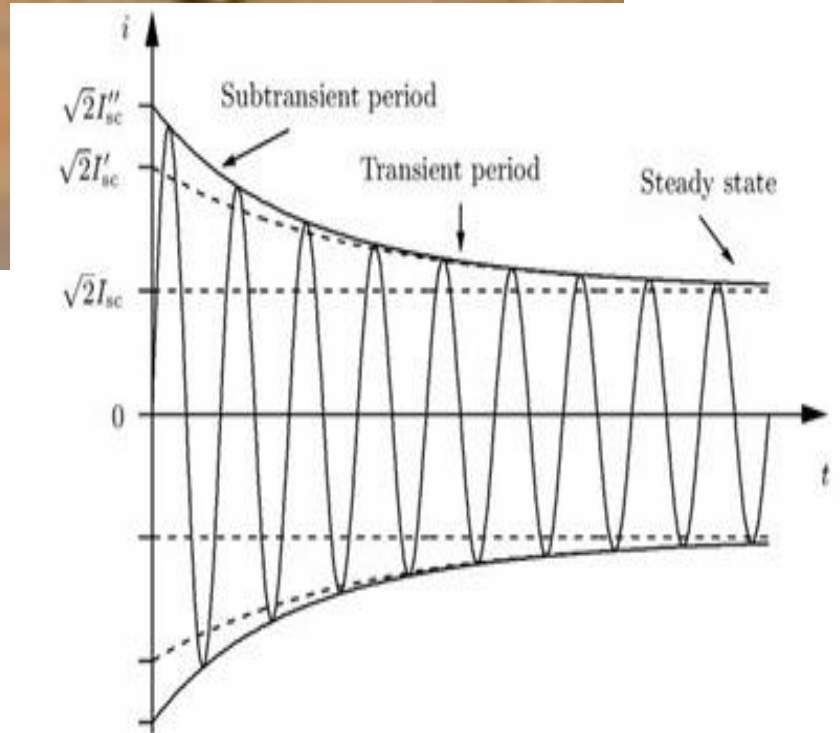


طراحی مفهومی و شبیه سازی سیستم  
ژنراتور اتصال کوتاه ۱۰۰ مگا ولت آمپر ۱۰۰  
کیلو آمپر و تحلیل هزینه ها



مدیر پروژه: امین بیرامی ایناللو

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

طراحی مفهومی و شبیه‌سازی سیستم ژنراتور اتصال کوتاه ۱۰۰ مگاوات آمپر ۱۰۰ کیلوآمپر

و تحلیل هزینه‌ها

مدیر پروژه:

امین بیرامی ایناللو

مجری:

سهراب امینی ولاشانی

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۳۹۹

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. مرکز توسعه فناوری موتورهای الکتریکی پیشرفته  
طراحی مفهومی و شبیه‌سازی سیستم ژنراتور اتصال کوتاه ۱۰۰ مگاوات آمپر ۱۰۰ کیلوآمپر و  
تحلیل هزینه‌ها/ مدیر پروژه. امین بیرامی ایناللو. ویراستار: سیما حسینی چشمه ماکانی. کارفرما: پژوهشگاه  
نیرو، ۱۳۹۹.

۱۳۶ ص: مصور، نمودار، جدول

۱. امینی ولاشانی، سهراب، مجری .



انتشارات پژوهشگاه نیرو

مرکز توسعه فناوری موتورهای الکتریکی پیشرفته

کلیه حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

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

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: [www.nri.ac.ir](http://www.nri.ac.ir)

پست الکترونیک انتشارات: [publications@nri.ac.ir](mailto:publications@nri.ac.ir)



## فرم تعهدنامه اصالت اثر

این جانب امین بیرامی ایناللو متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی این جانب و همکاران به شرح زیر است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

همکاران:

۱. عرفان خسروی‌مهر

۲. محمدطاهر گلستانی داریانی

۳. سعید صدیق

۴. عقیل قاهری

۵. حمید جهانگیر

۶. سهراب امینی ولاشانی

۷. یحیی طائفی‌اقدام

## پیشگفتار

ژنراتورهای اتصال کوتاه مولدهای الکتریکی هستند که وظیفه آنها تولید جریان زیاد برای آزمایش قدرت قطع و وصل کلیدها است. آزمایش مزبور در جهت تأیید طرح و روند طراحی و ساخت صورت می‌گیرد و بنابراین از حیث دسته‌بندی از مقوله نوعی و یا نمونه‌ای (Type and/or Sample Test) در نظر گرفته می‌شود. کلیدهای مدنظر به‌ویژه از نوع قدرت، سازندگان محدودی داشته و لذا آزمایشگاه‌های توان‌بالای دارنده ژنراتورهای اتصال کوتاه محدود می‌باشند، از سوی دیگر ساختمان و تجهیزات جانبی ژنراتورهای اتصال کوتاه بسیار پیچیده بوده و لذا هزینه سرمایه‌گذاری جهت خرید یا طراحی، ساخت و پیاده‌سازی آنها شدیداً افزایش می‌یابد.

در عین حال تعدد آزمایشگاه‌های فشارقوی در کشور و فقدان ژنراتور اتصال کوتاه در این آزمایشگاه‌ها موجب وابستگی به آزمایشگاه‌های خارجی شده و گاهی منجر به تضعیف نظارت بر کیفیت کلیدهای ساخت داخلی شده است و لذا با توجه به توسعه کمی و کیفی سازندگان ادوات فشارقوی و اهمیت تضمین کیفیت محصولات آنها لازم است مطالعاتی راجع به ساختار و نحوه عملکرد این تجهیزات صورت گیرد، علی‌الخصوص اینکه به واسطه کمبود این ادوات منابع و مراجع کافی راجع به آنها بسیار محدود بوده و هرگونه بررسی مستلزم ایده‌پردازی و سپستایید آن می‌باشد.

هسته مرکزی آزمایشگاه‌های توان‌بالا ژنراتورهای اتصال کوتاه است که وظیفه آنها ایجاد الگوهای جریانی خاص جهت آزمایش جریان تحمل و قطع کلیدها می‌باشد. رژیم کاری ویژه و لذا پیچیدگی این ادوات منجر به گزاف‌بودن هزینه ساخت و نصب گردیده به‌طوری که تعداد آنها در سطح بین‌المللی نادر بوده و کشور ما فاقد حتی یک نمونه می‌باشد و بدین جهت در راستای تجهیز آزمایشگاه‌های توان‌بالا از طریق خرید یا ساخت، لازم است بررسی‌هایی صورت گیرد.

هدف اصلی پروژه حاضر، مطالعه اسناد مرتبط با طراحی و ساخت ژنراتورهای اتصال کوتاه و سپس طراحی و مدل‌سازی اجزای سیستم ژنراتور اتصال کوتاه شامل تجهیز راه‌انداز، ژنراتور اتصال کوتاه، سیستم تحریک با سقف تحریک شدید، ترانسفورماتور اتصال کوتاه، سیستم کنترل، حفاظت و مانیتورینگ و ... جهت دستیابی به مشخصات فنی معین است. پس از تعیین مشخصات فنی اجزای سیستم ژنراتور، سازندگان این اجزاء شناسایی شده و استعلام قیمت انجام می‌گیرد. همچنین با توجه به امکان ساخت ژنراتور اتصال کوتاه با استفاده از ژنراتورهای مستعمل، در بخشی از پروژه، این امکان‌سنجی مطالعه می‌شود و تحلیل فنی و اقتصادی صورت می‌گیرد و در نهایت برنامه عملیاتی ساخت ژنراتور اتصال کوتاه ارائه می‌گردد.

پروژه پیش رو با همین منظور و در ۵ فصل انجام شده است که در فصل اول فعالیت‌ها و مطالعات انجام‌شده در زمینه ژنراتور اتصال کوتاه بررسی و جمع‌بندی شده است. سپس در فصل دوم مطابق با تجهیزات شناسایی‌شده در فصل اول در سیستم ژنراتور اتصال کوتاه، تأمین‌کنندگان این تجهیزات و توانمندی هر یک ارائه شده است. در فصل سوم پروژه نیز منابع تأمین ژنراتورهای مستعمل بررسی شده و در نهایت منابعی که قابلیت ورود جهت دریافت چنین ژنراتوری دارند شناسایی شده است که در فصل چهارم، پس از انتخاب ژنراتور، پارامترهای دینامیکی ژنراتور تخمین و محاسبه شده و مدار سیستم ژنراتور اتصال کوتاه، شبیه‌سازی شده است تا امکان دستیابی به پارامترهای

استاندارد اتصال کوتاه بررسی شود. در نهایت در فصل پنجم پروژه، برنامه عملیاتی شامل ریزپروژه‌های انجام‌پذیر به‌همراه تخمین هزینه و زمان اجرای طرح ارائه شده است.

گزارش پیش رو مربوط به تمامی بندهای خدمات پروژه "طراحی مفهومی و شبیه‌سازی سیستم ژنراتور اتصال کوتاه ۱۰۰ مگاوات‌آمپر ۱۰۰ کیلوآمپر و تحلیل هزینه‌ها" می‌باشد که با مدیریت آقای مهندس امین بیرامی ایناللو، مشاوره آقای یحیی طائفی اقدام و محققین مهندس عرفان خسروی‌مهر، محمدطاهر گلستانی داریانی، سعید صدیق، عقیل قاهری و نظارت آقای دکتر حمید جهانگیر و مجری‌گری آقای مهندس سهراب امینی ولاشانی از مرکز توسعه فناوری موتورهای الکتریکی نگارش و تدوین شده است. پروژه پیش رو به پیشنهاد شرکت آزمایشگاه‌های بین‌المللی برق و انرژی فتح (فاتل) تعریف و تحت کارفرمایی صندوق پژوهش و فناوری صنعت برق و انرژی به انجام رسیده است.

## فهرست مطالب

| عنوان                                                                                                                                                                                                                        | صفحه |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ۱- مرور، بررسی و تجمیع فعالیت‌های قبلی انجام‌شده در پژوهشگاه نیرو، شرکت فاتل و دیگر شرکت‌های فعال در این حوزه و بررسی انواع ساختارهای ممکن سیستم ژنراتور اتصال کوتاه، تحلیل فنی و اقتصادی پیکربندی و تعیین ساختار نهایی..... | ۳    |
| ۱-۱- مقدمه.....                                                                                                                                                                                                              | ۳    |
| ۱-۲- روش‌های تولید جریان اتصال کوتاه.....                                                                                                                                                                                    | ۳    |
| ۱-۲-۱- استفاده از شبکه سراسری.....                                                                                                                                                                                           | ۳    |
| ۱-۲-۲- استفاده از مدارهای RLC متصل به شبکه.....                                                                                                                                                                              | ۴    |
| ۱-۲-۳- استفاده از ژنراتور اتصال کوتاه.....                                                                                                                                                                                   | ۵    |
| ۱-۳- تجهیزات لازم برای انجام تست با استفاده از ژنراتور اتصال کوتاه.....                                                                                                                                                      | ۶    |
| ۱-۳-۱- ژنراتور اتصال کوتاه و سیستم‌راه‌انداز آن.....                                                                                                                                                                         | ۷    |
| ۱-۳-۲- سیستم تحریک.....                                                                                                                                                                                                      | ۸    |
| ۱-۳-۳- Pilot ژنراتور.....                                                                                                                                                                                                    | ۱۱   |
| ۱-۳-۴- ترانسفورماتور اتصال کوتاه.....                                                                                                                                                                                        | ۱۱   |
| ۱-۳-۵- مقاومت و راکتور.....                                                                                                                                                                                                  | ۱۱   |
| ۱-۳-۶- مدارشکن Master.....                                                                                                                                                                                                   | ۱۱   |
| ۱-۳-۷- Make Switch.....                                                                                                                                                                                                      | ۱۱   |
| ۱-۳-۸- خازن.....                                                                                                                                                                                                             | ۱۲   |
| ۱-۳-۹- سلول‌های تست.....                                                                                                                                                                                                     | ۱۲   |
| ۱-۳-۱۰- اتاق کنترل.....                                                                                                                                                                                                      | ۱۲   |
| ۱-۴- موازی کردن ژنراتورهای اتصال کوتاه.....                                                                                                                                                                                  | ۱۲   |
| ۱-۵- رژیم عملکرد ژنراتور اتصال کوتاه.....                                                                                                                                                                                    | ۱۴   |
| ۱-۶- رژیم تست اتصال کوتاه با استفاده از ژنراتور اتصال کوتاه.....                                                                                                                                                             | ۱۵   |
| ۱-۷- مطالعه امکان‌سنجی ساخت ژنراتور اتصال کوتاه برای آزمایشگاه مرکزی جمهوری کره در مؤسسه طراحی ماشین‌های سنگین Dae-An.....                                                                                                   | ۱۷   |
| ۱-۸- ژنراتور اتصال کوتاه ساخت شرکت Brush.....                                                                                                                                                                                | ۲۰   |
| ۱-۹- مطالعه شرکت آزمایشگاه‌های بین‌المللی قدرت فاتل در خصوص طراحی ژنراتور اتصال کوتاه.....                                                                                                                                   | ۲۲   |
| ۱-۱۰- مجموعه آزمایشگاهی شرکت AICHI ELECTRIC.....                                                                                                                                                                             | ۲۴   |
| ۱-۱۱- آزمایشگاه فشارقوی Siemens.....                                                                                                                                                                                         | ۲۸   |
| ۱-۱۲- آزمایشگاه ICMET.....                                                                                                                                                                                                   | ۳۰   |
| ۱-۱۳- آزمایشگاه ۱۵۰۰ مگاوات آمپری CPRI هند.....                                                                                                                                                                              | ۳۳   |
| ۱-۱۴- بررسی ژنراتور اتصال کوتاه ساخت شرکت جنرال الکتریک.....                                                                                                                                                                 | ۳۵   |
| ۱-۱۵- بررسی ژنراتور اتصال کوتاه ساخت شرکت Allias-Chalmers.....                                                                                                                                                               | ۳۸   |
| ۱-۱۶- بررسی ژنراتور اتصال کوتاه شرکت Westinghouse Electric.....                                                                                                                                                              | ۳۹   |
| ۱-۱۷- بررسی ژنراتور اتصال کوتاه ۸۸۸۰ مگاوات آمپری آزمایشگاه Toshiba.....                                                                                                                                                     | ۴۲   |
| ۱-۱۸- انتخاب ساختار مناسب سیستم ژنراتور اتصال کوتاه.....                                                                                                                                                                     | ۴۵   |

- ۱- ۱۹- نتیجه‌گیری..... ۴۶
- ۲- شناسایی و بررسی سازندگان و تأمین‌کنندگان اجزای سیستم ژنراتور اتصال کوتاه..... ۴۸
- ۲- ۱- مقدمه..... ۴۸
- ۲- ۲- سازندگان، تعمیرکاران و تأمین‌کنندگان حوزه ژنراتور..... ۴۸
- ۲- ۲- ۱- شرکت توربوژنراتور شاهرود..... ۴۸
- ۲- ۲- ۲- شرکت فن ژنراتور..... ۴۹
- ۲- ۲- ۳- شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران..... ۵۱
- ۲- ۲- ۴- شرکت پارس ژنراتور مینا..... ۵۲
- ۲- ۳- سازندگان و تأمین‌کنندگان سیستم تحریک استاتیکی، سیستم SFC و درایو الکتروموتور..... ۵۴
- ۲- ۳- ۱- شرکت اطمینان‌بخش..... ۵۴
- ۲- ۳- ۲- شرکت خدمات نیروگاهی آهار..... ۵۶
- ۲- ۳- ۳- شرکت پرتو صنعت..... ۵۷
- ۲- ۳- ۴- جهاد دانشگاهی علم و صنعت..... ۵۸
- ۲- ۳- ۵- شرکت برنا الکترونیک..... ۵۸
- ۲- ۳- ۶- جهاد دانشگاهی خواجه نصیرالدین طوسی..... ۵۸
- ۲- ۴- سازندگان و تأمین‌کنندگان ترانسفورماتورهای قدرت..... ۵۹
- ۲- ۴- ۱- ایران ترانسفو..... ۵۹
- ۲- ۴- ۲- آریا ترانسفو..... ۶۰
- ۲- ۵- سیستم‌های کنترل، مانیتورینگ و حفاظت..... ۶۱
- ۲- ۵- ۱- شرکت آریا کنترل پیشرو..... ۶۱
- ۲- ۵- ۲- شرکت بهمن گسترش کیان..... ۶۲
- ۲- ۵- ۳- شرکت فنی مهندسی ایستخرد پارسه..... ۶۲
- ۲- ۵- ۴- شرکت درخشان صنعت ایساتیس (سامایش)..... ۶۲
- ۲- ۶- شرکت‌های توانمند در زمینه طراحی، ساخت و تأمین کویلینگ، بیرینگ و فلاپویل..... ۶۳
- ۲- ۶- ۱- شرکت مهندسی و خدمات تابا..... ۶۳
- ۲- ۶- ۲- شرکت توربو کمپرسور البرز..... ۶۳
- ۲- ۷- نتیجه‌گیری..... ۶۴
- ۳- شناسایی تیپ‌های ژنراتوری موجود در صنایع کشور و بررسی منابع تأمین ژنراتور مستعمل و امکان‌سنجی ساخت ژنراتور اتصال کوتاه..... ۶۷
- ۳- ۱- مقدمه..... ۶۷
- ۳- ۲- ژنراتورهای کاربردی در واحدهای تولید برق جانبی صنایع..... ۶۷
- ۳- ۲- ۱- بررسی واحدهای تولید برق جانبی صنایع پتروشیمی..... ۶۷
- ۳- ۲- ۲- بررسی واحدهای تولید برق پالایشگاه‌ها..... ۶۷
- ۳- ۲- ۳- بررسی واحدهای تولید برق صنایع فولاد..... ۶۷
- ۳- ۳- بررسی ژنراتورهای واحد فیات نیروگاه ری..... ۶۸
- ۳- ۴- بررسی و مقایسه ژنراتورهای مارلی و آنسالدو..... ۶۸
- ۳- ۵- بررسی تکمیلی ژنراتورهای مارلی و برداشت اطلاعات..... ۷۰

|                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ۳-۶- امکان‌سنجی به‌کارگیری ژنراتور مارلی به‌عنوان ژنراتور اتصال کوتاه.....                                         | ۷۶  |
| ۳-۷- نتیجه‌گیری .....                                                                                              | ۷۸  |
| ۴- شبیه‌سازی نرم‌افزاری سیستم، مطالعه پارامترهای خروجی و طراحی و اصلاح مدل جهت دستیابی به مشخصات خروجی مطلوب ..... | ۸۱  |
| ۴-۱- مقدمه .....                                                                                                   | ۸۱  |
| ۴-۲- محاسبات راکتانس‌های ناشی ماشین سنکرون.....                                                                    | ۸۱  |
| ۴-۲-۱- راکتانس ناشی شیار .....                                                                                     | ۸۵  |
| ۴-۲-۲- راکتانس ناشی اتصالات پیشانی.....                                                                            | ۸۶  |
| ۴-۲-۳- راکتانس ناشی زیگزاگ (شکسته).....                                                                            | ۸۶  |
| ۴-۲-۴- راکتانس ناشی نوک دندان.....                                                                                 | ۸۶  |
| ۴-۲-۵- راکتانس ناشی کل سیم‌پیچی استاتور .....                                                                      | ۸۷  |
| ۴-۲-۶- راکتانس ناشی سیم‌پیچی تحریک.....                                                                            | ۸۷  |
| ۴-۲-۷- راکتانس ناشی سیم‌پیچی دمپر .....                                                                            | ۸۷  |
| ۴-۳- محاسبات ثابت‌های زمانی اتصال کوتاه .....                                                                      | ۸۸  |
| ۴-۴- شبیه‌سازی سیستم در محیط نرم‌افزاری و طراحی پارامترها.....                                                     | ۸۸  |
| ۴-۵- تحلیل نیروهای وارد بر سیم‌پیچی ژنراتور مارلی در زمان اتصال کوتاه.....                                         | ۹۶  |
| ۴-۵-۱- نیروهای وارد بر هادی درون شیارهای استاتور.....                                                              | ۹۶  |
| ۴-۵-۲- نیروی درونی در قسمت انتهایی سیم‌پیچی (سطح مخروطی).....                                                      | ۹۷  |
| ۴-۶- تحلیل افزایش دمای سیم‌پیچی ژنراتور مارلی حین اتصال کوتاه.....                                                 | ۹۹  |
| ۴-۷- نتیجه‌گیری .....                                                                                              | ۹۹  |
| ۵- تهیه و تدوین برنامه تفصیلی اصلاحات، ساخت و تست ژنراتور اتصال کوتاه با استفاده از ژنراتور مستعمل.....            | ۱۰۲ |
| ۵-۱- مقدمه .....                                                                                                   | ۱۰۲ |
| ۵-۲- مراحل و پروژه‌های انجام‌پذیر جهت پیاده‌سازی سیستم ژنراتور اتصال کوتاه و تخمین هزینه.....                      | ۱۰۴ |
| ۵-۲-۱- تأمین ژنراتور سنکرون اتصال کوتاه.....                                                                       | ۱۰۴ |
| ۵-۲-۲- تأمین سیستم تحریک ژنراتور اتصال کوتاه.....                                                                  | ۱۰۵ |
| ۵-۲-۳- تأمین سیستم راه‌انداز ژنراتور اتصال کوتاه.....                                                              | ۱۰۶ |
| ۵-۲-۴- تأمین سیستم ذخیره‌ساز انرژی فلابویل متصل به روتور ژنراتور .....                                             | ۱۰۶ |
| ۵-۲-۵- تأمین محفظه، درپوش و ملزومات نصب بر روی فندانسیون.....                                                      | ۱۰۷ |
| ۵-۲-۶- تأمین سیستم بیرینگ پدستال .....                                                                             | ۱۰۷ |
| ۵-۲-۷- تأمین ترانسفورماتور اتصال کوتاه خروجی ژنراتور .....                                                         | ۱۰۸ |
| ۵-۲-۸- تأمین سیستم‌های جانبی.....                                                                                  | ۱۰۸ |
| ۵-۲-۹- تأمین سیستم کنترل، مانیتورینگ و حفاظت.....                                                                  | ۱۰۹ |
| ۵-۲-۱۰- طراحی و اجرا و بهره‌برداری سیستم تست.....                                                                  | ۱۰۹ |
| ۵-۳- زمان‌بندی اجرای طرح.....                                                                                      | ۱۱۱ |
| ۵-۴- نتیجه‌گیری .....                                                                                              | ۱۱۱ |
| ۶- نتیجه‌گیری .....                                                                                                | ۱۱۳ |

## فهرست شکل‌ها

| عنوان                                                                                                                            | صفحه |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| شکل ۱-۱: مدار RLC سری.....                                                                                                       | ۴    |
| شکل ۲-۱: مدار RLC موازی.....                                                                                                     | ۴    |
| شکل ۶-۱: پیکربندی لازم جهت اجرای تحریک Flying.....                                                                               | ۹    |
| شکل ۷-۱: زمان‌بندی و روند اجرای تحریک Flying.....                                                                                | ۹    |
| شکل ۸-۱: نحوه تغییرات ولتاژ حاصل از بازوبست کلید.....                                                                            | ۱۰   |
| شکل ۹-۱: مدار ژنراتورهای اتصال کوتاه موازی.....                                                                                  | ۱۳   |
| شکل ۱۰-۱: برخی رژیم‌های تست اتصال کوتاه.....                                                                                     | ۱۶   |
| شکل ۱۱-۱: ساختار کلی مجموعه آزمایشگاهی شرکت AICHI ELECTRIC.....                                                                  | ۲۵   |
| شکل ۱۲-۱: جانمایی تجهیزات و نحوه اتصال آنها در مجموعه آزمایشگاهی شرکت AICHI ELECTRIC.....                                        | ۲۷   |
| شکل ۱۳-۱: دیاگرام سیستم اندازه‌گیری مجموعه آزمایشگاهی شرکت AICHI ELECTRIC.....                                                   | ۲۸   |
| شکل ۱۴-۱: بخشی از آزمایشگاه فشار قوی Siemens – ژنراتور اتصال کوتاه.....                                                          | ۲۹   |
| شکل ۱۵-۱: Make Switch های سرعت بالا از نوع VA-12M، ۱۲ کیلوولت؛ ۱۲ کیلوآمپر.....                                                  | ۳۰   |
| شکل ۱۶-۱: راکتورهای تنظیم‌کننده جریان اتصال کوتاه.....                                                                           | ۳۰   |
| شکل ۱۷-۱: سه ژنراتور اتصال کوتاه ۳۹۰ کیلوولت آمپر، ۴۰۰ ولت که به سه ترانسفورماتور تک‌فاز ۴۰۰ کیلوولت به ۲۵ ولت متصل شده‌اند..... | ۳۱   |
| شکل ۱۸-۱: سه ژنراتور اتصال کوتاه از نوع TI-100-2 با ظرفیت ۲۵۰۰ مگاولت آمپر.....                                                  | ۳۱   |
| شکل ۱۹-۱: حداکثر مقادیر RMS جریان اتصال کوتاه با قابلیت اعمال به کلیدها و مدارشکن‌ها بسته به ولتاژ ریکاوری.....                  | ۳۲   |
| شکل ۲۰-۱: حداکثر مقادیر RMS جریان اتصال کوتاه مجاز بسته به راکتانس تجهیز تحت تست.....                                            | ۳۲   |
| شکل ۲۱-۱: دیاگرام تک‌خطی آزمایشگاه ICMET.....                                                                                    | ۳۳   |
| شکل ۲۲-۱: تصویر ژنراتور اتصال کوتاه ۱۵۰۰ مگاولت آمپر تأمین‌شده توسط Oerlikon و اتاق کنترل آن در آزمایشگاه CPRI.....              | ۳۴   |
| شکل ۲۳-۱: تصویر ژنراتور اتصال کوتاه ۱۵۰۰ مگاولت آمپر تأمین‌شده توسط Alstom و اتاق کنترل آن در آزمایشگاه CPRI.....                | ۳۴   |
| شکل ۲۴-۱: تعویض راه‌انداز الکتروموتوری ژنراتور دوم با راه‌انداز SFC.....                                                         | ۳۴   |
| شکل ۲۵-۱: شماتیک مجموعه ژنراتور اتصال کوتاه مجهز به سیستم تحریک استاتیک و راه‌انداز SFC.....                                     | ۳۵   |
| شکل ۲۶-۱: سازه نگهدارنده سیم‌پیچی انتهایی ژنراتور جنرال الکتریک.....                                                             | ۳۶   |
| شکل ۲۷-۱: بستر تست مقاومت سازه نگهدارنده سیم‌پیچی انتهایی.....                                                                   | ۳۷   |
| شکل ۲۸-۱: سیستم ضربه‌گیر محفظه ژنراتور جنرال الکتریک.....                                                                        | ۳۷   |
| شکل ۲۹-۱: سازه نگهدارنده سیم‌پیچی انتهایی ژنراتور شرکت Alias-Chalmers.....                                                       | ۳۸   |
| شکل ۳۰-۱: سیم‌بندی دمپر ژنراتور.....                                                                                             | ۳۹   |
| شکل ۳۱-۱: نصب ژنراتور بر روی فندانسیون انعطاف‌پذیر H شکل.....                                                                    | ۳۹   |
| شکل ۳۲-۱: ساختار مکانیکی نگهدارنده سیم‌پیچی انتهایی.....                                                                         | ۴۱   |
| شکل ۳۳-۱: روتور ژنراتور در دستگاه شیارزن.....                                                                                    | ۴۱   |
| شکل ۳۴-۱: رابطه راکتانس‌های ژنراتور با درصد ولتاژ اولیه ژنراتور.....                                                             | ۴۲   |

- شکل ۱-۳۵: ساختار ژنراتور ۸۸۸۰ مگاوات آمپری اتصال کوتاه شرکت Toshiba ..... ۴۳
- شکل ۱-۳۵: سازه نگهدارنده سیم‌پیچی انتهایی ..... ۴۵
- شکل ۱-۳۵: تغییرات راکتانس‌های گذرا و ثابت‌های زمانی در ولتاژهای پایین ژنراتور ..... ۴۵
- شکل ۱-۳۵: ژنراتورهای اتصال کوتاه شرکت Toshiba، ۱۶۰۳ مگاوات آمپر سمت چپ، ۸۸۸۰ مگاوات آمپر سمت راست ..... ۴۵
- شکل ۱-۲: تصاویری از فعالیت‌های ساخت ژنراتور در شرکت توربوژنراتور شاهرود ..... ۴۸
- شکل ۲-۲: تصاویری از فعالیت‌های تعمیر و ساخت ژنراتور در شرکت فن‌ژنراتور ..... ۵۰
- شکل ۲-۳: تصاویری از ساخت تعمیرات روتور در کارگاه شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران ..... ۵۱
- شکل ۲-۴: تصویری از کارگاه پارس ژنراتور مینا ..... ۵۳
- شکل ۲-۵: تصویر درایو فشارضعیف و درایو ماژولار فشار متوسط ساخت شرکت اطمینان‌بخش ..... ۵۵
- شکل ۲-۶: تصویر سیستم تحریک ۷۵ کیلوواتی ۴۰۰ آمپری ساخت شرکت اطمینان‌بخش ..... ۵۶
- شکل ۲-۷: درایو ۶ کیلووات ۲۵۰-۴۰۰ کیلووات تولیدی شرکت پرتو صنعت ..... ۵۷
- شکل ۲-۸: درایو فشار متوسط تولیدی جهاد دانشگاهی علم و صنعت ..... ۵۸
- شکل ۲-۹: تصاویری از کارخانه شرکت ایران ترانسفو ..... ۶۰
- شکل ۲-۱۰: تصاویری از خط تولید شرکت آریا ترانسفو ..... ۶۱
- شکل ۳-۱: ژنراتور ۴۴ مگاوات آمپری ساخت شرکت مارلی ..... ۶۸
- شکل ۳-۲: ژنراتور ۴۴ مگاوات آمپری ساخت شرکت آنسالدو ..... ۶۹
- شکل ۳-۳: نقشه سیم‌پیچی استاتور ژنراتورهای مارلی (الف) و آنسالدو (ب) ..... ۶۹
- شکل ۳-۴: عملیات بازکردن براکت‌های جلو و عقب ژنراتور مارلی واحد ۲۶ جهت بررسی داخل آن ..... ۷۱
- شکل ۳-۵: فضای داخل استاتور ..... ۷۲
- شکل ۳-۶: اورهنگ سیم‌پیچی استاتور در سمت توربین ..... ۷۲
- شکل ۳-۷: اورهنگ سیم‌پیچی استاتور در سمت سربندی (کلکتور) ..... ۷۲
- شکل ۳-۸: تصاویر نگهدارنده‌های اورهنگ سیم‌پیچی استاتور (الف) تا (ج) نگهدارنده‌های سربندی کلاف‌ها (د) و (و) نگهدارنده‌های کلاف‌ها ..... ۷۳
- شکل ۳-۹: گوه شیارهای استاتور ..... ۷۴
- شکل ۳-۱۰: تصویر روتور بدون رینگ نگهدارنده (الف) و (ب) اورهنگ روتور (ج) گوه شیار روتور ..... ۷۴
- شکل ۳-۱۱: نقشه سیم‌پیچی روتور (الف) و یک فاز استاتور (ب) ..... ۷۴
- شکل ۳-۱۲: ولتاژ و جریان نامی هر پیچک قطب بدون تغییر تعداد دور سیم‌پیچی (۳ دور) ..... ۷۵
- شکل ۳-۱۳: ترکیب ولتاژ و جریان نامی با قابلیت دستیابی در خروجی ژنراتور بدون تغییر تعداد دور سیم‌پیچی (۳ دور) ..... ۷۵
- شکل ۳-۱۴: ولتاژ و جریان نامی هر پیچک قطب با تغییر تعداد دور سیم‌پیچی (۱ دور) ..... ۷۶
- شکل ۳-۱۵: ترکیب ولتاژ و جریان نامی با قابلیت دستیابی در خروجی ژنراتور با تغییر تعداد دور سیم‌پیچی (۱ دور) ..... ۷۶
- شکل ۴-۱: شماتیک سیستم ژنراتور اتصال کوتاه ..... ۸۱
- شکل ۴-۲: مفهوم شار مفید و شار نشتی در یک سیم‌پیچی حامل جریان ..... ۸۲
- شکل ۴-۳: وضعیت عبور شار از روتور ماشین سنکرون در سه وضعیت تندگذر، گذرا و حالت دائم ..... ۸۳

|                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| شکل ۴-۴: مدارهای معادل اتصال کوتاه ژنراتور سنکرون؛ الف) مدار معادل حالت دائم ژنراتور ب) مدار معادل گذرای ژنراتور ج) مدار معادل تندگذر ژنراتور..... | ۸۳  |
| شکل ۵-۴: نقشه ابعادی روتور و استاتور ژنراتور مارلی.....                                                                                            | ۸۴  |
| شکل ۶-۴: نقشه ابعادی سطح مقطع شیارهای الف) روتور و ب) استاتور.....                                                                                 | ۸۴  |
| شکل ۷-۴: تصویر مشخصه اشباع ژنراتور مارلی.....                                                                                                      | ۸۵  |
| شکل ۸-۴: شار نشتی شیار.....                                                                                                                        | ۸۵  |
| شکل ۹-۴: شار نشتی اتصالات پیشانی در ماشین سنکرون.....                                                                                              | ۸۶  |
| شکل ۱۰-۴: نشت زیگزاگ در ماشین سنکرون.....                                                                                                          | ۸۶  |
| شکل ۱۱-۴: نشت نوک دندانه در ماشین سنکرون.....                                                                                                      | ۸۷  |
| شکل ۱۲-۴: نمایش شارهای نشتی شیار استاتور، تحریک و دمپر در ماشین سنکرون.....                                                                        | ۸۷  |
| شکل ۱۳-۴: بارگذاری مغناطیسی ژنراتور مارلی در محیط نرم‌افزار Maxwell.....                                                                           | ۸۹  |
| شکل ۱۴-۴: سیستم ژنراتور اتصال کوتاه شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار Matlab/Simulink.....                                                                | ۸۹  |
| شکل ۱۵-۴: شکل موج ولتاژ و جریان‌های اتصال کوتاه سه‌فاز در خروجی ژنراتور.....                                                                       | ۹۰  |
| شکل ۱۶-۴: شکل موج لحظه‌ای، DC و مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه فاز A.....                                                                            | ۹۱  |
| شکل ۱۷-۴: شکل موج لحظه‌ای، DC و مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه فاز B.....                                                                            | ۹۱  |
| شکل ۱۸-۴: شکل موج لحظه‌ای، DC و مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه فاز C.....                                                                            | ۹۲  |
| شکل ۱۹-۴: شکل موج ولتاژ و جریان تحریک.....                                                                                                         | ۹۳  |
| شکل ۲۰-۴: تغییرات سرعت ژنراتور پس از اعمال اتصال کوتاه.....                                                                                        | ۹۴  |
| شکل ۲۱-۴: شمای کلی یک فلاپویل.....                                                                                                                 | ۹۴  |
| شکل ۲۲-۴: توزیع شار مغناطیسی درون یک شیار با سیم‌پیچی دولایه الف) جریان‌ها غیرهم‌جهت ب) جریان‌ها هم‌جهت.....                                       | ۹۷  |
| شکل ۲۳-۴: نمایش شیار یک ماشین با بی‌نهایت هادی با استفاده از تئوری تصویر.....                                                                      | ۹۷  |
| شکل ۲۴-۴: مسیر تقریبی شار مغناطیسی در قسمت انتهایی سیم‌پیچی ژنراتور.....                                                                           | ۹۸  |
| شکل ۲۵-۴: نیروی وارده بر قسمت انتهایی سیم‌پیچی ژنراتور.....                                                                                        | ۹۸  |
| شکل ۱-۵: زمان‌بندی اجرای طرح.....                                                                                                                  | ۱۱۱ |

## فهرست جدول‌ها

| عنوان                                                                  | صفحه |
|------------------------------------------------------------------------|------|
| جدول ۱-۱: مقایسه پارامترهای یک ژنراتور متعارف و یک ژنراتور اتصال کوتاه | ۴۲   |
| جدول ۱-۳: مشخصات فنی ژنراتور مارلی واحد ۲۶ نیروگاه ری                  | ۷۰   |
| جدول ۱-۴: مقادیر تقریبی پارامترهای دینامیکی ژنراتور مارلی              | ۸۸   |
| جدول ۲-۴: مقادیر استاندارد ژنراتور اتصال کوتاه جهت مطالعه شبیه‌سازی    | ۹۰   |
| جدول ۳-۴: پارامترهای محاسبه مشخصات فلاپویل                             | ۹۵   |
| جدول ۴-۴: مشخصات فنی مواد بررسی شده برای ساخت فلاپویل                  | ۹۵   |
| جدول ۵-۴: نتایج حاصل از محاسبات مشخصات فنی فلاپویل                     | ۹۵   |
| جدول ۱-۵: مشخصات نهایی ژنراتور اتصال کوتاه پیشنهادی                    | ۱۰۳  |
| جدول ۲-۵: بودجه تأمین ژنراتور سنکرون اتصال کوتاه                       | ۱۰۵  |
| جدول ۳-۵: بودجه تأمین سیستم تحریک ژنراتور اتصال کوتاه                  | ۱۰۶  |
| جدول ۴-۵: بودجه تأمین سیستم راه‌انداز ژنراتور اتصال کوتاه              | ۱۰۶  |
| جدول ۵-۵: بودجه تأمین سیستم فلاپویل                                    | ۱۰۷  |
| جدول ۶-۵: بودجه تأمین محفظه، درپوش و ملزومات نصب بر روی فندانیون       | ۱۰۷  |
| جدول ۷-۵: بودجه تأمین سیستم بیرینگ پدستال                              | ۱۰۸  |
| جدول ۸-۵: بودجه تأمین ترانسفورماتور اتصال کوتاه خروجی ژنراتور          | ۱۰۸  |
| جدول ۹-۵: بودجه تأمین سیستم‌های جانبی                                  | ۱۰۹  |
| جدول ۱۰-۵: بودجه تأمین سیستم کنترل، مانیتورینگ و حفاظت                 | ۱۰۹  |
| جدول ۱۱-۵: بودجه طراحی، اجرا و بهره‌برداری سیستم تست                   | ۱۱۰  |
| جدول ۱۲-۵: بودجه کلی لازم برای تأمین سیستم تست ژنراتور اتصال کوتاه     | ۱۱۱  |
| جدول ۱-۶: مشخصات نهایی ژنراتور اتصال کوتاه پیشنهادی                    | ۱۱۵  |
| جدول ۲-۶: بودجه کلی لازم برای تأمین سیستم تست ژنراتور اتصال کوتاه      | ۱۱۶  |



## مقدمه

راه‌اندازی سیستم ژنراتور اتصال کوتاه جهت تست تجهیزات قدرت، نیاز به یک مرحله مطالعه امکان‌سنجیو بررسی چالش‌های مطرح و توانمندی ساخت آن در کشور دارد. با توجه به هدف بررسی امکان ساخت ژنراتور اتصال کوتاه با ژنراتور مستعمل، لازم است که ضمن بررسی و انتخاب چنین ژنراتوری، جهت امکان دستیابی به پارامترهای استاندارد اتصال کوتاه، یک مرحله مطالعه شبیه‌سازی در حد پارامترهای تخمین‌زدنی (مرحله تحلیل تفصیلی در مرحله بعد انجام می‌شود) انجام شود تا پتانسیل اتصال کوتاه ژنراتور مشخص شود. سپس در مرحله بعد در صورت تأییدشدن ژنراتور، فرآیندهای اصلاح و بهبود پارامترهای ژنراتور استخراج شود. در نهایت پس از شناسایی همه تجهیزات سیستم و لیست اقدامات لازم، برنامه عملیاتی اجرای این طرح با تخمین قیمت و زمان ارائه می‌شود تا ساختار اجرا و پیاده‌سازی ژنراتور اتصال کوتاه استخراج شود. پروژه پیش رو با همین منظور و در ۵ فصل انجام شده است که در فصل اول فعالیت‌ها و مطالعات انجام‌شده در زمینه ژنراتور اتصال کوتاه بررسی و جمع‌بندی شده است. سپس در فصل دوم مطابق با تجهیزات شناسایی‌شده در فصل اول در سیستم ژنراتور اتصال کوتاه، تأمین‌کنندگان این تجهیزات و توانمندی هریک ارائه شده است. در فصل سوم پروژه نیز منابع تأمین ژنراتورهای مستعمل بررسی شده و در نهایت منابع قابل ورود جهت دریافت چنین ژنراتوری شناسایی شده است که در فصل چهارم، پس از انتخاب ژنراتور، پارامترهای دینامیکی ژنراتور تخمین و محاسبه شده و مدار سیستم ژنراتور اتصال کوتاه، شبیه‌سازی شده است تا امکان دستیابی به پارامترهای استاندارد اتصال کوتاه بررسی شود. در نهایت در فصل پنجم پروژه، برنامه عملیاتی شامل ریزپروژه‌های انجام‌پذیر به‌همراه تخمین هزینه و زمان اجرای طرح ارائه شده است.

## **فصل اول**

**مرور و بررسی و تجميع فعاليت‌هاى قبلى انجام‌شده در پژوهشگاه نیرو،  
شرکت فآتل و ديگر شرکت‌هاى فعال در اين حوزه و بررسی انواع  
ساختارهاى ممکن سيستم ژنراتور اتصال کوتاه، تحليل فنى و اقتصادى  
پيگربندى و تعيين ساختار نهايى**

## ۱-۱- مقدمه

ژنراتور اتصال کوتاه نسبت به ژنراتورهای معمولی، چالش‌های ساخت بیشتری دارد و بخصوص با توجه به عمومی‌نبودن سفارش ساخت چنین ژنراتوری، فناوری طراحی و ساخت آن در اختیار کشورهای معدودی است. همچنین مدار سیستم ژنراتور اتصال کوتاه می‌تواند ساختارهای مختلفی داشته باشد که هریک دارای معایب و مزایایی هستند. در زمینه طراحی و ساخت ژنراتور اتصال کوتاه و سیستم جانبی آن، مطالعاتی در پژوهشگاه نیرو، برخی از شرکت‌های بین‌المللی و همچنین در شرکت آزمایشگاه‌های بین‌المللی قدرت فاتل انجام شده است که در فصل پیش رو بررسی می‌شود. در این مرحله هدف بررسی و پوشش همه چالش‌های مطرح در این زمینه از جمله ساختارهای کاربردی، راهکارهای طراحی و ساخت ژنراتور و همچنین کلیات تست اتصال کوتاه بررسی می‌شود. در پژوهشگاه نیرو در سال‌های گذشته، دو پروژه "تحقیق در زمینه ساختمان و عملکرد ژنراتورهای اتصال کوتاه" و "طراحی و ساخت یک نمونه ژنراتور اتصال کوتاه فشار ضعیف" در خصوص ژنراتورهای اتصال کوتاه انجام شده است که در این فصل و همین طور فصل‌های آتی بررسی شده است. همچنین در این فصل به مطالعه شرکت فاتل در خصوص طراحی، شبیه‌سازی و مشخصات فنی ژنراتورهای اتصال کوتاه و سایر مستندات ارائه شده توسط این شرکت پرداخته شده است. علاوه بر این موارد، چندین مطالعه بین‌المللی و گزارش فنی نیز در خصوص آزمایشگاه‌های ژنراتور اتصال کوتاه و نحوه اجرای آنها بررسی شده است.

## ۱-۲- روش‌های تولید جریان اتصال کوتاه

برای تولید مقدار زیادی جریان می‌توان از شبکه سراسری، مدارهای RLC سری یا موازی متصل به شبکه و یا ژنراتور اتصال کوتاه و تست سینتتیک استفاده کرد. در ادامه به تشریح هریک از این روش‌ها پرداخته می‌شود.

### ۱-۲-۱- استفاده از شبکه سراسری

برای انجام تست از طریق شبکه سراسری لازم است اثرات این جریان از لحاظ سطح زیاد جریان، زمان کوتاه عبور جریان و تکرار عمل اتصال کوتاه بر شبکه بررسی شود. این جریان زیاد را نمی‌توان از شبکه به‌طور مستقیم دریافت کرد بلکه باید یک ترانسفورماتور کاهنده بعد از شبکه در شرایطی که سطح ولتاژ اولیه زیاد باشد، جریان و ولتاژ متناسب با استاندارد را تأمین کند.

این نوع بارگذاری بر خطوط سراسری به مفهوم گذاشتن و برداشتن بار راکتیو با مقدار بالا در مدت زمان کوتاه می‌باشد که موجب بروز اثر منفی بر روی خطوط و حتی بر بارهای مجاور می‌گردد و افت ولتاژ مکرر و حالت‌های گذرا رخ خواهد داد که ناپایداری گذرای دینامیکی و اثرات مخرب بر مولدهای شبکه و تلفات سنگینی را به دنبال خواهد داشت [۱].

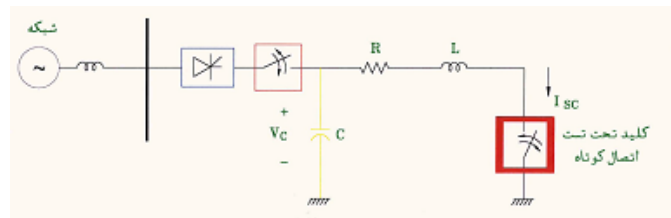
## ۱-۲-۲- استفاده از مدارهای RLC متصل به شبکه

می‌توان با ذخیره‌کردن انرژی در خازن و سری یا موازی کردن آن با سلف و مقاومت، جریان سینوسی با درصد میرایی که وابسته به مقدار مقاومت‌های مدار است، ایجاد کرد [۱].

مقدار دامنه جریان و فرکانس آن طبق استاندارد مشخص شده است که به وسیله آن محدودیت‌های مربوط به ظرفیت خازنی و ولتاژ ذخیره‌شده در خازن و همچنین مقدار راکتانس سلف حاصل می‌شود. در ادامه به جزئیات این روش‌ها و روابط مربوط پرداخته می‌شود:

الف) مدار RLC سری

مدار مدنظر مطابق شکل ۱-۱ است:



شکل ۱-۱: مدار RLC سری [۱]

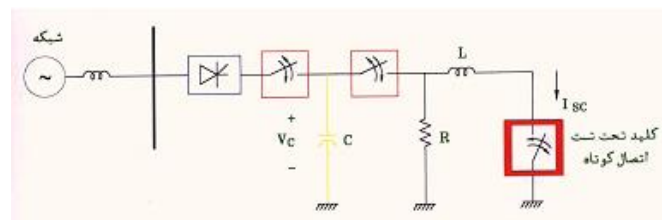
در مدار فوق معادلات زیر حاکم است:

$$\frac{d^2 V_c}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dV_c}{dt} + \frac{1}{LC} V_c = 0 \quad 1-1$$

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad 2-1$$

ب) مدار RLC موازی

مدار مربوطه مطابق شکل ۲-۱ می‌باشد:



شکل ۲-۱: مدار RLC موازی [۱]

در مدار فوق روابط زیر حاکم است:

$$\frac{di_L^2}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{di_L}{dt} + \frac{1}{LC} i_L = 0 \quad 3-1$$

$$i_{sc}(t) = Ae^{(-\alpha I \sqrt{W_0^2 - \alpha^2})} = Ae^{-\alpha t} [\cos(\omega t + \phi)] \quad 4-1$$

$$\alpha \ll 1 \quad \omega_0 = \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

در مدار موازی مقدار مقاومت بسیار زیاد است که می‌توان آن را مقاومت دی‌الکتریک فرض کرد. برای افزایش میرایی می‌توان یک مقاومت با آن موازی کرد که مقدار آن باید به گونه‌ای انتخاب شود که در ۵ سیکل اول برای انجام یک تست، میرایی ناچیز چشم‌پوشیدنی باشد. از آنجا که فرکانس تشدید با مشخصه سلف و خازن مرتبط است و  $\omega$  فرکانس جریان سینوسی اتصال کوتاه است، لذا مقادیر سلف و خازن را می‌توان با لحاظ تلورانس‌هایی تعیین نمود.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 2\pi f \quad 5-1$$

برای داشتن جریان اتصال کوتاه مدنظر، باید انرژی لازم را قبل از اتصال کوتاه ذخیره کرد تا در زمان اتصال کوتاه این انرژی برای ایجاد جریان با دامنه مطابق استاندارد ایجاد گردد.

$$E_L = \frac{1}{2} Li^2 \quad 6-1$$

$$E_c = \frac{1}{2} CV_c^2 \quad 7-1$$

از آنجا که انرژی خازن به عنوان تنها ورودی مدار RLC که قبل از اتصال کوتاه شارژ شده است برابر با انرژی‌ای که در حالت اتصال کوتاه بین خازن و سلف تبادل می‌شود، است بنابراین:

$$\left. \begin{array}{l} E_L = E_c \\ q_c = V_c C \end{array} \right\} \Rightarrow q = \frac{i_{sc}}{\omega} \quad 8-1$$

در این روش لازم است که از قبل کلیدهای فرمان خازن را در سقف ولتاژ لازم شارژ کرده و سپس، منبع تغذیه DC را با کلید فرمان از خازن جدا و سپس با اتصال کلید مدنظر برای آزمایش، مدار RL را به خازن متصل کرد (حالت سری) که باعث جاری شدن جریان خواهد شد [۱].

مقدار مقاومت، تعیین کننده میرایی و افت دامنه جریان نسبت به سیکل اول است که مدت زمان ایجاد جریان اتصال کوتاه توسط انرژی ذخیره شده را مشخص می‌کند.

### ۱-۲-۳- استفاده از ژنراتور اتصال کوتاه

با توجه به ممکن نبودن تولید جریان زیاد با استفاده از شبکه و مدارهای ذخیره ساز RLC می‌توان از منابع دیگر تولید انرژی نظیر ژنراتور سنکرون استفاده کرد. اما این مولدها باید دارای ویژگی‌های خاصی باشند تا بتوان کاربری مذکور را از آن گرفت که در ادامه به چند نمونه مهم اشاره می‌شود [۱].

- تجهیز باید تاثیرگذاری مستقیم کمتری بر شبکه داشته باشد.
- توانایی ذخیره انرژی لازم برای یک زنجیره تست یا یک تست اتصال کوتاه را داشته باشد.
- قابلیت تولید توان راکتیو بالایی را داشته باشد، درحالی که لزومی به داشتن دامنه توان اکتیو بالا نیست.
- توانایی تأمین جریان در سطح زیاد را داشته باشد.
- توانایی تثبیت دامنه جریان را دارا باشد.
- شکل موج سینوسی ولتاژ با ضریب اعوجاج هارمونیک پایینی داشته باشد (کمتر از ۵٪).
- جریان زیاد بر عمر سیستم اثر نامطلوب نداشته یا به عبارتی از استقامت بالای الکتریکی، حرارتی و مکانیکی برخوردار باشد و به‌ویژه قابلیت تحمل نیروهای الکترومغناطیسی ناشی از اتصال کوتاه را داشته باشد.

واضح است که ژنراتور سنکرون معمولی قابلیت ارائه همه مشخصات مذکور را ندارد، اما با اعمال تغییرات اساسی در آن می‌توان قابلیت‌های فوق را برای ژنراتور ایجاد کرد.

مطابق استاندارد، رژیم کاری ژنراتور شامل یک سری تست اتصال کوتاه در یک زنجیره تست بوده که پس از یک وقفه مشخص، زنجیره بعدی تکرار می‌شود. بنابراین ژنراتور باید قادر به تأمین جریان راکتیو در یکی از حالت‌های زیر باشد.

- تست یک اتصال کوتاه منفرد

- زنجیره‌ای از تست‌های اتصال کوتاه

بنابراین بر اساس یکی از این دو عملکرد ژنراتور باید ظرفیت ذخیره انرژی لازم را داشته باشد تا به عملکرد مناسب مطابق استاندارد دست یابد و همچنین از لحاظ مدت زمان لازم ذخیره انرژی لازم، قابلیت‌های ضروری را برای ذخیره‌سازی در حداقل زمان مابین دو تست پیاپی از یک زنجیره داشته باشد. بنابراین نکته ذیل حائز اهمیت است:

- ژنراتور انرژی لازم را فقط برای یک تست اتصال کوتاه ذخیره کند و در زمان کمتر از ۳ دقیقه در یک زنجیره بین هر تست متوالی افت سرعت ناشی از تلفات مسی و آهنی و نیز تلفات مکانیکی، انرژی لازم را برای تست بعدی مهیا نماید، به‌طوری که طی ۰/۱ ثانیه پس از اتصال کوتاه، سرعت ژنراتور یا فرکانس ولتاژ ترمینال خروجی ژنراتور، بیشتر از ۵ درصد کاهش نیابد (شرط اصلی مربوط به حالت اول).

### ۱-۳- تجهیزات لازم برای انجام تست با استفاده از ژنراتور اتصال کوتاه

برای انجام تست اتصال کوتاه به تجهیزات مختلفی اعم از ژنراتور اتصال کوتاه، سیستم تحریک، موتور یا درایور، ترانسفورماتور و غیره نیاز است که در ادامه به تشریح کارکرد هریک از این تجهیزات و لزوم استفاده از آنها پرداخته

خواهد شد.

### ۱- ۳- ۱- ژنراتور اتصال کوتاه و سیستم راه‌انداز آن

ژنراتورهای اتصال وظیفه تأمین توان را برای مدارشکن‌های تحت تست بر عهده دارند. این ژنراتورها باید توانایی تحمل توان راکتیو با شدت زیاد در مدت زمانی کوتاه را داشته باشند. به‌همین دلیل، تفاوت‌هایی با ژنراتورهای عادی دارند. این ژنراتورها باید راکتانس کمی داشته باشند تا حداکثر خروجی اتصال کوتاه را فراهم کنند. ژنراتور اتصال کوتاه در واقع یک آلترنیتور سه‌فاز است. هر سیم‌پیچ آن از دو یا چند بخش ساخته شده که به‌صورت سری، موازی، ستاره و مثلث قابلیت اتصال دارند تا قادر به تأمین ولتاژهای متفاوتی باشند [۲].

این ژنراتور عموماً از طریق یک موتور القایی سه‌فاز و از طریق یک شفت ارتجاعی یا یک درایور مناسب و یا با استفاده از مبدل فرکانس استاتیکی (SFC) درایو می‌شوند. این ژنراتورها اغلب روتور سنگینی دارند و یا از یک فلاپیول خارجی به‌صورت کوپل شده استفاده می‌شود تا انرژی جنبشی لازم در طول تست را فراهم کند و همچنین افت سرعت مجموعه را کاهش دهد.

بر مبنای محدودیت‌های تحمیل‌شده مربوط به الگوی قطع-وصل کلید و دامنه جریان‌های اتصال کوتاه، مجموعه موتور-ژنراتور باید امکان ذخیره انرژی را حداقل برای چند رژیم اتصال کوتاه دارا باشد، به‌طوری که تغییرات سرعت ناشی از تلفات از ۱۰ درصد تجاوز ننماید و بنابراین ساختار ژنراتور معمولاً از نوع قطب برجسته انتخاب شده و یا از فلاپیول استفاده می‌شود تا میزان انرژی جنبشی ذخیره‌شده در روی روتور افزایش یابد. از سوی دیگر برای تولید جریان اتصال کوتاه با دامنه مدنظر مقادیر راکتانس‌های نشتی سیستم باید حداقل مقدار ممکن باشد و بدین منظور عمق شیارهای استاتور کاهش یافته و قطر میله‌های دمپر افزایش می‌یابد، بدین طریق مقدار مقاومت دمپرها نیز کاهش یافته که منجر به افزایش ثابت‌های زمانی ماشین می‌شود [۲].

سیستم تحریک با ولتاژ و جریان سقف بسیار بالا از نیازمندی‌های اصلی بوده که باید دارای سرعت پاسخ زیادی نیز باشد تا امکان تولید و کنترل جریان‌های اتصال کوتاه با دامنه مدنظر و در زمان مقتضی میسر شود. همچنین جریان‌های اتصال کوتاه مدنظر موجب تولید نیروها و گشتاورهای ضربه‌ای با دامنه بسیار زیاد می‌گردد که در این راستا لازم است بخش‌های حساس نظیر انتهای کلاف‌ها و گوه‌ها تقویت شده و برای کاهش انتقال لرزش به فونداسیون، هسته به‌صورت ارتجاعی در داخل بدنه قرار گیرد و در نهایت فونداسیون قابلیت تحمل و دفع ارتعاشات پیاپی را نیز داشته باشد.

با توجه به الزامات و محدودیت‌ها، سیستم ژنراتور اتصال کوتاه پیشنهادی از یک واحد ژنراتور اتصال کوتاه، یک واحد موتور راه‌انداز، یک واحد اینورتر شش، دوازده یا هجده پالسه، یک واحد ژنراتور سنکرون، یک واحد موتور القایی و سیستم کنترل و مانیتورینگ تشکیل می‌گردد که البته برای تکمیل سیستم و تحقق عملکرد آن به تجهیزات جانبی دیگری نیز نیاز است. برای انجام آزمایش در ابتدا موتور راه‌انداز ژنراتور اتصال کوتاه راه‌اندازی شده و سرعت ژنراتور را به سرعت نامی می‌رساند، به موازات آن موتور راه‌انداز متصل به ژنراتور تغذیه‌کننده‌ی تحریک

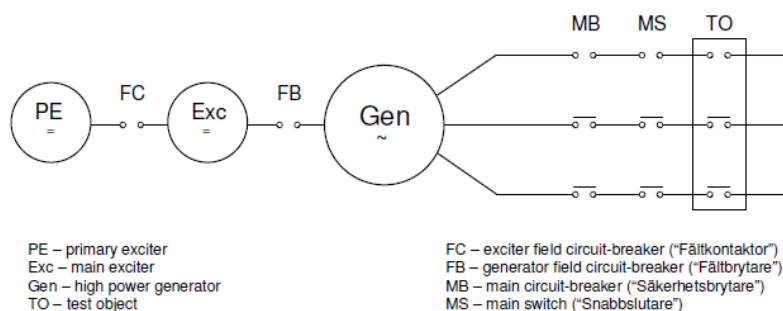
راه‌اندازی شده و ژنراتور را به سرعت نامی می‌رساند، سپس ولتاژ تحریک ژنراتور اخیر اعمال گردیده به‌طوری که در ترمینال آن ولتاژ نامی تولید گردد. در ادامه زاویه آتش کلیدهای نیمه‌هادی اینورتر به‌گونه‌ای تنظیم می‌گردد که ولتاژ ترمینال ژنراتور اتصال کوتاه در شرایط مدار باز برابر ولتاژ نامی شود. اکنون سیستم در حال آماده‌باش برای شروع آزمایش‌های اتصال کوتاه است. در حدود چند میلی‌ثانیه قبل از صدور فرمان اتصال کوتاه کلید تحت آزمایش، فرمان آتش کلیدهای نیمه‌هادی اینورتر صادر می‌گردد به‌طوری که ولتاژ خروجی تحریک را به حداکثر مقدار افزایش دهد (ضربه تحریک)، سپس کلید تحت آزمایش اتصال کوتاه شده و پس از گذشت ۱۰ نیم‌سیکل فرمان قطع آن صادر می‌گردد و همزمان و یا حتی چند میلی‌ثانیه قبل از صدور فرمان قطع، زاویه آتش کلیدهای نیمه‌هادی به مقدار متناظر با ولتاژ بی‌باری نامی و یا ولتاژ منفی کاهش می‌یابد. در حین اتصال کوتاه به‌واسطه تلفات ژنراتور سرعت محور کاهش می‌یابد و در صورتی که کاهش سرعت از ۱۰ درصد تجاوز نماید به فلاپویل نیاز است و در این حال لازم است بعد از هر بار اتصال کوتاه (و یا چند بار اتصال کوتاه بسته به میزان افت سرعت) در فرصت زمانی مابین اتصال کوتاه‌ها، موتور راه‌انداز به شبکه متصل شده و افت سرعت را جبران نماید. در ارتباط با سیستم تغذیه تحریک نیز همین نکته وجود داشته و لازم است که افت زیاد در سرعت موتور-ژنراتور تغذیه تحریک جبران گردد [۱].

### ۱-۳-۲- سیستم تحریک

یکی از سیستم‌های تحریک که برای مقابله با اثر مغناطیس‌زدایی واکنش آرمیچر در ژنراتور اتصال کوتاه استفاده می‌شود، تحریک Impulse یا Super است. از آنجایی که جریان‌های اتصال کوتاه ضریب توان پس‌فاز دارند، اثر مغناطیس‌زدایی ایجاد می‌کنند و میدان کلی و نیروی محرکه را کاهش می‌دهند. در نتیجه، ولتاژ ریکآوری از میزان ولتاژ پیش از اتصال کوتاه کمتر خواهد شد. این اثر با استفاده از یک سیستم تحریک Impulse جبران‌پذیر است. مجموعه مبدل به‌کاررفته با یک فلاپویل بزرگ همراه است. موتور، پیش از انجام تحریک از تغذیه قطع است. جریان میدان در مدت کوتاهی گاهی تا حدود ۱۰ برابر مقدار عادی خود در لحظه اتصال کوتاه افزایش پیدا می‌کند [۲].

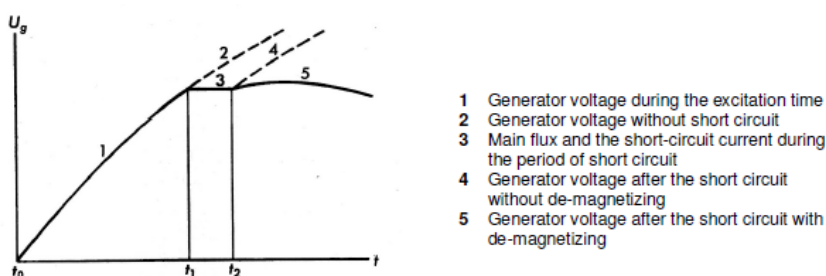
در صورتی که لازم باشد جریان را در طول اعمال اتصال کوتاه ثابت نگه داشته شود، از این نوع سیستم تحریک استفاده می‌شود، چراکه در غیر این صورت، ژنراتور به‌دلیل تأثیر راکتانس آرمیچر خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهد و بنابراین باعث افت جریان اتصال کوتاه خواهد شد. این Super Excitation بزرگ به‌کمک یک سیستم تحریک قدرتمند با قابلیت دستیابی است و با اتصال کوتاه‌کردن تعدادی مقاومت سری در مدار میدان و در لحظه‌ای که ژنراتور هم‌اتصال کوتاه شده است، به میدان ژنراتور اعمال می‌شود.

نوع دیگری از سیستم‌های تحریک کاربرد، Flying Excitation است. پیکربندی لازم جهت اجرای این نوع تحریک در شکل ۳-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۳: پیکربندی لازم جهت اجرای تحریک Flying [۲]

همچنین مطابق نمودار شکل ۱-۴، روند و زمان‌بندی اجرای این نوع تحریک تشریح می‌شود.



شکل ۱-۴: زمان‌بندی و روند اجرای تحریک Flying [۲]

در ابتدا، قبل از لحظه  $t_0$ ، تحریک اصلی (PE)، تا مقدار ولتاژ خاصی که از قبل مشخص شده تحریک می‌شود، اما به میدان ژنراتور متصل نیست. در لحظه  $t_0$ ، میدان ژنراتور متصل شده و ولتاژ آن به‌صورت نمایی شروع به افزایش می‌کند. شدت افزایش ولتاژ روی منحنی به تنظیمات ولتاژ تحریک بستگی دارد.

در لحظه  $t_1$ ، با فرض اینکه ولتاژ ژنراتور به مقدار مطلوب برای انجام تست رسیده است، در این لحظه، اتصال کوتاه اعمال می‌شود (بازه‌ی زمانی  $t_0$  تا  $t_1$  که معمولاً بین ۰/۵ تا ۱ ثانیه طول می‌کشد) و بعد از حدود ۰/۱ تا ۰/۲ ثانیه، اتصال کوتاه در لحظه  $t_2$  قطع می‌شود.

در بازه‌ی زمانی اعمال اتصال کوتاه، سیستم تحریک تلاش می‌کند که ولتاژ میدان اصلی ژنراتور را افزایش دهد و در همین حال، واکنش عکس‌العمل آرمیچر در تلاش است این ولتاژ را کاهش دهد.

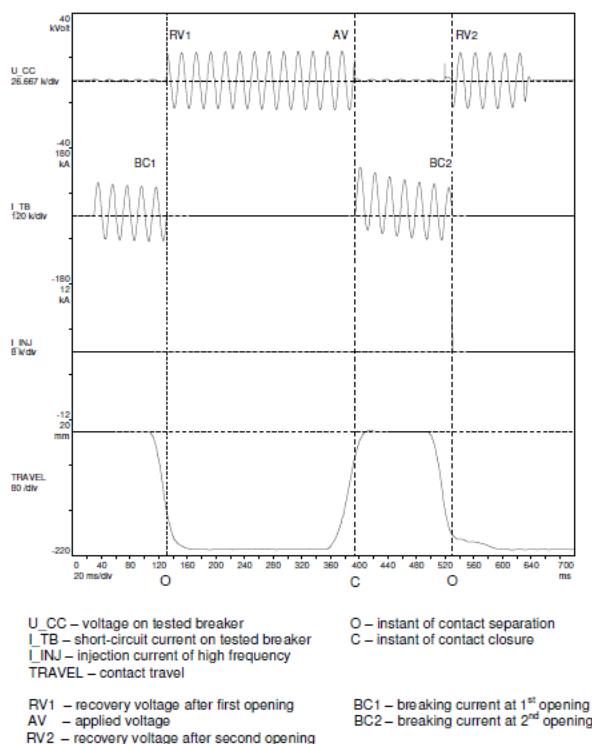
اگر سیستم درست طراحی شده باشد و درست کار کند، این نیروها با هم در موازنه هستند تا میدان اصلی در کل مدت زمان انجام تست اتصال کوتاه ثابت بماند. در این روش، جریان اتصال کوتاه نیز ثابت می‌ماند و ولتاژ ریکآوری، بلافاصله بعد از قطع اتصال کوتاه به همان ولتاژ قبل از اعمال اتصال کوتاه می‌رسد.

بعد از لحظه  $t_2$ ، ولتاژ ژنراتور یک بار دیگر تلاش می‌کند که به مقدار بی‌باری برسد، مگر اینکه اقدام خاصی انجام شود. در این صورت ولتاژ به مقادیر به‌شدت بالایی می‌رسد. دقیقاً قبل از این لحظه، میدان تحریک وارد عمل می‌شود؛ یعنی بعد از اینکه ولتاژ ژنراتور به‌شدت افت کرد، فقط کمی افزایش پیدا می‌کند. در اینجا پارامترهای حائز اهمیت و مدنظر، ولتاژ تحریک و زمان تحریک (بازه‌ی  $t_0$  تا  $t_1$ ) هستند.

هرچقدر ولتاژ تحریک بیشتر باشد، منحنی افزایش ولتاژ ژنراتور تندتر خواهد بود و برای رسیدن ژنراتور به یک ولتاژ خاص، به زمان تحریک کمتری نیاز است. تنظیمات انتخابی برای تحریک، توسط مقدار جریانی که مدنظر است، تعیین می‌شود.

تفاوت اصلی بین دو روش Flying Excitation و Super Excitation این است که با داشتن مقاومت‌های سری در میدان در حالت Super Excitation، می‌توان ژنراتور را پیش از شروع تست به ولتاژ مطلوب رساند، اما وقتی از روش Flying Excitation استفاده می‌شود، می‌توان از تلفات در ژنراتور و مقاومت‌های سری جلوگیری کرد.

در عمل، به‌خاطر وجود مدار دمپ‌کننده ژنراتور، شرایط کمی پیچیده‌تر می‌شود. با انجام هیچ اقدامی در میدان نمی‌توان حالت‌های گذرا را به‌طور کامل جبران کرد؛ یعنی جریان اتصال کوتاه در بازه‌ی اعمال را به‌صورت کامل نمی‌توان ثابت نگه داشت (در اولین بخش این بازه کاهش پیدا می‌کند). در صورتی که از یک سیستم Super Excitation بزرگ استفاده شود، مقدار خاصی جبران حاصل می‌شود (البته در صورتی که جریان در بخش آخر اعمال اتصال کوتاه مجبور به افزایش شود). بنابراین ولتاژ یک بار دیگر به‌مقدار پیش از قطع اتصال کوتاه خواهد رسید [۲].



شکل ۵-۱: نحوه تغییرات ولتاژ حاصل از بازوبست کلید [۲]

یک مثال از نحوه تغییرات ولتاژ حاصل از باز و بست کلید در شکل ۵-۱ آمده است.

### ۱- ۳- ۳- ژنراتور Pilot

این ژنراتور در واقع یک منبع سه‌فاز کوچک است که مستقیماً به شفت اصلی ژنراتور اتصال کوتاه متصل می‌شود. در طول تست اتصال کوتاه، تمام ولتاژهای موجود توسط AVR ثابت نگه داشته می‌شوند. این ولتاژ برای تأمین توان کنترلی Sequence timer، اسیلوگراف الکترومغناطیسی و سایر تجهیزات لازم است [۳].

### ۱- ۳- ۴- ترانسفورماتور اتصال کوتاه

در صورتی که ولتاژ تست با ولتاژ ژنراتور متفاوت باشد، از ترانسفورماتور استفاده می‌شود. معمولاً برای کم کردن ولتاژ ترانسفورماتور سه‌فاز و برای افزایش دادن ولتاژ ترانسفورماتورهای تک‌فاز مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ترانسفورماتورها طوری طراحی می‌شوند که توانایی مقاومت در برابر اتصال کوتاه‌های مکرر را داشته باشند. سیم‌پیچ‌های آنها نیز به‌منظور تنظیم ولتاژ به‌صورت سری یا موازی قابلیت اتصال دارند. راکتانس ناشی این ترانسفورماتورها باید کم باشد. سیم‌پیچ‌های این تجهیزات از نظر مکانیکی مستحکم هستند و عایق اضافی نیز دارند. برای تست‌های سه‌فاز، ترانسفورماتورها در سمت منبع به‌صورت مثلث متصل می‌شوند. چهار سیم‌پیچی هر فاز در سمت ثانویه به‌صورت ترکیبی از سری یا موازی و در صورت سه‌فاز بودن به‌صورت ستاره یا مثلث قابلیت اتصال دارند [۳].

### ۱- ۳- ۵- مقاومت و راکتور

از بانک‌های مقاومتی و راکتوری سه‌فاز به‌منظور کنترل کردن جریان استفاده می‌شود. همچنین از راکتورها برای تنظیم اندازه و از مقاومت‌ها برای کنترل نرخ نزول مؤلفه‌ی DC جریان استفاده می‌شود. ضریب توان اتصال کوتاه نیز با این روش کنترل‌پذیر است [۳].

### ۱- ۳- ۶- مدارشکن Master

این مدارشکن معمولاً از نوع air-blast است و نسبت به مدارشکن‌های تحت تست ظرفیت بیشتری دارد. از این مدارشکن اغلب به‌عنوان مدارشکن پشتیبان استفاده می‌شود. در صورت خرابی مدارشکن تحت تست، این مدارشکن باز خواهد شد. از دیگر کاربردهای این مدارشکن، جدا کردن تجهیز تحت تست از منبع تغذیه بعد از انجام هر تست است. این مدارشکن باید قادر به تحمل کردن کل توان اتصال کوتاه در مدار تست باشد [۳].

### ۱- ۳- ۷- Make Switch

برای اطمینان از این که جریان اتصال کوتاه درست در لحظه مدنظر اعمال می‌شود، از این سوئیچ‌ها استفاده می‌شود. این سوئیچ‌ها با توجه به زمان بسته‌شدن و ظرفیتشان انتخاب می‌شوند. با این حال، ظرفیت قطع آنها اهمیتی ندارد، چراکه برای قطع مدار استفاده نمی‌شوند. در لحظه‌ی اتصال، مدارشکن پشتیبان و مدارشکن تحت تست بسته هستند. سرعت بسته‌شدن این سوئیچ‌ها آن قدر بالاست که پیش از آنکه جریان اتصال کوتاه به مقدار حداکثر خود برسد، کنتاکت‌ها کاملاً بسته می‌شوند [۳].

### ۱- ۳- ۸- خازن

از بانک‌های خازنی به دو منظور استفاده می‌شود: (الف) فراهم کردن جریان پیش‌فاز برای تست کردن عملکرد مدارشکن در شرایط قطع جریان‌های شارژینگ و (ب) کنترل کردن نرخ افزایش ولتاژ re-striking. در تست سینتیک و سایر تست‌های غیرمستقیم، خازن‌ها بخش حیاتی مدار تست هستند. بانک‌های خازنی تک‌فاز هستند و به صورت سری یا موازی قابلیت اتصال دارند [۳].

### ۱- ۳- ۹- سلول‌های تست

معمولاً سازه‌هایی از جنس RCC یا آجر مستحکم هستند. برای تسهیل تست مدارشکن‌های air-blast و مدارشکن‌های روغنی، به ترتیب هوای فشرده و سیستم تصفیه روغن به سلول تست داده می‌شود. برای تست کردن مدارشکن‌های LV، HV و EHV، سلول‌های تست جداگانه ساخته می‌شود. کابل‌های کنترلی و اندازه‌گیری در انتهای هر سلول تست قرار دارند [۳].

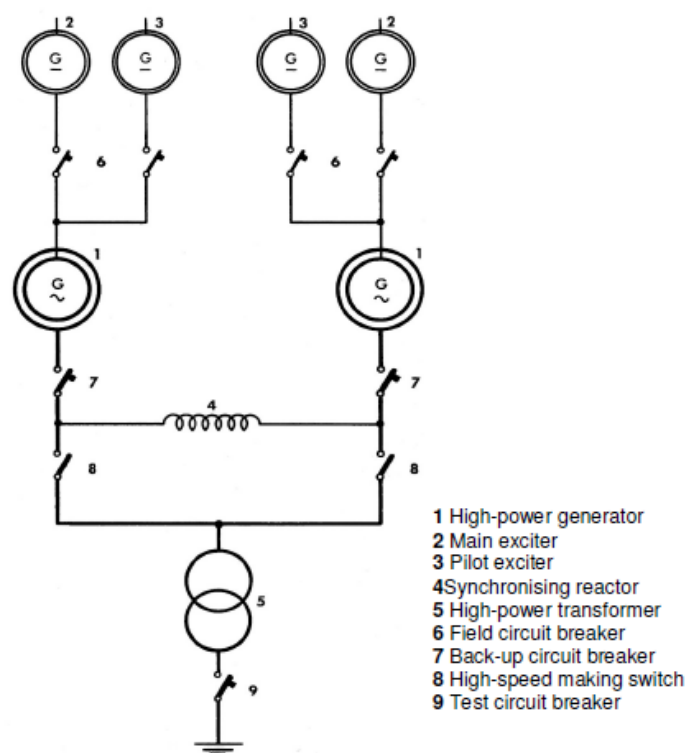
### ۱- ۳- ۱۰- اتاق کنترل

این اتاق معمولاً در فاصله‌ی ۲۰ متری سلول‌های تست ساخته می‌شود و مجهز به یک میز کنترلی برای کنترل از راه دور تحریک ژنراتورهای اتصال کوتاه و سایر تجهیزات است. اوسیلوگراف، پنل توزیع، اسیلوگراف الکترومغناطیسی، یک اسیلوسکوپ از نوع اشعه کاتدی، یک سوئیچ Sequence الکتریکی و یک سوئیچ Sequence الکترونیکی نیز در این اتاق وجود دارد [۳].

### ۱- ۴- موازی کردن ژنراتورهای اتصال کوتاه

به منظور تأمین جریان اتصال کوتاه لازم، می‌توان از دو ژنراتور به صورت موازی استفاده کرد. به دلیل سیستم تحریک انتخابی و همچنین به دلیل اینکه ماشین‌ها از نظر الکتریکی و مکانیکی مشابه هم نیستند، ممکن است این کار باعث ایجاد مشکلات خاصی شود [۲].

وقتی از تحریک Flying Excitation استفاده می‌شود، ژنراتورها برای بازه بسیار کوتاهی (در حدود ۱ ثانیه) تحریک می‌گردند. این زمان برای سنکرون کردن ژنراتورها کافی نیست (به دلیل جرم زیاد ژنراتورها). تحریک کردن ماشین‌ها با ولتاژ کامل قبل از شروع تست و سنکرون کردن آنها با این روش غیرممکن است که دلیل آن این مسئله است که این ژنراتورها طوری طراحی نشده‌اند که در بازه زمانی طولانی‌تری با ولتاژ کامل کار کنند و همچنین نمی‌توان از تحریک‌های مرسوم و متداول استفاده کرد، چون این کار باعث می‌شود امکان استفاده از سیستم تحریک Super Excitation وجود نداشته باشد. سیستم خاص شکل ۱-۶ برای سنکرون سازی و تحریک کاربردی است:



شکل ۱-۶: مدار ژنراتورهای اتصال کوتاه موازی [۲]

قبل از شروع تست، ژنراتورها توسط تحریک‌های پایلوت ۳ تحریک می‌شوند. این کار باعث می‌شود که ژنراتورها تا چند کیلوولت تحریک شوند. دو ژنراتور به صورت موازی دو طرف رآکتور سنکرون سازی ۴ متصل می‌شوند (اندازه‌ی آن ۲ اهم بر فاز است) و مدارشکن‌های پشتیبان ۷ بسته می‌شوند. توانی که در این حالت منتقل می‌شود برای سنکرون کردن ژنراتورها و سنکرون نگه‌داشتن آنها در چند درجه الکتریکی کافی است. درست پیش از شروع تست، تحریک‌های پایلوت قطع می‌شوند. در صورتی که از Flying Excitation استفاده شود، تحریک‌های اصلی ۲ بلافاصله بعد از قطع تحریک‌های پایلوت وارد مدار می‌شوند. در این فاصله، ماشین‌ها آن قدر زمان ندارند که از حالت سنکرون خارج شوند. از آنجایی که منحنی تحریک ماشین‌ها کمی با هم متفاوت است، در طول تحریک نمی‌توان از تولید جریان‌های equalizing جلوگیری کرد.

با انتخاب یک رآکتور با اهم نسبتاً بالا، محدود کردن این جریان‌ها تا حد معقولی ممکن می‌شود. تنظیمات مدارهای میدان باید به گونه‌ای باشند که در لحظه‌ای که تست توسط سوئیچ ۸ یا مدارشکن ۹ آغاز می‌شود، ژنراتورها به ولتاژ یکسان یا تقریباً یکسان برسند.

البته به دلایل عملی، معمولاً از زمان تحریک یکسانی برای هر دو ماشین استفاده می‌شود. بنابراین صرف نظر کردن از برخی الزامات که منجر به ولتاژ یکسان می‌شوند، ضروری است. این صرف نظر کردن، تأثیر چشمگیری ندارد. ماشین بزرگ‌تر همیشه باید درست تنظیم شود. بخشی از سیستم سنکرون کننده به کاررفته به صورت خودکار عمل می‌کند و برای انجام تست در بازه‌های ۳ دقیقه‌ای، به اندازه‌ی کافی سریع است. هنگام انجام تست‌های ری کلوزینگ پرسرعت، تحریک‌های اصلی در سرتاسر تست متصل می‌مانند و توان سنکرون سازی بین دو

دوره اتصال کوتاه را نیز تأمین می‌کنند [۲].

در مدت تست اتصال کوتاه، ماشین‌ها تمایل دارند که از حالت سنکرون خارج شوند. وقتی ماشین‌ها بدون ترانسفورماتور و به شکل مستقیم به هم متصل شوند، در مدت تست اتصال کوتاه هیچ توان سنکرون‌کننده‌ای بین آنها ردوبدل نمی‌شود. در صورتی که ترانسفورماتور وصل شود و ژنراتورها به صورت موازی به سمت ثانویه متصل شوند، این وضعیت را می‌توان بهبود بخشید. افت ولتاژی که به خاطر راکتانس ترانسفورماتور رخ می‌دهد، باعث می‌شود مقداری سنکرون‌بودن بین ماشین‌ها حاصل شود. در حالت اتصال کوتاه دو فاز، حتی شرایط بهتری نیز قابلیت دستیابی دارد، چون همواره مقدار خاصی توان سنکرون‌کننده که در هر فاز اتصال کوتاه نشده، در دسترس است. در عمل، موقعیت اهمیت چندانی ندارد، چون ماشین‌ها با جرم زیادی که دارند، در بازه‌ی زمانی کوتاه قبل از شروع اتصال کوتاه، زمان کافی برای خروج از حالت سنکرون پیدا نمی‌کنند.

محاسبات برای موازی کردن دو ژنراتور ۱۳۰۰ مگاوات آمپر و ۲۵۰۰ مگاوات آمپر آزمایشگاه توان‌بالای Ludvika نشان داده است که وقتی ژنراتورها به طور مستقیم به هم متصل می‌شوند، حدوداً ۱۰ تا ۱۵ درصد افت توان حاصل می‌شود و طی یک بازه‌ی زمانی ۰/۲ ثانیه‌ای، توان کامل کشیده می‌شود. در صورتی که زمان اتصال کوتاه ۰/۱ ثانیه باشد، افت توان کمتر از ۱ درصد خواهد بود. در صورتی که ژنراتورها از طریق ترانسفورماتور متصل شوند، حداکثر افت توان چیزی بین ۲ تا ۳ درصد خواهد بود. به عنوان جمع‌بندی، در صورتی که زمان اعمال اتصال کوتاه به ۰/۱ تا ۰/۲ ثانیه محدود شود، مشکل در خورتوجهی وجود نخواهد داشت.

## ۱-۵- رژیم عملکرد ژنراتور اتصال کوتاه

عملکرد معمول یک ژنراتور اتصال کوتاه به شرح زیر است:

۱- شتاب‌گیری از سرعت صفر تا ۳۰۰۰ دور در دقیقه در کمتر یا برابر با ۱۰ دقیقه

۲- عملکرد در رژیم کاری 4A و 4B با جریان اتصال کوتاه نامی در ۳۰ دقیقه. برای رژیم تست 4A، زمان اتصال کوتاه بایستی در سه دوره ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ ثانیه تکرار شود. در رژیم تست 4B نیز، زمان‌های تکرار اتصال کوتاه در سه دوره ۰/۲، ۰/۲ و ۰/۲ انجام می‌شود که بایستی شتاب‌گیری تا سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه در بین تست‌ها، امکان‌پذیر باشد.

۳- تکرار رژیم‌های کاری فوق‌الذکر در هر ۳۰ دقیقه، بدون هیچ وقفه‌ای بایستی انجام‌شدنی باشد.

۴- پس از انجام فرآیندهای فوق، ترمزگیری دینامیکی و کاهش سرعت به ۹۰ درصد سرعت نامی در ۱۰ دقیقه یا کمتر و سپس توقف تا سرعت صفر، در مجموع در ۴۵ دقیقه بایستی انجام شود.

نوع دیگر سیکل عملکرد ژنراتور اتصال کوتاه را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

۱- شتاب‌گیری از سرعت صفر تا ۳۰۰۰ دور در دقیقه در کمتر یا برابر با ۱۰ دقیقه

۲- کارکرد در ولتاژ نامی به مدت ۱۰ دقیقه

۳- پس از انجام فرآیندهای فوق، ترمزگیری دینامیکی و کاهش سرعت به ۱۰ درصد سرعت نامی در ۱۰ دقیقه یا کمتر و سپس توقف تا سرعت صفر، در مجموع در ۴۵ دقیقه بایستی انجام شود. ژنراتور فوق، بایستی امکان حداقل دو راه‌اندازی و توقف در ۸ ساعت را فراهم کند.

## ۱-۶- رژیم تست اتصال کوتاه با استفاده از ژنراتور اتصال کوتاه

این تست به سه صورت انجام‌پذیر است [۱] و [۳]:

- مدت زمان هر اتصال کوتاه برابر با ۱۰ نیم‌سیکل با حداکثر مؤلفه DC در یک زنجیره که به تعداد ۵ مرتبه تکرار و با فاصله زمانی ۵ دقیقه بین هر اتصال کوتاه انجام پذیرد و پس از ۲ ساعت وقفه، زنجیره اتصال کوتاه بعدی آغاز می‌گردد.

- مدت زمان هر اتصال کوتاه به مدت ۱۰ نیم‌سیکل با حداکثر مؤلفه DC در یک زنجیره که به تعداد ۱۰ مرتبه تکرار با فاصله زمانی ۱۰ دقیقه بین هر تست اتصال کوتاه انجام می‌گیرد که پس از ۲ ساعت وقفه زمانی، زنجیره بعدی آغاز گردد.

- روند O-t-CO که زمان t برابر با ۰/۱ تا ۰/۳ ثانیه می‌باشد این سیکل ۸ مرتبه با فاصله زمانی ۳ دقیقه بین هر اتصال کوتاه تکرار می‌شود و پس از ۲ ساعت وقفه، زنجیره بعدی آغاز می‌گردد. حداکثر زمان هر اتصال کوتاه ۵ سیکل یا ۱۰۰ میلی‌ثانیه می‌باشد (با فرض فرکانس ۵۰ Hz هرتز)

یکی دیگر از روش‌های انجام تست اتصال کوتاه به قرار زیر است:

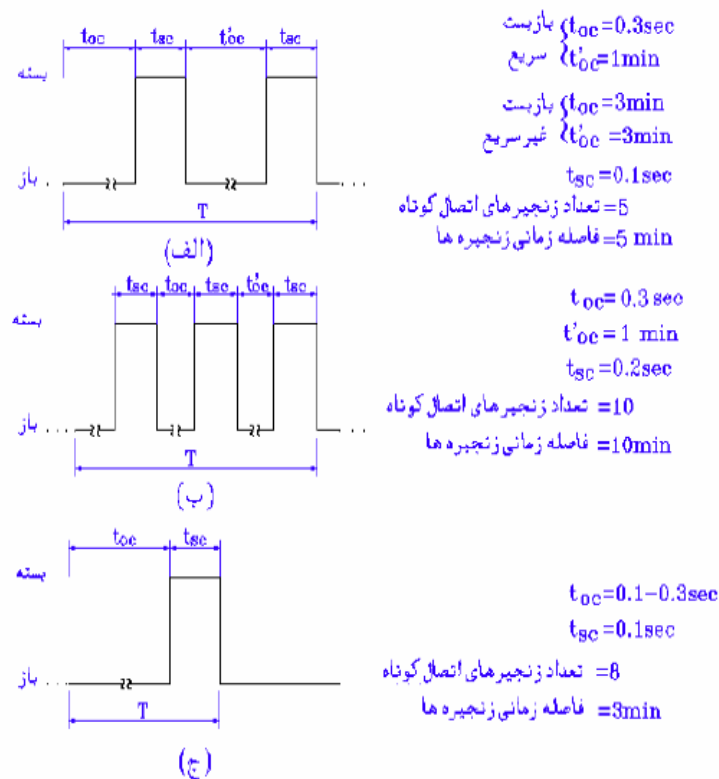
- یک اتصال کوتاه سه‌فاز با جریان نامی به مدت ۰/۳ ثانیه که هر ۳۰ دقیقه یک بار تکرارشدنی است. در این مدت، ژنراتور باید به حالت آماده‌به‌کار روشن باشد و تحریک نشود.

- شش اتصال کوتاه، هر یک به مدت ۰/۱۵ ثانیه که هر ۳۰ دقیقه تکرارشدنی است. بازه زمانی بین هر اتصال کوتاه ۶ دقیقه است که در این مدت ژنراتور باید سرعت گردش تنظیمی خود را بازیابی کند. در انتهای این سیکل تست، یک دوره‌ی ۳۰ دقیقه‌ای به منظور خنک‌سازی انجام می‌شود که در این مدت، ژنراتور به حالت آماده‌به‌کار و بدون اعمال تحریک در سرعت خاصی می‌چرخد.

- سه اتصال کوتاه دوبل مطابق با الگوی مقابل: اتصال کوتاه ۰/۱۵ ثانیه‌ای، ۰/۳ ثانیه مکث و دوباره اتصال کوتاه ۰/۱۵ ثانیه‌ای. بازه‌ی زمانی بین دو سیکل ۱۵ دقیقه است. در انتهای این روش، باید به مدت ۳۰ ثانیه عملیات خنک‌سازی صورت گیرد. در این بازه، ژنراتور به حالت آماده‌به‌کار و بدون اعمال تحریک در سرعت خاصی می‌چرخد.

- یک اتصال کوتاه به مدت حداکثر ۴ ثانیه که هر ۳۰ دقیقه تکرارشدنی است و در این بازه‌ی ۳۰ دقیقه‌ای ژنراتور به حالت آماده‌به‌کار و بدون اعمال تحریک در سرعت خاصی می‌چرخد. در این روش، مقدار متوسط مجذور مربعات جریان استاتور باید کمتر از مقدار جریان متقارن شوک باشد.

براساس استاندارد، جریان نامی اتصال کوتاه کلید تابعی از ولتاژ نامی آن بوده و وظیفه مولد جریان اتصال کوتاه، تأمین جریانی با دامنه مزبور و در مدت زمان پنج سیکل (۱۰۰ میلی‌ثانیه) است که این دامنه حتی المقدور باید ثابت بوده و انحراف فرکانس جریان اتصال کوتاه سینوسی نسبت به فرکانس نامی (۵۰ هرتز) و همچنین آلودگی هارمونیکی آن به ترتیب از ۵ و ۱۰ درصد تجاوز ننماید [۱].



شکل ۷-۱: برخی رژیم‌های تست اتصال کوتاه [۱]

مطابق شکل ۷-۱ در صورت تبعیت از الگوی قطع و وصل الف، لازم است این الگو با فواصل زمانی ۵ دقیقه‌ای به تعداد ۵ مرتبه تکرار گردد که برای الگوی ب فواصل زمانی بین الگوها معادل ۱۰ دقیقه و تعداد آنها ۱۰ مرتبه است. در الگوی ج نیز فواصل زمانی برابر ۳ دقیقه و تعداد الگوها ۸ مرتبه می‌باشد. ضمناً لازم است که زنجیره اتصال کوتاه بعدی حداقل به مدت دو ساعت بعد از آخرین زنجیره اتصال کوتاه پیاده شود.

## ۱-۷- مطالعه امکان‌سنجی ساخت ژنراتور اتصال کوتاه برای آزمایشگاه مرکزی جمهوری کره در مؤسسه طراحی ماشین‌های سنگین Dae-An

هدف این پروژه، ارزیابی امکان ساخت ژنراتور اتصال کوتاه و یا بازسازی یک ژنراتور معمولی توسط صنایع بومی به‌منظور ساخت آزمایشگاه تست اتصال کوتاه کلیدها و سایر اجزا شبکه برق بوده است [۴].

استفاده از توربوژنراتور ۵۰ مگاواتی در این پروژه که برای تولید انرژی در نیروگاه استفاده می‌شده است، برای کاربرد اتصال کوتاه به‌تنهایی کافی نبوده و به‌دلیل اینکه پارامترهای لازم برای استفاده به‌عنوان ژنراتور اتصال کوتاه را نداشته و ممکن بوده است که برای استفاده به‌عنوان این هدف به‌کلی مشخصات ذاتی‌اش تغییر کرده باشد.

ژنراتور اتصال کوتاه بایستی مخصوص این کار طراحی شود و توانایی کار با بارهای متناوب قطع‌شونده تحت جریان‌های بالای متناوب را داشته باشد. طبق اطلاعات این ژنراتور، می‌توان ولتاژ بی‌باری را به دلایل زیر افزایش داد:

- مشخصه بی‌باری در ولتاژ نامی به اشباع نمی‌رسد.
- سیم‌پیچی‌های استاتور موازی هستند و این امکان وجود دارد که آنها را سری کرد.
- فاصله هوایی می‌تواند کمتر شود.
- سیم‌پیچی تحریک می‌تواند در مدت زمان کوتاهی به‌صورت اضافه بار کار کند.

جریان خروجی اتصال کوتاه رابطه معکوسی با راکتانس‌های ناشی دارد. بنابراین در طراحی ژنراتور اتصال کوتاه برخلاف توربوژنراتور، سیم‌پیچی یک‌لایه استاتور و شیارهای کم‌عمق استاتور و رتور در نظر گرفته می‌شود. در پروژه فوق‌الذکر، مدار تست ژنراتور اتصال کوتاه در آزمایشگاه باید قادر به فراهم کردن جریانی به‌میزان ۴۰ کیلوآمپر در ولتاژ نامی ۱۰ کیلوولت باشد.

قدم اول در پروژه Dae-An، جهت نوسازی توربوژنراتور ۵۰ مگاواتی برای هدف ژنراتور اتصال کوتاه رسیدن به ولتاژ بی‌باری ۱۲ کیلوولت استاتور در یک سیم‌پیچی تک‌لایه بوده است. تعداد شیارهای استاتور نیز بستگی به شار مغناطیسی رتور و همچنین نسبت تعداد شیارهای استاتور به رتور دارد. تعداد شیارهای استاتور (۴۲ یا ۳۰) باید طراحان را قادر سازد تا بتوانند سرهای خروجی سیم‌پیچ‌های استاتور را در سمت‌های مقابل استاتور قرار دهند تا بتواند برای طراحی تابلوی برق دستی خروجی مناسب باشد.

قدم بعدی در پروژه فوق‌الذکر، تقویت ساختار ماشین در برابر نیروهای شدید دینامیکی تولیدشده توسط جریان‌های اتصال کوتاه بوده است. عملیات ساخت بایستی به‌گونه‌ای باشد که ماشین بتواند در برابر تمام تنش‌های مکانیکی و الکتریکی مقاومت کند. برای مثال یکی از اقدامات اصلی، جداکردن سیم‌پیچ‌ها و پیشانی آنها است. سیم‌پیچ‌های انتهایی در یک رینگ فولادی غیرمغناطیسی قرار داده شده و عملیات بازسازی باید تنش‌های کششی سیم‌پیچ‌های استاتور را محدود کند.

میزان روند کاهشی جریان اتصال کوتاه خروجی ژنراتور و همچنین اندازه ولتاژ ریکآوری ژنراتور اتصال کوتاه، وابسته به پارامترهای ژنراتور و همچنین میزان سقف ولتاژ سیستم تحریک است. یک سیستم تحریک با قابلیت تغییر فوری ولتاژ تحریک می‌تواند با محدود کردن روند کاهشی جریان خروجی اتصال کوتاه، عملکرد آن را بهبود بخشد. با توجه به عملکرد کوتاه مدت سیستم تحریک در زمان اتصال کوتاه، از اجزای این سیستمی‌توان به‌صورت اضافه‌بار در این زمان بهره‌برداری کرد.

موتور (درایو) راه‌انداز این ژنراتور، سرعت ژنراتور را در حالت بی‌باری از صفر تا سرعت نامی طی چندین دقیقه افزایش می‌دهد. توان خروجی این موتور نیز بایستی از تلفات مکانیکی و تهویه ژنراتور بیشتر باشد و همچنین قبل از زمان اتصال کوتاه ژنراتور، باید تغذیه درایو راه‌انداز از شبکه قطع می‌شده است.

برای کاهش استرس مکانیکی و گشتاوری اتصال شفت الکتروموتور و ژنراتور، قسمت کوپلینگ با یک کلاچ لیز طراحی شده است که این کلاچ گشتاور انتقالی را از ژنراتور به شفت الکتروموتور در زمان اتصال کوتاه به‌میزان مقبولی محدود می‌کند. این موتور راه‌انداز از نوع یک موتور القایی رتورسیم‌پیچی شده با قابلیت کنترل سرعت خروجی است.

ژنراتور اتصال کوتاه فوق از تجهیزات جانبی زیر تشکیل شده است:

- سیستم تحریک
- الکتروموتور موتور راه‌انداز
- موتور القایی تهویه برای سیستم تهویه اجباری ژنراتور
- سیستم روغن کاری برای احتیاجات اتصال گیربکس (کوپلینگ) الکتروموتور و ژنراتور
- تابلوی برق دستی خروجی سیم‌پیچی‌های استاتور
- سیستم کلاچ کوپلینگ خاص برای اتصال شفت الکتروموتور و ژنراتور
- سیستم حفاظت ژنراتور اتصال کوتاه

در ژنراتور اتصال کوتاه، سیم‌پیچی‌های تحریک باید سطح مقطع کوچکتری را نسبت به توربوژنراتورهای معمولی داشته باشد. افزایش سطح مقطع آهنی رتور در مقایسه با مس اجازه افزایش بیشتر شار را درون رتور بدون ایجاد اشباع می‌دهد. همچنین تعداد شیارهای رتور باید با هدف افزایش بیشتر هدایت مغناطیسی، حداقل انتخاب شود که شیارهای پهن‌تر و کم‌عمق‌تری داشته باشد.

روی سیم‌پیچی‌های رتور در قسمت انتهایی به‌وسیله نوارهای پهن و محکم مسی پر شده است که این نوارها همراه با گوه‌های شیار، میله‌های دمپر را می‌سازند و این میله‌ها به‌وسیله رینگ نگهدارنده برنجی به‌صورت مدور با هم اتصال کوتاه می‌شوند. علاوه بر آن، بدنه رتور روی پایه‌هایی<sup>۱</sup> با بلبرینگ‌های لبه‌دار قرار گیرد.

شیارهای استاتور نیز مانند رتور به‌صورت پهن و کم‌عمق طراحی شده است. سیم‌پیچی استاتور با توجه به

1- Bearing Pedestal

ملاحظات و محدودیت‌های مکانیکی و عایقی، باید با حداقل پهنای عایقی و گوه‌ها طراحی شوند که بهترین حالت این مفهوم را سیم‌پیچی‌های تک‌لایه دارند.

ولتاژ خروجی ژنراتور اتصال کوتاه نیز باید سینوسی با کمترین میزان اعوجاج هارمونیک باشد. بنابراین گام سیم‌پیچی باید در کمترین حالت البته با توجه به هارمونیک ۵ام و ۷ام طراحی شده باشد.

سیستم تهویه ژنراتور اتصال کوتاه، خنک‌کاری سیستم را بین عملکرد اتصال کوتاه‌های متوالی بنا به کاربرد، به‌صورت مؤثری انجام می‌دهد. ژنراتور اتصال کوتاه باید یک سیستم خنک‌کاری تهویه اجباری با ورود و خروج آزاد هوا داشته باشد.

طراحان SKODA بعضی از محاسبات طراحی ژنراتور اتصال کوتاه را با شرایط زیر انجام دادند:

- استفاده از روتور توربوژنراتور ۵۰ مگاواتی
- افزایش اجرایی شار مغناطیسی
- بازسازی استاتور

به‌عنوان نتیجه از این محاسبات، دو مشخصه تئوری از ژنراتورهای اتصال کوتاه که پارامترهای خواسته‌شده با ولتاژ نامی ۱۲ کیلوولت و توان اتصال کوتاه ۱۰۰۰ مگاوات آمپر را پوشش دهد، وجود داشته است:

۱. ژنراتور اتصال کوتاه با سیم‌پیچی دولایه استاتور با ۳۰ شیار
۲. ژنراتور اتصال کوتاه با سیم‌پیچی یک‌لایه استاتور با ۶۰ شیار

طبق مطالعات انجام‌شده SKODA، ژنراتور طرح یک، تنها ژنراتوری است که از لحاظ تئوری اجرایی است، زیرا SKODA تنها ژنراتورهای اتصال کوتاه با سیم‌پیچی تک‌لایه را می‌سازد و فناوری روش‌های تقویت اتصالات پیشانی در سیم‌پیچی‌های دولایه را ندارد.

در حالت دوم طراحی ژنراتور از شمش‌های نازک‌تر استفاده می‌شده است که عرض هر شمش نصف حالت اول (سیم‌پیچی دولایه) می‌باشد و استحکام آنها ۸ برابر کمتر بوده و برای کاربرد ژنراتور اتصال کوتاه مناسب نیست. همچنین استفاده از روتور توربوژنراتور ۵۰ مگاواتی نیز خالی از اشکال نیست. روتور ژنراتور بایستی حتماً دارای دمپر باشد. از طرفی سرعت ژنراتور اتصال کوتاه در حین عملکرد تغییر می‌کند، پس باید سرعت ثانویه بحرانی ژنراتور اتصال کوتاه بیشتر از سرعت نامی باشد که در کل بازسازی توربوژنراتور ۵۰ مگاواتی برای چنین ژنراتور اتصال کوتاهی ممکن نبوده است.

در پایان پروژه Dae-An، نتیجه گرفته شده است که بازسازی توربوژنراتور ۵۰ مگاواتی برای کاربرد ژنراتور اتصال کوتاه ممکن نیست و مطالعات بر روی طراحی و ساخت ژنراتور اتصال کوتاه ۲۵۰۰ مگاوات آمپری تمرکز یافته است.

## ۱-۸- ژنراتور اتصال کوتاه ساخت شرکت Brush

از برخی مشخصات کلی این ژنراتور اتصال کوتاه می‌توان به ولتاژ نامی ۱۴۰۰۰ یا ۷۰۰۰ ولت، سیستم تحریک از نوع استاتیک، خروجی اولیه ۲۵۰۰ مگاوات آمپر و خروجی برای مدت ۱۰۰ میلی‌ثانیه در حدود ۲۰۷۳ مگاوات آمپر برای حالتی که از تحریک Super استفاده نشود و حدود ۲۲۷۵ برای حالتی که از این نوع تحریک استفاده شود، اشاره کرد [۵].

ژنراتور اتصال کوتاه استفاده‌شده، با هوا خنک‌سازی می‌شود و خنک‌سازی از نوع تهویه باز است. ژنراتور به دو یاتاقان Pedestal مجهز است و استاتور آن از یک فریم یک‌تکه جوش‌داده‌شده تشکیل شده که محافظ مغناطیسی در آن قرار دارد. این محافظ به‌صورت ورقه‌ورقه ساخته شده و بین میله‌های جفت سطح بیرونی پنهان هستند. صفحات کلمپینگ<sup>۱</sup> که از فولاد غیرمغناطیسی ساخته شده‌اند، مانند انگشت‌هایی غیرمغناطیسی در داخل استاتور جوش خورده‌اند. پوشش‌های جوش‌داده‌شده از هر دو سمت فریم استاتور را می‌بندند.

هوای خنک‌سازی با فشار به‌سمت بخش پایینی پوشش‌های جوش‌داده‌شده دمیده می‌شود و سپس به‌سمت فضای سیم‌پیچی شده و محفظه استاتور جریان پیدا می‌کند. در ادامه، از دریچه‌ای که در پایین فریم استاتور تعبیه شده، خارج می‌شود.

سیم‌پیچی استاتور از نوع سه‌فاز یک‌لایه و با دو مسیر موازی است و دو انتهای هر شش پیچک سیم‌پیچی از ماشین بیرون آمده است. رشته‌های شمش‌های سیم‌پیچی از هادی‌های موازی با ۳۶۰ درجه جابه‌جایی<sup>۲</sup> تشکیل شده‌اند.

روتور ژنراتور به‌صورت یک‌تکه و از فولاد آلیاژبالا<sup>۳</sup> ساخته شده است. سیم‌پیچی‌های میدان که در شیارها قرار دارند، از سیم‌های رشته‌ای مسی با آلیاژ نقره ساخته شده و همگی به عایق دمایی دسته F مجهز هستند. سیم‌پیچی‌ها با گوه‌های برنزی در شیارها نگه داشته می‌شوند. نوارهای مسی که زیر گوه‌ها قرار دارند، توسط حلقه‌های مسی، اتصال دارند. ماده‌ی حلقه‌های نگهدارنده، فولاد آلیاژ بالای مقاوم در برابر زنگ است.

سیم‌پیچی‌های روتور فقط از طریق هوا خنک می‌شوند. جریان میدان به‌سمت دو حلقه فولادی که یک‌به‌یک در بیرون پوشش جوش‌داده‌شده قرار دارند، هدایت می‌شود. سپس جریان تغذیه به محور روتور می‌رسد. روتور بین دو یاتاقان Pedestal با یاتاقان‌های شعاعی قرار دارد [۵].

ژنراتور برای خنک‌شدن به جریان هوا با نرخ ۱۸ مترمکعب بر ثانیه تحت فشار استاتیکی ۲۰۰۰ پاسکال نیاز دارد. سطح تصفیه هوا باید به‌گونه‌ای باشد که مقدار گردو خاک ورودی به ژنراتور را پایین‌تر از ۰/۰۱۲ میلی‌گرم بر مترمکعب نگه دارد.

1- Clamping  
2- Transposition  
3- High-Alloyed

تنظیم‌کننده ولتاژ تحریک قابلیت پاسخ‌دهی سریع است که از نوع استاتیکی با سیستم کنترل مبتنی بر ریزپردازنده‌های ۱۶ بیتی قدرتمند ساخته شده است. از برخی مشخصات تنظیم‌کننده تحریک می‌توان به تنظیم ولتاژ ترمینال ژنراتور، مد عملکردی اینورتری یکسوساز تریستوری برای قطع تحریک از ژنراتور، کنترل کردن یکسوساز تریستوری و کنترل دستی جریان تحریک اشاره کرد [۵].

سیستم تحریک با اعمال حدوداً ۸۰ درصد ولتاژ منفی به سیم‌پیچی میدان ژنراتور (مد عملکردی اینورتری)، عملیات قطع تحریک از ژنراتور را انجام می‌دهد. این قطع تحریک برای خاموش کردن فوری ژنراتور، با باز کردن مدارشکن‌های میدان AC انجام می‌گیرد. زمانی که دستور تریپ صادر شد، کنتاکت‌های مدارشکن میدان AC فوراً باز می‌شوند. به منظور تلف کردن انرژی جمع‌شده در سیم‌پیچی میدان، مقاومت تخلیه‌ای به صورت موازی با سیم‌پیچی میدان ژنراتور قرار می‌گیرد [۵]. ویژگی‌های اصلی این سیستم عبارت‌اند از ولتاژ نامی تحریک ۲۶۴ ولت DC، جریان نامی تحریک ۹۸۰ آمپر، سقف ولتاژ تحریک حدوداً ۲۰۰۰ ولت DC و سقف جریان تحریک، حدوداً ۸ کیلو آمپر.

تجهیز راه‌انداز ژنراتور، یک الکتروموتور قفس سنجابی با ساختار افقی است. این موتور به گونه‌ای ساخته شده است که قابلیت استقرار روی فوندانسیون داشته باشد. این موتور با به کارگیری یک درایو کنترل دور، به صورت مستقیم ژنراتور اتصال کوتاه را راه‌اندازی می‌کند. یک استوانه در انتهای شفت تعبیه شده تا امکان کوپلینگ با ژنراتور فراهم باشد.

میله‌های روتور در شیارهای چندلایه هسته روتور چفت می‌شوند. شفت روتور توسط دو یاتاقان Pedestal نگه داشته شده است که با روغن کیفیت بالا روغن کاری می‌شوند [۵].

سیستم کنترل و حفاظت ژنراتور نیز شامل مصادیق زیر است:

● نظارت بر دمای تمام المان‌های ژنراتور از جمله:

- سیم‌پیچی استاتور ژنراتور
- یاتاقان‌های ژنراتور
- سیستم خنک‌کنندگی ژنراتور
- سیم‌پیچی استاتور الکتروموتور راه‌اندازی
- یاتاقان‌های الکتروموتور راه‌انداز
- سیستم روغن کاری
- سیستم تحریک
- ترانسفورماتورهای تغذیه

● اندازه‌گیری لرزش یاتاقان‌های:

- ژنراتور
- الکتروموتور راه‌انداز

● محافظت در برابر سرعت بیش از حد

- شناسایی قوس الکتریکی

همچنین یک پنل مجزا به‌منظور:

- محافظت در برابر خطای زمین‌شدن روتور
- محافظت در برابر خطای زمین‌شدن استاتور
- محافظت تفاضلی
- محافظت در برابر اضافه ولتاژ
- محافظت  $U^2t$
- محافظت  $I^2t$
- محافظت سیم‌پیچی‌های میدان در برابر اضافه جریان

برخی تست‌های کارگاهی که روی ژنراتور اتصال کوتاه انجام شده است نیز عبارت‌اند از:

- تست راکتانس آرمیچر
- تست سرعت بیش از حد
- مقاومت‌های سیم‌پیچی
- مقاومت عایقی
- مقاومت عایقی یاتاقان
- مشخصه‌های اتصال کوتاه، تلفات و تعادل جریان
- تست دمای محفظه یاتاقان
- اندازه‌گیری ارتعاش‌ها
- تحلیل هارمونیک
- تست دی‌الکتریک
- بررسی تجهیزات جانبی

## ۱-۹- مطالعه شرکت آزمایشگاه‌های بین‌المللی قدرت فاتل در خصوص

### طراحی ژنراتور اتصال کوتاه

شرکت آزمایشگاه‌های بین‌المللی قدرت فاتل در مطالعه‌ای به مهم‌ترین مشخصه‌های ژنراتورهای اتصال کوتاه پرداخته است و مطالعه‌ای در قالب تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای ژنراتورهای اتصال کوتاه انجام داده است تا پارامترهایی که نتایج مقبولی از نظر استاندارد به دست می‌دهد را استخراج کند.

در این مطالعه که بر روی یک ژنراتور ۱۲۰ مگاوات‌آمپر ۱۸ کیلوولت انجام شده است، تحلیل حساسیت

پارامترهایی از جمله مقاومت استاتور  $R_s$ ، راکتانس زیرگذرا  $X_d$  و  $X_q$  نسبت  $X_q/X_d$ ، راکتانس گذرا  $X_d'$  راکتانس‌های سنکرون  $X_d$  و  $X_q$  توان ژنراتور، ولتاژ ژنراتور و ولتاژ سیستم تحریک بر روی خروجی اتصال کوتاه ژنراتور بررسی شده و بازه‌های مقبولى برای پارامترها برای این ژنراتور نمونه استخراج شده است.

در این ژنراتور علاوه بر رعایت مقادیر استاندارد که محدود بودن تغییرات مقدار مؤثر جریان به ۵ درصد در بازه ۰/۱ تا ۳ ثانیه و حداقل مقدار ثابت زمانی مؤلفه DC ۶۰ میلی‌ثانیه است، جریان پیک آن بایستی کمتر از ۷۵ کیلوآمپر و جریان مؤثر آن کمتر از ۲۵ کیلوآمپر نباشد.

بدین ترتیب در یک سناریو تغییرات مقاومت استاتور در بازه ۰/۰۲ تا ۰/۰۲ پریونیت بررسی شده است که افزایش مقاومت بیش از ۰/۰۶ پریونیت منجر به کاهش ثابت زمانی مؤلفه DC به کمتر از ۶۰ میلی‌ثانیه و افزایش مقاومت به بیش از ۰/۱۴ پریونیت نیز منجر به کاهش پیک جریان به کمتر از ۷۵ کیلوآمپر و تغییرات بیش از ۵ درصدی مقدار مؤثر جریان شده است. بنابراین طبق این سناریو، مقاومت استاتور ژنراتور در مرحله طراحی و نایبستی بیشتر از ۰/۰۶ پریونیت باشد.

در سناریو بعدی تأثیر تغییر راکتانس‌های زیرگذرا ( $X_d$  و  $X_q$ ) در خروجی اتصال کوتاه ژنراتور مطالعه شده است که این پارامترها از ۰/۰۶ تا ۰/۱۶ پریونیت تغییر داده شده و مشاهده شده است که افزایش این پارامترها، ثابت زمانی مؤلفه DC جریان را بهبود داده و در طرفی دیگر منجر به بدتر شدن درصد تغییرات مقدار مؤثر آن و کاهش پیک جریان شده است. بنابراین در یک مقدار مشخص میانی، هر سه قید فوق رعایت شده و مقادیر مطلوبی به دست داده است که این مقدار ۰/۱۲ پریونیت بوده است.

به‌منظور مطالعه تأثیر نسبت  $X_q/X_d$  نیز با توجه به اینکه راکتانس‌های زیرگذرای یک ژنراتور روتوراستوانه‌ای در دو محور طولی و عرضی، کمتر از ۱۰ درصد با یکدیگر تفاوت دارند، این مقدار از ۱ تا ۱/۰۹ تغییر داده شده و مشاهده شده است که این گزینه تأثیر چندانی در خروجی اتصال کوتاه ندارد و همه پاسخ‌ها مقبول است.

تأثیر تغییرات راکتانس گذرای ژنراتور با تغییر این مقدار از ۰/۰۷ تا ۰/۳ پریونیت بررسی شده است. مقدار پایین این پارامتر، ثابت زمانی مؤلفه DC کمی به دست می‌دهد و از طرفی مقدار بالای آن نیز منجر به کاهش مقدار مؤثر جریان به کمتر از ۲۵ کیلوآمپر می‌شود که در بازه ۰/۱ تا ۰/۱۶ پریونیت هر دو محدودیت ارضا می‌شود که در این بازه، تنها در بازه کوچک محدود ۰/۱۳ تا ۰/۱۶ پریونیت، میزان تغییرات مقدار مؤثر جریان محدود به ۵ درصد بوده است.

افزایش راکتانس سنکرون ژنراتور  $X_d$  منجر به کاهش مقدار مؤثر جریان به زیر ۲۵ کیلوآمپر می‌شود. از طرفی مقدار خیلی پایین و خیلی زیاد این پارامتر منجر به افزایش نرخ تغییرات مقدار مؤثر جریان می‌شود و تنها در بازه ۱ تا ۱/۱ پریونیت همه شروط رعایت شده است.

در یک سناریو نیز مقدار  $X_q$  از ۰/۲۲ تا ۱/۱۱ که برابر با مقدار  $X_d$  است، تغییر داده شده که تأثیر منفی در خروجی اتصال کوتاه نداشته است.

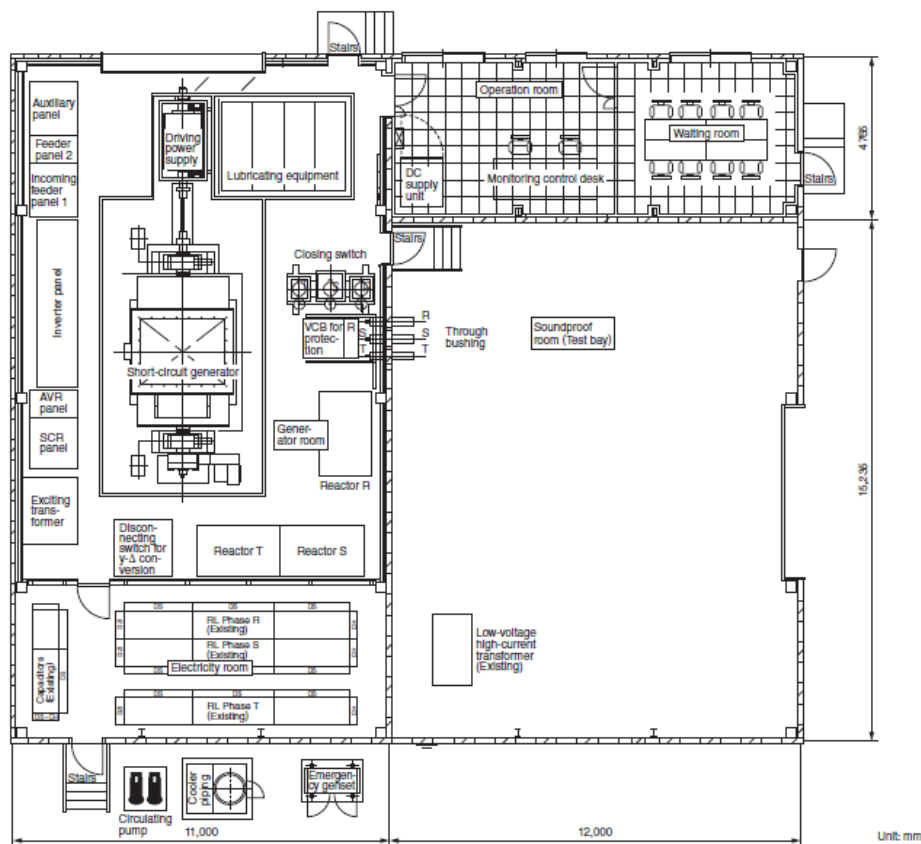
مطالعه توان ژنراتور نیز نشان داده است که توان ۱۲۰ مگاوات برای جریان‌های هدف طرح مطلوب است و توان‌های پایین‌تر قادر به تأمین این جریان‌ها نیستند.

افزایش ولتاژ نامی ژنراتور منجر به کاهش مقدار مؤثر و پیک جریان اتصال کوتاه می‌شود. به‌گونه‌ای که ولتاژ بالای ۱۸ کیلوولت، پیک کمتر از ۷۵ کیلوآمپر و مقدار مؤثر کمتر از ۲۵ کیلوآمپر ایجاد می‌کند. ولتاژهای بالای ۱۸ کیلوولت نیز با توجه به هدف طرح، نیاز نبوده است.

سقف تحریک ژنراتور از نظر تغییر مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه، اهمیت زیادی دارد. به‌گونه‌ای که اگر تحریک در لحظه اتصال کوتاه به مقدار کافی نباشد، عکس‌العمل آرمیچر منجر به کاهش جریان (تا کمتر از ۲۵ کیلوآمپر) شده و از طرفی مقدار بیش از حد نیاز آن نیز منجر به افزایش مقدار مؤثر جریان پس از افت ناشی از تأخیر سیم‌پیچی تحریک خواهد بود که هر دو، منجر به افزایش میزان تغییرات جریان اتصال کوتاه (بیش از ۵ درصد) در بازه ۰/۱ تا ۳ ثانیه می‌شود. در این بررسی، مقدار مناسب سقف تحریک ۷ پریونیت به دست آمده است. همچنین در سناریویی دیگر تأثیر تأخیر سیستم تحریک بر پاسخ اتصال کوتاه مشاهده گردید که تأخیر این سیستم می‌تواند به افت مقدار مؤثر جریان در حدود ۱۰۰ الی ۲۰۰ میلی‌ثانیه پس از اتصال کوتاه شود که این گزینه تغییرات این پارامتر را تا ثانیه ۳، به بیش از ۵ درصد می‌رساند.

## ۱-۱۰- مجموعه آزمایشگاهی شرکت AICHI ELECTRIC

این مجموعه متشکل از یک ژنراتور اتصال کوتاه (موتور راه‌انداز و خود ژنراتور)، راکتور، اینورترهای ولتاژ متوسط، پنل‌های کنترل، سیستم‌های مانیتورینگ، سوئیچ، مدارشکن، Test sequencer و ادوات اندازه‌گیری است که شمای کلی ساختار این آزمایشگاه در شکل ۱-۸ نشان داده شده است [۶].



شکل ۱-۸: ساختار کلی مجموعه آزمایشگاهی شرکت AICHI ELECTRIC [۶]

در این مجموعه از یک ژنراتور اتصال کوتاه و یک موتور القایی به‌منظور درایو آن تشکیل شده است. دلیل انتخاب ماشین دو قطب، سرعت دورانی و اینرسی بالای آن است. برای تحریک ژنراتور، از یک سیستم تحریک استاتیک با قدرت پاسخ‌گویی بالا استفاده شده است. سیم‌بندی ژنراتور به‌کمک یک سوئیچ قطع‌کننده بیرونی تغییرپذیر از ستاره به مثلث است.

موتور القایی انتخابی از نوع روتور قفس‌سنجابی است. همچنین از یک سیستم اینورتری ولتاژ متوسط برای راه‌اندازی و کنترل سرعت آن استفاده شده است. سیستم روغن‌کاری در زمان راه‌اندازی و توقف، شروع به تزریق روغن از مخزن مربوط می‌کند. البته در زمانی که سیستم با سرعت گردان نامی کار می‌کند، یک پمپ به‌صورت مستقیم به شفت موتور و ژنراتور متصل می‌شود و به‌منظور جلوگیری از هدررفت انرژی، روغن را به یاتاقان‌ها تزریق می‌کند.

در واحد کنترل این آزمایشگاه، اینورتری ولتاژ متوسط متشکل از سه پنل قرار داده شده است. کارکرد اصلی آن تنظیم سرعت روی ۳۶۰۰ دور در دقیقه برای فرکانس ۶۰ هرتز و ۳۰۰۰ دور در دقیقه برای فرکانس ۵۰ هرتز است. ویژگی اصلی این اینورتر، کم‌بودن جریان هجومی در زمان راه‌اندازی است. به‌علاوه، حتی در میانه‌ی عملیات توقف، امکان راه‌اندازی مجدد وجود دارد.

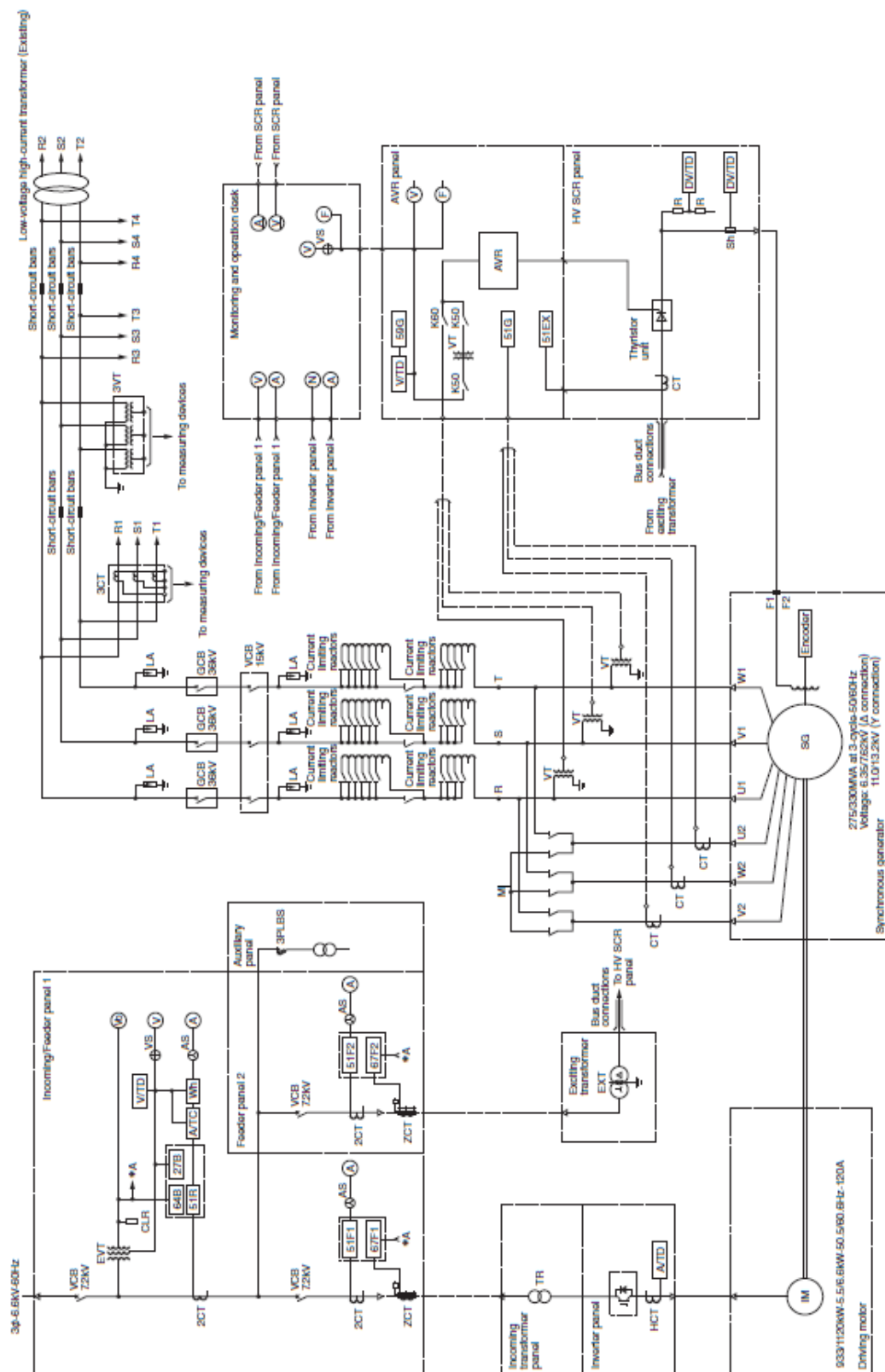
همچنین در بخش کنترل یک پنل AVR تعبیه شده است. محدوده‌ی کنترل این پنل از ۰ تا ۱۱۰ درصد

است. ولتاژ ژنراتور با استفاده از یک صفحه لمسی که روی سطح پنل اصلی تعبیه شده است، تنظیم می‌شود. ترისტورهایی که برای یکسوسازی جریان میدان استفاده شده‌اند، ظرفیت کافی برای انتقال ۴۰۰۰ آمپر را در مدت کوتاهی دارند.

در صورت قطع برق این سیستم تست، قطع‌شدن مخزن روغن از یاتاقان‌ها مسئله مهمی است. به‌همین دلیل این آزمایشگاه به سیستمی مجهز است که در آن یک مولد به‌عنوان پشتیبان استفاده می‌شود. همچنین یک پمپ DC نیز نصب می‌شود.

برای هر فاز، دو مجموعه راکتور با ظرفیت‌های مختلف استفاده شده‌اند. راکتور ۱ توسط هفت ترکیب مختلف از سوئیچ‌های تغییر وضعیت و راکتور ۲ توسط چهار ترکیب مختلف از سوئیچ‌های تغییر وضعیت کنترل می‌شود. بنابراین، ۲۸ ترکیب متفاوت برای تنظیم و اصلاح جریان قابلیت پیاده‌سازی دارد.

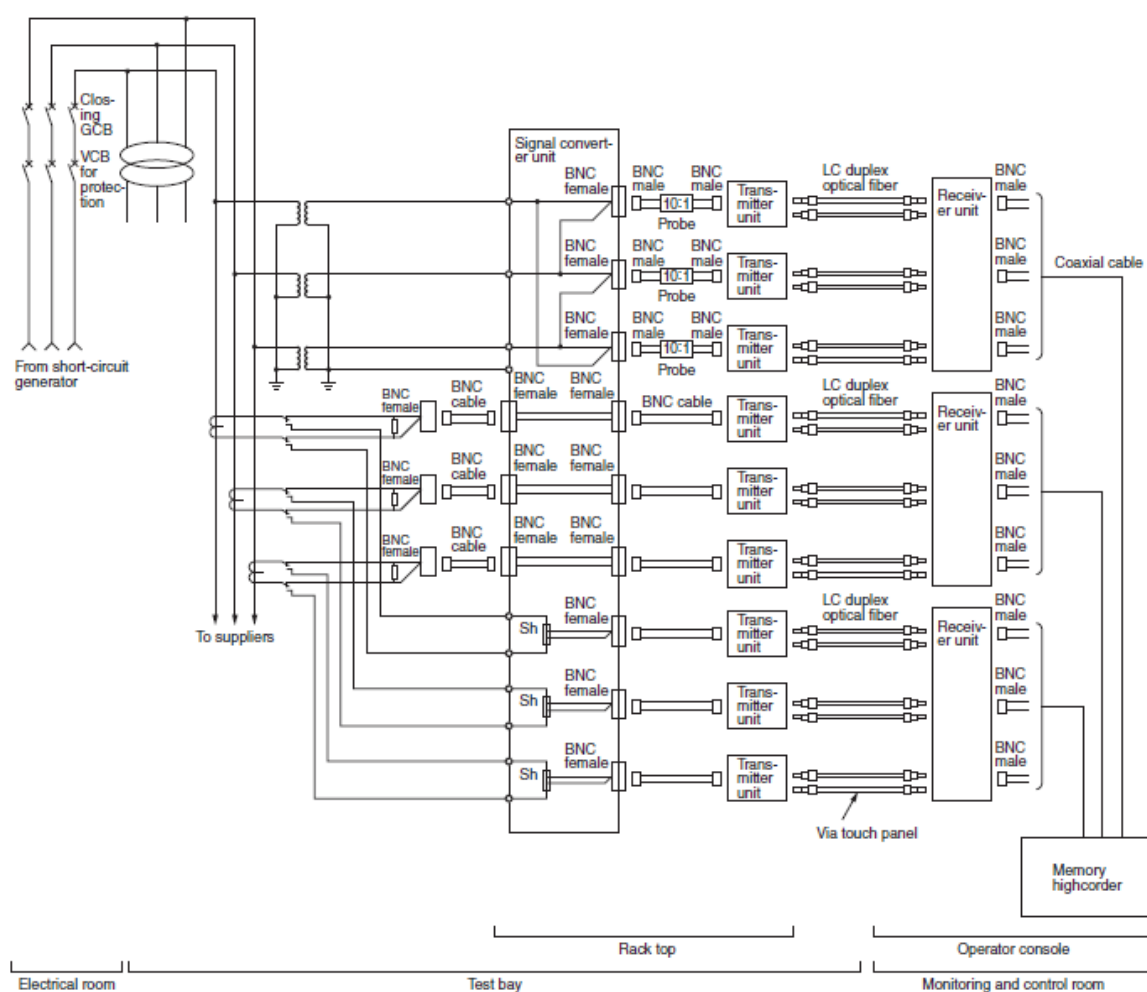
در تست اتصال کوتاه، نیاز به مرحله‌ای تحت عنوان فاز کلوزینگ است. Test Sequencer مربوط شرایط تست را با دقت ۰/۱ میلی‌ثانیه تضمین می‌کند. سیگنال‌های خروجی از Test Sequencer از طریق یک تبدیل سریع که توسط سوئیچ‌های IGBT انجام می‌شود، کنترل می‌شوند. یک مدارشکن با عایق گازی ۳۶ کیلوولت به‌عنوان سوئیچ کلوزینگ انتخاب می‌شود که دقت بسته‌شدن آن مثبت و منفی ۰/۵ میلی‌ثانیه است. نحوه جانمایی و اتصال تجهیزات در این مجموعه‌ی آزمایشگاهی در شکل ۹-۱ نشان داده شده است.



شکل ۹-۱: جانمایی تجهیزات و نحوه اتصال آنها در مجموعه آزمایشگاهی شرکت AICHI ELECTRIC [۶]

همچنین در شکل ۱-۱۰، دیاگرام سیستم اندازه‌گیری نشان داده شده است. ترانسفورماتورهای جریان که جریان‌های اتصال کوتاه را اندازه‌گیری می‌کنند در محل تست نصب شده‌اند. این ترانسفورماتورها تجهیزات خاصی با مشخصه‌ی تبدیل ۳۰۰۰ به ۱۵ آمپر هستند. برای اتصال آنها از BNC استفاده می‌شود که با توجه به مقاومت اهمی، ولتاژی برابر با ۱۵ ولت تولید می‌کند.

بین محل انجام تست و اتاق مانیتورینگ و کنترل از کابل‌های فیبر نوری استفاده می‌شود. این روش یک روش عالی برای انتقال داده‌های اندازه‌گیری شده است چراکه کابل فیبر نوری در برابر ولتاژهای فراتاخت ناشی از کلیدزنی به‌منظور ایجاد اتصال کوتاه یا ولتاژهای بالا عایق است.



شکل ۱-۱۰: دیاگرام سیستم اندازه‌گیری مجموعه آزمایشگاهی شرکت AICHI ELECTRIC [۶]

## ۱-۱۱- آزمایشگاه فشارقوی Siemens

در این آزمایشگاه، ظرفیت کلیدزنی تجهیزات ولتاژ بالا و ولتاژ متوسط به‌لحاظ فشار حرارتی و عملکرد در شرایط اتصال کوتاه، باز و بست و ظرفیت عایقی بعد از قطع اتصال کوتاه و رفتار ارزیابی می‌شود (شکل ۱-۱۱) [۷].



شکل ۱-۱: بخشی از آزمایشگاه فشارقوی Siemens - ژنراتور اتصال کوتاه [۷]

در این مجموعه از ژنراتوری با حداکثر خروجی ۶۴۰۰ مگاوات آمپر استفاده شده است. حداکثر جریان اتصال کوتاه تولیدی توسط این ژنراتور، ۲۷۰ کیلوآمپر (پیک) است. همچنین حداکثر ولتاژ در دسترس به‌منظور تست سینتتیک، ۱۱۵۰ کیلوولت است.

قلب این آزمایشگاه فشارقوی از دو ژنراتور مشابه تشکیل شده که ساخته شرکت زیمنس هستند. علاوه بر این، متصل کردن ژنراتور سومی که در آزمایشگاه فشار متوسط واقع شده است، نیز انجام‌شدنی است. دو ژنراتور توان سه‌فاز اتصال کوتاه ۲۸۰۰ مگاوات آمپری دارند که در سمت ثانویه‌ی ترانسفورماتورها اعمال می‌شود. وقتی هر سه ژنراتور به‌صورت موازی متصل شوند، جریان تست ۶۴۰۰ مگاوات آمپری به‌صورت مستقیم قابلیت دستیابی دارد. این میزان متناظر با جریان اتصال کوتاه تک‌قطبی ۱۲۰ کیلوآمپری با منبعی با ولتاژ ۳۵ کیلوولت است. هر دو ژنراتور با دو سیم‌پیچی موازی سه‌فاز در استاتور ساخته شده‌اند تا نیروهای حاصل از جریان ضربه، راحت‌تر کنترل‌پذیر باشند.

همچنین از یک موتور القایی ۳ مگاواتی به‌منظور درایو این ژنراتورها استفاده می‌شود. برای راه‌اندازی ژنراتور از مقاومت‌های راه‌انداز استفاده می‌شود و زمان راه‌اندازی تقریباً ۱۵ دقیقه خواهد بود. ترمز کردن به‌منظور توقف کامل سیستم در حدود ۳۰ دقیقه طول می‌کشد و از طریق مدار ترمز DC حاصل می‌شود.

وزن استاتور ژنراتور اتصال کوتاه ۳۹۰ تن، وزن روتور ۲۲۵ تن و وزن کل ۶۸۰ تن است. گشتاور حاصل از فلاپیول نیز ۱۳۰۰۰ کیلونیوتون است.

از دیگر تجهیزات موجود در این آزمایشگاه می‌توان به ترانسفورماتور اتصال کوتاه با ظرفیت ۲۵۰ مگاوات آمپر اشاره کرد. همچنین تپ‌چنجر ستاره-مثلث برای ژنراتور اتصال کوتاه، کلیدهای ایمنی، میک سوئیچ‌ها، راکتورهای محدودکننده جریان، باس‌بار ولتاژ بالا، سیستم کنترل، مدارهایی به‌منظور انجام تست به روش سینتتیک و ادوات اندازه‌گیری دیجیتال از دیگر امکانات و تجهیزات موجود در این آزمایشگاه هستند [۷].

## ۱-۱۲- آزمایشگاه ICMET

در این آزمایشگاه نیز همانند بسیاری از آزمایشگاه‌های دیگر، تجهیزاتی اعم از ترانسفورماتور اتصال کوتاه، ژنراتور اتصال کوتاه، ژنراتور سنکرون، راکتور و مقاومت برای کنترل جریان اتصال کوتاه، مدارشکن‌های محافظتی، Make Switchها، ایستگاه کمپرسور و سلول تست وجود دارد. تصاویری از این تجهیزات در شکل ۱-۱۲ تا شکل ۱-۱۵ نشان داده شده است [۸].



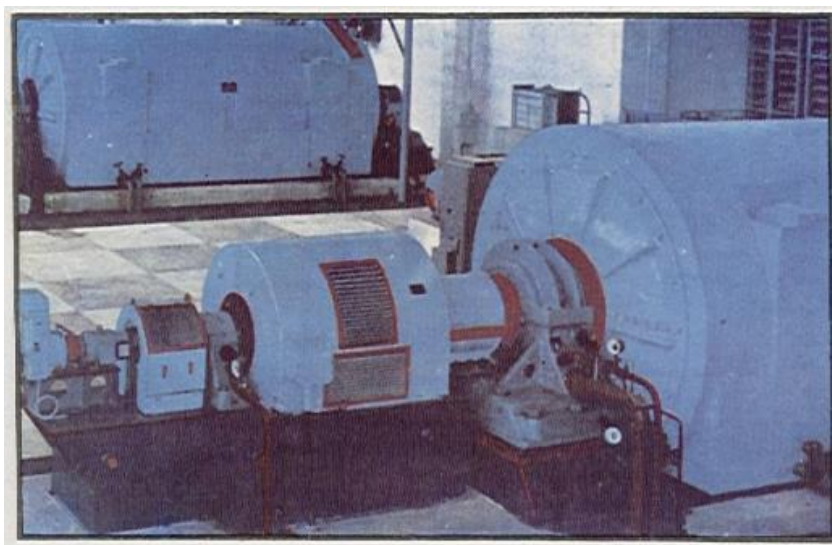
شکل ۱-۱۲: Make Switchهای سرعت بالا از نوع VA-12M؛ ۱۲ کیلوولت؛ ۱۲ کیلوآمپر [۸]



شکل ۱-۱۳: راکتورهای تنظیم‌کننده جریان اتصال کوتاه [۸]



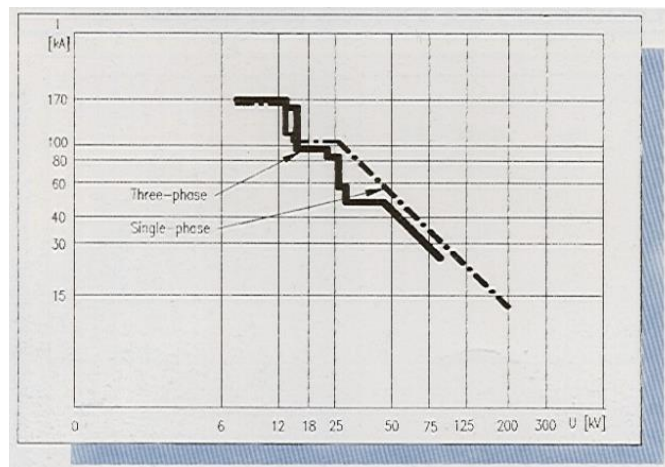
شکل ۱-۱۴: سه ژنراتور اتصال کوتاه ۳۹۰ کیلوولت آمپر، ۴۰۰ ولت که به سه ترانسفورماتور تک‌فاز ۴۰۰ کیلوولت به ۲۵ ولت متصل شده‌اند [۸]



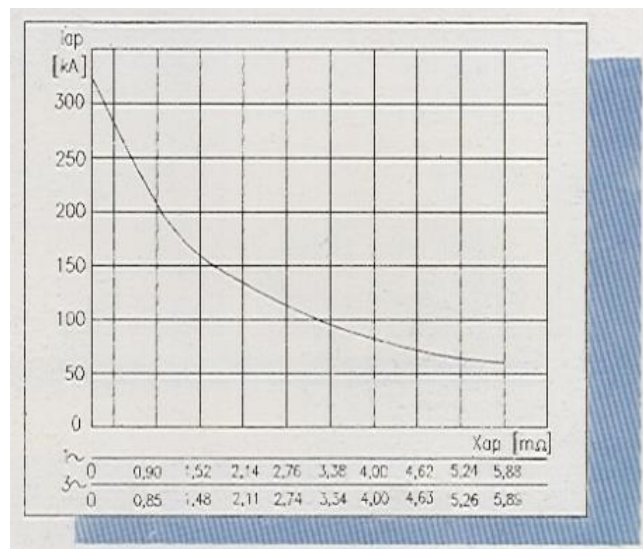
شکل ۱-۱۵: سه ژنراتور اتصال کوتاه از نوع TI-100-2 با ظرفیت ۲۵۰۰ مگاوات آمپر [۸]

در این آزمایشگاه تست‌هایی از قبیل خطای ترمینال، قطع فاز، خطای تک‌خط، جریان‌های سلفی کوچک، جریان‌های خازنی کوچک، زمین‌کردن دوطرفه، جریان‌های نامی، جریان‌های اتصال کوتاه و غیره روی تجهیزاتی اعم از مدارشکن‌های ولتاژ متوسط و ولتاژ بالا، سوئیچ‌های بار، فیوزهای ولتاژ متوسط و ولتاژ بالا، بوشینگ‌ها، موتورها و ولتاژ بالا، رآکتورها و غیره انجام‌شدنی هستند.

پارامترهای تست اتصال کوتاه در این آزمایشگاه، مطابق نمودارهای شکل ۱-۱۶ و شکل ۱-۱۷ تعیین می‌شوند.

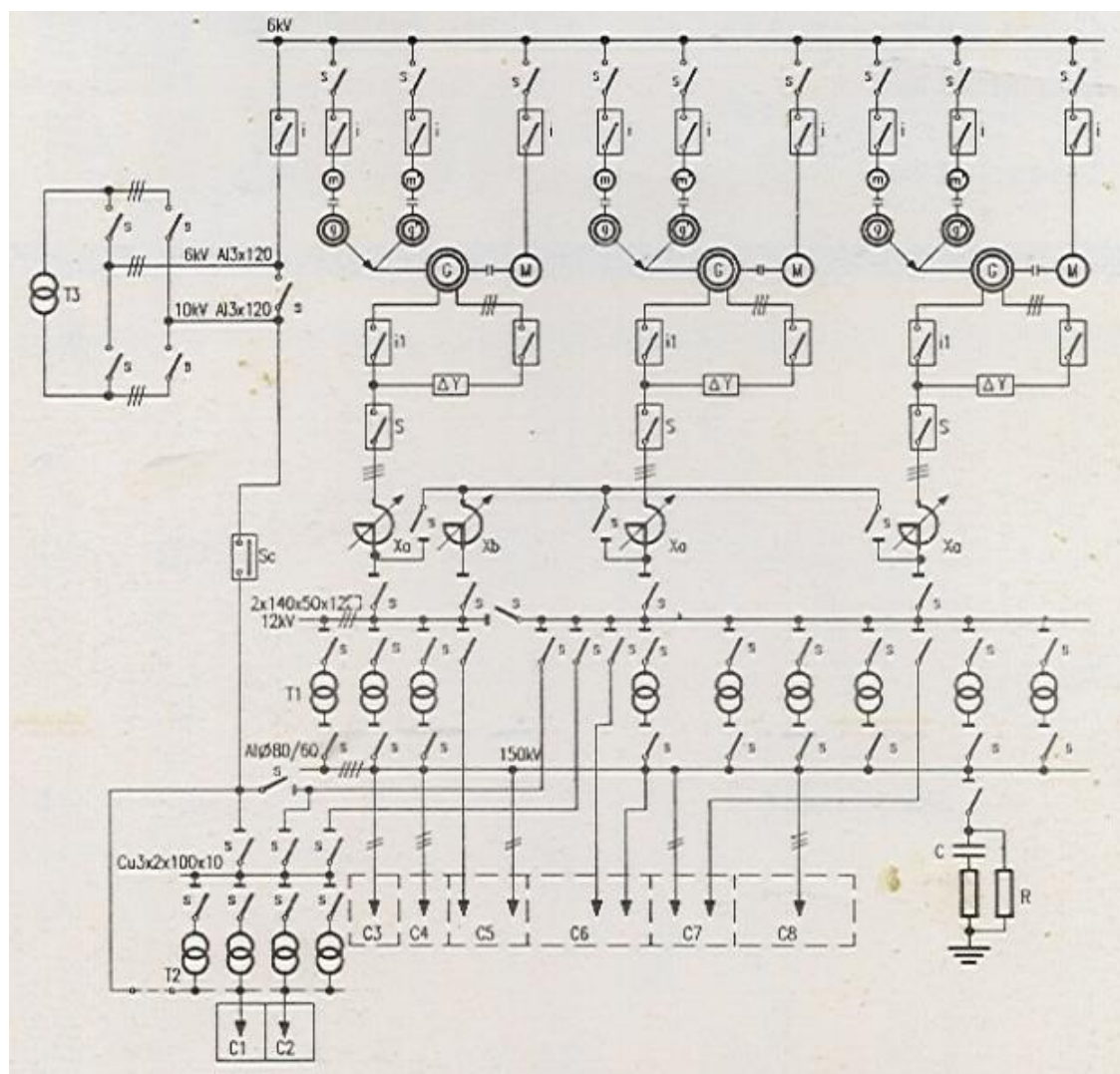


شکل ۱۶-۱: حداکثر مقادیر RMS جریان اتصال کوتاه اعمال شده به کلیدها و مدارشکن‌ها بسته به ولتاژ ریکآوری [۸]



شکل ۱۷-۱: حداکثر مقادیر RMS جریان اتصال کوتاه مجاز بسته به راکتانس تجهیز تحت تست [۸]

همچنین شمای کلی آزمایشگاه و نحوه‌ی جانمایی و اتصال تجهیزات به یکدیگر در شکل ۱۸-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۸: دیاگرام تک‌خطی آزمایشگاه ICMET [۸]

### ۱-۱۳- آزمایشگاه ۱۵۰۰ مگاوات آمپری CPRI هند

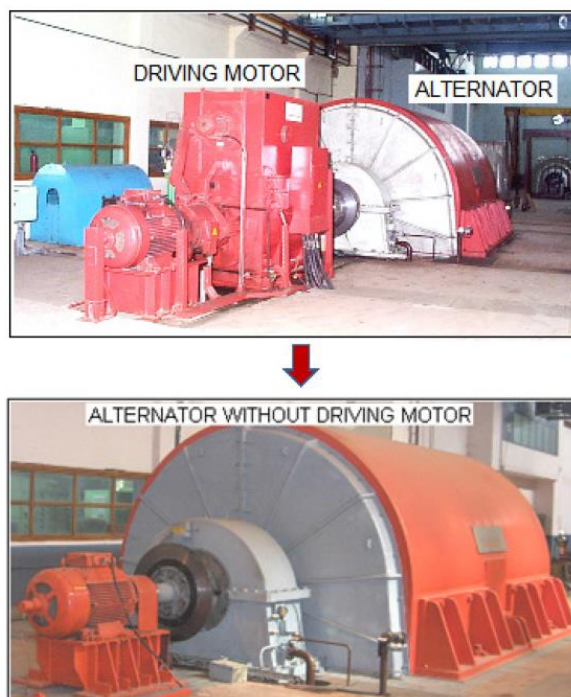
آزمایشگاه ۱۵۰۰ مگاوات آمپری CPRI، مجهز به دو ژنراتور اتصال کوتاه با طراحی سفارشی است که یکی از آنها در سال ۱۹۶۸ توسط شرکت Oerlikon تأمین شده است. ژنراتور دوم نیز در سال ۱۹۹۶ توسط شرکت Alstom تأمین شده است که پس از ۱۰ سال کار با راه‌انداز الکتروموتوری، این سیستم با سیستم راه‌انداز SFC و سیستم تحریک استاتیک جایگزین شده است. راه‌انداز SFC ژنراتور، عملکرد بدون نیاز به الکتروموتور راه‌انداز را به ارمغان آورده است که هزینه تعمیر و نگهداری و تلفات الکتروموتور راه‌انداز را حذف کرده است [۹].



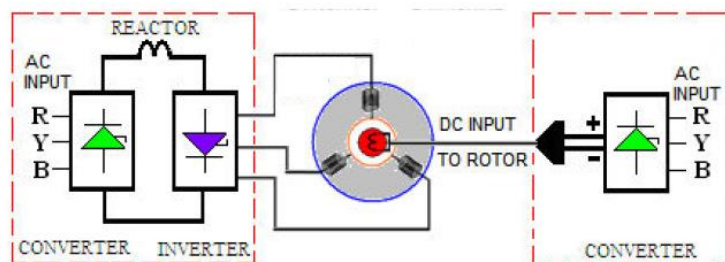
شکل ۱-۱۹: تصویر ژنراتور اتصال کوتاه ۱۵۰۰ مگاوات‌آمپر تأمین‌شده توسط Oerlikon و اتاق کنترل آن در آزمایشگاه CPRI [۹]



شکل ۱-۲۰: تصویر ژنراتور اتصال کوتاه ۱۵۰۰ مگاوات‌آمپر تأمین‌شده توسط Alstom و اتاق کنترل آن در آزمایشگاه CPRI [۹]



شکل ۱-۲۱: تعویض راه‌انداز الکتروموتوری ژنراتور دوم با راه‌انداز SFC [۱۰]



شکل ۱-۲۲: شماتیک مجموعه ژنراتور اتصال کوتاه مجهز به سیستم تحریک استاتیک و راه‌انداز SFC [۱۰]

حذف الکتروموتور راه‌انداز ۲۳۰۰ کیلوواتی، نتایج زیر را در بر داشته است:

- حذف تلفات بادخوری و اصطکاک الکتروموتور
- کاهش لرزش و نویز
- حذف سیستم‌های جانبی الکتروموتور شامل فن خنک‌کننده ۹ کیلوواتی، پمپ روغن و پمپ آب‌خنک‌کن.
- کاهش تعمیرات، نگهداری و هزینه‌های الکتروموتور

در تغییر سیستم راه‌اندازی فوق، ژنراتور فقط با تغذیه جریان ۹۴ آمپر (۴/۵ کیلووات) تا سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه راه‌اندازی می‌شود و در مرحله دوم با تغذیه جریان ۲۳۰ آمپر (۹۵۰ کیلووات)، سرعت آن تا ۳۰۰۰ دور در دقیقه افزایش پیدا می‌کند. به‌کارگیری SFC ضریب قدرت جریان شبکه را به بالای ۰/۸ تا ۰/۹ رسانده است و امکان بازگشت توان در مرحله اتمام تست وجود دارد که منجر به بهبود مصرف انرژی سیستم شده است [۱۰].

## ۱-۱۴- بررسی ژنراتور اتصال کوتاه ساخت شرکت جنرال الکتریک

ژنراتور اتصال کوتاه ۱۶۲۵ مگاوات آمپری ساخت شرکت جنرال الکتریک [۱۱] در سال ۱۹۵۲ راه‌اندازی شده است. توان نامی این ژنراتور اتصال کوتاه، ۱۲۵ مگاوات آمپر است که توان اتصال کوتاه ۱۶۲۵ مگاوات آمپر را در ولتاژ ۱۵/۵ کیلوولت تأمین می‌کند. در ساخت این ژنراتور دو چالش مهار کردن نیروهای وارده بر هادی‌ها به‌علت جریان لحظه‌ای بالا (بالای ۱۰۰ کیلوآمپر) و همچنین امکان حفظ جریان اولیه اتصال کوتاه به‌مدت حدود ۵ سیکل مطرح بوده است که این گزینه نیازمند ثابت زمانی بالا و مقاومت الکتریکی پایین در مدار روتور بوده است.

تعداد شیارهای ژنراتور کمو عریض و عمق آنها حدود ۶۰ درصد شیارهای عادی ژنراتوری انتخاب شده است. بنابراین در این ژنراتورها، بارگذاری حرارتی ژنراتور کمتر از ژنراتورهای متداول است که اینها منجر به کاهش راکتانس سیم‌پیچی و جریان اتصال کوتاه شدیدتر می‌شود.

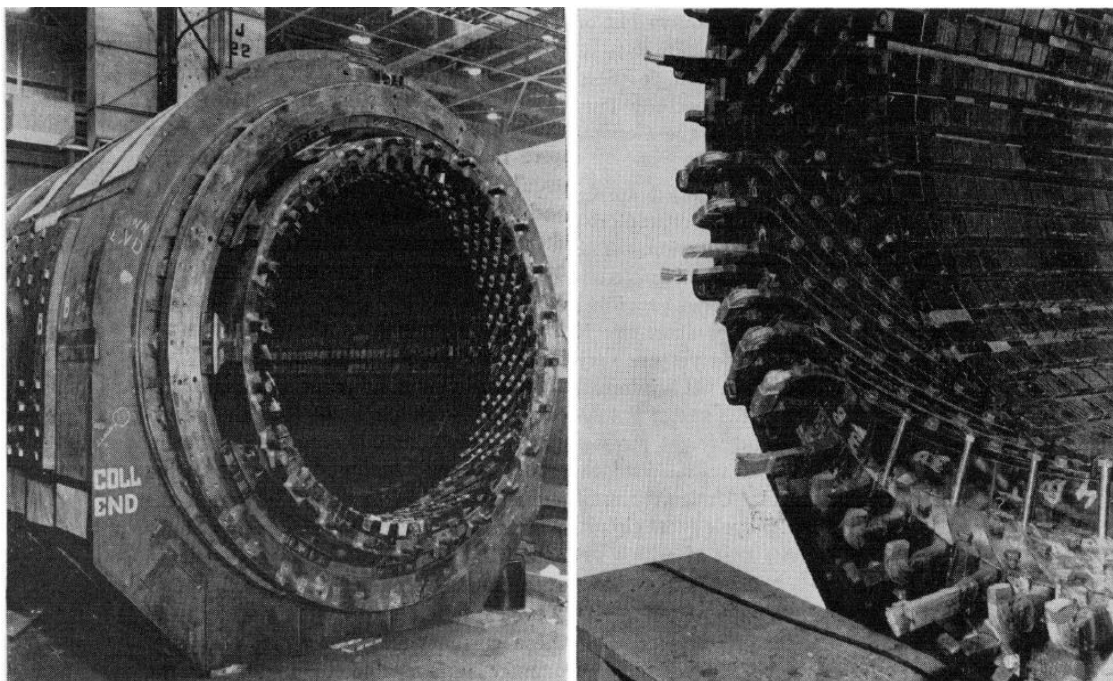
به‌منظور تقویت استحکام مکانیکی سیم‌پیچی انتهایی ژنراتور، از ایده طراحی و ساخت آن به‌صورت استوانه‌ای به‌جای مخروطی استفاده شده است که با توجه به شکستگی کمتر در این حالت، امکان مهار نیروها بیشتر و همچنین راکتانس پراکندگی سیم‌پیچی انتهایی کمتر است.

همچنین در این مطالعه، بررسی‌هایی در خصوص تأثیر اشباع بر جریان اتصال کوتاه انجام شده است که نشان داده است با وجود اینکه اشباع در استحصال جریان بیشتر مفید است، اما روند افت جریان را نیز تسریع می‌کند و این شرایط مطلوب نیست.

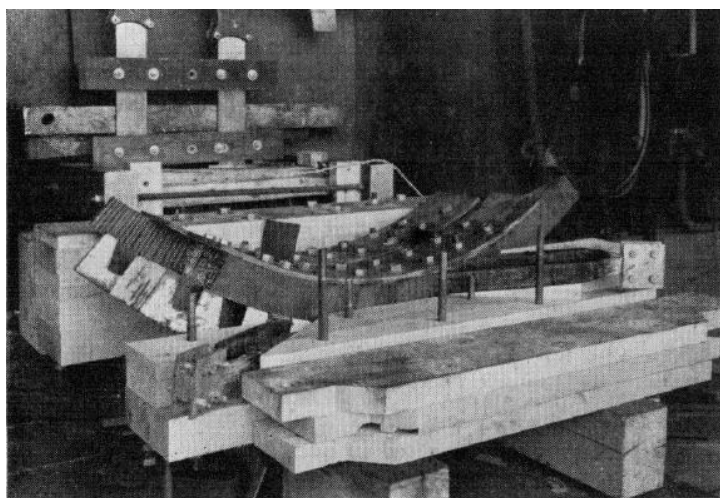
بر روی روتور این ژنراتور نیز یک سیم‌پیچی دمپر با مقاومت بسیار پایین طراحی شده است که امکان شارش جریان‌های قوی برای به‌دست‌آمدن نیروی محرکه مغناطیسی شدید در حین اتصال کوتاه را فراهم می‌کند. سطح مقطع سیم‌پیچی تحریک نیز همانند سیم‌پیچی استاتور کاهش داده شده است گرچه مشخصه تحریک ترانسفورماتور، امکان بهره‌گیری حداکثر از این اصلاح را محدود کرده است.

در شیارهای استاتور این ژنراتور از دو ردیف گوه استفاده شده است، یک ردیف جهت مهارکردن هادی لایه زیرین و یک ردیف در لبه شیار، جهت مهارکردن هادی بالایی که این دو ردیف گوه جهت جلوگیری از آسیب واردکردن نیروهای اتصال کوتاه به عایق هادی‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین یک رینگ کلمپی در انتهای هسته، این لایه‌ها را به‌شدت مهار کرده است که به‌عنوان سازه نگهدارنده سیم‌پیچی انتهایی نیز عمل می‌کند.

در طراحی سازه مکانیکی نگهدارنده سیم‌پیچی انتهایی که به‌شکل استوانه طراحی شده است، از چهار قطاع یک استوانه از جنس ماده عایقی که لایه داخلی آنها به‌صورت شیاردار ساخته شده، استفاده شده است که بسیار شبیه به یک چرخ‌دنده مارپیچی است و هادی‌های انتهایی در داخل شیارهای آن مهار می‌شود. در ساخت این سازه، به‌صورت مجزا تست‌ها بر روی هادی‌های مجزا انجام شده است و جریان‌های ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلوآمپر به دفعات به هادی‌ها اعمال شده است. در نهایت با اعمال جریان‌های بالا، سازه نمونه از بین رفته است (شکل ۱-۲۴).

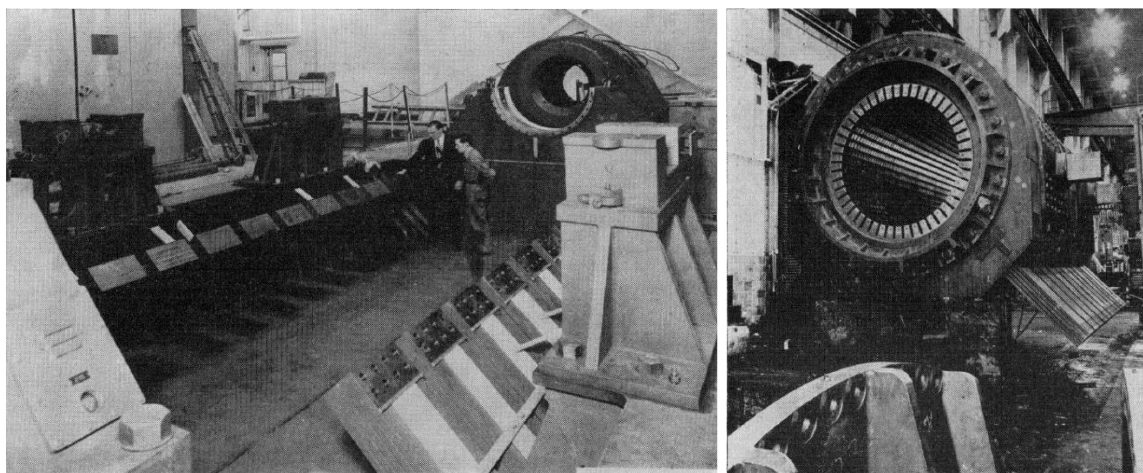


شکل ۱-۲۳: سازه نگهدارنده سیم‌پیچی انتهایی ژنراتور جنرال الکتریک [۱۱]



شکل ۱-۲۴: بستر تست مقاومت سازه نگهدارنده سیم‌پیچی انتهایی [۱۱]

در مدار روتور این ژنراتور یک سیم‌پیچی دمپر با آلیاژ مس در نظر گرفته شده است که به همراه گوه‌های فولادی، وظیفه تأمین مسیر جریان‌های میراکننده را به عهده دارند و در قسمت انتهایی با استفاده از صفحه مسی اتصال کوتاه می‌شوند.



شکل ۱-۲۵: سیستم ضربه‌گیر محفظه ژنراتور جنرال الکتریک [۱۱]

در رابطه با نصب ژنراتور بر روی فندانیسیون، سیستم‌های مختلفی مطالعه شده و در نهایت یک سیستم ضربه‌گیر با فنرهای ۴۵ درجه مطابق شکل ۱-۲۵ انتخاب شده است. این سیستم که برای این کاربرد بسیار جذاب بوده است، برای چرخش زاویه‌ای محفظه عملکرد نرمی دارد و بستر ضربه‌گیری بسیار مناسبی برای همه حالات اتصال کوتاه فراهم کرده است.

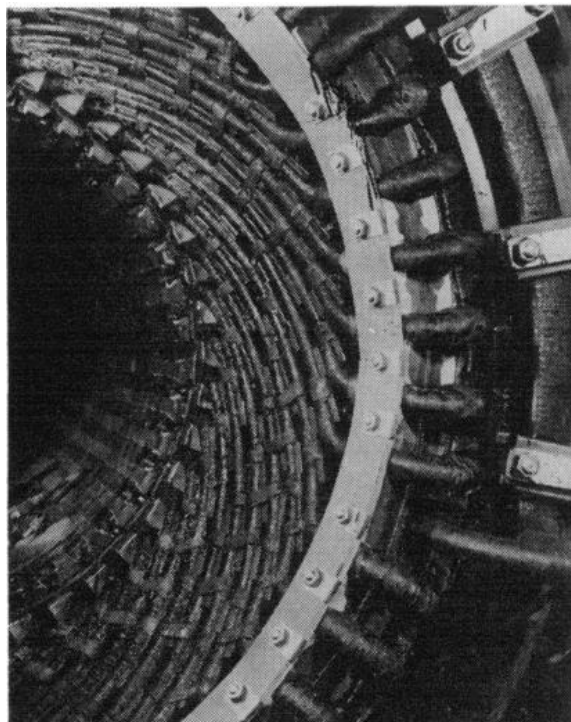
جهت خنک‌کنندگی این ژنراتور نیز از ۴ دمنده الکتروموتوری و دو کولر استفاده شده است که در بالای ژنراتور نصب شده است و در مواقع نیاز روشن می‌شوند. در رابطه با سیستم بیرینگ ژنراتور نیز جهت جلوگیری از شارش جریان گردشی بین روتور و استاتور ناشی از ناهم‌محوری لحظه‌ای روتور در لحظه اتصال کوتاه، نیاز به ایزوله کردن روتور و استاتور وجود دارد. بدین ترتیب استفاده از بیرینگ پدستال در این طرح در نظر گرفته شده است. همچنین

جهت جلوگیری از القای جریان در این بیرینگ، پوسته‌های بیرینگ از مواد غیرمغناطیسی ساخته شده است. راه‌انداز این سیستم نیز یک الکتروموتور القایی ۳۰۰۰ اسب بخار بوده است که از مشکلات آن، انتقال شوک‌های مکانیکی از طریق کوپلینگ با روتور ژنراتور بوده است.

## ۱-۱۵- بررسی ژنراتور اتصال کوتاه ساخت شرکت Allias-Chalmers

ژنراتور ساخت این شرکت که در سال ۱۹۵۱ اجرایی شده است، امکان تأمین توان ۱/۲۸ مگاوات‌آمپر توان اتصال کوتاه لحظه‌ای را دارد. این ژنراتور دو تفاوت عمده با یک ژنراتور معمولی دارد. گزینه اول، تفاوت در چگالی شار است که در این ماشین، امکان افزایش ولتاژ ترمینال تا ۱۶۰ الی ۱۸۰ درصد مقدار عادی وجود دارد. با افزایش جریان اتصال کوتاه، نیروهای سیم‌پیچی انتهایی ژنراتور با توان ۲ افزایش می‌یابد و جریان نیز با افزایش ولتاژ افزایش می‌یابد. این بدین معنی است که نیروهای مکانیکی وارد بر سیم‌پیچی این ژنراتور به‌علت افزایش شار ماشین، با توان ۳ افزایش خواهد یافت. گزینه دوم کاهش عمق شیار استاتور و افزایش ظرفیت جریان اتصال کوتاه ژنراتور است. در این ژنراتور به‌مقدار کمتر از نصف حالت عادی کاهش داده شده است که منجر به کاهش راکتانس ژنراتور به حدود ۱/۲ تا ۲/۳ مقدار اولیه شده است [۱۲].

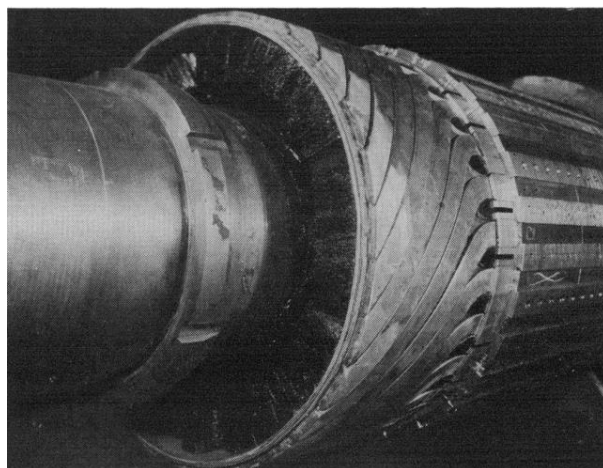
مقاوم‌سازی سیم‌پیچی یک ژنراتور معمولی دوقطبی، به‌علت سیم‌پیچی انتهایی بلند آن و راکتانس کم، سخت‌تر از ژنراتور با دیگر سرعت‌ها است. سیم‌پیچی انتهایی این ژنراتور همانند یک ژنراتور معمولی ولی کامل‌تر به‌صورت شکل ۱-۲۶ انجام شده است. حفاظت هادی‌های داخل شیارهای ژنراتور نیز با استفاده از گوه‌های معمولی انجام شده است. سیم‌پیچی انتهایی این ژنراتور به‌صورت مخروطی همانند یک ژنراتور معمولی است.



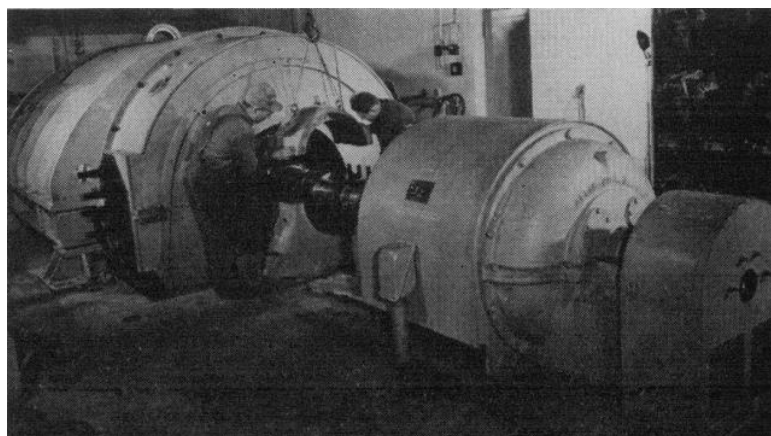
شکل ۱-۲۶: سازه نگهدارنده سیم‌پیچی انتهایی ژنراتور شرکت Allias-Chalmers [۱۲]

دمپر استفاده‌شده در این ژنراتور نیز زیر گوه شیارهای روتور و بر روی سیم‌پیچی تحریک قرار داده شده است و اتصال الکتریکی با گوه‌ها و رینگ نگهدارنده دارد. مقاومت این سیم‌پیچی بسیار پایین است و از سوختن گوه‌های شیارها به علت عبور جریان القایی جلوگیری می‌کند.

با توجه به شوک‌های مکانیکی شدید ژنراتور، این ژنراتور بر روی یک سازه ناودانی H شکل انعطاف‌پذیر نصب شده است تا امکان رزونانس با گشتاور ضربانی تک‌فاز یا هارمونیک حذف شود.



شکل ۱-۲۷: سیم‌بندی دمپر ژنراتور [۱۲]



شکل ۱-۲۸: نصب ژنراتور بر روی فندانسیون انعطاف‌پذیر H شکل [۱۲]

## ۱-۱۶- بررسی ژنراتور اتصال کوتاه شرکت Westinghouse Electric

این ژنراتور در سال ۱۹۶۳ پیاده‌سازی شده است و در زمان خود بزرگ‌ترین ژنراتور اتصال کوتاه جهان بوده است. ژنراتور امکان ۴ اتصال کوتاه موفق با توان ۳۰۰۰ مگاوات آمپر سه‌فاز یا ۱۵۰۰ مگاوات آمپر تک‌فاز را با توان نامی ۱۵۰ مگاوات آمپر دارد.

در طراحی این ژنراتور، حداکثر مقدار مجاز برای راکتانس زیرگذر ژنراتور ۵ درصد و حداکثر ۳ درصد با فرض وجود ترانسفورماتور اتصال کوتاه بوده است. راکتانس گذرای ژنراتورهای متعارف، در حدود ۱۰ تا ۲۵ درصد است.

بنابراین در طراحی این ژنراتور بایستی ملاحظات در نظر گرفته می‌شد تا بتوان به راکتانس‌های کم دست پیدا کرد. شار تولیدی در ژنراتور ناشی از جریان‌های اتصال کوتاه، تمایل به عبور از راکتانس‌های ناشی ژنراتور دارد. بنابراین تا حد امکان بایستی راکتانس فاصله هوایی ژنراتور کم و راکتانس‌های ناشی ژنراتور کاهش یابد. مهم‌ترین فاکتور در کاهش راکتانس گذرا، کاهش پهنای مسیرهای شار ناشی و افزایش طول آنها است. پهنای این مسیرها به شدت بستگی به عمق شیار استاتور و فاصله هوایی دارد. طول آن نیز با گام قطبی ژنراتور یا سرعت آن در ارتباط است.

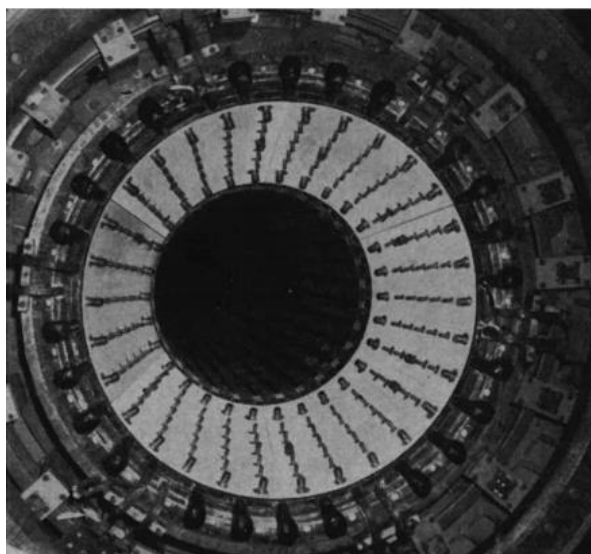
در طرف دیگر محدودیت‌های مکانیکی، سرعت ژنراتورهای قطب برجسته را به دوسوم ژنراتورهای قطب استوانه‌ای محدود می‌کند. توربوژنراتورها را می‌توان با وزن حدود دوسوم مواد فعال و حدود نصف مواد کل نسبت به ژنراتورهای قطب برجسته، ساخت.

بین انتخاب یک ژنراتور ۴ قطب و یک ژنراتور ۲ قطب نیز برای اینکه گام قطبی و مواد فعال یکسانی داشته باشند، نیاز است که قطر ژنراتور ۴ قطب، دو برابر ژنراتور دیگر باشد. همچنین طول سیم‌پیچی انتهایی آنها برابر ولی حجم آن دوبرابر خواهد بود. محدودیت‌های تنش مکانیکی در سرعت بالا، ساخت روتور در این قطر را نیز محدود می‌کند. به‌طور کلی یک مصالحه می‌تواند ساخت ژنراتور اتصال کوتاه با یک ژنراتور ۴ قطب با حدود ۶۰ درصد قطر بیشتر، ۳۰ درصد حجم سیم‌پیچی انتهایی بیشتر و ۲۰ درصد مواد فعال استفاده‌شده بیشتر باشد.

در طراحی بیشتر توربوژنراتورها، امکان دفع رزونانس در فرکانس‌های ۶۰ و ۱۲۰ هرتز در نظر گرفته می‌شود. اما در طراحی ژنراتور اتصال کوتاه، امکان دفع در فرکانس‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ نیز بایستی در نظر گرفته شود.

راه‌اندازی ژنراتور با استفاده از یک الکتروموتور القایی روتورسیم‌پیچی‌شده صورت می‌گیرد که به کمک مقاومت‌هایی که در مسیر روتور آن قرار می‌گیرد، امکان راه‌اندازی، کنترل سرعت و ترمز وجود دارد. بیرینگ ژنراتور از نوع پدستال بوده و سیستم خنک‌سازی آن هواخنک می‌باشد که به کمک یک دمنده سانتریفیوژی و یک کولر نصب‌شده در دو انتها عمل می‌کند.

به‌منظور کاهش راکتانس‌های ناشی، شیارهای استاتور عریض و کم‌عمق در نظر گرفته شده است و در قسمت انتهایی سیم‌پیچی نیز ساختار با کمترین امکان نشت پیاده‌سازی شده است.

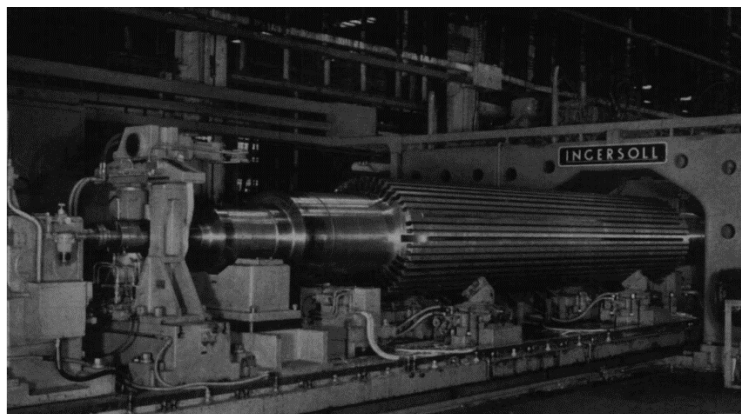


شکل ۱-۲۹: ساختار مکانیکی نگهدارنده سیم‌پیچی انتهایی

به‌منظور دفع شوک‌های مکانیکی اتصال کوتاه ژنراتور، از یک سیستم نوسان‌گیر متشکل از فنرهای صفحه‌ای استفاده شده است که امکان چرخش محفظه به‌صورت محدود حول خط محور آن را می‌دهد. این فنرها در ۵ بسته در گوشه‌های مختلف ژنراتور نصب شده است.

سازه نگهدارنده سیم‌پیچی انتهایی ژنراتور نیز در شکل ۱-۲۹ نشان داده شده است که به‌صورت کلمپی، سیم‌پیچی انتهایی را مهار می‌کند. طراحی این سازه به‌گونه‌ای بوده است که امکان شارش هوای خنک‌کننده به بخش‌های مختلف سیم‌پیچی را محدود نکند.

روتور این ژنراتور دارای دو سیم‌پیچی تحریک و دمپر است. سیم‌پیچی تحریک ژنراتور، مشابه سیم‌پیچی تحریک یک ژنراتور متعارف است، با این تفاوت که عایق سیم‌پیچی این ژنراتور، امکان اضافه‌تحریک تا ۱۵۰۰ ولت را فراهم می‌کند. مدار دمپر نیز شامل گوه شیپارهای روتور (که هم وظیفه دمپر و هم وظیفه محافظت هادی شیپار را دارد)، میله‌های دمپر مقابل قطب‌ها، نوارهای متصل‌کننده و اتصالات انتهایی است. با توجه به دوکاربری گوه‌های شیپار، نیاز است که این گوه‌ها در جهت شعاعی، سیم‌پیچی تحریک را به‌صورت کاملاً فشرده مهار کند ولی در جهت محوری که با توجه به عبور جریان و انبساط حرارتی، تا حدی آزادی حرکت داشته باشد. به‌همین دلیل گوه‌های شیپار روتور نیز همانند گوه‌های شیپارهای استاتور، به‌صورت تکه‌تکه ساخته و با استفاده از نوارهایی به یکدیگر وصل می‌شوند تا امکان عبور جریان پیوسته وجود داشته باشد. اتصال انتهایی این سیم‌پیچی نیز با استفاده از رینگ نگهدارنده است که هم وظیفه محافظت از سیم‌پیچی انتهایی روتور در برابر نیروی سانتریفیوژی و هم وظیفه اتصال با مقاومت پایین انتهایی سیم‌پیچی دمپر را بر عهده دارد.

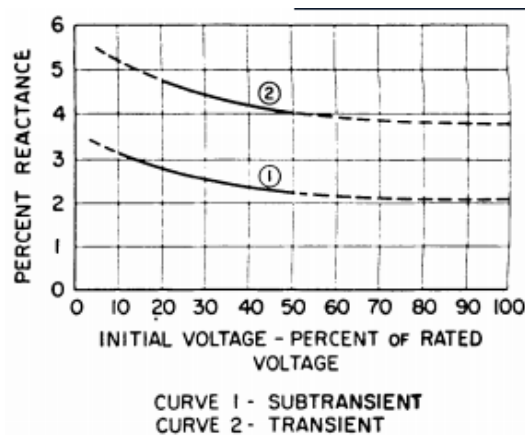


شکل ۱-۳۰: روتور ژنراتور در دستگاه شیپارزن

کلکتور تحریک روتور از نوع متداول که با استفاده از حلقه‌های شیپاردار مارپیچی بر روی شفت سوار شده است و دارای یک سیستم تهویه مجزا است، می‌باشد. جاروبک و کلکتور این سیستم تغذیه تحریک، امکان اضافه‌تحریک سیم‌پیچی روتور را فراهم می‌کند. همچنین جاروبک‌ها انعطاف‌پذیر بوده و در زمان‌هایی که نیاز به تغذیه تحریک در سرعت‌های بالا نباشد، از خوردگی جاروبک محافظت می‌شود.

عایق‌بندی خاصی در سیستم تحریک ژنراتور به کار گرفته شده است تا امکان افزایش ناگهانی تحریک تا ۳۰۰۰ ولت، در زمان کوتاهی قبل از اتصال کوتاه را فراهم کند. این اضافه‌تحریک، امکان افزایش شار در زمان بسیار کوتاهی قبل از اتصال کوتاه را ایجاد می‌کند که می‌تواند با کاهش سریع جریان اتصال کوتاه مقابله کند.

راکتانس‌های ژنراتور و ثابت‌های زمانی آن، مطابق با مقادیر محاسبه‌شده بوده است ولی تنها ثابت زمانی زیرگذرای ژنراتور، اندکی کمتر از مقدار مورد انتظار بوده است. در شکل ۱-۳۱ رابطه راکتانس‌های ژنراتور با درصد ولتاژ اولیه ژنراتور نشان داده شده است.



شکل ۱-۳۱: رابطه راکتانس‌های ژنراتور با درصد ولتاژ اولیه ژنراتور

## ۱-۱۷- بررسی ژنراتور اتصال کوتاه ۸۸۸۰ مگاوات آمپری آزمایشگاه Toshiba

شرکت Toshiba اولین ژنراتور اتصال کوتاه خود را با ظرفیت ۷۰۰ مگاوات آمپر در سال ۱۹۳۸ و در تکمیل آن مطالعه، یک ژنراتور اتصال کوتاه با ظرفیت ۳۶۱۰ مگاوات آمپر در سال ۱۹۵۵ و ژنراتور ۷۴۰۰ مگاوات آمپر در سال ۱۹۶۴ طراحی و ساخته است. در سال ۲۰۰۰ نیز یک ژنراتور اتصال کوتاه ۱۶۰۳ مگاوات آمپری برای آزمایشگاه توان بالای LG کره جنوبی و در سال ۲۰۰۱، ژنراتور ۸۸۸۰ مگاوات آمپری را برای آزمایشگاه خود طراحی و ساخته است [۱۳].

در مطالعه پیش رو، دو ژنراتور ۱۶۰۳ و ۸۸۸۰ مگاوات آمپری بررسی شده‌اند. هر دوی این ژنراتورها به سیستم اضافه‌تربیک مجهز هستند. به‌طوری که ژنراتور اول تا ۱۰ پریونیت و ژنراتور دوم تا ۵ پریونیت امکان افزایش ولتاژ تحریک دارد. چالش ساخت این ژنراتورها، طراحی با حداکثر جریان اتصال کوتاه و نگه‌داشتن این جریان‌ها به مدت ۳ تا ۵ سیکل پس از اتصال کوتاه بوده است.

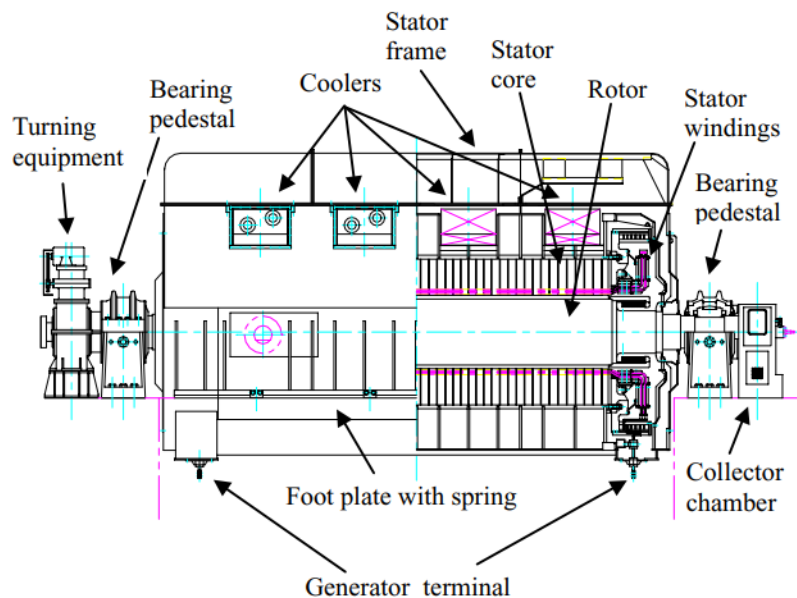
جدول ۱-۱: مقایسه پارامترهای یک ژنراتور متعارف و یک ژنراتور اتصال کوتاه [۱۳]

| مشخصه       | مقدار برای ژنراتور متداول | مقدار برای ژنراتور اتصال کوتاه ۸۸۸۰ مگاوات آمپر |
|-------------|---------------------------|-------------------------------------------------|
| جریان       | $X_d''$ (اهم)             | ۰/۱۶۹                                           |
| اتصال کوتاه | $X_d'$ (اهم)              | ۰/۱۳۵                                           |
|             |                           | ۰/۰۱۹۶                                          |
|             |                           | ۰/۰۲۹۸                                          |

|                                                                      |                                                |                                                         |               |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------|
| ۰/۵۹                                                                 | ۱/۰                                            | Td' (ثانیه)                                             | افت سرعت      |
| ۰/۰۱۶                                                                | ۰/۰۲۷                                          | Td'' (ثانیه)                                            |               |
| ۲/۰                                                                  | ۱/۰                                            | جریان سطح روتور (پریونیت)                               |               |
| ۱/۹                                                                  | ۱/۰                                            | نیروی الکترومغناطیسی (پریونیت)                          |               |
| کمتر از ۵ درصد در ۳ سیکل پس از اتصال کوتاه                           | عملکرد پیوسته                                  | ثابت اینرسی (پریونیت)                                   | شرایط عملکردی |
| ۱/۲                                                                  | ۱/۰                                            |                                                         |               |
| - عملکرد متناوب برای اتصال کوتاه<br>- عملکرد پیوسته در ولتاژ ۵۰ درصد | - عملکرد پیوسته در بار کامل                    | چگالی جریان سیم‌پیچی استاتور<br>(آمپر بر میلی‌متر مربع) |               |
| مقدار اولیه در اتصال کوتاه:<br>۳۶۶                                   | عملکرد پیوسته:<br>۸/۶                          | جریان تحریک (آمپر بر میلی‌متر مربع)                     |               |
| - در ۵۰ درصد ولتاژ: ۳/۰<br>- در ۱۰۰ ولتاژ: ۶/۷                       | عملکرد پیوسته:<br>(خنک‌کننده هیدروژنی)<br>۱۲/۷ |                                                         |               |

در جدول ۱-۱ مقایسه‌ای بین پارامترهای ژنراتور ۸۸۸۰ مگاوات آمپری Toshiba با یک ژنراتور متعارف ۱۰۰۰ مگاواتی انجام شده است. از مقایسه فوق نتیجه می‌شود که بارگذاری مغناطیسی بالاتر و راکتانس نشتی کمتر شیارها در ژنراتور اتصال کوتاه، منجر به کم‌تر شدن راکتانس‌های گذرای این ژنراتور شده است.

ساختار ژنراتور ۸۸۸۰ مگاوات آمپری در شکل ۱-۳۲ نشان داده شده است که از این شکل مشاهده می‌شود، بدنه ژنراتور به کمک فنرهای مارپیچی به فندانسیون مجموعه متصل است تا شوک‌های مکانیکی اتصال کوتاه را دفع کند. در طرف دیگر ۴ فن خنک‌کننده به‌عنوان سیستم خنک‌کننده ژنراتور تعبیه شده است و بیرینگ‌های روتور از نوع پدستال در نظر گرفته شده است تا شوک‌های بدنه ژنراتور به روتور منتقل نشود.



شکل ۱-۳۲: ساختار ژنراتور ۸۸۸۰ مگاوات آمپری اتصال کوتاه شرکت Toshiba [۱۳]

در طراحی الکتریکی این ژنراتور سه تصمیم مهم گرفته شده است. این تصمیم‌ها، بارگذاری مغناطیسی قوی جهت کاهش ضریب راکتانس، شیارهای کم عمق و عریض جهت کاهش راکتانس پراکندگی و در نهایت کاهش مقاومت سیم‌پیچی تحریک است.

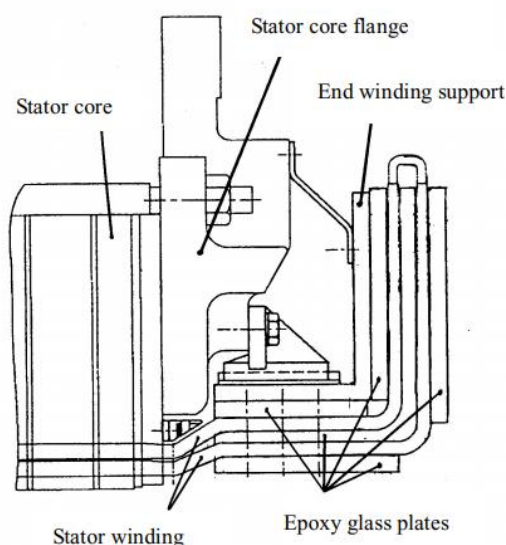
طراحی مغناطیسی این ژنراتور در مرحله طراحی عددی، به دقت انجام شده است تا امکان بارگذاری مغناطیسی بالاتر هسته روتور و استاتور وجود داشته باشد. زیرا که در ژنراتورهای اتصال کوتاه، این بارگذاری، حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد بیشتر از توربوژنراتورهای معمولی است.

به منظور افزایش ثابت زمانی اتصال کوتاه، سطح مقطع سیم‌پیچی تحریک تا حد امکان افزایش داده شده است. اما تقویت این ویژگی با استحکام مکانیکی مواد شفت روتور و همچنین چگالی شار محدود می‌شود. سطح مقطع این سیم‌پیچی به گونه‌ای انتخاب شده است که امکان تحمل ولتاژ ۱۰۰ درصد را به مدت ۱۰ دقیقه و ولتاژ ۵۰ درصد به صورت پیوسته دارا باشد.

وقوع اتصال کوتاه منجر به ایجاد یک شار آسنکرون در سطح روتور شده و جریان‌های سطحی سنگینی ایجاد می‌کند که می‌تواند به روتور آسیب بزند. بدین منظور در این ژنراتور یک سیم‌پیچی دمپر در زیر گوه‌های شیار روتور تعبیه شده است. سطح مقطع این میله‌ها حدود ۵ برابر سطح مقطع دمپرهای معمولی در نظر گرفته شده است.

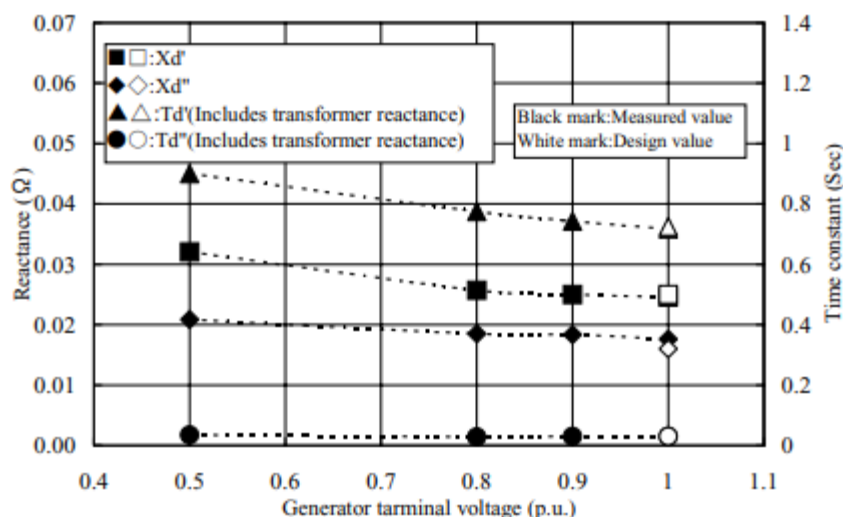
در طراحی مکانیکی این ژنراتورهای اتصال کوتاه، شرکت Toshiba از تجارب قبلی خود استفاده کرده است. نیروهای الکترومغناطیسی وارده بر یک ژنراتور اتصال کوتاه ۱۶۰۳ مگاوات آمپری، به اندازه نیروهای وارده بر یک ژنراتور معمولی ۵۰۰ مگاواتی است. در خصوص ژنراتور اتصال کوتاه ۸۸۸۰ مگاوات آمپری نیز این نیروها بزرگتر از ۱/۵ برابر نیروهای ژنراتور معمولی ۱۰۰۰ مگاواتی خواهد بود. بر اساس این تجربه، مشخصه مواد و شکل سازه‌ها مانند گوه‌ها و بلوک‌های عایقی با تست و تحلیل انتخاب شده است.

بین هادی‌های سیم‌پیچی انتهایی ژنراتور از بلوک‌های عایقی در کل مسیرها استفاده شده است و صفحات اپوکسی مابین لایه‌های سیم‌پیچی در دو طرف آنها قرار گرفته و آنها را به شدت مهار کرده و با استفاده از یک فلنج به سطح هسته استاتور وصل شده است (شکل ۱-۳۳).



شکل ۱-۳۳: سازه نگهدارنده سیم‌پیچی انتهایی [۱۳]

در شکل ۱-۳۴ راکتانس‌های گذرای ژنراتور و ثابت‌های زمانی آن نشان داده شده است که مشاهده می‌شود مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر طراحی مطابقت دارد. همچنین در این منحنی مشاهده می‌شود که کاهش ولتاژ ترمینال ژنراتور منجر به افزایش این پارامترها می‌شود.



شکل ۱-۳۴: تغییرات راکتانس‌های گذرا و ثابت‌های زمانی در ولتاژهای پایین ژنراتور [۱۳]



شکل ۱-۳۵: ژنراتورهای اتصال کوتاه شرکت Toshiba، ۱۶۰۳ مگاوات آمپر سمت چپ، ۸۸۸۰ مگاوات آمپر سمت راست [۱۳]

## ۱-۱۸- انتخاب ساختار مناسب سیستم ژنراتور اتصال کوتاه

در خصوص ژنراتور اتصال کوتاه، در فصل‌های آتی، امکان ساخت این ژنراتور از ژنراتورهای مستعمل بررسی می‌گردد و در صورت مثبت بودن نتیجه چنین ایده‌ای، طراحی و ساخت یک ژنراتور اتصال کوتاه جدید در ساختار این سیستم تست حذف می‌گردد. همچنین در صورتی که امکان افزایش جریان نامی ژنراتور با کاهش ولتاژ نامی با تغییر تعداد دور سیم‌پیچی در چنین طرحی وجود نداشته باشد (در صورت تصمیم بر بالابودن ولتاژ نامی ژنراتور نسبت به ولتاژ پیشنهادی ۱/۱۳ کیلوولتی)، در ساختار ژنراتور، استفاده از ترانسفورماتور اتصال کوتاه به منظور افزایش جریان خروجی پیش‌بینی می‌شود.

در خصوص سیستم راه‌انداز ژنراتور نیز طبق بررسی‌های صورت گرفته در این فصل، ساختار الکتروموتور و درایو، ساختار الکتروموتور روتورسیم‌پیچی شده با مقاومت راه‌انداز و ساختار SFC نمونه‌های استفاده شده در آزمایشگاه‌های موجود در جهان است. سیستم نوع سوم به دلیل قدیمی بودن فناوری و نیاز به تعمیرات و نگهداری بالا و همچنین تلفات بالای آن، به طور قطع از گزینه‌های پیش رو خارج است. مقایسه طرح اول و دوم نیز بدین شرح است که هزینه یک دستگاه SFC در مقایسه با درایو کنترل دور در توان یکسان، به دلیل استفاده از کلیدهای ترستوری در مقایسه با کلیدهای IGBT، به مراتب کمتر است و سیستم کنترل ساده‌تری دارد. از طرفی در طرح اول نیاز به الکتروموتور نیز حذف می‌شود که این گزینه هزینه‌های خرید الکتروموتور، تعمیر و نگهداری، سیستم کوپلینگ و تلفات را نیز حذف می‌کند. بنابراین استفاده از سیستم SFC که تجربه استفاده از آن در آزمایشگاه CPRI نیز وجود دارد، در این پروژه پیشنهاد می‌شود.

در خصوص سیستم تحریک نیز با توجه به قابلیت‌های کنترلی سریع و نگهداری پایین سیستم‌های تحریک استاتیکی، این نوع سیستم تحریک انتخاب می‌گردد. در صورت زیاده‌بودن سقف ولتاژ لازم نیز، می‌توان از سیستم تحریک ۶ پالسه استفاده کرد، ولی سیستم‌های تحریک ۱۲ پالسه، علاوه بر امکان دستیابی به سقف ولتاژ بالاتر، ضریب قدرت و ضریب اعوجاج هارمونیکی بهتری ارائه می‌کنند. بنابراین این ویژگی در مرحله انتخاب مشخصات فنی سیستم تحریک در مرحله اجرا، انتخاب می‌شود.

در خصوص ظرفیت لازم ذخیره انرژی اتصال کوتاه نیز، در صورت کافی نبودن ممان اینرسی ژنراتور، بایستی استفاده فلاپیول به ظرفیت لازم، پیش‌بینی شود که این نکته در فصل‌های آتی بررسی می‌شود.

## ۱-۱۹- نتیجه‌گیری

در این فصل مطالعه‌ای در خصوص تست اتصال کوتاه و روش‌های اجرای آن و سایر ویژگی‌های مربوط بررسی شد. سپس از بین این روش‌ها تمرکز بر روی ژنراتور اتصال کوتاه قرار گرفت و مطالعاتی که در این زمینه انجام شده است و چالش‌های ساخت و اجرای این سیستم بررسی شدند. همچنین چندین نمونه آزمایشگاه اتصال کوتاه موجود مطالعه شد و نکات اجرایی آنها برداشت شد.

## **فصل دوم**

**شناسایی و بررسی سازندگان و تأمین کنندگان اجزای  
سیستم ژنراتور اتصال کوتاه**

## ۲-۱- مقدمه

در مطالعه مروری فصل گذشته، تجهیزات سیستم ژنراتور اتصال کوتاه شناسایی شدند و در فصل‌های آینده، تخمینی از مشخصات فنی هر تجهیز و فعالیت‌های لازم در خصوص طراحی و بازسازی و یا ساخت و خرید آنها ارائه خواهد شد. در این فصل، شرکت‌های مرتبط با اجزای این سیستم، اعم از طراحی، ساخت، بازسازی و تأمین بررسی و جمع‌آوری می‌شود.

## ۲-۲- سازندگان، تعمیرکاران و تأمین‌کنندگان حوزه ژنراتور

### ۲-۲-۱- شرکت توربوژنراتور شاهرود

شرکت توربوژنراتور شاهرود تجربه دو دهه فعالیت در زمینه طراحی، ساخت و بازسازی انواع ماشین‌های الکتریکی فشارقوی و فشارضعیف و ژنراتورهای نیروگاهی را داشته است که در زمینه تأمین سیستم ژنراتور اتصال کوتاه، با توجه به مصادیق زیر، امکان ارائه خدمات در زمینه طراحی مجدد، ساخت و نصب شینه‌های ژنراتور، بازسازی شفت، محفظه و بیرینگ و همچنین کویلینگ ژنراتور را دارد.



شکل ۲-۱: تصاویری از فعالیت‌های ساخت ژنراتور در شرکت توربوژنراتور شاهرود

### • خدمات فنی مهندسی

- طراحی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی الکترومغناطیسی و استاتیکی و دینامیکی ماشین‌های الکتریکی و همه قطعات مکانیکی
- مهندسی معکوس انواع ماشین‌های الکتریکی و بازطراحی با توجه به درخواست کارفرما
- طراحی و مدلینگ قطعات یدکی الکتروموتورها
- مشاوره در خرید، تأمین، نصب و بهره‌برداری و عیب‌یابی ماشین‌های الکتریکی
- برگزاری دوره‌های آموزشی مرتبط با عیب‌یابی و نگهداری ماشین‌های الکتریکی
- تغییر در طراحی الکتریکی و مکانیکی اجزاء مختلف الکتروموتور مانند ولتاژ تغذیه، نوع خنک‌کنندگی، سرعت خروجی، درجه حفاظت (IP) و ... با هدف افزایش راندمان و تغییر در مشخصات خروجی

### • ساخت ماشین‌های الکتریکی

- توانایی ساخت شینه‌های ژنراتورهای نیروگاهی
- توانایی کامل در ساخت الکتروموتورهای LV، MV، HV تا ۱۰ مگاوات
- توانایی در ساخت ماشین‌های الکتریکی جریان مستقیم (DC) تا ۱۰۰۰۰ اسب بخار
- ساخت ترانسفورماتورهای توزیع و ترانسفورماتور با کاربردهای خاص تا سطح ولتاژ ۶۰ کیلوولت
- ساخت ماشین‌های الکتریکی خاص مانند BLDC، Core Less Motor و نیروگاهی
- ساخت ماشین‌های الکتریکی انحصاری برای صنایع ریلی، نفت و گاز، صنایع دریایی و صنعت حفاری
- ساخت قطعات خاص مکانیکی کاربردی در صنایع مختلف
- ساخت انحصاری استیرر (همزن مغناطیسی) کاربردی در صنایع فولاد
- ساخت ترمزهای برقی کاربردی در صنایع نفت و گاز
- ساخت مگنت‌های مختلف کاربردی در صنایع فولاد
- توانایی ساخت واریاک و رآکتور کاربردی در راه‌اندازی الکتروموتورهای مختلف
- **بازسازی و سرویس ماشین‌های الکتریکی**
- بازسازی و سرویس ماشین‌های الکتریکی AC با فشار متوسط و فشارقوی
- بازسازی و سرویس ماشین‌های الکتریکی DC
- سرویس و بازسازی انواع ترانسفورماتورهای توزیع، قدرت و همچنین ترانسفورماتورهای خاص
- بازسازی و تعمیر ترمزهای مغناطیسی کاربردی در صنایع نفت و گاز
- بازسازی انواع مختلف استیررهای مغناطیسی کاربردی در صنایع مختلف
- بازسازی تجهیزات وابسته به ماشین‌های الکتریکی دوار و استاتیک مانند شفت، فریم، پوسته، زغال، کوئل و...
- بازسازی تجهیزات با کاربری خاص مانند مگنت، رآکتور، انواع سلف، جداکننده مغناطیسی و...
- بازسازی اجزاء لازم ماشین‌های الکتریکی
- **خدمات فنی و جانبی**
- عیب‌یابی و پایش وضعیت ماشین‌های الکتریکی به‌صورت دوره‌ای
- آنالیز ارتعاشات
- آنالیز پارامترهای الکتریکی
- ساخت و تأمین قطعات یدکی و جانبی برای انواع ماشین‌های الکتریکی مانند پوسته، ترمینال باکس، رینگ، کلکتور، زغال، سنسور، شفت و...
- بالانس دینامیکی در سایت کارفرما و همچنین در محل کارخانه
- آماده‌سازی کویلینگ و انجام هم‌راستایی با دستگاه لیزری

## ۲-۲-۲- شرکت فن ژنراتور

گروه صنعتی فن ژنراتور نیز یکی از مراکز مجهز ساخت و ارائه خدمات بازسازی ماشین‌های الکتریکی جریان متناوب و جریان مستقیم کشور است که بیش از دو دهه تجربه فعالیت در این زمینه را دارد. این گروه با همکاری

شرکت WEIRE ELECTRIC آلمان که یکی از بزرگ‌ترین شرکت‌های تولیدکننده ژنراتور می‌باشد، ژنراتورهای آسنکرون بادی را برای شرکت صبانیرو تولید کرده و در حال حاضر ساخت اولین ژنراتور آسنکرون صد در صد داخلی را جهت نصب در توربین‌های بادی در دست دارد.

گروه صنعتی فن‌ژنراتور دارای یک کارگاه مجهز اختصاصی برای ساخت شینه‌های ژنراتورهای نیروگاهی می‌باشد. این کارگاه دارای تمامی ماشین‌آلات و تسهیلات مرتبط با ساخت انواع شینه‌های نوع خنک‌شونده با هوا، آب و گاز می‌باشد. همچنین این گروه صنعتی توانایی ساخت شینه‌های ژنراتورهای نیروگاهی را به هر دو روش بیش‌رزین (RR) و تحت خلأ و فشار (VPI) دارا است.

واحد کویل‌سازی گروه فن‌ژنراتور مجهز به مجموعه ماشین‌آلات ساخت سیم تخت عایق‌شده و ساخت کویل می‌باشد. دستگاه کشش مفتول، نورد، سیستم آنیلینگ، سیم تخت مسی، دستگاه‌های نوارزنی، لوپینگ، فرمینگ، هات‌پرس و ... نمونه‌هایی از این تجهیزات می‌باشند. تولید بیش از هزار و هفت‌صد عدد کویل فشارقوی و ارسال آنها برای شرکت ABB جهت سیم‌پیچی ۳۳ دستگاه الکتروموتور از جمله نمونه‌های صادرات شرکت می‌باشد.



شکل ۲-۲: تصاویری از فعالیت‌های تعمیر و ساخت ژنراتور در شرکت فن‌ژنراتور

در حال حاضر، فن‌ژنراتور از مراکز مهم تعمیر و بازسازی ماشین‌های الکتریکی در منطقه محسوب می‌شود. خدمات این شرکت در زمینه تعمیرات ماشین‌های الکتریکی به شرح ذیل می‌باشد:

- بازسازی ژنراتورهای نیروگاهی
- بازسازی و سیم‌پیچی همه انواع موتورهای ژنراتورهای فشارقوی
- بازسازی و سیم‌پیچی و نوسازی موتورهای کشنده
- سیم‌پیچی ترانسفورماتورهای قدرت و توزیع در هر دو نوع خشک و روغنی
- بازسازی و سیم‌پیچی انواع موتورهای ژنراتورهای جریان مستقیم
- ساخت قطعات و ملحقات ماشین‌های الکتریکی

شرکت فن ژنراتور تمامی تجهیزات لازم جهت سیم‌پیچی روتور و استاتور، خارج کردن و جازدن رینگ‌های نگهدارنده، ساخت شینه‌های ترنسپوز شده، تست‌های حین فرایند و ... را دارد.

## ۲-۳- شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران

شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران به‌عنوان یک شرکت وابسته به وزارت نیرو، در زمینه تعمیرات اساسی و تخصصی واحدهای نیروگاهی، بازسازی و ارتقا، ساخت تجهیزات، راه‌اندازی و نگهداری واحدهای نیروگاهی، صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، پالایشگاهی، سیمان، قند و ریلی می‌باشد.



شکل ۲-۳: تصاویری از ساخت تعمیرات روتور در کارگاه شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران

توانمندی‌های این شرکت را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

- تعمیرات اساسی و دوره‌ای انواع تجهیزات سبک و سنگین نیروگاهی به‌همراه تمامی تست‌های کنترلی دمونتاز و مونتاژ انواع توربین‌های گازی و بخار با ظرفیت و کلاس‌های مختلف
- مهندسی مجدد و معکوس انواع تجهیزات نیروگاهی و ساخت انواع پره توربین و قطعات سبک و سنگین نیروگاهی

- ارائه خدمات آزمایشگاهی مواد، تعیین عمر باقی‌مانده، تست و عیب‌یابی مخرب و غیرمخرب مواد و قطعات
- اندازه‌گیری دقیق انواع قطعات با استفاده از تجهیزات و آزمایشگاه مجهز اندازه‌گیری دقیق CMM
- تعمیر، بازسازی، ساخت و تأمین انواع قطعات نیروگاهی دوار و ثابت
- بازسازی، ساخت و تعمیرات اساسی انواع ترانسفورماتور و ژنراتور با ظرفیت‌های مختلف
- تست عملکرد انواع ترانسفورماتور High Voltage در آزمایشگاه فشارقوی
- بالانس دینامیک انواع تجهیزات دوار شامل انواع توربین، کمپرسور، ژنراتور در ابعاد و اندازه‌های مختلف
- ارائه مشاوره خدمات تخصصی مهندسی در سطوح کیفی و مناسب

تجهیزات موجود در هر بخش به شرح زیر است:

معاونت مکانیک و ساخت:

- انواع ماشین‌آلات و تجهیزات ماشین‌کاری سبک و سنگین با ظرفیت‌های ابعادی و وزنی متنوع جهت هر نوع ماشین‌کاری
- تجهیزات بالانس دینامیک جهت بالانس انواع تجهیزات دوار تا وزن ۸۰ تن با امکان تأمین شرایط خلأ
- تجهیزات دمونتاژ و مونتاژ انواع توربین، کمپرسور و ژنراتور
- تجهیزات آزمایشگاهی پیشرفته مواد و تست‌های مخرب و غیرمخرب
- تجهیزات اندازه‌گیری دقیق CMM در دو نوع ثابت و پرتابل
- تجهیزات ردیف چینی و مومنتوم‌گیری انواع پره جهت نصب در توربین و کمپرسور
- ماشین‌آلات فرز CNC شامل دستگاه‌های سه‌محور، چهارمحور و پنج‌محور

معاونت الکتریک:

- انواع تجهیزات کوئل‌پیچی افقی و عمودی جهت انواع ترانسفورماتور با ظرفیت‌های مختلف
- تجهیزات کشش، شکل‌دهی و نورد سرد انواع سیم و اتصالات مسی
- کوره VPDP جهت رطوبت‌گیری عایق‌های active part با ظرفیت وزنی ۳۰۰ تن
- تجهیزات کامل تعمیرات اساسی انواع ژنراتورها و ترانسفورماتورهای قدرت
- تجهیزات کامل ساخت شینه استاتور و روتور ژنراتور
- آزمایشگاه مجهز فشارقوی به همراه تجهیزات تخصصی مربوط جهت تست عملکرد ترانسفورماتور و ژنراتور
- تجهیزات کامل ساخت شینه و انواع ژنراتور نیروگاهی و با ظرفیت‌های مختلف
- کوره VPI جهت تزریق رزین برای ساخت کوئل‌های استاتور

## ۲-۲-۴- شرکت پارس ژنراتور مپنا

شرکت مهندسی و ساخت ژنراتور مپنا (پارس)، با هدف انتقال تکنولوژی ساخت و تولید انواع ژنراتورهای نیروگاه‌های حرارتی (تا ظرفیت ۱۶۰ مگاوات)، آبی (تا ظرفیت ۲۵۰ مگاوات) و باس‌داکت‌های نیروگاهی، در حال فعالیت در این حوزه است. این شرکت با همکاری تولیدکنندگان بین‌المللی این صنعت توانسته است علاوه بر تولید

بیش از ۵۰ درصد از مولدهای نیروگاهی کشور به همراه باس داکت و تجهیزات جانبی، محصولات خود را به کشورهایمانند سوریه، عراق و تاجیکستان صادر کند.



شکل ۲-۴: تصویری از کارگاه پارس ژنراتور مپنا

محصولات تولیدی این شرکت عبارت‌اند از:

- تولید ژنراتور هواخنک مدل MGS58 با توان نامی ۲۳۵ MVA
- تولید ژنراتور هواخنک مدل MGG58 با توان نامی ۲۳۰ MVA
- تولید ژنراتور هواخنک مدل MGG57 با توان نامی ۲۱۶ MVA
- تولید ژنراتور هواخنک مدل MGS55 با توان نامی ۲۰۰ MVA
- تولید ژنراتور هواخنک مدل MGG55 با توان نامی ۲۰۰ MVA
- تولید ژنراتور هواخنک مدل MGS54 با توان نامی ۲۰۲ MVA
- تولید ژنراتور هواخنک مدل MGG41 با توان نامی ۵۶,۲۵ MVA
- تولید ژنراتور هواخنک مدل MGG30 با توان نامی ۳۱,۲۵ MVA
- تولید ژنراتور هواخنک مدل MGS23 با توان نامی ۱۳,۱۲۵ MVA
- تولید ژنراتور هواخنک مدل MGS21 با توان نامی ۷,۵ MVA
- تولید ژنراتور آبی مدل MGH52 با توان نامی ۱۴۰ MVA
- تولید ژنراتور آبی مدل MGH60 با توان نامی ۳۰۰ MVA
- تولید توربین بادی مدل MWT 2.5-103-I با توان نامی ۲,۵ MW
- تولید ژنراتور توربین بادی مدل MGW 13-IA6 با توان نامی ۲۹۱۰ KVA
- تولید پره توربین بادی ۲,۵ مگاوات مدل MWTB-50.3
- تولید باس داکت در محدوده جریانی ۱ الی ۱۴ کیلوآمپر
- تولید تراکشن موتور تا ۵۳۰ کیلووات
- تولید الکتروموتور ۹۰۰ کیلووات

شرکت مهندسی و ساخت ژنراتور مپنا (پارس) با بهره‌گیری از منابع انسانی و نیز تجهیزات و ماشین‌آلات پیشرفته، قادر به ارائه خدمات نیروگاهی زیر است:

- آموزش‌های تخصصی بهره‌برداران نیروگاه‌ها
- تعمیرات موردی محصولات نصب‌شده (ژنراتورهای نیروگاهی-توربین‌های بادی-الکتروموتورهای صنعتی و ...)
- تأمین قطعات یدکی و ابزار مخصوص محصولات تولیدی (انواع ژنراتورهای نیروگاهی-توربین‌های بادی-الکتروموتورهای صنعتی و ...)
- تعمیرات اساسی (Overhaul) محصولات نصب‌شده (انواع ژنراتورهای نیروگاهی-توربین‌های بادی-الکتروموتورهای صنعتی و ...)
- خدمات فنی و مهندسی در زمینه همه محصولات تولیدی از مرحله نصب تا راه‌اندازی
- ارائه مشاوره فنی در زمینه طراحی، ساخت و خرید ماشین‌های الکتریکی و تجهیزات جانبی
- انجام تست‌های الکتریکی و مکانیکی اجزای محصولات (انواع ژنراتورهای نیروگاهی-توربین‌های بادی-الکتروموتورهای صنعتی و ...)
- سوپروایزری نصب و راه‌اندازی محصولات
- بهینه‌سازی و ارتقاء واحدهای نیروگاهی و تجهیزات آنها به دستگاه‌هایی نظیر: On Line Monitoring- On Line/Offline Partial Discharge
- طراحی و ساخت انواع استراکچرهای فلزی
- طراحی و ساخت شینه انواع ژنراتورهای حرارتی و آبی

## ۲-۳- سازندگان و تأمین‌کنندگان سیستم تحریک استاتیکی، سیستم SFC و درایو الکتروموتور

### ۲-۳-۱- شرکت اطمینان‌بخش

شرکت دانش‌بنیان اطمینان‌بخش با توان بومی و ملی طراحی، ساخت و تولید درایوهای ماژولار فشارضعیف در همه رنج‌های صنعتی و درایوهای ماژولار فشارمتوسط تا سطح ولتاژ ۱۱ کیلوولت و توان ۴/۵ مگاوات آمپر می‌باشد. این شرکت با دارا بودن مجموعه موتور و ژنراتور تا ۳۲۰۰ کیلووات در داخل کارخانه، عملاً امکان تست واقعی درایو در بار کامل را تا رنج مذکور فراهم نموده است. همچنین آزمایشگاه‌های فشارقوی، تست دما، تست ارتعاش و تست رطوبت جهت ماژول‌ها و بردهای الکترونیکی در داخل کارخانه، به‌طور مرتب تجهیزات تولیدی را پایش می‌کنند [۱۳].



شکل ۲-۵: تصویر درایو فشارضعیف و درایو ماژولار فشارمتوسط ساخت شرکت اطمینان‌بخش

از دیگر محصولات تولیدی این شرکت می‌توان به ماژول‌های هوشمند، منابع تغذیه سفارشی، منبع تغذیه بدون وقفه (UPS)، سیستم تحریک استاتیکی ماشین‌های سنکرون، درایو خودرو برقی، محرکه موتور آسانسور با قابلیت بازیافت و ذخیره انرژی و اینورتر واسط شبکه سلول خورشیدی اشاره کرد.

در زمینه سیستم تحریک، شرکت اطمینان‌بخش تجربه به‌روزرسانی و بهینه‌سازی قطعات سیستم تحریک نیروگاه ۳۲۰ مگاواتی نیروگاه منتظری اصفهان، ساخت قطعات کنترلی نیروگاه بخاری فولاد مبارکه، جایگزینی و بهینه‌سازی قطعات کنترلی سیستم تحریک نیروگاه کلان و جایگزینی سیستم تحریک دینامیکی با تحریک استاتیکی شرکت‌های تولیدی قند نقش جهان، یاسوج و کرج را دارد.



شکل ۲-۶: تصویر سیستم تحریک ۷۵ کیلوواتی ۴۰۰ آمپری ساخت شرکت اطمینان بخش

## ۲-۳-۲- شرکت خدمات نیروگاهی آهار

شرکت آهار در زمینه اتوماسیون صنعتی و ساخت کارت‌های الکترونیکی فعالیتش را آغاز کرده و در بومی‌سازی کامل سیستم‌های کنترل لازم صنایع انرژی‌محور شامل نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها، صنایع پتروشیمی، نفت و گاز فعالیت دارد که سیستم‌های کنترل انواع توربین‌های گازی و بخار، سیستم‌های تحریک ژنراتور و تجهیزات جنبی مربوط از این دست بوده است [۱۴].

بخش‌های تخصصی شرکت عبارت‌اند از دپارتمان الکترونیک، دپارتمان توربین‌های گازی و بخار، دپارتمان سیستم‌های حفاظت و تحریک ژنراتور دفتر فنی و بخش تحقیق و توسعه.

این شرکت قادر به طراحی و ساخت سیستم‌های تحریک جریان مستقیم، سیستم‌های تحریک جریان متناوب و سیستم‌های تحریک جریان استاتیکی است که برخی پروژه‌های اجرا شده توسط شرکت به شرح زیر است:

- طراحی و ساخت و نصب سیستم تحریک ژنراتور بر روی واحد ۶۰ مگاوات اشکودا نیروگاه مشهد در سال ۱۳۹۷، طراحی و ساخت و نصب سیستم تحریک ژنراتور بر روی واحد ۲۰ مگاوات جنرال الکتریک شماره ۲ نیروگاه قشم در سال ۱۳۹۷
- طراحی و ساخت و نصب سیستم تحریک ژنراتور بر روی واحد ۶۰ مگاوات جنرال الکتریک شماره ۳ نیروگاه قشم در سال ۱۳۹۷
- طراحی و ساخت و نصب سیستم تحریک ژنراتور بر روی واحد ۲۵ مگاوات جنرال الکتریک نیروگاه کیش

- طراحی و ساخت و نصب سیستم تحریک ژنراتور بر روی واحد ۱۱۸ مگاوات میتسوبیشی شماره ۳ نیروگاه قم
  - طراحی و ساخت و نصب سیستم تحریک ژنراتور Alstom واحد گازی نیروگاه شمس سرخس
  - طراحی و ساخت سیستم تحریک ژنراتور GE واحد بخار نیروگاه بعثت
- این شرکت همچنین پروژه‌هایی در دست اجرا دارند که برخی از آنها عبارت‌اند از:
- طراحی و ساخت و نصب سیستم حفاظت ژنراتور بر روی واحد ۸۵ مگاوات میتسوبیشی شماره ۶ نیروگاه ری
  - طراحی و نصب سیستم تحریک ژنراتور بر روی واحد ۳۰ مگاوات نیروگاه طرشت
  - خرید کنترل تحریک و حفاظت ژنراتور یک دستگاه مولد گازی به‌همراه نصب و راه‌اندازی
  - خرید یک دستگاه سیستم تحریک استاتیک بدون ترانسفورماتور واحدهای ۳۲۰ مگاواتی نیروگاه اصفهان معادل UNITROL 6000 ABB

## ۲-۳- شرکت پرتوصنعت

شرکت پرتوصنعت از سال ۱۳۶۹ در زمینه طراحی و تولید "کنترل‌کننده دور موتور" یا درایوهای دور متغیر VFD فعالیت دارد. درایوهای تولیدی این شرکت تا رنج توان ۴۰۰ کیلووات با تکنولوژی Vector Control و در سطح ۶ کیلوولت، از ۲۵۰ تا ۴۰۰۰ مگاوات ارائه می‌شود.

اینورترهای تولیدی این شرکت در همه صنایع از قبیل صنایع نفت و گاز نصب و در حال بهره‌برداری بوده و ظرفیت تولید ۴۰۰۰۰ عدد دستگاه در سال را دارد.



شکل ۲-۷: درایو ۶ کیلوولت ۲۵۰ الی ۴۰۰۰ کیلووات تولیدی شرکت پرتوصنعت

## ۲-۳-۴- جهاد دانشگاهی علم و صنعت

جهاد دانشگاهی علم و صنعت در زمینه طراحی و ساخت محصولات صنعتی، ارائه خدمات تخصصی و انجام تحقیقات کاربردی مورد نیاز کشور در حوزه برق و مکانیک فعالیت می‌کند. از مهم‌ترین محصولات این واحد می‌توان به طراحی و ساخت انواع رکتیفایرهای صنعتی ولتاژ بالا و جریان بالا، منابع تغذیه بدون وقفه شامل انواع یوپی‌اس و شارژرهای صنعتی، کنترل دور موتورهای ولتاژ متوسط، سیستم برق و کنترل دکل حفاری نفت، تجهیزات آزمایشگاه فشارقوی و خدمات تست عایقی، انواع غبارگیرهای صنعتی شامل فیلترهای الکترواستاتیک و بگ هاوس، دکل حفاری نفت، بازوهای بارگیری دریایی نفت، سیستم جلوگیری رسوب مخازن نفت و نمک‌زدایی الکترواستاتیکی اشاره نمود. از محصولات مرتبط با پروژه حاضر که توسط این مرکز تولید می‌شود، می‌توان درایوهای فشارمتوسط و فشارضعیف را نام برد. درایوهای تولید جهاد دانشگاهی علم و صنعت، در رنج ولتاژی ۳ تا ۶/۶ کیلوولت و تا توان ۱۰ مگاوات آمپر است [۱۵].



شکل ۲-۸: درایو فشارمتوسط تولیدی جهاد دانشگاهی علم و صنعت

## ۲-۳-۵- شرکت برناالکترونیک

شرکت برناالکترونیک در صنعت تولید تجهیزات برق و الکترونیک صنعتی، سیستم‌های حفاظت کاتدیک و پایش و کنترل خوردگی فعالیت داشته است. قابلیت‌های این شرکت در حوزه کنترل موتورهای الکتریکی، تولید مبدل‌های الکترونیک- قدرت و خط مونتاژ SMD است [۱۶].

یکی از زمینه‌های فعالیت شرکت برناالکترونیک که مرتبط با طراحی و ساخت درایو موتورهای الکتریکی است، طراحی و تولید کنترل دور الکتروموتورهای ولتاژمتوسط با توان بالا (مگادرایو) می‌باشد. مگادرایو برناالکترونیک در ولتاژهای ۳ تا ۱۱ کیلوولت و توان‌های تا ۱۵ مگاوات آمپر قابلیت تولید و تحویل را دارند.

## ۲-۳-۶- جهاد دانشگاهی خواجه نصیرالدین طوسی

جهاد دانشگاهی واحد خواجه نصیرالدین طوسی در حوزه تولید برق تجدیدپذیر و ماشین‌های الکتریکی و الکترونیک قدرت، فعالیت‌هایی از جمله طراحی و ساخت انواع الکتروموتورهای خاص و کالکتورهای DC، طراحی و ساخت مبدل‌های الکترونیک قدرت برای کنترل ولتاژ خروجی، طراحی و ساخت و اجرای جبران‌سازهای توان راکتیو استاتیکی، منابع تغذیه و مبدل‌های DC-DC و AC-AC در فرکانس و ولتاژ خاص، درایو موتورهای

الکتریکی و همچنین طراحی خط تولید و خط بازسازی ماشین‌های الکتریکی را انجام می‌دهد. همچنین این مرکز به نرم‌افزارهای طراحی بهینه جهت طراحی انواع ماشین‌های الکتریکی، نرم‌افزار شبیه‌سازی برای بررسی عملکرد حالت دائم و حالت دینامیکی مجهز است [۱۷].

## ۲-۴- سازندگان و تأمین‌کنندگان ترانسفورماتورهای قدرت

### ۲-۴-۱- ایران ترانسفو

گروه ایران ترانسفو یکی از بزرگ‌ترین شرکت‌های منطقه در زمینه ساخت و تولید بخش وسیعی از ترانسفورماتورهای کوچک توزیع تا ترانسفورماتورهای بزرگ قدرت، ترانسفورماتورهای خاص متناسب با نیاز صنعت، تجهیزات ترانسفورماتور و همچنین انواع پست‌ها می‌باشد. خدمات و محصولات تولیدی این کارخانه مطابق با استانداردهای IEC60076 و VDE0532 (استانداردهای کشور آلمان) بوده و عبارت‌اند از [۱۸]:

- طراحی و تولید ترانسفورماتورهای قدرت تا ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت و توان ۲۵۰ مگاوات آمپر.
- طراحی و تولید اتوترانسفورماتورهای قدرت تا ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت و توان ۳۱۵ مگاوات آمپر.
- طراحی و تولید ترانسفورماتور تک‌فاز قدرت با ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت و توان ۲۰۰ مگاوات آمپر.
- طراحی و تولید راکتور شنت با ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت و توان ۵۰ مگاوار.
- طراحی و تولید ترانسفورماتورهای زمین تا ولتاژ ۶۳ کیلوولت.
- طراحی و تولید ترانسفورماتور موبایل با ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت و توان ۴۰ مگاوات آمپر.
- طراحی و تولید ترانسفورماتور کوره با جریان ۵۰ کیلوآمپر و توان ۳۰ مگاوات آمپر.
- طراحی و تولید ترانسفورماتورهای روغنی توزیع و فوق توزیع
- طراحی و تولید ترانسفورماتور توزیع هرمتیک (با بالشتک گازی) تا ولتاژ ۳۶ کیلوولت و توان ۵۰۰۰ کیلوولت-آمپر.
- طراحی و تولید ترانسفورماتورهای توزیع خشک رزینی تا ولتاژ ۳۶ کیلوولت و توان ۳۱۵۰ کیلوولت آمپر.
- طراحی و اجرای پست موبایل با ولتاژ ۱۳۲ کیلوولت، پست GIS با ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت و پست AIS و خطوط فشارقوی با ولتاژ ۴۲۰ کیلوولت.
- طراحی و اجرای پست‌های کمپکت تا ولتاژ ۳۶ کیلوولت و توان ۱۶۰۰ کیلوولت آمپر و پست‌های پکیج تا ولتاژ ۳۶ کیلوولت و توان ۲۵۰۰ کیلوولت آمپر.
- طراحی و تولید انواع قطعات و مواد عایقی مصرفی در ترانسفورماتورهای روغنی توزیع، فوق توزیع و قدرت تا سطح ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت.
- تولید روغن ترانسفورماتور در کلاس‌های I و II بدون بازدارنده.
- تولید انواع تجهیزات ترانسفورماتور شامل انواع مقره‌های سرامیکی تا ولتاژ ۳۶ کیلوولت، ترانسفورماتور جریان

و ...

- تعمیر و نگهداری و خدمات پس از فروش انواع ترانسفورماتور و تجهیزات مربوطه.



شکل ۲-۹: تصاویری از کارخانه شرکت ایران ترانسفو

## ۲-۴-۲- آریا ترانسفو

آریا ترانسفو در زمینه تولید انواع ترانسفورماتورهای قدرت شبکه، نیروگاهی، صنایع، راکتورهای موازی، ترانسفورماتورهای توزیع و پست‌های پیش‌ساخته با استفاده از تکنولوژی و دانش فنی شرکت‌های معتبر اروپای غربی و به‌کارگیری ماشین‌آلات و آزمایشگاه‌های مدرن فشارقوی فعالیت دارد [۱۹].

تولیدات این شرکت در دو بخش مستقل قدرت و توزیع در فاز اول تا توان ۵۵۰ مگاوات‌آمپر و تا ولتاژ ۴۲۰ کیلوولت و در فاز دوم تا توان ۱۰۰۰ مگاوات‌آمپر و تا ولتاژ ۸۰۰ کیلوولت انجام می‌پذیرد. با توجه به پیشرفت روزافزون دانش فنی و تکنولوژی ساخت ترانسفورماتور، این شرکت علاوه بر تأمین ماشین‌آلات پیشرفته و جدید از سازندگان معتبر اروپای غربی و نیز به‌کارگیری بهترین متخصصین از داخل و خارج کشور، در جهت انتقال تکنولوژی و دانش فنی روز از شرکت‌های صاحب‌نام این صنعت اقدام نموده تا طراحی، آموزش، نظارت بر تولید، تست و نیز تأمین نرم‌افزارهای تخصصی ضروری و همه پشتیبانی‌های فنی لازم توسط آنها صورت پذیرد.

بدین منظور با شرکت SMIT هلند از گروه SGB-SMIT که در زمینه تولید و تحویل انواع ترانسفورماتورهای قدرت نیروگاهی و انتقال، صنایع، راکتورهای موازی به بازار اروپا و آمریکا فعالیت دارد، قرارداد طولانی‌مدت لیسانس و انتقال تکنولوژی و دانش فنی طراحی و ساخت، تأمین نرم‌افزارهای تخصصی لازم، آموزش کارکنان، نظارت بر تولید و آزمایش‌های فشارقوی و نیز در صورت ضرورت تأمین مواد اولیه و ساخت مشترک سفارش‌ها را منعقد نموده است.

### محصولات این شرکت عبارت است از:

- ترانسفورماتورهای کنسرواتوری به‌صورت دیواره کنگره‌ای و یا رادیاتوری تا ولتاژ ۳۶ کیلوولت و توان ۴۰۰۰ کیلوولت‌آمپر
- ترانسفورماتورهای هرمتیک به‌صورت دیواره کنگره‌ای و یا بالشتک گازی تا ولتاژ ۳۶ کیلوولت و توان ۴۰۰۰ کیلوولت‌آمپر
- ترانسفورماتورهای خشک رزینی تا ولتاژ ۳۶ کیلوولت و توان ۱۰۰۰۰ کیلوولت‌آمپر

- ترانسفورماتورهای قدرت نیروگاهی و انتقال شبکه تا ولتاژ ۴۲۰ کیلوولت و توان ۵۵۰ مگاوات آمپر
- راکتورهای موازی تا ولتاژ ۴۲۰ کیلوولت و توان ۱۰۰ مگاوار
- ترانسفورماتورهای خاص:
  - ترانسفورماتورهای دو و چندولتاژ
  - ترانسفورماتورهای پست موبایل
  - ترانسفورماتورهای کوره و یک‌سوساز
  - ترانسفورماتورهای شیفت فاز



شکل ۲-۱۰: تصاویری از خط تولید شرکت آریا ترانسفو

## ۲-۵- سیستم‌های کنترل، مانیتورینگ و حفاظت

### ۲-۵-۱- شرکت آریا کنترل پیشرو

شرکت آریا کنترل پیشرو در رشته‌های برق، کنترل، اتوماسیون صنعتی، تله‌متری و سیستم‌های کنترل از راه دور و با هدف ارائه خدمات فنی و مهندسی برای شرکت‌های نفت، گاز، پتروشیمی و انواع صنایع از قبیل صنعت سیمان، صنایع خودرویی و غیره فعالیت دارد. از مهم‌ترین خدمات این شرکت می‌توان به خدمات صنعتی و سیستم‌های کنترل و مانیتورینگ اشاره کرد. این شرکت دارای کارگاهی مجهز و پیشرفته است که با استفاده از پرسنل خود، سوابقی در زمینه طراحی و ساخت انواع تابلوهای برق و راه‌اندازی سیستم‌های مانیتورینگ و اجرای انواع سیستم‌های کنترلی و حفاظتی دارد. عمده فعالیت اجرایی این شرکت عبارت‌اند از اجرای تابلوهای برق، نصب و راه‌اندازی سیستم‌های اعلام حریق F&G، اجرای تابلوهای توزیع، نصب و راه‌اندازی سنسورها و ادوات ابزار دقیق و اجرای بانک خازنی. از مشتریان شرکت آریا کنترل پیشرو می‌توان به گروه مپنا، شرکت سیمان تهران، گروه مدیریت گروه

صنعت دلوآرافزار، شرکت نفت بهران، شرکت فولاد خوزستان و شرکت پتروشیمی امیرکبیر اشاره کرد [۲۰].

## ۲-۵-۲- شرکت بهمن‌گسترش کیان

شرکت بهمن‌گسترش کیان با اخذ نمایندگی از شرکت‌های بین‌المللی همچون شرکت پاورماشین Power Machines (بزرگ‌ترین هولدینگ سازنده تجهیزات نیروگاهی در روسیه) مشتمل بر شرکت LMZ (سازنده توربین‌های آب و بخار)، شرکت Electrosila (سازنده ژنراتورهای نیروگاهی)، شرکت ZTL (کارگاه پره‌سازی) و شرکت‌های بزرگ دیگر در زمینه طراحی و نصب و راه‌اندازی سیستم‌های مانیتورینگ و کنترل همچون شرکت Nitteplopribor و شرکت CKTI (انستیتو مطالعاتی انرژی) و شرکت Aplisens (سازنده تجهیزات ابزار دقیق) در حوزه مانیتورینگ، کنترل سیستم‌های نیروگاهی در ایران فعالیت دارد [۲۱].

برخی پروژه‌های اجرا شده توسط شرکت مهندسی بهمن‌گسترش کیان عبارت‌اند از انجام خدمات طراحی، خرید تجهیزات و نصب و راه‌اندازی یک سیستم جدید مانیتورینگ و تحلیل ارتعاشات برای توربوژنراتور واحد شماره ۵ نیروگاه رامین اهواز، انجام خدمات طراحی، مهندسی، خرید کلیه تجهیزات، نصب و راه‌اندازی سیستم کنترل DCS واحد شماره ۴ نیروگاه رامین اهواز و انجام خدمات طراحی، خرید تجهیزات، نصب و راه‌اندازی یک بسته کامل مانیتورینگ، تحلیل ارتعاشات، کنترل و هشدار برای توربوژنراتور واحد شماره ۳ نیروگاه رامین اهواز.

## ۲-۵-۳- شرکت فنی مهندسی ایستاخرد پارسه

شرکت فنی مهندسی ایستاخرد پارسه، شرکتی تخصصی در زمینه‌های برق و کنترل و ابزار دقیق است که خدمات خود را به‌صورت پیمانکاری کلید در دست (EPCC) (طراحی، مهندسی / تأمین تجهیزات و بازرگانی / نصب و راه‌اندازی) ارائه می‌کند [۱۱].

پروژه‌های انجام‌شده این شرکت در زمینه کنترل و مانیتورینگ در صنایع مختلف از قبیل ترمینال‌های نفتی، پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها، صنایع غذایی، دارویی و شیمیایی بوده است. این شرکت در زمینه سیستم‌های کنترل و مانیتورینگ، کلیه خدمات فنی و مهندسی شامل مشاوره، تأمین تجهیزات، پیش‌راه‌اندازی و راه‌اندازی شامل انجام خدمات مونتاژ تابلوها، سینی کاری، کابل کشی، کاندوئیت کاری، اهم‌چک، میگرچک، لوپ‌چک، برنامه‌نویسی لاجیک و مانیتورینگ، FAT، SAT و تحویل پروژه‌ها را به‌صورت Turnkey و با رعایت کلیه استانداردهای لازم انجام می‌دهد.

## ۲-۵-۴- شرکت درخشان‌صنعت ایساتیس (سامایش)

خدماتی که شرکت سامایش ارائه می‌کند، طراحی و نصب و راه‌اندازی سیستم‌های کنترل و مانیتورینگ است. سامایش با اندازه‌گیری لحظه‌به‌لحظه پارامترهای مؤثر و اعلام آلارم‌های به‌موقع و همچنین ارائه نمودارها و گزارش‌های دقیق از وضعیت این پارامترها می‌تواند ضمن کنترل بهینه آنها و زمینه‌سازی برای بهبود وضعیت این پارامترها، از بروز حوادث احتمالی و گسترش خسارات جلوگیری کند. سامایش، ابزار نظارت بر پارامترهای فیزیکی (دما، رطوبت، ولتاژ، ارت، جریان، پارامترهای یکسوساز، پارامترهای دیزل ژنراتور، نشت آب، حریق، تشخیص حرکت

و غیره) را فراهم می‌کند که هم‌اکنون نیز در سطح وسیعی از بانک‌ها، مؤسسات دولتی و خصوصی به‌طور کاربردی استفاده می‌شوند [۱۲].

## ۲-۶- شرکت‌های توانمند در زمینه طراحی، ساخت و تأمین کویلینگ، بیرینگ و فلاویل

### ۲-۶-۱- شرکت مهندسی و خدمات تابا

شرکت دانش‌بنیان مهندسی و خدمات تابا پس از موفقیت‌هایی که در ساخت قطعات توربین بخار از جمله رینگ‌ها و پره‌های توربین به دست آورده است، در راستای تدوین دانش فنی برای ورود در ساخت و مهندسی انواع یاتاقان‌ها، اقدام به ساخت یاتاقان‌های توربین بخار ۱۰۵ مگاواتی نموده است. ساخت این یاتاقان‌ها در شرکت تابا، شامل مراحل مهندسی معکوس و تعیین شرایط هندسی و متریالی یاتاقان‌ها، بررسی روش‌هایی برای بابت‌ریزی با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی و عملی، بررسی عملکردی مکانیکی یاتاقان ساخته‌شده با استفاده از تحلیل المان محدود و در نهایت تلفیق دانش و تجربه در زمینه یاتاقان‌سازی است. با تدوین دانش انجام‌گرفته در طراحی و ساخت یاتاقان‌های توربین، شرکت دانش‌بنیان مهندسی و خدمات تابا امکان ساخت داخل تمامی یاتاقان‌های توربین‌های حرارتی و صنعتی و همچنین یاتاقان‌های صنایع کوچک و بزرگ را دارد.

### ۲-۶-۲- شرکت توربوکمپرسور البرز

شرکت توربوکمپرسور البرز در حوزه صنایع نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی و نیرو در کشور، در زمینه‌های طراحی مهندسی، ساخت و تولید، تعمیرات اساسی و تأمین انواع قطعات و مجموعه‌های مربوط به تجهیزات دوار فعالیت می‌کند. خدماتی که این شرکت ارائه می‌کند به‌شرح زیر است:

#### خدمات مهندسی و تولید

- مهندسی و تولید اجزاء مکانیکی ماشین‌آلات دوار
- انجام تحلیل‌های مکانیکی و سیالاتی
- تدوین روش‌های خلاقانه تولید به‌منظور نیل به کیفیت بالا
- تعمیر بخش مکانیکی تجهیزات دوار
- جوان‌سازی
- تخمین عمر

#### خدمات تعمیراتی

- عیب‌یابی و رفع نقص در ماشین‌آلات دوار صنعتی
- انجام تعمیرات دوره‌ای و بازرسی‌های مربوطه

- نصب و راه‌اندازی تجهیز در سایت
- بهره‌برداری و به‌روزرسانی
- انجام تعمیرات اساسی سطوح C و D توربین‌های گازی و کمپرسورها

#### خدمات اندازه‌برداری دقیق

- خدمات ابعادبرداری با دستگاه CMM (دستگاه WENZEL آلمان)
- خدمات ابر نقاط
- تهیه مدل سه‌بعدی
- تهیه نقشه‌های مهندسی
- تحلیل ابعادی و تolerانس‌گذاری

#### خدمات ریخته‌گری دقیق

- تولید ماهیچه‌های ریخته‌گری به روش پرینت سه‌بعدی
- ریخته‌گری دقیق انواع قطعات از جنس سوپرآلیاژ (پایه نیکل، پایه کبالت، پایه آهن-نیکل)
- ریخته‌گری دقیق گریز از مرکز

#### خدمات بازرگانی

- تأمین اقلام یدکی توربین‌های گازی، کمپرسورها از سازندگان اصلی
- تأمین بخش‌های کنترلی و ابزار دقیق مربوط به ماشین‌آلات صنعتی
- تأمین مواد اولیه ضروری در تولید مجموعه‌های ماشین‌آلات دوار
- تأمین انواع فولادها و سوپرآلیاژها از جمله HASTELLOY، NIMONIC، MONEL و INCONEL

## ۲-۷- نتیجه‌گیری

در این فصل به شناسایی و جمع‌آوری توانمندی‌های داخلی در حوزه تأمین و طراحی و ساخت تجهیزات مربوط به سیستم ژنراتور اتصال کوتاه پرداخته شد. این تجهیزات به چند بخش ۱- ژنراتور و الکتروموتور راه‌انداز ۲- سیستم تحریک و درایو و SFC ۳- ترانسفورماتورهای تغذیه و ترانسفورماتور اتصال کوتاه، ۴- سیستم کنترل و مانیتورینگ و حفاظت و ۵- کوپلینگ، بیرینگ و فلاویل تقسیم و بررسی شد و شرکت‌های توانمند در ارائه خدمات بازسازی و طراحی و ساخت در ۵ بخش شناسایی و توانمندی هر یک بیان شد.



## **فصل سوم**

**شناسایی تیپ‌های ژنراتوری موجود در صنایع کشور و  
بررسی منابع تأمین ژنراتور مستعمل و امکان‌سنجی ساخت  
ژنراتور اتصال کوتاه**

### ۳-۱- مقدمه

در بسیاری از صنایع بزرگ مانند صنایع فولاد، پالایشی و پتروشیمی، به دلیل مصرف انرژی الکتریکی درخور توجه، از واحدهای تولید برق جانبی استفاده می‌شود که عنصر اصلی این نیروگاه‌های جانبی، ژنراتور تولید برق آنهاست. بدین ترتیب با هدف مطالعه استفاده از ژنراتورهای مستعمل به عنوان ژنراتور اتصال کوتاه، ژنراتورهای موجود در این واحدها قابلیت بررسی دارند. همچنین یکی از مهم‌ترین منابع تأمین ژنراتور مستعمل، نیروگاه‌های تولید برق شبکه هستند که با توجه به طیف وسیع توانی ژنراتورهای کاربردی در این نیروگاه‌ها، می‌تواند گزینه مناسبی برای انتخاب ژنراتور متناسب با توان لازم پروژه باشد. در ادامه به بررسی برخی از نمونه‌های ذکر شده پرداخته می‌شود.

### ۳-۲- ژنراتورهای کاربردی در واحدهای تولید برق جانبی صنایع

#### ۳-۲-۱- بررسی واحدهای تولید برق جانبی صنایع پتروشیمی

در واحد تولید برق نیروگاه شرکت پتروشیمی شیراز، از ۳ دستگاه ژنراتور ۲۷ مگاواتی استفاده شده است. نیروگاه مجتمع پتروشیمی ایلام نیز از ۴ واحد ۲۵ مگاواتی برای تولید برق مصرف داخلی استفاده می‌کند. واحد نیروگاه پتروشیمی شازند اراک دارای ۵ دستگاه توربوژنراتور گازی به ظرفیت‌های ۲۵ مگاوات است. در نیروگاه شرکت پتروشیمی دماوند نیز از ۴ ژنراتور بزرگ ۱۶۲ مگاواتی به منظور تأمین ۲۴ واحد پتروشیمی هم‌جوار استفاده شده است. فاز اول نیروگاه طرح توسعه پتروشیمی فجر نیز از ۴ ژنراتور ۱۶۰ مگاواتی برای تأمین برق لازم استفاده می‌کند.

#### ۳-۲-۲- بررسی واحدهای تولید برق پالایشگاه‌ها

نیروگاه گازی پالایشگاه فازهای ۶ و ۷ و ۸ میدان گازی پارس جنوبی از ۴ ژنراتور ۴۵ مگاواتی برای تأمین برق پالایشگاه استفاده می‌کند. نیروگاه ۴۲ مگاواتی پالایشگاه بندرعباس نیز از یک دستگاه ژنراتور ۴۲ مگاواتی جهت تولید برق نیروگاه استفاده می‌کند. در نیروگاه سوم پالایشگاه آبادان، ۷ ژنراتور ۳۰ مگاواتی استفاده شده است.

#### ۳-۲-۳- بررسی واحدهای تولید برق صنایع فولاد

در نیروگاه ۲۹ مگاواتی تولید هم‌زمان برق و حرارت فولادسازی و نورد سبا، از ۷ ژنراتور ۴/۲ مگاواتی استفاده شده است. نیروگاه سیکل ترکیبی فولاد مبارکه متشکل از چهار واحد توربین گاز هر کدام به ظرفیت ۱۶۲ مگاوات و دو واحد توربین بخار هر کدام به ظرفیت ۱۶۰ مگاوات است.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، توان ژنراتورهای استفاده شده در صنایع فوق‌الذکر، عمدتاً کمتر از ۲۵ مگاوات است و متناسب با توان اتصال کوتاه ۱۰۰ مگاوات آمپر نمی‌باشد. در برخی نمونه‌های محدود نیز توان‌های

بزرگ‌تر و متناسب با توان هدف پروژه مشاهده می‌شود، اما با توجه به محدود بودن تعداد این مصادیق و همچنین جدید بودن واحد مربوطه و آزاد نبودن ژنراتور، احتمال امکان یافتن و اخذ این ژنراتورها پایین به نظر می‌رسد. در برخی موارد نیز توان‌های بالا و در حدود ۱۶۰ مگاوات به کار گرفته شده است که بالاتر از توان مورد نیاز پروژه است. در طرف دیگر، نیروگاه‌های کشور است که با توجه به طیف وسیع توانی ژنراتورها و تعداد زیاد آنها، امکان یافتن ژنراتور مستعمل و خارج از شبکه در این حوزه بسیار زیاد است. بخصوص ارتباطات نزدیک پژوهشگاه نیرو با شرکت مادر تخصصی برق حرارتی، بروکرسی‌های زیاد را کاهش داده و همچنین امکان بررسی‌های دقیق‌تر بر روی ژنراتورهای نیروگاهی کاندید را بیشتر می‌کند.

### ۳-۳- بررسی ژنراتورهای واحد فیات نیروگاه ری

پس از مذاکراتی که با مدیران شرکت برق حرارتی صورت گرفت، ژنراتورهای ۴۴ مگاوات آمپری ساخت شرکت‌های مارلی و آنسالدو موجود در نیروگاه ری که در حال حاضر خارج از شبکه هستند، جهت بررسی‌های بیشتر برای به کارگیری به عنوان ژنراتور اتصال کوتاه پیشنهاد شد. به دنبال آن طی نامه‌نگاری‌های صورت گرفته با شرکت مدیریت تولید برق تهران، در تاریخ ۹۸/۱۰/۲۹ بازدیدی کلی از ژنراتورهای مذکور در محل نیروگاه ری صورت گرفت و جلسه‌ای با معاونت فنی و مهندسی و مدیر تعمیرات برق نیروگاه برگزار گردید. در ادامه اسناد فنی ژنراتورها از مرکز اسناد نیروگاه جهت بررسی‌های بیشتر به امانت گرفته شد و بررسی تکمیلی مرکز اسناد نیروگاه در تاریخ ۹۸/۱۱/۲۷ انجام شد.

### ۳-۴- بررسی و مقایسه ژنراتورهای مارلی و آنسالدو

دو ژنراتور فوق‌الذکر که اخیراً در واحدهای فیات نیروگاه به کار گرفته می‌شدند، دارای مشخصات نامی مشابهی می‌باشند، اما به منظور اصلاح ساختار سیم‌پیچی آنها جهت دستیابی به جریان‌های بالا، نیاز است که ساختار سیم‌پیچی هریک بررسی و مقایسه شود.



شکل ۳-۱: ژنراتور ۴۴ مگاوات آمپری ساخت شرکت مارلی

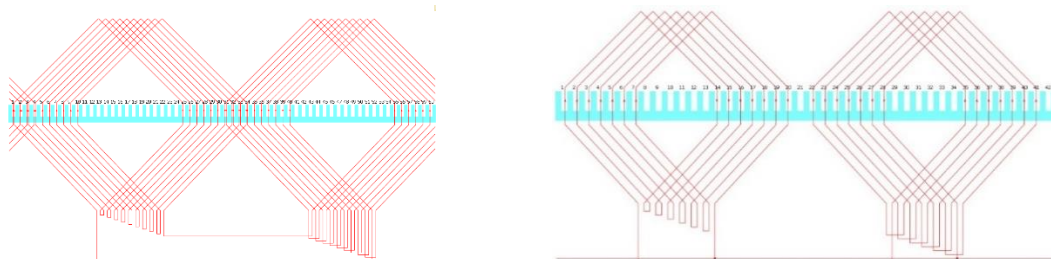


شکل ۳-۲: ژنراتور ۴۴ مگاوات آمپری ساخت شرکت آنسالدو

ولتاژ القایی یک ماشین سنکرون به صورت تقریبی زیر بیان می‌شود:

$$E \propto N \times \phi \times f \quad ۱-۳$$

در رابطه فوق، فرکانس هر دو ژنراتور ثابت و برابر ۵۰ هرتز و شار عبوری از هر قطب ماشین‌ها نیز با توجه به بارگذاری مغناطیسی یکسان و تعداد قطب برابر، برابر است. با علم به برابری ولتاژ نامی ژنراتورها، تعداد دور کل سیم‌پیچی ژنراتورها (صرف‌نظر از ضرایب توزیع و گام کسری) نیز تقریباً برابر است.



ب

الف

شکل ۳-۳: نقشه سیم‌پیچی استاتور ژنراتورهای مارلی (الف) و آنسالدو (ب)

لازم به ذکر است که تعداد دور هر پیچک ژنراتور مارلی (در هر لایه شیار) ۳ و تعداد پیچک‌های سری در برابر هر قطب آن ۷ می‌باشد. با توجه به اینکه مجموعه پیچک‌های سری در برابر دو قطب، با یکدیگر موازی بسته شده‌اند (شکل ۳-۳ الف)، می‌توان گفت تعداد دور کل سیم‌پیچی ژنراتور مارلی برابر ۲۱ (۷ × ۳) است. همچنین برای ژنراتور آنسالدو، تعداد دور هر پیچک ژنراتور مارلی (در هر لایه شیار) ۱ و تعداد پیچک‌های سری در برابر هر قطب آن ۱۰ می‌باشد. با توجه به اینکه مجموعه پیچک‌های در برابر دو قطب این ژنراتور بر خلاف ژنراتور مارلی با یکدیگر سری بسته شده‌اند (تا کمبود ولتاژ ناشی از تعداد دور پایین در هر شیار در خروجی جبران شود، شکل ۳-۳ ب)، می‌توان گفت تعداد دور کل سیم‌پیچی ژنراتور مارلی برابر ۲۰ (۱ × ۲۰) است. بنابراین ملاحظه می‌شود که تعداد دور کل سیم‌پیچی دو ژنراتور تقریباً برابر است (۲۰ ~ ۲۱).

حال جهت افزایش جریان خروجی ژنراتور با حفظ توان نامی، در ژنراتور آنسالدو می‌توان از ایده موازی کردن مجموعه پیچک‌های برابر دو قطب استفاده کرد. بدین ترتیب می‌توان جریان نامی خروجی را با نصف کردن ولتاژ نامی، تا دو برابر افزایش داد. در خصوص ژنراتور مارلی نیز به دلیل سری بودن مجموعه پیچک‌های در برابر دو قطب، نمی‌توان از این ایده استفاده کرد، اما می‌توان تعداد دور هر پیچک را در داخل شیارها به یک سوم کاهش داد (سطح مقطع هادی ۳ برابر می‌شود) تا بدین ترتیب با یک سوم شدن ولتاژ نامی، جریان خروجی ژنراتور تا ۳ برابر قابلیت افزایش دارد. از طرفی با بررسی ابعاد شیارهای دو ژنراتور، مشاهده گردید که عرض شیارهای ژنراتور مارلی، ۶۰ الی ۷۰ درصد بیشتر از عرض شیارهای ژنراتور آنسالدو است که این ویژگی منجر به کاهش درخور توجه راکتانس‌های ناشی گذرای ژنراتور مارلی می‌شود. بنابراین با توجه به تحلیل‌های فوق با فرض اعمال اصلاحات، ژنراتور مارلی قابلیت جریان دهی بالایی نسبت به ژنراتور آنسالدو به عنوان ژنراتور اتصال کوتاه خواهد داشت. بدین منظور سایر مطالعات تکمیلی در ادامه تنها بر روی این ژنراتور صورت می‌پذیرد.

### ۳-۵- بررسی تکمیلی ژنراتورهای مارلی و برداشت اطلاعات

پس از تعیین ژنراتورهای مارلی به عنوان ژنراتور مناسب جهت مطالعه به کارگیری به عنوان ژنراتور اتصال کوتاه، در مرحله بعدی، وضعیت این ژنراتورها و اطلاعات تکمیلی آنها بررسی شد. در حال حاضر ۴ واحد ژنراتور مارلی در نیروگاه ری موجود می‌باشد که یکی از آنها (واحد ۲۸) در حال کار است و سه واحد دیگر (واحدهای ۲۵ تا ۲۷) از مدار خارج شده‌اند. از میان ۳ ژنراتور فوق نیز روتور ژنراتور واحد ۲۶ که سابقاً به دلیل مشکل فنی در رینگ نگهدارنده<sup>۱</sup>، به طور کامل خارج شده است و امکان مشاهده و بررسی اجزای داخل آن وجود دارد، انتخاب گردید که در بازدیدهای مورخ ۹۹/۰۲/۱۵، ۹۹/۰۲/۱۶ و ۹۹/۰۲/۲۲ در بابراکت‌های دو سمت آن توسط پرسنل نیروگاه باز شد و جهت مطالعات تکمیلی در اختیار تیم پروژه قرار گرفت (شکل ۳-۴). مشخصات نامی ژنراتور به شرح جدول ۳-۱ است و سیم‌پیچی این ژنراتور به صورت دولایه و ۳ دور در هر لایه انجام شده است.

جدول ۳-۱: مشخصات فنی ژنراتور مارلی واحد ۲۶ نیروگاه ری

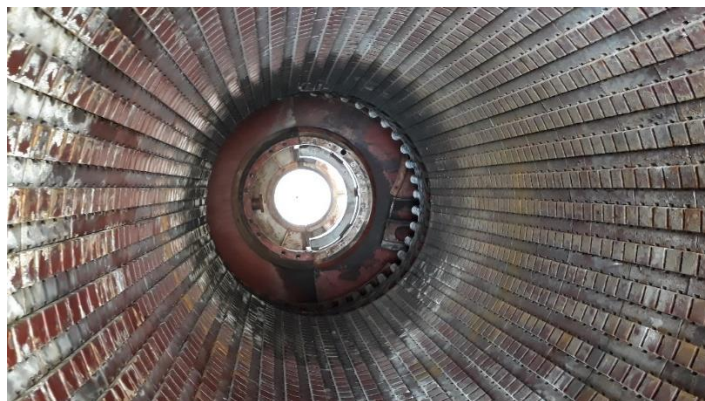
| عنوان پارامتر                           | مقدار  |
|-----------------------------------------|--------|
| توان نامی (kVAR)                        | ۴۴،۱۴۱ |
| ولتاژ نامی (V)                          | ۱۱،۰۰۰ |
| جریان نامی (A)                          | ۲،۳۱۷  |
| فرکانس (Hz)                             | ۵۰     |
| ضریب قدرت (%)                           | ۸۵     |
| دمای محیط برای عملکرد نامی (deg)        | ۱۵     |
| ارتفاع از سطح دریا برای عملکرد نامی (m) | ۰      |
| سرعت نامی (rpm)                         | ۳۰۰۰   |
| تعداد قطب                               | ۲      |
| اضافه سرعت (rpm)                        | ۳۶۰۰   |
| تعداد شیار استاتور                      | ۴۲     |

1- Retaining ring

|         |                      |
|---------|----------------------|
| ۲       | تعداد لایه سیم‌پیچی  |
| ۳       | تعداد دور در هر لایه |
| ۱۹۰-۲۴۰ | ولتاژ میدان (V)      |
| F       | کلاس عایقی           |



شکل ۳-۴: عملیات بازکردن براکت‌های جلو و عقب ژنراتور مارلی واحد ۲۶ جهت بررسی داخل آن



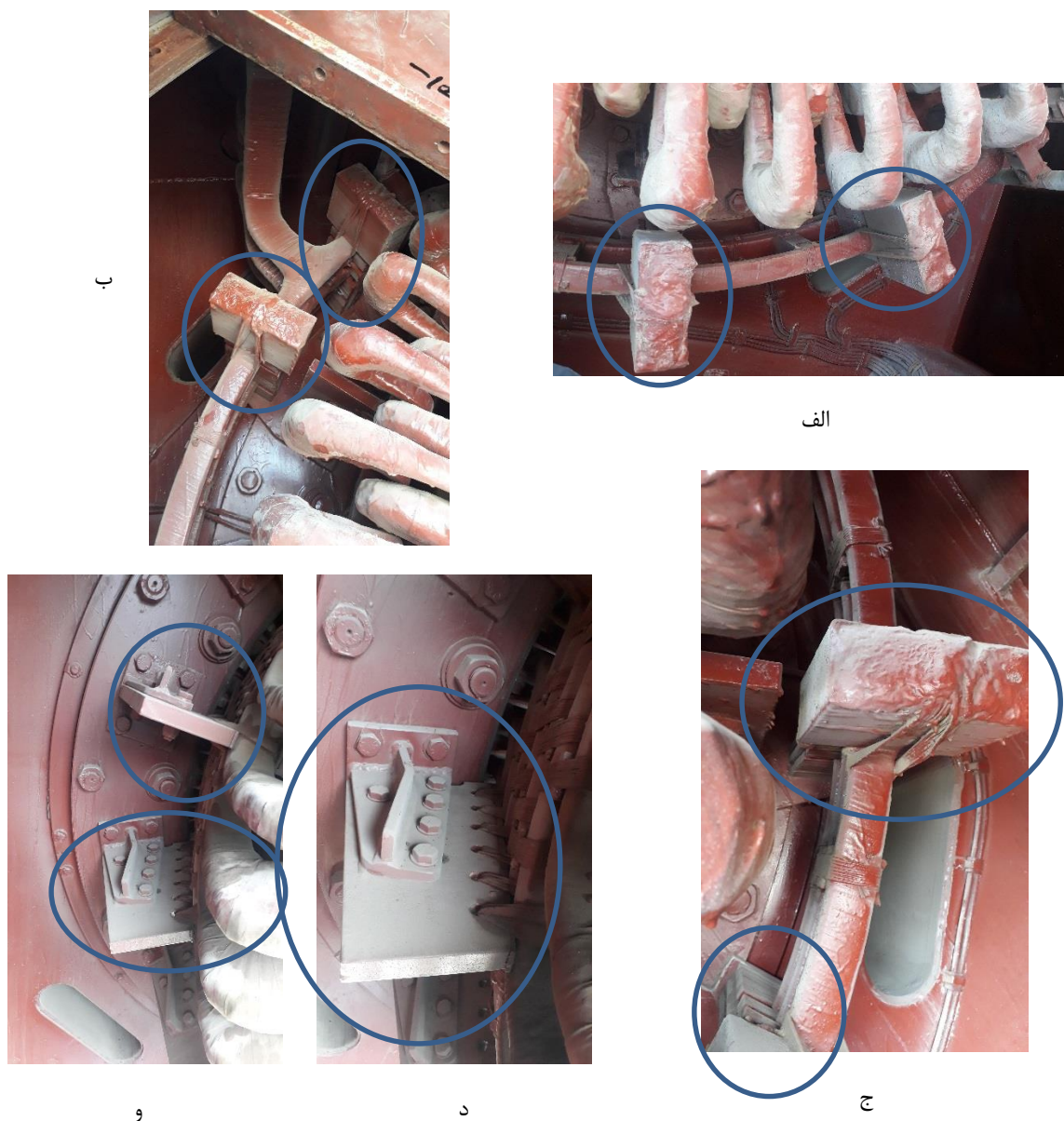
شکل ۳-۵: فضای داخل استاتور



شکل ۳-۶: اورهنگ سیم‌پیچی استاتور در سمت توربین



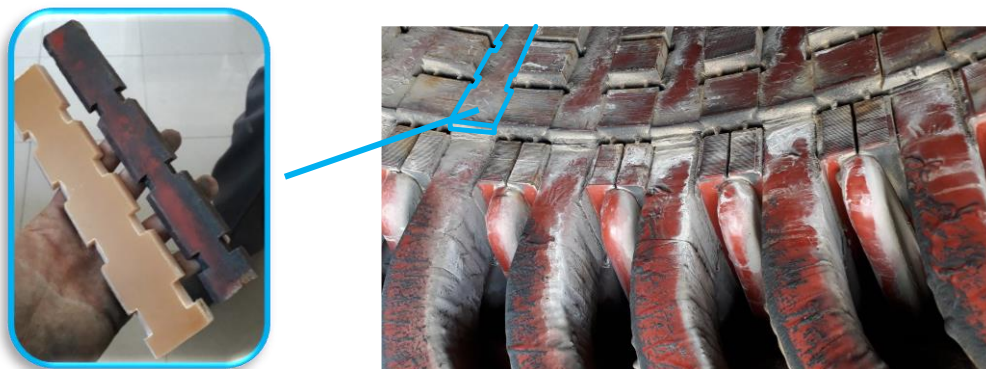
شکل ۳-۷: اورهنگ سیم‌پیچی استاتور در سمت سربندی (کلکتور)



شکل ۳-۸: تصاویر نگهدارنده‌های اورهنگ سیم‌پیچی استاتور (الف) تا (ج) نگهدارنده‌های سربندی کلاف‌ها (د) و (و) نگهدارنده‌های کلاف‌ها

در شکل ۳-۵ تا شکل ۳-۱۰ فضای داخل استاتور بدون روتور، اورهنگ ژنراتور در انتهای سمت توربین<sup>۱</sup> و انتهای سمت کلکتور تحریک<sup>۲</sup> و روتور نشان داده شده است.

1- Turbine End  
2- Collector End



شکل ۳-۹: گوه شیپارهای استاتور

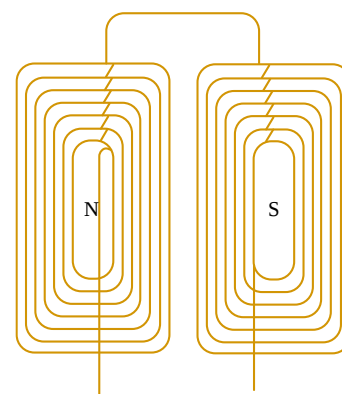


(ج)

(ب)

(الف)

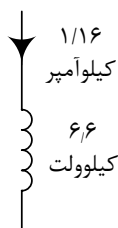
شکل ۳-۱۰: تصویر روتور بدون رینگ نگهدارنده<sup>۱</sup> (الف) و (ب) اورهنگ روتور (ج) گوه شیپار روتور



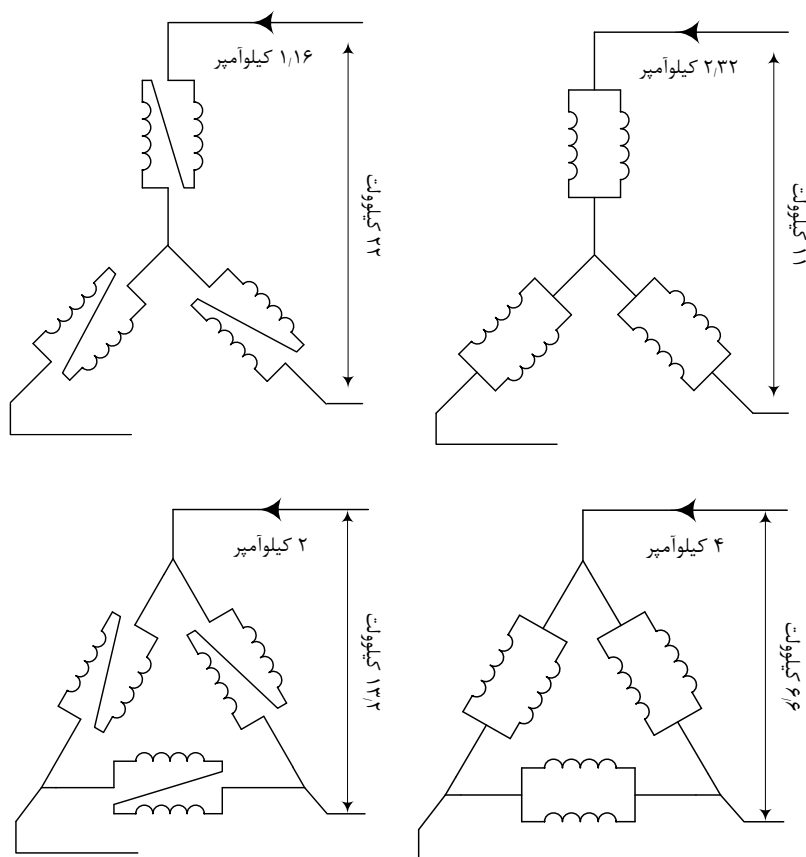
ب

الف

شکل ۳-۱۱: نقشه سیم‌پیچی روتور (الف) و یک فاز استاتور (ب)



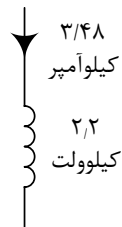
شکل ۳-۱۲: ولتاژ و جریان نامی هر پیچک قطب بدون تغییر تعداد دور سیم‌پیچی (۳ دور)



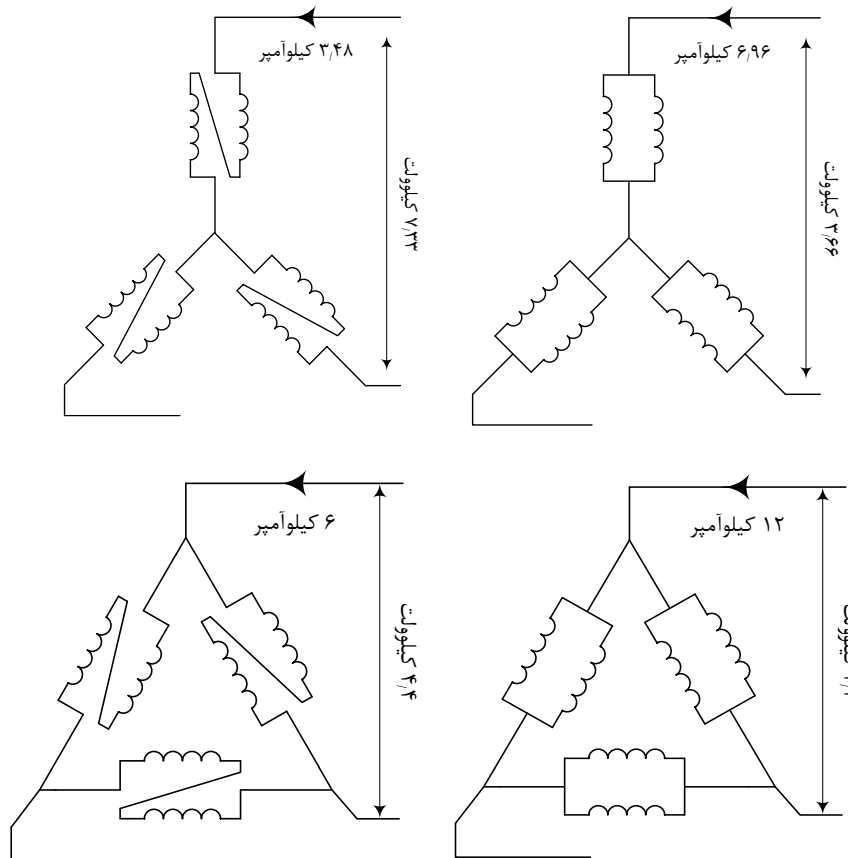
شکل ۳-۱۳: ترکیب ولتاژ و جریان نامی با قابلیت دستیابی در خروجی ژنراتور بدون تغییر تعداد دور سیم‌پیچی (۳ دور)

در شکل ۳-۱۱ نقشه سیم‌پیچی استاتور و روتور ژنراتور مارلی نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، مجموعه پیچک‌های روبروی دو قطب استاتور با یکدیگر موازی بسته شده‌اند. سیم‌پیچی روتور این ژنراتور نیز به صورت هم‌مرکز انجام شده است. با توجه به هدف کاربری ژنراتور برای تست‌های توان‌بالا، جهت افزایش قابلیت‌های ولتاژی و جریانی آن، بهتر است که با اعمال تغییراتی در سربندی آن، امکان دستیابی به ترکیب‌های مختلف نسبت ولتاژ و جریان به وجود آید. هر پیچک فاز ژنراتور دارای جریان نامی ۱/۱۶ کیلوآمپر و ولتاژ نامی ۶/۶ کیلوولت است (شکل ۳-۱۲). بدین ترتیب اگر دو سر هر دو پیچک هر سه فاز (مجموعاً ۱۲ سر) در ترمینال ژنراتور وجود داشته باشد، با ایجاد مکانیزمی امکان دستیابی به ۴ ترکیب ولتاژ و جریان مطابق شکل ۳-۱۳ با اتصال سری و موازی پیچک‌ها و اتصال ستاره و مثلث فازها وجود خواهد داشت. از طرفی جهت دستیابی به جریان‌های شدیدتر در خروجی، می‌توان با تغییر تعداد دور سیم‌پیچی ژنراتور (از ۳ دور به ۱ دور، با ۳ برابر کردن سطح مقطع هادی‌ها)،

جریان و ولتاژ هر پیچک را به ترتیب ۳ برابر و یک‌سوم کرد (شکل ۳-۱۴) که در نتیجه می‌توان به ترکیب‌های شکل ۳-۱۵ در خروجی دست یافت.



شکل ۳-۱۴: ولتاژ و جریان نامی هر پیچک قطب با تغییر تعداد دور سیم‌پیچی (۱ دور)



شکل ۳-۱۵: ترکیب ولتاژ و جریان نامی با قابلیت دستیابی در خروجی ژنراتور با تغییر تعداد دور سیم‌پیچی (۱ دور)

### ۳-۶- امکان‌سنجی به‌کارگیری ژنراتور مارلی به‌عنوان ژنراتور اتصال کوتاه

بررسی‌های صورت گرفته بر روی ژنراتور مارلی نشان داد که در این ژنراتور از نظر ترکیب‌های مختلف ولتاژی، امکان دستیابی به جریان نامی بالاتر با تغییر این ترکیب وجود دارد. به‌طوری که ولتاژ ژنراتور از ۱۱ کیلوولت به ۳/۶ کیلوولت می‌رسد که در این صورت جریان نامی ژنراتور تا ۳ برابر افزایش پیدا می‌کند. از طرفی با توجه به ولتاژ

هدف ژنراتور اتصال کوتاه که ۱/۱۳ کیلوولت می‌باشد، همچنان امکان اصلاح و بهبود جریان ژنراتور با حفظ بارگذاری یکسان وجود دارد. اما با توجه به این که ولتاژ ۱۱ کیلوولت در خروجی ژنراتور در آزمایش‌های قدرت دیگر، ولتاژ مفیدی می‌باشد، مقرر گردید تا ژنراتور فوق‌الذکر بدون تغییر در نسبت تعداد دور سیم‌پیچی‌ها در سیستم ژنراتور اتصال کوتاه استفاده شود. بنابراین جریان اتصال کوتاه با قابلیت دستیابی کمتر از مقدار هدف پروژه (۱۰۰ کیلوآمپر) خواهد بود. مقدار جریان قابل دستیابی در این ژنراتور در فصل بعد مطالعه خواهد شد. در ادامه سایر مباحث مطرح در خصوص امکان به‌کارگیری ژنراتور به‌عنوان ژنراتور اتصال کوتاه بررسی می‌شود.

در خصوص به‌کارگیری ژنراتور مارلی به‌عنوان یک ژنراتور اتصال کوتاه، چالش‌هایی مطرح است که به‌صورت زیر می‌توان بیان کرد [۵]:

- با توجه به کاربری ژنراتور به‌عنوان یک ژنراتور تولید توان نیروگاهی، بالابودن راکتانس‌های ناشی ژنراتور موجب می‌گردد مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه دریافتی از ژنراتور کم باشد.
- نگهدارنده‌های پیشانی کلاف‌ها و گوه‌های تعبیه‌شده در شیارها ممکن است تحمل نیروهای وارده بر سیم‌پیچی را نداشته باشد.
- دولایه‌بودن سیم‌پیچی ژنراتور دارای یک مزیت و یک عیب است. در سیم‌پیچی دولایه، استحکام شمش‌ها به‌دلیل بسته‌شدن دولایه به یکدیگر بالاست اما از طرفی در صورت عبور جریان‌های غیرهم‌جهت از دولایه، منجر به واردشدن نیروهای شدید بر سیم‌پیچی بخصوص در ناحیه پیشانی می‌شود.
- بیرینگ‌های ژنراتور از نوع نصب‌شده بر روی محفظه می‌باشد که در ژنراتور اتصال کوتاه، این بیرینگ‌ها تنش‌های اتصال کوتاه را به بدنه ژنراتور منتقل و منجر به مشکلات مکانیکی می‌شود.
- ممان اینرسی روتور ژنراتور مارلی به‌دلیل پایین‌بودن تعداد قطب آن ممکن است ظرفیت کافی برای ذخیره انرژی اتصال کوتاه را نداشته باشد و در تست اتصال کوتاه، افت سرعت آن بیش از حد استاندارد باشد.
- ژنراتور مارلی سیم‌پیچی دمپر ندارد و گوه‌های آلیاژ آلومینیوم آنکه توسط رینگ‌نگهدارنده پیشانی سیم‌پیچی روتور اتصال کوتاه می‌شود، به‌عنوان دمپر عمل می‌کند. راکتانس ناشی دمپر تا حد درخور توجهی در اندازه جریان اتصال کوتاه تندگذر تأثیر دارد و از طرفی می‌تواند در میزان افت مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه تأثیر بگذارد.
- جاروبک‌های تعبیه‌شده بر روی رینگ‌های لغزان روتور جهت انتقال جریان به سیم‌پیچی تحریک، ممکن است در صورت عبور جریان‌های بالا معیوب شود و تحمل عبور چنین جریانی را نداشته باشد.

بنابراین با توجه به چالش‌های فوق‌الذکر به‌منظور استفاده از این ژنراتور به‌عنوان ژنراتور اتصال کوتاه، لازم است تغییراتی در ساختار آن اعمال شوند. اولین و مهم‌ترین راه برای افزایش جریان اتصال کوتاه بدون تغییر نسبت تعداد دور سیم‌پیچی، اعمال اصلاحات جهت کاهش راکتانس زیرگذرای ژنراتور است. در این حالت با کاهش سطح مقطع هادی‌ها، عمق شیارها کاهش می‌یابد و پشته هادی‌ها نیز با ماده‌ای مستحکم پر و یا جهت اجرای مجاری

خنک‌سازی استفاده می‌شوند. در نتیجه این تغییرات، جریان نامی ژنراتور کاهش می‌یابد، اما با توجه به مدت زمان کوتاه تست اتصال کوتاه، جریان گذرا می‌تواند تا چندین برابر جریان نامی باشد. این تغییرات در سیم‌پیچی هم در روتور و هم در استاتور اعمال خواهد شد، اما نسبت تغییر دور باید ثابت باشد و تغییر تعداد دور روتور و استاتور به صورت هم‌زمان صورت گیرد. نکته‌ی حائز اهمیت در تغییر تعداد دورها آن است که نسبت تغییر دورها و در نتیجه ولتاژ نامی ژنراتور (۱۱ کیلوولت) ثابت بماند.

همچنین با توجه مطالعات اولیه و بررسی مراجع، به نظر می‌رسد که جهت مهار نیروهای وارده (نیروی دولایه به یکدیگر) بر سیم‌پیچی، بایستی به صورت تک‌لایه تغییر یابد و جهت ثابت ماندن ولتاژ خروجی، می‌توان مسیرهای موازی سیم‌پیچی ژنراتور را به صورت سری متصل کرد. در سیم‌پیچی تک‌لایه نیز با توجه به کاهش ضخامت شمش‌ها، ممکن است هادی استحکام لازم را نداشته باشد که این انتخاب بایستی در مرحله طراحی تفصیلی ژنراتور در مرحله اجرا تصمیم‌گیری شود.

با توجه به اینکه عبور جریان بالای اتصال کوتاه باعث می‌شود نیروی وارده به سیم‌پیچی‌ها در شیارها و اورهنگ ژنراتور به میزان مجذور نسبت تبدیل افزایش یابد، لذا لازم است نگهدارنده‌های اورهنگ، اسپیسرها بین دورهای سیم‌پیچی، نگهدارنده‌های پشت کلاف‌ها و سربندی کلاف‌ها و در صورت نیاز، گوه‌های شیارها تقویت شوند.

نیروهای اتصال کوتاه، منجر به وارد شدن تنش به محفظه ژنراتور، بیرینگ‌ها و فنداسیون محل نصب ژنراتور می‌شود. به منظور رفع چنین مشکلی با توجه به تجارب موجود، استفاده از بیرینگ‌های Pedestal به جای بیرینگ‌های سوار بر محفظه ژنراتور پیشنهاد می‌شود تا نیروهای تنش روتور به محفظه ژنراتور منتقل نشود. همچنین در سکوی نصب ژنراتور بر روی فنداسیون، استفاده از صفحات فتری جهت میرا کردن و محدود کردن نوسانات ژنراتور وارد بر فنداسیون پیش‌بینی می‌شود.

در خصوص جاروبک‌های انتقال جریان تحریک به سیم‌پیچی روتور نیز استفاده از تعداد بالاتر زغال جهت تقسیم جریان بین تعداد بالاتر زغال پیش‌بینی می‌شود تا بدین ترتیب از تخریب این قطعات در برابر عبور جریان زیاد، جلوگیری شود.

سیم‌پیچی دمپر در ژنراتور اتصال کوتاه، نقش مهمی دارد و در صورتی که گوه‌های موجود در شیارهای روتور مشخصات لازم دمپر را ارضا نکند، بایستی اصلاحاتی در خصوص عمق نصب گوه‌ها و سطح مقطع آنها صورت پذیرد که این گزینه نیز در مرحله طراحی تفصیلی انجام خواهد شد.

در خصوص انرژی ذخیره‌شده در روتور در سرعت نامی نیز بایستی بررسی شود که در صورت کافی نبودن این انرژی جهت اعمال اتصال کوتاه بدون افت بیش از حد استاندارد سرعت، استفاده از فلاپویل جهت افزایش ممان اینرسی مجموعه دوار پیش‌بینی می‌شود.

### ۳-۷- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، توان ژنراتورهای به کاررفته در صنایع دارای واحدهای تولید برق، عمدتاً کمتر از ۲۵ مگاوات است و متناسب با توان اتصال کوتاه ۱۰۰ مگاوات‌آمپر نمی‌باشد. در برخی موقعیت‌های محدود

نیز توان‌های بزرگ‌تر و متناسب با توان هدف پروژه مشاهده می‌شود، اما با توجه به محدود بودن تعداد آنها و همچنین جدید بودن واحد مربوطه و آزاد نبودن ژنراتور، احتمال امکان یافتن و اخذ این ژنراتورها پایین به نظر می‌رسد. در برخی موقعیت‌ها نیز توان‌های بالا و در حدود ۱۶۰ مگاوات به کار گرفته شده است که بیشتر از توان ضروری پروژه است. در طرف دیگر، نیروگاه‌های کشور است که با توجه به طیف وسیع توانی ژنراتورها و تعداد زیاد آنها، امکان یافتن ژنراتور مستعمل و خارج از شبکه در این حوزه بسیار زیاد است. بخصوص ارتباطات نزدیک پژوهشگاه نیرو با شرکت مادر تخصصی برق حرارتی، بروکراسی‌های زیاد را کاهش داده و همچنین امکان بررسی‌های دقیق‌تر بر روی ژنراتورهای نیروگاهی کاندید را بیشتر می‌کند.

با بررسی ژنراتورهای نیروگاهی نیز از طریق پیشنهاد مدیران شرکت برق حرارتی، ژنراتورهای ۴۴ مگاوات آمپری ساخت شرکت‌های آنسالدو و مارلی نیروگاه ری به‌عنوان کاندیدای چنین طرحی انتخاب شدند که پس از چندین مرحله بازدید از این ژنراتورها و بررسی امکان دستیابی به جریان بیشتر، ژنراتور مارلی به‌عنوان ژنراتور مناسب انتخاب و پارامترهای ابعادی و مشخصات فنی آن از طریق نقشه‌برداری و مطالعه مستندات موجود استخراج گردید و همچنین امکان دستیابی به ترکیب‌های مختلف ولتاژ در خروجی ژنراتور در این فصل بررسی شد که در نهایت مقرر گردید ولتاژ خروجی ژنراتور همان ولتاژ نامی فعلی (۱۱ کیلوولت) بماند.

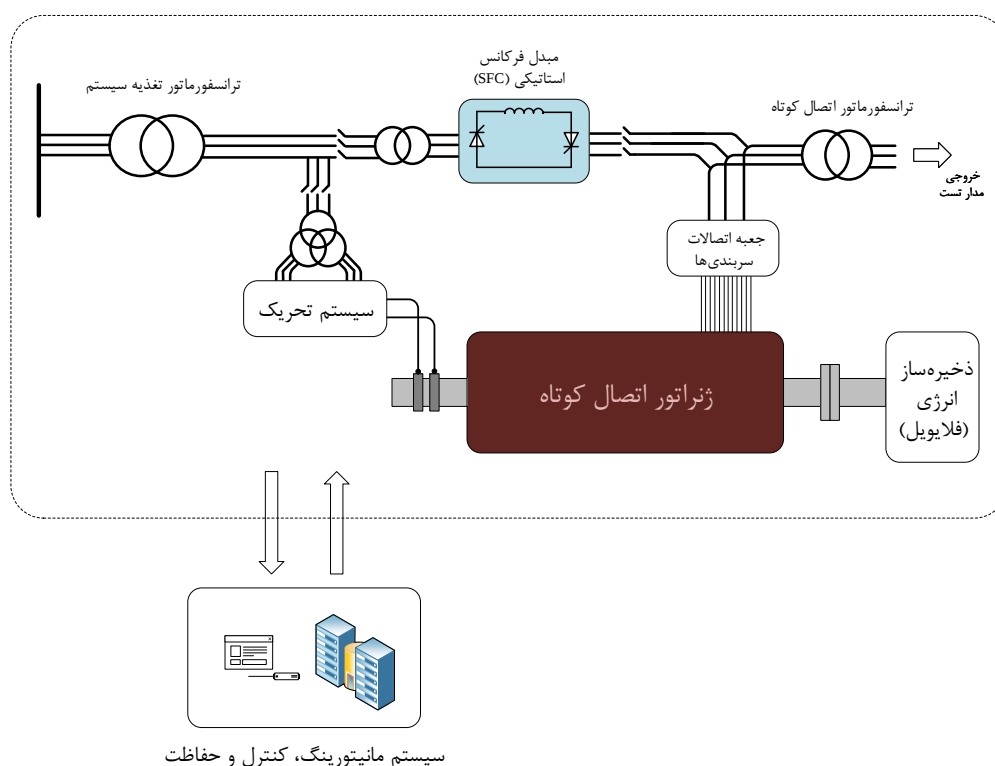
همچنین در این فصل چالش‌های موجود در پیش روی به‌کارگیری این ژنراتور به‌عنوان ژنراتور اتصال کوتاه شناسایی و راهکارهای موجود ارائه شدند. برخی از این موارد عبارت‌اند از کاهش راکتانس زیرگذرای ژنراتور از طریق کاهش عمق شیارها، بهبود استحکامات مکانیکی در نواحی دارای تنش‌های مکانیکی بسیار، استفاده از بیرینگ‌های Pedestal، نصب صفحات دمپر بر روی فندانسیون نصب ژنراتور، بهبود گوه‌های روتور به‌منظور استفاده به‌عنوان سیم‌پیچی دمپر و جاروبک‌های انتقال جریان به روتور. در نهایت نیز عنوان شد در صورت کافی نبودن ممان اینرسی روتور جهت ذخیره انرژی اتصال کوتاه، بایستی استفاده از فلاپویل در دستور کار قرار گیرد.

## **فصل چهارم**

**شبیه‌سازی نرم‌افزاری سیستم، مطالعه پارامترهای  
خروجی و طراحی و اصلاح مدل جهت دستیابی به  
مشخصات خروجی مطلوب**

## ۴-۱- مقدمه

با توجه به انتخاب ژنراتور و نقشه‌برداری ابعاد کلی، شیارها و ... در فصل پیش رو، ابتدا پارامترهای دینامیکی ژنراتور با استفاده از تحلیل‌های ریاضی محاسبه می‌شود. البته به‌دست‌آوردن مقادیر دقیق این پارامترها نیاز به تحلیل‌های الکترومغناطیسی دقیق با نرم‌افزارهای المان محدود دارد که با توجه به مطالعه کلی و امکان‌سنجی به‌کارگیری ژنراتور مربوطه، تحلیل‌های ریاضی بدین منظور و تا این مرحله اتکاپذیر هستند.



شکل ۴-۱: شماتیک سیستم ژنراتور اتصال کوتاه

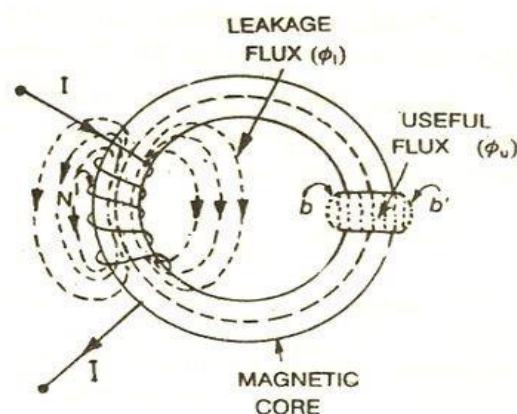
پس از محاسبه پارامترهای دینامیکی ژنراتور، شماتیک کلی سیستم ژنراتور اتصال کوتاه که در شکل نشان داده شده است مطالعه می‌شود. در این مرحله ابتدا ژنراتور بدون در نظر گرفتن سیستم راه‌انداز، در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink شبیه‌سازی شده و پارامترهای اتصال کوتاه با مقادیر استاندارد مقایسه می‌شود و در صورت مغایرت، پارامترهای مربوطه، طراحی و در مدل اصلاح می‌شود. در نهایت مشخصات سایر تجهیزات جانبی ژنراتور نیز طراحی و شبیه‌سازی می‌شود.

## ۴-۲- محاسبات راکتانس‌های ناشی ماشین سنکرون

اصولاً در ماشین‌های الکتریکی متمرکز کردن تمام شار به مسیرهای مفید، غیرممکن است و همیشه ناشی

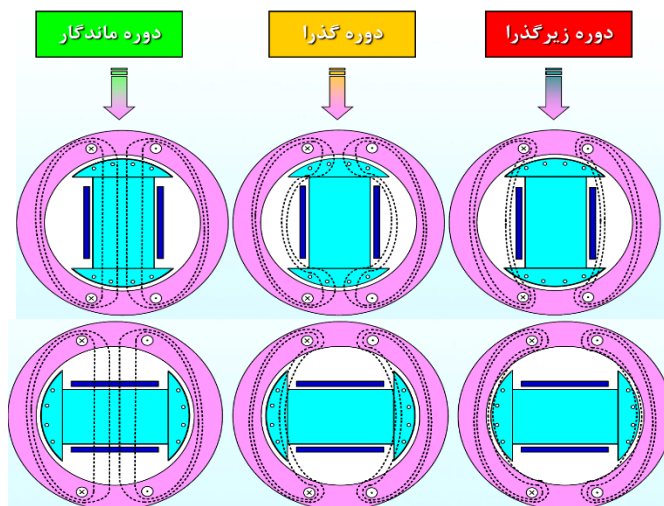
شار وجود دارد. اگر نشتی متناوب باشد در هر سیم‌پیچی که با آن مرتبط باشد ولتاژ القاء می‌کند که این ولتاژ را افت ولتاژ واکنشی نشتی می‌نامند. مقاومت القایی نظیر این ولتاژ اثر مهمی بر عملکرد ماشین‌های جریان متناوب می‌گذارد [۲۲].

محاسبات میزان شارهای نشتی مشکل است، زیرا مسیرهای نشتی از نظر هندسی پیچیده‌اند. به‌دست‌آوردن نتایج صحیح غیرممکن است؛ چون از نظر ریاضی تعیین هندسه پیچیده شار پراکندگی نیز ممکن نیست. به‌همین دلیل معمولاً نتایج به‌دست‌آمده با اطلاعات تجربی مقایسه می‌شود [۲۲].



شکل ۴-۲: مفهوم شار مفید و شار نشتی در یک سیم‌پیچی حامل جریان

در ژنراتورهای سنکرون در لحظه بروز اتصال کوتاه، شار عبوری از دمپر و سیستم تحریک نمی‌تواند به‌طور ناگهانی تغییر کند، لذا ابتدا جهت جلوگیری از این تغییرت شار، رلوکتانس شدیدی به‌عنوان رلوکتانس دوره تندگذر در مسیر شار اصلی دیده می‌شود. این رلوکتانس با گذر زمان به‌دلیل عبور شار بیشتر از مسیر روتور، مقدار گذرای کوچک‌تری پیدا کرده و در نهایت به مقدار حداقل خود و حالت پایدار باز می‌گردد. رلوکتانس‌های ذکرشده در مدار معادل ماشین عامل به‌وجودآمدن سه راکتانس در سه بازه زمانی کاری بوده که به‌عنوان راکتانس‌های تندگذر (زیرگذر)، گذرا و حالت دائم شناخته می‌شوند.

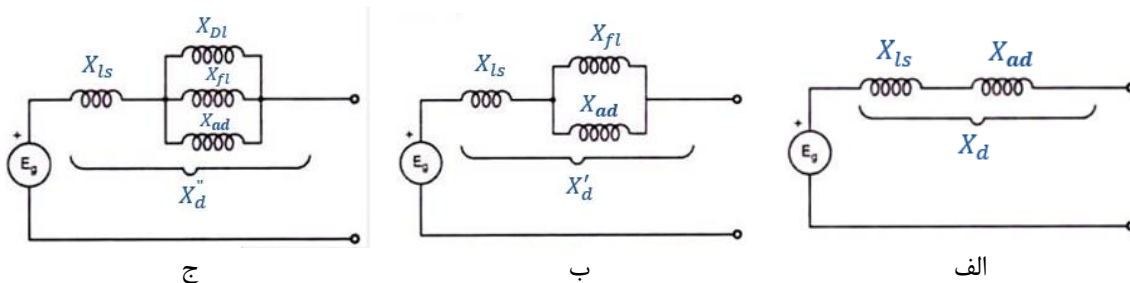


شکل ۴-۳: وضعیت عبور شار از روتور ماشین سنکرون در سه وضعیت تندگذر، گذرا و حالت دائم

در ژنراتورهای تست اتصال کوتاه به منظور دریافت جریان‌های بسیار شدید در مدت زمان‌های کم، می‌بایست مقدار راکتانس زیرگذرا تا حد امکان کوچک باشد. کوچک بودن این راکتانس به معنی به حداقل رساندن مسیرهای نشت شار و نزدیک شدن ماشین به حالت ایدئال می‌باشد. روابط مربوط به راکتانس‌های تندگذر و گذرای ماشین سنکرون به صورت زیر است [۲۳]:

$$X_d'' = X_{ls} + X_{ad} \parallel X_{fl} \parallel X_{DI} \quad ۱-۴$$

$$X_d' = X_{ls} + X_{ad} \parallel X_{fl} \quad ۲-۴$$



شکل ۴-۴: مدارهای معادل اتصال کوتاه ژنراتور سنکرون؛ الف) مدار معادل حالت دائم ژنراتور ب) مدار معادل گذرای ژنراتور ج) مدار معادل تندگذر ژنراتور

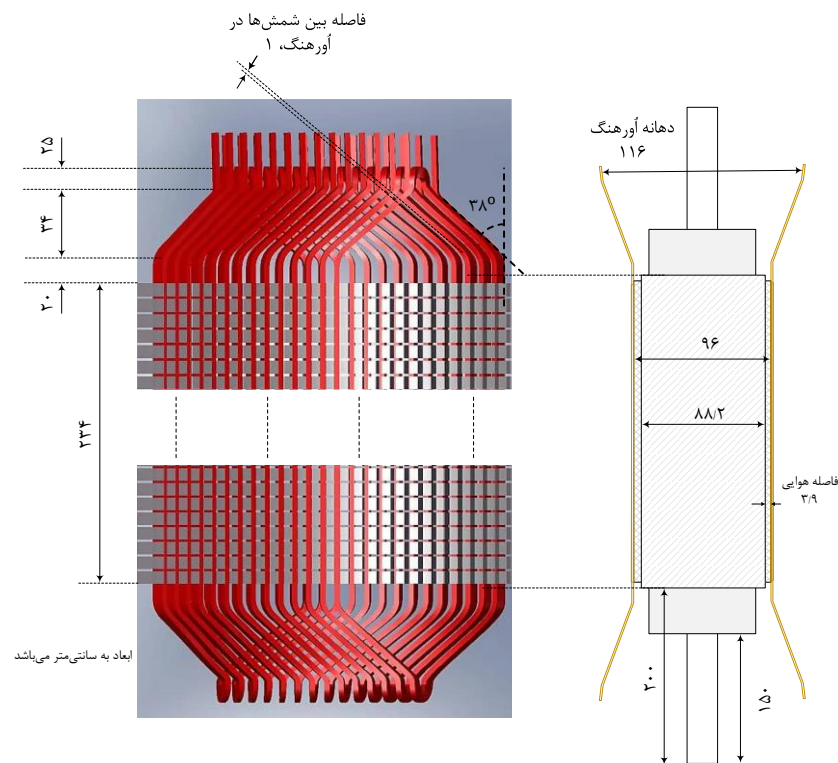
در رابطه فوق  $X_d''$  راکتانس تندگذر ماشین،  $X_{ls}$  راکتانس نشتی سیم‌پیچی استاتور،  $X_{ad}$  راکتانس فاصله هوایی،  $X_{fl}$  راکتانس نشتی سیم‌پیچی تحریک و  $X_{DI}$  راکتانس نشتی میله‌های دمپر می‌باشد. نشت شار سیم‌پیچی استاتور خود از سه بخش نشت شیار، نشت اورهنگ و نشت فاصله هوایی تشکیل می‌شود [۲۴]:

$$X_{ls} = X_{slot} + X_{overhang} + X_{zigzag} + X_{tooth} \quad ۳-۴$$

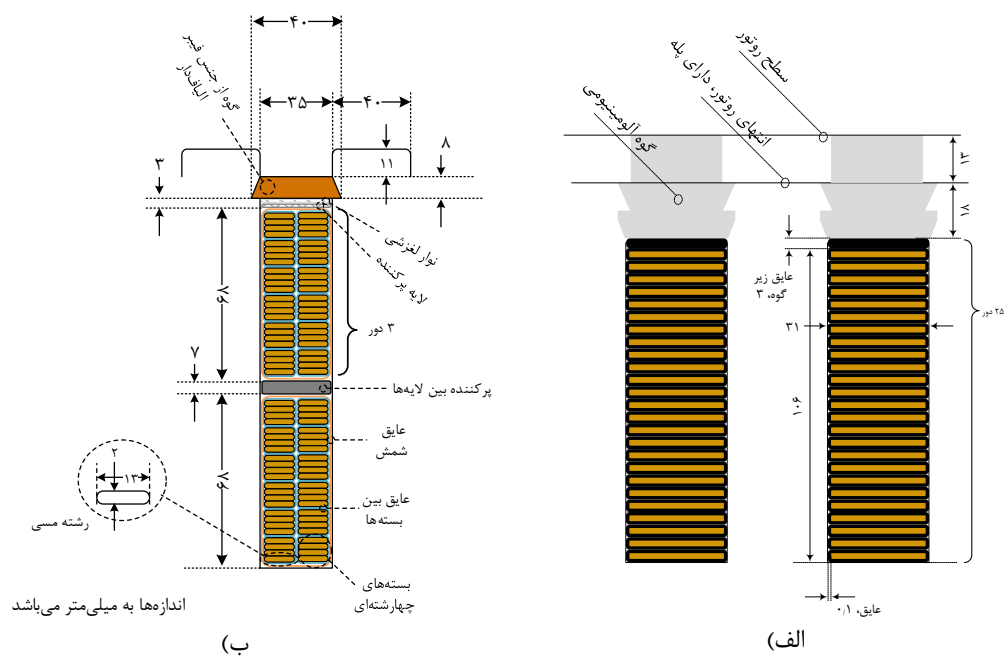
راکتانس نشتی سیم‌پیچی تحریک نیز از دو بخش نشت اورهنگ و نشت شیار تشکیل شده است. به همین دلیل می‌توان نتایج مشابه نشت شیار استاتور، برای شیار رتور نیز در نظر گرفت.

لازم به ذکر است که روابط تحلیلی جهت بررسی راکتانس‌های نشتی، در [۸] پیشنهاد شده است و تنها جهت بررسی رفتار نشت برحسب دیگر پارامترها استفاده می‌شود. به همین جهت در نمونه‌هایی که قابلیت محاسبه دقیق ندارند، تا حدودی از مقادیر تجربی نیز کمک گرفته شده است. محاسبه دقیق راکتانس‌های گذرا در مطالعه تحلیل الکترومغناطیسی با نرم‌افزارهای المان محدود انجام می‌شود.

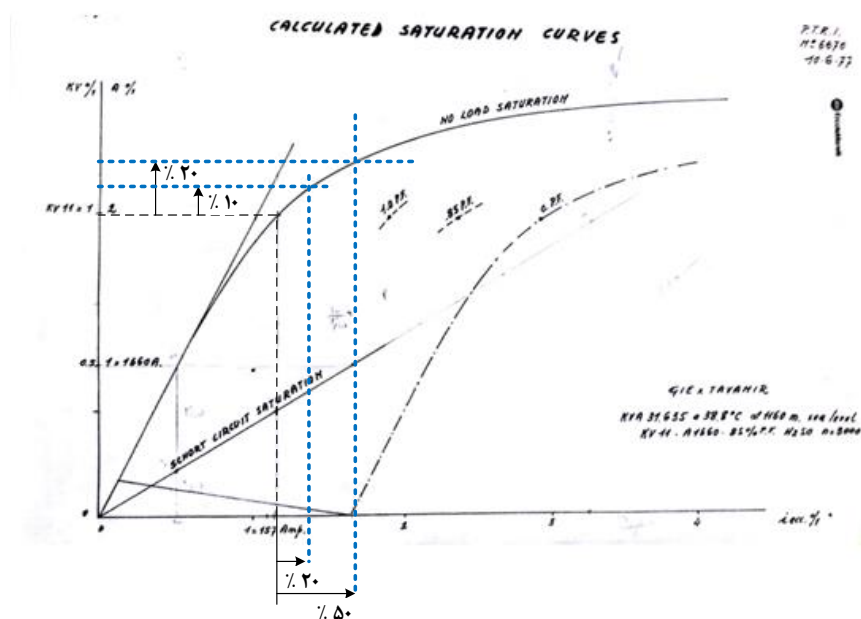
نقشه ابعادی روتور و استاتور ژنراتور مارلی در شکل ۴-۵، همچنین نقشه ابعادی مقطع شیارهای روتور و استاتور در شکل ۴-۶ و همچنین تصویر مشخصه اشباع ژنراتور در شکل ۴-۷ نشان داده شده است که در ادامه جهت محاسبه پارامترها استفاده می‌شود.



شکل ۴-۵: نقشه ابعادی روتور و استاتور ژنراتور مارلی



شکل ۴-۶: نقشه ابعادی سطح مقطع شیارهای (الف) روتور و (ب) استاتور

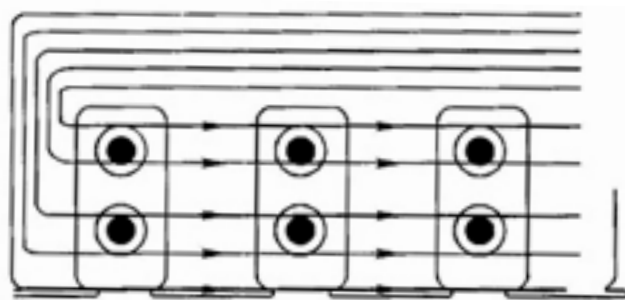


شکل ۴-۷: تصویر مشخصه اشباع ژنراتور مارلی

با توجه به اینکه در حال حاضر فقط به مشخصه اشباع موجود می‌توان اکتفا کرد، از روی این مشخصه می‌توان مشاهده کرد که امکان افزایش شار ژنراتور تا ۲۰ درصد وجود دارد که این گزینه با افزایش ۵۰ درصدی جریان تحریک در حالت بی‌باری انجام‌پذیر است.

#### ۴-۲-۱- راکتانس نشتی شیاری

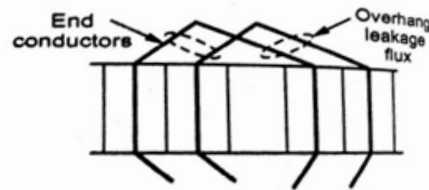
شار نشتی شیاری در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. این شار شیاری را از یک دندانه تا دندانه بعدی طی می‌کند و با برگشت خود به داخل آهن با قسمتی از هادی‌های زیرش پیوند حاصل می‌کند. به بیان دیگر این شار فاصله هوایی را طی نکرده و وارد رتور نمی‌شود [۲۴].



شکل ۴-۸: شار نشتی شیاری

#### ۴-۲-۲- راکتانس نشتی اتصالات پیشانی

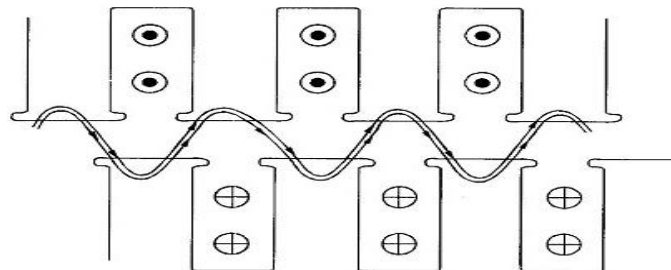
اتصالات پیشانی<sup>۱</sup> سیم‌پیچی آرمیچر شار نشتی جداگانه‌ای تولید می‌کنند که مقدار آن بستگی به وضعیت کَلگی سیم‌ها و مجاورت آنها به مواد فلزی مانند نگهدارنده‌های هسته و سپرهای دارای خواص هدایتی و مغناطیسی دارد. شکل ۹-۴ شار نشتی اتصالات پیشانی را نشان می‌دهد. واضح است که این شار نشتی هویت مستقل دارد و مقدار و توزیع شار کل را تغییر نمی‌دهد [۲۵].



شکل ۹-۴: شار نشتی اتصالات پیشانی در ماشین سنکرون

#### ۴-۲-۳- راکتانس نشتی زیگزاگ (شکسته)

شار زیگزاگ مطابق شکل ۱۰-۴ از یک دندان به دندان دیگر (متقابل بین روتور و استاتور) در فاصله هوایی به صورت شکسته یا زیگزاگ عبور می‌کند. مقدار این شار بستگی به طول فاصله هوایی و وضعیت نسبی نوک دندانها دارد [۲۴].

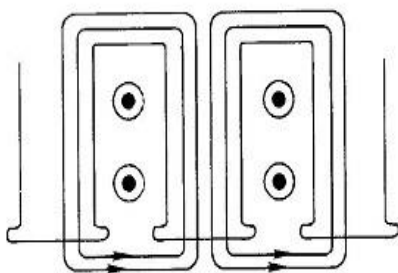


شکل ۱۰-۴: نشت زیگزاگ در ماشین سنکرون

#### ۴-۲-۴- راکتانس نشتی نوک دندان

این شار از نوک یک دندان به نوک دندان دیگر عبور می‌کند. این شار در ماشین‌هایی که فاصله هوایی بزرگ دارند، مانند ماشین‌های DC و ماشین‌های سنکرون کاملاً مهم است. اما در موتورهای القایی معمولاً ناچیز می‌باشد. شکل ۱۱-۴ شار نشتی نوک دندان را نشان می‌دهد [۲۴].

1- Over Hangs



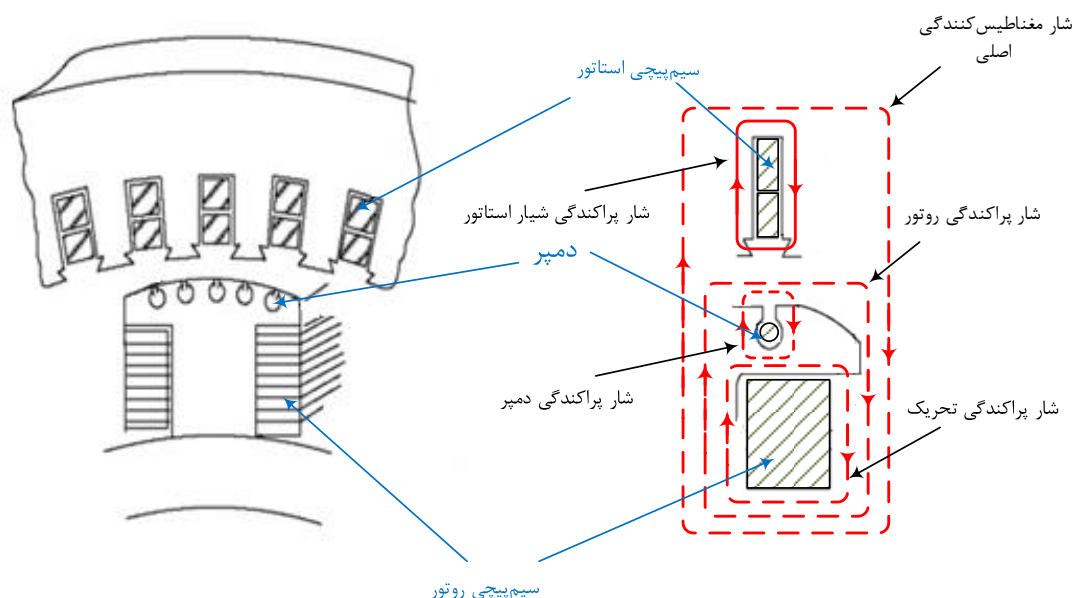
شکل ۴-۱۱: نشت نوک دندان در ماشین سنکرون

#### ۴-۲-۵- راکتانس نشتی کل سیم‌پیچی استاتور

همان طور که بیان شد شار نشتی کل سیم‌پیچی استاتور خود از چهار بخش نشت شیار، نشت اتصالات پیشانی، نشت زیگزاگ و نشت دندان تشکیل می‌شود که هر یک در بخش‌های قبلی تشریح شدند [۲۴].

#### ۴-۲-۶- راکتانس نشتی سیم‌پیچی تحریک

شار نشتی سیم‌پیچی‌های تحریک مانند همان تعریف شار نشتی در سیم‌پیچی‌های استاتور تعریف می‌شود و محاسبات آن نیز به همان شیوه است، با این تفاوت که در سیم‌پیچی تحریک، سیم‌پیچی از نوع تک‌لایه است [۲۵].



شکل ۴-۱۲: نمایش شارهای نشتی شیار استاتور، تحریک و دمپر در ماشین سنکرون

#### ۴-۲-۷- راکتانس نشتی سیم‌پیچی دمپر

در ساختار روتور ژنراتور مارلی، سیم‌پیچی دمپر وجود ندارد و گوه‌های مربوط به شیارهای روتور که جنس آلایژ آلومینیوم دارد، به عنوان دمپر عمل می‌کند. شار نشتی سیم‌پیچی‌های دمپر مانند همانند تعریف شار نشتی در

سیم‌پیچی‌های تحریک و آرمیچر تعریف می‌شود که در شکل ۴-۱۲ نیز نشان داده شده است [۲۳].

#### ۴-۳- محاسبات ثابت‌های زمانی اتصال کوتاه

علاوه بر راکتانس‌های گذرای ژنراتور، ثابت‌های زمانی اتصال کوتاه نیز پارامترهای مهم دیگر در مطالعه خروجی اتصال کوتاه ژنراتور می‌باشد که در ادامه محاسبه شده است [۲۳]:

$$T_d'' = \frac{L_{ld} + L_{ad} \parallel L_{sl} \parallel L_{fl}}{R_d} \quad ۴-۴$$

$$T_d' = \frac{L_{fl} + L_{ad} \parallel L_{sl}}{R_f} \quad ۵-۴$$

در نهایت پارامترهای مربوط به راکتانس‌های نشتی و مقاومت ژنراتور که با استفاده از روابط ارائه شده در مراجع، بخصوص مرجع [۸] محاسبه شده‌اند، به صورت جدول ۴-۱ به دست می‌آید.

جدول ۴-۱: مقادیر تقریبی پارامترهای دینامیکی ژنراتور مارلی

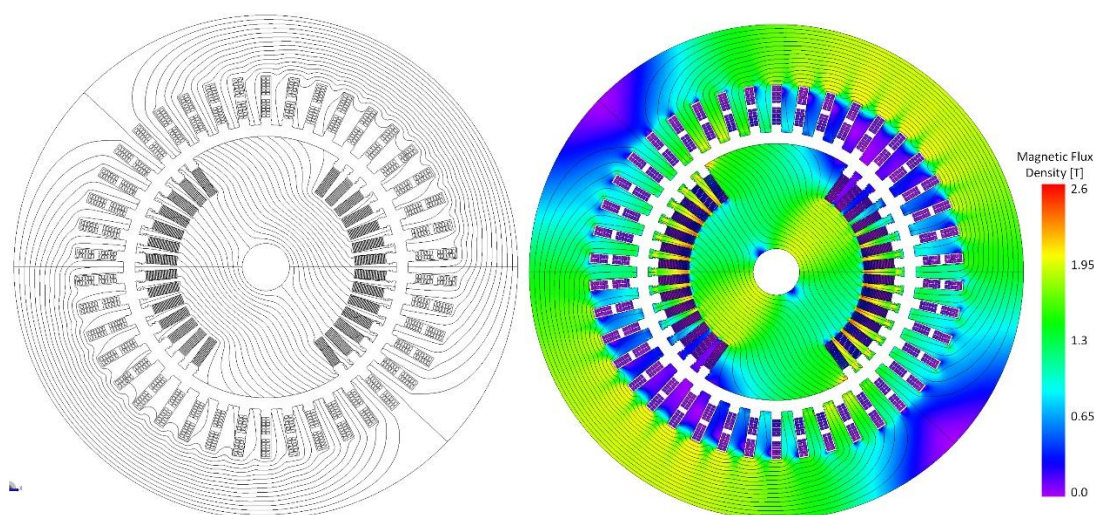
| پارامتر  | مقدار (پریونیت)      |
|----------|----------------------|
| $R_s$    | $2/5 \times 10^{-3}$ |
| $X_d$    | ۱/۹۷۶                |
| $X_d'$   | ۰/۲۱۷۳               |
| $X_d''$  | ۰/۱۵۰۲               |
| $X_{ls}$ | ۰/۰۹۵۲               |
| $T_d''$  | ۰/۰۱                 |
| $T_d'$   | ۰/۹۰۷۵               |

#### ۴-۴- شبیه‌سازی سیستم در محیط نرم‌افزاری و طراحی پارامترها

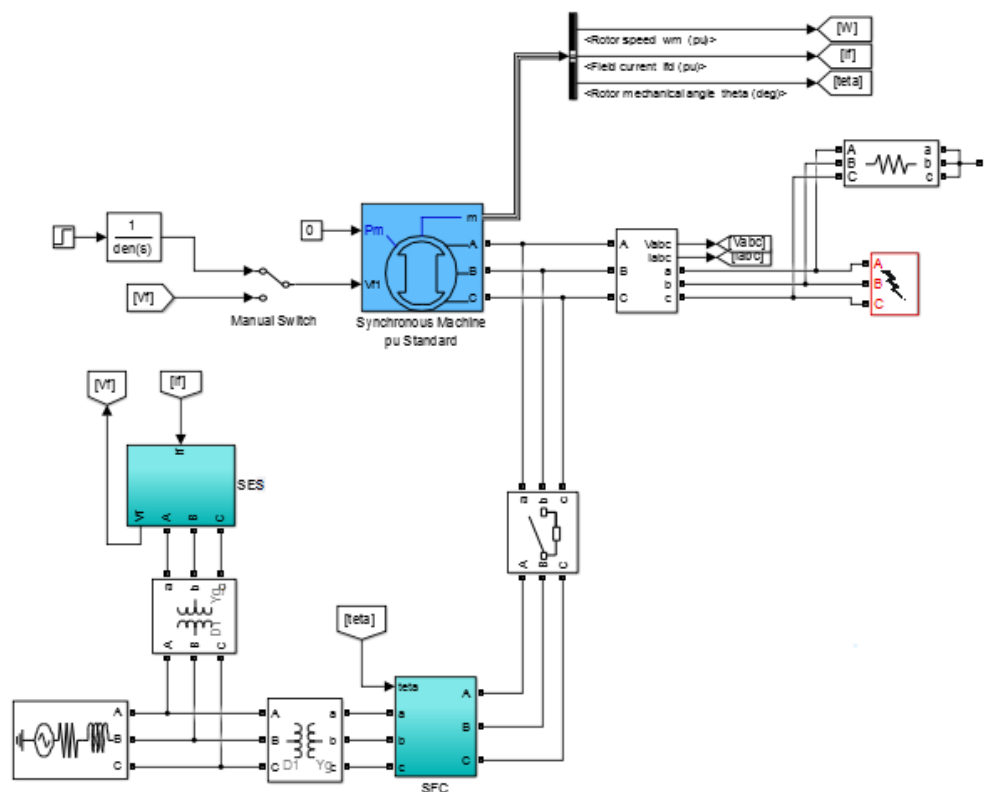
با توجه به پارامترهای دینامیکی محاسبه شده ژنراتور، سیستم ژنراتور به همراه یک مدار اتصال کوتاه در نرم‌افزار Matlab/Simulink طبق شکل ۴-۱۴ شبیه‌سازی شده است. همچنین جهت بررسی کلی مشخصه مغناطیسی ژنراتور، یک تحلیل دوبعدی از سطح مقطع ژنراتور در محیط نرم‌افزار المان محدود Maxwell در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است.

در شبیه‌سازی سیستم در نرم‌افزار Matlab، مقدار ثابت اینرسی ژنراتور با فرض وجود فلاپیول، پس از شبیه‌سازی اتصال کوتاه و بررسی افت سرعت با مقدار استاندارد (جدول ۴-۲) تعیین شده است. سپس با توجه به مقدار ثابت اینرسی لازم و ثابت اینرسی ژنراتور، اندازه فلاپیول طراحی می‌شود. سپس با توجه به معین شدن وزن

مجموعه روتور و فلایویل، توان سیستم راه‌انداز ژنراتور مطابق با زمان راه‌اندازی استاندارد (جدول ۴-۲) طراحی می‌شود. مشخصات نامی سیستم تحریک نیز با توجه به ولتاژ و جریان تحریک به‌دست‌آمده از طریق سعی و خطا در شبیه‌سازی جریان اتصال کوتاه جهت دستیابی به حداکثر جریان اتصال کوتاه و همچنین رعایت نکات استاندارد ذکرشده در جدول ۴-۲ تعیین می‌گردد.



شکل ۴-۱۳: بارگذاری مغناطیسی ژنراتور مارلی در محیط نرم‌افزار Maxwell

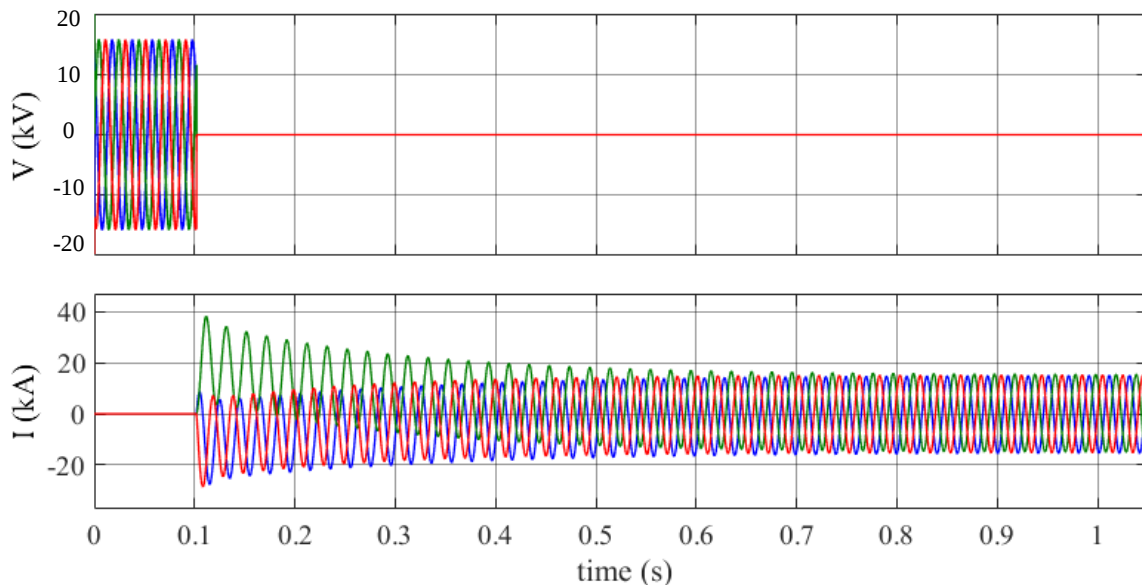


شکل ۴-۱۴: سیستم ژنراتور اتصال کوتاه شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار Matlab/Simulink

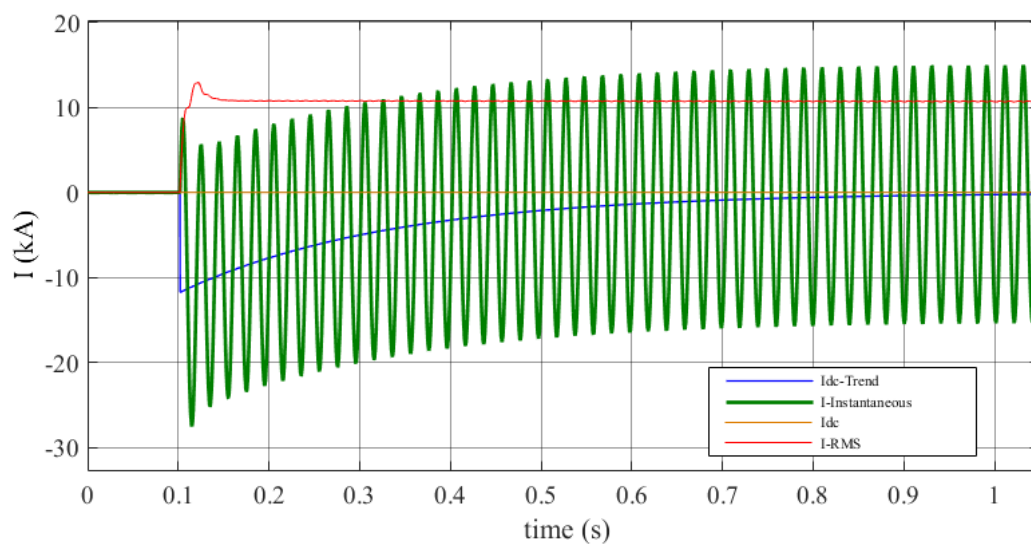
جدول ۴-۲: مقادیر استاندارد ژنراتور اتصال کوتاه جهت مطالعه شبیه‌سازی

| پارامتر                                                                                   | مقدار            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| نسبت مقدار پیک اولیه جریان به مقدار مؤثر جریان در ثانیه ۳، بیش از ۳ برابر باشد.           |                  |
| تغییرات مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه در بازه زمانی ۰/۱ تا ۳ ثانیه، بیشتر از ۵ درصد نباشد. |                  |
| حداکثر افت سرعت، ۰/۱ ثانیه پس از وقوع اتصال کوتاه                                         | ۵ درصد           |
| زمان شتاب‌گیری تا سرعت نامی                                                               | کمتر از ۱۰ دقیقه |

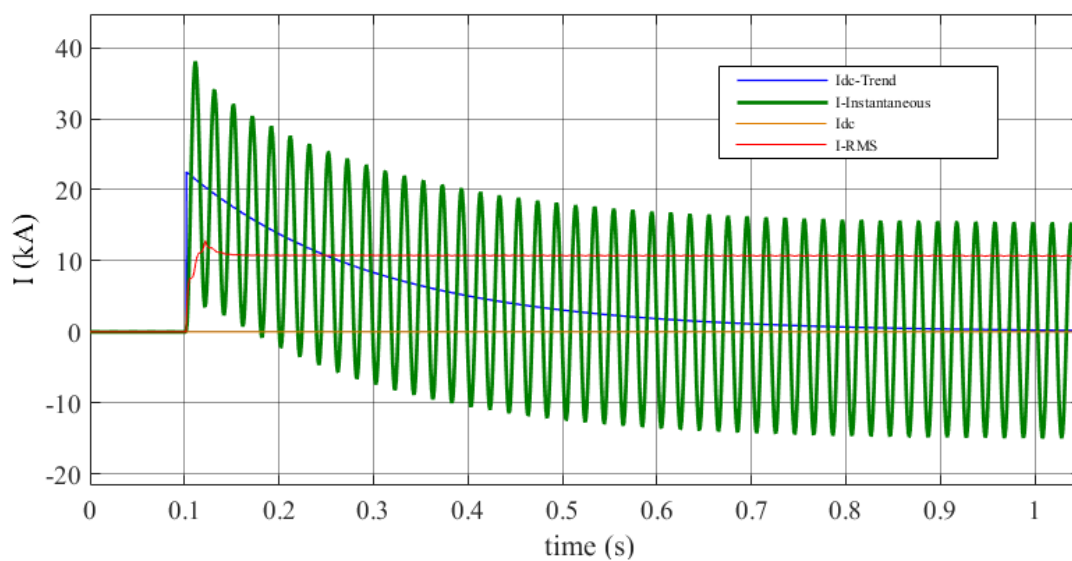
در شکل ۴-۱۵ شکل موج ولتاژ سه‌فاز ژنراتور و جریان‌های سه‌فاز اتصال قبل و بعد از اتصال کوتاه نشان داده شده است. جریان‌های اتصال کوتاه به تفکیک فاز نیز در شکل ۴-۱۶ تا شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است که بیشترین مقدار جریان DC در فاز B (به دلیل لحظه کلیدزنی خاص) اتفاق افتاده است. با بررسی شکل موج‌های جریان می‌توان گفت حداکثر پیک جریان به دست آمده حدود ۳۸ کیلوآمپر و مقدار مؤثر جریان پس از ۱۰۰ میلی‌ثانیه، حدود ۱۰ کیلوآمپر است که مطابق استاندارد، نسبت دو عدد، بیش از ۳ برابر است. ثابت زمانی مؤلفه DC جریان نیز حدود ۲۰۰ میلی‌ثانیه است که مطابق استاندارد، بیش از ۶۰ میلی‌ثانیه است.



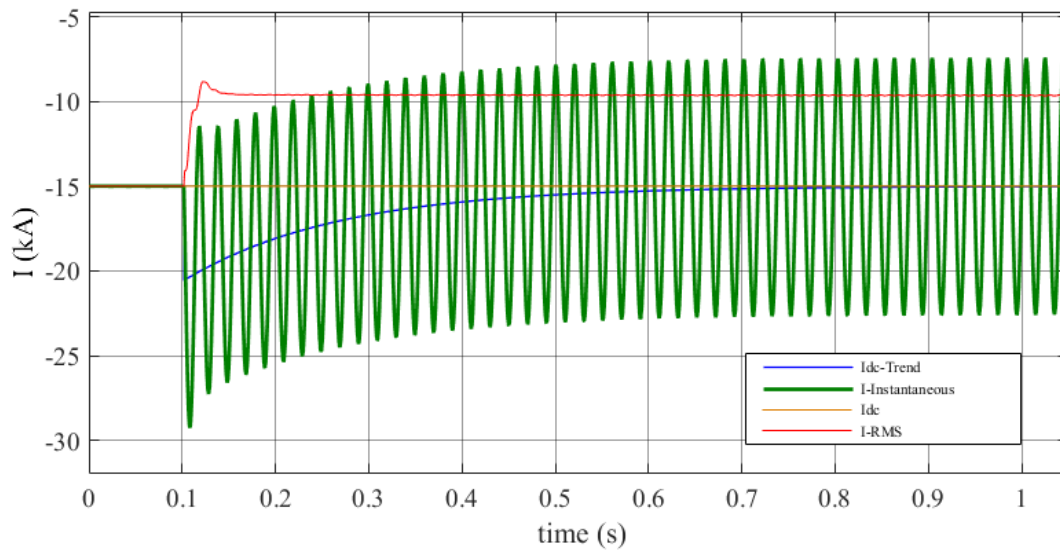
شکل ۴-۱۵: شکل موج ولتاژ و جریان‌های اتصال کوتاه سه‌فاز در خروجی ژنراتور



شکل ۴-۱۶: شکل موج لحظه‌ای، DC و مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه فاز A



شکل ۴-۱۷: شکل موج لحظه‌ای، DC و مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه فاز B



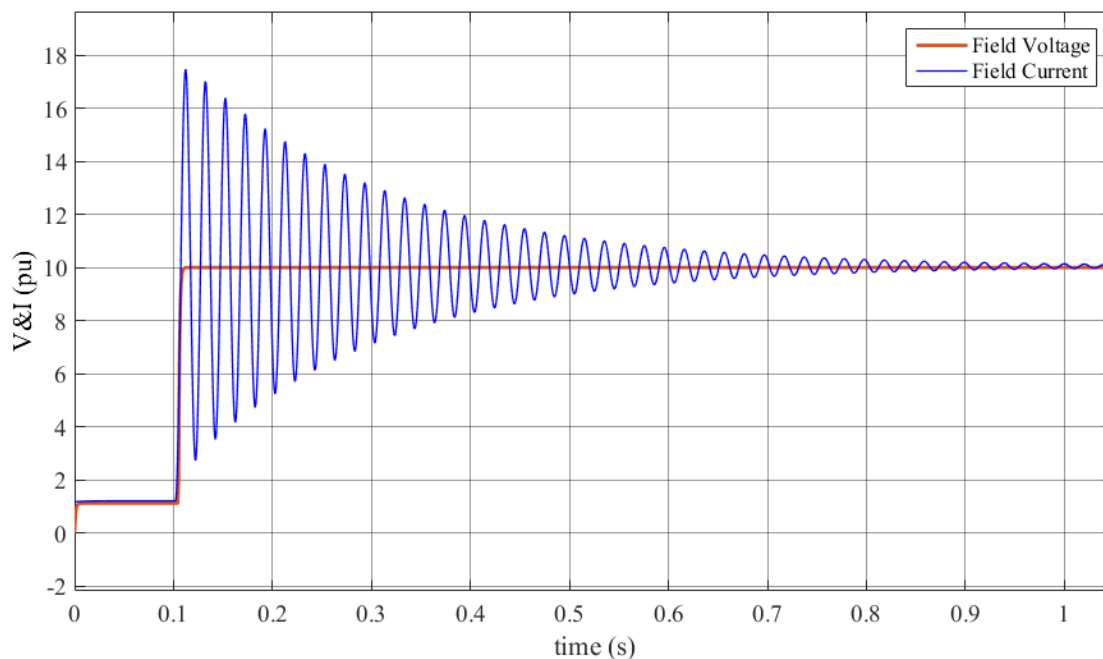
شکل ۴-۱۸: شکل موج لحظه‌ای، DC و مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه فاز C

ولتاژ تحریک قبل از اتصال کوتاه ژنراتور برابر با مقدار  $1/12$  پریونیت متناظر با ولتاژ بی‌باری ژنراتور است. مقدار سقف ولتاژ تحریک<sup>۱</sup> پس از اتصال کوتاه نیز مطابق سعی و خطا در شبیه‌سازی جهت دستیابی به حداکثر جریان اتصال کوتاه پس از ۱۰۰ میلی‌ثانیه و مطابق با استاندارد که بایستی تغییرات مقدار مؤثر جریان بین ۰/۱ تا ۳ ثانیه به ۵ درصد محدود شود، برابر با ۱۰ پریونیت به دست آمده است. متعاقباً با اعمال سقف ولتاژ تحریک و دستیابی به مشخصه جریان اتصال کوتاه مطلوب، جریان تحریک مطابق شکل ۴-۱۹ به دست آمده است. ملاحظه می‌شود که جریان حالت دائم تحریک، ۱۰ پریونیت و پیک گذرای آن به ۱۸ پریونیت می‌رسد. بدین ترتیب و با فرض مقادیر مبنای ولتاژ و جریان تحریک مطابق با مشخصه اشباع ژنراتور و مشخصه سیم‌پیچی روتور، به ترتیب ۷۳ ولت و ۱۵۷ آمپر، مشخصات نامی سیستم تحریک لازم به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_{f-Cieling} = 10 \times 73 = 730 \text{ V} \quad ۴-۶$$

$$I_f = 10 \times 157 = 1570 \text{ A} \quad ۴-۷$$

$$I_{f-Cieling} = 18 \times 157 = 2826 \text{ A} \quad ۴-۸$$



شکل ۴-۱۹: شکل موج ولتاژ و جریان تحریک

در خصوص سیستم راه‌انداز ژنراتور نیز با توجه به حداقل زمان راه‌اندازی ژنراتور مطابق جدول ۴-۲ و همچنین وزن روتور ژنراتور، توان این سیستم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

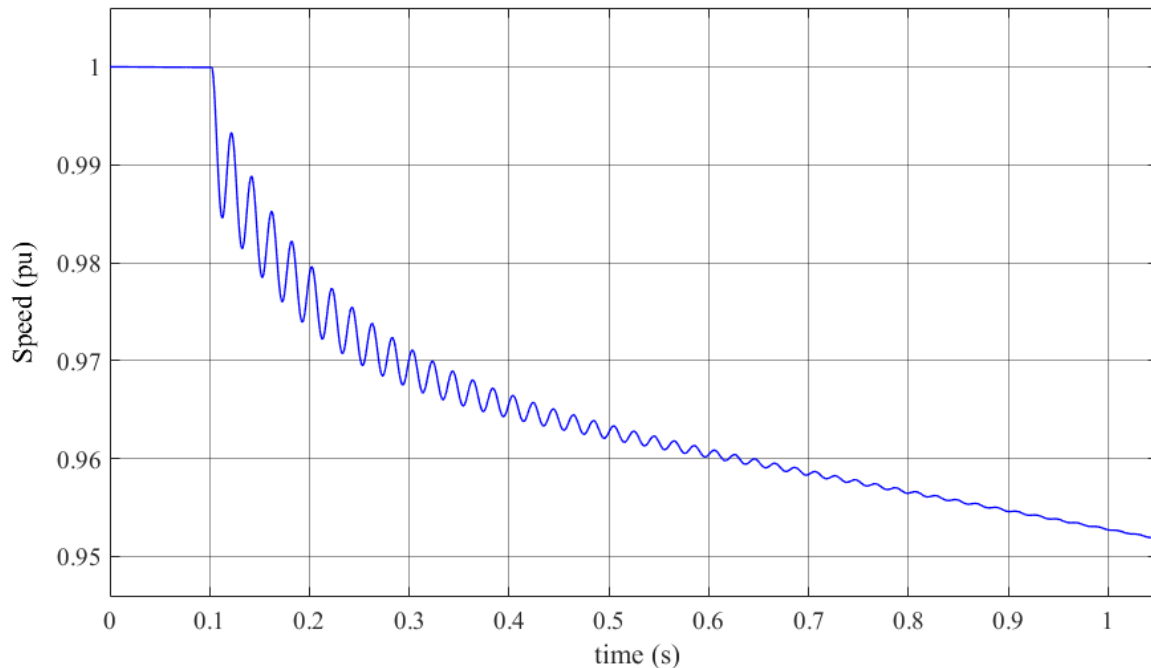
$$\frac{1}{2} J_r \omega^2 = P_m \times t \quad ۹-۴$$

$$P_m = \frac{1}{2} J \omega^2 / t = \frac{6300 * 314.1593^2}{2 * 10 * 60} = 518 \text{ kW} \quad ۱۰-۴$$

بدین ترتیب حداقل توان لازم جهت راه‌اندازی ژنراتور در طول ۱۰ دقیقه، ۵۲۰ کیلووات می‌باشد. حال با در نظر گرفتن وزن فلایویل، توان سیستم لازم جهت راه‌اندازی و افزایش سرعت مجموعه روتور ژنراتور و فلایویل تا سرعت نامی در طول ۱۰ دقیقه و ۲۰ دقیقه به ترتیب به صورت زیر خواهد بود:

$$P_m = \frac{1}{2} J_{r+f} \omega^2 / t = \frac{26119 * 314.1593^2}{2 * 10 * 60} = 2.145 \text{ MW} \quad ۱۱-۴$$

$$P_m = \frac{1}{2} J_{r+f} \omega^2 / t = \frac{26119 * 314.1593^2}{2 * 20 * 60} = 1.074 \text{ MW} \quad ۱۲-۴$$

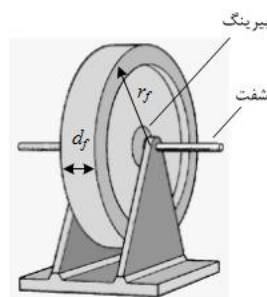


شکل ۴-۲۰: تغییرات سرعت ژنراتور پس از اعمال اتصال کوتاه

در محاسبات مربوط به محاسبه ابعاد فلاپویل ضروری برای تأمین ممان اینرسی و انرژی مدنظر، چند رابطه مهم حائز اهمیت هستند. انرژی جنبشی حاصل در مجموعه ( $E_c$ )، به انرژی جنبشی روتور ( $E_r$ ) و انرژی جنبشی فلاپویل ( $E_f$ ) تقسیم می‌شود و رابطه ۴-۱۳ بیانگر آن است [۴].

$$E_c = E_r + E_f \quad ۴-۱۳$$

$$E_f = \frac{1}{2} J_f \omega^2 \quad ۴-۱۴$$



شکل ۴-۲۱: شمای کلی یک فلاپویل

حداکثر مقدار مجاز برای شعاع فلاپویل با رعایت مقدار مجاز تنش وارده بر آن به دست می‌آید. با به‌دست‌آمدن طول و شعاع، پس از محاسبه حجم می‌توان به جرم فلاپویل رسید.

به‌منظور به‌دست‌آوردن ممان اینرسی لازم برای فلاپویل، باید به ممان اینرسی روتور توجه شود. ثابت اینرسی روتور  $H_r$  طبق معادله ۴-۱۵ با ممان اینرسی روتور رابطه دارد [۴].

$$H_r = \frac{\frac{1}{2} J_r \omega^2}{S_{rated}} \quad ۱۵-۴$$

با توجه به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته و همچنین با در نظر گرفتن حاشیه امنیت، ثابت اینرسی مجموعه روتور و فلاپیول، برابر با ۲۹/۲ ثانیه در نظر گرفته شده است.

جدول ۴-۳: پارامترهای محاسبه مشخصات فلاپیول

| پارامتر مدنظر                                 | مقدار       |
|-----------------------------------------------|-------------|
| سرعت نامی $\omega$ (rpm)                      | ۳,۰۰۰       |
| ظرفیت نامی ژنراتور $S_{rated}$ (MVA)          | ۴۴/۱۴       |
| ضریب اینرسی $k_B$                             | ۰/۶۰۶       |
| ممان اینرسی روتور $J_r$ ( $\text{kg.m}^2$ )   | ۶,۳۰۰       |
| انرژی روتور $E_r$ (J)                         | ۳۱۰,۸۷۴,۲۰۱ |
| ثابت اینرسی کل $H_c$ (s)                      | ۲۹/۲        |
| ثابت اینرسی روتور $H_r$ (s)                   | ۷/۰۴۳       |
| ثابت اینرسی فلاپیول $H_f$ (s)                 | ۲۲/۱۵۷      |
| ممان اینرسی فلاپیول $J_f$ ( $\text{kg.m}^2$ ) | ۱۹,۸۲۰      |

برای طراحی فلاویل، دو ماده فولاد مارچینگ<sup>۱</sup> و چدن خاکستری<sup>۲</sup> بررسی شده‌اند. مشخصات این مواد به‌قرار جدول ۴-۴ است.

جدول ۴-۴: مشخصات فنی مواد بررسی شده برای ساخت فلاویل

| پارامتر موردنظر                            | فولاد Maraging | چدن خاکستری GCI25 |
|--------------------------------------------|----------------|-------------------|
| چگالی $\rho_B$ ( $\text{kg/m}^3$ )         | ۸,۰۰۰          | ۷,۳۴۰             |
| حداکثر تنش با قابلیت تحمل $\sigma_B$ (MPa) | ۹۰۰            | ۲۲۰               |

حداکثر شعاع با قابلیت طراحی با در نظر گرفتن محدودیت حداکثر تنش با قابلیت تحمل هر جنس استفاده شده، به دست می‌آید. با داشتن حداکثر شعاع با قابلیت طراحی و با در نظر گرفتن حاشیه امنیت حدود ۵۰ درصدی برای تنش اعمالی به ماده استفاده شده در فلاویل، شعاع طراحی به گونه‌ای انتخاب می‌شود که این دو شرط نقض نشوند و وزن ماده استفاده شده و به دنبال آن هزینه تمام شده کمتر شود. نتایج نهایی به‌صورت جدول ۴-۵ حاصل خواهد شد.

جدول ۴-۵: نتایج حاصل از محاسبات مشخصات فنی فلاویل

| پارامتر مدنظر | فولاد Maraging | آهن GCI25 |
|---------------|----------------|-----------|
|---------------|----------------|-----------|

1- Maraging Steel

2- Gray Cast Iron

|               |               |                                                |
|---------------|---------------|------------------------------------------------|
| ۰/۹۵۵         | ۱/۸۴۹         | حداکثر شعاع با قابلیت طراحی $(m)r_{fmax}$      |
| ۱/۷۸۶         | ۰/۱۱۱         | حداقل طول با قابلیت طراحی $(m)d_{fmin}$        |
| ۰/۷           | ۱/۳           | شعاع انتخابی $(m)r_f$                          |
| ۶/۱۷          | ۰/۴۵۶         | طول انتخابی $(m)d_f$                           |
| ۹/۵۰۴         | ۲/۴۱۹         | حجم فلاپویل $(m^3)V_f$                         |
| ۶۹,۷۶۰        | ۱۹,۳۵۳        | وزن فلاپویل $(kg)m_f$                          |
| ۱۱۸/۳۱۶       | ۴۴۴/۷۶۳       | تنش وارده به فلاپویل طراحی شده $(MPa)\sigma_f$ |
| ۵۳/۷۸         | ۴۹/۴۲         | حاشیه‌ی امنیتی (%)                             |
| ۱,۰۲۲,۱۵۳,۷۹۹ | ۹۷۸,۰۱۳,۷۹۹   | انرژی حاصل از فلاپویل $(J)E_f$                 |
| ۱,۳۳۳,۰۲۸,۰۰۰ | ۱,۲۸۸,۸۸۸,۰۰۰ | انرژی کل $(J)E_c$                              |

#### ۴-۵- تحلیل نیروهای وارد بر سیم‌پیچی ژنراتور مارلی در زمان اتصال کوتاه

##### ۴-۵-۱- نیروهای وارده بر هادی درون شیارهای استاتور

عبور جریان‌های اتصال کوتاه از سیم‌پیچی ژنراتور، با توجه به قرارگرفتن هادی‌ها در کنار یکدیگر، منجر به واردشدن نیروهای شدید به هادی‌ها ناشی از شار مغناطیسی به‌وجودآمده در اطراف آنها می‌گردد. طبق روابط الکترومغناطیسی، جهت این نیرو مطابق با جهت جریان‌های عبوری از تمامی هادی‌ها در نظر گرفته می‌شود. اگر یک اتصال کوتاه سه‌فاز رخ دهد، برخی از نیروهای وارده بر یک هادی درون یک شیار که برگرفته از مجموع‌برداری نیروهای وارد بر هادی از تمامی هادی‌های دیگر می‌باشد، یکدیگر را خنثی نموده و اگر اتصال کوتاه تک‌فاز رخ دهد، مقدار نیروهای وارد بر یک هادی درون شیار، افزایش می‌یابد. آنچه که محاسبه شده حاکی از آن است که برآیند نیروهای وارد بر یک هادی، تنها در جهت شیار و فاصله‌هوایی بوده (شعاعی) و در جهت مماس بر روتور و استاتور، نیروها یکدیگر را خنثی می‌کنند. رابطه‌نهایی برای نیروهای وارد بر هادی بالایی و زیرین در درون شیار به‌ترتیب به‌صورت زیر می‌باشد که با استفاده از تئوری تصویر مطابق شکل ۴-۲۳ به دست آمده است [۲۱]:

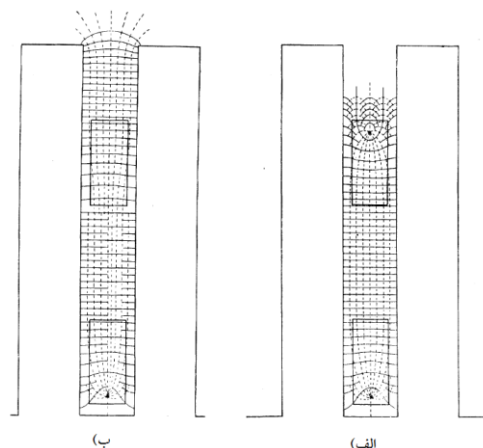
$$F_{y_2} = -14.1 \times 10^{-8} \times \frac{I_2^2}{S_w} \quad ۱۶-۴$$

$$F_{y_1} = 14.1 \times 10^{-8} \times \frac{I_2^2}{S_w} \quad ۱۷-۴$$

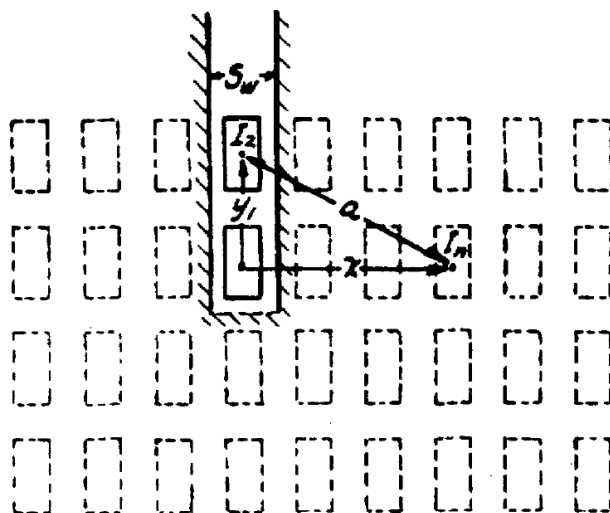
در رابطه فوق  $I_2$  حداکثر جریان عبوری از هادی مدنظر و  $S_w$  عرض شیار ماشین می‌باشد. علامت منفی نشان‌دهنده این است که نیرو به‌سمت بیرون شیار بوده و تمایل به بیرون راندن هادی دارد. همچنین به هادی زیرین نیز به همان اندازه نیرو در جهت کف شیار وارد می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عریض‌تربودن شیار ژنراتور، منجر به کاهش نیروی الکترومغناطیسی وارد بر هادی‌ها می‌شود.

بدین ترتیب با توجه به اینکه حداکثر جریان پیک ژنراتور مارلی ۳۸ کیلوآمپر است و تعداد مسیرهای موازی سیم‌پیچی ۲ و تعداد دور در هر لایه شیار ۳ است، بدین ترتیب حداکثر جریان در هر لایه شیار، ۵۷ کیلوآمپر به دست می‌آید.

با توجه به اینکه عرض شیارهای ژنراتور ۳۵ میلی‌متر (۱/۳۸ اینچ) است، حداکثر نیروی وارده بر هادی بالایی، حدود ۲۲۰ پوند بر اینچ یا ۳۸۵ نیوتن بر سانتی‌متر است که تمایل دارد هادی را از داخل شیار به بیرون بکشد.



شکل ۲۲-۴: توزیع شار مغناطیسی درون یک شیار با سیم‌پیچی دولایه (الف) جریان‌ها غیرهم‌جهت (ب) جریان‌ها هم‌جهت [۲۱]

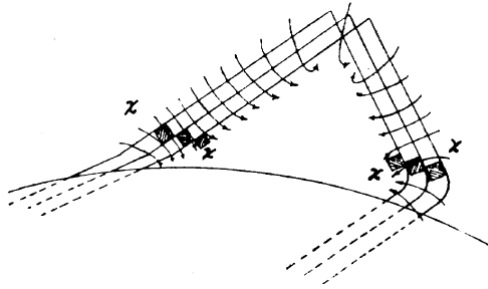


شکل ۲۳-۴: نمایش شیار یک ماشین با بی‌نهایت هادی با استفاده از تئوری تصویر [۲۱]

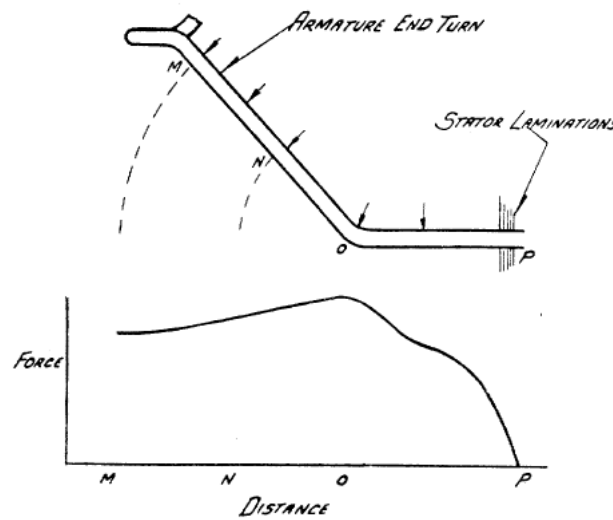
#### ۴-۵-۲- نیروی درونی در قسمت انتهایی سیم‌پیچی (سطح مخروطی)

در شکل ۲۴-۴ مسیر تقریبی شار پیوندی قسمت انتهایی سیم‌پیچی ژنراتور در شرایط اتصال کوتاه تک‌فاز برای یک فاز نشان داده شده است. همه جریان‌ها در هادی‌های موازی در یک جهت هستند، بنابراین هادی‌ها تمایل به جذب یکدیگر دارند. بیشترین نیروی وارده بر سیم‌پیچی انتهایی، در یک لایه در ناحیه  $x-x$  است، زیرا که بیشترین تمرکز شار در این ناحیه است (شکل ۲۵-۴). همچنین هرچه به انتهای اورهنگ نزدیک‌تر می‌شود، یک

نیروی دافعه بین دو لایه سیم‌پیچی پدیدار می‌شود که تمایل به جداسازی دولایه از هم دارد که به همین دلیل این قسمت به صورت مخروطی و با شعاع بیشتر ساخته می‌شود تا نیروهای وارده تا حد امکان کم شود. نیروهای وارد بر بخش‌های مابین نوک و قسمت X-X هادی‌ها در بخش مخروطی، همانند محاسبه نیروی وارده بر هادی‌های جریان‌دار فضای آزاد است که به صورت زیر و با محاسبه مجموع نیروهای هادی‌های یک سمت کویل‌های هر مسیر موازی محاسبه می‌شود [۲۱]:



شکل ۴-۲۴: مسیر تقریبی شار مغناطیسی در قسمت انتهایی سیم‌پیچی ژنراتور [۲۱]



شکل ۴-۲۵: نیروی وارده بر قسمت انتهایی سیم‌پیچی ژنراتور [۲۱]

$$F = \frac{2}{445 \times 10^5} \frac{I^2}{a} \left( 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{N-1} \right) \quad ۱۸-۴$$

که در رابطه فوق  $I$  حداکثر جریان عبوری از هادی،  $a$  فاصله بین مرکز تا مرکز دو هادی یک سمت کویل در یک لایه از سطح مخروطی اندوآندینگ و  $N$  تعداد کویل در هر مسیر فاز می‌باشد.

در قسمت انتهایی سیم‌پیچی ژنراتور مارلی، فاصله بین دو هادی مجاور حدود ۱۰ میلی‌متر است که بدین ترتیب فاصله مرکز دو هادی ۴۵ میلی‌متر به دست می‌آید. تعداد کویل‌های هر فاز در هر مسیر موازی نیز ۷ می‌باشد. با فرض جریان حداکثر ۵۷ کیلوآمپر برای هر لایه ژنراتور، نیروی وارده بر سیم‌پیچی در ناحیه انتهایی، ۲۰۲ پوند بر اینچ یا ۳۵۳ نیوتن بر سانتی‌متر خواهد بود.

## ۴-۶- تحلیل افزایش دمای سیم‌پیچی ژنراتور مارلی حین اتصال کوتاه

به‌منظور محاسبه افزایش دمای سیم‌پیچی ژنراتور، از معادل قراردادن انرژی الکتریکی تلف‌شده در داخل هادی (بدون درنظر گرفتن انتقال حرارت بین هادی و محیط) با رابطه ظرفیت گرمایی هادی استفاده شده که این رابطه پس از ساده‌سازی به‌صورت رابطه زیر برای هادی مس بیان می‌شود:

$$T = 0.0297 \times \log \left( \frac{\theta_2 + 234}{\theta_1 + 234} \right) \times \frac{A^2}{I^2} \quad ۱۹-۴$$

در رابطه فوق جریان  $I$  مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه هر لایه بر حسب آمپر،  $A$  سطح مقطع هادی بر حسب CM (Circular Mil)، دماهای  $\theta_1$  و  $\theta_2$  بر حسب درجه و  $T$  مدت زمان اتصال کوتاه بر حسب ثانیه است.

سطح مقطع هر لایه سیم‌پیچی برابر با  $۶۸ \times ۳۵$  میلی‌متر مربع است که در صورتی که با توجه به رشته‌ای بودن هادی و عایق‌های آن، به‌صورت بدبینانه، ۵۰ درصد این فضا مس فرض شود، سطح مقطع خالص هر لایه سیم‌پیچی، معادل  $۱۰^۶ \times ۲/۳۵$  CM است. با توجه به اینکه مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه ژنراتور مارلی حدود ۱۰ کیلوآمپر است، جریان مؤثر هر لایه سیم‌پیچی ۱۵ کیلوآمپر خواهد بود (دو مسیر موازی و ۳ دور سیم‌پیچی).

با توجه به فرضیات فوق و بدون درنظر گرفتن سیستم خنک‌کننده، در صورت عبور جریان اتصال کوتاه فوق‌الذکر به مدت ۳ ثانیه در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، دمای سیم‌پیچی حدود ۲/۵ درجه افزایش خواهد یافت که معادل با عبور جریان نامی ژنراتور (۲۳۰۰ آمپر) به مدت حدود یک دقیقه است. به‌منظور بررسی افزایش دمای سیم‌پیچی در صورت کاهش عمق شیارها، در صورت نصف‌شدن سطح مقطع هادی در رابطه فوق و افزایش حدود دو برابری جریان اتصال کوتاه، افزایش دما حدود ۳۵ درجه خواهد بود.

افزایش دمای سیم‌پیچی در یک دوره اتصال کوتاه زیاد نمی‌باشد، اما این امر در اتصال کوتاه‌های متوالی می‌تواند مشکل‌ساز باشد که در دوره‌های استراحت بین دوره‌های اتصال کوتاه، سیستم خنک‌سازی می‌تواند سیم‌پیچی و هسته ژنراتور را خنک کند.

در رابطه با سیم‌پیچی روتور نیز، با توجه به افزایش جریان ۱۰ برابر تحریک (۱۷۹۰ آمپر) و سطح مقطع هر دور آن حدود  $۲/۱ \times ۳۱$  میلی‌متر مربع، افزایش دما در طول ۳ ثانیه، حدود ۱۲ درجه خواهد بود و در صورت کاهش ۳۰ درصدی سطح مقطع آن، افزایش دما ۲۶ درجه خواهد بود. لازم به ذکر است که افزایش دماهای فوق بدون درنظر گرفتن سیستم خنک‌کننده محاسبه شده است و با توجه به دفعات متوالی اتصال کوتاه، سیستم خنک‌کننده بایستی قدرت و فرصت کافی برای کاهش دمای سیم‌پیچی‌ها را داشته باشد.

## ۴-۷- نتیجه‌گیری

در این فصل، ابتدا محاسبات پارامترهای دینامیکی ژنراتور از جمله راکتانس‌های نشتی، ثابت‌های زمانی گذرای ژنراتور از روی مشخصات ابعادی مربوطه محاسبه گردید. در محاسبه راکتانس‌های مربوطه از روابط تحلیلی استفاده شده است که نتیجه این روابط دقت بالایی ندارد و برای بررسی حدودی پارامترهای دینامیکی استفاده می‌شود.

به‌منظور محاسبه مقادیر دقیق، نیاز به تحلیل المان محدود دقیق ژنراتور می‌باشد که در مراحل آتی طرح، به تفصیل بررسی می‌شود. بدین منظور، راکتانس نشتی شیار، راکتانس مغناطیس‌کنندگی، راکتانس نشتی تحریک و راکتانس نشتی دمپر محاسبه گردید و متعاقباً راکتانس‌های اتصال کوتاه، راکتانس گذرای اتصال کوتاه، راکتانس تندگذر اتصال کوتاه و راکتانس نشتی سیم‌پیچی به‌ترتیب ۱/۹۷۶، ۰/۲۱۷۳، ۰/۱۵۰۲ و پریونیت به دست آمد. در ادامه مقادیر ژنراتور با پارامترهای مربوطه، در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink شبیه‌سازی گردید و نتایج به‌دست‌آمده در مدار اتصال کوتاه ثبت گردید. در تست اتصال کوتاه، پیک جریان تا ۳۸ کیلوآمپر و مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه، حدود ۱۰ کیلوآمپر با تحریک ۱۰ پریونیت مشاهده گردید که طبق استاندارد، این نسبت بالای ۳ برابر به دست آمد. همچنین میزان تغییرات مؤلفه مؤثر جریان در بازه ۰/۱ تا ۳ ثانیه مطابق با استاندارد، زیر ۵ درصد مشاهده شد. همچنین با طراحی و لحاظ کردن فلاویل در مدار، افت سرعت حین اتصال کوتاه نیز کمتر از ۵ درصد در بازه زمانی ۱۰۰ میلی‌ثانیه گردید. لازم به ذکر است که نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها، مطمئناً نتایج دقیق نمی‌باشد و نیاز به تحلیل المان محدود دقیق ژنراتور و در صورت لزوم، اصلاح سیم‌پیچی آن می‌باشد.

علاوه بر مباحث فوق، مشخصات فنی فلاویل، ظرفیت‌های سیستم تحریک و سیستم راه‌انداز ژنراتور نیز در این فصل محاسبه و در مطالعات وارد گردید.

## **فصل پنجم**

**تهیه و تدوین برنامه تفصیلی اصلاحات، ساخت و تست  
ژنراتور اتصال کوتاه با استفاده از ژنراتور مستعمل**

## ۵-۱- مقدمه

در بخش‌های قبلی، مشخصات ژنراتور مارلی بررسی شد و با توجه به کاربری جدید این ژنراتور و همچنین سیستم‌های جانبی لازم، در فصل پیش رو یک برنامه عملیاتی جهت مشخص شدن مراحل گام‌به‌گام تبدیل و اصلاح ژنراتور و تدارک سیستم‌های جانبی و پیکربندی مجموعه و در نهایت ارزیابی و بهره‌برداری آن استخراج شده است. همچنین در این مرحله، بودجه تخمینی لازم جهت اجرای طرح نیز ارائه شده است که برخی از این نمونه‌ها از طریق استعلام و برخی دیگر از طریق تجربیات و سوابق موجود در پروژه‌های پیشین انجام‌شده در پژوهشگاه نیرو، تخمین زده شده است. در نهایت نیز مدت زمان لازم جهت اجرای طرح ارائه شده است.

در خصوص ژنراتور مارلی، اقدامات اصلاحی پیشنهادی به‌منظور به‌کارگیری به‌عنوان ژنراتور اتصال کوتاه به‌شرح زیر است:

### - کاهش عمق شیارهای استاتور و تقویت آنها

این گزینه به‌منظور کاهش راکتانس نشتی استاتور و با توجه به تحلیل‌های دمایی و تحمل مکانیکی هادی‌ها در برابر نیروهای اتصال کوتاه انجام خواهد شد. همچنین تقویت عایقی هادی‌ها و همچنین گوه‌های نگهدارنده، با توجه به افزایش دما و نیروهای وارده، تعیین می‌شود. با توجه به محدودیت‌های هسته ژنراتور و هزینه‌های مربوطه، عرض شیارها تغییر داده نخواهد شد.

### - کاهش حجم سیم‌پیچی پیشانی و تقویت مکانیکی آن

با توجه به اینکه بخش مهمی از راکتانس نشتی استاتور، مربوطه به قسمت پیشانی است، این بخش تا حد امکان و با بررسی انواع طرح‌های موجود (به‌عنوان مثال پیشانی استوانه‌ای به‌جای مخروطی) بهبود داده خواهد شد و در نهایت یک سازه نگهدارنده قوی برای مقابله با نیروهای وارده بر این بخش طراحی و ساخته می‌شود.

### - اصلاح سیم‌پیچی‌های روتور

در بخش روتور این ژنراتور، مهم‌ترین اصلاح مربوط به تقویت سیم‌پیچی دمپر است که این گزینه با افزایش سطح مقطع گوه‌ها و تقویت اتصالات بین آنها و اتصال انتهایی در زیر رینگ نگهدارنده است. همچنین با توجه به نیاز به کاهش مقاومت روتور و در طرف دیگر، کاهش عمق شیار آن (بخصوص که ژنراتور مدت زمانی در خور توجیهی با ولتاژ نامی و بی‌بار، کار خواهد کرد و منجر به افزایش دمای سیم‌پیچی تحریک می‌شود)، امکان اصلاح سیم‌پیچی تحریک بررسی خواهد شد. با توجه به افزایش حدود ۱۰ برابری جریان تحریک، تقویت جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزنده نیز در دستور کار قرار دارد. لازم به ذکر است که در این بخش، برنامه‌ای برای تغییر در رینگ نگهدارنده وجود ندارد.

### - مهار شوک‌های مکانیکی بدنه

به‌منظور مهار شوک‌های مکانیکی وارده بر فندانسیون ژنراتور، یک سیستم ضربه‌گیر فنی بین محل نصب بدنه ژنراتور و فندانسیون تعبیه می‌شود. همچنین به‌منظور جلوگیری از انتقال این شوک‌ها به روتور، سیستم بیرینگ این ژنراتور اصلاح و از نوع پدستال خواهد بود.

#### - سیستم خنک‌کاری

سیستم خنک‌کاری ژنراتور از نوع هواخنک خواهد بود که این گزینه با تعبیه فن‌های خنک‌کننده و کولرهای مربوطه انجام خواهد شد.

در نهایت به‌صورت بدبینانه، مشخصات خروجی ژنراتور اتصال کوتاه به‌شرح جدول ۵-۱ خواهد بود:

جدول ۵-۱: مشخصات نهایی ژنراتور اتصال کوتاه پیشنهادی

| مقدار                                          | مشخصه                                                                    |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| ۲                                              | تعداد قطب                                                                |
| ۳                                              | تعداد فاز                                                                |
| ۵۰ هرتز                                        | فرکانس                                                                   |
| ستاره زمین‌نشده                                | اتصالات                                                                  |
| ۳۰۰۰ دور در دقیقه                              | سرعت نامی                                                                |
| استاتیک                                        | سیستم تحریک                                                              |
| ۴۰ درجه                                        | حداکثر دمای محیط                                                         |
| ۹۰ درصد                                        | حداکثر رطوبت محیط                                                        |
| ۳۰ درجه                                        | حداکثر دمای آب سیستم خنک‌کن                                              |
| ۱۵۰۰ متر                                       | ارتفاع از سطح دریا                                                       |
| IC37                                           | سیستم خنک‌کن                                                             |
| F                                              | کلاس عایقی                                                               |
| ۱۱ کیلوولت                                     | مقدار مؤثر ولتاژ نامی                                                    |
| ۱۸۷ مگاوار                                     | توان اتصال کوتاه نامی (تا ۳ ثانیه)                                       |
| ۳۸ کیلوآمپر یا بیش از ۳ برابر مقدار مؤثر جریان | پیک جریان اتصال کوتاه                                                    |
| ۱۰ کیلوآمپر                                    | مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه پس از ۰/۱ ثانیه تا ۳ ثانیه                  |
| بیش از ۶۰ میلی‌ثانیه                           | ثابت زمانی مؤلفه DC جریان اتصال کوتاه                                    |
| ۳ ثانیه                                        | تحمیل حرارتی جریان اتصال کوتاه                                           |
| ۵۰۰۰ بار                                       | تعداد کل خطای اتصال کوتاه تحمل‌پذیر ژنراتور در طول عمر آن بدون بروز آسیب |
| ۱۵۰۰ بار                                       | تعداد توقف و راه‌اندازی                                                  |
| کمتر از ۵ درصد                                 | حداکثر افت سرعت، ۰/۱ ثانیه پس از وقوع اتصال کوتاه                        |
| بیش از ۳ برابر                                 | نسبت مقدار پیک جریان به مؤثر آن در ۰/۱ ثانیه                             |
| کمتر از ۵ درصد                                 | تغییرات مقدار مؤثر جریان از ۰/۱ تا ۳ ثانیه                               |
| بیش از ۶۰ میلی‌ثانیه                           | ثابت زمانی کاهش مؤلفه DC                                                 |
| با حداکثر افت ۱۰ تا ۱۵ درصدی ظرفیت، وجود دارد  | امکان موازی‌سازی ژنراتورها                                               |
| کمتر از ۱۰ دقیقه                               | زمان شتاب‌گیری تا سرعت نامی                                              |
| کمتر از ۱۰ دقیقه                               | زمان ترمز دینامیکی (از ۱۰۰ درصد سرعت نامی به ۱۰ درصد سرعت نامی)          |
| IP55 (مطابق با استاندارد IEC60034-5)           | ضریب حفاظت جعبه ترمینال                                                  |

## ۵-۲- مراحل و پروژه‌های انجام‌پذیر جهت پیاده‌سازی سیستم ژنراتور اتصال کوتاه و تخمین هزینه

جهت اجرا و پیاده‌سازی سیستم ژنراتور اتصال کوتاه، بایستی بخش‌های مختلف این سیستم با توجه به توانمندی‌های موجود در کشور و میزان سفارشی‌بودن هریک، یا از طریق خرید و یا سفارش ساخت، تأمین گردد که لیست آن به شرح زیر است که در ادامه هریک به تفصیل بررسی می‌شود:

۱. تأمین ژنراتور سنکرون اتصال کوتاه
۲. تأمین سیستم تحریک ژنراتور اتصال کوتاه
۳. تأمین سیستم راه‌انداز ژنراتور اتصال کوتاه
۴. تأمین سیستم ذخیره‌ساز انرژی فلابویل متصل به روتور ژنراتور
۵. تأمین محفظه، درپوش و ملزومات نصب بر روی فندانسیون
۶. تأمین سیستم بیرینگ پدستال
۷. تأمین ترانسفورماتور قدرت خروجی ژنراتور
۸. تأمین سیستم‌های جانبی
۹. تأمین سیستم کنترل، مانیتورینگ و حفاظت
۱۰. طراحی و اجرا و بهره‌برداری سیستم تست

## ۵-۲-۱- تأمین ژنراتور سنکرون اتصال کوتاه

با توجه به بررسی‌های پروژه و تصمیم بر استفاده از ژنراتور مستعمل موجود به‌عنوان ژنراتور اتصال کوتاه، به‌جای طراحی یک ژنراتور جدید که بسیار هزینه‌بر و پیچیده است، در این مرحله، اقدامات لازم جهت تبدیل ژنراتور مارلی به یک ژنراتور اتصال کوتاه ارائه شده است. بررسی‌های صورت گرفته در بخش‌های قبل نشان داد که ژنراتور مارلی امکان به‌کارگیری به‌عنوان ژنراتور اتصال کوتاه را دارد، اما به‌منظور تشخیص دقیق رفتار این ژنراتور در شرایط اتصال کوتاه، نیاز به تحلیل الکترومغناطیسی در محیط نرم‌افزارهای تحلیل المان محدود به‌صورت سه‌بعدی می‌باشد تا در صورت نیاز، لیست اصلاحات لازم از جمله تغییر عمق شیار، تغییر تعداد دور، تغییر تعداد لایه‌های سیم‌پیچی معین شود. سپس تحلیل‌های الکترومکانیکی و حرارتی جهت طراحی سیستم‌های خنک‌کننده و استحکامات لازم در ناحیه پیشانی سیم‌پیچی و شیارها انجام شود. پس از انجام طراحی‌های لازم، ژنراتور بایستی دمونتاژ شده و ضمن تمیزکاری داخل آن، سیم‌پیچی، سیستم خنک‌کاری و استحکامات جدید بر روی آن پیاده‌سازی شود. بدین ترتیب فعالیت‌های ضروری این مرحله به‌صورت زیر خواهد بود:

۱. فعالیت‌های کارشناسی طراحی تفصیلی، طراحی ساخت و تهیه نقشه‌ها، بازرگانی، تحویل‌گیری مازول‌ها، نصب و تست
۲. فعالیت‌های مکانیکی و اجرایی مقدماتی شامل: بازکردن براکت‌ها، خروج روتور، دمونتاژ سیم‌پیچی و شست‌وشوی داخل ژنراتور

۳. ساخت کلاف‌ها و عایق‌های مربوطه، سیم‌پیچی مجدد و ساخت و نصب گوه‌های جدید
۴. ساخت کلاف‌ها و عایق‌های سیم‌پیچی روتور و دمپر به همراه نوار اتصال انتهایی و نصب
۵. سربندی کلاف‌ها، نصب نگهدارنده‌های اورهنگ‌ها و ترمینال‌ها و جازدن روتور و متعلقات

جدول ۵-۲: بودجه تأمین ژنراتور سنکرون اتصال کوتاه

| مرحله | بودجه اجرا  |           |
|-------|-------------|-----------|
|       | میلیون ریال | هزار دلار |
| ۱     | ۶,۰۰۰       | -         |
| ۲     | ۵,۰۰۰       | -         |
| ۳     | -           | ۱۲۰       |
| ۴     | -           | ۱۲۰       |
| ۵     | -           | ۶۰        |
| مجموع | ۱۱,۰۰۰      | ۳۰۰       |

با توجه به مراحل فوق، هزینه هر بخش به صورت جدول ۵-۲ می‌باشد.

## ۵-۲-۲- تأمین سیستم تحریک ژنراتور اتصال کوتاه

در مطالعات شبیه‌سازی، حدود توان سیستم تحریک استخراج گردید. در این مرحله، با توجه به سقف ولتاژ و سقف جریان تحریک لازم، بایستی سیستم تحریک طراحی و ساخته شود که این سیستم در صورتی که ادوات کلیدزنی مربوطه (تریستورها) موجود در بازار، امکان تأمین ولتاژ مدنظر را نداشته باشد، بایستی به صورت ۱۲ پالسه اجرا شود. همچنین با توجه به ظرفیت شبکه بالادستی (شبکه آزمایشگاه)، در صورتی که جریان‌کشی سیستم تحریک منجر به اختلال و افت ولتاژ در شبکه بالادستی شود، بایستی تغذیه آن به صورت سیستم مجزا با استفاده از ذخیره‌ساز انرژی فلاپویل پیاده‌سازی شود. بدین ترتیب شرح فعالیت‌های این مرحله به صورت زیر خواهد بود و بودجه مراحل در

جدول ۵-۳ ارائه شده است:

۱. فعالیت‌های کارشناسی جهت طراحی تفصیلی، بازرگانی، تحویل‌گیری ماژول‌ها، نصب و تست
۲. ساخت سیستم تحریک استاتیک
۳. خرید دو ترانسفورماتور تک‌فاز و یا یک ترانسفورماتور تک‌فاز سه‌سیم‌پیچه جهت تغذیه دو مبدل سیستم تحریک در صورت استفاده از مبدل ۱۲ پالسه و یا خرید یک ترانسفورماتور تک‌فاز در صورت استفاده از مبدل ۶ پالسه
۴. پیاده‌سازی سیستم تغذیه مدار تحریک شامل ژنراتور، الکتروموتور راه‌انداز و فلاپویل در صورت نیاز که در مرحله طراحی (مرحله ۱) مشخص می‌شود.

جدول ۵-۳: بودجه تأمین سیستم تحریک ژنراتور اتصال کوتاه

| مرحله | بودجه اجرا  |           |
|-------|-------------|-----------|
|       | میلیون ریال | هزار دلار |
| ۱     | ۲,۰۰۰       | -         |
| ۲     | -           | ۹۰        |
| ۳     | -           | ۶۰        |
| ۴     | -           | ۹۰        |
| مجموع | ۲,۰۰۰       | ۲۴۰       |

## ۵-۲-۳- تأمین سیستم راه‌انداز ژنراتور اتصال کوتاه

با توجه به مطالعات گذشته و تخمین توان سیستم راه‌انداز استاتیک ژنراتور سنکرون، در این مرحله، طراحی تفصیلی این سیستم صورت گرفته و سفارش، ساخت یا خرید و تأمین سیستم انجام می‌شود.

۱. فعالیت‌های کارشناسی جهت طراحی تفصیلی، بازرگانی، تحویل‌گیری مازول‌ها، نصب و تست

۲. ساخت مبدل SFC

جدول ۵-۴: بودجه تأمین سیستم راه‌انداز ژنراتور اتصال کوتاه

| مرحله | بودجه اجرا  |           |
|-------|-------------|-----------|
|       | میلیون ریال | هزار دلار |
| ۱     | ۱,۰۰۰       | -         |
| ۲     | -           | ۴۲        |
| مجموع | ۱,۰۰۰       | ۴۲        |

## ۵-۲-۴- تأمین سیستم ذخیره‌ساز انرژی فلیویل متصل به روتور ژنراتور

در مطالعات شبیه‌سازی، به‌منظور رعایت حد استاندارد افت سرعت ژنراتور در حین اتصال کوتاه، نیاز به وجود فلیویل جهت ذخیره انرژی کافی قبل از وقوع اتصال کوتاه بر روی مجموعه شفت و فلیویل متصل به آن، مشخص شد. در این مرحله طراحی موادی و مکانیکی فلیویل با توجه به مواد در دسترس و متناسب با هدف پروژه و محدودیت‌های فضای و همچنین بالانس کردن آن، انجام شده و ضمن خرید تجهیزات مربوط، مراحل ساخت آن انجام می‌شود. لازم به ذکر است که با توجه به نهایی‌نشدن قطعی و دقیق پارامترهای ژنراتور، در این خصوص ظرفیت ذخیره انرژی و به دنبال آن هزینه اجرای این مرحله با بالاسری بالایی در نظر گرفته شده است.

۱. فعالیت‌های کارشناسی جهت طراحی تفصیلی (مهندسی مواد و مکانیک)، بازرگانی، تحویل‌گیری مواد، نصب و تست

۲. خرید مواد اولیه شامل فولاد آلیاژ نیکل، مواد محفظه، کوپلینگ‌ها (به‌همراه سیستم روغن کاری) و بیرینگ‌ها

و فعالیت‌های مکانیکی ساخت و اجرایی شامل تراشکاری، ماشین‌کاری، مونتاژ، نصب بیرینگ‌ها و شفت

جدول ۵-۵: بودجه تأمین سیستم فلایول

| مرحله | بودجه اجرا  |           |
|-------|-------------|-----------|
|       | میلیون ریال | هزار دلار |
| ۱     | ۲,۰۰۰       | -         |
| ۲     | -           | ۱۵۰       |
| مجموع | ۲,۰۰۰       | ۱۵۰       |

## ۵-۲-۵- تأمین محفظه، درپوش و ملزومات نصب بر روی فندانسیون

عبور جریان‌های اتصال کوتاه در ژنراتور، گشتاورهای شدید ایجاد می‌کند که این گشتاورها به فندانسیون ژنراتور منتقل می‌شود و علاوه بر اثرات مخرب، ایجاد لرزش‌ها و نویزهای ناخواسته در محیط می‌کند. برای دفع این نوسانات، یک سیستم ضربه‌گیر در ناحیه قرارگیری ژنراتور بر روی فندانسیون بایستی طراحی و تعبیه شود. همچنین تغییر سیستم سیم‌پیچی پیشانی استاتور و سازه نگهدارنده آن، نیاز به تغییراتی در درپوش جدید ژنراتور ایجاد می‌کند که این تغییرات بایستی در محفظه ژنراتور اعمال گردد.

۱. فعالیت‌های کارشناسی جهت طراحی تفصیلی (مهندسی مواد و مکانیک)، بازرگانی، تحویل‌گیری مواد، نصب و تست مجزا

۲. ساخت سیستم ضربه‌گیر و نصب مابین محفظه ژنراتور و فندانسیون

۳. ساخت درپوش‌های انتهایی سازگار با بیرینگ جدید و اورهنگ جدید

جدول ۵-۶: بودجه تأمین محفظه، درپوش و ملزومات نصب بر روی فندانسیون

| مرحله | بودجه اجرا  |           |
|-------|-------------|-----------|
|       | میلیون ریال | هزار دلار |
| ۱     | ۱,۰۰۰       | -         |
| ۲     | -           | ۲۵        |
| ۳     | -           | ۱۵        |
| مجموع | ۱,۰۰۰       | ۴۰        |

## ۵-۲-۶- تأمین سیستم بیرینگ پدستال

جهت جلوگیری از انتقال شوک‌های مکانیکی به روتور ژنراتور در حین اتصال کوتاه، بیرینگ آن بایستی از نوع پدستال باشد که در بیرون محفظه ژنراتور نصب می‌شود.

۱. فعالیت‌های کارشناسی جهت طراحی تفصیلی (مهندسی مواد و مکانیک)، بازرگانی، تحویل‌گیری مواد، نصب و تست

۲. اصلاح دو سر شفت‌ها جهت نصب بر روی بیرینگ‌های پدستال

۳. ساخت بیرینگ‌های پدستال

جدول ۵-۷: بودجه تأمین سیستم بیرینگ پدستال

| مرحله | بودجه اجرا  |           |
|-------|-------------|-----------|
|       | میلیون ریال | هزار دلار |
| ۱     | ۱,۰۰۰       | -         |
| ۲     | -           | ۱۵        |
| ۳     | -           | ۲۵        |
| مجموع | ۱,۰۰۰       | ۴۰        |

## ۵-۲-۷- تأمین ترانسفورماتور اتصال کوتاه خروجی ژنراتور

با توجه به هدف دستیابی به جریان اتصال کوتاه ۱۰۰ کیلوآمپری توسط این سیستم و از طرفی تصمیم بر حفظ ولتاژ ۱۱ کیلوولتی در خروجی ژنراتور، نیاز به وجود یک ترانسفورماتور جریان بالا با حداقل شار نشتی وجود دارد تا بتوان به جریان‌های بالاتر جهت تست ادوات قدرت دست یافت. در تخمین هزینه ترانسفورماتور فوق‌الذکر، به‌صورت خوش‌بینانه، توان اتصال کوتاه ۱۰۰ مگاوات‌آمپر به‌عنوان توان ترانسفورماتور در نظر گرفته شده است. اما با توجه زمان پایین دوره اتصال کوتاه، توان نامی ترانسفورماتور کمتر خواهد بود. ولی از طرفی طراحی و ساخت چنین ترانسفورماتوری پیچیدگی بالایی دارد که خود به هزینه طراحی و ساخت آن می‌افزاید. در این مرحله ابتدا با توجه به مشخصات نهایی جریان اتصال کوتاه با قابلیت استحصال از ژنراتور، طراحی ترانسفورماتور جهت دستیابی به مشخصه جریان هدف انجام شده و ساخت آن در دستور کار قرار می‌گیرد.

۱. فعالیت‌های کارشناسی جهت تدوین مشخصات فنی و طراحی مفهومی، بازرگانی، تحویل‌گیری تجهیز، نصب و تست

۲. ساخت ترانسفورماتور قدرت با توان ۱۰۰ مگاوات‌آمپر و ولتاژ ۳/۳ کیلوولت به ۱/۱ کیلوولت

جدول ۵-۸: بودجه تأمین ترانسفورماتور اتصال کوتاه خروجی ژنراتور

| مرحله | بودجه اجرا  |           |
|-------|-------------|-----------|
|       | میلیون ریال | هزار دلار |
| ۱     | ۱,۰۰۰       | -         |
| ۲     | -           | ۹۰۰       |
| مجموع | ۱,۰۰۰       | ۹۰۰       |

## ۵-۲-۸- تأمین سیستم‌های جانبی

سیستم‌های جانبی ژنراتور نیز پس از تأمین تجهیزات اصلی، مشخص شده و مشخصات فنی آنها استخراج می‌شود. در نهایت پس از تأمین این تجهیزات، فعالیت‌های مکانیکی نصب و تنظیم هریک در دستور کار قرار می‌گیرد.

۱. فعالیت‌های کارشناسی جهت تدوین مشخصات فنی و طراحی مفهومی، بازرگانی، تحویل‌گیری تجهیزات، نصب و تست

۲. تأمین کابل قدرت، باسبار، کلیدهای قدرت و سکسیونر

۳. فعالیت‌های مکانیکی و اجرایی شامل نصب کوپلینگ‌ها و تنظیم محورها، کابل‌کشی، نصب باسبارها و کلیدها و اتصالات قدرت

جدول ۵-۹: بودجه تأمین سیستم‌های جانبی

| مرحله | بودجه اجرا  |           |
|-------|-------------|-----------|
|       | میلیون ریال | هزار دلار |
| ۱     | ۱,۰۰۰       | -         |
| ۲     | -           | ۴۲        |
| ۳     | ۲,۰۰۰       |           |
| مجموع | ۳,۰۰۰       | ۴۲        |

## ۵-۲-۹- تأمین سیستم کنترل، مانیتورینگ و حفاظت

در کنار مدار قدرت سیستم ژنراتور اتصال کوتاه، سیستم کنترل، مانیتورینگ و حفاظت مجموعه ژنراتور اتصال کوتاه، سیستم تحریک، سیستم راه‌انداز و سیستم فلاپویل توسط یک سیستم یکپارچه بایستی صورت پذیرد که مراحل پیاده‌سازی این سیستم به شرح زیر و تخمین هزینه اجرا در جدول ۵-۱۰ ارائه شده است:

۱. فعالیت‌های کارشناسی طراحی تفصیلی سیستم کنترل، مانیتورینگ و حفاظت جامع، بازرگانی، تحویل‌گیری تجهیزات، نصب و تست

۲. خرید سیستم یکپارچه کنترل، مانیتورینگ و حفاظت، به همراه سنسورهای ولتاژ، جریان، سرعت، دما، ارتعاشات، تخلیه جزئی، نشت روغن و ... برای ژنراتور، سیستم تحریک، فلاپویل، سیستم راه‌انداز و متعلقات

جدول ۵-۱۰: بودجه تأمین سیستم کنترل، مانیتورینگ و حفاظت

| مرحله | بودجه اجرا  |           |
|-------|-------------|-----------|
|       | میلیون ریال | هزار دلار |
| ۱     | ۱,۰۰۰       | -         |
| ۲     | -           | ۵۰        |
| مجموع | ۱,۰۰۰       | ۵۰        |

## ۵-۲-۱۰- طراحی و اجرا و بهره‌برداری سیستم تست

در نهایت پس از تأمین کلیه تجهیزات مجموعه، فعالیت‌های کارشناسی و اجرایی جهت نصب و راه‌اندازی مجموعه و تنظیم بخش‌های مختلف در کنار هم و در نهایت تست آن انجام خواهد شد.

۱. فعالیت‌های کارشناسی جهت طراحی تفصیلی سیستم قدرت، فرآیند کنترل، مانیتورینگ و حفاظت و یکپارچه‌سازی تجهیزات

۲. فعالیت‌های مکانیکی؛ حمل تجهیزات به محل‌های تعیین‌شده، نصب کوپلینگ‌ها و سیستم روغن‌کاری، تنظیمات هم‌محوری شفت‌ها و یکپارچه‌سازی و تست بخش‌های مکانیکی

۳. فعالیت‌های بخش قدرت؛ نصب باسبارها، کابل‌کشی، برقراری اتصالات ترمینال‌ها و تست بخش‌های قدرت

۴. فعالیت‌های ابزار دقیق؛ نصب و راه‌اندازی سیستم کنترل، مانیتورینگ و حفاظت، نصب سنسورها و مسیرهای انتقال اطلاعات و فرامین به سیستم مرکزی و تست مجموعه

۵. یکپارچه‌سازی، هماهنگی اجزا و تست جامع مجموعه مدار ژنراتور اتصال کوتاه

جدول ۵-۱۱: بودجه طراحی، اجرا و بهره‌برداری سیستم تست

| مرحله | بودجه اجرا  |           |
|-------|-------------|-----------|
|       | میلیون ریال | هزار دلار |
| ۱     | ۲,۰۰۰       | -         |
| ۲     | ۳,۰۰۰       | ۱۲        |
| ۳     | ۲,۰۰۰       | -         |
| ۴     | ۲,۰۰۰       | -         |
| ۵     | ۱,۰۰۰       | -         |
| مجموع | ۱۰,۰۰۰      | ۱۲        |

در نهایت پیاده‌سازی سیستم تست ژنراتور اتصال کوتاه، شامل ۸ مرحله کلی است که بودجه مجموعه آن حدود ۱/۸ میلیون دلار هزینه تجهیزات و مواد، به‌اضافه ۳۳ میلیارد ریال هزینه خدمات کارشناسی و اجرایی تخمین زده شد که در کنار آن، مبلغ فروش ۲۰۰ میلیون تومان برای مس سیم‌پیچی فعلی ژنراتور پیش‌بینی می‌گردد.

در ارائه طرح سیستم راه‌انداز ژنراتور، دو طرح استفاده از راه‌انداز SFC و یا راه‌انداز الکتروموتور و درایو بررسی شده است که با توجه به هزینه تمام‌شده پایین‌تر، سیستم SFC پیشنهاد شده است.

همچنین در ارائه طرح آزمایشگاه، مواردی مانند:

x قسمت‌های مدار تست بعد از ترانسفورماتور خروجی ژنراتور اتصال کوتاه شامل:

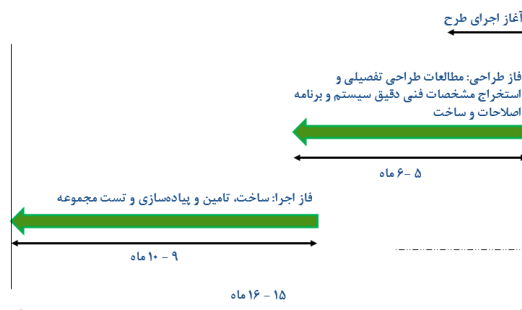
❖ بانک‌های خازنی، مقاومتی و سلفی

❖ کلیدهای قدرت و سکسیونرها

× و ترانسفورماتور تغذیه اصلی آزمایشگاه در نظر گرفته نشده است (فرض بر در دسترس بودن تغذیه ۲۰ کیلوولت با قدرت حداقل ۲ مگاوات می‌باشد).

### ۵-۳- زمان‌بندی اجرای طرح

در بخش قبلی، زیربخش‌های لازم‌الاجرا برای پیاده‌سازی سیستم ژنراتور اتصال کوتاه در ۸ مرحله تعریف شدند که این مراحل به صورت موازی اجرایی خواهند بود. این ۸ مرحله هر یک دارای دو فاز مطالعه و طراحی و فاز اجرا و پیاده‌سازی هستند. بنابراین می‌توان گفت مطابق شکل ۱-۵، طرح پیش رو دارای دو فاز است که فاز اول آن به حدود ۵ الی ۶ ماه زمان و فاز دوم آن ۹ الی ۱۰ ماه زمان نیاز دارد.



شکل ۱-۵: زمان‌بندی اجرای طرح

### ۵-۴- نتیجه‌گیری

در فصل پیش رو، مراحل تأمین سیستم ژنراتور اتصال کوتاه به تفصیل استخراج گردید و هزینه اجرای هر بند به صورت جدول ۵-۱۲ تخمین زده شد. بودجه کل اجرای سیستم حدود ۱/۸ میلیون دلار هزینه تجهیزات و مواد، به اضافه ۳۳ میلیارد ریال هزینه خدمات کارشناسی و اجرایی تخمین زده شده است. همچنین مدت زمان اجرای طرح در دو فاز طراحی و مطالعه و فاز ساخت اجرا، در مجموع حدود ۱۵ الی ۱۶ ماه تخمین زده شد.

جدول ۵-۱۲: بودجه کلی لازم برای تأمین سیستم تست ژنراتور اتصال کوتاه

| ردیف | عنوان مرحله                                             | بودجه اجرا                               |                               |
|------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|
|      |                                                         | خدمات کارشناسی و اجرایی<br>(میلیون ریال) | تجهیزات و مواد<br>(هزار دلار) |
| ۱    | تأمین ژنراتور سنکرون اتصال کوتاه                        | ۱۱,۰۰۰                                   | ۳۰۰                           |
| ۲    | تأمین سیستم تحریک ژنراتور اتصال کوتاه                   | ۲,۰۰۰                                    | ۲۴۰                           |
| ۳    | تأمین سیستم راه‌انداز ژنراتور اتصال کوتاه               | ۱,۰۰۰                                    | ۴۲                            |
| ۴    | تأمین سیستم فلاپیول                                     | ۲,۰۰۰                                    | ۱۵۰                           |
| ۵    | بودجه تأمین محفظه، درپوش و ملزومات نصب بر روی فندانسیون | ۱,۰۰۰                                    | ۴۰                            |
| ۶    | بودجه تأمین سیستم بیرینگ پدستال                         | ۱,۰۰۰                                    | ۴۰                            |
| ۷    | تأمین ترانسفورماتور قدرت خروجی ژنراتور                  | ۱,۰۰۰                                    | ۹۰۰                           |

|       |        |                                       |    |
|-------|--------|---------------------------------------|----|
| ۴۲    | ۳,۰۰۰  | تأمین سیستم‌های جانبی                 | ۸  |
| ۵۰    | ۱,۰۰۰  | تأمین سیستم کنترل، مانیتورینگ و حفاظت | ۹  |
| ۱۲    | ۱۰,۰۰۰ | طراحی، اجرا و بهره‌برداری سیستم تست   | ۱۰ |
| ۱,۸۱۶ | ۳۳,۰۰۰ | مجموع                                 |    |

**فصل ششم**

**نتیجه گیری**

پروژه حاضر به‌منظور مطالعه اولیه راه‌اندازی آزمایشگاه ژنراتور اتصال کوتاه با هدف بررسی چالش‌ها و ارائه برنامه عملیاتی انجام شد. ساخت ژنراتور اتصال کوتاه، علاوه بر پیچیدگی آن و نبودن دانش طراحی و ساخت آن در کشور، هزینه بالایی دارد و امکان خرید آن از کشورهای خارجی نیز با توجه به محدودیت‌های تحریم وجود ندارد. بنابراین در قالب یک ایده که تجربه بین‌المللی آن نیز وجود دارد، امکان ساخت چنین ژنراتوری با استفاده از یک ژنراتور متعارف مستعمل مطرح گردید. پس از بررسی صنایع دارای واحدهای جانبی تولید برق و تحلیل توان‌های ژنراتورهای موجود و بخصوص فراوانی آنها از جهت امکان یافتن یک نمونه آزاد و خارج از شبکه، این نتیجه حاصل شد که در نیروگاه‌های کشور این فراوانی وجود دارد و امکان پیدا کردن یک نمونه آزاد نیز بسیار زیاد است. پیرو این مسئله مذاکراتی با مدیران شرکت برق حرارتی صورت گرفت که به‌دنبال آن ژنراتورهای ۴۴ مگاوات‌آمپری ساخت شرکت‌های مارلی و آنسالدو مستعمل موجود در نیروگاه ری که از مدار تولید برق خارج هستند، پیشنهاد گردید. در طول بازدیدها و بررسی‌هایی که از این دو ژنراتور انجام گرفت، ژنراتور مارلی به‌عنوان ژنراتوری که از نظر جریان‌دهی بالا برای کاربرد ژنراتور اتصال کوتاه مناسب بود، انتخاب گردید. در مرحله بعد با نقشه‌برداری پارامترهای ابعادی و همچنین برداشت اطلاعات فنی از مستندات موجود، محاسبات تقریبی جهت تخمین پارامترهای دینامیکی ژنراتور انجام شد تا در طول شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری، میزان جریان‌دهی این ژنراتور در شرایط اتصال کوتاه بررسی شود و به‌دنبال مشخصات کلی سیستم‌های جانبی مانند سیستم تحریک، سیستم راه‌انداز و فلاپویل استخراج شود.

در بخشی دیگر از پروژه، مطالعات داخلی و بین‌المللی حوزه ژنراتور اتصال کوتاه بررسی شد. در این مراجع، برخی مربوط به پروژه‌های طراحی و ساخت ژنراتور اتصال کوتاه بوده است که یک نمونه مربوط به به‌کارگیری یک ژنراتور مستعمل با این هدف بود و سایر نمونه‌ها مربوط به بررسی آزمایشگاه‌های اتصال کوتاه موجود و بررسی ساختارهای کاربردی بود که در نهایت با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته، ساختار بهینه جهت این کاربرد پیشنهاد گردید. در این ساختار استفاده از راه‌انداز SFC به‌جای راه‌انداز الکتروموتور و درایو پیشنهاد گردید که هزینه احداث، تعمیر و نگهداری و هزینه تلفات انرژی کمتری دارد. سیستم تحریک پیشنهادی نیز یک سیستم تحریک استاتیکی ۱۲ پالسه است که علاوه بر سقف ولتاژ قوی آن، ضریب قدرت و ضریب اعوجاج هارمونیک بهتر در جریان تغذیه ایجاد می‌کند. در خصوص سیستم فلاپویل نیز با در نظر گرفتن حاشیه امنیت بالا، استفاده از فلاپویل پیشنهاد شد که تصمیم‌گیری قطعی در این خصوص در فاز بعد که پارامترهای ژنراتور به‌طور قطع تعیین می‌شود، انجام خواهد شد.

در بخشی از پروژه نیز با توجه به تصمیم به‌کارگیری ژنراتور مارلی، اصلاحات لازم بررسی و ارائه شد. با توجه به چالش‌های مطرح در این خصوص، لازم است تغییراتی در ساختار ژنراتور اعمال شوند. اولین و مهم‌ترین راه برای افزایش جریان اتصال کوتاه بدون تغییر نسبت تعداد دور سیم‌پیچی، اعمال اصلاحات جهت کاهش راکتانس زیرگذرای ژنراتور است. در این حالت با کاهش سطح مقطع هادی‌ها، عمق شیارها کاهش می‌یابد و پشته‌های هادی‌ها نیز با ماده‌ای مستحکم پر و یا جهت اجرای مجاری خنک‌سازی استفاده می‌شوند. در نتیجه این تغییرات، جریان نامی ژنراتور کاهش می‌یابد، اما با توجه به مدت زمان کوتاه تست اتصال کوتاه، جریان گذرا می‌تواند تا چندین برابر جریان نامی باشد. این تغییرات در سیم‌پیچی هم در روتور و هم در استاتور اعمال خواهد شد، اما نسبت تغییر دور باید ثابت باشد و تغییر تعداد دور روتور و استاتور به‌صورت هم‌زمان صورت گیرد. نکته حائز اهمیت در تغییر تعداد

دورها آن است که نسبت تغییر دورها و در نتیجه ولتاژ نامی ژنراتور (۱۱ کیلوولت) ثابت بماند.

همچنین با توجه به مطالعات اولیه و بررسی مراجع، به نظر می‌رسد که جهت مهار نیروهای وارده (نیروی دو لایه به یکدیگر) بر سیم‌پیچی، بایستی به صورت تک‌لایه تغییر یابد و جهت ثابت ماندن ولتاژ خروجی، می‌توان مسیرهای موازی سیم‌پیچی ژنراتور را به صورت سری متصل کرد. در سیم‌پیچی تک‌لایه نیز با توجه به کاهش ضخامت شمش‌ها، ممکن است هادی استحکام لازم را نداشته باشد که این انتخاب بایستی در مرحله طراحی تفصیلی ژنراتور در مرحله اجرا تصمیم‌گیری شود.

با توجه به اینکه عبور جریان بالای اتصال کوتاه باعث می‌شود نیروی وارده به سیم‌پیچی‌ها در شیارها و اورهنگ ژنراتور به میزان مجذور نسبت تبدیل افزایش یابد، لذا لازم است نگهدارنده‌های اورهنگ، اسپیسرها بین دورهای سیم‌پیچی، نگهدارنده‌های پشت کلاف‌ها و سربندی کلاف‌ها و در صورت نیاز، گوه‌های شیارها تقویت شوند.

نیروهای اتصال کوتاه، منجر به وارد شدن تنش به محفظه ژنراتور، بیرینگ‌ها و فنداسیون محل نصب ژنراتور می‌شود. به منظور رفع چنین مشکلی با توجه به تجارب موجود، استفاده از بیرینگ‌های Pedestal بجای بیرینگ‌های سوار بر محفظه ژنراتور پیشنهاد می‌شود تا نیروهای تنش روتور به محفظه ژنراتور منتقل نشود. همچنین در سکوی نصب ژنراتور بر روی فنداسیون، استفاده از صفحات فنری جهت میرا کردن و محدود کردن نوسانات ژنراتور وارد بر فنداسیون پیش‌بینی می‌شود.

در خصوص جاروبک‌های انتقال جریان تحریک به سیم‌پیچی روتور نیز استفاده از تعداد بالاتر زغال جهت تقسیم جریان بین تعداد بالاتر زغال پیش‌بینی می‌شود تا بدین ترتیب از تخریب این قطعات در برابر عبور جریان زیاد، جلوگیری شود.

سیم‌پیچی دمپر در ژنراتور اتصال کوتاه، نقش مهمی دارد و در صورتی که گوه‌های موجود در شیارهای روتور مشخصات ضروری دمپر را ارضا نکند، بایستی اصلاحاتی در خصوص عمق نصب گوه‌ها و سطح مقطع آنها صورت پذیرد که این گزینه نیز در مرحله طراحی تفصیلی انجام خواهد شد.

بنابراین، اقدامات اصلاحی پیشنهادی به منظور به کارگیری ژنراتور مارلی به عنوان ژنراتور اتصال کوتاه به شرح زیر است:

- کاهش عمق شیارهای استاتور و تقویت عایقی و گوه‌های آنها
  - کاهش حجم سیم‌پیچی پیشانی و تقویت مکانیکی آن
  - افزایش سطح مقطع گوه‌های روتور به عنوان دمپر و تقویت اتصال الکتریکی بین آنها در طول روتور و قسمت انتهایی
  - مهار شوک‌های مکانیکی بدنه در محل بر روی فنداسیون به کمک ضربه‌گیرهای فنری
  - به کارگیری بیرینگ پدستال و تغییر سیستم بیرینگ قبلی
  - بهبود سیستم خنک‌کاری
- در نهایت به صورت بدینانه، مشخصات خروجی سیستم ژنراتور اتصال کوتاه به شرح جدول ۶-۱ خواهد بود.

مراحل تأمین سیستم ژنراتور اتصال کوتاه به تفصیل استخراج گردید و هزینه اجرای هر بند به صورت جدول ۶-۲ تخمین زده شد و تأیید می‌گردد که تبدیل ژنراتور مارلی به ژنراتور اتصال کوتاه و تأمین سیستم‌های جانبی، با بودجه کل اجرای سیستم حدود ۱/۸ میلیون دلار هزینه تجهیزات و مواد، به اضافه ۳۳ میلیارد ریال هزینه خدمات کارشناسی و اجرایی امکان‌پذیر است. همچنین مدت زمان اجرای طرح در دو فاز طراحی و مطالعه و فاز ساخت اجرا، در مجموع حدود ۱۵ الی ۱۶ ماه تخمین زده شد.

جدول ۶-۱: مشخصات نهایی ژنراتور اتصال کوتاه پیشنهادی

| مشخصه                                                                    | مقدار                                          |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| تعداد قطب                                                                | ۲                                              |
| تعداد فاز                                                                | ۳                                              |
| فرکانس                                                                   | ۵۰ هرتز                                        |
| اتصالات                                                                  | ستاره زمین‌نشده                                |
| سرعت نامی                                                                | ۳۰۰۰ دور در دقیقه                              |
| سیستم تحریک                                                              | استاتیک                                        |
| حداکثر دمای محیط                                                         | ۴۰ درجه                                        |
| حداکثر رطوبت محیط                                                        | ۹۰ درصد                                        |
| حداکثر دمای آب سیستم خنک‌کن                                              | ۳۰ درجه                                        |
| ارتفاع از سطح دریا                                                       | ۱۵۰۰ متر                                       |
| سیستم خنک‌کن                                                             | IC37                                           |
| کلاس عایقی                                                               | F                                              |
| مقدار مؤثر ولتاژ نامی                                                    | ۱۱ کیلوولت                                     |
| توان اتصال کوتاه نامی (برای ۳ ثانیه)                                     | ۱۸۷ مگاوار                                     |
| پیک جریان اتصال کوتاه                                                    | ۳۸ کیلوآمپر یا بیش از ۳ برابر مقدار موثر جریان |
| مقدار مؤثر جریان اتصال کوتاه پس از ۰/۱ ثانیه تا ۳ ثانیه                  | ۱۰ کیلوآمپر                                    |
| ثابت زمانی مؤلفه DC جریان اتصال کوتاه                                    | بیش از ۶۰ میلی ثانیه                           |
| تحمل حرارتی جریان اتصال کوتاه                                            | ۳ ثانیه                                        |
| تعداد کل خطای اتصال کوتاه تحمل‌پذیر ژنراتور در طول عمر آن بدون بروز آسیب | ۵۰۰۰۰ بار                                      |
| تعداد توقف و راه‌اندازی                                                  | ۱۵۰۰۰ بار                                      |
| حداکثر افت سرعت، ۰/۱ ثانیه پس از وقوع اتصال کوتاه                        | کمتر از ۵ درصد                                 |
| نسبت مقدار پیک جریان به مؤثر آن در ۳ ثانیه ۰/۱                           | بیش از ۳ برابر                                 |
| تغییرات مقدار مؤثر جریان از ۰/۱ تا ۳ ثانیه                               | کمتر از ۵ درصد                                 |
| ثابت زمانی کاهش مؤلفه DC                                                 | بیش از ۶۰ میلی ثانیه                           |
| امکان موازی‌سازی ژنراتورها                                               | با حداکثر افت ۱۰ تا ۱۵ درصدی ظرفیت، وجود دارد  |
| زمان شتاب‌گیری تا سرعت نامی                                              | کمتر از ۱۰ دقیقه                               |
| زمان ترمز دینامیکی (از ۱۰۰ درصد سرعت نامی به ۱۰ درصد سرعت نامی)          | کمتر از ۱۰ دقیقه                               |
| ضریب حفاظت جعبه ترمینال                                                  | IP55 (مطابق با استاندارد IEC60034-5)           |

جدول ۶-۲: بودجه کلی لازم برای تأمین سیستم تست ژنراتور اتصال کوتاه

| ردیف | عنوان مرحله                                             | بودجه اجرا                               |                               |
|------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|
|      |                                                         | خدمات کارشناسی و اجرایی<br>(میلیون ریال) | تجهیزات و مواد<br>(هزار دلار) |
| ۱    | تأمین ژنراتور سنکرون اتصال کوتاه                        | ۱۱,۰۰۰                                   | ۳۰۰                           |
| ۲    | تأمین سیستم تحریک ژنراتور اتصال کوتاه                   | ۲,۰۰۰                                    | ۲۴۰                           |
| ۳    | تأمین سیستم راه‌انداز ژنراتور اتصال کوتاه               | ۱,۰۰۰                                    | ۴۲                            |
| ۴    | تأمین سیستم فلاپویل                                     | ۲,۰۰۰                                    | ۱۵۰                           |
| ۵    | بودجه تأمین محفظه، درپوش و ملزومات نصب بر روی فندانسیون | ۱,۰۰۰                                    | ۴۰                            |
| ۶    | بودجه تأمین سیستم بیرینگ پدستال                         | ۱,۰۰۰                                    | ۴۰                            |
| ۷    | تأمین ترانسفورماتور قدرت خروجی ژنراتور                  | ۱,۰۰۰                                    | ۹۰۰                           |
| ۸    | تأمین سیستم‌های جانبی                                   | ۳,۰۰۰                                    | ۴۲                            |
| ۹    | تأمین سیستم کنترل، مانیتورینگ و حفاظت                   | ۱,۰۰۰                                    | ۵۰                            |
| ۱۰   | طراحی، اجرا و بهره‌برداری سیستم تست                     | ۱۰,۰۰۰                                   | ۱۲                            |
|      | مجموع                                                   | ۳۳,۰۰۰                                   | ۱,۸۱۶                         |

## مراجع

- [۱] گروه پژوهشی ماشین‌های الکتریکی؛ گزارش "تحقیق در زمینه ساختمان و عملکرد ژنراتورهای اتصال کوتاه"، پژوهشکده برق، پژوهشگاه نیرو، ۱۳۸۲.
- [2] M. Kincses, "Digital Modelling of the Excitation and Short-Circuit Transient Characteristics of the Short-Circuit Generators," Thesis for the Degree of Master of Science, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 2006.
- [3] Available: <https://www.engineeringenotes.com/electrical-engineering/circuit-breakers/how-to-test-circuit-breaker-devices-electrical-engineering/33210>
- [4] "Assistance in Short Circuit Generator Design and Manufacture," United Nations Industrial Development Organization (UNIDO)1989.
- [۵] گروه پژوهشی ماشین‌های الکتریکی؛ گزارش "ارائه رهنمودهای کیفی برای تبدیل ژنراتور ۵۰ کیلوولت‌آمپر آزمایشگاهی به ژنراتور اتصال کوتاه و برآورد هزینه تقریبی"، پژوهشکده برق، پژوهشگاه نیرو، ۱۳۸۲.
- [6] Available: <https://www.aichi-brand.jp/>.
- [7] A. K. Datta, M. Dubey, and S. Jain, "Modelling and Simulation of Static Excitation System in Synchronous Machine Operation and Investigation of Shaft Voltage," *Advances in Electrical Engineering*, vol. 2014, p. 727295, 2014/07/03 2014.
- [۸] گروه پژوهشی ماشین‌های الکتریکی؛ گزارش "طراحی و ساخت یک نمونه ژنراتور اتصال کوتاه فشار ضعیف"، پژوهشکده برق، پژوهشگاه نیرو، ۱۳۸۴.
- [9] Available: <https://cpri.in/component/content/article/348.html>
- [10] A. Datta, A. Ansari, R. Mondal, and V. Raghavaiah, "Operational Benefits in Large Synchronous Machine with the Application of Static Drives," *Electrical and Electronics Engineering: An International Journal*, vol. 3, pp. 131-139, 05/31 2014.
- [11] C. E. Kilbourne, "New Large Short-Circuit Testing Generators [includes discussion]," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 71, pp. 829-837, 1952.
- [12] S. Beckwith, "Turbogenerator for Use in Short-Circuit Testing," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 70, pp. 2016-2020, 1951.
- [13] H. Yoda, M. Fujita, E. Nakamura, T. Ikuzawa, T. Otaka, and S. Nagano, "The world's largest class 8,880MVA short circuit generator," in *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2002, pp. 688-693 vol.2.
- [14] <http://aharco.com/>.
- [15] <http://www.jdevs.com/>.
- [16] <https://www.borna-co.com/>.
- [17] <http://jdnasir.acecr.ac.ir/fa>.
- [18] <http://www.iran-transfo.com/>.
- [19] <https://www.arya-transfo.com/>.
- [20] A. Beirami, V. Vahidinasab, M. Shafie-khah, and J. P. S. Catalão, "Multiobjective ray optimization algorithm as a solution strategy for solving non-convex problems: A power generation scheduling case study," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 119, p. 105967, 2020/07/01/ 2020.
- [21] J. F. Calvert, "Forces in Turbine Generator Stator Windings," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 50, pp. 178-194, 1931.

- [22] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcova, *Design of rotating electrical machines*: John Wiley & Sons, 2013.
- [23] I. Boldea, *Synchronous Generators*: CRC Press, 2015.
- [24] A. Sawhney and A. Chakrabarti, *Course in electrical machine design*: Dhanpat Rai, 2010.
- [25] A. Ivanov-Smolensky, *Electrical Machines*: MIR Publishers, 1982.