NRI-ER-1055-PDIPN21-01-F

پژوهشگاه نیرو

مطالعه و بررسی ماژول تخمین حالت نرم‌افزارهای کاربردی موجود جهت تعیین الزامات و قابلیت‌های نسخه بومی نرم‌افزار تخمین حالت

مدیر پروژه: عطیه کشاورز محمدیان

واحد مجری: گروه پژوهشی سامانه‌های کنترل هوشمند

DOI: 10.30503/nripress.2020.207


بسم الله الرحمن الرحيم

مطالعه و بررسی ماژول تخمین حالت نرم‌افزارهای کاربردی موجود جهت تعیین الزامات و قابلیت‌های نسخه بومی نرم‌افزار تخمین حالت

مدیر پروژه: عطیه کشاورز محمدیان

گروه پژوهشی پشتیبان: سامانه‌های کنترل هوشمند

همکاران پروژه: عطیه کشاورز محمدیان، سارا سلجوقی

واحد مجری: گروه پژوهشی سامانه‌های کنترل هوشمند

انتشارات پژوهشگاه نیرو

خرداد ۱۴۰۲

کد ثبت گزارش: NRI-ER-1055-PDIPN21-01-F

DOI: 10.30503/nripress.2020.20

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. گروه پژوهشی سامانه‌های کنترل هوشمند

مطالعه و بررسی ماژول تخمین حالت نرم‌افزارهای کاربردی موجود جهت تعیین الزامات و قابلیت‌های نسخه بومی نرم‌افزار تخمین حالت مدیر پروژه: عطیه کشاورز محمدیان. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۲.

۱۰۴ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. کشاورز محمدیان، عطیه، همکار پروژه. ۲. ظفری، لیلا، مدیر واحد مجری. ۳. گروه پژوهشی سامانه‌های کنترل هوشمند ۴. محور پژوهشی سامانه‌های کنترل و مدیریت شبکه برق

انتشارات پژوهشگاه نیرو

گروه پژوهشی سامانه‌های کنترل هوشمند

کلیه حقوق معنوی اثر متعلق به پدیدآورندگان، کلیه حقوق مادی متعلق به پژوهشگاه نیرو و نشر مطالب در حدود متعارف، با ذکر منبع بلامانع است.

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

تلفن: ۹-۸۸۰۷۹۴۰۱

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: *www.nri.ac.ir*

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

فرم تعهدنامه اصالت اثر

متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب عطیه کشاورز محمدیان، مدیر پروژه مطالعه و بررسی ماژول تخمین حالت نرم‌افزارهای کاربردی موجود جهت تعیین الزامات و قابلیت‌های نسخه بومی نرم‌افزار تخمین حالت و همکاران به شرح زیر است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است مطابق مقررات، مورد ارجاع قرار گرفته و در فهرست منابع ذکر گردیده است.

☑ گزارش حاصل انجام همه مراحل پروژه است.

☐ارش حاصل انجام ..... مرحله از ..... مرحله پروژه است.

همکاران :

۱. عطیه کشاورز محمدیان

۲. سارا سلجوقی

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

پیشگفتار

گزارش حاضر تحت عنوان گزارش نهایی مربوط به پروژه " مطالعه و بررسی ماژول تخمین حالت نرم‌افزارهای کاربردی موجود جهت تعیین الزامات و قابلیت‌های نسخه بومی نرم‌افزار تخمین حالت " است.

در این گزارش، به مرور ماژول تخمین‌گر حالت سیستم قدرت، تعریف و شرح اهمیت مسأله تخمین حالت در سیستم قدرت، دسته‌بندی تخمین‌گرهای حالت سیستم قدرت بر اساس معیارهای مختلف، بررسی اجزا و لایه‌های مختلف تخمین‌گر حالت سیستم قدرت، موارد استفاده از تخمین‌گر حالت در سیستم قدرت، شناسایی و تهیه لیستی از برترین نرم‌افزارهای کاربردی موجود در دنیا که دارای ماژول تخمین حالت قابل عرضه می‌باشند، مطالعه و بررسی برخی از مهم‌ترین نرم‌افزارهای شناسایی‌شده، مقایسه این نرم‌افزارها و انتخاب مناسبترین نرم‌افزار جهت تعیین الزامات و قابلیت‌های نرم‌افزار بومی تخمین حالت بر اساس شرایط و نیازمندی‌های موجود در کشور پرداخته خواهد شد.

مدیر پروژه : عطیه کشاورز محمدیان

تهیه‌کنندگان گزارش : عطیه کشاورز محمدیان

سارا سلجوقی

ناظر : محمدمهدی عباسی

کارفرما : پژوهشگاه نیرو

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

فهرست مطالب

عنوان صفحه

مقدمه ۱
فصل اول: مروری بر ماژول تخمین‌گر حالت و اجزاء آن ۵
۱-۱- مقدمه ۶
۱-۲- تخمین‌گرهای حالت سیستم قدرت ۶
۱-۲-۱- اهمیت مسأله تخمین حالت سیستم قدرت ۷
۱-۲-۲- دسته‌بندی تخمین‌گرهای حالت سیستم قدرت ۹
۱ ۲ ۲ ۱ تخمین حالت استاتیکی، ردیابی و دینامیکی ۹
۱ ۲ ۲ ۲ دسته‌بندی بر اساس معیارهای مختلف برای تخمین حالت ۱۳
۱ ۲ ۲ ۳ دسته‌بندی بر اساس سطح شبکه ۱۳
۱-۳- اجزاء و لایه‌های تخمین‌گر حالت ۱۴
۱-۳-۱- لایه داده ۱۴
۱ ۳ ۱ ۱ اندازه‌گیری‌های سیستم ۱۴
۱ ۳ ۱ ۲ شبه‌اندازه‌گیری‌ها ۱۶
۱ ۳ ۱ ۳ مدل شبکه ۱۷
۱-۳-۲- لایه عملکرد ۱۹
۱ ۳ ۲ ۱ تحلیل مشاهده‌پذیری ۱۹
۱ ۳ ۲ ۲ تخمین‌گر حالت ۲۰
۱-۳-۳- لایه کاربرد ۲۱
۱ ۳ ۳ ۱ تشخیص و شناسایی داده‌های نادرست ۲۱
۱ ۳ ۳ ۲ تخمین مدل شبکه ۲۱
۱ ۳ ۳ ۳ سایر برنامه‌ها ۲۲
۱-۴- موارد استفاده از تخمین‌گر حالت ۲۳

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

۱-۵- وضعیت کیفیت توان ۲۵
۱-۶- مراحل و پروسه تخمین‌گر حالت به صورت دقیق ۲۶
۱-۷- جمع‌بندی ۲۷
فصل دوم: مطالعه و بررسی نرم‌افزارها ۲۸
۲-۱- مقدمه ۲۹
۲-۲- طبقه‌بندی نرم‌افزارها در این حوزه ۳۱
۲-۳- راه‌حل‌های نرم‌افزاری موجود برای تخمین‌گر حالت ۳۱
۲-۳-۱- نرم‌افزارهای برنامه‌ریزی و تحلیل ۳۱
۲-۳-۲- نرم‌افزارهای سیستم‌های مدیریت توزیع ۳۲
۲-۴- نرم‌افزار شرکت ABB ۳۳
۲-۴-۱- رویکرد ۳۳
۲-۴-۲- اجزاء ۳۴
۲-۴-۳- قابلیت‌ها ۳۵
۲-۴-۴- نرم‌افزار ABB Network Manager از شرکت ABB ۳۵
۲-۴-۵- تخمین‌گر حالت به‌عنوان بخشی از سیستم اسکادا ۳۵
۲-۵- نرم‌افزار شرکت CYME ۳۷
۲-۵-۱- توابع اصلی پکیج CYMEDIST ۳۸
۲-۵-۲- ماژول‌های اضافی (تخمین حالت) ۳۹
۲-۵-۳- قابلیت‌های تخمین‌گر حالت CYMEDIST ۴۰
۲-۵-۴- تخمین حالت شبکه‌های ثانویه ۴۱
۲-۵-۵- اندازه‌گیری‌ها (ورودی ماژول) ۴۱
۲-۵-۶- خروجی ماژول ۴۱
۲-۶- نرم‌افزار شرکت NEXANT ۴۲
۲-۶-۱- سطح انتقال ۴۳

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

۲-۶-۲- سطح توزیع ۴۳
۲-۷- نرم‌افزار شرکت OSI ۴۵
۲-۷-۱- قابلیت‌ها ۴۵
۲-۷-۲- ماژول‌ها ۴۶
۲-۷-۳- مزایا ۴۹
۲-۸- نرم‌افزار شرکت ETAP ۵۱
۲-۸-۱- سطح انتقال ۵۱
۲ ۸ ۱ ۱ ویژگی‌ها و قابلیت‌ها ۵۱
۲-۸-۲- سطح توزیع ۵۲
۲ ۸ ۲ ۱ ویژگی‌های و قابلیت‌ها ۵۲
۲-۹- نرم‌افزار شرکت DIgSILENT ۵۳
۲-۹-۱- انواع اندازه‌گیری ورودی ۵۴
۲-۹-۲- اجزاء ۵۴
۲-۹-۳- الگوریتم ۵۵
۲-۹-۴- خروجی‌ها (متغیرهای حالت تخمینی) ۵۷
۲-۱۰- نرم‌افزار شرکت NEPLAN ۵۸
۲-۱۰-۱- جمع‌آوری داده‌ها از شبکه ۶۰
۲ ۱۰ ۱ ۱ پست‌های اولیه ۶۰
۲ ۱۰ ۱ ۲ پست‌های ثانویه ۶۰
۲ ۱۰ ۱ ۳ اعتبار سنجی داده‌ها ۶۰
۲ ۱۰ ۱ ۴ داده‌های شبکه ۶۱
۲-۱۱- نرم‌افزار شرکت POWERTECH ۶۲
۲-۱۲- نرم‌افزار شرکت GE ۶۶
۲-۱۲-۱- پخش بار و تخمین حالت در نرم‌افزار PowerOn Control: مشاهده‌پذیری در سطح شبکه توزیع ۶۷

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

۲-۱۳- نرم‌افزار شرکت KEPCO ۶۸
۲-۱۴- نرم‌افزار شرکت SIEMENS ۷۰
۲-۱۴-۱- تخمین‌گر حالت در TNA ۷۲
۲-۱۵- جمع‌بندی ۷۳
فصل سوم: مقایسه نرم‌افزارها ۷۴
۳-۱- مقدمه ۷۵
۳-۲- جمع‌بندی اجزاء ماژول تخمین حالت ۷۵
۳-۳- مقایسه نرم‌افزارها ۷۶
فصل چهارم: نتیجه‌گیری ۸۱
۴-۱ نتیجه‌گیری ۸۲
فهرست منابع ۸۸

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱ بازار جهانی تخمین‌گرهای حالت سیستم قدرت ۹

شکل ۱-۲ دسته‌بندی انواع پایداری در سیستم قدرت ۱۱

شکل ۱-۳ اجزاء و لایه‌های تخمین‌گر حالت سیستم قدرت ۱۴

شکل ۱-۴ وضوح زمانی اندازه‌گیری توزیع ۱۵

شکل ۱-۵ مروری بر تحلیل مشاهده‌پذیری ۲۰

شکل ۱-۶ زمینه استفاده از تخمین حالت در سیستم توزیع مدرن ۲۳

شکل ۱-۷ انواع مختلف PQSE ۲۶

شکل ۱-۸ مراحل دقیق ماژول تخمین‌گر حالت ۲۷

شکل ۲-۱ شرکت‌های تخمین‌گر حالت بر اساس منطقه جغرافیایی ۲۹

شکل ۲-۲ نمودار اجمالی برنامه‌های تخمین حالت در سیستم ABBNetwork Manager SCADA ۳۶

شکل ۲-۳ نمونه‌ای از گزارش تخمین‌گر حالت از اندازه‌گیری‌های نادرست ۳۷

شکل ۲-۴ نرم‌افزار GRID360DA و ماژول‌های مربوطه ۴۳

شکل ۲-۵ نمونه‌ای از GUI نرم‌افزار GRID360DA ۴۵

شکل ۲-۶ تعامل الگوریتمی اجزاء مختلف تخمین‌گر حالت DIgSILENT ۵۶

شکل ۲-۷ نمایی از معماری مشتری-سرور ۵۹

شکل ۲-۸ بلوک دیاگرام و ارتباط ماژول‌ها در smartPIT ۶۰

شکل ۲-۹ اجزاء و ماژول‌ها در نرم‌افزار DSA شرکت Powertech ۶۲

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

شکل ۲-۱۰ نمایی از GUI نرم‌افزار DSA ۶۴

شکل ۲-۱۱ بلوک دیاگرام نرم‌افزار PowSysGUI ۶۵

شکل ۲-۱۲ نمایی از اجزاء نرم‌افزار PowerOn Control ۶۶

شکل ۲-۱۳ نمایی از GUI محاسبات پخش بار در فیدر در نرم‌افزار PowerOn Control ۶۷

شکل ۲-۱۴ نمای کلی از نرم‌افزار PAS ۶۸

شکل ۲-۱۵ ماژول SE در KEPCO ۷۰

شکل ۲-۱۶ ماژول‌های مرتبط در سیستم کنترل شرکت SIEMENS ۷۱

شکل ۲-۱۷ نمایی از ارتباطات ماژول‌ها و توابع در سطح شبکه انتقال در نرم‌افزار شرکت SIEMENS ۷۲

شکل ۳-۱ نمایی از ارتباطات ماژول تخمین‌گر حالت در سیستم قدرت ۷۶

شکل ۴-۱ نمایی از محیط کاربری ماژول تخمین حالت نرم‌افزار DIgSILENT PowerFactory ۸۵

شکل ۴-۲ تنظیمات بررسی مقبولیت در ماژول تخمین حالت نرم‌افزار DIgSILENT PowerFactory ۸۷

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱ دسته‌بندی موارد استفاده از DSE ۲۳

جدول ۲-۱ شرکت‌های عرضه‌کننده نرم‌افزارهای کاربردی دارای ماژول تخمین حالت ۳۰

جدول ۳ ۱ خلاصه‌ای از ویژگی‌های ارائه شده توسط نرم‌افزارهای معرفی شده تخمین‌گر حالت ۷۷

مقدمه

برای بهره‌برداری امن از سیستم‌های قدرت در هم پیچیده و وسیع امروزی نیاز به سامانه‌های نرم‌افزاری مختلفی است. یکی از مهم‌ترین نیازمندی‌ها در این زمینه، نرم‌افزارهای تحلیل سیستم قدرت است. شرکت‌های مختلفی در دنیا نرم‌افزارهای کاردبردی جهت تحلیل سیستم قدرت ارائه کرده‌اند. نرم‌افزارهای تحلیل سیستم قدرت دارای ماژول‌های مختلفی مانند پخش بار، اتصال کوتاه و تخمین حالت می‌باشند. همان‌طور که می‌دانیم، یکی از مهم‌ترین ماژول‌های تحلیل سیستم قدرت، تخمین حالت می‌باشد. تخمین‌گر حالت سیستم قدرت به نظارت و کنترل شبکه‌های توزیع و انتقال کمک می‌کند. تخمین‌گر حالت بر اساس اندازه‌گیری‌های زمان-واقعی، داده‌های واردشده دستی و مدل شبکه، نتایج پخش بار را برای کل شبکه فراهم نموده و هم‌چنین امکان شناسایی داده‌های اندازه‌گیری نادرست، تحلیل مشاهده‌پذیری و تعیین مقدار متغیرهای حالت شبکه را فراهم می‌کند. عوامل مختلفی در گسترش کاربرد نرم‌افزارهای تخمین حالت سیستم قدرت دخیل می‌باشند؛ از جمله ظهور و پذیرش روزافزون شبکه‌های هوشمند، گسترش سریع و پیچیده‌تر شدن شبکه‌های توزیع و انتقال و قوانین حمایت از استفاده از سیستم‌های کارآمد انرژی.

به‌طورکلی می‌توان گفت تخمین حالت جهت به دست آوردن بهترین تخمین از متغیرهای حالت سیستم قدرت بر اساس مجموعه اندازه‌گیری‌های موجود و سایر داده‌های مفید سیستم می‌باشد که نتایج آن، پایگاه داده زمان-واقعی را برای سایر برنامه‌های کاربردی سیستم قدرت، مانند ارزیابی امنیت، کنترل و پخش بار اقتصادی و غیره فراهم می‌آورد. تخمین حالت از اندازه‌گیری‌های زمان-واقعی، داده‌های مربوط به بار، داده‌های مربوط به توپولوژی شبکه و اطلاعات شبکه مثل امپدانس خطوط، داده‌های کاذب، داده‌های ساختگی و غیره استفاده می‌کند. در صورت کافی بودن میزان اندازه‌گیری‌ها، شبکه مشاهده‌پذیر می‌باشد و می‌توان بدون استفاده از داده‌های بار، حالت سیستم را تخمین زد.

نظارت و کنترل مؤثر شبکه به ابزارهای تحلیل زمان-واقعی نیاز دارد که بتواند حالت سیستم را تخمین زده و همچنین پاسخ سیستم را به تغییرات بار و یا شرایط آب و هوایی پیش‌بینی کند. بنابراین، تجزیه و تحلیل سیستم قدرت نیاز به توپولوژی دینامیک شبکه و اندازه‌گیری‌های زمان-واقعی دارد. تخمین حالت، فرآیند تخصیص یک مقدار به یک متغیر حالت ناشناخته سیستم، با استفاده از اندازه‌گیری‌های آن سیستم و بر اساس معیارهای از پیش تعیین‌شده است. این فرآیند شامل اندازه‌گیری‌های دارای خطا است. بنابراین فرآیند تخمین حالت سیستم بر اساس یک معیار آماری است که مقدار واقعی متغیرهای حالت را در نظر می‌گیرد تا معیار انتخاب‌شده را به حداقل یا حداکثر برساند.

در یک سیستم قدرت، متغیرهای حالت عبارت‌اند از مقادیر ولتاژ و زوایای فاز نسبی در گره‌های سیستم. ورودی‌های یک تخمین‌گر، اندازه‌گیری‌های ناکامل (دارای خطا) سیستم قدرت از دامنه ولتاژ و توان، توان راکتیو یا مقادیر جریان است. تخمین‌گر به گونه‌ای طراحی می‌شود که "بهترین تخمین" از

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

دامنه ولتاژ و زوایای فاز سیستم را تولید کرده و تشخیص دهد که در مقادیر اندازه‌گیری شده خطاهایی وجود دارد و ممکن است اندازه‌گیری‌های افزونه باشند.

در صورت استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری هوشمند در شبکه، می‌توان تجزیه و تحلیل سیستم قدرت را با استفاده از داده‌های دقیق‌تری انجام داد. هرچند، نصب گسترده تجهیزات اندازه‌گیری هوشمند و دقیق‌تر به دلیل قیمت بالای آن‌ها با محدودیت مواجه است. درصورتی‌که تجهیزات اندازه‌گیری در نقاط کلیدی شبکه نصب شوند، تخمین حالت می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مفید برای جبران عدم نصب تجهیزات اندازه‌گیری در سایر نقاط و همچنین مقابله با نویز اندازه‌گیری به کار آید. نتیجه تخمین حالت منعکس‌کننده مقادیر واقعی متغیرهای حالت شبکه مانند ولتاژ شین‌ها و توان واقعی و راکتیو شاخه‌ها می‌باشد.

با توجه به اهمیت مسأله تخمین حالت در تحلیل، نظارت و کنترل سیستم‌های قدرت، شرکت‌های مختلفی در دنیا مانند ABB، Siemens، CYME و DIgSILENT به طراحی و عرضه ماژول‌های تخمین حالت پرداخته‌اند. با وجود این که شرکت‌های مختلفی در دنیا دارای ماژول تخمین حالت قابل عرضه می‌باشند، اما موانع و مشکلات مختلفی بر سر راه خریداری و بهره‌برداری از این نرم‌افزارها وجود دارد. در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

- مسائل امنیتی و پدافند غیرعامل
- هزینه بالای خرید
- امکان عدم پشتیبانی از این نرم‌افزارها در حال حاضر و یا در آینده
- هزینه بالای مجوز بهره‌برداری (لایسنس)
- تحریم‌های موجود
- مشکلات خروج ارز

به طور مثال، هزینه ماژول تخمین حالت DIgSILENT که از جمله مهم‌ترین قابلیت‌های کارکردی این نرم‌افزار به شمار می‌رود بسیار بالا بوده و هزینه تهیه آن در حالت تک‌کاربره بالغ بر ۲۰ هزار یورو و در حالت دوکاربره نیز در حدود ۳۵ هزار یورو خواهد بود.

با توجه به مشکلات ذکرشده، اسناد و ابلاغیه‌های مختلف موجود در کشور بر بومی‌سازی نرم‌افزارهای کاربردی صنعت برق کشور و خوداتکایی در طراحی و پیاده‌سازی نرم‌افزارهای مورد نیاز در مراکز دیسپاچینگ، تأکید فراوان داشته‌اند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

در نتیجه، با توجه به مشکلات ذکرشده درزمینه استفاده از نرم‌افزارهای خارجی تحلیل شبکه و تأکید بر بومی‌سازی نرم‌افزارهای مورد نیاز در صنعت، مسأله ایجاد یک نسخه بومی از نرم‌افزار تخمین حالت در دستور کار گروه پژوهشی سامانه‌های کنترل هوشمند قرارگرفته است. در همین راستا، پروژه‌ای با عنوان "انجام فعالیت‌های مقدماتی فنی و نرم‌افزاری شامل تعیین الگوریتم‌ها و راستی‌آزمایی نرم‌افزار تخمین حالت" توسط این گروه پژوهشی پیشنهاد شده و در جلسه شورای پژوهش-فناوری پژوهشکده انتقال در تاریخ ۱۴۰۰/۱۲/۱۸ مورد تأیید قرار گرفته است.

از آن‌جا که نمونه‌های موفقی از نرم‌افزارهای کاربردی موجود در دنیا دارای ماژول تخمین حالت قابل عرضه می‌باشند، مطالعه و بررسی بر روی این نرم‌افزارها می‌تواند کمک بسیاری در زمینه تعیین الزامات و قابلیت‌های یک نسخه بومی از نرم‌افزار تخمین حالت کرده و گام اولیه‌ای برای تعیین الگوریتم‌ها و راستی‌آزمایی و تهیه یک نسخه بومی از نرم‌افزار تخمین حالت باشد.

با توجه به این توضیحات، «مطالعه و بررسی ماژول تخمین حالت نرم‌افزارهای کاربردی موجود جهت تعیین الزامات و قابلیت‌های نسخه بومی نرم‌افزار تخمین حالت» در این پروژه مد نظر قرار گرفته است. مطالعه و بررسی جامع ماژول تخمین حالت نرم‌افزارهای کاربردی موجود در دنیا می‌تواند کمک شایانی در تعیین الزامات و قابلیت‌ها، تعیین ورودی‌ها و خروجی‌ها و تعیین سیستم مد نظر برای شبیه‌سازی و راستی‌آزمایی نسخه بومی نرم‌افزار تخمین حالت (سیستمی که به لحاظ دسترسی به داده‌ها، پارامترها و توپولوژی شبکه وضعیت مطلوبی داشته باشد) بکند.

انجام مطالعات جامع بر روی ماژول تخمین حالت نرم‌افزارهای کاربردی مطرح در دنیا و بررسی و مقایسه الزامات و قابلیت‌های آنها با یکدیگر، می‌تواند به انتخاب یک نرم‌افزار مناسب به عنوان الگو برای طراحی و پیاده‌سازی نسخه بومی نرم‌افزار تخمین حالت کمک نماید.

انجام این مطالعات منجر به هموارسازی مسیر تحقق سیاست‌های کنونی کشور در راستای تهیه نرم‌افزارهای بومی منطبق با نیازمندی‌های موجود، افزایش امنیت سایبری شبکه برق کشور، کاهش وابستگی به شرکت‌های خارجی و رفع نگرانی‌ها در زمینه تهیه لایسنس نسخه‌های خارجی نرم‌افزار و عدم پشتیبانی به علت تحریم‌ها خواهد شد.

گزارش حاضر تحت عنوان «مطالعه و بررسی ماژول تخمین حالت نرم‌افزارهای کاربردی موجود» شامل چهار فصل می‌باشد.

در فصل اول، ابتدا مروری بر مسأله تخمین حالت سیستم قدرت انجام خواهد شد. در این راستا، ابتدا تعریف و شرح اهمیت مسأله تخمین حالت سیستم قدرت و سپس دسته‌بندی تخمین‌گرهای حالت سیستم

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

قدرت بر اساس معیارهای مختلف انجام می‌شود. در ادامه فصل، اجزاء ماژول تخمین‌گر حالت و لایه‌های آن بررسی خواهند شد. سپس، موارد استفاده از تخمین‌گر حالت در سیستم قدرت، وضعیت کیفیت توان و مراحل و پروسه تخمین‌گر حالت سیستم قدرت بررسی خواهند شد.

در فصل دوم، به شناسایی برخی از مهم‌ترین نرم‌افزارهای ارائه‌شده در دنیا پرداخته خواهد شد که دارای ماژول تخمین حالت قابل عرضه می‌باشند. سپس به طبقه‌بندی نرم‌افزارها در این حوزه و بررسی راه‌حل‌های نرم‌افزاری موجود برای تخمین‌گر حالت پرداخته خواهد شد. سپس مطالعه و بررسی برخی از مهم‌ترین نرم‌افزارهای شناسایی‌شده که دارای ماژول تخمین حالت قابل عرضه می‌باشند، انجام خواهد شد.

در فصل سوم، به جمع‌بندی ماژول تخمین حالت و سپس به مقایسه نرم‌افزارهای بررسی‌شده در فصل دوم پرداخته خواهد شد.

در فصل چهارم، بر اساس شرایط و نیازمندی‌های موجود در کشور به انتخاب مناسب‌ترین نرم‌افزار جهت تعیین الزامات و قابلیت‌های نرم‌افزار بومی تخمین حالت پرداخته خواهد شد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

فصل اول: مروری بر ماژول تخمین‌گر حالت و اجزاء آن

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

۱-۱- مقدمه

در این فصل، ابتدا مروری بر مسأله تخمین حالت سیستم قدرت انجام شده است. در این راستا، ابتدا تعریف و شرح اهمیت مسأله تخمین حالت سیستم قدرت و سپس دسته‌بندی تخمین‌گرهای حالت سیستم قدرت بر اساس معیارهای مختلف انجام شده است. در ادامه فصل، اجزاء ماژول تخمین‌گر حالت و لایه‌های آن بررسی می‌شود. سپس، موارد استفاده از تخمین‌گر حالت در سیستم قدرت، وضعیت کیفیت توان و مراحل و پروسه تخمین‌گر حالت سیستم قدرت بررسی خواهند شد.

۱-۲- تخمین‌گرهای حالت سیستم قدرت

تخمین حالت[۱] روشی برای یافتن مقادیر نامعلوم متغیرهای حالت بر اساس برخی اندازه‌گیری‌های ناقص است. این روش از معیارهای آماری برای تخمین اندازه واقعی متغیرهای نامعلوم استفاده می‌کند. یکی از رایج‌ترین معیارها، به حداقل رساندن مجموع مربعات خطا است. در قرن بیستم، تخمین حالت در چندین حوزه از کاربردهای فضایی ناسا گرفته تا مهندسی کنترل و سیستم‌های قدرت استفاده شده است.

در سیستم‌های EMS، تخمین گرهای حالت، ابزارهای مهندسی بسیار مهمی هستند. تخمین حالت یک روش ضروری برای نظارت بر سیستم‌های قدرت است. همچنین دارای یک عملکرد حیاتی است که به‌عنوان یک «خشک‌شویی» عمل می‌کند که در آن خطاهای اندازه‌گیری بد را شناسایی کرده و آن‌ها را حذف می‌کند. تخمین گرهای حالت همچنین توسط EMS برای اهداف دیگری مانند بهبود الگوریتم‌های قیمت‌گذاری حاشیه‌ای مکانی[۲] (LMP) استفاده می‌شود، به‌طوری‌که به قیمت‌گذاری توان بر اساس مکان و جریان برق در سیستم‌های قدرت کمک می‌کند. یکی از عملکردهای کلیدی سیستم EMS تخمین حالت سیستم قدرت است؛ بنابراین، مهم‌ترین عنصر برای اجرای این منطق، اتصال مداوم ایستگاه نظارت به میدان است. بدیهی است که با تکنولوژی امروزی، به ندرت می‌توان اندازه‌گیری‌ها را از یک میدان یا ایستگاه به اتاق کنترل از طریق تلفن ارسال کرد و این مقوله از طریق فناوری ارتباطات و انتقال داده‌ها انجام می‌شود. در مواردی که وضعیت تجهیزات نیروگاه‌ها به صورت دستی مدیریت می‌شوند، ممکن است برخی شرایط استثنا اعمال شود. با این حال، در برخی شرایط اضطراری، به دست آوردن تمام اندازه‌گیری‌های دقیق برای یک تصمیم فوری در زمان کوتاه دشوار است؛ بنابراین، یکی از

[۱] State Estimation

[۲] Locational Marginal Pricing

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

راه‌های غلبه بر این شرایط، تقریب مطمئن مقادیر نامعلوم و فیلتر کردن خطاها از طریق تخمین حالت است [۱].

۱-۲-۱- اهمیت مسأله تخمین حالت سیستم قدرت

تخمین‌گر حالت سیستم قدرت به نظارت[۱]، سرپرستی[۲] و کنترل شبکه‌های توزیع و انتقال کمک می‌کند. تخمین‌گر حالت بر اساس اندازه‌گیری‌های زمان-واقعی[۳]، داده‌های واردشده دستی و مدل شبکه، نتایج پخش بار را برای کل شبکه فراهم نموده و هم‌چنین امکان شناسایی داده‌های اندازه‌گیری نادرست، تحلیل مشاهده‌پذیری[۴] و تعیین مقدار متغیرهای حالت شبکه را فراهم می‌کند [۲]. اگرچه در حال حاضر از تخمین‌گر حالت سیستم قدرت در مقیاس‌های وسیع استفاده نمی‌شود، اما پتانسیل استفاده از تخمین‌گر حالت برای ارائه حفاظت و کنترل زمان-واقعی سیستم‌های قدرت در آینده وجود دارد. عوامل مختلفی در گسترش کاربرد نرم‌افزارهای تخمین حالت سیستم قدرت دخیل می‌باشند؛ از جمله ظهور و پذیرش روزافزون شبکه‌های هوشمند، گسترش سریع و پیچیده‌تر شدن شبکه‌های توزیع و انتقال و قوانین حمایت دولت‌ها برای استفاده از سیستم‌های کارآمد انرژی. به نظر می‌رسد، تخمین حالت سیستم قدرت با تغییر مداوم از شبکه‌های توزیع غیر فعال به فعال توجه بیشتری را به خود جلب کند. این گذار سبب افزایش نیاز به به راه‌حل‌های مؤثر برای نظارت و کنترل زمان-واقعی سیستم‌های توزیع الکتریکی می‌شود [۳].

نظارت و کنترل مؤثر شبکه قدرت به ابزارهای تحلیل زمان-واقعی نیاز دارد که بتوانند بردار حالت سیستم را تخمین زده و همچنین پاسخ سیستم را به تغییرات بار و شرایط آب و هوایی پیش‌بینی کنند؛ بنابراین، تجزیه و تحلیل سیستم قدرت نیاز به توپولوژی دینامیک و اندازه‌گیری‌های زمان-واقعی دارد. تخمین حالت فرآیند تخصیص یک مقدار به یک متغیر حالت ناشناخته سیستم، بر اساس اندازه‌گیری‌های آن سیستم و بر اساس معیارهای از پیش تعیین شده است. با توجه به ناکامل بودن اندازه‌گیری‌ها (وجود خطای اندازه‌گیری)، تخمین حالت بر اساس یک معیار آماری[۵] انجام می‌شود. با در نظر گرفتن مقادیر واقعی متغیرهای حالت، به بیشینه‌سازی یا کمینه‌سازی معیار مورد نظر پرداخته شده و مقادیر متغیرهای حالت تخمین زده شده به دست می‌آیند [۲].

---

[۱] Monitoring

[۲] Supervising

[۳] Real-Time

[۴] Observability

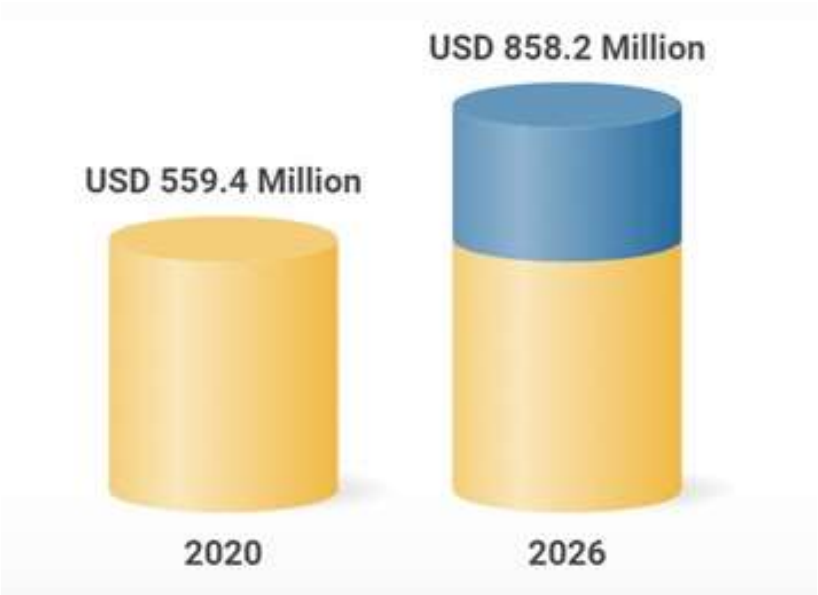
[۵] Statistical Criterion

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

در یک سیستم قدرت، متغیرهای حالت عبارت از دامنه ولتاژ و زوایای فاز نسبی در گره‌های سیستم هستند. ورودی‌های تخمین‌گر حالت سیستم قدرت شامل اندازه‌گیری‌های ناکامل از دامنه ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو و یا مقادیر جریان هستند. تخمین‌گر سیستم قدرت به گونه‌ای طراحی می‌شود که با وجود مقادیر خطا در اندازه‌گیری‌ها و با وجود اندازه‌گیری‌های افزونه[۱] بتواند بهترین تخمین را از دامنه و زاویه فاز ولتاژ گره‌های سیستم ارائه دهد [۲].

در صورت استفاده بیشتر از دستگاه‌های اندازه‌گیری هوشمند در شبکه، می‌توان تجزیه و تحلیل سیستم قدرت را با استفاده از داده‌های دقیق‌تری انجام داد. هرچند، نصب گسترده تجهیزات اندازه‌گیری هوشمند و دقیق‌تر به دلیل قیمت بالای آن‌ها با محدودیت مواجه است. در صورتی که تجهیزات اندازه‌گیری در نقاط کلیدی شبکه نصب شوند، تخمین حالت می‌تواند به عنوان یک ابزار مفید برای جبران عدم نصب تجهیرات اندازه‌گیری در سایر نقاط و همچنین مقابله با نویز اندازه‌گیری به کار آید. نتیجه تخمین حالت منعکس‌کننده مقادیر واقعی متغیرهای حالت شبکه مانند ولتاژ شین‌ها و توان واقعی و راکتیو شاخه‌ها می‌باشد [۲].

شکل ۱-۱ بازار جهانی تخمین‌گرهای حالت سیستم قدرت در سال ۲۰۲۰ و پیش‌بینی آن تا سال ۲۰۲۶ را نشان می‌دهد [۳]. چنان‌چه در این شکل دیده می‌شود، در بحبوحه بحران COVID-19، بازار جهانی تخمین‌گرهای حالت سیستم قدرت در سال ۲۰۲۰ حدود ۵۵۹/۴ میلیون دلار آمریکا تخمین زده شده و پیش‌بینی شده است که تا سال ۲۰۲۶ به ۸۵۸/۲ میلیون دلار برسد که بیان‌گر ۶/۷ درصد نرخ رشد ترکیبی سالانه (CAGR[۲]) می‌باشد.



[۱] Redundant Measurements

[۲] Compound Annual Growth Rate

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

شکل 1-1 بازار جهانی تخمین‌گرهای حالت سیستم قدرت

در حال حاضر، شبکه‌های هوشمند به طور فزاینده‌ای در کشورهای آمریکای شمالی و اروپایی در حال گسترش هستند، در کشورهای آمریکای لاتین، آسیا-اقیانوسیه و خاورمیانه نیز تمایل به گسترش شبکه‌های هوشمند مشاهده می‌شود. رشد شدید بازار جهانی شبکه هوشمند به نوبه خود تقاضا برای اجزاء معماری، سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مختلفی که برای بهبود عملیات شبکه هوشمند مورد نیاز هستند را افزایش می‌دهد. یکی از مهم‌ترین نیازمندی‌های در این زمینه، نرم‌افزارهای تخمین‌گر حالت سیستم قدرت هستند [۳].

۱-۲-۲- دسته‌بندی تخمین‌گرهای حالت سیستم قدرت

۱ ۲ ۲ ۱ تخمین حالت استاتیکی، ردیابی و دینامیکی

در این بخش، به معرفی تخمین حالت استاتیکی، ردیابی و دینامیکی در سیستم قدرت پرداخته می‌شود. بدین منظور، ابتدا مفاهیم پایداری حالت ماندگار[۱]، پایداری حالت گذرا[۲] و پایداری دینامیکی[۳] در سیستم قدرت معرفی می‌شوند. پایداری یک سیستم به توانایی آن سیستم برای بازگشت به حالت ماندگار پس از وقوع یک اغتشاش[۴] گفته می‌شود. در شبکه برق AC با ژنراتورهای سنکرون، پایداری سیستم قدرت عبارت از توانایی آن برای بازگشت به حالت ماندگار بدون از دست دادن همزمانی[۵] می‌باشد؛ به عبارت دیگر، پایداری سیستم قدرت، به توانایی ماشین‌های سنکرون سیستم برای باقی ماندن در حالت سنکرون در مواجهه با هر گونه اغتشاش گفته می‌شود. به همین دلیل است که به این نوع پایداری، پایداری سنکرون نیز گفته می‌شود. پایداری سیستم قدرت را می‌توان به پایداری حالت ماندگار، پایداری حالت گذرا و پایداری دینامیکی دسته‌بندی نمود [۴]. در ادامه، این سه نوع پایداری شرح داده شده‌اند.

---

[۱] Steady-State Stability

[۲] Transient Stability

[۳] Dynamic Stability

[۴] Disturbance

[۵] Synchronism

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

- **پایداری حالت ماندگار**[۱] **(شبه‌ماندگار**[۲]**)**: پایداری حالت ماندگار به توانایی ماشین‌های مختلف سیستم در بازیابی و ماندن در حالت سنکرون، بعد از یک اغتشاش کوچک و آرام، مانند تغییر تدریجی بار گفته می‌شود. مطالعات پایداری حالت ماندگار به تغییرات کوچک و تدریجی در شرایط عملیاتی سیستم قدرت محدود می‌شوند. در پایداری حالت ماندگار، ولتاژ باس‌ها در نزدیکی مقادیر نامی خود نگاه داشته می‌شوند. همچنین، اطمینان حاصل می‌شود که زوایای فاز بین دو باس خیلی بزرگ نباشند. علاوه بر این، اضافه بار تجهیزات و خطوط انتقال مورد بررسی قرار می‌گیرند. این بررسی‌ها عموما توسط مطالعات پخش بار انجام می‌شوند. در حالت ماندگار، نقطه عملکرد[۳] سیستم تنها به دلیل تغییرات آهسته و روان بار و یا تغییرات کوچک منابع تجدیدپذیر تغییر می‌کند. در این حالت، متغیرهای حالت سیستم تغییرات بسیار ناچیزی داشته و تقریبا ثابت می‌باشند [۴].

- **پایداری حالت گذرا**[۴]: مطالعات پایداری حالت گذرا در شرایطی انجام می‌شود که یک اغتشاش ناگهانی و شدید (مانند وقوع عیب[۵]، از کار افتادن یک ژنراتور، عملیات کلیدزنی و تغییر بار بزرگ) در سیستم قدرت رخ دهد. هدف از مطالعات پایداری حالت گذرا این است که متغیرهای سیستم پس از رفع اغتشاش به حالت ماندگار برسند [۴].

- **پایداری دینامیکی:** این نوع پایداری حالتی بین پایداری ماندگار و گذرا است. به توانایی سیستم قدرت در حفظ پایداری تحت اغتشاشات کوچک، پایداری دینامیکی گفته می‌شود. اغتشاشات کوچک می‌توانند بر اثر نوسانات رندوم در بار و یا میزان تولید رخ دهند. این اغتشاشات توسط تنظیم‌کننده‌های ولتاژ، کنترل‌کننده‌ها و گاورنرها برطرف می‌شوند. در این نوع پایداری، اغتشاشات کوچک ۱۰ تا ۳۰ ثانیه‌ای مورد نظر است [۴].

لازم به ذکر است که کارگروه IEEE/CIGRE[۶]، مفاهیم پایداری دینامیکی و حالت ماندگار را ترکیب کرده و تحت نام پایداری سیگنال-کوچک[۷] در نظر گرفته است [۵]. در شکل ۱-۲، دسته‌بندی پایداری سیستم قدرت توسط این کارگروه نشان داده شده است.

---

۱ Steady-State

۲ Quasi-Steady

۳ Operating Point

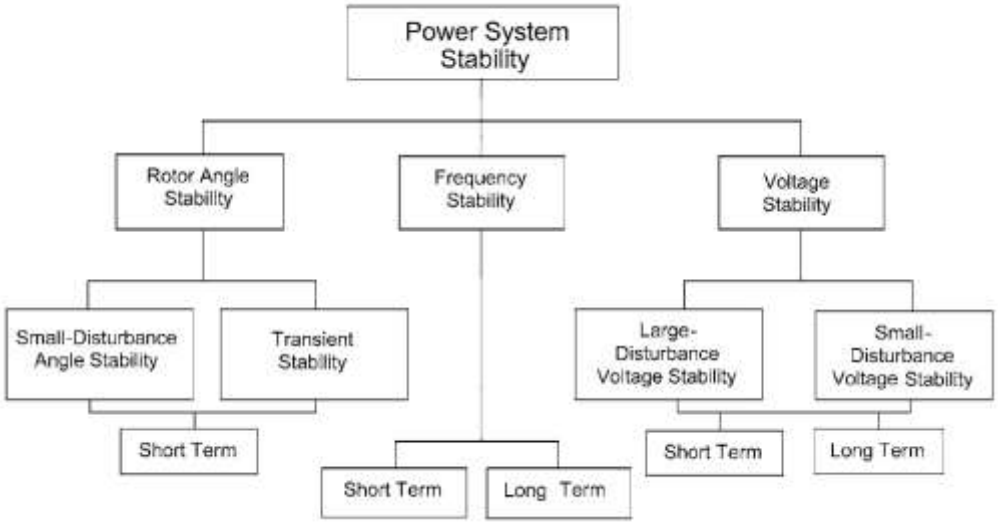
۴ Transient

۵ Fault

۶ IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions

۷ Small-Signal Stability

DOI: 10.30503/nripress.2020.207



شکل 1-2 دسته‌بندی انواع پایداری در سیستم قدرت

در ادامه، چارچوب‌های تخمین حالت استاتیکی، ردیابی و دینامیکی در سیستم قدرت معرفی شده‌اند.

- تخمین حالت استاتیکی

درصورتی‌که بردار حالت سیستم در زمان k تنها از اندازه‌گیری‌های به‌دست‌آمده در همان زمان k تخمین زده شود، تخمین‌گر حالت استاتیکی می‌باشد. در این زمینه می‌توان به روش کمترین مربعات وزن‌یافته (WLS[1]) اشاره نمود. از آن‌جایی که در روش استاتیکی، از اطلاعات مقادیر بردار حالت تخمین‌زده‌شده و اندازه‌گیری‌ها در زمان‌های قبلی استفاده نمی‌شود، لازم است که عملیات تخمین حالت استاتیکی در زمان $k+1$ نیز به طور کامل اجرا شود. درنتیجه، بار محاسباتی این روش به علت افزایش روزافزون مقیاس و پیچیدگی سیستم قدرت امروزی افزایش می‌یابد.

به عبارت دیگر، در تخمین حالت استاتیکی، اطلاعات انتقال حالت[2] کاملاً نادیده گرفته می‌شود. درنتیجه در روش تخمین حالت استاتیکی، اطلاعات اندازه‌گیری و تخمین‌زده‌شده در زمان‌های گذشته در نظر گرفته نمی‌شود. این روش حافظه گذشته را در زمان حال به همراه ندارد و نمی‌تواند دینامیک‌های واقعی سیستم (حالت‌های دینامیکی ژنراتورها، بارها و غیره) را ردیابی کند.

[1] Weighted Least Square

[2] State Transition Information

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

- تخمین حالت ردیابی[۱]

روش‌های تخمین حالت ردیابی بر اساس توسعه تخمین حالت استاتیکی به دست می‌آیند. این روش یک حالت شبه‌ماندگار را برای سیستم فرض می‌کند که در آن حالت سیستم در زمان k به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$X(k) = X(k-1) + \omega(k) \qquad (۱-۱)$$

در این رابطه، $X(k)$ نشان‌دهنده بردار حالت در زمان k بوده و $\omega(k)$ یک نویز سفید گوسی با میانگین صفر است که ماتریس کوواریانس آن معلوم است. یکی از چالش‌های موجود در فرمول‌نویسی روش تخمین حالت ردیابی عدم وجود یک مدل مناسب برای نشان دادن پویایی و دینامیک وضعیت سیستم است. روش تخمین حالت ردیابی یک حالت شبه‌ماندگار را برای سیستم فرض می‌کند که در آن حالت سیستم بدون تغییر باقی می‌ماند؛ البته به غیر از نویز گوسی $\omega(k)$. با افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده و بارهای انعطاف‌پذیر، دیگر نمی‌توان تغییرات متغیرهای حالت سیستم را تنها با یک نویز سفید گوسی مدل نمود. این وضعیت در حضور تغییر توپولوژی شبکه و پارامترهای خطوط انتقال و ترانسفورماتورها، کلیدزنی بانک‌های خازنی و راکتورهای موازی نیز تشدید می‌شود. درنتیجه، اتخاذ روش تخمین حالت ردیابی برای کاربردهای عملی به یک چالش بزرگ تبدیل می‌شود.

- تخمین حالت دینامیکی

برای غلبه بر مشکلات روش‌های تخمین حالت استاتیکی و ردیابی، از روش‌های تخمین حالت دینامیکی استفاده می‌شود. در روش دینامیکی، بردار حالت در زمان k به صورت بازگشتی و از روی مقادیر تخمین‌زده شده در زمان قبل $k-1$ و مقادیر اندازه‌گیری زمان k به‌روزرسانی می‌شود.

بار محاسباتی پایین‌تر و قابلیت پیش‌بینی از مزایای روش دینامیکی نسبت به روش استاتیکی می‌باشند. قابلیت پیش‌بینی بردار حالت یک گام به جلو در روش دینامیکی، زمان تصمیم‌گیری بیشتری به اپراتور می‌دهد. در روش دینامیک، به مدل دینامیکی فضای حالت سیستم نیاز می‌باشد؛ در حالی که روش‌های تخمین حالت استاتیکی و ردیابی بی‌نیاز از این مدل می‌باشند [۶].

شایان ذکر است که روش تخمین حالت استاتیکی ممکن است در صورت بروز تغییرات ناگهانی عملکرد بهتری نسبت به روش تخمین حالت ردیابی داشته باشد. با این حال، قابلیت ردیابی دینامیکی سیستم را برخلاف روش تخمین حالت دینامیکی ندارد. علاوه بر این، تخمین حالت استاتیکی (برخلاف

[۱] Tracking State Estimation (TSE)

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

تخمین حالت دینامیکی)، مستلزم این است که بردار حالت تنها با آخرین مجموعه اندازه‌گیری‌های موجود مشاهده‌پذیر باشد [۸], [۷].

۲ ۲ ۲ ۱ دسته‌بندی بر اساس معیارهای مختلف برای تخمین حالت

همان‌طور که گفته شد، با توجه به اهمیت مسأله تخمین حالت در تحلیل، نظارت و کنترل سیستم‌های قدرت، شرکت‌های مختلفی در دنیا مانند ABB، Siemens، CYME و DIgSILENT به طراحی و عرضه ماژول‌های تخمین حالت پرداخته‌اند. این تخمین‌گرها را می‌توان بر اساس راه حل[۱] و معیار مورد نظر دسته‌بندی کرد [۹]. معیارهای مختلفی چه برای تخمین حالت استاتیکی و چه برای تخمین حالت دینامیکی وجود دارد. به طور مثال می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

- کمترین مربعات وزن‌یافته (WLS)
- روش کمترین مقدار مطلق (LAV[۲])
- روش حداقل مربعات منظم (RLS[۳])
- فیلتر کالمن[۴]
- فیلترهای بیزین[۵]
- روش نیوتن-گوس[۶]

۳ ۲ ۲ ۱ دسته‌بندی بر اساس سطح شبکه

در میان ماژول‌های تحمین حالت عرضه شده توسط شرکت‌های مختلف برخی از آن‌ها در سطح توزیع و برخی در سطح انتقال و یا هر دو به تخمین حالت سیستم می‌پردازند. به طور مثال ماژول

---

[۱] Solution

[۲] Leat Absolute Value

[۳] Regularized Least Square

[۴] Kalman Filter

[۵] Bayesian

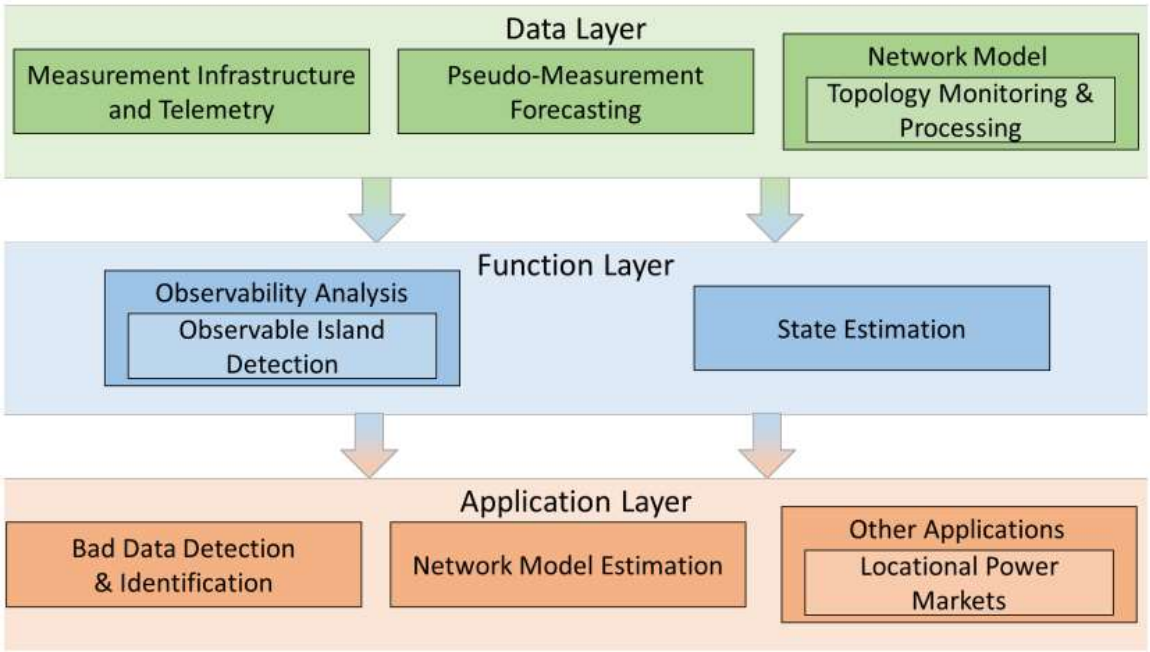
[۶] Newton Gaussian

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

تخمین حالت شرکت CYME تنها در سطح توزیع و شرکت‌های ABB، ETAP و DIgSILENT در دو سطح انتقال و توزیع ارائه می‌شوند.

۱-۳- اجزاء و لایه‌های تخمین‌گر حالت

در شکل ۱-۳، یک نمای کلی از عملکرد لایه‌های تقسیم‌شده در یک تخمین‌گر حالت سیستم قدرت نشان داده شده است. در ادامه، به بررسی هریک از اجزاء و لایه‌ها پرداخته می‌شود [۱۰].



شکل 1-3 اجزاء و لایه‌های تخمین‌گر حالت سیستم قدرت

۱-۳-۱- لایه داده

لایه داده شامل فناوری اطلاعات و ویژگی‌های فیزیکی است که در مرکز کنترل انباشته شده است. لایه داده ورودی تخمین‌گر حالت است، یعنی تمام دانش سیستم که می‌تواند بر نتیجه تخمین حالت تأثیر بگذارد. این اطلاعات شامل اندازه‌گیری‌ها و پیش‌بینی‌ها و همچنین مدل و توپولوژی شبکه است [۱۰].

۱ ۱ ۳ ۱ اندازه‌گیری‌های سیستم

اندازه‌گیری‌ها مهم‌ترین جنبه تخمین‌گر حالت هستند. بدون اندازه‌گیری‌های کافی، تخمین حالت می‌تواند غیر قابل حل یا غیر قابل استفاده باشد. سه معیار اصلی زیر در مورد زیرساخت اندازه‌گیری یک شبکه برق وجود دارد [۱۰].

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

- توزیع و جانمایی اندازه‌گیری

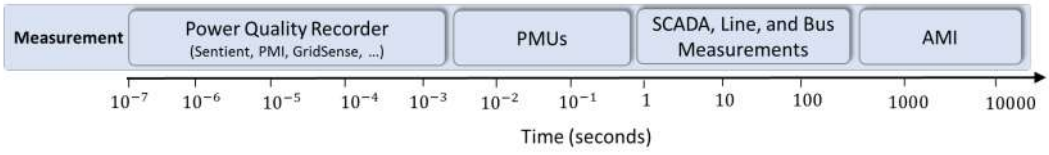
اندازه‌گیری توزیع بر مشاهده‌پذیری و افزونگی[۱] تخمین‌گر حالت تأثیر می‌گذارد. برای این که یک تخمین‌گر حالت کاملا مشاهده‌پذیر باشد، اندازه‌گیری‌ها باید به‌گونه‌ای توزیع شوند که حداقل به همان تعداد اندازه‌گیری‌های مستقل وجود داشته باشد. توجه داشته باشید که یک دستگاه تا زمانی که مقادیر مستقل را اندازه‌گیری می‌کند می‌تواند چندین اندازه‌گیری را تشکیل دهد. به‌عنوان‌مثال، PMU به طور بالقوه می‌تواند ولتاژ شین و زاویه ولتاژ و همچنین تعدادی جریان خط و زوایای جریان را اندازه‌گیری کند؛ که همه آن‌ها مستقل از یکدیگر هستند و به‌عنوان اندازه‌گیری به‌حساب می‌آیند [۱۰].

- دقت اندازه‌گیری

دقت، دومین مشخصه تعیین‌کننده زیرساخت اندازه‌گیری برای تخمین حالت است. در فرمول‌بندی حداقل مربعات وزن‌یافته (WLS)، اندازه‌گیری‌ها با وزنی مطابق با دقت آن‌ها در تخمین‌گر گنجانده می‌شوند. سایر فرمول‌بندی‌های مسئله تخمین حالت نیز مکانیسم مشابهی دارند. به‌این‌ترتیب، اندازه‌گیری‌هایی با دقت بالاتر تأثیر قوی‌تری نسبت به اندازه‌گیری‌هایی با دقت پایین‌تر، بر نتیجه دارند. تخمین‌گرهای حالت توزیع معمولا تجهیزات اندازه‌گیری پیشرفته‌تری نسبت به سیستم‌های انتقال دارند [۱۰].

- وضوح زمانی اندازه‌گیری

تخمین‌گرهای حالت توزیع معمولا از طیف گسترده‌ای از منابع اندازه‌گیری تشکیل شده‌اند. وضوح داده‌های رایج برای تجهیزات اندازه‌گیری توزیع در شکل ۱-۴ نشان داده‌شده است.



شکل 1-4 وضوح زمانی اندازه‌گیری توزیع

در صورت مواجهه با اندازه‌گیری‌هایی با وضوح زمانی متفاوت، دو گزینه زیر برای تخمین حالت زمان-واقعی وجود دارد.

- تخمین حالت با وضوح کمترین فرکانس اندازه‌گیری

[۱] Redundancy

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

- تخمین حالت با وضوح بالاتر از پایین‌ترین فرکانس اندازه‌گیری

۱. زیرساخت اندازه‌گیری پیشرفته (AMI)

یکی از بزرگ‌ترین ابتکارات فعلی برای نوسازی سیستم‌های توزیع، نصب اندازه‌گیری هوشمند در سطح مشتری است. این تجهیزات که به نام AMI شناخته می‌شوند، علاوه بر خودکار کردن فرآیند خواندن و صدور صورت‌حساب، داده‌هایی را فراهم می‌کنند که امکان پیشرفت‌های بیشتری در دقت و جزئیات پیش‌بینی‌ها را فراهم می‌کند. AMI همچنین می‌تواند در برخی عملیات مرکزی، مانند تخمین حالت، استفاده شود. AMI می‌تواند در تخمین حالت به یکی از دو روش زیر کمک برساند [۱۰].

- ادغام مستقیم با تخمین‌گر حالت به‌عنوان اندازه‌گیری
- امکان پیش‌بینی پیشرفته در سطح مشتری، ایجاد شبه‌اندازه‌گیری‌های دقیق

۲. اینورترها و DERهای هوشمند

رشد DERها یکی از عوامل برای نوسازی شبکه توزیع است؛ از جمله توسعه در مشاهده‌پذیری و تخمین حالت. DERها چالشی برای سیستم‌های سنتی، غیرفعال و یک‌طرفه سیستم‌های توزیع هستند، اما در عین حال فرصتی نیز ارائه می‌دهند. این منابع می‌توانند علاوه بر شرکت در بازار انرژی و تأمین ولتاژ، در نقطه اتصال خود به عنوان یک منبع اندازه‌گیری عمل کند [۱۰].

۳. واحدهای اندازه‌گیری فازور

PMU یک قطعه پیشرفته از تجهیزات اندازه‌گیری است که در حال حاضر در سیستم‌های انتقال گستردگی بیشتری نسبت به سیستم توزیع دارد. با این حال، دقت و وضوح زمانی آن، آن را پرهزینه‌تر از سایر کنتورها می‌کند و قرار دادن PMU در سراسر یک سیستم توزیع در آینده نزدیک غیرواقعی به نظر می‌رسد. PMUها بیشتر در سیستم‌های انتقال یافت می‌شوند، جایی که مشاهده‌پذیری شبکه برای عملیات و امنیت سیستم حیاتی‌تر بوده و باس‌های کمتری برای نظارت وجود دارد [۱۰].

۲۱۳۱ شبه‌اندازه‌گیری‌ها[۱]

شبه‌اندازه‌گیری‌ها داده‌هایی هستند که می‌توانند به مقادیر اندازه‌گیری قابل‌استفاده برای تخمین حالت تبدیل شوند. رایج‌ترین کاربرد شبه‌اندازه‌گیری‌ها در قالب پیش‌بینی بار در ترانسفورماتورهای توزیع

[۱] Pseudo-Measurements

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

یا اتصالات مشتری[۱] است. شبه‌اندازه‌گیری‌ها برای DSE[۲] نیز حیاتی هستند، زیرا این سیستم‌ها به ندرت تنها بر اساس اندازه‌گیری‌های واقعی قابل‌مشاهده بوده و به اطلاعات اضافی نیاز دارند [۱۰].

۳ ۱ ۳ ۱ مدل شبکه

تخمین‌گر حالت بر فرض یک مدل شبکه دقیق استوار است و محاسبات خود را بر آن اساس پایه‌ریزی می‌کند. از آنجا که «محتمل‌ترین حالت» بر اساس روابط فیزیکی بین شاخه‌ها و باس‌ها است، یک خطا در مدل منجر به خطا در روابط فیزیکی و درنتیجه تخمین حالت می‌شود. عدم دقت و ناقص بودن مدل شبکه یکی از نقاط ضعف در سیستم‌های توزیع است.

خوشبختانه، توانایی ذاتی یک تخمین‌گر حالت برای تجزیه یک سیستم به زیر شبکه‌ها اجازه می‌دهد تا کار به صورت جزئی انجام شود، یعنی اگر تنها بخشی از شبکه به‌طور دقیق مدل‌سازی شود، تخمین‌گر حالت می‌تواند فقط برای حل آن بخش برنامه‌ریزی شود و در این حالت اگر فقط چند ناحیه با ولتاژ بالا نیاز به نظارت دقیق داشته باشند، این رویه مفید است [۱۰].

۱. پارامترهای شبکه

پارامترهای شبکه، مشخصه‌های دائمی یک سیستم قدرت هستند که در عملکرد روزانه تغییر نمی‌کنند. مهم‌ترین پارامترهای شبکه عبارت‌اند از

- اتصال به شبکه
- پارامترهای خط (امپدانس خط، پیکربندی فاز و غیره)
- پارامترهای باس (مشتریان متصل، تجهیزات شبکه، عناصر شنت و غیره)
- پارامترهای تجهیزات (ترانسفورماتورها، کلیدها، عناصر حفاظتی و غیره) [۱۰]

۲. توپولوژی شبکه

علاوه بر مدل شبکه و پارامترهای خط، یک تخمین‌گر حالت به اطلاعات به‌روز در مورد پیکربندی توپولوژی نیاز دارد. توپولوژی شبکه عناصری از شبکه است که در طول عملکرد قابل تنظیم هستند و ممکن است شامل موارد زیر باشد [۱۰].

[۱] Customer Connections

[۲] Disturbution State Estimation

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

- موقعیت سوئیچ‌ها
- نسبت تپ ترانس‌ها
- وضعیت تجهیزات حفاظتی
- وضعیت عنصر راکتیو

۳. قالب و انعطاف‌پذیری مدل شبکه[۱]: مدل اطلاعات مشترک (CIM[۲])

روشی که در آن مدل شبکه ذخیره می‌شود می‌تواند بر اجرای DSE تأثیر بگذارد. این مسأله در درجه اول به دلیل سه چالش زیر است که اغلب نادیده گرفته می‌شوند.

- **عملیات مرکزی:** مدل شبکه برای بسیاری از سیستم‌های توزیع، از عملیات آنلاین تا تحلیل برنامه‌ریزی، مرکزی است. همه این برنامه‌ها به اطلاعات مدل و توپولوژی به‌روز نیاز دارند، البته نه لزوما در مقیاس‌های زمانی یکسان. یک مدل شبکه مرکزی باید اطلاعات مناسب را به هر برنامه ارائه دهد.

- **سازگاری:** به همین ترتیب، هر برنامه ممکن است در قالب داده یکسانی کار نکند. برخی برنامه‌ها مانند برنامه‌ریزی، خاموشی و عملیات آنلاین هرکدام ممکن است بر روی پلت‌فرم‌های نرم‌افزاری اختصاصی متفاوتی اجرا شوند که قالب‌ها و متغیرهای مدل شبکه متفاوتی را دارا هستند. علاوه بر این، هر رابط با نهادهای خارجی مانند اپراتور سیستم انتقال ممکن است به یک قالب داده خاص نیاز داشته باشد.

- **اطلاعات زمان-واقعی:** توپولوژی شبکه توزیع دائما در حال تغییر است و این باید در به‌روزرسانی‌های زمان-واقعی مدل شبکه منعکس شود. هر مدل مرکزی باید با اطلاعات توپولوژی که از مرکز کنترل یا یک پردازنده توپولوژی می‌آید سازگار باشد.

به دلیل این چالش‌ها، شرکت‌های برق اجرای DSE در زمان-واقعی را دشوار می‌دانند. مدرن کردن مدل شبکه برای تبدیل شدن به یک سیستم خودکار به‌روز و سازگار با همه برنامه‌های کاربردی شبکه و اتصالات خارجی، به‌خودی‌خود یک چالش پیاده‌سازی است. مدل‌های شبکه سنتی با به‌روزرسانی‌های توپولوژی همگام نیستند و به‌راحتی با برنامه‌های زمان-واقعی مانند تخمین‌گر حالت ارتباط برقرار نمی‌کنند.

---

[۱] Network Model Format and Flexibility

[۲] Common Information Model

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

شناخته‌شده‌ترین رویکرد برای پرداختن به مسئله ناسازگاری مدل شبکه، ایجاد مجموعه‌ای از استانداردها است که به عنوان مدل اطلاعات مشترک (CIM) نامیده می‌شوند. این استانداردها شامل IEC 61970 و IEC 61968 می‌باشند.

CIM یک روش استاندارد برای نمایش اطلاعات مدل شبکه است که در زبان مدل‌سازی یکپارچه[۱] (UML) که در آن روابط و ویژگی‌های اجزاء شبکه به عنوان ساختار تعریف می‌شوند، تجویز می‌شود. CIM فرمت داده مورد استفاده برای ذخیره این اطلاعات را تعریف نمی‌کند، اما در عوض یک زبان نشانه‌گذاری قابل توسعه استاندارد (XML[۲]) را تعریف می‌کند که در آن اطلاعات مدل شبکه را می‌توان با استفاده از چارچوب توصیف منابع (RDF[۳]) تبدیل کرد [۱۰].

- مدل شبکه سه فاز[۴]

در مقایسه با سیستم‌های انتقال، بسیاری از شبکه‌های توزیع با مقداری عدم تعادل کار می‌کنند. در واقع، برخی از سیستم‌های توزیع ممکن است به گونه‌ای طراحی شوند که دقیقا یک‌سوم توان تحویلی به هر مشتری را در هر فاز تقسیم کنند و تعادل ایجاد کنند. سیستم‌های دیگر ممکن است یک فاز را به هر مشتری تحویل دهند، این عمل می‌تواند عدم تعادل را در سه فاز ایجاد کند.

بسته به میزان عدم تعادل در سیستم، حفظ یک مدل شبکه سه فاز ممکن است ضروری باشد. از آن‌جایی‌که سیستم‌های توزیع بسیار بیشتر از انتقال در معرض عدم تعادل هستند، این مشکل مختص DSE است [۱۰].

۱-۳-۲- لایه عملکرد

لایه عملکرد شامل عملکرد اصلی یک تخمین‌گر حالت است که در آن داده‌های ورودی برای تعیین محتمل‌ترین حالت سیستم قدرت پردازش می‌شوند. اجزاء اصلی لایه عملکرد شامل تحلیل مشاهده‌پذیری و خود الگوریتم تخمین حالت است [۱۰].

۱ ۲ ۳ ۱ تحلیل مشاهده‌پذیری

هدف از تجزیه و تحلیل مشاهده‌پذیری تعیین این است که آیا داده‌های ارائه‌شده به سیستم برای تعیین حالت الکتریکی شبکه قدرت کافی است یا خیر. این تعریف از مشاهده‌پذیری بسیار شبیه به

[۱] Unified Modeling Language

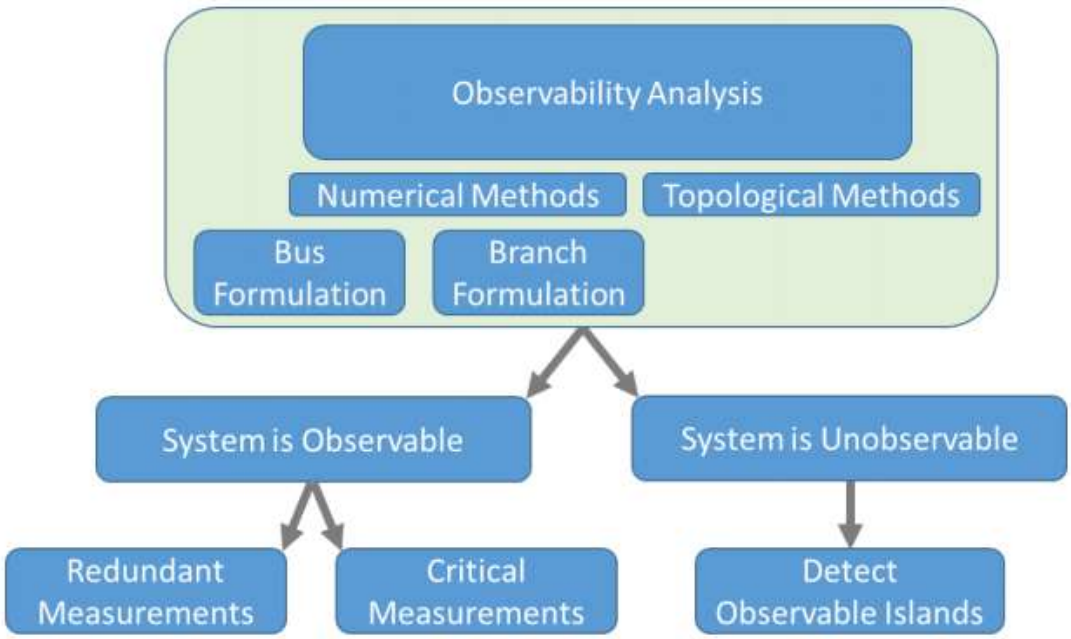
[۲] Extensible Markup Language

[۳] Resource Description Framework

[۴] Three-Phase Network Model

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

تعریف موجود در نظریه کنترل است که تعیین می‌کند آیا حالت داخلی یک سیستم را می‌توان از خروجی‌های آن تعیین کرد. این تحلیل برای تخمین‌گر یک فرآیند حیاتی است؛ زیرا بدون مشاهده‌پذیری، تخمین حالت ممکن نیست. به‌عنوان یک قاعده کلی، باید تقریبا دو مقدار اندازه‌گیری‌شده در سیستم برای هر باس قابل‌مشاهده وجود داشته باشد. این عدد بر اساس ماهیت معماری شبکه تغییر می‌کند. شکل ۱-۵ یک نمای کلی از ساختار و اصطلاحات مرتبط با تجزیه و تحلیل مشاهده‌پذیری را ارائه می‌دهد [۱۰]. این شکل فرآیند تحلیل مشاهده‌پذیری را نشان می‌دهد که شامل روش‌های مختلف است.



شکل 1-5 مروری بر تحلیل مشاهده‌پذیری

۱ ۳ ۲ ۲ تخمین‌گر حالت

تخمین‌گر حالت قسمت اصلی محاسبات است که از ورودی‌های لایه داده علاوه بر خروجی‌های تحلیل مشاهده‌پذیری برای ایجاد محتمل‌ترین حالت عملیاتی سیستم قدرت استفاده می‌کند. در ابتدایی‌ترین حالت، هدف تخمین حالت به حداقل رساندن تفاوت بین اندازه‌گیری‌ها و حالت الکتریکی تخمینی است. هر مقدار اندازه‌گیری داده‌شده z به‌عنوان تابعی از حالت اصلی واقعی x و مقداری خطای ناشناخته (معمولا گاوسی) e در نظر گرفته می‌شود.

$$z = h(x) + e \qquad (۲-۱)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

هدف حل محتمل‌ترین حالت الکتریکی x با به حداقل رساندن خطا e است [۱۰].

۱-۳-۳- لایه کاربرد

لایه کاربرد، توابع مفید از شبکه قدرت را پوشش می‌دهد که مستقیما توسط تخمین حالت فعال می‌شوند. درحالی‌که تخمین حالت واقعا برای تمام توابع شبکه با بهبود دقت تجسم شبکه مفید است، یکپارچه‌ترین برنامه‌های کاربردی تخمین حالت در این بخش توضیح داده‌شده‌اند: تشخیص و شناسایی داده‌های نادرست و توپولوژی و تخمین پارامتر [۱۰].

۱ ۳ ۳ ۱ تشخیص و شناسایی داده‌های نادرست

تشخیص و شناسایی داده‌های نادرست یکی از رایج‌ترین برنامه‌هایی است که مستقیما از خروجی یک تخمین‌گر حالت استفاده می‌کند. این فرآیندی است که با آن خروجی تخمین‌گر حالت قادر به تشخیص اندازه‌گیری اشتباه است. پس از شناسایی داده‌های نادرست، منبع داده‌های نادرست نیز باید پیدا شود. ساده‌ترین روش این است که دوباره تخمین حالت اجرا شود تا تشخیص داده شود آیا مشکل داده‌های نادرست حل‌شده است یا نه. اگر چندین اندازه‌گیری خطای همبستگی داشته باشد، ممکن است این رویکرد نادرست باشد. یکی دیگر از رویکردهای قوی‌تر برای شناسایی داده‌های نادرست، آزمایش فرضیه[۱] است [۱۰].

۱ ۳ ۳ ۲ تخمین مدل شبکه

در قسمت قبل تأثیر عدم دقت در مدل شبکه (به‌طور خاص، پارامترها و توپولوژی) مورد بحث قرار گرفت. دقت در این نقاط داده برای حفظ یک تخمین‌گر حالت همگرا و مفید ضروری است. با این حال، یک تخمین‌گر حالت با اندازه‌گیری‌های افزونه، توانایی تخمین و تصحیح حالت‌های مشکوک مدل شبکه را دارد. تخمین مدل شبکه می‌تواند به دو روش انجام شود. گزینه اول مشابه روشی است که داده‌های نادرست شناسایی می‌شوند. گزینه دوم ترکیب این نقاط داده در بردار حالت است که به موازات حالت الکتریکی تخمین زده می‌شوند [۱۰].

۱. تخمین خطای پارامتر شبکه

خطاهای پارامتر شبکه را می‌توان به عنوان خطاهای آنالوگ مشاهده کرد؛ بدین صورت که مقدار امپدانس خطوط یا تجهیزات در برخی ظرفیت‌ها نادرست است و باید دوباره تنظیم شوند. خطاهای پارامتر اغلب در تخمین حالت به عنوان یک سری خطاهای اندازه‌گیری مرتبط ظاهر می‌شوند [۱۰].

[۱] Hypothesis Testing

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

۲. برآورد خطای توپولوژی شبکه

خطاهای توپولوژی شبکه خطاهای گسسته‌ای هستند؛ بدین صورت که متغیرهای شبکه (که اعداد صحیح هستند) دارای مقدار نادرستی می‌باشند. معمولا خطای توپولوژی شبکه به معنای موقعیت نادرست سوئیچ‌ها و نسبت نادرست تپ ترانس‌ها است [۱۰].

۳. تخمین حالت تعمیم‌یافته

تخمین‌گرهای حالت سیستم قدرت که علاوه بر مرحله تخمین قدرت شامل انواع روش‌های اصلاح داده (مانند حذف داده‌های بد، اصلاح خطاهای پارامتری، اصلاح مدل و توپولوژی شبکه و حتی جایابی تجهیزات اندازه‌گیری و PMUها) می‌باشند، اغلب به عنوان تخمین‌گر حالت تعمیم‌یافته[۱] یا پیشرفته[۲] نامیده می‌شوند [۱۰].

۱ ۳ ۳ ۳ سایر برنامه‌ها

مزیت اصلی تخمین حالت، سطح بهبودیافته اطمینان در داده‌های سیستم است. اکثر کاربردهای بالقوه از این فرض ناشی می‌شوند که تخمین‌گر حالت تصویری در زمان-واقعی از حالت الکتریکی شبکه ارائه می‌دهد. در حالی که برخی از این کاربردها ممکن است بدون استفاده از تخمین حالت ممکن باشند، چندین مورد وجود دارد که برای آن‌ها، سطح اطمینان بالایی در بخش بزرگی یا کل سیستم مورد نیاز می‌باشد؛ سطح اطمینانی که توسط تخمین‌گر حالت قابل تأمین می‌باشد. نمونه‌ای از کاربردهایی که تخمین‌گر حالت برای آن ضروری است، ایجاد یک بازار برق محلی[۳] و قیمت‌گذاری حاشیه‌ای-محلی (LMP[۴]) است. LMPها هزینه زمان-واقعی انرژی را برای افزایش تدریجی تقاضا در یک مکان معین نشان می‌دهند. برای تعیین این قیمت‌ها، باید تخمین دقیقی از متغیرهای حالت سیستم و ارتباط متغیرهای حالت با محدودیت‌هایی مانند جریان و ولتاژ وجود داشته باشد. به عنوان مثال، اگر یک انشعاب خاص به حد مجاز خود برای جریان نزدیک شود، LMPها به گونه‌ای محاسبه می‌شوند که مشوق تغییرات تقاضا/تولید برای کاهش جریان باشند. بنابراین اهمیت داشتن یک تخمین حالت دقیق آشکار می‌گردد [۱۰].

---

[۱] Generalized

[۲] Enhanced

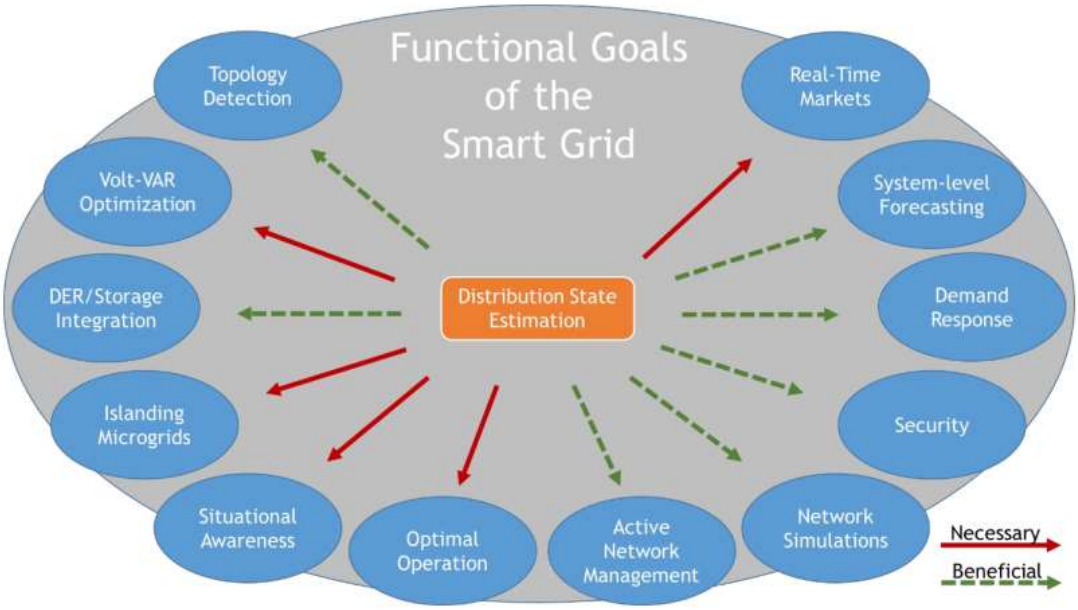
[۳] Locational Power Market

[۴] Locational-Marginal Prices

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

۱-۴- موارد استفاده از تخمین‌گر حالت

تخمین‌گر حالت به عنوان یک تابع فعال در نظر گرفته می‌شود. این تابع تصویر بهتری از شبکه را ارائه می‌دهد که اپراتورها می‌توانند بر اساس آن تصمیم بگیرند. درحالی‌که برخی از توابع برای فعال کردن قابلیت کامل به تخمین‌گر حالت نیاز دارند، مهم‌ترین کاربرد تخمین حالت ارائه داده‌های سیستم گسترده‌تر با اطمینان بهبودیافته است، که به نفع سایر توابع شبکه می‌باشد [۱۰]. شکل ۱-۶ نشان می‌دهد که چگونه تخمین حالت اجزاء اصلی چیزی که به‌عنوان «شبکه هوشمند» شناخته می‌شود را تغذیه می‌کند.



شکل 1-6 زمینه استفاده از تخمین حالت در سیستم توزیع مدرن

به طور خلاصه می‌توان موارد استفاده از تخمین‌گر حالت را در جدول زیر مشاهده کرد.

جدول 1-1 دسته‌بندی موارد استفاده از DSE

دسته‌بندی استفاده	خلاصه‌ای از موارد استفاده
تمیز کردن داده[۱]	تخمین حالت واقعی تشخیص داده‌های نادرست

[۱] Data Cleansing

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

	تصفیه داده‌های قدیمی
مشاهده‌پذیری	تعیین مکان اندازه‌گیری روش‌های پیش‌بینی بهبودیافته استنتاج‌های اندازه‌گیری[۱] استنتاج‌های صورتحساب[۲]
بهینه‌سازی	بهینه‌سازی ولت-وار جریان برق بهینه برنامه‌ریزی *DER*
شبکه و توپولوژی	کالیبراسیون شبکه تشخیص توپولوژی
قابلیت اطمینان سیستم: اقدامات پیشگیرانه	مطالعات پیشامد[۳] تغییرات توپولوژی شبکه سلامت سیستم
قابلیت اطمینان سیستم: اقدامات اصلاحی	محل خطا تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط
قیمت دینامیک انرژی	قیمت‌های حاشیه‌ای-مکانی (*LMP*) پیش‌بینی قیمت انرژی انرژی تعاملی[۴]
سیستم توزیع	مجموعه داده‌های معتبر برای عملیات گسترش شبکه اندازه‌گیری شبیه‌سازی و پیش‌بینی شبکه عیب‌یابی شبکه پاسخ به تقاضا
عملیات پیشرفته سیستم	بهینه‌سازی در سطح سیستم

[۱] Measurement Inferences

[۲] Billing Inferences

[۳] Contingency Studies

[۴] Transactive Energy

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

توزیع	عملیات انتقال-توزیع ترکیبی[۱] مدیریت شبکه اکتیو در سطح سیستم ریزشبکه‌های جزیره‌ای[۲]

۱-۵- وضعیت کیفیت توان

تخمین حالت فرض می‌کند که سیستم قدرت در وضعیت پایدار (به‌طور معادل حالت شبه‌استاتیک) بوده و تمام شکل موج‌های جریان و ولتاژ کاملا سینوسی با دامنه و فرکانس ثابت هستند. به همین دلیل، ردیابی بار-جریان هارمونیک یا رفتار گذرای مقادیر سیستم (مانند ولتاژ و جریان) در داخل شبکه امکان‌پذیر نیست.

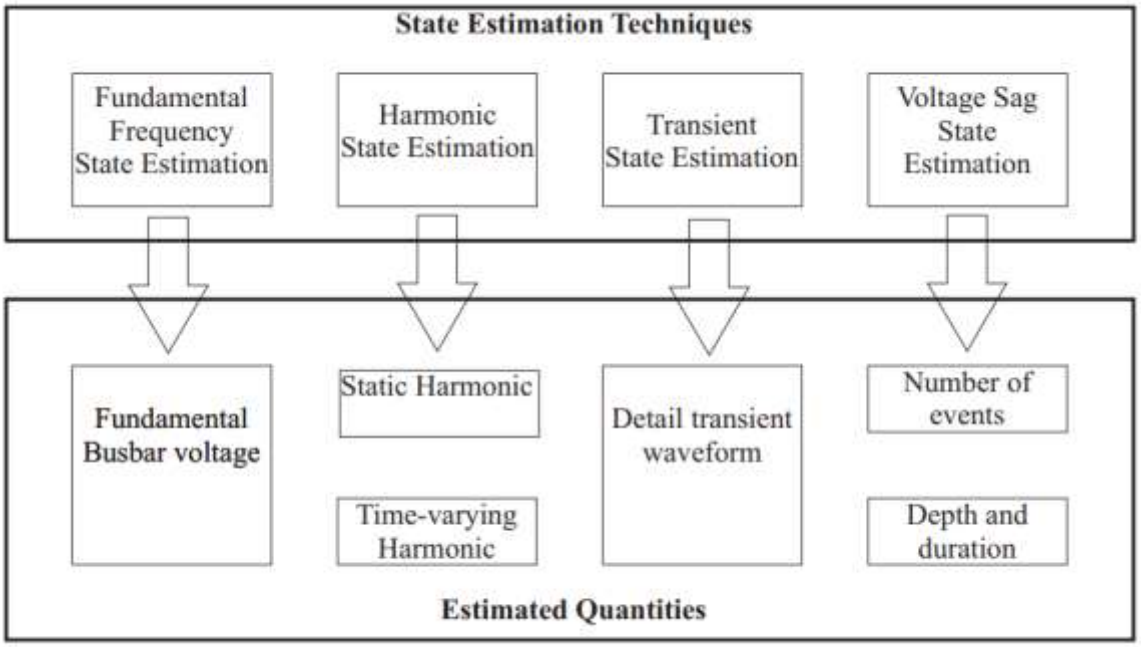
اخیرا اهمیت مسائل کیفیت توان باعث شده است که تحقیقات بر روی گسترش مفهوم تکنیک‌های تخمین حالت به موضوعات کیفیت توان متمرکز شود. این حوزه تحقیقاتی تخمین حالت کیفیت توان (PQSE)[۳] نامیده می‌شود. شکل ۱-۷ یک نمای کلی از PQSE را بر اساس مقادیر تخمینی و تکنیک‌های تخمین حالت که در قسمت‌های قبلی بررسی‌شده است، نشان می‌دهد. درواقع، انواع مختلف PQSE از تکنیک‌های تخمین حالت برای مشکلات کیفیت توان استفاده می‌کنند [۱۱].

[۱] Combined Transmission-Distribution Operation

[۲] Islanded Microgrid

[۳] Power Quality State Estimation

DOI: 10.30503/nripress.2020.207



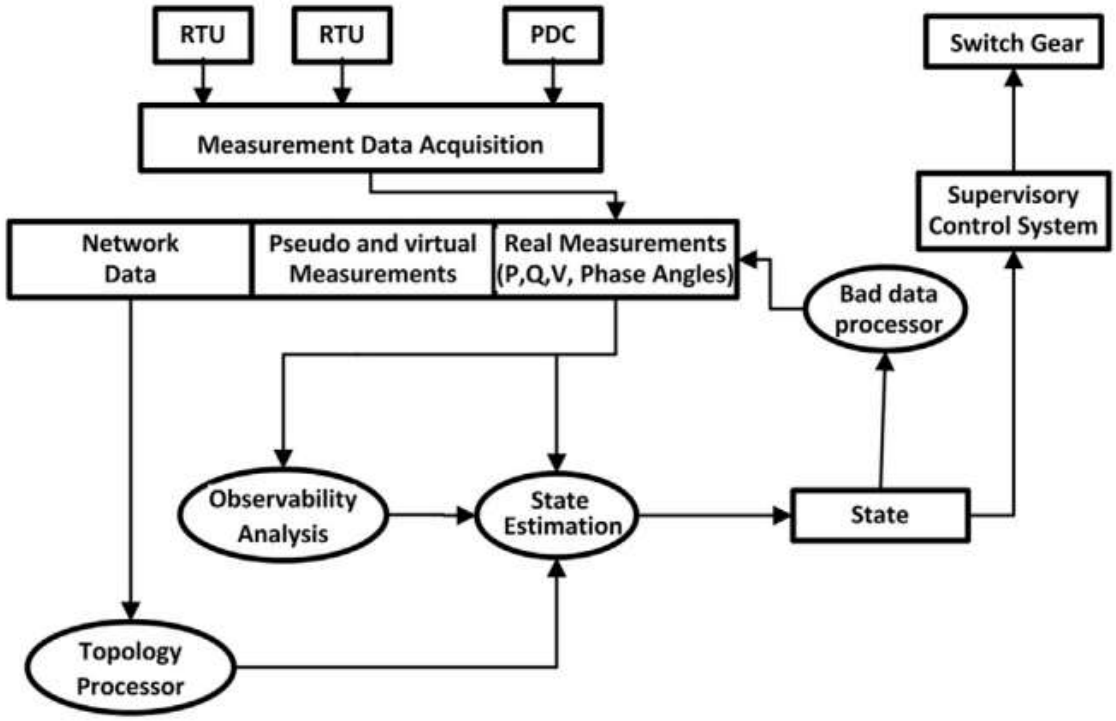
شکل 1-7 انواع مختلف PQSE

۱-۶- مراحل و پروسه تخمین‌گر حالت به صورت دقیق

همان‌طور که گفته شد، تخمین‌گر حالت، بردار حالت سیستم را با استفاده از اندازه‌گیری‌های SCADA، اندازه‌گیری‌های PMU، شبه‌اندازه‌گیری‌ها و اطلاعات توپولوژی به دست می‌آورد. این اندازه‌گیری‌ها، همراه با اندازه‌گیری‌های دیگر (شبه‌اندازه‌گیری‌ها و اندازه‌گیری‌های مجازی) و اطلاعات

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

حاصل از تحلیل مشاهده‌پذیری و توپولوژی، برای تخمین حالت سیستم استفاده می‌شوند. این حالت توسط سیستم کنترل نظارتی همان‌طور که در شکل زیر نشان داده‌شده است استفاده می‌شود [۱۲].



شکل 1-8 مراحل دقیق ماژول تخمین‌گر حالت

۱-۷- جمع‌بندی

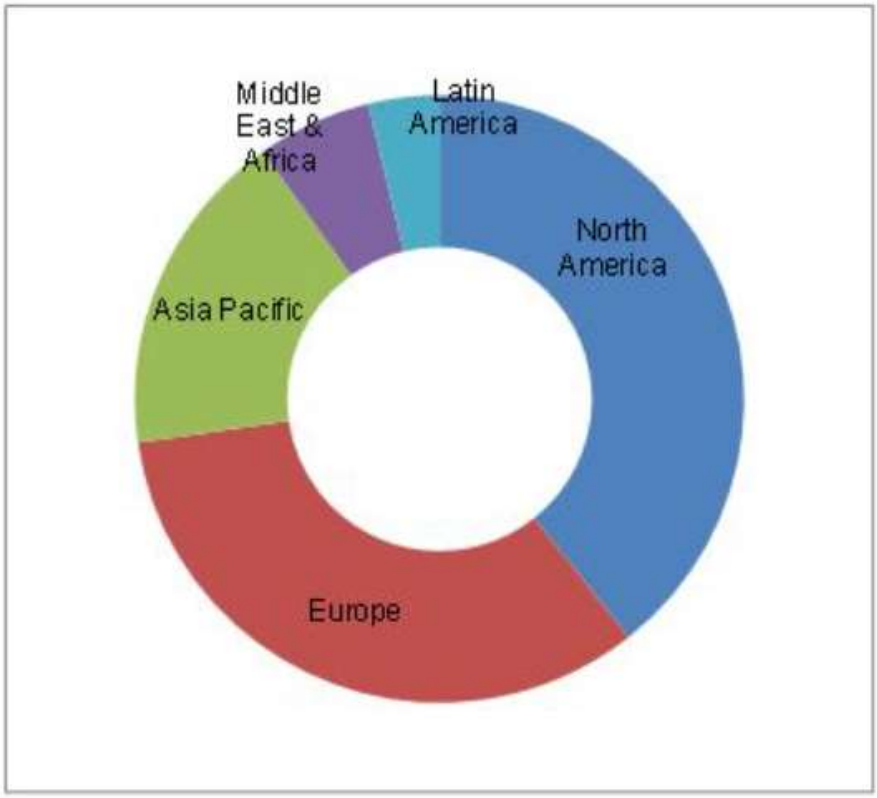
در این فصل، ابتدا سعی شد تا به مفاهیم اولیه ماژول تخمین‌گر حالت، ضرورت وجود آن در سیستم قدرت و دسته‌بندی آن پرداخته شود. همچنین در ادامه اجزاء و لایه‌های ماژول تخمین‌گر حالت در سه لایه داده، عملکرد و کاربرد مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، در این فصل سعی شد تا ارتباط بین ماژول تخمین‌گر حالت و دیگر ماژول‌ها نیز بررسی شود. موارد استفاده از تخمین‌گر حالت در سیستم قدرت، وضعیت کیفیت توان و مراحل و پروسه تخمین‌گر حالت سیستم قدرت نیز در این فصل مورد بررسی قرار گرفت.

فصل دوم: مطالعه و بررسی نرم‌افزارها

۲-۱- مقدمه

در این فصل، به شناسایی برخی از مهم‌ترین نرم‌افزارهای ارائه‌شده در دنیا پرداخته خواهد شد که دارای ماژول تخمین حالت قابل عرضه می‌باشند. سپس به طبقه‌بندی نرم‌افزارها در این حوزه و بررسی راه‌حل‌های نرم‌افزاری موجود برای تخمین‌گر حالت پرداخته خواهد شد. سپس مطالعه و بررسی برخی از مهم‌ترین نرم‌افزارهای شناسایی‌شده که دارای ماژول تخمین حالت قابل عرضه می‌باشند، انجام خواهد شد.

چنان‌چه گفته شد، با توجه به اهمیت مسأله تخمین حالت در تحلیل، نظارت و کنترل سیستم‌های قدرت، شرکت‌های مختلفی در دنیا به طراحی و عرضه ماژول‌های تخمین حالت پرداخته‌اند. همان‌طور که در شکل ۲-۱ قابل مشاهده است، بیشترین سهم در بازار تخمین‌گر حالت متعلق به آمریکای شمالی و اروپا است. شرکت‌هایی مانند SIEMENS، ABB، OSI و DIgSILENT از بزرگ‌ترین تولیدکننده‌ها در این حوزه هستند [۱۳].



شکل 2-1 شرکت‌های تخمین‌گر حالت بر اساس منطقه جغرافیایی

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

جدول۲ -۱، به معرفی برخی از مهم‌ترین شرکت‌های عرضه‌کننده نرم‌افزارهای دارای ماژول تخمین حالت می‌پردازد.

جدول ۲-۱ شرکت‌های عرضه‌کننده نرم‌افزارهای کاربردی دارای ماژول تخمین حالت

Company	*Country*
General Electric Company	*U.S.*
Open System International, Inc.	*U.S.*
Powerworld Corporation	*U.S.*
ETAP/Operation Technology, Inc.	*U.S.*
SKM Systems Analysis Inc.	*U.S.*
Nexant	*U.S.*
Electrocon International, Inc.	*U.S.*
Resource Innovations, Inc.	*Canada*
CYME International T&D Inc.	*Canada*
DIgSILENT GmbH	*Germany*
Siemens AG	*Germany*
NEPLAN AG	*Switzerland*
ABB Ltd.	*Switzerland*
EPFL	*Switzerland*
Alstom	*France*
GDF SUEZ S.A.	*France*
Energy Computer Systems Ltda.	*Colombia*
Inspired Interface	*South Africa*
Kepco	*South Korea*
Powertech	*China*

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

۲-۲- طبقه‌بندی نرم‌افزارها در این حوزه

برنامه‌های شبیه‌سازی برای تجزیه و تحلیل پایداری سیستم قدرت را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد؛ بسته‌های نرم‌افزاری تجاری و بسته‌های نرم‌افزاری باهدف آموزش/تحقیق. بسته‌های نرم‌افزاری تجاری مختلفی مانند PSS/E، SIMPOW، DIgSILENT، EUROSTAG، NEPLAN و PowerWorld در این زمینه به فروش می‌رسد. این برنامه‌ها به کاربران اجازه می‌دهند تا به اجزاء/سیستم جامع، مدل‌ها و الگوریتم‌های محاسباتی کارآمد برای تحلیل دسترسی داشته باشند. با این وجود، این برنامه‌ها برای زمینه‌های آموزشی و پژوهشی مناسب نیستند؛ زیرا معمولاً امکان اصلاح یا ادغام مدل‌ها را ارائه نمی‌دهند. در زمینه‌های آموزشی و تحقیقاتی، انعطاف‌پذیری یک بسته نرم‌افزاری جنبه بسیار مهم‌تری از کارایی محاسباتی آن است [۱۴].

۲-۳- راه‌حل‌های نرم‌افزاری موجود برای تخمین‌گر حالت

در حال حاضر، چندین راه‌حل نرم‌افزاری برای انجام تخمین حالت در سیستم‌های توزیع وجود دارد. این راه‌حل‌های تجاری به صورت ماژول افزودنی به نرم‌افزارهای برنامه‌ریزی، تجزیه و تحلیل و عملیات توزیع موجود بوده و برای اجرای الگوریتم‌های تخمین حالت در شبکه‌های توزیع طراحی شده‌اند. شرح مختصری از برخی از مرتبط‌ترین راه‌حل‌های تجاری موجود در این بخش ارائه شده است. نرم‌افزار تخمین حالت می‌تواند راهی ساده برای پردازش داده‌های سیستم توزیع باشد. این نرم‌افزارها به‌منظور رساندن تخمین حالت سطح انتقال به سطح توزیع طراحی شده‌اند.

این نرم‌افزارها ممکن است به‌عنوان یک هاب عمل کنند؛ اما باید با یک زیرساخت اندازه‌گیری قوی، سیستم ارتباطی و اطلاعات مدل شبکه به‌روز پشتیبانی شوند. علاوه بر این، نرم‌افزار باید تحت نظارت باشد تا مسائلی مانند کالیبراسیون اندازه‌گیری و عدم همگرایی را بتوان بدون آسیب رساندن به عملیات مورد بررسی قرار داد. همچنین تشخیص داده‌های بد باید نظارت شود تا تشخیص و اصلاحات صحیح اعمال شده و اندازه‌گیری‌های خوب به اشتباه حذف نشوند. «موتور تخمین حالت» محاسبات مرکزی را بر اساس داده‌های موجود انجام می‌دهد. ملاحظاتی مانند زیرساخت اندازه‌گیری، ارتباطات، مدل شبکه و سازگاری اطلاعات نیز به همان اندازه موتور تخمین حالت مهم هستند [۱۴].

۲-۳-۱- نرم‌افزارهای برنامه‌ریزی و تحلیل

CYME یک نرم‌افزار برنامه‌ریزی و تحلیل است که متعلق به شرکت Eaton است. این نرم‌افزار در میان ابزارهای توزیع، به‌ویژه برای میزبانی مدل‌های شبکه GIS و اجرای تحلیل جریان بار تحت سناریوهای

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

مختلف برای اهداف برنامه‌ریزی و توسعه، در میان بسیاری از عملکردهای دیگر، بسیار رایج است. CYME دارای یک ماژول اختیاری می‌باشد که برای تخمین حالت توزیع با هدف پاک‌سازی مجموعه داده‌ها و دستیابی به پروفایل شبکه دقیق‌تر به منظور پشتیبانی از سایر توابع تجزیه و تحلیل به کار می‌رود. نرم‌افزار CYME معمولا یک ابزار تحلیل توان آفلاین است و می‌توان از آن برای مطالعه دوره‌های تاریخی[۱] (به‌عنوان‌مثال، تخمین روز بعد) و ترکیب اندازه‌گیری‌های AMI استفاده کرد. این ابزار می‌تواند برای تشخیص خطاهای پارامتری و خطای مدل شبکه استفاده شده و تعدادی شاخص کیفیت را ارزیابی کند [۱۴].

Grid360 توسط شرکت Nexant نیز ابزار تحلیل دیگری است که می‌تواند هم برای برنامه‌ریزی و تحلیل آفلاین و هم برای عملیات درون حلقه استفاده شود. مجموعه ابزار مبتنی بر وب شامل ویژگی‌های پخش سناریو، جریان بار و سایر ابزارهای مفید است. ابزار تخمین حالت توزیع، گزینه‌های سفارشی‌سازی و تجسم GIS را امکان‌پذیر می‌سازد. این نرم‌افزار همچنین دارای تخمین توپولوژی است تا وضعیت سوئیچ نادرست شناسایی و تصحیح شود. Grid360 از پروتکل‌های CIM برای برقراری ارتباط مدل شبکه و داده‌های اندازه‌گیری استفاده کرده و بنابراین می‌تواند در سیستم‌هایی برای میزبانی مدل شبکه آنلاین ادغام شود. از نتیجه تخمین حالت می‌توان برای بهبود دقت سایر ابزارهای تحلیل استفاده کرد [۱۴].

۲-۳-۲- نرم‌افزارهای سیستم‌های مدیریت توزیع

درحالی‌که ابزارهای برنامه‌ریزی و تجزیه و تحلیل فوق می‌توانند با عملیات مرکز کنترل برای بازخورد زمان-واقعی ادغام شوند، یک سیستم DMS می‌تواند به‌عنوان یک پلت‌فرم کنترل و عملیات درون حلقه‌ای جامع‌تر استفاده شده و همچنین می‌تواند تخمین حالت را نیز ارائه دهد. بسیاری از شرکت‌هایی که پلت‌فرم‌های DMS و ADMS ارائه می‌دهند (مانند ABB، GE، Schneider و SIEMENS)، تخمین‌گرهای حالت را به‌عنوان یکی از بلوک‌های سازنده سیستم‌های خود تبلیغ می‌کنند.

پلت‌فرم‌های DMS با سیستم‌های کاربردی SCADA و عملیات کنترل و مدل‌های شبکه میزبان یکپارچه شده‌اند. این باعث می‌شود که آن‌ها برای تخمین حالت و پردازش اطلاعات اندازه‌گیری موجود ایده‌آل باشند.

در سیستم یکپارچه ایده‌آل ارائه‌شده توسط ارائه‌دهندگان DMS، تخمین‌گر حالت اولین گام در عملیات است که اندازه‌گیری‌های SCADA، AMI و سایر داده‌های اندازه‌گیری را دریافت کرده و

[۱] Historical Periods

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

محتمل‌ترین حالت سیستم را محاسبه می‌کند؛ در نتیجه بقیه توابع DMS می‌توانند توابع بهینه‌سازی زمان-واقعی را اجرا کنند.

شرکت SIEMENS یک حق اختراع برای تخمین‌گر خود ثبت کرده است که تخمین بار و شبه‌اندازه‌گیری‌ها و غربالگری انواع خاصی از داده‌های بد و گنجاندن نتیجه در DSE را پوشش می‌دهد.

شرکت ABB نیز یک حق اختراع برای تخمین‌گر حالت دوسطحی خود به دست آورده است. نرم‌افزار این شرکت مختص سیستم‌های توزیع نیست و می‌تواند برای یک سیستم کنترل هماهنگ انتقال-توزیع اعمال شود [۱۰].

۲-۴- نرم‌افزار شرکت ABB

۲-۴-۱- رویکرد

تخمین‌گر حالت عرضه شده توسط ABB با نام SPIDER™ از یک رویکرد دو مرحله‌ای استفاده می‌کند. بدین صورت که ابتدا متغیرهای حالت سیستم مشاهده‌پذیر و سپس سیستم خارجی[۱] یا مشاهده‌ناپذیر را تخمین می‌زند. تخمین متغیرهای حالت سیستم خارجی با اضافه کردن شبه‌اندازه‌گیری‌های[۲] توان تزریقی به باس‌های سیستم خارجی محاسبه انجام می‌شود. از خروجی ماژول تخمین حالت این نرم‌افزار می‌توان برای تابع تحلیل امنیت[۳] و تابع حساسیت شبکه[۴] جهت محاسبه ضرایب حساسیت تلفات انتقال[۵] زمان-واقعی و دیگر توابع تحلیل شبکه مانند پخش بار بهینه، دیسپاچینگ امنیت[۶] و برنامه‌ریزی ولتاژ[۷] استفاده کرد [۱۵].

---

۱ External

۲ Pseudo-Measurements

۳ Security Analysis Function

۴ Network Sensitivity Function

۵ Transmission Loss Sensitivity Factors

۶ Security Dispatch

۷ Voltage Scheduling

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

۲-۴-۲- اجزاء

تخمین‌گر حالت ABB شامل چهار جز اصلی زیر است [۱۵].

- **بازیابی آنالوگ و وضعیت**[۱]: داده‌های مختلف سیستم را که مورد نیاز مدل‌ساز شبکه و تخمین‌گر حالت می‌باشند جمع‌آوری و هماهنگ می‌کند. داده‌هایی مانند اندازه‌گیری‌های زمان-واقعی، زمان‌بندی‌های بار و تولید، ویژگی‌های واحد تولید و مجموعه محدودیت‌های فعلی سیستم.
- **مدل‌ساز شبکه**[۲]: توپولوژی فعلی (مدل باس) را تعیین می‌کند. بدین صورت که با استفاده از الگوریتم‌های گراف کارآمد، توصیف گره-بریکر-شاخه[۳] را به توصیف باس-شاخه[۴] شبکه تبدیل می‌کند.
- **تخمین‌گر حالت**[۵]: تخمین حداقل مربعات وزن‌یافته (WLS) را انجام می‌دهد.
- **به روز رسانی پارامترهای شبکه**[۶]: با استفاده از مقادیر تخمینی پارامترهای مشاهده‌پذیر شبکه به محاسبه مقادیر جدید برخی پارامترهای شبکه مانند ضرایب توزیع گروه بارها[۷]، ضرایب توزیع واحدهای تولید[۸]، ولتاژهای تنظیم‌شده باس‌ها[۹]، موقعیت تپ ترانسفورماتور و وضعیت مدارشکن‌ها می‌پردازد.

---

۱ Status and Analogue Retrieval

۲ Network Model Builder

۳ Node-Breaker-Branch

۴ Bus-Branch

۵ State Estimator

۶ Network Parameter Update

Factors ۷ Load Group Distribution

۸ Unit Distribution Factors

۹ Regulated Bus Voltages

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

۲-۴-۳- قابلیت‌ها

تخمین‌گر حالت ABB دید منسجم‌تری از وضعیت شبکه قدرت ارائه کرده و قابلیت‌های زیر را دارد [۱۵]:

- تشخیص اندازه‌گیری‌های بد
- محاسبه بایاس در اندازه‌گیری‌ها
- برآورد انحراف معیار اندازه‌گیری‌های آنالوگ
- تشخیص اضافه بار شاخه‌ها، نقض محدودیت واحدهای تولید[۱] و ولتاژهای خارج از محدوده
- به روز رسانی پارامترهای تطبیقی با استفاده از نتایج تخمین حالت زمان-واقعی برای استفاده توسط تابع پخش بار بهینه و یا تخمین حالت قسمت‌های موقتا مشاهده‌ناپذیر شبکه

۲-۴-۴- نرم‌افزار ABB Network Manager از شرکت ABB

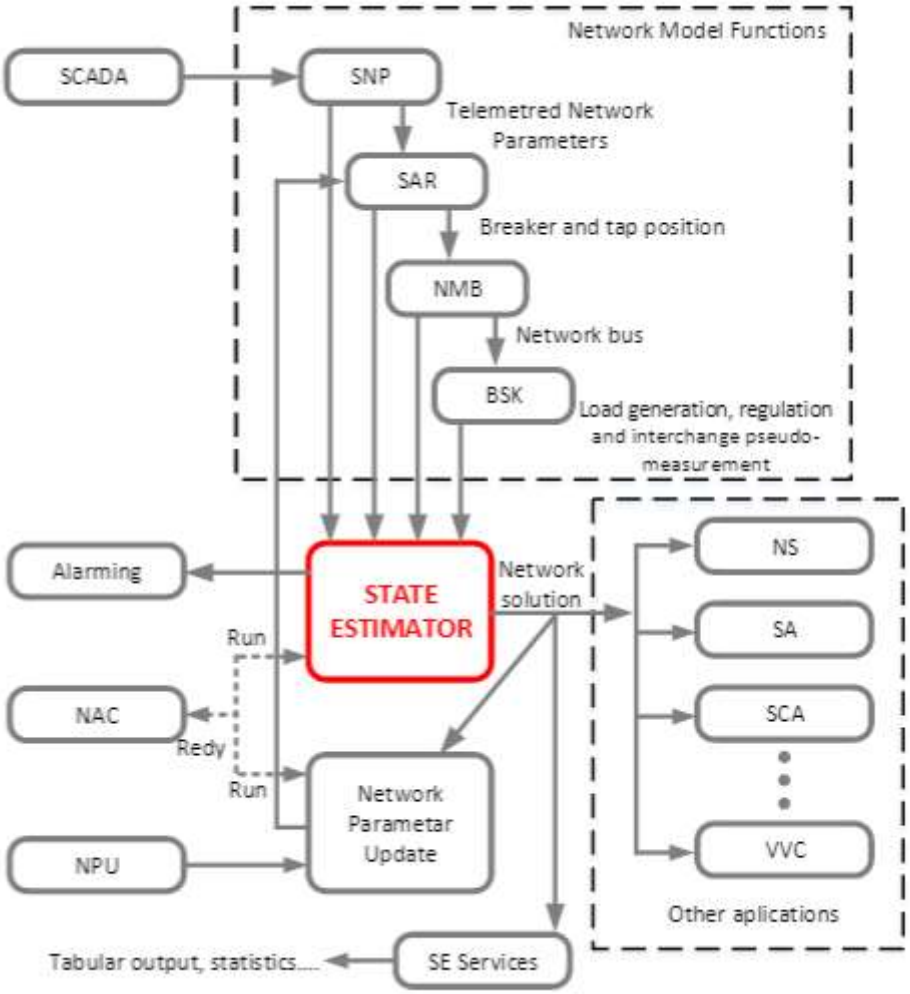
محاسبه زمان-واقعی در یک سیستم مدیریت انرژی (EMS) به عهده تابع تخمین حالت است. تمام برنامه‌های کاربردی دیگر در EMS از بردار حالت تخمین به عنوان ورودی برای الگوریتم‌های خود استفاده می‌کنند. کنترل خودکار ولتاژ و توان راکتیو یکی از برنامه‌های پیشرفته شبکه زمان-واقعی است که از ورودی نتایج تخمین‌گر حالت برای محاسبه ولتاژ و نقطه تنظیم راکتیو استفاده می‌کند [۱۶].

۲-۴-۵- تخمین‌گر حالت به‌عنوان بخشی از سیستم اسکادا

تابع تخمین حالت مسئول تعیین حالت واقعی شبکه برق بر اساس مدل شبکه فعلی، اندازه‌گیری‌های موجود و توپولوژی شبکه است. این یک برآورد زمان-واقعی از وضعیت پایدار کل شبکه سیستم قدرت را ارائه می‌دهد. در شکل زیر یک نمودار کلی از توابع تخمین حالت در سیستم ABB Network Manager SCADA نشان داده‌شده است [۱۶].

[۱] Unit Limit Violations

DOI: 10.30503/nripress.2020.207



شکل 2-2 نمودار اجمالی برنامه‌های تخمین حالت در سیستم ABBNetwork Manager SCADA

مطابق این شکل، فرآیند تخمین حالت شامل چندین تابع است که قبل از فرآیند تخمین حالت اجرا می‌شوند. توابع مدل شبکه، مدل شبکه را ساخته و داده‌های اندازه‌گیری و توپولوژی را از سیستم SCADA به دست می‌آورند. این توابع عملکردهای SNP (Telemetry Snapshot) و SAR (Status and Analog Retrieval) هستند که اندازه‌گیری زمان-واقعی و موقعیت‌های بریکر و سوئیچ را از سیستم SCADA دریافت می‌کنند. این توابع توسط تابع NMB (Network Model Builder) دنبال می‌شوند که مدل توپولوژیکی شبکه را بر اساس داده‌های تله‌متری و داده‌های ایستای شبکه ایجاد می‌کند. درنهایت تابع BSK (Bus Scheduler) اجرا می‌شود که تمام شبه‌اندازه‌گیری‌ها را برای تمام نقاط اندازه‌گیری به دست می‌آورد. با اجرای صحیح همه این توابع، محاسبه تخمین حالت SE فعال می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

برخی از توابعی که از الگوریتم SE بهره می‌برند برای محاسبات زمان-واقعی به منظور عملکرد ایمن سیستم قدرت و عملکرد بهینه استفاده می‌شوند که شامل تابع SA (تجزیه و تحلیل امنیتی)، تابع SCA (تحلیل مدار کوتاه)، تابع NS (حساسیت شبکه) و تابع VVC (کنترل ولت-وار) هستند.

تابع SE به صورت دوره‌ای (معمولاً یک‌بار در دقیقه) تریگر شده و یا توسط یک رویداد در سیستم فعال می‌شود. یکی از وظایف تخمین‌گر حالت (SE) شناسایی و ردیابی اندازه‌گیری‌های بد یا نادرست و جایگزینی آن‌ها با مقادیر تخمین زده‌شده است. همچنین، وظیفه شناسایی خطاهای توپولوژی احتمالی بر عهده تخمین‌گر حالت می‌باشد. هر اندازه‌گیری که به عنوان اشتباه تشخیص داده شود، در گزارش‌های SE نشان داده می‌شود. این گزارش‌ها راهی سریع برای اشاره به وضعیت اندازه‌گیری یا توپولوژی نادرست یا مشکوک است که باید بررسی شوند. رایج‌ترین دلیل برای جایگزینی مقدار اندازه‌گیری شده با مقادیر SE، وضعیت سوئیچینگ نادرست (خطای توپولوژی) است. نمونه‌ای از گزارش SE از اندازه‌گیری‌های نامعتبر در یک سیستم SCADA/EMS زمان-واقعی در شکل زیر نشان داده شده است [۱۶].

Station	Measurement ID	Type		Meas. value	Estim. value	NO of detects
TREBI	TREBI 220TR1	2X	MW	74,9	116,8	86
PECSO	PECSO 400TR2	3X	MVAR	60,9	-53,1	118
TOPN	TOPN 400TR2	3X	MVAR	59,4	-47	118
GYOR	GYOR 400TR4	3X	MW	-130,8	-261,3	118
GYOR	GYOR 400TR4	3X	MVAR	-11,6	-59,3	118
HEPE	HEPE 220TR1	2X	MW	80,2	-19,8	118
HEPE	HEPE 220TR1	2X	MVAR	5,2	-22,7	118

شکل 2-3 نمونه‌ای از گزارش تخمین‌گر حالت از اندازه‌گیری‌های نادرست

۲-۵- نرم‌افزار شرکت CYME

پکیج CYMDIST پکیج پایه تحلیل سیستم توزیع نرم‌افزار CYME است. این پکیج تمام ابزارهای مدل‌سازی و تحلیل مورد نیاز برای انجام انواع مختلف شبیه‌سازی‌های دخیل در برنامه‌ریزی سیستم توزیع

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

الکتریکی را در کنار هم قرار می‌دهد. این نرم‌افزار از مدل‌های توزیع متعادل و نامتعادل با هر ترکیبی از فازها و با پیکربندی‌های مختلف شعاعی[۱]، حلقه‌ای[۲] یا مشبک[۳] پشتیبانی می‌کند [۱۷].

۲-۵-۱- توابع اصلی پکیج CYMEDIST

پکیج CYMDIST شامل توابع تحلیلی اصلی زیر می‌باشد [۱۷].

- پخش بار نامتعادل[۴]
- تخصیص و برآورد بار[۵]
- تجزیه و تحلیل عیب[۶]
- تعادل بار[۷]
- جایابی و تعیین سایز بهینه خازن[۸]
- راه‌اندازی موتور[۹]
- تحلیل بچ[۱۰]

---

[۱] Radial

[۲] Looped

[۳] Meshed

[۴] Unbalanced Load Flow

[۵] Load Allocation and Estimation

[۶] Fault analysis:

[۷] Load Balancing

and Sizing [۸] Optimal Capacitor Placement

[۹] Motor Starting

[۱۰] Batch Analysis

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

۲-۵-۲- ماژول‌های اضافی (تخمین حالت)

به جز این توابع اصلی، نرم‌افزار CYMDIST شامل برخی ماژول‌های اضافی برای انجام تجزیه و تحلیل‌های عمیق‌تر و تخصصی‌تر می‌باشد. ماژول‌های جدید این نرم‌افزار برای پاسخگویی به نیازهای در حال تحول مهندسان توزیع به طور منظم توسعه می‌یابند. به طور مثال می‌توان به ماژول‌های اضافی زیر اشاره نمود [۱۷].

- مدل‌سازی پیشرفته پست‌های توزیع
- مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های توزیع ثانویه شعاعی
- مدل‌سازی و تحلیل شبکه‌های بسیار مشبک‌شده[۱] (مانند شبکه‌های ثانویه ولتاژ پایین و شبکه‌های نقطه‌ای[۲])
- خدمات نقشه‌های آنلاین
- مدیریت پروژه پیشرفته
- مکان‌یاب پیشرفته عیب
- تخمین‌گر حالت سیستم توزیع

یکی از مهم‌ترین این ماژول‌ها، ماژول تخمین‌گر حالت توزیع می‌باشد. ماژول تخمین حالت نرم‌افزار CYMDIST با یک الگوریتم تصفیه شده[۳] در هسته خود، می‌تواند به پردازش اندازه‌گیری‌های مختلف یک مدل شبکه دقیق و دارای جزئیات پرداخته و شارش توان و ولتاژ سیستم را تخمین زده و مناسب‌ترین راه حل را تعیین کند. تجزیه و تحلیل این نرم‌افزار برای شبکه‌های شعاعی، حلقه ای و مشبک انجام می‌شود. این ماژول می‌تواند پخش بار نامتعادل و ولتاژها را در هر سطح از یک سیستم توزیع تجزیه و تحلیل کند [۱۷].

[۱] Heavily Meshed

[۲] Spot Networks

[۳] Refined

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

این ماژول از یک فرمول ریاضی دقیق که برای همه توپولوژی‌های سیستم توزیع (شعاعی، حلقه‌ای، مشبک)، از جمله سیستم‌های به شدت مشبک مانند شبکه‌های ثانویه[۱] قابل حل می‌باشد، استفاده می‌کند. جزئیات ارائه شده توسط این ماژول به مهندس کاربر سیستم توزیع کمک می‌کند تا بهترین راه حل را برای مشکلات شناسایی شده طراحی کند. این ماژول به طور یکپارچه با چارچوب نرم‌افزار CYME ادغام شده و استفاده از نتایج را برای سایر شبیه‌سازی‌های نرم‌افزار CYME و انجام تنظیمات در مدل توزیع تسهیل می‌کند [۱۷].

۲-۵-۳- قابلیت‌های تخمین‌گر حالت CYMEDIST

ماژول تخمین‌گر حالت نرم‌افزار CYMEDIDT دارای قابلیت‌های زیر می‌باشد [۱۷].

- تخمین پخش بار نامتعادل
- پردازش انواع اندازه‌گیری‌های فازی (ولت، آمپر، کیلو وات، کیلو وار) با دقت‌های مشخص‌شده توسط کاربر
- مدیریت افزونگی در اندازه‌گیری‌ها
- تخمین موقعیت تپ ترانسفورماتور تحت بار و رگولاتور ولتاژ
- امکان در نظر گرفتن تولیدات پراکنده
- ارائه شاخص‌های کیفیت[۲] تخمین حالت
- حذف داده‌های بد قبل از تجزیه و تحلیل بر اساس قوانین تعیین شده توسط کاربر
- انجام مقداردهی اولیه بار برای سایر تحلیل‌های سیستم توزیع مانند تحلیل ظرفیت[۳]، بهینه‌سازی ولت-وار، تحلیل پیشامد[۴] و غیره

[۱] Secondary Grid Networks

[۲] Quality Indices

[۳] Capacity Analysis

[۴] Contingency Analysis

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

- کمک به شناسایی خطاهای احتمالی در توپولوژی و اندازه‌گیری‌ها (مانند وضعیت سوئیچ‌ها، وضعیت خازن شنت، موقعیت تپ و غیره)

۲-۵-۴- تخمین حالت شبکه‌های ثانویه

تحلیل‌های ماژول تخمین حالت توزیع CYMEDIST بر اساس یک فرمولاسیون ریاضی دقیق انجام شده و قادر است سیستم‌های به‌هم‌پیوسته[۱] بزرگ را نیز تحلیل نماید. این الگوریتم قوی، تخمین حالت سیستم‌های بسیار مشبک‌شده مانند شبکه‌های ثانویه را ممکن می‌سازد. امکان تخمین مقادیر بار و محاسبه جریان کابل‌های ولتاژ پایین برای افزایش آگاهی شبکه نیز توسط این ماژول وجود دارد [۱۸].

۲-۵-۵- اندازه‌گیری‌ها (ورودی ماژول)

ماژول تخمین حالت توزیع CYMEDIST بر خلاف الگوریتم‌های سنتی مانند پخش بار و تخصیص بار از اندازه‌گیری‌های فازی ولتاژ نیز در کنار اندازه‌گیری‌های سنتی (آمپیر، کیلووات، کیلووار) استفاده می‌کند. تجهیزات اندازه‌گیری فازور ولتاژ می‌توانند در هر یک از گره‌های سیستم توزیع نصب شوند [۱۸].

۲-۵-۶- خروجی ماژول

خروجی ماژول تخمین حالت توزیع CYMEDIST شامل چندین گزارش دقیق است که می‌توانند توسط کاربر سفارشی‌تر شوند. این گزارش‌ها با جدول‌بندی نتایج مانند مقادیر بار تخمین‌زده شده، خروجی‌های اندازه‌گیری‌شده و خروجی‌های تخمین‌زده شده سیستم، بینشی در مورد روش و راه حل تخمین حالت مورد استفاده ارائه می‌دهند. مجموعه‌ای از شاخص‌های کیفیت نیز برای کمک به مهندس در ارزیابی دقت نتایج، به شرح زیر موجود است [۱۸].

- مانده‌های نرمالیزه‌شده[۲]
- مانده‌های وزن‌یافته[۳]

---

[۱] Interconnected

[۲] Normalized Residuals

[۳] Weighted Residuals

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

- ضرب‌کننده‌های لاگرانژ نرمالیزه‌شده[۱]
- هزینه تخمین حالت[۲]
- اختلاف در اندازه‌گیری‌ها[۳]

۲-۶- نرم‌افزار شرکت NEXANT

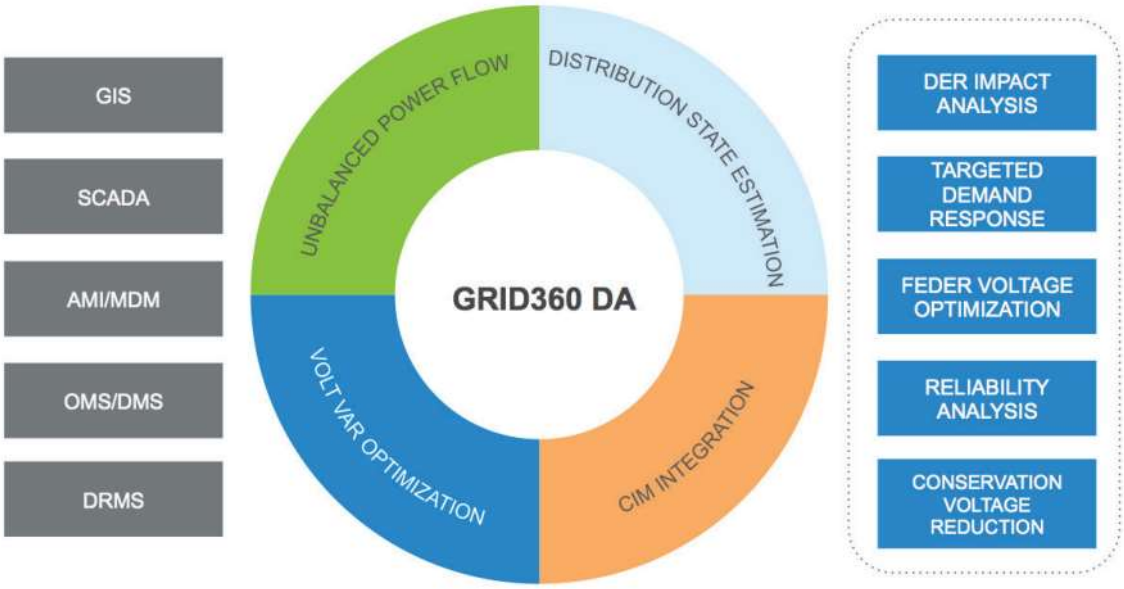
نرم‌افزار GRID360™ شرکت NEXANT یک پلت‌فرم تجزیه و تحلیل شبکه توزیع است که برنامه‌ریزان و اپراتورهای سیستم توزیع را قادر می‌سازد تا تأثیر منابع انرژی پراکنده (DERs) را تجزیه و تحلیل کرده و برای شرایط اوج بار برنامه‌ریزی کنند. همچنین می‌توان با استفاده از این پلت‌فرم، برنامه‌ریزی توزیع را بهینه کرده و قابلیت اطمینان را بهبود داد. این پلت‌فرم بر اساس فناوری‌های اثبات‌شده در صنعت مانند تخمین حالت و تخمین توپولوژی ساخته شده که داده‌های مدل شبکه توزیع را تأیید کرده، اندازه‌گیری‌های اشتباه را برطرف نموده، عملکرد برنامه را بهبود بخشیده و قابلیت‌های تحلیلی را افزایش می‌دهد. این پلت‌فرم با استفاده از یک رابط کاربری گرافیکی غنی و مبتنی بر مرورگر، سناریوی قدرتمندی را ارائه می‌دهد که برنامه‌ریزان و اپراتورها می‌توانند از آن برای تجزیه و تحلیل شرایط عادی و غیرعادی استفاده کرده و تصمیمات آگاهانه و مؤثر برای عملکرد کارآمد و قابل‌اعتماد سیستم بگیرند. شکل زیر نرم‌افزار GRID360 DA و ماژول‌های مربوطه آن را نشان می‌دهد. GRID360 DA شامل ماژول تخمین‌گر حالت توزیع به منظور اعتبارسنجی داده‌های مدل شبکه توزیع، برطرف کردن اندازه‌گیری‌های اشتباه، بهبود بخشیدن به عملکرد برنامه و تقویت قابلیت‌های آن است [۱۹].

[۱] Normalized Lagrange Multipliers

[۲] Solution Cost

[۳] Measurement Mismatches

DOI: 10.30503/nripress.2020.207



شکل 2-4 نرم‌افزار GRID360DA و ماژول‌های مربوطه

نرم‌افزار این شرکت در هر دو سطح توزیع و انتقال طراحی شده است.

۲-۶-۱- سطح انتقال

تجزیه و تحلیل GRID360 در سطح انتقال، اپراتورهای شبکه را قادر می‌سازد تا برنامه‌ریزی و عملیات انتقال را با استفاده از برنامه‌های مدیریت انرژی پیشرفته مانند تخمین حالت، تحلیل پیشامد، پخش بار بهینه و تجزیه و تحلیل مکان خطا بهینه کنند. این برنامه‌ها را می‌توان در عملیات سیستم زمان-واقعی استفاده کرد [۱۹].

۲-۶-۲- سطح توزیع

تجزیه و تحلیل GRID360 در سطح توزیع، برای برنامه‌ریزان و اپراتورهای سیستم توزیع، مجموعه‌ای یکپارچه از برنامه‌های کاربردی و امکانات زیر فراهم می‌کند [۱۹].

- تجزیه و تحلیل تأثیر منابع انرژی توزیع‌شده (DERs)
- افزایش آگاهی

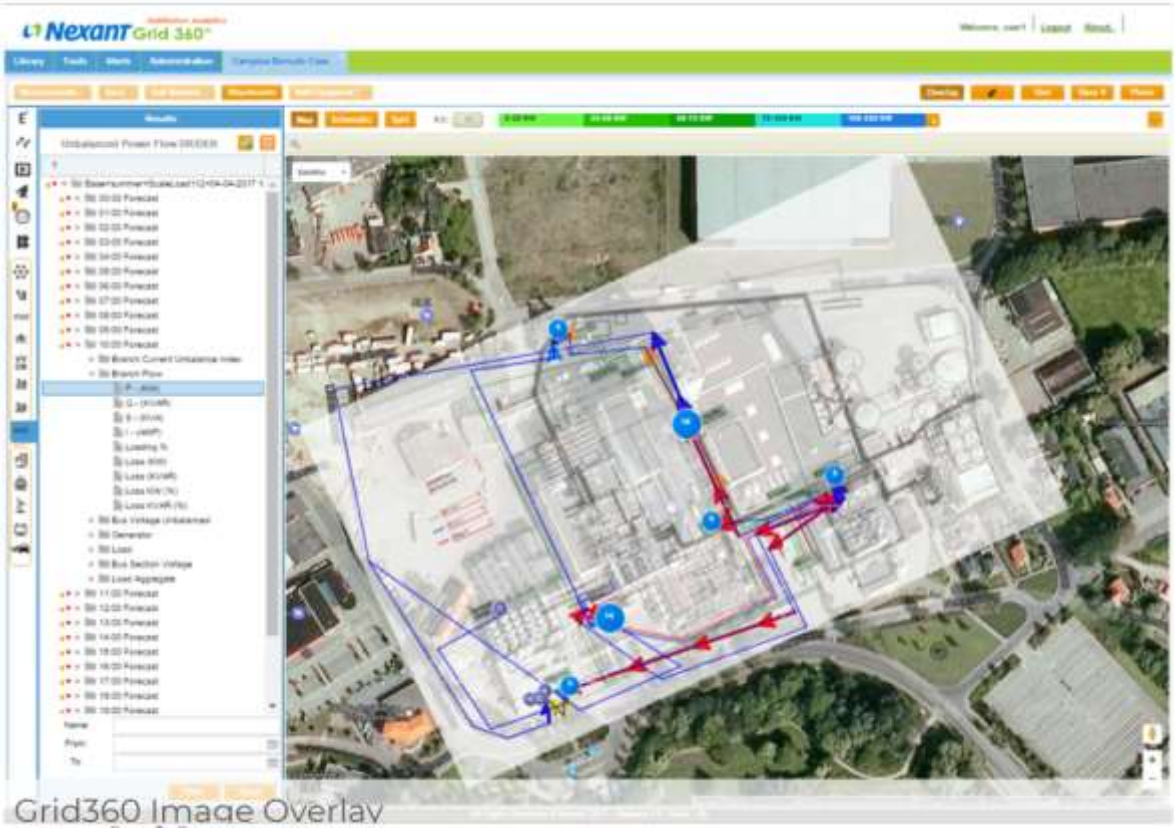
DOI: 10.30503/nripress.2020.207

- بهینه کردن عملیات شبکه
- برنامه‌ریزی برای شرایط اوج بار
- بهبود قابلیت اطمینان

شکل زیر نمونه‌ای از GUI نرم‌افزار GRID360DA را نشان می‌دهد.



DOI: 10.30503/nripress.2020.207



شکل 2-5 نمونه‌ای از GUI نرم‌افزار GRID360DA

۲-۷- نرم‌افزار شرکت OSI

شرکت OSI نرم‌افزار Spectra™ را که یک سیستم مدیریت توزیع پیشرفته (ADMS[۱]) زمان-واقعی می‌باشد، عرضه می‌کند [۲۰].

۲-۷-۱- قابلیت‌ها

نرم‌افزار Spectra™ اپراتورهای سیستم توزیع را قادر به موارد زیر می‌سازد [۲۰].

- مدل‌سازی و مدیریت شبکه توزیع

[۱] Advanced Distribution Management Systems

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

- نظارت و کنترل سیستم قدرت
- مدیریت خاموشی‌های برنامه‌ریزی‌شده و برنامه‌ریزی‌نشده
- دیسپاچینگ کارکنان و مدیریت کار میدانی (اعزام خدمه و ...)
- تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد شبکه
- یکپارچه‌سازی تولیدات تجدیدپذیر و تولید پراکنده

۲-۷-۲- ماژول‌ها

نرم‌افزار Spectra™ شامل ماژول‌های کاربردی مختلف مانند موارد زیر است [۲۰].

- ماژول Spectra eMap™ (DMS Representation & Visualization)

ماژول Spectra eMap مدل عملیاتی سیستم توزیع و جزء اساسی سامانه‌های DMS، OMS و سایر برنامه‌ها است. این ماژول مدل‌های زمان-واقعی و تصویرسازی پیشرفته را برای قادر ساختن اپراتورها به نظارت و کنترل سیستم توزیع و تصمیم‌گیری عملیاتی فراهم می‌کند.

- ماژول Spectra DMS™ (Distribution Management System)

ماژول Spectra DMS شامل مجموعه‌ای جامع و یکپارچه از راه‌حل‌های مدیریت الکتریکی و سیستم توزیع است که از طریق یک رابط کاربری مشترک[۱] قابل دسترسی است. ماژول Spectra DMS عملکرد سیستم توزیع را نظارت کرده و به کاربران این امکان را می‌دهد که پیش از بحرانی شدن شرایط بالقوه اضافه بار و افت ولتاژ، با بهترین راه‌حل‌ها پاسخ دهند.

- ماژول Electra OMS™ (Outage Management System)

ماژول Electra OMS یک راه‌حل جدید و پیشرفته برای مدیریت خاموشی است که به شرکت‌ها این امکان را می‌دهد تا زمان پاسخگویی به قطع برق را بهتر مدیریت کرده و مشتریان و تنظیم‌کننده‌ها[۲] را به

[۱] Common User Interface

[۲] Regulators

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

خوبی در مورد وضعیت و پیش‌بینی بازیابی شبکه آگاه سازد. این ماژول قابلیت اطمینان کلی سیستم را بهبود بخشیده و واگذاری وظایف به تکنسین‌های میدانی را ممکن می‌سازد.

- ماژول OpenGIS™ (Geographical Information Systems Interface)

ماژول OpenGIS یک رابط پیکربندی[۱] استاندارد برای سیستم GIS شرکت توزیع جهت بازیابی مدل شبکه و نقشه‌های سیستم (اطلاعات الکتریکی، جغرافیایی و سایر اطلاعات) فراهم می‌کند. رابط‌های برنامه‌نویسی کاربردی (API[۲]) ماژول OpenGIS به گونه‌ای طراحی شده‌اند که امکان اتصال به تجهیزات متداول GIS را فراهم کرده و می‌توانند بر اساس نیازهای خاص کاربر تنظیم شوند. این ماژول از به‌روزرسانی مدل شبکه به صورت تدریجی و دوره‌ای (مانند روزانه یا هفتگی) پشتیبانی می‌کند.

- ماژول Spectra DPF™ (Distribution Power Flow)

ماژول Spectra DPF به اپراتورها امکان مشاهده وضعیت الکتریکی سیستم توزیع را می‌دهد. این ماژول دارای یک الگوریتم پخش بار سه‌فاز مقاوم[۳] است که ولتاژ زمان-واقعی، تغییرات بار و همچنین شرایط نزدیک به محدودیت‌های عملیاتی را محاسبه می‌کند.

- ماژول Spectra SCA™ (Short Circuit Analysis)

ماژول Spectra SCA خطاها را در فیدرهای شعاعی یا حلقه‌ای تجزیه و تحلیل کرده و مقادیر هر فاز را برای شرایط خطا از جمله سهم خطا از موتورها و منابع تولید پراکنده (DG) محاسبه می‌کند. می‌توان از این ماژول در حالت زمان-واقعی و برای سنجش ظرفیت خطا[۴] در نقاط مورد نظر یا در حالت مطالعه[۵] برای تجزیه و تحلیل جریان‌ها و ولتاژها در تمام قسمت‌های شبکه در شرایط خطا استفاده کرد.

- ماژول Spectra VVC™ (Volt/VAR Control/Optimization)

---

[۱] Configuration Interface

[۲] Application Programming Interface

[۳] Robust

[۴] Fault Capacity

[۵] Study Mode

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

ماژول Spectra VVC توسط مدیریت هوشمند و بهینه منابع راکتیو قدرت به کاهش تلفات سیستم، آزادسازی ظرفیت سیستم، بهبود سطوح ولتاژ و پیاده‌سازی کاهش ولتاژ صرفه‌جویانه (CVR[1]) کمک می‌کند. این ماژول نظارت بر پروفیل‌های ولتاژ سیستم توزیع و جریان‌های برق را انجام داده و بانک‌های خازنی، تنظیم‌کننده‌های ولتاژ و LTCها را برای دستیابی به اهداف مورد نظر کنترل می‌کند.

- ماژول Spectra FLISR™ (Fault Location, Isolation & Service Restoration)

ماژول Spectra FLIS شرکت‌ها را قادر می‌سازد تا مدت زمان خاموشی را کاهش داده و هنگام بازیابی خطاها از نقض ولتاژ و بارگذاری جلوگیری کنند. این ماژول از داده‌های خطا و مدل زمان-واقعی شبکه برای مکان‌یابی خطاها، تعیین مراحل سوئیچینگ مورد نیاز برای جداسازی تجهیزات دارای خطا در سیستم توزیع و بازگرداندن سرویس به بخش‌های بدون خطای سیستم استفاده می‌کند.

- ماژول Spectra FR™ (Feeder Reconfiguration)

ماژول Spectra FR یک راه حل سوئیچینگ پیشرفته است که انتقال بار بهینه را برای بهبود عملکرد کلی سیستم توزیع تعیین می‌کند. این ماژول اپراتورها را قادر می‌سازد تا به سرعت با راه‌حل‌های سوئیچینگ واکنش نشان دهند تا شرایط اضافه بار را کاهش داده، آسیب به دارایی‌های سیستم را به حداقل رسانده، شرایط ولتاژ غیرقابل قبول را اصلاح کرده و خدمات مشتری را بهبود بخشند.

- ماژول OpenSTLF™ (Short Term Load Forecasting)

ماژول OpenSTLF یک ابزار ساده و قابل اعتماد برای پیش‌بینی بار کوتاه‌مدت است که بر تکنیک‌های شبکه عصبی برای پیش‌بینی بارها با بالاترین دقت متکی است. این ماژول از چندین ناحیه بار یا فیدر پشتیبانی کرده و قابلیت پیش‌بینی تا ۳۵ روز آینده را دارد. رابط کاربری این ماژول از نمایش‌های مختلف جدولی و گرافیکی تشکیل شده است.

- ماژول OpenSOM™ (Switch Order Management)

ماژول OpenSOM ابزارهای لازم برای فرموله کردن فرآیند سوئیچینگ ایمن و مؤثر را به صورت تعاملی و با استفاده از رابط کاربر گرافیکی فراهم کرده و به اپراتور اجازه می‌دهد تا اقدامات لازم را در حالت مطالعه و قبل از ارسال دستورات، راستی‌آزمایی کند.

[1] Conservation Voltage Reduction

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

- ماژول OpenLM™ (Load Management)

ماژول OpenLM یک برنامه جامع و تحت وب برای پیاده‌سازی استراتژی‌های مدیریت بار مؤثر برای سیستم‌های توزیع الکتریکی است. این ماژول به ارائه یک استراتژی برای کاهش پیک بار مورد انتظار و جلوگیری از تقاضای اضافی و هزینه‌های انرژی می‌پردازد.

- ماژول OpenDR™ (Demand Response)

ماژول OpenDR یک برنامه کامل مدیریت پاسخگویی تقاضا برای مدیریت بار مصرف‌کننده برای سیستم‌های توزیع اکتریکی است. این ماژول از توابع هدف مختلف برای بهینه‌سازی سطح پاسخ تقاضای اجرا شده و کنترل از راه دور بارهای مشترکین برای دستیابی به بهترین محدودیت‌های عملیاتی مربوط به پروفیل‌های ولتاژ و توان راکتیو استفاده می‌کند.

- ماژول Spectra DSE™ (Distribution State Estimator)

ماژول تخمین‌گر حالت Spectra DSE™ یک برنامه قوی و با کارایی بالا می‌باشد که مقادیر فازی (متغیرهای حالت) را برای شبکه توزیع به صورت زمان-واقعی محاسبه می‌کند. این برنامه تمام اندازه‌گیری‌های موجود، از جمله اندازه‌گیری‌های زائد را در نظر می‌گیرد. ماژول Spectra DSE™ با افزایش تعداد و تنوع داده‌های زمان-واقعی، تخمین دقیق‌تری از متغیرهای حالت شبکه برای استفاده در سایر برنامه‌های پیشرفته سیستم DMS فراهم می‌کند.

۲-۷-۳- مزایا

نرم‌افزار Spectra™ شامل مجموعه‌ای کامل و یکپارچه از توابع و برنامه‌های کاربردی است که بر روی یک مدل شبکه مشترک عمل کرده و از طریق یک رابط کاربری مشترک و یکپارچه قابل دسترسی هستند. این نرم‌افزار بر روی یک پلت‌فرم زمان-واقعی با کارایی بالا و ایمن ساخته شده است تا نیازهای در حال تحول شرکت‌ها برای قابلیت‌های پیشرفته شبکه هوشمند را برآورده کند. مزایای این نرم‌افزار عبارت‌اند از [۲۰]:

- **راه‌حل یکپارچه[۱] زمان-واقعی**: ساخته شده بر روی یک پلت‌فرم اسکادای زمان-واقعی با استفاده از معماری، فناوری و رابط کاربری مشترک. این نرم‌افزار با ترکیب داده‌های زمان-واقعی، داده‌های شبکه

[۱] Integrated Solution

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

الکتریکی و داده‌های اتصال[۱]، برنامه‌های کاربردی پیشرفته یکپارچه را در یک مدل شبکه واحد فعال می‌کند.

- **نگهداری و پشتیبانی کارآمد[۲]:** طراحی منطقی با استفاده از فناوری‌های باز در این نرم‌افزار، هزینه‌های آموزش، ادغام، پشتیبانی و نگهداری را کاهش می‌دهد.
- **امنیت جامع[۳]:** معماری امنیتی یکپارچه را با پشتیبانی از دسترسی زمان-واقعی و سازمانی فراهم می‌کند.
- **اتوماسیون توزیع متمرکز[۴]:** برنامه‌های اتوماتیک را برای کاهش تلفات، حفظ کیفیت توان، بهبود قابلیت اطمینان و کاهش پیک تقاضا ارائه می‌دهد.
- **قابلیت اطمینان بهبودیافته[۵]:** آگاهی موقعیتی بهبودیافته[۶] و همچنین برنامه‌هایی برای پاسخگویی خودکار به قطعی‌ها، به حداقل رساندن تأثیر بر روی مشتریان
- **بهبود ایمنی[۷]:** افزایش دید وضعیت شبکه، سوئیچینگ و برچسب‌گذاری[۸] یکپارچه و یک مدل شبکه واحد
- **بهبود بهره‌وری عملیات[۹]:** فراهم کردن ابزارهای شبیه‌سازی و تحلیل برای کمک به اپراتورها برای ارزیابی و اعتبارسنجی گزینه‌ها در برابر شرایط فعلی و آینده و تصمیم‌گیری بهتر

---

۱ Connectivity

۲ Efficient Maintenance and Support

۳ Comprehensive Security

۴ Centralized Distribution Automation

۵ Improved Reliability

۶ Situational Awareness

۷ Improved Safety

۸ Tagging

۹ Improved Operations Efficiency

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

- **بهبود بهره وری انرژی**[1]: برنامه‌های خودکار برای کاهش تلفات و اوج تقاضا
- **مدیریت منابع انرژی پراکنده:** مدل‌سازی، نظارت، مدیریت و کنترل تولیدات تجدیدپذیر و پراکنده، ذخیره‌کننده‌های انرژی، ریزشبکه‌ها و سایر انواع منابع پراکنده

۲-۸- نرم‌افزار شرکت ETAP

۲-۸-۱- سطح انتقال

تخمین‌گر حالت ETAP داده‌های تله‌متری مانند اندازه‌گیری توان را پردازش می‌کند تا تخمینی از دامنه و زوایای فاز ولتاژ باس‌ها در سیستم قدرت به دست آورد. تخمین‌گر حالت با استفاده از مقادیر داده‌های تله‌متری و مدل الکتریکی، داده‌ها را برای خطاهای آشکار بررسی کرده، بخش‌هایی از شبکه را که دارای داده تله‌متری کافی برای مشاهده‌پذیر بودن هستند، تعیین کرده، اندازه‌گیری‌های مجازی را در بخش‌های مشاهده‌ناپذیر ایجاد کرده و سپس ولتاژ سیستم و شارش توان الکتریکی را برای کل سیستم تخمین می‌زند[۲۱]. این تخمین حالت روی کل سیستم از جمله بخش مشاهده‌ناپذیر سیستم انجام شده و مقایسه‌ای نیز بر روی مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر تخمین‌زده‌شده جهت اعتبارسنجی آنلاین انجام می‌گیرد [۲۲].

۲ ۸ ۱ ۱ ویژگی‌ها و قابلیت‌ها

ویژگی‌ها و قابلیت‌های کلیدی نرم‌افزار تخمین حالت ETAP عبارت‌اند از [۲۱]:

- تخمین حالت زیرسیستم‌های مشاهده‌ناپذیر
- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری‌شده با مقادیر تخمینی آن‌ها
- همگرایی سریع و قابل اعتماد
- نیاز حداقلی به اندازه‌گیری‌های سیستم

[1] Improved Energy Efficiency

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

- استفاده از روش‌های به روز تخمین حالت
- بررسی سازگاری داده‌ها
- تشخیص خطا و داده‌های بد
- توزیع بار
- مقایسه‌کننده تخمین حالت

۲-۸-۲- سطح توزیع

شرکت ETAP یک سیستم مدیریت توزیع پیشرفته ارائه می‌کند که مجموعه‌ای هوشمند و مقاوم از برنامه‌های کاربردی مبتنی بر GIS در شبکه توزیع بوده و برای مدیریت قابل اعتماد و ایمن، کنترل، تصویرسازی و بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع کوچک تا وسیع کاربرد دارد. یکی از ماژول‌های این سیستم مدیریت توزیع، تخمین‌گر حالت توزیع می‌باشد. تخمین‌گر حالت توزیع ETAP به همراه تخصیص بار به فراهم‌سازی مانیتورینگ هوشمند و زمان-واقعی از جمله تخمین زیرسیستم‌های مشاهده‌ناپذیر و محاسبه تلفات می‌پردازد [۲۲].

با گسترش نفوذ تولیدات پراکنده در شبکه توزیع، نظارت بر مدل زمان-واقعی شبکه با استفاده از تخمین‌گر حالت برای شبکه‌های توزیع نامتعادل سنتی ضروری می‌باشد. تخمین‌گر حالت توزیع از تکنیک‌های تخصیص بار برای ارائه گزارش‌های زمان-واقعی تلفات توان فنی و غیرفنی استفاده می‌کند [۲۳].

۲ ۸ ۲ ۱ ویژگی‌های و قابلیت‌ها

ویژگی‌ها و قابلیت‌های کلیدی نرم‌افزار تخمین حالت توزیع ETAP عبارت‌اند از [۲۱]:

- تخمین بارهای منفرد روی یک فیدر بر اساس کلاس‌های بار، نوع بار، منحنی بار و اندازه‌گیری‌های بار
- ادغام با تخمین‌گر حالت شبکه انتقال برای ارائه تصویری یکپارچه و کامل از یک سیستم انتقال و توزیع یکپارچه
- توانایی عمل در شبکه‌های زیر:

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

- ✓ با یا بدون تأیید اندازه‌گیری‌های تله‌متری
- ✓ با پردازش دستی یا خودکار بخش‌های مشاهده‌ناپذیر شبکه
- ✓ با یا بدون اندازه‌گیری‌های ثابت
- ✓ شناخته شده بودن تمام داده‌های تاریخی[۱]
- ✓ شبکه‌های بدون هیچ داده تاریخی (بر اساس پارامترهای عناصر شبکه) و همچنین با توجه به تنظیمات کاربر

- قابلیت استفاده از داده‌های تاریخی شبکه از جمله:
  - ✓ پروفایل بار روزانه بر اساس نوع کلاس، روز هفته و شرایط آب و هوایی
  - ✓ پیک بار برای ترانسفورماتورهای توزیع و/یا مصرف‌کنندگان و/یا انتقال انرژی
- در نظر گرفتن داده‌های زمان-واقعی غیرقابل دسترسی و جبران عدم وجود آن‌ها با داده‌های تاریخی، اندازه‌گیری‌های شبه‌مجازی و مجازی برای دستیابی به حداقل مجموعه داده‌های ورودی لازم برای اجرای پخش بار
- گزارش جدولی زمان-واقعی از تلفات فنی و غیرفنی در هر فیدر و هر پست

۲-۹- نرم‌افزار شرکت DIgSILENT

در میان نرم‌افزارهای تحلیل سیستم قدرت، نرم‌افزار DIgSILENT PowerFactory که توسط شرکت DIgSILENT GmbH ارائه می‌شود، به عنوان یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای تحلیل شبکه به شمار می‌رود که سالیان سال است در کشورمان با اقبال گسترده کاربران صنعت برق و دانشگاهی روبرو شده است. نرم‌افزار DIgSILENT قابلیت‌های کارکردی مختلفی دارد که قابلیت تخمین حالت یکی از مهم‌ترین آن‌ها به شمار می‌رود. این نرم‌افزار یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای تحلیل شبکه است که در هر سه حوزه تولید، انتقال و توزیع کاربرد دارد. تابع تخمین حالت PowerFactory نتایج پخش بار را بر اساس

[۱] Historical Data

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

اندازه‌گیری‌های زمان-واقعی، داده‌های وارد شده به صورت دستی و مدل شبکه برای کل سیستم قدرت ارائه می‌کند. قبل از انجام هر گونه تجزیه و تحلیل بیشتر روی سیستم، مانند تحلیل پیشامد، بررسی‌های امنیتی و غیره، لازم است تا متغیرهای حالت کنونی سیستم قدرت با استفاده از اندازه‌گیری‌های موجود تخمین زده شود [۲۴].

۲-۹-۱- انواع اندازه‌گیری ورودی

انواع اندازه‌گیری که توسط تخمین‌گر حالت PowerFactory پردازش می‌شوند [۲۵]:

- شارش توان اکتیو شاخه‌ها
- شارش توان راکتیو شاخه‌ها
- دامنه جریان شاخه
- دامنه ولتاژ باس بار
- وضعیت مدارشکن‌ها
- موقعیت تپ ترانسفورماتورها

این اندازه‌گیری‌ها معمولا نویزی بوده و همچنین ممکن است برخی از داده‌ها کاملا اشتباه باشند. از طرف دیگر، معمولا داده‌های موجود بیش از حد لازم می‌باشند و می‌توان از اندازه‌گیری‌های افزونه برای بهبود دقت تخمین متغیرهای شبکه سود برد.

۲-۹-۲- اجزاء

تابع تخمین حالت PowerFactory از چندین جزء مستقل تشکیل شده است که عبارتند از [۲۵]:

- پیش پردازش:

  تنظیم وضعیت مدارشکن‌ها و موقعیت تپ‌ها با توجه به سیگنال‌های اندازه‌گیری‌شده آن‌ها

- بررسی مقبولیت[۱]:

[۱] Plausibility Check

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

شناسایی و جداسازی همه اندازه‌گیری‌ها با خطای ظاهری بر اساس معیارهای مختلف

- تجزیه و تحلیل مشاهده‌پذیری:

بررسی مشاهده‌پذیری سیستم: به طور کلی، یک ناحیه از سیستم مشاهده‌پذیر است اگر اندازه‌گیری‌های موجود در سیستم بتواند اطلاعات کافی (غیر زائد) برای تخمین متغیرهای حالت آن ناحیه از شبکه را فراهم کند.

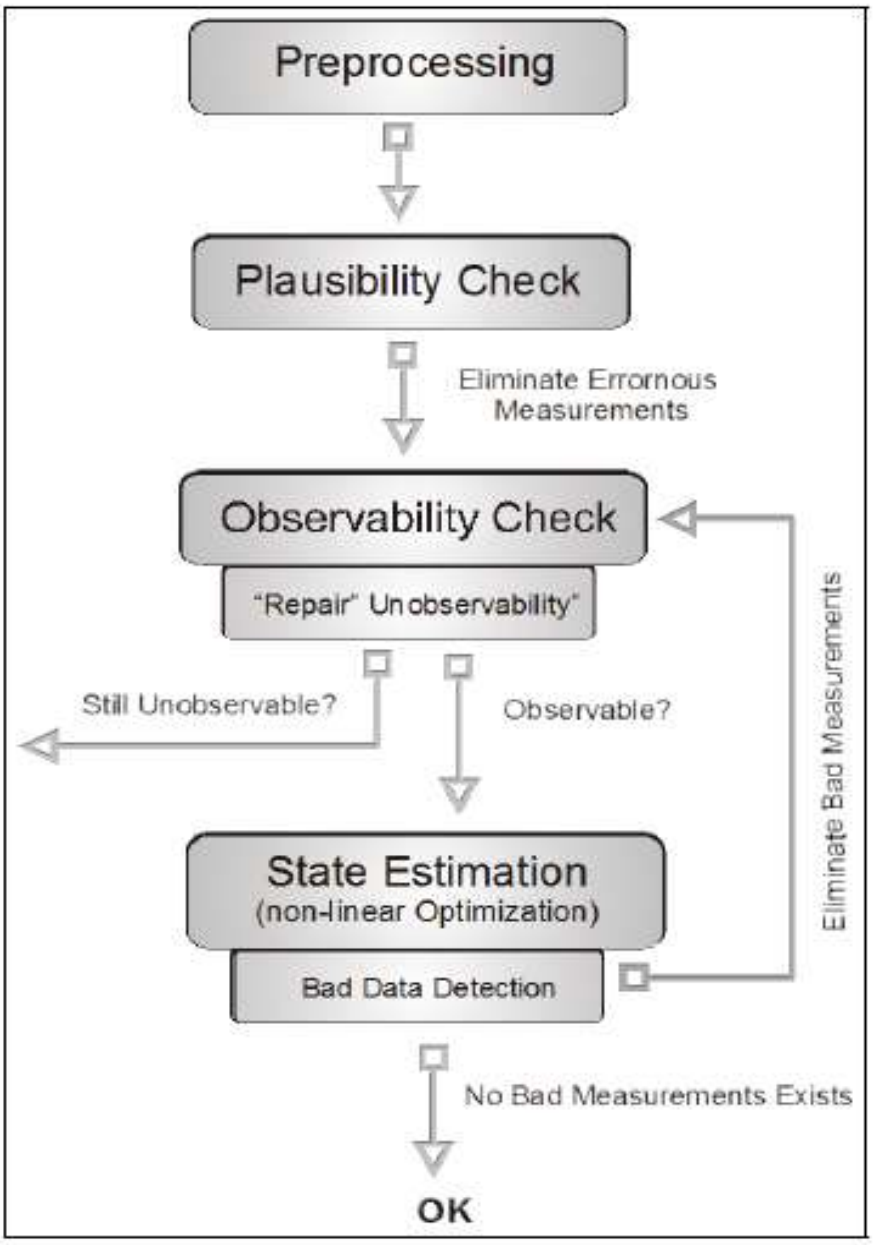
- تخمین حالت (بهینه‌سازی غیرخطی):

حل مسأله بهینه‌سازی غیرخطی، دارای راه‌های مختلفی برای مواجهه با مناطق مشاهده‌ناپذیر شبکه

۲-۹-۳- الگوریتم

شکل ۲-۶ تعامل الگوریتمی اجزاء مختلف تخمین‌گر حالت DIgSILENT را نشان می‌دهد [۲۵].

DOI: 10.30503/nripress.2020.207



شکل 2-6 تعامل الگوریتمی اجزاء مختلف تخمین‌گر حالت DIgSILENT

به منظور بهبود کیفیت نتایج، تحلیل مشاهده‌پذیری و تخمین حالت را می‌توان در یک حلقه اجرا کرد. در این حالت، در پایان هر مرحله تخمین حالت، به تشخیص داده‌های بد پرداخته می‌شود. بدین‌صورت که خطای هر یک از تجهیزات اندازه‌گیری با محاسبه اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده، تخمین زده می‌شود. اندازه‌گیری‌هایی که خطای تخمین‌زده شده آن‌ها بسیار بزرگتر از انحراف معیار دستگاه

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

اندازه‌گیری است، در تکرارهای بعدی در نظر گرفته نمی‌شوند. این روند تا زمانی تکرار می‌شود که دیگر اندازه‌گیری‌های بد تشخیص داده نشوند [۲۵].

۲-۹-۴- خروجی‌ها (متغیرهای حالت تخمینی)

حالت‌هایی که می‌توان توسط ماژول تخمین حالت DIgSILENT و بر اساس اندازه‌گیری‌های داده‌شده تخمین زد، برای عناصر مختلف در شبکه متفاوت بوده و عبارت‌اند از [۲۵]:

- بارها
  - توان اکتیو و/یا
  - توان راکتیو یا
  - ضریب مقیاس[۱] (به عنوان یک جایگزین)
- ماشین‌های سنکرون
  - توان اکتیو و/یا
  - توان راکتیو
- ماشین‌های آسنکرون
  - توان اکتیو
- سیستم جبران‌ساز توان راکتیو (SVC[۲])
  - توان راکتیو
- ترانسفورماتورهای ۲ و ۳ سیم‌پیچه
  - موقعیت تپ‌ها (برای همه تپ‌ها به جز یک تپ)

[۱] Scaling Factor

[۲] Static VAR Compensator

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

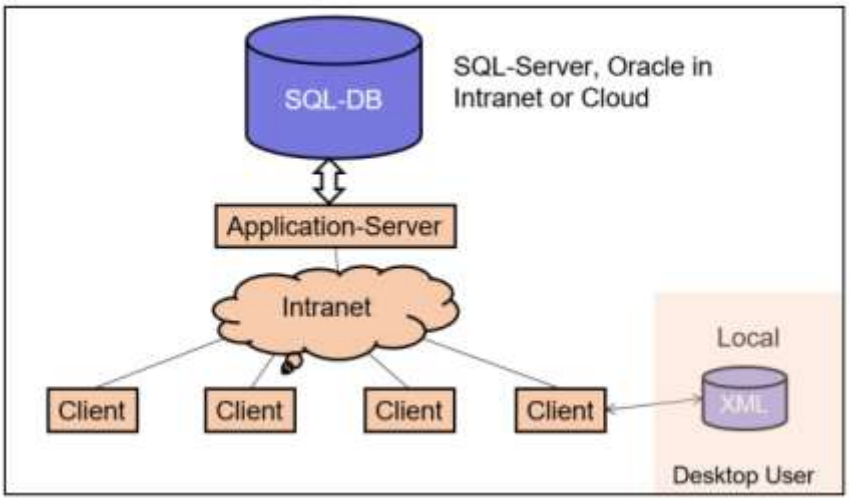
۲-۱۰- نرم‌افزار شرکت NEPLAN

این مجموعه یکی از کامل‌ترین ابزارهای برنامه‌ریزی، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی شبکه‌های برق (انتقال، توزیع، تولید و صنعتی) و همچنین شبکه‌های گاز، آب و گرمایش را دارا می‌باشد. NEPLAN یکی از پیشرفته‌ترین و کامل‌ترین ابزار تجزیه و تحلیل سیستم قدرت در سراسر جهان است. این نرم‌افزار برای برنامه‌ریزی شبکه‌های انتقال و توزیع، سیستم‌های انرژی‌های تجدیدپذیر یا تولید پراکنده، شبکه‌های هوشمند و نیروگاه‌های تولید/صنعتی استفاده می‌شود. در این نرم‌افزار، می‌توان پیکربندی شبکه را بر روی یک نقشه جغرافیایی قرار داده و در نتیجه تجسم و کارایی را بهبود بخشید. برای این منظور می‌توان از طیف گسترده‌ای از نقشه‌ها مانند نقشه‌های دقیق خیابان‌ها، تصاویر هوایی و ماهواره‌ای و اساسا هر نوع داده نقشه موجود برای سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS[۱]) استفاده کرد. نرم‌افزار NEPLAN اولین ابزار تجزیه و تحلیل سیستم قدرت کاملا مبتنی بر وب در جهان بوده و بنابراین تمام مزایای رایانش ابری مبتنی بر فناوری معماری مشتری-سرور[۲] را دارد [۲۶]. شکل زیر نمایی از معماری مشتری-سرور را نشان می‌دهد.

[۱] Geographic Information Systems

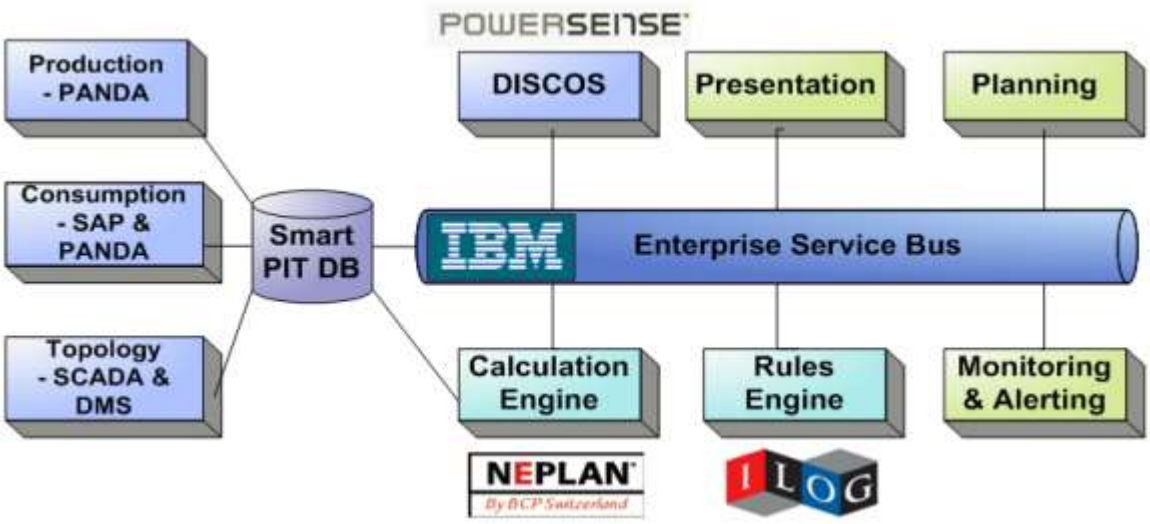
[۲] Client-Server Architecture

DOI: 10.30503/nripress.2020.207



شکل 2-7 نمایی از معماری مشتری-سرور

این شرکت ماژولی به نام "SmartPIT" را فراهم کرده که حجم بی‌سابقه‌ای از اطلاعات را در مورد وضعیت شبکه ارائه می‌دهد. در نتیجه قادر خواهد بود تا کل شبکه را بر اساس مقادیر واقعی ساعت‌به‌ساعت مورد تجزیه و تحلیل، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری قرار دهد. ماژول SmartPIT تمام اطلاعات موجود در مورد شبکه را از سیستم‌های GIS و SCADA / DMS، داده‌های صورتحساب، AMR و اندازه‌گیری‌های دستگاه‌های خودکارسازی جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل می‌کند. با استفاده از این اطلاعات، می‌توان از زیرساخت‌های الکتریکی موجود استفاده بهینه‌تری کرده و برای آینده برنامه‌ریزی هوشمندانه‌تری نمود [۲۶]. شکل زیر بلوک دیاگرام و ارتباط ماژول‌ها در smartPIT را نمایش می‌دهد.



DOI: 10.30503/nripress.2020.207

شکل 2-8 بلوک دیاگرام و ارتباط ماژول‌ها در smartPIT

۲-۱۰-۱- جمع‌آوری داده‌ها از شبکه

۲ ۱۰ ۱ ۱ پست‌های اولیه

پست‌های اولیه با SCADA / DMS سنتی (سیستم مدیریت توزیع) نظارت می‌شوند. داده‌های واردشده به SmartPIT عبارت‌اند از [۲۷]:

- پیکربندی باس در پست‌های اولیه
- ولتاژ ترانسفورماتور و شین
- اندازه‌گیری جریان بار در سر فیدر - در برخی موارد نیز توان اکتیو و راکتیو
- وضعیت سوئیچینگ (توپولوژی) در شبکه MV

ارسال اطلاعات به SmartPIT هر ۱۰ دقیقه انجام می‌شود.

۲ ۱۰ ۱ ۲ پست‌های ثانویه

منابع مهم و کلیدی برای اندازه‌گیری‌های شبکه MV دستگاه‌های نظارتی Discos™ هستند که در ابتدا برای تشخیص اتصال کوتاه و کنترل از راه دور پیاده‌سازی شدند. این دستگاه‌ها جریان، توان اکتیو و راکتیو را در خطوط MV و ترانسفورماتورها ارائه می‌دهند. این اطلاعات از هر پست مجهز به Discos هر ۱۰ دقیقه یک بار از طریق GPRS به SmartPIT منتقل می‌شود [۲۷].

۲ ۱۰ ۱ ۳ اعتبار سنجی داده‌ها

یکپارچه‌سازی دقیق داده‌ها بین SmartPIT و سایر سیستم‌ها یک مزیت بزرگ است؛ اما در محیطی که داده‌های شبکه و مشتری در مقیاس بزرگی تغییر می‌کند، الزامات سختی را در مورد واقعی بودن داده‌ها ایجاد می‌کند. برای اینکه SmartPIT در این زمینه مورد اعتماد باشد، فیلترهای مناسب و داده‌های پیش‌فرض برای همه اجزاء شبکه تعریف شده‌اند تا اطمینان حاصل شود که تخمین حالت مختل نمی‌شود. اندازه‌گیری‌های دریافتی با ابزار ILog™ rules اعتبارسنجی می‌شوند تا از محاسبات تخمین حالت در برابر

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

اندازه‌گیری‌های غیرمحتمل اجتناب کند. به اپراتور نیز اطلاع داده می‌شود تا بتواند اندازه‌گیری‌های بد را پیدا کرده و آن‌ها را اصلاح کند [۲۷].

۴ ۱ ۱۰ ۲ داده‌های شبکه

داده‌های شبکه برای مدل محاسباتی هر ۲۴ ساعت از دو منبع SAP PM و GIS وارد می‌شوند که شامل موارد زیر می‌باشند [۲۷].

- خطوط MV
- بریکرها و قطع کننده‌های MV
- ترانسفورماتورهای HV/MV و MV/LV
- ژنراتورها
- ساختار شبکه شامل مکآن‌های پست
- داده‌های بار

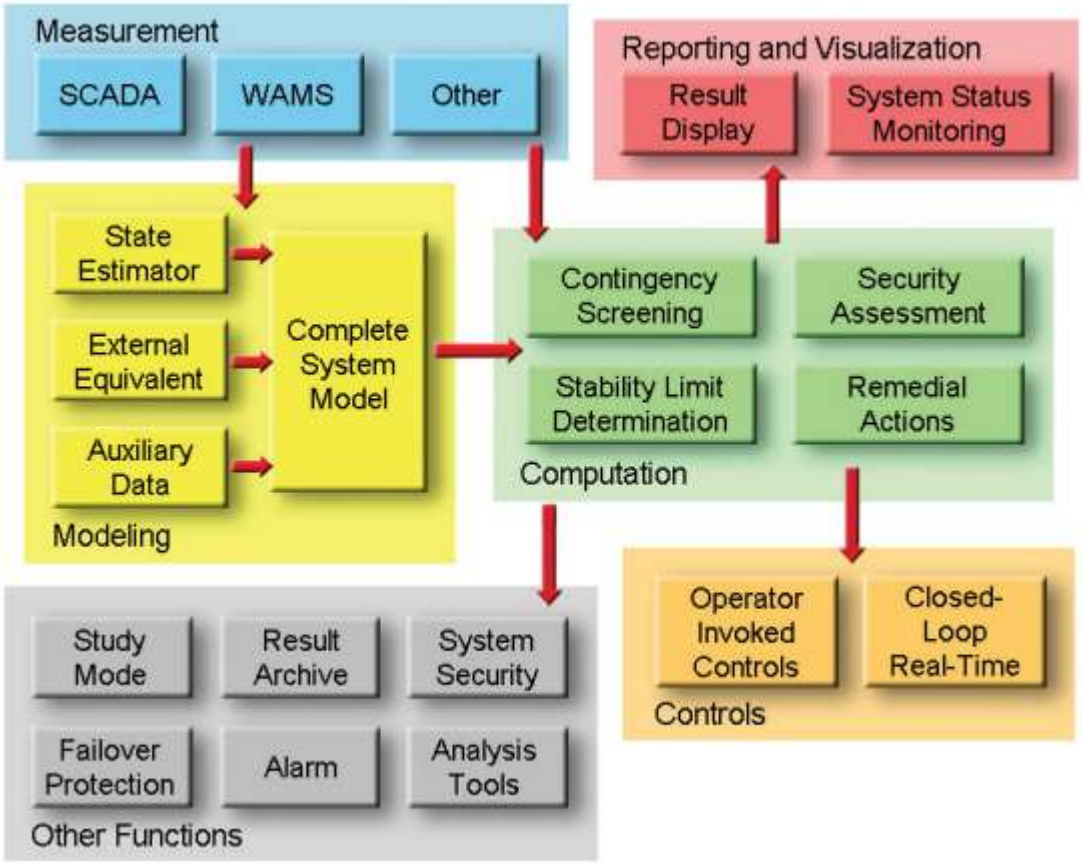
داده‌های بار برای تخمین حالت شبکه قابل‌اعتماد ضروری هستند. داده‌های بار از ۴ منبع جمع‌آوری می‌شوند [۲۷]:

- فروش انرژی ساعتی
- تولید انرژی ساعتی
- فروش انرژی سالانه
- ایستگاه‌های MV/LV از راه دور

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

۲-۱۱- نرم‌افزار شرکت POWERTECH

نرم‌افزار DSATools از شرکت Powertech مجموعه‌ای از ابزارهای پیشرفته تجزیه و تحلیل سیستم قدرت است که قابلیت‌های ارزیابی کامل امنیت سیستم، از جمله همه اشکال پایداری را فراهم می‌کند. نرم‌افزار DSA آنلاین، از اطلاعات زمان-واقعی به دست آمده از طریق SCADA/WAMS و ماژول تخمین حالت سیستم مدیریت انرژی (EMS) استفاده کرده و یک راه‌حل قابل اجرا برای تأمین برق مطمئن ارائه می‌دهد [۲۸]. شکل زیر اجزاء و ماژول‌ها در نرم‌افزار DSA شرکت Powertech را نمایش می‌دهد.



شکل 2-9 اجزاء و ماژول‌ها در نرم‌افزار DSA شرکت Powertech

سیستم DSA به‌عنوان یک ماژول رابط عمل می‌کند که مدیریت موارد زیر را پوشش می‌دهد [۲۸]:

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

ماژول‌های ارزیابی امنیتی: موتورهای هر ماژول (VSAT[۱]، TSAT[۲]، SSAT[۳]) به صورت یکپارچه پیکربندی شده‌اند تا وظایف تجزیه و تحلیل مورد نیاز را انجام دهند.

سخت‌افزار محاسباتی: تمام سرورهای محاسباتی تنظیم و برنامه‌ریزی‌شده‌اند تا به‌درستی کار کنند.

مدل‌ها، داده‌ها و سناریوهای تحلیل: همه مدل‌ها و داده‌های مورد نیاز، تعیین و نگهداری می‌شوند. علاوه بر این، سناریوهای تجزیه و تحلیل برای برنامه‌های کاربردی تعریف شده‌اند.

آرشیو و تصویرسازی نتایج: نتایج محاسبات و تجزیه و تحلیل برای استفاده در آینده ذخیره و بایگانی می‌شوند. ابزارهای مختلف تجسم و تصویرسازی نتایج در دسترس می‌باشد. همچنین دسترسی مستقیم به تجزیه و تحلیل پیشرفته‌تر خروجی از طریق ماژول DSAOA ™DSATools فراهم شده است.

عملیات سیستم: این قسمت شامل مجموعه‌ای از توابع برای پیکربندی سیستم، نظارت بر عملیات، امنیت سیستم و نگهداری است [۲۸].

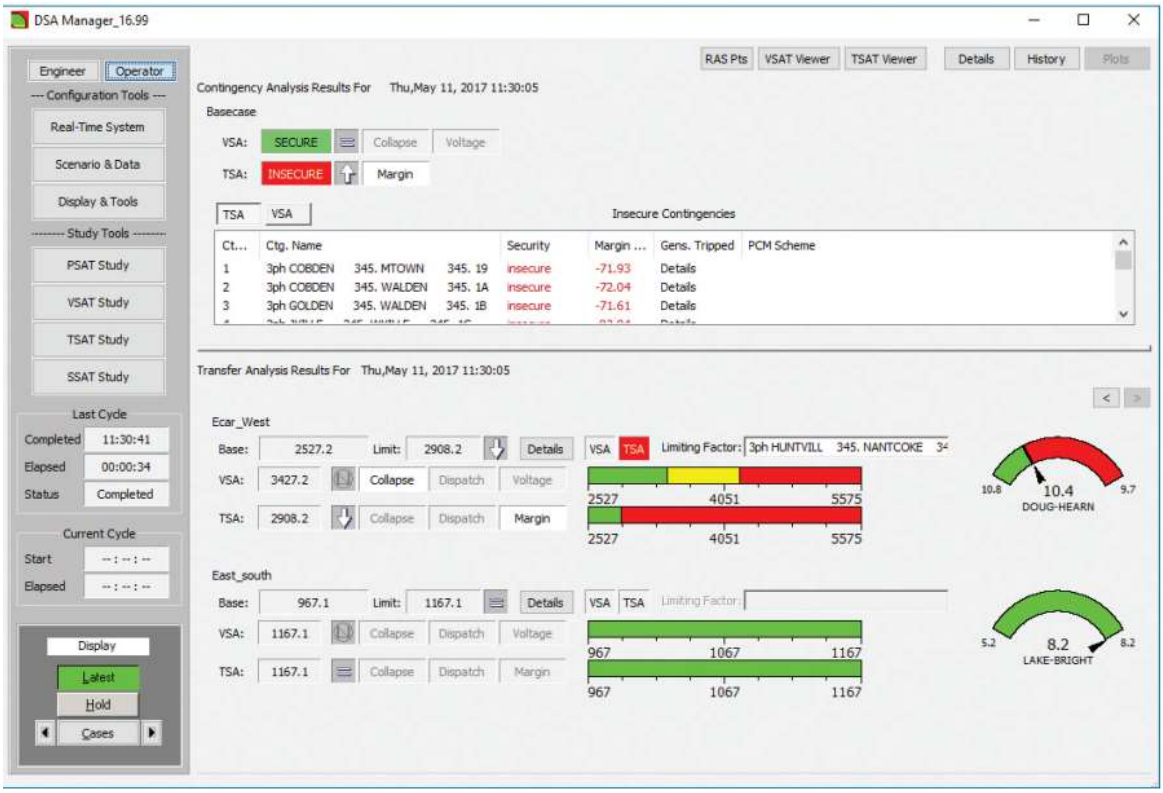
شکل زیر نمایی از GUI نرم‌افزار DSA را نشان می‌دهد.

[۱] Voltage Security Assessment Tool

[۲] Transient Security Assessment Tool

[۳] Small Signal Analysis Tool

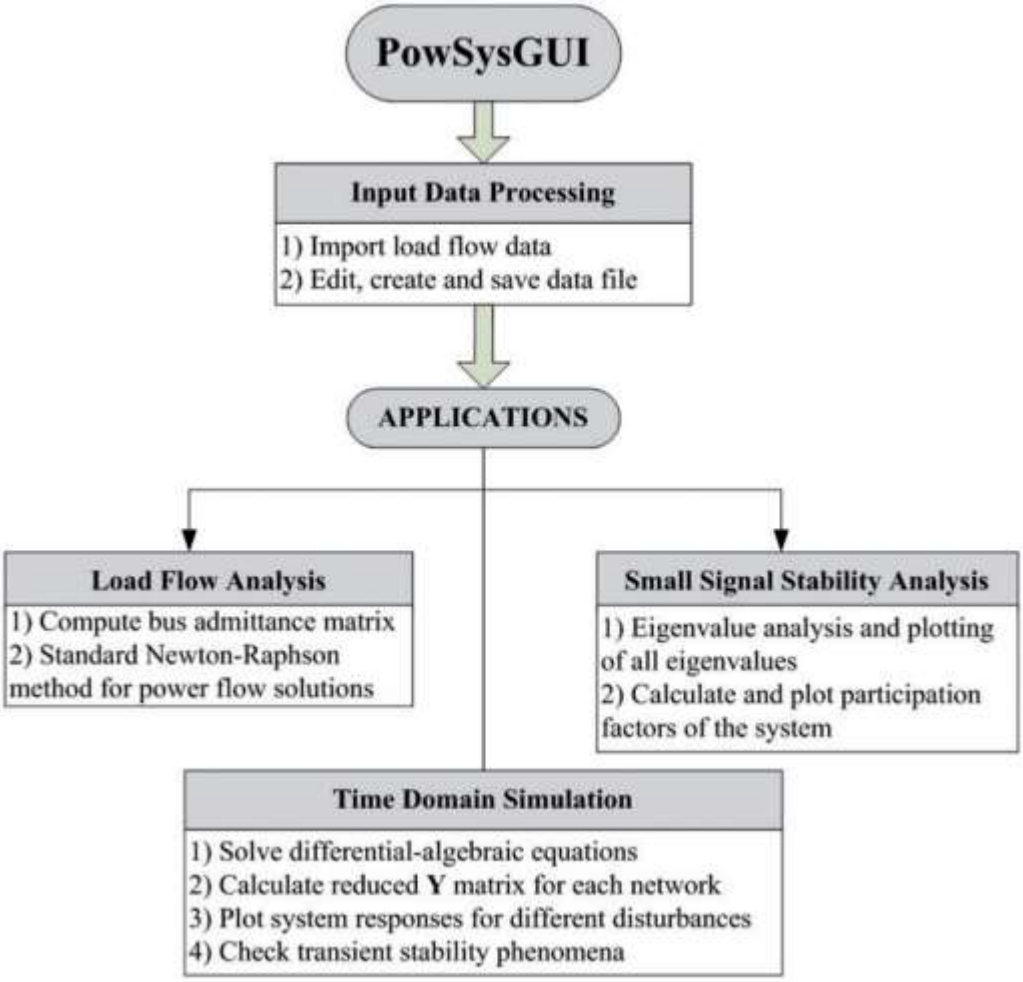
DOI: 10.30503/nripress.2020.207



شکل 2-10 نمایی از GUI نرم‌افزار DSA

DSATools یک مجموعه ابزار کامل برای برنامه‌ریزی سیستم قدرت و مطالعات عملیاتی ارائه می‌دهد. علاوه بر قابلیت‌های مدل‌سازی غنی و روش‌های محاسباتی پیشرفته، این نرم‌افزار مملو از ابزارهای مطالعه مفیدی است که بهره‌وری را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد [۲۸]. در DSATools از نرم‌افزار open-source PowSysGUI استفاده‌شده است [۲۹]. بلوک دیاگرام نرم‌افزار PowSysGUI در شکل زیر دیده می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.207



شکل 2-11 بلوک دیاگرام نرم‌افزار PowSysGUI

۲-۱۲- نرم‌افزار شرکت GE

نرم‌افزار PowerOn™ Control از شرکت GE یک مجموعه نرم‌افزار کامل است که نیازهای عملیاتی و کنترلی سیستم توزیع را برطرف می‌کند. همه برنامه‌های PowerOn Control SCADA و DMS به طور کامل در یک پلت‌فرم امن مبتنی بر پیشرفته‌ترین فناوری‌ها ادغام شده‌اند. به این ترتیب ویژگی‌هایی را ارائه می‌دهند که به کاربران در دستیابی به امنیت، قابلیت اطمینان و اهداف مالی کمک می‌کنند. سیستم‌های کنترل PowerOn به کاربران درباره رویدادهای مهمی که بر شبکه تأثیر می‌گذارند هشدار می‌دهند. همچنین به کاربران اجازه می‌دهند تا برای کنترل شبکه، به حداقل رساندن قطعی، محافظت از شبکه و اطمینان از امنیت عمومی، واکنش سریع نشان دهند. ابزارهای پشتیبانی تصمیم داخلی و توابع کنترل خودکار، عملکرد نرم‌افزار را در تمام سطوح بهبود بخشیده، هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده و اهداف نظارتی و شرکتی را برآورده می‌کنند.

PowerOn Control شامل یک پلت‌فرم یکپارچه SCADA پیشرفته است که با استفاده از هر یک از رابط‌های استاندارد موجود امروزی مانند SOA، EAI، ICCP، DNP، IEC، ODBC، SQL و موارد دیگر، به‌طور یکپارچه در زیرساخت‌های IT و مرکز کنترل قرار می‌گیرد [۳۰]. شکل زیر نمایی از اجزاء نرم‌افزار PowerOn Control را نشان می‌دهد.



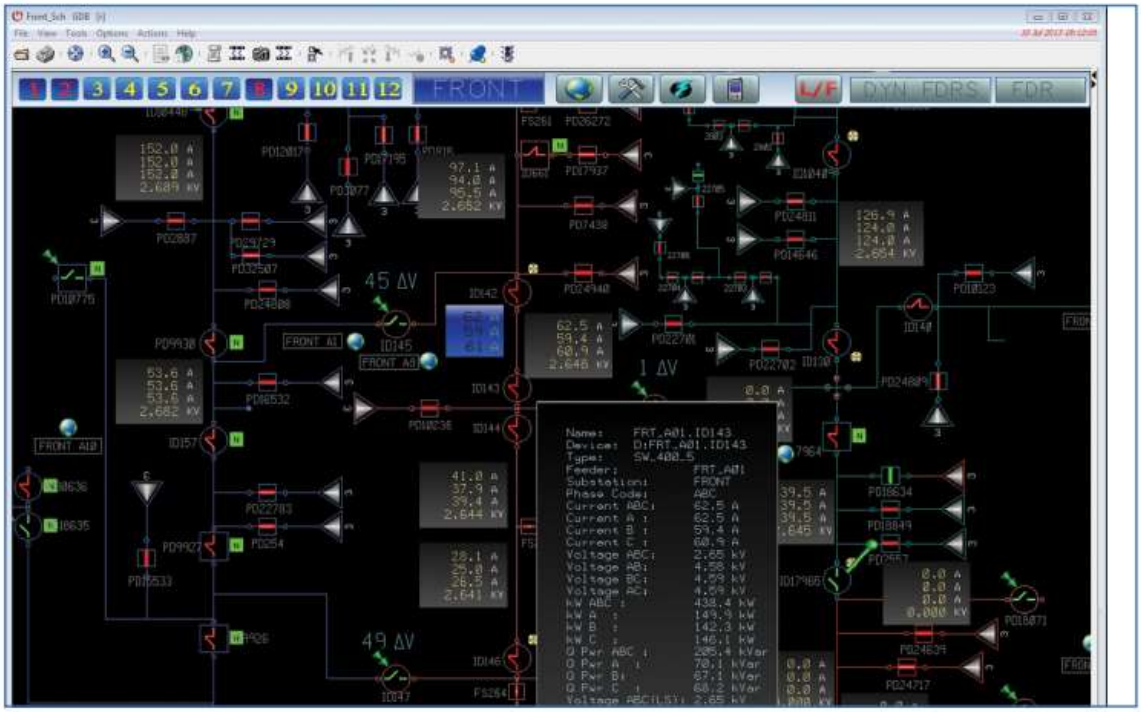
شکل 2-12 نمایی از اجزاء نرم‌افزار PowerOn Control

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

۲-۱۲-۱- پخش بار و تخمین حالت در نرم‌افزار PowerOn Control: مشاهده‌پذیری در سطح شبکه توزیع

ماژول‌های پخش بار و تخمین حالت در نرم‌افزار PowerOn Control به طور فوق‌العاده‌ای دید کاربران از شبکه توزیع را بهبود بخشیده و به آن‌ها اجازه می‌دهند تا در برابر خطرات عملکرد، قابلیت اطمینان و امنیت حیاتی، بدون سرمایه‌گذاری گسترده در تجهیزات نظارت از راه دور گران‌قیمت، محافظت کنند.

این برنامه‌ها از پروفیل‌های بار تخمینی در نقاط توزیع مشتری و همچنین اندازه‌گیری‌های SCADA از ولتاژ و جریان (در داخل پست و هر نقطه در طول فیدر) برای محاسبه ولتاژها، جریان‌ها و تلفات فاز جداگانه در کل شبکه توزیع استفاده می‌کنند. دید افزایش‌یافته مزایایی مانند تشخیص مشکلات سیستم ازجمله نقض ولتاژ و ارزیابی دقیق تلفات سیستم را ارائه می‌دهد. الگوریتم تخمین‌گر حالت پیشرفته به طور خودکار وضعیت شبکه و حتی پارامترهای شبکه را برای مطابقت با مقادیر محاسبه‌شده و اندازه‌گیری‌شده تصحیح می‌کند. همچنین محاسبات دقیق ماژول پخش بار، اطلاعات مورد نیاز سایر توابع پیشرفته نرم‌افزار PowerOn Control DMS را فراهم می‌کند [۳۰]. شکل زیر نمایی از GUI محاسبات پخش بار در فیدر در نرم‌افزار PowerOn Control را نمایش می‌دهد.

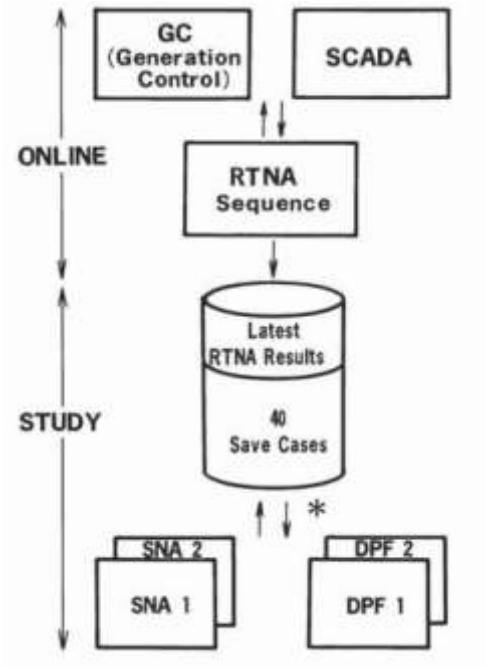


شکل 2-13 نمایی از GUI محاسبات پخش بار در فیدر در نرم‌افزار PowerOn Control

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

۲-۱۳- نرم‌افزار شرکت KEPCO

شرکت برق کره (KEPCO) تنها شرکت برق در جمهوری کره است که نیازهای کل کشور را برای سطوح تولید، انتقال و توزیع برق پوشش می‌دهد. نرم‌افزار PAS[۱] که یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای کاربردی موجود در جهان در نظر گرفته می‌شود، در سیستم جدید مدیریت انرژی (EMS) برای مرکز کنترل ملی KEPCO پیاده‌سازی شده است تا به طور مداوم شبکه برق کره را نظارت و راه‌اندازی کند. شکل زیر نمای کلی از نرم‌افزار PAS را نشان می‌دهد [۳۱].



شکل 2-14 نمای کلی از نرم‌افزار PAS

دنباله RTNA[۲] مجموعه بسیار قدرتمندی برای توزیع‌کنندگان است که می‌تواند به‌طور مداوم یک شبکه بزرگ و پیچیده قدرت مانند KEPCO را در سطح امنیتی بالا نظارت و راه‌اندازی کند. RTNA با هر

[۱] Power Application Software

[۲] Real-Time Network Analysis

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

تغییر قابل توجهی در وضعیت شبکه برق مانند تغییر وضعیت بریکر یا به صورت دوره‌ای (هر ۳۰ دقیقه) انجام شده و یا به صورت دستی تنظیم می‌شود. برنامه‌های زیر RTNA را تشکیل می‌دهند [۳۱]:

- تحلیل امنیت (SA[۱])
- دیسپاچینگ اقتصادی با محدودیت امنیتی (SCED[۲])
- کنترل ولتاژ (VC[۳])
- حساسیت شبکه (NS[۴])
- محاسبه ضریب پنالتی (PF[۵])
- بازیابی آنالوگ و وضعیت (SAR[۶])
- مدل‌ساز شبکه (NMB[۷])
- تخمین حالت (SE[۸])

ماژول تخمین حالت برنامه‌ای کلیدی در RTNA محسوب می‌شود. این ماژول محتمل‌ترین حالت‌های شبکه را بر اساس مدل باس به دست آمده از ماژول NMB و داده‌های دورسنجی جمع‌آوری‌شده توسط ماژول SAR که شامل افزونگی‌ها می‌شود، تخمین می‌زند. فرآیند ماژول تخمین حالت دنباله RTNA که توسط KEPCO ارائه شده، در شکل زیر نشان داده شده است [۳۱].

---

۱ Security Analysis-AC Solution

۲ Security Constrained Economic Dispatch

۳ Voltage Control

۴ Network Sensitivity

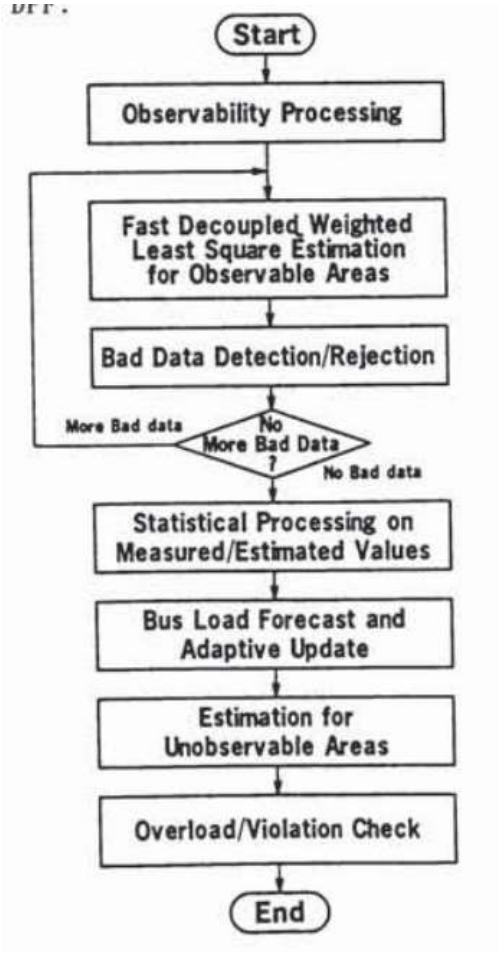
۵ Penalty Factor Calculation

۶ Status & Analog Retrieval

۷ Network Model Builder

۸ State Estimator

DOI: 10.30503/nripress.2020.207



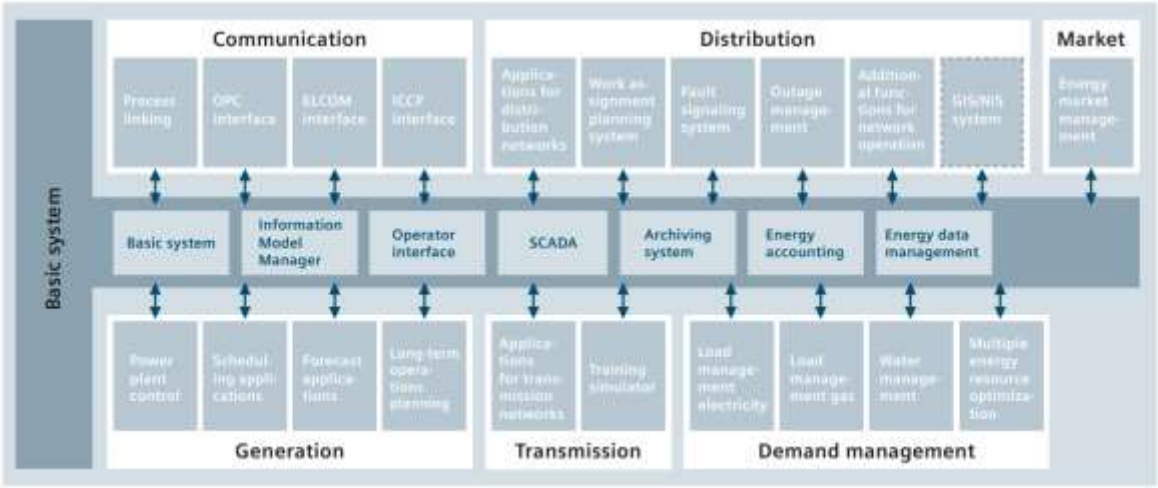
شکل 2-15 ماژول SE در KEPCO

۲-۱۴- نرم‌افزار شرکت SIEMENS

در شکل زیر نمایی از سیستم کنترلی شرکت زیمنس نشان داده شده است. تخمین‌گر حالت در سطح انتقال و در مجموعه برنامه‌های کاربردی شبکه انتقال (TNA[۱]) قرار دارد [۳۲].

[۱] Transmission Network Applications

DOI: 10.30503/nripress.2020.207



شکل 2-16 ماژول‌های مرتبط در سیستم کنترل شرکت SIEMENS

مجموعه برنامه‌های کاربردی شبکه انتقال (TNA) ابزارهایی را برای نظارت پیشرفته، ارزیابی امنیتی و بهبود عملیاتی عملکرد یک شبکه انتقال الکتریکی فراهم می‌کند؛ از جمله:

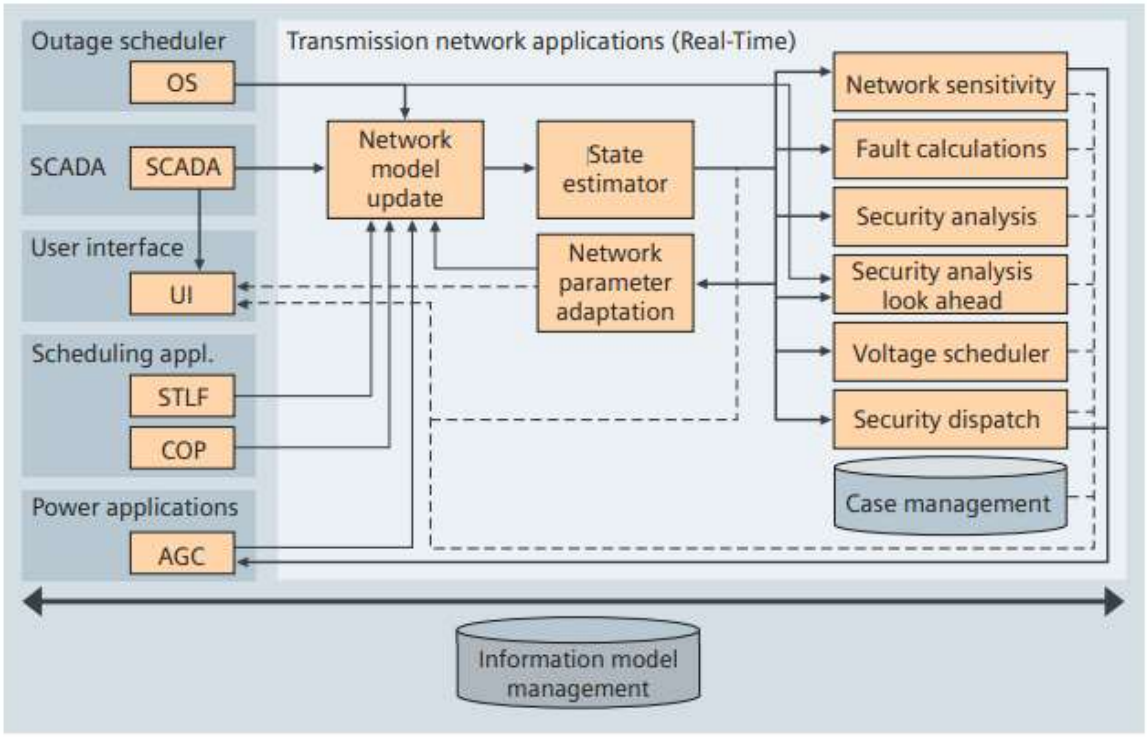
- ارائه یک ارزیابی سریع و قابل فهم از وضعیت فعلی شبکه و بهبود نظارت
- ارزیابی امنیت در برابر خطاها و قطعی‌ها
- ارائه اقدامات پیشگیرانه / اصلاحی در برابر رویدادهای برنامه‌ریزی‌شده / موجود
- بهینه‌سازی عملیات در برابر هزینه‌ها و ضررها

این توابع به طور قابل توجهی قابلیت اطمینان عملیاتی و کارایی را در مدیریت شبکه افزایش می‌دهند. TNA به‌طور خودکار به بسیاری از شرایط عملیاتی مختلف (ایمن، ناامن، اضطراری) پاسخ می‌دهد تا پشتیبانی مناسب را برای اپراتور فراهم کند. در میان بسیاری از ویژگی‌های دیگر، TNA همچنین از حالت مطالعه پشتیبانی می‌کند که به کاربران اجازه می‌دهد مطالعات مختلفی از جمله تهیه استراتژی‌های اصلاحی، تهیه برنامه عملیاتی روز بعد، تجزیه و تحلیل رویدادهای عملیاتی پس از خاموشی و غیره را انجام دهند [۳۲].

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

۲-۱۴-۱- تخمین‌گر حالت در TNA

هدف از تابع تخمین‌گر حالت در TNA، ارائه یک شبکه قابل اعتماد و کامل از اندازه‌گیری‌های زمان-واقعی، شبه‌اندازه‌گیری‌های به دست آمده از به‌روزرسانی مدل (MU[۱]) و ورودی‌های اپراتور است. تخمین‌گر حالت، بخش‌های قابل‌مشاهده شبکه که اندازه‌گیری‌های زمان-واقعی در آن‌ها افزونه هستند را شناسایی می‌کند. با استفاده از این افزونگی، تخمین‌گر حالت، اندازه‌گیری‌های «بد» را شناسایی کرده و آن‌ها را از مجموعه اندازه‌گیری‌های معتبر حذف می‌کند [۳۲]. شکل زیر نمایی از ارتباطات ماژول‌ها و توابع در سطح شبکه انتقال در نرم‌افزار شرکت SIEMENS را نشان می‌دهد. ابزار مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل شبکه انتقال شرکت SIEMENS، PSS®ODMS نام دارد.



شکل 2-17 نمایی از ارتباطات ماژول‌ها و توابع در سطح شبکه انتقال در نرم‌افزار شرکت SIEMENS

[۱] Model Update

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

۲-۱۵- جمع‌بندی

در این فصل، به شناسایی برخی از مهم‌ترین نرم‌افزارهای ارائه‌شده در دنیا پرداخته شد که دارای ماژول تخمین حالت قابل عرضه می‌باشند. سپس به طبقه‌بندی نرم‌افزارها در این حوزه و بررسی راه‌حل‌های نرم‌افزاری موجود برای تخمین‌گر حالت شامل نرم‌افزارهای برنامه‌ریزی و تحلیل و نرم‌افزارهای سیستم مدیریت توزیع، پرداخته شد. سپس مطالعه و بررسی برخی از مهم‌ترین نرم‌افزارهای شناسایی‌شده که دارای ماژول تخمین حالت قابل عرضه می‌باشند، شامل نرم‌افزارهای شرکت‌های ABB، CYME، OSI، ETAP، DIgSILENT، SIEMENS، KEPCO، NEPLAN و GE انجام شد. در فصل بعد، به مقایسه این نرم‌افزارها و انتخاب نرم‌افزار مناسب جهت تعیین الزامات و قابلیت‌های نرم‌افزار بومی تخمین حالت پرداخته خواهد شد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

فصل سوم: مقایسه نرم‌افزارها

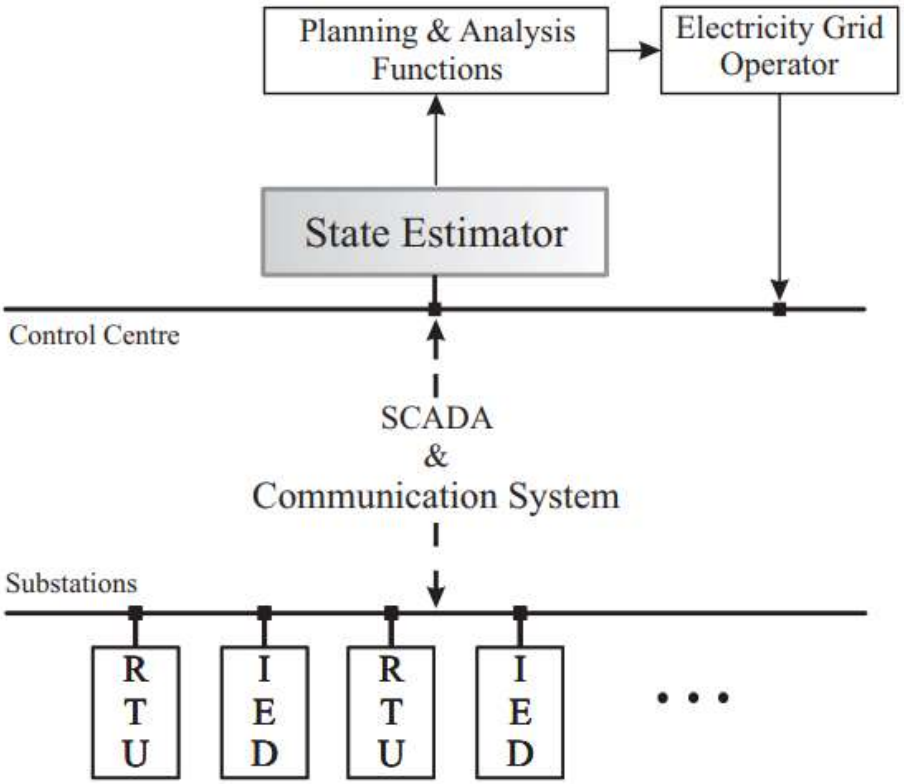
۳-۱- مقدمه

در این فصل، به جمع‌بندی ماژول تخمین حالت و سپس به مقایسه نرم‌افزارهای بررسی‌شده در فصل قبل پرداخته خواهد شد.

۳-۲- جمع‌بندی اجزاء ماژول تخمین حالت

همان‌طور که در فصل اول به طور مفصل اشاره شد، ماژول تخمین حالت اکنون بخش مهمی از سیستم مدیریت انرژی (EMS) به شمار می‌رود. شکل ۳-۱ موقعیت این ماژول را با سایر اجزاء نشان می‌دهد. داده‌های جمع‌آوری‌شده با استفاده از واحدهای پایانه راه دور (RTU) و دستگاه‌های الکترونیکی هوشمند (IED) از سراسر شبکه از طریق یک سیستم SCADA به مرکز کنترل منتقل می‌شوند. با این حال، داده‌های خام ممکن است همیشه به دلیل نویز اندازه‌گیری و خطاها قابل اعتماد نباشند. علاوه بر این، مجموعه اندازه‌گیری‌های ارسالی ممکن است برای تعیین وضعیت عملکرد سیستم نیز کافی نباشد. علاوه بر این، حتی اگر از نظر فنی امکان‌پذیر باشد، انتقال همه اندازه‌گیری‌ها حتی در صورت موجود بودن مقرون‌به‌صرفه نیست. به همین دلیل، راه‌حل تخمین‌گر حالت، بر اساس اندازه‌گیری‌های موجود و مدل فرضی سیستم، تخمین بهینه‌ای از حالت سیستم را ارائه می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر، تخمین حالت در واقع یک روش سیستماتیک (رویه ریاضی) برای پردازش مجموعه اندازه‌گیری‌ها و دستیابی به بهترین تخمین از حالت فعلی سیستم است. خروجی تخمین‌گر حالت توسط توابع کاربردی EMS مانند تحلیل پیشامد، کنترل خودکار تولید، پیش‌بینی بار، پخش بار بهینه و غیره استفاده می‌شود. در واقع، تخمین‌گر حالت سیستم قدرت مانند یک فیلتر بین اندازه‌گیری‌های خام جمع‌آوری‌شده از شبکه و توابع کاربردی که به یک پایگاه داده قابل‌اعتماد نیاز دارند، عمل می‌کند [۱۲].

DOI: 10.30503/nripress.2020.207



شکل 3-1 نمایی از ارتباطات ماژول تخمین‌گر حالت در سیستم قدرت

همچنین همانطور که در فصل اول اشاره شد، ماژول تخمین‌گر حالت دارای سه لایه داده، عملکرد و کاربرد است که به طور کامل در فصل اول بررسی شدند. به طور خلاصه، لایه داده شامل اندازه‌گیری‌های سیستم، شبه‌اندازه‌گیری‌ها و مدل و توپولوژی شبکه است. لایه عملکرد شامل تحلیل مشاهده‌پذیری و خود الگوریتم تخمین حالت و لایه کاربرد شامل تشخیص و شناسایی داده‌های نادرست و تشخیص توپولوژی و تخمین پارامترها است.

۳-۳- مقایسه نرم‌افزارها

در جدول زیر سعی شده تا خلاصه‌ای از ویژگی‌های ارائه شده توسط نرم‌افزارهای معرفی شده تخمین‌گر حالت ارائه شود تا بتوان به طور مناسب بهترین نرم‌افزار را بر اساس شرایط و نیازمندی‌های موجود در کشور انتخاب کرد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

جدول 3 ا خلاصه‌ای از ویژگی‌های ارائه شده توسط نرم‌افزارهای معرفی شده تخمین‌گر حالت

شرکت تجاری	نرم‌افزار استفاده شده	ویژگی‌ها و قابلیت‌های نرم‌افزار مرتبط با تخمین‌گر حالت
شرکت *ABB*	*SPIDER™*	تشخیص اندازه‌گیری‌های بد محاسبه بایاس در اندازه‌گیری‌ها برآورد انحراف معیار اندازه‌گیری‌های آنالوگ تشخیص اضافه بار شاخه‌ها به روز رسانی پارامترها
	ABB Network Manager	تخمین وضعیت شبکه (کالیبراسیون بار در زمان-واقعی) محاسبات پخش بار محاسبات اتصال کوتاه پیکربندی بهینه مجدد فیدر کاهش تلفات (کنترل *MVAr*) مدیریت بار تشخیص محل خطا، جداسازی و بازیابی سیستم (*FLISR*) سوئیچینگ خودکار *[۳۳]*
شرکت *CYME*	پکیج *CYMDIST*	تخمین پخش بار نامتعادل پردازش انواع اندازه‌گیری‌ها با دقت‌های مشخص‌شده مدیریت افزونگی در اندازه‌گیری‌ها تخمین موقعیت تپ ترانسفورماتور تحت بار و رگولاتور ولتاژ امکان در نظر گرفتن تولیدات پراکنده ارائه شاخص‌های کیفیت تخمین حالت حذف داده‌های بد انجام مقداردهی اولیه بار برای سایر تحلیل‌های سیستم توزیع کمک به شناسایی خطاهای احتمالی در توپولوژی و اندازه‌گیری‌ها
شرکت *NEXANT*	نرم‌افزار *Grid360*	تخمین حالت و تخمین توپولوژی تشخیص و برطرف کردن اندازه‌گیری‌های بد

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

		استفاده از یک رابط کاربری گرافیکی غنی و مبتنی بر مرورگر اعتبارسنجی داده‌های مدل شبکه توزیع تجزیه و تحلیل مکان خطا بهینه سازی ولتاژ فیدر کاهش ولتاژ حفاظتی[1]
شرکت *OSI*	نرم‌افزار *Spectra* ™	مدل‌سازی و مدیریت شبکه توزیع نظارت و کنترل سیستم قدرت مدیریت خاموشی‌های برنامه‌ریزی‌شده و برنامه‌ریزی‌نشده دیسپاچینگ کارکنان و مدیریت کار میدانی تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد شبکه یکپارچه‌سازی تولیدات تجدیدپذیر و تولید پراکنده
شرکت *ETAP*	*ETAP* در سطح انتقال	تخمین حالت زیرسیستم‌های مشاهده‌ناپذیر مقایسه مقادیر اندازه‌گیری‌شده با مقادیر تخمینی آن‌ها همگرایی سریع و قابل اعتماد نیاز حداقلی به اندازه‌گیری‌های سیستم استفاده از روش‌های به روز تخمین حالت بررسی سازگاری داده‌ها تشخیص خطا و داده‌های بد توزیع بار مقایسه‌کننده تخمین حالت
	ETAP در سطح توزیع	تخمین بارهای منفرد روی یک فیدر بر اساس کلاس‌های بار، نوع بار، منحنی بار و اندازه‌گیری‌های بار ادغام با تخمین‌گر حالت شبکه انتقال برای ارائه تصویری یکپارچه و کامل از یک سیستم انتقال و توزیع یکپارچه توانایی عمل در شبکه‌هایی با یا بدون تأیید اندازه‌گیری‌های تله‌متری

[1] Conservation Voltage Reduction

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

		توانایی عمل در شبکه‌هایی با پردازش دستی یا خودکار بخش‌های مشاهده‌ناپذیر شبکه توانایی عمل در شبکه‌هایی بدون اندازه‌گیری‌های ثابت توانایی عمل در حالت شناخته شده بودن تمام داده‌های تاریخی توانایی عمل در شبکه‌های بدون هیچ داده تاریخی
شرکت *General Electric*	*PowerOn™ Control* (*GENe*)	محاسبه ولتاژها، جریان‌ها و تلفات فاز جداگانه در کل شبکه توزیع افزایش مشاهده‌پذیری تشخیص بهبودیافته مشکلات سیستم از جمله نقض ولتاژ و ارزیابی دقیق تلفات سیستم تولید یک راه‌حل زمان-واقعی تک‌فاز، دوفاز و سه‌فاز نامتعادل و ارائه سطح بالایی از مشاهده‌پذیری برای سیستم *SCADA* پخش بار و تخمین حالت بسیار دقیق پشتیبانی از حلقه‌های *partial-phase* محاسبات پیچیده تلفات، از جمله مس ترانسفورماتور و تلفات هسته پشتیبانی از تمام پیکربندی‌های سیم‌پیچ ترانسفورماتور اولیه و ثانویه که معمولا مورد استفاده قرار می‌گیرند، از جمله ستاره، دلتا و ترانسفورماتور خودکار *[۳۴]*
شرکت *KEPCO*	نرم‌افزار *PAS*	استفاده از روش حداقل مربعات وزنی جدا شده سریع برای مدیریت شبکه بزرگ با سرعت بالا دسترسی به مشاهده‌پذیری چندین جزیره تزریق صفر[۱] به عنوان محدودیت برای دستیابی به راه‌حل‌های دقیق‌تر پردازش و نمایش باقیمانده‌های بین مقادیر دورسنجی شده و تخمینی به صورت آماری جهت آگاه‌سازی در مورد بایاس‌های اندازه‌گیری ایجاد امکان جایگزینی هر مقدار دورسنجی شده با مقادیر محاسبه شده توسط تخمین‌گر حالت

[۱] Zero Injections

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

شرکت *SIEMENS*	*PSS®ODMS*	عملکرد سریع با همگرایی قوی شناسایی اندازه‌گیری‌های بحرانی و بد تصحیح خودکار وضعیت سوئیچ گزارش‌های تنظیم توپولوژی و جهت جریان پشتیبانی از مدل‌های برنامه‌ریزی / عملیات ترکیبی پشتیبانی از اندازه‌گیری جریان در قطع‌کننده / سوئیچ تخمین *sub-transmision* (ولتاژ پایین) با تله‌متری به طور قابل اعتماد پشتیبانی از محدودیت‌های جریان تله‌متری *[۳۵]*
شرکت *DIgSILENT*	*DIgSILENT PowerFactory*	قابلیت اندازه‌گیری *P*، *Q*، *I* و *V* بررسی‌های محتمل و معقول بودن اندازه‌گیری‌ها شناسایی/حذف خودکار داده‌های بد قابلیت مشاهده‌پذیری سیستم گزینه‌های مختلف برای رسیدگی به مناطق غیر قابل مشاهده در نظر گرفتن محدودیت‌های جریان بار

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

فصل چهارم: نتیجه‌گیری

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

۴-۱ نتیجه‌گیری

در این فصل، بر اساس شرایط و نیازمندی‌های موجود در کشور به انتخاب مناسب‌ترین نرم‌افزار جهت تعیین الزامات و قابلیت‌های نرم‌افزار بومی تخمین حالت پرداخته می‌شود.

نرم‌افزار DIgSILENT PowerFactory که توسط شرکت DIgSILENT GmbH ارائه می‌شود، یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای تحلیل شبکه است که در هر سه حوزه تولید، انتقال و توزیع کاربرد دارد. این نرم‌افزار را می‌توان به عنوان نمونه موفقی از نرم‌افزارهای کاربردی موجود در دنیا در نظر گرفت که دارای ماژول تخمین حالت می‌باشد. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان محاسباتی همچون پخش بار، اتصال کوتاه، آنالیز گذرا و تخمین حالت که در قالب توابع متنوع ارائه می‌شوند را انجام داد. افزون بر این توابع، امکانات دیگری مانند برنامه‌نویسی به زبان DPL[۱] و تعریف مدل‌های DSL[۲] به کاربر این اجازه را می‌دهد که تحلیل‌های دلخواه موردنظر را روی سیستم قدرت اجرا کرده و امکانات جدید به کتابخانه نرم‌افزار اضافه نماید.

این نرم‌افزار نه تنها ابزارهای متنوع و محیط کاربرپسندی را در اختیار کاربران قرار می‌دهد؛ بلکه پیچیدگی‌های سایر نرم‌افزارهای آنالیز سیستم قدرت را نداشته و کاربر در استفاده از این نرم‌افزار امکانات فراوانی را در دست خواهد داشت. از دیگر امکانات این نرم‌افزار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۳۶]:

- امکان مدیریت اطلاعات پروژه به صورت تک و چندکاربره
- بانک اطلاعات با ذخیره‌سازی داده‌های تاریخی
- محاسبات اقتصادی[۳] پخش بار
- محاسبات پخش بار AC/DC

[۱] DIgSILENT Programing Language

[۲] DIgSILENT Simulation Language

[۳] Economic Dispatch

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

- تحلیل و محاسبات خطا و حوادث[۱]
- محاسبات شبیه‌سازی دینامیکی[۲] و راه‌اندازی موتور
- شبیه‌سازی حالت‌های گذرای الکترومغناطیسی[۳]
- محاسبات و تحلیل مقادیر ویژه[۴] و کاهش شبکه[۵]
- برنامه نویسی DSL و DPL
- هماهنگی رله‌ها [۶] و اینترفیس اسکادا [۷]
- تحلیل هارمونیکی[۸]
- محاسبات قابلیت اطمینان[۹]

علاوه بر مزایای ذکر شده، این نرم‌افزار به عنوان یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای تحلیل شبکه به شمار می‌رود که سالیان سال است در کشورمان با اقبال گسترده کاربران صنعت برق و دانشگاهی روبرو شده است. این نرم‌افزار به دلیل قدرت و صحت نتایج آن، در شرکت‌های برق منطقه‌ای، شرکت‌های توزیع و مراکز آموزشی و پژوهشی مختلف دارای کاربرد بوده و توسط آن‌ها خریداری شده است. بنابراین دسترسی

---

۱ Event/Fault General Analysis

۲ Dynamic RMS Simulation

۳ EMT Simulation

Analysis Value ۴ Eigen

۵ Network Reduction

۶ Relay Coordination

۷ GIS/SCADA Interface

۸ Harmonic Analysis

۹ Reliability Calculation

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

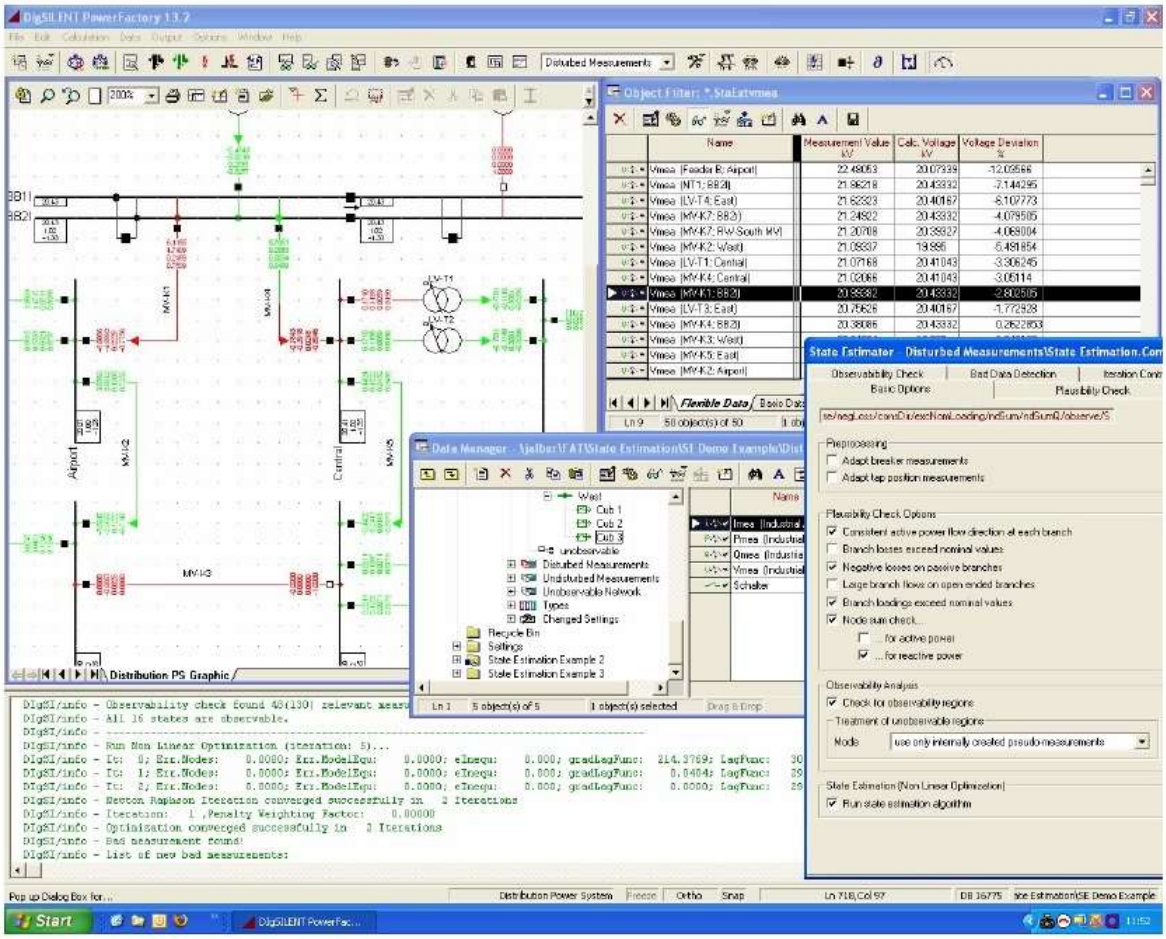
به این نرم‌افزار و آشنایی با آن در کشور نسبت به سایر نرم‌افزارها بیشتر می‌باشد؛ که خود دلیلی مزید بر سایر مزایای مذکور برای این نرم‌افزار می‌باشد.

در کنار مزایایی که برای نرم‌افزار DIgSILENT ذکر شد، ماژول تخمین حالت این نرم‌افزار نیز مزایا و قابلیت‌هایی به شرح زیر دارد [۳۷].

- تخمین حالت در سطوح مختلف شبکه شامل توزیع و انتقال
- دسترسی به اطلاعات این ماژول شامل ورودی‌ها، خروجی‌ها، الگوریتم تخمین حالت (تابع هزینه و روش بهینه‌سازی غیرخطی)
- امکان پیش‌پردازش اطلاعات مانند تنظیم وضعیت مدارشکن‌ها و موقعیت تپ‌ها با توجه به سیگنال‌های اندازه‌گیری‌شده آن‌ها
- شناسایی و جداسازی داده‌های بد
- تحلیل مشاهده‌پذیری و حل مسأله بهینه‌سازی غیرخطی بر اساس روش‌های مختلف برای مواجهه با مناطق مشاهده‌ناپذیر شبکه
- امکان اجرای تخمین حالت در یک محیط آنلاین برای تحلیل زمان-واقعی دقیق از کل سیستم بر اساس اطلاعات دریافتی از اسکادا

شکل زیر یک اسکرین‌شات از نرم‌افزار DIgSILENT PowerFactory برای یک سناریوی کاربردی با استفاده از تخمین حالت را نشان می‌دهد [۳۷].

DOI: 10.30503/nripress.2020.207



شکل ۴-۱ نمایی از محیط کاربری ماژول تخمین حالت نرم‌افزار DIgSILENT PowerFactory

همان‌طور که گفته شد، تخمین‌گر حالت DIgSILENT PowerFactory قبل از مرحله تخمین حالت، در مرحله بررسی مقبولیت به شناسایی و جداسازی همه اندازه‌گیری‌ها با خطای ظاهری بر اساس معیارهای مختلف می‌پردازد.

در این مرحله، هر کدام از اندازه‌گیری‌ها که در هر یک از بررسی‌های مقبولیت زیر ناموفق باشد، حذف شده و در مرحله تخمین حالت در نظر گرفته نخواهد شد [۳۷].

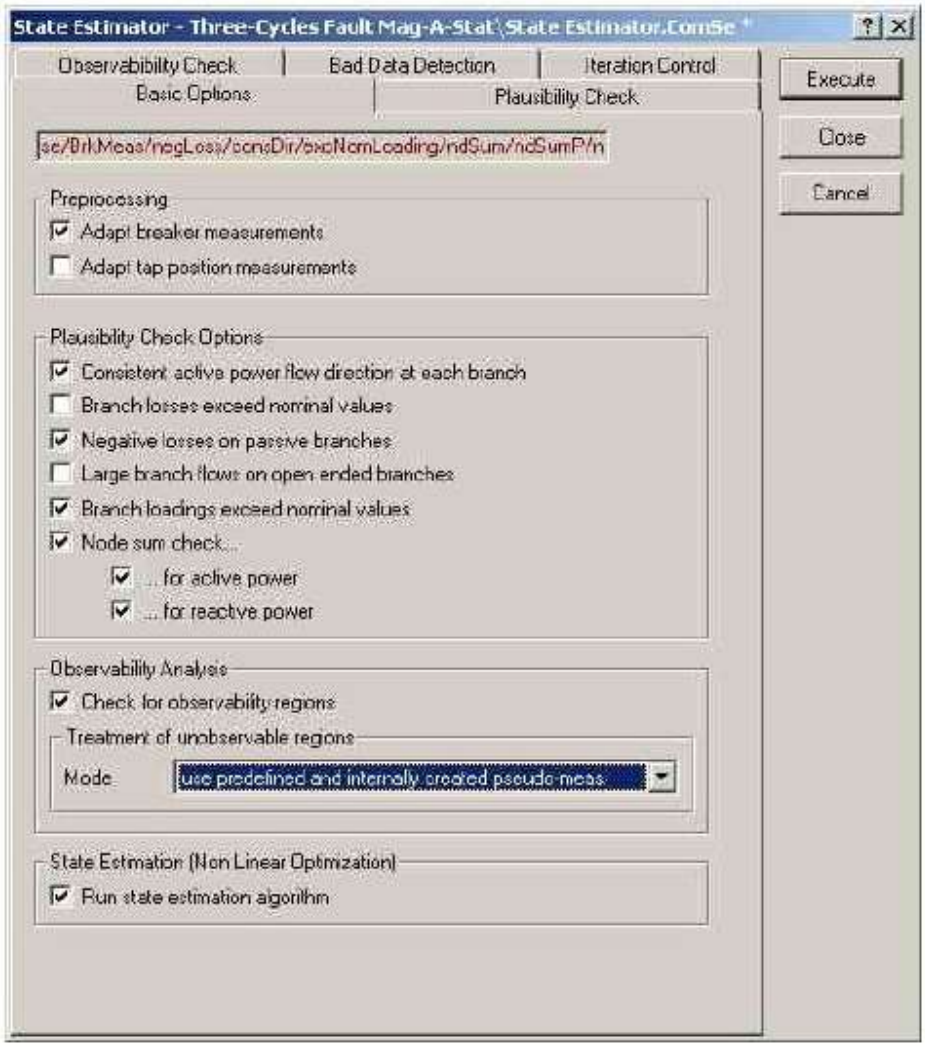
- بررسی جهت شارش توان اکتیو سازگار در هر سمت عناصر انشعابات
- بررسی تلفات انشعابات بسیار بزرگ که از مقادیر اسمی خود بیشتر باشند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

- بررسی تلفات منفی در عناصر غیرفعال انشعابات
- بررسی جریان انشعابات بزرگ روی عناصر شاخه باز
- بررسی عدول بارگذاری اندازه‌گیری‌شده در انشعابات از مقادیر بارگذاری اسمی عناصر انشعابات
- بررسی مجموع توان اکتیو و راکتیو در گره‌ها

علاوه بر این، در DIgSILENT PowerFactory، این بررسی‌های مقبولیت را می توان به صورت جداگانه نیز انجام داد. در شکل زیر، تنظیمات مربوط به بررسی مقبولیت در ابزار تخمین حالت DIgSILENT PowerFactory مشاهده می‌شود. کاربر می‌تواند مورد به مورد از میان این بررسی‌های مقبولیت انتخاب کند. نتیجه بررسی مقبولیت، برای هر اندازه‌گیری با قابلیت مرتب‌سازی، گزارش و تصویرسازی ارائه می‌شود [۳۷].

DOI: 10.30503/nripress.2020.207



شکل ۴-۲ تنظیمات بررسی مقبولیت در ماژول تخمین حالت نرم‌افزار DIgSILENT PowerFactory

با توجه به تمامی مزایا و قابلیت‌های ذکر شده برای نرم‌افزار DIgSILENT PowerFactory و ماژول تخمین حالت آن، می‌توان با مطالعه و بررسی بر روی این نرم‌افزار، الزامات و قابلیت‌های یک نسخه بومی از نرم‌افزار تخمین حالت را تعیین کرد.

فهرست منابع

[1] Bandak, C. E. (2013). Power systems state estimation (Doctoral dissertation, California State University, Sacramento).

[2]"Power System State Estimator Market By Software Type (Utility & Power Control Centers), Application (Transmission & Distribution Networks) and Solution Methods (WLS, LAV, Kalman Filter, Bayesian, Newton Gaussian) - Global Trends & Forecasts To 2019," 2014. [Online]. Available: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/power-system-state-estimator-market-162531821.html

[3] "Power System State Estimators - Global Market Trajectory & Analytics," 2022. [Online]. Available: https://www.researchandmarkets.com/reports/5141214/power-system-state-estimators-global-market

[4] "https://nptel.ac.in/courses/108/104/108104051/."

[5] "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions," IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, Aug. 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.825981.

[6] A. Gulati, N. Gulati, and S. K. Solanki, "Overview of State Estimation Technique for Power System Control," IOSR J. Electr. Electron. Eng., vol. 8, no. 5, pp. 51–55, 2013.

[7] J. Zhao, G. Zhang, Z. Y. Dong, and M. La Scala, "Robust forecasting aided power system state estimation considering state correlations," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 4, pp. 2658–2666, 2016.

[8] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, and G. B. Sheblé, Power generation, operation, and control., 3rd ed. Wiley, 2017.

[9] "2022-2030 World Power System State Estimator Market Report Professional Analysis 2022," 2022. [Online]. Available: https://www.htfmarketreport.com/reports/3596778-2020-2025-global-power-system-state-estimator-market-report-production-and-consumption-professional-analysis

[10] Razanousky, M., & Morrissey, K. (2022). Fundamental Research Challenges for Distribution State Estimation to Enable High-Performing Grids. Final Report, NYSERDA (2018).

[11] Farzanehrafat, A., & Watson, N. R. (2010, December). Review of power quality state estimation. In 2010 20th Australasian Universities Power Engineering Conference (pp. 1-5). IEEE.

[12] Ahmad, F., Rasool, A., Ozsoy, E., Sekar, R., Sabanovic, A., & Elitaş, M. (2018). Distribution system state estimation-A step towards smart grid. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 81, 2659-2671.

[13] https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/power-system-state-estimator-market-162531821.html

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

[14] Ekinci, S., Demiroren, A., & Zeynelgil, H. L. (2017). PowSysGUI: A new educational software package for power system stability studies using MATLAB/Simulink. International Journal of Electrical Engineering Education, 54(4), 283-298.

[15]https://library.e.abb.com/public/7ea594006f544abfc1257b0c0055220f/State%20Estimation.pdf.

[16] Rubeša, R., Ivanković, I., Rekić, M., & Jukić, A. (2019, April). Condition for Establishing Voltage Var Control Function Considering Quality of Input Data. In 2019 2nd International Colloquium on Smart Grid Metrology (SMAGRIMET) (pp. 1-6). IEEE.

[17] "https://www.cyme.com/software/cymdist/BR917045EN-Distribution.pdf."

[18] "https://www.cyme.com/software/cymestateestim/BR917067EN-Distr-State-Estim.pdf."

[19] https://www.nexant.com/sites/default/files/knowledge_center/Nexant-Grid360-DataSheet_final.pdf

[20] "https://www.osii.com/solutions/products/distribution-management.asp."

[21] "https://etap.com/product/state-estimation-software."

[22] "ETAP Solutions, A Unified Digital Twin Platform Design, Operation, and Automation," 2020. [Online]. Available: https://etap.com/docs/default-source/brochures/etap-solutions-overview.pdf?sfvrsn=88144c7c_74

[23] "https://etap.com/product/distribution-state-estimation."

[24] DIgSILENT PowerFactory, Integrated Power System Analysis Software, 2002.

[25] PowerFactory 2020, User Manual.

[26] https://www.neplan.ch/wpcontent/uploads/2019/10/PamphletNEPLAN_V10_E-1.pdf

[27] https://www.neplan.ch/wp-content/uploads/2015/01/Full-paper-0435-Peter-Vinter-Hans-Knudsen.pdf

[28] https://www.dsatools.com/wp-content/uploads/2020/01/DSA-Manager-Brochure-001.pdf

[29] PowSysGUI: A new educational software package for power system stability studies using MATLAB/Simulink

[30] https://www.gegridsolutions.com/products/brochures/uos/poweron_control.pdf

DOI: 10.30503/nripress.2020.207

[31] Kim, Y. H., Lee, H. S., Fukushima, N., & Hayashi, H. (1990). Implementation of advanced power application software to KEPCO's energy management system. In Power Systems and Power Plant Control 1989 (pp. 285-289). Pergamon.

[32] Principle of energy management, siemens, power energy guid, edition 7.8

[33]https://library.e.abb.com/public/d812ff32efa92201852575fa00562955/BR_SCADA_DMS.pdf

[34] https://www.gegridsolutions.com/products/brochures/uos/loadflowdemest.pdf

[35]https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:cf604335c8712767e27b6986b9505ea0ada9d9ed/odms-brochure-may-2017-intl-version-withactivehyperlinks-lores-s.pdf

[36] https://digsilentfile.ir/

[37] Alber, Jochen. (2023). State Estimation in PowerFactory: Algorithmic Aspects.