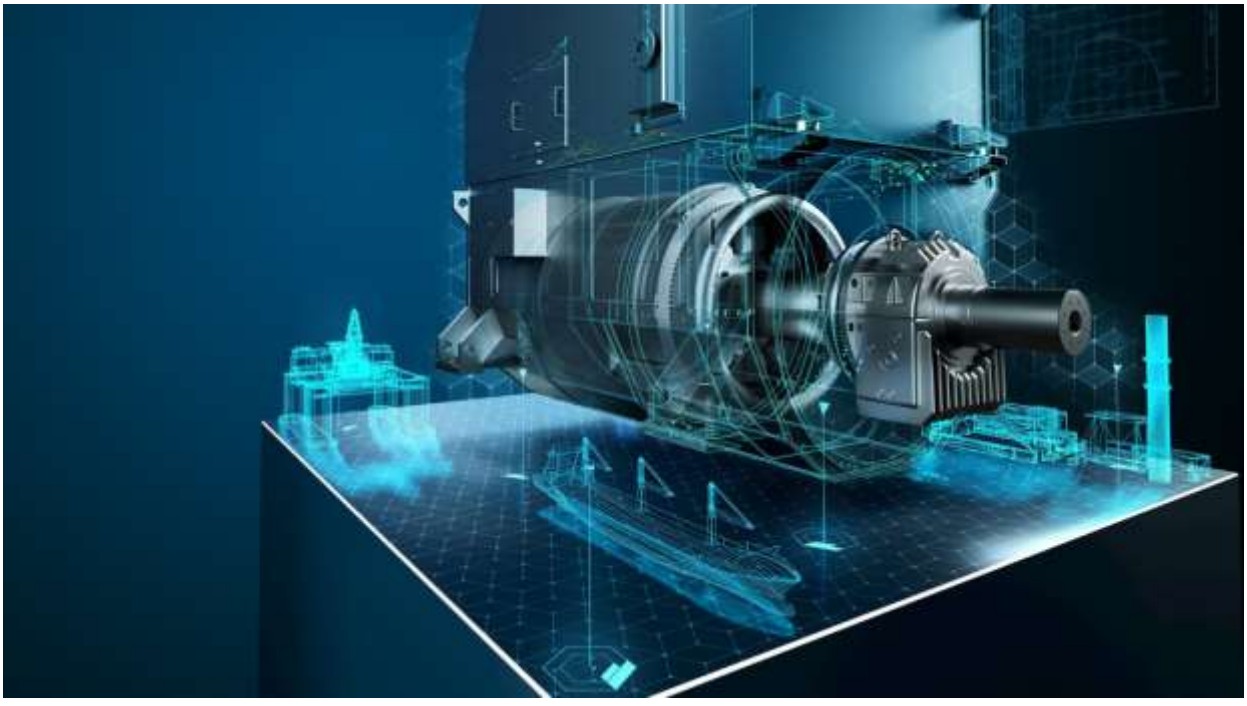
NRI-ER-827-PCPSPN02-9-00-L

تهیه دستورالعمل استاندارد طراحی، ساخت و تست
سیستم حفاظت ژنراتور و ترانس نیروگاهی



مجری دانشگاهی: دکتر بهنام محمدی ایواتلو

دانشگاه مجری: دانشگاه تبریز

DOI: 10.30503/nripress.2020.151


بسم الله الرحمن الرحيم

تهیه دستورالعمل استاندارد طراحی، ساخت و تست سیستم حفاظت ژنراتور و ترانس نیروگاهی

مجری دانشگاهی: بهنام محمدی ایواتلو

دانشگاه مجری: دانشگاه تبریز

همکاران پروژه:

علی احمدیان

نماینده مدیر طرح:

عباس یوسف‌پور

واحد مجری:

طرح ارتقا و استانداردسازی سیستم‌های پایش، حفاظت و کنترل نیروگاه‌ها

انتشارات پژوهشگاه نیرو

بهمن ۱۴۰۰

کد ثبت گزارش: NRI-ER-827-PCPSPN02-9-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. طرح ارتقا و استانداردسازی سیستم‌های پایش، حفاظت و کنترل نیروگاه‌ها

تهیه دستورالعمل استاندارد طراحی، ساخت و تست سیستم حفاظت ژنراتور و ترانس نیروگاهی/ نماینده مدیر طرح: عباس یوسف‌پور. ویراستار: نازنین محمدی‌نام. کارفرما: شرکت مادرتخصصی تولید نیروی برق حرارتی، ۱۴۰۰.

۲۸۵ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. احمدیان، علی، همکار پروژه. ۲. یوسف‌پور، عباس، نماینده مدیر طرح. ۳. طرح ارتقا و استانداردسازی سیستم‌های پایش، حفاظت و کنترل نیروگاه‌ها، واحد مجری. ۴. دانشگاه مجری: دانشگاه تبریز. ۵. محمدی ایواتلو، بهنام، مجری دانشگاهی. ۶. احمدیان، علی، همکار پروژه. ۷. عابدینی، معین، ناظر. ۸.. بخشی، علی مجری پژوهشگاه.

انتشارات پژوهشگاه نیرو

طرح ارتقا و استانداردسازی سیستم‌های پایش، حفاظت و کنترل نیروگاه‌ها

کلیه حقوق معنوی اثر متعلق به پدیدآورندگان، کلیه حقوق مادی متعلق به شرکت مادرتخصصی تولید نیروی برق حرارتی است و نشر مطالب در حدود متعارف، با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۹-۸۸۰۷۹۴۰۱

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: *www.nri.ac.ir*

پست الکترونیک انتشارات: *publications@nri.ac.ir*

بسمه تعالی

شماره:

تاریخ:

پیوست:

فرم تعهدنامه اصالت اثر

متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی همکارانی از دانشگاه تبریز به شرح زیر و موردتأیید اینجانب عباس یوسف‌پور، نماینده مدیر طرح در پروژه تهیه دستورالعمل استاندارد طراحی، ساخت و تست سیستم حفاظت ژنراتور و ترانس نیروگاهی است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است مطابق مقررات، موردارجاع قرار گرفته و در فهرست منابع ذکر شده است.

■ گزارش حاصل انجام همه مراحل پروژه است.

همکاران:

۱. بهنام محمدی ایواتلو

۲. علی احمدیان

۳. معین عابدینی (ناظر)

۴. علی بخشی

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

پیشگفتار

تأسیسات قدرت نیروگاهی مانند ژنراتورها و ترانسفورماتورها در اثر نقصان در سیستم خود و یا تضعیف استقامت مکانیکی آن در مقابل ولتاژهای ضربه‌ای پیش‌بینی نشده و همچنین در اثر افزایش حرارت، دچار خطاهایی می‌شوند. این خطاها ممکن است به شکل اتصال زمین، اتصال کوتاه، پارگی و قطع‌شدگی هادی‌ها و شکستن عایق‌ها و ... باشند. تأسیساتی که دچار خطا می‌شوند باید در کوتاه‌ترین زمان ممکن از شبکه جدا شوند تا از ازدیاد و گسترش خطا و از کار افتادن بقیه قسمت‌های سالم شبکه جلوگیری گردد. یکی از تجهیزات برای حفاظت و جداسازی سیستم رله‌های حفاظتی هستند که وظیفه دارند متوجه خطا شده و محل آن را مشخص کنند، شدت آن را بسنجند و اطلاعات را به مرکز مخابره نموده و یا در صورت لزوم خود مدار الکتریکی را قطع کنند. بهتر است که فقط همان قسمت خطادار از مدار جدا شده و قسمت‌های بدون عیب دیگر شبکه تا موقعی که دچار خطا نشده‌اند بدون قطع برق به‌کار خود ادامه دهند. به چنین حفاظتی، حفاظت سلکیتو یا انتخابی گفته می‌شود. لذا به‌دست آوردن دستورالعمل استاندارد جهت بررسی سیستم‌های حفاظت اجزای گران‌قیمت و با ارزشی همچون ژنراتور و ترانس از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

این گزارش مربوط به مراحل چهارگانه از پروژه تهیه دستورالعمل استاندارد طراحی، ساخت و تست سیستم حفاظت ژنراتور و ترانس نیروگاهی است که انجام آن، با مسئولیت طرح ارتقا و استانداردسازی سیستم‌های پایش، حفاظت و کنترل نیروگاه ها، به دانشگاه تبریز واگذار شده است و نظارت بر/داوری آن، بر عهده جناب آقای مهندس طورچی مقدم و دکتر عابدینی بوده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۱- مقدمه فصل دوم ۸۳
۲- تقسیم‌بندی نیروگاه‌های کشور ۸۳
۲-۱- حفاظت نیروگاه‌های بخاری ۸۳
۲-۱-۱- حفاظت بویلر ۸۴
۲-۱-۱-۱- پایین بودن سطح درام یا فقدان آب بویلر ۸۴
۲-۱-۱-۲- سرعت مخلوط بخار و آب ۸۴
۲-۱-۱-۳- کیفیت مخلوط بخار و آب ۸۵
۲-۱-۱-۵- پمپ‌های گردشی بویلر (سیگنال غیر شرطی) ۸۵
۲-۱-۲- حفاظت توربین ۸۵
۲-۱-۲-۱- از دست رفتن فشار روغن روانساز ۸۹
۲-۱-۲-۲- پایین بودن خلا کندانسور ۹۰
۲-۱-۲-۳- تریپ توربین بر اثر هدایت بالای چگالیده ۹۰
۲-۱-۲-۴- اهرم تریپ دستی ۹۰
۲-۱-۲-۵- تریپ اضافه سرعت ۹۰
۲-۱-۲-۶- از دست رفتن گاورنر الکتریکی ۹۰
۲-۱-۲-۷- پایین بودن دما و فشار بخار ورودی ۹۰
۲-۱-۳- بررسی توابع کنترلی سیستم تحریک و ارتباط آن با رله ۹۱
۲-۲- حفاظت نیروگاه گازی ۹۳
۲-۳- حفاظت نیروگاه سیکل ترکیبی ۹۳
۲-۴- حفاظت نیروگاه آبی (تلمبه ذخیره‌ای) ۹۳
۲-۴-۱- حفاظت اضافه جریان ترمز دینامیکی ۹۴
۳- بهینه‌سازی سیستم حفاظت الکتریکی نیروگاه قدیمی ۹۴
۳-۱- ارزیابی مهندسی سیستم حفاظت نیروگاه ۹۴
۳-۲- مطالعات بهینه‌سازی نیروگاه حرارتی بعثت ۹۶
۴- ژنراتور و ترانسفورماتورهای موجود در نیروگاه‌ها ۹۹
۵- چالش‌های بخش حفاظت نیروگاهی ۱۰۴
۵-۱- بررسی عملکرد رله قطع تحریک ژنراتور در نیروگاه گازی ری ۱۰۴
۵-۲- رله الکترومکانیکی برگشت توان نیروگاه ری ۱۰۶
۵-۵- الزامات هماهنگی رله‌های نیروگاهی و شبکه ۱۱۰

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۵-۶- تریپ رخ داده در نیروگاه شهید مدحج (زرگان) ۱۱۲
۶- جمع‌بندی فاز دوم ۱۱۴
مراجع فاز دوم ۱۱۴
۱- مقدمه فاز سوم ۱۱۶
۱-۱- شرح سخت‌افزار ۱۱۶
۱-۲- طراحی مکانیکی ۱۱۷
۱-۲-۱- نسخه‌های سخت‌افزاری ۱۱۷
۱-۲-۲- کیس (پوشش) و روش‌های نصب ۱۱۷
۱-۲-۳- نمای جلوی واحد حفاظت ۱۱۸
۱-۲-۴- اتصال PC ۱۱۸
۱-۳- واحد تغذیه کمکی ۱۱۸
۱-۴- واحد ترانسفورماتور ورودی ۱۱۸
۱-۶- واحد باینری I / O ۱۱۹
۱-۷- واحد اتصال داخلی ۱۱۹
۱-۸- واحد تغذیه ۱۱۹
۱-۹- بلوک ترانسفورماتور تزریق X011 ..... ۱۲۲
۱-۹-۱- X011 ..... ۱۲۳
۱-۹-۲- X11-1,-2 ..... ۱۲۳
۱-۱۰- آزمایش بدون ژنراتور ۱۳۲
۱-۱۰-۱- محافظت از خطای استاتور به زمین: ۱۳۳
۱- ویژگی‌ها ۱۳۳
۲- کاربرد ۱۳۳
۲- توابع حفاظتی ۱۳۴
۳- طراحی ۱۳۵
۴- سخت‌افزار ۱۳۶
۵- نرم‌افزار ۱۳۸
۶- ابزار مهندسی گرافیکی ۱۳۸
۷- توابع ۱۳۸
۷-۱- حفاظت اضافه جریان جهت‌دار ۱۳۸
۷-۲- تابع فرکانس ۱۳۸
۷-۳- نرخ تغییرات فرکانس ۱۳۸
۷-۴- اندازه‌گیری ۱۳۸
۷-۵- توابع کمکی ۱۳۹

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۶-۷- بررسی منطقی ۱۳۹
۷-۷- توالی ثبات رخدادها ۱۳۹
۸-۷- ثبات اغتشاش ۱۳۹
۹-۷- واسط ماشین و انسان (HMI) – CAP2/316 ..... ۱۳۹
۱۰-۷- ارتباطات راه دور ۱۴۰
۱۱-۷- خروجی‌ها و ورودی‌های راه دور (RIO580) ۱۴۰
۱۲-۷- تشخیص و نظارت خودکار ۱۴۰
۱۳-۷- نرم‌افزار پشتیبانی ۱۴۰
۱۴-۷- سخت‌افزار داده‌های فنی ۱۴۱
۱۵-۷- توابع حفاظتی کمکی (Ancillary functions ۱۶۷
۱۶-۷- دیاگرام وایرینگ برای یک رله‌ی نمونه ۱۶۹
۸- تست رله های دیجیتال ۱۷۰
۱-۸- مبانی استراتژی تست رله‌های دیجیتال ۱۷۱
۲-۸- معیارهای مؤثر در تنظیم فواصل تست‌های دوره‌ای ۱۷۱
۳-۸- معیارهای مؤثر در انجام تست‌ها ۱۷۲
۴-۸- فاصله بهینه تست‌های پیشگیرانه ۱۷۲
۵-۸- دستگاه میکروپروسسوری تست کننده رله های دیجیتال ۱۷۴
۶-۸- دستگاه تست OMICRON CMC256 plus ۱۷۵
۷-۸- لیست آزمایشات رله‌های حفاظتی ۱۷۶
۹- پروتکل‌های مخابراتی ۱۷۹
۱-۹- الزامات کانال مخابراتی برای حفاظت واحدهای نیروگاهی ۱۸۲
۱۰- سیستم پایش ۱۸۲
۱-۱۰- قابلیت MACHsense-R در ABB ۱۸۲
۱-۱-۱۰- قابلیت ABB در نظارت بر وضعیت موتورهای ولتاژ بالا ۱۸۴
۲-۱۰- خدمات طلایی GE ۱۸۶
۱-۲-۱۰- خدمات طلایی در عمل ۱۸۷
۲-۲-۱۰- پیشنهادات مرتبط ۱۸۸
۳-۱۰- سیستم کنترل و تشخیص GenAdviser ۱۸۸
شکل ۳-۲۰. شمای کلی سیستم کنترل و تشخیص GenAdviser ۱۸۹
مراجع فاز سوم ۱۹۱
۱-۱-مقدمه فاز چهارم (دستورالعمل) ۱۹۳
۲-۱- محدوده کاربرد ۱۹۳
۳-۱- مسئولیت اجرا ۱۹۳

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۴-۱- تعاریف و اختصارات ۱۹۳
۱-۴-۱- تعاریف ۱۹۳
۵-۱- نیازمندی‌های عمومی ۱۹۴
۱-۲- حفاظت ژنراتورهای نیروگاهی ۱۹۵
۱-۱-۲- حفاظت ژنراتور از طریق تشخیص جریان خطا ۱۹۶
۱-۱-۱-۲- حفاظت در برابر خطاهای داخلی ۱۹۶
۲-۱-۱-۲- حفاظت در برابر خطاهای خارجی ۱۹۷
۲-۱-۲- حفاظت لغزش قطب ژنراتور ۲۰۴
۳-۱-۲- حفاظت فرکانسی غیر نرمال ژنراتور ۲۰۵
۴-۱-۲- حفاظت تحریک اضافی ژنراتور ۲۰۷
۲-۲- حفاظت تراسفورماتورهای نیروگاهی ۲۰۹
۱-۲-۲- حفاظت از ترانسفورماتورهای قدرت از طریق تشخیص جریان خطا ۲۱۲
۲-۲-۲- حفاظت دیفرانسیل ۲۱۵
۳-۲-۲- حفاظت های مکانیکی ۲۱۷
۴-۲-۲- پایش و نگهداری روغن در حال بهره‌برداری ۲۱۸
۱-۴-۲-۲- آزمون‌های لازم برای تعیین وضعیت روغن ۲۱۸
۵-۲-۲- پایش وضعیت عایقی ۲۲۰
۱-۳- طراحی فیزیکی ۲۲۱
۲-۳- توابع حفاظتی و ویژگی سیگنال آن‌ها ۲۲۲
۳-۳- واحد تغذیه رله ۲۲۴
۴-۳- واحد ترانسفورماتور ورودی ۲۲۴
۵-۳- واحد پردازنده اصلی ۲۲۵
۶-۳-ویژگی‌های اپتوکوپلر ۲۲۵
۷-۳- مشخصات کنتاکت‌ها ۲۲۵
۸-۳-ارتباط از راه دور ۲۲۶
۹-۳- تشخیص و نظارت خودکار ۲۲۶
۱۰-۳- الزامات کانال مخابراتی برای حفاظت واحدهای نیروگاهی ۲۲۷
۱-۴- تست‌های اولیه ۲۲۸
۱-۱-۴-تست اندوکتانس سیم‌پیچ ۲۳۰
۲-۱-۴- تست امپدانس سیم‌پیچ و مصرف توان ۲۳۱
۳-۱-۴- تست ولتاژ ضربه ۲۳۱
۴-۱-۴- تست مقاومت در برابر عایق ۲۳۲
۶-۱-۴- تست مقاومت حرارتی سیم‌پیچ ۲۳۳

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۴-۱-۷- تست شوک ۲۳۴
۴-۱-۸- تست استقامت مکانیکی ۲۳۵
۴-۲- تست‌های پیشگیرانه و سالیانه ۲۳۵
۴-۲-۱- تست‌های اساسی رله های حفاظتی و کنترلی ۲۳۵
۴-۲-۲- تست زیر بار ON-LOAD TEST (سالیانه) ۲۳۶
۴-۳- فاصله بهینه تست‌های پیشگیرانه ۲۳۷
پیوست ۲۳۸
۵-۱- روش‌های حفاظت در مقابل لغزش قطب ۲۳۸
۵-۱-۱- انواع الگوهای حفاظت out of step ۲۳۹
۵-۲- حفاظت برگشت توان ژنراتور ۲۴۲
۵-۲-۱- اثر موتوری ۲۴۲
۵-۲-۲- تأثیر برگشت توان روی توربین بخار ۲۴۳
۵-۲-۳- تأثیر برگشت توان روی سایر محرک‌های اولیه ۲۴۳
۵-۲-۴- حفاظت حالت موتوری ۲۴۴
۵-۳- دلایل اضافه تحریک ۲۴۷
۵-۳-۱- آسیب اضافه تحریک ۲۴۸
۵-۳-۲- محدوده‌های V/Hz ۲۵۰
۵-۴- حفاظت قطع میدان ژنراتور ۲۵۰
۵-۴-۱- سایر فاکتورهای تأثیرگذار روی شدت قطع میدان ۲۵۱
۵-۴-۲- اثر سیستم ۲۵۲
۵-۴-۳- آسیب به ژنراتور ۲۵۳
۵-۵- حفاظت قطع میدان ۲۵۳
۵-۵-۱ الگوهای مبتنی بر رله دیستانس ۲۵۴
۵-۶- حفاظت یاتاقان ۲۵۴
۵-۶-۱- ولتاژهای شفت فرکانس پایین ۲۵۵
۵-۶-۲- ولتاژ شفت تحت عملکرد اینورتر ۲۵۷
۵-۶-۳- جلوگیری از خرابی‌های یاتاقان‌های ژنراتور با استفاده از AEGIS ۲۵۹
۵-۷- سیستم خنک‌کنندگی ژنراتور ۲۵۹
۵-۷-۱- خنک کردن به‌وسیله هوا ۲۶۰
۵-۷-۲- خنک کردن به‌وسیله هیدروژن و به‌طور غیر مستقیم ۲۶۰
۵-۷-۳- خنک کردن به روش مستقیم توسط هیدروژن ۲۶۱
۵-۷-۴- خنک کردن مستقیم ژنراتور توسط مایعات: ۲۶۲
۵-۸- پروتکلهای مخابراتی ۲۶۳

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (۱-۲): تجزیه و تحلیل عوامل ایجاد خطا در ترانسفورماتورهای ۱۱۰ تا ۱۴۹ کیلوولت..... ۷
جدول (۲-۲): تجزیه و تحلیل عوامل ایجاد خطا در ترانسفورماتورهای ۱۵۰ تا ۱۹۹ کیلوولت..... ۷
جدول (۳-۲): شماره و تعریف تجهیزات مورد استفاده..... ۸
جدول (۴-۲): محدودیت نتایج آزمون‌های روغن در حین بهره‌برداری مطابق با استاندارد IEC 60422..... ۲۸
جدول (۵-۲): تحلیل گازهای محلول در روغن طبق روش استاندارد IEC60599..... ۳۱
جدول (۱-۴): تعداد عمل کننده‌ها در مدار منطقی کنترل برنامه‌ریزی شده PLC..... ۷۸
جدول (۲-۴): بررسی عوامل تصحیح کننده طرح حفاظتی..... ۷۸

جدول ۱: ویژگی‌های هر یک از سیستم‌های تحریک..... ۹۱
جدول ۲ پیشنهاد بهبود و توسعه حفاظت ژنراتور [۱و۲]..... ۹۸
جدول ۳: پیشنهادهای بهبود و توسعه حفاظت ترانسفورماتورها [۱و۲]..... ۹۹
جدول ۴: عملکرد رله قطع تحریک نیروگاه گازی ری [۱و ۳]..... ۱۰۵
جدول ۵ تعداد تریپ‌های اشتباه رله‌های نصب شده در نیروگاه‌های آمریکای شمالی [۴]..... ۱۰۹
جدول ۶: ملاحظات هماهنگی حفاظت شبکه نیروگاهی و انتقال [۴]..... ۱۱۰
جدول ۳-۱ ورودی‌های متغیر آنالوگ..... ۱۴۱
جدول ۳-۲ داده‌های کنتاکت..... ۱۴۱
جدول ۳-۳ ورودی‌های اپتوکوپلر..... ۱۴۲
جدول ۳-۴ دیودهای نوری..... ۱۴۳
جدول ۳-۵ پیکربندی و تنظیمات..... ۱۴۳
جدول ۳-۶ ارتباطات راه دور..... ۱۴۳
جدول ۳-۷ تغذیه کمکی..... ۱۴۴
جدول ۳-۸ داده‌های عمومی..... ۱۴۵
جدول ۳-۹ طراحی مکانیکی..... ۱۴۶
جدول ۳-۱۰ تابع اضافه‌بار حرارتی..... ۱۴۶
جدول ۳-۱۱ تابع جریان با زمان متناهی (51DT)..... ۱۴۶
جدول ۳-۱۲ تابع ولتاژ زمان متناهی (۵۹/۲۷)..... ۱۴۷
جدول ۳-۱۳ حفاظت اضافه جریان زمان متناهی جهت‌دار..... ۱۴۷
جدول ۳-۱۴ تابع اضافه جریان زمان معکوس جهت‌دار..... ۱۴۸
جدول ۳-۱۵ تابع اندازه‌گیری UIFPQ..... ۱۴۹

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

جدول ۳-۱۶ ماژول اندازه‌گیری سه‌فاز ۱۵۰
جدول ۳-۱۷ دیفرانسیل ژنراتور (87G) ۱۵۰
جدول ۳-۱۸ دیفرانسیل ترانسفورماتور (87T) ۱۵۰
جدول ۳-۱۹ اضافه جریان لحظه‌ای (۵۰) ۱۵۱
جدول ۳-۲۰ اضافه جریان کنترل شده با ولتاژ (۵۱-۲۷) ۱۵۲
جدول ۳-۲۱ تابع اضافه جریان زمان معکوس ۱۵۲
جدول ۳-۲۲ تابع اضافه جریان خطای زمین زمان معکوس ۱۵۳
جدول ۳-۲۳ جریان توالی فاز منفی ۱۵۴
جدول ۳-۲۴ تابع حفاظت اضافه ولتاژ لحظه‌ای (۵۹و۲۷) با ارزیابی مقدار پیک ۱۵۴
جدول ۳-۲۵ زیر امپدانس(underimpedance) ۱۵۵
جدول ۳-۲۶ حداقل راکتانس ۱۵۵
جدول ۳-۲۷ اضافه بار استاتور ۱۵۶
جدول ۳-۲۸ اضافه بار روتور ۱۵۷
جدول ۳-۲۹ جریان فاز توالی منفی ۱۵۸
جدول ۳-۳۰ فرکانس ۱۵۹
جدول ۳-۳۱ نرخ تغییرات فرکانس ($\frac{df}{dt}$) ۱۶۰
جدول ۳-۳۲ تحریک بیشتر از حد نرمال (Over-excitation) ۱۶۰
جدول ۳-۳۳ تحریک بیشتر از حد نرمال (Over-excitation) به همراه تابع تأخیر زمانی معکوس ۱۶۱
جدول ۳-۳۴ تابع تعادل ولتاژ (Voltage balance function) ۱۶۱
جدول ۳-۳۵ ایزوله سازی ژنراتورهای معیوب (Dead machine protection) ۱۶۲
جدول۳-۳۶ حفاظت از استاتور در برابر خطای زمین ۱۶۳
جدول۳-۳۷ حفاظت از روتور در برابر خطای زمین ۱۶۴
جدول ۳-۳۸ حفاظت لغزش قطب ۱۶۴
جدول ۳-۳۹ تابع توان (Power function) ۱۶۵
جدول ۳-۴۰ حفاظت خرابی بریکر (Breaker failure protection) ۱۶۶
جدول ۳-۴۱ ثبت اغتشاشات رخ داده ۱۶۶
جدول ۳-۴۲ توابع منطقی ۱۶۷
جدول ۳-۴۳ تابع تأخیر با استفاده از گیت منطقی Integrator ۱۶۷
جدول ۳-۴۴ بررسی منطقی سیگنال‌های ورودی (Plausibility check) ۱۶۷
جدول ۳-۴۵ تابع نظارت بر زمان عملکرد کلیدها (Runtime supervision) ۱۶۸
جدول ۳-۴۶ مقادیر قابل قبول برای اعمال به ورودی توابع حفاظتی توسط دستگاه سنجش UIfPQ ۱۶۸
جدول ۴۷: برنامه نمونه برای تست یک رله دیجیتال ۱۷۲

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

جدول ۳-۴۸ برگ آزمایش رله دیفرانسیل تراسفورماتور ۱۷۳
جدول ۳-۵۰ برگ آزمایش رله اضافه جریان با زمان معکوس ۱۷۷
جدول ۳-۶۱ مشخصات سیستم پایش ABB ۱۸۳
جدول ۲-۱ حفاظت اضافه جریان زمان محدود شده جهت‌دار ۱۹۸
جدول ۲-۲ تابع اضافه جریان زمان معکوس جهت‌دار ۱۹۹
جدول ۲-۳ اضافه جریان لحظه‌ای ۲۰۰
جدول ۲-۴ اضافه جریان کنترل شده با ولتاژ ۲۰۰
جدول ۲-۵ تابع اضافه جریان زمان معکوس ۲۰۱
جدول ۲-۶ تابع اضافه جریان خطای زمین زمان معکوس ۲۰۱
جدول ۲-۷ جریان توالی فاز منفی ۲۰۲
جدول۲-۸ حفاظت از روتور در برابر خطای زمین ۲۰۳
جدول۲-۹ حفاظت از استاتور در برابر خطای زمین ۲۰۳
جدول ۲-۱۰ حفاظت لغزش قطب ۲۰۴
جدول ۲-۱۱ فرکانس ۲۰۶
جدول ۲-۱۲ نرخ تغییرات فرکانس ($\frac{df}{dt}$) ۲۰۶
جدول ۲-۱۳ تحریک بیشتر از حد نرمال (Over-excitation) ۲۰۷
جدول ۲-۱۴ تحریک بیشتر از حد نرمال (Over-excitation) به همراه تابع تأخیر زمانی معکوس ۲۰۷
جدول ۲-۱۵ تابع تعادل ولتاژ (Voltage balance function) ۲۰۸
جدول ۲-۱۶ شماره و تعریف تجهیزات مورد استفاده ۲۱۰
جدول ۲-۱۷ دیفرانسیل ترانسفورماتور (87T) ۲۱۶
جدول ۲-۱۸ محدودیت نتایج آزمون‌های روغن در حین بهره‌برداری مطابق با استاندارد IEC 60422 ..... ۲۲۰
جدول ۲-۱۹ شناسایی خطا با استفاده ار روش گازهای کلیدی ۲۲۰
جدول ۳-۱ داده‌های عمومی ۲۲۲
جدول ۳-۲ توابع حفاظتی ضروری برای سیستم حفاظتی ۲۲۳
جدول ۳-۳ مشخصات ولتاژ رله ۲۲۴
جدول۳-۵ ویژگی کنتاکت‌ها ۲۲۵
جدول ۴-۱ برگه‌ی تست و آزمایش ۲۲۸
جدول۴-۲ میزان خطای قابل قبول در تست رله ۲۳۶
جدول ۴-۳ برگ آزمایش رله دیفرانسیل تراسفورماتور ۲۳۷

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل (۲–۱): شماتیک حفاظت یک ترانس ستاره/مثلث ۱۱
شکل (۲–۲): منحنی جریان بر حسب زمان ۱۲
شکل (۲–۳): حفاظت ترانسفورماتور در سمت ثانویه برای مقابله با یک خطای سه‌فاز ۱۳
شکل (۲–۴): حفاظت ترانسفورماتور در سمت ثانویه برای مقابله با یک خطای تک‌فاز به زمین ۱۳
شکل (۲–۵): حفاظت ترانسفورماتور در سمت ثانویه برای مقابله با یک خطای دو فاز به هم ۱۴
شکل (۲–۶): دیاگرام اتصال رله دیفرانسیل ۱۵
شکل (۲–۷): شماتیک اتصال رله دیفرانسیل به ترانسفورماتور ستاره/مثلث ۱۶
شکل (۳–۱): پیکربندی واحد ژنراتور و ترانسفورماتور ۲۷
شکل (۳–۲): پیکربندی مجزا برای ژنراتور و ترانسفورماتور ۲۸
شکل (۳-۳): نحوه اتصال رله دیفرانسیل برای تشخیص خطای دو فاز ۲۹
شکل (۳–۴): روش دایره‌های هم‌مرکز برای تشخیص OS ۳۵
شکل (۵-۳): روش تک Blinder برای تشخیص OS ۳۷
شکل (۳–۶): روش دوبل Blinder برای تشخیص OS ۳۸
شکل (۳–۷): اندازه‌گیری توان ۴۴
شکل (۳–۸): خطای زاویه‌ی توان ۴۵
شکل (۴–۱): مراحل تهیه سیگنال الکتریکی به‌منظور تغذیه رله اضافه جریان ۷۳

شکل ۱ : اندازه‌گیری توان ۸۸
شکل ۲: خطای زاویه‌ی توان ۸۹
شکل ۳-۱ نمای جلوی منبع تغذیه ۱۲۱
شکل ۳-۲ PCB داخلی منبع تغذیه ۱۲۲
شکل ۳-۳ سیگنال تغذیه ۱۲۷
شکل ۳-۴ شماتیک وایرینگ مربوط به تغذیه‌ی اولیه‌ی استاتور ۱۲۸
شکل ۳-۵ شماتیک وایرینگ مربوط به تغذیه‌ی ثانویه‌ی استاتور در نقطه‌ی ستاره ۱۲۹
شکل ۳-۶ شماتیک وایرینگ مربوط به تغذیه‌ی ثانویه‌ی استاتور در نقطه‌ی ترمینال ۱۳۰
شکل ۳-۷ شماتیک وایرینگ مربوط به خطای اتصال روتور به زمین ۱۳۱
شکل ۳-۸ شماتیک وایرینگ مربوط به تست بدون حضور ژنراتور ۱۳۲
شکل ۳-۹ نمای کلی سخت‌افزار ۱۳۶
شکل۳-۱۰ مسیر انتقال اطلاعات ۱۳۷
شکل ۳-۱۱ دیاگرام وایرینگ رله به همراه دو ورودی خروجی ۱۷۰

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

شکل ۳-۱۲ ساختار دستگاه میکروپروسسوری تست کننده رله های دیجیتال ۱۷۴
شکل ۳-۱۳ دستگاه تست Omicron CMC 256 plus ۱۷۵
شکل ۳-۱۴ مدل OSI ۱۸۰
شکل ۳-۱۹ شمای کلی قابلیت MACHsense-R در ABB ۱۸۶
شکل (۱-۲) نحوه اتصال رله دیفرانسیل امپدانس بالا برای تشخیص خطای دو فاز ۱۹۷
شکل (۲-۲) شماتیک حفاظت یک ترانسفورماتور ستاره/مثلث ۲۱۲
شکل (۲–۳) منحنی جریان بر حسب زمان ۲۱۳
شکل (۲–۴) حفاظت ترانسفورماتور در سمت ثانویه برای مقابله با یک خطای سه‌فاز ۲۱۴
شکل (۲–۵) حفاظت ترانسفورماتور در سمت ثانویه برای مقابله با یک خطای تک‌فاز به زمین ۲۱۴
شکل (۲–۶) حفاظت ترانسفورماتور در سمت ثانویه برای مقابله با یک خطای دو فاز به هم ۲۱۵
شکل (۲–۷) شماتیک اتصال رله دیفرانسیل به ترانسفورماتور ستاره/مثلث ۲۱۶
شکل (۱) روش دایره‌های هم‌مرکز برای تشخیص OS ۲۴۰
شکل (۲) روش تک Blinder برای تشخیص OS ۲۴۱
شکل (۳) روش دوبل Blinder برای تشخیص OS ۲۴۱
شکل (۴) اندازه‌گیری توان ۲۴۶
شکل (۵) خطای زاویه‌ی توان ۲۴۷
شکل (۷) مدل OSI ۲۶۳

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

فصل اول

مقدمه

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

تأسیسات قدرت نیروگاهی مانند ژنراتورها و ترانسفورماتورها در اثر نقصان در سیستم خود و یا تضعیف استقامت مکانیکی آن در مقابل ولتاژهای ضربه‌ای پیش‌بینی نشده و همچنین در اثر افزایش حرارت، دچار خطاهایی می‌شوند. این خطاها ممکن است به شکل اتصال زمین، اتصال کوتاه، پارگی و قطع‌شدگی هادی‌ها و شکستن عایق‌ها و ... باشند. تأسیساتی که دچار خطا می‌شوند باید در کوتاه‌ترین زمان ممکن از شبکه جدا شوند تا از ازدیاد و گسترش خطا و از کار افتادن باقی قسمت‌های سالم شبکه جلوگیری شود. یکی از تجهیزات برای حفاظت و جداسازی سیستم رله‌های حفاظتی هستند که وظیفه دارند متوجه خطا شده و محل آن را مشخص کنند، شدت آن را بسنجند و اطلاعات را به مرکز مخابره نموده و یا در صورت لزوم خود مدار الکتریکی را قطع کنند. بهتر است که فقط همان قسمت خطادار از مدار جدا شود و قسمت‌های بدون عیب دیگر شبکه تا موقعی که دچار خطا نشده‌اند بدون قطع برق به‌کار خود ادامه دهند. به چنین حفاظتی، حفاظت سلکتیو یا انتخابی گفته می‌شود.

ژنراتورها گران‌قیمت‌ترین و مهم‌ترین قسمت یک نیروگاه برق هستند. خطاهای ژنراتور باعث آسیب رسیدن به ژنراتور می‌شوند و در صورت عدم عملکرد به موقع سیستم حفاظتی زیان‌های وارد شده به ژنراتور بسیار زیاد می‌شود که تعمیر و یا جایگزینی ژنراتور ممکن است مدت‌زمان بسیار زیادی طول بکشد و هزینه‌های بسیار زیادی را به سیستم تحمیل کند. از دست رفتن ژنراتور برای مدت‌زمان طولانی، تأمین بار را بر دوش سایر ژنراتورهای همان نیروگاه و یا نیروگاه‌های دیگر می‌گذارد. اضافه بار در ژنراتورها هم می‌تواند عمر مفید آن‌ها را کاهش داده و هم باعث آسیب رساندن به آن‌ها شود. همه این مسائل اهمیت وجود یک سیستم حفاظتی خوب را دو چندان نمایان می‌کند.

تجهیزات حفاظتی ژنراتورهای با دور کم مانند ژنراتورهای نیروگاه‌های حرارتی و توربین آبی و ژنراتورهای با دور زیاد مانند توربوژنراتورها تفاوتی ندارند و تنها در نوع اتصال ژنراتورها به شبکه متفاوت‌اند که این اتصالات به دو دسته اتصال واحد و اتصال به شین هستند.

در سیستم اتصال واحد، هر کدام از ژنراتورها دارای ترانسفورمر مخصوص به خود هستند و ترانسفورمر و ژنراتور تشکیل یک واحد می‌دهند که به همین علت به سیستم اتصال واحد معروف است. اتصال واحد در مواردی که توان ژنراتور زیاد است، استفاده می‌شود. در اتصال شین، ژنراتورها مستقیماً به شین وصل هستند و دارای تراسفورمر مخصوص نیستند. ژنراتورها توان خود را به شین منتقل می‌کنند و ترانسفورمرها با اتصال به شینه توان موردنیاز را می‌کشند.

به‌صورت کلی حفاظت سیستم ژنراتور به دو دسته کلی حفاظت در مقابل خطاهای داخلی و خطاهای خارجی تقسیم‌بندی می‌شود. خطاهای داخلی بر اثر خطای سیم‌پیچی استاتور یا روتور می‌تواند اتفاق بیافتد. خطاهای سیم‌پیچی استاتور شامل اتصال دو فاز، اتصال زمین، اتصال زمین دوبل و اتصال حلقه است. همچنین خطاهای سیم‌پیچی روتور نیز شامل اتصال به زمین، اتصال حلقه، اتصال زمین دوبل و قطع تحریک می‌شود. خطاهای خارجی نیز شامل عواملی هستند که در شبکه قدرت رخ می‌دهند و همچنین عواملی که منجر به اختلال در عملکرد قسمت گرداننده روتور می شوند. از جمله خطاهای شبکه قدرت می‌توان اتصال کوتاه در شبکه به ویژه در سیستم اتصال شین، بار نامتعادل و مشکلات ازدیاد ولتاژ در اثر قطع بار نام برد. به علاوه عوامل اختلال در عملکرد روتور نیز شامل خراب شدن توربین و قطع سیستم بخار است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

لازم به ذکر است که، تنها قطع ژنراتور از شبکه برق کافی نیست و تجهیزات دیگری نیز موردنیاز است تا از آسیب‌های احتمالی جلوگیری شود. از جمله این دستگاه‌ها می‌توان دستگاه برداشت تحریک و دستگاه خاموش‌کننده جرقه را نام برد.

تجهیزات حفاظتی به‌کاررفته برای حفاظت ژنراتورها در برابر خطاهای داخلی شامل دو نوع حفاظت جریانی و حفاظت غیر جریانی می‌گردد. که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ رله دیفرانسیل برای تشخیص اتصال دو فاز مختلف در ژنراتور
- ✓ رله اتصال حلقه برای تشخیص اتصال حلقه در یک فاز ژنراتور
- ✓ رله اتصال زمین برای حفاظت ژنراتور در مقابل اتصال زمین سیم‌پیچی استاتور
- ✓ رله توان متقابل برای حفاظت کلی ژنراتورهای کوچک

همچنین تجهیزات حفاظتی به‌کاررفته برای حفاظت ژنراتورها در برابر خطاهای خارجی نیز شامل موارد زیر است :

- ✓ رله حرارتی برای حفاظت در مقابل بار زیاد
- ✓ رله اضافه جریان برای حفاظت در مقابل اتصال کوتاه
- ✓ رله ولتاژ زیاد برای حفاظت در مقابل ولتاژ زیاد غیر مجاز
- ✓ رله بار نامتعادل برای حفاظت در مقابل بار نامتعادل غیر مجاز
- ✓ رله برگشت توان برای جلوگیری از حالت موتوری شدن ژنراتور

خطای اتصال دو فاز در استاتور بین دو فازی که در یک شیار واقع شده‌اند و یا سر سیم آنها کنار هم قرار دارند، و یا در اثر اتصالی به بدنه دو فاز که کنار هم قرار ندارند، می‌تواند اتفاق بیافتد. در شرایط عملکرد عادی، جریان‌ها در دو طرف ژنراتور از لحاظ فاز و دامنه با هم برابر هستند. اما هنگام بروز خطای دو فاز، این تساوی از بین می‌رود. به علاوه، در اثر خطا، ولتاژ نیز کم می‌شود. از رله اضافه جریان و همچنین رله دیفرانسیل برای تشخیص این نوع خطا استفاده می‌شود.

خطای اتصال سیم‌پیچی‌های استاتور ژنراتورها با بدنه فلزی ژنراتور در اثر خرابی عایق سیم‌پیچی‌ها ایجاد می‌شود. در اثر این اتصالی اگر نقطهٔ صفر شبکه نسبت به زمین عایق باشد، جریان کم در حد چندین آمپر از زمین عبور می‌کند، که اثرات چندان زیادی بر سیستم نخواهد داشت. در جریان‌های بیش از ۲۰ آمپر حتی درصورتی‌که مدت‌زمان آن کم هم باشد، اثرات جبران‌ناپذیری می‌تواند بر سیستم داشته باشد. جریان‌های کم، می‌تواند عایق سیم در محل اتصالی را از بین برده و منجر به اتصال حلقه و یا خطای اتصالی دو فاز گردد. بنابراین، در صورت اتفاق افتادن چنین خطایی، باید ژنراتور سریعاً از مدار خارج شده و جریان تحریک نیز قطع شود. درصورتی‌که ژنراتور و ترانسفورماتور با هم تشکیل یک واحد الکتریکی را بدهد، چون سیم‌پیچی به لحاظ الکتریکی از شبکه برق ایزوله است، اگر خطا در طرف فشار ضعیف ترانسفورمر و در خود ژنراتور اتفاق بیافتد، جریان خطا بسیار بیشتر از حالتی است که خطا در شبکه و سمت فشار قوی ترانسفورمر اتفاق بیافتد. حفاظت ژنراتور در مقابل اتصال زمین شامل استفاده از رله ولت‌متری، رله جریانی و رله اتصال زمین است. در حالت اتصال مستقیم به شبکه، به دلیل آنکه ولتاژ صفر در وضعیت وقوع خطا در شبکه و شین‌های ژنراتور تقریبا یکسان است، سنجش ولتاژ جابه‌جایی نقطه صفر برای تشخیص اتصال بدنه ژنراتور کافی نیست. در این وضعیت به‌منظور

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

حفاظت ژنراتور رله ولت‌متری به‌عنوان رله قطع کننده و رله وات‌متری به‌عنوان رله سدکننده، در صورت امکان زمین کردن نقطه صفر ستاره، استفاده می‌شود و درصورتی‌که این امکان وجود نداشته باشد، از روش‌های سنجش منتجه جریان‌ها و استفاده از رله دیفرانسیل بهره گرفته می‌شود.

در این گزارش نخست با بررسی استانداردها و مراجع مختلف شرحی از روش‌های حفاظت نیروگاهی جمع‌آوری می‌گردد. به‌منظور مروری بر کارهای صورت‌گرفته در تدوین دستورالعمل‌های حفاظتی خاص تجربه دو کشور کانادا و برزیل، در تدوین دستورالعمل حفاظتی مخصوص خود بررسی شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

فصل دوم

روش‌های متداول جهت حفاظت

ترانسفورماتورهای نیروگاهی

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۱-۲- مقدمه

در بخش حفاظت رله‌های مرسوم و متداول جهت اهداف مختلفی برای انواع مختلف تجهیزات الکتریکی استفاده می‌شوند. دلایل اصلی استفاده از رله در تجهیزات مختلف عبارت‌اند از:

- جداسازی بخش معیوب (محل خطا) از سایر قسمت‌های سیستم جهت حفظ عملکرد سایر قسمت‌های سیستم.
- کاهش آسیب واردشده به تجهیزات معیوب.
- کاهش احتمال آتش‌سوزی در تجهیزات الکتریکی اساسی.
- کاهش احتمال به خطر افتادن اپراتورها و کارکنان.
- کاهش احتمال ایجاد مشکل برای تجهیزات مجاور محل خطا در سطح ولتاژهای بالا.

در بحث حفاظت عناصر سیستم‌های قدرت، به ویژه در سطوح ولتاژ بالا، سرعت بالای عناصر حفاظتی برای حفظ یکپارچگی سیستم بسیار مهم است. در برخی مواقع علاوه بر حفظ پایداری سیستم، کاهش صدمات واردشده به تجهیزاتی که دچار مشکل شده‌اند نیز برای بهره‌برداران شبکه حائز اهمیت است. در رابطه با ترانسفورماتورهای قدرت، به دلیل هزینه‌های بسیار بالای تعمیرات، جایگزینی تجهیزات معیوب و حتی کاهش خطرات ناشی از وقوع آتش‌سوزی احتمالی و صدمه رساندن به تجهیزات مجاور، محدودسازی خطاهای احتمالی بسیار ضروری است. به دلیل ساختار داخلی ترانسفورماتورها جهت انتقال جریان، استفاده از رله‌های حساس و دارای سرعت بسیار بالا برای صدور هشدارهای موردنیاز، در مسیر ترانسفورماتورها ضروری هستند. جهت حفاظت ترانسفورماتورهای مشابه که برای کارهای مختلفی استفاده می‌شوند، هیچ استاندارد مشابهی وجود ندارد. بعضاً چندین راه حل فنی مختلف برای حفاظت وجود دارد که با توجه به آیتم‌های موردنیاز بهره‌بردار سیستم از جمله حساسیت بالا، سرعت بالای واکنش، هزینه‌های موردنیاز برای حفاظت و.... بهترین راهکار انتخاب می‌شود. اما طرح انتخاب‌شده باید بهترین راه حل برای **به حداقل رساندن** موارد زیر باشد:

- هزینه تعمیرات موردنیاز بعد از خطا
- اثرات نامطلوب بر روی عملکرد سیستم
- گسترش آسیب به تجهیزات مجاور
- مدت‌زمان عدم دسترسی به تجهیزات آسیب‌دیده

برای ترانسفورماتورهای مختلف تحت شرایط متفاوت، خرابی‌های مختلفی می‌تواند رخ بدهد. سیم‌پیچ‌های الکتریکی و هسته مغناطیسی یک ترانسفورماتور در طول سیکل کاری خود تحت عوامل خارجی متفاوتی قرار می‌گیرد، که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از:

- انبساط و انقباض به دلیل سیکل‌های حرارتی بیش از حد اعمال‌شده به‌دستگاه.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- لرزش‌های ناشی از استفاده نادرست.
- ایجاد حرارت بسیار زیاد در محل بهره‌برداری به دلیل هسته مغناطیسی بزرگ.
- تحمیل گرمای بیش از حد به ترانسفورماتور به دلیل اضافه بار و یا مناسب نبودن تجهیزات خنک‌کننده.
- تریپ‌های ناشی از جریان‌های خطای ایجادشده.

این عوامل هر کدام به تنهایی می‌توانند سبب آسیب‌های جبران ناپذیر به ترانسفورماتور شوند. در این راستا طبق آمار منتشرشده برای کشور کانادا از ۱ ژانویه ۱۹۸۸ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۰۲، تعداد دفعاتی که ترانسفورماتورهای موجود در رنج کاری ۱۱۰ تا ۱۴۹ و ۱۵۰ تا ۱۹۹ کیلوولت به دلایل مختلف به‌وسیله‌ی تجهیزات حفاظتی از مدار خارج شده‌اند، طبق جدول‌های ۲-۱ و ۲-۲ هستند [۱].

جدول (۱-۲): تجزیه و تحلیل عوامل ایجاد خطا در ترانسفورماتورهای ۱۱۰ تا ۱۴۹ کیلوولت.

کل زمان خارج از مدار بودن ترانس	تعداد خروج از مدار	قسمت آسیب‌دیده	کل زمان خارج از مدار بودن ترانس (ساعت)	تعداد خروج از مدار	قسمت آسیب‌دیده
۳۱۰۴	۳۱	برق گیر	۲۲۱۴۴	۹۳	بوشینگ
۱۵۸۵	۱۱	*CT*	۲۴۸۷۶	۳۱	سیم‌پیچ
۶۱۶۶	۲۴	تجهیزات جانبی	۵۱۸۰۶	۱۸۷	تپ‌چنجر تحت بار
۲۳۴۰۷	۳۲۳	تجهیزات کنترلی و حفاظتی	۴۹۳	۱۵	هسته
۳۴۳۴۱	۲۲۰	عوامل ناشناخته	۱۵۹۰	۲۸	سیستم سرمایشی

جدول (۲-۲): تجزیه و تحلیل عوامل ایجاد خطا در ترانسفورماتورهای ۱۵۰ تا ۱۹۹ کیلوولت.

کل زمان خارج از مدار بودن ترانس	تعداد خروج از مدار	قسمت آسیب‌دیده	کل زمان خارج از مدار بودن ترانس (ساعت)	تعداد خروج از مدار	قسمت آسیب‌دیده
۹۷۳	۷	برق گیر	۱۱۱۴۳	۱۸	بوشینگ
۴۶۲۶	۱	*CT*	۶۶۷۳	۲	سیم‌پیچ
۹۵۵	۱۸	تجهیزات جانبی	۱۶۱۰۹	۲۸	تپ‌چنجر تحت بار
۶۴۳۹	۱۹	تجهیزات کنترلی و	-	۰	هسته

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

			حفاظتی		
سیستم سرمایشی	۶	۲۱۵۱	عوامل ناشناخته	۹	۶۲۸

برای حفاظت ترانسفورماتورهای نیروگاهی استانداردهای مختلفی ارائه شده است که متداول‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها استاندارد IEEE C37.91-v2008 است [۲]. که در ادامه به بررسی روش‌های معرفی‌شده در این استاندارد می‌پردازیم. روش‌ها و برنامه‌های حفاظتی مطرح‌شده در این استاندارد برای ترانسفورماتورهایی با ظرفیت نامی بیش از ۵ مگاولت آمپر و ولتاژ کاری بیش از ۱۰ کیلوولت ارائه شده‌اند. اما می‌توان این روش‌ها را برای حفاظت ترانسفورماتورهای با رنج کاری پایین‌تر از موارد اشاره‌شده به‌کار برد. هدف کلی این گزارش، ارائه‌ی اطلاعات موردنیاز برای بهره‌برداران سیستم‌های انتقال و فوق توزیع جهت استفاده‌ی مناسب از رله‌های مختلف و سایر تجهیزات حفاظتی است. شماره و نشانگر تجهیزات الکتریکی به‌کاررفته در این استاندارد در جدول ۲-۳ ارائه شده‌اند.

جدول (۳-۲): شماره و تعریف تجهیزات مورداستفاده

نوع تجهیزات	شماره تجهیزات
رله *V/HZ*[۱]	۲۴
تجهیزات حرارتی[۲]	۲۶
رله جریان معکوس[۳]	۴۶
رله حرارتی ترانس[۴]	۴۹
رله اضافه جریان لحظه‌ای[۵]	۵۰
رله اضافه جریان لحظه‌ای برای نقطه نول[۶]	۵۰*N*
رله اضافه جریان مدت دار[۷]	۵۱
رله اضافه جریان مدت دار عبوری از زمین[۸]	۵۱*G*

۱ *Volts-per-hertz (V/Hz) relay*

۲ *Apparatus thermal device*

۳ *Reverse-phase or phase-balance current relay*

۴ *Transformer thermal relay*

۵ *Instantaneous overcurrent relay*

۶ *Instantaneous neutral overcurrent relay*

۷ *AC time overcurrent relay*

۸ *AC time ground overcurrent relay*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

رله اضافه جریان مدت دار عبوری از نقطه نول[۱]	۵۱*N*
رله پشتیبان اضافه جریان عبوری از نقطه نول[۲]	۵۱*NB*
رله کنترل گشتاور[۳]	۵۱*NT*
کلید قطع جریان متناوب[۴]	۵۲
رله اضافه ولتاژ[۵]	۵۹
رله حفظ تعادل جریان یا ولتاژ[۶]	۶۰
کلید فشار[۷]	۶۳
رله آشکارساز نقطه خنثی[۸]	۶۴
رله اضافه جریان عبوری مستقیم[۹]	۶۷
رله اضافه جریان عبوری مستقیم از نقطه خنثی[۱۰]	۶۷*G*
رله قطع ارتباط خروجی[۱۱](تنظیمات قفل‌شده)	۸۶
رله دیفرانسیل[۱۲]	۸۷
رله دیفرانسیل زمین[۱۳]	۸۷*G*

۱ *AC time neutral overcurrent relay*

۲ *AC time neutral overcurrent backup relay*

۳ *AC time neutral overcurrent torque-controlled relay*

۴ *AC circuit breaker*

۵ *Overvoltage relay*

۶ *Voltage or current balance relay*

۷ *Pressure switch*

۸ *Ground detector relay*

۹ *AC directional overcurrent relay*

۱۰ *AC directional ground overcurrent relay*

۱۱ *Lockout relay*

۱۲ *Differential protective relay*

۱۳ *Ground differential protective relay*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

روش‌های مختلفی برای تشخیص خطاهای مختلف در ترانسفورماتورها وجود دارد، که در ادامه به موارد اشاره‌شده در این استاندارد می‌پردازیم.

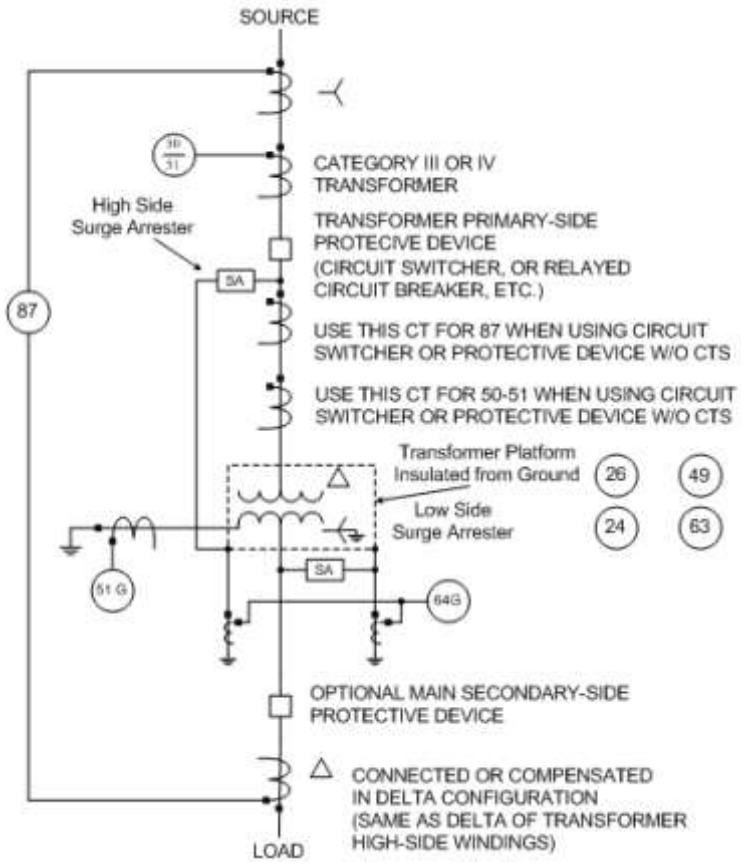
۲-۲- نحوه حفاظت از ترانسفورماتورهای قدرت از طریق تشخیص جریان خطا

۱-۲-۲-رله و فیوز

روش متداول برای حفاظت الکتریکی ترانسفورماتورهای سه‌فاز تا رنج ۵ مگاولت آمپر در مقابل جریان‌های خطا استفاده از فیوزهای متناسب با هر ترانس است. اما برای ترانسفورماتورهای بالاتر از رنج کاری ۱۰ مگاولت آمپر نیاز به سیستم‌های حفاظتی ترکیبی است، که نمونه‌ای از این حفاظت‌ها در شکل ۲-۱ مشاهده می‌شود. ترانسفورماتورهایی که بین این دو رنج کاری (۵ تا ۱۰ مگاولت آمپر) قرار دارند، یا توسط رله‌های متناسب و یا بعضاً توسط فیوز محافظت می‌شوند. انتخاب سیستم حفاظتی بستگی به اهمیت بارهای متصل به ترانس، اندازه شبکه و قیود امنیتی حاکم بر هر بخش دارد. ملاحظات مختلف موجود در شبکه‌های مختلف مانند توانایی هماهنگ کردن فیوزها با رله‌های بالادست، نوع خطا، امنیت کارکنان، سرعت و زمان رفع خطا و ... در تعیین نوع حفاظت نقش مهمی بر عهده خواهند داشت [۳].

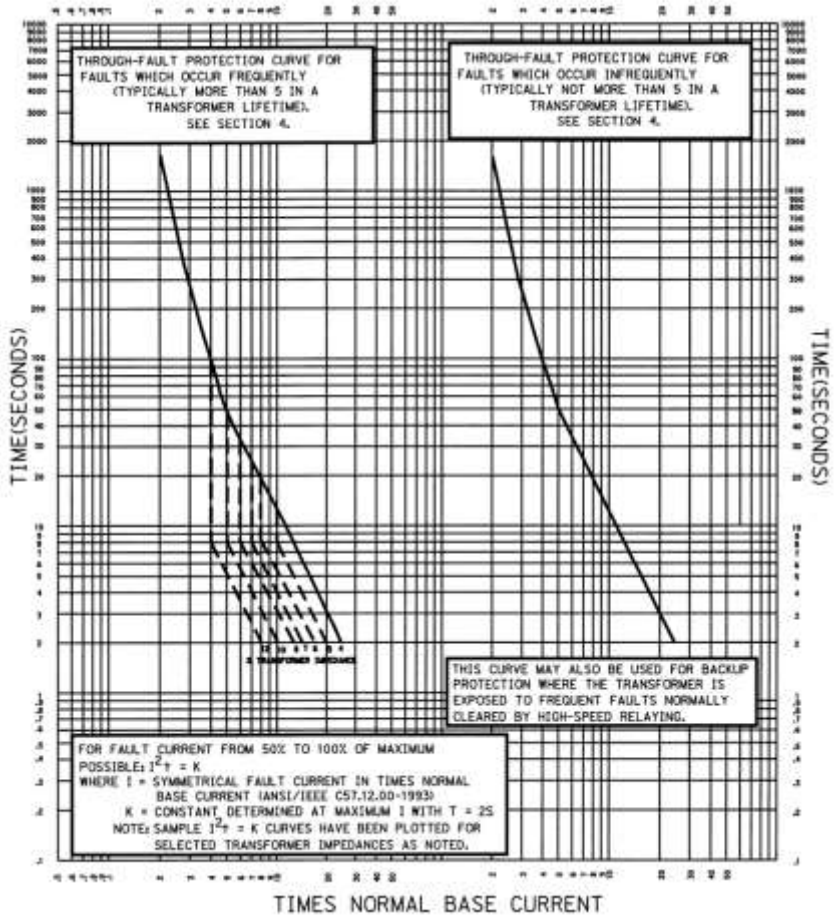
با توجه به ظرفیت نامی ترانسفورماتورها انتخاب و عملکرد فیوزها و رله‌ها متفاوت است. برای ترانسفورماتورهای سه‌فاز دارای ظرفیت نامی ۵۰۰ کیلوولت آمپر تا ۵۰۰۰ کیلوولت آمپر دو منحنی جهت انتخاب تجهیزات حفاظتی پیشنهاد شده است. این دو منحنی در شکل ۲-۲ نمایش داده شده‌اند. منحنی سمت چپ برای در نظر گرفتن همزمان آسیب‌های مکانیکی و حرارتی ارائه شده است. همچنین از این منحنی می‌توان جهت انتخاب تجهیزات حفاظتی فیدرهای موجود در مسیر ترانس‌ها استفاده کرد. با توجه به امپدانس هر ترانسفورماتور نوع منحنی نیز متفاوت خواهد بود. منحنی‌های ارائه‌شده با توجه به جریان‌های خطا در محدوده‌ی ۵۰ تا ۱۰۰ درصدی بدترین حالت ممکن برای اضافه جریان و با استفاده از رابطه‌ی $I^2t = K$ رسم می‌گردند. در این رابطه مقدار K برابر ۲ ثانیه که نشان‌دهنده بدترین حالت مکانیکی است، در نظر گرفته می‌شود. منحنی سمت راست فقط جهت در نظر گرفتن آسیب‌های حرارتی ارائه شده است. همچنین از این منحنی می‌توان برای انتخاب تجهیزات موردنیاز برای حفاظت ثانویه استفاده کرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل (۲–۱): شماتیک حفاظت یک ترانس ستاره/مثلث

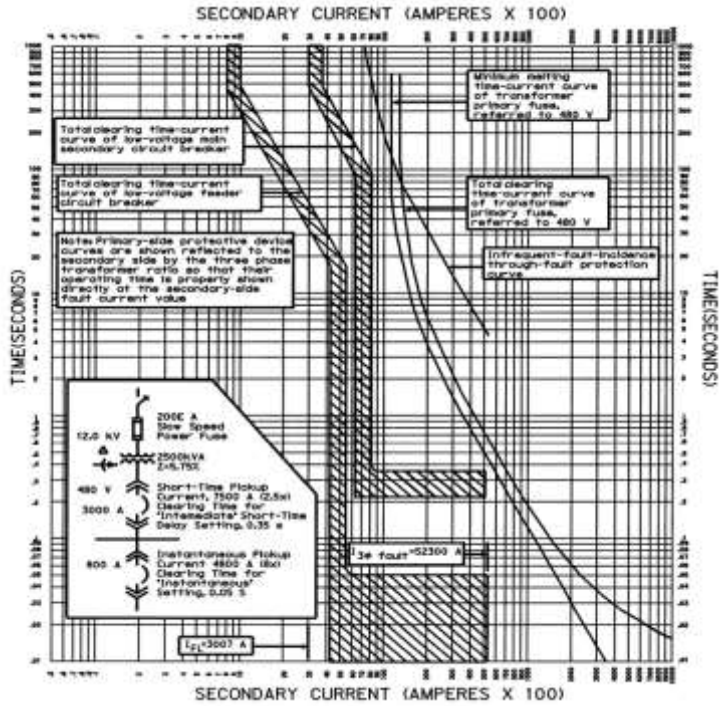
DOI: 10.30503/nripress.2020.151



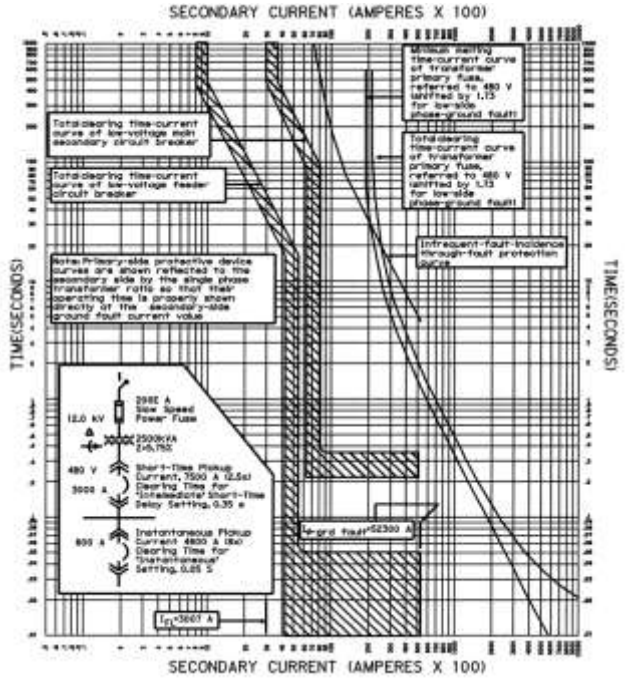
شکل (۲–۲): منحنی جریان بر حسب زمان

نحوه هماهنگی فیوزها و رله‌های اضافه جریان با منحنی‌های حفاظتی در شکل‌های ۲-۳، ۲-۴ و ۲-۵ ارائه شده است. این منحنی‌ها برای ترانسفورماتورهای ستاره/مثلث ارائه شده‌اند. همچنین نسبت تبدیل ترانس ۱:۱ فرض شده است. منحنی ارائه‌شده در شکل ۲-۳ برای حالتی است که یک خطای سه‌فاز رخ بدهد، در این حالت جریان خط در طرف اولیه ۱/۷۳ برابر جریان موجود در سیم‌پیچ‌های اولیه خواهد بود. منحنی ارائه‌شده در شکل ۲-۴ و ۲-۵ برای حالتی است که خطای تک‌فاز به زمین و یا دو فاز به هم در طرف ثانویه ترانس رخ دهد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

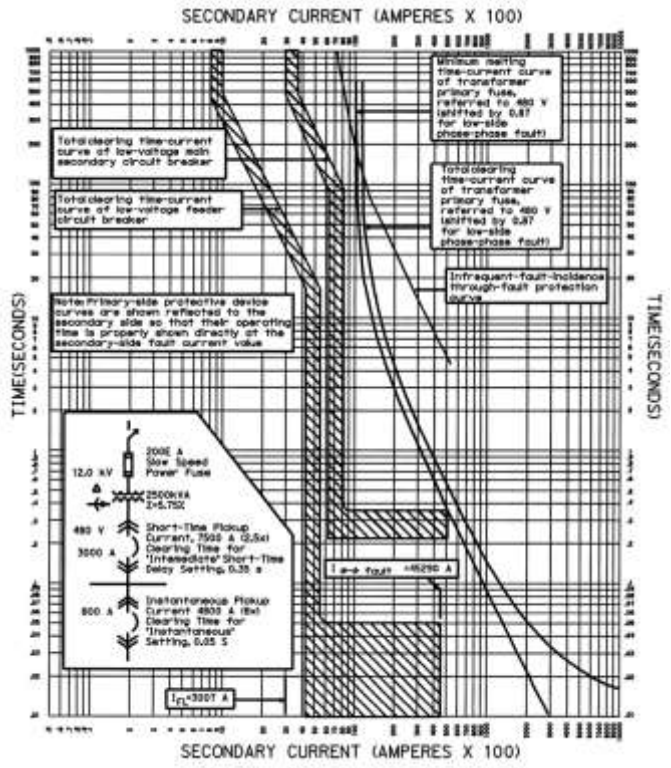


شکل (۲–۳): حفاظت ترانسفورماتور در سمت ثانویه برای مقابله با یک خطای سه‌فاز



شکل (۲–۴): حفاظت ترانسفورماتور در سمت ثانویه برای مقابله با یک خطای تک‌فاز به زمین

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل (۲–۵): حفاظت ترانسفورماتور در سمت ثانویه برای مقابله با یک خطای دو فاز به هم

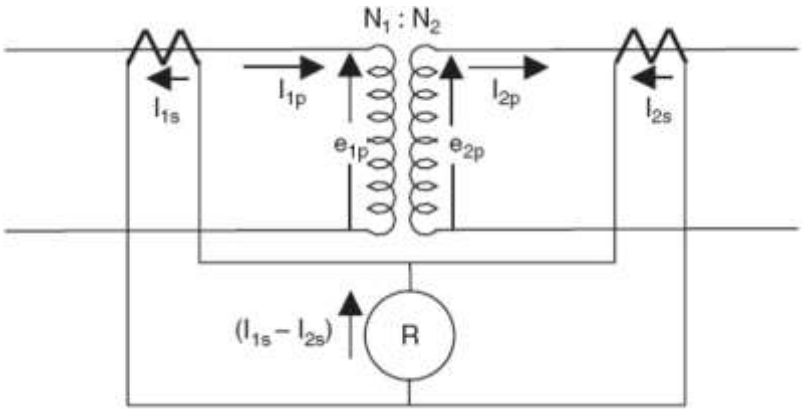
۲-۲-۲- حفاظت دیفرانسیل

با اینکه حفاظت از طریق فیوز ساده‌ترین و کم هزینه‌ترین راه حفاظت است، اما حفاظت دیفرانسیل مزایای بسیاری را نسبت به حالت قبل دارد. از جمله این مزایا می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۴]:

- در این نوع حفاظت سرعت تشخیص خطا بسیار بالا است، در نتیجه آسیب بسیار کمتری به تجهیزات وارد می‌شود.
- محل خطا بر حسب اندازه ناحیه حفاظت به‌طور دقیق تعیین می‌شود.
- تعیین دقیق محل خطا این اجازه را به سیستم اتوماسیون می‌دهد تا نسبت به جداسازی آن ناحیه اقدام سریع‌تری را انجام دهد.
- رفع هر چه سریع‌تر خطا مانع ایجاد قوس‌های الکتریکی در تجهیزات خواهد شد.

رله دیفرانسیل جریان متداول‌ترین نوع حفاظت دیفرانسیل است که برای حفاظت ترانسفورماتورهای با ظرفیت ۱۰ مگاولت آمپر و بالاتر به‌کار می‌روند. شماتیک اتصال این رله به ترانس تک‌فاز در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. اگر خطایی در ناحیه محدود به دو سیم‌پیچ رخ دهد آنگاه اختلاف جریان اولیه و ثانویه از یک حد مشخص بیشتر خواهد شد و رله عمل می‌کند. رله دیفرانسیل رله بسیار حساسی است که بر اساس اختلاف جریان واردشده به آن عمل می‌کند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل (۲–۶): دیاگرام اتصال رله دیفرانسیل

با فرض اینکه نسبت CT ها برابر ۱:۱ باشد، جریان عبوری از رله به‌صورت زیر است:

$$I_d = I_{1s} - I_{2s} \quad (۲-۱)$$

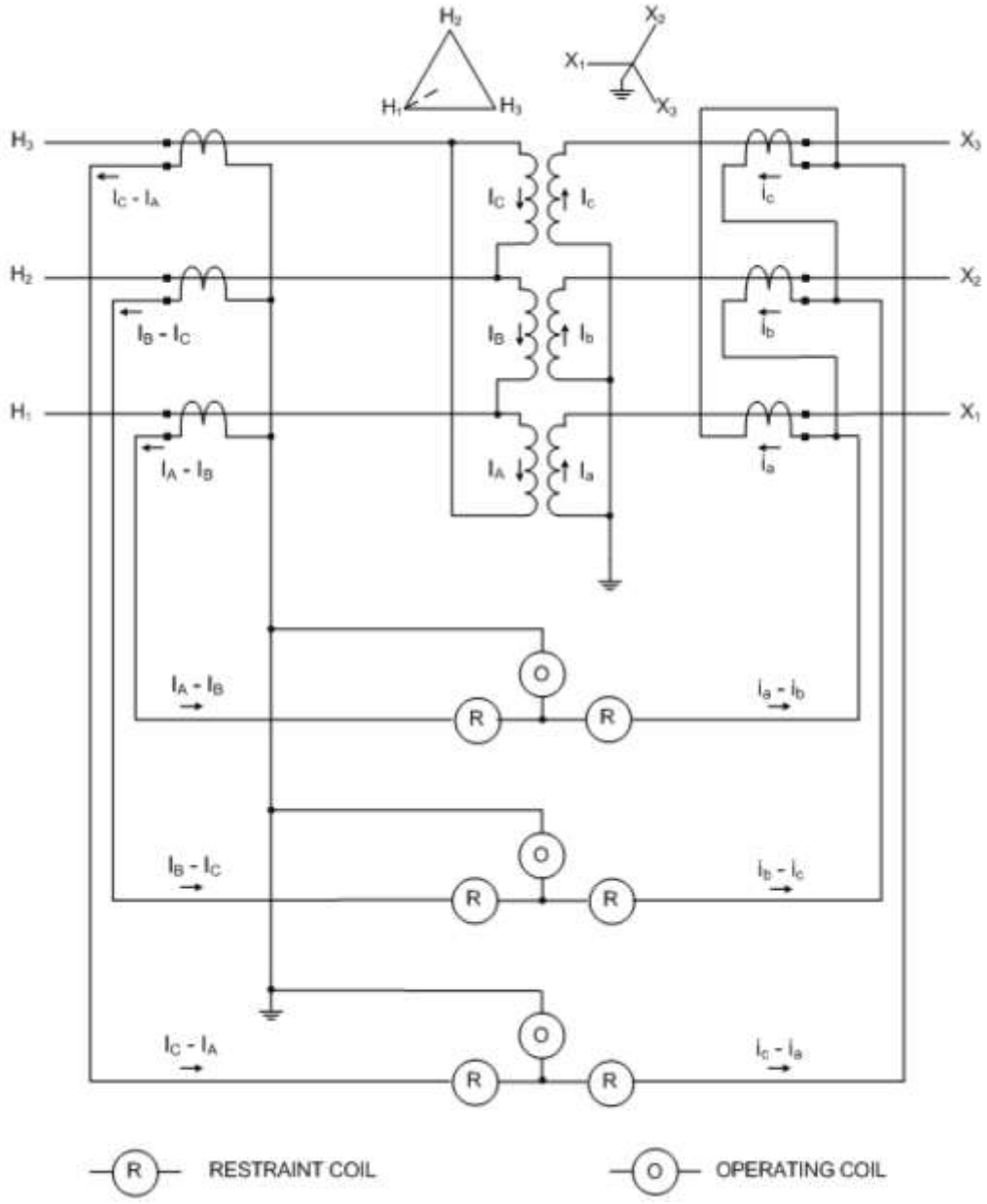
در این رابطه I_d نشانگر جریان عمل‌کننده و I_{1s}، I_{2s} به ترتیب نشانگر جریان‌های ورودی و خروجی به ترانسفورماتور هستند. نسبت ۱:۱ تقریباً در ترانسفورماتورهای قدرت دیده نمی‌شود، بنابراین نسبت واقعی هر ترانس باید در نظر گرفته شود. نحوه اتصال CT ها و نسبت انتخاب‌شده باید به گونه‌ای باشد که رله در برابر خطاهای خارج از محدوده ترانس واکنشی نشان ندهد. نحوه اتصال CT ها در شکل ۲-۷ برای یک ترانس ستاره/مثلث نمایش داده شده است. اتصال ستاره/مثلث در ترانسفورماتور قدرت و در حالت عادی باعث ایجاد اختلاف فاز ۳۰ درجه بین کمیت‌های مربوطه در اولیه و ثانویه خواهد شد. بنابراین باید قبل از ورود این جریان‌ها به رله دیفرانسیل این جریان‌ها را از نظر اختلاف فاز یکسان نمود. با اتصال ستاره و مثلث CT های سه‌فاز می‌توان جریان‌های ثانویه ورودی به رله دیفرانسیل را از نظر اختلاف فاز یکسان نمود. همچنین برای یکسان کردن جریان‌های ثانویه ورودی به رله از نظر دامنه یا فاز می‌توان در رله‌های الکترومکانیکی و استاتیکی از ترانس‌های جریان کمکی استفاده کرد. در رله‌های دیجیتالی نیازی به این اتصالات نیست.

به‌دلیل وجود خطا در CT ها و سایر عوامل خطا مانند وجود تپ چنجر در یک طرف ترانسفورماتور تحت شرایط نرمال و غیر خطا و یا خطاهای خارج از ناحیه ترانسفورماتور یک جریان حداقل از رله دیفرانسیل عبور خواهد کرد. در این حالت برای جلوگیری از عملکرد رله در برابر این شرایط از یک جریان به نام جریان مقاوم (I_r) و جریان I_d در طرح دیفرانسیل استفاده می‌شود که به آن طرح حفاظت دیفرانسیل درصدی گفته می‌شود. در این شرایط شرط عملکرد رله این است که جریان دیفرانسیل از یک درصد مشخصی از جریان مقاوم بالاتر برود. روابط موردنیاز در زیر ارائه شده‌اند. K شیب مشخصه است و می‌تواند مقادیری مانند۲۰ تا ۴۰ درصد باشد.

$$I_r = \frac{I_{1s} + I_{2s}}{2} \quad (۲-۲)$$

$$I_d \geq KI_r \quad (۲-۳)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل (۲–۷): شماتیک اتصال رله دیفرانسیل به ترانسفورماتور ستاره/مثلث

عوامل اصلی ایجاد خطا در حفاظت دیفرانسیل درصدی عبارت‌اند از:

جریان هجومی ترانسفورماتور[۱] : این جریان به دلیل مشخصه غیر خطی هسته ترانسفورماتور و البته لحظه کلیدزنی به‌وجود می‌آید. تفاوت این جریان با جریان خطا در این است که مؤلفه هارمونیک دوم آن قابل‌توجه

۱ *Inrush Current*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

است. بنابراین از این طریق می‌توان برای تمایز آن از جریان خطا استفاده کرد. البته می‌توان با تشخیص زمان خاموش بودن ترانسفورماتور و برق‌دار شدن آن نیز جریان هجومی را تشخیص داد. میزان جریان هجومی ۸ تا ۱۰ برابر جریان عادی تراسفورماتور است.

اشباع ترانسفورماتور جریان[۱]: تحت جریان‌های اتصال کوتاه بیرون از ناحیه ترانسفورماتور ممکن است CT به اشباع برود. اگر CT یک طرف به اشباع برود آنگاه جریان‌های ثانویه متفاوت بوده و بنابراین ممکن است رله دیفرانسیل به اشتباه عمل کند. راهکار غلبه بر این مشکل پیدا کردن بدترین شرایط خطا و لحاظ کردن آن در منحنی رله دیفرانسیل است.

۳-۲- حفاظت مکانیکی

وقوع هر گونه خطای الکتریکی در درون تانک ترانسفورماتور باعث داغ شدن موضعی و ایجاد قوس الکتریکی خواهد شد. در اثر تجزیه روغن گاز ایجادشده باعث افزایش فشار محفظه تانک و یا جابه‌جایی سریع روغن ترانسفورماتور می‌شود. برای آشکارسازی خطاهای داخلی می‌توان از رله‌های حفاظتی مکانیکی استفاده کرد [۵]:

دستگاه فشار شکن[۲]: به‌صورت یک صفحه دیسکی چندلایه در بالای ترانسفورماتور قرار می‌گیرد. اگر فشار از یک حد مشخصی فراتر رود برای جلوگیری از انفجار ترانسفورماتور این دستگاه اقدام به کاهش فشار از طریق افزایش حجم محفظه شده و با کنترل فشار دوباره بسته می‌شود.

رله افزایش سریع فشار روغن: این رله شیب افزایش فشار را اندازه‌گیری می‌کند؛ و بنابراین سریع‌تر از دستگاه فشارشکن می‌تواند خطا را تشخیص دهد.

رله بوخ هلتس[۳]: این رله تقریباً در همه ترانسفورماتورها به‌کار می‌رود و در بین تانک و کنزرواتور قرار می‌گیرد. رله با به‌وجود آمدن گاز یا هوا در داخل منبع روغن دستگاه و یا پایین رفتن سطح روغن از حد مجاز و یا در اثر جریان پیدا کردن شدید روغن به‌کار می‌افتد و سبب به صدا درآوردن سیگنال و دادن علامت می‌شود و یا اینکه مستقیماً دستگاه خسارت‌دیده را از برق قطع می‌کند. رله بوخ هلتس به قدری دقیق است که به محض وقوع کوچک‌ترین خطا عمل می‌کند و مانع از آن می‌شود که دستگاه خسارت زیادی ببیند. خطاهایی که سبب به‌کار انداختن رله بوخ هلتس می‌شوند عبارت‌اند از:

- جرقه بین قسمت‌های زیر فشار و هسته ترانسفورماتور
- اتصال زمین
- اتصال حلقه و کلاف
- قطع یک فاز
- سوختن آهن

---

۱ *CT Saturation*

۲ *Pressure relief*

۳ *Buchholz relay*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- چکه کردن روغن از ظرف روغن و یا از لوله‌های ارتباطی

در خطاهای کوچک، هوا یا گازهای متصاعدشده از روغن، وارد لوله رابط بین ترانسفورماتور و منبع ذخیره روغن (ظرف انبساط) شده و به داخل رله بوخ هلتس که در یک قسمت از این لوله قرار دارد راه یافته و به طرف قسمت بالای رله که به‌صورت مخزن گاز درست شده است صعود می‌کند و در آنجا جمع می‌شود. گازهای راه‌یافته به داخل رله بوخ هلتس به سطح فوقانی روغن فشار می‌آورد و باعث پایین آوردن سطح روغن در رله بوخ هلتس می‌گردد. این فشار به شناور بالایی رله، منتقل می‌شود و آن را به طرف پایین هدایت می‌کند. حرکت شناور باعث بستن و یا باز کردن کنتاکت‌هایی می‌شود که جهت دادن فرمان در یک محفظه جیوه‌ای تعبیه شده‌اند.

در موقعی که خطا به‌صورت یک اتصالی شدید باشد، گازهای متصاعد شده در اثر قوس الکتریکی به قدری زیاد می‌گردد که موجب راندن موجی از روغن به داخل ظرف انبساط می‌شوند. اگر سرعت موج روغن از مقدار معینی که قبلاً تنظیم شده است تجاوز کند، قبل از اینکه گازها به داخل رله بوخ هلتس راه یابند، دریچه اطمینان رله به‌کار می‌افتد و باعث قطع ترانسفورماتور از برق می‌شود. اگر رله بوخ هلتس دارای دو گوی شناور باشد، دریچه اطمینان طوری تنظیم می‌گردد که وقتی سرعت حرکت روغن مابین ۵۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر بر ثانیه رسید، رله عمل کند. در رله‌هایی که شامل یک گوی شناور هستند، دریچه اطمینان با شناور لحیم شده است و در این رله‌ها وقتی سرعت روغن به ۶۵ تا ۹۰ سانتی‌متر بر ثانیه رسید رله عمل می‌کند.

۴-۲- پایش و نگهداری روغن در حال بهره‌برداری

کاغذ و روغن با توجه به خاصیت عایقی مناسبی که هر یک از آن‌ها در کنار هم دارند، به‌عنوان عایقی مناسب در ترانسفورماتورهای قدرت مورداستفاده قرار می‌گیرند. استقامت دی الکتریک کاغذ و روغن به تنهایی برابر با ۴۰ و ۱۲ کیلو ولت بر میلی‌متر است؛ درحالی‌که استقامت دی الکتریک ترکیب آن‌ها برابر با ۶۴ کیلوولت بر میلی‌متر بوده که افزایش چشمگیری به‌شمار می‌آید.

نکته مهم در بهره‌برداری از این عایق ترکیبی، بررسی اثر پیری عایقی است. فرایند پیری عایقی به شرایط کارکرد و طراحی تجهیزات بستگی داد. از سوی دیگر نرخ پیری عایقی تابعی از دما، میزان اکسیژن و رطوبت است. وجود برخی از مواد در ترانس موجب سرعت بخشیدن به فرایند پیری روغن می‌شود؛ این مواد شامل مس و رنگ روکش‌ها هستند. مکانیزم پیری روغن بر اساس اکسیداسیون بوده که به تشکیل اسیدها و مواد قطبی منجر می‌گردد. بعضی از فرآورده‌های اکسیداسیون مولکول‌های بزرگ با حلالیت ضعیف در روغن بوده، که به شکل رسوب در تانک ترانس ته‌نشین می‌شوند. این مواد با عنوان لجن شناخته می‌شوند که موجب تخریب بیشتر کاغذ می‌شوند.

روش‌های مختلفی برای ارزیابی وضعیت روغن و کاغذ وجود دارد. با استفاده از مجموعه آزمون‌های تشخیصی، می‌توان تغییر وضعیت عایق را در درازمدت پایش کرد و علت این تغییرات که معمولاً بر اثر عوامل حرارتی، شیمیایی و مکانیکی هستند را مشخص کرد. مجموعه اقدامات پایش روغن به‌منظور شناسایی فرایندهای اکسیداسیون قبل از تخریب عایق‌های کاغذی و انجام عملیات پیشگیرانه انجام می‌پذیرد. از لحاظ اقتصادی تعویض یا تعمیر کاغذ ترانس امکان‌پذیر نبوده و طول عمر ترانس به طول عمر کاغذ آن وابستگی شدیدی دارد. ازاین‌رو در این بخش آزمون‌های پایش وضعیت ترانس و پیری روغن بررسی می‌گردد.

۱-۴-۲- پیری روغن ترانسفورماتور

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

واکنش‌های اکسیداسیون به‌عنوان مهم‌ترین عامل پیری روغن معدنی ترانس شناخته می‌شوند. تنها در دماهای بالای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد امکان تخریب حرارتی مولکول‌های روغن وجود دارد، در نتیجه تخریب حرارتی بر اثر وقوع خطاهای حرارتی یا الکتریکی ایجاد می‌شود.

فرآورده‌های اکسیداسیون تأثیر منفی بر خواص الکتریکی روغن گذاشته و نقش کاتالیزور را برای سرعت بخشیدن به فرایند اکسیداسیون روغن ایفا می‌کنند. اسیدهای کربوکسیلیک تولیدشده یا در روغن حل شده یا به سلولوز انتقال می‌یابد. بعضی از فرآورده‌های دیگر اکسیداسیون نیز دارای ساختاری بزرگ و قطبی بوده و قابلیت حل شدن آن‌ها در روغن کم است، بنابراین به‌صورت لجن رسوب کرده و مانع از خنک‌کنندگی مناسب ترانس به ویژه در کانال‌های باریک روغن می‌شوند. آزمایش پایداری در برابر اکسیداسیون می‌تواند به‌عنوان یکی از آزمون‌های تعیین مناسب بودن روغن در حال بهره‌برداری برای استفاده‌های آتی مورداستفاده قرار گیرد. پایش رنگ و وضعیت ظاهری، اسیدیته، رطوبت، ضریب تلفات دی‌الکتریک و کشش سطحی اطلاعات مرتبط با اکسیداسیون را ارائه می‌کنند.

۲-۴-۲- تخریب روغن هنگام بهره‌برداری

در تجهیزات الکتریکی چندین فرایند وابسته به یکدیگر رخ می‌دهد که باعث تخریب روغن هنگام بهره‌برداری می‌گردند. این فرایندها می‌تواند شامل آلودگی با ذرات معلق، الیاف، آب فرآورده‌های اکسیداسیون، تخلیه الکتریکی یا جرقه و افزایش درجه حرارت به علت گرم شدن باشند.

وجود آب در روغن می‌تواند محصولی از فرایند اکسیداسیون روغن یا تخریب کاغذ باشد، یا اینکه در طول دوره سرویس، تعمیرات و یا در مرحله تنف معمولی تجهیز وارد روغن شود. قابلیت انحلال آب در روغن به دما و میزان PH روغن بستگی دارد. اگر روغن به نقطه اشباع برسد، رنگ آن به تیرگی نزدیک شده و قطرات آب در آن پدیدار می‌شود. معمولاً ۹۹٪ از رطوبت موجود در سیستم‌های عایقی در کاغذ عایقی وجود دارد. با زیاد شدن رطوبت، طول عمر متوسط کاغذ عایقی و در نتیجه طول عمر ترانس به طرز قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، بنابراین پایش منظم به‌منظور تشخیص به موقع خطا و انجام اقدامات پیشگیرانه ضروری است. آب آزاد به‌وسیله بازدید بهره‌برداران قابل‌تشخیص بوده با این حال آب محلول را تنها با انجام آزمایش‌های روغن تشخیص می‌دهند.

آلودگی روغن با ذرات معلق یا الیاف در سه مورد ممکن است به وقوع بپیوندد. در شایع‌ترین دلیل آلودگی روغن به ذرات معلق خطای انسانی در تعمیرات عنوان شده است. ایجاد شدن این ذرات از طریق قسمت‌های عایقی ترانس و اثر قوس اکتریکی و فراورده‌های تخریبی بر اثر خطا عوامل دیگر تشکیل‌دهنده ذرات معلق و الیاف در ترانس است. این آلودگی در هنگام حضور آب، می‌تواند استقامت الکتریکی روغن را کاهش دهند. این آلودگی روغن نیز همانند نفوذ آب تنها با آزمایش روغن ترانسفورماتور قابل‌شناسایی است.

۳-۴-۲- آزمون‌های لازم برای تعیین وضعیت روغن

هدف از آزمایش‌های روغن پایش وضعیت آن و اطمینان از شرایط آن جهت ادامه بهره‌برداری است. اگرچه تعداد زیادی از آزمایش‌ها بر روی روغن ترانس قابل‌انجام است اما برای تعیین وضعیت روغن در حال بهره‌برداری آزمایش‌های شرح‌داده‌شده در زیر کافی است. بر پایه نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌ها، اقدامات اصلاحی لازم صورت خواهد گرفت. به‌منظور تدوین این گزارش از استانداردهای IEC60422 (دستورالعمل نظارت و نگهداری برای

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

روغن‌های معدنی عایقی در تجهیزات الکتریکی) و IEEE C 57, 106 (دستورالعمل IEEE برای پذیرش و نگه‌داری روغن‌های عایق در تجهیزات الکتریکی) استفاده شده است.

آزمون‌های فیزیکی روغن

رنگ و وضعیت ظاهری یکی از اولین تست‌های روغن است. با اینکه این آزمون‌ها بیشتر کیفی هستند. اما در کنار هم نشان‌گر مفیدی از تخریب روغن هستند. تغییر رنگ ناگهانی یا تیره‌رنگ بودن روغن می‌تواند نشان‌دهنده مشکل حل شدن آب، ذرات کربن در روغن و یا وجود لجن در محفظه‌های ترانس باشد. آزمون فیزیکی دیگر مربوط به روغن ترانس بررسی گرانروی روغن ترانس است. به‌طور معمول پیری و اکسیداسیون در روغن گرانروی را افزایش می‌دهد.

آزمون‌های شیمیایی روغن

اولین آزمون شیمیایی روغن مربوط به بررسی اسیدیته روغن است. روغن به علت وجود فراورده‌های اسیدی ناشی از اکسیداسیون، اسیدی می‌شود. اسیدها می‌توانند باعث خوردگی در بخش‌های فلزی ترانس شده و موجب تخریب سلولوز نیز بشوند. آزمون اسیدیته مخصوصاً برای پایش پیری روغن مفید است. با افزایش نرخ اسیدی نرخ پیری روغن نیز افزایش می‌یابد. این آزمون به‌منظور تعیین زمان مناسب برای تصفیه شیمیایی یا تعویض روغن استفاده می‌گردد. دیگر تستی که بر روی روغن ترانس انجام می‌پذیرد، تست تعیین سطح گوگرد روغن است. سطح گوگردی که در روغن پالایش‌شده وجود دارد به عیار و روش‌های تصفیه نفت خام بستگی دارد. بعضی از ترکیب‌های حاوی گوگرد در روغن‌ها تا اندازه‌ای در اکسیداسیون روغن فعال هستند. بدین‌معنی که فرایند واکنش با پروکسیدهای شکل‌گرفته متوقف شده و زنجیره واکنش اکسیداسیون شکسته می‌شوند. به‌طورکلی هنگام طراحی روغن ترانس دو ویژگی متضاد هم وجود دارد. پایداری خوب برابر اکسیداسیون بر پایه ترکیبات طبیعی و دیگری اثر خوردگی کم بر مس و نقره به‌کاررفته‌شده در ترانس این دو ویژگی را شامل می‌شود. انجام آزمون‌های خوردگی با بررسی ترانس‌ها و راکتورهای معیوب‌شده در فاصله زمانی سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ میلادی به‌صورت یک دستورالعمل جامع ضروری شد. به‌طور خلاصه درصورتی‌که نتایج سطح گوگرد در روغن از میزان تعیین‌شده بیشتر باشد روش‌های اصلاحی زیر باید صورت گیرد:

۱- اضافه کردن پسیواتور به روغن و حفظ سطح ماده پسیواتور

۲- در صورت امکان تصفیه شیمیایی روغن یا تعویض آن با روغن بدون خوردگی

آزمون‌های الکتریکی

ضریب تلفات دی الکتریک به‌عنوان اولین تست الکتریکی موردارزیابی قرار می‌گیرد. ضریب تلفات دی‌الکتریک نشان می‌دهد که میدان الکتریکی AC چگونه بر روغن اثر می‌گذارد. در برابر این تست مقاومت ویژه که نشان‌دهنده قابلیت انتقال بار الکتریکی روغن تحت شرایط DC است نیز اندازه‌گیری می‌شود. هر دو آزمون ذکرشده به شدت به مقادیر حتی کوچک آلایندگی‌های کلوبیدی، فراورده‌های اکسیداسیون یا لجن‌های قطبی یا آلایندگی‌های یونی حساس هستند. مقاومت ویژه علاوه به موارد ذکرشده تحت تأثیر آلودگی با نمک‌های فلزی و آب نیز است. ازاین‌رو انجام این این آزمایش‌ها برای روغن‌های تحت بهره‌برداری مفید هستند. محدوده مجاز مقادیر ضریب تلفات عایقی و مقاومت ویژه به نوع و محل نصب تران وابسته است اما به‌طورکلی مقادیر بالای ضریب تلفات الکتریکی و مقاومت ویژه کم دلالت بر کم شدن استقامت عایقی روغن ترانس دارند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

در مراحل اولیه پیری، کشش سطحی بین روغن و آب با سرعت نسبتاً زیادی تغییر می‌کند. اما پس از رسیدن تخریب به سطوح متوسط ثابت می‌گردد. اندازه‌گیری این پارامتر برای شناسایی مواد حاصله از تخریب و وجود آلودگی‌های دو قطبی محلول در روغن مفید است. همچنین این آزمون برای شناسایی لجن حل‌شده در روغن قبل از اینکه به‌صورت رسوب در آید پیشنهاد شده است. مقادیر کمتر از $22\ mN/m$ نشان‌دهنده این شرایط است، اما لازم است که با انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری لجن صحت آن تأیید گردد.

تست دیگری که بر روی روغن ترانس انجام می‌گیرد بررسی ولتاژ شکست است. ولتاژ شکست نشان‌دهنده قابلیت روغن به‌عنوان عایق الکتریکی است که یکی از نقش‌های اصلی روغن است. این پارامتر به حضور فیزیکی روغن آلودگی در روغن حساس است. ولتاژ شکست در مناطقی که تنش الکتریکی بالا است به طرز قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. این مناطق معمولاً جذب‌کننده آب و ذرات جامد هستند. بنابراین این آزمایش برای شناسایی این چنین آلودگی‌هایی مفید است. گرچه ولتاژ شکست پایین نشان‌دهنده وجود آلودگی است اما باید دقت شود که ولتاژ شکست بالا به منزله بدون آلودگی بودن روغن ترانس نتیجه‌گیری نمی‌شود.

آزمون پایداری در برابر اکسیداسیون نیز دیگر آزمون روغن ترانس است. اکسیداسیون به معنی تخریب روغن ترانسفورماتور در دمای کار نرمال در حضور اکسیژن است. همچنین توانایی روغن در مقابله با اکسیداسیون را پایداری در برابر اکسیداسون می‌نامند. آزمایش پایداری در برابر اکسیداسیون برای روغن‌های در حال بهره‌برداری به معنی اندازه‌گیری استقامت باقی‌مانده روغن جهت مقابله با اکسیداسیون است.

محدوده مجاز برای هر یک از آزمون‌های اشاره‌شده در فوق در جدول ۲-۴ نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این تست‌ها لازم است توسط کارشناس با محدودیت‌های ذکرشده در جدول و در نظر گرفتن نوع روغن، مشخصات ترانسفورماتور، نتایج آزمون‌های قبلی و روند سرعت تغییرات نتایج مقایسه شود.

جدول (۲-۴) محدودیت نتایج آزمون‌های روغن در حین بهره‌برداری مطابق با استاندارد IEC 60422

آزمایش	ولتاژ		
	کمتر از ۷۲/۵	۷۲/۵-۱۷۰	بیشتر از ۱۷۰
اسیدیته *mg KOH/g*	۰/۳	۰/۲	۰/۱۵
ولتاژ شکست *kV*	۳۰	۴۰	۵۰
رنگ و ظاهر	تمیز و بدون اثری از تیرگی		
مقاومت دی الکتریکی در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد	۰/۵	۰/۵	۰/۲
کشش	۲۴	۲۴	۲۴
گرانروی	بیشترین مقدار افزایش نهایتا ۴۰ در صد مقدار اولیه		
آب محلول *mg/Kg*	۲۵	۱۵	۱۰

۴-۴-۲- پایش وضعیت عایقی

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

در زمینه پایش وضعیت عایقی ترانس‌های نیروگاهی معمولاً از دستگاه پایش ساخت شرکت Hydran M2 در برخی از پست‌های فشار قوی تهران مانند پست فشار قوی تهرانپارس استفاده شده است. اساس این ابزار تجزیه و تحلیل گازهای موجود در محفظه تانک و دمای روغن ترانس بوده است. طبق گزارش‌های ارائه‌شده توسط این شرکت این دستگاه با اتصال به محفظه تانک ترانس می‌تواند وضعیت ترانس را به‌صورت بر خط پایش کند. با این حال استفاده از این دستگاه در پست‌های فشار قوی با توجه به نامطلوب بودن عملکرد آن و خطای این دستگاه نسبت به نتایج به‌دست‌آمده از گازکروموگرافی ترانس در برق منطقه‌ای تهران متوقف شده است. با این حال به‌منظور آشنایی با عملکرد پایش وضعیت ترانس به‌صورت مختصر ارائه شده است.

در سال‌های اخیر برای پایش وضعیت ترانسفورماتور جهت تشخیص عیوبی که در مراحل اولیه در حال رخ دادن است از تجزیه و تحلیل روغن مخزن ترانسفورماتور و تپ‌چنجر استفاده می‌شود. خطاهای حرارتی و الکتریکی در ترانسفورماتورهای قدرت مواد عایقی را تجزیه کرده و با توجه به شدت خطا گازهایی متصاعد می‌کنند که درون روغن ترانس حل می‌شوند. با توجه به گردش روغن در داخل ترانس و تماس آن با قسمت‌های اصلی تجهیز، روغن تمامی مواد جامد و گازهای محلول را با خود حمل می‌کند. در نتیجه با نمونه‌برداری و شناسایی گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور امکان‌پذیر است. در دستگاه Hydran به جای نمونه‌برداری گازهای محلول توسط روش‌های ابزار دقیق تخمین زده می‌شود. با این حال به دلیل اختلاف در شناسایی گازها با روش ارائه‌شده در استاندارد IEC60567 که روش نمونه‌برداری از روغن جهت تست گازهای محلول در آن شرح داده شده، نتایج این روش کاملاً رضایت‌بخش نبوده است.

روش گازکروماگرافی روش خلأ که به روش پمپ‌تایر معروف است، بیش از مابقی روش‌ها مانند HEAD Space ، Striper رایج است. شرح دقیق این روش‌ها در استاندارد عنوان‌شده موجود است. در روش‌های گازکروماگرافی گازهای هیدروژن، متان، اتان، اتیلن، استلن، منوکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن، اکسیژن و نیتروژن را اندازه‌گیری می‌کنند. حد تشخیص این روش‌ها در حد ۱ PPM برای گازهای هیدروکربنی، ۵ PPM برای هیدروژن و ۲۰ PPM منواکسید کربن، ۵۰ PPM برای دی‌اکسید کربن و برای گازهای جوی ۱۰۰۰ PPM است. در دستگاه Hydran با توجه به مدل‌های مختلف آن قابلیت تشخیص ۲ تا ۴ نوع از گازهای مطرح‌شده در فوق را دارا است. در نتیجه دقت این دستگاه کاهش می‌یابد. در نقطه مقابل همچنین اگرچه استخراج و اندازه‌گیری گازهای محلول در حال حاضر به طرز مؤثری استانداردسازی شده است؛ اما هنوز تحلیل نتایج استاندارد نبوده و بیشتر از اینکه علم خاصی باشد یک هنر است. نکته اصلی که در روش‌های سنتی به آن پرداخته می‌شود، نسبت دادن مقدار گازهای اندازه‌گیری‌شده به عیوب موردنظر است. به عبارت دیگر در تفسیر نتایج، میزان اطلاعات در دسترس و تجربه شخص تحلیل‌گر می‌تواند به نتایج دقیق‌تری نسبت به وضعیت ترانس برساند. در نتیجه شناسایی تعداد محدودی از گازهای محلول در ترانس و همچنین عدم توجه به سابقه کاری ترانس در دستگاه Hydran دقت وضعیت ترانس را با اختلال رو به رو می‌کند. یک کارشناس برای تعیین وضعیت ترانس و تحلیل گازهای محلول عوامل متنوعی مانند ابعاد، نوع و سن ترانسفورماتور، محل، درجه حرارت روغن، سن روغن، سیستم تنفسی ترانسفورماتور، نرخ گردش روغن در ترانسفورماتور را بر خلاف دستگاه Hydran موردتوجه قرار می‌دهد.

تحلیل نتایج گازهای محلول در روغن به‌صورت خلاصه در ادامه شرح داده می‌شود. مطالعات آزمایشی انجام‌گرفته بر تخریب اکتان، مدل ترکیبی متشکل از پیوندهای کربن به کربن و کربن به هیدروژن ارائه می‌کند که اطلاعات

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مهمی در مورد حداقل دمای ناشی از عیب که باعث تشکیل گاز شده است را به‌کارشناس مربوطه می‌دهد. با توجه به روش‌های تجربی مبتنی بر همبستگی گازهای کلیدی یا نسبت گازها و خطا می‌توان تحلیل اولیه‌ای از وضعیت ترانس داشته باشیم. هر یک از شش دسته خطا را می‌توان با توجه به ترکیب گازهای هیدروکربن و جدول تحلیل گازهای محلول در روغن شناسایی کرد. اساس این تحلیل‌ها نسبت مواد C_2H_2/C_2H_4 ,CH_4/H C_2H_2/C_2H6 در روغن است. در برخی از کشورها به جای نسبت CH_4/H_2 از نسبت C_2H_2/C_2H_6 استفاده می‌شود. نسبت‌های نشان داده‌شده در جدول تنها زمانی باید محاسبه شود که حداقل یکی از گازها یا مقدار رشد آن بیشتر از مقادیر نرمال باشد. همچین باید توجه داشت که افزایش مقدار استلین نشان‌دهنده درجه حرارت نقطه داغ بیشتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد است.

جدول (۲-۵) تحلیل گازهای محلول در روغن طبق روش استاندارد IEC60599

نوع خطا	شرح خطا	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H6
PD	تخلیه جزیی	تأثیری ندارد	<۰/۱	<۰/۲
D1	تخلیه با انرژی کم	>۱	۰/۱ -۰/۵	>۱
D2	تخلیه با انرژی زیاد	۰/۶ -۲/۵	۰/۱ -۱	>۲
T1	خطای حرارتی کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد	تأثیری ندارد	۰>۱ تأثیری ندارد	<۱
T2	خطای حرارتی بین۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد	<۰/۱	>۱	۱-۴
T3	خطای حرارتی بیشتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد	<۰/۲	>۱	>۴

با توجه به جدول ۲-۵ مشاهده می‌شود که بین خطاهای D1 و D2 هم‌پوشانی وجود دارد. بدین‌معنی که در برخی موارد هنگام تحلیل نتایج گازهای محلول در روغن باید به هر دو نوع خطا اشاره کرد. تفاوت بین این دو خطا که میزان انرژی موجود در تخلیه است، می‌تواند در میزان تخریب احتمالی بر تجهیز مؤثر بوده و اقدامات پیشگیرانه متفاوتی را الزامی سازد.

درصورتی‌که نسبت گازها خارج از محدوده نشان داده‌شده در جدول ۲-۵ بوده و خطای مشخصی را نتوان از این جدول استناج کرد، باید آن را ترکیبی از خطاها یا خطای جدید ترکیب‌شده با مقادیر زیاد گاز پیش‌زمینه تحلیل کرد. در این حالت نمی‌توان با استفاده از جدول ۲-۶ خطایابی نمود. در این حالت با استفاده از نمودارهای گرافیکی می‌توان نزدیک‌ترین خطا را شناسایی کرد. در این حالت استفاده از جدول ۲-۶ برای تمیز تقریبی بین تخلیه جزئی، تخلیته و خطای حرارتی بهتر از عدم شناسایی عیب است.

جدول (۲-۶) تحلیل نسبت گازها به روش MSS شرکت زیمنس

محدوده نسبت	عددهای نسبت				
	C_2H_2/C_2H_6	H_2/CH_4	C_2H_4/C_2H_6	C_2H_4/C_3H6	CO_2/CO

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

کمتر از ۰/۳	۰	۰	۰	۰	۱
بین ۰/۳ تا ۱	۱	۰	۰	۱	۱
بین ۱ تا ۳	۱	۱	۱	۲	۱
بین ۳ تا ۱۰	۲	۲	۱	۳	۰
بیشتر از ۱۰	۲	۳	۱	۳	۲
تشخیص حالت موجود	عددهای نسبت				
نرمال	۰	۰	۰	۰	۰
تخلیه با انرژی زیاد	۲	۱	۱	۲ یا ۳	۱
تخلیه با انرژی کم	۲	۲	۱	۲ یا ۳	۱
تخلیه جزئی همراه با انرژی زیاد	۱	۳	۰	–	۰
تخلیه جزئی همراه با انرژی کم	۱	۳	۰	–	۰
خطای حرارتی کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد	۰	۰	۰	۱	۲
خطای حرارتی بین ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد	۰	۰	۱	۲	۲
خطای حرارتی بیشتر از ۱۰۰۰ درجه	۱	۰	۱	۲یا ۳	۲
افزایش دما و تخلیه	۱	۱	۱	۲	۲
افزایش دما و تخلیه جزئی	۰	۳	۱	۲	۲

۵-۴-۲- تحلیل عیوب ترانسفورماتور با استفاده از نسبت گازها

نسبت CO_2/CO :

با افزایش دما، دی«اکسید کربن و منو«اکسید کربن از کاغذ آغشته به روغن تولید می‌شوند. نسبت CO_2/CO کمتر از سه معمولاً نشان‌دهنده وجود خطا در کاغذ و کمی کربونیزاسیون است. در این شرایط درجه پلیمریزاسیون DP کاغذ کاهش می‌یابد.

زمانی که یک کارشناس به تخریب کاغذ مشکوک باشد این نسبت اندازه‌گیری می‌شود. پس از مشخص شدن این نسبت ترکیبات فورفورال تست شده یا در صورت امکان، درجه پلیمریزاسیون نمونه کاغذ اندازه‌گیری شود.

نسبت O_2/N_2 :

به دلیل تماس مستقیم روغن با هوا در منبع انبساط تجهیزات تنفس‌کننده یا به دلیل وجود نشتی در تجهیزات بسته، اکسیژن و نیتروژن به‌صورت محلول در روغن یافت می‌شود. در حالت تعادل و با در نظر گرفتن حلالیت

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

اکسیژن و نیتروژن تقریباً مشابه نسبت این گازها در هواده بوده و نزدیک ۰/۵ است. در طول بهره‌برداری این نسبت در نتیجه اکسیداسیون روغن و یا پیری کاغذ کاهش می‌یابد به شرطی که سرعت مصرف اکسیژن بیشتر از نفوذ آن به روغن باشد. عواملی مانند بار و سیستم حفاظتی تجهیز نیز بر این نسبت تأثیرگذار است، در نتیجه نسبت کمتر از ۰/۳ را می‌توان نشان‌دهنده مصرف زیاد اکسیژن فرض کرد.

نسبت C_2H_2/H_2:

کارکرد تپ‌چنجر تحت بار در ترانسفورماتورهای قدرت گازهایی را تولید می‌کند که متناسب با خطای تخیله با انرژی کم است. اگر امکان ارتباط روغن یا گاز بین محفظه دایورتر سوئیچ تپ‌چنجر و مخزن اصلی ترانسفورماتور یا بین منابع انبساط این دو وجود داشته باشد، ممکن است این گاز به روغن مخزن اصلی منتقل شده و تحلیل را دچار خطا کنند. هر چند روند تولید گاز در تپ‌چنجر مخصوص به خود بوده و با خطای تخلیه با انرژی کم در مخزن اصلی متفاوت است. اگر این نسبت بیشتر از ۲ تا ۳ در مخزن اصلی باشد نشان‌دهنده نشت روغن دایورتر به روغن مخزن اصلی است. این موضوع را می‌توان با مقایسه مقدار گازهای محلول در روغن مخزن اصلی، دایورت سوییچ و منابع انبساط با یکدیگر اثبات کرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

فصل سوم

روش‌های متداول جهت حفاظت

ژنراتورهای نیروگاهی

۳-۱- مقدمه

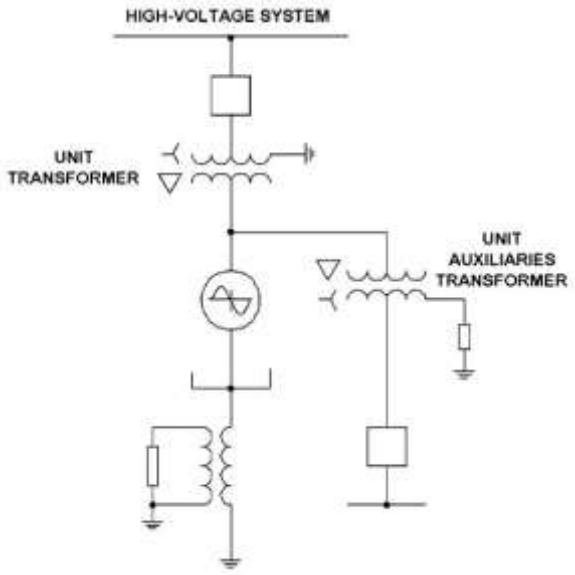
ژنراتور مهم‌ترین و با ارزش‌ترین بخش یک نیروگاه است. نقص داخلی ژنراتور علاوه بر زیانی که به خود ژنراتور وارد می‌کند، باعث قطع قسمت بزرگی از انرژی نیروگاه نیز می‌گردد. درصورتی‌که خطاهای به‌وجودآمده به موقع شناسایی نشوند، باعث افزایش صدمات به ژنراتور شده و تعمیر محل خطا ممکن است زمان بسیار زیادی طول

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

بکشد و در این مدت بهره‌برداری سیستم با مشکل مواجه شود. که این سبب اضافه بار در سایر ژنراتورها خواهد شد. اضافه بار در ژنراتورها، علاوه بر اینکه امکان آسیب را بالا می‌برد، طول عمر دستگاه‌ها را نیز کاهش خواهد داد. برای جلوگیری از اینگونه مشکلات بهتر است خطاهای داخلی ژنراتور را قبل از ایجاد شناسایی و برطرف کرد. جهت بررسی روش‌های حفاظت ژنراتورهای نیروگاهی استانداردهای مختلفی ارائه شده است که متداول‌ترین و پرکاربردترین آنها استاندارد IEEE C37.102-v2006 است، که در ادامه به بررسی روش‌های معرفی‌شده در این استاندارد پرداخته می‌شود [۶].

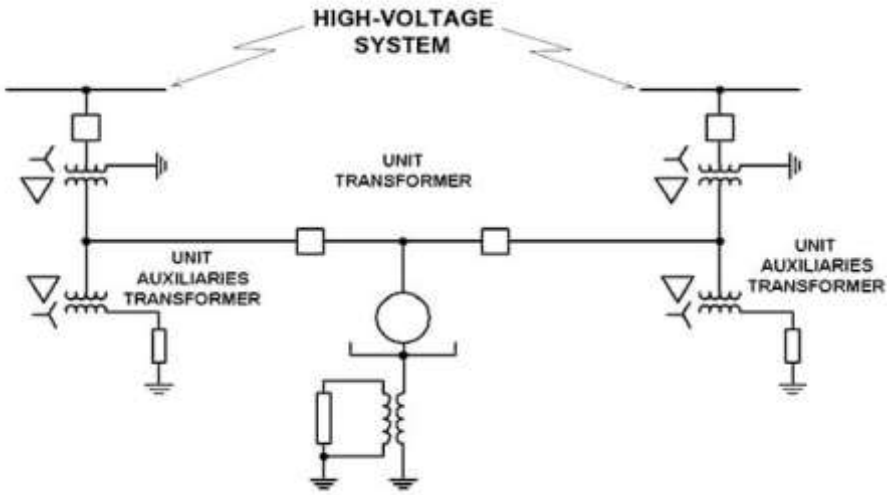
۲-۳- نحوه حفاظت از ژنراتور از طریق تشخیص جریان خطا

حفاظت ژنراتورهای نیروگاهی معمولاً در دو حالت بررسی می‌شود. در حالت اول که به‌صورت اتصال واحد در نظر گرفته می‌شود، هر ژنراتور دارای ترانسفورماتور مخصوص به خود است. به‌طوری‌که ژنراتور و ترانسفورماتور یک واحد الکتریکی را تشکیل می‌دهند. بنابراین این واحد به یک حفاظت واحد نیز مجهز می‌شود. این نوع اتصال برای ژنراتورهای با قدرت بالا بسیار مناسب هستند. شکل ۳-۱ نحوه اتصال واحد و شکل ۳-۲ نحوه اتصال مجزا ژنراتور و ترانسفورماتور را نمایش می‌دهد. حالت دوم که به اتصال شین معروف است، ژنراتورها دارای ترانسفورماتور مخصوص به خود نیستند. در این حالت انرژی ژنراتورها مستقیماً به شین منتقل می‌شود و سپس به کمک یک یا چند ترانسفورماتور، انرژی لازم از شین‌ها گرفته می‌شود.



شکل (۳–۱): پیکربندی واحد ژنراتور و ترانسفورماتور

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل (۳-۲): پیکربندی مجزا برای ژنراتور و ترانسفورماتور

عمده خطاهایی که در ژنراتورها ایجاد می‌شوند در اثر نقص ایزولاسیون و عایق‌بندی قسمتی از سیم‌پیچ‌های ژنراتور و کابل‌های رابط آن و یا بر اثر عوامل خارجی هستند. بنابراین می‌توان حفاظت ژنراتور را به دو بخش تقسیم کرد [۷]:

- حفاظت در برابر خطاهای داخلی
- حفاظت در برابر عوامل خارجی غیر مجاز

۱-۲-۳- حفاظت در برابر خطاهای داخلی

خطاهای داخلی خود نیز به بخش خطاهای روتور و استاتور تقسیم می‌شوند. از جمله خطاهای قابل‌وقوع در استاتور می‌توان به اتصال دوفاز، اتصال حلقه، اتصال زمین، اتصال دو فاز به زمین اشاره کرد. خطاهای ممکن برای روتور نیز شامل اتصال به زمین، قطع تحریک هستند.

۱-۱-۲-۳- اتصال دو فاز

اتصال دوفاز در داخل ژنراتور معمولاً در اثر شکستن و خرد شدن عایق‌بندی به‌وجود می‌آید. از طرفی اتصال یک فاز به بدنه در داخل ژنراتور و اتصال فاز دیگر به زمین نیز یک نوع اتصال دو فاز به‌شمار می‌آید. اگر اتصال دو فاز در داخل ژنراتور باشد، جریان اتصال کوتاه بین دو نقطه‌ی اتصالی اولاً توسط خود ژنراتور به‌وجود می‌آید، که به آن جریان اتصال کوتاه داخلی گفته می‌شود و ثانیاً توسط ژنراتوری که با این ژنراتور به‌طور موازی کار می‌کند. جهت تشخیص این نوع خطا از دو روش مرسوم زیر استفاده می‌گردد:

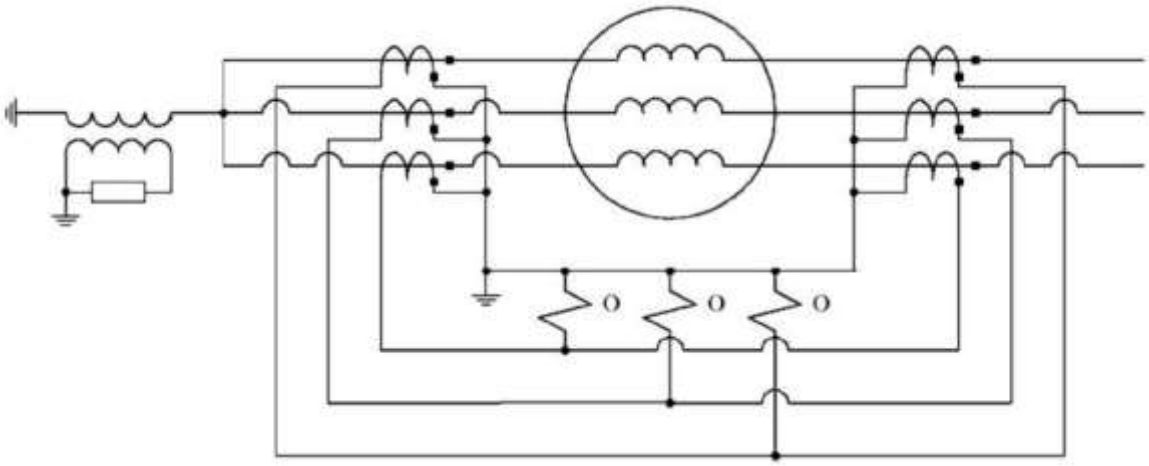
- رله دیفرانسیل
- رله جریان زیاد زمانی

ازآنجایی‌که اتصال دو فاز در داخل ژنراتور همیشه سبب عبور جریان اتصال کوتاه زیادی از نقطه‌ی صفر ستاره ژنراتور می‌شود، می‌توان با سنجش این جریان توسط رله‌ی جریان زیاد زمانی از وقوع این نوع اتصال آگاهی پیدا کرد. در این حالت رله‌ی جریان زیاد زمانی بر روی سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور جریانی که در

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

نقطه‌ی صفر ژنراتور بسته شده است نصب می‌گردد. البته این رله نمی‌تواند تشخیص دهد که اتصال دو فاز در داخل ژنراتور و یا در خارج ژنراتور اتفاق افتاده است، و چون کلید اصلی ژنراتور نباید در اثر خطاهای خارجی بلافاصله و بی‌موقع قطع شود، بنابراین باید زمان قطع این رله خیلی زیاد باشد. شدت جریان کار رله باید مقداری کمتر از اتصال کوتاه دائمی ژنراتور در حالت تحریک بار کامل تنظیم شود و نسبت به نوع ماشین، این مقدار اغلب ۱/۲ تا ۱/۶ برابر جریان نامی ژنراتور است.

برای تعیین اتصال دو فاز داخلی و حفاظت ژنراتور در مقابل اثرات نامطلوب آن، رله دیفرانسیل مناسب‌ترین راهکار است. همان‌طور که در شکل ۳-۳ مشاهده می‌شود، بر روی هر فاز در دو طرف ژنراتور یک ترانسفورماتور جریان نصب شده است و طرف ثانویه این ترانسفورماتورها به‌طور هم‌نام به یکدیگر متصل شده‌اند و از محل اتصال آنها انشعاباتی برای رله‌ی دیفرانسیل گرفته شده است. در شرایط عادی که جریان در هر دو طرف یکسان است ولتاژ سه سر سیمی که به رله دیفرانسیل وارد می‌شود برابر صفر بوده و رله بدون جریان است.



شکل (۳-۳): نحوه اتصال رله دیفرانسیل برای تشخیص خطای دو فاز

در موقع اتصال کوتاه بین دو فاز داخلی ژنراتور، جریان از ترانسفورماتورهای جریان عبور کرده و چون این جریان‌ها از حالت عادی (برابری) خارج شده‌اند، اختلاف جریان‌ها از رله دیفرانسیل عبور می‌کنند و رله دیفرانسیل تحریک شده و سبب قطع کلید ژنراتور و برداشت تحریک آن می‌شود. جهت تنظیم رله دیفرانسیل باید تفاوت جریان‌ها را برابر با ۱۰ الی ۲۰ درصد جریان نامی در نظر گرفت.

۲-۱-۲-۳-اتصال زمین

اتصال پیدا کردن سیم‌پیچ استاتور ژنراتورهای ولتاژ بالا با بدنه‌ی فلزی ماشین در اثر عدم عایق‌بندی درست به‌وجود می‌آید. در اثر این اتصالی اگر نقطه‌ی صفر شبکه نسبت به زمین عایق باشد، یک جریان خازنی از زمین عبور می‌کند که مقدار آن خیلی کم است. اگر میزان این جریان بیشتر از ۲۰ آمپر باشد اثرات نامطلوبی بر روی آهن استاتور خواهد گذاشت. علاوه بر این، اتصال به زمین یک فاز باعث بالا رفتن ولتاژ الکتریکی فاز سالم نسبت به زمین شده و این ازدیاد ولتاژ می‌تواند باعث اتصال به بدنه در دیگر فازها شود. بنابراین در صورت وقوع چنین

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

اتصالی حتی در قسمت‌های نزدیک نقطه صفر ستاره که در آن جریان اتصالی خیلی کم است، باید بلافاصله ژنراتور از مدار خارج شود و تحریک آن نیز سریعاً قطع شود.
در حالت اتصال واحد، چون سیم‌پیچ‌های ژنراتور با شبکه ارتباط مستقیم فلزی ندارند، شدت جریان اتصال زمین به محل اتصال بستگی دارد. اگر اتصال در سمت فشار ضعیف (در طرف اولیه ترانسفورماتور و در خود ژنراتور) باشد، شدت جریان اتصال به زمین به مراتب بیشتر از حالتی خواهد بود که اتصال در سمت فشار قوی ترانسفورماتور صورت گیرد. در ضمن شدت جریان اتصال به زمین به محل اتصال‌شده در داخل ژنراتور نیز بستگی دارد، هرچقدر محل اتصال‌شده به نقطه‌ی صفر ستاره نزدیک‌تر باشد، شدت این جریان کمتر خواهد بود.

در حالت کلی و برای تشخیص سریع اتصالات زمین با امپدانس‌های مختلف در قسمت استاتور ژنراتور رله دیفرانسیل امپدانس بالا[1] به‌کار گرفته می‌شود. همان‌طور که از اسم این رله مشخص است، با استفاده از این رله امپدانس حفاظت دیفرانسیلی افزایش می‌یابد. این رله به‌وسیله نشانگرهای موجود محل خطا (داخل ژنراتور یا خارج ژنراتور) را نمایش می‌دهد. در خطاهای خارجی ولتاژ در رله کمتر خواهد بود، درحالی‌که برای خطاهای داخل ژنراتور ولتاژ اعمال‌شده به رله بسیار بالا است. جریان کار رله در حدود ۲ درصد کمتر از جریان حالت نامی ژنراتور تنظیم می‌شود. این رله نسبت به رله دیفرانسیل معمولی حساسیت بسیار بالایی دارد و نسبت به عوامل خارجی به شدت حساس است.

۳-۳- حفاظت در برابر خطاهای خارجی

- **حفاظت ژنراتور در اثر بار زیاد**

حرارت بیش از حد مجاز تحمیل‌شده به ژنراتور چه ناشی از بار زیاد و چه در اثر نقص سیستم خنک‌کننده، سبب آسیب به عایق‌بندی سیم‌پیچ‌های ژنراتور و در نتیجه کاهش عمر ژنراتور می‌شود. در بسیاری از موارد جهت کنترل اضافه بار از یک رله حرارتی که معمولاً با رله جریان زیاد ادغام می‌شود، استفاده می‌شود.

- **حفاظت ژنراتور در مواقع بروز اتصال کوتاه در شبکه**

در صورتی‌که در شبکه اتصال کوتاهی رخ بدهد، ژنراتور شبکه را در محل خطا تغذیه خواهد نمود. شدت جریان تزریقی علاوه بر امپدانس مدار اتصال یافته به شدت جریان تحریک ژنراتور در حین اتصال کوتاه نیز بستگی دارد. وقوع اتصال کوتاه در شبکه سبب افت ولتاژ ژنراتور خواهد شد که این پارامتر خود یکی از عوامل شناسایی وقوع اتصال کوتاه در شبکه است. جهت حفاظت ژنراتور در برابر جریان‌های بسیار زیاد همانند جریان اتصال کوتاه در شبکه می‌توان از رله‌ی جریان زیاد و یا رله‌ی دیستانس استفاده کرد.

- **حفاظت لغزش قطب ژنراتور**

در سیستم‌های انتقال، قابلیت لغزش قطب در ژنراتورهای اصلی خیلی کم است، به این خاطر که این معیار طی دهه اخیر دقیق‌تر شده است. روند فعلی برای اتصال ژنراتورهای سنکرون کوچک و متوسط که به‌صورت موازی با شبکه اصلی کار می‌کنند، شرایط احتمالی خرابی زیادی را برای این ماشین‌ها به‌وجود آورده است.

---

۱ *High-impedance differential relay*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

افزایش میزان تولید داخلی متصل به خطوط فرعی و سیستم توزیع برق باعث شده است که سیستم حفاظت لغزش قطب که قبلاً برای این ماشین‌ها تعبیه نمی‌شد، موردتوجه قرار گیرد. لغزش قطب می‌تواند به دلیل اختلال‌های خارجی نظیر خطاهایی که مدت‌زمان رفع آن‌ها طولانی است، تحریک خطادار، حذف تحریک، و یا اضافه توان ورودی تحریک اولیه ناشی از بروز اضافه‌بار و یا قطع ناگهانی بار و غیره، رخ دهد. این مسئله می‌تواند مشکلات جدی نظیر گشتاورهای نوسانی شدید تولیدشده در شرایط لغزش قطب را به‌وجود آورد که سبب تحریک شدید بخش شفت ژنراتور شده و موجب وارد شدن ضربه‌های نوسانی به آن شود. لغزش قطب در یک ماشین سنکرون در واقع در حالتی رخ می‌دهد که گشتاور الکترومغناطیسی ناکافی وجود دارد که باعث می‌شود شار مغناطیسی روتور و استاتور در حالت سنکرون با هم نباشند. دلیل این مسئله در واقع عدم تعادل میان توان مکانیکی و توان الکتریکی یک ماشین سنکرون است. لغزش قطب یا بین ژنراتورها و سیستم‌های اصلی رخ می‌دهد و یا بین دو بخش از سیستم اصلی، که در نتیجه باعث جاری شدن توان سنکرون شده می‌شود که در جهت قطب و در سیکل‌های دو برابر هر سیکل لغزش، جاری می‌شود. لغزش قطب برای هر ماشین سنکرون با هر اندازه‌ای، همیشه سبب بروز مشکلاتی خواهد شد و زمانی که لغزش قطب ماشین موردنیاز است، تا ماشین در کمترین زمان ممکن از شبکه قطع شود، این شرایط سبب جاری شدن جریان‌های شدید شده و روی سیم‌پیچ‌های ژنراتور تأثیر می‌گذارد و باعث به‌وجود آمدن سطوح شدیدی از گشتاورهای حالت گذرای شفت می‌شود. ژنراتورهای کوچک و صنعتی باید به سرعت، زمانی که تحت شرایط شیفت زاویه ناخواسته در انتهای خود قرار می‌گیرند، از مدار خارج شوند. ژنراتورهای بزرگ حفظ پایداری شبکه را بر عهده دارند. قطع آن متناسب با عملکرد سیستم‌های حفاظتی شبکه قدرت است. حفاظت در مقابل لغزش قطب هنگامی موردنیاز است که ژنراتور حالت سنکرون خود را با منبع تغذیه شبکه اصلی از دست داده و در نتیجه باعث بروز نوسان‌های شدید در جریان عبوری از شبکه می‌شود.

- **لغزش ژنراتور**

سرعت زاویه‌ای ژنراتور و یا همان لغزش آن را می‌توان برحسب درجه در ثانیه و یا بر حسب سیکل در ثانیه تعیین کرد که در روش مرجع،۳۶۰ درجه برابر با یک سیکل لغزش است. برای ژنراتورهای پشت سر هم، لغزش متوسط در نیم‌سیکل اول لغزش در حالت کلی در محدوده ۲۵۰ تا ۴۰۰ درجه در ثانیه است (۰/۶۹۴ تا ۱/۱۱ سیکل در ثانیه) درحالی‌که برای واحدهای کمپوند، لغزش اولیه متوسط در محدوده ۴۰۰ تا ۸۰۰ درجه در ثانیه (۱/۱۱ تا ۲/۲۲ سیکل در ثانیه) است. در هر دو نوع ژنراتور، لغزش متوسط در سیکل‌های لغزش باقی‌مانده در محدوده ۱۲۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه در ثانیه (۳/۳۳ تا ۴/۴۴ سیکل در ثانیه) قرار می‌گیرد. باید خاطرنشان کرد که این لغزش‌ها مقادیر تقریبی هستند. لغزش واقعی به‌صورت پیوسته با زمان تغییر می‌کند و تابعی از اینرسی اولیه ماشین و نیز مدت‌زمانی است که طول می‌کشد تا خطا رفع گردد. در حالت کلی، هر چه مدت‌زمان رفع خطا طولانی‌تر باشد، لغزش اولیه بیشتر است. یک نکته قابل‌توجه این است که اضافه سرعت ژنراتور در صورت از بین رفتن حالت سنکرون برابر با یک پالس در واحد لغزش است که در آن لغزش پریونیت برابر یا سیکل در ثانیه تقسیم‌بر ۶۰ است که همان فرکانس مبنا است. بنابراین اگر یک ژنراتور دارای سرعت زاویه‌ای ۴ سیکل در ثانیه

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

باشد، سرعت پریونیت ماشین یعنی S برابر $S = 1 + \frac{-4}{60} = 1.067$ پریونیت است و یا به عبارت دیگر، ماشین تحت اضافه سرعت ۶/۷٪ کار می‌کند.

- **نکات مهم در تنظیم**

تکنیک‌های خنک‌کننده پیشرفته امپدانس ژنراتور را افزایش داده است زیرا امپدانس کلی سیستم به دلیل تقویت کاهش می‌یابد. این تغییرات باعث شده است تا مراکز الکتریکی از سیستم انتقال به GSU و خود ژنراتور منتقل شوند. بنابراین، این مسئله استفاده از سیستم حفاظت خارجی در ژنراتور را ضروری می‌کند. نگرانی عمده استفاده از الگویی برای نوسانات شدید اما پایدار است. پیش از این، محافظت خارجی فقط بر روی سیستم انتقال اعمال می‌شد و روی سیستم تولید اثرگذار نبود. بروز حادثه در سیستم برق مانند خطاها، از مدار خارج شدن ناگهانی واحد بزرگ یا مسیر انتقال می‌تواند باعث آشفتگی شدید سیستم شود که سیستم حفاظت خارجی را به چالش می‌کشاند. در چنین شرایطی، از مدار خارج شدن ژنراتور به دلیل سوء عملکرد یک الگوی رله می‌تواند یک رویداد قابل‌بازیابی را به یک حادثه بزرگ سیستمی تبدیل کند. درنتیجه، عملکرد سیستم حفاظتی خارجی در یک ژنراتور نباید برای نوسانات قابل‌بازیابی وارد عمل شود.

در حالت گذرای سیستم، جریان ژنراتور و ترانسفورماتور GSU با افزایش اختلاف زاویه‌ای بین ژنراتور و سیستم افزایش می‌یابد. در حداکثر اختلاف زاویه ۱۸۰ درجه، جریان می‌تواند از سطح خطای سه‌فاز در ترمینال‌های ژنراتور فراتر رود. استفاده مکرر از چنین جریانات با توان زیاد و گشتاور مکانیکی شدید در هر سیکل لغزش می‌تواند به توربین، ژنراتور و ترانسفورماتور GSU صدمه بزند. در حالت ایدئال، محافظت خارجی باید برای قطع ژنراتور در سیکل اول لغزش پیش از جداسازی کامل جریان پیک وارد عمل شود. لزوم جلوگیری از قطع تحت شرایط نوسانات پایدار و مداخله زودهنگام برای محدود کردن جریان فعلی امری مطلوب است. تنظیمات حاصل، بسته به نوع الگوی حفاظت خارجی بستگی دارد که ممکن است به مصالحه نیاز داشته باشد. در چنین مواردی، قابلیت اطمینان ژنراتور معمولاً دارای اولویت بیشتر و محدودسازی جریان دارای اولویت کمتر است.

- **نوسانات قابل بازیابی**

محافظت خارجی باید به‌گونه‌ای تنظیم شود که در صورت از دست رفتن پایداری سیستم را قطع کند. در پی اختلال در سیستم، روتورهای ژنراتور دچار اختلال زاویه‌ای می‌شوند، چرا که سعی در تنظیم وضعیت عملیاتی جدید در حالت پایدار دارند. در یک سیستم پایدار، نوسانات روتور کاهش می‌یابد. جابه‌جایی زاویه‌ای اولیه بزرگ‌ترین است و با هر چرخش روتور بعدی نوسانات زاویه‌ای از نظر اندازه کاهش می‌یابد تا زمانی که زاویه روتور به حالت پایدار برسد. با افزایش شدت اختلال، اختلاف زاویه‌ای اولیه نیز اتفاق می‌افتد. در هر سیستمی، زاویه نوسان بیشینه‌ای وجود دارد که سیستم قادر به بازیابی آن نیست.

برخی از الگوهای حفاظت خارجی فقط برای شرایط پس از، از دست رفتن حالت سنکرون طراحی شده‌اند. سایر طرح‌ها قبل از اولین لغزش قطب (قبل از اختلاف زاویه ۱۸۲ درجه) با حداکثر زاویه نوسان پایدار وارد عمل می‌شوند. در حالت دوم، تنظیمات دشوار است. زاویه بحرانی و مسیرهای مقاومت امپدانسی، ثابت نیستند و با شرایط سیستم و محل خطا به‌شدت تغییر می‌کنند. بهترین روش برای تعیین زاویه نوسان بحرانی، مدل‌سازی

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

سیستم با استفاده از یک برنامه پایداری گذرا است. نمایش سیستم باید دارای بارهای سیستم، کلیه ژنراتورها، تنظیم‌کننده ولتاژ و کنترل گاورنر در یک منطقه بزرگ اطراف ماشین‌های الکتریکی موردنظر باشد. سپس این سیستم با استفاده از خطاهای نقاط بحرانی با استفاده از حداکثر زمان بازیابی پیش‌بینی‌شده، تست می‌شود. این خطاها در سطوح مختلف بار، تنظیمات سیستم و ترکیب تولید، برای تعیین شدیدترین نوسانات موردنظر اعمال می‌شوند. محل مقاومت امپدانسی حاصل از این موارد تست در مرحله بعدی برای تنظیم رله حفاظت خارجی مورداستفاده قرار می‌گیرد. متأسفانه، ابزارهای مدل‌سازی پایداری حالت گذرا و زمان استفاده از آن‌ها در دسترس همگان نیست و روش‌هایی اغلب استفاده می‌شوند که از دقت پایین‌تری برخوردارند.

در صورت نبود داده‌های پایداری گذرا، یک فرض کلی در نظر گرفته می‌شود که جابه‌جایی فراتر از ۱۲۰ درجه قابل‌بازیابی نیست و بروز ناپایداری قریب‌الوقوع است. درنتیجه، محافظت خارجی غالباً به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که وقتی امپدانس از این مقدار تجاوز کند، شروع به قطع سیستم کند. ساختار گرافیکی مکان نوسان برای تعیین محل ۱۲۰ و ۲۴۰ درجه در صفحه R-X استفاده می‌شود. هر دو مورد ضروری هستند زیرا نوسانات ممکن است مشخصه‌های رله را از هر جهت تغییر دهد. حداقل امپدانس سیستم باید در این محاسبه لحاظ شود، زیرا دامنه نوسانات بر اساس آن تعیین می‌شود. تنظیمات به‌دست‌آمده باید مناسب باشد تا رنج نسبت ولتاژ n از ۰/۶۵ به ۱/۵ را در خود جای دهد. این کار برای پوشش ولتاژ داخلی دستگاه‌های تحت کنترل تنظیم‌کننده دستی و افزایش ولتاژ دستگاه‌های تحت کنترل اتوماتیک است. عامل دیگر، که باید در مراحل تنظیم موردتوجه قرار گیرد، تغییر امپدانس ژنراتور با لغزش است. امپدانس ژنراتور، همراه با رأکتانس سیستم و رأکتانس ترانسفورماتور GSU، مسیر نوسان را تعیین می‌کند. در یک لغزش صفر، امپدانس ژنراتور معادل X_d خواهد بود. در ۱۰۰٪ لغزش $X_g = X_d^{''}$ است. مطالعات نشان داده‌اند که میزان لغزش برای شرایط عادی از دست رفتن حالت سنکرون بین ۵۰ تا ۰/۳۳ درصد است. این مربوط به تغییرات امپدانس ژنراتور از $X_d^{'}$ به $2X_d^{'}$ است. مقدار $X_d^{'}$ به‌طور معمول در ساخت مکان هندسی نوسان استفاده می‌شود زیرا امپدانس‌های پایین‌تر، وسعت نوسان کوچک‌تری را تولید می‌کنند. تنظیم سیستم حفاظتی باید حاوی مقدار حدی کافی را برای تعیین مکان هندسی ناشی از نوسانات کندتر با امپدانس مؤثر ژنراتور در نزدیکی $2X_d^{'}$ داشته باشد.

- **محدودیت جریان**

متأسفانه برای جلوگیری از عملکرد نوسانات پایدار در سیستم، یک تنظیم زاویه‌ای بالا لازم است. این تنظیم، محدودیت جریان را تسهیل نمی‌کند. با استفاده از الگوی حافظت خارجی تنظیم شده تحت ۱۲۰ درجه، اختلاف ولتاژ در سیستم به $\sqrt{3}$ برابر مقدار اسمی می‌رسد. این مقدار، جریان را تا ۸۶٪ حداکثر جریان ۱۸۰درجه محدود می‌کند. اگر فرض شود که استرس‌های حرارتی و مکانیکی تابعی از مربع جریان هستند، با قطع تحت ۱۲۰درجه سبب کاهش استرس‌های ترانسفورماتور GSU ژنراتور به میزان حداکثر ۷۵٪ می‌گردد.

- **سرعت نوسانات**

نکته دیگر حداکثر سرعت نوسان پیش‌بینی‌شده است. الگوهای تشخیص خارجی از زمان‌بندی استفاده می‌کنند تا بین تغییرات امپدانس سیستم ناشی از یک خطا و تغییرات ناشی از یک نوسان، تمایز قائل شوند. یک خطا، در همه شرایط، امپدانس سیستم را به‌طور لحظه‌ای تغییر می‌دهد درحالی‌که تغییر امپدانس در حالت

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

گذرای سیستم توسط ثابت زمانی‌های ژنراتور و اینرسی محدود می‌شود. زمان‌بندی الگوی موردنظر باید سریع‌ترین نوسان پیش‌بینی‌شده را تشخیص دهد. سرعت نوسان در سیکل لغزش قابل‌شناسایی نیست. سرعت در سیکل اول لغزش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا سیکل در واقع زمانی است که شناسایی سیستم حفاظت خارجی رخ می‌دهد.

۱-۳-۳- روش‌های حفاظت در مقابل لغزش قطب

لغزش قطب را می‌توان به‌سادگی با اندازه‌گیری مستقیم زاویه بار در ماشین سنکرون مشاهده کرد اما این روش مستلزم سنسورها و تجهیزات اضافی برای اندازه‌گیری است. روش‌های مشخصی وجود دارند که از ماشین‌های الکتریکی در مقابل خطرات ناشی از لغزش قطب بدون چنین تجهیزات حفاظتی، محافظت می‌کنند. در روش‌های کلاسیک برای تعیین لغزش قطب، تغییرات امپدانس ظاهری یک ژنراتور را که از سر ترمینال‌های آن دیده می‌شود، بررسی کرده و عموماً بر اساس رله‌های نوع دیستانس اعمال می‌کنند که ترکیبی از MHO و مشخصه‌های خطی هستند که در [۸] توضیح داده شده است.

پیش‌نیازهای سیستم حفاظت در مقابل لغزش قطب

- تشخیص دقیق لغزش‌های قطب اولیه و نتایج آن برای مودهای تولید مصرف
- تشخیص نرخ لغزش قطب در بازه ۰/۱٪ تا ۱۰٪

تمایز میان لغزش‌های قطب رخداده با یک سیستم مرکزی در امپدانس ماشین و سیم‌پیچ‌های ترانس افزاینده آن سیستم (پله ۱) و لغزش‌های شیفت رخداده با یک سیستم مرکزی میان ترمینال‌های ترانسفورماتور فشار قوی (پله ۲).

۴-۳- انواع الگوهای حفاظت out of step

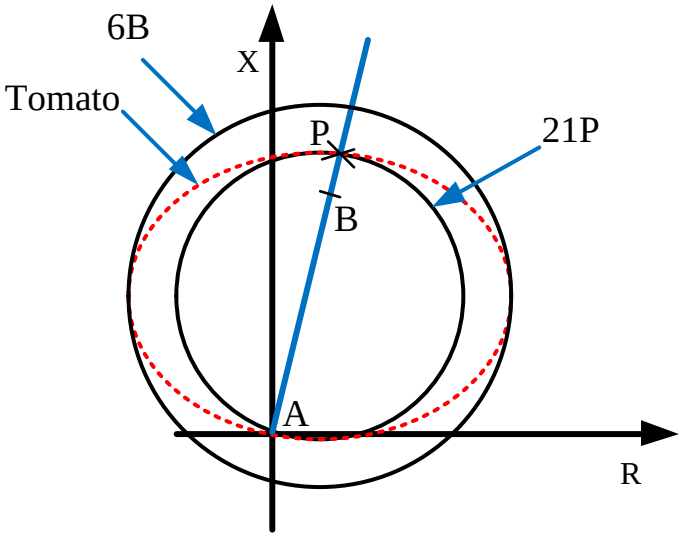
برخی از سیستم‌های واقعی مورداستفاده در الگوی رله‌های OS به‌صورت زیر توصیف می‌شوند:

- **الگوی دایره‌های هم‌مرکز**

الگوی دایره‌های هم‌مرکز برای تشخیص OS در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. به‌طور معمول، رله OS با مشخصه نشان‌داده‌شده همانند ۶۸، به سیستم رله خط انتقال اضافه شده و المانی که به حالت اضافه ولتاژ (جریان) می‌رسد را احاطه می‌کند، نظیر $21P$. به خاطر وجود اینرسی چرخان سیستم، زمان زیادی لازم است تا زاویه گشتاور افزایش یافته و محل نوسانات نیز از ۶۸ به $21P$ برسد. برای خطایی که در محدوده $21P$ رخ می‌دهد، هر دو المان لزوماً هم‌زمان عمل می‌کنند. واحد منطقی رله، توالی را شناسایی کرده و خطا و یا نوسان را تشخیص می‌دهد و عکس‌العمل مقتضی را آغاز می‌کند. کمان‌های نقطه‌چین دایره‌ها که به‌عنوان مشخصه‌های «*tomato*» نامیده می‌شوند، در واقع پیاده‌سازی آنالوگ مشخصه‌های «*tomato*» هستند. این الگو برای مسدودسازی عملکرد قطع OS و یا مسدودسازی عملکرد وصل مجدد، مناسب خواهد بود. اما این الگو برای قطع OS مناسب نیست، مگر آنکه یک واحد منطقی دیگر به سیستم رله اضافه شود. اگر خطای خارجی فاز نزدیک به محدوده‌ی $21P$ رخ دهد، مانند نقطه‌ی P مشخص‌شده روی شکل به خاطر پایین بودن سطح انرژی آن نقطه است رله با تأخیر عمل می‌کند. از سوی دیگر محدوده‌ی ۶۸ دارای سطح انرژی به‌شدت بالاتری است و بسیار سریع‌تر از $21P$ عمل می‌کند. با حذف جریان *infeed* ورودی به خطای خارجی پس از ناتوانی قطع

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مدار، می‌توان عملکرد متوالی المان‌های حفاظتی ۶۸ و *21P* را مدیریت نمود. اگر مدت‌زمانی که واحد منطقی بروز خطا را تشخیص می‌دهد کوتاه‌تر از اختلاف زمانی عملکرد دو المان باشد، خطا در نقطه *P* به‌صورت غلط به‌عنوان شرایط *OS* تشخیص داده شده و باعث قطع اشتباه *A* می‌شود. اگر برای جلوگیری از بروز این شرایط زمان را افزایش دهیم، نوسانات سریع *OS* به‌وجود می‌آید که از قطع واحد *OS* جلوگیری خواهد کرد. با اضافه کردن دایره مرکزی سوم تفکیک شرایط نوسانی و شرایط خطا بهتر صورت خواهد گرفت، اما این دایره دارای یک بار اهمی اضافه خواهد بود. قطع *OS* با استفاده از الگوی دو دایره هم‌مرکز قابل‌پیاده‌سازی است، درصورتی‌که عملکرد متوالی *68/21P* بررسی شده و توالی تنظیم مجدد نیز صحیح باشد. برای کاربردهای خطوط دارای سه باس، تأثیر نامطلوبی روی رله‌های مسدودسازی مبتنی بر *OS* خواهد داشت. این رله‌ها درصورتی‌که خطای سه‌فاز در مرحله بعدی رفع گردد، از الگوی دایره هم‌مرکز استفاده می‌کنند.



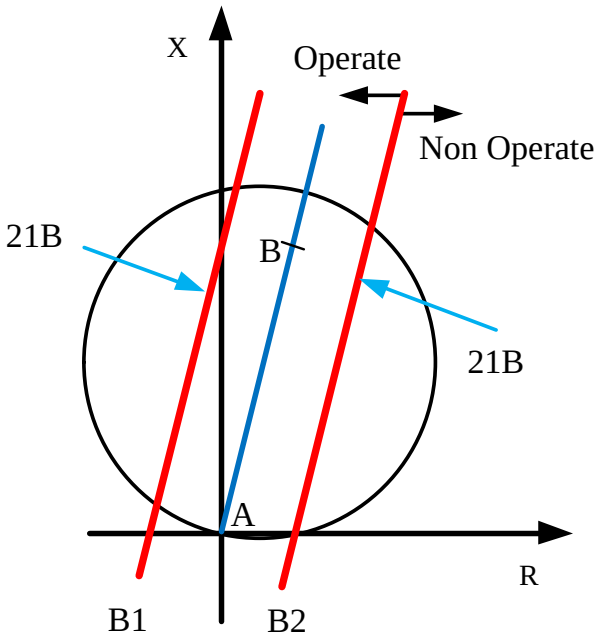
شکل (۳-۴): روش دایره‌های هم‌مرکز برای تشخیص OS

- **الگوی *Blinder***

یکی از انواع رله *Blinder* دارای مشخصه‌هایی است که در دیاگرام *R-X* خط انتقال (شکل ۳-۵) از خطوط موازی تشکیل شده‌اند. یک رله تک *Blinder*، مثل *21B*، دو مشخصه خطی را ارائه می‌کند. یک کاربرد مشخص این المان، برای محدودسازی پوشش رله دیستانس در محل بار است. یک رله تک *Blinder* به همراه واحد منطقی کمکی را می‌توان برای عملکرد قطع *OS* به‌کار برد. استفاده از این ساختار، تنها به کاربردهایی محدود است که در آن عملکرد مسدودسازی قطع رله‌های دیستانس فاز موردنیاز است، به این خاطر که نوسانات عبوری از این بخش خط (در نمودار *R-X*) باعث عملکرد رله‌های خط خواهد شد. یک رله *Blinder* واحد قادر نیست شرایط خطا و شرایط بروز *OS* را تا زمانی که توالی تنظیم مجدد رله تأیید شود، متمایز کند. چنین الگویی عملکرد قطع *OS* را تا زمانی که نوسانات به‌طور کامل از موقعیت *180* درجه عبور نکرده و به شرایط هم‌فاز برنگردد، به تأخیر خواهد انداخت. ساختار المان *OS* تک *Blinder* به این خاطر توصیه شده است که باعث می‌شود سیستم در اثر قطعی خط، به بخش خطادار و سالم تقسیم شود و بخش

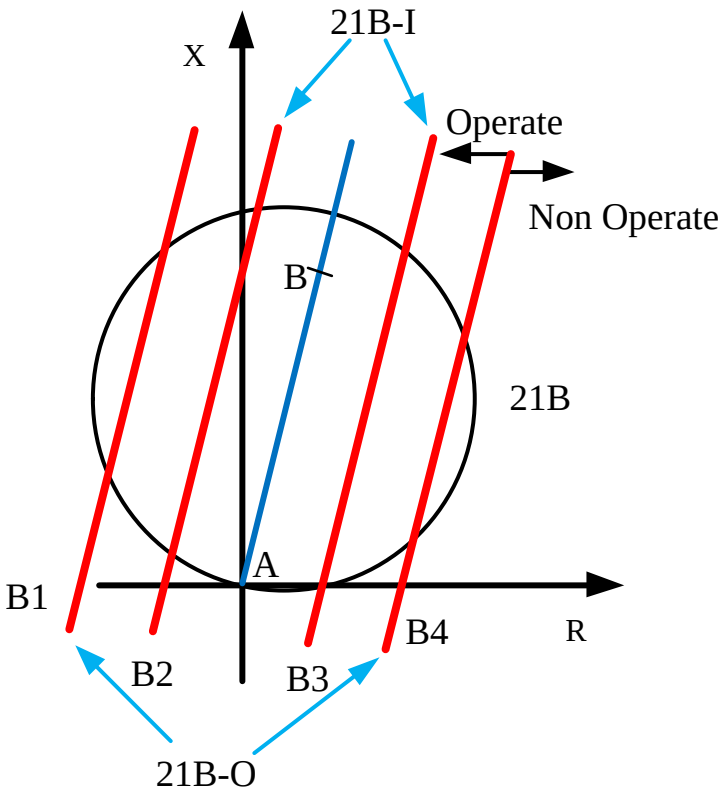
DOI: 10.30503/nripress.2020.151

سالم خط نیز توسط رله‌های مقایسه‌فاز، حفاظت می‌شود. یک کاربرد دیگر این المان، قطع *OS* روی نوسانات عبوری از رله‌های خط است. در نهایت، این الگوی رله برای کاربردهای قطع *OS* نزدیک ژنراتور نصب می‌شود. الگوی دو *Blinder* (شکل ۳-۶) شرایط *OS* را با مشاهده ترتیب عملکرد *Blinder*های داخلی و خارجی، تشخیص می‌دهد. خطا باعث عملکرد هم‌زمان می‌شود. همچنین بروز شرایط *OS* نیز باعث می‌شود که *Blinder* ی خارجی اول از همه عمل کرده، و در ادامه نیز *Blinder* ی داخلی وارد عمل شود. الگوی دو *Blinder* امکان محدودسازی ناحیه قطع رله‌های دیستانس، مسدودسازی قطع *OS*، مسدودسازی قطع مجدد *OS* و یا تریپ‌زنی *OS* را صرف‌نظر از جهت نرمال پخش بار، فراهم خواهد کرد. انواع مختلف و شکل‌های مختلف مشخصه‌ها را می‌توان به‌منظور انتخاب سیستم حفاظتی به‌کار برد، نظیر سیستم‌های حفاظتی دارای یک یا دو *Blinder* ، *MHO* و یا مشخصه‌های عدسی. الگوی *MHO* به شکل بهره‌برداری در حین نوسانات پایدار حساس است، به‌گونه‌ای که اگر مشخصه‌ها خیلی بزرگ باشند، این حساسیت بیشتر می‌شود. همچنین این روش ممکن است در شناسایی برخی از خطاهای لغزش قطب ناتوان باشد، درصورتی‌که تأخیرهای زمانی به‌منظور جلوگیری از قطع سیستم در شرایط نوسانی پایدار، استفاده شوند. الگوی تک *Blinder*، ایمن‌ترین الگوی متداول است اما هزینه‌ای که باید برای نصب این سیستم اضافه در مقابل عملکرد غلط سیستم پرداخت این است که یک سیکل لغزش قطب کامل برای عملکرد این روش حفاظتی، موردنیاز است. مشخصه *Blinder* دوبل، دارای امنیت کمتری نسبت به الگوی تک *Blinder* است، و ممکن است در شناسایی لغزش قطب اول که در ادامه بروی یک خطای نزدیک به ماشین، رخ می‌دهد، ناتوان باشد. نظیر الگوی تک *Blinder* ، این مدل نیز به یک سیکل لغزش قطب کامل برای عملکرد دقیق نیاز دارد.



شکل (۵-۳): روش تک Blinder برای تشخیص OS

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل (۳–۶): روش دوبل Blinder برای تشخیص OS

- **الگوی عملی حفاظت out of step**

الگوی پیشنهادشده برای ژنراتوری که سیستم حفاظت سنکرون خود را از دست داده است، الگوی *blinder* *CEX-CEB* است. این الگو از سه واحد اندازه‌گیری امپدانس و یک مدار منطقی برای بررسی تغییرات متوالی امپدانس در شرایط از بین رفتن حالت سنکرون استفاده می‌کند تا احتمال خروجی ژنراتور را هنگامی که زاویه بین ولتاژ ژنراتور و ولتاژ سیستم برابر ۹۰ درجه و یا کمتر است، به صفر برساند. سوئیچ‌زنی‌های کلیدهای حفاظتی معمولاً در این زاویه (۹۰ درجه و یا کمتر) توصیه می‌شود تا دوره کار قطع‌کن‌های مدار را به حداقل برساند. هنگامی که این الگو به‌دقت اعمال شود، می‌تواند از خروج ژنراتور در نیم سیکل اول لغزش تحت شرایط عدم سنکرون، جلوگیری کند. ازآنجایی‌که از بین رفتن حالت سنکرون در اصل یک پدیده سه‌فاز متعادل است، واحدهای رله مورداستفاده در این الگو تنها به شکل تجهیزات تک‌فاز خواهند بود.

۳-۵- حفاظت فرکانسی غیر نرمال ژنراتور

بهره‌برداری تحت فرکانس *60Hz* در شرایط نرمال حاصل اتصال ژنراتور به سیستم قدرت است. بهره‌برداری در فرکانس‌های بیشتر هنگامی رخ می‌دهد که تولید از حد لازم فراتر رود. این شرایط در نتیجه خروج بخشی از بار اصلی و یا خط انتقال اصلی که حامل توان الکتریکی است، رخ می‌دهد. برعکس، بهره‌برداری در فرکانس کم در نتیجه کمبود تولید که حاصل خروج یک ژنراتور بزرگ از مدار و یا بخش مهمی از خط انتقال است، رخ می‌دهد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- **تأثیر روی ژنراتور**

اثرات فرکانس غیر نامی روی ژنراتور کمتر از اضافه فرکانس و یا نقصان فرکانس است. به این خاطر که شرایط اضافه فرکانس در نتیجه اضافه‌تولید رخ می‌دهد، و می‌توان آن را به سرعت با کاهش توان خروجی از طریق کنترل دستی و یا خودکار گاورنر حل کرد. افزایش سرعت شفت در شرایط اضافه فرکانس نیز می‌تواند به عملکرد بهتر سیستم خنک‌کننده کمک کرده و ازاین‌رو، قابلیت انتقال بار ژنراتور را افزایش دهد. یک مشکل اساسی این است که حد ولتاژ ترمینال ممکن است ۱۰۵٪ مقدار نامی شود که در این حالت ولتاژ ترمینال در یک ژنراتور که تحت شرایط کنترل دستی عمل می‌کند، متناسب با فرکانس افزایش خواهد یافت. شرایط نقصان فرکانس نیز به دلیل افزایش بار رخ داده و نمی‌توان آن را به‌صورت محلی اصلاح کرد. کاهش سرعت سبب کاهش خنک‌سازی و تهویه ژنراتور شده و قابلیت انتقال بار را در آن کاهش می‌دهد. در عمل، ژنراتورها می‌توانند تا ۹۵٪ سرعت نامی کار کنند تا از اضافه تحریک ژنراتور جلوگیری شود. از ۹۵٪ تا ۹۰٪ سرعت نامی، هم ولتاژ خروجی و هم جریان خروجی باید متناسب با سرعت کاهش یابد، بنابراین سبب کاهش ظرفیت خروجی ژنراتور می‌شود که این کاهش مربع کاهش سرعت خواهد بود. سیستمی که تحت شرایط کمتر از فرکانس نامی کار می‌کند، یک سیستم دارای اضافه‌بار است. ژنراتورهای متصل در این سیستم انتظار می‌رود که از مقدار نامی *MVA* خود تجاوز کنند. نیروی میدانی نیز طبق پیش‌بینی ولتاژ سیستم را ثابت حفظ می‌کند. بنابراین اضافه‌بار کوتاه‌مدت در استاتور و مدارهای میدان ژنراتور یک مشکل اساسی خواهد بود. این اضافه‌بارهای کوتاه‌مدت در فرکانس نامی در استاندارد *ANSI C50.13-1989* تعریف شده‌اند. استانداردهای ژنراتور محدوده‌های لازم را برای عملکرد تحت فرکانس غیر نامی تعیین نکرده است. این داده‌ها باید توسط سازنده ژنراتور ارائه شود.

- **حفاظت و تنظیمات**

حفاظت از تیغه‌های توربین در مقابل اثرات ناشی از عملکرد ژنراتور در فرکانس غیر نامی یک مشکل اساسی است. الگوی حفاظتی باید دارای سرعت کافی باشد تا حفاظت موردنظر را برای هر محدوده از مشخصه‌های تعیین‌شده توسط سازنده، تأمین کند. حفاظت باید دارای تأخیر کافی باشد تا امکان هماهنگ‌سازی با طرح‌های قطع بار اتوماتیک شبکه قدرت را فراهم کند. همچنین، ازآنجایی‌که فشارهای لرزشی زیاد است، زمان مجاز در یک فرکانس غیر نرمال باید تابعی از داده‌های قبلی توربین باشد. حفاظت در مقابل اضافه فرکانس اعمال نمی‌شود به این خاطر که این شرایط را می‌توان به‌صورت محلی با استفاده از عملکرد گاورنر و یا کنترل دستی آن، اصلاح نمود در مقابل حفاظت در مقابل نقصان فرکانس اعمال می‌شود چون این شرایط را نمی‌توان به‌صورت محلی اصلاح کرد.

- **حفاظت اولیه شبکه**

حفاظت اولیه در مقابل عملکرد تحت شرایط نقصان فرکانس در واقع طرح‌های قطع بار اتوماتیک شبکه قدرت است که روی سیستم قدرت اعمال می‌گردد. نقصان فرکانس در سطح سیستم ناشی از اضافه‌بار است. قطع بار برای انتقال بار کافی و حفظ تعادل میان تولید و بار اعمال می‌شود و ازاین‌رو، شرایط نقصان فرکانس اصلاح خواهد شد. در شرایط وقوع اختلالات شدید در سیستم، مثل قطع خطوط انتقال، سیستم قدرت به یک سری جزیره‌های از هم جدا تقسیم می‌شود. عدم تعادل بار/تولید در هر جزیره خواهیم داشت. برخی از جزیره‌ها دارای اضافه‌تولید هستند و بیشتر از فرکانس نامی کار می‌کنند. در این جزیره‌ها، گاورنر و یا کنترل دستی سبب کاهش

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

تولید شده و تعادل را برقرارمی‌کند، بنابراین، فرکانس سیستم تنظیم می‌شود. در سایر جزیره‌ها، بار از تولید بیشتر خواهد بود، در نتیجه سبب کاهش فرکانس سیستم می‌شود. کاهش فرکانس نیز موجب کاهش بار و افزایش گشتاور ژنراتور خواهد شد. فرکانس در چنین سیستمی تا زمانی کاهش خواهد یافت که تعادل بین بار و خروجی توان برقرار شود. اگر عدم انطباق بار و تولید به‌اندازه‌ای زیاد باشد که سبب افت فرکانس کمتر از مقدار تقریبی $55Hz$ شود، عملکرد تجهیزات کمکی واحد باعث می‌شود که توان خروجی ژنراتور افت کند. بدون کنترل سریع سیستم به شکل قطع بار، یک سیستم جزیره‌ای با سطح اضافه‌باری خواهیم داشت که طی چند دقیقه از مدار خارج می‌شود. به این دلیل که کاهش فرکانس یک معیار اصلی برای تعیین شدت اضافه‌بار سیستم است، الگوهای خودکار قطع بار برای کاهش افت فرکانس سیستم طراحی شده است. این الگوها بار را به‌صورت پله‌ای متناسب با افت فرکانس، کاهش می‌دهد. در عمل، یک الگوی ریزش بار ممکن است بار سیستم را در چهار و یا شش مرحله کاهش فرکانس، بین ۲۰ تا ۵۰٪ کاهش دهد. قطع بار با قطع فیدرهای پست فرعی سیستم توزیع انجام می‌گیرد. هر فیدر انتخابی به یک سطح قطع بار اختصاص دارد. مراحل ریزش بار در عمل به‌صورت زیر است:

سطح اول: $59.4Hz$ برای ۱۵ سیکل

سطح دوم: $58.8Hz$ برای ۱۵ سیکل

سطح سوم: $58.2Hz$ برای ۲۰ سیکل

سطح چهارم: $57.8Hz$ برای ۲۰ سیکل

الگوهای قطع بار برای برقرار کردن شرایط اضافه‌بار مجاز بیشینه طراحی می‌شوند. فرکانس کار نهایی برای شرایط اضافه‌بار و نقصان‌بار بر اساس مشخصه‌های دروپ گاورنرهای توربین و تغییرات بار با فرکانس تعیین می‌شود. گاورنرهای توربین‌های بخار دارای دروپ ۴٪ هستند. این بدان معنی است که تغییر بار ۵۰٪ سبب کاهش ۲٪ در سرعت می‌شود که فرکانس را $1.2Hz$ تغییر می‌دهد. در شرایط ایدئال، قطع خودکار بار به‌گونه‌ای طراحی می‌شود که تنها بار موردنیاز را برای بازیابی تعادل بین تولید و بار متصل شده، قطع کند. اما پیچیدگی سیستم قدرت باعث می‌شود که برآورده سازی این هدف مشکل باشد. سطوح بار و نیز ترکیب تولید سبب تغییرات ساعتی ساختار سیستم در نتیجه خروج تجهیزات مختلف می‌شود. این فاکتورها ممکن است سبب شود که در سیستم، جزیره‌های مختلفی ایجاد گردد که این ساختار جزیره‌ای در طراحی الگوی قطع بار موردنیاز دخیل خواهد بود. یک مشکل دیگر این است که افت فرکانس به‌صورت نوسانی است و در کل سیستم به‌صورت یکنواخت رخ نمی‌دهد. در نتیجه، اضافه و یا نقصان قطع بار اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

- **حفاظت توربین احتراقی ژنراتور**

تیغه‌های ژنراتورهای مبتنی بر توربین احتراقی(CTG) در حالت کلی، دامنه فرکانس گسترده‌تری را در مقایسه با تیغه‌های توربین بخار تحمل می‌کنند. بعضی از توربین‌های CTG می‌توانند به‌طور مداوم در فرکانس‌های پایین حتی تا مقدار ۵۷ هرتز کار کنند. این فرکانس، تقریباً حداقل فرکانس پایدار برای سیستم قدرت است. کاهش بیشتر فرکانس موجب کاهش تولید ژنراتور بخار در سراسر سیستم خواهد شد که دلیل آن، عملکرد نادرست تجهیزات جانبی توربین است. بالاتر از این فرکانس، توان خروجی ژنراتور بخار با کاهش فرکانس افزایش می‌یابد؛ در مقادیر کمتر از این فرکانس، خروجی با فرکانس کاهش می‌یابد و سیستم از مدار خارج می‌شود. برابر حدودی حداقل فرکانس کار CTG و حداقل فرکانس پایدار سیستم به‌شدت تعداد سطوح

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

حفاظتی موردنیاز را برای شرایط افت فرکانس، کاهش می‌دهد. CTG ها اغلب تنها با یک سیستم حفاظتی واحد در مقابل افت فرکانس با تأخیر زمانی فعال می‌شوند. ازآنجایی‌که CTG ها قادرند با سرعت بالایی راه‌اندازی و بارگذاری شوند، اغلب به‌عنوان واحدهای ایجاد پیک و یا برای بازیابی سیستم پس از بروز خطا به‌کار می‌روند. در هر دو مورد، این واحدها در بازه‌های زمانی که سیستم تحت استرس قرار دارد، تحت سرویس هستند. عملکرد آن‌ها برای بازیابی یا احیای سیستم حیاتی است و ایجاد شرایط دسترسی حداکثری به آن‌ها حتی تحت شرایطی که سیستم حفاظتی عمل کرده است، باید مدنظر قرار گیرد. یک راه‌کار، برای پیاده‌سازی سیستم حفاظت در مقابل افت فرکانس در این واحدها استفاده از آلارم به‌جای قطع‌کن مدار است. یک روش دیگر، آنلاین نگه‌داشتن CTG ها است تا زمانی که واحدهای بخار با تنظیم سیستم حفاظتی CTG در مقابل افت فرکانس روی مقداری کمتر از سطح افت فرکانس مینیمم، وارد مدار شوند. این یک راه‌کار عملی است، زیرا CTG ها نسبت به شرایط افت فرکانس در مقایسه با واحدهای بخار مقاوم‌تر هستند. تنظیمات افت فرکانس برای CTG ها و واحد منطقی مورداستفاده، باید با سیستم حفاظتی «جریان کمپرسور» مورداستفاده در سیستم سوخت CTG، هماهنگ‌سازی شود.

۶-۳- حفاظت برگشت توان ژنراتور

یک ژنراتور هنگامی که توان ورودی مکانیکی به شفت آن در هنگام اتصال به سیستم قدرت حذف شود، حالت موتوری پیدا می‌کند. فرض بر این است که میدان ژنراتور تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد و ژنراتور به یک موتور سنکرون تبدیل می‌شود که عامل اصلی سنکرون شدن سرعت است. اگر تحریک میدان نیز از بین رفته باشد، ژنراتور ممکن است حالت سنکرون را از دست داده و به یک موتور القایی تبدیل شود. این قسمت تنها شرایط موتوری را با میدان مغناطیسی و ژنراتور توربین تحت سرعت سنکرون در نظر می‌گیرد. فرض بر این است که تحریک ثابت می‌ماند، در این صورت ژنراتور می‌تواند به‌صورت یک موتور سنکرون به‌طور نامحدود عمل کند. حالت موتوری به تحریک اولیه آسیب می‌رساند، نه به ژنراتور. حالت موتوری ممکن است ناشی از خطای اپراتور، خرابی مدار شکن ژنراتور در طی پروسه خاموش شدن یا به علت شکستن مکانیکی اجزا باشد. هر دو طرح حفاظت مکانیکی و الکتریکی در اغلب تأسیسات استفاده می‌شوند. حفاظت از موتور الکتریکی در قالب رله‌های قدرت معکوس است که طبق استاندارد تعیین می‌شوند. این رله جریان برق را در ترمینال‌های ژنراتور سیستم قدرت تشخیص می‌دهد. تلفات اصطکاک و توربین و نیز تلفات الکتریکی ژنراتور، در حالت موتوری، مقدار توان ورودی را تعیین می‌کنند. رله قدرت معکوس، ژنراتور و مدارشکن‌های میدانی و نیز تحریک اولیه را قطع می‌کند.

۱-۶-۳- اثر موتوری

موتوری شدن یک ژنراتور به این معنی است که تحت کنترل خودکار رگلاتور ولتاژ، سیستم قدرت در معرض خطر قرار ندارد. البته فرض بر این است که سیستم می‌تواند در مقابل کاهش ظرفیت تولید در نتیجه خروج سیستم، مقاومت کند. ازآنجایی‌که مدار میدان به دلیل از دست دادن تحریک اولیه تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد، بارگیری توان رأکتیو (Var) روی ژنراتور و نیز ولتاژ ترمینال پس از قطع توان، ثابت باقی می‌مانند. در مرحله بعدی، بارگذاری Var، بر اساس سطح لازم برای حفظ ولتاژ رگلاتور ولتاژ بدون توان خروجی kW تنظیم می‌شود. اگر ژنراتور در ابتدا تحت ضریب قدرت پیش فاز ($Vars$ خروجی ژنراتور) عمل کند، انتظار می‌رود که خروجی Var افزایش

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

یافته و حالت موتوری پیش بیاید. اگر ژنراتور قبل از دست دادن توان ورودی با ضریب قدرت پس فاز کار کند، $Vars$ ورودی به ژنراتور کاهش می‌یابد.

سرعت تنظیمات Var متفاوت خواهد بود. از دست دادن توربین بخار منجر به کاهش آهسته توان خروجی و تغییر آهسته توان رأکتیو می‌شود به این خاطر که فشار بخار در توربین کم می‌شود. در نتیجه تنظیم Var سریع خواهد بود، که بر اساس پاسخ محرک و ثابت زمانی ژنراتور این تنظیم صورت می‌گیرد. اگر ژنراتور با ولتاژ رگلاتور تنظیم‌شده به‌صورت دستی نزدیک به مقدار نامی بار قبل از حالت موتوری کار می‌کرد، شرایط بروز خسارت بیشتر می‌شد. رگلاتور دستی جریان میدان را روی مقدار موردنیاز برای بار نامی حفظ می‌کند. این جریان به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای درصورتی‌که توان خروجی kW وجود نداشته باشد، از مقدار استاندارد تجاوز می‌کند. در نتیجه ممکن است خروجی Var، ولتاژ ترمینال، و احتمالاً ولتاژ سیستم بسیار بالاتر از حد ایمن شوند. این نتایج ناخوشایند لزوم استفاده از کنترل رگلاتور ولتاژ را به‌صورت خودکار در هنگام سنکرون‌سازی با سیستم قدرت آشکار می‌سازد. هنگامی که تحریک میدان ژنراتور تحت سرویس است، ژنراتور به‌عنوان یک موتور سنکرون بدون آسیب عمل می‌کند. آسیب ژنراتور در صورتی اتفاق می‌افتد که تحریک و نیز محرک اولیه با هم حذف شوند. در این شرایط، ژنراتور ممکن است حالت سنکرون خود را از دست بدهد و به‌صورت یک موتور القایی با تحریک اولیه کمتر از سرعت سنکرون کار کند. اختلاف سرعت بین روتور و میدان مغناطیسی استاتور باعث ایجاد جریان در روتور می‌شود.

۲-۶-۳- تأثیر برگشت توان روی توربین بخار

حالت موتوری به‌طورکلی برای محرک اولیه خطرناک است نه برای ژنراتور. در توربین‌های بخار، تلفات هوایی سبب گرم شدن قابل‌توجه تیغه‌های توربین می‌شود. به‌طور معمول، جریان بخار این گرما را از تیغه‌ها و دیگر قسمت‌های توربین حذف می‌کند. در حالت موتوری، جریان کافی بخار برای خنک کردن وجود ندارد و حرارت ایجادشده باعث انحراف تیغه و نرم شدن آن می‌شود. تیغه‌های دارای قطر بزرگ دارای سرعت نوک بالاتری هستند و گرمای بیشتری دارند. ازاین‌رو، درجه حرارت بحرانی معمولاً در فشار پایین در انتهای خروجی توربین اتفاق می‌افتد. تلفات حرارتی همچنین تابعی از چگالی بخار است. توربین‌های خنک‌کننده تحت خلأ عمل می‌کنند و می‌توانند خیلی طولانی‌تر از توربین‌هایی که با فشار بالا به‌کار می‌روند، در حالت موتوری مقاومت کنند. این بدان معنی است که مدت‌زمانی که یک توربین خنک‌کننده می‌تواند حالت موتوری را نگه دارد، در صورت از بین رفتن خلأ، به شدت کاهش می‌یابد. آسیب‌ها محدود به تیغه نمی‌شود. از دست دادن جریان بخار نه‌تنها توانایی توربین را برای از بین بردن گرما کاهش می‌دهد، بلکه همچنین توانایی متعادل‌سازی گرما را نیز کم می‌کند. نقاط داغ محلی می‌توانند باعث ایجاد استرس و انحراف درون توربین شوند. انحراف داخلی توربین نیز می‌تواند ساییدگی بین اجزاء را ایجاد کند، گرمای بیشتری تولید کند و باعث فرسودگی شود. حداقل جریان بخار موردنیاز برای خنک‌کننده بسته به نوع طراحی توربین متفاوت است؛ در برخی موارد جریان تحت توان خروجی خیلی کم برای جلوگیری از آسیب کافی نیست. بنابراین برای عملکرد سیستم تحت توان خروجی کمینه، سیستم حفاظتی لازم است. در این وضعیت یک رله قدرت پیش رو ($forward$) برای تعیین حداقل توان خروجی ژنراتور استفاده می‌شود. مدت قطع مدار با این رله باید به اندازه کافی تأخیر داشته باشد تا بتواند

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

واحد را سنکرون کرد و بارگذاری تنظیمات رله نیز باید بیشتر باشد تا از قطع احتمالی رله در شرایط عادی و در زمان راه‌اندازی، جلوگیری کند.

۳-۶-۳- تأثیر برگشت توان روی سایر محرک‌های اولیه

حالت موتوری باعث مشکلاتی برای محرک‌های اولیه دیگر می‌شود. هنگامی که ورودی آب برای یک توربین آبی قطع می‌شود، محرک ممکن است زیر آب بماند. حالت موتوری در چنین حالت می‌تواند به دلیل به‌وجود آمدن حباب، به محرک آسیب برساند. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که توربین آبی به‌صورت یک پمپ با سر پایین عمل می‌کند. فشار پایین در پشت تیغه‌ها باعث تولید انفجاری از حباب‌های کوچک با دمای پایین در سطح تیغه می‌شود. نیروی این فوران، ذرات فلزی را از سطح تیغه به حالت تراشه جدا می‌کند و فرسایش تیغه را به دنبال دارد. ژنراتورهای درایوشده با موتور دارای سیستم‌های محافظتی مکانیکی هستند که در صورت خرابی مکانیکی از جمله گرمای بیش‌ازحد، خاموش می‌شوند. در این واحدها ممکن است حالت موتوری در نتیجه قطع سیستم حفاظت مکانیکی رخ دهد. در این وضعیت، حالت موتوری می‌تواند خسارات جدی ایجاد کند، زیرا خطای مکانیکی اولیه رفع نشده است. حالت موتوری در این واحدهای همچنین خطر انفجار و آتش‌سوزی را به دلیل سوخت نشتی محتمل می‌کنند. توربین‌های گاز و دیگر واحدهای ژنراتور دنده‌ای تحت شرایط موتوری در معرض آسیب قرار دارند، به‌خصوص زمانی که چرخ‌دنده طراحی شده به‌صورت تک‌جهته باشد. در چنین طرح‌هایی، تنها یک سمت دندانه چرخ‌دنده ماشین‌کاری می‌شود تا به‌عنوان یک سطح درایو عمل کند. حالت موتوری، ورودی درایو را معکوس کرده سمت دیگر دندانه به‌صورت نیروی درایو کننده عمل می‌کند که باعث شل شدن و گرمای بیش‌ازحد می‌شود.

۴-۶-۳- حفاظت حالت موتوری

روش‌های مکانیکی همراه با رله‌های قدرت معکوس برای تشخیص شرایط موتوری استفاده می‌شوند. سیستم حفاظت مکانیکی در مقابل حالت موتوری برای یک توربین بخار می‌تواند به شکل سوئیچ‌های فشار دیفرانسیلی، آشکارسازهای دمای کوره خروجی، کنترل مانیتورهای سیستم کنترل روغن و قفل تعویض سوئیچ بخار اعمال شود. اندیکاتورهای جریان و رله‌های قدرت معکوس در توربین‌های آبی استفاده می‌شود. رله قدرت معکوس در واحدهایی که به‌عنوان کندانسورهای سنکرون عمل می‌کنند، قابل‌استفاده نیست. این رله به‌طورکلی به ماشین‌های آبی محدود است. در حالت خنک‌کنندگی، این واحدها تحت شرایط کنترل‌شده برای جلوگیری از آسیب در شرایط موتوری کنترل می‌شوند.

- **حفاظت مکانیکی: توربین‌های بخار**

ازآنجایی‌که حداکثر حرارت معمولاً در انتهای خروجی توربین بخار رخ می‌دهد، آشکارسازهای دما در مسیر اگزوز می‌توانند حالت موتور را تشخیص دهند. این آشکارسازها به‌طور معمول هشدار می‌دهند و به دلیل مشکلات ایمنی با آشکارسازها و تغییرات دما در داخل کوره اگزوز به‌عنوان حفاظت موتور اصلی مورداستفاده قرار نمی‌گیرند. مانیتورهای فشار در سیستم روغن ترمز توربین و سیستم‌های کنترل‌کننده روغن می‌توانند برای تعیین موقعیت دریچه بخار استفاده شوند. سیستم روغن ترمز توربین یک سیستم ایمن است. با کم شدن فشار، تمام دریچه‌ها بسته می‌شود. فشار روغن تنظیم‌کننده موقعیت گاورنر و دریچه‌های تعویض را جهت کنترل میزان بارگیری در شرایط عادی تغییر می‌دهد. فشار در این سیستم‌ها شاخص دقیقی برای نمایش بارگذاری واحد است

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

و می‌تواند برای تشخیص شرایط موتور استفاده شود. سوئیچ‌های محدودکننده بر روی شیرهای بخار به‌گونه‌ای تنظیم شده‌اند که موقعیت شیر را نشان دهند. این سوئیچ‌ها برای نشان دادن بسته شدن شیر و قطع جریان بخار استفاده می‌شوند. این طرح دارای یک مشکل اساسی است. تعداد سوپاپ‌ها در واحدهای بزرگ افزایش یافته و اتصال سری بسیاری از سوئیچ‌های محدودکننده لازم است تا شاخص (تمام بسته) را برای قطع حالت موتوری فراهم کند. مشکلات تنظیم سوئیچ‌ها باعث عدم کارایی این طرح شده است. افت فشار دیفرانسیل در توربین فشار بالا یک معیار مستقیم برای تعیین جریان بخار است. استفاده از یک سوپاپ فشار که تحت جریان بخار با سرعت غیر اسمی بار کار می‌کند، یک روش مناسب برای تشخیص شرایط موتوری است. طرح‌های مکانیکی دقیق از مدارهای سری‌های اضافه و مدارهای منطقی موازی استفاده می‌کنند، به‌طوری‌که قطع یک کنتاکت نمی‌تواند الگوی حفاظتی را به خطر بیاندازد، اما این طرح‌ها با این فرض اعمال می‌شوند که جریان بخار تحت شرایطی که بسته شدن دریچه نشان داده می‌شود، متوقف می‌گردد. این مورد همیشه درست نیست. دریچه‌های بخار ممکن است به علت انحراف و اتصال مکانیکی یا جریان برگشتی نشت کنند. ناکارایی در این طرح‌ها می‌تواند فاجعه‌آمیز باشد. تشخیص غلط حالت موتوری باعث قطع اشتباه ژنراتور می‌شود. با عملکرد شیر ناشی از نشتی، گاورنر سرعت نمی‌تواند سرعت بالای تنظیم را محدود کند و ممکن است آسیب شدیدی را به سیستم منجر شود. به همین دلیل، طرح‌های مکانیکی موتوری معمولاً توسط یک رله قدرت معکوس برای کنترل جابه‌جایی جریان بخار قبل از باز کردن ژنراتور بازرسی می‌شود.

- **حفاظت الکتریکی**

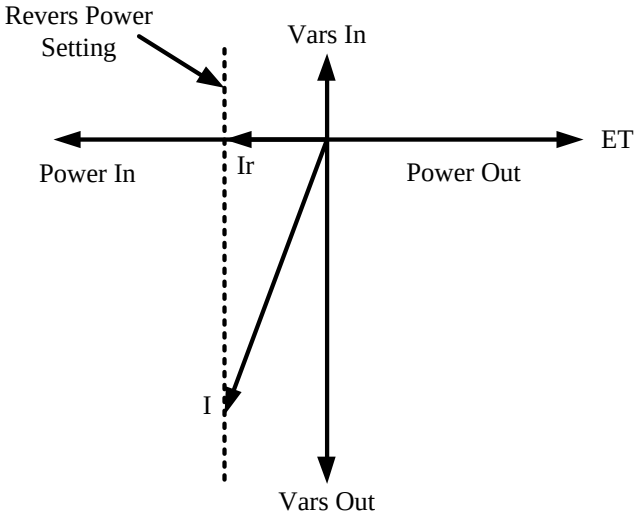
وقتی انرژی محرک اولیه به یک ژنراتور حذف می‌شود، کمبود انرژی باید از سیستم برق تأمین شود. رله برق در ترمینال‌های ژنراتور به جستجوی ژنراتوری مشغول می‌شوند که بتواند این شرایط را تشخیص دهد. نوع محرک اولیه تعیین‌کننده میزان حساسیت موردنیاز برای رله است. توربین‌های گازی هنگام استفاده در حالت موتوری، همانند یک کمپرسور بزرگ هستند. توان مصرفی واحد برحسب کیلووات در حالت موتوری، می‌تواند تا ۱۰۰٪ مقدار نامی kVA برای یک ماشین تک‌شفت یا حداکثر ۱۰ تا ۱۵٪ برای ماشین دوشفت افزایش یابد. از سوی دیگر، توربین‌های آبی با تیغه‌های بالاتر از سطح آب به ۰,۲ تا ۲ ٪ توان نامی برحسب کیلووات نیاز دارند. هنگامی که پروانه به‌طور کامل غوطه‌ور است، قدرت موتور می‌تواند به ۱۰۰٪ مقدار نامی برسد. توربین‌های آبی با تیغه‌های قابل‌تنظیم کاپلان (*Kaplan*) به کمتر از ۰,۲٪ کیلووات نیاز دارند، به شرطی که تیغه‌ها در حالت صاف قرار بگیرند. دیزل ژنراتورهای بدون سیلندر، به حدود ۱۵٪ و یا ۲۵٪ کیلووات در موتورهای چهار و دو چرخ نیاز دارند. توربین‌های بخار تحت خلأ کامل به ۰,۵ تا ۳,۰٪ کیلووات نیاز دارند. توربین‌های بخار بدون کندانسور یا توربین‌های بادی بدون خلأ، بیش از ۳ درصد توان نامی موتور نیاز دارند.

بحث فوق نشان می‌دهد که حساسیت رله قدرت معکوس می‌تواند مسئله اصلی در طراحی سیستم حفاظتی توربین‌های بخار بزرگ و توربین‌های آبی باشد. رله‌های قدرت الکترومکانیکی و الکترونیکی با تنوع زیادی در دسترس هستند. این رله‌ها ممکن است از نظر آمپر یا از نظر وات سمت ثانویه تنظیم شوند. همچنین ممکن است یک فاز یا سه‌فاز باشند. استفاده از رله‌های تک‌فاز بر این فرض استوار است که تلفات موتوری در تمام فازها به‌طور مساوی اعمال می‌شود. این فرض همیشه درست نیست. در واحدهای بسیار بزرگ، تغییرات ۰/۲ تا ۰/۳ درصد توان خروجی اسمی بین فازها توسط محققان گزارش شده است. این مقدار بسیار قابل‌توجه است، زیرا کل قدرت

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

موتور سه‌فاز برای چنین واحد ممکن است ۰/۵ درصد باشد. هنگامی که رله‌های میکروپروسسوری استفاده می‌شود، عدم تعادل مشکل‌ساز نخواهد بود، زیرا این رله‌ها معمولاً توان سه‌فاز را اندازه می‌گیرند.

رله‌های کالیبره‌شده در واقع رله‌هایی با کالیبراسیون تنظیم‌شده بر اساس مؤلفه هم‌فاز جریان، I_r در شکل ۳-۷ هستند. یک رله تک‌فاز که برای ولتاژ ورودی ۱۲۰ ولت و برای جریان ۱۰ میلی‌آمپر کالیبره شده است، به شرطی تحت این ولتاژ کار می‌کند که جریان و ولتاژ هم‌فاز باشند و ولتاژ ورودی ۱۲۰ ولت باشد. حدآستانه این رله در حقیقت $0.01A\times120V=1.2W$ است. ازآنجایی‌که این رله در واقع به توان پاسخ می‌دهد، جریان حدآستانه تابعی از ولتاژ ورودی است. این همانند رله‌ای با همان تنظیم است که به ۰،۱۱ آمپر نیاز دارد، تحت شرایطی که ولتاژ ورودی به $1.2W/110V=0.11A$ کاهش یابد.



شکل (۳–۷): اندازه‌گیری توان

رله‌های میکروپروسسور محافظ ژنراتور چندمنظوره معمولاً شامل دو تابع توان برگشت‌پذیر هستند که بر اساس ولتاژ و جریان رله برحسب وات تنظیم می‌شوند. یک تابع برای حفاظت از موتور اعمال می‌شود و دومی می‌تواند پس از قطع متوالی ژنراتور وارد عمل می‌شود. برخی از توابع توان معکوس میکروپروسسوری برای جریان برق ورودی یا خروجی از ژنراتور تنظیم می‌شوند. یکی از این رله‌ها دارای یک محدوده قابل‌تنظیم توان -۳ تا +۳ پریونیت با گام افزایشی ۰/۰۰۱ پریونیت است. رله‌های الکترومکانیکی با حساسیت‌های کمتر از ۴ میلی‌آمپر تحت ولتاژ نامی موجود هستند. تمام رله‌های توان معکوس که در توربین‌های بخار و توربین‌های آبی استفاده شده‌اند، در صورت عدم‌بارگذاری Var زیاد در شرایط موتوری، حساس هستند. این عملکرد، نتیجه توان موتوری کم موردنیاز این واحدها و خطاهای کم در اندازه‌گیری زاویه ضریب قدرت است. در حالت ایدئال، رله‌های توان معکوس، چه برای جریان و یا برای وات ثانویه کالیبره شده باشند، توان را همانند زیر محاسبه می‌کنند.

$$P=IE\times\cos(\theta)=I_rE \qquad (۳-۱)$$

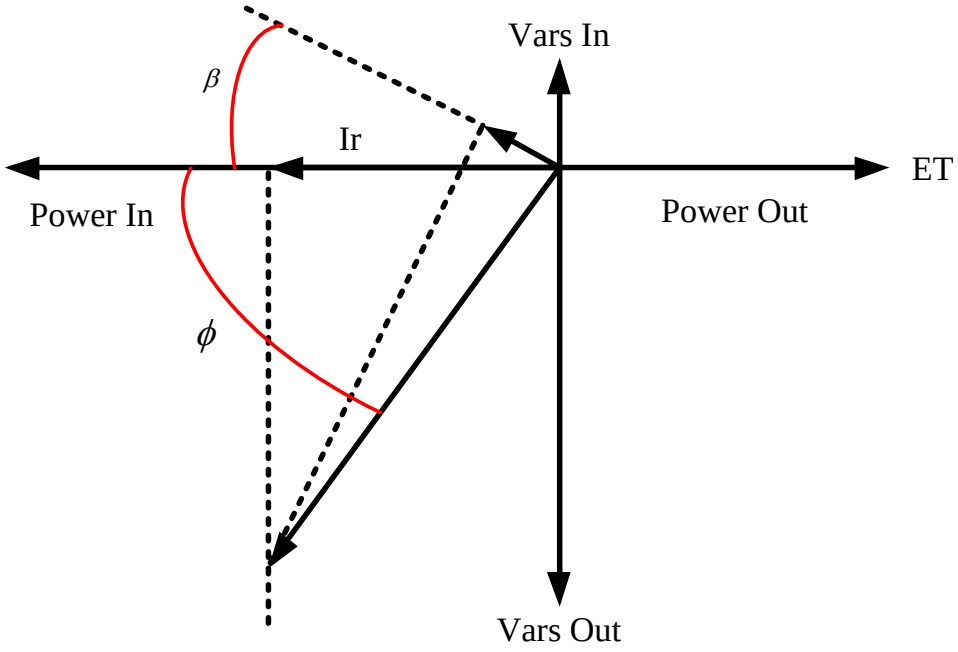
که در آن E و Ir به ترتیب کمیت‌های خط بوده و θ نیز زاویه ضریب قدرت است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

خطای PT و CT ممکن است باعث تغییر جریان و ولتاژ اعمال شده به رله شود. همچنین، خطای جزئی در مشخصه‌های رله نیز می‌تواند باعث بروز خطای زاویه‌ای β در اندازه‌گیری رله شود:

$$P=IE\times\cos(\theta\pm\beta) \qquad (۳-۲)$$

در هر صورت، خطا به‌صورت یک انحراف توان نسبت به مقدار واقعی در رله ظاهر می‌شود (شکل ۳-۸). اگر ژنراتور تحت یک ضریب قدرت کم به علت بارگذاری زیاد Var و خطای زاویه‌ای نسبت به زاویه واقعی ضریب قدرت به حالت موتوری برود، توان موتوری اندازه‌گیری شده ممکن است کمتر از نقطه تنظیم رله باشد.



شکل (۳-۸): خطای زاویه‌ی توان

۳-۷- حفاظت تحریک اضافی ژنراتور

ترانسفورماتورها و ژنراتورها به یک میدان مغناطیسی داخلی نیاز دارند. هسته ترانسفورماتور و استاتور یک ژنراتور به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که شار مغناطیسی لازم را برای بار نامی فراهم کنند. هنگامی که این تجهیزات تحت سطح شار بیش از مقادیر طراحی‌شده کار می‌کنند، شرایط اضافه تحریک رخ می‌دهد. ولتاژ خروجی یک ژنراتور یا ترانسفورماتور، تابع نرخ تغییر شار و تعداد دورهای سیم‌پیچ خروجی است.

$$e=N\frac{d\varphi}{dt} \qquad (۳-۳)$$

در شرایط کارکرد عادی، ولتاژ سینوسی است و نرخ تغییر آن بر اساس فرکانس تعیین می‌شود که خود توسط سرعت ژنراتور تعیین می‌گردد. معادله زیر برای شار هسته CT موردنیاز برای ولتاژ خروجی به‌دست می‌آید. همان رابطه برای ترانسفورماتور قدرت یا ژنراتور صدق می‌کند.

$$\varphi_{\max}=\frac{\sqrt{2}E_{RMS}}{N\times 2\pi f} \qquad (۳-۴)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

در عبارت فوق $\varphi_{\max}$ بیانگر حداکثر مقدار شار هسته موردنیاز برای تولید E_{RMS} است که E_{RMS} همان RMS ولتاژ خروجی است. N تعداد سیم‌پیچ خروجی و f فرکانس برحسب هرتز است. این معادله نشان می‌دهد که شار هسته به‌طور مستقیم با ولتاژ متناسب است و با فرکانس رابطه عکس دارد.

$$\varphi \propto \frac{V}{f} \qquad (۳-۵)$$

اندازه واقعی شار در هسته استاتور یا ترانسفورماتور به‌سختی قابل‌اندازه‌گیری است، اما می‌توان آن را به ازای V/f پریونیت برای ولت / هرتزهای مختلف محاسبه کرد. یک ژنراتور یا ترانسفورماتور که بدون بار با ولتاژ و فرکانس اسمی کار می‌کند، دارای یک شار پریونیت است و گفته می‌شود تحت تحریک پریونیت کار می‌کند. تجهیزاتی که در ولتاژ نامی و ۹۵٪ فرکانس اسمی کار می‌کنند، دارای شار ۱/۰۵پریونیت یا تحریک ۱/۰۵ پریونیت هستند.

اضافه تحرک، ناشی از ولتاژ بالا در فرکانس‌های نامشخص تحت ولتاژ نامی با فرکانس پایین خواهد بود. توجه داشته باشید که شرایط اضافه تحریک، همانند شرایط اضافه ولتاژ نیست، درحالی‌که شکست دی‌الکتریک عایق، در این شرایط مشکل‌ساز است. ازآنجایی‌که اضافه تحریک تابعی از ولتاژ و فرکانس است، ممکن است ناگهانی رخ دهد. ترانسفورماتورها و ژنراتورها ممکن است به‌واسطه عملکرد نامناسب و یا خطای اپراتور بدون تداخل با عملکرد، دچار اضافه تحریک شوند. فرسودگی مواد عایق به دلیل گرما شدید است. یک ترانسفورماتور یا ژنراتور که در اثر یک رخداد جدی دچار اضافه تحریک شده، ممکن است در نتیجه یک رویداد معمولی یا در حین سرویس عادی آسیب ببینند.

۱-۷-۳- دلایل اضافه تحریک

خرابی‌های اضافه تحریک معمولاً در بازه‌های زمانی عملکرد بدون فرکانس رخ می‌دهد نظیر راه‌اندازی و یا خاموش شدن ژنراتورها. نمونه‌های قدیمی از این شرایط، راه‌اندازی و خاموشی واحد تحت کنترل رگلاتور خودکار ولتاژ است.

ولتاژ خروجی ژنراتور تابعی از سرعت انتشار شار است. اگر پروسه راه‌اندازی شامل استفاده از میدان در سرعت کاهش یافته بوده و رگلاتور خودکار ولتاژ به‌صورت عمدی تحت سرویس قرار گیرد، می‌تواند سبب بروز آسیب‌های ناشی از اضافه تحریک شود. رگلاتور خودکار جریان میدان را افزایش می‌دهد و به این ترتیب شار میدان در صورت نیاز برای حفظ ولتاژ خروجی اسمی افزایش می‌یابد. با کاهش سرعت، سطوح شار از سطح طراحی‌شده که برای دنبال کردن مقدار مرجع ولتاژ رگلاتور موردنیاز خواهد بود، تجاوز می‌کند. به‌عنوان مثال، اگر میدان با سرعت ۸۰٪ اعمال شود و نقطه مرجع رگلاتور ولتاژ ۱،۰ پریونیت باشد، V/Hz حاصل برابر 1.25 پریونیت خواهد شد. سناریوی مشابهی نیز در شرایط خاموش شدن ممکن است رخ دهد. بعد از آفلاین شدن، واحدها اغلب مجاز به کاهش تولید تحت کنترل دستی رگلاتور هستند. رگلاتور دستی برای حفظ جریان میدان روی مقدار مرجعی استفاده می‌شود که ولتاژ نامی را بدون بار و فرکانس اسمی ($V/f=1.0$) تولید می‌کند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

این حالت بهره‌برداری از تلفات ژنراتور و ترانسفورماتور برای کمک به حالت ترمزی در شرایط کاهش تولید استفاده می‌کند. اگر رگلاتور خودکار به اشتباه در خلال این حالت تحت سرویس قرار گیرد، اضافه تحرک دوباره اتفاق خواهد افتاد به این دلیل که رگلاتور تحریک را افزایش می‌دهد تا مقدار ولتاژ مرجع ثابت بماند. این آسیب‌ها در صورت استفاده از رگلاتور خودکار مدرن رخ نمی‌دهد. اکثر رگلاتورهای جدید به مدار محدودکننده V / Hz مجهز شده‌اند که جریان میدان را برای محدود کردن V/Hz کمتر از یک مقدار از پیش تعیین‌شده صرف‌نظر از مقدار مرجع ولتاژ رگلاتور تنظیم می‌کند.

یکی دیگر از آسیب‌های متداول V / Hz، آسیب مدار قطع میدان خروجی برای خروج واحد است. هنگامی که یک واحد نزدیک به شرایط بار کامل کار می‌کند، جریان میدان در اکثر واحدها به‌اندازه کافی بالا است تا ولتاژ بدون بار ۱/۳ پریونیت یا بیشتر تولید شود. اگر ژنراتور بارگذاری شده درحالی‌که تحت رگلاتور دستی است و بریکر مدار میدان قادر به باز کردن نیست، از مدار خارج شود، جریان میدان پیش از قطع مدار توسط رگلاتور دستی ثابت می‌ماند که در نتیجه V / Hz بیش از ۱,۳ پریونیت خواهد شد. اگر بریکر مدار میدان زمانی که ژنراتور تحت کنترل رگلاتور خودکار ولتاژ بدون مدار مغناطیسی V / Hz است، نتواند باز کند، باعث افزایش بیش‌ازحد اضافه تحریک خواهد شد. باز هم، رگلاتور خودکار جریان محرکه کامل را به میدان اعمال می‌کند تا ولتاژ در فرکانس کاهش‌یافته روی نقطه مرجع ثابت بماند. برخی اضافه تحریک را به‌عنوان یک پدیده آفلاین در نظر می‌گیرند اما در اصل، اضافه تحریک می‌تواند تحت شرایطی که ژنراتور با سیستم قدرت سنکرون می‌شود، خطرآفرین باشد. به‌طور معمول، سیستم قدرت متصل از بروز شرایط اضطراری V / Hz ناشی از خطای اپراتور جلوگیری می‌کند، اما خرابی‌های درون رگلاتور ولتاژ و مدارهای مربوطه می‌تواند موجب بروز اضافه تحریک‌های خطرناک برای ژنراتور سنکرون و ترانسفورماتور متصل به آن شود. از دست رفتن سیگنال ولتاژ ژنراتور برای رگلاتور یک نمونه از این شرایط است. این حادثه در رگلاتور ولتاژ به‌صورت ولتاژ صفر در ترمینال‌های ژنراتور ظاهر می‌شود. رگلاتور با جاری ساختن جریان میدان برای تقویت ولتاژ، سعی می‌کند که این شرایط را اصلاح نماید. رگلاتور حداکثر میدان محرک جریان را تا زمانی که رگلاتور خودکار توسط اپراتور یا توسط سیستم حفاظت خاموش شود، ثابت نگه می‌دارد. در هر صورت، ولتاژهای ترمینال حاصل به مراتب بیشتر از مقدار اسمی بوده و ژنراتور و تجهیزات متصل ممکن است در معرض آسیب‌های ناشی از اضافه تحریک قرار گیرند. قطع ژنراتور توسط سیستم حفاظت در مقابل اضافه جریان، آسیب حاصل از اضافه تحرک را تحمل نمی‌کند. این الگو برای حفاظت سیم‌پیچی میدان در مقابل آسیب‌های حرارتی ناشی از اضافه جریان میدان طراحی شده است. زمان عملکرد ممکن است برای جلوگیری از آسیب ناشی از اضافه تحریک به‌اندازه کافی کوتاه نباشد. حذف بار توسط رگلاتور ولتاژ تحت سرویس بار خازنی می‌تواند باعث بروز اضافه تحریک شود. بار خازنی ممکن است یک خازن شنت برای کنترل ولتاژ یا پشتیبانی از توان رأکتیو باشد یا اینکه ممکن است به‌صورت یک جریان شارژ برای خط انتقال ولتاژ بالا مدل شود. در هر صورت، اضافه تحریک به دو صورت رخ می‌دهد. اولین حالت شامل تابع محدودکننده Var پیش فاز است که در بیشتر رگلاتورهای خودکار استفاده می‌شود. این رگلاتور بر اساس محدود کردن توان رأکتیو جاری شده از ژنراتور تنظیم می‌شود. اگر بار خازنی به‌اندازه کافی بزرگ باشد تا به این مقدار حدی برسد، رگلاتور خودکار جریان میدانی را افزایش می‌دهد، و به این ترتیب ولتاژ ژنراتور افزایش می‌یابد. در شرایط کار عادی برای یک ژنراتور متصل به سیستم اصلی، این عمل برای کاهش جریان Var به

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

ژنراتور مناسب است. با این حال، هنگامی که ژنراتور روی یک بار خازنی ایزوله می‌شود، افزایش ولتاژ ژنراتور سبب افزایش Var خروجی از بار خازنی می‌گردد. این عمل منجر به افزایش کنترل نشده خروجی تحریک و در نهایت بروز اضافه تحریک در ژنراتور و ترانسفورماتور GSU می‌شود. مکانیسم دوم اضافه تحریک پس از حذف بار، خود تحریک است. این مکانیسم زمانی اتفاق می‌افتد که راکتانس سنکرون هم‌راستا با محور q در ژنراتور به‌علاوه رأکتانس ترانسفورماتور GSU بیشتر از راکتانس خازنی سیستم متصل ($X_q > X_c$) شود. خود تحریک موجب ایجاد ولتاژ کنترل نشده هم‌راستا با محور q می‌شود، صرف‌نظر از اینکه رگلاتور ولتاژ تحت کنترل است یا خیر. رگلاتور ولتاژ هم‌راستا با محور d عمل کرده و بنابراین نمی‌تواند افزایش ولتاژ و اضافه تحریک ناشی از آن را کنترل کند. خود تحریک به‌طور معمول مربوط به ژنراتورهای آبی است، زیرا این واحدها معمولاً در زمان قطع بار، از سرعت ۱۲۰ تا ۱۴۰ درصدی برخوردارند. افزایش فرکانس، مقدار X_c را کاهش می‌دهد، بنابراین به ظرفیت کمتر برای خود تحریک در شرایط قطع بار نیاز است.

۲-۷-۳- آسیب اضافه تحریک

مواد مغناطیسی دارای حداکثر شار مغناطیسی در واحد سطح هستند. این ویژگی را به‌عنوان چگالی شار ماکزیمم یا چگالی شار اشباع ماده می‌شناسند. ساختار هسته مغناطیسی یک ترانسفورماتور و استاتور یک ژنراتور باید مساحت کافی برای تولید شارهای لازم برای رعایت استانداردهای مربوط به ولتاژ نامی و استانداردهای صنعتی را دارا باشد. ازآنجایی‌که مساحت هسته معادل با افزایش هزینه است، طراحان سطح کمتری را نسبت به این استانداردها ارائه می‌دهند. طراحی هسته نه‌تنها شامل طراحی مساحت کافی برای تأمین شار موردنیاز است، بلکه گرمای هسته نیز یک نگرانی مهم است. گرما در مواد مغناطیسی به‌وسیله جریان‌های گردابی و هیسترزیس ایجاد می‌شود. تلفات ناشی از جریان گردابی به‌طور مستقیم با چگالی شار و مربع فرکانس متناسب است. تلفات هیسترزیس با ۱/۵ تا ۲/۵ توان چگالی جریان با توجه به نوع مواد متناسب بوده و به‌طور مستقیم با فرکانس رابطه دارد. ساختار مغناطیسی طراحی‌شده برای کاربردهای AC مانند هسته ترانسفورماتور و استاتور در یک ژنراتور AC به‌صورت ورقه‌ای ساخته می‌شوند تا تلفات جریان‌های گردابی و در نتیجه گرما را به حداقل برساند. هنگامی که ترانسفورماتور یا ژنراتور در محدوده پارامترهای اسمی کار می‌کند، جریان در هسته کمتر از چگالی شار اشباع خواهد بود و نفوذپذیری هسته بسیار بالاتر از ساختار مجاور خواهد بود. در نتیجه، جریان تولیدشده در سیم‌پیچ‌ها خود را به هسته محدود می‌کند. گرمای هسته نیز در محدوده استاندارد طراحی قرار دارد. اگر خطاهای عملکرد یا خرابی تجهیزات سطح شار بیشتری نسبت به چگالی شار ماکزیمم تولید کند، هسته اشباع خواهد شد. شار بیش از ظرفیت هسته به فضای هوایی اطراف و به ساختارهای فلزی غیر ورقه‌ای در اطراف هسته نفوذ می‌کند. آسیب به یک هسته ورقه‌ای به علت افزایش تلفات به یک اضافه تحریک شدید برای مدت‌زمان قابل‌توجهی نیاز دارد. با این حال، جریان‌های گردابی که در ساختارهای غیر ورقه‌ای ایجاد می‌شوند، می‌توانند به سرعت آسیب‌های حرارتی و خرابی اجزای سازنده را به دنبال داشته باشند. در یک ژنراتور، خطرآفرین‌ترین شار در انتهای هسته استاتور ظاهر می‌شود. اضافه جریان متناوب موجب ایجاد جریان‌های زیاد در انتهای هسته پایانی و ورقه‌های انتهایی آن می‌شود. گرمای شدید در این منطقه متمرکز خواهد شد. همچنین، اضافه جریان‌های القا شده در ورقه‌های استاتور می‌توانند باعث بروز گرادیان‌های ولتاژ بین

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

ورقه‌های هسته شوند که برای شکست عایق بین ورقه‌ها، کافی خواهد بود. اگر این اتفاق رخ دهد، هسته به‌طور دائمی آسیب می‌بیند، و در نهایت باعث می‌شود که هسته تحت شار عادی نیز دچار جرقه شده و گرما و خرابی اجزای آن افزایش می‌یابد. تعمیرات هسته شامل جداسازی هسته برای حذف و جایگزینی ورقه‌های آسیب دیده است. بدیهی است، تنظیم مجدد هسته استاتور یک روش بسیار گران‌قیمت است. اضافه تحریک ترانسفورماتور تا زمانی که پیشرفت در طراحی هسته و مواد مغناطیسی اجازه کاهش شدید در سطح هسته را نداده بود، مشکل‌ساز نبود. طرح‌های اقتصادی مقرون‌به‌صرفه چگالی شار طبیعی را نزدیک به چگالی شار اشباع ساخته است. ترانسفورماتورهایی که در معرض اضافه تحریک هستند، اشباع هسته را تجربه خواهند کرد. شار اضافی هسته را رها کرده و به فضای عایق اطراف هسته نفوذ می‌کند. این شار سبب القای جریان شده و گرمای بیش‌ازحدی در سیم‌پیچ‌ها، اتصالات، و اجزای ساختار به‌وجود می‌آورد. نگرانی عمده تحت شرایطی که یک ترانسفورماتور در معرض اضافه تحریک قرار می‌گیرد، خرابی عایق است، اما آسیب‌های دیگری نیز ممکن است رخ دهد. گرمای ناشی از جریان القایی می‌تواند باعث کاهش توان مکانیکی در اجزای ساختار و تخریب رنگ مخزن شود. آلودگی روغن عایق نیز ناشی از تخریب عایق و رنگ خواهد بود. عامل مهم آسیب‌های حرارتی ناشی از اضافه تحریک در ترانسفورماتور، ماهیت غیر سینوسی شار نشتی است. به‌طور معمول، جریان هسته به‌صورت سینوسی بین سیکل‌های مثبت و منفی تغییر می‌کند. با افزایش ولتاژ، مقادیر جریان شار افزایش می‌یابد. اگر ولتاژ به‌طور قابل‌توجهی بالا است، هسته سطح کافی برای پشتیبانی از مقادیر پیک شار موردنیاز را ندارد. هنگامی که چگالی شار ماکزیمم از مقدار مجاز تجاوز می‌کند، پدیده اشباع در هر سیکل دو بار رخ می‌دهد. در هر سیکل اشباع، شار نشتی در خارج از هسته به شکل غیر سینوسی ظاهر می‌شود. این شار و جریان القاشده دارای هارمونیک‌های متعدد هستند. ازآنجایی‌که تلفات جریان گردابی و هیسترزیس با فرکانس افزایش می‌یابد، هارمونیک‌ها اثر حرارت را درون هسته و در ساختارهای غیرخطی تقویت می‌کنند. همان‌طور که ولتاژ (تحریک) افزایش می‌یابد، جریان تحریک ترانسفورماتور با سرعت بیشتری افزایش خواهد یافت. مرجع ۲ داده‌های زیر را برای یک نوع ترانسفورماتور خاص ارائه داده است. جریان‌های تحریک ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰٪ جریان اسمی بار در ولتاژهای فرکانس اسمی با نسبت‌های ۱۲۵، ۱۳۳ و ۱۴۳ درصد رخ می‌دهد. اضافه تحریک باعث غیر سینوسی شدن شار هسته می‌شود؛ بنابراین، جریان تحریک لازم برای تولید این شار نیز باید غیر سینوسی باشد. جریان تحریک پر از هارمونیک حرارت بیشتری را در سیم‌پیچ‌ها تولید می‌کند که بیشتر از دامنه جریان سینوسی RMS معادل آن است. ازاین‌رو، در سطوح بالای اضافه تحریک، آسیب‌های حرارتی به سیم‌پیچ‌ها، محتمل‌تر خواهد بود.

۳-۷-۳- محدوده‌های V/Hz

سطح هسته و خواص مغناطیسی مواد هسته، قابلیت تحریک ژنراتور یا ترانسفورماتور را مشخص می‌کند. هسته برای تأمین چگالی شار لازم برای بهره‌برداری تحت بار کامل و برای حذف گرمای ناشی از سطح تحریک طراحی می‌شود. استانداردها، محدوده‌های V / Hz را برای ترانسفورماتور یا ژنراتور به‌طور مستقیم مشخص نمی‌کنند، اما محدوده‌های ولتاژ مشخص‌شده برای این تجهیزات در فرکانس‌های معین به‌طور مستقیم تعیین‌کننده محدوده‌های V / Hz است. به‌عنوان مثال، استانداردهای $IEEE$ مستلزم این هستند که ژنراتور بتواند با ولتاژ kVAی اسمی، فرکانس و ضریب قدرت اسمی با تغییرات ولتاژ ترمینال معادل ۵+ درصدی کار

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

کنند. این استاندارد به معنی حد مجاز V / Hz است که تقریباً برابر ۱/۰۵ پریونیت است. استانداردهای ترانسفورماتور پیچیده‌تر است. در شرایط بی‌باری، ترانسفورماتور باید تحت ولتاژی برابر ۱۱۰ ٪ ولتاژ نامی مقاومت کند. در بار کامل و ۸۰٪ ضریب توان پیش‌فاز، یک ترانسفورماتور باید بتواند با ولتاژ ۱۰۵٪ در ترمینال‌های ثانویه کار کند. پس حد مقاومت ولتاژ در سیم‌پیچ به امپدانس ترانسفورماتور بستگی دارد. سیم‌پیچ اولیه هر ترانسفورماتور با امپدانس بیش از ۸/۵٪ باید دارای مقاومت بیش از ۱۱۰٪ ولتاژ نامی باشد تا ولتاژ متناوب ۱۰۵٪ را در ثانویه تولید کند.

۴-۷-۳- حفاظت اضافه تحریک

رله V/Hz در ترمینال‌های اولیه یا ثانویه، حفاظت در مقابل اضافه تحریک را برای ترانسفورماتور تأمین می‌کند. حفاظت برای یک ژنراتور و ترانسفورماتور متصل به آن می‌تواند در شکل‌های مختلف، توسط رله V / Hz در ترمینال‌های ژنراتور، توسط مدار محدودکننده V / Hz در رگلاتور خودکار ولتاژ، و یا با فناوری سنجش جریان و یا ولتاژ میدان، پیاده‌سازی شود.

- **رله‌های مانیتورینگ میدان**

رله‌ها در داخل سیستم تحریک می‌توانند حفاظت در مقابل اضافه تحریک را با مانیتورینگ (پایش) جریان یا ولتاژ، فراهم کنند. این رله‌ها روی مقداری بالاتر از ولتاژ میدان یا ولتاژ موردنیاز برای تولید ولتاژ خروجی ژنراتور تحت شرایط بی‌باری تنظیم می‌شوند. ولتاژ بی‌باری، ولتاژ نامی، و نامی برای تحریک ۱/۰ پریونیت یکسان هستند. قطع مدار از طریق تایمر با تأخیر چندثانیه‌ای صورت می‌گیرد. این رله فقط هنگامی تحت سرویس است که ژنراتور آفلاین باشد تا در هنگام راه‌اندازی و خاموش شدن، حفاظت در مقابل اضافه تحریک را تأمین کند.

- **محدودکننده V/Hz**

محدودکننده‌های V / Hz با پیشرفته‌ترین سیستم‌های تحریک عرضه‌شده برای واحدهای متوسط و بزرگ ارائه می‌شود. این مدار در داخل رگلاتور خودکار ولتاژ قرار دارد. این مدار ولتاژ و فرکانس را در ترمینال‌های ژنراتور اندازه‌گیری کرده و میدان ژنراتور را برابر با مقدار موردنیاز برای جلوگیری از عملکرد ژنراتور تحت شرایط بیشتر از مقدار پیش‌فرض V / Hz تنظیم می‌کند. طرح‌های محدودکننده مختلفی وجود دارد. یک محدودکننده پیشرفته بلافاصله V / Hz ی خروجی ژنراتور را با مقدار پیش‌فرض هماهنگ می‌کند. محدودکننده‌های پیچیده‌تر اجازه می‌دهد که اضافه تحریک برای یک زمان خاص که با نام مشخصه زمان معکوس تعریف شده است، برقرار باشد. راه‌اندازی سریع، نامطلوب است، زیرا ممکن است از پاسخگویی مطلوب ژنراتور مطلوب در شرایط اضطراری سیستم جلوگیری کند. برای جلوگیری از خاموش شدن ژنراتور باید محدوده‌کننده‌های موردنظر روی فرکانسی کمتر از فرکانس اسمی تنظیم شوند (مثلاً ۹۵٪ فرکانس اسمی)، این تنظیمات باعث می‌شود که مدار محدوده‌کننده همواره تحت سرویس بوده و یا فقط زمانی وارد سرویس شود که ژنراتور آفلاین است. هنگامی که محدودکننده V / Hz تنها در فرکانس‌های کمتر تحت است، حفاظت در مقابل اضافه تحرک در فرکانس‌های بالاتر بر اساس ماکزیمم حد ولتاژ که مستقل از فرکانس است تأمین می‌شود. این یک روش غیر کارآمد برای حفاظت V / Hz است چرا که یک محدوده ولتاژ ثابت، مشخصه قطع V / Hz یی را تولید می‌کند که با عکس فرکانس متناسب است. این پروسه قطع اضافه‌بار از قابلیت اضافه تحریک کوتاه‌مدت ژنراتور در طول اختلالات سیستم استفاده نخواهد کرد. در تأسیساتی که محدودکننده تنها زمانی تحت سرویس

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

است که ژنراتور در حالت آفلاین قرار می‌گیرد، فرض می‌شود که اضافه تحریک زمانی رخ می‌دهد که ژنراتور به سیستم برق متصل است. این فرض درست نیست. اگرچه بیشتر اضافه تحریک‌ها به‌صورت آفلاین رخ می‌دهند، اما در مواردی نیز ممکن است اضافه تحریک زمانی که ژنراتور با سیستم قدرت سنکرون شده است، به وقوع بپیوندد. این شکل از حفاظت معمولاً توصیه نمی‌شود. هنگامی که محدودکننده V/Hz در همه زمان‌ها تحت سرویس است، خروجی محدودکننده در برابر خروجی دیگر توابع کنترلی رگلاتور، ارجح است. جریان میدان بر اساس تابع محدودکننده تعیین می‌شود. در شرایط کار عادی، تابع کنترل غالب، مقادیر مرجع ولتاژ برای تنظیم‌کننده است. هنگامی که وضعیت اضافه تحریک رخ می‌دهد، حد V/Hz محدودتر از مقدار مرجع ولتاژ شده و کنترل جریان میدان صورت می‌گیرد. محدودکننده، ولتاژ خروجی را بدون توجه به مقدار مرجع ولتاژ کم می‌کند. هنگام تنظیم این نوع محدودکننده‌ها باید مراقب بود. تنظیم بیش‌ازحد ممکن است قابلیت ژنراتور را در محدود ساختن ولتاژ خروجی کاهش دهد.

۸-۳- حفاظت قطع میدان ژنراتور

قطع میدان (LOF) زمانی رخ می‌دهد که مدار تحریک سیم‌پیچ میدان ژنراتور قطع شود. این مسئله ممکن است در نتیجه خرابی تجهیزات، باز شدن تصادفی مدار قطع کن میدان، و یا مدار باز شدن و یا اتصال کوتاه شدن سیستم تحریک و یا جرقه زدن اسلیپ رینگ رخ دهد. صرف‌نظر از دلیل این پدیده، این شرایط، برای ژنراتور و نیز برای سیستم قدرت خطرناک است. ورودی جریان DC به سیم‌پیچ میدان سبب تحریک مدار مغناطیسی روتور شده و شار روتور را به‌وجود می‌آورد. این شار باعث تولید ولتاژ داخلی به‌صورت سنکرون با ولتاژ سیستم می‌شود. هنگامی که تحریک قطع می‌شود، جریان روتور با سرعتی که بر اساس ثابت زمانی مدار میدان تعیین می‌شود، کاهش خواهد یافت. ولتاژ داخلی ژنراتور نیز با همین سرعت کم می‌شود. به این خاطر که خروجی Var ژنراتور متناسب با ولتاژ داخلی ژنراتور است، توان خروجی Var نیز کاهش می‌یابد. اگر ژنراتور اول از همه توان Var را به شبکه قدرت تزریق کند، توان خروجی Var به صفر خواهد رسید به این خاطر که ژنراتور توان رأکتیو افزایشی را از سیستم قدرت جذب می‌کند تا جایگزین تحریکی کند که توسط مدار میدان تشکیل شده است. مصرف Var ممکن است از نرخ MVA ژنراتور بیشتر شود. کاهش ولتاژ داخلی نیز سبب تضعیف کوپلینگ مغناطیسی بین روتور و استاتور خواهد شد. در نقطه‌ای خاص، کوپلینگ آن‌قدر ضعیف می‌شود که توان خروجی به سیستم قدرت را به‌صورت گذرا کاهش داده و ژنراتور نیز حالت سنکرون خود را از دست می‌دهد. این پدیده درست شبیه به تلفات پایداری حالت دائمی است. به‌منظور درک تلفات سنکرون سازی در نتیجه بروز LOF، معادله زاویه توان را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$P_e = \frac{E_g E_s}{X_T} \sin\delta \qquad (۳-۶)$$

که در عبارت فوق، P_e توان الکتریکی منتقل‌شده به سیستم قدرت است، E_g ولتاژ داخلی ژنراتور است، E_s ولتاژ سیستم معادل است، $X_T = X_g + X_{tr} + X_{sys}$ و X_g رأکتانس مؤثر ژنراتور است و δ نیز زاویه بین E_s و E_g است. اثر کاهش ولتاژ داخلی ژنراتور در واقع کاهش منحنی زاویه توان با توان خروجی توربین است که زاویه کار ژنراتور را برحسب ولتاژ سیستم تعیین می‌کند. با کاهش منحنی توان، زاویه کار تا مقدار مشخصی که تعادل

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

میان توان ورودی مکانیکی و توان خروجی الکتریکی را برقرار می‌سازد، افزایش می‌یابد. هنگامی که زاویه کار به ۹۰ درجه می‌رسد، توان خروجی الکتریکی بیشینه خواهد شد. کاهش جریان میدان تا این نقطه نشان‌دهنده عدم توانایی ژنراتور در انتقال همه توان مکانیکی ورودی به سیستم قدرت است. توان مکانیکی مازاد با چرخش ژنراتور تلف می‌شود. با افزایش سرعت تا ۶۰ Hz، حالت سنکرون ژنراتور نیز از بین می‌رود. ژنراتور شروع به شتاب گرفتن می‌کند. با افزایش سرعت، توان خروجی توربین کم می‌شود همان‌طور که بر اساس تنظیمات دروپ گاورنر تعیین شده است، در این حالت توان الکتریکی افزایش می‌یابد، همچنان که بر اساس مشخصه لغزش-گشتاور سیستم قدرت تعیین می‌شود. در نهایت، توان خروجی توربین و توان الکتریکی ژنراتور به یک تعادل جدید می‌رسند، که در آن نقطه، ژنراتور تحت سرعت بیشتر از سنکرون کار می‌کند همانند یک ژنراتور القایی که تحریک را از سیستم قدرت به شکل توان Var دریافت می‌کند. از بین رفتن حالت سنکرون در نتیجه قطع میدان یک پدیده سریع نیست. در عمل، این پدیده در یک ژنراتور توربین بخار با بار کامل، این پدیده چندین ثانیه طول می‌کشد. لغزش نهایی تحت تأثیر تنظیمات دروپ گاورنر، امپدانس سیستم و بارگذاری اولیه قرار می‌گیرد. برای یک ماشین که تحت بار کامل کار می‌کند، لغزش نهایی در عمل ۲ تا ۵٪ است. توان خروجی ژنراتور القایی کمتر از توان خروجی پیش از قطع میدان است. لغزش نهایی و یا لغزش حالت دائمی ژنراتور القایی از اهمیت بالایی برخوردار است به این خاطر که این لغزش تعیین‌کننده رأکتانس مؤثر ژنراتور است که در مقابل نیز تعیین‌کننده عملکرد سیستم پس از پدیده LOF است. تلفات میدان را می‌توان با یک مدار سری شامل ژنراتور و رأکتانس ترانسفورماتور GSU و نیز امپدانس سیستم نشان داد. امپدانس سیستم با افزایش لغزش کاهش می‌یابد و لغزش نیز با بار اولیه ژنراتور، زیاد می‌شود. بنابراین، هر چه بار اولیه ژنراتور بیشتر باشد، جریان سنکرون بیشتر شده و اثرات این پدیده در ژنراتور و نیز سیستم قدرت متصل به آن، شدیدتر خواهد بود.

۱-۸-۳- سایر فاکتورهای تأثیرگذار روی شدت قطع میدان

بار اولیه ژنراتور در واقع فاکتور اصلی در تعیین خرابی‌های بالقوه ناشی از رخداد LOF است. تغییرات امپدانس سیستم و نیز مود قطع تحریک نیز روی حالت پدیده LOFی نهایی اثر خواهد داشت. کاهش راکتانس سیستم نیز سبب کاهش فرکانس نهایی لغزش و نیز افزایش توان خروجی از ژنراتور القایی خواهد شد. در نگاه اول، یک سیستم قدرت قوی جریان‌های پس از خطای بیشتری را ارائه داده و بنابراین پتانسیل بالایی در خرابی خواهد داشت. این مسئله لزوماً درست نیست. به این خاطر که سیستم قدرت قوی، لغزش نهایی کمتری را نتیجه می‌دهد، امپدانس مؤثر ژنراتور افزایش خواهد یافت، در نتیجه باعث کاهش جریان استاتور می‌شود. خرابی سیستم قدرت قوی ممکن است در عمل سبب تولید جریان‌های استاتور کمتر شده و نسبت به خرابی یک سیستم ضعیف، آسیب‌های کمتری را باعث شود. LOF در اصل ناشی از یک اتصال کوتاه مدار میدان و یا مدار باز شدن مدار میدان خواهد بود. مورد اول جریان استاتور بیشتری را تولید کرده و توان رأکتیو را بیشتر می‌کند و در حالت کلی آسیب‌های بیشتری در نتیجه بروز مدار باز در مدار میدان به‌وجود خواهد آمد. هنگامی که ماشین‌های الکتریکی به‌صورت مستقیم به یک باس مشترک متصل شده‌اند، احتمال خرابی افزایش می‌یابد. با کاهش تحریک روی واحدی با قطع مدار تحریک، رگلاتورهای ولتاژ در ماشین‌های سالم میدان اولیه را مجبور می‌کنند که کاهش ولتاژ باس را جبران کند. این امر سبب افزایش توان Var تزریق شده به ماشین خطادار خواهد شد. این شرایط زمانی بیشتر می‌شود که واحدها به یک سیستم قدرت قوی متصل شده باشند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مرجع ۲، مطالعه‌ای را در مورد دو ژنراتور متصل‌شده به یک باس مشترک و یک سیستم قدرت قوی ارائه کرده است. در این مطالعه، واحد موردنظر که دارای مدار تحریک قطع شده است، مقدار پیک MVA را که بیشتر از ۲ پریونیت است، مشاهده کرده و جریان پیک استاتور نیز به صفر پریونیت می‌رسد. بروز LOF روی یک واحد آبی تحت بار سبک ممکن است حالت سنکرون واحد را از بین نبرد. ژنراتورهای آبی از نوع ماشین‌های قطب برجسته هستند و به همین دلیل قادر هستند تا ۲۵٪ بار اسمی را تحت شرایطی که مدار میدان قطع شده است، بدون آنکه حالت سنکرون را از دست بدهند، پاسخ دهند. اما، به‌محض اینکه ماشین قطب برجسته حالت سنکرون خود را از دست بدهد، این مسئله ممکن است باعث افزایش سریع لغزش گردد. گاورنر آبی با عملکرد کندتر و همچنین این واقعیت که ماشین قطب برجسته همانند ژنراتور القایی ناکارآمد عمل می‌کند، باعث این پاسخ کند خواهد شد. اگر میدان ژنراتور آبی در شرایط نزدیک به بار کامل قطع شود، اثرات و نیز عملکرد سیستم حفاظتی درست شبیه به واحدهای توربین بخار خواهد بود.

۲-۸-۳- اثر سیستم

ژنراتوری که تحت شرایط غیر سنکرون بدون تحریک عمل می‌کند می‌تواند Var در رنج ۰/۴ تا ۱/۹ برابر مقدار اسمی توان را مصرف کند به این دلیل که لغزش از مقدار نزدیک به صفر تا ۴٪ افزایش می‌یابد. اثر تلفات میدان روی سیستم قدرت بر اساس قابلیت سیستم در مقاومت در برابر تلفات توان‌های اکتیو و رأکتیو خروجی تعیین می‌شود، اما در مقابل نیز مقدار تقاضای توان Var ی بیشتر در نتیجه بروز خطا پس از بروز LOF رخ می‌دهد. از سوی دیگر، اگر سیستم قدرت در برآورده‌سازی مقدار توان Var مورد تقاضای بار در واحد خراب‌شده، ناتوان باشد، خاموشی گسترده‌ای رخ خواهد داد. در مرحله اول، تحریک روی ژنراتورهای نزدیک به‌صورت کامل سبب تقویت توان رأکتیو تزریقی به ژنراتوری می‌شود که مدار میدان در آن قطع شده است، و از ولتاژ شبکه پشتیبانی خواهد کرد. هرچه شار Var بیشتر باشد، احتمال بروز اضافه‌بار بیشتر شده و خطوط سیستم انتقال قطع خواهند شد. ژنراتورهای مجاور نمی‌توانند سقف تحریک موردنیاز را به‌صورت نامحدود بدون آنکه آسیب‌های حرارتی به مدارهای میدان وارد شود، حفظ کنند. اگر ژنراتور آسیب‌دیده غیر متصل باشد، محدوده‌کننده‌های جریان میدان روی واحدها مجاور غیرفعال شده و در نتیجه کاهش ناگهانی در جریان اسمی میدان رخ می‌دهد. کاهش حاصل از این کاهش جریان در توان Var سبب بروز تضعیف ولتاژ شدیدی خواهد شد. ولتاژ سیستم نیز افت ناگهانی داشته و یا ناپایداری‌های ماشین‌های سیستم رخ می‌دهد که در نهایت سبب خاموشی ناحیه‌ای از سیستم خواهد شد. مطالعات دینامیکی مشابه مطالعات مورداستفاده در تحلیل حالت گذرا برای تعیین پاسخ دقیق سیستم تحت شرایط رخداد LOF لازم است. این مطالعات هم زمان‌بر بوده و هم بسیار هزینه‌بر هستند. یک روش غربالگری با استفاده از پخش بار استاندارد قادر است مطالعات دینامیکی موردنیاز را تعیین کند. در ژنراتور موردنظر، بدترین حالت رخداد LOF در پخش بار با تنظیم پخش توان رأکتیو در ماشین تحت ۱/۵تا ۲ برابر مقدار اسمی‌توان MW، شبیه‌سازی می‌گردد. اگر پخش بار با ولتاژهای منطقی سیستم حل شود، سیستم قادر خواهد بود که در مقابل رخداد LOF مقاومت کند. اما اگر پاسخ در همگرایی به مقدار دقیق ناتوان بوده و یا نتایج به‌دست‌آمده برای ولتاژ به شدت غلط باشند، رخداد LOF را می‌توان به‌صورت دینامیکی برای تعیین اینکه آیا سیستم می‌تواند در مقابل قطع میدان تحریک مقاومت کند یا خیر، مدل‌سازی کرد.

۳-۸-۳- آسیب به ژنراتور

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

ارزیابی آسیب ژنراتور در نتیجه قطعی مدار تحریک از دهه ۱۹۵۰ تغییر کرد، هنگامی که رله‌های امپدانسی به‌صورت گسترده برای حفاظت LOF مورداستفاده قرار گرفتند. در آن زمان، عموم محققان قبول داشتند که ماشین‌ها می‌توانند به‌صورت آسنکرون تحت شرایط بروز خطای LOF حداقل به مدت ۲ تا ۳ دقیقه بدون آسیب فعالیت کنند. یک مقاله نوشته‌شده در سال ۱۹۵۴ مربوط به رویدادی بود که در آن یک واحد آبی ۱۰ MW به مدت ۱۷ دقیقه به‌صورت یک ژنراتور القایی کار می‌کند بدون آنکه آسیب ببیند. احتمال خرابی ژنراتور در صورت بروز خطای LOF به طراحی ژنراتور و نیز لغزش نهایی در شرایط عملکرد آسنکرون وابسته است. اثرات مختلف عملکرد آسنکرون بدون تحریک عبارت‌اند از جریان‌های شدید استاتور، جریان‌های القایی روتور، ضربانی شدن گشتاور و گرمای انتهای هسته. اگرچه قابلیت‌های آسنکرون در این استانداردها موردبررسی قرار نگرفته است، اما توقعات جدید خیلی کمتر است، به‌گونه‌ای که در برخی از موارد خرابی کمتر از ۱۰ ثانیه رخ می‌دهد. این مسئله به‌خصوص در ماشین‌های مبتنی بر کنداکتورهای خنک‌سازی‌شده معتبر است. دلایل مختلفی وجود دارد که چرا ماشین‌های مبتنی بر کنداکتورهای خنک‌سازی شده آسیب‌پذیرتر هستند. روش‌های خنک‌سازی پیشرفته برای این نوع از ماشین‌ها استفاده می‌شود که در نتیجه نسبت MVA را در آن‌ها از یک مقدار فیزیکی تعیین شده، بیشتر می‌کند. این ماشین‌ها دارای امپدانس پریونیت بیشتری بوده و اینرسی کمتری نسبت به ماشین‌های مرسوم هستند. به خاطر این مشخصه‌ها، ماشین مبتنی بر کنداکتورهای خنک‌سازی شده تحت لغزش بالاتری عمل می‌کنند. این مسئله سبب کاهش رأکتانس معادل در شرایط عملکرد آسنکرون می‌شود، و جریان‌های القایی استاتور و روتور را افزایش می‌دهد. ماشین مبتنی بر کنداکتورهای خنک‌سازی‌شده دارای ثابت زمانی‌های حرارتی کمتری هستند، ازاین‌رو افزایش دما در آن‌ها به ازای جریان مشخص در مقایسه با ماشین‌های خنک‌سازی‌شده، سریع‌تر است. تلفات میدان نسبت به شرایط اولیه بار سبک (۳۰٪ بار اسمی و یا کمتر) تحت لغزش خیلی کمتری رخ می‌دهد، در عمل ۰٫۱ تا ۰٫۲ درصد. در این لغزش کم، خرابی ژنراتور بعید است. با این وجود، لغزش نهایی در نتیجه تلفات میدان نسبت به بار کامل خیلی بیشتر است، ۲ تا ۵ درصد و ژنراتور را در معرض خرابی ناشی از همه منابع فوق‌الذکر قرار خواهد داد.

۴-۸-۳- حفاظت قطع میدان

قدیمی‌ترین نوع سیستم حفاظتی در مقابل LOF از یک رله زیرجریان و یا زیرولتاژ متصل به مدار میدان استفاده می‌کرد. این الگوها به‌گونه‌ای تنظیم می‌شدند که تحت افت جریان و یا ولتاژ میدان کمتر از مقدار موردنیاز برای تولید ولتاژ اسمی خروجی تحت شرایط بی‌باری، کار کنند. این الگوها باید به هم پیوسته باشند تا از سوء عملکرد سیستم حفاظتی تحت شرایط راه‌اندازی زمانی که میدان کمتر از نقطه مرجع است، جلوگیری شود. یک تایمر تأخیری نیز برای جلوگیری از قطع مدار تحت شرایطی که رگلاتور ولتاژ به سرعت جریان میدان را در پاسخ به تغییر ناگهانی سیستم کاهش می‌دهد، مثلاً تحت شرایطی که خطا رفع می‌گردد، موردنیاز خواهد بود. این الگوها دارای عیب‌های متعددی هستند. رله زیرجریان تنها خطاهایی را تشخیص می‌دهد که باعث کاهش جریان عبوری از رله می‌شود، مثلاً باز شدن قطع کن مدار میدان. این الگو شرایط تلفات میدان را که ناشی از اتصال کوتاه مدار است، تشخیص نمی‌دهد. این الگو تحت شرایطی عمل می‌کند که قطع‌کن مدار میدان به واسطه اضافه‌بار و یا عملکرد سیستم حفاظتی در مقابل خطا، قطع کنند. اما این عملکرد سیستم، تأخیر زمانی زیادی را به دنبال دارد. رله زیرولتاژ در شناسایی مدار باز شدن بخش پایین‌دست رله، ناتوان است. همچنین، این رله‌ها به این خاطر که

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

جریان AC ی القایی در مدار میدان تحت شرایطی که ژنراتور در حالت آسنکرون کار می‌کند، امری محتمل است، عمل نخواهند کرد. یک الگوی دیگر که می‌توان از آن استفاده کرد، رله‌های قدرت رزرو با اتصالات PT و CT ی تناوبی است، بنابراین رله‌های مذکور توان Var ورودی به ژنراتور را تشخیص خواهند داد. چنین الگوهایی حفاظت خوبی را در مقابل تلفات میدان ارائه داده و رله قدرت رزرو دارای قیمت کمتری در مقایسه با رله‌های دیستانس هستند. عیب این روش این است که الگوی مذکور بین تلفات میدان و سایر شرایط خطای شبکه، تفاوتی قائل نمی‌شود.

۳-۸-۵- الگوهای مبتنی بر رله دیستانس

استانداردهای مدرن برای سیستم حفاظتی LOF در کنار المان‌های اندازه‌گیری امپدانس در ترمینال‌های ژنراتور استفاده می‌شوند. دو الگوی امپدانسی اصلی در کاربردهای امروزی سیستم حفاظت LOF وجود دارد. یک الگو قطع مدار را تحت شرایطی که خطای LOF تشخیص داده شد، بر عهده دارد. الگوی دیگر به‌منظور ارزیابی اینکه آیا خطای رخ داده از نوع LOF است یا خیر، به‌کار می‌رود. اگر نوع خطا، LOF نباشد، قطع مدار به تأخیر خواهد افتاد تا به اپراتور زمان و امکان کافی برای بازیابی میدان و جلوگیری از قطع ژنراتور، فراهم آورد. در حالتی که قطع کن مدار میدان به‌صورت تصادفی باز شود درحالی‌که ژنراتور آنلاین است، قطع کن مدار میدان به سرعت بسته می‌شود بدون آنکه ژنراتور آسیب ببیند. برای سنکرون‌سازی مجدد این شرایط، لازم است که ژنراتور آفلاین شود به این خاطر که ثابت زمانی طولانی در مدار میدان باعث می‌شود که ساخت ولتاژ داخلی ژنراتور به طول بیانجامد، بنابراین، حالت‌های گذرای مکانیکی را در حد قابل‌قبول، محدود خواهد کرد.

۳-۹- حفاظت یاتاقان

ولتاژ شفت و جریان‌های شفت متناظر با آن‌ها و یا همان جریان‌های یاتاقان شناخته شده هستند به این خاطر که بیشتر از یک قرن است که در موتورهای DC و AC ی تحت کارکردهای خط تولید قدیمی وجود دارند. اخیراً، با ظهور درایوهای اینورتری، جریان‌های یاتاقان فرکانس بالا و ولتاژهای شفت علت اصلی خرابی‌های گذرا در یاتاقان‌ها است. اگرچه این پدیده و روش‌های حذف مرتبط با آن‌ها کاملاً شناخته شده است، اما باید به خاطر داشت که هنوز هم مشکلات بالقوه برای صنایع در این رابطه وجود دارد.

مطالعات موجود در زمینه ولتاژهای شفت روی ماشین‌های گردان از قرن قبل ارائه شده و اولین بار نیز توسط Alger و Samson در سال ۱۹۲۴، به‌صورت خلاصه بیان شد. سپس، این پدیده به‌صورت گسترده در مطالعات دیگر بیان شده و موردبررسی قرار گرفت. هم ماشین‌های AC و هم DC تحت تأثیر ولتاژهای شفت قرار گرفته و جریان‌های شفت را تولید می‌کنند که باعث خرابی مؤلفه‌هایی نظیر یاتاقان‌ها، رول‌های شفت، گیربکس و نیز قسمت‌های اتصال‌دهنده می‌گردد. یک توضیح گسترده در مورد روش‌های حذف این ولتاژ در مقالات موجود یافت می‌شود اما مطالعات صورت‌گرفته تا این زمان، تنها ولتاژهای شفت دارای مؤلفه‌های فرکانس پایین را موردبحث قرار داده‌اند. پس از این، با افزایش درایوهای سرعت بالا (VSD)، ولتاژهای شفت فرکانس بالا (HF) نیز شناسایی شدند و مشکل جدیدی را به‌وجود آورد. امروزه، هم ولتاژهای شفت فرکانس بالا و هم فرکانس پایین به‌خوبی موردمطالعه قرار گرفته و شناسایی شده‌اند. با وجود همه مشکلات مربوط به ولتاژهای شفت، این مسئله به یک هدف مفید برای بهبود و توسعه روش‌های شناسایی خطا و تعمیر و نگهداری ژنراتورهای آبی و

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

توربوژنراتورها، بدل شده است. این گرایش به تدریج برای همه ماشین‌های گردان در حال تعمیم است، که با توسعه روش‌های مانیتورینگ شرایط در همه کاربردهای صنعتی صورت می‌گیرد.

۱-۹-۳- ولتاژهای شفت فرکانس پایین

الف) مروری بر این پدیده

در یک سیستم درایو، به‌طور مشخص چهار نوع ولتاژ شفت به‌وجود می‌آید که می‌توان از منابع مختلفی، به‌وجود آمده و سبب بروز جریان‌های شفت گردد.

۱) متناوب بودن ولتاژهای القایی در شفت: میدان‌های مغناطیسی نامتعادل ناشی از طراحی، ساخت نظیر حفره‌های خنک‌کننده در راستای محور استاتور و یا ورقه‌ای بودن روتور، اتصالات میان بخش‌های مختلف استاتور، تغییرات ضریب نفوذپذیری میان بخش‌های مختلف، گریز از مرکز روتور، و خمیدگی روتور می‌تواند باعث ایجاد شارهای مغناطیسی چرخان در شفت گردد. بنابراین، متناوب بودن ولتاژهای القایی در شفت و جریان‌های گردشی ناشی از آن در حلقه فریم استاتور، انتهای یاتاقان، شفت روتور، و انتهای یاتاقان روتور، باعث می‌شود که درصورتی‌که ولتاژ افزایش یابد و بیشتر از مقدار آستانه شود، نوار عایقی روان‌کننده یاتاقان از بین برود. یک نمونه از مطالعات صورت‌گرفته، مطالعه انجام‌شده توسط Alger و Samson در مورد خاص استاتورهای ورقه‌ای بخش‌بندی‌شده و شار نامتقارن ناشی از آن است که سبب تولید جریان‌های شفت می‌شود. در نتیجه، قواعد طراحی برای جلوگیری از این مشکل در مهندسی ساخت، مستلزم حفظ و رعایت این قوانین در پروسه ساخت و تعیین اندازه ماشین است.

۲) شار محوری روتور: یک شار مغناطیسی ممکن است از طریق شفت به‌وسیله مغناطیس‌های باقی‌مانده (متناسب با شار مغناطیسی جزئی و غیر مغناطیس‌شدگی مؤلفه‌ها)، اشباع محلی، پارامترهای نامتقارن در میدان‌های سیم‌پیچی روتور و خمیدگی‌های روتور، به‌وجود آید. شار قطب یکنواخت از شفت شروع شده و در حلقه فریم استاتور، یاتاقان، شفت روتور، یاتاقان، می‌چرخد. ولتاژ القایی ناشی از این شار نیز در امتداد طول رول یاتاقان ایجاد شده و سبب چرخش جریان در یاتاقان می‌گردد.

۳) اثر الکترواستاتیکی: این پدیده خارج از محیط داخلی ماشین است و اغلب ناشی از بار است. این پدیده می‌تواند ناشی از اصطکاک بست‌ها، نوارهای مهارکننده و یا اصطکاک بین تیغه‌ها و بخار فشار پایین توربین باشد. این ویژگی، خاصیت خازنی است به‌گونه‌ای که با افزایش ولتاژ یاتاقان، ولتاژ عایق روان‌کننده نیز تا مقدار آستانه افزایش می‌یابد و سبب شکست عایقی می‌شود. این پدیده دوم را دشارژ الکتریکی ماشینی (EDM) ناشی از پالس جریان در داخل یاتاقان می‌نامند.

۴) پتانسیل القایی خارجی روی شفت: سیستم تحریک در ماشین‌های سنکرون، اغلب یک‌سوسازهای کنترل شده با تریستور، پالس‌های ولتاژ حالت گذرای نسبتاً زیادی را در سیم‌پیچ‌های روتور ایجاد کرده و سبب بروز پتانسیل الکتریکی روی شفت با کوپلینگ خازنی میان سیم‌پیچ‌های روتور و شفت می‌شود. بررسی خرابی‌های یاتاقان، یکی از اولین مراحل بررسی دلایل پدیده ولتاژ شفت است. جریان‌های فرکانس پایین یاتاقان را می‌توان به چهار دسته تقسیم‌بندی کرد: جریان‌های پوششی، جریان‌های حفره‌ای، جریان‌های جرقه‌ای و جریان‌های ترکیبی. یک سطح پوشش داده‌شده در حالت کلی با چشم غیرمسلح غیرقابل‌دیدن است و مشخصه‌های میکروسکوپی با دهانه‌های کوچک در آن وجود دارد که طی دشارژ (تخلیه) الکتریکی تشکیل می‌شوند (EDM). جریان‌های حفره‌ای که در

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

حفره‌های خیلی بزرگ‌تر به‌وجود می‌آیند، شکل جدی‌تر و خطرناک‌تر جریان‌های پوششی هستند. شکاف‌های ناشی از جرقه نیز نامنظم بوده و اغلب در جهت چرخش موتور اریب می‌شوند. جریان‌های ترکیبی نیز به مقدار زیاد جریان‌های نشتی عبوری از رول یاتاقان بستگی داشته و می‌توان به‌سادگی آن‌ها را مشاهده کرد. بررسی این پدیده در حالت کلی زیر میکروسکوپ صورت می‌گیرد تا منشأ خرابی مشخص شود به این دلیل که این منشأ یا شیمیایی است و یا مکانیکی.

ب) روش‌های اندازه‌گیری

استاندارد IEEE 112، برای پروسه تست موتورها و ژنراتورهای القایی چند فاز، راه‌کارهایی را برای اجرای روش‌های اندازه‌گیری جریان و ولتاژ شفت ارائه کرده است درحالی‌که ماشین تحت سرعت و ولتاژ اسمی کار می‌کند. ولتاژ یاتاقان باید روی همه یاتاقان‌ها، چه عایق‌بندی شده باشند و چه نشده باشند، اندازه‌گیری شده و اطلاعاتی پیرامون سلامت نوارهای روغنی عایقی به ما می‌دهد. یک روش دیگر، بر اندازه‌گیری پتانسیل روی سرهای مخالف شفت تمرکز دارد که معمولاً با جاروبک ها و یا حلقه‌های لغزشی برای کاربردهای عملی استفاده می‌شوند. یک اسیلوسکوپ با امپدانس ورودی زیاد باید استفاده شود به این خاطر که سیگنال‌های شفت ازنظر هارمونیک‌های فرکانسی بسیار غنی هستند. اندازه‌گیری‌ها را می‌توان با یک مولتی‌متر TRMS نیز اجرا نمود. استاندارد NEMA MG1 نیز مقدار آستانه ولتاژ شفت را ۳۰۰ mV اعلام کرده است که می‌تواند برای موتورهای القایی قفس سنجابی چند فازی با توان اسمی ۳۶۰۰ kW و یا کمتر تحت ولتاژ ۷۲۰۰ V یا کمتر اعمال گردد، درحالی‌که استاندارد IEC60034-25 حد آستانه ولتاژ شفت را ۳۰۰ mV پیک برای موتورهای ولتاژ پایین تعیین می‌کند. بر همین اساس، سازنده‌ها اغلب مقدار آستانه ولتاژ یاتاقان را ۲ V برای موتورهای ولتاژ متوسط در نظر می‌گیرند. اگر ولتاژ شفت بیشتر این مقدار آستانه باشد، هر دو استاندارد فوق حد عایقی پیشنهادی برای یاتاقان را تحت عملکرد سینوسی، تعیین می‌کنند، و ولتا شفت در این حالت مطابق با IEEE112 اندازه‌گیری می‌شود.

ج) خرابی‌های ناشی از ولتاژهای شفت/روش‌های حذف آن

برای حفاظت از یاتاقان‌ها، معمولاً از عایق یاتاقان و جاروبک‌های زمین‌شده شفت استفاده می‌شود. عملکرد سیستم‌های بعدی باید در نظر گرفته نشود، همان‌طور که در میان سایر ژنراتورها تا ۲/۸ صورت گرفته مگاوات است. مقاومت زمین ۹۰۹ اهم باعث می‌شود که بار الکترواستاتیکی تجمع یافته با ولتاژ شفت تا ۱۷۰ ولت روی شفت توربین افزایش یابد. ازآنجایی‌که عایق روان‌کننده یاتاقان به‌صورت خازن عمل می‌کند، اگر ولتاژ یاتاقان بیشتر از ولتاژ شکست نوار عایقی شود، جریان مخرب در یاتاقان تا پایه یاتاقان به گردش می‌افتد. برخی از مطالعات موردی وجود یاتاقان‌های روغنی (توضیح داده‌شده در بخش III-C را روی موتورهای DC متناسب با ولتاژهای شفت، نشان داده‌اند. یک آزمایش نیز در این رابطه صورت گرفته است: موتورهای DC توسط سیستم‌های یک‌سوساز تغذیه می‌شوند که برای تولید هارمونیک‌ها شناخته می‌شود. برقراری ولتاژهای حالت گذرای قطبی میدان سبب بروز عدم تعادل در شار فاصله هوایی می‌گردد که درنهایت ولتاژهای شفت را تولید می‌کند، علت به‌وجود آمدن این ولتاژهای شفت، رأکتانس حالت گذرای قطب‌های میدانی است که کاملاً مشابه نیستند به این خاطر که پروسه‌های ساخت سیستم‌ها با هم متفاوت است، فیلم روغنی دی‌الکتریک یاتاقان قطع می‌شود که سبب بروز دشارژ الکتریکی EDM بر اساس سطح ولتاژ و شکل موج ولتاژ dV/dt می‌گردد. علاوه بر

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

این، جاروبک‌های کربنی قدیمی برای اندازه‌گیری ولتاژ شفت و یا زمین‌شدگی شفت مناسب نیستند که علت آن نیز در برخی از مقالات توضیح داده شده است. در این مقالات توضیح داده شده است که در جاروبک‌های کربنی کلاسیک، چگالی جریان نوعی هرگز در کاربردهای زمین شدگی شفت، از حد مجاز تجاوز نمی‌کند و ازاین‌رو امپدانس تماسی بالایی را بین شفت و جاروبک به‌وجود می‌آورد که سبب جرقه در این کنتاکت می‌گردد. علاوه بر جاروبک‌ها و روغن حساسیت به گردوغبار نیز عامل دیگری است. برخی از مقالات ادعا کرده‌اند که قابل‌اطمینان‌ترین جاروبک‌ها، جاروبک‌های فلزی یا نوع هم‌بافته هستند. با این وجود، در صنعت، کمیت‌های موردنظر در کاربردهای موتور DC و AC در مقابل ولتاژهای شفت با استفاده از جاروبک‌های کربنی با ساختار خاص، محافظت می‌شوند.

۲-۹-۳- ولتاژ شفت تحت عملکرد اینورتر

الف) مروری بر این پدیده

پدیده جریان‌های یاتاقان هنگامی که موتور با اینورتر منبع ولتاژ (VSI) مبتنی بر مدولاسیون عرض پالس (PWM) کار می‌کند به‌صورت گسترده بررسی شده است. تعداد قابل‌توجهی از مطالعات ولتاژ مود مشترک (CM) را برای یک اینورتر PWM برای ایجاد ارتباط با جریان‌های یاتاقان ارائه کرده‌اند. تولید جریان‌های فرکانس بالا در یاتاقان شامل کوپلینگ خازنی و سلفی داخل ماشین نیز می‌شود. همه سیستم‌های درایو دارای خازن‌های پارازیتی و سلف‌های پارازیتی هستند، و همیشه تحت عملکرد سینوسی از آن‌ها صرف‌نظر می‌شود. تحت شرایط کارکرد اینورتر، مشخص شده است که مؤلفه‌های فرکانس بالا (HF) برای ولتاژ CM سبب تحریک خازن‌ها و سلف‌های پارازیتی موتور شده و جریان‌های یاتاقان تحت عنوان جریان‌های القای اینورتری را تولید می‌کنند. این پدیده‌ها در محدوده ۱۰۰ کیلوهرتز تا چندین مگاهرتز بر اساس ادعای برخی از نویسنده‌های مقالات است.

ب) روش‌های اندازه‌گیری

در حال حاضر، هیچ مقدار آستانه‌ای برای ولتاژهای شفت و یا یاتاقان برای ماشین‌های تحت کارکرد اینورتر تعیین نشده است اما سازنده‌ها معمولاً حد ولتاژ یاتاقان V ۵ را برای موتورهای ولتاژ متوسط توصیه می‌کنند. علاوه بر این، هیچ تجهیز استاندارد و یا روشی برای اندازه‌گیری این ولتاژ وجود ندارد. مراجع روش‌های مختلف را برای اندازه‌گیری جریان‌های شفت نشان می‌دهد. این نکته نیز قابل‌توجه است که روش اندازه‌گیری جریان شنت در استاندارد IEEE112 مناسب ناست. این روش مسیر امپدانس پایینی را بین انتهای شفت ایجاد کرده و جریان واقعی شنت را نشان نمی‌دهد. اگر هیچ تجهیز اندازه‌گیری قبلاً در مکان موردنظر نصب نشده باشد، اندازه‌گیری جریان‌های یاتاقان عملاً غیرممکن است. نصب یک کویل Rogowski حول شفت داخل ماشین یک روش اندازه‌گیری جریان شفت است که جریان گردشی فرکانس بالا را القا می‌کند. این روش مستلزم آماده‌سازی دقیق ماشین بوده و در میدان به‌سادگی قابل‌اجرا نیست. اما کویل های Rogowski به‌صورت گسترده به‌خصوص برای مانیتور کردن جریان‌های زمین متناظر با dV/di ی بالا در ماشین‌های تغذیه‌شونده توسط اینورتر توسط ABB استفاده می‌شوند. اندازه‌گیری‌های جریان‌های فرکانس بالای یاتاقان اغلب از روش‌های غیرقابل‌پیش‌بینی استفاده می‌کند که به آماده‌سازی دقیق موتورنیاز دارد. معمولاً یک عایق الکتریکی بین یاتاقان و فریم نصب می‌شود. سپس یک سیم با امپدانس پایین برای کوتاه‌سازی عایق استفاده می‌شود و جریان عبوری از این سیم نیز

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

اندازه‌گیری می‌گردد. باید خاطرنشان کرد که این روش تنها تخمین خوبی از جریان یاتاقان را نشان می‌دهد. علاوه بر این، تخمین مقادیر جریان‌های مخرب یاتاقان کار پیچیده‌ای است به این خاطر که این اندازه‌گیری و تخمین به‌اندازه ماشین و میدان مورداستفاده بستگی دارد.

ج) روش‌های حذف برای حفاظت یاتاقان‌ها

هدف اصلی مطالعه جریان‌های یاتاقان به‌صورت واضح برای قواعد عملی پیشنهادی و راه‌کارهای پیشنهادی برای استفاده از ماشین‌ها در شرایط کاری مختلف است. روش‌های مختلفی را هم که در زمینه تست و هم در صنعت موردآنالیز قرار گرفته‌اند می‌توان به دودسته تقسیم‌بندی کرد. روش‌های اعمال‌شده در سمت اینورتر و یا روش‌های مورداستفاده برای حذف جریان‌های یاتاقان در موتور. هدف اصلی، کاهش و یا حذف ولتاژ مود مشترک اینورتر است، به این خاطر که این ولتاژ منبع اصلی تولید جریان‌های فرکانس بالای یاتاقان است. دسته اول فیلترهای خروجی اینورتر، (فیلترهای dV/dt و رآکتورهای dV/dt)، فیلترها سینوسی، چُک‌های مود مشترک و کابل‌های غلاف‌دار هستند. فیلترهای مود مشترک را می‌توان برای کاهش و یا حذف ولتاژ CM به‌کار برد. دسته دوم شامل نوارهای مهارکننده HF، رینگ‌ها، یاتاقان‌های عایق‌بندی‌شده، یاتاقان‌های هیبرید و یا سرامیکی، کوپلینگ‌های عایق‌بندی‌شده و یا روتور غلاف دار الکترواستاتیکی است. یاتاقان‌های سرامیکی مسیرهای جریان را می‌شکند، درحالی‌که لایه‌های عایقی مربوط به یاتاقان‌های عایق‌بندی‌شده جریان‌های گردشی و جریان‌های یاتاقان ناشی از جریان‌های زمینی روتور را کاهش می‌دهند اما در مقابل جریان‌های یاتاقان EDM ناکارآمد هستند. روش کلاسیک برای قطع جریان‌های گردشی HF در ماشین‌ها، نصب یک یاتاقان سرامیکی و یا هیبرید است. معمولاً، ماشین‌های القایی با توان اسمی بیش از ۱ مگاوات حداقل دارای یک و یا دو یاتاقان عایق‌بندی‌شده هستند. سایر روش‌ها بر استفاده از یک یاتاقان سرامیکی روی انتهای زمین‌شده شفت تکیه دارند. در همه موارد، این پدیده باید به‌صورت کامل پیش از اعمال هر روش حذفی، موردبررسی قرار گیرد. یک روش ارائه‌شده برای حفاظت از جریان‌های یاتاقان، که امروزه در صنعت شناخته شده است، ایجاد مسیر امپدانس پایین به زمین برای جریان‌های یاتاقان است. این روش شامل یک حلقه هدایت‌کننده نصب‌شده روی شفت است که حاوی میلیون‌ها میکرو فیبر هادی است. به‌صورت تجربی اثبات شده است که این سیستم برای حذف جریان‌های فرکانس بالا و ولتاژهای فرکانس بالا در رنج مگاهرتز نظیر جریان‌های یاتاقان EDM و جریان‌های گردشی HF مناسب است. برای مثال، رنج حفاظت یک یاتاقان جریان بالا که در حالت خاص برای موتورهای بزرگ و ژنراتورهای بزرگ طراحی شده است، می‌تواند تا ۱۲۰ آمپر را به‌صورت پیوسته تحت فرکانس ۱۳/۵ مگاهرتز با ولتاژ تخلیه ۳ کیلوولتی پیک، تحمل کند. ماشین‌های حساس در صنعت اغلب با این سیستم حفاظتی مجهز می‌شوند که مستلزم تعمیر و نگهداری کمتری در مقایسه با جاروبک‌های زمین‌شده سنتی هستند. باید خاطرنشان کرد که خرابی‌های یاتاقان ناشی از جریان‌های فرکانس پایین و فرکانس بالا درست شبیه هم هستند با این تفاوت که پدیده جرقه زدن معمولاً مربوط به ماشین‌هایی است که توسط یک‌سوسازها و یا اینورترها تغذیه می‌شوند. جرقه زدن به‌صورت جرقه‌های دارای توزیع عرضی در داخل بلبرینگ شناخته می‌شود که پدیده washboarding را نتیجه می‌دهد. در مطالعات قبلی، مکانیزم زمین‌سازی شفت با اتصال شفت و فریم با مسیر امپدانس پایین ارائه می‌شده است. با این وجود، این مطالعات با مشکلاتی در رابطه با لایه کربنی ساخته‌شده روی شفت دست‌به‌گریبان بودند که مسیر

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

امپدانسی را افزایش می‌داد. پس از این رویداد، جرقه نیز شدیدتر می‌شود. بنابراین، قواعد عملی پیش از نصب ماشین تغذیه‌شونده با اینورتر برای جلوگیری از خرابی‌های یاتاقان‌ها نیز ارائه می‌شود.

۳-۹-۳- جلوگیری از خرابی‌های یاتاقان‌های ژنراتور با استفاده از AEGIS

ژنراتورها، همانند موتورهای توان بالا، در معرض جریان‌های گردی هستند که ناشی از خرابی یاتاقان‌های الکتریکی و خرابی آن‌ها می‌شود که اغلب در زمان کوتاهی صورت می‌گیرد. در واقع، بیش از نیمی از خرابی‌های ژنراتورها ناشی از خرابی یاتاقان‌ها است. این جریان‌های گردشی از فریم تا یاتاقان جاری شده و سپس در امتداد شفت به یاتاقان دیگر و سپس به فریم برمی‌گردند. به‌منظور قطع این جریان‌های گردشی، ژنراتورها در عمل با یک یاتاقان عایق‌بندی‌شده در انتهای شفت موتور مجهز می‌گردد. اما این روش همیشه مؤثر نیست، و خرابی‌های یاتاقان نیز همچنان ادامه دارد. این مورد است که در برنامه برقابی ایالات‌متحده مدنظر بوده و در آن، هزینه باز کردن یک ژنراتور توربین به‌اندازه ۱/۵ میلیون دلار بوده است.

به‌منظور جلوگیری از مصرف هزینه‌های بالای تعمیر و نگهداری ناشی از خرابی‌های الکتریکی در یاتاقان‌های ژنراتور، یک لایه حفاظتی دیگر موردنیاز است. زمین کردن شفت مسیری را بین شفت و فریم و زمین با مقاومت پایین به‌جای مسیر عبوری از یاتاقان به‌وجود می‌آورد. اما روش‌های سنتی زمین کردن شفت نظیر جاروبک‌های سد کربنی و جاروبک‌های رشته‌ای سیمی به جایگزین‌های متوالی و یا تنظیم کنتاکت‌های شفت به‌صورت دائمی نیاز دارند. این یک کار خطرناک است به‌خصوص زمانی که ژنراتور در پروسه تعمیر و نگهداری، آنلاین است. در مقابل، حلقه‌های AEGIS® iPRO شفت ژنراتور را با میکرو فیبرهای هادی متصل می‌کنند که در نتیجه میلیون‌ها نقطه اتصال را با شفت ایجاد کرده و یک مسیر مقاومت پایین را برای جریان‌های گردشی و مخرب به‌وجود می‌آورد. این میکرو فیبرها که دارای عمر طولانی هستند برای این منظور استفاده می‌شوند که بدون شکستن تعمیر شده و در مقابل بیش از ۲ میلیون مسیر برگشتی نیز مقاومت نشان می‌دهند. این میکرو فیبرها با اصطکاک بسیار کم و حداقل سایش عمل کرده و عمر آن‌ها نیز حداقل ۱۰ برابر طول عمر یاتاقان‌ها است. AEGIS® iPRO شفت‌های دارای ظرفیت جریانی بالای ترکیبی و زمین‌شده را با مانیتورینگ لحظه‌ای ولتاژ شفت در یک حلقه فشرده واحد، توصیه کرده است. برای ژنراتورهایی که دسترسی به آن‌ها دشوار است، iPRO-MR از یک سیم پوششی برای اتصال ترانسمیترهای سیم‌بندی‌شده سخت استفاده می‌کند. و از سیستم‌های SCADA و یا اتوماسیون ساختمانی برای مانیتور کردن بهره می‌برد. iPRO-MR همچنین کاربردهای حساس نیز علاوه بر سیستم حفاظتی یاتاقان غیر تطبیقی، روشی را توصیه می‌کند که بر اساس مانیتورینگ راه دور و لحظه‌ای سطوح واقعی ولتاژ شفت است. علاوه بر حفاظت یاتاقان‌های ژنراتور؛ AEGIS® iPRO همچنین کیفیت توان را با تیغه‌ای کردن مؤلفه‌های فرکانس بالای خروجی ژنراتور بهبود داده است.

۳-۱۰- سیستم خنک‌کنندگی ژنراتور

قبل از مطالعه سیستم خنک‌کنندگی ژنراتور، چگونگی به‌وجود آمدن افت در ژنراتور را موردمطالعه قرار می‌دهیم. افت در ژنراتور از سه قسمت جداگانه تشکیل می‌شود که عبارت‌اند از: افت اصطکاک سیال، افت مسی و افت آهنی.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

الف) افت اصطکاک سیال خنک‌کننده: این افت، در اثر گردش سیال خنک‌کننده در داخل ژنرتور به‌وجود می‌آید و عامل آن، اصطکاک سیال در هنگام جریان آن در میان سیم‌پیچ‌های استاتور و روتور در حال گردش است.

ب) افت مسی: این افت، ناشی از عبور جریان از سیم‌پیچ‌های روتور و استاتور است که از سیم‌پیچ‌های استاتور، جریان متناوب، و از سیم‌پیچ‌های روتور، جریان dc عبور می‌کند.

ج) افت آهنی: افت آهنی، عبارت از افت در هسته آهنی ژنراتور، به هنگامی است که تحت تأثیر میدان مغناطیسی متناوب قرار می‌گیرد.

به‌طور تقریبی می‌توان گفت که در هر ژنراتور، افت اصطکاک سیال خنک‌کننده در حدود ۰/۸، افت مسی در حدود ۰/۴، و افت آهن در حدود ۰/۴ درصد است. برای این که درجه حرارت ژنراتور از حد مجاز تجاوز نکند، برای تمام ژنراتورهایی که در نیروگاه به‌کار گرفته می‌شوند ، سیستم خنک‌کنندگی اجباری در نظر گرفته می‌شود. به همین جهت افت اصطکاک سیال خنک‌کننده در همه ژنراتورهای قدرت اجتناب‌ناپذیر است. روش حذف گرمای ایجادشده در داخل سیم‌پیچی روتور و استاتور به دو روش تماس غیر مستقیم و مستقیم انجام می‌شود. در روش خنک‌کنندگی تماس غیر مستقیم، گاز (هوا یا هیدروژن) به کمک پره‌های نصب‌شده در دو طرف روتور به سمت داخل ژنراتور فرستاده می‌شود و از طریق فاصله هوایی بین روتور استاتور و کانال‌های ونتیلاسیون به حرکت در می‌آید. در این روش خنک‌کنندگی، گاز خنک‌کننده با سیم‌پیچی روتور و استاتور تماسی ندارد و گرمای گرفته‌شده توسط گاز از طریق سد یا مانع حرارتی ایزولاسیون سیم‌پیچی صورت می‌گیرد. در روش خنک‌کنندگی مستقیم یا بدون واسطه، عامل خنک‌کننده (گاز یا مایع) مستقیماً با فلز سیم‌پیچی ژنراتور (یعنی شمش مس) در تماس است تا گرما را از شمش بگیرد؛ بدون آنکه تجهیزات عایق کاری یا دندانه‌های روتور در مسیر انتقال گرما نقشی داشته باشند.

۱-۱۰-۳- خنک کردن به‌وسیله هوا

با وجود این که بازده ژنراتورهایی که با آب خنک می‌شوند نسبتاً بالاست و افت آنها به حدود ۱/۵ ٪ می‌رسد، اما در ژنراتورهای بزرگ، چون قدرت خروجی آنها زیاد است، حتی این مقدار درصد کم افت انرژی نیز مقدار قابل‌ملاحظه‌ای از کل انرژی است. در ژنراتورهای قدیمی به‌وسیله گردش هوا در داخل ژنراتور، عمل خنک کردن انجام می‌شد. برای این کار، هوا از محیط اطراف گرفته یا کشیده می‌شد و پس از عبور از ژنراتور دوباره در محیط اطراف تخلیه می‌گردید. به این سیستم خنک‌کنندگی، سیستم خنک‌کنندگی باز می‌گویند. با اینکه این سیستم از جهت خنک کردن، کاملاً مؤثر و مفید است ولی معایب زیادی از جمله موارد زیر را به همراه دارد:

۱ ـ در هنگام کار، سرو صدای زیادی تولید می‌شد.

۲ ـ احتمال آتش‌سوزی بالا بود، چون هر گونه آتش‌سوزی در داخل ژنراتور به‌وسیله جریان مداوم هوای تازه تشدید می‌شد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

امروز با به‌کار بردن یک سیستم جدیدتری، عمل خنک سازی انجام می‌گیرد، به‌طوری‌که همان مقدار هوای مورد لزوم در یک مدار بسته به‌طور پیوسته گردش می‌کند و ضمن خنک کردن ژنراتور خود نیز به‌وسیله خنک‌کننده‌هایی به‌طور مداوم خنک می‌گردد. به این روش، سیستم خنک‌کنندگی بسته می‌گویند. برای به جریان انداختن هوا از باد بزن‌هایی که به روتور چسبیده، یا باد بزن‌هایی که به‌طور جداگانه از روتور یا با وسیله دیگری می‌چرخد، استفاده می‌شود. این سیستم خنک‌کنندگی از سیستم قبلی تمیزتر بوده و خیلی بی‌سر و صداتر کار می‌کند و خطرات آتش‌سوزی هم در آن کمتر می‌شود.

۲-۱۰-۳- خنک کردن به‌وسیله هیدروژن و به‌طور غیر مستقیم

با توجه به مقدار افت اصطکاک سیال خنک‌کننده (مثل هوایی که در قسمت قبلی مشخص شده است)، اگر افت فشار جریان سیال در داخل سوراخ‌های ژنراتور کمتر شود، بازده کلی ژنراتور به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای اضافه می‌گردد. برای این منظور از سیال سبک‌تری به نام هیدروژن (برای عمل خنک کردن) استفاده می‌شود. همچنین هیدورژن نسبت به هوا دارای ضریب هدایت گرمایی و ظرفیت حرارتی بالاتری است. با توجه به این که افت اصطکاک سیال خنک‌کننده، متناسب با چگالی سیال خنک‌کننده است، در نتیجه خواص خنک‌کنندگی هیدروژن شرایط ایدئالی را مهیا می‌کند.

در حالت کلی استفاده از هیدروژن دارای مزایای فراوانی است:

۱ـ چون قدرت خنک‌کنندگی هیدروژن نسبت به هوا زیاد است، در نتیجه می‌توان ژنراتورهای سنگین‌تر و با قدرت بیشتری ساخت. همچنین استفاده از هیدروژن سبب کاهش فونداسیون می‌شود. لازم به یادآوری است که قابلیت هدایت گرمایی هیدروژن تقریباً ۷ برابر هوا است

۲ـ چون در منافذ داخل ژنراتورها اکسیژن وجود ندارد (به علت پر بودن ژنراتور از گاز ازت یا گاز کربنیک) عمر قسمت‌های عایق کاری سیم‌پیچ‌ها اضافه می‌شود. همچنین به علت عدم وجود هوا در هنگام ایجاد قوس الکتریکی، امکان به‌وجود آمدن اسیدنیتریک وجود ندارد. در نتیجه، استفاده از هیدروژن، ضریب اطمینان کار کرد ژنراتور را افزایش می‌دهد

۳ ـ خطر آتش‌سوزی کاهش می‌یابد، زیرا هیدروژن خالص غیر قابل‌انفجار است. در نتیجه در ژنراتورهایی که توسط گاز هیدروژن خنک می‌شوند، استفاده دستگاه اطفاء حریق الزامی نیست.

۴ـ به علت استفاده از هیدروژن، محفظه‌های ورود هیدورژن کاملاً آب‌بندی می‌شوند و امکان ورود گرد و خاک و رطوبت وجود ندارد. در نتیجه تعداد دفعات مربوط به تعمیرات ژنراتور کم می‌شود.

۵ـ وزن مخصوص هیدروژن در مقایسه با هوا بسیار کم است (حدود ۱۴ برابر سبکتر از هوا است) و این امر باعث می‌شود که تلفات ناشی از اصطکاک ژنراتور، ۸ الی ۱۰ ٪ کاهش یابد.

در مقابل مزایای اشاره‌شده، این روش معایبی نیز به همراه دارد. هیدروژنی که توسط آن، پوسته ژنراتور پر می‌شود، درصورتی‌که به شکل مخلوط با هوا در آید (به نسبت ۱ به ۴ تا ۷۴ ٪) و در صورت وجود بخار روغن (به نسبت ۲ به ۳ تا

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۸۱/۵ ٪) مخلوط قابل‌انفجاری ایجاد می‌کند. بنابراین در ژنراتورهایی که توسط هیدروژن خنک می‌شوند، باید بدنه آن از فولاد غیر قابل نفوذ ساخته شود و مسیر گاز خنک‌کننده در داخل ژنراتور کاملاً آب‌بندی شود. همچنین آب‌بندی شین‌های خروجی ژنراتور و آب‌بندی در پوش‌های سردکن گاز و آب‌بندی دریچه‌ها و قسمت‌های مجزا که به هم وصل می‌شود، نیز باید کاملاً تأمین گردند. اما مشکل اصلی در آب‌بندی ژنراتور، محلی در بین محور روتور و محافظ‌های انتهایی استاتور است. برای این منظور، از گلندهای آب‌بندی شونده به‌وسیله روغن استفاده می‌شود. این گلندها در هر طرف انتهای روتور قرار دارند. یک پمپ کوچک برای برقراری آب‌بندی در مواقعی که توربین کار نمی‌کند، تدارک دیده می‌شود که روغن آن از سیستم روغن کاری توربین تأمین می‌گردد.

به‌عنوان نمونه در نیروگاه شهید محمد منتظر قائم، روتور و استاتور به‌وسیله هیدروژن خنک می‌شوند، و هیدروژن هم توسط چهار خنک‌کننده آبی که در چهار گوشه استاتور قرار دارند، خنک می‌شود. در طرف روتور نیز فن‌های سیرکولاسیون گاز هیدروژن نصب شده است. همچنین برای آب‌بندی گاز هیدروژن در دو طرف ژنراتور از آب‌بندی به‌وسیله روغن استفاده می‌شود

۳-۱۰-۳- خنک کردن به روش مستقیم توسط هیدروژن

یکی از اشکالات سیستم خنک‌کننده غیر مستقیم ژنراتورها پایین بودن ضریب هدایت عایق های الکتریکی سیم‌پیچ‌های روتور و استاتور است. این عایق‌ها مانند یک عایق حرارتی عمل می‌کنند و در نتیجه اختلاف درجه حرارتی بین سیم‌پیچ مسی و گاز خنک‌کننده به‌وجود می‌آید. امروزه در ژنراتورهای جدید هیدروژن با سیم‌پیچ‌های مسی تماس مستقیم دارد. بنابراین به‌کار بردن این روش خنک‌کنندگی مؤثرتر از روش قبل است، زیرا در این روش هیدورژن می‌تواند گرما را مستقیماً از شمش سیم‌پیچی روتور یا استاتور دریافت کند. در این سیستم در داخل شمش مسی سیم‌پیچی‌های استاتور و روتور، لوله‌ای از فولاد غیر مغناطیسی قرار می‌گیرد تا هیدروژن در داخل این لوله به حرکت درآید. لازم به ذکر است که ژنراتورهایی را که مستقیماً توسط هیدورژن خنک می شوند نمی‌توان به‌وسیله هوا خنک کرد. زیرا سیم‌پیچ های استاتور و روتور براساس خنک شدن اجباری محاسبه شده‌اند و درصورتی‌که به جای هیدروژن توسط هوا عمل خنک‌کاری صورت گیرد، درجه حرارت افزایش یافته و باعث صدمه به ژنراتور می‌گردد. بنابراین به محض ایجاد نشتی هیدروژن در ژنراتورها، باید ژنراتور را بی‌بار نمود تا از شبکه جدا گردد. وصل مجدد چنین ژنراتوری به شبکه فقط در صورت رفع نشتی امکان پذیر خواهد بود.

۴-۱۰-۳- خنک کردن مستقیم ژنراتور توسط مایعات

در ژنراتورهای با قدرت بسیار بالا به‌منظور خنک کردن مستقیم از روغن یا آب مقطر استفاده می‌شود. زیرا سطح گرمازدایی به هنگام استفاده از آب با روغن در مقایسه با هیدورژن بسیار زیاد است. به عبارت دیگر؛ ضریب انتقال حرارت آب و روغن بیشتر از گاز هیدورژن است. در نتیجه با استفاده از روش خنک‌کنندگی مستقیم توسط مایعات ژنراتورهایی با قدرت بیشتر و حجم کمتری می‌توان ساخت. البته استفاده از آب مقطر به‌عنوان مایع خنک‌کننده در مقایسه با روغن بهتر است، زیرا اولاً خاصیت گرمازدایی آب بیشتر از روغن است. در ثانی از نقطه‌نظر خطر آتش‌سوزی آب دارای ایمنی بیشتری است. بنابراین در بسیاری از ژنراتورهای پرقدرت (به خصوص ژنراتورهای پرقدرت ساخته‌شده توسط شوروی سابق از قدرت ۱۶۵ تا ۸۰۰

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مگاوات) از آب مقطر برای خنک‌کنندگی سیم‌پیچ‌های روتور و استاتور استفاده می‌شود. البته خنک‌کنندگی مستقیم آب برای ژنراتورهای کاربردی در نیروگاه‌های آبی هم استفاده میشود. البته در بعضی از ژنراتورها آب خنک‌کننده فقط از شمش‌های استاتور عبور می‌کند. آب گرم خارج‌شده از ژنراتور توسط دستگاه سردکن (که در خارج ژنراتور قرار دارد) خنک می‌شود تا دوباره توسط پمپ به ژنراتور برگردانده شود. همچنین گردش هیدروژن داخل ژنراتور (به‌منظور خنک کردن مدار مغناطیسی ژنراتور) توسط پره‌های نصب‌شده بر روی محور روتور امکان‌پذیر خواهد بود.

البته برای هیدورژن هم یک سیستم خنک‌کنندگی مجزا در نظر گرفته می‌شود. نمونه‌ای از این نوع سیستم خنک‌کنندگی را می‌توان در واحدهای ۳۲۰ مگاواتی نیروگاه اسلام‌آباد، تبریز و نکا مشاهده نمود. در این نیروگاه‌ها برای خنک‌کردن شمش‌های استاتور از سیستم آب خنک‌کن مدار بسته با آب بدون یون استفاده می‌شود. در ژنراتورهای نیروگاه نکا سیم‌پیچ‌های استاتور از نوع تسمه‌های توخالی ساخته شده‌اند که به‌وسیله عبور آب خالص و به دور از هر گونه یون خنک می‌شوند. همچنین روتور ژنراتور هم به‌وسیله عبور گاز هیدروژن از میان شیارها و سطح روتور خنک می‌شود. فشار لازم برای به گردش درآوردن گاز هیدروژن گرم‌شده توسط دو پروانه که در دو انتهای روتور تعبیه شده‌اند تأمین می‌گردد. گاز هیدروژن گرم‌شده در خارج از ژنراتور به‌وسیله چهار خنک‌کننده خنک می‌گردد تا دوباره در ژنراتور مورداستفاده قرار گیرد. البته خنک‌کننده‌های جداگانه‌ای برای خنک‌کردن آب عبوری از سیم‌پیچ‌های استاتور در نظر گرفته شده‌اند. ضمناً برای جلوگیری از نشت هیدروژن به خارج از ژنراتور و همچنین ممانعت از اتلاف آن از سیستم آب‌بندی روغنی استفاده می‌شود. در واحدهای ۳۲۰ مگاواتی نیروگاه اسلام‌آباد (مشابه با نیروگاه نکا) و برای خنک کردن شمش‌های استاتور از سیستم آب خنک کردن مداربسته استفاده می‌شود. در این سیستم آب گرم خارج‌شده از شمش‌های استاتور وارد یک تانک انبساط می‌شود که حداکثر درجه حرارت آب خروجی از استاتور ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد است. سپس توسط یک پمپ گریز از مرکز آب ذخیره‌شده در تانک پس از عبور از خنک‌کننده دوباره وارد سیم‌پیچ‌های استاتور می‌شود. البته با توجه به اهمیت خنک‌کنندگی ژنراتور تعداد پمپ‌های خنک‌کننده و فیلتر این سیستم دو عدد است که در حالت عادی یکی از آنها در حال بهره‌برداری و دیگری به‌صورت ذخیره هستند.

۳-۱۱- دلایل افزایش دمای استاتور ژنراتور

گرم شدن بیش از حد و غیر عادی ژنراتور یکی از پدیده‌هایی است که در ژنراتورهای نیروگاهی ممکن است رخ دهد. این پدیده در گزارشات متعددی که توسط اپراتورهای واحدهای نیروگاهی ارائه شده، رخ داده است. برای جلوگیری از وقوع خطاهای جدی ناشی از افزایش دما در ژنراتورها و تخریب آنها، لازم است که وضعیت قسمت‌های مختلف ژنراتور به‌صورت مداوم پایش گردد. بر اساس گزارشات منتشرشده توسط مؤسسه EPRI، سیم‌پیچ‌های استاتور و هسته استاتور دو بخش اصلی هستند که همواره در معرض افزایش دمای ناگهانی قرار دارند. بنابراین در ادامه به بررسی دلایل افزایش دما در این بخش‌ها و همچنین راهکارهای مقابله با آنها می‌پردازیم.

۳-۱۱-۱- افزایش دمای سیم‌پیچی استاتور

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

لرزش انتهای شینه استاتور می‌تواند موجب تخریب عایق ground wall در قسمت انتهایی شینه‌های ژنراتور شود. همچنین این لرزش‌ها می‌توانند موجب ایجاد تنش و آسیب در هادی‌های درون شینه‌ها و یا اتصالات آنها گردند. این لرزش‌ها در اثر نیروهای الکترومغناطیسی ناشی از هادی‌های حامل، ایجاد می‌گردند و اجتناب‌ناپذیر هستد. درصورتی‌که در اثر مرور زمان (و یا طراحی های ناصحیح) نگهدارنده‌های مکانیکی که انتهای شینه‌ها را از لرزش زیاد حفظ می‌کنند، شل شوند و یا دچار عیب گردند، لرزش انتهای شینه افزایش می‌یابد و درنتیجه به مرور زمان موجب ایجاد خطا در سیم‌پیچی استاتور می‌گردد. مسئله دیگری که ممکن است برای قسمت انتهایی شینه‌ها رخ دهد این است که لرزش‌های انتهای شینه موجب تحریک سیستم نگهدارنده مکانیکی می‌شود و درنتیجه هسته استاتور در فرکانس طبیعی نزدیک به ۱۰۰ هرتز (دوبرابر فرکانس سیستم) تحریک می‌گردد؛ در این حالت یک نیروی کوچک می‌تواند ایجاد لرزش با دامنه زیاد و در نتیجه آن ایجاد خسارت نماید. این پدیده معمولاً در نزدیکی شرایط نامی ژنراتور رخ می‌دهد. در طراحی ژنراتورهایی که بعد از سال ۱۹۸۰ میلادی ساخته شده‌اند، به افزایش استحکام در سیستم نگهدارنده برای جلوگیری از ایجاد این پدیده اهمیت زیادی داده شده است. به‌طور خلاصه می‌توان گفت لرزش در ناحیه انتهایی شینه‌ها می‌تواند موجب ایجاد مشکلات زیر گردد:

- ایجاد سایش و خراشیدگی در عایق ground wall انتهای شینه که موجب «خاکی» و یا «روغنی» شدن آن قسمت می گردد.
- ترک در عایق ground wall انتهای شینه و ایجاد خطای اتصال به زمین.
- شکستن هادی‌ها و درنتیجه افزایش محلی دما که سوختن عایق ground wall را در پی خواهد داشت.

در ژنراتورهای هواخنک که از سنسورهای RTD برای اندازه‌گیری دمای سیم‌پیچ‌ها استفاده می‌شود، به دلیل اینکه این حسگرها بین عایق دو شینه در درون برخی از شیارها قرار می‌گیرند، دمای اندازه‌گیری‌شده توسط آنها بین ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از دمای واقعی هادی‌های مسی درون شینه‌ها است. به دلیل تفاوت بین ضریب انبساط عایق و هادی‌های مسی، در اثر گرما، هادی‌ها انبساط طولی بیشتری از عایق پیدا می کنند و در نتیجه به عایق شینه‌ها خسارت می زنند. از طرف دیگر درصورتی‌که گوه‌ها در شیارها شل شده باشند، لرزش‌های شینه‌ها (درون شیار) که در اثر نیروهای الکترومغناطیسی به‌وجود می‌آیند، موجب سایش عایق به سطح داخلی دندانه‌های استاتور می‌شود که خراشیدگی و خرابی در عایق به‌وجود می‌آورند. این پدیده بیشتر در نزدیکی انتهای هسته رخ می‌دهد.

۳-۱۱-۲- افزایش دمای هسته استاتور

اتصال کوتاه بین عایق ورقه‌های هسته در اثر عواملی مانند تغییرات حرارتی، الکتریکی، مکانیکی، طراحی ناصحیح می‌تواند رخ دهد. در ماشین‌های الکتریکی هوا خنک، مهم‌ترین عامل گرم شدن بیش از حد هسته، مسدود شدن مسیر تهویه، به دلیل وجود روغن و یا گرد و خاک است. اگر مدت‌زمان این اشکال طولانی شود، روند تخریب عایق سرعت می‌گیرد. وقتی دمای هسته به بیش از مقادیر طراحی افزایش یابد، نیروهای محوری و شعاعی وارد بر نگه‌دارنده‌های هسته به مقدار کافی بزرگ هستند که آن را تغییر شکل دائمی دهند. بنابراین حتی پس از رفع مشکل گرمای بیش از حد نیز امکان دارد که تخریب هسته و سایش عایق بین ورقه‌های آن ادامه یابد. همچنین اگر به‌منظور سیم‌پیچی مجدد و برای درآوردن

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

سیم‌پیچ‌های قبلی از روش گرم کردن استفاده شود، مناسب نبودن دمای گرمایش (گرم کردن بیش از حد) می‌تواند باعث تخریب عایق بین ورقه‌ها گردد. افزایش بیش از حد چگالی شار (بیش از مقادیر طراحی) در یوغ استاتور نیز می‌تواند منشأ گرمایش بیش از حد آن گردد که تخریب عایقی و افزایش ارتعاشات مکانیکی، از پیامدهای آن است. اگر در اثر هر نوع خطا در سیم‌پیچی درون شیارها، جریان زیادی از آنها عبور کند، امکان سوختن عایق بین هسته‌ها و ذوب شدن ورقه‌ها وجود دارد. در برخی ژنراتورها، هسته استاتور از طریق عبور دادن پیچ (میله عایق‌شده) از سوراخی که در هسته ایجاد می‌گردد و با مهره و جوش کردن آن به هم، محکم می‌شوند. با از بین رفتن این مهره‌ها و یا گشاد شدن پیچ‌ها، عایق دور میله از بین می‌رود و ورقه‌های استاتور اتصال کوتاه می‌شوند. همین‌طور شل شدن این اتصالات باعث می‌شود که ارتعاشات هسته افزایش یابد و امکان تخریب عایق‌ها و سوختن هسته فراهم گردد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

فصل چهارم

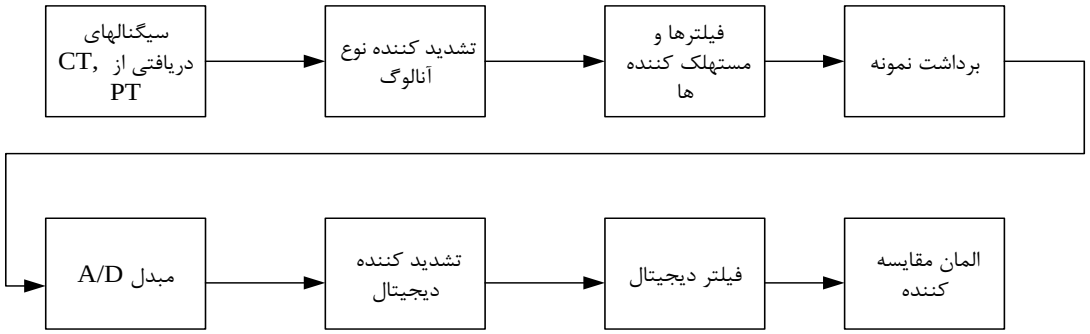
تجربه کشورهای مختلف در تدوین

دستورالعمل حفاظتی

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۴-۱- مقدمه

در این بخش استانداردهای ارائه‌شده توسط برخی از کشورها در زمینه حفاظت تجهیزات نیروگاهی موردبررسی قرار می‌گیرد. در بسیاری از کشورها با توجه به قابل‌دسترس بودن رله‌های ساخت شرکت‌های معتبر بخش عمده‌ای از دستورالعمل حفاظتی آن‌ها به تنظیمات رله‌ها متمرکز شده است. با این حال در دو کشور برزیل و کانادا با توجه به شرایط خاص موجود در دو نیروگاه که در ادامه به بررسی آن پرداخته می‌شود، دستورالعمل‌های مخصوص حفاظت‌های کمکی تدوین شده است. در ارائه این دستورالعمل‌ها تمرکز بر رله‌های دیجیتال است. در این نوع رله‌ها امکان مقابله با عیوب روی داده‌ها و تجهیزات و شبکه‌های تولید و انتقال به‌صورت بر خط قابل پیاده‌سازی است. در این مدل رله‌ها از عوامل نامطلوبی همچون قطع نابجا کلیدها و خاموشی بی‌مورد به‌صورت کامل اجتناب می‌شود. همچنین این رله‌ها تغییر شکل کمیات تغذیه رله، با توجه به نوع مدار و پدیده‌های احتمالی تخمین زده می‌شود. به عبارت دیگر در رله‌های دیجیتال اطلاعات دریافتی با استفاده از فیلترهای خاص میکروپروسسوری شکل ایدئال را به‌دست آورده، رله با توجه به شکل ایدئال سینوسی یا هارمونی اول کمیات تغذیه عمل می‌کند. مراحل تهیه سیگنال الکتریکی به‌منظور تغذیه رله اضافه جریان، بدون نیاز به المان‌های مکانیکی یا الکترودینامیکی معمول در رله‌های نوع آنالوگ در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. در تدوین استاندارد نیازهای هر یک از مراحل زیر به‌صورت جامع موردتحلیل قرار گرفته و الزامات لازم برای طراحی و ساخت رله دیجیتال برای هر یک از تجهیزات نیروگاهی مشخص می‌گردد.



شکل (۴-۱): مراحل تهیه سیگنال الکتریکی به‌منظور تغذیه رله اضافه جریان

۴-۲- دستورالعمل حفاظتی در شبکه برق ایالت B.C.Hydro در کشور کانادا

شبکه برق ایالات British Columbia واقع در کشور کانادا با ولتاژ ۵۰۰ کیلو ولت بهره‌برداری می‌شود. در این شبکه تعداد بسیار زیادی خطوط انتقال انرژی به‌منظور انتقال توان تولیدی نیروگاه‌های آبی واقع در شمال ناحیه Peac River Canyon را به جنوب، مرکز ایالت و شهر ونکور موردبهره‌برداری قرار می‌گیرند. طول متوسط این خطوط در حدود ۸۰۰ کیلومتر با ظرفیت انتقالی ۲۲۷۰ مگا وات است. با توجه به طول بالای خطوط، راکتورهای شنت وصل به خطوط و باس‌ها ضروری است. در این شبکه تعداد راکتورهای شنت ۵۰۰ کیلوولت به حدود ۴۰۰ واحد تخمین زده می‌شود. با توجه به تعداد بالای راکتورهای شنت، تدوین دستورالعمل حفاظت مناسب به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان شبکه ضروری است. به‌منظور انتقال توان توسط این خطوط به‌طور معمول تعداد چهار ایستگاه ۵۰۰ کیلو ولت، ۲ ایستگاه در انتهای خطوط و همچنین دو ایستگاه واسط در مسیر خط به‌منظور اتصال ۲ کلید و راکتورهای شنت در نظر گرفته شده‌اند. به‌طورکلی در این خطوط انتقال توان نیروگاه‌های آبی به

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

فواصلی که مشخص شده‌اند، تنها با استفاده از راکتورهای شنت ممکن است. منابع قدرت راکتیو نصب‌شده در خطوط فشار قوی این شبکه شامل راکتورهای شنت با قدرت ۱۳۵ مگاوار و کمپانساتورهای سنکرون با قدرت ۷۵ مگاوار است [۳۱].

در این بخش تجربیات بهره‌برداری و دستورالعمل‌های خاص که به‌منظور بهره‌برداری ایمن از راکتورهای شنت موجود در شبکه منطقه مورداشاره استفاده شده، تشریح می‌گردد. میزان مؤثر بودن دستورالعمل در تشخیص به موقع خطاهای رخ داده و نقش این دستور العمل در جلوگیری از صدمه به راکتورهای شنت با توجه به خصوصیات ویژه راکتورها شرح داده می‌شوند. این تجزیه و تحلیل حوادث روی‌داده و میزان مؤثر بودن رله‌های حفاظتی و مشکل‌های موجود در کار آنان با توجه به مطالعات استاتیکی در طی ۳۰ سال بهره‌برداری در شرکت برق ایالت برتیش کلمبیا در کشور کانادا جمع‌آوری شده است [۳۱].

۱-۲-۴- خصوصیات عیوب روی‌داده در راکتورها و بررسی آماری مربوط به آن

خسارات ناشی از وقوع خطا در راکتور را می‌توان مشابه ترانس‌های قدرت در نظر گرفت. برخی از خطاها در عایق داخلی شامل خطای فاز به زمین، خطای داخلی در بوشینگ‌ها، خطای حلقه - حلقه در سیم‌پیچ‌ها و برخی دیگر خطاهای جنبی از جمله کاهش سطح روغن، قطع سیستم خنک‌کنندگی و غیره بوده‌اند [۳۳]. به‌طورکلی در این گزارش خطاهای ثبت‌شده در شرکت برق منطقه به‌دسته کلی تقسیم می‌گردند:

۱- خطاهای ثبت‌شده بر اثر افزایش شدید جریان فاز، شامل خطای فاز به زمین

۲- خطاهای حلقه - حلقه در سیم‌پیچ‌های راکتور

۳- خطاهای غیر الکتریکی این خطاها با کاهش شار راکتور همراه نبوده در نتیجه موجب تغییرات لحظه‌ای جریان نمی‌شود مانند سطح روغن و قطع سیستم خنک‌کنندگی و غیره. عدم تشخیص این خطاها در صورت ادامه در طول مدت بهره‌برداری سبب رخ دادن خطاهای دسته ۱ و ۲ رو به شدت افزایش می‌دهند. در نتیجه به دلیل کاهش ریسک بهره‌برداری، رله‌های مناسب برای تشخیص خطاهای غیر الکتریکی و مکانیکی در تجهیزات نصب شده است. از معروف‌ترین این نوع رله‌ها به رله مکانیکی کنترل سطح روغن، درجه حرارت سیم‌پیچ‌ها، اندازه‌گیری افزایش ناگهانی فشار گاز اشاره کرد.

رله‌های مکانیکی اشاره‌شده در تشخیص خطاهایی که در دو دسته ۱ و ۲ طبقه‌بندی می‌گردند نیز می‌توانند مورداستفاده قرار بگیرد. در طراحی دستورالعمل حفاظتی راکتورهای شنت برق منطقه‌ای بریتیش کلمبیا، رله افزایش فشار گاز با اندازه‌گیری نرخ رشد لحظه‌ای فشار گاز در داخل محفظه بسته راکتور در پی بروز خطا در ایزولاسیون داخلی فعال شده، و تشخیص خطا را در فاصله زمانی بسیار کوتاه چند سیکل را ممکن می‌سازد. با این حال استفاده از رله‌های الکتریکی برای تشخیص خطاهای داخلی در عایق‌بندی هادی‌ها و سیم‌پیچی استفاده می‌شوند. با این حال، در حفاظت راکتورهای شنت شرکت برق منطقه‌ای برتیش کلمبیا، در تشخیص این خطاها از رله مکانیکی افزایش فشار گاز نیز به‌کار برده می‌شود. نوع قوس و شدت قوس داخلی میزان افزایش ناگهانی فشار گاز در داخل محفظه را مشخص می‌کنند. در مواقعی که میزان قوس قابل صرف نظر کردن باشد، سرعت افزایش فشار گاز مقدار کافی برای تحریک رله را از دست داده و موجب از کار افتادگی رله و یا تأخیر زمانی در کار رله می‌شود. خطاهای داخلی با شدت محدود از جمله خطای حلقه به حلقه و یا خطای نزدیک به نقطه نول، با استفاده از رله افزایش ناگهانی فشار تشخیص داده می‌شوند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

استفاده از رله افزایش ناگهانی فشار در راکتورهای شنت شبکه برق بریتیش کلمبیا بر اساس نتایج تجربی عملکرد آن‌ها در دوره بهره‌برداری و تجزیه تحلیل مشکلات و دشواری‌های پیاده‌سازی این نوع از حفاظت صورت گرفته است. در طول ۳۰ سال گذشته، تعداد ۲۱۷ رله نصب‌شده در راکتورهای شنت و ترانسفورماتورهای شبکه موردبررسی قرار می‌گیرد. بر اساس مطالعات مطرح‌شده در این گزارش تعداد ۹۰ رله بر اثر خطاهای داخلی عملکرد مناسبی نداشتند، و سیستم موردحفاظت قرار گرفته‌شده را با مشکل روبه‌رو می‌کند. در نتیجه در تدوین دستورالعمل ویژه حفاظت شرکت برق منطقه‌ای برتیش کلمبیا، رله‌های افزایش فشار ناگهانی گاز در ترانسفورماتورهای قدرت باز نموده و با رله‌های الکتریکی مناسب جایگزین شده‌اند. با این حال، این اقدام در مورد رله‌های به‌کاررفته در راکتورهای شنت امکان‌پذیر نبوده است. در نتیجه عدم اطمینان رله‌های افزایش ناگهانی فشار گاز در تشخیص خطاهای داخلی، در راکتورهای شنت رله‌های الکتریکی تقویت و اصلاح شده تا به‌صورت هماهنگ با رله‌های مکانیکی اشاره شده حفاظت راکتورهای شنت را بر عهده گیرند. رله‌های الکتریکی پیش‌بینی‌شده در این دستورالعمل رله دیفرانسیل، حفاظت اضافه جریان فاز و زمین خطاهای الکتریکی را بر اساس تغییرات لحظه‌ای جریان‌های راکتور تشخیص می‌دهند [۳۱].

نتایج مطالعات آماری وقوع خطا در راکتورهای شنت این شرکت، موجب استفاده ترکیبی از حفاظت‌های مکانیکی و الکتریکی با تأخیر زمانی مناسب و همچنین قفل شدن در قبال جریان هجومی با استفاده از حفاظت اضافه جریان زمین جهتی با حساسیت بالا شد.

۲-۲-۴- مشکلات موجود در حفاظت راکتورهای شنت

شرکت برق منطقه‌ای بریتیش کلمبیا مشکلات حفاظتی طرح‌های معمول حفاظت راکتور را پس از تحلیل حوادث در طول بهره‌برداری از به ۴ گروه عمده زیر تقسیم کرده است [۳۳]:

۱- خطاهای حلقه – حلقه در راکتورهای شنت در پاره‌ای از مواقع با ایجاد تغییرات ناچیزی همراه بوده و در نتیجه رله‌های حفاظتی پیش‌بینی‌شده برای این خطا فعال نمی‌شوند. رله‌های دیفرانسیل در راکتورهای شنت معمولا قادر به تشخیص خطای حلقه – حلقه نیستند. در نتیجه مطابق با تحلیل حوادث پیش‌بینی طرح حفاظتی برای تشخیص این خطا ضروری است.

۲- سطح جریان هجومی در راکتورهای شنت نصب‌شده در این شرکت تا حد قابل‌قبولی به دلیل مجهز بودن این راکتورها به شکاف فاصله هوایی در هسته کاهش می‌یافتند. در نتیجه درصد هارمونی دوم جریان هجومی نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه با توجه به کاهش هارمونی دوم جریان، عملکرد رله اضافه جریان هارمونی دوم (رله قفل نمودن حفاظت‌های حساس به جریان هجومی) تحت تأثیر قرار گرفته و عملکرد مناسبی دارا نبوده است.

۳- جریان هجومی برقرارشده در راکتورهای شنت دارای مقدار بزرگ‌تری ثابت مؤلفه DC بوده، در نتیجه احتمال اشباع DC ترانسفورماتورهای جریان فاز به‌صورت غیرمتقارن همراه است.

۴- راکتورهای شنت با اتصال مستقیم به خط، در هنگام بی‌برق شدن سه‌فاز خط، مداری شامل خاصیت خازنی خط و اندوکتانس سیم‌پیچ‌های راکتور را به‌وجود می‌آورند و در نتیجه ولتاژ نواسانی با فرکانس نشان داده‌شده در رابطه (۱) با توجه به انرژی ذخیره‌شده در سیم‌پیچ‌های راکتور ایجاد می‌گردد. در این رابطه توان راکتیو راکتورهای شنت با Q_{SH} و قدرت راکتیو خازنی خط با Q_C نشان داده شده‌اند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

$$f=60\sqrt{\frac{Q_{SH}}{Q_C}} \qquad (۴-۱)$$

در بسیاری از موارد خاصیت خازنی خط توسط راکتورهای شنت به‌صورت صد در صدی جبران‌سازی نمی‌شوند. در نتیجه فرکانس نوسانات ولتاژ باقی‌مانده در خط به‌صورت کسری از فرکانس شبکه (۶۰ هرتز) کاهش می‌یابد. این نوسانات موجب افزایش جریان در راکتورهای پس از قطع خط می‌شود. علاوه بر این، نوسانات ایجادشده مؤلفه صفر را نیز شامل می‌شود، در نتیجه در پی قطع یک فاز، ولتاژ حفظ‌شده در خط ولتاژ نوسانی خواهد بود.

۳-۲-۴- مقرارت پیش‌بینی‌شده در طرح‌های حفاظتی راکتورهای شنت

استفاده از رله و تجهیزات حفاظتی الکتریکی و مکانیکی به‌عنوان راهکارهای حفاظت از راکتورهای شنت شبکه برق این ایالت، توسط کارشناسان موردمطالعه و بررسی قرار گرفته شد. تدوین مدار حفاظتی مناسب جهت تشخیص خطای حلقه – حلقه به‌صورت ایمن و عدم کار در قبال تغییرات گذرای ولتاژ در مواقع قطع و وصل کلیدها و مسائل جانبی است. حفاظت اول و عمده در راه تشخیص خطای فاز به فاز در سیم‌پیچی‌ها و اتصال سیم‌پیچ‌ها به هسته یا بدنه یا تانک راکتور توسط حفاظت دیفرانسیل که از سیگنال‌های نمونه‌گیری‌شده توسط ترانس جریان مسیر نول، ترمینال‌ها راکتور شنت قبل از تنظیم دستور العمل حفاظتی این سیستم انجام می‌گیرد. با این حال این نوع حفاظت، قادر به تشخیص خطای حلقه- حلقه که بر اثر انتقال جریان خطای عبوری رخ داده باشد، نیست. در این نوع خطا امپدانس فاز تحت شرایط خطا کاهش یافته و جریان گردشی میان فازها به جریان عبوری از فازهای سیم‌پیچی اضافه می‌گردد. درصورتی‌که راکتور زمین شده باشد، جریان مؤلفه صفر را از طریق نقطه نول به زمین هدایت می‌گردد. در نتیجه به‌منظور تشخیص خطای حلقه- حلقه در راکتورهای زمین شده، اندازه‌گیری امپدانس فاز یا جریان مؤلفه صفر استفاده می‌گردد [۳۱].

این شرکت از رله اضافه جریان زمین جهتی در مسیر نول با کد 32N برای روش تشخیص خطاهای حلقه- حلقه استفاده می‌کنند. این رله به‌عنوان رله جهتی زمین شناخته می‌شود. خطای حلقه – حلقه را از طریق عبور جریان مؤلفه صفر تشخیص می‌دهد. لازم به یادآوری است، این رله در قبال سایر خطاهای زمین خارجی، مانند خطای زمین در شینه تغذیه یا در خط، عمل نمی‌کند. در تنظیمات رله پنج تا ده درصد جریان اسمی راکتور به‌عنوان حد فعال‌سازی انتخاب می‌شود. دستور تریپ نیز با تأخیر زمانی ناچیز با استفاده از تایمر انجام می‌شود. همچنین به‌منظور غیر فعال کردن عملکرد رله در هنگام ورود اولیه راکتور به مدار از یک مدار منطقی استفاده می‌گردد.

برای مقابله با عملکرد نابجا رله در برابر اشباع نابرابر سه واحد ترانسفورماتور جریان نصب‌شده در سه‌فاز راکتور در هنگام وارد مدار شدن، رله از طریق ترانس جریان نصب‌شده در نقطه نول تغذیه می‌گردد. برای حفاظت پشتیبان یک رله اضافه جریان با مشخصه زمانی معکوس 51NT استفاده شده است.

با توجه به مطالب ارائه‌شده در این بخش، شرکت برق منطقه‌ای برای حفاظت از راکتورهای شنت، از رله‌های چندمنظوره استفاده می‌کند. رله‌های اضافه جریان فاز و زمین و رله‌های اضافه جریان مسیر نول رله‌های چندمنظوره موجود در طرح حفاظت از راکتورهای شنت هستند. رله‌های اضافه جریان مسیر نول توسط ترانسفورماتورهای جریان در مسیر نول راکتور و رله‌های اضافه جریان زمین از جریان مؤلفه صفر در سمت تغذیه

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

راکتور سیگناهای ورودی رله‌ها را شامل می‌شوند. از دیگر مزایای این طرح‌های حفاظتی می‌توان به امکان ثبت کمیت‌های خطا اشاره کرد [۳۲].

برای حفاظت از افزایش ولتاژ از رله‌های ولتاژی تنظیم‌شده بر روی ۱۲۰ درصد ولتاژ با تأخیر زمانی محدود استفاده می‌شود. در طرح حفاظتی ارائه‌شده در این دستورالعمل از حفاظت 51P به‌عنوان حفاظت پشتیبان در نظر گرفته شده است. در همین راستا حداقل تأخیر زمانی ۱/۶ ثانیه به ازای جریانی معادل ۱۵۰ درصد جریان نامی برای مشخصه کار رله اضافه جریان زمانی خیلی معکوس تنظیم شده است. به‌منظور حفاظت از قطع در قبال جریان هجومی، رله اضافه جریان فاز لحظه‌ای رله 50P پیش‌بینی‌شده در مدار منطقی مورداستفاده قرار می‌گیرد. به‌منظور حفاظت خطای حلقه به حلقه از ترکیب طرح حفاظتی المان اضافه جریان زمین در نقطه نول از نوع لحظه‌ای 50N که توسط مدار زمین نقطه نول به المان جریان جهتی در رله 51N مشخص شده، از ترانسفورماتور جریان نقطه نول راکتور تغذیه می‌شود و همچنین المان جهتی نظارت شده که توسط المان جهتی با استفاده از ولتاژ مؤلفه صفر در طرف تغذیه راکتور و ناحیه مستقیم به سمت راکتور سیگنال‌های خود را دریافت می‌کند، استفاده شده است.

۴-۲-۴- مدار منطقی جلوگیری از قطع در قبال جریان هجومی

در دستورالعمل ارائه‌شده در رله‌های حفاظتی راکتورهای شنت، مدار منطقی مناسب به‌منظور جلوگیری از به عملکرد نا به جای رله در هنگام جریان‌های هجومی استفاده می‌شود. در این مدار منطقی، رله حفاظتی خطای حلقه- حلقه در رله چندمنظوره توسط مدار منطقی در شرایط جریان هجومی قفل می‌گردد.

مدار منطقی جلوگیری از قطع راکتور در جریان هجومی، مدار قطع رله اضافه جریان زمین را در هنگامی که از راکتور از مدار خارج شده، باز می‌شود چند ثانیه پس از وارد مدار شدت راکتور مدار حفاظتی را کامل می‌کند. المان اضافه جریان استفاده شده در مدار منطقی جلوگیری از قطع راکتور در جریان هجومی، در ۸۰ درصد جریان اسمی و تأخیر به میزان ۲۴۰ سیکل تنظیم شده است. از دیگر مزایای این مدار منطقی می‌توان به تشخیص در مدار قرار گرفتن و قرار نگرفتن خط جبران‌سازی‌شده را از طریق اندازه‌گیری ولتاژ خط اشاره کرد.

مدار منطقی قادر به تشخیص قوس تک‌فاز یا وصل غیر کامل دستگاه قطع و وصل راکتور است. این ویژگی به دلیل قطع راکتور با استفاده از رله اضافه جریان فاز است. رله در صورت برقراری جریان در هر فاز راکتور (کار رله‌های 50C, 50B, 50A) درحالی‌که کنتاکت‌های کمکی سکسیونر یا کلید راکتور وضعیت باز بودن و بی برق بودن راکتور را نشان دهدف عمل می‌کند.

پیش‌بینی مورداشاره به‌منظور تشخیص بروز قوس در داخل محفظه قطع یا قوس در فاصله ترمینال‌های دستگاه قطع‌کننده صورت می‌گیرد. این مدار منطقی در صورت برقراری جریان در سیم‌پیچ‌های راکتور در هنگام باز نمودن و بی‌برق نمودن راکتور کلید خط را قطع و راکتور را ایزوله می‌کند.

راکتورهای شنت این شرکت همانند ترانسفورماتورها با استفاده از رله Lock-out و قفل شدن همزمان کلیدهای قطع‌شده عمل ایزوله شدن راکتور کامل می‌شود.

۴-۳- دستورالعمل حفاظتی در نیروگاه آبی Itaipu

این نیروگاه آبی بر روی رودخانه‌ای با همین نام در جنوب کشور برزیل در امتداد مسیر مرزی میان برزیل و پاراگوئه احداث شده است. انرژی تولیدشده توسط این نیروگاه به‌صورت مساوری میان دو کشور برزیل و پاراگوئه

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

تقسیم می‌شود. این نیروگاه داری ۱۸ ژنراتور ۷۰۰ مگاواتی بوده و به‌طورکلی انرژی تولید این نیروگاه معادل با ۱۲۶۰۰ مگاوات است. در مورد ضرورت حفاظت مناسب از این نیروگاه و جلوگیری از قطع نابجای این نیروگاه می‌توان به اهمیت این نیروگاه در تأمین انرژی دو کشور برزیل و پاراگوئه اشاره کرد. طبق ارزیابی‌های صورت‌گرفته این نیروگاه در حدود ۲۳٪ انرژی موردنیاز کشور برزیل و همچنین ۹۰٪ از انرژی موردنیاز کشور پاراگوئه را تأمین می‌کند. به دلیل مصرف انرژی کمتر کشور پاراگوئه بخشی از توان تولیدی این نیروگاه مربوط به کشور پاراگوئه به کشور برزیل فروخته می‌شود. در نتیجه در حدود ۶ درصد از توان تولیدی به کشور پاراگوئه منتقل شده و ۹۴ در صد توان تولیدی برای مصرف در خاک برزیل استفاده می‌گردد [۳۳].

شبکه سراسری کشورهای برزیل و پاراگوئه با فرکانس‌های ۶۰ و ۵۰ هرتز انرژی مشترکین خود را تأمین می‌کنند. در نتیجه از ۱۸ ژنراتور موجود در این نیروگاه تعداد ۹ نیروگاه با فرکانس اسمی ۶۰ هرترز متعلق به کشور برزیل در سمت چپ این سد و تعداد ۹ نیروگاه با فرکانس اسمی ۵۰ هرترز متعلق به کشور پاراگوئه در سمت راست این رودخانه نصب شده‌اند. توان تولیدی تمام واحدهای این نیروگاه با استفاده از ترانسفورماتورهای افزاینده به ولتاژ ۵۰۰ کیلو ولت تبدیل شده و پس از آن توسط ۸ خط جریان متناوب و ۴ خط جزیان مستقیم برای کشور برزیل منتقل شده و توسط ۴ خط توان متوسط در کشور پاراگوئه این توان منتقل می‌گردد.

۱-۳-۴- دلایل نوشتن دستورالعمل حفاظتی ویژه در نیروگاه

با توجه به بهره‌برداری اولیه از واحدهای نیروگاهی با فرکانس۵۰ هرتز در ابتدای افتتاح این نیروگاه، استفاده موازی از این نیروگاه توسط دو کشور برزیل و پاراگوئه نیازمند تدوین دستورالعمل‌های حفاظتی مناسب و استفاده از سیستم‌های حفاظتی مخصوص است. در هنگام راه‌اندازی واحدهای تولیدی بخش ۶۰ هرتز مشکلات حفاظتی به‌طور کامل در شبکه دیده شده بود. در نتیجه سیستم حفاظتی مخصوص به‌منظور کنترل خطوط و واحدهای تولیدی به‌صورت کامل پیش‌بینی شد.

به‌طورکلی اهداف پیش‌بینی و استفاده از مدارات حفاظتی مخصوص در این نیروگاه را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد [۳۴]:

۱- ساختمان سیستم حفاظتی ساده و مناسبی دارا است.

۲- قابل اطمینان مناسبی جهت جلوگیری از عملکرد اشتباه رله را دارا است.

۳- هزینه پیاده‌سازی این سیستم محدود و قابل‌سرمایه‌گذاری بوده است.

۴- بررسی حوادث و تجزیه تحلیل آن، از نقش مهم این سیستم در عملکرد سیستم حفاظتی را روشن ساخته است.

این نیروگاه از لحظه وارد مدار شدن اولین ژنراتور تولید توان خود تا تکمیل تمامی فازهای خود به‌صورت دوره‌ای به‌روزرسانی شده است. در این بین جابه‌جایی اتصالات و راه‌اندازی واحدها، عدم هماهنگی موقت در ظرفیت خطوط انتقال تولیدی، مشکلات و حوادثی را به‌وجود آورده بود. به همین دلایل روش‌ها و تجهیزات خاصی به‌منظور ایجاد بیشترین هماهنگی ممکن میان تمام تجهیزات ضروری بودند از جمله این ضرورت‌ها ایجاد طرح حفاظتی مخصوص برای این نیروگاه بوده است [۳۵].

بخش عمده‌ای از طرح حفاظتی مخصوص به‌منظور مقابله با حوادث روی داده در بخش ۶۰ هرتز عمل می‌کند. که در مورد علت این امر وجود سیستم ارتباط و کنترل اتوماتیک موجود در ایستگاه‌های این بخش اشاره شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

این حفاظت قادر به کنترل مناسب تمامی بخش‌های نیروگاه از جمله ژنراتورها، راکتورها و خطوط انتقال در برابر رخ دادن تمامی خطاها است.

در سال ۲۰۰۵ عملکرد این سیستم موردبازنگری قرار گرفته و عملکرد آن به‌صورت گزارشی ارائه شده است. بر اساس این گزارش طرح حفاظتی مخصوص در بخش با فرکانس ۶۰ هرتز، ۱۷ مورد سیگنال آلارم و یا سیگنال قطع به ژنراتورهای نیروگاه و سیستم کنترل شبکه ارسال کرده است. این آلارم‌ها و اقدامات صورت‌گرفته‌شده توسط طرح حفاظتی مخصوص در بخش ۶۰ هرتز نیروگاه به شرح زیر بوده است [۳۶]:

- ۷ عملکرد طرح حفاظتی جهت حفظ پایداری شبکه در قبال خطاهای روی داده در خطوط ۷۶۵ کیلوولت
- یک عملکرد طرح حفاظتی جهت اقدام برای حفاظت ژنراتور در شرایط کار زیر تحریک و قطع تحریک
- یک عملکرد طرح حفاظتی جهت حفاظت شبکه ۵۰۰ کیلوولت در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از رزونانس
- سه مورد عملکرد به‌منظور کنترل اضافه فرکانس و جلوگیری از مدار خارج شدن نیروگاه‌های حرارتی در جنوب برزیل
- سه مورد اقدام برای کاهش اضافه بار ترانسفورماتوهای قدرت
- یک مورد عملکرد به‌منظور جلوگیری از فروپاشی ولتاژ
- یک مورد اقدام به‌منظور تأمین اطمینان کافی در استهلاک نوسانات ظاهر شده

در مورد آلارم‌ها و اقدامات صورت‌گرفته‌شده توسط طرح حفاظتی مخصوص در بخشی با فرکانس ۵۰ هرتز نیروگاه، تا تاریخ تدوین گزارش تعداد ۱۴ ارسال سیگنال ثبت شده است. اقدامات صورت‌گرفته در این بخش شامل کنترل واحدهای تولیدی در نیروگاه ۵۰ هرتز، کنترل شبکه سراسری در منطقه آند، و کنترل خطوط جریان متناوب است. به‌طورکلی همانند بخش با فرکانس ۶۰ هرتز، اقدامات صورت‌گرفته توسط سیستم حفاظت مخصوص در بخش ۵۰ هرتز به‌صورت زیر است:

- ۵ مورد اقدام به‌منظور کنترل فرکانس در ناحیه آند (شبکه سراسری کشور پاراگوئه)
- ۳ مورد اقدام به‌منظور جلوگیری از افت فرکانس در شبکه
- ۴ مورد عملکرد برای جلوگیری از اضافه ولتاژ
- ۱ مورد عملکرد برای کاهش اضافه بار در شبکه ۵۰۰ کیلو ولت
- ۱ مورد فعالیت به‌منظور کاهش اضافه بار ترانسفوماتور

۲-۳-۴- حفاظت در بخش با فرکانس ۶۰ هرتز

در این بخش شرح مختصری از پیش‌بینی‌ها و اقدامات انجام‌شده به‌منظور پیش‌بینی خطا و رفع خطا از نیروگاه و ایستگاه‌های بخش با فرکانس ۶۰ هرتز ارائه می‌شود. این مطالب شامل رله‌های حفاظتی و نوع تجهیزات مورد قطع و وصل است [۳۳].

- جلوگیری از اضافه ولتاژهای دائم فرکانس ۵۰ در شبکه ۵۰۰ کیلوولت

در شبکه این نیروگاه، در صورت قطع خطوط ۷۶۵ کیلو ولت مداری مناسب جهت بروز رزونانس ایجاد می‌شود. همان‌گونه که مشخص است ایجاد رزونانس با اضافه ولتاژهای موقت درازمدت همراه خواهد بود. در مدار رزونانس ژنراتورها در این نیروگاه، خطوط ۵۰۰ کیلوولت و ترانسفورماتورها در ایستگاه foz do Iguacu موجود هستند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

طرح حفاظتی مخصوص در صورت افزایش ولتاژ تا بیش از ۶۰۰ کیلو ولت در فاصله زمانی بیش از ۲۵۰ میلی ثانیه، فرمان قطع سه خط ۷۶۵ کیلو ولتی در ایستگاه مورداشاره و همچنین کلیه ژنراتورها و خطوط ۵۰۰ کیلو ولت را ارسال می‌کند. این اضافه‌ولتاژ توسط دو رله تشخیص داده شده و باز شدن خطوط ۷۶۵ کیلو ولتی توسط ارسال سیگنال‌های مخابراتی به نیروگاه اعلام می‌گردد.

- وارد نمودن تجهیزات مستهلک‌کننده نوسانات شبکه در طول مدت برقراری ارتباط با شبکه ناحیه جنوب کشور برزیل

بدین‌منظور به ترتیب در هنگام افزایش فرکانس تا بیش از ۶۲/۵ هرتز و در هنگام کاهش فرکانس تا مقداری کمتر از ۲۶ هرتز کانال کانال فرکانسی PSS قطع و وصل می‌گردد. همچنین به‌منظور جلوگیری از ایجاد اشتباه به دلیل کاهش فرکانس درصورتی‌که سیگنال PSS از سمت شبکه تولید محاسبه شده باشد، مدار منطقی پیش‌بینی شده عمل می‌کند. در این حالت در صورت قطع خط ارتباطی این افزایش فرکانس ایجاد می‌گردد.

- اقدامات پشتیبانی مناسب جهت کنترل افزایش فرکانس در ناحیه جنوب برزیل

سیستم پشتیبان کنترل افزایش فرکانس در زمانی که سیستم‌های اصلی پیش‌بینی‌شده در سیستم PSS به‌منظور کنترل افزایش فرکانس در سیستم اتوماتیک دچار تقض شده باشد، عمل می‌کند. درصورتی‌که سرعت افزایش فرکانس به مقداری بیش از ۱/۲ هرتز بر ثانیه برسد و فرکانس در محدوده ۶۱/۵- ۶۱ هرتز باشد، ژنراتور در نیروگاه آبی از مدار خارج می‌گردد.

- محافظت ژنراتور در نیروگاه در قبال قطع تحریک

در صورتی عبور نرخ تغییرات فرکانس از مقدار ۲/۴ هرتز بر ثانیه و حضور فرکانس در محدوده‌ی ۶۱/۵- ۶۱ هرتز . همان‌گونه که انتظار می‌رود رله افزایش فرکانس عمل می‌کند با این حال با هدف افزایش اطمینان از دو رله حفاظتی دیگر استفاده شده است. در صورت کار هر یک از این رله‌های حفاظتی سیگنال‌های لازم از طریق سیستم‌های مخابراتی جهت قطع ۴ خط ۵۰۰ کیلو ولت با ایستگاه موردنظر ارسال می‌گردد.

اقدام عمده طرح حفاظتی مخصوص با توجه به سیستم کنترل PLC قطع ژنراتورها است. مطابق با استانداردهای ارائه‌شده قطع ژنراتور در صورت قرار داشتن در هر یک از شرایط اضطراری که توسط متغیرهای زیر مشخص می‌شوند، ضروری است:

۱- تعداد ژنراتورهای در حال کار

۲- میزان تولید قدرت اکتیو در فرکانس ۶۰ هرتز

۳- توان موردنیاز در ناحیه

۴- ولتاژ در خط ۷۶۵ کیلو ولت

متغیرهای مشخص‌شده در فوق در سرتاسر شبکه اندازه‌گیری شده و به سیستم کنترل PLC منتقل می‌گردد. بر اساس مدارهای منطقی پیش‌بینی‌شده در طرح حفاظتی مخصوص، در صورت وقوع شرایط لازم ژنراتور از مدار خارج می‌گردد.

- حفظ پایداری شبکه

برای حفظ پایداری شبکه تعداد هفت واحد منطقی آماده کاهش بار واحدهای ژنراتوری در بخش تولید با فرکانس ۶۰ هرتز در صورت خروج خطوط ۷۶۵ کیلو ولت یا قطع ترانسفورماتورها در پست‌های فشار قوی آن هستند. در

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

بخش سیستم حفاظتی موردنظر مدارهای منطقی پیش‌بینی‌شده به‌منظور حفظ پایداری شبکه به شماره ۲، ۵، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ مشخص شده‌اند.

- کنترل فرکانس در ناحیه جنوب برزیل

در طرح حفاظتی مخصوص ارائه‌شده، دو مدار منطقی برای جلوگیری از قفل شدن نیروگاه‌های حرارتی واقع در جنوب برزیل انتخاب شده‌اند. این دو مدار عملکردی به‌صورت مکمل یکدیگر را دارند. در زمان قطع خط ۷۶۵ که نیروگاه را به سمت جنوب رودخانه مرتبط می‌کند، مدار منطقی اول فعال شده و موجب قطع ژنراتورهای نصب‌شده در نیروگاه آبی به‌صورتی‌که حداقل ۴ واحد به‌صورت موازی در حال کار باشند، می‌شود.

- کاهش بار ترانسفورماتور

در طرح حفاظتی مطرح‌شده، سه مدار منطقی با هدف کاهش اضافه بار ترانسفورماتورهای پست نیروگاهی در نظر گرفته شده است. هنگامی که اضافه بار در ترانسفورماتورها تا بیش از ۵۰ در صد ظرفیت نامی باشد، با تأخیرهای زمانی ۳ و ۱۰ و ۱۶ ثانیه تعداد سه واحد ژنراتورهای نیروگاه آبی از مدار خارج می‌گردند.

- حفاظت در برابر فروپاشی ولتاژ

پدیده فروپاشی ولتاژ که در صورت همزمان خطوط انتقال با بیشینه ظرفیت خود در حال بارگیری باشند و سطح ولتاژ کار ژنراتورها در حالت فوق تحریک کاهش یابد. محدودکننده اضافه تحریک در ژنراتور فعال شده و همچنین افت ولتاژ خروجی و فروپاشی ولتاژ در شبکه انتقال همراه می‌شود. در این شرایط در طرح حفاظتی مخصوص نیروگاه آبی، یک مدار منطقی موظف است در چنین شرایطی، یکی از ژنراتورها را از مدار خارج کند. در چنین شرایطی توان راکتیو موردنیاز شبکه انتقال کاهش یافته و پدیده فروپاشی ولتاژ رخ نمی‌دهد.

۳-۳-۴- حفاظت در بخش با فرکانس ۵۰ هرتز

در این بخش شرح مختصری از پیش‌بینی‌ها و اقدامات انجام‌شده به‌منظور پیش‌بینی خطا و رفع خطا از نیروگاه و ایستگاه‌های بخش با فرکانس ۶۰ هرتز ارائه می‌شود. این مطالب شامل رله‌های حفاظتی و نوع تجهیزات موردقطع و وصل است [۳۳].

- اقدامات به‌صورت حفاظت پشتیبان برای رله‌های اضافه فرکانس

در صورت افزایش فرکانس تا مقدار ۵۶ هرتز در فاصله زمانی ۳/۳ ثانیه و یا خاج شدن تجهیزات یک‌سوکننده خط جریان متناوب و یا تغییرات فرکانس در فاصله ما بین ۵۱ و ۵۱ هرتز با سرعت افزایش ۳ هرتز در ثانیه، طرح حفاظتی مخصوص فعال‌شده در مرحله اول خط جریان مستقیم صادرکننده توان تولیی نیروگاه به کشور برزیل را از مدار خارج می‌کند. این مدار منطقی از طرح حفاظتی مخصوص، همچنین وظیفه قطع ارتباط خط صادرکننده توان را در شرایطی که اخرین ژنراتور بخش ۵۰ هرتز نیز از مدار خارج شده است را بر عهده دارد.

- کنترل اضافه ولتاژ

مدار پیش‌بینی‌شده در طرح حفاظت مخصوص، زمانی که تجهیزات یکسوکننده خط صادرکننده توان با مشکل روبرو شده باشد و اضافه ولتاژی در حدود ۸۵۰ کیلو ولت در فاصله زمانی ۲۰۰ میلی‌ثانیه رخ داده باشد، خط جریان مستقیم رابط بین دو کشور را از مدار خارج می‌کند.

- کنترل ولتاژ در بخش ۵۰ هرتز

این حفاظت در صورت کاهش ولتاژ از سطخ ۲۵۰ کیلو ولت برای فاصله زمانی ۴۰۰ میلی‌ثانیه فعال می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- اجتناب از بروز فروپاشی فرکانسی در شبکه پاراگوئه

در صورت ایجاد مشکل در تجهیزات یکسوکننده خط جریان مستقیم، فرکانس شبکه‌ای کشور پاراگوئه در محدوده ۵۱-۵۲ با نرخ تغییرات ۲/۳ هرتز امکان تغییر دارد. طرح حفاظتی ارائه‌شده به‌صورت اتوماتیک یک واحد ژنراتور شبکه محلی را از مدار خارج می‌کند.

- جلوگیری از افزایش ولتاژ

این حفاظت در صورت بروز خطا در یکی از خطوط ارتباطی این نیروگاه با شبکه مانند خطای فاز به فاز در خط ۵۰۰ کیلو ولت و یا خطای واحدهای یکسو ساز خط جریان مستقیم و یا اتصال به زمین خط فعال می‌گردد و ارتباط میان خط رابط بین دو کشور را قطع می‌کند.

- کاهش اضافه بار

درصورتی‌که خطوط ۵۰۰ کیلو ولت منطقه برزیل بر اثر شرایطی از مدار خارج شود، این مدار از طرح حفاظتی مخصوص این اطمینان را حاصل می‌شود که خط HVDC رابط میان دو کشور دچار اضافه ولتاژ نگردد.

- حفظ پایداری شبکه

برای حفظ پایداری شبکه تعداد هفت واحد منطقی آماده کاهش بار واحدهای ژنراتوری در بخش تولید با فرکانس ۶۰ هرتز در صورت خروج خطوط ۷۶۵ کیلو ولت یا قطع ترانسفورماتورها در پست‌های فشار قوی آن هستند. در بخش سیستم حفاظتی موردنظر مدارهای منطقی پیش‌بینی‌شده به‌منظور حفظ پایداری شبکه به شماره ۲، ۵، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ مشخص شده‌اند.

- کاهش بار ترانسفورماتور

در طرح حفاظتی مطرح‌شده، سه مدار منطقی به‌منظور کاهش اضافه بار ترانسفورماتورهای پست نیروگاهی در نظر گرفته شده است. درصورتی‌که اضافه بار در ترانسفورماتورها تا بیش از ۵۰ درصد ظرفیت نامی باشد، با تأخیرهای زمانی ۳ و ۱۰ و ۱۶ ثانیه تعداد سه واحد ژنراتورهای نیروگاه آبی از مدار خارج می‌گردند.

۴-۳-۴- تحلیل عملکرد طرح حفاظتی مخصوص

طرح حفاظتی مخصوص ارائه‌شده در نیروگاه آبی مرزی، شرایط مخصوص پیچیده‌ای با توجه به تغییرات فرکانس در دو بخش ۵۰ و ۶۰ هرتز دارد. مورد ویژه در بخش فرکانس۶۰ هرتز بیشتر متمرکز بر رعایت فاصله زمانی مناسب در سنکرون‌سازی ژنراتورهای بخش ۶۰ هرتز پس از رفع خطا با شبکه سراسری است. در حال حاضر فاصله میان سنکرون‌سازی ژنراتورهای این نیروگاه با شبکه توسط طرح حفاظتی مخصوص به حدود یک دقیقه و سی ثانیه برای هر یک از ژنراتورها رسیده است. کاهش این فاصله زمانی تا حد ممکن به دلیل جلوگیری از فعالیت ژنراتورها در حالت زیر تحریک امری دارای اهمیت است. این فاصله زمانی با توجه به استفاده از طرح حفاظتی مخصوص در حدود ۵ دقیقه کاهش داده شده است [۳۶].

در بخش مربوط به کشور پاراگوئه اکثر تمرکز بر روی خط ترانزیت توان میان دو کشور که یک خط جریان مستقیم و اثرات سایر سیستم‌های حفاظتی بر روی این خط و توان مبادله‌شده میان دو کشور است. با این حال در این بخش از سیستم، اکثر سیستم‌ها و مدارات کنترلی به‌صورت دستی توسط اپراتورها باز و بسته می‌شوند. با

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

این حال نتایج تحلیل شرایط عملکرد طرح حفاظتی مخصوص این اطمینان را راجع به عدم عملکرد نابه جای سیستم حفاظتی در برابر موقعیت‌های مختلف کلیدهای را به مالکین دو شبکه داده می‌شود.

با تجزیه و تحلیل سیستم حفاظت مخصوص در بخش ۶۰ هرتز تعداد عملکرد هر یک از مدارات منطقی با استفاده از PLC در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به نتایج نشان داده‌شده در جدول ۴-۱ می‌توان نتیجه گرفت که در طول دوران بهره‌برداری مدارهای منطقی ۱ و ۱۶ که برای حفظ پایداری شبکه تحت بدترین شرایط بهره‌برداری تعیین شده‌اند، به هیچ وجه فعال نشده‌اند. همچنین بروز مدارات منطقی مناسب در بسیاری از حوادث مانع قطع بار در شبکه سراسری برزیل، ناپایداری ولتاژ و ایجاد خاموشی‌های گسترده در این شبکه شده است. با این حال، بروز اشتباه در عملکرد این طرح حفاظتی مخصوص عمدتاً ناشی از امور نگه‌داری و مدارات منطقی PLC و از کار افتادن تجهیزات جنبی و کمکی بوده‌اند. پس از بررسی و تحلیل گزارشات عملکرد این طرح حفاظتی عواملی که موجب بهبود وضعیت بهره‌برداری از نیروگاه با توجه به خطاهای موجود در مدارهای منطقی PLC در جدول ۴-۲ نشان داده شده است [۳۳].

در دستورالعمل جامع ارائه‌شده با توجه به الزامات بهره‌بردار نحوه تنظیم مدارات منطقی و فانکشن‌های حفاظتی این بخش به‌صورت کامل موردبررسی قرار می‌گیرد.

جدول (۱-۴): تعداد عمل‌کننده‌ها در مدار منطقی کنترل برنامه‌ریزی‌شده PLC [۳۳]

مدار منطقی ۰۲	مدار منطقی ۰۴	مدار منطقی ۰۵	مدار منطقی ۰۶	مدار منطقی ۰۸	مدار منطقی ۰۹	مدار منطقی ۱۱	مدار منطقی ۱۲	مدار منطقی ۱۳	مدار منطقی ۱۴	مدار منطقی ۱۵
۷۶	۲	۲۵	۳	۱۵	۱۳	۴	۸	۵	۳	۵

جدول (۲-۴): بررسی عوامل تصحیح‌کننده طرح حفاظتی [۳۳]

مدارات منطقی	عوامل کار نا به جای حفاظت
مدار منطقی ۲	قطع ژنراتورها در پی از کار افتادن تجهیزات کمکی، در حالی‌که مدار منطقی PLC قطع خط گزارش شده است.
مدار منطقی ۲	قطع یک واحد به جای ۲ واحد ناشی از فاصله زمانی نامناسب‌تر تنظیم بار در مدار منطقی PLC بدون بروز مشکلات پایداری در شبکه
مدار منطقی ۹	عدم قطع واحدهای تولید ناشی از عیب در تجهیزات کمکی مشخص‌کننده وضعیت ترانسقورماتور
مدار منطقی ۱۳	قطع ژنراتور ناشی از خطای نرم‌افزاری در سیستم PLC

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

فصل پنجم

نتیجه‌گیری

۵-۱- نتیجه‌گیری

در این گزارش که مربوط به فعالیت‌های صورت‌گرفته در مرحله‌ی اول پروژه «تهیه دستورالعمل استاندارد طراحی، ساخت و تست سیستم حفاظت ژنراتور و ترانس نیروگاهی» است، به مطالعه و بررسی کارهای صورت‌گرفته پرداخته شده است. به‌طورکلی سه بخش اصلی مطالعات که شامل روش‌های متداول جهت حفاظت ترانسفورماتورهای نیروگاهی، روش‌های متداول جهت حفاظت ژنراتورهای نیروگاهی و تجربه کشورهای مختلف در تدوین دستورالعمل حفاظتی است موردارزیابی قرار گرفت. امید است با اطلاعات به‌دست‌آمده، در فازهای بعدی پروژه تدوین دستورالعمل به درستی و با دقت کافی صورت پذیرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مراجع

[1] Forced Outage Performance of Transmission Equipment for the Period January 1, 1998 to December 31, 2002," Canadian Electricity Association, Montreal, PQ, Canada, H3B 2V6, pp. 1-146, 2006.

[2] "C37.91-2008 - IEEE Guide for Protecting Power Transformers", 2008.
Blackburn, J. L. Protective Relaying, Principles and Applications, New York: Marcel Dekker, Inc., 1998.

[3] Einvall, C. H., and Linders, J. R., "A three-phase differential relay for transformer protection," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, no. 6, pp. 1971–1980, 1975.

[4] Tziouvaras, D., and Jimenez, R., "Protecting a 138 kV phase shifting transformer: EMTP modeling and model power system testing," Western Protective Relaying Conference, Spokane, WA, Oct. 21–23, 2003.

[5] "C37.102-2006 - IEEE Guide for AC Generator Protection", 2006.

[6] Ilar, M., Narayan, V., Von Roeschlaub, F., and Pencinger, C. J., "Total Generator Ground Fault Protection," Georgia Tech Protective Relaying Conference, Georgia Institute of Technology, May 3–4, 1979.

[7] Imhof J. A. et al " Out of Step Relaying for Generators – Working Group Report", IEEE Transaction in Power Apparatus and Systems, Vol, PAS-96, No.5, September 1977, pp. 1556 – 1564.

[8] Brady, J., Loss of excitation protection for modern synchronous generators, IEEE Trans Power Apparatus and Systems, 94 (5), 1457–1463, 1975.

[9] Del Toro, V. Electromechanical Devices for Energy Conversion and Control Systems, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1968.

[10] Alexander, G. W., Corbin, S. L., and McNutt, W. J. Influence of design and operating practice on excitation of generator step-up transformers. IEEE Trans., PAS-85(8), 1966.

[12] IEEE Std 637.91-2000, IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers, New York, 2000.

[13] IEEE C37.106–1987, IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection of Power Generation Plants, New York, 1987.

[14] Crenshaw, M. L. and Temoshok, M., Protection of large steam turbine generators during abnormal operations, Pennsylvania Electric Association Relay Committee Meeting, October 21–22, 1971, Reading, PA.

[15] Westinghouse Power Generation Systems Publication, GEN 74-009, Underfrequency Operation of Westinghouse Power Generation Equipment, Westinghouse, August 1974, East Pittsburg, PA.

[16] IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants, C37.106–1987, IEEE, New York, 1987.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

[17] Burek, J. Krata, M. Fulczyk, and J. Altonen, "The new power based approach in pole slip protection," Przegląd Elektrotechniczny, vol. 88, pp. 106-110, 2012.

[18] Baily, F. G., Bardwick, H. A., and Fenton, R. E. Operating and maintaining steam turbine generators– Operating at off-normal conditions, Power, August 1976, The McGraw-Hill Companies.

[19] Berdy, J., Brown, P. G., and Goff, L. E., Protection of Steam Turbine Generators During Abnormal Frequency Conditions, General Electric Company, Schenectady, New York.

[20] IEEE Guide for Operation and Maintenance of Turbine Generators, IEEE Std 67-1990, IEEE, New York, 1990.

[21] D. Reimert, Protective relaying for power generation systems: CRC press, 2005.

IEEE Guide for AC Generator Protection, IEEE Std C37.102-1995, IEEE, New York, 1996.

[22] Pencinger, C. J. Modern Generator Protection System. Pacific Coast Electrical Association, Engineering and Operating Conference, San Francisco, CA, March 18–19, 1982.

[23] Mason, C. R. The Art & Science of Protective Relaying, John Wiley & Sons Inc., New York, 1967.

[24] Tremaine, R. L. and Blackburn J. L., Loss-of-excitation protection for synchronous machines, AIEE Transactions PAS, 73 Part III, 765–772, 1954.

[25] Alger, P. L., Franklin, R. F., Kilbourne, C. E. and McLure, J. B., Short circuit capabilities of synchronous machines for unbalanced faults, AIEE Trans., 72, Part III, 394–403, 1953.

[26] Choi, S. S. and Jia, X. M., Under excitation limiter and its role in prevention excess synchronous generator stator end-core heating, IEEE Trans., 15 (1), 95–101, 2000.

[27] Be´rube´, R. G., Hajagos Les, M., and Beaulieu, R. E., A utilities perspective on under-excitation limiters, IEEE Trans Energy and Conversion, 10 (3), 532–537, 1995.

[28] ABB Power, T&D Company, Protective Relaying Theory and Applications, Marcel Dekker, New York, 1994, 111–116.

[29] Mackenzie, W. F., Imnof, U. A., Dewey, C., Emmerling, E. J., Freer, F. H., Horowitz, S. H. and Wagner C. L., "Loss-of-field relay operation during system disturbances, working group report June 1991 IEEE Transactions vol PAS-94 No. 5 Sept /Oct 1975, 1464–1472

[30] Meliha B.Sela, Ralph Barone, "B.C. Hydro protection Application for 500kv shunt Rectors", Western Protection Relay Conference, 2018, Washington.

[31] T.G.Martininch, J.E.Drakos, " B.C. Series Capacitor Bank staged Fault Test", IEEE, PAS-102, 1983.

[۳۲] طهماسبقلی شاهرخشاهی، «حفاظت تجهیزات فشار قوی» انتشارات کاوش پرداز سال ۱۳۸۹.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

[33] R.Jovita, G.CDasilva, "Special Protection Scheme in Operation at Itaipu Power plant", CIGRE section, 2006

[34] J.D.. Morraese, V.FSalko, "Electrical and Related Design Aspects of ITAIPU Hydroelectric Project", IEEE Transaction on Power Delivery, 1982.

[35] E. Borg, "ITAIPU the World's Largest Transmission report" ASEA Journal 1982.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۱- مقدمه فصل دوم

در این مرحله از پروژه به‌منظور بررسی و تدوین دستورالعمل‌های حفاظتی مناسب به‌صورتی‌که تمامی نیازهای شبکه را دربر گیرد، نیازمند ایجاد یک بانک اطلاعاتی از تجهیزات نیروگاه شامل فانکشن‌ها حفاظتی و شناسایی چالش‌های مختلف برای حفاظت هر یک از تجهیزات است. در این گام به‌منظور رسیدن اهداف موردبحث و همچنین در نظر گرفتن شرایط ویژه بهره‌برداری در طول ۶ ماهه نخست سال اطلاعات تجهیزات نیروگاه‌ها شامل نوع ترانسفورماتورها و ژنراتورها، میزان بارگیری هر یک از آن‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری نصب‌شده در نیروگاه مانند ترانسفورماتورهای جریان و ترانسفورماتورهای ولتاژی جمع‌آوری می‌شود. برای این منظور با هماهنگی کارفرمای محترم یک سامانه مبتنی بر وب طراحی شد که هر یک از نیروگاه‌های کشور بتوانند با استفاده از نام کاربری خود اطلاعات را وارد پایگاه داده کنند یا اطلاعات توسط همکاران پروژه وارد پایگاه داده خواهد شد. شایان ذکر است که فرض بر این بود که انجام این کار منوط به اخذ مجوزهای لازم برای در اختیار قرار دادن داده‌های مجریان طرح است. اگر مدیران هر یک از نیروگاه‌ها در زمان تعیین‌شده اطلاعات را در اختیار تیم پروژه قرار ندهند اطلاعات مربوط به آنها از پایگاه داده‌ها حذف خواهد شد. بر اساس گزارش‌های گرفته‌شده میزان همکاری نیروگاه‌های مختلف در قرار دادن اطلاعات موردنیاز این فاز به‌صورت کامل صورت نگرفت. در نتیجه بر اساس منابع موجود سعی در شناسایی چالش‌ها و شناسایی سیستم‌های حفاظتی نیروگاه‌ها شده است. در ابتدای این گزارش نیروگاه‌های کشور تقسیم‌بندی می‌شود و نیازهای حفاظتی مخصوص هر نوع نیروگاه که در گزارش مرحله اول پروژه تشریح نشده است، بررسی می‌گردد. در گام بعدی این گزارش، مسئله بهینه‌سازی سیستم حفاظت یک نیروگاه با توجه به پروژه بهینه‌سازی نیروگاه بعثت ارائه شده است. در گام آخر چالش‌هایی که در بخش حفاظت سیستم‌های نیروگاهی معمولا موردتوجه قرار گرفته شده است، بر اساس گزارش‌های حادثه‌های ارائه‌شده فهرست می‌گردد.

۲- تقسیم‌بندی نیروگاه‌های کشور

مجموعه نیروگاه‌های فعال کشور را می‌توان به نیروگاه‌های بخار، نیروگاه‌های گازی، سیکل ترکیبی و برق آبی تقسیم نمود. لازم به ذکر است که ساختار حفاظت برای نیروگاه‌های هسته‌ای مشابه با نیروگاه‌های بخار متداول است. تفاوت نیروگاه هسته‌ای با حفاظت نیروگاه‌های بخاری را می‌توان به حذف حفاظت توالی منفی در دیزل اضطراری نیروگاه هسته‌ای به دلیل حفظ مسائل ایمنی اشاره نمود. همچنین در این نیروگاه‌ها یک تریپ اتوماتیک بر اساس نتیجه‌گیری از مقادیر تخمین زده شده اشباع بخار (برای سنجش اشباع بخار از مقدار دما و فشار بخار استفاده شده است) استفاده می‌شود. که دلیل استفاده از این تریپ عدم وجود زمان کافی برای اطلاع اپراتور از عدم انتقال آب به توربین در شرایط غیر عادی بویلر با توجه به مقدار کم ثابت زمانی عبور بخار از بویلر است. در ادامه حفاظت سایر نیروگاه‌ها به‌صورت مختصر شرح داده می‌شود. لازم به ذکر است که حفاظت مربوط به ترانسفورماتور و ژنراتور به‌صورت جداگانه در گزارش مرحله اول به‌صورت مشروح بیان شده است.

۲-۱- حفاظت نیروگاه‌های بخاری

در این بخش کلیات حفاظت دو بخش اصلی نیروگاه بخار (بویلر و توربین) به‌صورت اجمالی بررسی می‌گردد. حفاظت ژنراتور و ترانسفورماتور این نیروگاه‌ها در مباحث مربوط به گزارش مرحله اول اشاره شده است [۱].

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۲-۱-۱- حفاظت بویلر

خطاهای مربوط به یک بویلر شامل دو بخش خطا بر روی بویلر و خطاهایی که بر روی اجزای جانبی آن رخ می‌دهد تقسیم می‌شود. خطاهای رخ داده‌شده بر روی اجزای جانبی بویلر معمولاً می‌توان بدون تریپ بویلر آن جز را جداسازی کرد. در صورت نیاز به تریپ بویلر سیستم حفاظتی باید یک سیگنال تریپ به توربین نیز ارسال کند. در ادامه عمده خطاهای بویلر مورداشاره قرار می‌گیرد:

۲-۱-۱-۱- پایین بودن سطح درام یا فقدان آب بویلر

در صورت کاهش سطح آب درام از مقدار معینی حباب‌های بخار محلول‌های هیدروژنی را ایجاد می‌کنند که پیوسته از لوله‌های گرم جدا می‌شوند. این حباب‌ها روکشی را در سطح لوله ایجاد می‌کنند. این روکش موجب کاهش ضریب انتقال حرارتی و در نتیجه افزایش دمای فلز می‌شود. افزایش دمای فلز باعث مشکلاتی شامل کاهش استقامت مواد یا افزایش خوردگی هنگام بارداری در لوله گرم می‌شود. در نتیجه طول عمر لوله کاهش می‌یابد. به شارهای ایجادکننده این خطا شار حرارتی بحرانی گفته می‌شود. این شار به قطر لوله، جهت لوله، سرعت و کیفیت مخلوط (آب و بخار) مربوط هستند.

برای حفاظت از این پدیده از کنتکت‌های اضافی در رله‌هایی که در تجهیزات اندازه‌گیری سطح آب درام قرار گرفته شده، استفاده می‌شود. همچنین به‌منظور جلوگیری از تریپ ناصحیح باید تعداد سیگنال‌های تریپ اندازه‌گیری سطح آب قابل‌قبول باشد. مخزن‌های فشار توسط لوله‌ها و شیرها به درام متصل شده‌اند و نشان‌دهنده سطح آب درام هستند. مقدار بالای مقاومت ویژه مشخص‌کننده بخار و مقدار پایین آن نشان‌دهنده آب هستند. مقاومت هر الکترود بین الکترود و دیواره‌ی سلول به‌منظور آشکارسازی سطح بخار اندازه‌گیری می‌شود. سیگنال‌های به‌دست‌آمده از هر سلول با لامپ‌های رنگی (سبز برای بخار و قرمز برای آب) مشخص می‌شوند. این سیگنال‌ها بر روی رله‌ای که کنتاکت‌های آن به لامپ‌های رنگی متصل است، اثر کرده و فرمان‌های آلارم یا تریپ مناسب را ایجاد می‌کنند. به‌منظور افزایش امنیت این طرح حفاظتی سلول‌های فشار در انتهای هر یک از مخازن برای ارسال تریپ در شرایط اضطراری تعبیه شده‌اند. لازم به یادآوری است که مدت‌زمان بین پایین بودن سطح درام و ایجاد خسارت در بویلر در حدود ۱۴ ثانیه تخمین زده می‌شود. در نتیجه دو روش ذکرشده در فوق به‌منظور تشخیص پایین بودن سطح درام و ارسال تریپ آتش بویلر باید در مدت‌زمان کمتری عمل کنند.

۲-۱-۱-۲- سرعت مخلوط بخار و آب

یکی از لازمه‌های بویلر چرخش آب تغذیه بین درام و بویلر است. در اثر خطاهای رخ‌داده بر روی پمپ‌های گردشی تغییر محسوسی در سرعت مخلوط بخار و آب در بویلرهای گردشی ایجاد می‌شود. همان‌گونه که مشخص است در این بویلرها سرعت مخلوط بخار و آب تنها قادر به تغییر از سرعت نرمال به مقدار کمی است.

حفاظت مطرح‌شده برای این امر وابسته به پمپ‌های گردشی بوده و با حفاظت قطع آب شناخته می‌شود. عملکرد این حفاظت به گونه‌ای است که دو فاصله زمانی t_1 و t_2 در نظر گرفته می‌شود. زمان t_1 نشان‌دهنده زمان تشخیص از دست رفتن آب تغذیه تا انحراف ناشی از جوشش هسته (برخورد حباب‌ها بر دیواره لوله‌ها و خوردگی روی این دیواره‌ها) است. این زمان معمولاً برای بارهای بیشتر از بیشنه مقدار خروجی پمپ در نظر گرفته می‌شود و زمان دوم برای بارهایی با مقدار کمتر از بیشینه مقدار خروجی پمپ در نظر گرفته می‌شود. اساس این حفاظت به‌صورت خلاصه به‌صورت زیر است:

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- حالتی که یک پمپ تغذیه توربین در سرویس- بار بیشتر از ظرفیت پمپ تغذیه الکتریکی باشد: در این صورت با تشخیص فقدان یا هدر رفتن آب از پمپ تغذیه توربین، یک تریپ به‌طور اتوماتیک شروع شده و اثر می‌کند به جز مواقعی که دو پمپ تغذیه الکتریکی نصب شده باشد و هر دو در زمان t_1 راه‌اندازی شده باشد.
- پمپ تغذیه توربین در سرویس- بار بیشتر از یک پمپ تغذیه الکتریکی نباشد: در این صورت با آشکار شدن خطا تریپ کم بودن آب بویلر به‌طور اتوماتیک فعال شده به جز مواقعی که یکی از پمپ‌های تغذیه الکتریکی در زمان t_2 آماده شده و وارد سرویس شود.

لازم به یادآوری است که در زمان راه‌اندازی معمولاً به پمپ‌های تغذیه الکتریکی نیاز نیست. در نتیجه لازم است که در این حالت از شروع تریپ به خاطر فقدان آب ورودی جلوگیری شود.

۲-۱-۱-۳- کیفیت مخلوط بخار و آب

کیفیت مخلوط بخار و آب با توجه به تأثیر سطح درام بر روی جداسازی بخار و آب تابعی از سطح آب درام است. بنابراین با حفاظت سطح آب درام می‌توان به برقراری این محدودیت اطمینان حاصل شود. در نتیجه در صورت پایین آمدن سطح آب از حد مشخص، پمپ‌های آماده‌به‌کار توسط سیگنال‌های آشکارساز سطح، فعال شده و در نتیجه سطح آب جبران می‌شود.

۲-۱-۱-۴- قطع بار الکتریکی

اگر تقاضای بخار مربوط به قطع بار الکتریکی باشد تریپ شیرهای توقف اضطراری توربین و شیرهای توقف گاورنر شروع به‌کار می‌کنند. گرم شدن پیش از حد لوله‌های فوق گرم‌کن یا لوله‌های گرم‌کن مجدد سریعاً اتفاق می‌افتد. این عمل در صورت قطع یا کاهش سطح گرمادهی انجام نمی‌شود.

کنترل شیرهای بخار توربین توسط یک سیستم فشار انجام می‌شود. با عملکرد کلیدهای فشاری از طریق کنتاکت‌های رله تأخیر زمان، سیگنالی به‌منظور تریپ مولد بخار ارسال می‌گردد. در صورت باز شدن هر یک از سکسیونرها و بریکرهای سیستم، رله‌های تأخیر زمان بدون انرژی شده و مانع از تریپ مولد بخار می‌گردند، درحالی‌که توربین و ژنراتور به شبکه وصل نیستند. در نتیجه امکان تریپ توربین در صورت خروج ژنراتور بدون تریپ دادن به مولد بخار به‌وجود می‌آید.

۲-۱-۱-۵- پمپ‌های گردشی بویلر (سیگنال غیر شرطی)

در طراحی پمپ‌های چرخشی بویلر توجه شده است که بار کامل با وجود سه پمپ از چهار پمپ پاسخ داده شود. در نتیجه کمترین تعداد تریپ به میزان افزایش بار واحد از مقدار بار کامل بستگی دارد. زمانی که بویلر در باری بالاتر از حد مجاز بهره‌برداری شود، تنها سه پمپ در حال کار دارد در نتیجه یک تریپ قطعی به‌طور اتوماتیک آغاز می‌شود. همچنین در زمانی که بویلر کمتر از بار کامل بهره‌برداری شود و دو پمپ در مدار باشد، عدم وجود یکی از این پمپ‌ها به‌طور اتوماتیک باعث یک تریپ قطعی (غیر شرطی)، به علت کمبود آب بویلر می‌شود.

۲-۱-۲- حفاظت توربین

به‌منظور حفاظت توربین شیرهای اضطراری در طراحی آن به‌کار برده شده است. این شیرها برای همه خطاهایی که ممکن آسیب رساندن جدی به توربین شوند، قبل از دخالت اپراتور به‌کار می‌روند. دلیل استفاده از این شیرها محدود کردن تریپ‌های اتوماتیک و حداکثر دسترس‌پذیری توربین است. در صورت وقفه در تغذیه سیال کنترل هیدرولیکی،

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

محرک اصلی بخار توربین و منحرف نمودن سیال باقی مانده در محرک‌ها برای جاری شدن، به‌دستگاه تخلیه تریپ داده می‌شود. عملکرد کلی سیستم کنترل هیدرولیکی به‌صورتی است که فشار سیال برای نگه‌داشتن شیرهای گاورنر و شیرهای توقف توربین که توسط فشار فنر باز می‌شوند کاملاً ضروری است. در غیاب فشا سیال، فنر تعبیه‌شده شیرهای بخار را می‌بند. سیال کنترل هیدرولیکی از طریق دو شیر تریپ اضطراری برای شیرهای بخار تأمین می‌شود. با عملکرد هر یک از این شیرهای منحرف‌کننده سیال هیدرولیکی به‌دستگاه تخلیه تریپ داده می‌شود. غوطه‌ورسازهای تریپ در شیرهای تریپ اضطراری توسط یک فنر در وضعیت بسته، نگه داشته می‌شوند. این فنر توسط یک اهرم تریپ فشرده نگه داشته می‌شود. در صورت برق‌دار شدن سیم‌پیچ تریپ یا عملکرد مستقیم اهرم که ناشی از اضافه سرعت یا تریپ دستی است، این اهرم رها می‌شود و شیر تریپ اضطراری باز می‌شود. در نتیجه تغذیه سیال هیدرولیکی به چرخ‌دنده شیر توربین قطع شده و سیال هیدرولیکی به‌دستگاه تخلیه هدایت می‌شود. این فرایند موجب از قطع فشار سیال شده و در نتیجه شیرهای بخار اصلی بسته می‌شوند. کلیات کلی حفاظت توربین به دو بخش مکانیکی و الکتریکی تقسیم می‌گردد که در ادامه این موارد به‌صورت خلاصه توضیح داده شده است.

- **حفاظت مکانیکی: توربین‌های بخار**

ازآنجایی‌که حداکثر حرارت معمولاً در انتهای خروجی توربین بخار رخ می‌دهد، آشکارسازهای دما در مسیر اگزوز می‌توانند حالت موتور را تشخیص دهند. این آشکارسازها به‌طور معمول هشدار می‌دهند و به دلیل مشکلات ایمنی با آشکارسازها و تغییرات دما در داخل کوره اگزوز به‌عنوان حفاظت موتور اصلی مورداستفاده قرار نمی‌گیرند. مانیتورهای فشار در سیستم روغن ترمز توربین و سیستم‌های کنترل‌کننده روغن می‌توانند برای تعیین موقعیت دریچه بخار استفاده شوند. سیستم روغن ترمز توربین یک سیستم ایمن است. با کم شدن فشار، تمام دریچه‌ها بسته می‌شود. فشار روغن تنظیم‌کننده موقعیت گاورنر و دریچه‌های تعویض را جهت کنترل میزان بارگیری در شرایط عادی تغییر می‌دهد. فشار در این سیستم‌ها شاخص دقیقی برای نمایش بارگذاری واحد است و می‌تواند برای تشخیص شرایط موتور استفاده شود. سوئیچ‌های محدودکننده بر روی شیرهای بخار به‌گونه‌ای تنظیم‌شده‌اند که موقعیت شیر را نشان دهند. این سوئیچ‌ها برای نشان دادن بسته شدن شیر و قطع جریان بخار استفاده می‌شوند. این طرح دارای یک مشکل اساسی است. تعداد سوپاپ‌ها در واحدهای بزرگ افزایش یافته و اتصال سری بسیاری از سوئیچ‌های محدودکننده لازم است تا شاخص (تمام بسته) را برای قطع حالت موتوری فراهم کند. مشکلات تنظیم سوئیچ‌ها باعث عدم کارایی این طرح شده است. افت فشار دیفرانسیل در توربین فشار بالا یک معیار مستقیم برای تعیین جریان بخار است. استفاده از یک سوپاپ فشار که تحت جریان بخار با سرعت غیر اسمی بار کار می‌کند، یک روش مناسب برای تشخیص شرایط موتوری است. طرح‌های مکانیکی دقیق از مدارهای سری‌های اضافه و مدارهای منطقی موازی استفاده می‌کنند، به‌طوری‌که قطع یک کنتاکت نمی‌تواند الگوی حفاظتی را به خطر بیاندازد، اما این طرح‌ها با این فرض اعمال می‌شوند که جریان بخار تحت شرایطی که بسته شدن دریچه نشان داده می‌شود، متوقف می‌گردد. این مورد همیشه درست نیست. دریچه‌های بخار ممکن است به علت انحراف و اتصال مکانیکی یا جریان برگشتی نشت کنند. ناکارایی در این طرح‌ها می‌تواند فاجعه‌آمیز باشد. تشخیص غلط حالت موتوری باعث قطع اشتباه ژنراتور می‌شود. با عملکرد شیر ناشی از نشتی، گاورنر سرعت نمی‌تواند سرعت بالای تنظیم را محدود کند و ممکن است آسیب شدیدی را به سیستم منجر شود. به همین دلیل، طرح‌های مکانیکی موتوری معمولاً توسط یک رله قدرت معکوس برای کنترل جابه‌جایی جریان بخار قبل از باز کردن ژنراتور بازرسی می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

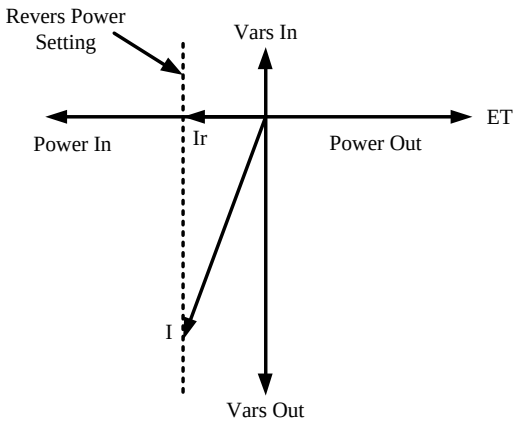
- **حفاظت الکتریکی**

وقتی انرژی محرک اولیه به یک ژنراتور حذف می‌شود، کمبود انرژی باید از سیستم برق تأمین شود. رله برق در ترمینال‌های ژنراتور به جستجوی ژنراتوری مشغول می‌شوند که بتواند این شرایط را تشخیص دهد. نوع محرک اولیه تعیین‌کننده میزان حساسیت موردنیاز برای رله است. توربین‌های گازی هنگام استفاده در حالت موتوری، همانند یک کمپرسور بزرگ هستند. توان مصرفی واحد برحسب کیلووات در حالت موتوری، می‌تواند تا ۱۰۰٪ مقدار نامی kVA برای یک ماشین تک شفت یا حداکثر ۱۰ تا ۱۵٪ برای ماشین دو شفت افزایش یابد. از سوی دیگر، توربین‌های آبی با تیغه‌های بالاتر از سطح آب به ۰٫۲ تا ۲ ٪ توان نامی برحسب کیلووات نیاز دارند. هنگامی که پروانه به‌طور کامل غوطه‌ور است، قدرت موتور می‌تواند به ۱۰۰٪ مقدار نامی برسد. توربین‌های آبی با تیغه‌های قابل‌تنظیم کاپلان (*Kaplan*) به کمتر از ۰٫۲٪ کیلووات نیاز دارند، به شرطی که تیغه‌ها در حالت صاف قرار بگیرند. دیزل ژنراتورهای بدون سیلندر، به حدود ۱۵٪ و یا ۲۵٪ کیلووات در موتورهای چهار و دو چرخ نیاز دارند. توربین‌های بخار تحت خلأ کامل به ۰٫۵ تا ۳٫۰٪ کیلووات نیاز دارند. توربین‌های بخار بدون کندانسور یا توربین‌های بادی بدون خلأ، بیش از ۳ درصد توان نامی موتور نیاز دارند.

بحث فوق نشان می‌دهد که حساسیت رله قدرت معکوس می‌تواند مسئله اصلی در طراحی سیستم حفاظتی توربین‌های بخار بزرگ و توربین‌های آبی باشد. رله‌های قدرت الکترومکانیکی و الکترونیکی با تنوع زیادی در دسترس هستند. این رله‌ها ممکن است از نظر آمپر یا از نظر وات سمت ثانویه تنظیم شوند. همچنین ممکن است یک فاز یا سه‌فاز باشند. استفاده از رله‌های تک‌فاز بر این فرض استوار است که تلفات موتوری در تمام فازها به‌طور مساوی اعمال می‌شود. این فرض همیشه درست نیست. در واحدهای بسیار بزرگ، تغییرات ۰/۲ تا ۰/۳ درصد توان خروجی اسمی بین فازها توسط محققین گزارش شده است. این مقدار بسیار قابل‌توجه است، زیرا کل قدرت موتور سه‌فاز برای چنین واحد ممکن است ۰/۵ درصد باشد. هنگامی که رله‌های میکروپروسسوری استفاده می‌شود، عدم تعادل مشکل‌ساز نخواهد بود، زیرا این رله‌ها معمولاً توان سه‌فاز را اندازه می‌گیرند.

رله‌های کالیبره‌شده در واقع رله‌هایی با کالیبراسیون تنظیم‌شده بر اساس مؤلفه هم‌فاز جریان، I_r در شکل ۱ هستند. یک رله تک‌فاز که برای ولتاژ ورودی ۱۲۰ ولت و برای جریان ۱۰ میلی‌آمپر کالیبره شده است، به شرطی تحت این ولتاژ کار می‌کند که جریان و ولتاژ هم‌فاز باشند و ولتاژ ورودی ۱۲۰ ولت باشد. حدآستانه‌ی این رله در حقیقت $0.01A \times 120V = 1.2W$ است. ازآنجایی‌که این رله در واقع به توان پاسخ می‌دهد، جریان حدآستانه تابعی از ولتاژ ورودی است. این همانند رله‌ای با همان تنظیم است که به ۰٫۱۱ آمپر نیاز دارد، تحت شرایطی که ولتاژ ورودی به $1.2W / 110V = 0.11A$ کاهش یابد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل ۱ : اندازه‌گیری توان

رله‌های میکروپروسسور محافظ ژنراتور چندمنظوره معمولاً شامل دو تابع توان برگشت‌پذیر هستند که بر اساس ولتاژ و جریان رله برحسب وات تنظیم می‌شوند. یک تابع برای حفاظت از موتور اعمال می‌شود و دومی می‌تواند پس از قطع متوالی ژنراتور وارد عمل می‌شود. برخی از توابع توان معکوس میکروپروسسوری برای جریان برق ورودی یا خروجی از ژنراتور تنظیم می‌شوند. یکی از این رله‌ها دارای یک محدوده قابل‌تنظیم توان -۳ تا +۳ پریونیت با گام افزایشی ۰/۰۰۱ پریونیت است. رله‌های الکترومکانیکی با حساسیت‌های کمتر از ۴ میلی‌آمپر تحت ولتاژ نامی موجود هستند. تمام رله‌های توان معکوس که در توربین‌های بخار و توربین‌های آبی استفاده شده‌اند، در صورت عدم‌بارگذاری Var زیاد در شرایط موتوری، حساس هستند. این عملکرد، نتیجه توان موتوری کم موردنیاز این واحدها و خطاهای کم در اندازه‌گیری زاویه ضریب قدرت است. در حالت ایدئال، رله‌های توان معکوس، چه برای جریان و یا برای وات ثانویه کالیبره شده باشند، توان را همانند زیر محاسبه می‌کنند:

$$P=IE\times\cos(\theta)=I_r E \qquad (۱)$$

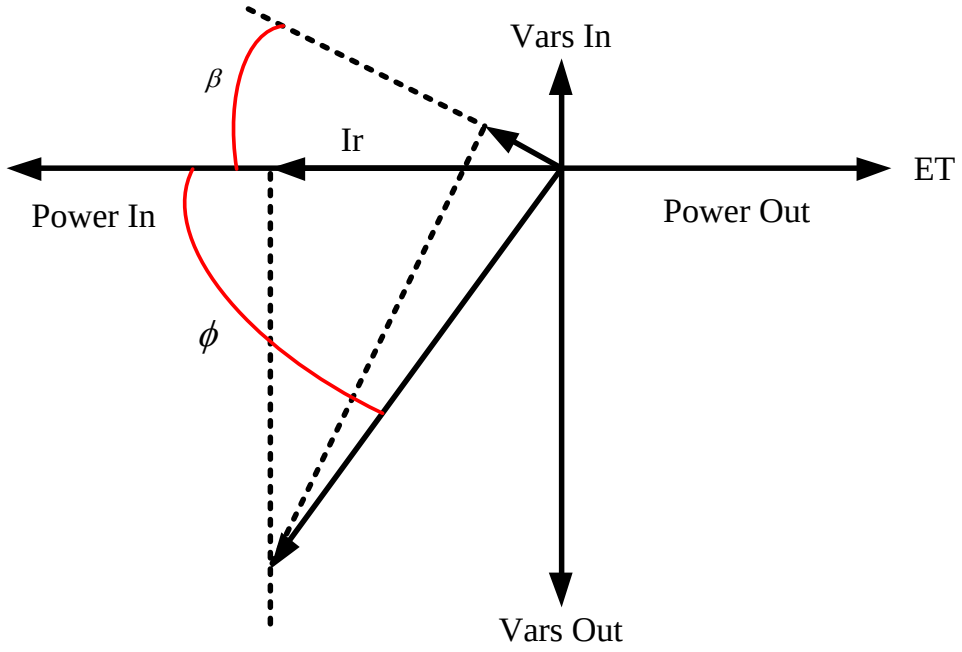
که در آن E و Ir به ترتیب کمیت‌های خط بوده و θ نیز زاویه ضریب قدرت است.

خطای PT و CT ممکن است باعث تغییر جریان و ولتاژ اعمال‌شده به رله شود. همچنین، خطای جزئی در مشخصه‌های رله نیز می‌تواند باعث بروز خطای زاویه‌ای β در اندازه‌گیری رله شود:

$$P=IE\times\cos(\theta\pm\beta) \qquad (۲)$$

در هر صورت، خطا به‌صورت یک انحراف توان نسبت به مقدار واقعی در رله ظاهر می‌شود (شکل ۲). اگر ژنراتور تحت یک ضریب قدرت کم به علت بارگذاری زیاد Var و خطای زاویه‌ای نسبت به زاویه واقعی ضریب قدرت به حالت موتوری برود، توان موتوری اندازه‌گیری شده ممکن است کمتر از نقطه تنظیم رله باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل ۲: خطای زاویه توان

علاوه بر حفاظت توضیح داده‌شده در فوق مواردی کلی دیگر که باعث تریپ توربین‌ها می‌شوند، عبارت‌اند از:

- تریپ از دست رفتن روغن روانساز
- تریپ پایین بودن خلا کندانسور
- تریپ برای اثر هدایت بالای چگالنده
- اهرم تریپ دستی
- تریپ اضافه سرعت
- تریپ بالا بودن دمای بخار خروجی از توربین فشار ضعیف
- تریپ پایین بودن دما و فشار بخار ورودی

۲-۱-۲-۱- از دست رفتن فشار روغن روانساز

در نیروگاه‌های بخار معمولاً روغن در سیستم روانسازی توسط پمپ‌های گریز مرکز به محور ژنراتور هدایت می‌شود. این پمپ‌ها روغن تحت فشار را از پمپ‌های افزایش فشار دریافت کرده و از طریق مسیر روغن توربین به یاتاقان‌های توربین ژنراتور می‌رسد. پمپ روغن اصلی همچنین روغن را مستقیماً به سیستم روغن را مستقیماً به سیستم روغن آب‌بندی هیدروژن ژنراتور تحویل می‌دهد. افت فشار از طریق روغن توربین، فشار روغن را کاهش می‌دهد تا به سطح موردنیاز برای یاتاقان‌های توربین برسد. این روغن به‌صورت مکانیکی به پمپ تقویت‌کننده مرتبط است. به‌منظور تأمین روغن ورودی یاتاقان‌های توربین ژنراتور در هنگام راه‌اندازی و توقف واحد، یک تانک روغن در کنار موتور AC گرداننده پمپ روغن روانساز قرار گرفته شده است.

افت فشار روغن روانساز در یاتاقان‌های توربین- ژنراتور به‌طور اتوماتیک موتور AC گرداننده پمپ روغن را به‌کار می‌اندازد. در صورت مشکل در این موتور یا از دست رفتن پمپ، کاهش بیشتر فشار روغن موجب راه‌اندازی موتور DC پمپ روغن می‌شود. در این حالت تریپ اولیه توربین – ژنراتور ایجاد می‌شود. سیلندرهای تریپ فنری دوگانه

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

توسط فشار روغن روانساز فشرده می‌شوند. در صورت از دست رفتن فشار روغن یاتاقان‌ها، روغن از سیلندرهای تریپ رها شده و در نتیجه شیرهای تریپ اضطراری عمل می‌کنند. این تریپ معمولاً همراه با یک تأخیر به‌منظور حداقل رساندن نوسانات گذرای فشار است.

۲-۱-۲-۲- پایین بودن خلا کندانسور

دو واحد تریپ مستقیم خلأ در سیستم حفاظتی نیروگاه بخار در نظر گرفته شده است. هر یک از این واحدها دارای دو عنصر حس‌کننده هستند. هر چهار عنصر، خلا کندانسور را با خلأ مطلق مقایسه کرده و هر دو عنصر مربوطه باید پایین بودن خلأ کندانسور را حس کنند. تریپ اولیه توربین زمانی ارسال می‌گردد که هر یک از دو واحد تریپ پایین بودن خلأ را گزارش کنند. در این حالت به کمک یک عمل مکانیکی روغن روانساز از سیلندر تریپ جدا می‌گردد. در نتیجه شیر تریپ اضطراری فعال می‌شود.

۲-۱-۲-۳- تریپ توربین بر اثر هدایت بالای چگالیده

تریپ توربین توسط ترانسمیترهای هدایت، که برای مشاهده و نظارت آلودگی چگالیده در خارج از واحد پرداخت چگالیده و لوله‌های تخلیه پمپ مکش چگالیده استفاده شده‌اند شروع می‌شود. یک مجموعه متشکل از چهار فرستنده در نقاط مختلف قرار داده شده است که با ساختار منطقی دو از دو در کانال تریپ برای هر مجموعه از فرستنده‌ها عمل خواهد کرد. هر فرستنده را می‌توان به‌صورت زیر بار در مدار و با مقداردهی نقطه تنظیم آن نظارت کرد.

۲-۱-۲-۴- اهرم تریپ دستی

اهرم تریپ دستی توربین به‌صورت مکانیکی به هر دو میله تریپ متصل‌شده به شیرهای تریپ اضطراری هنگام تریپ، نیرو وارد می‌کند.

۲-۱-۲-۵- تریپ اضافه سرعت

در برخی از خطاها سرعت توربین و در نتیجه سرعت ژنراتور از بیشینه سرعت آن تجاوز می‌کنند. این افزایش سرعت معمولاً در صورت تجاوز بخار عبوری از حد مدنظر برای پاسخ‌گویی بار تجاوز کند، رخ می‌دهد. سرعت توربین از طریق گاورنر در سرعتی کمتر از تنظیم تریپ اضافه سرعت کنترل می‌شود. درصورتی‌که گاورنر قادر به بستن شیرهای گاونر نشوند، رله تریپ اضافه سرعت توربین که بر روی محور توربین نصب شده است، فعال شده و شیرهای تریپ اضطراری را فعال می‌کند.

۲-۱-۲-۶- از دست رفتن گاورنر الکتریکی

توربین‌های جدید نیروگاه‌های بخار دارای گاورنرهای الکترونیکی به‌منظور ایجاد امنیت در کانال‌های کنترل الکتریکی هستند. زمانی که تعداد زیادی از کانال‌ها دچار نقص شده و یا خطاهای دیگری بر روی عملکر گاورنر تأثیر بگذارند، یک سیگنال از طریق رله اینترلاک توان تولیدی پایین برای تریپ واحد صادر می‌شود.

۲-۱-۲-۷- پایین بودن دما و فشار بخار ورودی

در شبکه‌های متشکل از واحدهای کوچک سیستم حفاظت فشار بخار ورودی کم به‌طور ثابت در فشار ۷۰ تا ۱۰۰ درصد کار می‌کردند. با ورود مدهای عملکرد جدید که شامل عملکرد فشار لغزان هستند این روش حفاظتی پاسخ‌گویی مناسبی نداشتند. ایجاد این تغییر، توربین را از خطرهای احتمالی حتی در صورت فقدان کل آتش بویلر محافظت می‌کند. برای رسیدن به این موضوع که همه واحدهای ۶۶۰ مگاوات باید بر اساس روش فشار لغزان حفاظت

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

شوند توسط استاندارد به نیروگاه‌های حرارتی ارجاع شده است. بدین‌منظور امکانات زیر در این واحدها باید تأمین گردد:

- یک آلارم مناسب در صورت فقدان کل آتش بویلر شروع شود
- وضعیت شعله در کوره‌ها نمایش داده شوند
- دماها و فشارهای مناسب نمایش داده شوند
- یک کلید فشاری تریپ اضطراری تدارک دیده شود.

۲-۱-۳- بررسی توابع کنترلی سیستم تحریک و ارتباط آن با رله

در استاندارد IEEE 421 عناصر و اجزای متداول و توابع کنترلی سیستم تحریک ارائه شده است. بر اساس این استاندارد سه نوع سیستم تحریک برای نیروگاه موجود است. ویژگی‌های هر یک از سیستم‌های تحریک در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: ویژگی‌های هر یک از سیستم‌های تحریک

دسته سیستم تحریک	نوع سیستم تحریک	منبع توان سیستم تحریک	پاسخ اولیه بالا
DC	ژنراتور *DC*	مجموعه ژنراتور- موتور یا شفت ماشین سنکرون	خیر
AC	ژنراتور و یکسوکننده ثابت و کنترل نشده	شفت ماشین سنکرون	خیر
	ژنراتور بدون جاروبک و یکسوکننده ثابت و کنترل‌نشده	شفت ماشین سنکرون	بله
	ژنراتور و یکسوکننده کنترل‌شده	شفت ماشین سنکرون	بله
ST	منبع بالقوه یکسوکننده کنترل‌شده	ولتاژ ماشین سنکرون یا ولتاژ باس کمکی	بله
	منبع مرکب یکسوکننده کنترل‌نشده	ولتاژ و جریان ماشین سنکرون	بله
	منبع مرکب یکسوکننده کنترل‌شده	ولتاژ و جریان ماشین سنکرون	بله

توابع کنترلی موجود در این استاندارد به‌صورت خلاصه به شرح زیر هستند:

کنترل خودکار: در استفاده از سیستم کنترل تحریک، کنترل خودکار به حفظ ولتاژ ترمینال دستگاه همزمان در سطحی از پیش تعیین شده و بدون فعالیت، در محدوده عملیاتی ماشین سنکرون اشاره دارد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

کنترل برانگیختگی ناپیوسته: یک عملکرد کنترلی که برای تغییر سریع تحریک ماشین سنکرون به سطحی متفاوت از آنچه که توسط تنظیم‌کننده ولتاژ و تثبیت‌کننده سیستم برق انجام شده، استفاده شده است. این کنترل بیشتر در زمان خطای سیستم یا اختلال به‌کار گرفته می‌شود.

جبران‌کننده افت خط: تابعی است که ولتاژ ترمینال ترمینال‌های ماشین سنکرون را به‌منظور جبران‌سازی افت ولتاژ ناشی از امپدانس خط در یک نقطه ثابت خارجی تغییر می‌دهد.

جبران‌کننده بار جریان: تابعی است که برای کنترل عملکرد تنظیم‌کننده ولتاژ برای کنترل ولتاژ در نقطه‌ای غیر از ترمینال ماشین سنکرون عمل می‌کند.

حد تحریک بیش از حد (OEL): یک تابع کنترل است که جریان میدانی ماشین سنکرون یا تجهیزات تحریک را با توجه به اضافه بار حرارتی در مقادیر مجاز محدود می کند. در عملکرد این تابع ممکن است اقدام فوری یا تأخیر زمان انجام شود. همچنین به حداکثر محدودیت تحریک گفته می‌شود.

جبران‌کننده توان راکتیو: تابعی که برای به‌دست آوردن تقسیم جریان راکتیو در بین ماشین‌های سنکرون موازی‌شده استفاده می‌شود.

تحت محدودکننده تحریک (UEL): تابعی که عملکرد رگولاتور را به‌منظور حفظ تحریک ماشین سنکرون نادیده گرفته یا مقداری به نقطه ولتاژ ترمینال اضافه می‌کند. هدف از این امر باقی ماندن خروجی ماشین سنکرون بیش از یک سطح از پیش تعیین شده است.

ولت بر هرتز: تابعی که برای جلوگیری از افزایش تقسیم ولتاژ ترمینال بر فرکانس از یک سطح از پیش تعیین شده استفاده می‌شود. هدف این است که از شار مغناطیسی بیش از حد در ماشین سنکرون و ترانسفورماتورهای متصل جلوگیری شود.

محدودکننده‌های V / Hz با پیشرفته‌ترین سیستم‌های تحریک عرضه شده برای واحدهای متوسط و بزرگ ارائه می‌شود. این مدار در داخل رگلاتور خودکار ولتاژ قرار دارد. این مدار ولتاژ و فرکانس را در ترمینال‌های ژنراتور اندازه‌گیری کرده و میدان ژنراتور را برابر با مقدار موردنیاز برای جلوگیری از عملکرد ژنراتور تحت شرایط بیشتر از مقدار پیش‌فرض V / Hz تنظیم می‌کند. طرح‌های محدودکننده مختلفی وجود دارد. یک محدودکننده پیشرفته بلافاصله V / Hz ی خروجی ژنراتور را با مقدار پیش‌فرض هماهنگ می‌کند. محدودکننده‌های پیچیده‌تر اجازه می‌دهد که اضافه تحریک برای یک زمان خاص که با نام مشخصه زمان معکوس تعریف شده است، برقرار باشد. راه‌اندازی سریع، نامطلوب است، زیرا ممکن است از پاسخگویی مطلوب ژنراتور مطلوب در شرایط اضطراری سیستم جلوگیری کند. برای جلوگیری از خاموش شدن ژنراتور باید محدوده‌کننده‌های موردنظر روی فرکانسی کمتر از فرکانس اسمی تنظیم شوند (مثلاً ۹۵٪ فرکانس اسمی)، این تنظیمات باعث می‌شود که مدار محدوده‌کننده همواره تحت سرویس بوده و یا فقط زمانی وارد سرویس شود که ژنراتور آفلاین است. هنگامی که محدودکننده V / Hz تنها در فرکانس‌های کمتر تحت است، حفاظت در مقابل اضافه تحرک در فرکانس‌های بالاتر بر اساس ماکزیمم حد ولتاژ که مستقل از فرکانس است تأمین می‌شود. این یک روش غیر کارآمد برای حفاظت V / Hz است چرا که یک محدوده ولتاژ ثابت، مشخصه قطع V / Hz یی را تولید می‌کند که با عکس فرکانس متناسب است. این پروسه قطع اضافه‌بار از قابلیت اضافه تحریک کوتاه‌مدت ژنراتور در طول اختلالات سیستم استفاده نخواهد کرد. در تأسیساتی که محدودکننده تنها زمانی تحت سرویس است که ژنراتور در حالت آفلاین قرار می‌گیرد، فرض می‌شود که اضافه تحریک زمانی رخ می‌دهد که ژنراتور به سیستم برق متصل است. این فرض درست نیست. اگرچه بیشتر اضافه

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

تحریک‌ها به‌صورت آفلاین رخ می‌دهند، اما در مواردی نیز ممکن است اضافه تحریک زمانی که ژنراتور با سیستم قدرت سنکرون شده است، به وقوع بپیوندد. این شکل از حفاظت معمولاً توصیه نمی‌شود. هنگامی که محدودکننده V / Hz در همه زمان‌ها تحت سرویس است، خروجی محدودکننده در برابر خروجی دیگر توابع کنترلی رگلاتور، ارجح است. جریان میدان بر اساس تابع محدودکننده تعیین می‌شود. در شرایط کار عادی، تابع کنترل غالب، مقادیر مرجع ولتاژ برای تنظیم‌کننده است. هنگامی که وضعیت اضافه تحریک رخ می‌دهد، حد V / Hz محدودتر از مقدار مرجع ولتاژ شده و کنترل جریان میدان صورت می‌گیرد. محدودکننده، ولتاژ خروجی را بدون توجه به مقدار مرجع ولتاژ کم می‌کند. هنگام تنظیم این نوع محدودکننده‌ها باید مراقب بود. تنظیم بیش‌ازحد ممکن است قابلیت ژنراتور را در محدود ساختن ولتاژ خروجی کاهش دهد.

۲-۲- حفاظت نیروگاه گازی

در حفاظت نیروگاه‌های گازی هر دو حفاظت ژنراتور و تانسفورماتور مطرح‌شده در گزارش مرحله اول پروژه را شامل می‌شوند. همچنین این نیروگاه‌ها دارای تریپ‌های مکانیکی در توربین گازی خود همانند نیروگاه‌های بخار هستند که عبارت‌اند از:

- دمای بالای تهویه پایینی
- فشار کم روغن روانساز
- خرابی در سیستم یخ زدایی
- خرابی شعله
- بالا بودن دمای محفظه
- بالابودن اختلاف فشار مدخل ورودی هوا
- ارتعاشات بیش از حد
- پایین بودن فشار سوخت ورودی
- نامتعادل بودن فشار گاز

۲-۳- حفاظت نیروگاه سیکل ترکیبی

با توجه به تأثیر محدودیت‌های نیروگاه گازی در توان تولیدی واحدهای بخاری و در ادغام سیستم‌های کنترل این دو توربین بخاری و گازی در هم، کنترل این نیروگاه‌ها کمی پیچیده‌تر هستند. با این حال حفاظت الکتریکی نیروگاه سیکل ترکیبی دو مجموعه حفاظت الکتریکی نیروگاه‌های بخاری و گازی را شامل می‌شوند. تنها تفاوت در سیستم‌های کنترل این نیروگاه‌ها با نیروگاه‌های رایج بخاری و گازی است.

۲-۴- حفاظت نیروگاه آبی (تلمبه ذخیره‌ای)

در این نیروگاه ترانسفورماتور ژنراتور علاوه بر اتصال هر ماشین به سیستم ۴۰۰ کیلو ولت، یک تغذیه برای ترانسفورماتورهای متعدد سیستم کمکی را نیز شامل می‌شود. سیستم حفاظتی ژنراتور و ترانسفورماتور برای فرکانس عادی شبیه سیستم‌های حفاظتی نیروگاه‌های مرسوم هستند. با این حال حفاظت مخصوصی برای عملکرد در خارج از محدوده فرکانسی در سیستم حفاظتی نیروگاه در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر دو سیستم حفاظتی در مقوله فرکانس متغیر وجود دارد. حفاظت اضافه جریان برای باس بارهای راه‌انداز و دیگری حفاظت دیفرانسیل ماشین که به‌منظور فراهم کردن تنظیم‌های جریان کم در فرکانس‌های کم طراحی شده‌اند. این دو سیستم حفاظتی، وقتی

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

ماشین در فکانس نرمال است، از مدار خارج می‌شوند. حفاظت اضافه جریان ترمز دینامیکی نیز به دلیل ماهیت متفاوت این نیروگاه‌ها در شبکه به حفاظت متداول اضافه شده‌اند [۱].

۲-۴-۱- حفاظت اضافه جریان ترمز دینامیکی

به‌منظور متوقف کردن سریع ژنراتور و راه‌اندازی مجدد آن در همان مد یا مد معکوس، یک اتصال کوتاه سه‌فاز را در ترمینال‌های ژنراتور در نظر گرفته می‌شود. در این حالت یک رله اضافه جریان ترمز دینامیکی که در بالاتر از جریان بار کامل تنظیم شده است، ماشین را حفاظت می‌کند. به علاوه برای یک خطای الکتریکی روی ژنراتور، یک سیگنال بازدارنده از حفاظت برای جلوگیری از به‌کار رفتن ترمز دینامیکی فراهم شده است. برای همه تریپ‌ها خطاهای دیگر یک سیگنال برای اطمینان از خاموش شدن واحد فرستاده می‌شود.

۳- بهینه‌سازی سیستم حفاظت الکتریکی نیروگاه قدیمی

بر اساس مطالعات صورت‌گرفته هزینه پروژه‌های بهینه‌سازی یک نیروگاه قدیمی در حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد هزینه ساخت یک نیروگاه جدید تخمین زده شده است. در مسئله بهینه‌سازی سیستم یک نیروگاه مهم‌ترین بخش تخمین طول عمر و هزینه بهبود آن است. اهداف کلی بهینه‌سازی سیستم حفاظتی یک نیروگاه به‌صورت زیر قابل‌جمع‌بندی است:

- شناسایی نقص سیستم حفاظت موجود و عدم تشخیص برخی از شرایط بهره‌برداری خطرناک برای واحد نیروگاهی و خروج اضطراری حاصله از آن
- بررسی پیر شدن اجزا رله‌های الکترومکانیکی و در نتیجه تشخیص رله‌هایی با عملکرد غیر دقیق
- ارزیابی عمر باقی مانده تجهیزات
- ارزیابی عملکرد سیستم حفاظتی موجود در نیروگاه

۳-۱- ارزیابی مهندسی سیستم حفاظت نیروگاه

این روش شامل مراحل زیر است:

گام اول: جمع‌آوری اطلاعات: اطلاعات جمع‌آوری‌شده معمولاً شامل داده‌های موجود، گزارش‌های عملکرد سیستم حفاظتی، گزارش‌های تعمیر و نگه‌داری تجهیزات است.

گام دوم: بررسی وجود قطعات یدکی و امکان تهیه و جایگزینی آن‌ها

گام سوم: جمع‌آوری و بررسی مدارک سازندگان تجهیزات اولیه

گام چهارم: بررسی عملکرد جاری تجهیزات و توانایی آن‌ها برای براورده کردن معیارهای حفاظتی مطابق استانداردهای موجود

گام پنجم: تعیین طول عمر تجهیزات

گام ششم: تعیین و ارزیابی مزایای مالی حاصله از سناریو بهینه‌سازی

مهم‌ترین مسئله در پروژه بهینه‌سازی سیستم نیروگاهی، به‌روزرسانی سیستم زمین ژنراتور است. زمین کردن ژنراتور باید با توجه به استانداردهای IEEEC37-101-1985 و IEEEC62-92-1989 انجام شود. تجهیزات معمول به‌کار رفته برای زمین کردن نقطه نول ژنراتور شامل ترانسفورماتورهای جریان و مقاومت متصل به نقطه نول یا ثانویه ترانسفورماتور توزیع و ترانسفورماتور ولتاژ هستند. در پروژه‌های بهینه‌سازی سیستم حفاظتی نیروگاه معمولاً توصیه

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

می‌شود که ترانسفورماتورهای روغنی به‌کاررفته در زمین کردن نقطه نول ژنراتور به جهت جلوگیری از آتش‌سوزی و سایر مشکلات روغن آسکارل تعویض شوند. همچنین در این راستا باید در نظر داشت که تغییر در سیستم زمین نقطه نول موجب افزایش ولتاژ در پایانه خنثی سیم‌پیچ‌های قدیمی استاتور می‌شوند، در این حالت باید عایق ژنراتور در نقطه نول نیز بررسی شود. همچین تغییر ولتاژ در نقطه نول سیم‌پیچی قدیمی، موجب افزایش خطای زمین ژنراتور می‌شود. همچنین میزان مقاومت‌ها نیز باید مجددا بررسی شده و عملکرد آن‌ها در نظر گرفته شود. در بهینه‌سازی بخش الکتریک نیروگاه زمین‌گرمایی نیوزلند، استفاده از سیستم زمین با مقاومت زیاد به علت وقوع اضافه ولتاژهای گذرای خطای زمین و شکست عایقی استاتور دارای قابلیت اطمینان مناسب ارزیابی نشد. در نتیجه ترانسفورماتورهای توزیع به همراه یک مقاومت ثانویه اهمی جایگزین ترانسفورماتور ولتاژ شد. رله اضافه ولتاژ خطای زمین به همراه مقاومت، حفاظت زمین را تأمین کردند.

همان‌گونه که انتظار می‌رود با جایگزین کردن رله‌های حفاظتی قدیمی با رله‌های برنامه‌پذیر می‌تواند موجب بهبود عملکرد نیروگاه و کاهش هزینه تعمیر و نگه‌داری شود. در یک پروژه بهینه‌سازی تحلیل ابزارهای حفاظتی نیازمند یک برنامه و دستورالعمل مناسب است.

برای تحلیل ابزارهای حفاظتی نخستین گام با استفاده از تست‌های تنظیم رله قابلیت استفاده از آن رله مشخص می‌گردد. همچنین در این مرحله باید توانایی رله موجود در پوشش دادن اهداف جدید با توجه به اضافه شدن برخی از تجهیزات و یا تغییرات در سیستم نیز موردارزیابی قرار گرفته می‌شود. در صورت نیاز در گام بعدی با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از قسمت قبلی نیاز به حفاظت‌های اضافی با توجه به پیر شدن رله موردبررسی قرار می‌گیرد. به‌عنوان مثال تجهیزات حفاظتی با طول عمر بیش از ۲۰ سال در برخی از شرایط قادر به عملکرد صحیح در حفاظت ژنراتور نمی‌باشند. این شرایط معمولاً در مورد حفاظت اتصال به زمین، اضافه بار، اضافه شار، حفاظت نامتعادلی بار و حفاظت‌های قطع فیوز بیشتر موردتوجه قرار می‌گیرند. درصورتی‌که در پروژه بهینه‌سازی بهبودی در سیستم تحریک ژنراتور صورت گیرد، تنظیمات رله اضافه جریان باید مجدداً ارزیابی شوند. همچنین به‌منظور جلوگیری از عملکرد اشتباه رله قطع تحریک ژنراتور که معمولاً در شرایط نوسان قدرت ایجاد می‌شود، از یک تأخیر زمانی مناسب استفاده می‌شوند. وجود این تأخیر زمانی موجب افزایش زمان جذب توان راکتیو توسط ژنراتور می‌شود. این عامل سبب افزایش احتمالی فروپاشی ولتاژ در شبکه می‌شود. بدین‌منظور برای افزایش حساسیت و قابلیت اطمینان این حفاظت، استفاده از رله موهو با مشخصه دو مرحله‌ای توصیه می‌گردد. در یک پروژه بهینه‌سازی همچنین نیاز ات که مقاومت عایقی قسمت‌های مختلف سیستم در نظر گرفته شود. در صورت پایین بودن این مقاومت اضافه کردن بخش‌های حفاظتی جدید به نظر لازم است به‌عنوان مثال در پروژه بهینه‌سازی نیروگاه زمین گرمایی نیوزلند، به خاطر مقاومت عایقی کم روتورها، مدارات آشکارساز خطای زمین روتور به سیستم اضافه شد.

در یک پروژه بهینه‌سازی حفاظت نیروگاه، بررسی عملکرد ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ از ضروریات پروژه به شمار می‌رود. دلیل این امر تأثیر مستقیم مقادیر اندازه‌گیری‌شده در عملکرد رله‌ها و در نتیجه جلوگیری از پیری زودرس تجهیزات نیروگاه است. در این مرحله انجام تست‌هایی از قبیل آزمون عایقی، پلاریته، نسبت تبدیل، منحنی اشباع و ... وضعیت کلی ترانس و عیوب آن‌ها تشخیص داده می‌شود. به‌منظور تشخیص عمر این ترانس‌ها آزمایش‌های اندازه‌گیری درجه پلیمریزاسیون، اندازه‌گیری تخلیه جزئی وضعیت عایقی و طول عمر ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری محاسبه می‌شود. در صورت نیاز به تعویض ترانسفورماتور اندازه‌گیری، سریعاً در پروژه نسبت به تعویض آن اقدام می‌گردد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

در گام آخر بررسی‌های سیستم حفاظتی نیروگاهی، وضعیت باتری، شارژرها و تجهیزات توزیع DC باید در پروژه بهینه‌سازی سیستم حفاظتی نیروگاه موردارزیابی قرار گیرد. در این گام ظرفیت باتری‌های موجود برای پاسخ‌گویی به بار ناشی از اضافه شدن تجهیزات حفاظتی مجددا موردبررسی قرار گرفته می‌شود. در این بررسی‌ها باید اثر کاهش ظرفیت باتری‌های موجود و عمر آن‌ها نیز لحاظ گردد.

۳-۲- مطالعات بهینه‌سازی نیروگاه حرارتی بعثت

این نیروگاه در جنوب شرقی تهران در مساحتی در حدود ۲۰۰۰۰۰ متر مربع واقع شده است. واحدهای تولید برق نیروگاه شامل سه واحد بخاری به ظرفیت هر کدام ۸۲/۵ مگاوات است. این نیروگاه از طریق ترانسفورماتورهای اصلی واحد، تولید واحد را به شبکه ۶۳ کیلوولت نیروگاه متصل و از طریق پست ۶۳ کیلوولت به‌منظور توزیع از طریق کابل زیرزمینی در محدوده تهران و حومه به بار متصل می‌شود. تولید این نیروگاه از طریق پست ۲۳۰ کیلوولت به مناطق شمالی و جنوبی کشور منتقل می‌شود. از مزایای این نیروگاه می‌توان به نزدیکی آن به لوله اصلی گاز و همچنین نزدیکی به پالایشگاه ری اشاره کرد. در نتیجه سوخت سنگین نیروگاه توسط خط لوله به پالایشگاه قابل‌دسترسی است. این نیروگاه دومین نیروگاه قدیمی کشور نیز به‌شمار می‌رود در نتیجه نیاز به بهینه‌سازی سیستم حفاظتی نیروگاه احساس می‌شده است. در نتیجه مطالعات بهینه‌سازی این نیروگاه از طریق انجام تعمیرات، بازسازی و نوسازی تجهیزات واحدهای آن به‌منظور تأمین اهداف زیر در اوایل دهه هفتاد شمسی انجام شده است:

- بالابردن قابلیت اطمینان و پایداری واحدها
- بالابردن راندمان واحد و رسیدن به حد نامی از نظر تولید
- جلوگیری از صدمات و خسارات واحد در هنگام بهره‌برداری و تولید انرژی
- جلوگیری از کاهش غیر معمول عمر تجهیزات
- کاهش هزینه تعمیرات، نگه‌داری و بهره‌برداری
- سهولت و اطمینان در امر بهره‌برداری از واحدها

از نتایج انجام این پروژه مطالعاتی، تهیه و تدوین شرح خدمات یکسان بهینه‌سازی جامع نیروگاه بعثت و دیگر نیروگاه‌های بخاری کشور است. سیستم حفاظت الکتریکی این نیروگاه با توجه به مطالب بیان شده در بخش ۳-۲ موردارزیابی قرار گرفته شده و نتایج زیر حاصل شده است.

سیستم حفاظتی ژنراتور این نیروگاه قبل از انجام پروژه بهینه‌سازی شامل رله‌های مکانیکی زیر بوده است:

- رله دیفرانسیل
- دیستانس
- اتصال زمین استاتور
- مؤلفه منفی
- قطع تحریک
- اتصال زمین روتور

با مقایسه سیستم حفاظتی نیروگاه و سیستم حفاظتی پیشنهادی در استانداردهای IEC می‌توان نتیجه گرفت که به سیستم حفاظتی نیروگاه باید رله‌های زیر اضافه شوند:

- رله برگشت توان

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- رله ولتاژ زیاد
- رله شار زیاد
- رله لغزش قطب
- رله قطع ترانس ولتاژ
- رله اضافه جریان
- رله اتصال زمین
- رله دیفرانسیل سراسری

با بررسی انجام‌شده بر روی کلاس عایقی سیم‌پیچ استاتور این نیروگاه که از نوع کلاس عایقی B است تصمیم بر تعویض شینه‌های مذکور با کلاس عایقی F در ژنراتور گرفته شد. تست‌های صورت‌گرفته بر روی رله‌های موجود ژنراتور از جمله رله‌های دیفرانسیل، دیستانس، مؤلفه منفی، ولتاژی نشان‌دهنده وجود خطاهای غیر مجاز در اکثر این حفاظت‌ها بوده است.

بررسی‌های صورت‌گرفته در ورد حفاظت ترانسفورماتورهای این نیروگاه نشان‌دهنده این است که این ترانس‌ها توسط رله‌های دیفرانسیل و اتصال به زمین محافظت می‌شده‌اند. ازاین‌رو به‌منظور تکمیل سیستم حفاظتی ترانسفورماتورهای مجموعه مطابق با استاندارد IEC مجموعه رله‌های عنوان‌شده در زیر به سیستم حفاظتی ترانس‌های این نیروگاه اضافه شد:

- رله دیفرانسیل
- رله جریان زیاد در طرف ولتاژ زیاد
- رله جریان زیاد در طرف ولتاژ پایین
- رله جریان زیاد خطای زمین

همچنین به‌منظور تکمیل حفاظت ترانس تغذیه داخلی رله‌های جریان زیاد در طرف ولتاژ زیاد و ولتاژ پایین این ترانس اضافه شده است. به‌منظور کامل شدن حفاظت ترانس نیروگاه رله‌های جریان زیاد قطع لحظه‌ای، جریان زیاد سه‌فاز، رله خطای زمین با مشخصه زمین معکوس جریان کم و رله خطاهای زمین- قطع لحظه‌ای به مجموعه حفاظتی ترانس‌های کمکی اضافه شدند.

موتورهای استفاده‌شده در نیروگاه بعثت تمامی از نوع القایی و کلاس عایقی B است. در بررسی‌های صورت‌گرفته در روی این موتورها نشان‌دهنده افزایش جریان نسبت به جریان نامی اولیه موتورها به دلیل استهلاک و نشتی‌های مختلف بوده است. در نتیجه در تنظیم مجدد رله جریان زیاد این موتورها این موارد در نظر گرفته شد. در بخش حفاظت الکتریک موتورهای نیروگاه رله‌های اشاره‌شده در زیر به سیستم حفاظت این موتورها اضافه شده است:

- رله توقف روتور
- رله خطای زمین
- رله ولتاژ کم
- رله توالی نادرست فازها
- رله جریان کم با زمان قطع معین

رله خطای زمین با زمان قطع معین برای جریان‌های کم

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

با توجه به اهداف تعیین‌شده برای بهینه‌سازی سیستم حفاظت نیروگاه بعثت مجموعه اقدامات گزارش‌شده در جدول ۲ برای رسیدن به اهداف ارائه شده است.

جدول ۲ پیشنهاد بهبود و توسعه حفاظت ژنراتور [۱و۲]

اجزا	خطا	رله موردنظر	فرمان
استاتور	شار مغناطیسی اضافی در سطح بالایی از چگالی شار، مسیر آهنی- مغناطیسی طراحی شده برای عبور شار نرمال، اشباع شده و شار از مسیرهای نشتی که برای این منظور طراحی نشده است، مسیر خود را می‌بندد که می‌تواند سبب صدمه دیدن ژنراتور شود میدان حاصل به‌صورت مستقیم متناسب با ولتاژ و به‌صورت معکوس با فرکانس متناسب است.	رله ولت/هرتز	واحد تریپ
خطاهای سیستم	بار انتقالی از ظرفیت ژنراتور بیشتر است	رله زیر فرکانسی	تریپ دادن تا رسیدن به حداقل فرکانس یا وسایل کمکی واحد تا جایی که سیستم اجازه می‌دهد
سیستم تحریک	اضافه تحریک	رله ولتاژ میدانی یا جریان زمانی	کنترل جهت کاهش تحریک تا مقدار مجاز و در صورت انجام نشدن در زمان معین فرمان تریپ صادر می‌شود.
	خطای تنظیم‌کننده	رله ولتاژ در رگولاتور	به تابع کنترل دستی *DC* منتقل می‌شود
شین ژنراتور	اضافه حرارت میدان	رله اضافه جریان میدان، ترانسدیوسر دمای میدان	آلارم و پس از کمی تأخیر زمانی، فرمان تریپ صادر می‌شود.
	خطای فاز	رله دیفرانسیل	واحد تریپ
	خطای زمین	رله ولتاژ نول یا جریان	واحد تریپ

پیشنهاد بهبود و توسعه حفاظت ترانسفورماتورهای این نیروگاه به‌صورت مختصر در جدول ۳ اشاره شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

جدول ۳: پیشنهادهای بهبود و توسعه حفاظت ترانسفورماتورها [۱و۲]

تجهیزات	اجزا یا خطای موردنظر	رله موردنظر	فرمان
ترانسفورماتور قدرت	سیم‌پیچ‌ها	رله اضافه جریان با تأخیر زمانی	واحد تریپ
		رله خطای فشار	واحد تریپ
		رله پشتیبان	آلارم یا واحد تریپ
	اضافه تحریک	رله ولت/ هرتز	واحد تریپ

در بررسی صورت‌گرفته در این نیروگاه، مشخص شد که تجهیزات اصلی نیروگاه با صرف هزینه نبستاً کمی قادر به بهینه‌سازی است. درحالی‌که بهینه‌سازی تجهیزات پایین امری بهینه نبوده و در نتیجه تصمیم بر تعویض این تجهیزات گرفته شد [۲].

۴- ژنراتور و ترانسفورماتورهای موجود در نیروگاه‌ها

در این بخش مدل ژنراتورها و ترانسفورماتورهایی که در برخی از نیروگاه‌های کشور استفاده می‌شوند، ارائه می‌گردد. هدف از ارائه این اطلاعات آشنایی با تجهیزات اصلی برخی از نیروگاه‌ها و در صورت نیاز ارائه برخی ملاحضات در تدوین دستورالعمل طراحی رله‌های نیروگاهی در فصل بعد است. همان‌گونه که در قسمت قبل اشاره شد، برخی از سیستم‌های نیروگاهی به دلیل طول عمر بیش از حد و یا شرایط خاص بهره‌برداری نیاز به حفاظت‌های بیشتری دارند. نتایج بررسی ساختار نیروگاه‌ها به‌صورت ارائه‌شده در زیر است:

نیروگاه سیکل ترکیبی دماوند:

بخش گازی:

مشخصات ژنراتور	**دور نامی: ۳۰۰۰ دور در دقیقه (*rpm*)** **حداکثر توان قابل‌تولید اکتیو: ۱۵۹ مگاوات (*MW*)** **حداقل توان قابل‌تولید اکتیو: ۶۰ مگاوات (*MW*)** **ولتاژ خروجی: ۱۵,۷۵ کیلوولت (*kV*)** **نوع سیستم تحریک: استاتیک** **قابلیت جذب توان راکتیو: ۵۰- تا ۰ مگاوار (*MVAR*)** **قابلیت تولید توان راکتیو: ۰ تا ۷۲+ مگاوار (*MVAR*)** **میزان تولید جامپ اولیه هر یک از واحدها در زمان سنکرون: ۱۰ مگاوات (*MW*)** **نرخ بارگیری: ۱۱ مگاوات بر دقیقه (*MW/min*)**
مشخصات ترانسفورماتور اصلی	سال ساخت : ۲۰۰۲ ظرفیت: ۲۰۰ مگاولت آمپر (*MVA*) نسبت تبدیل ولتاژ: ۴۲۰ → ۱۵,۷۵ کیلوولت (*kV*)

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

	گروه برداری: *Ynd11* فرکانس نامی: ۵۰ هرتز (*Hz*) نوع سیستم خنک‌کنندگی: فن و هوا

بخش بخاری:

مشخصات ژنراتور	**دور نامی: ۳۰۰۰ دور در دقیقه (*rpm*)** **حداکثر توان قابل‌تولید اکتیو: ۱۵۹ مگاوات (*MW*)** **حداقل توان قابل‌تولید اکتیو: ۵۵ مگاوات (*MW*)** **ولتاژ خروجی: ۱۵,۷۵ کیلوولت (*kV*)** **نوع سیستم تحریک: استاتیک** **قابلیت جذب توان راکتیو: ۵۰- تا ۰ مگاوار (*MVAR*)** **قابلیت تولید توان راکتیو: ۰ تا ۷۲+ مگاوار (*MVAR*)** **میزان تولید جامپ اولیه هر یک از واحدها در زمان سنکرون: - مگاوات (*MW*) نرخ بارگیری: ۵ تا ۸ مگاوات بر دقیقه (*MW/min*)**
مشخصات ترانسفورماتور اصلی	سال ساخت: ۲۰۰۸ الی ۲۰۱۰ ظرفیت: ۲۰۰ مگاولت آمپر (*MVA*) نسبت تبدیل ولتاژ: ۴۲۰ → ۱۵,۷۵ کیلوولت (*kV*) گروه برداری: *Ynd11* فرکانس نامی: ۵۰ هرتز (*Hz*) نوع سیستم خنک‌کنندگی: *ONAN/ONAF1/ONAF2*

نیروگاه سیکل ترکیبی شهید رجایی

بخش گازی:

مشخصات ژنراتور	**دور نامی: ۳۰۰۰ دور در دقیقه (*rpm*)** **حداکثر توان قابل‌تولید اکتیو: ۱۵۴ مگاوات (*MW*)** **حداقل توان قابل‌تولید اکتیو: ۶۰ مگاوات (*MW*)** **ولتاژ خروجی: ۱۳,۸ کیلوولت (*kV*)** **نوع سیستم تحریک: بدون جاروبک** **قابلیت جذب توان راکتیو: ۳۰- تا ۰ مگاوار (*MVAR*)** **قابلیت تولید توان راکتیو: ۰ تا ۳۵+ مگاوار (*MVAR*)** **میزان تولید جامپ اولیه هر یک از واحدها در زمان سنکرون: ۷ مگاوات (*MW*) نرخ بارگیری: ۱۰ مگاوات بر دقیقه (*MW/min*)**
مشخصات ترانسفورماتور	سال ساخت: ۱۹۹۲

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

اصلی	ظرفیت: ۱۵۴ مگاولت آمپر (*MVA*) نسبت تبدیل ولتاژ: ۴۰۰ → ۱۳,۸ کیلوولت (*kV*) گروه برداری: *Ynd1* فرکانس نامی: ۵۰ هرتز (*Hz*) نوع سیستم خنک‌کنندگی: *ONAF*

بخش بخاری:

مشخصات ژنراتور	**دور نامی: ۳۰۰۰ دور در دقیقه (*rpm*)** **حداکثر توان قابل‌تولید اکتیو: ۱۲۵ مگاوات (*MW*)** **حداقل توان قابل‌تولید اکتیو: ۸۰ با دو بویلر و با یک بویلر ۴۵ مگاوات (*MW*)** **ولتاژ خروجی: ۱۰,۵ کیلوولت (*kV*)** **نوع سیستم تحریک: بدون جاروبک** **قابلیت جذب توان راکتیو: ۳۰- تا ۰ مگاوار (*MVAR*)** **قابلیت تولید توان راکتیو: ۰ تا ۵۵+ مگاوار (*MVAR*)** **میزان تولید جامپ اولیه هر یک از واحدها در زمان سنکرون: ۱,۵- ۱ مگاوات (*MW*) نرخ بارگیری: ۸ مگاوات بر دقیقه (*MW/min*)**
مشخصات ترانسفورماتور اصلی	سال ساخت: ۱۹۹۷ ظرفیت: ۱۲۵ مگاولت آمپر (*MVA*) نسبت تبدیل ولتاژ: ۴۰۰ → ۱۰,۵ کیلوولت (*kV*) گروه برداری: *Ynd11* فرکانس نامی: ۵۰ هرتز (*Hz*) نوع سیستم خنک‌کنندگی:*ONAF*

نیروگاه بخار شهید رجایی

مشخصات ژنراتور	**دور نامی: ۳۰۰۰ دور در دقیقه (*rpm*)** **حداکثر توان قابل‌تولید اکتیو: ۲۵۰ مگاوات (*MW*)** **حداقل توان قابل‌تولید اکتیو: ۱۲۵ مگاوات (*MW*)** **ولتاژ خروجی: ۱۹ کیلوولت (*kV*)** **نوع سیستم تحریک: *brush less* (دیود گردان)** **قابلیت جذب توان راکتیو: ۹۰- تا ۰ مگاوار (*MVAR*)** **قابلیت تولید توان راکتیو: ۰ تا ۱۷۰+ مگاوار (*MVAR*)** **میزان تولید جامپ اولیه هر یک از واحدها در زمان سنکرون: ۱۲,۵ مگاوات (*MW*) نرخ بارگیری: ۵ مگاوات بر دقیقه (*MW/min*)**

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مشخصـــات ترانســـفورماتور اصلی	سال ساخت: ۱۹۸۶ ظرفیت: ۳۱۲,۵ مگاولت آمپر (*MVA*) نسبت تبدیل ولتاژ: ۴۰۰ → ۱۹ کیلوولت (*kV*) گروه برداری: *Ynd11* فرکانس نامی: ۵۰ هرتـز (*Hz*) نوع سیستم خنک‌کنندگی: پمپ و فن (*OFAF*)

نیروگاه گازی رودشور

مشخصات ژنراتور	**دور نامی: ۳۰۰۰ دور در دقیقه (*rpm*)** **حداکثر توان قابل‌تولید اکتیو: ۲۴۵ مگاوات (*MW*)** **حداقل توان قابل‌تولید اکتیو: ۱۴۰ مگاوات (*MW*)** **ولتاژ خروجی: ۱۵,۷۵ کیلوولت (*kV*)** **نوع سیستم تحریک: استاتیک** **قابلیت جذب توان راکتیو: ۷۵- تا ۰ مگاوار (*MVAR*)** **قابلیت تولید توان راکتیو: ۰ تا ۱۴۵+ مگاوار (*MVAR*)** **میزان تولید جامپ اولیه هر یک از واحدها در زمان سـنکرون: ۱۰ مگـاوات (*MW*)** **نرخ بارگیری: ۱۳ مگاوات بر دقیقه(*MW/min*)**
مشخصات ترانسفورماتور اصلی	سال ساخت: ۲۰۰۵ ظرفیت: ۳۱۵ مگاولت آمپر (*MVA*) نسبت تبدیل ولتاژ: ۴۲۰ → ۱۵,۷۵ کیلوولت (*kV*) گروه برداری: *Ynd1* فرکانس نامی: ۵۰ هرتز (*HZ*) نوع سیستم خنک‌کنندگی:*ONAF*

نیروگاه بخار شهید منتظری

مشخصات ژنراتور	**دور نامی: ۳۰۰۰ دور در دقیقه (*rpm*)** **حداکثر توان قابل‌تولید اکتیو: ۲۰۰ مگاوات (*MW*)** **حداقل توان قابل‌تولید اکتیو: ۱۴۵ مگاوات (*MW*)** **ولتاژ خروجی: ۱۵,۷۵ کیلوولت (*kV*)** **نوع سیستم تحریک: استاتیک - دینامیک (رزرو)** **قابلیت جذب توان راکتیو: ۲۵- تا ۰ مگاوار (*MVAR*)** **قابلیت تولید توان راکتیو: ۰ تا ۱۱۰+ مگاوار (*MVAR*) (نسبت بـه بـار اکتیـو متغیر است)**

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

	میزان تولید جامپ اولیه هر یک از واحدها در زمان سنکرون: ۱۰ مگاوات (*MW*) نرخ بارگیری: ۳ مگاوات بر دقیقه (*MW/min*)
مشخصات ترانسفورماتور اصلی	سال ساخت: فاز ۱: ۱۹۸۲-۱۹۸۳ و فاز ۲: ۱۹۹۳-۱۹۹۴ ظرفیت: ۲۵۰ مگاولت آمپر (*MVA*) نسبت تبدیل ولتاژ: فاز ۱: ۲۳۰ → ۱۵,۷۵ فاز ۲: ۴۰۰ → ۱۵,۷۵ کیلوولت (*kV*) گروه برداری: *Ynd11* فرکانس نامی: ۵۰ هرتز (*Hz*) نوع سیستم خنک‌کنندگی:*OFAF*

نیروگاه بخار تبریز

مشخصات ژنراتور	دور نامی: ۳۰۰۰ دور در دقیقه (*rpm*) حداکثر توان قابل‌تولید اکتیو: ۴۰۰,۶۸ مگاوات (*MW*) حداقل توان قابل‌تولید اکتیو: ۲۰۰ مگاوات (*MW*) ولتاژ خروجی: ۲۰ کیلوولت (*kV*) نوع سیستم تحریک: استاتیک قابلیت جذب توان راکتیو: ۲۰۵- تا ۰ مگاوار (*MVAR*) قابلیت تولید توان راکتیو: ۰ تا ۳۳۹+ مگاوار (*MVAR*) میزان تولید جامپ اولیه هر یک از واحدها در زمان سنکرون: ۱۱ مگاوات (*MW*) نرخ بارگیری: ۴ مگاوات بر دقیقه (*MW/min*)
مشخصات ترانسفورماتور اصلی	سال ساخت: ۱۹۷۹- ۱۹۷۸ ظرفیت: ۴۵۰=۳*x*۱۵۰ مگاولت آمپر (*MVA*) نسبت تبدیل ولتاژ: ۲۴۷ → ۲۰ کیلوولت (*kV*) گروه برداری: *Ynd11* فرکانس نامی: ۵۰ هرتز (*Hz*) نوع سیستم خنک‌کنندگی:*OFAF*

نیروگاه گازی تبریز

مشخصات ژنراتور	دور نامی: ۳۰۰۰ دور در دقیقه (*rpm*) حداکثر توان قابل‌تولید اکتیو: ۳۶ مگاوات (*MW*) حداقل توان قابل‌تولید اکتیو: ۱۰ مگاوات (*MW*) ولتاژ خروجی: ۱۱ کیلوولت (*kV*) نوع سیستم تحریک: استاتیک قابلیت جذب توان راکتیو: ۲۳- تا ۰ مگاوار (*MVAR*) قابلیت تولید توان راکتیو: ۰ تا ۳۷+ مگاوار (*MVAR*) میزان تولید جامپ اولیه هر یک از واحدها در زمان سنکرون: ۵ مگاوات (*MW*) نرخ بارگیری: ۲ مگاوات بر دقیقه (*MW/min*)
مشخصات ترانسفورماتور اصلی	سال ساخت: ۱۹۷۲

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

	ظرفیت: ۶۷٫۵ مگاولت آمپر (*MVA*) نسبت تبدیل ولتاژ: ۲۴۸٫۵ → ۱۱ کیلوولت (*kV*) گروه برداری: *Ynd11* فرکانس نامی: ۵۰ هرتز (*Hz*) نوع سیستم خنک‌کنندگی:*ONAF*

نیروگاه بخار سهند بناب

مشخصات ژنراتور	دور نامی: ۳۰۰۰ دور در دقیقه (*rpm*) حداکثر توان قابل‌تولید اکتیو: ۳۲۵ مگاوات (*MW*) حداقل توان قابل‌تولید اکتیو: ۶٫۵ مگاوات (*MW*) ولتاژ خروجی: ۲۰ کیلوولت (*kV*) نوع سیستم تحریک: دینامیک (بدون جاروبک) قابلیت جذب توان راکتیو: ۱۲۶٫۸۵- تا ۰ مگاوار (*MVAR*) قابلیت تولید توان راکتیو: ۰ تا ۲۴۳٫۷۵ + مگاوار (*MVAR*) میزان تولید جامپ اولیه هر یک از واحدها در زمان سنکرون: ۶ مگاوات (*MW*) نرخ بارگیری: ۳، ۵ و ۸ (وابسته به شرایط) مگاوات بر دقیقه (*MW/min*)
مشخصات ترانسفورماتور اصلی	سال ساخت: ۲۰۰۱ ظرفیت: ۴۰۰ مگاولت آمپر (*MVA*) نسبت تبدیل ولتاژ: ۲۴۵ → ۲۰ کیلوولت (*kV*) گروه برداری: *Ynd11* فرکانس نامی: ۵۰ هرتز (*Hz*) نوع سیستم خنک‌کنندگی: *OFAF*

۵- چالش‌های بخش حفاظت نیروگاهی

در این بخش عملکرد برخی از رله‌های نصب‌شده در نیروگاه را به‌منظور شناسایی نقاط قوت سیستم حفاظتی که باید در دستورالعمل طراحی رله‌های نیروگاهی ارائه‌شده در بخش سوم موردتأکید قرار گیرد، ذکر شده است. با این حال، ازآنجاکه تمامی رله‌های نصب‌شده در نیروگاه‌ها با توجه به شرایط خاص کشورهای سازنده طراحی شده‌اند ممکن است برخی عملکردهای نابجا در آن‌ها مشاهده شود، با بررسی دقیق این مشکلات باید در دستورالعمل طراحی رله در فاز آخر پروژه تلاش شود این معایب به حداقل خود برسد. بدین‌منظور علاوه بر بررسی عملکرد برخی از رله‌های نصب‌شده در نیروگاه‌ها، نتایج برخی از حوادث صورت‌گرفته در سالیان اخیر نیز بررسی شده است. لازم به ذکر است با توجه به عدم همکاری نیروگاه‌های مختلف نتایج بیشتر بخش‌ها از کتاب‌ها و گزارش‌های قابل‌دسترس نوشته شده است [۱-۳].

۵-۱- بررسی عملکرد رله قطع تحریک ژنراتور در نیروگاه گازی ری

در جدول ۴ عملکرد رله قطع تحریک در واحدهای نیروگاه گازی ری گزارش شده است. در این جدول منظور از خطای خارجی وقوع خطای اتصال کوتاه در نزدیکی باس ژنراتور است که معمولاً سبب داخل شدن مشخصه

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

امپدانسی به دایره عملکرد رله می‌شود. مشکلات در سایر بخش‌های کاری نیروگاه که منجر به عملکرد رله می‌شوند، توسط خطای انسانی نشان داده شده است.

جدول ۴: عملکرد رله قطع تحریک نیروگاه گازی ری [۱و ۳]

علت عملکرد / نوع واحد	علت خارجی		علت داخلی		نامعین	مجموع	درصد
	خطای خارجی	نیاز شبکه	خطای داخلی	خطای نیروی انسانی			
آسک	–	۱	۷	–	–	۸	۵/۲
هیتاچی قدیم	۳	۲	۳۰	۵	–	۴۰	۲۶
هیتاچی جدید	۱	–	۴	–	–	۵	۳/۲
فیات	–	–	۶	۲	–	۸	۵/۲
میتسوبیشی	–	–	–	–	–	–	–
آاگ (آلارم)	۲	۱	۲	–	۴	۹	۵/۸
آاگ (تریپ)	۹	۱۵	۵۴	۴	۲	۸۴	۵۴/۵
مجموع	۱۵	۱۹	۱۰۳	۱۱	۶	۱۵۴	۱۰۰
درصد	۹/۷	۱۲/۳	۶۶/۹	۷/۱	۳/۹	۱۰۰	

با توجه به نتایج جدول ۴ این نکته مشخص است که واحدهای میتسوبیشی و فیات در طول دوران بهره‌برداری بهترین عملکرد را دارا بودند. که این امر نشان‌دهنده کنترل و حفاظت بالای این دو طرح از سیستم تحریک ژنراتور است. نکته مهم در این گزارش این است که واحدهای فیات واحدهای تحریک برای سیستم‌های بزرگ‌تر از واحدهای نصب‌شده در نیروگاه ری طراحی شده است. در نتیجه قابلیت اطمینان این سیستم بسیار بالا بوده و احتمال نقص و یا قطع تحریک در مسیر تغذیه تحریک بسیار ناچیز است.

نکته مهم در بررسی عملکرد رله قطع تحریک این واحد مربوط بررسی تنظیم ناصحیح این رله‌ها است. با توجه به عمل نکردن این رله‌ها باید موردبررسی قرار گرفته می‌شد. در بررسی‌های صورت‌گرفته مشخص شده است که روتور ژنراتور واحد ۳۰ هیچ‌گونه آسیبی ندیده است. از سوی دیگر در رابطه با واحد ۳۳ می‌توان بیان داشت که با توجه به ظاهر شدن آلارم زمین شدن روتور در این واحد، پدیده مذکور منجر به اتصال کوتاه شدن مدار تحریک نشده و در نتیجه نیازی به عملکرد رله قطع تحریک در این حالت نبوده است. در سایر موارد ثبت‌شده در این مورد اکثراً مربوط به افت فرکانس عملکرد حفاظت مربوط به خطا در سیستم AVR ژنراتور بی‌بار شده و در نتیجه نیازی به عملکرد رله قطع تحریک در این واحدها نبوده است.

با توجه دیگر به جدول ۴ می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین عملکرد رله قطع تحریک در واحدهای آاگ و هیتاچی قدیم رخ داده است. در این راستا با بازدید از ژنراتورهای واحدهای ۳۸ و ۳۹ آاگ آثار منتج‌شده از قطع تحریک دیده نشده است. با این حال بررسی بر روی ژنراتور واحد ۱۳ هیتاچی قدیم نشان‌دهنده علائم منتج‌شده از قطع تحریک مانند تغییر رنگ گوه سرتاسر شیار به رنگ بنفش و ریختگی رنگ‌های عایقی روی روتور بر اثر سوختگی مشاهده شده است. در این راستا بررسی‌ها به‌منظور علت عملکرد ناصحیح رله این واحدها صورت گرفت. نتایج این بررسی‌ها

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مشکلات بیان‌شده در ادامه را برای این واحدها متصور شدند که عمده دلایل آن به طراحی داخلی رله مربوط نبوده است.

- اشکال در سیستم کلید تحریک که جهت رفع این مشکل کلید تحریک با کنتاکتور تعویض شد.
- درجه حرارت بالای محفظه کارت‌های تحریک که جهت اصلاح این محفظه به اتاق فرمان واحد منتقل شده است.
- پلاریته اشتباهه CT
- حساسیت بالای بخش AVR این واحدها نسبت به دیگر واحدهای نیروگاه

در بررسی دیگری در مورد تقسیم‌بندی زمان عملکرد رله‌های قطع تحریک صورت گرفت. نتایج این بررسی نشان داده که بیشتر عملکرد این رله در ساعت‌های ۷ الی ۱۶ رخ داده است. همچنین در ایام گرم سال در فصل تابستان اکثر این عملکرد ثبت شده است. بر اساس این نتایج وابستگی عملکرد رله و سیستم تحریک به دمای محیط استنباط گردید. ازاین‌رو این حساسیت به دمای محیط باید در دستورالعمل طراحی رله نیروگاهی مدنظر گرفته شود.

بررسی‌های صورت‌گرفته بر روی سیستم تحریک و حفاظت آن در این نیروگاه به‌طورکلی منجر به نتایج زیر شده است:

- قطر دایره مشخصه رله قطع تحریک در واحدهای هیتاچی جدید نسبت به واحدهای هیتاچی قدیم کوچک‌تر بوده است و همچنین میزان آفست آن نیز زیادتر بوده است. در نتیجه رله عملکرد در این واحد کاهش می‌یابد. پس از مطالعات صورت‌گرفته تنظیمات این رله مجدداً و به‌صورت مناسب اصلاح شد.
- سیستم کنترل و حفاظت واحدهای هیتاچی قدیم و جدید همانند طرح واحدهای فیات صورت گرفت.
- احتمال رخ دادن پدیده قطع تحریک با افزایش درجه حرارت محیط افزایش می‌یابد که نیاز به متعادل سازی دمای محیط است.

۵-۲- رله الکترومکانیکی برگشت توان نیروگاه ری

در واحدهای آسک نیروگاه ری گازی از رله برگشت توان CWD ساخت وستینگهاوس استفاده شده است. اساس عملکرد این رله حس کردن افزایش یا کاهش توان خط و فرستادن دستورهای لازم برای کلیدها و سیستم کنترلی است. در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که این رله، یک رله حساس نسبت به جریان، با داشتن تنظیم جریان زیاد و کم است. این رله معمولاً از ولتاژ فاز به فاز و جریان خط استفاده می‌کند. حداکثر گشتاور در این رله در زمان پیش‌فازی ۳۰ درجه‌ای جریان نسبت به ولتاژ ایجاد می‌شود.

یک صفحه القایی حساس نسبت به توان و یک تغییردهنده فاز در ساختمان این رله استفاده شده است. الکترومغناطیس المان اصلی، دارای سیم‌پیچ جریان، با انشعاب‌های مختلف است. ورودی روی ساقه وسطی هسته قرار دارد. دو سیم‌پیچ ولتاژ، روی دو ساقه بیرونی هسته، قرار دارند. گشتاور راه‌اندازی با عبور جریان از سیم‌پیچ جریان ایجاد و عبور جریان از دو سیم‌پیچ ولتاژ متصل به دو فاز ایجاد می‌شود. این جریان و ولتاژ از طریق ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری نصب‌شده به رله می‌رسد. در اثر این عبور، شارهای مغناطیسی غیرهم‌فاز در فاصله هوایی رله ایجاد شده و در نتیجه گشتاور لازم را ایجاد می‌کند. جهت چرخش به مقدار جریان بستگی دارد. همان‌گونه که مشخص است، ترکیب ولتاژ و جریان گشتاور عملکرد را ایجاد می‌کند. لازم به ذکر است که یک مدار ایجادکننده اختلاف فاز در سیم‌پیچ‌های ولتاژ قرار گرفته شده است. مدار تغییردهنده فاز، از یک مقاومت سری با سیم‌پیچ‌های ولتاژ تشکیل شده

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

است. این رله دارای کنتاکت‌های وات بالا و پایین که در امتداد قوسی با زاویه ۱۵۰ درجه قابل‌تنظیم است، است. کنتکت‌های متحرک با توجه به مقدار وات تنظیم‌شده موقعیت معینی خواهند داشت. در نتیجه این کنتاکت‌ها تا نرسیدن به وات معین عمل نخواهند کرد.

به‌منظور بررسی عملکرد رله برگشت توان واحدهای مختلف نیروگاه گازی ری، گزارش عملکرد این رله‌ها که در سال ۱۳۷۵ ارائه شده است، استفاده شده است. بر اساس این گزارش رله برگشت توان در واحد گروه آسک در مجموع ۲۲ بار عملکرد داشته است. به‌منظور آشنایی با شرایط عملکرد این نتایج زیر قابل‌استخراج است:

- بیشترین عملکرد این رله در فصل سرما ثبت شده است.
- پدیده برگشت توان معمولاً همزمان با دیگر وقایع مانند کاهش سرعت گردش توربوژنراتور یا افزایش سرعت گردش توربوژنراتور بوده است.
- علت بروز پدیده برگشت توان ژنراتور در بسیاری از مواقع حذف یا قطع شعله یا تغییر سوخت از گازوئیل به گاز گزارش شده است.

رله برگشت توان در واحدهای هیتاچی قدیم دارای عملکرد مناسبی بوده است. علت این امر را می‌توان وجود یک سیستم کنترل با قابلیت تطبیق سریع با شرایط بیان کرد. گاورنر این واحدها توانایی پاسخ سریع به شرایط مختلف را دارا است. در نتیجه در این واحدها مشکل عدم سوخت رسانی مناسب که به‌عنوان مهم‌ترین دلیل برای عملکرد رله برگشت توان است به خوبی پوشش داده شده است. با این حال در مدت‌زمان بررسی گزارش در خرداد سال ۷۵، تعداد عملکرد این رله برابر با ۱۱ مورد گزارش شده است. دلایل عملکرد این رله با توجه به شرایط عنوان‌شده در زیر بیان شده است:

- شرایط محیطی عملکرد این رله همانند سایر واحدها نقش اصلی در عملکرد رله را دارند. عملکرد این رله معمولا در فصل سرما رخ داده است.
- پدیده برگشت توان معمولاً همزمان با دیگر وقایع مانند کاهش سرعت توربین و یا غیر عادی بودن مدار سرعت، عملکرد رله اضافه ولتاژ و عملکرد رله قطع تحریک بوده است.
- علل بروز برگشت توان در گزارش‌ها عبارت‌اند از نوسان شدید فرکانس شبکه، بروز خطای الکتریکی در محدوده ژنراتور و کاهش فشار روغن هیدرولیم سیستم کنترل.

در واحدهای هیتاچی جدید میزان عملکرد رله برگشت توان بیش از سایر واحدها گزارش شده است. در نتیجه بررسی‌های خاصی برای تشریح علت این عملکرد انجام شده است. نکات عمده عملکرد این رله در این واحد عبارت‌اند از:

- عملکرد رله اضافه ولتاژ
- عملکرد رله قطع تحریک
- نوسانات شبکه
- تعییر سوخت گازوئیل به گاز
- بروز خطای الکتریکی در محدوده ژنراتور

بررسی‌های صورت‌گرفته نشان‌دهنده این نکته بوده است که عملکرد نا مطلوب رله قطع تحریک که در قسمت قبلی نیز اشاره شد یکی از دلایل رخ دادن این عملکرد است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

عملکرد رله برگشت توان در واحدهای فیات نیروگاه ری نیز معمولاً بیش از حد مورد انتظار است که بررسی‌های صورت‌گرفته برای تعیین علت این امر به شرح زیر است.

بالا رفتن درجه حرارت هوای خنک‌کن پره‌های گردان توربین، معمولاً در این واحدها سیستم کم‌کننده اتوماتیک بار را فعال می‌کند. این سیستم سبب کاهش بار را تا زمان از بین رفتن آلارم درجه حرارت می‌شود. این عمل معمولاً منجر به باز شدن کلید قدرت ژنراتور بر اثر عملکرد رله برگشت توان می‌شود. لازم به یادآوری است که این سیستم کنترل منحصراً برای واحدهای گروه فیات تعبیه شده است. دلیل عمده برای بروز این شرایط وجود خطا در الکتروموتور فن‌های خنک‌کننده اعلام شده است.

برای بیان عامل دوم عملکرد بیش از حد این رله به مدار فرمان تنظیم سوخت واحد اشاره شده است. این سیستم با افزایش مقاومت اهمی (پتانسیو متر)، فرمان افزایش سوخت به شیر مربوطه را صادر می‌کند. همچنین با کاهش مقاومت اهمی، فرمان کاهش سوخت ارسال می‌گردد. در زمان‌های کثیف شدن پتانسومتر گاورنر الکترونیکی واحد که با استپ موتور گاورنر کوپل شده است، منجر به ناهماهنگی میان افزایش پله‌های با با تغییرات مقاومت اهمی می‌شود. در نتیجه سبب بروز خطا می‌شود.

عملکرد رله برگشت توان واحدهای میتسوبیشی دارای بهترین عملکرد در نیروگاه گازی ری است. این رله ۴ بار عملکرد داشته است. این عملکرد به دلیل وقوع خطا در محدوده ژنراتور رخ داده‌اند. سیستم کنترل این واحدها از نوع میکروپروسسوری بوده است. در نتیجه بارگیری خیلی سریع و در لحظه اول انجام می‌شود. که از مزایای آن این است که رله برگشت توان حالت سوئینگ را ندیده و در نتیجه عملکردی در حالت معمول تغییر سوخت نداشته باشد.

واحدهای گروه آاگ نیز دارای عملکردی قابل‌قبول بوده‌اند و دلایل عملکرد رله برگشت توان نیز مشابه با سایر واحدها است. ازاین‌رو به بررسی عوامل مؤثر در این واحدها پرداخته نمی‌شود.

پس از بررسی‌های انجام‌شده بر روی رله‌های برگشت توان واحدهای مختلف نیروگاه گازی ری می‌توان نتیجه گرفت که سیستم کنترل مناسب واحد با قابلیت تطبیق سریع و تنظیم مناسب دروپ گاورنر تا حد زیادی می‌تواند عملکرد رله برگشت توان و رخ دادن حالت موتوری شدن ژنراتور را کاهش دهند. در نتیجه توصیه می‌شود که واحدهای کنترل به سیستم‌های میکروپروسسوری ارتقا داده شوند. همچنین در سیستم‌های گروه فیات و سایر واحدهای مشابه کشور در برنامه‌های دوره‌ای تعمیرات نسبت به تمیز بودن پتاسیومتر اطمینان حاصل گردد. در این صورت به ازای افزایش بار مقدار مناسبی سوخت افزایش یافته و از حالت موتوری شدن ژنراتور جلوگیری می‌گردد.

۵-۳- عملکرد کاذب رله دیفرانسیل ژنراتور در نیروگاه پتروشیمی کرمانشاه

نیروگاه پتروشیمی کرمانشاه شامل سه واحد گازی با ظرفیت ۱۱ مگاوات و ولتاژ خروجی ۱۱ کیلو ولت ساخت شرکت کاوازاکی است. در این نیروگاه ژنراتور GTGA پس از سنکرون شدن با باس ۱۱ کیلوولت، باری در حدود ۱/۵ مگاوات را تغذیه کرده که بنا به دلایلی نیاز به افزایش بار روی ژنراتور بوده است. بدین‌منظور یک موتور پمپ آب خنک‌کن به قدرت ۱/۴ مگاوات شروع به‌کار کرده است. در لحظه شروع به‌کار موتور رله دیفرانسیل ژنراتور عمل کرده و باعث خروج واحد می‌گردد.

با بررسی‌های صورت‌گرفته نظیمات رله دیفرانسیل ژنراتور ۷۰ میلی‌آمپر بوده است و قبل از راه‌اندازی موتور مذکور جریان‌های طرفین ژنراتور از روی رله دیجیتال Micom با هم مقایسه شد. نتایج این مشاهده نشان‌دهنده آن بود که جریان‌های طرف نوترال ژنراتور هر سه یکسان و برابر با جریان فاز وسط طرف بریکر 52G بوده است. با این حال

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

جریان‌های مربوط به فازهای R و T طرف C.B با هم و نسبت به فازهای هم نام طرف نوترال، متفاوت بودند. به‌منظور بررسی مشکل اقدامات زیر در این نیروگاه انجام شد:

- تست نسبت تبدیل ترانس‌های اندازه‌گیری جریان
- تست مجدد پلاریته ترانس‌های اندازه‌گیری جریان
- بررسی وایرینگ مربوط به رله دیفرانسیل
- بررسی مجدد تنظیمات رله دیفرانسیل

پس از بررسی موارد فوق همچنان خطای مذکور باقی‌مانده بود. با بررسی‌های صورت‌گرفته آرایش نصب ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری جریان، موقعیت C.T مربوط به فاز R ,T به پشت فیدر داخل پست تغییر داده شد که اشکال پس از این تغییر بر طرف شد. دلیل رفع این خطا مربوط به حلقوی بودن CTها بوده است. که در آن کابل‌ها درست در مرکز CT قرار گرفته‌اند.

۵-۴- عملکردهای کاذب رله‌های ژنراتوری آمریکای شمالی

نتایج ثبت‌شده از تریپ‌های واحدهای ژنراتوری (۲۹۰ واحد ، حدود ۵۲،۷۴۵ مگاوات) در طول دوره اختلال شبکه برق در آمریکای شمالی در ۱۴ اوت ۲۰۰۳ ، شامل ۱۳ نوع عملکرد سیستم حفاظتی نیروگاه بوده است. در نتیجه کارگروه بررسی توصیه‌های خاموش (NERC (BRRTF، به بررسی عملکرد و راه‌های جلوگیری از این عملکرهای اشتباه پرداخت. با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته توسط این کارگروه مشخص شد که تابع‌های حفاظتی از جمله فوق تحریک، ولتاژ بیش از حد، فقدان تحریک، جریان بیش از حد، و عملکردهای محافظ جریان بیش از حد به تغییرات ولتاژ و فرکانس غیر طبیعی که در شرایط خطای شبکه رخ می‌دهند، حساس هستند. در نتیجه این کارگروه برنامه‌های حفاظتی و تنظیمات آن‌ها را به‌منظور هماهنگ‌سازی سیستم‌های حفاظتی نیروگاه و شبکه را موردارزیابی قرار داد. تعداد تریپ‌های اشتباه هر رله واحدهای نیروگاهی در طول این اختلال در جدول ۵ نشان داده شده است [۴].

جدول ۵ تعداد تریپ‌های اشتباه رله‌های نصب‌شده در نیروگاه‌های آمریکای شمالی [۴]

نوع رله	۲۱	۲۴	۲۷	۳۲	۴۰	۴۶	۵۰	۵۰ *BF*	۵۱ *V*	۵۹	۷۸	۸۱	۸۷ *T*
تعداد عملکرد	۸	۱	۳۵	۸	۱۳	۵	۷	۱	۲۰	۲۶	۷	۵۹	۴

در این جدول هر یک از حفاظت‌های زیر با کدهای نشان داده شده مشخص شده‌اند:

- mho-distance
  21
- voltage-controlled and voltage-restrained overcurrent 51V
- volts per hertz
  24
- undervoltage
  27
- overvoltage
  59
- reverse power
  32

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- loss of field 40
- negative sequence 46
- breaker failure 50BF
- inadvertent energizing 50/27
- out of step 78
- over/underfrequency 81
- transformer differential 87T

۵-۵- الزامات هماهنگی رله‌های نیروگاهی و شبکه

در گزارش ارائه‌شده توسط کارگروه NERC هماهنگی میان ژنراتور و شبکه به شرح زیر تعریف می‌شود [۴]: ‘‘هماهنگی سیستم‌های حفاظتی در شبکه‌های تولید و انتقال (برای وقایع خارج از نیروگاه)، به این معنی است که باید سیستم حفاظتی نیروگاه‌ها و عناصر کنترل مربوطه به گونه‌ای تنظیم شوند که از عمکرد غیرضروری سیستم حفاظتی ژنراتور قبل از هرگونه حفاظت در شبکه انتقال جلوگیری شود.’’

در گزارش ارائه‌شده توسط کارگروه NREC الزامات و چالش‌های هماهنگی هر یک از رله‌های موجود در نیروگاه با رله‌های شبکه انتقال که سبب جلوگیری از عملکرد اشتباه رله نیروگاهی می‌شوند، گزارش داده شده است. خلاصه این الزامات و رله‌های شبکه انتقال که با هر رله نیروگاهی باید هماهنگ شوند در جدول ۶ مشخص شده است [۴].

جدول ۶: ملاحظات هماهنگی حفاظت شبکه نیروگاهی و انتقال [۴]

تابع حفاظت نیروگاه	تابع‌های حفاظت شبکه انتقال	ملاحظات
رله دیستانس	رله دیستانس دیفرانسیل باس‌بار دیفرانسیل ترانس خطای بریکر	- تمامی رله‌های دیستانس باید هماهنگ شوند. - استقلال تریپ‌ها باید حفظ شوند. - مشخص کردن زمان خطای بریکر - تنظیمات باید با برنامه‌ریزی و مطالعات سیستم، از طریق مدل‌سازی صریح عملکرد یا از طریق نظارت بر نوسانات امپدانس در محل رله در برنامه‌های مختلف و استفاده از تجربیات مهندسی انجام شود.
ولت بر هرتز	برنامه‌های برای مقابله با	- ویژگی‌های حفاظت ژنراتور V/Hz باید در

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

	کاهش فرکانس	تهیه برنامه مقابله با شرایط کاهش فرکانس برای کلیه شرایط ولتاژ موردنیاز تعیین و شناخته شود. - سیستم کنترل تحریک ژنراتور با V/Hz محدودیت V/Hz هماهنگی شوند. - برنامه مقابله باید با تنظیمات فوق هماهنگ شود. - تنظیمات باید با برنامه‌ریزی و مطالعات سیستم، از طریق مدل‌سازی صریح عملکرد یا از طریق نظارت بر عملکرد ولتاژ و فرکانس در محل رله و با استفاده از تجربیات مهندسی انجام شود.
حفاظت *undervoltage*	دیستانس دیفرانسیل باس‌بار دیفرانسیل ترانس خطای بریکر	- برای یک رویداد شدید قابل‌بازیابی با شرایط کم ولتاژ سیستم نباید تریپ سریعاً ارسال شود. - تنظیمات باید با برنامه‌ریزی و مطالعات سیستم، از طریق مدل‌سازی صریح عملکرد یا از طریق نظارت بر عملکرد ولتاژ در محل رله و با استفاده از تجربیات مهندسی انجام شود.
حفاظت اضافه ولتاژ	دیستانس دیفرانسیل باس‌بار دیفرانسیل ترانس خطای بریکر	- برای یک رویداد شدید قابل‌بازیابی با شرایط کم ولتاژ سیستم نباید تریپ سریعاً ارسال شود. - تنظیمات باید با برنامه‌ریزی و مطالعات سیستم، از طریق مدل‌سازی صریح عملکرد یا از طریق نظارت بر عملکرد ولتاژ در محل رله و با استفاده از تجربیات مهندسی انجام شود.
بازگشت توان	-	- برخی از سیستم‌های کنترلی در شرایط بازگشت توان راکتیو بالا موجب ناپایداری شبکه می‌شود. - این رله باید با دقت بالا عمل کند.
از دست رفتن میدان	تنظیمات به‌کاررفته در مطالعات شبکه	- جلوگیری از خروج از منحنی توان راکتیو - ضروری است که عملکرد این رله برای نوسانات انرژی پایدار کار نکند. مسیر امپدانس اکثر

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

		واحدها با ضریب توان پس‌فاز برای نوسانات پایدار از ربع اول و دوم عبور و برگشت می‌کند.
توالی فاز منفی بیش از حد	دیستانس رله زمین مستقیم رله اضافه جریان زمین	- باید سیستم هماهنگ‌شده برای خطاهای نامتقارن مجدداض تنظیم شود. - خطوط ترانسپوزه باید در این هماهنگی توجه شود. - سیستم‌های وصل مجدد اتومات باید برنامه‌ریزی مجدد شوند. - در صورت بروز آلارم ارسال میزان جریان واحدهای نیروگاهی به رله‌های شبکه و سپس ارسال دستور تریپ در صورت عدم وجود شرایط یکسان در سیستم شبکه انتقال.
دیفرانسل ژنراتور دیفرانسیل ترانس		- هم‌پوشانی مناسب منطقه دیفرانسیل کلی و منطقه دیفرانسیل باس و غیره باید تأیید شوند.

۵-۶- تریپ رخ داده در نیروگاه شهید مدحج (زرگان)

در سالیان گذشته خط شهید مدحج-اهواز ۲ (NW-۸۰۷) بدون گزارش و تریپ رله، در پست شهید مدحج قطع و واحد بخار شماره ۲ نیروگاه زرگان به علت باز بودن سکسیونر مربوطه دچار تریپ شده و واحد شماره یک بخار نیز به علت قطع مصرف داخلی از مدار خارج شده است. وضعیت نیروگاه و شبکه متصل قبل از حادثه در حالت کارکرد نرمال به شرح زیر بوده است:

واحدهای بخار شماره یک و دو نیروگاه زرگان هر کدام با بار ۹۰ مگاوات در مدار بوده و واحدهای گازی نیروگاه در زمان حادثه در مدار نبوده‌اند. سکسیونر رابط بین باس بار و واحدهای شماره یک و دو بخار باز بوده و بنابراین واحدهای شماره یک و دو بخار مستقیماً با خط شهید مدحج-اهواز ۲ مرتبط بوده‌اند. ترانسفورماتور مربوط به مصرف داخلی واحد شماره یک از مدار خارج بوده و لذا مصرف داخلی این واحد از طریق ترانسفورماتور اصلی که به باس بار واحد شماره دو متصل است، تأمین می‌شد. همچنین خط فشار قوی ۲۳۰ کیلوولت اهواز۲-آبادان طبق برنامه قبلی جهت آزمایش سیستم‌های حفاظتی و راه‌اندازی مدارات سیستم‌های تله پروتکشن از مدار خارج بوده است. بدین‌ترتیب با توجه به توضیحات ارائه‌شده در مورد وضعیت سیستم، گزارش مربوط به عملکرد تجهیزات حفاظتی به شرح زیر است:

آلارم PLC Tripping در پست دو اهواز ظاهر شده و خط زرگان قطع گردیده است. در سمت نیروگاه زرگان نیز تریپ‌های زیر توسط رله‌های موجود اعمال شده‌اند:

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

رله جریان زیاد طرف ۲۳۰ کیلوولت ترانسفورماتور راه‌انداز (Station Transformer) به‌صورت C.B.F عمل کرده و سبب قطع کلیدهای ۲۳۰ کیلوولت مربوط به باس بار واحد شماره دوم شده است. در ادامه تریپ توربین سبب تریپ واحد شماره‌ی دو شده و عمل کرده است. همچنین به علت قطع مصرف داخلی، تجهیزات حفاظتی واحد شماره یک عمل کرده‌اند.

رله‌های جریان زیاد نصب‌شده بر روی کلیدهای واحد شماره دو و ترانسفورماتور راه‌انداز که به دلیل فقدان سیستم‌های حفاظتی باس بار نیروگاه طوری استفاده شده بودند که در اثر عملکرد به‌صورت C.B.F عمل نموده و کلیه کلیدهای ۲۳۰ کیلووات باس بار مربوطه را قطع کرده‌اند، به‌صورت زیر تنظیم شده بودند:

رله و واحد شماره دو:

C.T.R: 800/5 A

I sett: 640 A

T sett: 280 msec

رله ترانسفورماتور راه انداز:

C.T.R: 100/5 A

I sett: 80 A

T sett: 280 msec

در طراحی سیستم‌های حفاظتی و کنترل خطوط در پست‌های فشار قوی، از رله سنکروچک استفاده می‌گردد که طبق استانداردهای بین‌المللی در این واحد نیروگاهی نیز از آن استفاده بود. نحوه کار این رله بدین‌ترتیب است که چنانچه اپراتور بخواهد کلید یک خط را ببند، ابتدا سیستم سنکرونایزینگ را با یک سوئیچ در مدار قرار می‌دهد، در این حالت سیستم سنکروسکوپ و رله سنکروچک در مدار قرار می‌گیرند. رله سنکروچک ولتاژهای ترانسفورماتورهای ولتاژ باس بار و خط موردنظر را که کلید سنکرونایزینگ آن وصل شده است را با یکدیگر مقایسه کرده و چنانچه شرایط با تنظیمات رله که بر اساس شرایط مناسب سنکرون کردن تعیین شده است مطابقت داشته باشد، کنتاکتی را در مسیر فرمان وصل کلید که از طرف اپراتور صادر شده است را می‌بندد و بنابراین تحت این شرایط کلید فرمان وصل را دریافت می‌کند و اگر شرایط سنکرون برقرار نباشد، به دلیل برقرار نشدن کنتاکت رله سنکروچک، اپراتور امکان وصل کلید را نخواهد داشت.

در این واحد نیروگاهی برای عیب‌یابی سیستم، رله سنکروچک موردآزمایش قرار گرفت و درستی کارکرد آن موردتأیید بوده است. بنابراین با توجه به اینکه ولتاژ از طرف نیروگاه زرگان وجود داشته است، در شرایط صحت و سلامت کلیه مدارات مذکور نباید امکان وصل کلید خط وجود داشته باشد، اما با توجه به اظهارات مسئولان نیروگاه مبنی بر اینکه در زمان سنکرونیزاسیون ولتاژ از طرف زرگان وجود نداشته است، این احتمال وجود دارد که رله‌های کمکی مربوط به خط زرگان که وظیفه ارتباط ولتاژ از ترانسفورماتور ولتاژ خط مذکور تا رله سنکروچک را به عهده دارند و یا مدارات ارتباطی مربوطه دارای مشکل بوده‌اند.

به علت عدم وجود دستگاه‌های ثبات در پست‌های اهواز ۲ و زرگان و عدم ثبت اطلاعات، تجزیه و تحلیل و نتیجه‌گیری دقیق حادثه به سرعت امکان‌پذیر نشده است. بنابراین با توجه به گزارشات فنی موجود می‌توان نتایج زیر را استنباط کرد:

- عدم هماهنگی مابین مسئولین حفاظتی نیروگاه و پست با مسئول قسمت دیسپاچینگ سبب وقوع اشتباهات فنی ثانویه در شبکه شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- عدم استفاده درست و اصولی از کلیدهای قدرت و سکسیونر تنها سبب تریپ یکی از واحدها شده است، که در حالت صحیح باید هر دو واحد از مدار خارج می‌شد.
- عدم وجود دستگاه‌های تجزیه و تحلیل حوادث باعث شده که مسئولین فنی پست و نیروگاه از مشکلات به‌وجودآمده اطلاع نداشته‌اند و برای خطرات احتمالی تدابیر لازم اتخاذ نشده بود.

علل مختلف عملکرد رله‌های دیفرانسیل ترانسفورماتورهای نیروگاهی گازی ری

دسته‌بندی علل عملکرد رله‌های تفاضلی ترانسفورماتورهای این نیروگاه به شرح زیر است:

- در اثر فاصله هوایی ایجادشده در محل اتصالات کلمپ سکسیونر متصل به ترانسفورماتور و جرقه‌های حاصل، سبب وقوع خطا در داخل پست شده که در نهایت رله دیفرانسیل تریپ کرده است.
- اتصال ایجادشده در خط خروجی نیروگاه، سبب افزایش جریان در خط شده و در نهایت کلمپ پانتوگراف ذوب شده است و در نهایت رله دیفرانسیل در ترانسفورماتور عمل نموده است.
- وقوع شکست در بریکرهای ۱۱ کیلووات، سبب تریپ رله دیفرنسیل ترانسفورماتور شده است.
- تأخیر در عملکرد کنتاکت یکی از فازهای بریکر ۲۳۰ کیلوولت، سبب افزایش جریان در فاز مربوطه شده و در نهایت رله دیفرانسیل ترانسفورماتور تریپ داده است.
- بارش مستقیم باران و برف بر مدارات حفاظتی اثر گذاشته و در مدارهای حفاظتی اختلالاتی به‌وجود آورده است.
- بر اثر ناپایداری‌های موجود در شبکه، رله دیفرانسیل ترانسفورماتور حالت ناپایداری از خود نشان داده و عمل خواهد کرد.

۶- جمع‌بندی فاز دوم

با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته و بیان‌شده در این گزارش اکثر چالش‌های مربوط به تنظیمات نا مناسب رله‌ها و یا قرار گیری نامناسب ترانس‌های اندازه‌گیری بوده است. که در دستورالعمل طراحی رله قابل مطرح نمی‌شود. با این حال برخی از مشکلات مانند پیری عایقی ژنراتورها نیازمند افزودن برخی حفاظت‌های دیگر به مجموعه است. در این راستا مسائلی همچون عملکرد رله‌های برگشت توان در زمستان که اکثرا به دلیل تغییر سوخت نیروگاه رخ می‌دهد می‌تواند با در نظر گرفتن تأخیرهای مناسب در این حالت بر طرف شود. ،در ایام گرم سال (افزایش پیک بار) بارگیری ماشین بالا بوده و بنابراین جریان عبوری از ذغال و جاروبک‌ها زیاد است همین امر می‌تواند منجر به کاهش عمر ذغال شده و پدیده مذکور رخ دهد. از طرف دیگر رله تشخیص قطع تحریک به نوسان توان بسیار حساس است و در شرایط پرباری شبکه یعنی ایام تابستان دامنه نوسانات بیشتر بوده و همین امر می‌تواند منجر به عملکرد کاذب رله شود.

مراجع فاز دوم

۱. حفاظت تجهیزات نیروگاهی (رله‌های غیر جریانی و مطالعات موردی)، تألیف مصطفی قلم‌چی، انتشارات امید انقلاب، ۱۳۹۱

۲. پروژه طراحی تحقیقاتی نیروگاه بخار، مرکز تحقیقات نیرو

۳. بهینه‌سازی سیستم الکتریکی برخی از واحدهای نیروگاه ری گازی، مصطفی قلمچی، همایون حائری، علیرضا معصومی، هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق آبان ۱۳۷۱

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

[4] *Power Plant and Transmission System Protection Coordination*, NERC System Protection and Control Subcommittee, Rev. 1, Jul. 2010. Available at: http://www.nerc.com/docs.

DOI:

۱- مقدمه فاز سوم

در این پروژه هدف ارائه استاندارد طراحی رله‌های حفاظتی ژنراتور و ترانسفورماتور نیروگاهی است. در قسمت زیر حفاظت‌های ژنراتور نیروگاهی ارائه شده است. در این مجموعه به‌منظور شمارش تعداد ورودی‌های رله و حذف موارد مشابه پورت‌های ورودی رله به ترتیب با شماره ۲ شماره‌گذاری شده است.

حفاظت دیفرانسیل ژنراتور: ورودی‌های حفاظت می‌تواند به پورت‌های ۵/۴/۳ متصل شود.

حفاظت اتصال زمین (ولتاژ باقی‌مانده): ورودی‌های این حفاظت به پورت‌های ۵/۴/۳/۲ متصل شده که ورودی ۲ ولتاژی است.

رله جهت‌دار قدرت: ورودی‌های این حفاظت به پورت‌های ۵/۴/۳/۲ متصل‌شده

مؤلفه منفی جریان: ورودی‌های این حفاظت به پورت‌های ۵/۴/۳/۲ متصل شده

این حفاظت دارای تریپ و آلارم است.

دیستانس	۵/۴/۳/۲
اضافه جریان	۴/۳/۲
حفاظت خطای زمین روتور	۵/۴/۳/۲
حفاظت خطای زمین استاتور	۵
حفاظت ولت بر هرتز	۵/۴/۳/۲
رله جریان زیاد لحظه‌ای	۵/۴/۳
حفاظت REF	۸/۷/۶/۵/۴/۳
اندازه‌گیری‌های دما و...	۱۱/۱۰/۹

در موارد مشابه با ترانسفورماتور نیروگاهی نیز می‌توان اعلام کرد که تعداد پورت‌های ورودی سیگنال اندازه‌گیری مشابه با حفاظت ژنراتور است.

۱-۱- شرح سخت‌افزار

سخت‌افزار الگوی شماتیکی حفاظت رله‌ها از واحدهای ۴ تا ۸ پلاگین، یک واحد اتصال و واحدهای زیر تشکیل شده است:

- واحد انتقال ورودی
- واحد مبدل آنالوگ به دیجیتال A/D
- واحد پروسسور اصلی
- ۱ تا ۴ عدد واحدهای باینری I/O
- واحد تغذیه کمکی
- واحد اتصال
- کیس و ترمینال‌ها برای سیگنال‌های آنالوگ و کانکتورها برای سیگنال‌های باینری

برخی از انواع مبدل‌های A/D تنها در رابطه با حفاظت دیفرانسیل طولی استفاده می‌شود و مودم‌های نوری را برای انتقال داده‌های اندازه‌گیری به ایستگاه راه دور تغذیه می‌کند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

سیگنال‌های پروسه باینری توسط واحد باینری I/O شناسایی شده و به پردازنده اصلی منتقل می‌شوند که آن‌ها را به کمک توابع کنترلی و عملگرهای حفاظت برای یک پروژه خاص پردازش می‌کند و سپس رله‌های خروجی و LEDها را بر این اساس فعال می‌کند.

متغیرهای آنالوگ ورودی به‌صورت الکتریکی از مدارهای الکتریکی توسط سیم‌پیچ‌هایترانسفورماتورها در واحد ورودی عایق‌بندی می‌شوند، همچنین ترانسفورماتورها سیگنال‌ها را ازنظر دامنه به حد مناسب برای پردازش توسط مدارهای الکترونیکی کاهش می‌دهند.

در اصل واحد پردازشگر اصلی از پردازنده اصلی، واحد مبدل A/D، سیستم کنترل واسط ارتباطی و ۲ شکاف PCMCIA تشکیل شده است.

سیگنال‌های پروسه باینری، سیگنال‌های پردازش‌شده با منطق کنترلی، رخدادها، متغیرهای آنالوگ، فایل‌های ضبط اغتشاش و تنظیمات کنترلی تجهیز را می‌توان از طریق واسط ارتباطی به اتاق کنترل ایستگاه ارسال کرد. از طرفی، سیگنال‌های منطق کنترلی و مجموعه‌های سوئیچینگ پارامترهای تنظیمی با کمک سیستم کنترل ایستگاه به سیستم حفاظتی منتقل می‌شوند.

برخی رله‌ها را می‌توان با یک تا چهار واحد باینری I/O مجهز کرد.

در برخی از واحدها دو رله برقی وجود دارد که هر کدام دارای دو کنتاکت مطابق با ورژن خود هستند:

- ۸ ورودی اپتوکوپلر و ۶ رله سیگنالینگ یا
- ۴ ورودی اپتوکوپلر و ۱۰ رله سیگنالینگ.

واحد I/O ی برخی رله‌ها به ۱۴ ورودی اپتوکوپلر و ۸ رله سیگنالینگ مجهز شده است.

۱۶ LED در جلو واحدها توسط رله‌های موجود در شکاف‌های ۱ و ۲، کنترل می‌شوند.

۲-۱- طراحی مکانیکی

۱-۲-۱- نسخه‌های سخت‌افزاری

رله‌ها در نسخه‌های مختلف وجود دارند که توضیحات هرکدام در دیتاشیت تحت عنوان «اطلاعات سفارش» ذکر شده‌اند.

۲-۲-۱- کیس (پوشش) و روش‌های نصب

پوشش برای سه روش نصب مناسب است.

نصب نیمه-تراز

پوشش را می‌توان به‌صورت نیمه تراز در پنل سوئیچ با کمک چهار قلاب ثابت‌کننده، نصب کرد. ابعاد برش پنل را می‌توان از دیتاشیت هر رله مشاهده کرد. ترمینال‌ها در قسمت عقب قرار دارند.

نصب در یک دندانه‌ی ۱۹ اینچی

یک صفحه نصب با تمام برش‌های مناسب برای تعبیه سیستم حفاظتی درون قفسه ۱۹ اینچی در دسترس است که اطلاعات کامل از دیتاشیت قابل‌مطالعه هستند همچنین همانند حالت قبل ترمینال‌ها در قسمت عقب قرار دارند.

نصب سطحی

معمولاً از یک فریم لولا شکل برای نصب سطحی استفاده می‌کنند که برای هر رله مشخصات در دیتاشیت هر رله نوشته شده است. ترمینال‌ها در قسمت عقب قرار دارند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۳-۲-۱- نمای جلوی واحد حفاظت

نمای جلوی واحد محافظت و توابع المان‌های صفحه جلویی را در دیتاشیت هر رله قابل‌مشاهده است.
معمولاً یک دکمه ریست در پشت صفحه جلویی قرار دارد که با سه هدف فعال می‌شود:

- ریست کردن رله‌های تریپ زنی و قفل رله در موارد موردنیاز، همچنین رله‌های سیگنالینگ و LEDها و حذف مشخصه‌ی دیستانس به هنگام اجرای برنامه کنترلی
- ریست کردن پیام‌های خطا که توسط عملگرهای تشخیص خطا یا self-monitoring شناسایی شده‌اند.
- ریست کردن کل واحد حفاظتی پس از تشخیص نقص جدی توسط توسط عملگرهای تشخیص خطا یا self-monitoring. (معمولاً برای شروع اولیه، حداقل ده ثانیه فشار دهید)

این عملیات کنترلی نیز می‌تواند با استفاده از واحد کنترل محلی در قسمت جلوی دستگاه انجام شود. اگر سیستم دوم عمل نکند، دکمه ریست را می‌توان با استفاده از یک ابزار مناسب از طریق سوراخ صفحه جلویی فشار داد.

۴-۲-۱- اتصال PC

برای تنظیم پارامترهای مختلف، خواندن رخدادها و اندازه‌گیری ولتاژ و جریان سیستم و همچنین برای اهداف تشخیصی و نگهداری، یک کامپیوتر شخصی (PC) باید به رابط جزء نوری متصل شود.

۳-۱- واحد تغذیه کمکی

واحد تغذیه کمکی واحدهای حفاظتی تمام ولتاژهای موردنیاز برای حفاظت از باتری ایستگاه را تأمین می‌کند. برای حفاظت واحد تغذیه کمکی خازن‌هایی تعبیه شده‌اند که قادر به قطع وقفه‌های کوتاه (حداکثر ۵۰ میلی ثانیه) در ولتاژ ورودی هستند، همچنین این واحد در برابر تغییرات پلاریته نیز محافظت می‌شود. در صورت قطع و یا بروز اشکال در تغذیه کمکی، واحد تولیدی تغذیه سیگنال‌های کنترلی مانند راه‌اندازی مجدد و مسدود کردن سیگنال‌های موردنیاز همه واحدهای دیگر را تولید می‌کند. اطلاعات فنی واحد تغذیه کمکی مربوط به هر رله در دیتاشیت قابل‌دسترسی است.

۴-۱- واحد ترانسفورماتور ورودی

واحد ترانسفورماتور ورودی هر واحد حفاظتی به‌عنوان واسط بین متغیرهای ورودی آنالوگ سیستم اصلی از قبیل جریان و ولتاژ و سیستم حفاظتی عمل می‌کند. صفحه نصب واحد حفاظتی می‌تواند حداکثر ۹ عدد CT و VT را در خود جای دهد. قسمت‌های مختلف مدارهای CT نیز در واحد ترانسفورماتور ورودی نصب شده است. ترانسفورماتورهای ورودی، وظیفه‌ی ایزولاسیون سازی بین سیستم اولیه و مدارهای الکترونیکی را برعهده دارد و همچنین (در صورت استفاده از CT، با کمک شنت) ولتاژ و سیگنال‌های جریان را تا حد مناسبی برای پردازش توسط مبدل‌های A/D کاهش می‌دهند. بنابراین واحد ترانسفورماتور ورودی سیگنال‌های ولتاژ را در خروجی‌های خود برای کانال‌های جریان و ولتاژ تولید می‌کند.
CT و VT که در واحد ترانسفورماتور ورودی قرار دارند، بسته به ورژن مورداستفاده، متفاوت هستند. اطلاعات بیشتر را می‌توانید از دیتاشیت هر واحد حفاظتی به‌دست آورد.

۵-۱- واحد پردازنده اصلی

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

پردازنده اصلی الگوریتم‌های کنترلی و حفاظتی را طبق تنظیمات خاص اجرا می‌کند که داده‌های خود را از واحد مبدل A/D و واحد I/O دریافت می‌کند. نتایج محاسبه‌شده توسط الگوریتم‌ها یا به‌صورت مستقیم و یا پس از پردازش منطقی به واحد I/O باینری منتقل می‌شود.

معمولاً از میکروپروسسور مبتنی بر ۸۰۴۸۶ در واحد اصلی پردازنده برخی واحدهای حفاظتی استفاده می‌شود. نمونه‌های گرفته‌شده توسط مبدل A/D به کمک یک پردازنده سیگنال دیجیتال (DSP) از قبل پردازش می‌شوند. واسطهای اتصال یک کامپیوتر HMI و ارتباط برقرار کردن با سیستم کنترل ایستگاه (SPA، IEC60870.S.103) در این بخش گنجانده شده است. رابط PCMCIA با دو پشته، اتصال به سیستم‌های باس دیگر مانند LON و MVB را تسهیل می‌کند. فلش EPROM که به‌عنوان حافظه برنامه استفاده می‌شوند، این نرم‌افزار را قادر می‌سازند که از طریق پورت جلویی متصل به کامپیوتر، دانلود شود.

لازم به ذکر است که یک روند self-monitoring به‌صورت موازی با پردازنده اصلی در پس‌زمینه اجرا می‌شود. پردازنده اصلی خود (به ترتیب عملکرد صحیح برنامه) توسط یک واحد نظارتی اصلی کنترل می‌گردد.

۶-۱- واحد باینری I / O

واحد باینری I/O باعث می‌شود سیگنال‌های باینری دریافت‌شده از طریق اپتوکوپلرها از واحد ایستگاه برای خواندن و قطع سایر سیگنال‌ها به‌صورت خارجی صادر شود. واحدهای خروجی و ورودی عایق الکتریکی بین مدارهای ارتباطی خارجی و مدارهای الکترونیکی داخلی را تأمین می‌کنند. همچنین واحدهای I/O در پشته‌های ۱ و ۲، وضعیت ۸ LED را که هر یک در صفحه جلویی هستند از طریق یک حافظه بافر مربوطه کنترل می‌کنند.

تعداد ورودی‌ها و خروجی‌های موردنیاز برای یک ورژن خاص با جابه‌جایی یک تا چهار واحد باینری I/O حاصل می‌شود. رابطه بین نسخه‌ها و تعداد واحد باینری I/O در دیتاشیت هر واحد حفاظتی موجود است.

۷-۱- واحد اتصال داخلی

سیم‌کشی بین واحدهای مختلف توسط واحد اتصال ML62a (عرض ۲۷۱ میلی متر) یا ML61a (عرض ۲۲۵ میلی متر) برقرار می‌شود. این سیم‌کشی در داخل و در پشت صفحه جلویی واقع شده است و دارای کانکتورها و سیم‌کشی موردنیاز واحدهای جداگانه است. علاوه بر این، واحد اتصال داخلی شامل اتصالات واحد کنترل محلی است. دکمه ریست و ۱۶ LED برای سیگنال‌های وضعیت در این واحد تعبیه شده‌اند.

۸-۱- واحد تغذیه

واحد تزریق منبع تغذیه مناسب را برای ترانسفورماتور تزریق فراهم می‌کند. بلوک ترانسفورماتور تزریق سیگنال‌های موردنیاز برای تمام الگوهای حفاظتی خطای زمین استاتور و روتور را تولید می‌کند. لازم به یادآوری است سیگنال‌ها همگی دارای شکل موج یکسان هستند.

واحد تزریق در یک محفظه واحد حفاظتی نصب شده است و بنابراین به تمامی داده‌هایی که برای واحد حفاظتی ارسال می‌شود واحد تزریق دسترسی دارد. در جدول زیر برای انواع ولتاژهای باتری دسته‌بندی نسخه‌های واحد تزریق مشخص شده‌اند.

ولتاژ باتری	تلرانس	خروجی
U1:110 or 125 V DC	+10% / -20%	110 V or 125 V, 1.1 A
U2:110;125;220;250 V DC	88…312 V DC	96 V, 1 A

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

U3:48;60;110 V DC	36…140 V DC	96 V, 1 A

نسخه‌های U2 و U3 با مبدل DC / DC کار می‌کنند.
واحدهای تزریق جدیدتر با کد U0 مشخص شده‌اند و فقط یک نوع با دامنه ولتاژ ۳۶ تا ۳۱۲ ولت دارند.
فرکانس ولتاژ تزریق، که دقیقاً برابر با ۱/۴ فرکانس اسمی ۵۰ هرتز یا ۶۰ هرتز است، می‌تواند با قرار دادن یک جامپر پلاگین در PCB 316Al61 انتخاب شود. سپس فرکانس ۱۲,۵ هرتز در موقعیت X12 و ۱۵,۰ هرتز در موقعیت X11 قابل انتخاب است.
کنترل‌ها و سیگنال‌ها:

- LED READY سبز:

منبع کمکی روشن شده است

- LED OVERLOAD قرمز:

مدار حفاظت داخلی انتخاب شده است و تزریقات قطع شده است.

- DISABLE LED زرد:

تزریقات روی سوئیچ در صفحه جلویی یا از طریق ورودی اپتوکوپلر غیرمستقیم غیرفعال شده است.
فقط چراغ سبز در هنگام کار عادی روشن می‌شود.

- ENABLE یا DISABLE شدن سوئیچ

موقعیت ۰: تزریق فعال شده است
موقعیت ۱: تزریق غیرفعال شده است

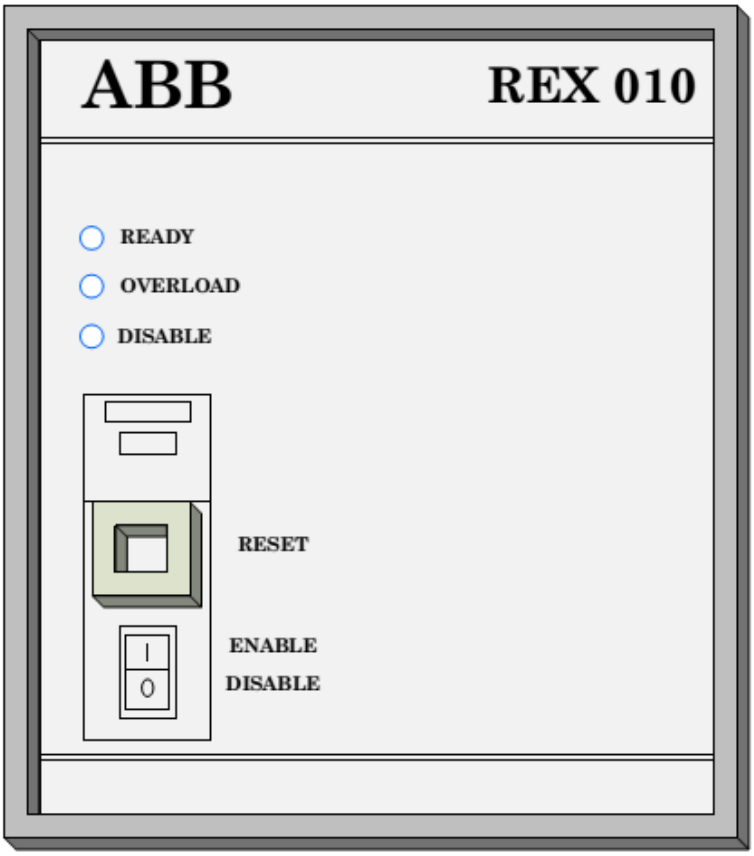
- دکمه ریست RESET:

مدار محافظ هنگام کار قفل می‌شود و توسط این دکمه که LED ی قرمز است ریست می‌شود.
مدار محافظ مدار در برابر فیدبک مازاد ژنراتور و قطع جریان تزریق عبور صفر معمولاً بیشتر از ۵ آمپر، محافظت می‌شود. در صورت وجود عیب و نقصی که باعث بروز ریست شده است، مدار محافظت مجدداً برقرار نمی‌شود، در این شرایط منبع تغذیه خاموش شده و سیم‌بندی خارجی از نظر بروز اتصال کوتاه و مدار باز بررسی می‌شوند.

- ورودی اپتوکوپلر

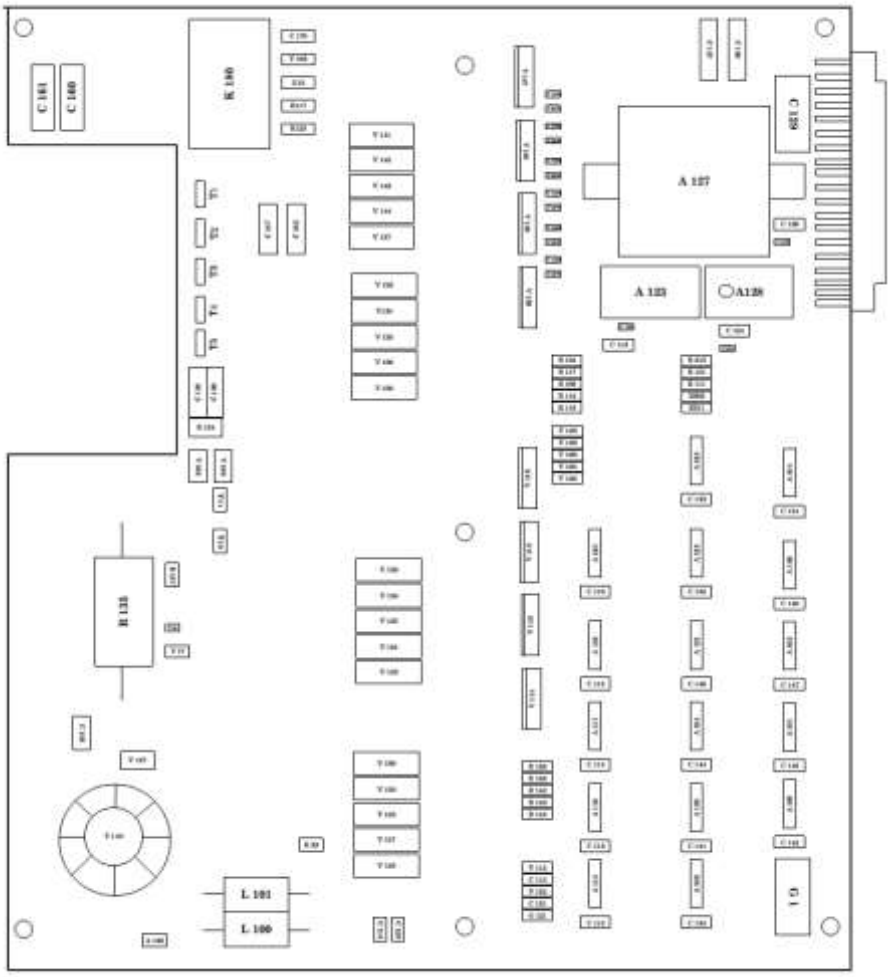
این بخش همان عملکرد دکمه ریست را دارد و می‌تواند برای غیرفعال کردن تزریق نیز استفاده شود. حالت دوم هنگامی رخ می‌دهد که ورودی در منطق ۱ باشد. به‌محض بازگشت ورودی به منطقی «۰»، تزریق از سر گرفته می‌شود. این نکته حائز اهمیت است که ولتاژ تزریق قبل از انجام هر کاری در نقطه اتصال ستاره، قطع باشد. سوئیچ ضامن در جلوی واحد تزریق REX010 باید روی حالت «غیرفعال» تنظیم شده و چراغ زرد «غیرفعال» باید روشن شود. ولتاژ ورودی، فرکانس تزریق و ولتاژ اپتوکوپلر به سفارش مشتری مشخص شده و اغلب بر اساس محصولات قبلی تحویل داده شده تنظیم می‌شوند. هیچ کنترلی در داخل واحد وجود ندارد، و باید توسط کاربر تنظیم شود.
خرابی منبع تغذیه
اگر چراغ سبز READY در مورد نسخه U1 روشن نباشد، اگرچه ولتاژ منبع کمکی درست اعمال شود، باید بررسی شود و در صورت لزوم فیوز واحد تغذیه باید تعویض شود. نگه‌دارنده فیوز در کنار ترمینال‌های منبع تغذیه کمکی قرار گرفته‌اند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل ۳-۱ نمای جلوی منبع تغذیه

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل ۳-۲ PCB داخلی منبع تغذیه

۹-۱- بلوک ترانسفورماتور تزریق X011

در رابطه با واحد تزریق نوع X010، بلوک ترانسفورماتور تزریق Type X011 سیگنال‌های تزریق و مرجع را برای آزمایش طرح‌های حفاظتی خطای استاتور و روتور به زمین فراهم می‌کند.

بلوک ترانسفورماتور تزریق مورداستفاده باید مطابق با روش زمین کردن مدار استاتور باشد.

تزریق اولیه در نقطه ستاره X011

تزریق ثانویه در نقطه ستاره X011- 1

تزریق ثانویه در ترمینال‌ها: X011- 2

هر نوع ترانسفورماتور تزریق دارای سه سیم‌پیچ ثانویه برای ولتاژهای زیر است:

Uis: ولتاژ تزریق استاتور

Uir: ولتاژ تزریق روتور

Ui: ولتاژ مرجع متصل به کانال ورودی.

ترانسفورماتور تزریق مشابهی برای طرح‌های حفاظتی استاتور و روتور استفاده می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مقادیر اسمی ولتاژهای تزریق Us، Uir و Ui برای نسخه X010 U1 و ولتاژ باتری ایستگاه UBat = 110 V DC اعمال می‌شود. ولتاژ در مورد نسخه‌های U2 و U3 با ضریب ۰/۸۷۲۷کاهش می‌یابد. بنابراین ولتاژ تزریق اولیه برای مدار استاتور ۹۶ V است.

X011 -۱-۹-۱

این نسخه برای تزریق اولیه در نقطه ستاره طراحی شده است و با ولتاژ اسمی همانند آنچکه در جدول زیر اشاره شده در دسترس است:

Uis	110 V
Uir	50 V
Ui	25 V

X11-1,-2 -۱-۹-۲

ترانسفورماتورهای تزریق دارای شناسه‌های زیر هستند:

R'_{ps}	Uis	Version
>8	0.85	M11
>32	1.7	M12
>128	3.4	M13

R'_{ps}	Uis	Version
>0.45	6.4	M21
>1.8	12.8	M22
>7.2	25.6	M23

ترانسفورماتورهای تزریق مورداستفاده برای تزریق ثانویه مدار استاتور، چهار سیم‌پیچ ولتاژ تزریقی دارند که به‌صورت موازی یا سری متصل هستند و برق را متناسب با مقاومت زمین تنظیم می‌کنند.

مقدار مقاومت موازی و حداکثر ولتاژ تزریق، ولتاژ تزریق مجاز را تعیین می‌کنند.

همیشه حداکثر ولتاژ تزریق ممکن بایستی انتخاب شود. برای مثال، برای مقاومت زمین R'Ps = 35mΩ، از Uis = 1.7 V استفاده می‌شود.

در مورد نسخه‌های M11، M12 و M13، امپدانس اتصال بین ترانسفورماتور تزریق و مقاومت زمین R'Ps باید تا حد ممکن کم باشد. مقاومت هر دو کابل اتصال نباید از ۵٪ ی R'Ps بیشتر باشد، به‌عنوان مثال برای یک مقاومت زمین R'Ps = 35mΩ و طول کابل‌های اتصال ۲×۲=۴ m، کابل‌ها باید دارای ضریب ۴۰ mm2 باشند.

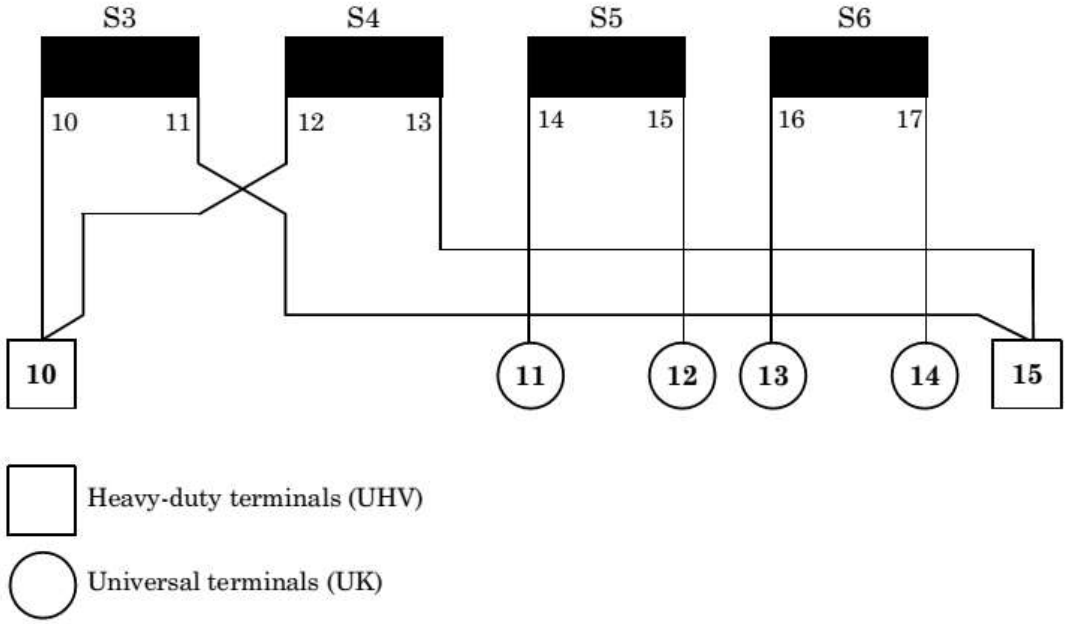
ولتاژهای Uri و Ui همانند X011 است.

اتصالات به سیستم اولیه از طریق دو ترمینال UHV 10 و ۱۵ انجام می‌شود که برای ترمینال‌های اسپاد طراحی شده‌اند. چهار ترمینال عمومی ۱۱ تا ۱۴ نوع UK35 بین دو ترمینال وجود دارد که برای سیم‌کشی داخلی استفاده می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

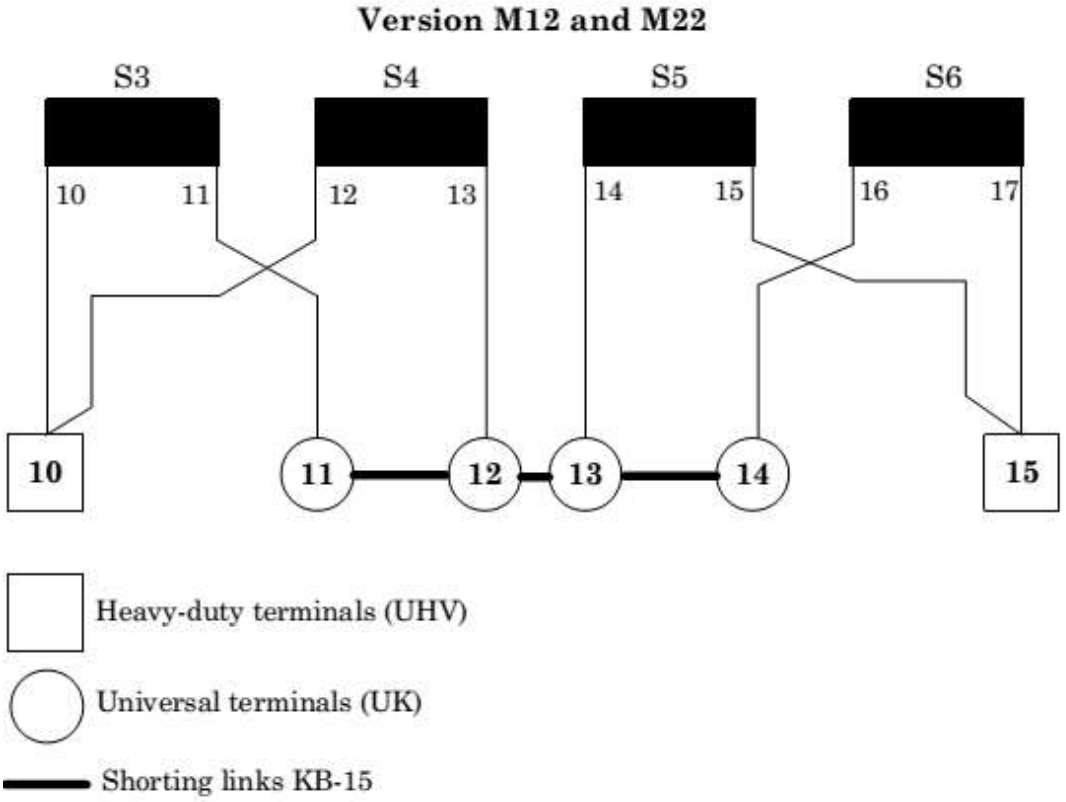
بسته به نسخه مورداستفاده، چهار سیم‌پیچ باید به ترمینال‌های جریان عمومی یا UHV متصل شوند.
اگر نسخه ارائه‌شده برای برنامه نامناسب باشد، اتصالات سیم‌پیچ را می‌توان مطابق با نمودارهای زیر تغییر داد. در مورد نسخه‌های M12، M22، M13 و M23 لینک‌های میانبر KB-15 باید در ترمینال‌های عمومی قرار بگیرد. چگونگی انجام این کار را می‌توان از دیاگرام «لینک‌های میانبر» در انتهای این بخش مشاهده کرد.

Version M11 and M21



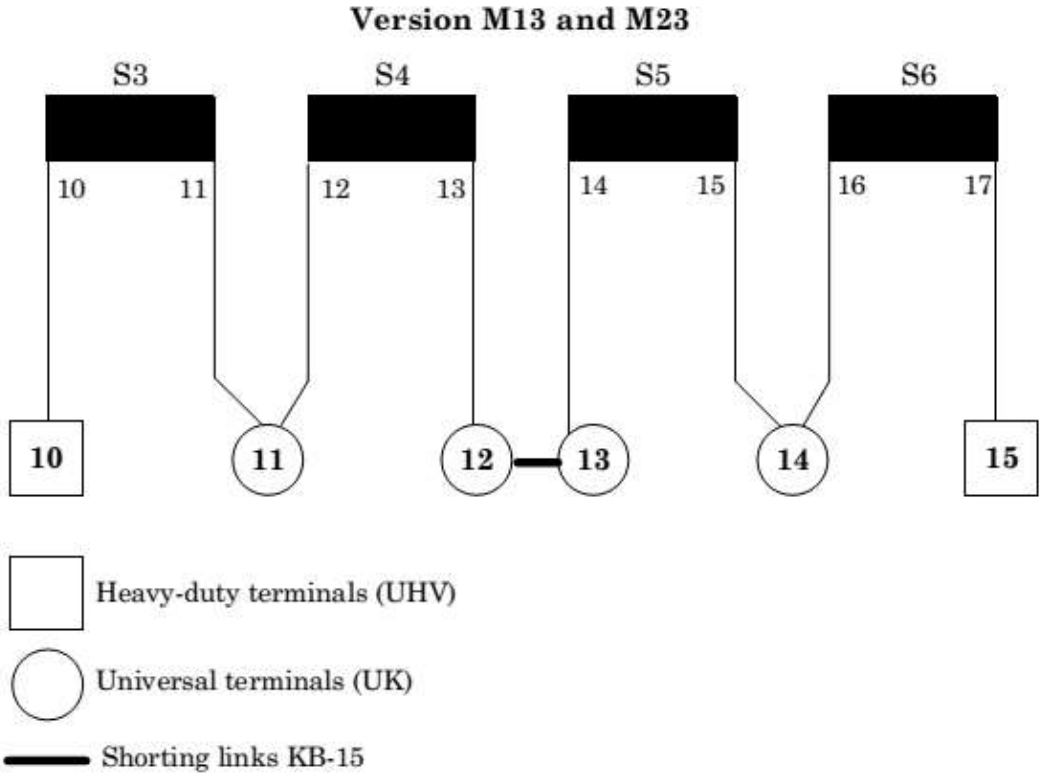
در مورد نسخه‌های M11 (X011-1) و M21 (X011 2)، دو سیم‌پیچ S3 و S4 به‌طور موازی در کنار ترمینال‌های (۱۰،۱۵) به هم وصل می‌شوند. دو سیم‌پیچ دیگر استفاده نمی‌شود و به ترمینال‌های عمومی سیم‌کشی می‌شوند. لینک‌های میانبر KB-15 لازم نیست و باید حذف شود.
در مورد نسخه‌های M12 (X011 1) و M22 (X0112) دو جفت سیم‌پیچ موازی به‌صورت سری به هم متصل می‌شوند. تمام ترمینال‌های عمومی با استفاده از لینک میانبر KB-15 به یکدیگر وصل می‌شوند.

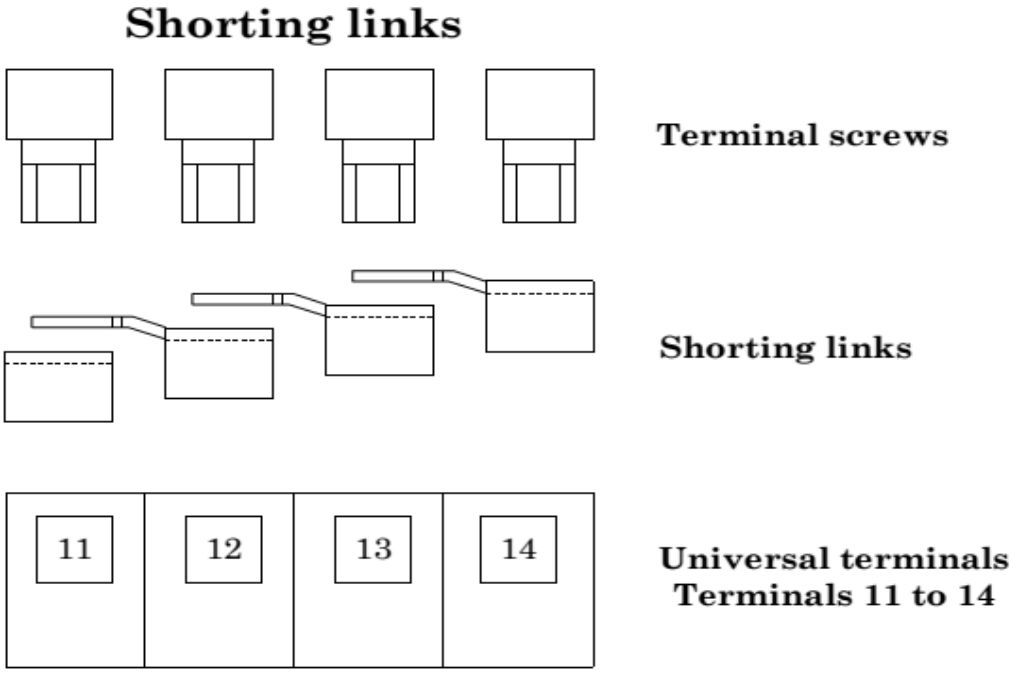
DOI: 10.30503/nripress.2020.151



در مورد نسخه‌های M13 (X011 1) و M23 (X011 2)، همه سیم‌پیچ‌های S3 ...S6 به‌صورت سری متصل می‌شوند. ترمینال‌های M12 و M13 با یک لینک کوتاه میانبر KB-15 پل می‌شوند. در شکل زیر لینک‌های کوتاه میانبر برای ورژن‌های M12 و M22 نشان داده شده‌اند:

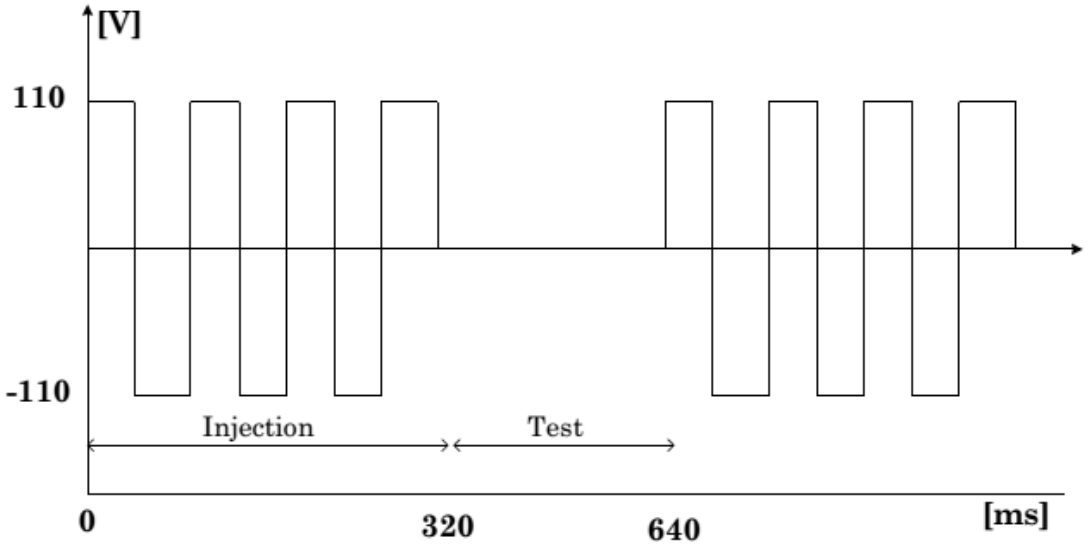
DOI: 10.30503/nripress.2020.151





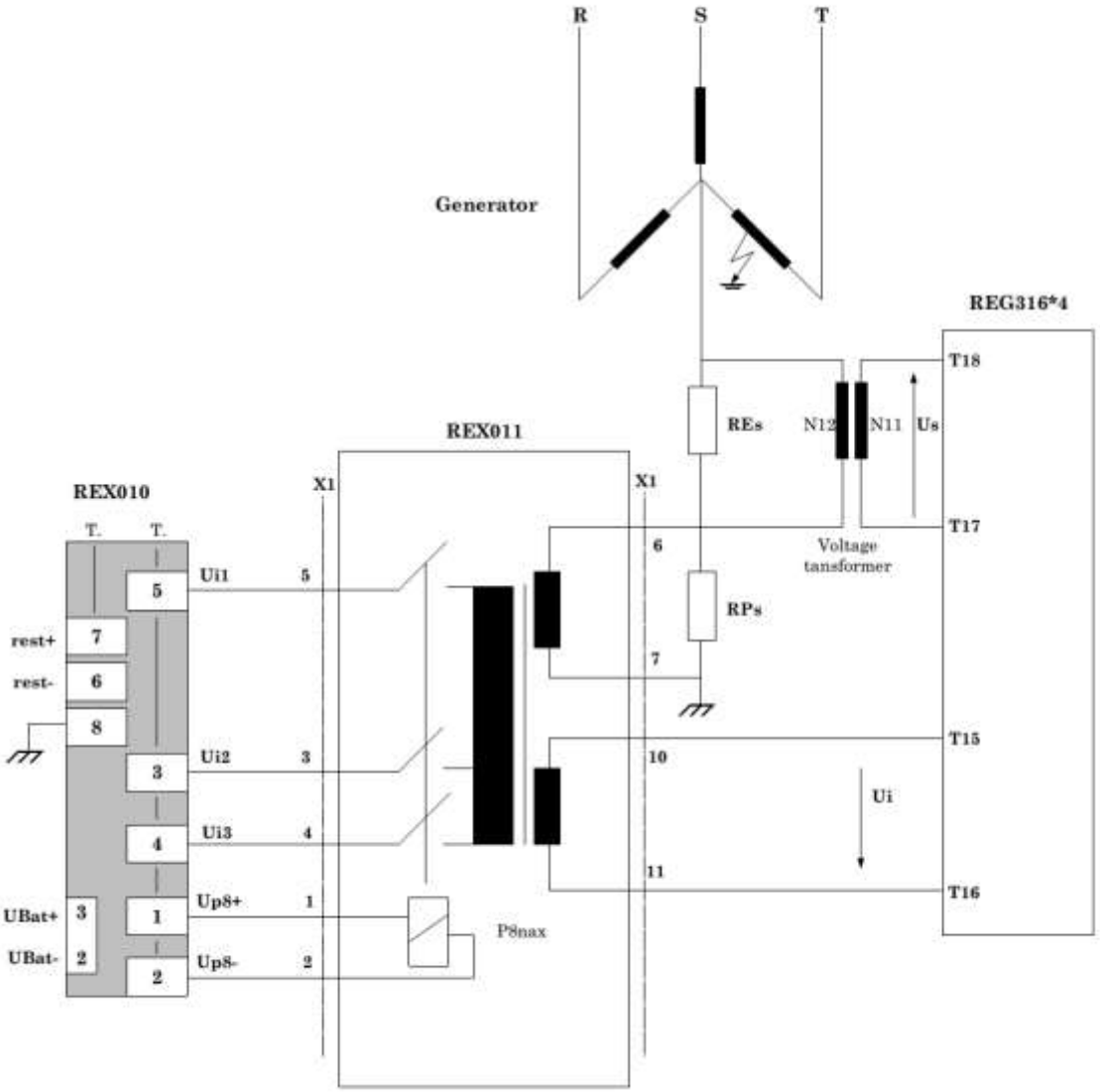
۴ پیچ ترمینال، ۳ لینک میانبر با افست و ۱ لینک میانبر مسطح با هر ترانسفورماتور تهیه می‌شود. لینک‌های میانبر در شکاف‌های تعبیه‌شده در ترمینال‌های عمومی قرار می‌گیرند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



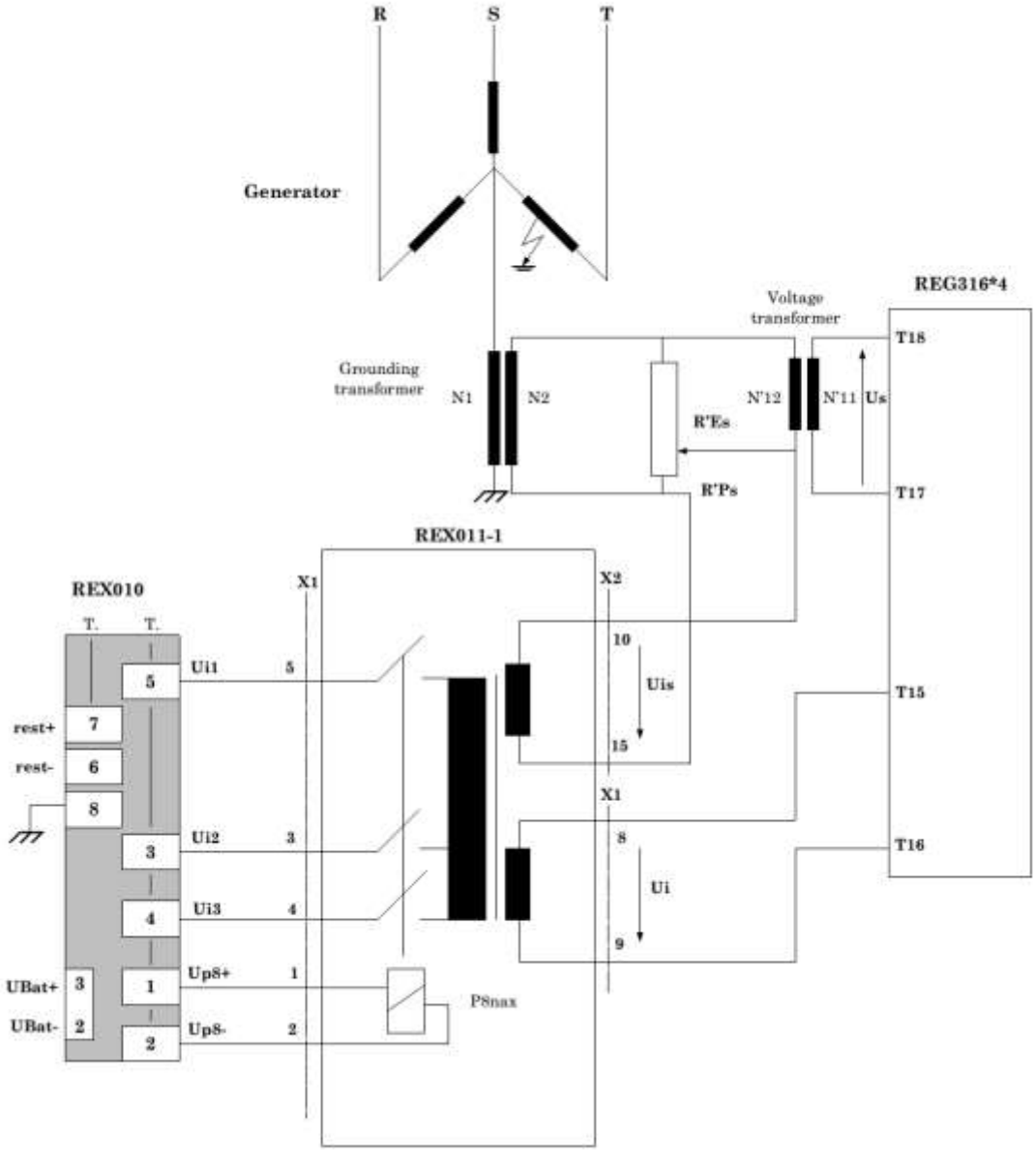
شکل ۳-۳ سیگنال تغذیه

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



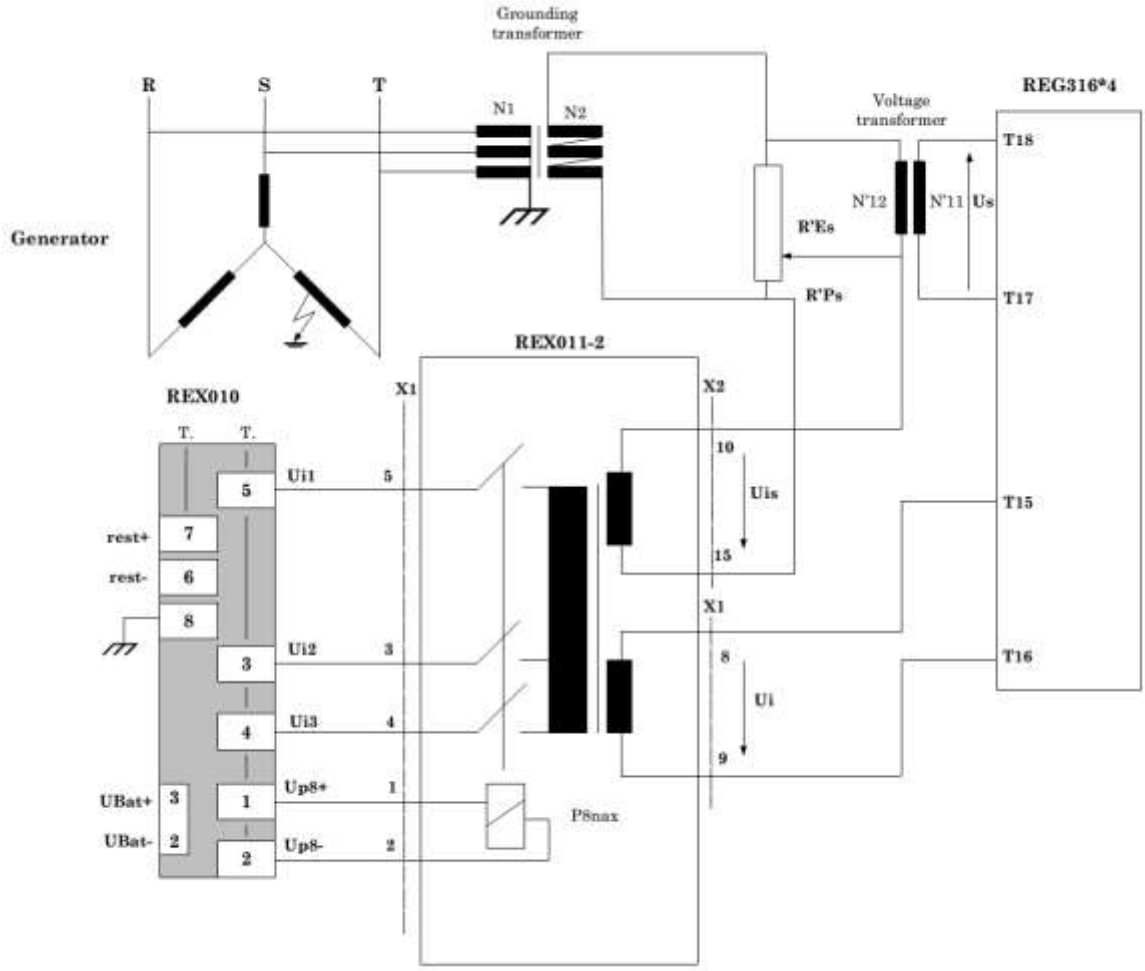
شکل ۳-۴ شماتیک وایرینگ مربوط به تغذیه اولیه استاتور

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



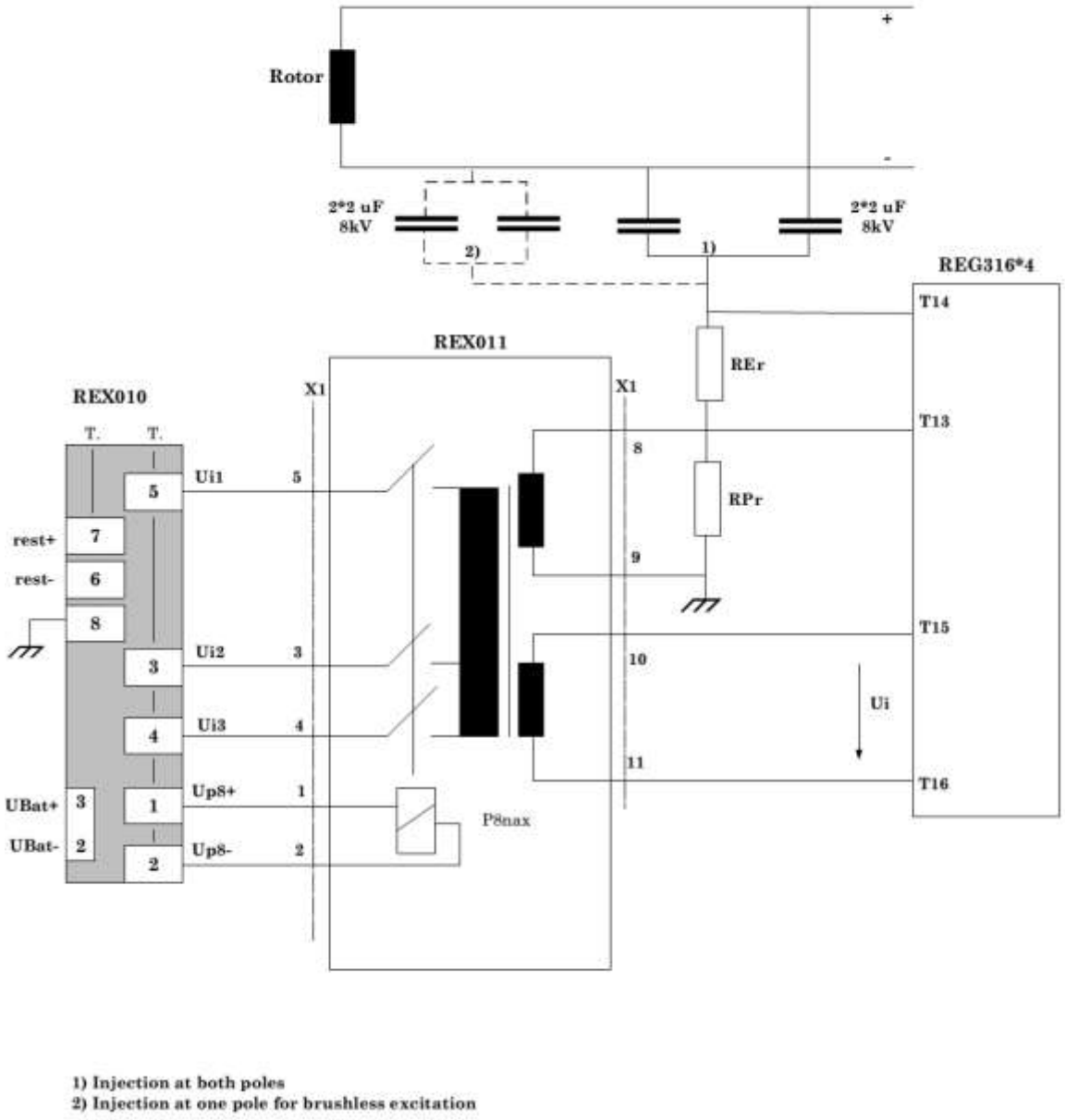
شکل ۳-۵ شماتیک وایرینگ مربوط به تغذیه ثانویه استاتور در نقطه ستاره

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل ۳-۶ شماتیک وایرینگ مربوط به تغذیه ثانویه استاتور در نقطه ترمینال

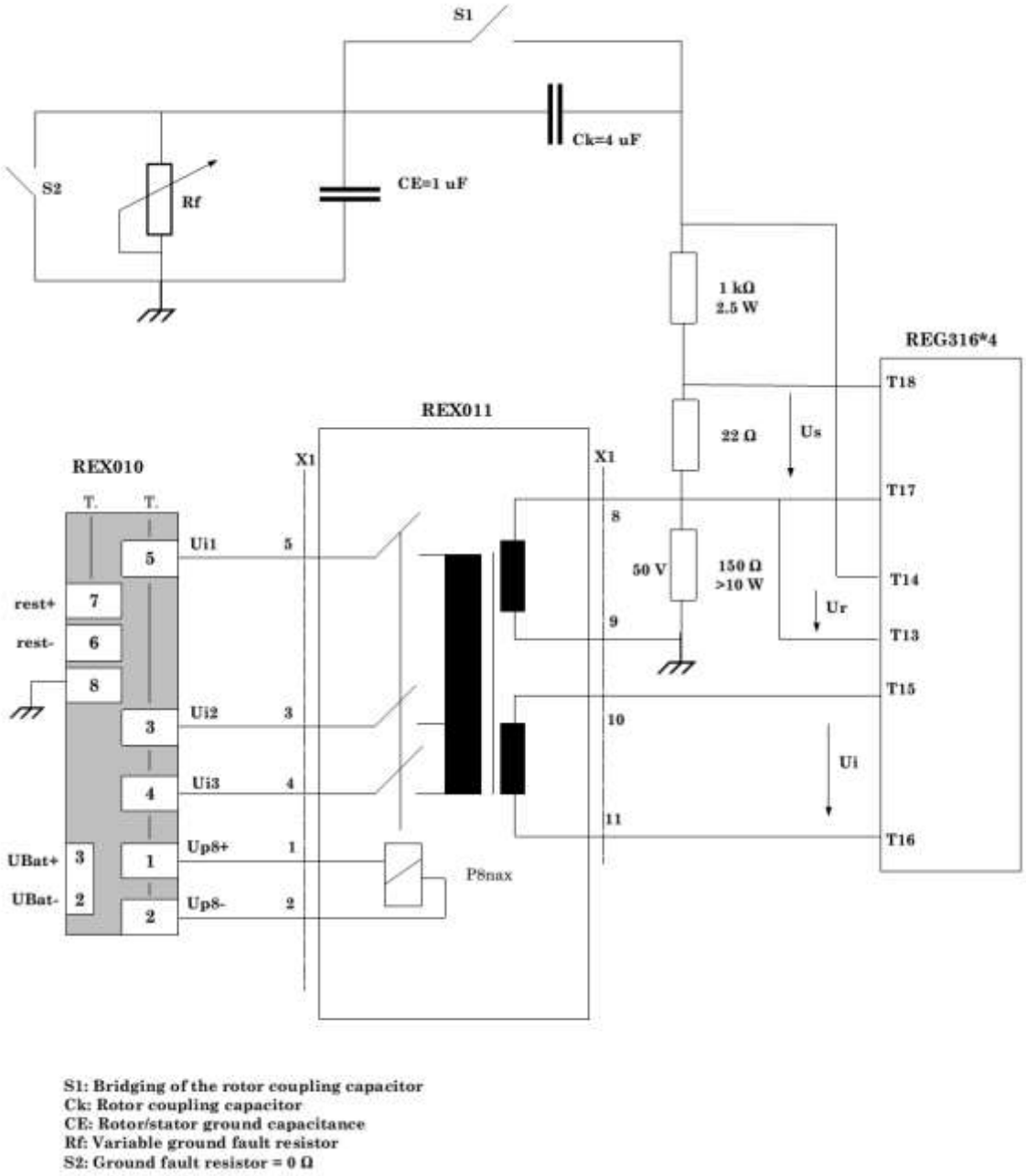
DOI: 10.30503/nripress.2020.151



1) Injection at both poles
2) Injection at one pole for brushless excitation

شکل ۳-۷ شماتیک وایرینگ مربوط به خطای اتصال روتور به زمین

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل ۳-۸ شماتیک وایرینگ مربوط به تست بدون حضور ژنراتور

۱۰-۱- آزمایش بدون ژنراتور

به‌منظور تست عملکرد واحد تزریق نوع X010 به‌علاوه بلوک ترانسفورماتور تزریق نوع X011 یا 2- / X011-1 و توابع حفاظتی Stator-E.FP و Rotor-E.FP بدون اتصال آن‌ها به واحد محافظت شده، مدار تست نشان داده‌شده در شکل‌های فوق، پیاده‌سازی می‌شود. از دو مقاومت زمین RE و RP برای ساده‌تر کردن مدار در هر دو طرح

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

محافظتی استاتور و روتور استفاده می‌شود. ولتاژ تزریق ۵۰ V برای هر دو مدل استفاده می‌شود. مقاومت خطای زمین توسط متغیر مقاومت Rf شبیه‌سازی می‌شود.

۱-۱۰-۱- محافظت از خطای استاتور به زمین:

برای آزمایش مقاومت در برابر خطای استاتور، سوئیچ S1 باید همیشه بسته باشد. مقاومت زمین RE شامل دو مقاومت ۱ kΩ و ۲۲ Ωاست. یک روش ساده برای شبیه‌سازی نسبت VT، همین روش است.

تنظیمات MTR و RE ها:

مقدار تئوری MTR به شرح زیر تعیین می‌شود:

$$MTR = \frac{22\Omega + 1000\Omega}{22\Omega} \times \frac{110V}{50V} = 102$$

تنظیمات را می‌توان با استفاده از توابع تنظیم مطرح‌شده در گزارش‌های قبلی تعیین کرد.

۱- ویژگی‌ها

- توابع حفاظت انتخاب‌پذیر
- تعدد برنامه‌ها
- تنظیم با کمک برنامه کامپیوتر شخصی با استفاده از برنامه عملگر مبتنی بر ویندوز
- پردازش سیگنال کاملاً عددی
- پایش پیوسته توسط خود سخت‌افزار
- اجرای تست‌های دوره‌های روتین، بیشتر توسط نرم‌افزار
- تنظیم پارامترها و ثبت تنظیمات
- نمایش مقادیر اندازه‌گیری‌شده
- نمایش وقایع، تأیید و چاپ آن‌ها
- ضبط اختلال
- مستندات‌سازی

۲- کاربرد

حوزه‌های اصلی کاربرد ترمینال رله محافظت از ژنراتورها، موتورها و ترانسفورماتورهای واحد است.

طراحی ماژولار، این تجهیز را از نظر انطباق با اندازه سیستم اولیه و الگوهای حفاظتی مطلوب بسیار انعطاف‌پذیر و ساده می‌کند. بنابراین روش‌های اقتصادی را می‌توان در رنج کامل کاربردهای موردنظر پیاده‌سازی کرد.

سطوح مختلف جایگزینی برای این تجهیز وجود دارد، قابلیت دسترسی و قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی را می‌توان به‌گونه‌ای انتخاب کرد که برای کاربردهای دارای چندین واحد رله‌ی حفاظتی مناسب باشد، اما در عین حال نیز دارای پیکربندی‌های متعددی برای توابع عملکرد باشد.

استفاده از واسط‌های استاندارد باعث می‌شود که رله با سیستم‌های کنترل پروسه قابل‌رقابت باشد چرا که حالت‌های مختلف تبادل داده با سطوح بالاتر کنترل پروسه مثل گزارش تک‌مسیره حالت‌ها و رویدادهای دیجیتال، مقادیر اندازه‌گیری شده و پارامترهای حفاظتی امکان‌پذیر است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۲- توابع حفاظتی

همه توابع حفاظتی مهم برای حفاظت ژنراتور، موتورها و ترانسفورماتورها واحد در این بخش شامل می‌شود. سیستم را می‌توان به رله‌های متعدد مجهز به الگوهای حفاظتی مرسوم، جایگزین کرد. جدول زیر خلاصه‌ای از مهم‌ترین توابع عملکرد رله را نشان می‌دهد.

توابع حفاظتی
حفاظت دیفرانسیلی ژنراتور حفاظت دیفرانسیلی ترانسفورماتور
حفاظت اضافه جریان زمان محدود (زیر جریانی)
حفاظت اضافه جریان لحظه‌ای (زیر جریانی)
حفاظت اضافه جریان ولتاژ کنترل شده
حفاظت اضافه جریان زمان معکوس
حفاظت اضافه جریان جهت‌دار با مشخصه‌های زمانی معکوس و یا محدود
حفاظت جریان توالی فاز منفی
حفاظت اضافه ولتاژ زمان محدود (زیر ولتاژ) حفاظت خطای استاتور به زمین (۹۵٪) حفاظت خطای روتور به زمین حفاظت اضافه ولتاژ لحظه‌ای (زیر ولتاژ) با ارزیابی مقدار پیک حفاظت تعادل ولتاژ
حفاظت خطای استاتور به زمین ۱۰۰٪ (+ خطای روتور به زمین)
حفاظت زیر امپدانس
حفاظت رأکتانس مینیمم (تلفات تحریک)
حفاظت اضافه‌بار
حفاظت جریان توالی فاز منفی معکوس
حفاظت اضافه دما
حفاظت فرکانس
حفاظت اضافه تحریک
حفاظت قطب

توابع عملکردی مطلوب برای کاربردهای خاص را می‌توان به‌سادگی از یک کتابخانه جامع با استفاده از کامپیوتر شخصی انتخاب نمود. هیچ دانشی در مورد برنامه‌نویسی موردنیاز نیست.

همه بازه‌های تنظیمات گسترده بوده تا توابع حفاظتی را برای کاربردهای چندگانه مناسب سازد. پارامترهای اصلی زیر را می‌توان تنظیم کرد:

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- کانال و یا کانال‌های ورودی
- تنظیمات pick up
- رله زمانی
- تعریف مشخصه‌های بهره‌برداری
- منطق قطع
- منطق سیگنال کنترلی

تنظیمات یک پارامتر خاص توابع حفاظتی را به‌گونه‌ای فعال می‌کند که به کانال‌های ورودی خاصی مرتبط شوند. سیگنال‌های ورودی و خروجی دیجیتالی را نیز می‌توان به‌صورت منطقی به هم مرتبط ساخت:

- خروجی‌های قطع و وصل هر تابع حفاظتی را می‌توان برای کانال‌های رله کمکی قطع و وصل که متناسب با حالت ماتریسی ساخته شده‌اند، اختصاص داد.
- سیگنال‌های pick up و قطع و وصل را می‌توان برای کانال‌های رله کمکی سیگنال دهی، اختصاص داد.
- تأمین پیش‌نیازهای لازم برای هر تابع حفاظتی با یک سیگنال دیجیتال (مثلاً ورودی دیجیتالی و یا سیگنال قطع سایر توابع حفاظتی)
- سیگنال‌های خارجی اعمال‌شده برای ورودی‌های دیجیتالی را می‌توان در هر حالت دلخواهی پردازش کرد.
- سیگنال‌های دیجیتالی را می‌توان برای ساخت توابع منطقی با هم ترکیب کرد، مثلاً سیگنال‌های فعال‌سازی و یا بلوکه‌کننده خارجی با سیگنال‌های ورودی یک تابع حفاظتی داخلی و در این صورت استفاده از آن برای مسدودسازی یکی از توابع حفاظتی دیگر.

۳- طراحی

رله برای تولید ترمینال‌های حفاظتی ژنراتور کاملاً عددی در نظر گرفته می‌شود، یعنی تبدیل آنالوگ به دیجیتال متغیرهای ورودی بلافاصله بعد از ترانسفورماتورهای ورودی صورت گرفته و همه پردازش سیگنال‌های عددی حاصل توسط میکروپروسسور اجرا شده و توسط خود برنامه‌ها نیز کنترل می‌شود.

واسط‌های استاندارد به رله این امکان را می‌دهد که با سایر سیستم‌های کنترلی در ارتباط باشد. امکان تبادل داده نظیر گزارش بدون وقفه حالت‌های باینری، رخدادها، اندازه‌گیری‌ها و پارامترهای حفاظتی و یا فعال‌سازی مجموعه متفاوتی از تنظیمات توسط سیستم‌های کنترلی سطح بالاتر، فراهم است.

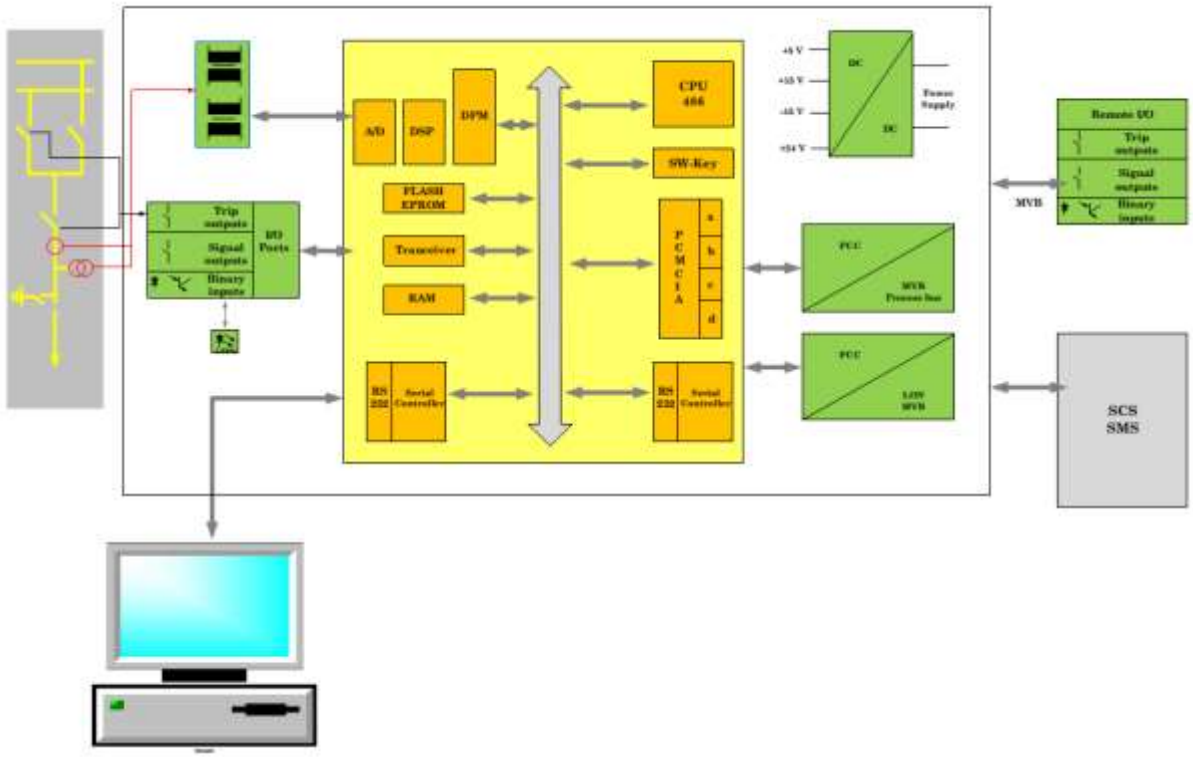
به دلیل طراحی فشرده، واحدهای سخت‌افزاری کمی نیاز است، نرم‌افزار ماژولار این سیستم و توابع نظارتی و تشخیص پیوسته یکپارچه رله این امکان را برای این سیستم فراهم کرده است که به‌صورت ایدئال تمامی انتظارات کاربر را از یک ترمینال حفاظتی مدرن با هزینه پایین برآورده سازد. قابلیت دسترسی یک ترمینال یعنی نسبت بین زمان متوسط آن در سرویس بدون خرابی و طول عمر کامل، که در اصل مهم‌ترین مشخصه موردنیاز تجهیزات حفاظتی است.

HMI ی مبتنی بر منو (واسط ماشین و انسان) و اندازه کوچک رله باعث ساده‌سازی ارتباطات، پیکربندی و تنظیمات می‌شود. حداکثر قابلیت انعطاف یعنی توانایی انطباق سیستم حفاظتی با کاربردها در یک سیستم قدرت خاص و یا هماهنگ‌سازی با آن، و یا جایگزینی واحدها در یک الگوی حفاظتی موجود، در رله توسط توابع نرم‌افزاری کمکی و تخصیص سیگنال‌های ورودی و خروجی از طریق HMI صورت می‌گیرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۴- سخت‌افزار

مفهوم سخت‌افزار برای رله‌ای که یک تجهیز حفاظتی ژنراتور است از چهار واحد پلاگین مختلف، یک PCB ی اصلی متصل و یک محفظه تشکیل شده است (شکل ۳-۹):

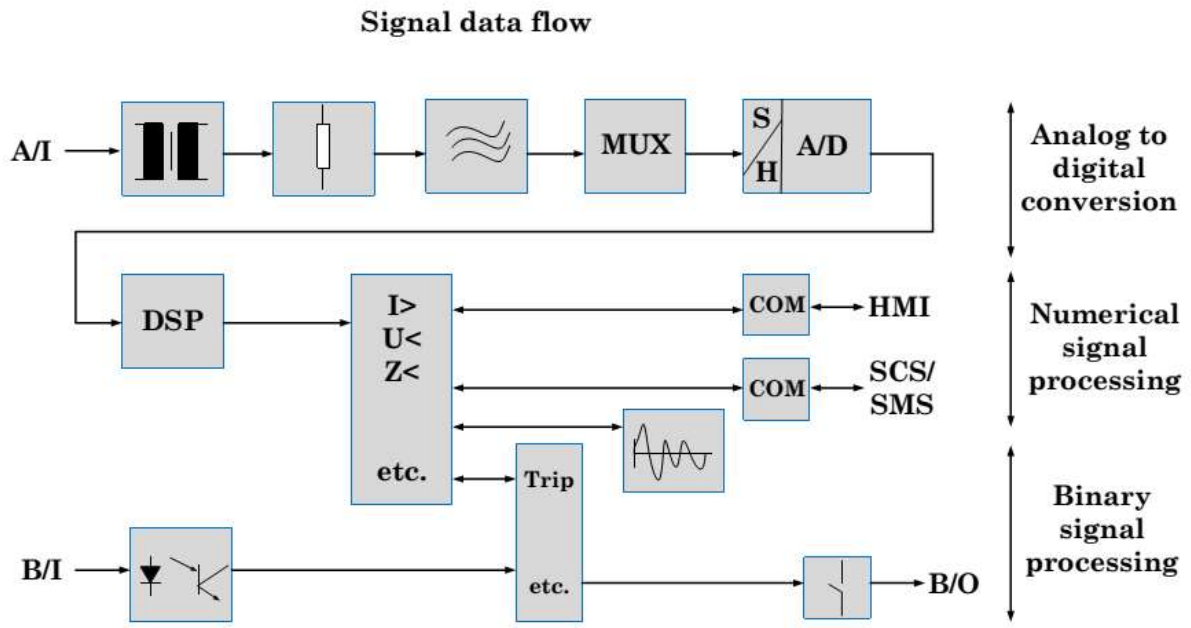


شکل ۳-۹ نمای کلی سخت‌افزار

- واحد ورودی آنالوگ
- واحد پردازش مرکزی
- واحدهای ورودی/خروجی باینری ۱ تا ۴
- واحد تغذیه توان
- PCB ی اصلی متصل
- محفظه با ترمینال‌های ارتباطی

در واحد ورودی آنالوگ، یک ترانسفورماتور ورودی ایزولاسیون الکتریکی و استاتیکی را بین متغیرهای ورودی آنالوگ و مدارهای الکترونیکی داخلی برقرار کرده و سیگنال‌ها را برای سطح مناسبی از پردازش تنظیم می‌کند. ترانسفورماتور ورودی می‌تواند حداکثر ۹ ترانس ورودی را مدیریت کند (ولتاژ، جریان حفاظتی و یا ترانس اندازه‌گیری). هر متغیر آنالوگ از یک فیلتر پایین گذر مرتبه اول R/C روی واحد CPU ی اصلی عبور می‌کند تا اثرات خارجی آن حذف شده و تداخل‌های HF نیز کاهش یابد (شکل۳-۱۰).

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل۳-۱۰ مسیر انتقال اطلاعات

در ادامه آن‌ها ۱۲ بار در هر دوره تناوب نمونه‌برداری شده و به سیگنال‌های دیجیتالی تبدیل می‌شوند. تبدیل آنالوگ به دیجیتال با یک مبدل ۱۶ بیتی صورت می‌گیرد. یک DSP قسمتی از فیلترینگ دیجیتالی را انجام داده و تضمین می‌کند که داده برای الگوریتم‌های حفاظتی در حافظه موجود باشد تا در اختیار پردازنده مرکزی قرار گیرد. هسته پردازش‌گر در اصل از میکروپروسسور اصلی برای الگوریتم‌های حفاظتی و حافظه‌های دو پورتی (DPMها) برای ایجاد ارتباط بین مبدل‌های A/D و پردازشگر اصلی تشکیل شده است. پردازشگر اصلی الگوریتم‌های حفاظتی را اجرا کرده و HMI ی محلی و واسط‌های سیستم کنترلی واحد را کنترل می‌کند. سیگنال‌های باینری از پردازشگر اصلی به ورودی‌های متناظر خود در واحد I/O با رله انتقال می‌یابند و ازاین‌رو رله‌های خروجی کمکی و دیودهای نوری (LED) را کنترل می‌کند. پردازشگر اصلی با یک واسط سریال RS232C مجهز شده است که از طریق آن تنظیمات حفاظتی تعیین می‌شود، رخدادها خوانده شده و داده‌ها از حافظه ثبات اختلال به یک PC ی محلی و یا راه دور منتقل می‌گردد.

در واحد پردازشگر اصلی، دو اسلات PCC و یک واسط RS232C وجود دارد. این واسط‌های سریال ارتباط راه دور را برای سیستم مانیتورینگ ایستگاه (SMS) و سیستم کنترلی ایستگاه (SCM) و نیز I/O های راه دور تأمین می‌کنند.

رله می‌تواند دارای یک تا چهار واحد I/O ی باینری باشد. این واحدها در این حالت‌ها در دسترس هستند:

a) دو رله قطع با دو کنتاکت سیکل کامل، ۸ ورودی اپتوکوپلر و ۶ رله سیگنال دهی نوع 316DB61
b) دو رله قطع با دو کنتاکت سیکل کامل، ۴ ورودی اپتوکوپلر و ۱۰ رله سیگنال دهی نوع 316DB62
c) ۱۴ ورودی اپتوکوپلر و ۸ رله سیگنال‌های نوع 316DB63

هنگامی که رله با بیش از دو واحد I/O ارتباط برقرار می‌کنند، اندازه N2 باید انتخاب گردد.

بر اساس اینکه دو یا چند واحد I/O پر می‌شوند، یا ۸ LED و یا ۱۶ LED در جلوی رله قابل‌مشاهده هستند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۵- نرم‌افزار

هم سیگنال‌های ورودی آنالوگ و هم باینری پیش از پردازش توسط پردازشگر اصلی بررسی می‌شوند. همان‌طور که در بخش سخت‌افزاری فوق موردبحث قرار گرفت، عبور سیگنال‌های آنالوگ از طریق ترانس‌های ورودی توالی، شنت، فیلتر پایین گذر (فیلتر ضد ورودی)، مالتی پلکسرها و مبدل A/D و DSP، صورت می‌گیرد. در شکل دیجیتالی، این سیگنال‌ها با کمک فیلترهای عددی به مؤلفه‌های ظاهری و حقیقی تقسیم‌بندی می‌شوند پیش از آنکه به پردازشگر اصلی اعمال شوند. سیگنال‌های باینری از ورودی‌های اپتوکوپلر به‌صورت مستقیم به پردازشگر اصلی اعمال می‌شوند. پردازش واقعی سیگنال‌ها در ارتباط با الگوریتم‌های حفاظتی و منطقی در ادامه صورت می‌گیرد.

۶- ابزار مهندسی گرافیکی

زبان برنامه‌نویسی گرافیکی CAP316 مورداستفاده در رله آن را به یک ابزار مهندسی کاربرپسند و قدرتمند برای مهندسی واحدهای کنترلی و حفاظتی می‌کند. این ابزار درست مشابه IEC1131 است. CAP316 به بلوک‌های تابعی این امکان را می‌دهد که برنامه‌های کاربردی را به‌صورت مستقیم به برنامه‌های کاربردی مورداستفاده سیستم تبدیل کنند (FUPLA) که درنتیجه قادر خواهد بود پردازنده‌های واحدهای کنترلی و حفاظتی را اجرا کند. بسته برنامه حاوی یک کتابخانه از بلوک‌های تابعی است. بالغبر ۸ پروژه (FUPLA های تولیدشده توسط CAP316) قادر هستند که به‌صورت هم‌زمان روی یک رله اجرا شوند.

۷- توابع

این قسمت مروری بر توابع احتمالی مطابق با انواع سخت‌افزارها است. این توابع را می‌توان در داخل اسکوپ ظرفیت CPU فعال کرد. یک یا چند تابع را می‌توان مطابق با ارتباطات PT اعمال نمود (مثلاً سه‌فاز برای مینیمم امپدانس و یا تک‌فاز برای حفاظت خطای زمین روتور و استاتور).

۷-۱- حفاظت اضافه جریان جهت‌دار

تابع حفاظت اضافه جریان جهت‌دار یا با زمان معکوس و یا با مشخصه‌های اضافه جریان زمان محدود موجود است. این تابع از یک حافظه ولتاژ برای خطاهای نزدیک به مکان رله تشکیل شده است. پاسخ تابع پس از زمان حافظه سپری شده قابل‌انتخاب است (قطع و یا مسدودسازی)

۷-۲- تابع فرکانس

تابع فرکانس بر اساس اندازه‌گیری یک ولتاژ صورت می‌گیرد. این تابع قادر است به‌صورت تابع مینیمم و یا ماکزیمم پیکربندی شده و یا به‌صورت تابع حفاظتی و به‌منظور حذف بار اعمال گردد. با چندین پیکربندی برای این تابع تقریباً هر تعداد مرحله را می‌توان پیاده‌سازی کرد.

۷-۳- نرخ تغییرات فرکانس

این تابع به‌صورت متناوب با فرکانس مطلوب فعال‌سازی می‌شود. این بخش شامل یک تجهیز مسدودکننده زیر ولتاژ است. پیکربندی تکراری این تابع تضمین‌کننده نمونه چندمرحله‌ای است.

۷-۴- اندازه‌گیری

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

هر دو تابع اندازه‌گیری مقادیر تک‌فاز rms را به‌صورت تک‌فاز و سه‌فاز اندازه‌گیری می‌کند. این اندازه‌گیری برای ولتاژ، جریان، فرکانس، توان حقیقی و توان ظاهری برای نمایش روی HMI ی محلی و یا انتقال به سیستم کنترل ایستگاه است. انتخاب دیگری که می‌توان در نظر گرفت، بین ولتاژهای فاز به زمین و فاز به فاز است.

۷-۵- توابع کمکی

توابع کمکی نظیر تأخیر و یا انتگرال‌گیر و یا گیت منطقی به‌کاربر این امکان را می‌دهند که ترکیب‌های منطقی از سیگنال‌ها را ایجاد کرده و تأخیرهای باقی‌مانده را نیز جبران کند.

یک ویژگی نظارتی اجرایی امکان بررسی باز شدن و یا بسته شدن همه انواع قطع کن‌ها را فراهم می‌کند (مدارشکن‌ها، ایزوله کننده‌ها، سوئیچ‌های زمینی و غیره). خرابی یک قطع کن و باز و یا بسته شدن در زمان مقتضی سبب ایجاد سیگنال متناظر برای پردازش بعدی می‌شود.

۷-۶- بررسی منطقی

توابع منطقی جریان و ولتاژ امکان تشخیص عدم تقارن‌های سیستم را تسهیل می‌کنند (به‌عنوان مثال در مدارهای ثانویه CTها و یا VT ها).

۷-۷- توالی ثبات رخدادها

تابع ثبات رخداد ظرفیت لازم را برای بالغبر ۲۵۶ سیگنال باینری شامل نشانگر زمان با رزولوشن کافی در حد میلی‌ثانیه تأمین می‌کند.

۷-۸- ثبات اغتشاش

ثبات اغتشاش بالغبر ۹ ورودی داخلی، بالغبر ۱۶ ورودی باینری را مانیتور کرده و نتایج توابع حفاظتی را با هم ادغام می‌کند. ظرفیت لازم برای ثبت اغتشاش‌ها به مدت‌زمان یک اغتشاش بستگی دارد که به‌صورت تاریخچه پیش از اغتشاش و مدت‌زمان خود اغتشاش تعریف می‌شود. زمان کامل ثبت تقریباً ۵ ثانیه است.

۷-۹- واسط ماشین و انسان (HMI) – CAP2/316

برای ارتباطات محلی با رله یک نرم‌افزار تنظیم‌کننده CAP2/316 موجود است که بر اساس سیستم ویندوز کار می‌کند. این نرم‌افزار تحت سیستم‌های عملیاتی زیر کار می‌کند:

- ویندوز NT 4.0
- ویندوز ۲۰۰۰

این ابزار برنامه‌نویسی بهینه برای مهندسی، تست، ترکیب‌بندی و بهره‌برداری موردنیاز است. نرم‌افزار مذکور می‌تواند یا به‌صورت آنلاین و یا به‌صورت آفلاین مورداستفاده قرار گیرد و علاوه بر این حاوی مود DEMO نیز است. برای هر تابع حفاظتی یک مشخصه قطع نمایش داده می‌شود. علاوه بر درک اصلی توابع حفاظتی، نمایش گرافیکی این توابع نیز امکان شفاف‌سازی تنظیمات پارامترها را فراهم می‌کند. هر تابع حفاظتی مطلوب را می‌توان از کتابخانه نرم‌افزار در همه توابع حفاظتی منتشرشده با استفاده از ویژگی درگ و دراپ انتخاب کرد.

HMIی ساخته‌شده

واحد HMI ی پیش رو در وهله اول برای سیگنال‌دهی رخدادهای واقعی، اندازه‌گیری و شناسایی داده‌ها استفاده می‌شود. تنظیمات آن نمایش داده نمی‌شود.

ویژگی‌ها

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- نمایش اندازه‌گیری
  - دامنه، زاویه، فرکانس کانال‌های آنالوگ
  - اندازه‌گیری‌های عملکردی
  - سیگنال‌های باینری
- لیست رخدادها
- دستورات بهره‌برداری
- اطلاعات ثبات اغتشاش
- توابع آگاهی‌دهنده
  - ریست کردن LED ها
  - ریست کردن خروجی‌های لچ
  - پاک کردن ثبات رخدادها
  - شروع گرم

۱۰-۷- ارتباطات راه دور

رله قادر است با یک سیستم مانیتورینگ و ارزیابی (SMS) ارتباط برقرار کرده و یا با یک سیستم کنترل ایستگاه (SCS) از طریق لینک فیبر نوری ارتباط برقرار کند. واسط سریال متناظر به تنظیمات حفاظتی و نیز ثبات اغتشاش، اندازه‌گیری و رخدادها این امکان را می‌دهد که پارامترهای تنظیمی را به‌صورت سوئیچ‌شده تنظیم کنند.

با استفاده از باس LON امکان تبادل اطلاعات باینری بین کنترل‌کننده‌های منفرد مثلاً سیگنال برای مسدودسازی داخلی ایستگاه فراهم می‌شود.

۱۱-۷- خروجی‌ها و ورودی‌های راه دور (RIO580)

با استفاده از نوع باس پروسه MVB، واحدهای ورودی و خروجی راه دور 500RIO11 می‌توانند به ترمینال‌های رله متصل شوند. کانال‌های ورودی و خروجی را می‌توان با استفاده از سیستم ورودی/خروجی راه دور RIO580 تعمیم داد. با نصب واحدهای 500RIO11 I/O در نزدیکی پروسه، سیم‌بندی‌ها به میزان قابل‌توجهی کم می‌شود، به این خاطر که این واحدها از طریق لینک فیبر نوری از ترمینال‌های 4*RE.316 قابل‌دسترسی هستند.

۱۲-۷- تشخیص و نظارت خودکار

رله توابع خودتشخیصی و نظارتی دارد که تضمین‌کننده ماکزیمم دسترسی است نه‌تنها برای خود ترمینال‌های حفاظتی بلکه برای حفاظت خود سیستم قدرت. خرابی‌های سخت‌افزاری بلافاصله با یک کنتاکت آلارم سیگنال‌دهی می‌شوند. در حالت خاص، تغذیه‌های کمکی خارجی و داخلی به‌صورت پیوسته پایش می‌شوند. عملکرد صحیح و تلورانس مبدل A/D با استفاده از سیکل‌های تبدیل دو ولتاژ مرجع تست می‌شود. الگوریتم‌های خاصی به‌صورت منظم حافظه‌های پروسسور (توابع پیش‌زمینه) را چک می‌کنند. یک watchdog نیز اجرای برنامه‌ها را چک می‌کند.

یک مزیت مهم خودتشخیصی و توابع نظارتی این است که اندازه‌گیری روتین و تناوبی و تست سیستم کاهش می‌یابد.

۱۳-۷- نرم‌افزار پشتیبانی

تجهیزات برنامه اپراتور و پیکربندی و تنظیمات برنامه‌های حفاظتی، لیست کردن پارامترها، خواندن رخدادها و لیست کردن داده‌های شناسایی دالی مختلف از وظایف این بخش است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

برنامه‌های ارزیابی REVAL و E_wineve (ویندوز NT/ویندوز ۲۰۰۰) برای نمایش و ارزیابی اغتشاش‌های ذخیره‌شده توسط ثبات اغتشاش، موجود هستند. جایی که داده‌های اغتشاش از طریق سیستم مخابراتی به ایستگاه ارزیابی ثبات اغتشاش ارسال می‌شود، برنامه انتقال فایل WinCom (ویندوز NT/ویندوز ۲۰۰۰) نیز مورداستفاده قرار می‌گیرد.

۱۴-۷- سخت‌افزار داده‌های فنی

جدول ۳-۱ ورودی‌های متغیر آنالوگ

تعداد ورودی‌ها مطابق با نسخه، ماکزیمم ۹ ورودی آنالوگ جریان‌ها و ولتاژها، ترمینال‌های $4\ mm^2$	
فرکانس اسمی f_N	50 Hz or 60 Hz
جریان اسمی I_N	1 A , 2 A or 5 A
نسبت حرارتی مدار جریان برای ۱۰ s، ۱ s به‌صورت دینامیکی (نیم دوره تناوب)	$4 \times I_N$ $30 \times I_N$ $100 \times I_N$ $250 \times I_N$ (peak)
ولتاژ اسمی U_N	100 v or 200 v
نسبت حرارتی مدار ولتاژ	$2.2 \times U_N$
بار به ازای هر فاز ورودی‌های جریان ورودی‌های ولتاژ	< 0.1 VA at I_N 1A < 0.3 VA at I_N = 5A < 0.25 VA at U_N
VTمشخصه‌های فیوز	Z acc . to DIN / VDE 0660 or equivalent

جدول ۳-۲ داده‌های کنتاکت

رله‌های قطع‌کننده	
تعداد کنتاکت‌ها	دو رله به ازای هر واحد I/O 316DB61 N/Oهرکدام دارای دو کنتاکت or316DB62 ترمینال‌های ۱,۵ mm2
ماکزیمم ولتاژ کار	300 V AC or V DC
نرخ پیوستگی	5 A
ایجاد و حمل برای 0.5	30 A

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

قطع برای30 ms	250 A
ایجاد توان تحت110 V DC	3300 W
ظرفیت قطع مدار برای L/R=40 ms جریان قطع با ۱ کنتاکت	1.5 A 0.3 A 0.1 A
جریان قطع با ۲ کنتاکت به‌صورت سری	5 A 1 A 0.3 A
کنتاکت‌های سیگنال دهی	
تعداد کنتاکت‌ها	۶ یا ۸ .acc به واحد I/O (316DB61.316DB62 or 316DB63), ۱ کنتاکت به ازای رله سیگنال‌دهی با ترمینال‌های ۱,۵ mm2 هر واسط مجهزشده با کنتاکت C/O و همه کنتاکت های N/O
حداکثر ولتاژ کار	250 V AC or V DC
نرخ پیوستگی	5 A
ایجاد و حمل برای£ 0.5	15 A
قطع برای30 ms	100 A
ایجاد توان تحت$110\ V_{DC}$	550 W
جریان قطع به ازای L/R=40 ms	0.5 A 0.1 A 0.04 A
کاربر می‌تواند کنتاکت‌های قطع و سیگنال‌دهی را برای توابع حفاظتی تخصیص دهد	

جدول ۳-۳ ورودی‌های اپتوکوپلر

تعداد اپتوکوپلر	**A,** 4 or **14** act. **ID I**;G unit (316DB61. 31GDB62 or 316DB63)
ولتاژ ورودی	118 to 36 V DC *1*36 to 75 V DC *t* **S2** lo 312 V DC /175 to 312 V DC
ولتاژ آستانه	10 to 17 V DC / 20 to 34 V DC f40 to 65 V DC f 140 to 175 V DC
جریان ورودی بیشینه	<12 mA
زمان اجرا	1 rins
کاربر می‌تواند توابع حفاظتی و ورودی‌ها را تخصیص دهد	

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

جدول ۳-۴ دیودهای نوری

اتخاب مودهای نمایش • تجمیع هر یک از اغتشاش‌های جدید • منطبق سازی با ریست توسط افزونه بعدی • منطبق‌سازی تنها به شرطی که سیستم حفاظتی با ریست کردن افزونه بعدی قطع شود	
رنگ‌ها	۱ سبز(آماده‌به‌کار) ۱ قرمز(قطع) ۶ یا ۱۴ زرد (سایر سیگنال‌ها)
کاربر می‌تواند LEDها را برای توابع حفاظتی اختصاص دهد	

جدول ۳-۵ پیکربندی و تنظیمات

محلی از طریق واسط ارتباطی روی کانکتور پورت پیش رو با استفاده از یک PC ی IBM با ویندوز NT 4.0 و یا ویندوز ۲۰۰۰. برنامه اپراتور می‌تواند با کنترل راه دور از طریق یک مودم عمل کند.	
برنامه اپراتور	به‌صورت انگلیسی و یا آلمان

جدول ۳-۶ ارتباطات راه دور

RS232Cواسط. نرخ تبدیل داده پروتکل‌ها	9پین Sub-D ی مادگی Bit/s ۹۶۰۰ SAP یا IEC 60870-5-103 316BM61b
تعداد واسط‌های PCC	۲ سوکت متصل‌کننده برای کارت‌های نوع ۳
دلخواه PCC پروتکل باس داخلی پروتکل باس پردازش باس پردازش و داخلی را می‌توان به‌صورت هم‌زمان مورداستفاده قرار داد	LON و یا MVB (قسمت MVB (IEC 61375 (قسمتی از IEC 61375)
باس LON نرخ انتقال داده	PCC با پورت فیبر نوری، کانکتورهای ST، ۱,۲۵ Mbit/s
باس WB	PCC با پورت فیبر نوری یدکی، کانکتورهای ST، Mbit/s ۱,۲۵

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

نرخ انتقال داده	
حافظه رخداد	256رخداد1 ms
تعیین زمان بدون سنکرون سازی	10 s>به ازای هر روز
واسط مهندسی	نرم‌افزار یکپارچه به‌صورت واسط برای مهندسی سیگنال با SigTOOL

جدول ۳-۷ تغذیه کمکی

ولتاژ تغذیه	
رنج ولتاژ	36 to 312 V DC
زمان رفع قطعی ولتاژ	>50 ms
نسبت فیوز	≥ 4 A
باتری ایستگاه بارگیری در شرایط نرمال (۱ رله برق‌دار) در حین خطا (همه رله‌ها برق‌دار هستند) با ۱ واحد I/O با ۲ واحد I/O با ۳ واحد I/O با ۴ واحد I/O	< 20 W < 22 W < 27 W < 32 W < 37 W
بار اضافی برای گزینه‌های SPA، IEC 60870-5-103 و یا واسط MVB LON	1.5 W 2.5 W
زمان بافر لیست رخداد و داده ثبات خطا در نبود تغذیه کمکی	>2 days (typ . 1 month)

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

جدول ۳-۸ داده‌های عمومی

رنج دمایی بهره‌برداری ذخیره‌سازی	-15° c to + 65 ° c - 45 ° c to + 95° c	EN 60255-6 (1994) . IEC 60255 – 6 (1988) .
رطوبت	93 % , 40 ° c , 4 days	IEC 60068 –2 –3(1969)
تست لرزه‌ای	5 g , 30 s , 1 to 33 Hz (1 octave / min)	IEC 60255–21–3(1995) IEEE 344 (1987)
تست عایقی	2kV , 50 Hz , 1 min 1kV across open contacts	EN 60255- 5 (2001) . IEC 60255 – 5 (2000)
تست ولتاژ برق‌گیر	5 kV , 1.2 / 50 μs	EN 60255 – 5 (2001) . IEC 60255 – 5 (2000) . EN 60950 (1995)
تست اغتشاش انفجاری ۱ MHz	1.0/2.5 kV , CI , 3 : 1 MHz 400 Hz rep . freq .	EN 60255 – 5 (2001) . IEC 60255 – 5 (2000) .
تست حالت گذرای خطا	2.4 kV , CI . 4	IEC 60255 22–1(1988) . ANSI / IEEE C37.90.1(1989)
تست دشارژ الکترواستاتیکی (ESD)	6/8 kV (10 shots) , CI . 3	EN 61000 – 4–4(1995) . IEC 61000–4– 4 (1995)
امنیت واسط‌های مغناطیسی در فرکانس‌های سیستم قدرت	300 A/m : 1000 A/m : 50 / 60 Hz	EN 61000–4 –2 (1996) IEC 61000 –4–2 (2011)
تست واسط فرکانس رادیویی (RFI)	• 0.15 -80 MHz , 80 % amplitude modulated 10 V , CI . 3 • 80 – 1000 MHz , 80% amplitude modulated 10 V/m , CI . 3 • 900 MHz , puls modulated	EN 61000 -4 – 8 (1993) IEC 61000 – 4 –8(1993)

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

انتشار	CI . A	EN 61000–4 – 6 (1996) , EN 61000 – 4 – 6 (1996) EN 61000 – 4 – 3 (1996) IEC 61000 – 4 – 3(1996) ENV 50204 (1995)

جدول ۳-۹ طراحی مکانیکی

وزن اندازه محفظه N1 اندازه محفظه N2	از ۷/۵ تا ۱۴/۵ kg تقریباً ۱۰ kg تقریباً ۱۲ kg
روش‌های مانیتورینگ	نیمه فلاش با ترمینال‌ها در سطح عقبی با ترمینال‌ها در رک ۱۹ اینچ نصب‌شده دارای ارتفاع 6U، عرض (1/2 9") N1=225.2 mm عرض N2=271 mm
کلاس محافظتی محفظه	IP 50 (IP 20 اگر MVB PCC مورداستفاده باشد) IPXXB برای ترمینال‌ها

جدول ۳-۱۰ تابع اضافه‌بار حرارتی

• تصویر ترمینال برای مدل مرتبه اول • اندازه‌گیری سه‌فاز یا تک‌فاز با تشخیص ماکزیمم مقدار فاز	
تنظیمات	
جریان اصلی I_B	۰,۵ تا ۲,۵ I_N با گام‌های ۰,۰۱ I_N
مرحله آلارم	۵۰ تا ۲۰۰٪ ϑ_N با گام‌های ۱٪ ϑ_N
مرحله قطع	۵۰ تا ۲۰۰٪ ϑ_N با گام‌های ۱٪ ϑ_N
ثابت زمانی حرارتی	۲ تا ۵۰۰ دقیق با گام‌های ۰,۱ دقیقه
دقت تصویر حرارتی	±10% ϑ_N (در f_N) با حفاظت CTها ±3% ϑ_N (در f_N) با تعادل هسته CTها

جدول ۳-۱۱ تابع جریان با زمان متناهی (51DT)

• تشخیص اضافه جریان و زیر جریان

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

• اندازه‌گیری سه‌فاز و یا تک‌فاز با شناسایی بیشترین، کمترین جریان فاز • مقاومت در برابر هارمونیک دوم برای جریان‌های هجومی بالا	
جریان افزایشی	۰,۰۲ تا ۲۰ I_N با گام‌های ۰,۰۱ I_N
تأخیر	۰,۰۲ تا ۶۰ s با گام‌های ۰,۰۱ s
دقت تنظیمات افزایشی (در f_N)	±10% و یا ±0.04 I_N
نرخ ریست اضافه جریان اضافه ولتاژ	٪۹۵< برای تابع max ٪۱۰۶> برای تابع min
ماکزیمم زمان کار بدون تأخیر کلی	۶۰ ms
مقاومت هجومی تنظیمات افزایشی نرخ ریست	دلخواه ۰,۲ I_{2h}/I_{1h} ۰,۸

جدول ۳-۱۲ تابع ولتاژ زمان متناهی (۵۹/۲۷)

• شناسایی اضافه ولتاژ و زیر ولتاژ • اندازه‌گیری تک‌فاز یا سه‌فاز با شناسایی بیشترین و کمترین ولتاژ فاز	
همچنین برای شناسایی موارد زیر: • خطاهای استاتور به زمین (٪۹۵) • خطاهای روتور به زمین (مستلزم اندازه‌گیری خارجی پلYWX111 و خازن‌های کوپلینگ) • خطاهای بین دورها	
تنظیمات	
ولتاژ افزایشی	۰,۰۱ تا ۲,۰ U_N با گام‌های ۰,۰۰۲ U_N
تأخیر	۰,۰۲ تا ۶۰ s با گام‌های ۰,۰۱ s
دقت تنظیمات افزایشی (در f_N)	±3% و یا ±0.004 U_N
نرخ ریست اضافه ولتاژ اضافه جریان	٪۹۶< برای تابع max ٪۱۰۴> برای تابع min
ماکزیمم زمان کار بدون تأخیر کلی	۶۰ ms

جدول ۳-۱۳ حفاظت اضافه جریان زمان متناهی جهت‌دار

• اندازه‌گیری سه‌فاز

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

• کاهش مؤلفه‌های فرکانس بالا و DC • مشخصه‌های زمان محدود ویژگی حافظه ولتاژ برای خطاهای نزدیک	
تنظیمات	
جریان	0.02 to 20 I_N in steps of 0.01 I_N
زاویه	-180 ° to + 180 ° in steps of 15 °
تأخیر	0.02 s to 60 s in steps of 0.01 s
tWait	0.02 s to 20 s in steps of 0.01 s
دقت تنظیمات افزایشی (در f_N) نرخ ریست دقت اندازه‌گیری زاویه (در ۰,۹۴ تا ۱,۰۶ f_N)	0.2 s to 60 s in steps of 0.01 s
رنج ولتاژ ورودی رنج حافظه ولتاژ دقت اندازه‌گیری زاویه در حافظه ولتاژ فرکانس وابسته به اندازه‌گیری زاویه در حافظه ولتاژ ماکزیمم زمان پاسخ‌گویی بدون تأخیر	± 4 % or ± 0.03 I_N >95 % ± 4

جدول ۳-۱۴ تابع اضافه جریان زمان معکوس جهت‌دار

• اندازه‌گیری سه‌فاز • کاهش مؤلفه‌های فرکانس بالا و DC • مشخصه‌های زمان معکوس • ویژگی حافظه ولتاژ برای خطاهای نزدیک	
تنظیمات	
جریان I_{Start}	1… 5 I_B in steps of 0.01 I_B
زاویه	-180 ° … + 180 ° in steps of 15 °
مشخصه زمان معکوس (مطابق با B.S.142 با رنج تنظیمات بیشتر) معکوس نرمال(normal inverse) خیلی معکوس(very inverse)	$t = k_1 / ((I/I_B)^c - 1)$ c = 0.02

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

به‌شدت معکوس(extremely inverse)	c = 1
خطای زمین طولانی‌مدت	c = 2
	c = 1
تنظیمات k_1	0.01 to 200 s in steps of 0.01 s
مقدار IB	0 to 15 s in steps of 0.2 s
tWait	0.04 to 3.5 I_N in steps of 0.01 I_N
مدت‌زمان حافظه	0.04 s to 15 s in steps of 0.01 s
دقت تنظیمات افزایشی (در f_N)	>92%
نرخ ریست	>94 %
دقت اندازه‌گیری زاویه (در ۰,۹۴ تا ۱,۰۶ f_N)	± 5 °
کلاس دقت زمان بهره‌برداری مطابق با استاندارد انگلیسی ۱۴۲	E 10
رنج ولتاژ ورودی	0.005 to 2 U_N
	< 0.005 U_N
رنج حافظه ولتاژ	± 20 °
دقت اندازه‌گیری زاویه در حافظه ولتاژ	± 0.5 ° / Hz
وابستگی فرکانس به اندازه‌گیری زاویه در حافظه ولتاژ	60ms
ماکزیمم زمان پاسخگویی بدون تأخیر	

جدول ۳-۱۵ تابع اندازه‌گیری UIFPQ

• اندازه‌گیری تک‌فاز ولتاژ، جریان، فرکانس، توان حقیقی و توان ظاهری • انتخاب اندازه‌گیری فاز نسبت به زمین یا فاز به فاز • کاهش مؤلفه‌های DC و هارمونیک‌ها در جریان و ولتاژ • جبران‌سازی خطاهای فاز در CTها و VT های اصلی و ورودی	
تنظیمات	
زاویه فاز	-180 ° to + 180 ° in steps of 0.1°
مقدار مرجع توان S_N	

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

	0.4 to 3 S_N in steps of 0.001 S_N

جدول ۳-۱۶ ماژول اندازه‌گیری سه‌فاز

• اندازه‌گیری سه‌فاز ولتاژ (ستاره یا مثلث) جریان، فرکانس، توان حقیقی و توان ظاهری و نیز ضریب قدرت • دو ورودی شمارنده ضربه مستقل برای محاسبه بازه زمانی و انرژی تجمیع شده. اندازه‌گیری سه‌فاز و شمارنده ضربه می‌تواند به‌صورت مستقل استفاده شده و نیز می‌تواند غیرفعال گردد • این تابع را می‌توان تا چهار بار پیکربندی نمود	
تنظیمات	
زاویه	-180 ° to + 180 ° in steps of 0.1°
مقدار مرجع برای توان	0.2 to 2.5 S_N in steps of 0.001 S_N
بازه t1	1 min , 2 min , 5 min , 10 min , 15 min , 20 min , 30 min , 60 min , or 120 min
فاکتور مقیاس توان	0.0001 to 1
ماکزیمم فرکانس ضربه	25Hz
مینیمم مدت‌زمان ضربه	10ms
دقت بازه زمانی	±2ms

جدول ۳-۱۷ دیفرانسیل ژنراتور (87G)

ویژگی‌ها: • تابع سه‌فاز • مشخصه جریان تطبیقی • پایداری بالا برای خطاهای خارجی و اشباع ترانسفورماتور جریان	
تنظیمات	
تنظیمات g (حساسیت اصلی)	0.1 to 0.4 I_N in steps of 0.05 I_N
تنظیمات v (شیب)	0.25 or 0.5
ماکزیمم زمان قطع -for $I_\Delta > 2\ I_N$ -for $I_\Delta \leq 2\ I_N$	≤ 30 ms ≤ 50 ms
دقت مقدار افزایشی g	± 4% I_N (at f_N)

جدول ۳-۱۸ دیفرانسیل ترانسفورماتور (87T)

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

ویژگی‌ها: • برای ترانس‌های دو و سه‌فاز • تابع سه‌فاز • مشخصه جریان تطبیقی • پایداری بالا برای خطاهای خارجی و اشباع ترانس جریان • بدون ترانس کمکی لازم به خاطر مجموعه برداری و جبران سازی نسبت CT • مقاومت در برابر جریان هجومی با استفاده از هارمونیک دوم	
تنظیمات	
تنظیمات g	0.1 to 0.5 I_N in steps of 0.1 I_N
تنظیمات v	0.25 or 0.6
تنظیمات b	1.25 to 5 in steps of 0.25 I_N
ماکزیمم زمان قطع (ترانس حفاظت شده بارگذاری‌شده)	≤ 30 ms
$I_\Delta > 2\ I_N$ $I_\Delta \leq 2\ I_N$	≤ 50 ms
دقت مقدار افزایشی	± 4% I_N (at f_N)
شرایط ریست کردن	I_Δ < 0.8 g-setting

جدول ۳-۱۹ اضافه جریان لحظه‌ای (۵۰)

ویژگی‌ها: • تابع ماکزیمم و یا مینیمم (اضافه جریان و زیر جریان) • اندازه‌گیری‌های سه‌فاز و تک‌فاز • رنج گسترده فرکانس (۰,۰۴ تا ۱,۲ f_N) • ارزیابی مقدار پیک	
تنظیمات	
جریان	0.1 to 20 I_N in steps of 0.1 I_N
تأخیر	0 to 60 s in steps of 0.01 s
دقت مقدار افزایشی (تحت ۰,۰۸ تا ۱,۱ f_N)	± 10% or ± 0.04 I_N
نرخ ریست	>90 % (foe max . function)
ماکزیمم زمان قطع بدون تأخیر (تحت f_N)	<110 % (for min . function) ≤30 ms (for max . function) ≤60 ms (for min . function)

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

جدول ۳-۲۰ اضافه جریان کنترل‌شده با ولتاژ (۵۱-۲۷)

ویژگی‌ها: • مقدار جریان بیشینه ثبت‌شده پس از راه‌اندازی • ریست تابع پس از بازگشت ولتاژ و یا پس از قطع آن • اندازه‌گیری سه‌فاز و یا تک‌فاز برای جریان • ارزیابی ولتاژ توالی مثبت	
تنظیمات	
جریان	0.5 to 20 I_N in steps of 0.1 I_N
ولتاژ	0.4 to 1.1 U_N in steps of 0.01 U_N
تأخیر	0.5 to 60 s in steps of 0.01 s
زمان نگه‌داشتن	0.1 to 10 s in steps of 0.02 s
دقت مقدار افزایشی	± 5 % (at f_N)
نرخ ریست	>94 %
زمان راه‌اندازی	≤80 ms

جدول ۳-۲۱ تابع اضافه جریان زمان معکوس

ویژگی‌ها: • اندازه‌گیری سه‌فاز و یا تک‌فاز با تشخیص بیشترین جریان فاز • پاسخ پایدار به حالت‌های گذرا	
مشخصه‌های زمان معکوس (مطابق با B.S.142 با رنج تنظیمات بیشتر)	$T = k_1 / ((I / I_B)^C - 1)$
معکوس نرمال	$C = 0.02$
خیلی معکوس	$C = 1$
به‌شدت معکوس	$C = 2$
معکوس زمان طولانی	$C = 1$
یا مشخصه RXIDG	$T = 5.8 - 1.35 \cdot \ln(I / I_B)$
تعداد فازها	
جریان اصلی I_B	
جریان افزایشی I_{start}	

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مینیمم تنظیمات زمانی t_{min}	1 or 3
تنظیمات k_1	0.04 to 2.5 I_N in steps of 0.01 I_N
کلاس‌های دقت برای زمان بهره‌برداری مطابق با British Standard 142 مشخصه RXIDG	1 to 4 I_B in steps of 0.01 I_B 0to 10 s in steps of 0.1 s
نرخ تنظیم مجدد	0.01 to 200 s in steps of 0.01 s E 5.0 $\pm$4 % (1 – I/80 I_B >94%

جدول ۳-۲۲ تابع اضافه جریان خطای زمین زمان معکوس

• اندازه‌گیری جریان خنثی (به‌دست‌آمده به‌صورت خارجی یا داخلی) • پاسخ پایدار به حالت‌های گذرا	
مشخصه‌های زمان معکوس (مطابق با B.S.142 با رنج تنظیمات بیشتر) معکوس نرمال خیلی معکوس به‌شدت معکوس معکوس زمان طولانی	$T = k_1 / ((I / I_B)^C – 1)$ C = 0.02 C = 1 C = 2
یا مشخصه RXIDG	C= 1
تنظیمات	$T = 5.8 – 1.35 . In (I / I_B)$
تعداد فازها	1 or 3
جریان اصلی I_B	0.04 to 2.5 I_N in steps of 0.01 I_N
جریان افزایشی I_{start}	1 to 4 I_B in steps of 0.01 I_B
مینیمم تنظیمات زمانی t_{min}	0to 10 s in steps of 0.1 s
تنظیمات k_1	0.01 to 200 s in steps of 0.01 s
کلاس‌های دقت برای زمان بهره‌برداری	

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مطابق با استاندارد انگلیسی ۱۴۲ مشخصه RXIDG	E 5.0
نرخ ریست	±4 % (1 – I/80 I_B
	>94%

جدول ۳-۲۳ جریان توالی فاز منفی

ویژگی‌ها: • حفاظت در مقابل بار نامتعادل • تأخیر زمان محدود • اندازه‌گیری سه‌فاز	
تنظیمات	
جریان توالی فاز منفی (I_2)	0.02 to 0.5 I_N in steps of 0.01 I_N
تأخیر	0.5 to 60 s in steps of 0.01 s
دقت مقدار افزایشی	± 4 % I_N (at f_N , I ≤I_N) (with measuring transformers)
نرخ ریست $I_2 \geq 0.2\ I_N$ $I_2 < 0.2\ I_N$	 >94 % >90%
زمان راه‌اندازی	≤80 ms

جدول ۳-۲۴ تابع حفاظت اضافه ولتاژ لحظه‌ای (۵۹و۲۷) با ارزیابی مقدار پیک

ویژگی‌ها: • ارزیابی مقادیر لحظه‌ای، بنابراین بسیار سریع است و مستقل از فرکانس در مقیاس وسیعی است • ذخیره‌سازی مقادیر لحظه‌ای بیشینه پس از شروع کار • بدون کاهش مؤلفه‌های DC • بدون کاهش هارمونیک‌ها • ۱ فاز و یا ۳ فاز • تشخیص مقدار بیشینه برای توابع چندفازی

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

• فرکانس محدودکننده کمتر و متغیر f_{min}	
تنظیمات	
ولتاژ	0.1 to 2.0 U_N in steps of 0.1 U_N
تأخیر	0.00 to 60 s in steps of 0.01 s
فرکانس محدود f_{min}	25 to 50 Hz in steps of 1 Hz
دقت مقدار افزایشی (تحت ۰,۰۸ تا ۱,۱ f_N)	± 6 % or ± 0,005 /U_N
نرخ ریست	>90 % (foe max . function)
ماکزیمم زمان قطع بدون تأخیر (تحت f_N)	<110 % (for min . function) <30 ms (for max . function) <50 ms (for min . function)

جدول ۳-۲۵ زیر امپدانس(underimpedance)

ویژگی‌ها: • تشخیص اتصال کوتاه‌های دوفاز و سه‌فاز (حفاظت پشتیبان) • اندازه‌گیری سه‌فاز و یا تک‌فاز • مشخصه دایره‌ای به مرکزیت نقطه مبدأ در دیاگرام R-X • ارزیابی کمترین مقدار فاز برای اندازه‌گیری سه‌فاز	
تنظیمات	
امپدانس	0.025 to 2.5 U_N / I_N in steps of 0.001 U_N / I_N
تأخیر	0.2 to 60 s in steps of 0.01 s
نرخ ریست	<106%
زمان راه‌اندازی	<50 ms (at f_N)
دقت مقادیر افزایشی	± 5 %

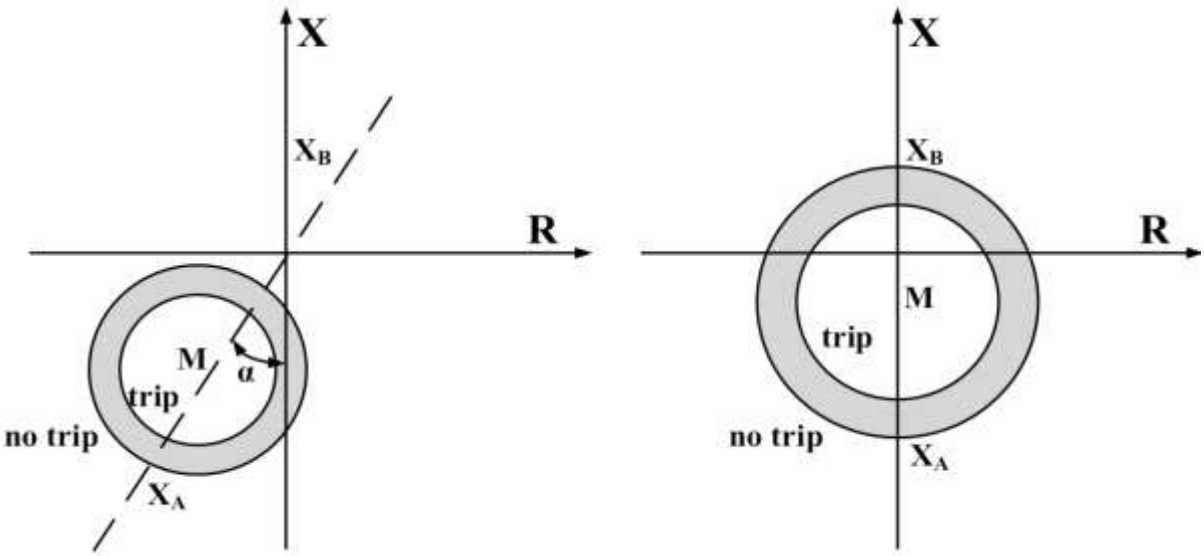
جدول ۳-۲۶ حداقل راکتانس

امکانات و ویژگی‌ها: • تشخیص تحریک اشتباه در ژنراتورهای سنکرون • اندازه‌گیری تک‌فاز و سه‌فاز • تشخیص تخطی از گام‌های تعریف‌شده برای رله‌های حفاظتی با مدارات منطقی تعبیه‌شده

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- تعیین مشخصه‌های مربوط به رله‌های دیستانس

مشخصه مربوط به تابع حفاظت راکتانس:



تنظیمات موردنیاز:	
راکتانس نقطه X_A	(۵- تا صفر) برابر نسبت ولتاژ نامی به جریان نامی تحت گام‌های ۰/۰۱
راکتانس نقطه X_B	(۲/۵- تا ۲/۵) برابر نسبت ولتاژ نامی به جریان نامی تحت گام‌های ۰/۰۱
تأخیر	۰/۲ تا ۶۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۰۱ ثانیه‌ای
زاویه‌ی آلفا	۱۸۰- تا ۱۸۰+ درجه تحت گام‌های ۵ درجه‌ای
دقت محاسبات مربوط به مقادیر *Pick-up*	۱۰± درصد از بیشترین مقدار راکتانس نقاط A یا B تحت فرکانس نامی
نرخ تنظیم مجدد رله	٪۱۰۵ برای حالت کار در شرایط کمینه و ٪۹۵ برای حالت کار در شرایط بیشینه تابع
زمان شروع	کمتر از ۵۰ میلی ثانیه

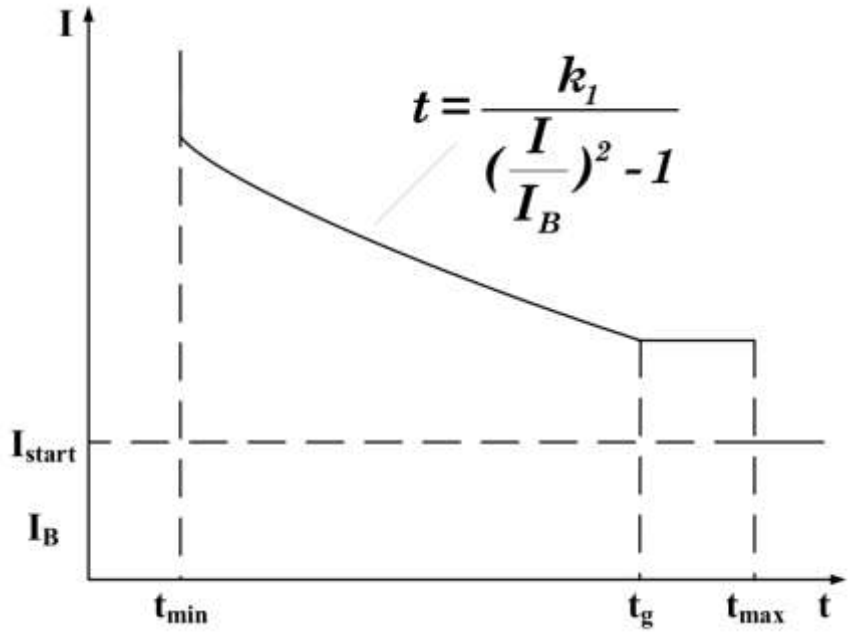
جدول ۳-۲۷ اضافه بار استاتور

امکانات و ویژگی‌ها:
• اندازه گیری تک‌فاز و سه‌فاز
• مشخصه عملکرد تحت استاندارد *ASA-C50.13*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- بالاترین مقدار فاز برای اندازه‌گیری‌های سه‌فاز

مشخصه مربوط به تابع حفاظت اضافه بار استاتور:



تنظیمات موردنیاز:	
جریان پایه (I_B)	(۰/۵ تا ۲/۵) برابر جریان نامی تحت گام‌های ۰/۰۱
ضریب زمانی (k_1)	۱ تا ۱۲۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۱ ثانیه‌ای
جریان *pick-up* (I_{Start})	(۱ تا ۱/۶) برابر جریان پایه تحت گام‌های ۰/۰۱
t_{min}	۱ تا ۱۲۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۱ ثانیه‌ای
t_g	۱۰ تا ۲۰۰۰ ثانیه تحت گام‌های ۱۰ ثانیه‌ای
t_{max}	۱۰۰ تا ۲۰۰۰ ثانیه تحت گام‌های ۱۰ ثانیه‌ای
t_{reset}	۱۰ تا ۲۰۰۰ ثانیه تحت گام‌های ۱۰ ثانیه‌ای
دقت محاسبات مربوط به مقادیر *Pick-up*	±۱۰ درصد تحت فرکانس نامی
زمان شروع	کمتر از ۸۰ میلی‌ثانیه

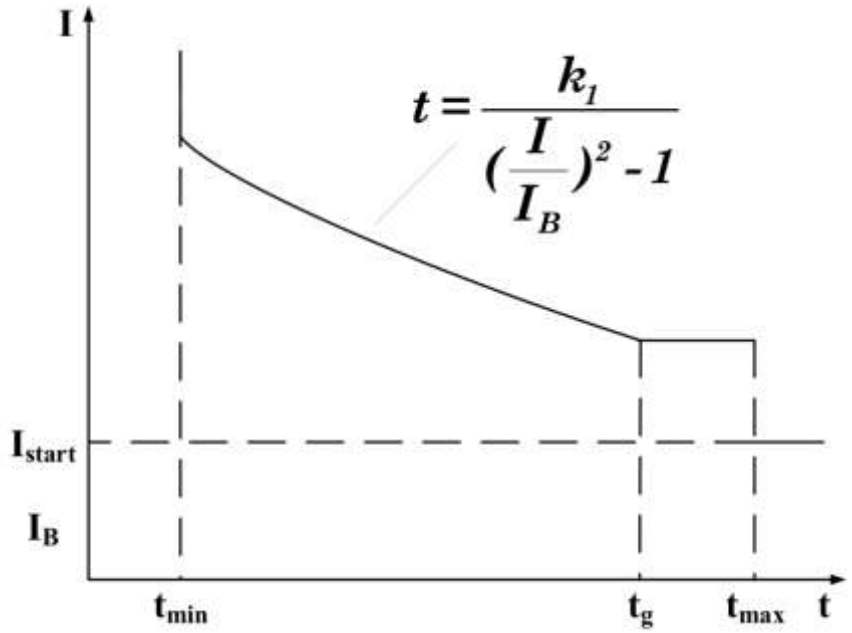
جدول ۳-۲۸ اضافه بار روتور

امکانات و ویژگی‌ها:

- اندازه‌گیری تک‌فاز و سه‌فاز
- مشخصه عملکرد تحت استاندارد *ASA-C50.13*
- بالاترین مقدار فاز برای اندازه‌گیری‌های سه‌فاز

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مشخصه مربوط به تابع حفاظت اضافه بار روتور:



تنظیمات موردنیاز:	
جریان پایه (I_B)	(۰/۵ تا ۲/۵) برابر جریان نامی تحت گام‌های ۰/۰۱
ضریب زمانی (k_1)	۱ تا ۱۲۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۱ ثانیه‌ای
جریان *pick-up* (I_{Start})	(۱ تا ۱/۶) برابر جریان پایه تحت گام‌های ۰/۰۱
t_{min}	۱ تا ۱۲۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۱ ثانیه‌ای
t_g	۱۰ تا ۲۰۰۰ ثانیه تحت گام‌های ۱۰ ثانیه‌ای
t_{max}	۱۰۰ تا ۲۰۰۰ ثانیه تحت گام‌های ۱۰ ثانیه‌ای
t_{reset}	۱۰ تا ۲۰۰۰ ثانیه تحت گام‌های ۱۰ ثانیه‌ای
دقت محاسبات مربوط به مقادیر *Pick-up*	±۵ درصد تحت فرکانس نامی
زمان شروع	کمتر از ۸۰ میلی‌ثانیه

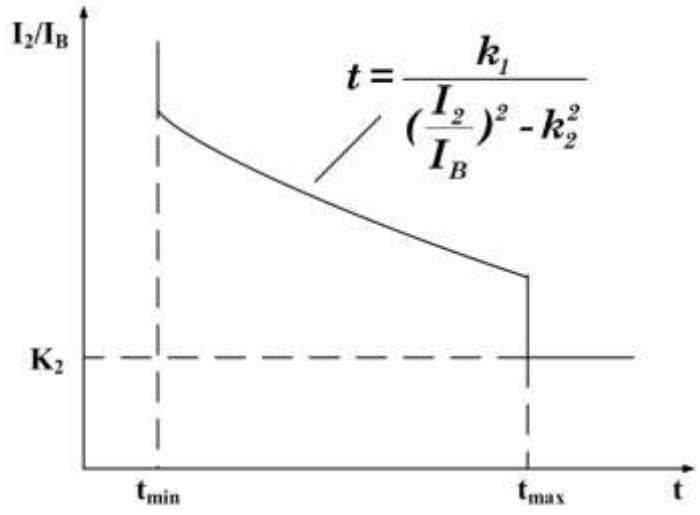
جدول ۳-۲۹ جریان فاز توالی منفی

امکانات و ویژگی‌ها:

- حفاظت در برابر حالت نامتعادل بار
- تأخیر زمانی معکوس
- اندازه گیری سه‌فاز

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مشخصه مربوط به تابع جریان فاز توالی منفی:



تنظیمات موردنیاز:	
جریان پایه (I_B)	(۰/۵ تا ۲/۵) برابر جریان نامی تحت گام‌های ۰/۰۱
ضریب زمانی (k_1)	۵ تا ۶۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۱ ثانیه‌ای
ضریب k_2 (*pick-up*)	۰/۰۲ تا ۰/۲ تحت گام‌های ۰/۰۱
t_{min}	۱ تا ۱۲۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۱ ثانیه‌ای
t_{max}	۵۰۰ تا ۲۰۰۰ ثانیه تحت گام‌های ۱ ثانیه‌ای
t_{reset}	۵ تا ۲۰۰۰ ثانیه تحت گام‌های ۱ ثانیه‌ای
دقت اندازه‌گیری جریان NPS(I_2)	±۴ درصد تحت فرکانس نامی
زمان شروع	کمتر از ۸۰ میلی‌ثانیه

جدول ۳-۳۰ فرکانس

امکانات و ویژگی‌ها:

- حساس به عملکرد اضافه و کاهش فرکانس نامی سیستم
- مقابله با کاهش کمینه ولتاژ

تنظیمات موردنیاز:	
فرکانس	۴۰ تا ۶۵ هرتز تحت گام‌های ۰/۰۱
تأخیر	۰/۱ تا ۶۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۰۱ ثانیه‌ای
کمینه ولتاژ	۰/۲ تا ۰/۸ برابر ولتاژ نامی تحت گام‌های ۰/۱
دقت مقدار *pick-up*	±۲ میلی هرتز تحت ولتاژ و فرکانس نامی
نرخ تنظیم مجدد	۱۰۰ درصد

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

زمان شروع	کمتر از ۱۳۰ میلی‌ثانیه

جدول ۳-۳۱ نرخ تغییرات فرکانس ($\frac{df}{dt}$)

امکانات و ویژگی‌ها: • تطبیق مقدار *pick-up* با توجه به تغییرات فرکانس • مقابله با کاهش دامنه ولتاژ	
تنظیمات موردنیاز:	
$\frac{df}{dt}$	۱۰- تا ۱۰ هرتز بر ثانیه تحت گام‌های ۰/۱ هرتز بر ثانیه
فرکانس	برای فرکانس نامی **۵۰ هرتز**: ۴۰ تا ۵۵ هرتز تحت گام‌های ۰/۰۱ برای فرکانس نامی **۶۰ هرتز**: ۵۰ تا ۶۵ هرتز تحت گام‌های ۰/۰۱
تأخیر	۰/۱ تا ۶۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۰۱ ثانیه‌ای
کمینه ولتاژ	۰/۲ تا ۰/۸ برابر ولتاژ نامی تحت گام‌های ۰/۱
دقت محاسبه نسبت $\frac{df}{dt}$ در بازه‌ی ۰/۹ تا ۱/۰۵ برابری فرکانس نامی	± ۰/۱ هرتزبر ثانیه
دقت محاسبه فرکانس در بازه‌ی ۰/۹ تا ۱/۰۵ برابری فرکانس نامی	±۲۵ میلی هرتز
نرخ تنظیم مجدد $\frac{df}{dt}$	۹۵ درصد برای عملکرد بیشینه و ۱۰۵ درصد برای عملکرد کمینه

جدول ۳-۳۲ تحریک بیشتر از حد نرمال (Over-excitation)

امکانات و ویژگی‌ها: • امکان سنجش نسبت ولتاژ به فرکانس • مقابله با کاهش کمینه ولتاژ	
تنظیمات موردنیاز:	
مقدار *Pick-up*	(۰/۲ تا ۲) برابر نسبت ولتاژ نامی به فرکانس نامی تحت گام‌های ۰/۰۱
تأخیر	۰/۱ تا ۶۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۰۱ ثانیه‌ای
رنج فرکانس	۰/۵ تا ۱/۲ برابر فرکانس نامی

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

دقت محاسبه در فرکانس نامی	± ۵ درصد
نرخ تنظیم مجدد	مابین ۹۷ تا ۱۰۳ درصد
زمان شروع	کمتر از ۱۲۰ میلی ثانیه

جدول ۳-۳۳ تحریک بیشتر از حد نرمال (Over-excitation) به همراه تابع تأخیر زمانی معکوس

امکانات و ویژگی‌ها: • قابلیت اندازه گیری تک‌فاز • تأخیر زمانی معکوس بر اساس استاندارد *IEEE Guide C37.91-1985*	
تنظیمات موردنیاز:	
تنظیمات جدول مربوطه	مقادیر مربوط به نسبت ولتاژ بر فرکانس نامی (در محدوده‌ی ۱/۰۵ تا ۱/۱-۱/۵ برابر نسبت ولتاژ بر فرکانس نامی)
نقطه شروع نسبت ولتاژ بر فرکانس	(۱/۰۵ تا ۱/۲) برابر نسبت ولتاژ بر فرکانس نامی تحت گام‌های ۰/۰۱
t_{min}	۰/۰۱ تا ۲ دقیقه تحت گام‌های ۰/۰۱ دقیقه‌ای
t_{max}	۵ تا ۱۰۰ دقیقه تحت گام‌های ۰/۱ دقیقه‌ای
زمان تنظیم مجدد	۰/۲ تا ۱۰۰ دقیقه تحت گام‌های ۰/۱ دقیقه‌ای
ولتاژ مرجع	(۰/۸ تا ۱/۲) برابر ولتاژ نامی تحت گام‌های ۰/۰۱
دقت مقدار *pick-up*	±۲ درصد (نسبت ولتاژ به فرکانس نامی)
رنج فرکانس	۰/۵ تا ۱/۲ برابر فرکانس نامی
نرخ تنظیم مجدد	۱۰۰ درصد
زمان شروع	کمتر از ۱۲۰ میلی‌ثانیه

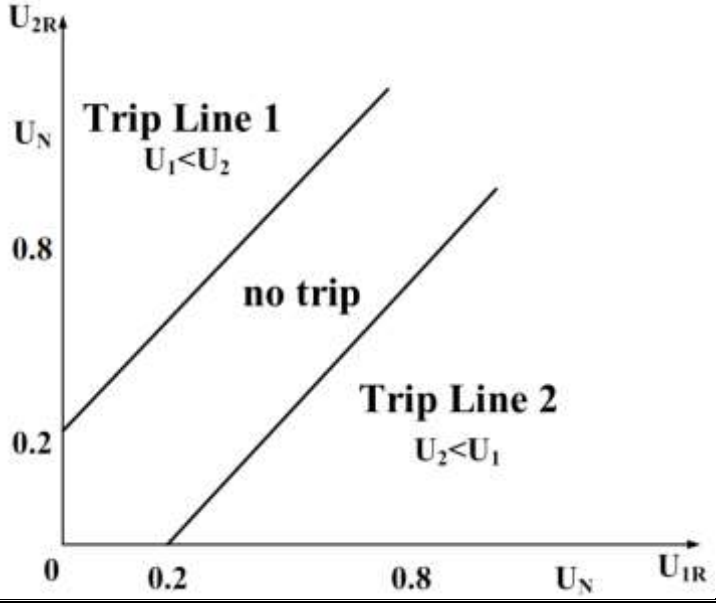
جدول ۳-۳۴ تابع تعادل ولتاژ (Voltage balance function)

امکانات و ویژگی‌ها: • مقایسه دامنه ولتاژ دو ورودی ولتاژ مختلف (ورودی ۱، ورودی ۲) • اندازه‌گیری ولتاژ تک‌فاز و یا سه‌فاز • ارسال سیگنال‌های مختلف پس از مقایسه ولتاژ در ورودی‌های مختلف • سنجش میزان اختلاف ولتاژ در فازهای مختلف برای حالت ۳ فاز سیستم و یا استفاده از تابع منطقی *OR* برای تصمیم‌گیری • جلوگیری از افزایش دامنه هارمونیکی در مرتبه‌های مختلف

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- جلوگیری از افزایش نقش مؤلفه‌ی *dc*

مشخصه مربوط به مقایسه تریپ‌های مختلف ولتاژ برای فاز *R* و حداکثر اختلاف مجاز ۰/۲ برابر ولتاژ نامی):



تنظیمات موردنیاز:	
اختلاف ولتاژ	(۰/۱ تا ۰/۵) برابر ولتاژ نامی تحت گام‌های ۰/۰۵
تأخیر تریپ (*Trip*)	۰ تا ۱ ثانیه تحت گام‌های ۰/۰۱ ثانیه‌ای
نرخ تنظیم مجدد	بالاتر از ۹۰ درصد
دقت مقدار *pick-up*	±۴ درصد (در ولتاژ و فرکانس نامی)
تعداد فازها	تک‌فاز یا سه‌فاز
U_{1R}	دامنه ولتاژ فاز *R* (متصل به ورودی ۱)
U_{2R}	دامنه ولتاژ فاز *R* (متصل به ورودی ۲)
زمان شروع	کمتر از ۵۰ میلی‌ثانیه

جدول ۳-۳۵ ایزوله سازی ژنراتورهای معیوب (Dead machine protection)

امکانات و ویژگی‌ها:

- جداسازی آنی ماشین‌های دچار خطاشده از شبکه
- اندازه‌گیری آنی اضافه جریان
- بررسی لحظه‌ای دامنه‌ی ولتاژ و ارسال آلارم در محدوده‌ی پایین‌تر از ۰/۸۵ ولتاژ نامی.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

این تابع معمولاً به‌صورت مستقل استفاده نمی‌شود و از ترکیب توابع ولتاژ، جریان و زمان قابل‌دستیابی است.	
تنظیمات موردنیاز:	
ولتاژ	(۰/۰۱ تا ۲) برابر ولتاژ نامی تحت گام‌های ۰/۰۰۲
زمان تنظیم مجدد	۰ تا ۶۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۰۱ ثانیه‌ای
جریان	(۰/۰۲ تا ۲۰) برابر جریان نامی تحت گام‌های ۰/۰۲
تأخیر	۰/۰۲ تا ۶۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۰۱ ثانیه‌ای

جدول۳-۳۶ حفاظت از استاتور در برابر خطای زمین

امکانات و ویژگی‌ها: • حفاظت از تمام سیم‌پیچی‌های استاتور • مناسب برای سیستم‌های حفاظتی با دو نقطه اتصال به زمین • بررسی دائمی عایق‌های به‌کاررفته • محاسبه‌ی مقاومت زمین در نقاط خطادار • ارسال آلارم و هشدار در صورت وقوع خطای زمین در نمایشگر	
روش‌های ایزوله (زمین) کردن: • اتصال نقطه ستاره سیم‌پیچ با مقاومت • اتصال نقطه ستاره سیم‌پیچ با استفاده از ترانسفورماتور	
تنظیمات موردنیاز:	
محدوده‌ی ارسال هشدار	۱۰۰ اهم تا ۲۰ کیلو اهم تحت گام‌های ۰/۰۱ کیلو اهم
تأخیر	۰/۲ تا ۶۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۱ ثانیه‌ای
بازه‌ی تریپ	۱۰۰ اهم تا ۲۰ کیلو اهم تحت گام‌های ۰/۰۱ کیلو اهم
تعداد نقاط ستاره	۲
مقاومت زمین نقطه ستاره اول (R_{ES-1})	۴۰۰ اهم تا ۵ کیلو اهم تحت گام‌های ۰/۰۱ کیلو اهم
مقاومت زمین نقطه ستاره دوم (R_{ES-2})	۹۰۰ اهم تا ۳۰ کیلو اهم تحت گام‌های ۰/۰۱ کیلو اهم
نرخ تنظیم مجدد	۱۱۰ درصد برای مقادیر کمتر از۱۰ کیلو اهم
زمان شروع	۱/۵ ثانیه
الزامات ضروری برای عملکرد تابع حفاظتی:	
حداکثر جریان نقطه زمین	کمتر از ۲۰ آمپر (ترجیحاً برابر ۵ آمپر)
ظرفیت خازنی نقطه زمین استاتور	۰/۵ تا ۶ میکروفاراد
مقاومت موازی نقطه زمین استاتور	۱۳۰ تا ۵۰۰ اهم
مقاومت سری نقطه زمین استاتور	۷۰۰ اهم تا ۵ کیلواهم

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

جدول۳-۳۷ حفاظت از روتور در برابر خطای زمین

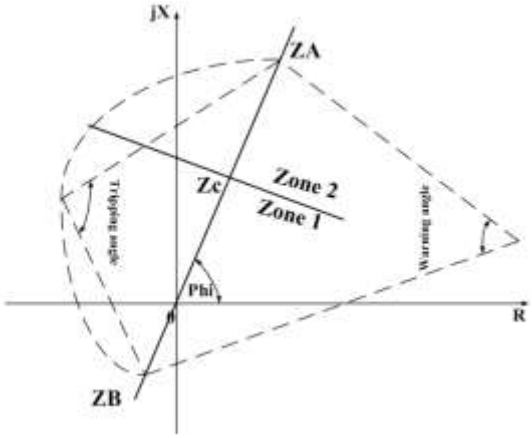
امکانات و ویژگی‌ها: • بررسی دائمی عایق‌های به‌کاررفته • محاسبه‌ی مقاومت زمین در نقاط خطادار • ارسال آلارم و هشدار در صورت وقوع خطای زمین در نمایشگر	
تنظیمات موردنیاز:	
محدوده‌ی ارسال هشدار	۱۰۰ اهم تا ۲۵ کیلو اهم تحت گام‌های ۰/۱ کیلو اهم
تأخیر	۰/۲ تا ۶۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۱ ثانیه‌ای
بازه‌ی تریپ	۱۰۰ اهم تا ۲۵ کیلو اهم تحت گام‌های ۰/۱ کیلو اهم
مقاومت زمین نقطه ستاره اول (R_{EP})	۹۰۰ اهم تا ۵ کیلو اهم تحت گام‌های ۰/۰۱ کیلو اهم
ظرفیت کوپلینگ	۲ تا ۱۰ میکروفاراد
نرخ تنظیم مجدد	۱۱۰ درصد برای مقادیر کمتر از۱۰ کیلو اهم
زمان شروع	۱/۵ ثانیه
الزامات ضروری برای عملکرد تابع حفاظتی:	
ظرفیت خازنی کل در نقطه زمین‌شده روتور	۲۰۰ نانوفاراد تا ۱ میکروفاراد
مقاومت موازی نقطه زمین روتور	۱۰۰ تا ۵۰۰ اهم
مقاومت سری نقطه زمین روتور	۹۰۰ اهم تا ۵ کیلواهم
ثابت زمانی	مقاومت سری * ظرفیت خازنی نقطه زمین (۳ تا ۱۰ میلی ثانیه)

جدول ۳-۳۸ حفاظت لغزش قطب

امکانات و ویژگی‌ها: • ثبت تحرکات قطب‌ها از ۰/۲ هرتز تا ۸ هرتز • زاویه‌ی هشدار قابل تنظیم برای حرکت قطب‌ها • تنظیم تعداد لغزش‌ها بر اساس الزمات موردنیاز

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مشخصه تابع مورد نظر



تنظیمات موردنیاز:	
امپدانس سیستم (Z_A)	(صفر تا ۵) برابر نسبت ولتاژ نامی به جریان نامی تحت گام‌های ۰/۰۰۱
امپدانس ژنراتور (Z_B)	(۵- تا صفر) برابر نسبت ولتاژ نامی به جریان نامی تحت گام‌های ۰/۰۰۱
امپدانس اولین گام (Z_C)	(صفر تا ۵) برابر نسبت ولتاژ نامی به جریان نامی تحت گام‌های ۰/۰۰۱
زاویه *phi*	۶۰ تا ۲۷۰ درجه با گام یک درجه
زاویه هشدار (*warning angle*)	۰ تا ۱۸۰ درجه با گام یک درجه
زاویه تحریک (*tripping angle*)	۰ تا ۱۸۰ درجه با گام یک درجه
زمان شروع مجدد در هر گام	۰/۵ تا ۲۵ ثانیه

جدول ۳-۳۹ تابع توان (Power function)

امکانات و ویژگی‌ها:

- اندازه‌گیری توان اکتیو و ظاهری
- اجرای عملکرد حفاظتی بر اساس هر دو توان اکتیو و ظاهری
- جلوگیری از وقوع توان معکوس در ماشین‌ها
- کنترل اضافه و کمبود توان از حد نرمال
- امکان اندازه‌گیری تک‌فاز، دوفاز و سه‌فاز

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

• جلوگیری از وقوع هارمونیک‌های مختلف با دامنه بیش از حد نرمال در سیستم • جبران خطاهای فاز توسط ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان در ورودی سیستم قدرت
تنظیمات موردنیاز:

توان *pick-up*	(۰/۱- تا۱/۲) برابر توان نامی تحت گام‌های ۰/۰۰۵
زاویه مشخصه	۱۸۰- تا ۱۸۰ درجه با گام‌های پنج درجه‌ای
تأخیر	۰/۰۵ تا ۶۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۰۱ ثانیه‌ای
توان ظاهری نامی	(۰/۵تا ۲/۵) برابر حاصلضرب ولتاژ نامی در جریان نامی
زمان تنظیم مجدد	۳۰ تا ۱۷۰ درصد تحت گام‌های یک درصدی
حداکثر زمان عملکرد بدون وقفه	۷۰ میلی ثانیه

جدول ۳-۴۰ حفاظت خرابی بریکر (Breaker failure protection)

امکانات و ویژگی‌ها: • تشخیص فازهای سیستم به‌صورت جداگانه • عملکرد تحت سیستم‌های تک‌فاز یا سه‌فاز • دو مرحله‌ی زمانی مجزا از هم • امکان کنترل از راه دور • امکان فعال و یا غیر فعال نمودن هر یک از تریپ‌های از پیش تعریف‌شده
تنظیمات موردنیاز:

جریان	(۰/۲ تا ۰/۵) برابر جریان نامی تحت گام‌های ۰/۰۱
تأخیر برای گام اول زمانی	۰/۰۲ تا ۶۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۰۱ ثانیه‌ای
تأخیر برای گام پشتیبان	۰/۰۲ تا ۶۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۰۱ ثانیه‌ای
زمان تنظیم مجدد پس از اعمال هر تریپ	۰/۰۲ تا ۶۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۰۱ ثانیه‌ای
زمان تنظیم مجدد پس از اعمال هر تریپ پشتیبان	۰/۰۲ تا ۶۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۰۱ ثانیه‌ای
تعداد فاز	یک یا سه‌فاز

جدول ۳-۴۱ ثبت اغتشاشات رخ‌داده

امکانات و ویژگی‌ها: • وجود حداکثر نه کانال مربوط به ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان • وجود حداکثر شانزده کانال باینری • وجود حداکثر دوازده کانال آنالوگ برای اندازه‌گیری‌های داخلی تجهیزات • امکان اخذ دوازده نمونه در هر دوره‌ی زمانی با فرکانس نمونه برداری ۷۲۰/۶۰۰ هرتز برای فرکانس نامی ۶۰/۵۰

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

هرتز • امکان ثبت نمونه‌های اخذشده و همچنین خروجی‌های کانال‌های باینری از هر پنج ثانیه	
فرمت اطلاعات ذخیره‌شده	*EVE*
کیفیت (*Resolution*)	*12 bits*
رنج دینامیکی	هفتاد برابر جریان نامی / ۲/۲ برابر ولتاژ نامی
دوره‌های ثبت اطلاعات (*Recording periods*):	
Pre-event	۴۰ تا ۴۰۰ میلی‌ثانیه تحت گام‌های ۲۰ میلی‌ثانیه‌ای
Event	۱۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی‌ثانیه تحت گام‌های ۵۰ میلی‌ثانیه‌ای
Post-event	۴۰ تا ۴۰۰ میلی‌ثانیه تحت گام‌های ۲۰ میلی‌ثانیه‌ای

۱۵-۷- توابع حفاظتی کمکی (*Ancillary functions*)

جدول ۳-۴۲ توابع منطقی

توابع منطقی با چهار کانال ورودی باینری و امکان استفاده از سه الگوریتم زیر برای هر فانکشن: • گیت *OR* • گیت *AND* • گیت *flip-flop* با دو ورودی و دو ابزار کنترلی • امکان ثبت نمونه‌های اخذشده و همچنین خروجی‌های کانال‌های باینری از هر پنج ثانیه

جدول ۳-۴۳ تابع تأخیر با استفاده از گیت منطقی Integrator

• برای به تأخیر انداختن زمان *pick-up* و یا زمان تنظیم مجدد • ارائه‌ی قابلیت اعمال ورودی معکوس به تجهیزات	
تنظیمات موردنیاز:	
Pick-up / Reset time	صفر تا ۳۰۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۰۱ ثانیه‌ای
Integration	*yes / no*

جدول ۳-۴۴ بررسی منطقی سیگنال‌های ورودی (Plausibility check)

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

• استفاده از یک تابع ***plausibility check*** برای ورودی‌های سه‌فاز ولتاژ و جریان • محاسبه و تعیین دامنه و فاز هر یک از توالی‌های مثبت، منفی و صفر برای ولتاژ و جریان سه‌فاز ورودی • مقایسه لحظه‌ای مقادیر محاسبه‌شده با مقادیر استاندار تعریف‌شده برای سیستم • وجود توابع عملکردی برای جلوگیری از ورود جریان‌های بیشتر از دوبرابر مقدار نامی و ولتاژهای بیشتر از ۱/۲ برابر مقدار نامی
تنظیمات موردنیاز:

تأخیر	۰/۱ تا ۶۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۱ ثانیه‌ای
مقادیر قابل‌قبول برای دامنه ولتاژ ورودی (توالی‌های مثبت، منفی و صفر)	(۰/۰۵ تا ۱/۲) برابر ولتاژ نامی تحت گام‌های ۰/۰۵
مقادیر قابل‌قبول برای دامنه جریان ورودی (توالی‌های مثبت، منفی و صفر)	(۰/۰۵ تا ۱) برابر جریان نامی تحت گام‌های ۰/۰۵

جدول ۳-۴۵ تابع نظارت بر زمان عملکرد کلیدها (Runtime supervision)

امکانات و ویژگی‌ها:
• بررسی باز و بسته شدن تمام کلیدهای حفاظتی مانند ***circuit-breakers, isolators*** • ارسال آلارم به صفحه‌ی نمایش در صورت عدم اجرای صحیح کلیدهای حفاظتی
تنظیمات موردنیاز:

زمان تنظیم	صفر تا ۶۰ ثانیه تحت گام‌های ۰/۰۱ ثانیه‌ای
دقت محاسبه‌ی عملکرد کلیدها	± ۴ میلی‌ثانیه

جدول ۳-۴۶ مقادیر قابل‌قبول برای اعمال به ورودی توابع حفاظتی توسط دستگاه سنجش UIfPQ

متغیرهای ورودی	میزان خطای قابل‌قبول		شرایط ایدئال
	Core balance CTs	*Protection CTs*	
ولتاژ	$\pm 0.5\%\ U_N$	$\pm 1\%\ U_N$	$0.2-1.2\ U_N$ $(f = f_N)$
جریان	$\pm 0.5\%\ I_N$	$\pm 2\%\ I_N$	$0.2-1.2\ I_N$ $(f = f_N)$
توان اکتیو	$\pm 0.5\%\ S_N$	$\pm 3\%\ S_N$	$0.2-1.2\ S_N$ $0.2-1.2\ U_N$ $0.2-1.2\ I_N$ $(f = f_N)$

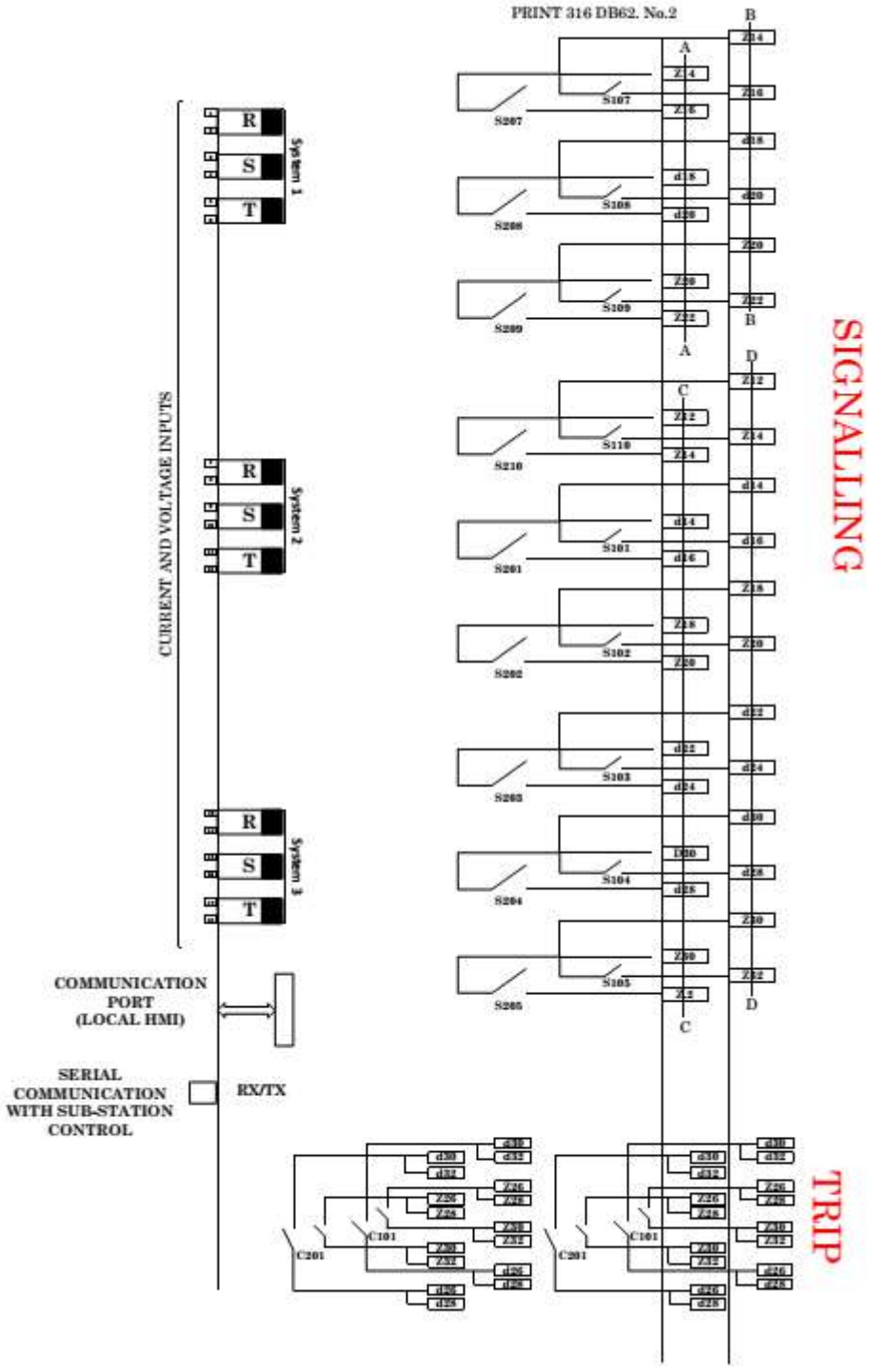
DOI: 10.30503/nripress.2020.151

توان ظاهری	$\pm 0.5\%\ S_N$	$\pm 3\%\ S_N$	
ضریب توان	± 0.01	± 0.03	$S = S_N ; f = f_N$
فرکانس	$\pm 0.1\%\ f_N$	$\pm 0.1\%\ f_N$	$0.9-1.1\ f_N$ $0.8-1.2\ U_N$

۱۶-۷- دیاگرام وایرینگ برای یک رله‌ی نمونه

دیاگرام وایرینگ بر اساس موارد متعدد بررسی‌شده برای یک رله نمونه به همراه دو ورودی خروجی در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل ۳-۱۱ دیاگرام وایرینگ رله به همراه دو ورودی خروجی

۸- تست رله‌های دیجیتال

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

انجام تست‌های پیشگیرانه برای اطمینان از صحت عملکرد تجهیزات اساسی شبکه از الزامات اساسی است. از مهم‌ترین تعمیرات و تست‌های پیشگیرانه می‌توان به بازدید دوره‌ای ژنراتورها، ترانسفورماتورهای قدرت، بریکرها و در نهایت سیستم‌های حفاظتی اشاره کرد. در انجام تعمیرات و تست‌های پیشگیرانه رعایت اصول و قواعد از پیش تعیین‌شده توسط کارشناسان فنی، الزامی است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به نحوه درست زمان‌بندی بین دو تست متوالی تجهیزات و نحوه انجام درست تست‌ها (غیرمخرب بودن تست‌ها، استفاده از تجهیزات مناسب برای تست، مشخص نمودن حداقل توابع ضروری تست، حفظ و ایمنی پرسنل در حین تست) اشاره کرد. معیارهای مورداستفاده در برنامه‌ریزی تست پیشگیرانه رله‌های حفاظتی به دو دسته معیارهای مؤثر در تنظیم فواصل تست‌های دوره‌ای و معیارهای مؤثر در انجام تست‌ها تقسیم‌بندی کرد.

۸-۱- مبانی استراتژی تست رله‌های دیجیتال

در برنامه تعمیرات پیشگیرانه و تست رله‌های استاتیکی بیشترین تمرکز برروی تست توابع رله (و به عبارت دیگر سخت‌افزار رله) قرار می‌گیرد. در حالت تست‌های نرم‌افزاری، تست توابع رله محدود به تست یک تابع و یا تنها بخش اندکی از قابلیت‌های رله خواهد بود، زیرا به علت نرم‌افزاری بودن توابع در صورت سالم بودن یک بخش آن می‌توان نسبت به سالم بودن دیگر توابع نیز اطمینان داشت. در برنامه تعمیرات پیشگیرانه رله‌های دیجیتال، سخت‌افزار رله بیشتر موردارزیابی قرار می‌گیرد. علت این امر نیز آنست که در یک رله دیجیتال مانند یک رله استاتیکی امکان بروز خطا و مستهلک شدن بخش‌هایی از آن وجود دارد. نه تنها بخش‌های مکانیکی رله مانند کنتاکت‌های خروجی و قسمت‌های مرتبط با تنظیمات رله می‌توانند دچار ضعف و خطا در عملکرد شوند بلکه بعضی از قسمت‌های الکترونیکی مانند منبع تغذیه داخلی رله، کریستال نوسان سازداخلی، قطعات فیلتر آنتی آلیاسینگ و مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال نیز از بروز خطا و مشکل در امان نیستند.

در رله‌های مدرن امروزی علاوه بر قابلیت کنترل و تست داخلی نرم‌افزار رله، بخشی از سخت‌افزار داخلی رله نیز توسط بخش «خود وارسی‌کننده» موردتست قرار می‌گیرد. رعایت این نکته در برنامه‌ریزی تست پیشگیرانه رله دارای مزایای بسیاری است. بنابراین برای هر رله دیجیتال باید سازنده بخشی‌هایی از سخت‌افزار رله که به‌صورت دائمی کنترل می‌شوند، را مشخص کند. با در نظرگرفتن نکته فوق می‌توان سخت‌افزار رله دیجیتال را به دو قسمت تقسیم کرد. قسمت اول توسط خود رله و به‌صورت داخلی موردتست و ارزیابی قرار می‌گیرد و بقیه سخت‌افزار رله که به‌صورت داخلی تست نمی‌شوند، در قسمت دوم قرار می‌گیرند. در استراتژی جدید تست این رله‌ها بیشترین تمرکز برروی بخش‌هایی از سخت‌افزار رله متمرکز می‌شود که به‌صورت داخلی موردتست و ارزیابی قرار نمی‌گیرند. با توجه به نکات فوق مانند برنامه زمان‌بندی تست رله‌های مرسوم، فاصله زمانی بین دو تست متوالی رله‌های دیجیتال نیز نمی‌توانند فاصله مشخص و ثابتی باشد.

۸-۲- معیارهای مؤثر در تنظیم فواصل تست‌های دوره‌ای

معیارهای مؤثر در تنظیم فواصل تست‌های دوره‌ای عبارت‌اند از ساختمان و نوع رله، محیط کار رله، جریان نامی رله، ولتاژ تغذیه رله، سطح ولتاژ شبکه، وجود خاصیت «خود وارسی‌کننده» در رله، ارزش و اهمیت تجهیزاتی که توسط رله موردحفاظت قرار می‌گیرند. با مدنظر قرار دادن معیارهای فوق و اثر دادن هر یک از پارامترهای موجود در برنامه

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

ریزی تست‌های دوره‌ای امکان دارد فاصله زمانی مناسب بین دو تست متوالی برای دو رله مشابه به علت قرار گرفتن در محیط های متفاوت تغییر کند.

۸-۳- معیارهای مؤثر در انجام تست‌ها

معیارهای مؤثر برای انجام تست‌های مختلف عبارت‌اند از بررسی دقت رله، بررسی سابقه عملکرد رله، استفاده از پرسنل متخصص، رعایت ایمنی پرسنل در هنگام انجام تست‌ها، رعایت اصول ایمنی تجهیزات در حین بی‌برق کردن، تست و برق‌دار کردن تجهیزات. در حال حاضر برنامه تست دوره‌ای بسیاری از تجهیزات حفاظتی به‌صورت سالیانه انجام می‌پذیرد که با اعمال معیارهای فوق، تست‌های ۲ سال یکبار برای تست دوره‌ای رله‌های حفاظتی به‌صورت‌کلی توصیه می‌شود.

۸-۴- فاصله بهینه تست‌های پیشگیرانه

به‌صورت ایدئال، انتخاب فاصله بهینه تست پیشگیرانه یک تجهیز با توجه به نیاز ضعیف‌ترین بخش آن وسیله برای انجام بازدیدهای دوره‌ای، مدت‌زمان در مدار بودن تجهیز، پیچیدگی و اهمیت تجهیز مشخص می‌گردد. با نزدیک شدن به طول عمر مؤثر یک دستگاه باید فاصله زمانی بین اجرای تست‌های پیشگیرانه کوتاه‌تر شود. در این استراتژی بهتر است برنامه تست در مورد بخش‌هایی از سخت‌افزار که احتمال آسیب دیدن بیشتری دارند با دقت تهیه و اجرا گردد. در تهیه این برنامه با تکیه بر فواصل موردنیاز برای بازدید دوره‌ای هر بخش از سخت‌افزار، برنامه تست به گونه‌ای تعیین می‌گردد که در فواصل زمانی متفاوت هر بخش به‌طور جداگانه تست شود. با اجرای این برنامه اولاً زمان خاموشی موردنیاز برای تست دوره‌ای دستگاه کاهش می‌یابد و ثانیاً در هر دوره اجرای تست فقط بخش‌های ضروری تست می‌گردند. به‌طور خلاصه برنامه تعمیر و نگهداری مطرح‌شده شامل تست حداقل توابع و حداقل سخت‌افزار رله خواهد بود. بر این اساس فاصله بین انجام تست‌ها برای رله‌های متفاوت یکسان نخواهد بود و بخش‌های متفاوت یک رله مانند گذشته یکجا و در یک‌دفعه تست نخواهد شد. به‌عنوان مثال در جدول ۴۷، یک نمونه برنامه تست برای یک رله دیجیتال که دارای ۶ بخش سخت‌افزاری است، ارائه شده است. به غیر از ۲ بخش ۴و۵ که به‌صورت دائم توسط بخش «خود وارسی‌کننده» رله بازرسی می‌گردند چهار بخش باقی‌مانده موردتست قرار نمی‌گیرند. با توجه به وضعیت و اهمیت هر بخش و مدت‌زمانی که تجهیز نیاز به بازرسی ندارد فواصل تست ۳،۲ و۴ ساله در نظر گرفته شده است. برای نمونه در جدول‌های ۴۸ و ۴۹ نمونه‌ای از برگ‌های تست موردنیاز برای رله‌های دیفرانسیل ترانسفورماتور و اضافه جریان با زمان معکوس ارائه شده است.

جدول ۴۷: برنامه نمونه برای تست یک رله دیجیتال

	زمان بازدید و تست دوره ای (سال)						
	۸۲	۸۳	۸۴	۸۵	۸۶	۸۷	۸۸
نرم‌افزار	√						
سخت‌افزار –بخش۱	√		√		√		√
سخت‌افزار –بخش۲	√				√		

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

سخت‌افزار –بخش۳	√		√		√		√
سخت‌افزار –بخش۴	√			√			√
سخت‌افزار –بخش۵	**توسط قابلیت"خود وارسی‌کننـــده رلـــه"بـــه‌صـــورت مرتب موردتست قرار می‌گیرند.**						
سخت‌افزار –بخش۶							

جدول ۳-۴۸ برگ آزمایش رله دیفرانسیل تراسفورماتور

تاریخ تست قبلی: تاریخ آزمایش:

الف) مشخصات ترانسفورماتور

نام و شماره ترانسفورماتور: نسبت تبدیل ترانسفورماتور: قدرت نامی:

گروه برداری: نسبت تبدیل *CT* جریان اولیه: نسبت تبدیل *CT* جریان ثانویه:

نسبت تبدیل *CT* جریان ثالثیه: نسبت تبدیل *CT* جریان جریان کمکی اولیه:

نسبت تبدیل *CT* جریان جریان کمکی ثانویه: نسبت تبدیل *CT* جریان جریان کمکی ثالثیه:

ب) مشخصات رله

نوع رله: نام سازنده: شماره سریال:

ج) تنظیمات رله:

جریان کمکی تنظیمی *Idiff*>: جریان کمکی تنظیمی *Idiff*>>:

شیب مرحله اول (*m1*): شیب مرحله دوم (*m2*): محل شروع شیب دوم:

TIME TEST Idiff >>	*TIME TEST Idiff >*
120% *Is*	*120%* *Is*
TR (ms)	*TR (ms)*
TM (ms)	*TM (ms)*

Is: جریان تنظیم شروع عملکرد رله

د) تست عملکرد رله:

ALARM TEST: *TRIP TEST:*

SUBSTATION FAULT & EVENT RECORDER TEST:

OPERATE: *LOCKOUT RELAY:*

ON LOAD TEST

Vdc:

I2A *I3A* *I2B* *I3B* *I2C* *I3C*

I restraint 1 *I restraint 2* *I restraint 3*

ب) تنظیمات رله:

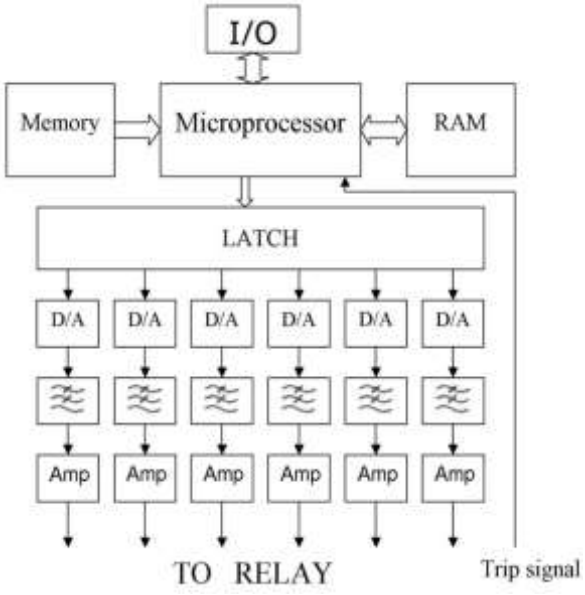
جریان تنظیمی: آمپر: ضریب زمان تنظیمی: نوع منحنی زمانی: جریان تنظیم آنی:

PICK UP TEST

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۸-۵- دستگاه میکروپروسسوری تست‌کننده رله‌های دیجیتال

طرح عمومی یک دستگاه تست میکروپروسسوری رله در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است. داده‌های مربوط به خطای سیستم قدرت که قبلاً محاسبه شده است به یک مبدل دیجیتال به آنالوگ (DAC) فرستاده می‌شود که به تقویت‌کننده‌های مناسب ولتاژ و جریان که قادر به تهیه سطوح واقعی ورودی رله هستند، متصل شده‌اند. سپس داده‌های شبیه‌سازی سری زمانی بر روی دیسک سیستم ذخیره می‌شوند. یک شبیه‌سازی خطا با دقت بالا به نرم‌افزار پیچیده‌ای نیاز دارد که معمولاً روی رایانه اجرا می‌شود و سپس به‌دستگاه تست‌کننده توسط دیسک، پورت سریال و... منتقل می‌شود. وظیفه پردازشگر دستگاه تست، انتقال داده از دیسک به DAC در فرکانس نمونه برداری موردنیاز است. ازآنجاکه فرکانس‌های نمونه برداری می‌توانند به بالاتر از ۱۲ کیلوهرتز نیز برسند معمولاً داده‌های شبیه‌سازی ابتدا به حافظه پردازشگر (RAM) و سپس به DAC انتقال داده می‌شوند تا بر مشکل محدودیت سرعت دسترسی پایین درایوهای دیسک غلبه کنند. طول کلمه DAC باید حداقل برابر و باید بزرگ‌تر از طول کلمه مبدل آنالوگ به دیجیتال به‌کاررفته در رله تحت تست باشد. DAC موجود در دستگاه‌های تست رله، طول کلمه‌ای برابر ۱۶ بیت دارند. وظیفه مهم دیگر برای ریزپردازنده تبدیل نمونه‌های داده، که معمولاً به‌صورت عددهایی با ممیز شناور هستند، به مقادیر ۱۶ بیتی مناسب برای DAC هاست. قبل از هر یک از DAC یک قفل (LATCH)، یعنی ذخیره ساده یک کلمه‌ای، وجود دارد. این مورد برای اطمینان از این است که همه خروجی‌های DAC از یک نمونه به نمونه بعدی دقیقاً در یک لحظه تغییر می‌کنند. پردازنده، هر قفل را با داده مربوطه بارگیری می‌کند و سپس به تمامی DAC ها فرمان می‌دهد که به‌طور همزمان با استفاده از دستور خط CONVERT مشترک تبدیل موردنظر را انجام دهند. یک فیلتر پایین‌گذر بعد از DAC قرار داده می‌شود تا پله‌های موجود در موج آنالوگ را که بر اثر تغییرات از یک نمونه به نمونه دیگر است، حذف کند. این فیلتر در اصل شبیه به فیلتر ضد تشابهی استفاده‌شده در واحد ورودی رله دیجیتال عمل می‌کند. فیلتر دارای پهنای باند گذاری از dc تا نصف فرکانس نمونه برداری خروجی است.



شکل ۳-۱۲ ساختار دستگاه میکروپروسسوری تست‌کننده رله‌های دیجیتال

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

آخرین عنصر از دستگاه تست، تقویت‌کننده خروجی است. تقویت‌کننده‌های ولتاژ، یک ولتاژ خروجی به‌طور نمونه ۱۱۰ ولت می‌دهند. تقویت‌کننده‌های جریان، که به عبارت دیگر تقویت‌کننده‌های عبور هدایت هستند، قادرند پیک جریان در سطح ۱۰۰ آمپری تولید کنند. دستگاه تست نشان‌داده‌شده در شکل، شش کانال خروجی دارد، سه تا برای ولتاژ و سه تا برای جریان و بنابراین قادر است رله حفاظت لغزش قطب را تست کند. هر چند با اضافه کردن کانال‌های بیشتر و تقویت‌کننده‌های مختلف می‌تواند هر رله‌ای را تست کند. علاوه بر سیگنال‌های خروجی به رله، یک سیگنال ورودی برای دستگاه تست به‌کار می‌رود تا کنتاکت‌های رله تریپ را ثبت کنند. این مورد به‌دستگاه تست اجازه می‌دهد که زمان عملکرد رله را به دقت نظارت کند. یک واسط کاربر در دستگاه تست گذاشته شده است که معمولاً به شکل یک صفحه نمایش و یک صفحه کلید است. این تجهیزات تست رله علاوه بر این قادرند با داده‌های گرفته‌شده از سیستم واقعی توسط یک ثبات خطای دیجیتال رله‌ها را تست کنند.

۶-۸- دستگاه تست OMICRON CMC256 plus

این دستگاه یکی از محصولات شرکت omicron است که جهت تست رله‌های حفاظتی به‌کار می‌رود. این دستگاه توسط برق شهری ۲۳۰ ولت متناوب که حداکثر تا ۴۰۰ ولت نیز قابل‌تغذیه است، راه‌اندازی می‌شود. در این دستگاه تعداد ۴ عدد خروجی ولتاژ صفر تا ۳۰۰ ولت و ۶ عدد خروجی جریان صفر تا ۱۲/۵ آمپر که با موازی کردن امکان دستیابی به ۳ خروجی وجود دارد همچنین این دستگاه دارای یک ولتاژ کمکی مستقیم است که در برخی از آزمایشات جهت تغذیه رله مورداستفاده قرار می‌گیرد. در این دستگاه ۴ عدد خروجی برای متغیرهای باینری نیز تعبیه شده است، که هم می‌توان توسط نرم‌افزار رابط از آنها استفاده کرد و هم به‌صورت مستقیم به‌صورت ولتاژی به‌کار برد. در روی پنل دستگاه ۱۰ عدد سوکت برای متغیرهای باینری ورودی تعبیه شده است که از این درگاه‌ها برای اتصال خروجی‌های رله‌های حفاظتی استفاده می‌شود. این دستگاه تست توسط یک پورت LPT1 به کامپیوتر متصل می‌شود و با نرم‌افزار نصب‌شده جهت انجام تست‌های مختلف هماهنگ می‌شود. نمای فیزیکی دستگاه در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱۳ دستگاه تست Omicron CMC 256 plus

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

نرم‌افزار تجاری omicron Test universe به‌عنوان اینترفیس نصب‌شده بـر روی کـامپیوتر جهـت کنتـرل بخـش سخت‌افزاری و اعمال تست‌های مختلف به‌کار می‌رود. این نرم‌افزار دارای سه بخش اصلی است که در ادامه هر یک بـه اختصار توضیح داده شده‌اند:

- Test modules

این بخش از جریان شامل بسته‌های مختلف نرم‌افزار جهت تست تابع های حفاظتی است. قابلیت‌هـای تعبیـه‌شـده در این بخش شامل تزریق سریع جریان و ولتاژ به رله، تست تریپ رله، ایجاد یک سری متـوالی تزریـق جریـان و ولتـاژ، تست مقادیر pick up، تست منحنی مشخصه تابع دیفرانسیل، تست رله‌های سنکروچک هستند.

- Control Center

این بخش از نرم‌افزار جهت تست کلیه توابع موجود در رله استفاده می‌شود. در این بخش می‌توان از قالب‌هـای پـیش فرض موجود در نرم‌افزار، و یا طرح‌های مخصوص استفاده نمود.

- Miscellaneous

از این بخش جهت اعمال دستورات مختلف از جمله روشن و خاموش کـردن ولتـاژ لینـک DC و یـا دیـدن وضـعیت ورودی‌های باینری استفاده کرد.

دستگاه omicron متداول‌ترین راه برای تست رله‌های مختلف در تمام جهان به‌شمار می‌آید، بنابراین آمـوزش کامـل آن نیازمند کسب تجارب مختلف در زمینه‌ی سیستم‌های حفاظتی است. در ادامه و به‌صورت تیتروار قابلیت‌های مهـم این دستگاه جهت تست رله‌های حفاظتی با توابع مختلف و پیشرفته بیان شده است:

- ✓ Numerical relays
- ✓ Static relays
- ✓ IEC 61850 IEDs
- ✓ Electromechanical relays
- ✓ Relay panels
- ✓ End-to-End testing with GPS or IRIG-B
- ✓ Wide area protection
- ✓ CB simulation
- ✓ CT/VT polarity checker
- ✓ Event recording
- ✓ Harmonics analysis

۷-۸- لیست آزمایشات رله‌های حفاظتی

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

در جدول ۵۰ لیست تمامی آزمایشات متداول موردنیاز برای تست رله‌های حفاظتی بر اساس استاندارد IEC 60255-1 ارائه شده است.

جدول ۳-۵۰ برگ آزمایش رله اضافه جریان با زمان معکوس

ردیف	شماره استاندارد فنی موجود	آیتم‌های موردآزمایش
	الزامات عملکردی:	
۱	*IEC 60255-100 Series Clause: 6.5, 6.7*	*Steady state requirements*
۲	*IEC 60255-100 Series Clause: 6.8*	*Dynamic simulation*
	الزامات ایمنی محصول:	
۳	*IEC 60255-1 Clause: 6.4* *IEC 60255-27 Clause: 10.5.2.2*	*Verification or measurement of clearance and creepage distance*
۴	*IEC 60255-1 Clause: 6.3* *IEC 60255-27 Clause: 10.5.2.3* *IEC 60529*	*IP rating*
۵	*IEC 60255-1 Clause: 6.4* *IEC 60255-27 Clause: 10.5.3.1*	*Impulse voltage*
۶	*IEC 60255-1 Clause: 6.4* *IEC 60255-27 Clause: 10.5.4.5*	*Single fault condition*
۷	*IEC 60255-1 Clause: 6.4* *IEC 60255-27 Clause: 10.5.3.4.1*	*Protective bonding resistance*
	آزمایشات الکتریکی:	
۸	*IEC 60255-1 Clause: 6.4* *IEC 60255-27 Clause: 10.5.4.1*	*Maximum temperature of parts and materials*
۹	*IEC 60255-1 Clause: 6.4* *IEC 60255-27 Clause: 10.5.4.3*	*Thermal short time*
۱۰	*IEC 60255-1 Clause: 6.4* *IEC 60255-27 Clause: 10.5.4.4*	*Output relay, make and carry*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

	تست‌های *EMC*:	
۱۱	*IEC 60255-26* *IEC 60255-1 Clause: 6.15* *IEC 60255-25*	*Radiated emission*
۱۲	*IEC 60255-26* *IEC 60255-1 Clause: 6.15* *IEC 60255-25*	*Conducted emission*
۱۳	*IEC 61000-4-16* *IEC 60255-1 Clause: 6.15* *IEC 60255-26 & IEC 60255-22-7*	*Power frequency immunity (BI only) +Verification of function*
۱۴	*IEC 61000-4-5* *IEC 60255-1 Clause: 6.15* *IEC 60255-26 & IEC 60255-22-5*	*Surge immunity tests +Verification of function*
۱۵	*IEC 60255-26* *IEC 60255-1 Clause: 6.15* *IEC 61000-4-18 & IEC 60255-22-1*	*1MHz burst immunity tests -damp oscillatory* *waves +Verification of function*
۱۶	*IEC 60255-26* *IEC 60255-1 Clause: 6.15* *IEC 61000-4-18 & IEC 60255-22-1*	*Electrical fast transient/burst immunity (EFT) +Verification of function*
۱۷	*IEC 61000-4-2* *IEC 60255-1 Clause: 6.15* *IEC 60255-22-2 & IEC 60255-26*	*Electrostatic discharge (ESD) +Verification of function*
۱۸	*IEC 61000-4-8* *IEC 60255-1 Clause: 6.15* *IEC 60255-26*	*Power frequency magnetic field +Verification of function*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۹- پروتکل‌های مخابراتی

پروتکل مجموعه قوانین لازم برای برقراری و تبادل اطلاعات بین دو سیستم تحت شبکه است. OSI (Open System Interconnection) و TCP/IP از معروف‌ترین و پراستفاده‌ترین پروتکل‌های مخابراتی در حوزه‌ی سیستم‌های قدرت هستند. این مدل‌ها توسط IEEE ایجاد شده و امکان برقراری ارتباط بین دستگاه‌های ساخته‌شده توسط تولیدکنندگان مختلف را فراهم می‌کنند. طبق شکل ۳-۱۴، مدل OSI از هفت لایه تشکیل شده است که از پایین به بالا شماره‌گذاری می شوند. هر یک از این لایه‌ها در سیستم مبدأ با لایه متناظر خود در سیستم مقصد در ارتباط است. در سیستم مبدأ این لایه‌ها از بالا به پایین اطلاعات موردنیاز لایه زیرین خود را فراهم می‌کنند و در سیستم مقصد از پایین به بالا، لایه‌ها اطلاعات موردنیاز لایه بالایی را فراهم می‌کنند. در ادامه هر یک از لایه‌ها و برخی از پروتکل‌های معروفی که در آنها استفاده می‌شوند توضیح داده شده است.

- لایه هفتم Application Layer :

لایه Application در مدل OSI یک واسط کاربری است که مسئول نمایش اطلاعات ارسالی و دریافتی از یک اپلیکیشن به‌کاربر است. این لایه اپلیکیشن ها و فرایندهای کاربر نهایی را پشتیبانی می‌کند. در این لایه دوطرف ارتباط (تقاضادهنده و پاسخ‌دهنده) مشخص شده، احراز هویت و حریم خصوصی کاربر و هرگونه محدودیت در ترکیب و ساختار اطلاعات در نظر گرفته می‌شود. هرچیزی در این لایه بر مبنای خواست کاربر و اپلیکیشن مشخص می‌شود. در این لایه اطلاعات برای ورود به لایه Presentation، قطعه قطعه می‌شوند و سپس نقطه مقصد، آنچه را که از لایه Presentation تحویل می‌گیرد، را به ترتیب بهم متصل کرده تا اصل اطلاعات به‌دست آید. نظارت بر Error Recovery و Flow control در این لایه صورت می‌پذیرد. Flow control زمانی اهمیت پیدا می‌کند که سرعت ارسال داده از سرعت دریافت داده بالاتر باشد و در صورت کنترل نشدن جریان، ممکن است برخی از داده‌های دریافت‌شده از بین بروند و یا دریافت نشوند. برخی از پروتکل‌های معروف‌ای لایه عبارت‌اند از:

Network Time Protocol (NTP)

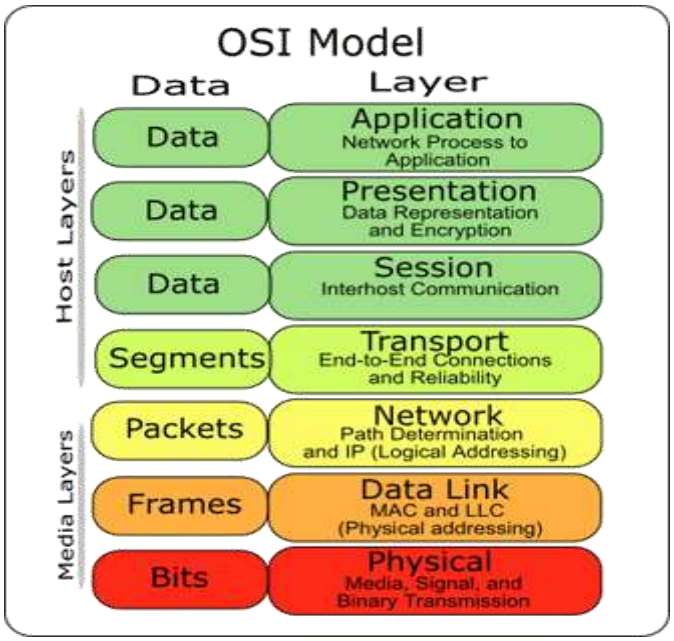
Simple Network Management Protocol (SNMP)

Telnet

Finger

File Transfer Protocol (FTP)

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل ۳-۱۴ مدل OSI

- **لایه ششم Presentation Layer**:

نحوه نمایش اطلاعات رمزگذاری‌شده و پکت‌بندی بر عهده این لایه است. یعنی اینکه اطلاعات چه‌گونه رمزنگاری شوند تا با سیستم عامل هر بخش هماهنگ شوند بر عهده این لایه است. این لایه اطلاعات دریافتی از لایه Application را از فرمت Application به فرمت شبکه ترجمه می‌کند. در طرف دیگر نیز این لایه دیتا را طوری تغییر فرم می‌دهد تا توسط لایه Application قابل‌پذیرش و فهم باشد. استاندارد کدها مثل ASCII-Unicode-EBCDIC در این لایه قرار دارند و اگر کامپیوترها از استاندارد کدهای مختلف استفاده کنند در این لایه تبدیل و قابل‌استفاده خواهد شد. پروتکل‌های مورداستفاده در این لایه عبارت‌اند از:

SSL (Secure Socket Layer): پروتکلی است که توسط شرکت Netscape برای رد و بدل کردن سندهای خصوصی از طریق اینترنت توسعه یافته‌است. SSL از یک کلید خصوصی برای به رمز درآوردن اطلاعاتی که بر روی یک ارتباط SSL منتقل می‌شوند استفاده می‌کند.

TLS (Transport Layer Security): یکی از پروتکل‌های رمزنگاری است و برای تأمین امنیت ارتباطات از طریق اینترنت و بر پایه SSL بنا شده‌است.

- **لایه پنجم Session Layer** :

این لایه مسئول برقراری، مدیریت و پایان بخشی به ارتباطات بین اپلیکیشن هاست. در واقع این لایه تبادلات و دستورات صورت‌گرفته بین اپلیکیشن ها در دو طرف ارتباط را ایجاد و مختصات‌بندی کرده و در نهایت پایان می‌بخشد. پروتکل‌های مورداستفاده در این لایه عبارت‌اند از:

SDP(Session Description Protocol): این پروتکل برای توصیف session های ارتباطی مالتی مدیا در نظر گرفته شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

SAP (Session Announcement Protocol): یک پروتکل آزمایشگاهی برای Broadcast کردن اطلاعات است.

- **لایه چهارم Transport Layer:**

لایه فوق مسئول پشتیبانی کنترل جریان داده‌ها و و بررسی خطا و بازیابی اطلاعات بین دستگاه‌های متفاوت است. کنترل جریان داده‌ها، بدین‌معنی است که لایه فوق درصورتی‌که اطلاعاتی از چندین برنامه ارسال شده باشد، داده‌های مربوطه به هر برنامه را به یک stream آماده تبدیل می‌کند تا در اختیار شبکه فیزیکی قرار داده شوند و به‌طورکلی وظیفه این لایه به شرح زیر است:

- ✓ حمل مطمئن داده
- ✓ ایجاد، مدیریت و خاتمه مدارات مجازی
- ✓ تشخیص و برطرف نمودن خطا

همچنین پروتکل‌های مورداستفاده در این لایه عبارت‌اند از: TCP، UDP و SPX.

- **لایه سوم Network Layer :**

در لایه فوق روش ارسال داده‌ها برای دستگاه گیرنده تعیین خواهد شد. پروتکل‌های منطقی، روتینگ و آدرس‌دهی نیز در این لایه انجام می‌شود. به‌طورکلی وظایف این لایه عبارت‌اند از:

- ✓ روتینگ
- ✓ پاسخ به سوالات متعددی همچون نحوه ارتباط سیستم‌های موجود در سگمنت‌های متفاوت شبکه
- ✓ subnet آدرس‌های مبدأ و مقصد و تشخیص مسیر لازم پروتکل‌های IPX , IP در این لایه استفاده می‌شوند.

- **لایه دوم Data Link Layer:**

پروتکل‌های فیزیکی در این لایه به داده‌های ارسال‌شده، اضافه خواهند شد. در این لایه نوع شبکه و وضعیت بسته‌های اطلاعاتی (Packet) نیز تعیین می‌شوند. وظایف اصلی این لایه عبارت‌اند از:

- ✓ انتقال مطمئن داده از طریق محیط انتقال
- ✓ آدرس‌دهی فیزیکی و یا سخت‌افزاری(MAC)
- ✓ توپولوژی شبکه

- **لایه اول Physical Layer :**

لایه فیزیکی، در مقایسه با سایر لایه‌ها پیچیدگی خاصی ندارد و تنها مسئولیتی که دارد ارسال بیت‌ها از طریق انتقال‌دهنده بی‌سیم یا سیمی است. این بیت‌ها می‌توانند در قالب طول موج در نوع وای‌فای یا ولتاژ روی حالت سیمی (اترنت یا زوج کابل‌های به‌هم تابیده) یا نوری از طریق کابل‌های فیبرنوری انتقال پیدا کنند. در حقیقت، تنها دو لایه پیوند داده و لایه فیزیکی باید جزئیاتی در ارتباط با نحوه انتقال بی‌سیم یا سیمی اطلاعات داشته باشند که این اطلاعات را از میان‌افزار کارت شبکه به‌دست می‌آورند. این لایه در ارتباط مستقیم با سخت‌افزار بوده و خصوصیات فیزیکی شبکه نظیر اتصالات، ولتاژ و زمان را مشخص می‌کند. پروتکل‌های مورداستفاده در این لایه عبارت‌اند از:

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

Fast Ethernet

RS232

E1

T1

ISDN

۱-۹- الزامات کانال مخابراتی برای حفاظت واحدهای نیروگاهی

- تحت شرایط عادی، تأخیر کانال مخابراتی مورداستفاده بین دو رله‌ی مشابه یا مجزا از هم واحدهای نیروگاهی باید کمتر از ۱۰ میلی‌ثانیه باشد. این شرط برای کوتاه‌ترین مسیر بین دو رله و مسیرهای جایگزین در مواقع بروز پیشامد باید برقرار باشد.
- نرخ خطای بیتی (Bit Error Rate) در شبکه‌های فیبر نوری باید از 10^{-5} کوچک‌تر باشد.
- عدم تقارن زمانی کانال‌های رفت و برگشت اطلاعات نباید از ۱ میلی‌ثانیه بیشتر باشد.
- در صورت استفاده از شبکه‌های فیبر نوری، مسیرهای جایگزین باید شناخته‌شده باشند.
- ضروری است سوئیچ شدن مسیرهای رفت و برگشت با هم صورت پذیرد.
- در صورت عدم استفاده از تجهیزات مخابراتی کلاس حفاظتی باید از سوئیچ شدن به مسیر جایگزین اجتناب شود. قابل‌ذکر است که در این صورت، قطع شدن مسیر اصلی باعث از دست رفتن ارتباط مخابراتی بین دو رله مختلف خواهد شد.
- درصورتی‌که اطلاعات از مسیری غیر از مسیرهای تعریف‌شده دریافت شود، ضروری است عملکرد رله قفل گردد و یک سیگنال آلارم فعال شود.

۱۰- سیستم پایش

۱-۱۰- قابلیت MACHsense-R در ABB

واحد اکتساب داده برای نظارت بر وضعیت موتورهای ولتاژ بالا

واحد اکتساب داده قابلیت MACHsense-R درABB، یک راه حل عالی برای تبدیل موتورهای ولتاژ بالا به‌دستگاه‌های هوشمند و متصل است. واحد اکتساب داده این امکان را به شما می‌دهد که با استفاده از سنسورهای توزیع‌شده و الگوریتم‌های پیشرفته برای آنالیز داده‌ها، بر سلامت تجهیزات خود نظارت کنید، بهینه‌سازی بازده و بهبود قابلیت اطمینان و ایمنی را انجام دهید.

موارد مورداستفاده

• موتورهای القایی ۳ فاز جریان متناوب

• وظیفه پیوسته یا متناوب

• سرعت ثابت یا سرعت متغیر

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

• برای ارتفاع شفت ۳۵۵ میلی‌متر و بالاتر

۱-۱-۱۰- پیکربندی سنسور

واحد اکتساب داده قابلیت MACHsense-R درABB با توجه به‌کاربرد، می‌تواند با تنظیمات مختلف سنسور پیکربندی شود.

• شتاب‌سنج لرزشی

• سنسورهای میدان مغناطیسی

• اندازه‌گیرهای درجه حرارت سیم‌پیچ (اگر RTD های داخلی در دسترس باشند)

۲-۱-۱۰- پارامترها

پارامترهای وضعیت یاتاقان

• لرزش کلی (سرعت RMS)

• پارامترهای عامل (فرکانس، سرعت در حال اجرا، لغزش)

• طیف لرزش

• طیف میدان مغناطیسی

• گریز از مرکز استاتیک

• محور پویا

• نوار روتور شکسته

جدول ۳-۶۱ مشخصات سیستم پایش ABB

اندازه‌گیرهای لرزش	
محدوده فرکانسی	۱ هرتز تا ۵۰ کیلوهرتز (قابل تنظیم)
وضوح	۲۴ بیت
نرخ نمونه برداری	تا ۱۰۲,۴ KS/S (کیلو نمونه بر ثانیه)
سنسورهای لرزشی	CTC M/AC192-1D 100mv/g
موقعیت‌های سنسور (موتور افقی)	DE افقی، DE عمودی، NDE افقی، بدنه افقی
ارتباطات	
ارتباطات شبکه موبایل	GPRS 3G موبایل
وای فای	802.11 a/b/g
اتصال LAN	10/100 MBPS

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

توان	
تأمین توان اضافی	110 – 240 AVC
محیط	
دما	۴۰- تا ۸۵ درجه سانتی گراد
کلاس IP	IP65
لرزش	MIL810
اندازه گیر های دما	
دمای سیم‌پیچ (RTD موردنیاز)	ورودی‌های 2/3/4 wire PT100
دمای یاتاقان (RTD اضافی موردنیاز)	ورودی‌های 2/3/4 wire PT100
مجوز / استانداردها	
	CE, RED,FCC,IC
	تنها نواحی ایمن: بدون مجوز ناحیه افقی
فیزیکی	
ابعاد	313.240.157 mm
واحد اکتساب داده	رو یا نزدیک موتور
سنسور لرزش	موقعیت‌های یاتاقان و بدنه موتور
سنسور میدان مغناطیسی	بدنه موتور

۳-۱-۱۰- قابلیت ABB در نظارت بر وضعیت موتورهای ولتاژ بالا

نظارت از راه دور بر وضعیت

قابلیت ABB در نظارت بر وضعیت موتورهای ولتاژ بالا (HV) به‌صورت پیوسته بر پارامترهای اصلی در موتورهای القایی ولتاژ بالا نظارت می‌کند. این مورد از الگوریتم‌های پیشرفته‌ای برای آنالیز داده‌ها استفاده می‌کند و توصیه‌های نگهداری و هشدارهای اولیه را ارائه می‌دهد. خرابی برنامه‌ریزی‌نشده می‌تواند به حداقل برسد، فعالیت‌های نگهداری بهینه شده و ایمنی بهبود یابد.

قابلیت ABB در نظارت بر وضعیت موتورهای ولتاژ بالا به‌کاربران این امکان را می‌دهد که از راه دور سلامت موتورهای خود را مشاهده کنند، علائم اولیه مشکلات احتمالی را ردیابی کنند و فعالیت‌های نگهداری را برای جلوگیری از خرابی برنامه‌ریزی‌نشده، برنامه‌ریزی کنند.

نظارت پیوسته بر وضعیت موتور

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

قابلیت MACHsense-R درABB به‌صورت پیوسته پارامترهای کلیدی عملیاتی و سلامتی مانند لرزش، دما و میدان مغناطیسی را درحالی‌که موتور در حال فعالیت است، کنترل می‌کند. داده‌ها به سرور امن مبتنی بر ابر انتقال می‌یابند و در آنجا به شکل رمزگذاری‌شده ذخیره می‌شوند.

الگوریتم‌های پیشرفته، مبتنی بر دانش و تجربه زیاد ABB، داده‌ها را آنالیز می‌کنند و اطلاعات معناداری را در مورد وضعیت و عملکرد موتور تولید می‌کنند. کاربران می‌توانند به راحتی از طریق پورتال وب اختصاصی به اطلاعات دسترسی یابند.

اعلان‌های ایمیل برای برنامه‌ریزی نگهداری کارآمد

اگر مقدار یک پارامتر از سطح پیش‌فرض هشدار فراتر رود، سیستم یک اعلان ایمیل و توصیه نامه نگه‌داری را برای کاربر ارسال می‌کند. این کار باعث می‌شود که زمان بیشتری برای برنامه‌ریزی نگهداری مؤثر فراهم شود و خرابی را کاهش می‌دهد.

مزایای اصلی

• **زمان فعالیت بالاتر** – فعالیت‌های نگهداری می‌توانند از قبل برنامه‌ریزی شوند تا از خرابی برنامه‌ریزی‌نشده اجتناب شود.

• **کاهش هزینه های نگهداری** - زمان و تلاش نگهداری با سیستم هشدار زودرس کاهش می‌یابد.

• **ایمنی بهبودیافته** - دسترسی ایمن به موتورهایی که در مناطق خطرناک یا دشوار قرار دارند، فراهم می‌شود.

• **طول عمر تجهیزات طولانی‌تر** – برنامه‌ریزی از قبل نگهداری از طول عمر طولانی‌تر موتور پشتیبانی می‌کند.

بر اساس قابلیت ABB در انجام راه‌حل نظارت بر وضعیت موتورهای ولتاژ بالا، ABB خدمات اضافی را ارائه می‌دهد که به مشتریان این امکان را می‌دهد که روی تجارت اصلی خود تمرکز کنند.

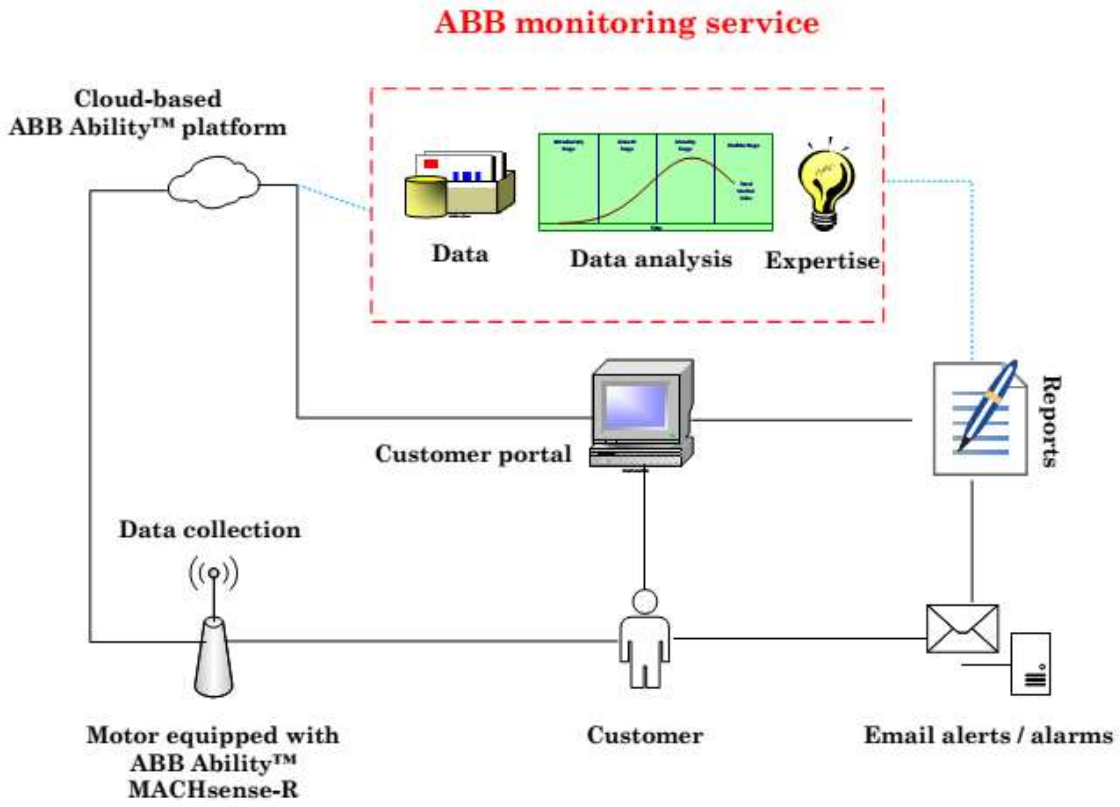
نظارت بر موتورها

با استفاده از قابلیت ABB در خدمات نظارت بر وضعیت، کاربران می‌توانند نظارت از راه دور موتورها را به ABB برسانند. در صورت ایجاد وضعیت اعلان یا هشدار، ABB فوراً با کاربر تماس خواهد گرفت تا در مورد خطا و مشکلات احتمالی، او را راهنمایی کند.

گزارش‌های کارشناس

علاوه بر این، در صورت ایجاد اعلان یا خطا توسط موتور، ABB پیشنهاد می‌کند که داده‌ها را آنالیز کرده و گزارش کاملی را با اطلاعاتی در مورد وضعیت موتور و توصیه‌های مربوط به اقدامات لازم برای نگهداری ارائه دهد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل ۳-۱۹ شمای کلی قابلیت MACHsense-R در ABB

۲-۱۰- خدمات طلایی GE

نظارت بر سلامت ژنراتور

با تکیه بر چندین دهه تجربه نظارت و تشخیص، GE خدمات مختلفی را برای صاحبان ژنراتور پیشنهاد می‌دهد. خدمات طلایی GE به لطف سنسورهای نصب‌شده دائمی و دو مرتبه آنالیز ژنراتور توسط کارشناسان جنرال الکتریک، یک راه حل تشخیص آنلاین ژنراتور را برای بهبود قابلیت اطمینان، افزایش دسترسی و کاهش هزینه نگهداری ارائه می‌دهد.

ارزیابی‌های کارشناس برای تأمین قابلیت اطمینان و آرامش خاطر

در بازارهای رقابتی امروز، قابلیت اطمینان اولویت اصلی است. اما اجزای الکتریکی و مکانیکی ژنراتورهای سالخورده، در معرض خراب شدن قرار دارند. بدون بررسی، این آسیب می‌تواند منجر به آسیب جمعی – خاموشی‌های اجباری گران و خرابی‌های غیر مترقبه شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

نظارت بر سلامت ژنراتور GE – خدمات طلایی از طریق نظارت دوره‌ای و ارزیابی وضعیت ژنراتور، می‌توانند این مسئله را برطرف کنند. خدمات GE نصب سنسورهای دائمی را انجام می‌دهند و به دنبال آن اندازه‌گیری‌ها دو مرتبه در سال انجام شده و گزارش کارشناس ارائه می‌شود.

بنابه آموزش و تجربه‌کارشناسان ژنراتور جنرال الکتریک می‌توانند از دیدگاه کارشناسی از صاحب کارخانه پشتیبانی کنند. این پشتیبانی شامل شناسایی مطمئن خطاهای قریب الوقوع، توصیه‌های مربوط به کاهش و - در صورت درخواست - کمک به برنامه‌ریزی مؤثر نگهداری، تعمیر یا جایگزینی است.

از زمان راه‌اندازی خدمات طلایی GE تقریباً در دو دهه گذشته، مشتریان در سراسر جهان از این تخصص سطح بالا، به همراه اطمینان از افزایش دسترسی و قابلیت اطمینان بهره‌مند شده‌اند.

۱-۲-۱۰- خدمات طلایی در عمل

خدمات طلایی GE به شما اجازه می‌دهند که در موردنیاز به نگهداری و زمان آن، تصمیم‌گیری آگاهانه داشته باشید. این مورد باعث می‌شود که برنامه‌ریزی و مدیریت استراتژیک عملیات، خاموشی‌ها، نیاز به قطعات یدکی و امور مالی خود را به شکل ساده‌تر انجام دهید. با افزایش قابلیت اطمینان و دسترسی ژنراتور خود، می‌توانید هزینه نگهداری را به مقدار قابل‌توجهی کاهش دهید.

پکیج تشخیص آنلاین ژنراتور GE به ترتیب دارای ماژول‌هایی برای استاتور و روتور است. پس از نصب سنسورهای دائمی، کارشناسان ژنراتور GE دو مرتبه در سال از آن بازدید می‌کنند تا در شرایط مختلف بار، با استفاده از تجهیزات GE، اندازه‌گیری را انجام دهند. نتایج در یک گزارش جامع ارائه می‌شود که شامل موارد زیر هستند:

- وضعیت کلی و قابلیت اطمینان ژنراتور
- هرگونه نقص و ضعف قریب‌الوقوع در تجهیزات
- آنالیز روند بلند مدت
- ماهیت و وسعت هرگونه تعمیر، تعمیرات اساسی یا خدمات توصیه‌شده

اندازه‌گیری

ارزیابی وضعیت خاص انجام می‌شود، تا امکان تشخیص زودهنگام خطاها را قبل از بحرانی شدن وضعیت فراهم کند.

تخلیه جزئی

برای شناسایی وخامت سیستم عایق استاتور

روش: از دستگاه‌های اتصالی استفاده می‌شود که جریان‌های تخلیه پالس مانند را ثبت می‌کنند.

آنالیز: الگوهای حل فازی Phi-Q-N برای شناسایی منابع تخلیه درون ژنراتور به‌کار می‌روند.

شار روتور

برای شناسایی خطاهای ایزولاسیون سیم‌پیچ روتور در حال چرخش

روش: یک پروب شار مغناطیسی برای اندازه‌گیری در شکاف هوا و تهیه اطلاعات در مورد نشت شار ناشی از شکاف روتور مورداستفاده قرار می‌گیرد.

آنالیز: داده اندازه‌گیری‌شده در رابطه با معیارهای تقارن بین قطب‌ها و تراکم شار نقطه صفر موردآنالیز قرار می‌گیرد. شدت سیم‌پیچ کوتاه می‌تواند اندازه‌گیری شود و سیم‌پیچ تحت تأثیر، معین می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

ولتاژ شفت

برای بررسی زمین شدن شفت و خطر فرسایش الکتریکی در یاتاقان‌ها، برای شناسایی خطاهای ایزولاسیون سیم‌پیچ روتور در حال چرخش فعال و شناسایی مسائل مربوط به ایزولاسیون یاتاقان و فرسایش شفت

روش: شفت زمینی یا پروب‌های مخصوص تماس، با اندازه‌گیری سرعت زیاد ولتاژ بین شفت و زمین، در ناحیه تماس مورداستفاده قرار می‌گیرند.

آنالیز: شکل موج‌های ثبت‌شده در حوزه زمان و فرکانس آنالیز می‌شوند.

کاربرد

هر ژنراتور توربو بزرگ ۲ یا ۴ قطبی

هر نوع ژنراتور نصب‌شده با برند OEM

محدوده

• نصب سنسورهای دائمی

• کارشناس GE هر شش ماه یک بار از سایت بازدید می‌کند تا موارد را اندازه‌گیری کند.

۲-۲-۱۰- پیشنهادات مرتبط

• خدمات طلایی یک پیشنهاد آنلاین هستند که در ژنراتور در عملکرد عادی، صورت می‌گیرند. این خدمات، خدمات تشخیص آفلاین GE را تکمیل می‌کنند، که تنها زمانی که ژنراتور در حالت آماده‌باش است، انجام می‌شوند. برای افزایش دانش در مورد خاموشی ماشین، خدمات طلایی شما را قادر می‌سازند که از ارزیابی‌های منظم با استفاده از سنسورهای نصب‌شده دائمی بهره‌مند شوید.

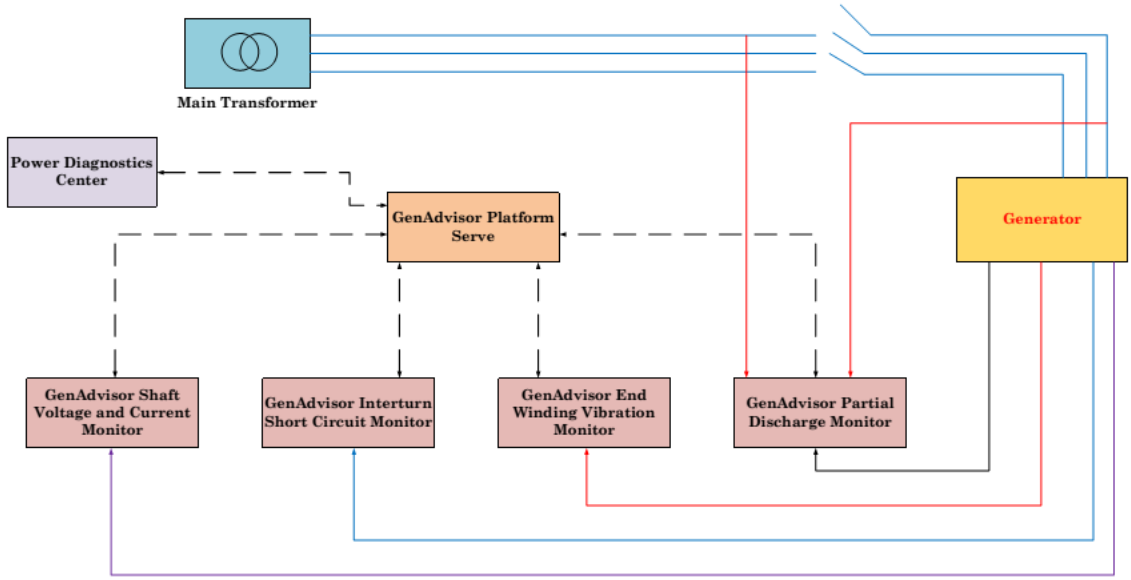
• مشتریان خدمات طلایی علاوه بر تجهیزات ارزیابی دائمی نصب‌شده می‌توانند از پشتیبانی از راه دور استفاده کرده و سطوح بعدی نظارت بر سلامت ژنراتور را انتخاب کنند.

۳-۱۰- سیستم کنترل و تشخیص GenAdviser

برای ژنراتورهای توربو

ژنراتورها و سایر مؤلفه‌های فنی طی سال‌ها در نیروگاه‌ها در حال کار هستند. فشارها و سالخوردگی ناشی از عملیات، می‌توانند موجب آسیب پی در پی در اجزای مختلف مانند سیم‌پیچ انتهایی استاتور یا عایق ولتاژ بالا شوند. انعطاف‌پذیری بیشتر الزامات در کنار افزایش تعداد شروع به‌کار و توقف، تغییرات در الزامات شبکه و همچنین بی‌ثباتی، می‌توانند در افزایش فشارها نقش داشته باشند. اگر امکان تشخیص تغییرات در مؤلفه‌ها از قبل با تشخیص طولانی مدت کار وجود داشته باشد، می‌توان از قطع برنامه‌ریزی‌نشده و نتایج گران آن اجتناب کرد و اقدامات لازم را برای تمدید عمر خدمات، مطابق برنامه انجام داد. برای بیش از بیست سال است که زیمنس، از سیستم‌هایی برای نظارت بر ژنراتورهای توربو استفاده می‌کند که در تشخیص زود هنگام آسیب‌های احتمالی در حین کار نقش دارند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل ۳-۲۰. شمای کلی سیستم کنترل و تشخیص GenAdviser

راه حل

پلتفرم ماژولار GenAdviser سیستم‌های مختلفی را برای نظارت بر ژنراتورهای زیمنس و همچنین ژنراتورهای تولیدکنندگان دیگر ارائه می‌دهد. هر سیستم می‌تواند به‌صورت جداگانه یا همراه با یک سرور مرکزی و سایر سیستم‌های نظارت مورداستفاده قرار گیرد.

پلتفرم ماژولار GenAdviser بر اساس تجربه چندین ساله توسعه یافته است و راه حل‌های سفارشی را برای اپراتورهای نیروگاه توان ارائه می‌دهد.

فرایندهای زیر می‌توانند به‌صورت پیوسته با سیستم‌های GenAdviser در حین کار بار ژنراتور نظارت و معین شوند:

- تخلیه‌های جزئی
- اتصال‌کوتاه‌های درونی در روتور
- لرزش در سیم‌پیچ‌های انتهایی استاتور
- ولتاژ در کوبش روتور و همچنین جریان از طریق برس‌های زمینی شفت

سیستم‌های نظارت GenAdviser جمع‌آوری داده‌ها، ذخیره‌سازی و تجسم داده‌های سنسور را امکان‌پذیر می‌کنند. سرور پلتفرم GenAdviser دسترسی از راه‌دور و امکان آنالیز را فراهم می‌سازد. سرور همچنین، ادغام چندین واحد نظارت را امکان‌پذیر می‌سازد، بنابراین امکان نظارت مرکزی تا بیست ژنراتور را فراهم می‌کند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

زیمنس در زمینه پکیج‌های خدمات، گزینه‌های تشخیص و آنالیز بیشتری را با کارشناسان واجد شرایط ارائه می‌دهد. داده‌های اندازه‌گیری‌شده می‌توانند به‌صورت مرتب از طریق دسترسی از راه دور ایمن موردآنالیز و ارزیابی قرار گیرند تا توصیه‌های لازم برای ادامه عملکرد نیروگاه را تعیین کنند.

خصوصیت‌ها

نظارت بر تخلیه جزئی GenAdviser

آسیب ایزولاسیون سیم‌پیچ استاتور می‌تواند با افزایش پیوسته تخلیه جزئی آشکار شود. این مورد در مراحل اولیه می‌تواند با استفاده از روش‌های فرکانس بالا شناسایی و تعیین و پایش شود و توصیه اقدامات ویژه‌ای را برای عملکرد بیشتر فراهم آورد.

نظارت بر لرزش سیم‌پیچ انتهایی استاتور GenAdviser

وضعیت سیم‌پیچ‌های انتهایی استاتور ژنراتور معمولاً با بازرسی چشمی و با تست‌های ضربه زدن موردبررسی قرار می‌گیرد. تعمیراتی که به موقع انجام نشده و یا اصلا انجام نشوند، می‌توانند باعث نیاز به سیم‌پیچی مجدد استاتور ژنراتور شوند. بنابراین نظارت بر لرزش سیم‌پیچ انتهایی، ابزار مفیدی برای ارزیابی وضعیت سیم‌پیچ‌های انتهایی استاتور ژنراتور است و می‌تواند نیاز به سیم‌پیچی مجدد را به حداقل برساند.

نظارت بر اتصال کوتاه چرخشی روتور GenAdviser

اتصال کوتاه روتور در حال چرخش به دلیل آسیب ناشی از سالخوردگی به عایق، می‌تواند در ژنراتورهایی که سالخورده‌تر هستند یا در فشار قرار دارند، رخ دهد. در بیشتر موارد، یک اتصال کوتاه چرخشی در ابتدا باعث خرابی ژنراتور نمی‌شود، اما می‌تواند اثرات نامطلوبی بر عملکرد ژنراتور داشته باشد.

نظارت بر ولتاژ شفت و جریان زمینی شفت GenAdviser

یک برس زمینی شفت در قسمت انتهایی توربین، برای جلوگیری از اثرپذیری یاتاقان‌های توربین از ولتاژ شفت تولید شده در ژنراتور و تخلیه ساختار استاتیک از توربین‌ها، روتور ژنراتور با زمین تعریف‌شده را فراهم می‌کند. نظارت بر ولتاژ شفت و جریان زمین از طریق برس‌های زمینی می‌تواند نقایص ایزولاسیون در یاتاقان‌ها و همچنین نقص عملکرد برس‌های زمینی را تشخیص دهد که می‌تواند به جلوگیری از آسیب قریب‌الوقوع کمک کند.

مزایای روش

با GenAdviser، زیمنس راه حل‌های سفارشی را برای نظارت بر قابلیت اطمینان ژنراتورها و تجهیزات ولتاژ بالا، برای استفاده‌کننده فراهم می‌کند. پیشنهادات پیشرفته مبتنی بر وضعیت ژنراتور، می‌توانند باعث شوند که قطع برنامه‌ریزی شده بهینه و کوتاه شود، زیرا تعمیرات لازم و سفارش قطعات یدکی می‌توانند از قبل طراحی شوند.

مزایای سیستم نظارت GenAdviser شامل موارد زیر باشد:

- هزینه‌های نگهداری کمتر به دلیل نگهداری مبتنی بر وضعیت

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- برآورد بهتر الزامات نگهداری با آنالیز روند
- بهینه‌سازی فواصل دوره‌های نگهداری و اقدامات نگهداری و همچنین عمر خدمت مؤلفه‌های تحت نظارت
- هشدار قبلی برای کاهش خطر قطع برنامه‌ریزی‌نشده
- تجمیع آسان در سیستم هایI&C (برای مثال SPPA-T3000) یا سیستم‌های اطلاعات نیروگاه (برای مثـال Pl Server، WinTS)
- اتصال اختیاری به مرکز تشخیص توان زیمنس برای ارزیابی / آنالیز از راه دور داده‌های اندازه‌گیری‌شده
- اکنون بیش از ۱۴۰ ژنراتور با سیستم‌های تشخیص زیمنس در حال نظارت هستند.

مراجع فاز سوم

[1] Numerical Protection and Control Devices, Operating Instructions, RE.316*4.

[2] Generator Protection Relay, Operating Instructions, P342-P345.

[3] Generator Protection Relay, Operating Instructions, P391.

[4] ABB Ability TM Condition Monitoring for HV motors.

[5] ABB AbilityTM MACHsens -RData acquisition unit for condition monitoringof high voltage motors

[6] GOLD* Service Generator Health Monitoring

[7] GenAdviser Service Generator Health Monitoring

DOI:

دستورالعمل

اهداف و تعاریف

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۱-۱- مقدمه فاز چهارم (دستورالعمل)

تداوم سرویس‌دهی مطمئن و پایدار با قابلیت اطمینان بالا در نیروگاه‌های الکتریکی نیازمند وجود سیستم‌های حفاظتی کارآمد و دقیق است. جهت حصول اطمینان از عملکرد صحیح سیستم‌های حفاظتی نیروگاه‌ها استفاده از سیستم‌های حفاظتی مناسب و همچنین در مواقع لزوم، اجرای دقیق سرویس‌ها و تست‌های دوره‌ای رله‌ها و سایر اجزای سیستم حفاظتی بر اساس دستورالعمل‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه[۲۷] ضروری است. با توجه به تنوع و گستردگی طراحی رله‌های حفاظتی موجود در نیروگاه‌ها و لزوم برنامه‌ریزی منظم و منسجم به‌منظور انجام دقیق و صحیح تست‌های دوره‌ای آن‌ها در بازه‌های زمانی مشخص و پاسخگویی به نیاز شرکت‌های مدیریت تولید نیروی برق در این خصوص، «دستورالعمل طراحی و تست سیستم‌های حفاظتی نیروگاهی» که تلفیقی از مستندات ارسالی از سوی شرکت‌های مطرح سازنده رله‌های حفاظتی، شرکت توانیر و مدیریت شبکه برق ایران است، به شرح زیر به‌منظور افزایش کارایی سیستم‌های حفاظتی موجود در شبکه و کاهش درصد عملکرد اشتباه سیستم‌های حفاظتی در حوادث مختلف ترانسفورماتورها و ژنراتورهای نیروگاهی تهیه و تدوین شده است.

۱-۲- محدوده کاربرد

این دستورالعمل در مورد تست تمامی سیستم‌های حفاظتی و رله نیومریکال (دیجیتالی) نیروگاهی ایران و همچنین ساخت سیستم‌های حفاظتی جدید نیروگاهی لازم‌الاجرا است. شرکت‌های مدیریت تولید نیروی برق و همچنین شرکت‌های برق منطقه‌ای می‌توانند جهت انجام تست‌های دوره‌ای برخی از رله‌های حفاظتی خاص که نیازمند برنامه سرویس و نگهداری ویژه در دوره‌های زمانی مشخص هستند، با هماهنگی واحدهای ذیربط اقدام کنند.

۱-۳- مسئولیت اجرا

شرکت‌های مدیریت تولید نیروی برق

۱-۴- تعاریف و اختصارات

۱-۴-۱- تعاریف

- **تابع حفاظتی (Protection Function)**: شامل انواع دستورات حفاظتی تعبیه‌شده در داخل رله‌های مختلف است که بر پایه‌ی ریزپردازنده‌ها استوار هستند. از جمله واحدهای پرکاربرد به‌کاررفته در بسیاری از توابع حفاظتی می‌توان به رله‌های اضافه جریان، اتصال زمین، کاهش ولتاژ و ... اشاره کرد.
- **حفاظت اصلی (Main Protection)**: شامل توابع حفاظتی بوده که برای رفع خطای اصلی و دارای تقدم به‌کار می‌روند.
- **حفاظت کمکی یا پشتیبان (Backup Protection)**: شامل توابع حفاظتی مختلفی بوده که با یک تأخیر زمانی منطقی نسبت به توابع به‌کاررفته در حفاظت اصلی تنظیم می‌شوند و در صورت عدم موفقیت توابع حفاظت اصلی در رفع خطای به وقوع پیوسته، وظیفه‌ی رفع خطا را بر عهده دارند.
- **مشخصه عملکرد رله‌های حفاظتی (Characteristic)**: نمایانگر دامنه‌ی عملکرد هر رله حفاظتی بوده و بسته به سازنده‌ی رله و سیستم به‌کاررفته، حالت‌های مختلفی را دربر می‌گیرد.

۲۷ *Preventive maintenance (PM)*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- **زمان عملکرد رله:** به فاصله‌ی زمانی مابین وقوع خطا در ناحیه‌ی عملکردی یک رله تا زمان بسته شدن کنتاکت‌های رله گفته می‌شود.
- **زمان عملکرد رله کمکی:** به مدت‌زمان موردنیاز جهت دریافت فرمان تریپ از توابع حفاظتی اصلی و ارسال فرمان به کنتاکت‌های مربوطه، اطلاق می‌شود.
- **زمان رفع خطا (Clearance Time):** به فاصله‌ی زمانی مابین وقوع خطا تا رفع خطا توسط توابع حفاظت اصلی و یا کمکی گفته می‌شود.

۵-۱- نیازمندی‌های عمومی

أ. طرح‌های حفاظتی به‌کاررفته جهت حفاظت ژنراتورها و ترانسفورماتورهای نیروگاهی باید قادر باشند که:
- ویژگی‌های شرایط نرمال را با شرایط غیرعادی تمیز دهند و خطای به‌وقوع پیوسته را شناسایی کند.
- با توجه به حساسیت بیش از حد واحدهای تولیدی، ناحیه‌ی وقوع خطا را در کمترین زمان ممکن شناسایی کرده و از سایر قسمت‌های سیستم ایزوله کند.
- سرعت پردازش رله‌ها و توابع حفاظتی به‌کاررفته باید متناسب با اهمیت واحدهای تولیدی باشد.

ب. بروز اشکال فنی در یکی از تجهیزات حفاظتی نباید سبب ایجاد وقفه در عملکرد کل سیستم حفاظتی شود.

ت. طرح‌های حفاظتی به‌کاررفته باید این قابلیت را داشته باشند که بدون قطع تجهیزات اولیه تعمیرات موردنیاز بر روی سایر قسمت‌های سیستم حفاظتی صورت گیرد.

ث. معماری ارتباط از راه دور و سیستم‌های مخابراتی به‌کاررفته باید قابلیت پشتیبانی از تمام تجهیزات موردتأیید وزارت نیرو را داشته باشند. همچنین باید امکان به‌روزرسانی و ارتقاء سیستم‌های مخابراتی به‌کاررفته وجود داشته باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

الزامات و تعیین توابع حفاظتی

۱-۲- حفاظت ژنراتورهای نیروگاهی

ژنراتور مهم‌ترین و با ارزش‌ترین بخش یک نیروگاه است. نقص داخلی ژنراتور علاوه بر آسیبی که به خود ژنراتور وارد می‌کند، باعث قطع قسمت بزرگی از انرژی نیروگاه نیز می‌گردد. درصورتی‌که خطاهای به‌وجودآمده به موقع شناسایی نشوند، صدمات واردشده به ژنراتور افزایش یافته و تعمیر محل خطا ممکن است زمان بسیار زیادی طول بکشد. این عوامل سبب می‌شوند که در مدت وقوع خطا بهره‌برداری سیستم با مشکل مواجه شود. از طرف دیگر، تداوم خطا در سیستم سبب اضافه بار در سایر ژنراتورهای تولیدی خواهد شد. اضافه بار در ژنراتورها، علاوه بر اینکه امکان آسیب‌های احتمالی را بالا می‌برد، طول عمر دستگاه‌ها را نیز کاهش خواهد داد. برای جلوگیری از اینگونه مشکلات بهتر است خطاهای داخلی ژنراتور را قبل از ایجاد مشکلات متعدد شناسایی و برطرف کرد. در بسیاری از نظام‌نامه‌های حفاظتی، حداقل الزامات موردنیاز برای حفاظت ژنراتورهای نیروگاهی بر پایه‌ی استاندارد IEEE C37.102-v2006 ارائه شده است. ازاین‌رو، حداقل تجهیزات حفاظتی موردنیاز برای حفاظت ژنراتورهای نیروگاهی در برابر خطاهای مختلف داخلی و خارجی به شرح زیر است:

- ✓ رله دیفرانسیل برای تشخیص اتصال دو فاز مختلف در استاتور ژنراتور
- ✓ رله اتصال زمین برای حفاظت ژنراتور در مقابل اتصال زمین سیم‌پیچی استاتور
- ✓ رله حرارتی برای حفاظت در مقابل بار زیاد
- ✓ رله اضافه جریان برای حفاظت در مقابل اتصال کوتاه
- ✓ رله ولتاژ زیاد برای حفاظت در مقابل ولتاژ زیاد غیر مجاز
- ✓ رله بار نامتعادل برای حفاظت در مقابل بار نامتعادل غیر مجاز
- ✓ رله برگشت توان برای جلوگیری از حالت موتوری شدن ژنراتور
- ✓ حفاظت در مقابل اتصال حلقه
- ✓ حفاظت قطع تحریک
- ✓ حفاظت اتصال زمین روتور

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- ✓ حفاظت overspeed
- ✓ حفاظت فرکانسی غیرنرمال ژنراتور
- ✓ حفاظت تحریک اضافی ژنراتور

در ادامه توابع حفاظتی موردنیاز برای تدوین الزامات ضروری جهت حفاظت ژنراتورهای نیروگاهی و همچنین تنظیمات مربوط به هر تابع ارائه شده است.

۱-۱-۲- حفاظت ژنراتور از طریق تشخیص جریان خطا

عمده خطاهایی که در ژنراتورها ایجاد می‌شوند در اثر نقص ایزولاسیون و عایق‌بندی قسمتی از سیم‌پیچ‌های ژنراتور و کابل‌های رابط آن و یا بر اثر عوامل خارجی هستند. بنابراین می‌توان اقدامات حفاظتی را برای دو قسمت مجزا طراحی کرد:

- حفاظت در برابر خطاهای داخلی
- حفاظت در برابر عوامل خارجی غیر مجاز

۱-۱-۱-۲- حفاظت در برابر خطاهای داخلی

خطاهای داخلی می‌توانند در دو بخش روتور و یا استاتور ژنراتورهای نیروگاهی رخ دهند. از جمله خطاهای قابل‌وقوع در استاتور می‌توان به اتصال دوفاز، اتصال حلقه، اتصال زمین و اتصال دوفاز به زمین اشاره کرد. خطاهای ممکن برای روتور نیز شامل اتصال به زمین و قطع تحریک هستند. در ادامه تجهیزات ضروری برای جلوگیری از وقوع صدمات احتمالی در هر قسمت ژنراتور بیان شده است. ذکر این نکته ضروری است که تجهیزات معرفی‌شده به‌عنوان المان‌های اساسی برای حفاظت ژنراتورهای مختلف هستند که با افزایش حساسیت هر نیروگاه نسبت به نیروگاه دیگر به لحاظ ارزش استراتژیکی، پیمانکار مربوطه باید علاوه بر تجهیزات و توابع معرفی‌شده نسبت به نصب تجهیزات به روزتر اقدام کند.

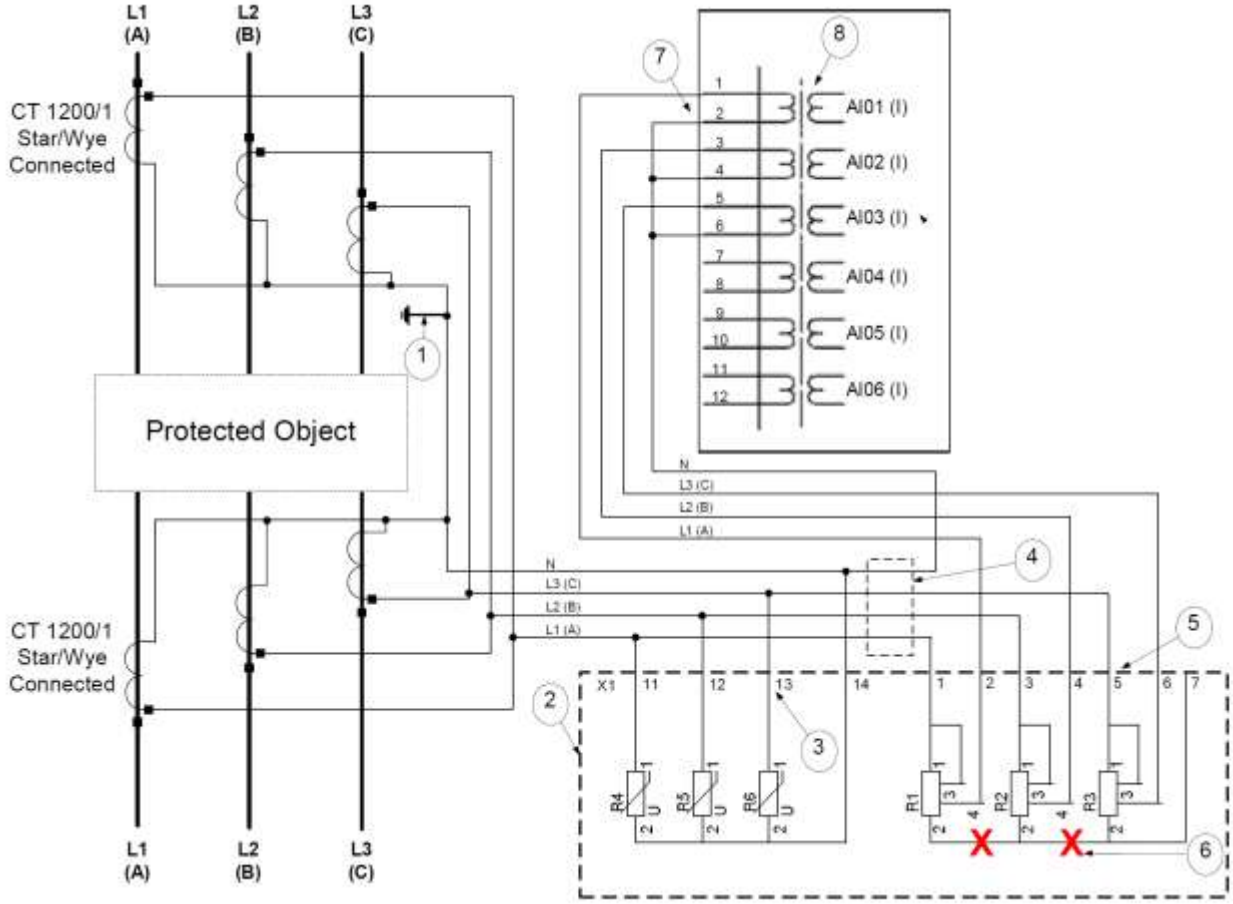
متداول‌ترین خطاهای قابل‌وقوع در استاتور هر ژنراتور نیروگاهی، اتصال دوفاز در داخل ژنراتور بر اثر شکستن و خرد شدن عایق‌بندی و اتصال زمین است. همچنین اتصال یک فاز به بدنه در داخل ژنراتور و یا اتصال فاز دیگر به زمین را نیز می‌توان در گروه اتصالات دو فاز لحاظ کرد. اگر یک اتصال دوفاز در داخل ژنراتور به وقوع بپیوندد، جریان اتصال کوتاه بین دو نقطه‌ی اتصالی به‌وجود آمده و در ادامه این جریان در ژنراتورهایی که با ژنراتور مدنظر به‌طور موازی کار می‌کنند، به‌وجود خواهد آمد. جهت تشخیص این نوع خطاها باید اپراتور سیستم از رله‌های **دیفرانسیل امپدانس بالا** و همچنین **رله جریان زیاد زمان محدودشده**[۲۸] استفاده کنند.

نحوه اتصال رله دیفرانسیل امپدانس بالا برای تشخیص خطاهای دوفاز در استاتور در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. همان‌طورکه از اسم این رله مشخص است، با استفاده از این رله امپدانس حفاظت دیفرانسیلی افزایش می‌یابد. این رله به‌وسیله نشانگرهای موجود محل خطا (داخل ژنراتور یا خارج ژنراتور) را نمایش می‌دهد. در خطاهای خارجی ولتاژ در رله کمتر خواهد بود، درحالی‌که برای خطاهای داخل ژنراتور ولتاژ اعمال‌شده به رله بسیار بالا است. ولتاژ کار رله باید حداکثر ۲ درصد کمتر-بیشتر از ولتاژ حالت نامی و جریان کار رله باید حداکثر ۰٫۵ درصد کمتر-بیشتر از جریان حالت نامی ژنراتور تنظیم شود. در شرایط عادی که جریان در هر دو طرف یکسان است ولتاژ سه‌سر سیمی که به رله

۲۸ *Restricted earth fault (REF)*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

دیفرانسیل وارد می‌شود برابر صفر بوده و رله بدون جریان است. در موقع اتصال کوتاه بین دوفاز داخلی ژنراتور، جریان از ترانسفورماتورهای جریان عبور کرده و چون این جریان‌ها از حالت عادی خارج شده‌اند، اختلاف جریان‌ها از رله دیفرانسیل عبور می‌کنند و رله دیفرانسیل تحریک شده و سبب قطع کلید ژنراتور و برداشت تحریک آن می‌شود.



شکل (۱-۲) نحوه اتصال رله دیفرانسیل امپدانس بالا برای تشخیص خطای دوفاز

رله‌ی جریان زیاد زمانی بر روی سیم‌پیچ ثانویه ترانسفورماتور جریانی که در نقطه‌ی صفر ژنراتور بسته شده، باید نصب گردد. این رله نمی‌تواند تشخیص بدهد که اتصال دوفاز در داخل ژنراتور و یا در خارج ژنراتور اتفاق افتاده است. و ازآنجایی‌که کلید اصلی ژنراتور نباید در اثر خطاهای خارجی بلافاصله و بی‌موقع قطع گردد، بنابراین باید زمان قطع این رله خیلی زیاد باشد. شدت جریان کار رله نیز باید مقداری کمتر از اتصال کوتاه دائمی ژنراتور در حالت تحریک بار کامل تنظیم شود و نسبت به نوع ماشین، این مقدار اغلب ۱/۲ تا ۱/۶ برابر جریان نامی ژنراتور است.

۲-۱-۱-۲- حفاظت در برابر خطاهای خارجی

- **حفاظت ژنراتور در اثر بار زیاد**

حرارت بیش از حد مجاز تحمیل‌شده به ژنراتور چه ناشی از بار زیاد و چه در اثر نقص سیستم خنک‌کننده، سبب آسیب به عایق‌بندی سیم‌پیچ‌های ژنراتور و در نتیجه کاهش عمر ژنراتور می‌شود. برای کنترل اضافه بار از یک رله حرارتی که می‌تواند با رله جریان زیاد نیز ادغام شود، باید استفاده کرد.

- **حفاظت ژنراتور در برابر اتصال کوتاه ایجادشده در شبکه**

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

درصورتی‌که در شبکه قدرت اتصال کوتاهی رخ دهد، ژنراتور شبکه را در محل خطا تغذیه خواهد کرد. شدت جریان تزریقی علاوه بر امپدانس مدار اتصال کوتاه‌یافته، به شدت جریان تحریک ژنراتور در حین اتصال کوتاه نیز بستگی دارد. از طرف دیگر وقوع اتصال کوتاه در شبکه سبب افت ولتاژ ژنراتور نیز خواهد شد که این پارامتر خود یکی از عوامل شناسایی وقوع اتصال کوتاه در شبکه است. جهت حفاظت ژنراتور در برابر جریان‌های بسیار زیاد همانند جریان اتصال کوتاه در شبکه باید از **رله‌ی جریان زیاد** و یا **رله‌ی دیستانس** استفاده کرد.

تنظیمات توابع حفاظتی مربوط به رله‌های معرفی‌شده در جدول‌های ۲-۱ تا ۲-۹ ارائه شده است. لازم به یادآوری است که این تنظیمات به‌وجودآورنده‌ی **حداقل شرایط موردنیاز** برای حفاظت ژنراتورهای نیروگاهی هستند. بدیهی است که استفاده از رله‌های دیجیتالی با دقت بالا علاوه بر برآورده کردن این الزامات، گزینه‌های مؤثر دیگری نیز برای اپراتور به ارمغان خواهد آورد.

جدول ۲-۱ حفاظت اضافه جریان زمان محدودشده جهت‌دار

- **اندازه‌گیری سه‌فاز**
- **کاهش مؤلفه‌های فرکانس بالا و *DC***
- **مشخصه‌های زمان محدود**
- **ویژگی حافظه ولتاژ برای خطاهای نزدیک**

تنظیمات موردنیاز:

جریان	*0.02 to 20 I_N in steps of 0.01 I_N*
زاویه	*-180° to + 180° in steps of 15 °*
تأخیر	*0.02 s to 60 s in steps of 0.01 s*
tWait [۲۹]	*0.02 s to 20 s in steps of 0.01 s*
دقت تنظیمات افزایشی (در فرکانس نامی)	*± 5 % or ± 0.02 I_N*
نرخ ریست	*>94 %*
دقت اندازه‌گیری زاویه (در ۰,۹۴ تا ۱,۰۶ فرکانس نامی)	*± 4*
رنج ولتاژ ورودی	*0.005 to 2 U_N*
رنج حافظه ولتاژ	*<0.005 U_N*
دقت اندازه‌گیری زاویه در حافظه ولتاژ	*± 20°*
فرکانس وابسته به اندازه‌گیری زاویه در حافظه ولتاژ	*± 0.5°/Hz*
ماکزیمم زمان پاسخ‌گویی بدون تأخیر	*60 ms*

۲۹زمان مجاز برای دریافت پاسخ فرمان‌های ارسالی

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

جدول ۲-۲ تابع اضافه جریان زمان معکوس جهت‌دار

- **اندازه‌گیری سه‌فاز**
- **کاهش مؤلفه‌های فرکانس بالا و *DC***
- **مشخصه‌های زمان معکوس**
- **ویژگی حافظه ولتاژ برای خطاهای نزدیک**

تنظیمات موردنیاز:

جریان I_{Start}	*1… 5 I_B in steps of 0.01 I_B*
زاویه	*-180 ° … + 180 ° in steps of 15 °*
مشخصه زمان معکوس (مطابق با *B.S.142* با رنج تنظیمات بیشتر)	$t = k_1 / ((I/I_B)^c - 1)$
معکوس نرمال(*Normal inverse*)	*c = 0.02*
خیلی معکوس(*Very inverse*)	*c = 1*
به‌شدت معکوس(*Extremely inverse*)	*c = 2*
خطای زمین طولانی‌مدت	*c = 1*
تنظیمات k_1	*0.01 to 200 s in steps of 0.01 s*
مقدار اختلاف جریان مجاز مرجع با جریان نامی (*IB*)	*0.04 to 2.5 IN in steps of 0.01 I_N*
tWait	*0.02 s to 20 s in steps of 0.01 s*
مدت‌زمان حافظه	*0.04 s to 15 s in steps of 0.01 s*
دقت تنظیمات افزایشی (در فرکانس نامی)	*± 5%*
نرخ ریست	*>94 %*
دقت اندازه گیری زاویه (در ۰,۹۴ تا ۱,۰۶ فرکانس نامی)	*± 5*
کلاس دقت زمان بهره‌برداری مطابق با استاندارد انگلیسی ۱۴۲	*E 10*
رنج ولتاژ ورودی	*0.005 to 2 U_N*
رنج حافظه ولتاژ	*< 0.005 U_N*
دقت اندازه‌گیری زاویه در حافظه ولتاژ	*± 20 °*
وابستگی فرکانس به اندازه‌گیری زاویه در حافظه ولتاژ	*± 0.5 °/ Hz*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

ماکزیمم زمان پاسخگویی بدون تأخیر	*60ms*

جدول ۲-۳ اضافه جریان لحظه‌ای

ویژگی‌ها:

- **تابع ماکزیمم و یا مینیمم (اضافه جریان و زیر جریان)**
- **اندازه‌گیری‌های سه‌فاز و تک‌فاز**
- **رنج گسترده فرکانس (۰,۰۴ تا ۱,۲ فرکانس نامی)**
- **ارزیابی مقدار پیک**

تنظیمات موردنیاز:

جریان	*0.1 to 20 I_N in steps of 0.1 I_N*
تأخیر	*0 to 60 s in steps of 0.01 s*
دقت مقدار افزایشی (تحت ۰,۰۸ تا ۱,۱ فرکانس نامی)	*± 10% or ± 0.04 I_N*
نرخ ریست	*>90 % (for max. function)* *<110 % (for min. function)*
ماکزیمم زمان قطع بدون تأخیر (تحت فرکانس نامی)	*≤30 ms (for max. function)* *≤60 ms (for min. function)*

جدول ۲-۴ اضافه جریان کنترل‌شده با ولتاژ

ویژگی‌ها:

- **مقدار جریان بیشینه ثبت‌شده پس از راه‌اندازی**
- **ریست تابع پس از بازگشت ولتاژ و یا پس از قطع آن**
- **اندازه‌گیری سه‌فاز و یا تک‌فاز برای جریان**
- **ارزیابی ولتاژ توالی مثبت**

تنظیمات موردنیاز:

جریان	*0.5 to 20 I_N in steps of 0.1 I_N*
ولتاژ	*0.4 to 1.1 U_N in steps of 0.01 U_N*
تأخیر	*0.5 to 60 s in steps of 0.01 s*
زمان نگه‌داشتن	*0.1 to 10 s in steps of 0.02 s*
دقت مقدار افزایشی	*± 5 % (at f_N)*
نرخ ریست	*>94 %*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

زمان راه‌اندازی	*≤80 ms*

جدول ۲-۵ تابع اضافه جریان زمان معکوس

ویژگی‌ها: • **اندازه‌گیری سه‌فاز و یا تک‌فاز با تشخیص بیشترین جریان فاز** • **پاسخ پایدار به حالت‌های گذرا**	
مشخصه‌های زمان معکوس (مطابق با *B.S.142* با رنج تنظیمات گسترش یافته)	$T = k_1 /((I / I_B)^C – 1)$
معکوس نرمال	$C = 0.02$
خیلی معکوس	$C = 1$
به‌شدت معکوس	$C = 2$
معکوس زمان طولانی	$C= 1$
مشخصه زمان معکوس بر اساس مشخصه *RXIDG*	$T=5.8 – 1.35.In (I / I_B)$
تنظیمات موردنیاز:	
تعداد فازها	*1 or 3*
جریان اصلی I_B	*0.04 to 2.5 I_N in steps of 0.01 I_N*
جریان افزایشی I_{start}	*1 to 4 I_B in steps of 0.01 I_B*
مینیمم تنظیمات زمانی t_{min}	*0 to 10 s in steps of 0.1 s*
تنظیمات k_1	*0.01 to 200 s in steps of 0.01 s*
کلاس‌های دقت برای زمان بهره‌برداری	
مطابق با *British Standard 142*	*E 5.0*
مطابق با مشخصه *RXIDG*	*±4 % (1 – I/80 I_B)*
نرخ تنظیم مجدد	*>94%*

جدول ۲-۶ تابع اضافه جریان خطای زمین زمان معکوس

ویژگی‌ها: • **اندازه‌گیری جریان خنثی (به‌دست‌آمده به‌صورت خارجی یا داخلی)** • **پاسخ پایدار به حالت‌های گذرا**	
مشخصه‌های زمان معکوس (مطابق با *B.S.142* با	$T = k_1 /((I / I_B)^C – 1)$

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

رنج تنظیمات گسترش یافته)	
معکوس نرمال	$C = 0.02$
خیلی معکوس	$C = 1$
به‌شدت معکوس	$C = 2$
معکوس زمان طولانی	$C= 1$
مشخصه زمان معکوس بر اساس مشخصه *RXIDG*	$T=5.8 – 1.35.In (I / I_B)$

تنظیمات موردنیاز:

تعداد فازها	*1 or 3*
جریان اصلی I_B	*0.04 to 2.5 I_N in steps of 0.01 I_N*
جریان افزایشی I_{start}	*1 to 4 I_B in steps of 0.01 I_B*
مینیمم تنظیمات زمانی t_{min}	*0 to 10 s in steps of 0.1 s*
تنظیمات k_1	*0.01 to 200 s in steps of 0.01 s*

کلاس‌های دقت برای زمان بهره‌برداری

مطابق با *British Standard 142*	*E 5.0*
مطابق با مشخصه *RXIDG*	*±4 % (1– I/80 I_B)*
نرخ تنظیم مجدد	*>94%*

جدول ۲-۷ جریان توالی فاز منفی

ویژگی‌ها:

- **حفاظت در مقابل بار نامتعادل**
- **تأخیر زمان محدود**
- **اندازه‌گیری سه‌فاز**

تنظیمات موردنیاز:

جریان توالی فاز منفی (I_2)	*0.02 to 0.5 I_N in steps of 0.01 I_N*
تأخیر	*0.5 to 60 s in steps of 0.01 s*
دقت مقدار افزایشی	*± 4 % I_N (at f_N, $I \leq I_N$) (with measuring transformers)*

نرخ ریست

$I_2 \geq 0.2\ I_N$	*>94 %*
$I_2 < 0.2\ I_N$	*>90%*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

زمان راه‌اندازی	*≤80 ms*

جدول۲-۸ حفاظت از روتور در برابر خطای زمین

امکانات و ویژگی‌ها:

- **بررسی دائمی عایق‌های به‌کاررفته**
- **محاسبه‌ی مقاومت زمین در نقاط خطادار**
- **ارسال آلارم و هشدار در صورت وقوع خطای زمین در نمایشگر**

تنظیمات موردنیاز:

محدوده‌ی ارسال هشدار	*100 Ω to 25 kΩ in steps of 0.1kΩ*
تأخیر	*0.2 s to 60 s in steps of 0.1 s*
بازه‌ی تریپ	*100 Ω to 25 kΩ in steps of 0.1 kΩ*
مقاومت زمین نقطه ستاره اول (R_{EP})	*900 Ω to 5 kΩ in steps of 0.01 kΩ*
ظرفیت کوپلینگ	*2 µF to 10 µF*
نرخ تنظیم مجدد	*110%*
زمان شروع	*1.5 s*

الزامات ضروری برای عملکرد تابع حفاظتی:

ظرفیت خازنی کل در نقطه زمین‌شده روتور	*200 nF to 1µF*
مقاومت موازی نقطه زمین روتور	*100 Ω to 500 Ω*
مقاومت سری نقطه زمین روتور	*900 Ω to 5 kΩ*
ثابت زمانی	*T = RER, * C = 3 to 10 ms*

جدول۲-۹ حفاظت از استاتور در برابر خطای زمین

امکانات و ویژگی‌ها:

- **حفاظت از تمام سیم‌پیچی‌های استاتور**
- **مناسب برای سیستم‌های حفاظتی با دو نقطه اتصال به زمین**
- **بررسی دائمی عایق‌های به‌کاررفته**
- **محاسبه‌ی مقاومت زمین در نقاط خطادار**
- **ارسال آلارم و هشدار در صورت وقوع خطای زمین در نمایشگر**

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

روش‌های ایزوله (زمین) کردن:

- **اتصال نقطه ستاره سیم‌پیچ با مقاومت**
- **اتصال نقطه ستاره سیم‌پیچ با استفاده از ترانسفورماتور**

تنظیمات موردنیاز:

محدوده‌ی ارسال هشدار	*100 Ω to 20 kΩ in steps of 0.1kΩ*
تأخیر	*0.2 s to 60 s in steps of 0.1 s*
بازه‌ی تریپ	*100 Ω to 20 kΩ in steps of 0.1kΩ*
تعداد نقاط ستاره	*2*
مقاومت زمین نقطه ستاره اول (R_{ES-1})	*400 Ω to 5 kΩ in steps of 0.01kΩ*
مقاومت زمین نقطه ستاره دوم (R_{ES-2})	*900 Ω to 30 kΩ in steps of 0.01kΩ*
نرخ تنظیم مجدد	*110% for setting values of ≤10 kΩ*
زمان شروع	*1.5 s*

الزامات ضروری برای عملکرد تابع حفاظتی:

حداکثر جریان نقطه زمین	*I0 <20A (recommended I0 = 5A)*
ظرفیت خازنی نقطه زمین استاتور	*0.5 μF to 6 μF*
مقاومت موازی نقطه زمین استاتور	*130 Ω to 500 Ω*
مقاومت سری نقطه زمین استاتور	*700 Ω to 5 k Ω (≥4.5 * RPS)*

۲-۱-۲- حفاظت لغزش قطب ژنراتور

لغزش قطب می‌تواند به دلیل اختلال‌های خارجی نظیر خطاهای مدت‌دار، تحریک خطادار، اضافه تـوان ورودی ناشـی از بروز اضافه‌بار و یا قطع ناگهانی بار رخ دهد. این مسئله می‌تواند مشکلات جدی نظیر گشتاورهای نوسـانی شـدید در شرایط لغزش قطب را به‌وجود آورد، که سبب تحریک شدید بخش شفت ژنراتور شده و باعـث وارد شـدن ضـربه‌هـای نوسانی به آن می‌شود. لغزش قطب در یک ژنراتور در حالتی رخ می‌دهد که گشتاور الکترومغناطیسی نامناسـب سـبب می‌شود تا شار مغناطیسی روتور و استاتور در حالت سنکرون با یکدیگر برابر نباشند. لغزش قطب یـا بـین ژنراتورهـا و سیستم‌های اصلی رخ می‌دهد و یا بین دو بخش از سیستم اصلی، که در نتیجـه باعـث جـاری شـدن تـوان سـنکرون خواهد شد. لغزش قطب برای ژنراتورهای نیروگاهی، سبب بروز مشکلات عملیاتی خواهد شد و باید در کمترین زمـان ممکن این خطا برطرف شود. تنظیمات مربوط به حفاظت لغزش قطب کـه بایـد بـر روی تجهیـزات حفـاظتی اعمـال شوند، در جدول ۲-۱۰ ارائه شده است.

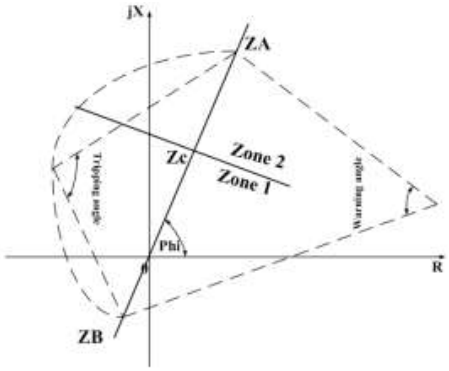
جدول ۲-۱۰ حفاظت لغزش قطب

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

امکانات و ویژگی‌ها:

- **ثبت تحرکات قطب‌ها از ۰/۲ هرتز تا ۸ هرتز**
- **زاویه‌ی هشدار قابل‌تنظیم برای حرکت قطب‌ها**
- **تنظیم تعداد لغزش‌ها بر اساس الزمات موردنیاز**

مشخصه تابع موردنظر



تنظیمات موردنیاز:

امپدانس سیستم (Z_A)	*0 to 5.0 U_N/I_N in steps of 0.001*
امپدانس ژنراتور (Z_B)	*-5.0 to 0 U_N/I_N in steps of 0.001*
امپدانس اولین گام (Z_C)	*0 to 5.0 U_N/I_N in steps of 0.001*
زاویه *phi*	*60° to 270° in steps of 1°*
زاویه هشدار (*warning angle*)	*0° to 180° in steps of 1°*
زاویه تحریک (*tripping angle*)	*0° to 180° in steps of 1°*
زمان شروع مجدد در هر گام	*0.5 to 20 in steps of 1*

۳-۱-۲- حفاظت فرکانسی غیر نرمال ژنراتور

حفاظت از تیغه‌های توربین در مقابل اثرات ناشی از عملکرد ژنراتور در فرکانس غیر نامی یک مشکل اساسی است. الگوی حفاظتی باید دارای سرعت کافی باشد تا حفاظت موردنظر را برای هر محدوده از مشخصه‌های تعیین‌شده توسط سازنده، تأمین کند. تابع حفاظتی مورداستفاده باید دارای تأخیر کافی باشد تا امکان هماهنگ‌سازی با طرح‌های قطع بار اتوماتیک شبکه قدرت را فراهم کند. همچنین، ازآنجایی‌که فشارهای لرزشی زیاد است، زمان مجاز در یک فرکانس غیر نرمال باید تابعی از داده‌های قبلی توربین باشد. حفاظت در مقابل اضافه فرکانس اعمال نمی‌شود به این خاطر که این شرایط را می‌توان به‌صورت محلی با استفاده از عملکرد گاورنر و یا کنترل دستی آن، اصلاح کرد در مقابل حفاظت در مقابل نقصان فرکانس اعمال می‌شود چون این شرایط را نمی‌توان به‌صورت محلی اصلاح کرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

تنظیمات مربوط به حفاظت فرکانسی غیر نرمال ژنراتور که باید بر روی تجهیزات حفاظتی اعمال شوند، در جداول ۲-۱۱ و ۲-۱۲ ارائه شده است.

جدول ۲-۱۱ فرکانس

امکانات و ویژگی‌ها: • **حساس به عملکرد اضافه و کاهش فرکانس نامی سیستم** • **مقابله با کاهش کمینه ولتاژ**	
تنظیمات موردنیاز:	
فرکانس	*40 to 65 Hz in steps of 0.01 Hz*
تأخیر	*0.1 to 60 s in steps of 0.01 s*
کمینه ولتاژ	*0.2 to 0.8 U_N in steps of 0.1 U_N*
دقت مقدار *pick-up*	*±30 mHz at U_N and f_N*
نرخ تنظیم مجدد	*100%*
زمان شروع	*<130 ms*

جدول ۲-۱۲ نرخ تغییرات فرکانس ($\frac{df}{dt}$)

امکانات و ویژگی‌ها: • **تطبیق مقدار *pick-up* با توجه به تغییرات فرکانس** • **مقابله با کاهش دامنه ولتاژ**	
تنظیمات موردنیاز:	
$\frac{df}{dt}$	*-10 to +10 Hz/s in steps of 0.1 Hz/s*
فرکانس	*40 to 55 Hz in steps of 0.01 Hz at f_N= 50 Hz*
تأخیر	*0.1 to 60 s in steps of 0.01 s*
کمینه ولتاژ	*0.2 to 0.8 U_N in steps of 0.1 U_N*
دقت محاسبه نسبت $\frac{df}{dt}$ در بازه‌ی ۰/۹ تا ۱/۰۵	*±0.1 Hz/s*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

برابری فرکانس نامی	
دقت محاسبه فرکانس در بازه‌ی ۰/۹ تا ۱/۰۵ برابری فرکانس نامی	*±30 mHz*
نرخ تنظیم مجدد $\frac{df}{dt}$	*95% for max. function;* *105% for min. function*

۴-۱-۲- حفاظت تحریک اضافی ژنراتور

رله *V/Hz* در ترمینال‌های اولیه یا ثانویه، جهت حفاظت ژنراتور در مقابل اضافه تحریک باید استفاده شود. حفاظت برای یک ژنراتور و ترانسفورماتور متصل به آن می‌تواند در شکل‌های مختلف، توسط رله *V/Hz* در ترمینال‌های ژنراتور، توسط مدار محدودکننده *V/Hz* در رگلاتور خودکار ولتاژ، و یا با فناوری سنجش جریان و یا ولتاژ میدان، پیاده‌سازی شود. محدودکننده‌های *V/Hz* با پیشرفته‌ترین سیستم‌های تحریک برای واحدهای متوسط و بزرگ ارائه شده‌اند. این مدار در داخل رگلاتور خودکار ولتاژ قرار دارد. این مدار ولتاژ و فرکانس را در ترمینال‌های ژنراتور اندازه‌گیری کرده و میدان ژنراتور را برابر با مقدار موردنیاز برای جلوگیری از عملکرد ژنراتور تحت شرایط بیشتر از مقدار پیش‌فرض V / Hz تنظیم می‌کند. تنظیمات مربوط به حفاظت تحریک اضافی ژنراتور که باید بر روی تجهیزات حفاظتی اعمال شوند، در جداول ۲-۱۳ تا ۲-۱۵ ارائه شده است.

جدول ۲-۱۳ تحریک بیشتر از حد نرمال (Over-excitation)

امکانات و ویژگی‌ها: • **امکان سنجش نسبت ولتاژ به فرکانس** • **مقابله با کاهش کمینه ولتاژ**

تنظیمات موردنیاز:

مقدار *Pick-up*	*0.2 to 2 U_N/f_N in steps of 0.01 U_N/f_N*
تأخیر	*0.1 to 60 s in steps of 0.01 s*
رنج فرکانس	*0.5 to 1.2 f_N*
دقت محاسبه در فرکانس نامی	*±3% or ±0.01 U_N/f_N*
نرخ تنظیم مجدد	*>97% (max.), <103% (min.)*
زمان شروع	*≤120 ms*

جدول ۲-۱۴ تحریک بیشتر از حد نرمال (Over-excitation) به همراه تابع تأخیر زمانی معکوس

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

امکانات و ویژگی‌ها:

- **قابلیت اندازه گیری تک‌فاز**
- **تأخیر زمانی معکوس بر اساس استاندارد *IEEE Guide C37.91-1985***

تنظیمات موردنیاز:

Table settings	*U/f values: (1.05; 1.10 to 1.50) U_N/f_N*
نقطه شروع نسبت ولتاژ بر فرکانس	*1.05 to 1.20 U_N/f_N in steps of 0.01 U_N/f_N*
t_{min}	*0.01 to 2 min in steps of 0.01 min*
t_{max}	*5 to 100 min in steps of 0.1 min*
زمان تنظیم مجدد	*0.2 to 100 min in steps of 0.1 min*
ولتاژ مرجع	*0.8 to 1.2 U_N in steps of 0.01 U_N*
دقت مقدار *pick-up*	*±3% U_N /f_N (at f_N)*
رنج فرکانس	*0.5 to 1.2 f_N*
نرخ تنظیم مجدد	*100%*
زمان شروع	*<120 ms*

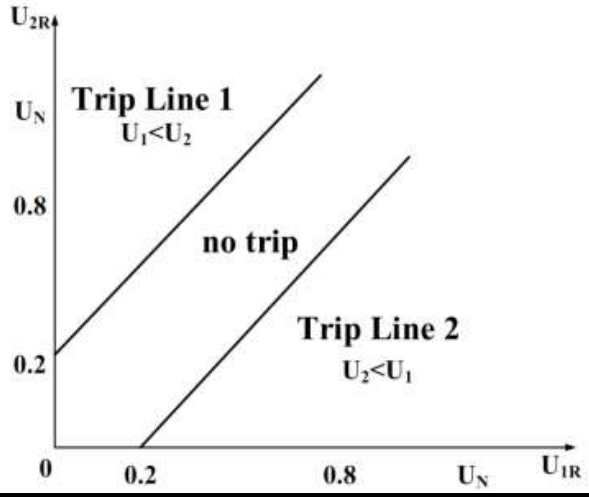
جدول ۲-۱۵ تابع تعادل ولتاژ (Voltage balance function)

امکانات و ویژگی‌ها:

- **مقایسه دامنه ولتاژ دو ورودی ولتاژ مختلف (ورودی ۱، ورودی ۲)**
- **اندازه گیری ولتاژ تک‌فاز و یا سه‌فاز**
- **ارسال سیگنال‌های مختلف پس از مقایسه ولتاژ در ورودی‌های مختلف**
- **سنجش میزان اختلاف ولتاژ در فازهای مختلف برای حالت ۳ فاز سیستم و یا استفاده از تابع منطقی *OR* برای تصمیم‌گیری**
- **جلوگیری از افزایش دامنه هارمونیکی در مرتبه‌های مختلف**
- **جلوگیری از افزایش نقش مؤلفه *dc***

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مشخصه مربوط به مقایسه تریپ‌های مختلف ولتاژ برای فاز *R* و حداکثر اختلاف مجاز ۰/۲ برابر ولتاژ نامی):



تنظیمات موردنیاز:

اختلاف ولتاژ	*0.1 to 0.5 U_N in steps of 0.05 U_N*
تأخیر تریپ (*Trip*)	*0.00 to 1.0 s in steps of 0.01 s*
نرخ تنظیم مجدد	*>90%*
دقت مقدار *pick-up*	*±2% or ±0.005 U_N*
تعداد فازها	*1 or 3*
U_{1R}	*phase R voltage amplitude, voltage channel 1 (line 1)*
U_{2R}	*phase R voltage amplitude, voltage channel 2 (line 2)*
بیشترین زمان مجاز تریپ بدون تأخیر	*≤50 ms*

۲-۲- حفاظت تراسفورماتورهای نیروگاهی

حداقل تجهیزات حفاظتی موردنیاز برای حفاظت ترانسفورماتورهای نیروگاهی در برابر خطاهای مختلف داخلی و خارجی به شرح زیر است:

أ. رله V/HZ

ب. تجهیزات حرارتی

ت. رله جریان معکوس

ث. رله حرارتی ترانسفورماتور

ج. رله اضافه جریان لحظه‌ای

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

ح. رله اضافه جریان لحظه‌ای برای نقطه نول
خ. رله اضافه جریان مدت‌دار
د. رله اضافه جریان مدت‌دار عبوری از زمین
ذ. رله اضافه جریان مدت‌دار عبوری از نقطه نول
ر. رله پشتیبان اضافه جریان عبوری از نقطه نول
ز. رله کنترل گشتاور
س. کلید قطع جریان متناوب
ش. رله اضافه ولتاژ
ص. رله حفظ تعادل جریان یا ولتاژ
ض. کلید فشار
ط. رله آشکارساز نقطه خنثی
ظ. رله اضافه جریان عبوری مستقیم
ع. رله اضافه جریان عبوری مستقیم از نقطه خنثی
غ. رله قطع ارتباط خروجی (تنظیمات قفل‌شده)
ف. رله دیفرانسیل
ق. رله دیفرانسیل زمین
ک. حفاظت اتصال زمین محدودشده (REF)
ل. رله بوخهلتس

لازم به یادآوری است که شماره و نشانگر تجهیزات الکتریکی به‌کاررفته در این دستورالعمل در جدول ۲-۱۶ ارائه شده است.

جدول ۲-۱۶ شماره و تعریف تجهیزات مورداستفاده

نوع تجهیزات	شماره تجهیزات
رله V/HZ[۳۰]	۲۴
تجهیزات حرارتی[۳۱]	۲۶
رله جریان معکوس[۳۲]	۴۶
رله حرارتی ترانسفورماتور[۳۳]	۴۹
رله اضافه جریان لحظه‌ای[۳۴]	۵۰

۳۰ *Volts-per-hertz (V/Hz) relay*

۳۱ *Apparatus thermal device*

۳۲ *Reverse-phase or phase-balance current relay*

۳۳ *Transformer thermal relay*

۳۴ *Instantaneous overcurrent relay*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

رله اضافه جریان لحظه‌ای برای نقطه نول[۳۵]	۵۰*N*
رله اضافه جریان مدت‌دار[۳۶]	۵۱
رله اضافه جریان مدت‌دار عبوری از زمین[۳۷]	۵۱*G*
رله اضافه جریان مدت‌دار عبوری از نقطه نول[۳۸]	۵۱*N*
رله پشتیبان اضافه جریان عبوری از نقطه نول[۳۹]	۵۱*NB*
رله کنترل گشتاور[۴۰]	۵۱*NT*
کلید قطع جریان متناوب[۴۱]	۵۲
رله اضافه ولتاژ[۴۲]	۵۹
رله حفظ تعادل جریان یا ولتاژ[۴۳]	۶۰
کلید فشار[۴۴]	۶۳
رله آشکارساز نقطه خنثی[۴۵]	۶۴
رله اضافه جریان عبوری مستقیم[۴۶]	۶۷
رله اضافه جریان عبوری مستقیم از نقطه خنثی[۴۷]	۶۷*G*
رله قطع ارتباط خروجی[۴۸](تنظیمات قفل‌شده)	۸۶
رله دیفرانسیل[۴۹]	۸۷
رله دیفرانسیل زمین[۵۰]	۸۷*G*

۳۵ *Instantaneous neutral overcurrent relay*

۳۶ *AC time overcurrent relay*

۳۷ *AC time ground overcurrent relay*

۳۸ *AC time neutral overcurrent relay*

۳۹ *AC time neutral overcurrent backup relay*

۴۰ *AC time neutral overcurrent torque-controlled relay*

۴۱ *AC circuit breaker*

۴۲ *Overvoltage relay*

۴۳ *Voltage or current balance relay*

۴۴ *Pressure switch*

۴۵ *Ground detector relay*

۴۶ *AC directional overcurrent relay*

۴۷ *AC directional ground overcurrent relay*

۴۸ *Lockout relay*

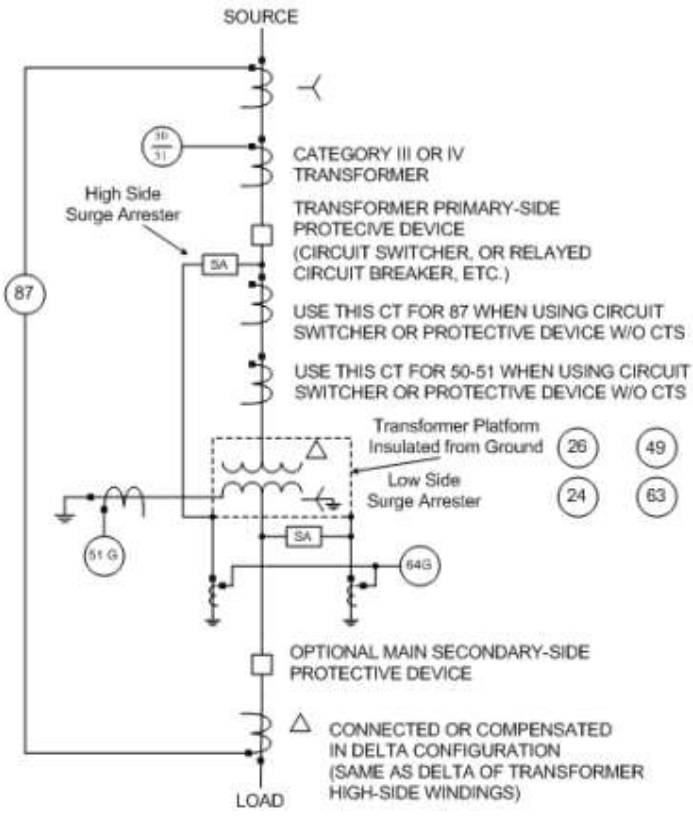
۴۹ *Differential protective relay*

۵۰ *Ground differential protective relay*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

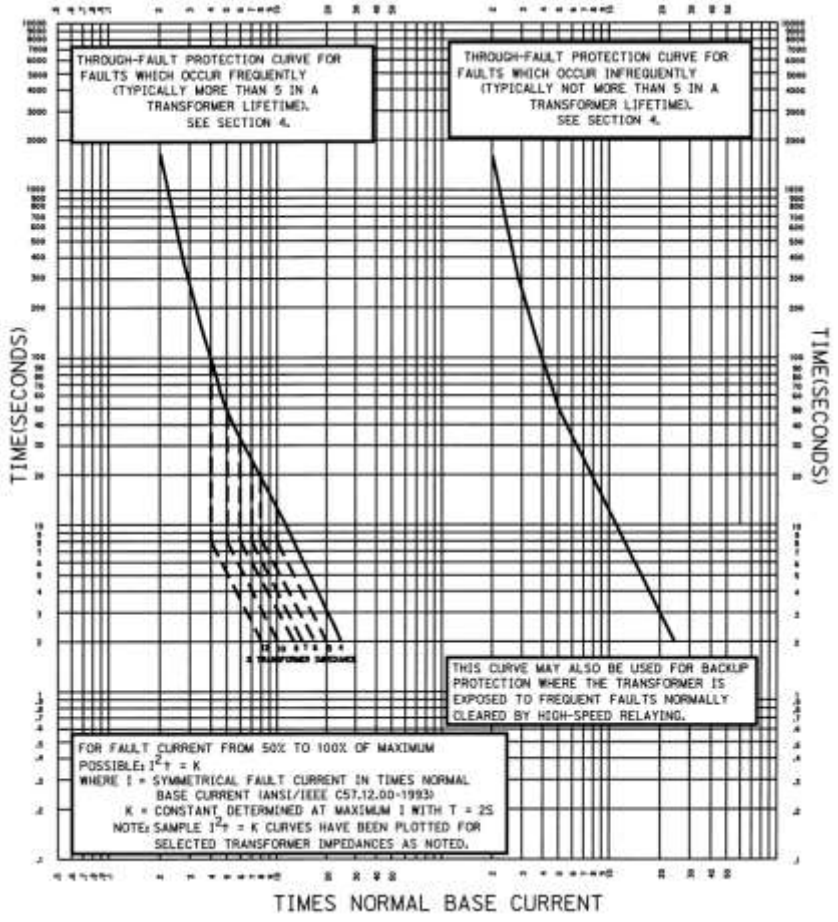
۱-۲-۲- حفاظت از ترانسفورماتورهای قدرت از طریق تشخیص جریان خطا

برای حفاظت الکتریکی ترانسفورماتورهای سه‌فاز بالاتر از رنج کاری ۵ مگاولت آمپر در مقابل جریان‌های خطا باید از رله اضافه جریان متناسب با مشخصه‌ی عملکردی هر ترانسفورماتور استفاده کرد. نمونه‌ای از این حفاظت در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. انتخاب سیستم حفاظتی بستگی به اندازه شبکه و قیود امنیتی حاکم بر هر بخش دارد. ملاحضات فنی موجود در شبکه‌های مختلف مانند نوع خطا، امنیت کارکنان، سرعت و زمان رفع خطا و ... در تعیین نوع حفاظت نقش مهمی دارند. با توجه به ظرفیت نامی ترانسفورماتورها انتخاب و عملکرد رله‌ها متفاوت است. برای ترانسفورماتورهای سه‌فاز دارای ظرفیت نامی ۵۰۰ کیلوولت آمپر تا ۵۰۰۰ کیلوولت آمپر دو منحنی جهت انتخاب تجهیزات حفاظتی پیشنهاد می‌شود. این دو منحنی در شکل ۲-۳ نمایش داده شده‌اند. منحنی سمت چپ جهت در نظر گرفتن همزمان آسیب‌های مکانیکی و حرارتی ارائه شده است. همچنین از این منحنی می‌توان جهت انتخاب تجهیزات حفاظتی فیدرهای موجود در مسیر ترانسفورماتورها استفاده کرد. با توجه به امپدانس هر ترانسفورماتور نوع منحنی نیز متفاوت خواهد بود. منحنی‌های ارائه‌شده با توجه به جریان‌های خطا در محدوده‌ی ۵۰ تا ۱۰۰ درصدی بدترین حالت ممکن برای اضافه جریان و با استفاده از رابطه‌ی $I^2t = K$ باید رسم شوند. در این رابطه مقدار K برابر ۲ ثانیه، بدترین حالت مکانیکی، باید در نظر گرفته شود. منحنی سمت راست فقط جهت در نظر گرفتن آسیب‌های حرارتی ارائه شده است. همچنین از این منحنی می‌توان برای انتخاب تجهیزات موردنیاز برای حفاظت ثانویه استفاده کرد.



شکل (۲-۲) شماتیک حفاظت یک ترانسفورماتور ستاره/مثلث

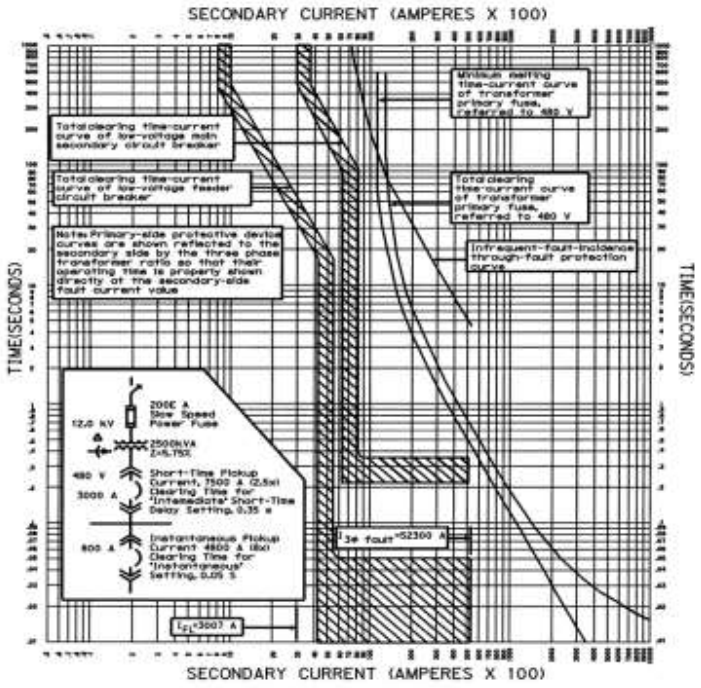
DOI: 10.30503/nripress.2020.151



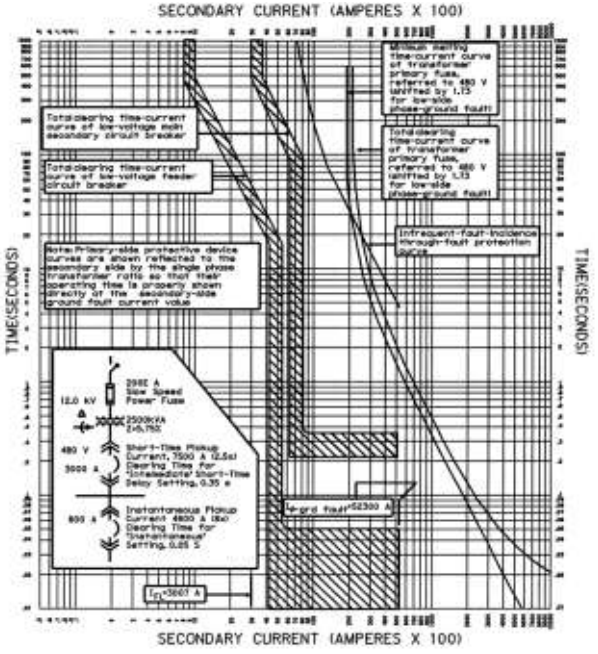
شکل (۲–۳) منحنی جریان بر حسب زمان

نحوه هماهنگی رله‌های اضافه جریان با منحنی‌های حفاظتی در شکل‌های ۲-۴، ۲-۵ و ۲-۶ ارائه شده است. این منحنی‌ها برای ترانسفورماتورهای ستاره/مثلث ارائه شده‌اند. همچنین نسبت تبدیل ترانسفورماتور ۱:۱ فرض شده است. منحنی ارائه‌شده در شکل ۲-۴ برای حالتی است که یک خطای سه‌فاز رخ بدهد، در این حالت جریان خط در طرف اولیه ۱/۷۳ برابر جریان موجود در سیم‌پیچ‌های اولیه خواهد بود. منحنی ارائه‌شده در شکل ۲-۵ و ۲-۶ برای حالتی هستند که خطای تک‌فاز به زمین و یا دوفاز به هم در طرف ثانویه ترانسفورماتور رخ دهد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

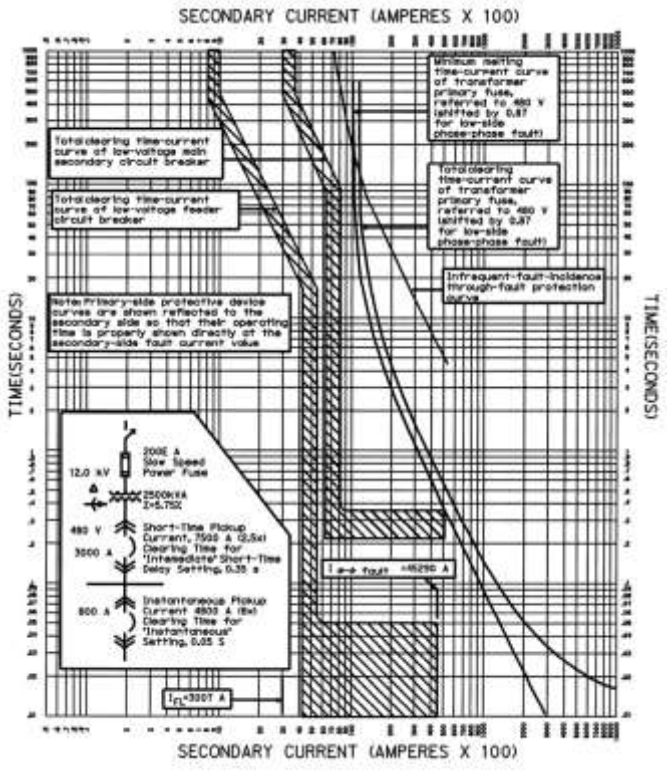


شکل (۲–۴) حفاظت ترانسفورماتور در سمت ثانویه برای مقابله با یک خطای سه‌فاز



شکل (۲–۵) حفاظت ترانسفورماتور در سمت ثانویه برای مقابله با یک خطای تک‌فاز به زمین

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل (۲–۶) حفاظت ترانسفورماتور در سمت ثانویه برای مقابله با یک خطای دوفاز به هم

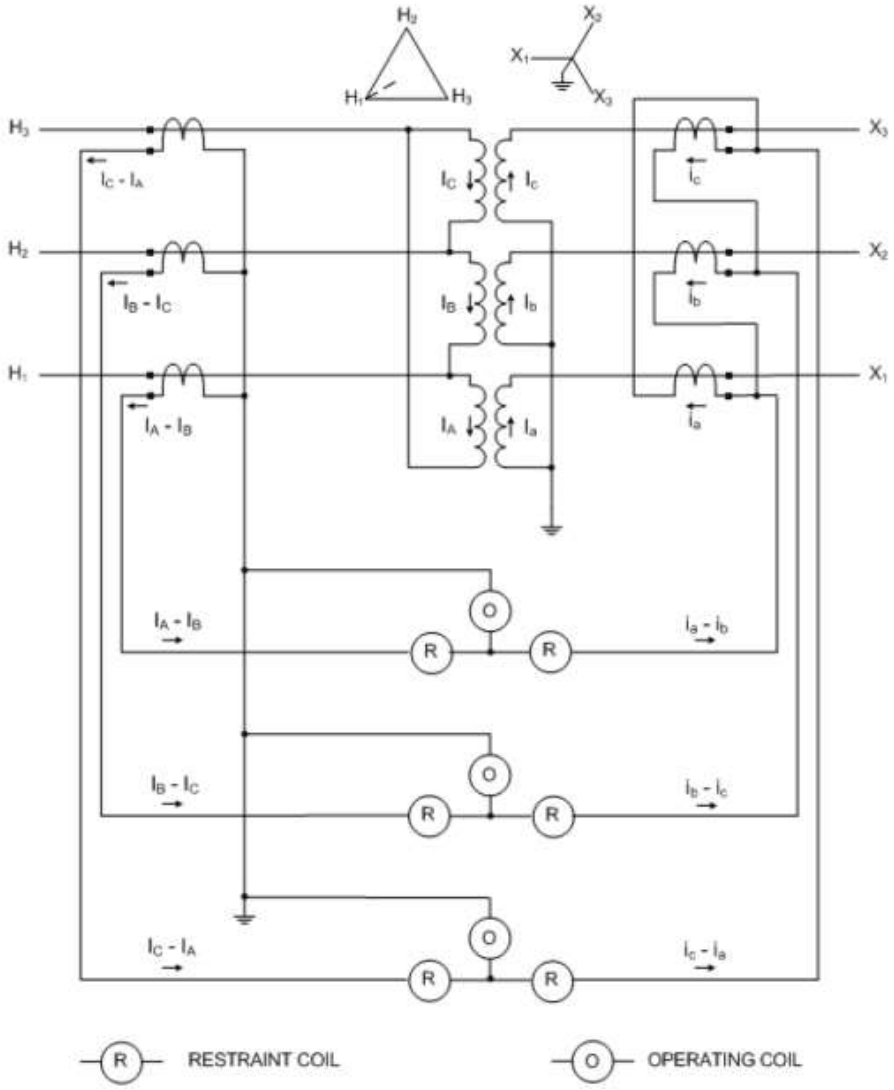
۲-۲-۲- حفاظت دیفرانسیل

از جمله مزایای استفاده از حفاظت دیفرانسیل نسبت به موارد دیگر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- در این نوع حفاظت سرعت تشخیص خطا بسیار بالا است، در نتیجه آسیب بسیار کمتری به تجهیـزات وارد می‌شود.
- محل خطا بر حسب اندازه ناحیه حفاظت به‌طور دقیق تعیین می‌شود.
- تعیین دقیق محل خطا این اجازه را به سیستم کنترل می‌دهـد تـا نسـبت بـه جداسـازی آن ناحیـه اقـدام سریع‌تری را انجام دهد.
- رفع هر چه سریع‌تر خطا مانع ایجاد قوس‌های الکتریکی در تجهیزات خواهد شد.

رله دیفرانسیل جریان متداولترین نوع حفاظت دیفرانسیل است که برای حفاظـت ترانسـفورماتورهای بـا ظرفیـت ۱۰ مگاولت آمپر و بالاتر پیشنهاد می‌شود. شماتیک اتصال این رله به ترانسفورماتور تک‌فاز در شکل ۲-۷ نشان داده شـده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل (۲–۷) شماتیک اتصال رله دیفرانسیل به ترانسفورماتور ستاره/مثلث

تنظیمات مربوط به حفاظت دیفرانسیل، در جدول ۲-۱۷ ارائه شده است.

جدول ۲-۱۷ دیفرانسیل ترانسفورماتور (87T)

امکانات و ویژگی‌ها:
• **برای ترانسفورماتورهای دو و سه‌فاز**
• **تابع سه‌فاز**
• **مشخصه جریان تطبیقی**
• **پایداری بالا برای خطاهای خارجی و اشباع ترانسفورماتور جریان**
• **بدون ترانسفورماتور کمکی لازم به خاطر مجموعه برداری و جبران سازی نسبت *CT***
• **مقاومت در برابر جریان هجومی با استفاده از هارمونیک دوم**
تنظیمات موردنیاز:

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

تنظیمات g	0.1 to 0.5 I_N in steps of 0.1 I_N
تنظیمات v	0.25 or 0.6
تنظیمات b	1.25 to 5 in steps of 0.25 I_N
ماکزیمم زمان قطع (ترانسفورماتور حفاظت‌شده بارگذاری‌شده)	≤ 30 ms
$I_\Delta > 2\ I_N$ $I_\Delta \leq 2\ I_N$	≤ 50 ms
دقت مقدار افزایشی	$\pm$ 4% IN (at fN)
شرایط ریست کردن	$I\Delta < 0.8$ g-setting

۳-۲-۲- حفاظت های مکانیکی

وقوع هر گونه خطای الکتریکی در درون تانک ترانسفورماتور باعث داغ شدن موضعی و ایجاد قوس الکتریکی خواهد شد. در اثر تجزیه روغن گاز ایجادشده باعث افزایش فشار محفظه تانک و یا جابه‌جایی سریع روغن ترانسفورماتور می‌شود. برای آشکارسازی خطاهای داخلی باید از رله‌های حفاظتی مکانیکی که در زیر بیان شده‌اند، استفاده کرد:

دستگاه فشارشکن[۵۱]: به‌صورت یک صفحه دیسکی چند لایه در بالای ترانسفورماتور قرار می‌گیرد. اگر فشار از یک حد مشخصی فراتر رود برای جلوگیری از انفجار ترانسفورماتور این دستگاه اقدام به کاهش فشار از طریق افزایش حجم محفظه کرده و با کنترل فشار دوباره بسته می‌شود.

رله افزایش سریع فشار روغن: این رله شیب افزایش فشار را اندازه‌گیری می‌کند، و بنابراین سریع‌تر از دستگاه فشارشکن می‌تواند خطا را تشخیص دهد.

رله بوخ هلتس[۵۲]: این رله تقریباً در همه ترانسفورماتورها به‌کار می‌رود و در بین تانک و کنزرواتور قرار می‌گیرد. رله با به‌وجود آمدن گاز یا هوا در داخل منبع روغن دستگاه و یا پائین رفتن سطح روغن از حد مجاز و یا در اثر جریان پیدا کردن شدید روغن به‌کار می‌افتد و سیگنال‌های لازم را به اپراتور منتقل می‌کند و یا اینکه مستقیماً دستگاه خسارت‌دیده را از برق قطع می‌کند. رله بوخ هلتس به قدری دقیق است که به محض وقوع کوچک‌ترین خطا عمل می‌کند و مانع از آن می‌شود که دستگاه خسارت زیادی ببیند. خطاهایی که سبب به‌کار انداختن رله بوخ هلتس می‌شوند عبارت‌اند از:

- جرقه بین قسمت‌های زیر فشار و هسته ترانسفورماتور
- اتصال زمین
- اتصال حلقه و کلاف
- قطع یک فاز
- سوختن آهن

۵۱ *Pressure relief*

۵۲ *Buchholz relay*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- چکه کردن روغن از ظرف روغن و یا از لوله‌های ارتباطی

اگر رله بوخ هلتس دارای دو گوی شناور باشد، دریچه اطمینان باید طوری تنظیم شود که وقتی سرعت حرکت روغن مابین ۵۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر بر ثانیه است، رله عمل کند. در رله‌هایی که شامل یک گوی شناور هستند، دریچه اطمینان با شناور لحیم شده است و در این رله‌ها وقتی سرعت روغن به ۶۵ تا ۹۰ سانتی‌متر بر ثانیه رسید رله عمل می‌کند.

۴-۲-۲- پایش و نگهداری روغن در حال بهره‌برداری

کاغذ و روغن با توجه به خاصیت عایقی مناسبی که هر یک از آن‌ها در کنار هم دارند، به‌عنوان عایقی مناسب در ترانسفورماتورهای قدرت مورداستفاده قرار می‌گیرند. استقامت دی‌الکتریک کاغذ و روغن به تنهایی برابر با ۴۰ و ۱۲ کیلو ولت بر میلی‌متر است، درحالی‌که استقامت دی الکتریک ترکیب آن‌ها برابر با ۶۴ کیلوولت بر میلی‌متر بوده که افزایش چشمگیری به‌شمار می‌آید. نکته مهم در بهره‌برداری از این عایق ترکیبی، بررسی اثر پیری عایقی است. فرایند پیری عایقی به شرایط کارکرد و طراحی تجهیزات بستگی دارد. از سوی دیگر نرخ پیری عایقی تابعی از دما، میزان اکسیژن و رطوبت است. آزمون‌های پایش وضعیت ترانسفورماتور و پیری روغن به شرح زیر هستند:

۱-۴-۲-۲- آزمون‌های لازم برای تعیین وضعیت روغن

هدف از این آزمایش‌ها پایش روغن و اطمینان از شرایط آن جهت ادامه بهره‌برداری است. اگرچه تعداد زیادی از آزمایش‌ها بر روی روغن ترانسفورماتور قابل‌انجام است اما برای تعیین وضعیت روغن در حال بهره‌برداری آزمایش‌های شرح داده‌شده در زیر کافی است. بر پایه نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌ها، اقدامات اصلاحی لازم باید صورت بگیرند. این آزمایش‌ها باید بر اساس استانداردهای IEC60422 (دستورالعمل نظارت و نگهداری برای روغن‌های معدنی عایقی در تجهیزات الکتریکی) و IEEE C 57, 106 (دستورالعمل IEEE برای پذیرش و نگه‌داری روغن‌های عایق در تجهیزات الکتریکی) صورت بگیرند.

- **آزمون‌های فیزیکی روغن**

رنگ و وضعیت ظاهری یکی از اولین تست‌های روغن است. با اینکه این آزمون‌ها بیشتر کیفی هستند. اما در کنار هم نشان‌گر مفیدی از تخریب روغن هستند. تغییر رنگ ناگهانی یا تیره رنگ بودن روغن می‌تواند نشان‌دهنده مشکل حل شدن آب، ذرات کربن در روغن و یا وجود لجن در محفظه‌های ترانسفورماتور باشد. آزمون فیزیکی دیگر مربوط به روغن ترانسفورماتور بررسی گرانروی روغن ترانسفورماتور است. به‌طور معمول پیری و اکسیداسیون در روغن گرانروی را افزایش می‌دهد.

- **آزمون‌های شیمیایی روغن**

اولین آزمون شیمیایی روغن مربوط به بررسی اسیدیته روغن است. روغن به علت وجود فرآورده‌های اسیدی ناشی از اکسیداسیون، اسیدی می‌شود. اسیدها می‌توانند باعث خوردگی در بخش‌های فلزی ترانسفورماتور شده و موجب تخریب سلولوز نیز بشوند. آزمون اسیدیته مخصوصاً برای پایش پیری روغن مفید است. با افزایش نرخ اسیدی نرخ پیری روغن نیز افزایش می‌یابد. این آزمون به‌منظور تعیین زمان مناسب برای تصفیه شیمیایی یا تعویض روغن استفاده می‌شود. دیگر تستی که بر روی روغن ترانسفورماتور انجام می‌پذیرد، تست تعیین سطح گوگرد روغن است. سطح گوگردی که در روغن پالایش‌شده وجود دارد به عیار و روش‌های تصفیه نفت خام بستگی دارد. بعضی از

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

ترکیب‌های حاوی گوگرد در روغن‌ها تا اندازه‌ای در اکسیداسیون روغن فعال هستند. بدین‌معنی که فرایند واکنش با پروکسیدهای شکل‌گرفته متوقف شده و زنجیره واکنش اکسیداسیون شکسته می‌شوند. به‌طورکلی هنگام طراحی روغن ترانسفورماتور دو ویژگی متضاد هم وجود دارد. پایداری خوب برابر اکسیداسیون بر پایه ترکیبات طبیعی و دیگری اثر خوردگی کم بر مس و نقره به‌کاررفته در ترانسفورماتور این دو ویژگی را شامل می‌شود. به‌طور خلاصه درصورتی‌که نتایج سطح گوگرد در روغن از میزان تعیین‌شده بیشتر باشد روش‌های اصلاحی زیر باید صورت گیرد:

۱- اضافه کردن پسیواتور به روغن و حفظ سطح ماده پسیواتور،

۲- در صورت امکان تصفیه شیمیایی روغن یا تعویض آن با روغن بدون خوردگی.

- **آزمون‌های الکتریکی**

ضریب تلفات دی‌الکتریک به‌عنوان اولین تست الکتریکی موردارزیابی قرار می‌گیرد. ضریب تلفات دی‌الکتریک نشان می‌دهد که میدان الکتریکی AC چگونه بر روغن اثر می‌گذارد. در برابر این تست مقاومت ویژه که نشان‌دهنده قابلیت انتقال بار الکتریکی روغن تحت شرایط DC است، نیز باید اندازه‌گیری شود. هر دو آزمون ذکرشده به شدت به مقادیر حتی کوچک آلایندگی‌های کلوبیدی، فراورده‌های اکسیداسیون یا لجن‌های قطبی یا آلایندگی‌های یونی حساس هستند. مقاومت ویژه علاوه به موارد ذکرشده تحت تأثیر آلودگی با نمک‌های فلزی و آب نیز است. بنابراین انجام این آزمایش‌ها برای روغن‌های تحت بهره‌برداری مفید هستند. محدوده مجاز مقادیر ضریب تلفات عایقی و مقاومت ویژه به نوع و محل نصب ترانسفورماتور وابسته است اما به‌طورکلی مقادیر بالای ضریب تلفات الکتریکی و مقاومت ویژه کم دلالت بر کم شدن استقامت عایقی روغن ترانسفورماتور دارند. در مراحل اولیه پیری، کشش سطحی بین روغن و آب با سرعت نسبتاً زیادی تغییر می‌کند. اما پس از رسیدن تخریب به سطوح متوسط ثابت می‌شود. اندازه‌گیری این پارامتر برای شناسایی مواد حاصله از تخریب و وجود آلودگی‌های دو قطبی محلول در روغن مفید است. همچنین این آزمون برای شناسایی لجن حل‌شده در روغن قبل از اینکه به‌صورت رسوب درآید پیشنهاد شده است. مقادیر کمتر از ۲۲ mN/m نشان‌دهنده این شرایط است، اما لازم است که با انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری لجن صحت آن تأیید شود.

تست دیگری که بر روی روغن ترانسفورماتور انجام می‌گیرد بررسی ولتاژ شکست است. ولتاژ شکست نشان‌دهنده قابلیت روغن به‌عنوان عایق الکتریکی است که یکی از نقش‌های اصلی روغن است. این پارامتر به حضور فیزیکی روغن آلودگی در روغن حساس است. ولتاژ شکست در مناطقی که تنش الکتریکی بالا است به طرز قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. این مناطق معمولاً جذب‌کننده آب و ذرات جامد هستند. بنابراین این آزمایش برای شناسایی این چنین آلودگی‌هایی مفید است. گرچه ولتاژ شکست پایین نشان‌دهنده وجود آلودگی است اما باید دقت شود که ولتاژ شکست بالا به منزله بدون آلودگی بودن روغن ترانسفورماتور نتیجه‌گیری نمی‌شود.

آزمون پایداری در برابر اکسیداسیون نیز دیگر آزمون روغن ترانسفورماتور است. اکسیداسیون به معنی تخریب روغن ترانسفورماتور در دمای کار نرمال در حضور اکسیژن است. همچنین توانایی روغن در مقابله با اکسیداسیون را پایداری در برابر اکسیداسون می‌نامند. آزمایش پایداری در برابر اکسیداسیون برای روغن‌های در حال بهره‌برداری به معنی اندازه‌گیری استقامت باقی‌مانده روغن جهت مقابله با اکسیداسیون است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

محدوده مجاز برای هر یک از آزمون‌های اشاره‌شده در فوق در جدول ۲-۱۸ نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از این تست‌ها لازم است توسط کارشناس با محدودیت‌های ذکرشده در جدول و در نظر گرفتن نوع روغن، مشخصات ترانسفورماتور، نتایج آزمون‌های قبلی و روند سرعت تغییرات نتایج مقایسه شود.

جدول ۲-۱۸ محدودیت نتایج آزمون‌های روغن در حین بهره‌برداری مطابق با استاندارد IEC 60422

آزمایش	ولتاژ (V)		
	کمتر از ۷۲/۵	۱۷۰ - ۷۲/۵	بیشتر از ۱۷۰
اسیدیته $mg\ KOH/g$	۰/۳	۰/۲	۰/۱۵
ولتاژ شکست kV	۳۰	۴۰	۵۰
رنگ و ظاهر	تمیز و بدون اثری از تیرگی		
مقاومت دی الکتریکی در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد	۰/۵	۰/۵	۰/۲
کشش	۲۴	۲۴	۲۴
گرانروی	بیشترین مقدار افزایش نهایتاً ۴۰ در صد مقدار اولیه		
آب محلول mg/Kg	۲۵	۱۵	۱۰

۵-۲-۲- پایش وضعیت عایقی

در زمینه پایش وضعیت عایقی ترانسفورماتورهای نیروگاهی معمولاً باید از دستگاه پایش ساخت شرکت Hydran M2 استفاده شود. اساس این ابزار تجزیه و تحلیل گازهای موجود در محفظه تانک و دمای روغن ترانسفورماتور است. این دستگاه با اتصال به محفظه تانک ترانسفورماتور می‌تواند وضعیت ترانسفورماتور را به‌صورت بر خط پایش کند. خطاهای حرارتی و الکتریکی در ترانسفورماتورهای قدرت مواد عایقی را تجزیه کرده و با توجه به شدت خطا گازهایی متصاعد می‌کنند که درون روغن ترانسفورماتور حل می‌شوند. با توجه به گردش روغن در داخل ترانسفورماتور و تماس آن با قسمت‌های اصلی تجهیز، روغن تمامی مواد جامد و گازهای محلول را با خود حمل می‌کند. در نتیجه با نمونه‌برداری و شناسایی گازهای محلول در روغن ترانسفورماتور تشخیص خطا امکان‌پذیر است. در دستگاه Hydran به جای نمونه‌برداری گازهای محلول، از روش‌های ابزار دقیق جهت تخمین استفاده می‌شود. در روش‌های گازکروماگرافی گازهای هیدروژن، متان، اتان، اتیلن، استلن، منوکسید کربن، دی‌اکسید کربن، اکسیژن و نیتروژن را اندازه‌گیری می‌کنند. حد تشخیص این روش‌ها در حد ۱ PPM برای گازهای هیدروکربنی، ۵ PPM برای هیدروژن و ۲۰ PPM منواکسید کربن، ۵۰ PPM برای دی اکسید کربن و برای گازهای جوی ۱۰۰۰ PPM است. در دستگاه Hydran با توجه به مدل‌های مختلف آن قابلیت تشخیص ۲ تا ۴ نوع از گازهای مطرح‌شده را دارد. در جدول ۲-۱۹ خلاصه پایش وضعیت ترانسفورماتور با استفاده از گازهای کلیدی نشان داده شده است.

جدول ۲-۱۹ شناسایی خطا با استفاده ار روش گازهای کلیدی

مشخصه خطا	گاز کلیدی

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

تخلیه جزئی	H_2
خطای حرارتی با دمای بالای ۳۰۰	C_2H_6
خطای حرارتی با دمای ۷۰۰-۳۰۰	C_2H_4
خطای حرارتی با دمای بالاتر از ۷۰۰	$C_2H_4-C_2H_2$
تخلیه الکتریکی	$C_2H_2 - H_2$

دستورالعمل طراحی توابع حفاظتی

با توجه به اهمیت طراحی رله در حفاظت نیروگاه‌ها، تمامی رله‌های استفاده‌شده باید ویژگی‌های ارائه‌شده در زیر را داشته باشد:

۱-۳- طراحی فیزیکی

أ. کیس (پوشش) باید قابلیت نصب به روش‌های زیر را دارد:

- نصب نیمه-تراز: پوشش را باید بتوان به‌صورت نیمه تراز در پنل سوئیچ با کمک چهار قلاب ثابت‌کننده، نصب کرد.
- نصب در یک دندانه‌ی ۱۹ اینچی: یک صفحه نصب با تمام برش‌های مناسب برای تعبیه سیستم حفاظتی درون قفسه ۱۹ اینچی باید در دسترس باشد که اطلاعات کامل از دیتاشیت قابل‌مطالعه باشند.
- نصب سطحی: رله باید از یک فریم لولا شکل برای نصب سطحی استفاده کند.

ب. رله باید دارای قابلیت ریست شدن باشد و با سه هدف لیست‌شده در زیر، این قابلیت فعال شود:

- ریست کردن رله‌های تریپ‌زنی و قفل رله در موارد موردنیاز، همچنین رله‌های سیگنالینگ و LEDها و حذف مشخصه دیستانس به هنگام اجرای برنامه کنترلی.
- ریست کردن پیام‌های خطا که توسط عملگرهای تشخیص خطا یا self-monitoring شناسایی شده‌اند.
- ریست کردن کل واحد حفاظتی پس از تشخیص نقص جدی توسط عملگرهای تشخیص خطا یا self-monitoring.

برای تنظیم پارامترهای مختلف، خواندن رخدادها و اندازه‌گیری ولتاژ و جریان سیستم و همچنین برای اهداف تشخیصی و نگهداری، رله باید قابلیت اتصال به یک کامپیوتر شخصی (PC) را داشته باشد.

ت. رله‌های طراحی‌شده و به‌کاررفته در سیستم‌های حفاظتی واحدهای تولیدی باید حداقل شرایط ارائه‌شده در جدول ۳-۱، را داشته باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

جدول ۳-۱ داده‌های عمومی

شاخص	تنظیمات موردنیاز	استاندارد پیشنهادی
رنج دمایی برای بهره برداری	*-15° c to + 65 ° c*	*EN 60255-6 (1994)*
رنج دمایی برای ذخیره سازی	*- 45 ° c to + 95° c*	*IEC 60255 – 6 (1988)*
رطوبت	*93 % , 40 ° c , 4 days*	*IEC 60068 –2 –3(1969)*
تست لرزه‌ای	*5 g , 30 s , 1 to 33 Hz (1 octave / min)*	*IEC 60255–21–3(1995) IEEE 344 (1987)*
تست عایقی	*2kV , 50 Hz , 1 min 1kV across open contacts*	*EN 60255- 5 (2001) IEC 60255 – 5 (2000)*
تست ولتاژ برق‌گیر	*5 kV , 1.2 / 50 µs*	*EN 60255 – 5 (2001) IEC 60255 – 5 (2000) EN 60950 (1995)*
تست اغتشاش انفجاری ۱ *MHz*	*1.0/2.5 kV , CI , 3 : 1 MHz 400 Hz rep . freq .*	*EN 60255 – 5 (2001) IEC 60255 – 5 (2000)*
تست حالت گذرای خطا	*2.4 kV , CI . 4*	*IEC 60255 22–1(1988) ANSI / IEEE C37.90.1(1989)*
تست دشارژ الکترواستاتیکی (*ESD*)	*6/8 kV (10 shots) , CI . 3*	*EN 61000 – 4–4(1995) IEC 61000–4– 4 (1995)*
امنیت واسط‌های مغناطیسی در فرکانس‌های سیستم قدرت	*300 A/m : 1000 A/m : 50 / 60 Hz*	*EN 61000–4 –2 (1996) IEC 61000 –4–2 (2011)*
تست واسط فرکانس رادیویی (*RFI*)	• *0.15 -80 MHz , 80 % amplitude modulated 10 V , CI . 3* • *80 – 1000 MHz , 80% amplitude modulated 10 V/m , CI . 3* *900 MHz , puls modulated*	*EN 61000 -4 – 8 (1993) IEC 61000 – 4 –8(1993)*
انتشار[۵۳]	*CI . A*	*EN 61000–4 – 6 (1996) EN 61000 – 4 – 6 (1996) EN 61000 – 4 – 3 (1996) IEC 61000 – 4 – 3(1996) ENV 50204 (1995)*

۲-۳- توابع حفاظتی و ویژگی سیگنال آن‌ها

۵۳ *Emission*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

أ. سیستم حفاظتی طراحی‌شده باید تمامی توابع حفاظتی برای حفاظت واحدهای ژنراتور و ترانسفورماتورها را شامل شود. در جدول ۳-۲ این توابع حفاظتی مشخص شده‌اند.

جدول ۳-۲ توابع حفاظتی ضروری برای سیستم حفاظتی

تابع حفاظتی	تابع حفاظتی
حفاظت دیفرانسیلی ژنراتور	**حفاظت دیفرانسیلی ترانسفورماتور**
حفاظت اضافه جریان زمان محدود (زیر جریانی)	**حفاظت اضافه جریان لحظه‌ای (زیر جریانی)**
حفاظت اضافه جریان ولتاژ کنترل‌شده	**حفاظت اضافه جریان زمان معکوس**
حفاظت اضافه جریان جهت‌دار با مشخصه‌های زمانی معکوس و یا محدود	**حفاظت جریان توالی فاز منفی**
حفاظت اضافه ولتاژ زمان محدود (زیر ولتاژ)	**حفاظت خطای استاتور به زمین (۹۵٪)**
حفاظت خطای روتور به زمین	**حفاظت اضافه ولتاژ لحظه‌ای (زیر ولتاژ) با ارزیابی مقدار پیک**
حفاظت تعادل ولتاژ	**حفاظت خطای استاتور به زمین ۱۰۰٪ (+ خطای روتور به زمین)**
حفاظت زیر امپدانس	**حفاظت رأکتانس مینیمم (تلفات تحریک)**
حفاظت اضافه‌بار	**حفاظت جریان توالی فاز منفی معکوس**
حفاظت اضافه دما	**حفاظت فرکانس**
حفاظت اضافه تحریک	**حفاظت قطب**

ب. همه بازه‌های تنظیمات باید گسترده بوده تا توابع حفاظتی را برای کاربردهای چندگانه مناسب سازد. تمامی پارامترهای اصلی که باید قابلیت تنظیم داشته باشند، در بندهای زیر مشخص شده است.

- کانال و یا کانال‌های ورودی
- تنظیمات pick up
- رله زمانی
- تعریف مشخصه‌های بهره‌برداری
- منطق قطع
- منطق سیگنال کنترلی

ت. تنظیمات یک پارامتر خاص توابع حفاظتی باید به‌گونه‌ای فعال شود که به کانال‌های ورودی خاصی مرتبط شوند. سیگنال‌های ورودی و خروجی دیجیتالی نیز باید به‌صورت منطقی به هم مرتبط شوند. این شرایط در بندهای زیر اشاره شده است:

- خروجی‌های قطع و وصل هر تابع حفاظتی را می‌توان برای کانال‌های رله کمکی قطع و وصل که متناسب با حالت ماتریسی ساخته شده‌اند، اختصاص داد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- سیگنال‌های pick up و قطع و وصل را می‌توان برای کانال‌های رله کمکی سیگنال دهی، اختصاص داد.
- تأمین پیش‌نیازهای لازم برای هر تابع حفاظتی با یک سیگنال دیجیتال (مثلاً ورودی دیجیتالی و یا سیگنال قطع سایر توابع حفاظتی) باید صورت گیرد.
- سیگنال‌های خارجی اعمال‌شده برای ورودی‌های دیجیتالی را می‌توان در هر حالت مناسب پردازش کرد.
- سیگنال‌های دیجیتالی را می‌توان برای ساخت توابع منطقی با هم ترکیب کرد، مثلاً سیگنال‌های فعال‌سازی و یا بلوکه‌کننده خارجی با سیگنال‌های ورودی یک تابع حفاظتی داخلی و در این صورت استفاده از آن برای مسدودسازی یکی از توابع حفاظتی دیگر.

۳-۳- واحد تغذیه رله

أ. برای حفاظت واحد تغذیه کمکی باید خازن‌هایی تعبیه شود. که قادر به قطع وقفه‌های کوتاه (حداکثر ۲۰ میلی ثانیه) در ولتاژ ورودی باشند. رنج ولتاژ مورداستفاده می‌تواند منطبق با یکی از بازه‌های مشخص‌شده در جدول ۳-۳ باشد.

جدول ۳-۳ مشخصات ولتاژ رله

مشخصات	حالت ۱	حالت ۲	حالت ۳
رنج ولتاژ	*36 to 312 V DC*	*24 to 48 Vdc-* *48 to 110 Vdc, and 30 to -100Vac (rms)* *110 to 250 Vdc, and 100 to-240Vac (rms)*	*24-250 Vdc*

ب. بارگیری رله از واحد تغذیه اصلی(باتری) در شرایط عادی باید کمتر از ۲۰ وات باشد.

ت. بارگیری رله از واحد تغذیه اصلی(باتری) در شرایط خطا با توجه به تعداد واحدهای I/O باید کمتر از مقادیر گزارش‌شده در جدول ۳-۴ باشد.

جدول ۳-۴ نرخ مجاز بارگیری رله در شرایط خطا

تعداد *I/O*	۱	۲	۳	۴
بارگیری	۲۲	۲۷	۳۲	۳۷

ث. رله مجاز است در صورت دارا بودن گزینه یا واسط اضافی در مقدار ۲/۵ وات توان اضافی دریافت کند.

۴-۳- واحد ترانسفورماتور ورودی

أ. صفحه نصب واحد حفاظتی باید حداقل ۹ عدد CT و VT را در خود جای دهد.

ب. فرکانس اسمی این واحدها باید در رنج ۵۰ یا ۶۰ هرتز باشد.

ت. جریان اسمی نامی این واحدها حداکثر باید ۵ آمپر باشد.

ث. نسبت حرارتی مدار جریان باید حداقل قادر به تحمل ۴ برابر جریان نامی واحد به مدت ۱۰ ثانیه باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

ج. ولتاژ اسمی واحد باید می‌تواند بین ۸۰ تا ۲۰۰ ولت باشد.

ح. نسبت حرارتی مدار ولتاژ باید حداقل قادر به تحمل ۲ برابر ولتاژ نامی واحد به مدت ۱۰ ثانیه باشد.

۳-۵- واحد پردازنده اصلی

أ. از میکروپروسسور مبتنی بر ۸۰۴۸۶ (حداقل تکنولوژی موردنیاز) در واحد اصلی پردازنده حفاظتی می‌توان استفاده کرد.

ب. نمونه‌های گرفته‌شده توسط مبدل A/D باید به کمک یک پردازنده که می‌تواند از نوع سیگنال دیجیتال (DSP) از قبل پردازش شوند.

ت. واسط‌های اتصال یک کامپیوتر HMI و ارتباط برقرار کردن با سیستم کنترل ایستگاه (SPA، IEC60870.S.103) باید گنجانده شده باشد.

ث. باید حافظه مناسب در نظر گرفته شود.

۳-۶-ویژگی‌های اپتوکوپلر

أ. تعداد اپتوکوپلرهای موجود در سیستم حفاظتی حداقل باید ۴ تا باشد.

ب. بیشینه جریانی که این اپتوکوپلر می‌تواند بکشد باید کمتر از ۱۲ میلی‌آمپر باشد.

ت. سایر ویژگی‌ها به شرط رعایت دو بند فوق می‌تواند به دلخواه کارفرما تعیین گردد.

۳-۷- مشخصات کنتاکت‌ها

أ. تعداد کنتاکت‌ها حداقل باید ۲ برابر تعداد واحدهای I/O باشد و از مقدار ۸ بیشتر باشد.

ب. بیشنه ولتاژ کاری آن باید برابر با ۳۰۰ ولت در شرایط AC باشد.

ت. به‌طور خلاصه الزامی است که شرایط جدول ۳-۵ برای رله در نظر گرفته شده باشد.

جدول۳-۵ ویژگی کنتاکت‌ها

کنتاکت های تریپ	
ماکزیمم ولتاژ کار	*300 V AC or V DC*
نرخ پیوستگی	*5 A*
ایجاد و حمل[۵۴] برای ۰/۵ ثانیه	*30 A*
قطع برای *30 ms*	*250 A*
ایجاد توان تحت *110 V DC*	*3300 W*
ظرفیت قطع مدار برای *L/R=40 ms* **جریان قطع با ۱ کنتاکت**	*0.1 A*
جریان قطع با ۲ کنتاکت به‌صورت سری	*0.3 A*
کنتاکت‌های سیگنال‌دهی	

54 *Make and carry*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

تعداد کنتاکت‌ها	*6, 10 or 8 acc. to I/O unit (316DB61, 316DB62 or 316DB63), 1 contact per sig. relay with 1.5 mm2 terminals Each interface unit equipped with 1 C/O contact and the all other N/O contacts*
حداکثر ولتاژ کار	*250 V AC or V DC*
نرخ پیوستگی	*5 A*
ایجاد و حمل برای ۰/۵ ثانیه	*15 A*
قطع برای *30 ms*	*100 A*

۸-۳-ارتباط از راه دور

أ. سیستم حفاظتی باید قادر باشد با یک سیستم مانیتورینگ و ارزیابی (SMS) ارتباط برقرار کرده و یا با یک سیستم کنترل ایستگاه (SCS) از طریق لینک فیبر نوری ارتباط برقرار کند.

ب. پیشنهاد می‌گردد نرخ تبدیل داده در سیستم مخابراتی در رنج ۹۶۰۰ بیت بر ثانیه باشد و از پرتوکول مخابراتی IEC61850 پیروی کند.

ت. پیشنهاد می‌شود ۲ تا ۳ سوکت بدین‌منظور در رله اختصاص داده شود.

ث. ظرفیت حافظه ثبت رخداد برای ثبت ۲۵۶ رخ داد در یک میلی‌ثانیه باید مناسب باشد.

ج. تحت شرایط عادی، تأخیر کانال مخابراتی مورداستفاده بین دو رله‌ی مشابه یا مجزا از هم واحدهای نیروگاهی باید کمتر از ۱۰ میلی‌ثانیه باشد. این شرط برای کوتاه‌ترین مسیر بین دو رله و مسیرهای جایگزین در مواقع بروز پیشامد باید برقرار باشد.

ح. نرخ خطای بیتی (Bit Error Rate) در شبکه‌های فیبر نوری باید از 10^{-5} کوچک‌تر باشد.

خ. عدم تقارن زمانی کانال‌های رفت و برگشت اطلاعات نباید از ۱ میلی‌ثانیه بیشتر باشد.

د. در صورت استفاده از شبکه‌های فیبر نوری، مسیرهای جایگزین باید شناخته شده باشند.

ذ. ضروری است سوئیچ شدن مسیرهای رفت و برگشت با هم صورت پذیرد.

ر. در صورت عدم استفاده از تجهیزات مخابراتی کلاس حفاظتی باید از سوئیچ شدن به مسیر جایگزین اجتناب شود. قابل ذکر است که در این صورت، قطع شدن مسیر اصلی باعث از دست رفتن ارتباط مخابراتی بین دو رله مختلف خواهد شد.

ز. درصورتی‌که اطلاعات از مسیری غیر از مسیرهای تعریف‌شده دریافت شود، ضروری است عملکرد رله قفل گردد و یک سیگنال آلارم فعال شود.

۹-۳- تشخیص و نظارت خودکار

أ. سیستم حفاظتی باید دارای توابع خودتشخیصی و نظارتی که تضمین‌کننده ماکزیمم دسترسی برای خود ترمینال‌های حفاظتی و برای حفاظت خود سیستم قدرت است، باشد.

ب. در سیستم حفاظتی باید خرابی‌های سخت‌افزاری بلافاصله با یک کنتاکت آلارم سیگنال‌دهی شوند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

ت. تغذیه‌های کمکی خارجی و داخلی باید به‌صورت پیوسته پایش شوند.

ث. عملکرد صحیح و تلورانس مبدل A/D باید تست شوند، برای این منظور می‌توان با استفاده از سیکل‌های تبدیل دو ولتاژ مرجع تست می‌شود.

ج. سیستم حفاظتی باید قادر به چک منظم حافظه‌های پروسسور (توابع پیش‌زمینه) باشد.

ح. سیستم حفاظتی باید قادر به چک منظم اجرای برنامه‌ها باشد.

۱۰-۳- الزامات کانال مخابراتی برای حفاظت واحدهای نیروگاهی

- تحت شرایط عادی، تأخیر کانال مخابراتی مورداستفاده بین دو رله‌ی مشابه یا مجزا از همه واحدهای نیروگاهی باید کمتر از ۱۰ میلی‌ثانیه باشد. این شرط برای کوتاه‌ترین مسیر بین دو رله و مسیرهای جایگزین در مواقع بروز پیشامد باید برقرار باشد.
- نرخ خطای بیتی (Bit Error Rate) در شبکه‌های فیبر نوری باید از 10^{-5} کوچک‌تر باشد.
- عدم تقارن زمانی کانال‌های رفت و برگشت اطلاعات نباید از ۱ میلی‌ثانیه بیشتر باشد.
- در صورت استفاده از شبکه‌های فیبر نوری، مسیرهای جایگزین باید شناخته شده باشند.
- ضروری است سوئیچ شدن مسیرهای رفت و برگشت با هم صورت پذیرد.
- در صورت عدم استفاده از تجهیزات مخابراتی کلاس حفاظتی باید از سوئیچ شدن به مسیر جایگزین اجتناب شود. قابل‌ذکر است که در این صورت، قطع شدن مسیر اصلی باعث از دست رفتن ارتباط مخابراتی بین دو رله مختلف خواهد شد.
- درصورتی‌که اطلاعات از مسیری غیر از مسیرهای تعریف‌شده دریافت شود، ضروری است عملکرد رله قفل گردد و یک سیگنال آلارم فعال شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

دستورالعمل تست رله‌های حفاظتی

انجام تست‌های پیشگیرانه برای اطمینان از صحت عملکرد تجهیزات اساسی ترانسفورماتورها و ژنراتورهای نیروگاهی است. از مهم‌ترین تعمیرات و تست‌های پیشگیرانه می‌توان به بازدید دوره‌ای ژنراتورها، ترانسفورماتورهای قدرت، بریکرها و در نهایت سیستم‌های حفاظتی اشاره کرد. در انجام تعمیرات و تست‌های پیشگیرانه رعایت اصول و قواعد از پیش تعیین‌شده توسط کارشناسان فنی، الزامی است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به نحوه درست زمان‌بندی بین دو تست متوالی تجهیزات و نحوه انجام درست تست‌ها (غیرمخرب بودن تست‌ها، استفاده از تجهیزات مناسب برای تست، مشخص نمودن حداقل توابع ضروری تست، حفظ و ایمنی پرسنل در حین تست) اشاره کرد. در رله‌های دیجیتال علاوه بر قابلیت کنترل و تست داخلی نرم‌افزار رله، بخشی از سخت‌افزار داخلی رله نیز توسط بخش «خود وارسی‌کننده» موردتست قرار می‌گیرد. سخت‌افزار رله دیجیتال به دو قسمت تقسیم می‌شود. قسمت اول توسط خود رله و به‌صورت داخلی موردتست و ارزیابی قرار می‌گیرد و بقیه سخت‌افزار رله که به‌صورت داخلی تست نمی‌شوند، در قسمت دوم قرار می‌گیرد. در استراتژی تست این رله‌ها بیشترین تمرکز بر روی بخش‌هایی از سخت‌افزار رله متمرکز می‌شود که به‌صورت داخلی تست و ارزیابی نمی‌شود. جهت تست این قسمت‌ها می‌توان از دستگاه‌های میکروپروسسوری تست‌کننده رله‌های دیجیتال استفاده کرد.

۱-۴- تست‌های اولیه

أ. تمامی تست‌های مشخص‌شده در جدول ۴-۱ مطابق با استاندارد بیان‌شده، باید به‌طور کامل انجام گیرد.

جدول ۴-۱ برگه‌ی تست و آزمایش

ردیف	شماره استاندارد فنی موجود	آیتم‌های موردآزمایش
		الزامات عملکردی:
۱	*IEC 60255-100 Series Clause: 6.5, 6.7*	*Steady state requirements*
۲	*IEC 60255-100 Series Clause: 6.8*	*Dynamic simulation*
		الزامات ایمنی محصول:
۳	*IEC 60255-1 Clause: 6.4*	*Verification or measurement of clearance and creepage distance*

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

	IEC 60255-27 Clause: 10.5.2.2	
۴	IEC 60255-1 Clause: 6.3 IEC 60255-27 Clause: 10.5.2.3 IEC 60529	IP rating
۵	IEC 60255-1 Clause: 6.4 IEC 60255-27 Clause: 10.5.3.1	Impulse voltage
۶	IEC 60255-1 Clause: 6.4 IEC 60255-27 Clause: 10.5.4.5	Single fault condition
۷	IEC 60255-1 Clause: 6.4 IEC 60255-27 Clause: 10.5.3.4.1	Protective bonding resistance
	آزمایشات الکتریکی:	
۸	IEC 60255-1 Clause: 6.4 IEC 60255-27 Clause: 10.5.4.1	Maximum temperature of parts and materials
۹	IEC 60255-1 Clause: 6.4 IEC 60255-27 Clause: 10.5.4.3	Thermal short time
۱۰	IEC 60255-1 Clause: 6.4 IEC 60255-27 Clause: 10.5.4.4	Output relay, make and carry
	تست‌های EMC:	
۱۱	IEC 60255-26 IEC 60255-1 Clause: 6.15 IEC 60255-25	Radiated emission
۱۲	IEC 60255-26 IEC 60255-1 Clause: 6.15 IEC 60255-25	Conducted emission
۱۳	IEC 61000-4-16 IEC 60255-1 Clause: 6.15 IEC 60255-26 & IEC 60255-22-7	Power frequency immunity (BI only) +Verification of function

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۱۴	IEC 61000-4-5 IEC 60255-1 Clause: 6.15 IEC 60255-26 & IEC 60255-22-5	Surge immunity tests +Verification of function
۱۵	IEC 60255-26 IEC 60255-1 Clause: 6.15 IEC 61000-4-18 & IEC 60255-22-1	1MHz burst immunity tests –damp oscillatory waves +Verification of function
۱۶	IEC 60255-26 IEC 60255-1 Clause: 6.15 IEC 61000-4-18 & IEC 60255-22-1	Electrical fast transient/burst immunity (EFT) +Verification of function
۱۷	IEC 61000-4-2 IEC 60255-1 Clause: 6.15 IEC 60255-22-2 & IEC 60255-26	Electrostatic discharge (ESD) +Verification of function
۱۸	IEC 61000-4-8 IEC 60255-1 Clause: 6.15 IEC 60255-26	Power frequency magnetic field +Verification of function

۱-۱-۴-تست اندوکتانس سیم‌پیچ

هدف: برای اطمینان از اینکه اندوکتانس سیم‌پیچ‌های رله در محدود مشخص‌شده قرار دارند.

روش: رسانایی باید از طریق آرمیچر در هر دو حالت باز و بسته اندازه‌گیری شود (برای همین ابزارهای مکانیکی در صورت لزوم مورداستفاده قرار می‌گیرند تا آرمیچر در موقعیت ثابت قرار بگیرد). رله باید بدون استفاده از قطعات فلزی در مجاورت آن سوار شود. در صورت عدم نیاز، هیچ پیش‌شرطی برای سیم‌پیچ رله در نظر گرفته نمی‌شود.

روش ۱ (a.c): اندوکتانس سیم‌پیچ را باید در شرایط انرژی‌دهی رله اندازه‌گیری کرد. در غیر این صورت، ولتاژ U اعمال‌شده برای اندازه‌گیری، باید سینوسی دارای فرکانسی برابر با فرکانس نامی مقدار انرژی‌دهی یا رله d.c باشد، همان‌گونه که مشخص شده است. مقاومت سیم‌پیچ R و جریان اندازه‌گیری شده و سپس اندوکتانس سیم‌پیچ L با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$Z = U/I; \qquad Z^2 = R^2 + (2\pi f L)^2$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

روش ۲ (d.c): اندوکتانس باید با تعیین ثابت زمانی اندازه‌گیری شود. در زمانی که ولتاژ نامی U به سیم‌پیچ اعمال می‌شود، مقدار ثابت زمانی به‌عنوان زمان موردنیاز برای رسیدن به ۶۳ درصد از جریان نامی بیان می‌شود. سپس مقدار اندوکتانس با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$L = R\,t$$

روش ۳: اندازه‌گیری مستقیم با اندازه‌گیر LCR در فرکانس ۱ کیلوهرتز و ولتاژ نامی سیم‌پیچ، مگر اینکه خلاف آن مشخص شده باشد.

شرایطی که باید درنظر گرفته شوند:

۱) روش ۱، ۲ یا ۳؛

۲) محدودیت‌های اندوکتانس سیم‌پیچ؛

۳) ولتاژ اعمال‌شده توسط منبع a.c یا d.c؛

۴) فرکانس منبع a.c؛

۵) مقدار انرژی نامی؛

۶) هر روش جایگزین، اگر موارد فوق قابل‌اجرا نباشند.

۲-۱-۴- تست امپدانس سیم‌پیچ و مصرف توان

هدف: برای اطمینان از اینکه امپدانس سیم‌پیچ‌های رله یا میزان مصرف توان در محدوده مشخص‌شده قرار دارند.

روش:

روش ۱: امپدانس سیم‌پیچ رله باید در شرایط بدون انرژی و انرژی‌دهی اندازه‌گیری شود. در غیر این صورت، ولتاژ a.c اعمال‌شده برای اندازه‌گیری، باید سینوسی دارای فرکانسی برابر با فرکانس نامی مقدار انرژی‌دهی یا رله d.c باشد، همانگونه که تولیدکننده شرح داده است. زمانی که انرژی‌دهی d.c باید در هنگام اندازه‌گیری بر سیم‌پیچ اعمال شود، ابزار کافی برای ایزوله‌کردن مدارهای a.c و d.c باید فراهم شوند.

روش ۲: مصرف توان (توان اکتیو برای d.c یا توان ظاهری برای a.c) باید در شرایط انرژی‌دهی رله یا برای رله‌ای که مصرف توان آن با موقعیت قطعات متحرک آن متفاوت است، در شرایطی که توسط تولیدکننده شرح داده شده است، اندازه‌گیری شود.

شرایطی که باید درنظر گرفته شوند:

۱) روش ۱ یا ۲؛

۲) محدودیت‌های امپدانس سیم‌پیچ یا مصرف توان؛

۳) مقدار نامی ولتاژ سیم‌پیچ یا با روش ۲، مقادیر ولتاژ سیم‌پیچ؛

۴) روش ۱: ولتاژ منبع a.c و فرکانس آن؛

۵) هر روش جایگزین دیگر، اگر موارد فوق قابل‌اجرا نباشند.

۳-۱-۴- تست ولتاژ ضربه

هدف: برای اطمینان از اینکه رله در برابر اضافه ولتاژهای گذرای مشخص‌شده مقاومت می‌کند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

روش: در آزمایش ولتاژ ضربه، مقدار اوج و شکل موج باید طبق موارد مشخص‌شده توسط تولیدکننده بر روی قطعات مربوط به رله پیاده‌سازی شوند. شکل موج استاندارد برای شبیه‌سازی اضافه ولتاژهای صاعقه با زمان جبهه موج ۱,۲ میکروثانیه و زمان تا نصف مقدار ۵۰ میکروثانیه مشخص می‌شود. سایر شکل موج‌ها و تنظیمات آزمایش می‌توانند از قبل مشخص شده باشند. در هر حالت، امپدانس خروجی تولیدکننده ضربه نباید بیشتر از ۵۰۰ اهم باشد. آزمایش باید حداقل برای سه ضربه از هر قطب با فاصله حداقل ۱ ثانیه بین پالس‌ها انجام شود. از بین بردن عایق جامد مجاز ناست. هیچ‌گونه جرقه‌زنی از طریق تماس وجود نخواهد داشت، مگر اینکه این مورد را تولیدکننده مشخص کرده باشد، در این حالت جرقه باعث آسیب دائمی نمی‌شود و انرژی خروجی ژنراتور باید مشخص شده باشد. در صورت مشخص‌بودن، یک رله در شرایط جدید مشروط به پیش‌شرط زیر اعمال می‌شود، مگر اینکه روش‌ها و مقادیر دیگر مشخص شده باشند: پیش‌شرط شامل آزمایش‌های «گرمای خشک» و «گرمای مرطوب» است.

آزمایش گرمای خشک در محفظه حرارتی صورت می‌پذیرد. دمای هوا در ناحیه‌ای که نمونه‌ها نصب شده‌اند، در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد با دقت ۲ کلوین حفظ می‌شود و نمونه‌ها ۴۸ ساعت در محفظه نگهداری می‌شوند.

آزمایش گرمای مرطوب در یک محفظه آزمایش با رطوبت نسبی بین ۹۱ درصد و ۹۵ درصد انجام می‌شود. دمای هوا در ناحیه‌ای که نمونه‌ها نصب شده‌اند، باید در ۲۵ درجه سانتی‌گراد با دقت ۵ کلوین حفظ شود. نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در محفظه نگهداری می‌شوند.

شرایطی که باید درنظر گرفته شوند:

۱) تعداد ضربه‌ها، اگر غیر از سه ضربه مثبت و منفی باشد؛

۲) پایانه‌هایی که آزمایش ولتاژ ضربه به آن‌ها اعمال می‌شود؛

۳) شکل موج و مشخصات ژنراتور (از جمله انرژی خروجی)؛

۴) حداکثر مقدار ولتاژ ضربه؛

۵) جزئیات پیش شرط، در صورت نیاز؛

۶) نتایج آزمون موردنیاز و اندازه‌گیری‌های نهایی برای بررسی انطباق.

۴-۱-۴- تست مقاومت در برابر عایق

هدف: برای اطمینان از اینکه مقاومت الکتریکی کافی بین مدارهای مشخص‌شده از یک رله حفظ می‌شود.

روش: اندازه‌گیری ولتاژ d.c باید بر روی قطعات مربوط به رله اعمال شود که توسط تولیدکننده مشخص شده است. مقدار ولتاژ اندازه‌گیری باید ۵۰۰ ولت باشد مگر اینکه خلاف آن مشخص شده باشد. اندازه‌گیری مقاومت باید حداقل ۵ ثانیه پس از اعمال ولتاژ انجام شود. در صورت مشخص بودن، یک رله در شرایط جدید مشروط به پیش شرط زیر اعمال می‌شود، مگر اینکه روش‌ها و مقادیر دیگر مشخص شده باشند:

پیش‌شرط شامل آزمایش‌های «گرمای خشک» و «گرمای مرطوب» است.

آزمایش گرمای خشک در محفظه حرارتی صورت می‌پذیرد. دمای هوا در ناحیه‌ای که نمونه‌ها نصب شده‌اند، در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد با دقت ۲ کلوین حفظ می‌شود و نمونه‌ها ۴۸ ساعت در محفظه نگهداری می‌شوند.

آزمایش گرمای مرطوب در یک محفظه آزمایش با رطوبت نسبی بین ۹۱ درصد و ۹۵ درصد انجام می‌شود. دمای هوا در ناحیه‌ای که نمونه‌ها نصب شده‌اند، باید در ۲۵ درجه سانتی‌گراد با دقت ۵ کلوین حفظ شود. نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در محفظه نگهداری می‌شوند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

هیچ چگالی (تراکمی) وجود ندارد.

شرایطی که باید درنظر گرفته شوند:

۱) پایانه‌هایی که ولتاژ آزمایش باید بر روی آن‌ها اعمال شود، با استفاده از موارد زیر انتخاب می‌شوند:

• پایانه‌های هر مدار تماس: تماس‌های قطع برای این آزمایش باید باز شوند

• تمام پایانه‌های دارای ولتاژ تست یکسان به هم متصل شده و هیچ قسمت رسانایی در معرض اتصال الکتریکی قرار نمی‌گیرد، دومین مورد توسط یک فویل بسته‌بندی‌شده در اطراف رله‌ها با محفظه عایق شبیه‌سازی می‌شود

• پایانه‌های سیم‌پیچ‌های جداگانه

• تمام پایانه سیم‌پیچ‌های دارای ولتاژ تست یکسان به هم متصل شده و تمام پایانه‌های مدار تماس به هم متصل هستند

• پایانه‌های مدارهای تماس جداگانه

۲) ولتاژ اندازه‌گیری، اگر غیر از ۵۰۰ ولت باشد

۳) زمان خواندن حالت پایدار

۴) جزئیات پیش شرط، در صورت نیاز

۵) حداقل مقدار مقاومت در برابر عایق.

۴-۱-۵- تست گرمای مرطوب، حالت پایدار

هدف: برای ارزیابی مناسب بودن رله برای استفاده در شرایط رطوبت نسبی زیاد.

روش: این آزمایش باید مطابق با آزمایش استاندارد IEC 60068-2-78 صورت بپذیرد. در دوره زمانی رله‌ها، نیمی از تعداد نمونه‌ها باید در معرض پتانسیل (10 ± 100) ولت d.c قرار بگیرند یا طبق موارد بیان‌شده، بین دو انتهای سیم‌پیچ متصل به هم (مثبت) و سایر پایانه‌ها با قسمت‌های رسانا (منفی) اعمال شوند. تنها برای شرایط ذخیره‌سازی، در زمان ارزیابی تناسب، لازم نیست ولتاژ اعمال شود.

در پایان دوره، رله‌ها باید از محفظه خارج شوند و در معرض شرایط بازیابی مشخص‌شده توسط تولیدکننده قرار بگیرند.

شرایطی که باید درنظر گرفته شوند:

۱) سختی (دما، رطوبت نسبی و مدت‌زمان) شرایط مناسب‌سازی و بازیابی؛

۲) ولتاژ اعمال‌شده اگر غیر از (10 ± 100) ولت d.c باشد؛

۳) اندازه‌گیری‌های نهایی:

• هیچ شواهدی از خوردگی، لایه‌برداری یا خرد شدن و یا خراب شدن مکانیکی که می‌تواند عملکرد را مختل کند، وجود نداشته باشد.

۴-۱-۶- تست مقاومت حرارتی سیم‌پیچ

هدف: برای تعیین اینکه آیا مقاومت حرارتی سیم‌پیچ رله در محدوده مشخص‌شده قرار دارد یا خیر.

روش: رله باید طبق موارد بیان‌شده توسط تولیدکننده نصب شود. رله باید با موفقیت، چهار مقدار تقریباً برابر در تمام محدوده عملیاتی خود را تأمین کند و پس از رسیدن به تعادل گرمایی، برای هر یک از آن‌ها افزایش دما انجام شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

تمام اندازه‌گیری‌ها باید در دمای ثابت محیط انجام شوند و رله باید در برابر نشت، تابش خورشید و موارد مشابه محافظت شود. افزایش دما برای سیم‌پیچ‌های تولیدشده از یک ماده رسانا توسط فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta t_w = \frac{R_w - R_a}{R_a}\left(t_a + \frac{1}{\alpha_0}\right)[K]$$

به‌طوری‌که:

Nw متوسط افزایش دما است؛

Ry مقاومت سیم‌پیچ در تعادل گرمایی است؛

Ra مقاومت سیم‌پیچ در دمای محیط است؛

ta دمای محیط است؛

$\alpha 0$ ضریب دمایی مقاومت ماده رسانا در صفر درجه سانتی‌گراد است.

این فرمول می‌تواند برای دمای بین صفر درجه سانتی‌گراد تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد دارای اعتبار باشد.

برای مس

$$\alpha_0 = \frac{1}{234,5}[K^{-1}]$$

با افزایش دما، مقاومت حرارتی با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{th} = \frac{\Delta t_w}{P_w}[K/W]$$

جایی که در آن Pw مقدار توان تأمین‌شده برای سیم‌پیچ در تعادل گرمایی است.

این مقدار میانگین نتایج حاصل از چهار اندازه‌گیری با مقدار مشخص‌شده مقایسه می‌شود، مگر اینکه توسط تولیدکننده به‌صورت دیگری مشخص شده باشد.

شرایطی که باید درنظر گرفته شوند:

۱) نصب رله؛

۲) مقادیر انرژی غیر از چهار مقداری که به‌صورت برابر در تمام محدوده عملیاتی توزیع شده‌اند؛

۳) ضریب دمایی سیم، اگر غیر از مس الکترولیتی باشد؛

۴) روش ارزیابی اگر غیر از میانگین چهار مقدار اندازه‌گیری موردنیاز باشد؛

۵) محدودیت‌های مقاومت حرارتی.

۷-۱-۴- تست شوک

هدف: برای اثبات عملکرد رله در زمان وقوع و یا پس از شوک‌های غیرتکراری در زمان عملکرد یا هنگام انتقال.

روش: این آزمایش باید مطابق با آزمایش Ea از استاندارد IEC 60068-2-27 صورت بپذیرد.

روش ۱: قابلیت عملکرد در زمان شوک. در طول این آزمایش، رله در شرایط کار خود (در مورد رله‌های یکپارچه که با ولتاژ سیم‌پیچ کار می‌کنند، مگر اینکه خلاف آن مشخص شده باشد) و یک سری دیگر که در شرایط آزاد تنظیم

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مجدد قرار دارند، باید تحت یک سری شوک‌ها قرار بگیرند. هر دو آزمایش باید در هر دو جهت هر سه محور عمود بر هم انجام شوند. در طول آزمایش، بر عملکرد تماس باید نظارت وجود داشته باشد. هم در شرایطی که رله در شرایط کار است و هم در شرایط آزاد هیچ باز و بسته شدن مدار تماس بسته یا بازی نباید از ۱۰ میکروثانیه بیشتر شود، مگر اینکه مقدار دیگری مشخص شده باشد. بار تماس باید طبق حالت مشخص‌شده باشد.

روش ۲: قابلیت عملکرد پس از شوک. در طول این آزمایش رله باید در هر دو جهت هر یک از سه محور عمود بر هم متحمل شوک شود. رله نباید انرژی داشته باشد و تماس‌ها نباید موردنظارت واقع شوند.

۸-۱-۴- تست استقامت مکانیکی

هدف: برای ارزیابی عملکرد مکانیکی رله‌ها در شرایط انرژی نامی در تعداد زیاد چرخه.

روش: رله باید با ولتاژ سیم‌پیچ نامی یا موردی که مشخص شده است، انرژی گرفته و آزمایش در دمای اتاق انجام شود. اگر این جریان متناوب باشد، عمل سوئیچینگ نباید با منبع مدار نظارت همزمان باشد. فرکانس کار باید مطابق موارد مشخص‌شده باشد. رله باید در یک چرخه هم به حالت کارکرد و هم به حالت آزاد یا تنظیم مجدد برسد. عملکرد مکانیکی رله باید به‌صورت الکتریکی موردنظارت واقع شود، درحالی‌که تمام تماس‌های مجاز هم نوع رله، دارای اتصال موازی با استفاده از بار تماس هستند، همان‌گونه که مشخص شده است. بار تماس انتخاب‌شده باید نظارت مورداطمینان بر چرخه‌های انجام‌شده را تضمین کند، درحالی‌که باعث ایجاد سطحی از سایش نقاط تماس نشود که می‌تواند ارزش آزمایش را کم کند. در هر زمان از آزمایش، تعداد سوءعملکردهای جمع‌شده نباید از مقدار مشخص‌شده توسط تولیدکننده بیشتر باشد.

۲-۴- تست‌های پیشگیرانه و سالیانه

با توجه به اهمیت تست‌های دوره‌ای تجهیزات حفاظت و کنترل، موارد ذیل در برنامه‌های سرویس سالیانه به‌دقت باید انجام شود:

۱-۲-۴- تست‌های اساسی رله های حفاظتی و کنترلی

مطابق دستورالعمل‌های مدیریت شبکه و شرکت توانیر، در تست کامل رله‌های حفاظتی موارد زیر باید لحاظ گردد:

أ. تنظیمات و کانفیگ رله‌های حفاظتی و کنترلی نیروگاه‌ها باید به‌صورت مناسب بر روی تجهیزات مجدداً تنظیم گردند.

ب. تست‌های PICK UP , DROP, TIME TEST در رله‌های جریانی، ولتاژی و امپدانسی مطابق دستورالعمل‌های مربوطه باید انجام شود.

ت. در تست رله‌های جهتی جریانی، باید علاوه بر تست زاویه عملکرد تریپ رله، عدم عملکرد رله در زوایای دیگر سنجیده شود.

ث. صحت پیوستگی مدارات رله‌های EF و SEF باید بررسی شود.

ج. در تست رله دیفرانسیل، علی‌الخصوص رله‌های نیومریکال و غیر نیومریکال، تست‌های هارمونیک دوم باید انجام گیرد.

ح. باید در تست رله‌های دیفرانسیل و اتصال زمین محدود، تست‌های پایداری (به‌صورت تزریق جریان به قسمت اولیه ترانسفورماتورهای جریان و به‌صورت تک‌فاز و به ازای تمامی فازها) انجام شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

خ. حفاظت‌های مکانیکی مربوط به ترانسفورماتورهای قدرت، کمکی، زمین و راکتورها تریپ، آلارم، سیگنال و نشان‌دهنده‌ها باید به‌طور کامل موردبررسی قرار گیرند.

د. مجموعه تست رله دیستانس شامل تست ZONE REACH و کلیه فانکشن‌های داخلی آن (PSB, VTFF, AIDED TRIP , D.O.C , D.E.F, S.O.TF, FAULT LOCATOR) باید بررسی شوند.

ذ. مقادیر مربوط به DEAD TIME و RECLAIM TIME در ریکلوزر و تعداد مراحل ریکلوزر باید ارزیابی گردد و مدارات مربوطه چک شوند.

ر. رله سنکرون چک به ازای تمامی شرایط موجود بررسی شود.

ز. تست رله‌های کنترلی TCS، CCS، LOCK OUT برای شرایط مختلف انجام شود.

س. تست رله اضافه شار (آلارم و تریپ) باید انجام شوند.

ش. تست رله‌های حذف بار جریانی و ولتاژی و آلارم‌های مربوطه (در صورت وجود) باید بررسی گردند.

ص. تست رله فرکانسی و آلارم‌های مربوطه (تست کلیه مراحل فعال) باید انجام شوند.

ض. همچنین، میزان خطای قابل‌قبول در تست رله‌های حفاظتی باید مطابق موارد زیر باشد:

جدول۴-۲ میزان خطای قابل‌قبول در تست رله

مورد	مقدار مجاز
دامنه جریان	حداکثر ۵٪
دامنه ولتاژ	حداکثر ۵٪
دامنه فرکانس	حداکثر ۵٪
امپدانس	حداکثر ۵٪
زاویه	۳ درجه
موارد زمانی	حداکثر ۵٪ یا ۱۰۰ میلی‌ثانیه

ط. عملکرد کلیه خروجی‌ها و ورودی‌های رله شامل مدارات تریپ و آلارم و اسکادا و پوزیشن باید کنترل شود. برای رله‌های نیومریکال، پس از انجام تست‌های سالیانه، گزارش مربوط بهEVENT FAULT SETTING و CONFIGURE خروجی گرفته‌شده و تاریخ و زمان سرویس به‌روز گردد.

ظ. عملکرد LED رله ها باید بررسی شوند.

۲-۲-۴- تست زیر بار ON-LOAD TEST (سالیانه)

أ. در پایان برنامه تست سالیانه و پس از برق‌دار کردن تجهیزات، از فعال بودن کلیه فانکشن‌های رله‌ها باید اطمینان حاصل شود.

ب. مقادیر Idiff وIr و اختلاف فاز جریان‌های HV و LV در رله‌های دیفرانسیل و اتصال زمین محدود، باید اندازه‌گیری و صحت تنظیمات بررسی شوند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

ت. کنترل مدارهای تریپ آلارم با تحریک کنتاکت‌های مربوطه رله باید انجام شود.

۳-۴- فاصله بهینه تست‌های پیشگیرانه

- فاصله بهینه تست پیشگیرانه هر تجهیز با توجه به نیاز ضعیف‌ترین بخش آن وسیله برای انجام بازدیدهای دوره‌ای، مدت‌زمان در مدار بودن تجهیز، پیچیدگی و اهمیت تجهیز باید مشخص گردد.
- با نزدیک شدن به طول عمر مؤثر یک دستگاه باید فاصله زمانی بین اجرای تست‌های پیشگیرانه کوتاه‌تر شود.
- برنامه تست باید به‌گونه‌ای طراحی شود که در فواصل زمانی متفاوت هر بخش به‌طور جداگانه تست شود.
- برنامه تست و وارسی تجهیزات باید در کمترین زمان ممکن صورت گرفته و بخش‌های ضروری به‌طور مرتب در هر دوره اجرای برنامه، تست شوند.

برای نمونه در جدول ۴-۳ نمونه‌ای از برگ‌های تست موردنیاز برای رله‌های دیفرانسیل ترانسفورماتور و اضافه جریان با زمان معکوس ارائه شده است.

جدول ۴-۳ برگ آزمایش رله دیفرانسیل تراسفورماتور

تاریخ تست قبلی:	تاریخ آزمایش:	
الف) مشخصات ترانسفورماتور		
نام و شماره ترانسفورماتور:	نسبت تبدیل ترانسفورماتور:	قدرت نامی:
گروه برداری:	نسبت تبدیل CT جریان اولیه:	نسبت تبدیل CT جریان ثانویه:
نسبت تبدیل CT جریان ثالثیه:		نسبت تبدیل CT جریان جریان کمکی اولیه:
نسبت تبدیل CT جریان جریان کمکی ثانویه:		نسبت تبدیل CT جریان جریان کمکی ثالثیه:
ب) مشخصات رله		
نوع رله:	نام سازنده:	شماره سریال:
ج) تنظیمات رله:		

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

پیوست

پیوست

۱-۵- روش‌های حفاظت در مقابل لغزش قطب

لغزش قطب را می‌توان به‌سادگی با اندازه‌گیری مستقیم زاویه بار در ماشین سنکرون مشاهده کرد اما این روش مستلزم سنسورها و تجهیزات اضافی برای اندازه‌گیری است. روش‌های مشخصی وجود دارند که از ماشین‌های الکتریکی در مقابل خطرات ناشی از لغزش قطب بدون چنین تجهیزات حفاظتی، محافظت می‌کنند. در روش‌های کلاسیک برای تعیین لغزش قطب، تغییرات امپدانس ظاهری یک ژنراتور را که از سر ترمینال های آن دیده می شود، بررسی کرده و عموماً بر اساس رله‌های نوع دیستانس اعمال می‌کنند که ترکیبی از MHO و مشخصه‌های خطی هستند.

پیش‌نیازهای سیستم حفاظت در مقابل لغزش قطب

- تشخیص دقیق لغزش‌های قطب اولیه و نتایج آن برای مودهای تولید مصرف
- تشخیص نرخ لغزش قطب در بازه ۰/۱٪ تا ۱۰٪

تمایز میان لغزش‌های قطب رخ داده با یک سیستم مرکزی در امپدانس ماشین و سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور افزاینده آن سیستم (پله ۱) و لغزش‌های شیفت رخ داده با یک سیستم مرکزی میان ترمینال‌های ترانسفورماتور فشار قوی (پله ۲).

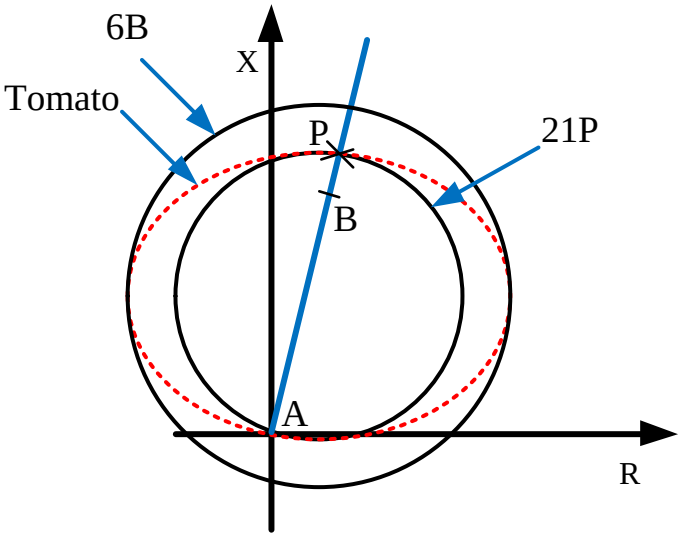
DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۱-۱-۵- انواع الگوهای حفاظت out of step

برخی از سیستم‌های واقعی مورداستفاده در الگوی رله‌های *OS* به‌صورت زیر توصیف می‌شوند:

- **الگوی دایره‌های هم‌مرکز**

الگوی دایره‌های هم مرکز برای تشخیص *OS* در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. به‌طور معمول، رله *OS* با مشخصه نشان داده‌شده همانند ۶۸، به سیستم رله خط انتقال اضافه شده و المانی که به حالت اضافه ولتاژ (جریان) می‌رسد را احاطه می‌کند، نظیر *21P*. به خاطر وجود اینرسی چرخان سیستم، زمان زیادی لازم است تا زاویه گشتاور افزایش یافته و محل نوسانات نیز از ۶۸ به *21P* برسد. برای خطایی که در محدوده *21P* رخ می‌دهد، هر دو المان لزوماً هم‌زمان عمل می‌کنند. واحد منطقی رله، توالی را شناسایی کرده و خطا و یا نوسان را تشخیص می‌دهد و عکس‌العمل مقتضی را آغاز می‌کند. کمان‌های نقطه‌چین دایره‌ها که به‌عنوان مشخصه‌های «*tomato*» نامیده می‌شوند، در واقع پیاده‌سازی آنالوگ مشخصه‌های «*tomato*» هستند. این الگو برای مسدودسازی عملکرد قطع *OS* و یا مسدودسازی عملکرد وصل مجدد، مناسب خواهد بود. اما این الگو برای قطع *OS* مناسب نیست، مگر آنکه یک واحد منطقی دیگر به سیستم رله اضافه شود. اگر خطای خارجی فاز نزدیک به محدوده‌ی *21P* رخ دهد، مانند نقطه‌ی *P* مشخص‌شده روی شکل به خاطر پایین بودن سطح انرژی آن نقطه است رله با تأخیر عمل می‌کند. از سوی دیگر محدوده‌ی ۶۸ دارای سطح انرژی به‌شدت بالاتری است و بسیار سریع‌تر از *21P* عمل می‌کند. با حذف جریان *infeed* ورودی به خطای خارجی پس از ناتوانی قطع مدار، می‌توان عملکرد متوالی المان‌های حفاظتی ۶۸ و *21P* را مدیریت کرد. اگر مدت‌زمانی که واحد منطقی بروز خطا را تشخیص می‌دهد کوتاه‌تر از اختلاف زمانی عملکرد دو المان باشد، خطا در نقطه *P* به‌صورت غلط به‌عنوان شرایط *OS* تشخیص داده شده و باعث قطع اشتباه *A* می‌شود. اگر برای جلوگیری از بروز این شرایط زمان را افزایش دهیم، نوسانات سریع *OS* به‌وجود می‌آید که از قطع واحد *OS* جلوگیری خواهد کرد. با اضافه کردن دایره مرکزی سوم تفکیک شرایط نوسانی و شرایط خطا بهتر صورت خواهد گرفت، اما این دایره دارای یک بار اهمی اضافه خواهد بود. قطع *OS* با استفاده از الگوی دو دایره هم مرکز قابل‌پیاده‌سازی است، درصورتی‌که عملکرد متوالی *68/21P* بررسی شده و توالی تنظیم مجدد نیز صحیح باشد. برای کاربردهای خطوط دارای سه باس، تأثیر نامطلوبی روی رله‌های مسدودسازی مبتنی بر *OS* خواهد داشت. این رله‌ها درصورتی‌که خطای سه‌فاز در مرحله بعدی رفع شود، از الگوی دایره هم‌مرکز استفاده می‌کنند.



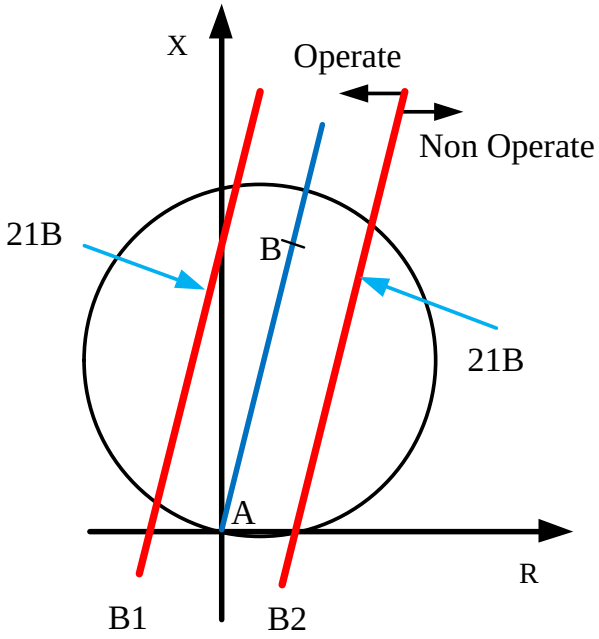
DOI: 10.30503/nripress.2020.151

شکل (۱) روش دایره‌های هم‌مرکز برای تشخیص OS

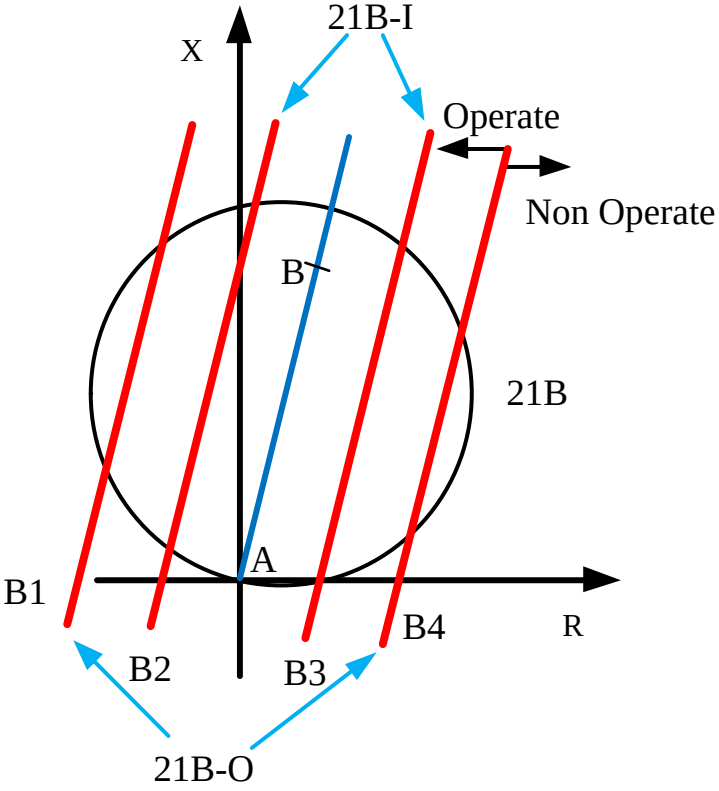
- **الگوی *Blinder***

یکی از انواع رله *Blinder* دارای مشخصه‌هایی است که در دیاگرام *R-X* خط انتقال (شکل ۳-۵) از خطوط موازی تشکیل شده‌اند. یک رله تک *Blinder*، مثل *21B*، دو مشخصه خطی را ارائه می‌کند. یک کاربرد مشخص این المان، برای محدودسازی پوشش رله دیستانس در محل بار است. یک رله تک *Blinder* به‌همراه واحد منطقی کمکی را می‌توان برای عملکرد قطع *OS* به‌کار برد. استفاده از این ساختار، تنها به‌کاربردهایی محدود است که در آن عملکرد مسدودسازی قطع رله‌های دیستانس فاز موردنیاز ناست، به این خاطر که نوسانات عبوری از این بخش خط (در نمودار *R-X*) باعث عملکرد رله‌های خط خواهد شد. یک رله *Blinder* واحد قادر نیست شرایط خطا و شرایط بروز *OS* را تا زمانی که توالی تنظیم مجدد رله تأیید شود، متمایز کند. چنین الگویی عملکرد قطع *OS* را تا زمانی که نوسانات به‌طور کامل از موقعیت *180* درجه عبور نکرده و به شرایط هم‌فاز برنگردد، به تأخیر خواهد انداخت. ساختار المان *OS* تک *Blinder* به این خاطر توصیه شده است که باعث می‌شود سیستم در اثر قطعی خط، به بخش خطادار و سالم تقسیم شود و بخش سالم خط نیز توسط رله‌های مقایسه‌فاز، حفاظت می‌شود. یک کاربرد دیگر این المان، قطع *OS* روی نوسانات عبوری از رله‌های خط است. در نهایت، این الگوی رله برای کاربردهای قطع *OS* نزدیک ژنراتور نصب می‌شود. الگوی دو *Blinder* (شکل ۳-۶) شرایط *OS* را با مشاهده ترتیب عملکرد *Blinder*های داخلی و خارجی، تشخیص می‌دهد. خطا باعث عملکرد هم‌زمان می‌شود. همچنین بروز شرایط *OS* نیز باعث می‌شود که *Blinder* ی خارجی اول از همه عمل کرده، و در ادامه نیز *Blinder* ی داخلی وارد عمل شود. الگوی دو *Blinder* امکان محدودسازی ناحیه قطع رله‌های دیستانس، مسدودسازی قطع *OS*، مسدودسازی قطع مجدد *OS* و یا تریپ زنی *OS* را صرف‌نظر از جهت نرمال پخش بار، فراهم خواهد کرد. انواع مختلف و شکل‌های مختلف مشخصه‌ها را می‌توان به‌منظور انتخاب سیستم حفاظتی به‌کار برد، همچون سیستم‌های حفاظتی دارای یک یا دو *Blinder* ، *MHO* و یا مشخصه‌های عدسی. الگوی *MHO* به شکل بهره‌برداری در حین نوسانات پایدار حساس است، به‌گونه‌ای که اگر مشخصه‌ها خیلی بزرگ باشند، این حساسیت بیشتر می‌شود. همچنین این روش ممکن است در شناسایی برخی از خطاهای لغزش قطب ناتوان باشد، درصورتی‌که تأخیرهای زمانی به‌منظور جلوگیری از قطع سیستم در شرایط نوسانی پایدار، استفاده شوند. الگوی تک *Blinder*، ایمن‌ترین الگوی متداول است اما هزینه‌ای که باید برای نصب این سیستم اضافه در مقابل عملکرد غلط سیستم پرداخت این است که یک سیکل لغزش قطب کامل برای عملکرد این روش حفاظتی، موردنیاز است. مشخصه *Blinder* دوبل، دارای امنیت کمتری نسبت به الگوی تک *Blinder* است، و ممکن است در شناسایی لغزش قطب اول که در ادامه بروی یک خطای نزدیک به ماشین، رخ می‌دهد، ناتوان باشد. نظیر الگوی تک *Blinder* ، این مدل نیز به یک سیکل لغزش قطب کامل برای عملکرد دقیق نیاز دارد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل (۲) روش تک Blinder برای تشخیص OS



شکل (۳) روش دوبل Blinder برای تشخیص OS

- **الگوی عملی حفاظت out of step**

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

الگوی پیشنهادشده برای ژنراتوری که سیستم حفاظت سنکرون خود را از دست داده است، الگوی *CEX- blinder* *CEB* است. این الگو از سه واحد اندازه‌گیری امپدانس و یک مدار منطقی برای بررسی تغییرات متوالی امپدانس در شرایط از بین رفتن حالت سنکرون استفاده می‌کند تا احتمال خروجی ژنراتور را هنگامی که زاویه بین ولتاژ ژنراتور و ولتاژ سیستم برابر ۹۰ درجه و یا کمتر است، به صفر برساند. سوئیچ‌زنی‌های کلیدهای حفاظتی معمولاً در این زاویه (۹۰ درجه و یا کمتر) توصیه می‌شود تا دوره کار قطع کن‌های مدار را به حداقل برساند. هنگامی که این الگو به‌دقت اعمال شود، می‌تواند از خروج ژنراتور در نیم سیکل اول لغزش تحت شرایط عدم سنکرون، جلوگیری کند. ازآنجایی‌که از بین رفتن حالت سنکرون در اصل یک پدیده سه‌فاز متعادل است، واحدهای رله مورداستفاده در این الگو تنها به شکل تجهیزات تک‌فاز خواهند بود.

۲-۵- حفاظت برگشت توان ژنراتور

یک ژنراتور هنگامی که توان ورودی مکانیکی به شفت آن در هنگام اتصال به سیستم قدرت حذف شود، حالت موتوری پیدا می‌کند. فرض بر این است که میدان ژنراتور تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد و ژنراتور به یک موتور سنکرون تبدیل می‌شود که عامل اصلی سنکرون شدن سرعت است. اگر تحریک میدان نیز از بین رفته باشد، ژنراتور ممکن است حالت سنکرون را از دست داده و به یک موتور القایی تبدیل شود. این قسمت تنها شرایط موتوری را با میدان مغناطیسی و ژنراتور توربین تحت سرعت سنکرون در نظر می‌گیرد. فرض بر این است که تحریک ثابت می‌ماند، در این صورت ژنراتور می‌تواند به‌صورت یک موتور سنکرون به‌طور نامحدود عمل کند. حالت موتوری به تحریک اولیه آسیب می‌رساند، نه به ژنراتور. حالت موتوری ممکن است ناشی از خطای اپراتور، خرابی مدار شکن ژنراتور در طی پروسه خاموش شدن یا به علت شکستن مکانیکی اجزا باشد. هر دو طرح حفاظت مکانیکی و الکتریکی در اغلب تأسیسات استفاده می‌شوند. حفاظت از موتور الکتریکی در قالب رله‌های قدرت معکوس است که طبق استاندارد تعیین می‌شوند. این رله جریان برق را در ترمینال‌های ژنراتور سیستم قدرت تشخیص می‌دهد. تلفات اصطکاک و توربین و نیز تلفات الکتریکی ژنراتور، در حالت موتوری، مقدار توان ورودی را تعیین می‌کنند. رله قدرت معکوس، ژنراتور و مدارشکن های میدانی و نیز تحریک اولیه را قطع می‌کند.

۱-۲-۵- اثر موتوری

موتوری شدن یک ژنراتور به این معنی است که تحت کنترل خودکار رگلاتور ولتاژ، سیستم قدرت در معرض خطر قرار ندارد. البته فرض بر این است که سیستم می‌تواند در مقابل کاهش ظرفیت تولید در نتیجه خروج سیستم، مقاومت کند. ازآنجایی‌که مدار میدان به دلیل از دست دادن تحریک اولیه تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد، بارگیری توان رأکتیو (*Var*) روی ژنراتور و نیز ولتاژ ترمینال پس از قطع توان، ثابت باقی می‌مانند. در مرحله بعدی، بارگذاری *Var*، بر اساس سطح لازم برای حفظ ولتاژ رگلاتور ولتاژ بدون توان خروجی *kW* تنظیم می‌شود. اگر ژنراتور در ابتدا تحت ضریب قدرت پیش فاز (*Vars* خروجی ژنراتور) عمل کند، انتظار می‌رود که خروجی *Var* افزایش یافته و حالت موتوری پیش بیاید. اگر ژنراتور قبل از دست دادن توان ورودی با ضریب قدرت پس فاز کار کند، *Vars* ورودی به ژنراتور کاهش می‌یابد.

سرعت تنظیمات *Var* متفاوت خواهد بود. از دست دادن توربین بخار منجر به کاهش آهسته توان خروجی و تغییر آهسته توان رأکتیو می‌شود به این خاطر که فشار بخار در توربین کم می‌شود. در نتیجه تنظیم *Var* سریع خواهد بود، که بر اساس پاسخ محرک و ثابت زمانی ژنراتور این تنظیم صورت می‌گیرد. اگر ژنراتور با ولتاژ رگلاتور تنظیم‌شده

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

به‌صورت دستی نزدیک به مقدار نامی بار قبل از حالت موتوری کار می‌کرد، شرایط بروز خسارت بیشتر می‌شد. رگلاتور دستی جریان میدان را روی مقدار موردنیاز برای بار نامی حفظ می‌کند. این جریان به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای درصورتی‌که توان خروجی kW وجود نداشته باشد، از مقدار استاندارد تجاوز می‌کند. در نتیجه ممکن است خروجی Var، ولتاژ ترمینال، و احتمالاً ولتاژ سیستم بسیار بالاتر از حد ایمن شوند. این نتایج ناخوشایند لزوم استفاده از کنترل رگلاتور ولتاژ را به‌صورت خودکار در هنگام سنکرون‌سازی با سیستم قدرت آشکار می‌سازد. هنگامی که تحریک میدان ژنراتور تحت سرویس است، ژنراتور به‌عنوان یک موتور سنکرون بدون آسیب عمل می‌کند. آسیب ژنراتور در صورتی اتفاق می‌افتد که تحریک و نیز محرک اولیه با هم حذف شوند. در این شرایط، ژنراتور ممکن است حالت سنکرون خود را از دست بدهد و به‌صورت یک موتور القایی با تحریک اولیه کمتر از سرعت سنکرون کار کند. اختلاف سرعت بین روتور و میدان مغناطیسی استاتور باعث ایجاد جریان در روتور می‌شود.

۲-۲-۵- تأثیر برگشت توان روی توربین بخار

حالت موتوری به‌طورکلی برای محرک اولیه خطرناک است نه برای ژنراتور. در توربین‌های بخار، تلفات هوایی سبب گرم شدن قابل‌توجه تیغه‌های توربین می‌شود. به‌طور معمول، جریان بخار این گرما را از تیغه‌ها و دیگر قسمت‌های توربین حذف می‌کند. در حالت موتوری، جریان کافی بخار برای خنک کردن وجود ندارد و حرارت ایجاد شده باعث انحراف تیغه و نرم شدن آن می‌شود. تیغه‌های دارای قطر بزرگ دارای سرعت نوک بالاتری هستند و گرمای بیشتری دارند. ازاین‌رو، درجه حرارت بحرانی معمولاً در فشار پایین در انتهای خروجی توربین اتفاق می‌افتد. تلفات حرارتی همچنین تابعی از چگالی بخار است. توربین‌های خنک‌کننده تحت خلأ عمل می‌کنند و می‌توانند خیلی طولانی‌تر از توربین‌هایی که با فشار بالا به‌کار می‌روند، در حالت موتوری مقاومت کنند. این بدان معنی است که مدت‌زمانی که یک توربین خنک‌کننده می‌تواند حالت موتوری را نگه دارد، در صورت از بین رفتن خلأ، به شدت کاهش می‌یابد. آسیب‌ها محدود به تیغه نمی‌شود. از دست دادن جریان بخار نه‌تنها توانایی توربین را برای از بین بردن گرما کاهش می‌دهد، بلکه همچنین توانایی متعادل‌سازی گرما را نیز کم می‌کند. نقاط داغ محلی می‌توانند باعث ایجاد استرس و انحراف درون توربین شوند. انحراف داخلی توربین نیز می‌تواند ساییدگی بین اجزاء را ایجاد کند، گرمای بیشتری تولید کند و باعث فرسودگی شود. حداقل جریان بخار موردنیاز برای خنک‌کننده بسته به نوع طراحی توربین متفاوت است؛ در برخی موارد جریان تحت توان خروجی خیلی کم برای جلوگیری از آسیب کافی نیست. بنابراین برای عملکرد سیستم تحت توان خروجی کمینه، سیستم حفاظتی لازم است. در این وضعیت یک رله قدرت پیش رو (*forward*) برای تعیین حداقل توان خروجی ژنراتور استفاده می‌شود. مدت قطع مدار با این رله باید به اندازه کافی تأخیر داشته باشد تا بتواند واحد را سنکرون کرد و بارگذاری تنظیمات رله نیز باید بیشتر باشد تا از قطع احتمالی رله در شرایط عادی و در زمان راه‌اندازی، جلوگیری کند.

۳-۲-۵- تأثیر برگشت توان روی سایر محرک‌های اولیه

حالت موتوری باعث مشکلاتی برای محرک‌های اولیه دیگر می‌شود. هنگامی که ورودی آب برای یک توربین آبی قطع می‌شود، محرک ممکن است زیر آب بماند. حالت موتوری در چنین حالت می‌تواند به دلیل به‌وجود آمدن حباب، به محرک آسیب برساند. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که توربین آبی به‌صورت یک پمپ با سر پایین عمل می‌کند. فشار پایین در پشت تیغه‌ها باعث تولید انفجاری از حباب‌های کوچک با دمای پایین در سطح تیغه می‌شود. نیروی این فوران، ذرات فلزی را از سطح تیغه به حالت تراشه جدا می‌کند و فرسایش تیغه را به دنبال دارد. ژنراتورهای درایوشده

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

با موتور دارای سیستم های محافظتی مکانیکی هستند که در صورت خرابی مکانیکی از جمله گرمای بیش ازحد، خاموش می‌شوند. در این واحدها ممکن است حالت موتوری در نتیجه قطع سیستم حفاظت مکانیکی رخ دهد. در این وضعیت، حالت موتوری می تواند خسارات جدی ایجاد کند، زیرا خطای مکانیکی اولیه رفع نشده است. حالت موتوری در این واحدهای همچنین خطر انفجار و آتش سوزی را به دلیل سوخت نشتی محتمل می کنند. توربین های گاز و دیگر واحدهای ژنراتور دنده‌ای تحت شرایط موتوری در معرض آسیب قرار دارند، به‌خصوص زمانی که چرخ‌دنده طراحی‌شده به‌صورت تک‌جهته باشد. در چنین طرح‌هایی، تنها یک سمت دندانه چرخ‌دنده ماشین‌کاری می‌شود تا به‌عنوان یک سطح درایو عمل کند. حالت موتوری، ورودی درایو را معکوس کرده سمت دیگر دندانه به‌صورت نیروی درایوکننده عمل می‌کند که باعث شل شدن و گرمای بیش‌ازحد می‌شود.

۴-۲-۵- حفاظت حالت موتوری

روش‌های مکانیکی همراه با رله‌های قدرت معکوس برای تشخیص شرایط موتوری استفاده می‌شوند. سیستم حفاظت مکانیکی در مقابل حالت موتوری برای یک توربین بخار می‌تواند به شکل سوئیچ‌های فشار دیفرانسیلی، آشکارسازهای دمای کوره خروجی، کنترل مانیتورهای سیستم کنترل روغن و قفل تعویض سوئیچ بخار اعمال شود. اندیکاتورهای جریان و رله‌های قدرت معکوس در توربین‌های آبی استفاده می‌شود. رله قدرت معکوس در واحدهایی که به‌عنوان کندانسورهای سنکرون عمل می‌کنند، قابل‌استفاده نیست. این رله به‌طورکلی به ماشین‌های آبی محدود است. در حالت خنک‌کنندگی، این واحدها تحت شرایط کنترل‌شده برای جلوگیری از آسیب در شرایط موتوری کنترل می‌شوند.

- **حفاظت مکانیکی: توربین‌های بخار**

ازآنجایی‌که حداکثر حرارت معمولاً در انتهای خروجی توربین بخار رخ می‌دهد، آشکارسازهای دما در مسیر اگزوز می‌توانند حالت موتور را تشخیص دهند. این آشکارسازها به‌طور معمول هشدار می‌دهند و به دلیل مشکلات ایمنی با آشکارسازها و تغییرات دما در داخل کوره اگزوز به‌عنوان حفاظت موتور اصلی مورداستفاده قرار نمی‌گیرند. مانیتورهای فشار در سیستم روغن ترمز توربین و سیستم‌های کنترل‌کننده روغن می‌توانند برای تعیین موقعیت دریچه بخار استفاده شوند. سیستم روغن ترمز توربین یک سیستم ایمن است. با کم شدن فشار، تمام دریچه‌ها بسته می‌شود. فشار روغن تنظیم‌کننده موقعیت گاورنر و دریچه‌های تعویض را جهت کنترل میزان بارگیری در شرایط عادی تغییر می‌دهد. فشار در این سیستم‌ها شاخص دقیقی برای نمایش بارگذاری واحد است و می‌تواند برای تشخیص شرایط موتور استفاده شود. سوئیچ‌های محدودکننده بر روی شیرهای بخار به‌گونه‌ای تنظیم‌شده‌اند که موقعیت شیر را نشان دهند. این سوئیچ‌ها برای نشان دادن بسته شدن شیر و قطع جریان بخار استفاده می‌شوند. این طرح دارای یک مشکل اساسی است. تعداد سوپاپ‌ها در واحدهای بزرگ افزایش یافته و اتصال سری بسیاری از سوئیچ‌های محدودکننده لازم است تا شاخص (تمام بسته) را برای قطع حالت موتوری فراهم کند. مشکلات تنظیم سوئیچ‌ها باعث عدم کارایی این طرح شده است. افت فشار دیفرانسیل در توربین فشار بالا یک معیار مستقیم برای تعیین جریان بخار است. استفاده از یک سوپاپ فشار که تحت جریان بخار با سرعت غیر اسمی بار کار می‌کند، یک روش مناسب برای تشخیص شرایط موتوری است. طرح‌های مکانیکی دقیق از مدارهای سری‌های اضافه و مدارهای منطقی موازی استفاده می‌کنند، به‌طوری‌که قطع یک کنتاکت نمی‌تواند الگوی حفاظتی را به خطر بیاندازد، اما این طرح‌ها با این فرض اعمال می‌شوند که جریان بخار تحت شرایطی که بسته شدن دریچه نشان داده می‌شود، متوقف می‌گردد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

این مورد همیشه درست نیست. دریچه‌های بخار ممکن است به علت انحراف و اتصال مکانیکی یا جریان برگشتی نشت کنند. ناکارایی در این طرح‌ها می‌تواند فاجعه‌آمیز باشد. تشخیص غلط حالت موتوری باعث قطع اشتباه ژنراتور می‌شود. با عملکرد شیر ناشی از نشتی، گاورنر سرعت نمی‌تواند سرعت بالای تنظیم را محدود کند و ممکن است آسیب شدیدی را به سیستم منجر شود. به همین دلیل، طرح‌های مکانیکی موتوری معمولاً توسط یک رله قدرت معکوس برای کنترل جابه‌جایی جریان بخار قبل از باز کردن ژنراتور بازرسی می‌شود.

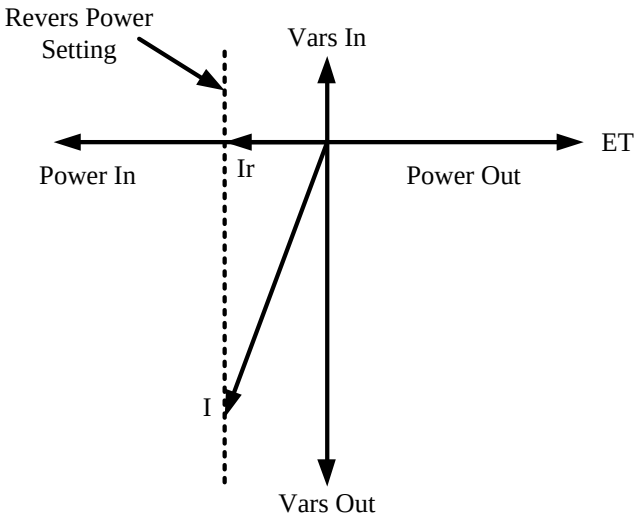
- **حفاظت الکتریکی**

وقتی انرژی محرک اولیه به یک ژنراتور حذف می‌شود، کمبود انرژی باید از سیستم برق تأمین شود. رله برق در ترمینال‌های ژنراتور به جستجوی ژنراتوری مشغول می‌شوند که بتواند این شرایط را تشخیص دهد. نوع محرک اولیه تعیین‌کننده میزان حساسیت موردنیاز برای رله است. توربین‌های گازی هنگام استفاده در حالت موتوری، همانند یک کمپرسور بزرگ هستند. توان مصرفی واحد برحسب کیلووات در حالت موتوری، می تواند تا ۱۰۰٪ مقدار نامی kVA برای یک ماشین تک‌شفت یا حداکثر ۱۰ تا ۱۵٪ برای ماشین دو شفت افزایش یابد. از سوی دیگر، توربین‌های آبی با تیغه‌های بالاتر از سطح آب به ۰٫۲ تا ۲ ٪ توان نامی برحسب کیلووات نیاز دارند. هنگامی که پروانه به‌طور کامل غوطه‌ور است، قدرت موتور می‌تواند به ۱۰۰٪ مقدار نامی برسد. توربین‌های آبی با تیغه‌های قابل‌تنظیم کاپلان (*Kaplan*) به کمتر از ۰٫۲٪ کیلووات نیاز دارند، به شرطی که تیغه‌ها در حالت صاف قرار بگیرند. دیزل ژنراتورهای بدون سیلندر، به حدود ۱۵٪ و یا ۲۵٪ کیلووات در موتورهای چهار و دو چرخ نیاز دارند. توربین‌های بخار تحت خلأ کامل به ۰٫۵ تا ۳٫۰٪ کیلووات نیاز دارند. توربین‌های بخار بدون کندانسور یا توربین‌های بادی بدون خلأ، بیش از ۳ درصد توان نامی موتور نیاز دارند.

بحث فوق نشان می‌دهد که حساسیت رله قدرت معکوس می‌تواند مسئله اصلی در طراحی سیستم حفاظتی توربین‌های بخار بزرگ و توربین‌های آبی باشد. رله‌های قدرت الکترومکانیکی و الکترونیکی با تنوع زیادی در دسترس هستند. این رله‌ها ممکن است از نظر آمپر یا از نظر وات سمت ثانویه تنظیم شوند. همچنین ممکن است یک فاز یا سه‌فاز باشند. استفاده از رله‌های تک‌فاز بر این فرض استوار است که تلفات موتوری در تمام فازها به‌طور مساوی اعمال می‌شود. این فرض همیشه درست نیست. در واحدهای بسیار بزرگ، تغییرات ۰/۲ تا ۰/۳ درصد توان خروجی اسمی بین فازها توسط محققان گزارش شده است. این مقدار بسیار قابل‌توجه است، زیرا کل قدرت موتور سه‌فاز برای چنین واحد ممکن است ۰/۵ درصد باشد. هنگامی که رله‌های میکروپروسسوری استفاده می‌شود، عدم تعادل مشکل‌ساز نخواهد بود، زیرا این رله‌ها معمولاً توان سه‌فاز را اندازه می‌گیرند.

رله‌های کالیبره‌شده در واقع رله‌هایی با کالیبراسیون تنظیم‌شده بر اساس مؤلفه هم‌فاز جریان، I_r در شکل ۳-۷ هستند. یک رله تک‌فاز که برای ولتاژ ورودی ۱۲۰ ولت و برای جریان ۱۰ میلی‌آمپر کالیبره شده است، به شرطی تحت این ولتاژ کار می‌کند که جریان و ولتاژ هم‌فاز باشند و ولتاژ ورودی ۱۲۰ ولت باشد. حدآستانه‌ی این رله در حقیقت $0.01A \times 120V = 1.2W$ است. ازآنجایی‌که این رله در واقع به توان پاسخ می‌دهد، جریان حدآستانه تابعی از ولتاژ ورودی است. این همانند رله‌ای با همان تنظیم است که به ۰٫۱۱ آمپر نیاز دارد، تحت شرایطی که ولتاژ ورودی به $1.2W / 110V = 0.11A$ کاهش یابد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل (۴) اندازه‌گیری توان

رله های میکروپروسسور محافظ ژنراتور چندمنظوره معمولاً شامل دو تابع توان برگشت پذیر هستند که بر اساس ولتاژ و جریان رله برحسب وات تنظیم می‌شوند. یک تابع برای حفاظت از موتور اعمال می‌شود و دومی می‌تواند پس از قطع متوالی ژنراتور وارد عمل می‌شود. برخی از توابع توان معکوس میکروپروسسوری برای جریان برق ورودی یا خروجی از ژنراتور تنظیم می‌شوند. یکی از این رله‌ها دارای یک محدوده قابل‌تنظیم توان -۳ تا +۳ پریونیت با گام افزایشی ۰/۰۰۱ پریونیت است. رله‌های الکترومکانیکی با حساسیت‌های کمتر از ۴ میلی‌آمپر تحت ولتاژ نامی موجود هستند. تمام رله‌های توان معکوس که در توربین‌های بخار و توربین‌های آبی استفاده شده‌اند، در صورت عدم‌بارگذاری Var زیاد در شرایط موتوری، حساس هستند. این عملکرد، نتیجه توان موتوری کم موردنیاز این واحدها و خطاهای کم در اندازه‌گیری زاویه ضریب قدرت است. در حالت ایدئال، رله‌های توان معکوس، چه برای جریان و یا برای وات ثانویه کالیبره شده باشند، توان را همانند زیر محاسبه می‌کنند:

$$P=IE\times\cos(\theta)=I_r E \qquad (۱)$$

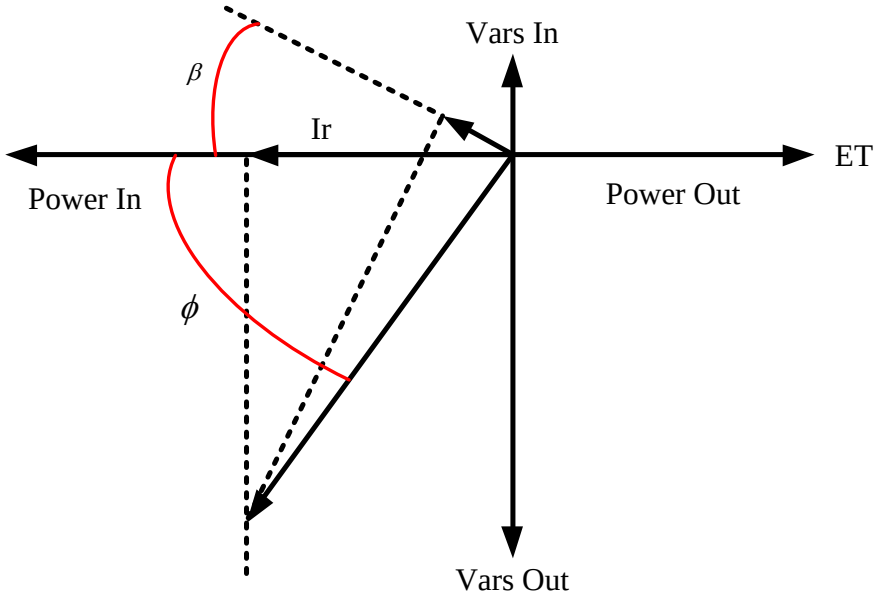
که در آن E و Ir به ترتیب کمیت‌های خط بوده و θ نیز زاویه ضریب قدرت است.

خطای PT و CT ممکن است باعث تغییر جریان و ولتاژ اعمال‌شده به رله شود. همچنین، خطای جزئی در مشخصه‌های رله نیز می‌تواند باعث بروز خطای زاویه‌ای β در اندازه‌گیری رله شود:

$$P=IE\times\cos(\theta\pm\beta) \qquad (۲)$$

در هر صورت، خطا به‌صورت یک انحراف توان نسبت به مقدار واقعی در رله ظاهر می‌شود (شکل ۳-۸). اگر ژنراتور تحت یک ضریب قدرت کم به علت بارگذاری زیاد Var و خطای زاویه‌ای نسبت به زاویه واقعی ضریب قدرت به حالت موتوری برود، توان موتوری اندازه‌گیری‌شده ممکن است کمتر از نقطه تنظیم رله باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151



شکل (۵) خطای زاویه توان

۳-۵- دلایل اضافه تحریک

خرابی‌های اضافه تحریک معمولاً در بازه‌های زمانی عملکرد بدون فرکانس رخ می‌دهد نظیر راه‌اندازی و یا خاموش شدن ژنراتورها. نمونه‌های قدیمی از این شرایط، راه‌اندازی و خاموشی واحد تحت کنترل رگلاتور خودکار ولتاژ است.

ولتاژ خروجی ژنراتور تابعی از سرعت انتشار شار است. اگر پروسه راه‌اندازی شامل استفاده از میدان در سرعت کاهش یافته باشد و رگلاتور خودکار ولتاژ به‌صورت عمدی تحت سرویس قرار گیرد، می‌تواند سبب بروز آسیب‌های ناشی از اضافه تحریک شود. رگلاتور خودکار جریان میدان را افزایش می‌دهد و به این ترتیب شار میدان در صورت نیاز برای حفظ ولتاژ خروجی اسمی افزایش می‌یابد. با کاهش سرعت، سطوح شار از سطح طراحی‌شده که برای دنبال کردن مقدار مرجع ولتاژ رگلاتور موردنیاز خواهد بود، تجاوز می‌کند. به‌عنوان مثال، اگر میدان با سرعت ۸۰٪ اعمال شود و نقطه مرجع رگلاتور ولتاژ ۱،۰ پریونیت باشد، V/Hz حاصل برابر 1.25 پریونیت خواهد شد. سناریوی مشابهی نیز در شرایط خاموش شدن ممکن است رخ دهد. بعد از آفلاین شدن، واحدها اغلب مجاز به کاهش تولید تحت کنترل دستی رگلاتور هستند. رگلاتور دستی برای حفظ جریان میدان روی مقدار مرجعی استفاده می‌شود که ولتاژ نامی را بدون بار و فرکانس اسمی ($V/f=1.0$) تولید می‌کند. این حالت بهره‌برداری از تلفات ژنراتور و ترانسفورماتور برای کمک به حالت ترمزی در شرایط کاهش تولید استفاده می‌کند. اگر رگلاتور خودکار به‌اشتباه در خلال این حالت تحت سرویس قرار گیرد، اضافه تحرک دوباره اتفاق خواهد افتاد به این دلیل که رگلاتور تحریک را افزایش می‌دهد تا مقدار ولتاژ مرجع ثابت بماند. این آسیب‌ها در صورت استفاده از رگلاتور خودکار مدرن رخ نمی‌دهد. اکثر رگلاتورهای جدید به مدار محدودکننده V/Hz مجهز شده‌اند که جریان میدان را برای محدود کردن V/Hz کمتر از یک مقدار از پیش تعیین‌شده صرف‌نظر از مقدار مرجع ولتاژ رگلاتور تنظیم می‌کند.

یکی دیگر از آسیب‌های متداول V/Hz، آسیب مدار قطع میدان خروجی برای خروج واحد است. هنگامی که یک واحد نزدیک به شرایط بار کامل کار می‌کند، جریان میدان در اکثر واحدها به‌اندازه کافی بالا است تا ولتاژ بدون بار ۱/۳ پریونیت یا بیشتر تولید شود. اگر ژنراتور بارگذاری شده درحالی‌که تحت رگلاتور دستی است و بریکر مدار میدان

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

قادر به باز کردن نیست، از مدار خارج شود، جریان میدان پیش از قطع مدار توسط رگلاتور دستی ثابت می‌ماند که در نتیجه V / Hz بیش از ۱٫۳ پریونیت خواهد شد. اگر بریکر مدار میدان زمانی که ژنراتور تحت کنترل رگلاتور خودکار ولتاژ بدون مدار مغناطیسی V / Hz است، نتواند باز کند، باعث افزایش بیش‌ازحد اضافه تحریک خواهد شد. باز هم، رگلاتور خودکار جریان محرکه کامل را به میدان اعمال می‌کند تا ولتاژ در فرکانس کاهش یافته روی نقطه مرجع ثابت بماند. برخی اضافه تحریک را به‌عنوان یک پدیده آفلاین در نظر می‌گیرند اما در اصل، اضافه تحریک می‌تواند تحت شرایطی که ژنراتور با سیستم قدرت سنکرون می‌شود، خطرآفرین باشد. به‌طور معمول، سیستم قدرت متصل از بروز شرایط اضطراری V / Hz ناشی از خطای اپراتور جلوگیری می‌کند، اما خرابی‌های درون رگلاتور ولتاژ و مدارهای مربوطه می‌تواند موجب بروز اضافه تحریک‌های خطرناک برای ژنراتور سنکرون و ترانسفورماتور متصل به آن شود. از دست رفتن سیگنال ولتاژ ژنراتور برای رگلاتور یک نمونه از این شرایط است. این حادثه در رگلاتور ولتاژ به‌صورت ولتاژ صفر در ترمینال‌های ژنراتور ظاهر می‌شود. رگلاتور با جاری ساختن جریان میدان برای تقویت ولتاژ، سعی می‌کند که این شرایط را اصلاح نماید. رگلاتور حداکثر میدان محرک جریان را تا زمانی که رگلاتور خودکار توسط اپراتور یا توسط سیستم حفاظت خاموش شود، ثابت نگه می‌دارد. در هر صورت، ولتاژهای ترمینال حاصل به مراتب بیشتر از مقدار اسمی بوده و ژنراتور و تجهیزات متصل ممکن است در معرض آسیب‌های ناشی از اضافه تحریک قرار گیرند. قطع ژنراتور توسط سیستم حفاظت در مقابل اضافه جریان، آسیب حاصل از اضافه تحرک را تحمل نمی‌کند. این الگو برای حفاظت سیم‌پیچی میدان در مقابل آسیب‌های حرارتی ناشی از اضافه جریان میدان طراحی شده است. زمان عملکرد ممکن است برای جلوگیری از آسیب ناشی از اضافه تحریک به‌اندازه کافی کوتاه نباشد. حذف بار توسط رگلاتور ولتاژ تحت سرویس بار خازنی می‌تواند باعث بروز اضافه تحریک شود. بار خازنی ممکن است یک خازن شنت برای کنترل ولتاژ یا پشتیبانی از توان رأکتیو باشد یا اینکه ممکن است به‌صورت یک جریان شارژ برای خط انتقال ولتاژ بالا مدل شود. در هر صورت، اضافه تحریک به دو صورت رخ می‌دهد. اولین حالت شامل تابع محدودکننده Var پیش فاز است که در بیشتر رگلاتورهای خودکار استفاده می‌شود. این رگلاتور بر اساس محدود کردن توان رأکتیو جاری‌شده از ژنراتور تنظیم می‌شود. اگر بار خازنی به‌اندازه کافی بزرگ باشد تا به این مقدار حدی برسد، رگلاتور خودکار جریان میدانی را افزایش می‌دهد، و به این ترتیب ولتاژ ژنراتور افزایش می‌یابد. در شرایط کار عادی برای یک ژنراتور متصل به سیستم اصلی، این عمل برای کاهش جریان Var به ژنراتور مناسب است. با این حال، هنگامی که ژنراتور روی یک بار خازنی ایزوله می‌شود، افزایش ولتاژ ژنراتور سبب افزایش Var خروجی از بار خازنی می‌گردد. این عمل منجر به افزایش کنترل نشده خروجی تحریک و در نهایت بروز اضافه تحریک در ژنراتور و ترانسفورماتور GSU می‌شود. مکانیسم دوم اضافه تحریک پس از حذف بار، خود تحریک است. این مکانیسم زمانی اتفاق می‌افتد که راکتانس سنکرون هم‌راستا با محور q در ژنراتور به‌علاوه رأکتانس ترانسفورماتور GSU بیشتر از راکتانس خازنی سیستم متصل ($X_q > X_c$) شود. خود تحریک موجب ایجاد ولتاژ کنترل‌نشده هم‌راستا با محور q می‌شود، صرف‌نظر از اینکه رگلاتور ولتاژ تحت کنترل است یا خیر. رگلاتور ولتاژ هم‌راستا با محور d عمل کرده و بنابراین نمی‌تواند افزایش ولتاژ و اضافه تحریک ناشی از آن را کنترل کند. خود تحریک به‌طور معمول مربوط به ژنراتورهای آبی است، زیرا این واحدها معمولاً در زمان قطع بار، از سرعت ۱۲۰ تا ۱۴۰ درصدی برخوردارند. افزایش فرکانس، مقدار X_c را کاهش می‌دهد، بنابراین به ظرفیت کمتر برای خود تحریک در شرایط قطع بار نیاز است.

۱-۳-۵- آسیب اضافه تحریک

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مواد مغناطیسی دارای حداکثر شار مغناطیسی در واحد سطح هستند. این ویژگی را به‌عنوان چگالی شار ماکزیمم یا چگالی شار اشباع ماده می‌شناسند. ساختار هسته مغناطیسی یک ترانسفورماتور و استاتور یک ژنراتور باید مساحت کافی برای تولید شارهای لازم برای رعایت استانداردهای مربوط به ولتاژ نامی و استانداردهای صنعتی را داشته باشد. ازآنجایی‌که مساحت هسته معادل با افزایش هزینه است، طراحان سطح کمتری را نسبت به این استانداردها ارائه می‌دهند. طراحی هسته نه‌تنها شامل طراحی مساحت کافی برای تأمین شار موردنیاز است، بلکه گرمای هسته نیز یک نگرانی مهم است. گرما در مواد مغناطیسی به‌وسیله جریان‌های گردابی و هیسترزیس ایجاد می‌شود. تلفات ناشی از جریان گردابی به‌طور مستقیم با چگالی شار و مربع فرکانس متناسب است. تلفات هیسترزیس با ۱/۵ تا ۲/۵ توان چگالی جریان با توجه به نوع مواد متناسب بوده و به‌طور مستقیم با فرکانس رابطه دارد. ساختار مغناطیسی طراحی شده برای کاربردهای AC مانند هسته ترانسفورماتور و استاتور در یک ژنراتور AC به‌صورت ورقه‌ای ساخته می‌شوند تا تلفات جریان‌های گردابی و در نتیجه گرما را به حداقل برساند. هنگامی که ترانسفورماتور یا ژنراتور در محدوده پارامترهای اسمی کار می‌کند، جریان در هسته کمتر از چگالی شار اشباع خواهد بود و نفوذپذیری هسته بسیار بالاتر از ساختار مجاور خواهد بود. در نتیجه، جریان تولید شده در سیم‌پیچ‌ها خود را به هسته محدود می‌کند. گرمای هسته نیز در محدوده استاندارد طراحی قرار دارد. اگر خطاهای عملکرد یا خرابی تجهیزات سطح شار بیشتری نسبت به چگالی شار ماکزیمم تولید کند، هسته اشباع خواهد شد. شار بیش از ظرفیت هسته به فضای هوایی اطراف و به ساختارهای فلزی غیر ورقه‌ای در اطراف هسته نفوذ می‌کند. آسیب به یک هسته ورقه‌ای به علت افزایش تلفات به یک اضافه تحریک شدید برای مدت‌زمان قابل‌توجهی نیاز دارد. با این حال، جریان‌های گردابی که در ساختارهای غیر ورقه‌ای ایجاد می‌شوند، می‌توانند به سرعت آسیب‌های حرارتی و خرابی اجزای سازنده را به دنبال داشته باشند. در یک ژنراتور، خطرآفرین‌ترین شار در انتهای هسته استاتور ظاهر می‌شود. اضافه جریان متناوب موجب ایجاد جریان‌های زیاد در انتهای هسته پایانی و ورقه‌های انتهایی آن می‌شود. گرمای شدید در این منطقه متمرکز خواهد شد. همچنین، اضافه جریان‌های القا شده در ورقه‌های استاتور می‌توانند باعث بروز گرادیان‌های ولتاژ بین ورقه‌های هسته شوند که برای شکست عایق بین ورقه‌ها، کافی خواهد بود. اگر این اتفاق رخ دهد، هسته به‌طور دائمی آسیب می‌بیند، و در نهایت باعث می‌شود که هسته تحت شار عادی نیز دچار جرقه شده و گرما و خرابی اجزای آن افزایش می‌یابد. تعمیرات هسته شامل جداسازی هسته برای حذف و جایگزینی ورقه‌های آسیب دیده است. بدیهی است، تنظیم مجدد هسته استاتور یک روش بسیار گران‌قیمت است. اضافه تحریک ترانسفورماتور تا زمانی که پیشرفت در طراحی هسته و مواد مغناطیسی اجازه کاهش شدید در سطح هسته را نداده بود، مشکل‌ساز نبود. طرح‌های اقتصادی مقرون‌به‌صرفه چگالی شار طبیعی را نزدیک به چگالی شار اشباع ساخته است. ترانسفورماتورهایی که در معرض اضافه تحریک هستند، اشباع هسته را تجربه خواهند کرد. شار اضافی هسته را رها کرده و به فضای عایق اطراف هسته نفوذ می‌کند. این شار سبب القای جریان شده و گرمای بیش‌ازحدی در سیم‌پیچ‌ها، اتصالات، و اجزای ساختار به‌وجود می‌آورد. نگرانی عمده تحت شرایطی که یک ترانسفورماتور در معرض اضافه تحریک قرار می‌گیرد، خرابی عایق است، اما آسیب‌های دیگری نیز ممکن است رخ دهد. گرمای ناشی از جریان القایی می‌تواند باعث کاهش توان مکانیکی در اجزای ساختار و تخریب رنگ مخزن شود. آلودگی روغن عایق نیز ناشی از تخریب عایق و رنگ خواهد بود. عامل مهم آسیب‌های حرارتی ناشی از اضافه تحریک در ترانسفورماتور، ماهیت غیر سینوسی شار نشتی است. به‌طور معمول، جریان هسته به‌صورت سینوسی بین سیکل‌های مثبت و منفی تغییر می‌کند. با افزایش ولتاژ، مقادیر جریان شار افزایش می‌یابد. اگر ولتاژ به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از مقدار اساست، هسته سطح کافی برای پشتیبانی از مقادیر پیک

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

شار موردنیاز را ندارد. هنگامی که چگالی شار ماکزیمم از مقدار مجاز تجاوز می‌کند، پدیده اشباع در هر سیکل دو بار رخ می‌دهد. در هر سیکل اشباع، شار نشتی در خارج از هسته به شکل غیر سینوسی ظاهر می‌شود. این شار و جریان القا شده دارای هارمونیک‌های متعدد هستند. ازآنجایی‌که تلفات جریان گردابی و هیسترزیس با فرکانس افزایش می‌یابد، هارمونیک‌ها اثر حرارت را درون هسته و در ساختارهای غیرخطی تقویت می‌کنند. همان‌طور که ولتاژ (تحریک) افزایش می‌یابد، جریان تحریک ترانسفورماتور با سرعت بیشتری افزایش خواهد یافت. مرجع ۲ داده‌های زیر را برای یک نوع ترانسفورماتور خاص ارائه داده است. جریان‌های تحریک ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰٪ جریان اسمی بار در ولتاژهای فرکانس اسمی با نسبت‌های ۱۲۵، ۱۳۳ و ۱۴۳ درصد رخ می‌دهد. اضافه تحریک باعث غیر سینوسی شدن شار هسته می‌شود؛ بنابراین، جریان تحریک لازم برای تولید این شار نیز باید غیر سینوسی باشد. جریان تحریک پر از هارمونیک حرارت بیشتری را در سیم‌پیچ‌ها تولید می‌کند که بیشتر از دامنه جریان سینوسی RMS معادل آن است. ازاین‌رو، در سطوح بالای اضافه تحریک، آسیب‌های حرارتی به سیم‌پیچ‌ها، محتمل‌تر خواهد بود.

۲-۳-۵- محدوده‌های V/Hz

سطح هسته و خواص مغناطیسی مواد هسته، قابلیت تحریک ژنراتور یا ترانسفورماتور را مشخص می‌کند. هسته برای تأمین چگالی شار لازم برای بهره‌برداری تحت بار کامل و برای حذف گرمای ناشی از سطح تحریک طراحی می‌شود. استانداردها، محدوده‌های V/Hz را برای ترانسفورماتور یا ژنراتور به‌طور مستقیم مشخص نمی‌کنند، اما محدوده‌های ولتاژ مشخص‌شده برای این تجهیزات در فرکانس‌های معین به‌طور مستقیم تعیین‌کننده محدوده‌های V/Hz است. به‌عنوان مثال، استانداردهای $IEEE$ مستلزم این هستند که ژنراتور بتواند با ولتاژ kVAی اسمی، فرکانس و ضریب قدرت اسمی با تغییرات ولتاژ ترمینال معادل ۵+ درصدی کار کنند. این استاندارد به معنی حد مجاز V/Hz است که تقریباً برابر ۱/۰۵ پریونیت است. استانداردهای ترانسفورماتور پیچیده‌تر است. در شرایط بی‌باری، ترانسفورماتور باید تحت ولتاژی برابر ۱۱۰ ٪ ولتاژ نامی مقاومت کند. در بار کامل و ۸۰٪ ضریب توان پیش فاز، یک ترانسفورماتور باید بتواند با ولتاژ ۱۰۵٪ در ترمینال‌های ثانویه کار کند. پس حد مقاومت ولتاژ در سیم‌پیچ به امپدانس ترانسفورماتور بستگی دارد. سیم‌پیچ اولیه هر ترانسفورماتور با امپدانس بیش از ۸/۵٪ باید دارای مقاومت بیش از ۱۱۰٪ ولتاژ نامی باشد تا ولتاژ متناوب ۱۰۵٪ را در ثانویه تولید کند.

۴-۵- حفاظت قطع میدان ژنراتور

قطع میدان (LOF) زمانی رخ می‌دهد که مدار تحریک سیم‌پیچ میدان ژنراتور قطع شود. این مسئله ممکن است در نتیجه خرابی تجهیزات، باز شدن تصادفی مدار قطع کن میدان، و یا مدار باز شدن و یا اتصال کوتاه شدن سیستم تحریک و یا جرقه زدن اسلیپ رینگ رخ دهد. صرف‌نظر از دلیل این پدیده، این شرایط، برای ژنراتور و نیز برای سیستم قدرت خطرناک است. ورودی جریان DC به سیم‌پیچ میدان سبب تحریک مدار مغناطیسی روتور شده و شار روتور را به‌وجود می‌آورد. این شار باعث تولید ولتاژ داخلی به‌صورت سنکرون با ولتاژ سیستم می‌شود. هنگامی که تحریک قطع می‌شود، جریان روتور با سرعتی که بر اساس ثابت زمانی مدار میدان تعیین می‌شود، کاهش خواهد یافت. ولتاژ داخلی ژنراتور نیز با همین سرعت کم می‌شود. به این خاطر که خروجی Var ژنراتور متناسب با ولتاژ داخلی ژنراتور است، توان خروجی Var نیز کاهش می‌یابد. اگر ژنراتور اول از همه توان Var را به شبکه قدرت تزریق کند، توان خروجی Var به صفر خواهد رسید به این خاطر که ژنراتور توان رأکتیو افزایشی را از سیستم قدرت جذب می‌کند تا جایگزین تحریکی کند که توسط مدار میدان تشکیل‌شده است. مصرف Var ممکن است از نرخ MVA

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

ژنراتور بیشتر شود. کاهش ولتاژ داخلی نیز سبب تضعیف کوپلینگ مغناطیسی بین روتور و استاتور خواهد شد. در نقطه‌ای خاص، کوپلینگ آن‌قدر ضعیف می‌شود که توان خروجی به سیستم قدرت را به‌صورت گذرا کاهش داده و ژنراتور نیز حالت سنکرون خود را از دست می‌دهد. این پدیده درست شبیه به تلفات پایداری حالت دائمی است. به‌منظور درک تلفات سنکرون سازی در نتیجه بروز LOF، معادله زاویه توان را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$P_e = \frac{E_g E_s}{X_T} \sin\delta \qquad (۲-۶)$$

که در عبارت فوق، P_e توان الکتریکی منتقل‌شده به سیستم قدرت است، E_g ولتاژ داخلی ژنراتور است، E_s ولتاژ سیستم معادل است، $X_T = X_g + X_{tr} + X_{sys}$ و X_g رأکتانس مؤثر ژنراتور است و δ نیز زاویه بین E_s و E_g است. اثر کاهش ولتاژ داخلی ژنراتور در واقع کاهش منحنی زاویه توان با توان خروجی توربین است که زاویه کار ژنراتور را برحسب ولتاژ سیستم تعیین می‌کند. با کاهش منحنی توان، زاویه کار تا مقدار مشخصی که تعادل میان توان ورودی مکانیکی و توان خروجی الکتریکی را برقرار می‌سازد، افزایش می‌یابد. هنگامی که زاویه کار به ۹۰ درجه می‌رسد، توان خروجی الکتریکی بیشینه خواهد شد. کاهش جریان میدان تا این نقطه نشان‌دهنده عدم توانایی ژنراتور در انتقال همه توان مکانیکی ورودی به سیستم قدرت است. توان مکانیکی مازاد با چرخش ژنراتور تلف می‌شود. با افزایش سرعت تا ۶۰ Hz، حالت سنکرون ژنراتور نیز از بین می‌رود. ژنراتور شروع به شتاب گرفتن می‌کند. با افزایش سرعت، توان خروجی توربین کم می‌شود همان‌طور که بر اساس تنظیمات دروپ گاورنر تعیین شده است، در این حالت توان الکتریکی افزایش می‌یابد، همچنان که بر اساس مشخصه لغزش-گشتاور سیستم قدرت تعیین می‌شود. در نهایت، توان خروجی توربین و توان الکتریکی ژنراتور به یک تعادل جدید می‌رسند، که در آن نقطه، ژنراتور تحت سرعت بیشتر از سنکرون کار می‌کند همانند یک ژنراتور القایی که تحریک را از سیستم قدرت به شکل توان Var دریافت می‌کند. از بین رفتن حالت سنکرون در نتیجه قطع میدان یک پدیده سریع نیست. در عمل، این پدیده در یک ژنراتور توربین بخار با بار کامل، این پدیده چندین ثانیه طول می‌کشد. لغزش نهایی تحت تأثیر تنظیمات دروپ گاورنر، امپدانس سیستم و بارگذاری اولیه قرار می‌گیرد. برای یک ماشین که تحت بار کامل کار می‌کند، لغزش نهایی در عمل ۲ تا ۵٪ است. توان خروجی ژنراتور القایی کمتر از توان خروجی پیش از قطع میدان است. لغزش نهایی و یا لغزش حالت دائمی ژنراتور القایی از اهمیت بالایی برخوردار است به این خاطر که این لغزش تعیین‌کننده رأکتانس مؤثر ژنراتور است که در مقابل نیز تعیین‌کننده عملکرد سیستم پس از پدیده LOF است. تلفات میدان را می‌توان با یک مدار سری شامل ژنراتور و رأکتانس ترانسفورماتور GSU و نیز امپدانس سیستم نشان داد. امپدانس سیستم با افزایش لغزش کاهش می‌یابد و لغزش نیز با بار اولیه ژنراتور، زیاد می‌شود. بنابراین، هر چه بار اولیه ژنراتور بیشتر باشد، جریان سنکرون بیشتر شده و اثرات این پدیده در ژنراتور و نیز سیستم قدرت متصل به آن، شدیدتر خواهد بود.

۱-۴-۵- سایر فاکتورهای تأثیرگذار روی شدت قطع میدان

بار اولیه ژنراتور در واقع فاکتور اصلی در تعیین خرابی‌های بالقوه ناشی از رخداد LOF است. تغییرات امپدانس سیستم و نیز مود قطع تحریک نیز روی حالت پدیده LOFی نهایی اثر خواهد داشت. کاهش راکتانس سیستم نیز سبب کاهش فرکانس نهایی لغزش و نیز افزایش توان خروجی از ژنراتور القایی خواهد شد. در نگاه اول، یک سیستم قدرت قوی جریان‌های پس از خطای بیشتری را ارائه داده و بنابراین پتانسیل بالایی در خرابی خواهد داشت. این مسئله لزوماً درست نیست. به این خاطر که سیستم قدرت قوی، لغزش نهایی کمتری را نتیجه می‌دهد، امپدانس

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مؤثر ژنراتور افزایش خواهد یافت، در نتیجه باعث کاهش جریان استاتور می‌شود. خرابی سیستم قدرت قوی ممکن است در عمل سبب تولید جریان‌های استاتور کمتر شده و نسبت به خرابی یک سیستم ضعیف، آسیب‌های کمتری را باعث شود. LOF در اصل ناشی از یک اتصال کوتاه مدار میدان و یا مدار باز شدن مدار میدان خواهد بود. مورد اول جریان استاتور بیشتری را تولید کرده و توان رأکتیو را بیشتر می‌کند و در حالت کلی آسیب‌های بیشتری در نتیجه بروز مدار باز در مدار میدان به‌وجود خواهد آمد. هنگامی که ماشین‌های الکتریکی به‌صورت مستقیم به یک باس مشترک متصل شده‌اند، احتمال خرابی افزایش می‌یابد. با کاهش تحریک روی واحدی با قطع مدار تحریک، رگلاتورهای ولتاژ در ماشین‌های سالم میدان اولیه را مجبور می‌کنند که کاهش ولتاژ باس را جبران نماید. این امر سبب افزایش توان Var تزریق‌شده به ماشین خطادار خواهد شد. این شرایط زمانی بیشتر می‌شود که واحدها به یک سیستم قدرت قوی متصل شده باشند. مرجع ۲، مطالعه‌ای را در مورد دو ژنراتور متصل‌شده به یک باس مشترک و یک سیستم قدرت قوی ارائه کرده است. در این مطالعه، واحد موردنظر که دارای مدار تحریک قطع شده است، مقدار پیک MVA را که بیشتر از ۲ پریونیت است، مشاهده کرده و جریان پیک استاتور نیز به صفر پریونیت می‌رسد. بروز LOF روی یک واحد آبی تحت بار سبک ممکن است حالت سنکرون واحد را از بین نبرد. ژنراتورهای آبی از نوع ماشین‌های قطب برجسته هستند و به همین دلیل قادر هستند تا ۲۵٪ بار اسمی را تحت شرایطی که مدار میدان قطع شده است، بدون آنکه حالت سنکرون را از دست بدهند، پاسخ دهند. اما، به‌محض اینکه ماشین قطب برجسته حالت سنکرون خود را از دست بدهد، این مسئله ممکن است باعث افزایش سریع لغزش گردد. گاورنر آبی با عملکرد کندتر و همچنین این واقعیت که ماشین قطب برجسته همانند ژنراتور القایی ناکارآمد عمل می‌کند، باعث این پاسخ کند خواهد شد. اگر میدان ژنراتور آبی در شرایط نزدیک به بار کامل قطع شود، اثرات و نیز عملکرد سیستم حفاظتی درست شبیه به واحدهای توربین بخار خواهد بود.

۲-۴-۵- اثر سیستم

ژنراتوری که تحت شرایط غیر سنکرون بدون تحریک عمل می‌کند می‌تواند Var در رنج ۰/۴ تا ۱/۹ برابر مقدار اسمی‌توان را مصرف کند به این خاطر که لغزش از مقدار نزدیک به صفر تا ۴٪ افزایش می‌یابد. اثر تلفات میدان روی سیستم قدرت بر اساس قابلیت سیستم در مقاومت در برابر تلفات توان‌های اکتیو و رأکتیو خروجی تعیین می‌شود، اما در مقابل نیز مقدار تقاضای توان Var ی بیشتر در نتیجه بروز خطا پس از بروز LOF رخ می‌دهد. از سوی دیگر، اگر سیستم قدرت در برآورده‌سازی مقدار توان Var موردتقاضای بار در واحد خراب‌شده، ناتوان باشد، خاموشی گسترده‌ای رخ خواهد داد. در مرحله اول، تحریک روی ژنراتورهای نزدیک به‌صورت کامل سبب تقویت توان رأکتیو تزریقی به ژنراتوری می‌شود که مدار میدان در آن قطع شده است، و از ولتاژ شبکه پشتیبانی خواهد کرد. هرچه شار Var بیشتر باشد، احتمال بروز اضافه‌بار بیشتر شده و خطوط سیستم انتقال قطع خواهند شد. ژنراتورهای مجاور نمی‌توانند سقف تحریک موردنیاز را به‌صورت نامحدود بدون آنکه آسیب‌های حرارتی به مدارهای میدان وارد شود، حفظ کنند. اگر ژنراتور آسیب‌دیده غیر متصل باشد، محدوده‌کننده‌های جریان میدان روی واحدهای مجاور غیرفعال شده و در نتیجه کاهش ناگهانی در جریان اسمی میدان رخ می‌دهد. کاهش حاصل از این کاهش جریان در توان Var سبب بروز تضعیف ولتاژ شدیدی خواهد شد. ولتاژ سیستم نیز افت ناگهانی داشته و یا ناپایداری‌های ماشین‌های سیستم رخ می‌دهد که در نهایت سبب خاموشی ناحیه‌ای از سیستم خواهد شد. مطالعات دینامیکی مشابه مطالعات مورد استفاده در تحلیل حالت گذرا برای تعیین پاسخ دقیق سیستم تحت شرایط رخداد LOF لازم است. این

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مطالعات هم زمان‌بر بوده و هم بسیار هزینه‌بر می‌باشند. یک روش غربالگری با استفاده از پخش بار استاندارد قادر است مطالعات دینامیکی موردنیاز را تعیین کند. در ژنراتور مورد نظر، بدترین حالت رخداد LOF در پخش بار با تنظیم پخش توان رأکتیو در ماشین تحت ۱/۵تا ۲ برابر مقدار اسمی‌توان MW، شبیه‌سازی می‌گردد. اگر پخش بار با ولتاژهای منطقی سیستم حل شود، سیستم قادر خواهد بود که در مقابل رخداد LOF مقاومت کند. اما اگر پاسخ در همگرایی به مقدار دقیق ناتوان بوده و یا نتایج به‌دست‌آمده برای ولتاژ به شدت غلط باشند، رخداد LOF را می‌توان به‌صورت دینامیکی برای تعیین اینکه آیا سیستم می‌تواند در مقابل قطع میدان تحریک مقاومت کند یا خیر، مدل‌سازی کرد.

۳-۴-۵- آسیب به ژنراتور

ارزیابی آسیب ژنراتور در نتیجه قطعی مدار تحریک از دهه ۱۹۵۰ تغییر کرد، هنگامی که رله‌های امپدانسی به‌صورت گسترده برای حفاظت LOF مورداستفاده قرار گرفتند. در آن زمان، عموم محققین قبول داشتند که ماشین‌ها می‌توانند به‌صورت آسنکرون تحت شرایط بروز خطای LOF حداقل به مدت ۲ تا ۳ دقیقه بدون آسیب فعالیت کنند. یک مقاله نوشته‌شده در سال ۱۹۵۴ مربوط به رویدادی بود که در آن یک واحد آبی ۱۰ MW به مدت ۱۷ دقیقه به‌صورت یک ژنراتور القایی کار می‌کند بدون آنکه آسیب ببیند. احتمال خرابی ژنراتور در صورت بروز خطای LOF به طراحی ژنراتور و نیز لغزش نهایی در شرایط عملکرد آسنکرون وابسته است. اثرات مختلف عملکرد آسنکرون بدون تحریک عبارت‌اند از جریان‌های شدید استاتور، جریان‌های القایی روتور، ضربانی شدن گشتاور و گرمای انتهای هسته. اگرچه قابلیت‌های آسنکرون در این استانداردها موردبررسی قرار نگرفته است، اما توقعات جدید خیلی کمتر است، به‌گونه‌ای که در برخی از موارد خرابی کمتر از ۱۰ ثانیه رخ می‌دهد. این مسئله به‌خصوص در ماشین‌های مبتنی بر کنداکتورهای خنک‌سازی‌شده معتبر است. دلایل مختلفی وجود دارد که چرا ماشین‌های مبتنی بر کنداکتورهای خنک‌سازی‌شده آسیب‌پذیرتر هستند. روش‌های خنک‌سازی پیشرفته برای این نوع از ماشین‌ها استفاده می‌شود که در نتیجه نسبت MVA را در آن‌ها از یک مقدار فیزیکی تعیین‌شده، بیشتر می‌کند. این ماشین‌ها دارای امپدانس پریونیت بیشتری بوده و اینرسی کمتری نسبت به ماشین‌های مرسوم هستند. به خاطر این مشخصه‌ها، ماشین مبتنی بر کنداکتورهای خنک‌سازی‌شده تحت لغزش بالاتری عمل می‌کنند. این مسئله سبب کاهش رأکتانس معادل در شرایط عملکرد آسنکرون می‌شود، و جریان‌های القایی استاتور و روتور را افزایش می‌دهد. ماشین مبتنی بر کنداکتورهای خنک‌سازی‌شده دارای ثابت زمانی‌های حرارتی کمتری هستند، ازاین‌رو افزایش دما در آن‌ها به ازای جریان مشخص در مقایسه با ماشین‌های خنک‌سازی‌شده، سریع‌تر است. تلفات میدان نسبت به شرایط اولیه بار سبک (۳۰٪ بار اسمی و یا کمتر) تحت لغزش خیلی کمتری رخ می‌دهد، در عمل ۰,۱ تا ۰,۲٪. در این لغزش کم، خرابی ژنراتور بعید است. با این وجود، لغزش نهایی در نتیجه تلفات میدان نسبت به بار کامل خیلی بیشتر است، ۲ تا ۵٪ و ژنراتور را در معرض خرابی ناشی از همه منابع فوق‌الذکر قرار خواهد داد.

۵-۵- حفاظت قطع میدان

قدیمی‌ترین نوع سیستم حفاظتی در مقابل LOF از یک رله زیرجریان و یا زیرولتاژ متصل به مدار میدان استفاده می‌کرد. این الگوها به‌گونه‌ای تنظیم می‌شدند که تحت افت جریان و یا ولتاژ میدان کمتر از مقدار موردنیاز برای تولید ولتاژ اسمی خروجی تحت شرایط بی‌باری، کار کنند. این الگوها باید به هم پیوسته باشند تا از سوء عملکرد سیستم حفاظتی تحت شرایط راه‌اندازی زمانی که میدان کمتر از نقطه مرجع است، جلوگیری شود. یک تایمر تأخیری نیز

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

برای جلوگیری از قطع مدار تحت شرایطی که رگلاتور ولتاژ به سرعت جریان میدان را در پاسخ به تغییر ناگهانی سیستم کاهش می‌دهد، مثلاً تحت شرایطی که خطا رفع می‌گردد، موردنیاز خواهد بود. این الگوها دارای عیب‌های متعددی هستند. رله زیرجریان تنها خطاهایی را تشخیص می‌دهد که باعث کاهش جریان عبوری از رله می‌شود، مثلاً باز شدن قطع کن مدار میدان. این الگو شرایط تلفات میدان را که ناشی از اتصال کوتاه مدار است، تشخیص نمی‌دهد. این الگو تحت شرایطی عمل می‌کند که قطع کن مدار میدان به واسطه اضافه‌بار و یا عملکرد سیستم حفاظتی در مقابل خطا، قطع کنند. اما این عملکرد سیستم، تأخیر زمانی زیادی را به دنبال دارد. رله زیرولتاژ در شناسایی مدار باز شدن بخش پایین‌دست رله، ناتوان است. همچنین، این رله‌ها به این خاطر که جریان AC ی القایی در مدار میدان تحت شرایطی که ژنراتور در حالت آسنکرون کار می‌کند، امری محتمل است، عمل نخواهند کرد. یک الگوی دیگر که می‌توان از آن استفاده کرد، رله‌های قدرت رزرو با اتصالات PT و CT ی تناوبی است، بنابراین رله‌های مذکور توان Var ورودی به ژنراتور را تشخیص خواهند داد. چنین الگوهایی حفاظت خوبی را در مقابل تلفات میدان ارائه داده و رله قدرت رزرو دارای قیمت کمتری در مقایسه با رله‌های دیستانس هستند. عیب این روش این است که الگوی مذکور بین تلفات میدان و سایر شرایط خطای شبکه، تفاوتی قائل نمی‌شود.

۵-۵-۱ الگوهای مبتنی بر رله دیستانس

استانداردهای مدرن برای سیستم حفاظتی LOF در کنار المان‌های اندازه‌گیری امپدانس در ترمینال‌های ژنراتور استفاده می‌شوند. دو الگوی امپدانسی اصلی در کاربردهای امروزی سیستم حفاظت LOF وجود دارد. یک الگو قطع مدار را تحت شرایطی که خطای LOF تشخیص داده شد، بر عهده دارد. الگوی دیگر به‌منظور ارزیابی اینکه آیا خطای رخداده از نوع LOF است یا خیر، به‌کار می‌رود. اگر نوع خطا، LOF نباشد، قطع مدار به تأخیر خواهد افتاد تا به اپراتور زمان و امکان کافی برای بازیابی میدان و جلوگیری از قطع ژنراتور، فراهم آورد. در حالتی که قطع‌کن مدار میدان به‌صورت تصادفی باز شود درحالی‌که ژنراتور آنلاین است، قطع‌کن مدار میدان به سرعت بسته می‌شود بدون آنکه ژنراتور آسیب ببیند. برای سنکرون‌سازی مجدد این شرایط، لازم است که ژنراتور آفلاین شود به این خاطر که ثابت زمانی طولانی در مدار میدان باعث می‌شود که ساخت ولتاژ داخلی ژنراتور به طول بیانجامد، بنابراین، حالت‌های گذرای مکانیکی را در حد قابل‌قبول، محدود خواهد کرد.

۵-۶- حفاظت یاتاقان

ولتاژ شفت و جریان‌های شفت متناظر با آن‌ها و یا همان جریان‌های یاتاقان شناخته شده هستند به این خاطر که بیشتر از یک قرن است که در موتورهای DC و AC ی تحت کارکردهای خط تولید قدیمی وجود دارند. اخیراً، با ظهور درایوهای اینورتری، جریان‌های یاتاقان فرکانس بالا و ولتاژهای شفت علت اصلی خرابی‌های گذرا در یاتاقان‌ها است. اگرچه این پدیده و روش‌های حذف مرتبط با آن‌ها کاملاً شناخته شده است، اما باید به خاطر داشت که هنوز هم مشکلات بالقوه برای صنایع در این رابطه وجود دارد.

مطالعات موجود در زمینه ولتاژهای شفت روی ماشین‌های گردان از قرن قبل ارائه شده و اولین بار نیز توسط Alger و Samson در سال ۱۹۲۴، به‌صورت خلاصه بیان شد. سپس، این پدیده به‌صورت گسترده در مطالعات دیگر بیان شده و موردبررسی قرار گرفت. هم ماشین‌های AC و هم DC تحت تأثیر ولتاژهای شفت قرار گرفته و جریان‌های شفت را تولید می‌کنند که باعث خرابی مؤلفه‌هایی نظیر یاتاقان‌ها، رول‌های شفت، گیربکس و نیز قسمت‌های اتصال‌دهنده می‌گردد. یک توضیح گسترده در مورد روش‌های حذف این ولتاژ در مقالات موجود یافت می‌شود اما

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

مطالعات صورت‌گرفته تا این زمان، تنها ولتاژهای شفت دارای مؤلفه‌های فرکانس پایین را موردبحث قرار داده‌اند. پس از این، با افزایش درایوهای سرعت بالا (VSD)، ولتاژهای شفت فرکانس بالا (HF) نیز شناسایی شدند و مشکل جدیدی را به‌وجود آورد. امروزه، هم ولتاژهای شفت فرکانس بالا و هم فرکانس پایین به‌خوبی موردمطالعه قرار گرفته و شناسایی شده‌اند. با وجود همه مشکلات مربوط به ولتاژهای شفت، این مسئله به یک هدف مفید برای بهبود و توسعه روش‌های شناسایی خطا و تعمیر و نگهداری ژنراتورهای آبی و توربوژنراتورها، بدل شده است. این گرایش به تدریج برای همه ماشین‌های گردان در حال تعمیم است، که با توسعه روش‌های مانیتورینگ شرایط در همه کاربردهای صنعتی صورت می‌گیرد.

۱-۶-۵- ولتاژهای شفت فرکانس پایین

الف) مروری بر این پدیده

در یک سیستم درایو، به‌طور مشخص چهار نوع ولتاژ شفت به‌وجود می‌آید که می‌توان از منابع مختلفی، به‌وجود آمده و سبب بروز جریان‌های شفت گردد.

۱) متناوب بودن ولتاژهای القایی در شفت: میدان‌های مغناطیسی نامتعادل ناشی از طراحی، ساخت نظیر حفره‌های خنک‌کننده در راستای محور استاتور و یا ورقه‌ای بودن روتور، اتصالات میان بخش‌های مختلف استاتور، تغییرات ضریب نفوذپذیری میان بخش‌های مختلف، گریز از مرکز روتور، و خمیدگی روتور می‌تواند باعث ایجاد شارهای مغناطیسی چرخان در شفت گردد. بنابراین، متناوب بودن ولتاژهای القایی در شفت و جریان‌های گردشی ناشی از آن در حلقه فریم استاتور، انتهای یاتاقان، شفت روتور، و انتهای یاتاقان روتور، باعث می‌شود که درصورتی‌که ولتاژ افزایش یابد و بیشتر از مقدار آستانه شود، نوار عایقی روان‌کننده یاتاقان از بین رود. یک نمونه از مطالعات صورت‌گرفته، مطالعه انجام‌شده توسط Alger و Samson در مورد خاص استاتورهای ورقه‌ای بخش‌بندی شده و شار نامتقارن ناشی از آن است که سبب تولید جریان‌های شفت می‌شود. در نتیجه، قواعد طراحی برای جلوگیری از این مشکل در مهندسی ساخت، مستلزم حفظ و رعایت این قوانین در پروسه ساخت و تعیین اندازه ماشین است.

۲) شار محوری روتور: یک شار مغناطیسی ممکن است از طریق شفت به‌وسیله مغناطیس‌های باقی‌مانده (متناسب با شار مغناطیسی جزئی و غیر مغناطیس شدگی مؤلفه‌ها)، اشباع محلی، پارامترهای نامتقارن در میدان‌های سیم‌پیچی روتور و خمیدگی‌های روتور، به‌وجود آید. شار قطب یکنواخت از شفت شروع شده و در حلقه فریم استاتور، یاتاقان، شفت روتور، یاتاقان، می‌چرخد. ولتاژ القایی ناشی از این شار نیز در امتداد طول رول یاتاقان ایجاد شده و سبب چرخش جریان در یاتاقان می‌گردد.

۳) اثر الکترواستاتیکی: این پدیده خارج از محیط داخلی ماشین است و اغلب ناشی از بار است. این پدیده می‌تواند ناشی از اصطکاک بست‌ها، نوارهای مهارکننده و یا اصطکاک بین تیغه‌ها و بخار فشار پایین توربین باشد. این ویژگی، خاصیت خازنی است به‌گونه‌ای که با افزایش ولتاژ یاتاقان، ولتاژ عایق روان‌کننده نیز تا مقدار آستانه افزایش می‌یابد و سبب شکست عایقی می‌شود. این پدیده دوم را دشارژ الکتریکی ماشینی (EDM) ناشی از پالس جریان در داخل یاتاقان می‌نامند.

۴) پتانسیل القایی خارجی روی شفت: سیستم تحریک در ماشین‌های سنکرون، اغلب یک‌سوسازهای کنترل‌شده با تریستور، پالس‌های ولتاژ حالت گذرای نسبتاً زیادی را در سیم‌پیچ‌های روتور ایجاد کرده و سبب بروز پتانسیل الکتریکی روی شفت با کوپلینگ خازنی میان سیم‌پیچ‌های روتور و شفت می‌شود. بررسی خرابی‌های یاتاقان، یکی از

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

اولین مراحل بررسی دلایل پدیده ولتاژ شفت است. جریان‌های فرکانس پایین یاتاقان را می‌توان به چهار دسته تقسیم‌بندی کرد: جریان‌های پوششی، جریان‌های حفره‌ای، جریان‌های جرقه‌ای و جریان‌های ترکیبی. یک سطح پوشش داده‌شده در حالت کلی با چشم غیرمسلح غیر قابل‌دیدن است و مشخصه‌های میکروسکوپی با دهانه‌های کوچک در آن وجود دارد که طی دشارژ (تخلیه) الکتریکی تشکیل می‌شوند (EDM). جریان‌های حفره‌ای که در حفره‌های خیلی بزرگ‌تر به‌وجود می‌آیند، شکل جدی‌تر و خطرناک‌تر جریان‌های پوششی هستند. شکاف‌های ناشی از جرقه نیز نامنظم بوده و اغلب در جهت چرخش موتور اریب می‌شوند. جریان‌های ترکیبی نیز به مقدار زیاد جریان‌های نشتی عبوری از رول یاتاقان بستگی داشته و می‌توان به‌سادگی آن‌ها را مشاهده کرد. بررسی این پدیده در حالت کلی زیر میکروسکوپ صورت می‌گیرد تا منشأ خرابی مشخص شود به این دلیل که این منشأ یا شیمیایی است و یا مکانیکی.

ب) روش‌های اندازه‌گیری

استاندارد IEEE 112، برای پروسه تست موتورها و ژنراتورهای القایی چند فاز، راه‌کارهایی را برای اجرای روش‌های اندازه‌گیری جریان و ولتاژ شفت ارائه کرده است درحالی‌که ماشین تحت سرعت و ولتاژ اسمی کار می‌کند. ولتاژ یاتاقان باید روی همه یاتاقان‌ها، چه عایق‌بندی‌شده باشند و چه نشده باشند، اندازه‌گیری شده و اطلاعاتی پیرامون سلامت نوارهای روغنی عایقی به ما می‌دهد. یک روش دیگر، بر اندازه‌گیری پتانسیل روی سرهای مخالف شفت تمرکز دارد که معمولاً با جاروبک‌ها و یا حلقه‌های لغزشی برای کاربردهای عملی استفاده می‌شوند. یک اسیلوسکوپ با امپدانس ورودی زیاد باید استفاده شود به این خاطر که سیگنال‌های شفت ازنظر هارمونیک‌های فرکانسی بسیار غنی هستند. اندازه‌گیری‌ها را می‌توان با یک مولتی‌متر TRMS نیز اجرا کرد. استاندارد NEMA MG1 نیز مقدار آستانه ولتاژ شفت را mV ۳۰۰ اعلام کرده است که می‌تواند برای موتورهای القایی قفس سنجابی چندفازی با توان اسمی kW ۳۶۰۰ و یا کمتر تحت ولتاژ V ۷۲۰۰ یا کمتر اعمال شود، درحالی‌که استاندارد IEC60034-25 حد آستانه ولتاژ شفت رامV ۳۰۰ پیک برای موتورهای ولتاژ پایین تعیین می‌کند. بر همین اساس، سازنده‌ها اغلب مقدار آستانه ولتاژ یاتاقان را V۲ برای موتورهای ولتاژ متوسط در نظر می‌گیرند. اگر ولتاژ شفت بیشتر این مقدار آستانه باشد، هر دو استاندارد فوق حد عایقی پیشنهادی برای یاتاقان را تحت عملکرد سینوسی، تعیین می‌کنند، و ولتا شفت در این حالت مطابق با IEEE112 اندازه‌گیری می‌شود.

ج) خرابی‌های ناشی از ولتاژهای شفت/روش‌های حذف آن

برای حفاظت از یاتاقان‌ها، معمولاً از عایق یاتاقان و جاروبک‌های زمین‌شده شفت استفاده می‌شود. عملکرد سیستم‌های بعدی باید در نظر گرفته نشود، همان‌طورکه در میان سایر ژنراتورها تا ۲/۸ صورت گرفته مگاوات است. مقاومت زمین ۹۰۹ اهم باعث می‌شود که بار الکترواستاتیکی تجمع یافته با ولتاژ شفت تا ۱۷۰ ولت روی شفت توربین افزایش یابد. ازآنجایی‌که عایق روان‌کننده یاتاقان به‌صورت خازن عمل می‌کند، اگر ولتاژ یاتاقان بیشتر از ولتاژ شکست نوار عایقی شود، جریان مخرب در یاتاقان تا پایه یاتاقان به گردش می‌افتد. برخی از مطالعات موردی وجود یاتاقان‌های روغنی (توضیح داده‌شده در بخش III-C را روی موتورهای DC متناسب با ولتاژهای شفت، نشان داده‌اند. یک آزمایش نیز در این رابطه صورت گرفته است: موتورهای DC توسط سیستم‌های یک‌سوساز تغذیه می‌شوند که برای تولید هارمونیک‌ها شناخته می‌شود. برقراری ولتاژهای حالت گذرای قطبی میدان سبب بروز عدم تعادل در شار فاصله هوایی می‌گردد که درنهایت ولتاژهای شفت را تولید می‌کند، علت به‌وجود آمدن این ولتاژهای شفت، رأکتانس حالت گذرای قطب‌های میدانی است که کاملاً مشابه نیستند به این خاطر که پروسه‌های ساخت

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

سیستم‌ها با هم متفاوت است، فیلم روغنی دی‌الکتریک یاتاقان قطع می‌شود که سبب بروز دشارژ الکتریکی EDM بر اساس سطح ولتاژ و شکل موج ولتاژ dV/dt می‌گردد. علاوه بر این، جاروبک‌های کربنی قدیمی برای اندازه‌گیری ولتاژ شفت و یا زمین شدگی شفت مناسب نیستند که علت آن نیز در برخی از مقالات توضیح داده شده است. در این مقالات توضیح داده شده است که در جاروبک‌های کربنی کلاسیک، چگالی جریان نوعی هرگز در کاربردهای زمین شدگی شفت، از حد مجاز تجاوز نمی‌کند و ازاین‌رو امپدانس تماسی بالایی را بین شفت و جاروبک به‌وجود می‌آورد که سبب جرقه در این کنتاکت می‌گردد. علاوه بر جاروبک‌ها و روغن حساسیت به گردوغبار نیز عامل دیگری است. برخی از مقالات ادعا کرده‌اند که قابل‌اطمینان‌ترین جاروبک‌ها، جاروبک‌های فلزی یا نوع هم‌بافته هستند. با این وجود، در صنعت، کمیت‌های موردنظر در کاربردهای موتور DC و AC در مقابل ولتاژهای شفت با استفاده از جاروبک‌های کربنی با ساختار خاص، محافظت می‌شوند.

۲-۶-۵- ولتاژ شفت تحت عملکرد اینورتر

الف) مروری بر این پدیده

پدیده جریان‌های یاتاقان هنگامی که موتور با اینورتر منبع ولتاژ (VSI) مبتنی بر مدولاسیون عرض پالس (PWM) کار می‌کند به‌صورت گسترده بررسی شده است. تعداد قابل‌توجهی از مطالعات ولتاژ مود مشترک (CM) را برای یک اینورتر PWM برای ایجاد ارتباط با جریان‌های یاتاقان ارائه کرده‌اند. تولید جریان‌های فرکانس بالا در یاتاقان شامل کوپلینگ خازنی و سلفی داخل ماشین نیز می‌شود. همه سیستم‌های درایو دارای خازن‌های پارازیتی و سلف‌های پارازیتی هستند، و همیشه تحت عملکرد سینوسی از آن‌ها صرف‌نظر می‌شود. تحت شرایط کارکرد اینورتر، مشخص شده است که مؤلفه‌های فرکانس بالا (HF) برای ولتاژ CM سبب تحریک خازن‌ها و سلف‌های پارازیتی موتور شده و جریان‌های یاتاقان تحت عنوان جریان‌های القای اینورتری را تولید می‌کنند. این پدیده‌ها در محدوده ۱۰۰ کیلوهرتز تا چندین مگاهرتز بر اساس ادعای برخی از نویسنده‌های مقالات است.

ب) روش‌های اندازه‌گیری

در حال حاضر، هیچ مقدار آستانه‌ای برای ولتاژهای شفت و یا یاتاقان برای ماشین‌های تحت کارکرد اینورتر تعیین نشده است اما سازنده‌ها معمولاً حد ولتاژ یاتاقان V ۵ را برای موتورهای ولتاژ متوسط توصیه می‌کنند. علاوه بر این، هیچ تجهیز استاندارد و یا روشی برای اندازه‌گیری این ولتاژ وجود ندارد. مراجع روش‌های مختلف را برای اندازه‌گیری جریان‌های شفت نشان می‌دهد. این نکته نیز قابل‌توجه است که روش اندازه‌گیری جریان شنت در استاندارد IEEE112 مناسب نیست. این روش مسیر امپدانس پایینی را بین انتهای شفت ایجاد کرده و جریان واقعی شنت را نشان نمی‌دهد. اگر هیچ تجهیز اندازه‌گیری قبلاً در مکان موردنظر نصب نشده باشد، اندازه‌گیری جریان‌های یاتاقان عملاً غیرممکن است. نصب یک کویل Rogowski حول شفت داخل ماشین یک روش اندازه‌گیری جریان شفت است که جریان گردشی فرکانس بالا را القا می‌کند. این روش مستلزم آماده‌سازی دقیق ماشین بوده و در میدان به‌سادگی قابل‌اجرا نیست. اما کویل های Rogowski به‌صورت گسترده به‌خصوص برای مانیتور کردن جریان‌های زمین متناظر با dV/di ی بالا در ماشین‌های تغذیه شونده توسط اینورتر توسط ABB استفاده می‌شوند. اندازه‌گیری‌های جریان‌های فرکانس بالای یاتاقان اغلب از روش‌های غیرقابل‌پیش‌بینی استفاده می‌کند که به آماده‌سازی دقیق موتور نیاز دارد. معمولاً یک عایق الکتریکی بین یاتاقان و فریم نصب می‌شود. سپس یک سیم با امپدانس پایین برای کوتاه‌سازی عایق استفاده می‌شود و جریان عبوری از این سیم نیز اندازه‌گیری می‌گردد. باید

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

خاطرنشان کرد که این روش تنها تخمین خوبی از جریان یاتاقان را نشان می‌دهد. علاوه بر این، تخمین مقادیر جریان‌های مخرب یاتاقان کار پیچیده‌ای است به این خاطر که این اندازه‌گیری و تخمین به‌اندازه ماشین و میدان مورداستفاده بستگی دارد.

ج) روش‌های حذف برای حفاظت یاتاقان‌ها

هدف اصلی مطالعه جریان‌های یاتاقان به‌صورت واضح برای قواعد عملی پیشنهادی و راه‌کارهای پیشنهادی برای استفاده از ماشین‌ها در شرایط کاری مختلف است. روش‌های مختلفی را هم که در زمینه تست و هم در صنعت موردآنالیز قرار گرفته‌اند می‌توان به دودسته تقسیم‌بندی کرد. روش‌های اعمال‌شده در سمت اینورتر و یا روش‌های مورداستفاده برای حذف جریان‌های یاتاقان در موتور. هدف اصلی، کاهش و یا حذف ولتاژ مود مشترک اینورتر است، به این خاطر که این ولتاژ منبع اصلی تولید جریان‌های فرکانس بالای یاتاقان است. دسته اول فیلترهای خروجی اینورتر، (فیلترهای dV/dt و رآکتورهای dV/dt)، فیلترها سینوسی، چُک‌های مود مشترک و کابل‌های غلاف‌دار هستند. فیلترهای مود مشترک را می‌توان برای کاهش و یا حذف ولتاژ CM به‌کار برد. دسته دوم شامل نوارهای مهارکننده HF، رینگ‌ها، یاتاقان‌های عایق‌بندی‌شده، یاتاقان‌های هیبرید و یا سرامیکی، کوپلینگ های عایق‌بندی‌شده و یا روتور غلاف دار الکترواستاتیکی است. یاتاقان‌های سرامیکی مسیرهای جریان را می‌شکند، درحالی‌که لایه‌های عایقی مربوط به یاتاقان‌های عایق‌بندی‌شده جریان‌های گردشی و جریان‌های یاتاقان ناشی از جریان‌های زمینی روتور را کاهش می‌دهند اما در مقابل جریان‌های یاتاقان EDM ناکارآمد هستند. روش کلاسیک برای قطع جریان‌های گردشی HF در ماشین‌ها، نصب یک یاتاقان سرامیکی و یا هیبرید است. معمولاً، ماشین‌های القایی با توان اسمی بیش از ۱ مگاوات حداقل دارای یک و یا دو یاتاقان عایق‌بندی شده هستند. سایر روش‌ها بر استفاده از یک یاتاقان سرامیکی روی انتهای زمین‌شده شفت تکیه دارند. در همه موارد، این پدیده باید به‌صورت کامل پیش از اعمال هر روش حذفی، موردبررسی قرار گیرد. یک روش ارائه‌شده برای حفاظت از جریان‌های یاتاقان، که امروزه در صنعت شناخته شده است، ایجاد مسیر امپدانس پایین به زمین برای جریان‌های یاتاقان است. این روش شامل یک حلقه هدایت‌کننده نصب‌شده روی شفت است که حاوی میلیون‌ها میکرو فیبر هادی است. به‌صورت تجربی اثبات شده است که این سیستم برای حذف جریان‌های فرکانس بالا و ولتاژهای فرکانس بالا در رنج مگاهرتز نظیر جریان‌های یاتاقان EDM و جریان‌های گردشی HF مناسب است. برای مثال، رنج حفاظت یک یاتاقان جریان بالا که در حالت خاص برای موتورهای بزرگ و ژنراتورهای بزرگ طراحی شده است، می‌تواند تا ۱۲۰ آمپر را به‌صورت پیوسته تحت فرکانس ۱۳/۵ مگاهرتز با ولتاژ تخلیه ۳ کیلوولتی پیک، تحمل کند. ماشین‌های حساس در صنعت اغلب با این سیستم حفاظتی مجهز می‌شوند که مستلزم تعمیر و نگهداری کمتری در مقایسه با جاروبک های زمین‌شده سنتی هستند. باید خاطرنشان کرد که خرابی‌های یاتاقان ناشی از جریان‌های فرکانس پایین و فرکانس بالا درست شبیه هم هستند با این تفاوت که پدیده جرقه زدن معمولاً مربوط به ماشین‌هایی است که توسط یک‌سوسازها و یا اینورترها تغذیه می‌شوند. جرقه زدن به‌صورت جرقه‌های دارای توزیع عرضی در داخل بلبرینگ شناخته می‌شود که پدیده washboarding را نتیجه می‌دهد. در مطالعات قبلی، مکانیزم زمین سازی شفت با اتصال شفت و فریم با مسیر امپدانس پایین ارائه می‌شده است. با این وجود، این مطالعات با مشکلاتی در رابطه با لایه کربنی ساخته شده روی شفت دست‌به‌گریبان بودند که مسیر امپدانسی را افزایش می‌داد. پس از این رویداد، جرقه نیز شدیدتر می‌شود. بنابراین، قواعد عملی پیش از نصب ماشین تغذیه شونده با اینورتر برای جلوگیری از خرابی‌های یاتاقان‌ها نیز ارائه می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

۳-۶-۵- جلوگیری از خرابی‌های یاتاقان‌های ژنراتور با استفاده از AEGIS

ژنراتورها، همانند موتورهای توان بالا، در معرض جریان‌های گردی هستند که ناشی از خرابی یاتاقان‌های الکتریکی و خرابی آن‌ها می‌شود که اغلب در زمان کوتاهی صورت می‌گیرد. در واقع، بیش از نیمی از خرابی‌های ژنراتورها ناشی از خرابی یاتاقان‌ها است. این جریان‌های گردشی از فریم تا یاتاقان جاری شده و سپس در امتداد شفت به یاتاقان دیگر و سپس به فریم برمی‌گردند. به‌منظور قطع این جریان‌های گردشی، ژنراتورها در عمل با یک یاتاقان عایق‌بندی‌شده در انتهای شفت موتور مجهز می‌گردد. اما این روش همیشه مؤثر نیست، و خرابی‌های یاتاقان نیز همچنان ادامه دارد. این مورد است که در برنامه برقابی ایالات‌متحده مدنظر بوده و در آن، هزینه باز کردن یک ژنراتور توربین به‌اندازه ۱/۵ میلیون دلار بوده است.

به‌منظور جلوگیری از مصرف هزینه‌های بالای تعمیر و نگهداری ناشی از خرابی‌های الکتریکی در یاتاقان‌های ژنراتور، یک لایه حفاظتی دیگر موردنیاز است. زمین کردن شفت مسیری را بین شفت و فریم و زمین با مقاومت پایین به‌جای مسیر عبوری از یاتاقان به‌وجود می‌آورد. اما روش‌های سنتی زمین کردن شفت نظیر جاروبک های سد کربنی و جاروبک های رشته‌ای سیمی به جایگزین‌های متوالی و یا تنظیم کنتاکت های شفت به‌صورت دائمی نیاز دارند. این یک کار خطرناک است به‌خصوص زمانی که ژنراتور در پروسه تعمیر و نگهداری، آنلاین است. در مقابل، حلقه‌های AEGIS® iPRO شفت ژنراتور را با میکرو فیبرهای هادی متصل می‌کنند که در نتیجه میلیون‌ها نقطه اتصال را با شفت ایجاد کرده و یک مسیر مقاومت پایین را برای جریان‌های گردشی و مخرب به‌وجود می‌آورد. این میکرو فیبرها که دارای عمر طولانی هستند برای این منظور استفاده می‌شوند که بدون شکستن تعمیر شده و در مقابل بیش از ۲ میلیون مسیر برگشتی نیز مقاومت نشان می‌دهند. این میکرو فیبرها با اصطکاک بسیار کم و حداقل سایش عمل کرده و عمر آن‌ها نیز حداقل ۱۰ برابر طول عمر یاتاقان‌ها است. AEGIS® iPRO شفت‌های دارای ظرفیت جریانی بالای ترکیبی و زمین‌شده را با مانیتورینگ لحظه‌ای ولتاژ شفت در یک حلقه فشرده واحد، توصیه کرده است. برای ژنراتورهایی که دسترسی به آن‌ها دشوار است، iPRO-MR از یک سیم پوششی برای اتصال ترانسمیترهای سیم‌بندی‌شده سخت استفاده می‌کند. و از سیستم‌های SCADA و یا اتوماسیون ساختمانی برای مانیتور کردن بهره می‌برد. iPRO-MR همچنین کاربردهای حساس نیز علاوه بر سیستم حفاظتی یاتاقان غیر تطبیقی، روشی را توصیه می‌کند که بر اساس مانیتورینگ راه دور و لحظه‌ای سطوح واقعی ولتاژ شفت است. علاوه بر حفاظت یاتاقان‌های ژنراتور؛ AEGIS® iPRO همچنین کیفیت توان را با تیغه‌ای کردن مؤلفه‌های فرکانس بالای خروجی ژنراتور بهبود داده است.

۷-۵- سیستم خنک‌کنندگی ژنراتور

قبل از مطالعه سیستم خنک‌کنندگی ژنراتور، چگونگی به‌وجود آمدن افت در ژنراتور را موردمطالعه قرار می‌دهیم. افت در ژنراتور از سه قسمت جداگانه تشکیل می‌شود که عبارت‌اند از: افت اصطکاک سیال، افت مسی و افت آهنی.

الف) افت اصطکاک سیال خنک‌کننده: این افت، در اثر گردش سیال خنک‌کننده در داخل ژنرتور به‌وجود می‌آید و عامل آن، اصطکاک سیال در هنگام جریان آن در میان سیم‌پیچ‌های استاتور و روتور در حال گردش است.

ب) افت مسی: این افت، ناشی از عبور جریان از سیم‌پیچ‌های روتور و استاتور است که از سیم‌پیچ‌های استاتور، جریان متناوب، و از سیم‌پیچ‌های روتور، جریان dc عبور می‌کند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

ج) افت آهنی: افت آهنی، عبارت از افت در هسته آهنی ژنراتور، به هنگامی است که تحت تـأثیر میـدان مغناطیسـی متناوب قرار می‌گیرد.

به‌طور تقریبی می‌توان گفت که در هر ژنراتور، افت اصطکاک سیال خنک‌کننده در حدود ۰/۸، افت مسـی در حـدود ۰/۴، و افت آهن در حدود ۰/۴ درصد است. برای این که درجه حرارت ژنراتور از حد مجـاز تجـاوز نکنـد، بـرای تمـام ژنراتورهایی که در نیروگاه به‌کار گرفته می‌شوند، سیستم خنک‌کنندگی اجباری در نظر گرفتـه مـی‌شـود. بـه همـین جهت افت اصطکاک سیال خنک‌کننده در همه ژنراتورهای قدرت اجتناب ناپذیر است. روش حذف گرمای ایجـادشـده در داخل سیم‌پیچی روتور و استاتور به دو روش تماس غیر مستقیم و مستقیم انجام می‌شود. در روش خنک‌کننـدگی تماس غیر مستقیم، گاز (هوا یا هیدروژن) به کمک پره‌های نصب‌شـده در دو طـرف روتـور بـه سـمت داخـل ژنراتـور فرستاده می‌شود و از طریق فاصله هوایی بین روتور استاتور و کانال‌های ونتیلاسیون بـه حرکـت در مـی‌آیـد. در ایـن روش خنک‌کنندگی، گاز خنک‌کننده با سیم‌پیچی روتور و استاتور تماسی ندارد و گرمـای گرفتـه‌شـده توسـط گـاز از طریق سد یا مانع حرارتی ایزولاسیون سیم‌پیچی صورت می‌گیرد. در روش خنک‌کنندگی مسـتقیم یـا بـدون واسـطه، عامل خنک‌کننده (گاز یا مایع) مستقیماً با فلز سیم‌پیچی ژنراتور (یعنی شمش مـس) در تمـاس اسـت تـا گرمـا را از شمش بگیرد؛ بدون آنکه تجهیزات عایق کاری یا دندانه‌های روتور در مسیر انتقال گرما نقشی داشته باشند .

۱-۷-۵- خنک کردن به‌وسیله هوا

با وجود این که بازده ژنراتورهایی که با آب خنک می‌شوند نسبتاً بالاست و افت آنها به حدود ۱/۵ ٪ مـی‌رسـد، امـا در ژنراتورهای بزرگ، چون قدرت خروجی آنها زیاد است، حتی این مقدار درصد کم افت انرژی نیز مقدار قابل‌ملاحظـه‌ای از کل انرژی است. در ژنراتورهای قدیمی به‌وسیله گردش هوا در داخل ژنراتور، عمل خنک کردن انجام می‌شـد. بـرای این کار، هوا از محیط اطراف گرفته یا کشیده می‌شد و پس از عبور از ژنراتور دوباره در محیط اطراف تخلیـه مـی‌شـد. به این سیستم خنک‌کنندگی، سیستم خنک‌کنندگی باز می‌گویند. با اینکه این سیستم از جهت خنـک کـردن، کـاملاً مؤثر و مفید است اما معایب زیادی از جمله موارد زیر را به همراه دارد:

۱ ـ در هنگام کار، سرو صدای زیادی تولید می‌شد.

۲ ـ احتمال آتش سوزی بالا بود، چون هر گونه آتش سوزی در داخل ژنراتور به‌وسیله جریان مداوم هوای تازه تشـدید می‌شد.

امروز با به‌کار بردن یک سیستم جدیدتری، عمل خنک‌سازی انجام می‌گیرد، به‌طوری‌که همان مقدار هوای مورد لـزوم در یک مدار بسته به‌طور پیوسته گردش می‌کند و ضمن خنک کردن ژنراتور خود نیـز بـه‌وسـیله خنـک‌کننـده‌هـایی به‌طور مداوم خنک می‌گردد. به این روش، سیستم خنک‌کنندگی بسته می‌گویند. برای به جریان انداختن هـوا از بـاد بزن‌هایی که به روتور چسبیده، یا باد بزن‌هایی که به‌طور جداگانه از روتور یا بـا وسـیله دیگـری مـی‌چرخـد، اسـتفاده می‌شود. این سیستم خنک‌کنندگی از سیستم قبلی تمیزتر بوده و خیلـی بـی‌سـر و صـداتر کـار مـی‌کنـد و خطـرات آتش‌سوزی هم در آن کمتر می‌شود.

۲-۷-۵- خنک کردن به‌وسیله هیدروژن و به‌طور غیر مستقیم

با توجه به مقدار افت اصطکاک سیال خنک‌کننده (مثل هوایی که در قسمت قبلی مشخص شده است)، اگر افت فشـار جریان سیال در داخل سوراخ‌های ژنراتور کمتر شود، بازده کلی ژنراتور به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای اضافه می‌گردد. بـرای این منظور از سیال سبک‌تری به نام هیدروژن (برای عمل خنک کردن) استفاده می‌شود. همچنـین هیـدورژن نسـبت

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

به هوا دارای ضریب هدایت گرمایی و ظرفیت حرارتی بالاتری است. با توجه به این که افت اصطکاک سیال خنک‌کننده، متناسب با چگالی سیال خنک‌کننده است، در نتیجه خواص خنک‌کنندگی هیدروژن شرایط ایدئالی را مهیا می‌کند.

در حالت کلی استفاده از هیدروژن دارای مزایای فراوانی است:

۱ـ چون قدرت خنک‌کنندگی هیدروژن نسبت به هوا زیاد است، در نتیجه می‌توان ژنراتورهای سنگین‌تر و با قدرت بیشتری ساخت. همچنین استفاده از هیدروژن سبب کاهش فونداسیون می‌شود. لازم به یادآوری است که قابلیت هدایت گرمایی هیدروژن تقریباً ۷ برابر هوا است

۲ـ چون در منافذ داخل ژنراتورها اکسیژن وجود ندارد (به علت پر بودن ژنراتور از گاز ازت یا گاز کربنیک) عمر قسمت‌های عایق کاری سیم‌پیچ‌ها اضافه می‌شود. همچنین به علت عدم وجود هوا در هنگام ایجاد قوس الکتریکی، امکان به‌وجود آمدن اسیدنیتریک وجود ندارد. در نتیجه، استفاده از هیدروژن، ضریب اطمینان کار کرد ژنراتور را افزایش می‌دهد

۳ ـ خطر آتش‌سوزی کاهش می‌یابد، زیرا هیدروژن خالص غیر قابل‌انفجار است. در نتیجه در ژنراتورهایی که توسط گاز هیدروژن خنک می‌شوند، استفاده دستگاه اطفاء حریق الزامی نیست.

۴ـ به علت استفاده از هیدروژن، محفظه‌های ورود هیدورژن کاملاً آب‌بندی می‌شوند و امکان ورود گرد و خاک و رطوبت وجود ندارد. در نتیجه تعداد دفعات مربوط به تعمیرات ژنراتور کم می‌شود.

۵ـ وزن مخصوص هیدروژن در مقایسه با هوا بسیار کم است (حدود ۱۴ برابر سبکتر از هوا است) و این امر باعث می‌شود که تلفات ناشی از اصطکاک ژنراتور، ۸ الی ۱۰ ٪ کاهش یابد.

در مقابل مزایای اشاره‌شده، این روش معایبی نیز به همراه دارد. هیدروژنی که توسط آن، پوسته ژنراتور پر می‌شود، درصورتی‌که به شکل مخلوط با هوا درآید (به نسبت ۱ به ۴ تا ۷۴ ٪) و در صورت وجود بخار روغن (به نسبت ۲ به ۳ تا ۸۱/۵ ٪) مخلوط قابل‌انفجاری ایجاد می‌کند. بنابراین در ژنراتورهایی که توسط هیدروژن خنک می‌شوند، باید بدنه آن از فولاد غیر قابل‌نفوذ ساخته شود و مسیر گاز خنک‌کننده در داخل ژنراتور کاملاً آب‌بندی شود. همچنین آب‌بندی شین‌های خروجی ژنراتور و آب‌بندی در پوش‌های سردکن گاز و آب‌بندی دریچه‌ها و قسمت‌های مجزا که به هم وصل می‌شود، نیز باید کاملاً تأمین گردند. اما مشکل اصلی در آب‌بندی ژنراتور، محلی در بین محور روتور و محافظ‌های انتهایی استاتور است. برای این منظور، از گلندهای آب‌بندی‌شونده به‌وسیله روغن استفاده می‌شود. این گلندها در هر طرف انتهای روتور قرار دارند. یک پمپ کوچک برای برقراری آب‌بندی در مواقعی که توربین کار نمی‌کند، تدارک دیده می‌شود که روغن آن از سیستم روغن کاری توربین تأمین می‌گردد.

به‌عنوان نمونه در نیروگاه شهید محمد منتظر قائم، روتور و استاتور به‌وسیله هیدروژن خنک می‌شوند، و هیدروژن هم توسط چهار خنک‌کننده آبی که در چهار گوشه استاتور قرار دارند، خنک می‌شود. در طرف روتور نیز فن‌های سیرکولاسیون گاز هیدروژن نصب شده است. همچنین برای آب‌بندی گاز هیدروژن در دو طرف ژنراتور از آب‌بندی به‌وسیله روغن استفاده می‌شود

۳-۷-۵- خنک کردن به روش مستقیم توسط هیدروژن

یکی از اشکالات سیستم خنک‌کننده غیر مستقیم ژنراتورها پایین بودن ضریب هدایت عایق های الکتریکی سیم‌پیچ‌های روتور و استاتور است. این عایق‌ها مانند یک عایق حرارتی عمل می‌کنند و در نتیجه اختلاف درجه

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

حرارتی بین سیم‌پیچ مسی و گاز خنک‌کننده به‌وجود می‌آید. امروزه در ژنراتورهای جدید هیدروژن با سیم‌پیچ‌های مسی تماس مستقیم دارد. بنابراین به‌کار بردن این روش خنک‌کنندگی مؤثرتر از روش قبل است، زیرا در این روش هیدورژن می‌تواند گرما را مستقیماً از شمش سیم‌پیچی روتور یا استاتور دریافت کند. در این سیستم در داخل شمش مسی سیم‌پیچی‌های استاتور و روتور، لوله‌ای از فولاد غیر مغناطیسی قرار می‌گیرد تا هیدروژن در داخل این لوله به حرکت درآید. لازم به ذکر است که ژنراتورهایی را که مستقیماً توسط هیدورژن خنک می‌شوند نمی‌توان به‌وسیله هوا خنک کرد. زیرا سیم‌پیچ های استاتور و روتور بر اساس خنک شدن اجباری محاسبه شده‌اند و درصورتی‌که به جای هیدروژن توسط هوا عمل خنک کاری صورت گیرد، درجه حرارت افزایش یافته و باعث صدمه به ژنراتور می‌گردد. بنابراین به محض ایجاد نشتی هیدروژن در ژنراتورها، باید ژنراتور را بی‌بار نمود تا از شبکه جدا گردد. وصل مجدد چنین ژنراتوری به شبکه فقط در صورت رفع نشتی امکان‌پذیر خواهد بود.

۴-۷-۵- خنک کردن مستقیم ژنراتور توسط مایعات:

در ژنراتورهای با قدرت بسیار بالا به‌منظور خنک کردن مستقیم از روغن یا آب مقطر استفاده می‌شود. زیرا سطح گرما زدایی به هنگام استفاده از آب با روغن در مقایسه با هیدورژن بسیار زیاد است. به عبارت دیگر؛ ضریب انتقال حرارت آب و روغن بیشتر از گاز هیدورژن است. در نتیجه با استفاده از روش خنک‌کنندگی مستقیم توسط مایعات ژنراتورهایی با قدرت بیشتر و حجم کمتری می‌توان ساخت. البته استفاده از آب مقطر به‌عنوان مایع خنک‌کننده در مقایسه با روغن بهتر است، زیرا اولاً خاصیت گرمازدایی آب بیشتر از روغن است. در ثانی از نقطه نظر خطر آتش‌سوزی آب دارای ایمنی بیشتری است. بنابراین در بسیاری از ژنراتورهای پرقدرت (به خصوص ژنراتورهای پرقدرت ساخته‌شده توسط شوروی سابق از قدرت ۱۶۵ تا ۸۰۰ مگاوات) از آب مقطر برای خنک‌کنندگی سیم‌پیچ‌های روتور و استاتور استفاده می‌شود. البته خنک‌کنندگی مستقیم آب برای ژنراتورهای کاربردی در نیروگاه‌های آبی هم استفاده می‌شود. البته در بعضی از ژنراتورها آب خنک‌کننده فقط از شمش‌های استاتور عبور می‌کند. آب گرم خارج‌شده از ژنراتور توسط دستگاه سردکن (که در خارج ژنراتور قرار دارد) خنک می‌شود تا دوباره توسط پمپ به ژنراتور برگردانده شود. همچنین گردش هیدروژن داخل ژنراتور (به‌منظور خنک کردن مدار مغناطیسی ژنراتور) توسط پره‌های نصب‌شده بر روی محور روتور امکان‌پذیر خواهد بود.

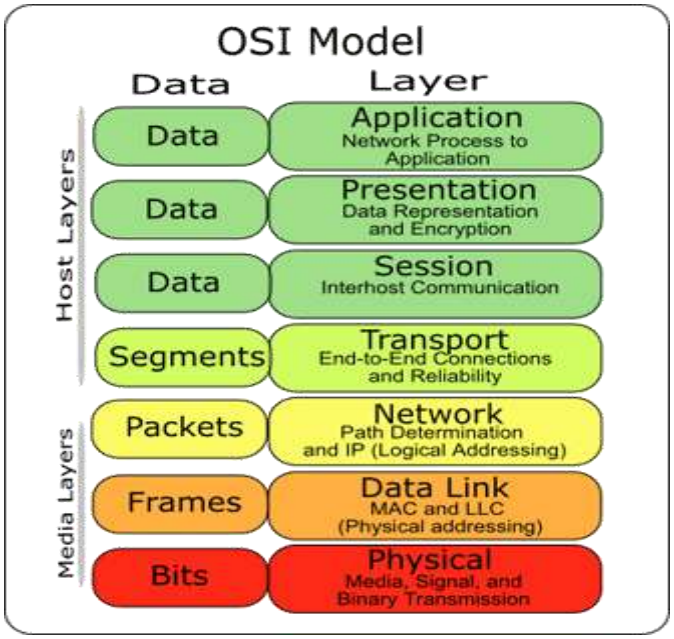
البته برای هیدورژن هم یک سیستم خنک‌کنندگی مجزا در نظر گرفته می‌شود. نمونه‌ای از این نوع سیستم خنک‌کنندگی را می‌توان در واحدهای ۳۲۰ مگاواتی نیروگاه اسلام‌آباد، تبریز و نکا مشاهده کرد. در این نیروگاه‌ها برای خنک‌کردن شمش‌های استاتور از سیستم آب خنک‌کن مدار بسته با آب بدون یون استفاده می‌گردد. در ژنراتورهای نیروگاه نکا سیم‌پیچ‌های استاتور از نوع تسمه‌های توخالی ساخته شده‌اند که به‌وسیله عبور آب خالص و به دور از هر گونه یون خنک می‌شوند. همچنین روتور ژنراتور هم به‌وسیله عبور گاز هیدروژن از میان شیارها و سطح روتور خنک می‌شود. فشار لازم برای به گردش درآوردن گاز هیدروژن گرم‌شده توسط دو پروانه که در دو انتهای روتور تعبیه شده‌اند تأمین می‌گردد. گاز هیدروژن گرم‌شده در خارج از ژنراتور به‌وسیله چهار خنک‌کننده خنک می‌شود تا دوباره در ژنراتور مورداستفاده قرار گیرد. البته خنک‌کننده‌های جداگانه‌ای برای خنک‌کردن آب عبوری از سیم‌پیچ‌های استاتور در نظر گرفته شده‌اند. ضمناً برای جلوگیری از نشت هیدروژن به خارج از ژنراتور و همچنین ممانعت از اتلاف آن از سیستم آب‌بندی روغنی استفاده می‌شود. در واحدهای ۳۲۰ مگاواتی نیروگاه اسلام‌آباد (مشابه با نیروگاه نکا) و برای خنک کردن شمش‌های استاتور از سیستم آب خنک کردن مدار بسته استفاده می‌شود. در این

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

سیستم آب گرم خارج‌شده از شمش‌های استاتور وارد یک تانک انبساط می‌شود که حداکثر درجه حرارت آب خروجی از استاتور ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد است. سپس توسط یک پمپ گریز از مرکز آب ذخیره‌شده در تانک پس از عبور از خنک‌کننده دوباره وارد سیم‌پیچ‌های استاتور می‌شود. البته با توجه به اهمیت خنک‌کنندگی ژنراتور تعداد پمپ‌های خنک‌کننده و فیلتر این سیستم دو عدد است که در حالت عادی یکی از آنها در حال بهره‌برداری و دیگری به‌صورت ذخیره هستند.

۸-۵- پروتکل‌های مخابراتی

پروتکل مجموعه قوانین لازم برای برقراری و تبادل اطلاعات بین دو سیستم تحت شبکه است. OSI (Open System Interconnection) و TCP/IP از معروف‌ترین و پر استفاده‌ترین پروتکل‌های مخابراتی در حوزه‌ی سیستم‌های قدرت هستند. این مدل‌ها توسط IEEE ایجاد شده و امکان برقراری ارتباط بین دستگاه‌های ساخته‌شده توسط تولیدکنندگان مختلف را فراهم می‌کنند. طبق شکل ۵-۱، مدل OSI از هفت لایه تشکیل شده است که از پایین به بالا شماره‌گذاری می‌شوند. هر یک از این لایه‌ها در سیستم مبدأ با لایه متناظر خود در سیستم مقصد در ارتباط است. در سیستم مبدأ این لایه‌ها از بالا به پایین اطلاعات موردنیاز لایه زیرین خود را فراهم می‌کنند و در سیستم مقصد از پایین به بالا، لایه‌ها اطلاعات موردنیاز لایه بالایی را فراهم می‌کنند. در ادامه هر یک از لایه‌ها و برخی از پروتکل‌های معروفی که در آنها استفاده می‌شوند توضیح داده شده است.



شکل (۷) مدل OSI

- لایه هفتم Application Layer :

لایه Application در مدل OSI یک واسط کاربری است که مسئول نمایش اطلاعات ارسالی و دریافتی از یک اپلیکیشن به‌کاربر است. این لایه اپلیکیشن‌ها و فرایندهای کاربر نهایی را پشتیبانی می‌کند. در این لایه دوطرف ارتباط (تقاضادهنده و پاسخ‌دهنده) مشخص شده، احراز هویت و حریم خصوصی کاربر و هرگونه محدودیت در ترکیب و ساختار اطلاعات در نظر گرفته می‌شود. هر چیزی در این لایه بر مبنای خواست کاربر و اپلیکیشن مشخص می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

در این لایه اطلاعات برای ورود به لایه Presentation، قطعه قطعه می‌شوند و سپس نقطه مقصد، آنچه را که از لایه Presentation تحویل می‌گیرد، را به ترتیب بهم متصل کرده تا اصل اطلاعات به‌دست آید. نظارت بر Error Recovery و Flow control در این لایه صورت می‌پذیرد. Flow control زمانی اهمیت پیدا می‌کند که سرعت ارسال داده از سرعت دریافت داده بالاتر باشد و در صورت کنترل نشدن جریان، ممکن است برخی از داده‌های دریافت‌شده از بین بروند و یا دریافت نشوند. برخی از پروتکل‌های معروف این لایه عبارت‌اند از:

Network Time Protocol (NTP)
Simple Network Management Protocol (SNMP)
Telnet
Finger
File Transfer Protocol (FTP)

- **لایه ششم Presentation Layer** :

نحوه نمایش اطلاعات رمزگذاری‌شده و پکت‌بندی بر عهده این لایه است. یعنی اینکه اطلاعات چگونه رمزنگاری شوند تا با سیستم عامل هر بخش هماهنگ شوند بر عهده این لایه است. این لایه اطلاعات دریافتی از لایه Application را از فرمت Application به فرمت شبکه ترجمه می‌کند. در طرف دیگر نیز این لایه دیتا را طوری تغییر فرم می‌دهد تا توسط لایه Application قابل‌پذیرش و فهم باشد. استاندارد کدها مثل ASCII-Unicode-EBCDIC در این لایه قرار دارند و اگر کامپیوترها از استاندارد کدهای مختلف استفاده کنند در این لایه تبدیل و قابل‌استفاده خواهد شد. پروتکل‌های مورداستفاده در این لایه عبارت‌اند از:

SSL (Secure Socket Layer): پروتکلی است که توسط شرکت Netscape برای رد و بدل کردن سندهای خصوصی از طریق اینترنت توسعه یافته است. SSL از یک کلید خصوصی برای به رمز درآوردن اطلاعاتی که بر روی یک ارتباط SSL منتقل می‌شوند استفاده می‌کند.

TLS (Transport Layer Security): یکی از پروتکل‌های رمزنگاری است و برای تأمین امنیت ارتباطات از طریق اینترنت و بر پایه SSL بنا شده است.

- **لایه پنجم Session Layer** :

این لایه مسئول برقراری، مدیریت و پایان بخشی به ارتباطات بین اپلیکیشن هاست. در واقع این لایه تبادلات و دستورات صورت گرفته بین اپلیکیشن ها در دو طرف ارتباط را ایجاد و مختصات‌بندی کرده و در نهایت پایان می‌بخشد. پروتکل‌های مورداستفاده در این لایه عبارت‌اند از:

SDP(Session Description Protocol): این پروتکل برای توصیف session های ارتباطی مالتی مدیا در نظر گرفته شده است.

SAP (Session Announcement Protocol): یک پروتکل آزمایشگاهی برای Broadcast کردن اطلاعات است.

- **لایه چهارم Transport Layer**:

لایه فوق مسئول پشتیبانی کنترل جریان داده‌ها و بررسی خطا و بازیابی اطلاعات بین دستگاه‌های متفاوت است. کنترل جریان داده‌ها، بدین معنی است که لایه فوق درصورتی‌که اطلاعاتی از چندین برنامه ارسال شده باشد،

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

داده‌های مربوطه به هر برنامه را به یک stream آماده تبدیل می‌نماید تا در اختیار شبکه فیزیکی قرار داده شوند و به‌طورکلی وظیفه این لایه به شرح زیر است:

- ✓ حمل مطمئن داده
- ✓ ایجاد، مدیریت و خاتمه مدارات مجازی
- ✓ تشخیص و برطرف ساختن خطا

همچنین پروتکل‌های مورداستفاده در این لایه عبارت‌اند از: TCP، UDP و SPX.

- **لایه سوم Network Layer:**

لایه فیزیکی و لایه لینک داده برای هر شبکه منحصربه‌فرد بوده و به‌صورت محلی اجرا می‌شوند. این دو لایه برای انتقال داده‌ها از یک گره به گره دیگر در شبکه، مورداستفاده قرار می‌گیرند. شبکه اینترنتی از ۵ شبکه – ۴ شبکه LAN و ۱ شبکه WAN تشکیل شده است. در لایه فوق روش ارسال داده‌ها برای دستگاه گیرنده تعیین خواهد شد. پروتکل‌های منطقی، روتینگ و آدرس‌دهی نیز در این لایه انجام می‌شود. به‌طورکلی وظایف این لایه عبارت‌اند از:

- ✓ روتینگ
- ✓ پاسخ به سؤالات متعددی نظیر نحوه ارتباط سیستم های موجود در سگمنت‌های متفاوت شبکه
- ✓ subnet آدرس‌های مبدأ و مقصد و تشخیص مسیر لازم پروتکل‌های IPX , IP در این لایه استفاده می‌گردند.

• نیاز به لایه شبکه

برای حل مسئله تحویل از طریق لینک‌های متفاوت، لایه شبکه یا شبکه اینترنتی طراحی شده است. لایه شبکه مسئولیت میزبانی برای تحویل به میزبان و مسیریابی بسته‌ها از طریق سوئیچ‌ها را بر عهده دارد. زمانی که بسته وارد می‌شود، سوئیچ با جدول مسیریابی خود مشورت می‌کند و سپس یک رابط کاربری را پیدا می‌کند که بسته باید از طریق آن ارسال شود. سپس بسته پس از بعضی تغییرات در اطلاعات مسیریابی، به لایه پیوند داده انتقال می‌یابد. لایه شبکه در مقصد، مسئولیت تأیید آدرس را بر عهده دارد.

• اینترنت به‌عنوان یک شبکه داده

اینترنت در لایه شبکه، شبکه بسته‌های سوئیچ شده است. اینترنت به‌عنوان حالت دیتاگرام برای سوئیچ در لایه شبکه انتخاب می‌شود. اینترنت از آدرس‌های جهانی تعریف‌شده در لایه شبکه برای رهگیری بسته‌ها از مبدأ به مقصد استفاده می‌کند. سوئیچینگ در لایه شبکه در اینترنت از روش دیتاگرام برای سوئیچینگ بسته‌ها استفاده می‌کند. بسته‌های موجود در لایه IPv4 دیتاگرام‌ها نامیده می‌شوند.

• اینترنت به‌عنوان یک شبکه بدون اتصال

تحویل بسته می‌تواند با اتصال به شبکه یا بدون اتصال به شبکه انجام شود. در حالت اتصال، قبل از ارسال بسته، مبدأ ابتدا با مقصد ارتباط برقرار می‌کند. پس از برقراری اتصال، بسته‌ها از همان مبدأ به مقصد به‌صورت متوالی ارسال می‌شوند. زمانی که تمام بسته‌های داده ارسال شدند، اتصال قطع می‌شود.

- Fragmentation

یک دیتاگرام می‌تواند از طریق شبکه‌های مختلف جاری شود. هر روتر اطلاعات داده IPv4 را از چارچوبی که دریافت می‌کند، رمزگشایی کرده و سپس پردازش می‌کند و سپس آن را در چارچوب دیگری محصور می‌کند. اندازه چارچوب دریافتی به پروتکل مورداستفاده در لایه فیزیکی که چارچوب از طریق آن ارسال شده، بستگی دارد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

• مجموعه کنترلی

پیاده‌سازی مجموعه کنترلی در بسته IPv4 از اصول مشابه پیروی می‌کند.

- مقدار فیلد مجموعه کنترلی بر روی صفر تنظیم شده است.

- منبع به بخش‌های ۱۶ بیتی تقسیم شده و سپس به هم اضافه می‌شوند. نتیجه تکمیل می‌شود و سپس به بخش مجموعه کنترلی وارد می‌شود.

- مجموعه کنترلی در IPv4 تنها بسته‌هایی را که شامل داده نیستند، پوشش می‌دهد.

• گزینه‌ها

منبع دیتاگرام Ipv4 از دو بخش تشکیل شده است:

- بخش ثابت

- بخش متغیر

بخش ثابت ۲۰ بایت و بخش متغیر حدود ۴۰ بایت طول دارند.

گزینه به معنای مواردی است که موردنیاز دیتاگرام نیستند. گزینه‌ها می‌توانند برای آزمایش و رفع اشکال شبکه مورداستفاده قرار گیرند. گزینه‌های موردنیاز برای پردازش منبع Ipv4 برای نرم‌افزار Ipv4 موردنیاز نیستند.

• فرمت بسته

هر بسته از منبع اصلی و به دنبال آن محموله تشکیل شده است. محموله از دو بخش تشکیل شده است:

۱. منبع توسعه اختیاری

۲. داده‌ها از منبع بالاتر

• منابع توسعه

طول منبع اصلی در ۴۰ بایت ثابت شده است. برای دادن کارایی بیشتر به دیتاگرام IP، منابع اصلی می‌توانند تا شش منبع توسعه دنبال شوند. این منابع می‌توانند گزینه‌هایی در IPv6 باشند.

• انتقال از IPv4 به IPv6

با توجه به تعداد زیاد سیستم‌های موجود در اینترنت، انتقال از IPv4 به IPv6 نمی‌تواند به‌صورت ناگهانی انجام شود. زمان زیادی برای انتقال هر سیستم در اینترنت از IPv4 به IPv6 موردنیاز است، که برای جلوگیری از هرگونه تلفات در سیستم، انتقال باید روان باشد.

از جمله مزایای این امر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. فضای آدرس بزرگ‌تر

۲. چارچوب منبع بهتر

۳. گزینه‌های جدید برای اجازه انجام وظیفه

۴. اجازه برای توسعه

۵. پشتیبانی برای امنیت بیشتر

- **لایه دوم Data Link Layer**:

پروتکل‌های فیزیکی در این لایه به داده‌های ارسال شده، اضافه خواهند شد. در این لایه نوع شبکه و وضعیت بسته‌های اطلاعاتی (Packet) نیز تعیین می‌گردند. وظایف اصلی این لایه عبارت‌اند از:

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

- ✓ انتقال مطمئن داده از طریق محیط انتقال
- ✓ آدرس دهی فیزیکی و یا سخت‌افزاری(MAC)
- ✓ توپولوژی شبکه

لایه پروتکل DLL، داده‌ها را بین گره‌های موجود در بخش‌های مشابه در شبکه محلی یا بین گره‌های شبکه مجاور در یک شبکه گسترده منتقل می‌کند. پروتکل‌های لینک داده، مشخص می‌کنند که چگونه دستگاه ها از طریق این برخوردها تشخیص داده شده و بازیابی می‌شوند و سپس مکانیسم‌هایی را برای کاهش یا جلوگیری از این برخوردها فراهم می‌کنند.

پروتکل‌های DLL را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. این بخش‌ها عبارت‌اند از:

- پروتکل‌های مقدماتی
- پنجره کشویی

۱. پروتکل‌های مقدماتی:

پروتکل‌های DLL مقدماتی به سه پروتکل تقسیم می‌شوند. این پروتکل‌ها عبارت‌اند از:

- پروتکل ساده بدون محدودیت
- پروتکل ساده توقف و انتظار
- پروتکل ساده برای یک کانال نویزی

الف) پروتکل ساده بدون محدودیت

ابتدا قابل‌ذکر است که داده‌ها تنها در یک جهت منتقل می‌شوند. هر دو لایه شبکه همیشه برای انتقال و دریافت آماده هستند. معمولاً از زمان پردازش چشم‌پوشی می‌شود و مهم‌تر از همه اینکه کانال ارتباطی بین لایه لینک داده هرگز به چارچوب‌ها آسیب نمی‌رساند و از آن‌ها خارج نمی‌شود.

این پروتکل شامل دو حالت فرستنده و گیرنده است. فرستنده داده‌ها را به گیرنده ارسال می‌کند و داده روی لایه لینک داده دستگاه فرستنده اجرا می‌شود و گیرنده داده را از فرستنده دریافت می‌کند و داده روی لایه لینک داده دستگاه گیرنده اجرا می‌شود. این یک پروتکل بسیار ساده است که در آن، فرستنده از حلقه while استفاده می‌کند و به‌صورت پیوسته داده‌ها را به گیرنده ارسال می‌کند. کار ابتدایی گیرنده صبر برای دریافت چارچوب است. به محض اینکه چارچوب را دریافت کرد، رویداد را روی frame_arrival یا روی انتظار برای چارچوب تنظیم می‌کند.

ب) پروتکل ساده توقف و انتظار:

این نوع پروتکل برای مقابله با مشکل سیل داده مورداستفاده قرار می‌گیرد. که در این مشکل فرستنده داده‌ها را به‌صورت پیوسته به گیرنده ارسال می‌کند و شرایطی مانند سیل در مکان گیرنده ایجاد می‌شود.

برای جلوگیری از این مورد، پروتکل توقف و انتظار مورداستفاده قرار می‌گیرد. بر این اساس فرستنده داده‌ها را به گیرنده ارسال می‌کند. اکنون گیرنده چارچوب را دریافت می‌کند و آن را به لایه شبکه دستگاه گیرنده منتقل می‌کند و پس از انجام این کار یک چارچوب ساختگی را به فرستنده‌ای که از آن چارچوب دریافت شده است، پس می‌فرستد. این مورد را تأیید نیز می‌گویند. بنابراین به‌صورت کلی‌تر می‌توان بدین‌شکل بیان کرد که: فرستنده چارچوب را ارسال می‌کند و سپس منتظر می‌ماند تا تأیید توسط گیرنده دریافت شود. این مورد، پروتکل توقف و انتظار نامیده می‌شود.

پ) پروتکل ساده برای یک کانال نویزی:

DOI: 10.30503/nripress.2020.151

این پروتکل، با کانال نویزی کار می‌کند. در اینجا وظیفه اصلی، تأییدی است که از گیرنده دریافت می‌شود. گیرنده یک تأیید مثبت و منفی را پس می‌فرستد و پس از دریافت تأیید، فرستنده دوباره شروع به‌کار می‌کند. عملکرد این پروتکل بدین‌صورت است که فرستنده چارچوب را به گیرنده می‌فرستد، گیرنده در صورت صحیح بودن چارچوب، آن را دریافت می‌کند، یک تأیید مثبت را پس می‌فرستد و پس از دریافت تأیید مثبت، فرستنده چارچوب بعدی را ارسال می‌کند، اما اگر گیرنده چارچوب و چارچوب، دماغه کانال آسیب دیده داشته باشند، یک تأیید منفی را پس می‌فرستد و پس از دریافت تأیید منفی، فرستنده چارچوب را دوباره ارسال می‌کند تا زمانی که گیرنده تأیید مثبت را پس بفرستد. این مورد، پروتکل ساده برای کانال نویزی نامیده می‌شود.

۲. پروتکل پنجره کشویی:

در پروتکل توقف و انتظار، همان‌گونه‌که بحث شد، تنها یک چارچوب، در یک زمان قابل‌انتقال است. این مورد باعث افزایش عدم کارایی در زمان افزایش طول بیت می‌شود. برای افزایش کارایی، باید سعی کنیم تا بیش از یک چارچوب را به‌صورت همزمان انتقال دهیم، بدین‌معنا که باید چندین چارچوب منتقل شود تا بازده زیاد شود. برای این مورد، ما فرض می‌کنیم که دو ایستگاه از طریق یک لینک دوگانه کامل به هم متصل شده‌اند. ایستگاه B فضای بافر را اختصاص می‌دهد تا بتواند چارچوب‌های W را بگیرد تا A بتواند چارچوب های W را بدون اینکه منتظر تأیید باشند، در انتظار نگه دارد. برای رهگیری چارچوب‌ها، یک عدد متوالی بر روی هر کدام برچسب‌گذاری می‌شود. ارسال تأیید بدین معنا است که B چارچوبی را تصدیق کرده است که شامل شماره توالی چارچوب بعدی است که پذیرفته شده است. این مورد به‌صورت ضمنی اعلام می‌کند که B آماده دریافت چارچوب‌های بعدی W است. این روش همچنین می‌تواند برای تأیید چندین چارچوب مورداستفاده قرار گیرد. A شماره توالی آن چارچوب‌هایی را که برای ارسال تأیید شده‌اند، حفظ می‌کند و B شماره توالی آن چارچوب‌هایی را که برای دریافت تأیید شده‌اند، حفظ می‌کند. هر فهرستی می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب پنجره‌ای در نظر گرفته شود. بنابراین این عملیات کامل، پروتکل پنجره کشویی نامیده می‌شود.

- **لایه اول Physical Layer**:

لایه فیزیکی، در مقایسه با سایر لایه‌ها پیچیدگی خاصی ندارد و تنها مسئولیتی که دارد ارسال بیت‌ها از طریق انتقال‌دهنده بی‌سیم یا سیمی است. این بیت‌ها می‌توانند در قالب طول موج در نوع وای‌فای یا ولتاژ روی حالت سیمی (اترنت یا زوج کابل‌های به هم تابیده) یا نوری از طریق کابل‌های فیبرنوری انتقال پیدا کنند. در حقیقت، تنها دو لایه پیوند داده و لایه فیزیکی باید جزئیاتی در ارتباط با نحوه انتقال بی‌سیم یا سیمی اطلاعات داشته باشند که این اطلاعات را از میان‌افزار کارت شبکه به‌دست می‌آورند. این لایه در ارتباط مستقیم با سخت‌افزار بوده و خصوصیات فیزیکی شبکه نظیر اتصالات، ولتاژ و زمان را مشخص می‌کند. پروتکل‌های مورداستفاده در این لایه عبارت‌اند از:

Fast Ethernet
RS232
E1
T1
ISDN