پیاده‌سازی برون‌خط و برخط برنامه تخمین حالت و شبیه‌سازی حوزه زمان در یک شبکه واقعی

مصطفی عیدیانی/ موسسه آموزش عالی خراسان/ eidiani@khorasan.ac.ir

چکیده

در این مقاله، نتایج حاصل از استفاده برنامه تخمین حالت[1] و شبیه‌سازی حوزه زمان[2]، در یک شبکه واقعی با نرم‌افزار دیگسایلنت ارایه‌شده است. با آنکه بیشتر از پنجاه شرکت برق منطقه‌ای و شرکت توزیع در ایران، نرم‌افزار دیگسایلنت[3] را خریداری کرده‌اند ولی هنوز از جعبه‌ابزار تخمین حالت این نرم‌افزار استفاده نمی‌کنند. در این مقاله برای نخستین بار نشان داده شده است که برای استفاده از تخمین حالت برون‌خط[4] و برخط[5] یک شبکه واقعی، به جای استفاده از برنامه‌ها و الگوریتم‌های نوشته‌شده در نرم‌افزار متلب[6] و C++ و لینک کردن آن با دیگسایلنت، می‌توان به‌طور کامل از همین نرم‌افزار استفاده کرد. این برنامه قادر است ولتاژ، جریان، توان حقیقی و موهومی، تپ ترانس و وضعیت کلیدهای شبکه را برای یک شبکه نمونه واقعی تخمین بزند ولی برنامه‌های نوشته‌شده با متلب، این توانایی را ندارند.

کلمات کلیدی: تخمین حالت، شبیه‌سازی حوزه زمان، دیگسایلنت

مقدمه

مزایای استفاده از تخمین حالت در سیستم قدرت بر کسی پوشیده نیست. [۱-۱۰]

- تشخیص اندازه‌گیری‌های نامناسب
- تخمین کمیت‌های اندازه‌گیری نشده
- تصحیح خطاهای اندازه‌گیری
- دقت بیشتر نسبت به پخش بار، به‌دلیل نزدیکی به کمیت‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه‌های اندازه‌گیری با دقت بالا و استفاده از تمامی اندازه‌گیری‌های موجود در مرکز دیسپاچینگ، که از اطلاعات ورودی پخش بار بیشتر است.

درباره تخمین حالت و شبیه‌سازی حوزه زمان به‌صورت برون‌خط و بر خط، مقاله‌های زیادی منتشرشده است [۱-۱۹] بیشتر مقاله‌ها فقط برای شبکه‌های کوچک و با برنامه‌نویسی با زبان متلب انجام‌شده است. با آنکه در یک مقاله، نشان داده می‌شود الگوریتم ارایه‌شده درست است [۲-۱۱] ولی از نظر یک بهره‌بردار شرکت برق، این برنامه‌ها، دانشگاهی می‌باشند و برای یک شبکه واقعی مناسب نیستند. علاوه بر آزمایش‌های مختلف بر روی مثال‌های مختلف و در شرایط مختلف، باید سرعت و دقت مناسبی باوجود فرض‌های واقعی داشته باشند که برای این‌کار، به سال‌ها و ساعت‌ها برنامه‌نویسی نیاز است.

از این‌رو از دید یک بهره‌بردار و برنامه‌ریز شرکت برق، باید از نرم‌افزارهایی استفاده کرد که احتمال اشتباه در خروجی آن کم باشد.

همان‌طور که می‌دانید؛ بیشتر از ۵۰ شرکت توزیع و برق منطقه‌ای، از نرم‌افزار دیگسایلنت استفاده می‌کنند و تمام شبیه‌سازی‌های شبکه خود را با این نرم‌افزار انجام می‌دهند [۱]. مشکل ازآنجا شروع می‌شود که به جای استفاده از امکانات نرم‌افزار خریداری‌شده، برنامه‌های کامپیوتری با الگوریتم‌های ابداعی نوشته می‌شود تا بتواند، تخمین حالت شبکه را انجام دهد. در مرجع [۱]، با آنکه در نرم‌افزار دیگسایلنت، جعبه‌ابزار تخمین حالت به‌صورت بر خط و برون‌خط وجود دارد؛ یک برنامه به زبان متلب و C++، نوشته‌شده است تا تخمین حالت شبکه را انجام دهد. سپس به‌منظور اطمینان از درستی عملکرد نرم‌افزار تخمین حالت نوشته‌شده، برنامه تخمین حالت بر روی شبکه‌های آزمون استاندارد ۱۱۸ و ۱۴ باسه IEEE انجام‌شده است. سپس خروجی این برنامه با یک برنامه اسکریپت ویژه، با دیگسایلنت لینک می‌شود تا بقیه محاسبات، در نرم‌افزار دیگسایلنت انجام شود.

در مقاله حاضر، نشان داده می‌شود که استفاده از نرم‌افزار دیگسایلنت به‌تنهایی، برای محاسبات تخمین حالت و شبیه‌سازی حوزه زمان، برخط کفایت می‌کند.

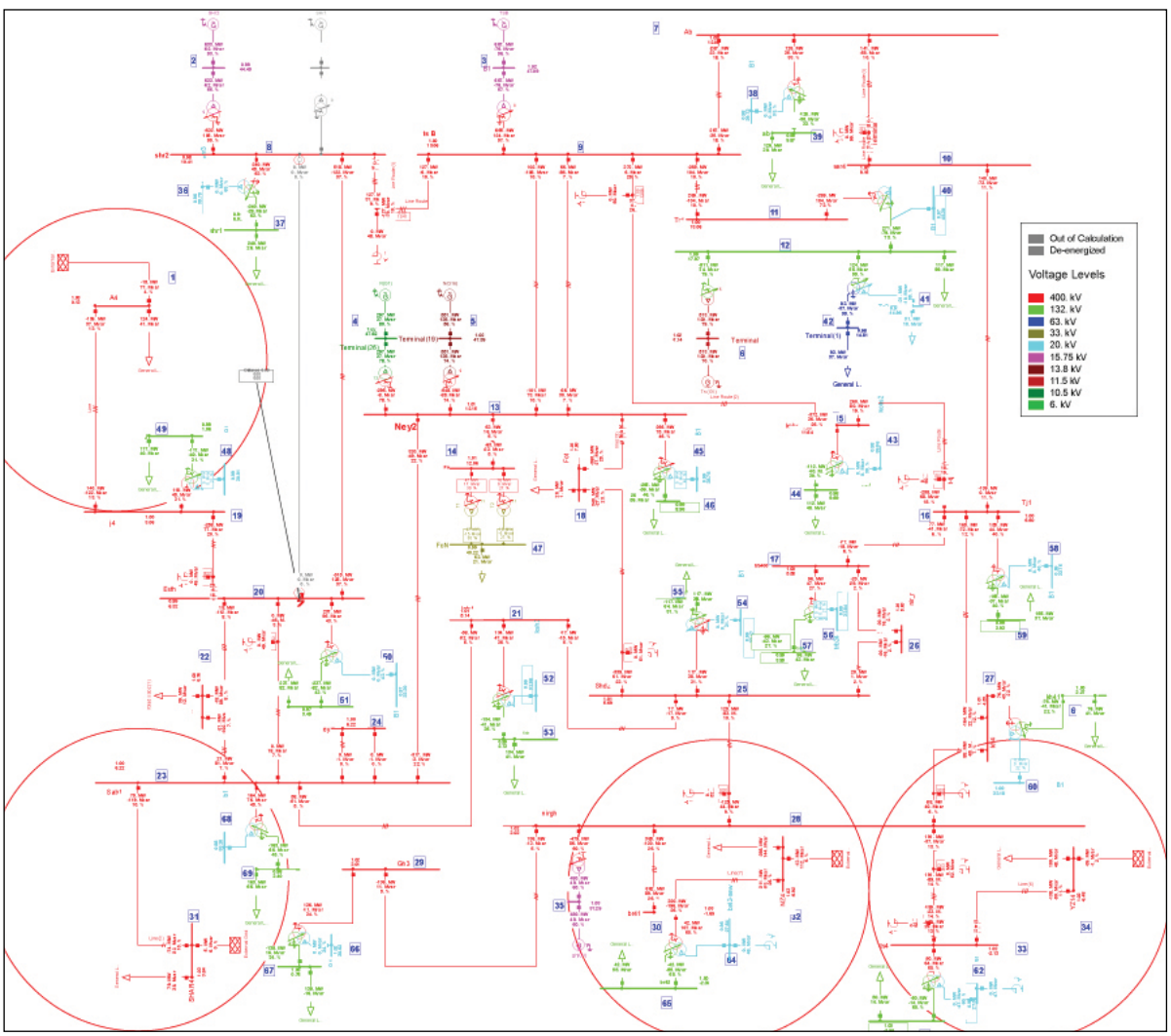
در بخش دوم مقاله، نحوه انتخاب شبکه آورده شده است. بخش سوم مقاله، نحوه مدل‌سازی پارامترهای سیستم برای تخمین حالت را نشان می‌دهد. بخش چهارم، تخمین حالت شبکه و بخش پنجم، شبیه‌سازی در حوزه زمان به‌صورت بر خط با برنامه OPC[۷] را نشان می‌دهد. در پایان، نتیجه‌گیری و مراجع آورده شده است.

۲- روش‌های تخمین حالت

روش‌های زیادی برای تعیین معیار درستی تخمین حالت ارایه‌شده است. به‌طور معمول روش‌های آماری برای تخمین حالت از داده‌های جمع‌آوری‌شده از اندازه‌گیرها استفاده می‌کنند و مقادیر نامعلوم را با توجه به داده‌های این اندازه‌گیرها تخمین می‌زنند [۱۳-۱].

ازآنجاکه به‌طور معمول مقادیر اندازه‌گیری دقیق نیستند، مقادیر تخمین زده‌شده نیز دقیق نخواهند بود؛ بنابراین برای تشخیص میزان درستی مقادیر تخمین زده‌شده، معیارهایی ارایه‌شده است که در ادامه به چند معیار معروف اشاره می‌شود:

هدف معیار بیشینه شباهت[۸]، بیشینه کردن این احتمال است که تخمین متغیر حالت با مقدار واقعی آن یکی باشد.



شکل ۱ : شبکه نمونه موردمطالعه

هدف معیار کمینه مربعات وزن‌دار[۹]، کمینه کردن مجموع مربعات اختلاف بین اندازه‌گیری‌های تخمینی با اندازه‌گیری‌های واقعی است.
هدف معیار کمینه واریانس[۱۰]، کمینه کردن مقدار مجموع مربعات اختلاف، بین مولفه‌های تخمینی بردار متغیرهای حالت و مولفه‌های مشابه بردار حقیقی متغیرهای حالت است.

۳- انتخاب شبکه مورد مطالعه

یکی از اهداف پروژه اصلی، شبیه‌سازی و مطالعه بر روی یک شبکه واقعی بوده است. شبکه مورد استفاده، شبکه خلاصه شده‌ای است که ۸۴ باس، ۷ نیروگاه با ۳۲ ژنراتور، ۳۳ خط ۴۰۰ کیلوولت، ۹ ترانسفورماتور ۲ سیم‌پیچه، ۱۷ ترانسفورماتور سه‌سیم‌پیچه، ۱۳ راکتور ۴۰۰ کیلوولت، ۴ اتصال با شبکه خارجی و ۲۷ پست ۴۰۰ کیلوولت دارد که در شکل (۱) نمودار تک‌خطی آن دیده می‌شود [۱۲-۱۳]. به دلایلی از اسامی ساده‌شده برای باس‌ها و ژنراتورها استفاده‌شده است.
در جدول زیر، اطلاعات کلی شبکه دیده می‌شود.

جدول ۱: اطلاعات کلی شبکه نمونه [۱۳]

تعداد المان‌های سیستم:
باس‌ها = ۹۴ ، ترمینال‌ها = ۷۵۳ ، خطوط = ۴۷
ترانس‌های دو سیم پیچه = ۸، ترانس های سه سیم پیچه = ۱۷
ماشین‌های سنکرون = ۶، ماشین‌های آسنکرون = ۰
بارها = ۲۷ ، شنت‌ها (خازن، راکتور و ...) = ۱۳
SVC = ۰

تولید و مصرف:
تولید ژنراتورها : 3216.00MW, 162.89Mvar, 3220.12MVA
توان مصرفی بار : 3171.47MW 1087.93Mvar 3352.88MVA
تلفات شبکه : 45.56MW, 1616.25Mvar
توان شارژ خط : -2287.00Mvar
جبران کننده سلفی : 728.93Mvar
ظرفیت نصب شده : 4276.00MW
ذخیره چر : 322.00MW

۴-مدل‌سازی پارامترهای سیستم برای تخمین حالت

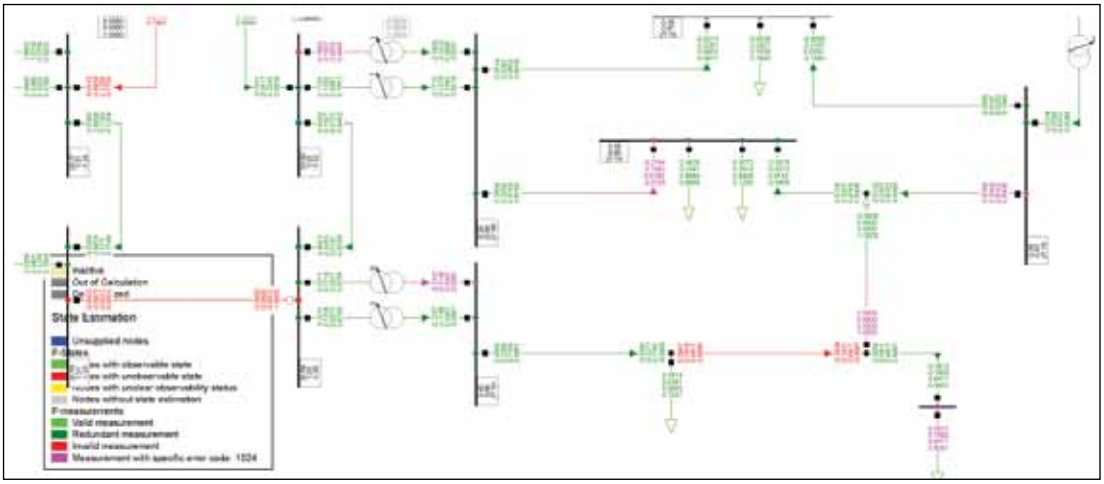
در این قسمت، نحوه مدل‌سازی اجزای سیستم قدرت برای محاسبات تخمین حالت و پخش بار متقارن نشان داده‌شده است.
برای محاسبات پخش بار، توان حقیقی و موهومی بارها مشخص بوده و فرض می‌شود این مقادیر به ولتاژ وابسته نیستند. برای برنامه تخمین حالت، بسته به نوع مطالعه، توان حقیقی و موهومی بار تخمین زده می‌شوند.
شبکه‌های خارجی متصل به شبکه مورد مطالعه، در پخش بار، به‌عنوان باس بی‌نهایت عمل می‌کنند و در برنامه تخمین حالت، توان حقیقی و موهومی آن‌ها، با اندازه‌گیری مشخص است.
برای ژنراتورهای شبکه، در حالت پخش بار، توان حقیقی مشخص است و باس‌های ژنراتوری کنترل ولتاژ بوده و بسته به نقطه کار، توان موهومی موردنیاز تولید می‌شود. برای تخمین حالت، بسته به نوع مطالعه، توان حقیقی و موهومی ژنراتورها تخمین زده می‌شوند.
برای ترانسفورماتورها نیز، امکان تخمین تپ ترانس در برنامه تخمین حالت وجود دارد.
در این مقاله، ابتدا برای تمام اتصالات شبکه، دستگاه‌های اندازه‌گیری قرارداده شده است که در واقعیت درست نیست. ولی برای تحلیل سناریوهای مختلف، هر وقت لازم شد؛ اندازه‌گیرها، وارد سیستم شده و یا از سیستم خارج می‌شوند. نرم‌افزار قادر است برای هر اتصالی، اندازه‌گیر توان حقیقی، موهومی، ولتاژ، قسمت حقیقی و موهومی جریان وصل نماید. در تمام مطالعات، فرض شده است اندازه‌گیرهای ولتاژ از مدار خارج می‌باشند.

۵-تخمین حالت شبکه

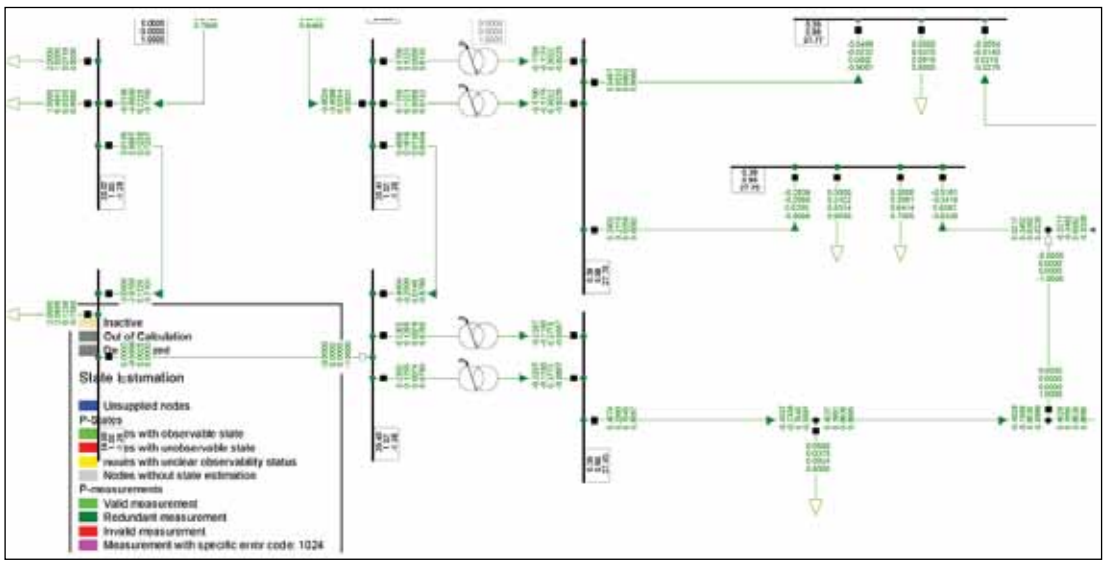
الگوریتم استفاده‌شده در نرم‌افزار را می‌توان به‌طور خلاصه در شکل (۲) نشان داد. تشخیص اطلاعات درست از غلط، تشخیص جهت توان اندازه‌گیری شده در خطوط انتقال، تشخیص مقادیر بسیار کوچک یا بزرگ از اطلاعات، تشخیص درست یا غلط بودن جمع توان‌ها یا جریان‌های وارد یا خارج‌شده به یک باس و ... ازجمله نقاط قوت این روش است [۱۹].
تشخیص تعداد مناسب اندازه‌گیرها و استفاده از برنامه‌های بهینه‌سازی غیرخطی برای حل تخمین حالت از دیگر موارد برتری این روش است [۱۹].

شکل ۲: نمودار الگوریتم تخمین حالت در نرم‌افزار [۱۹]

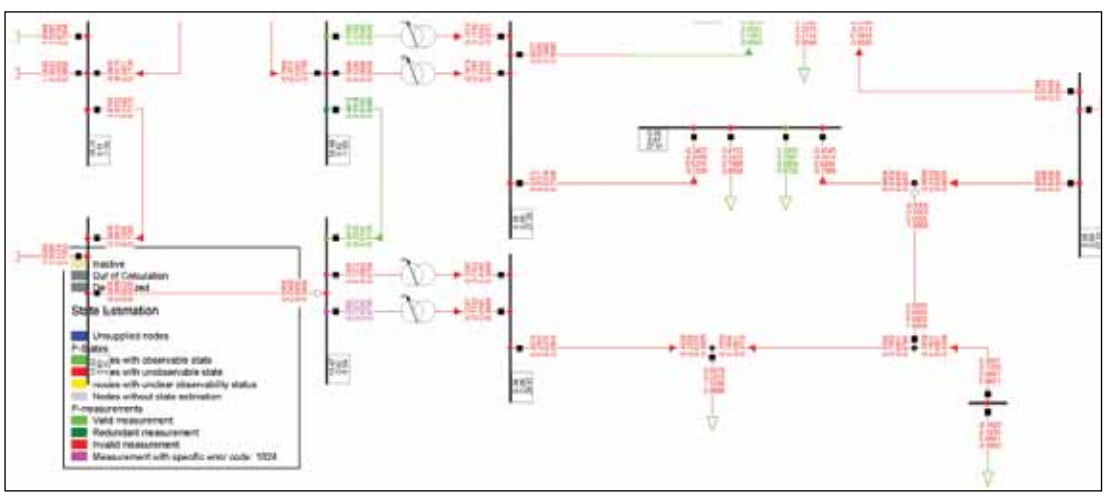
برای این مقاله از سه سناریو استفاده‌شده است.
الف- اندازه‌گیری امن: در این سناریو فرض شده است تمام اندازه‌گیرها در مدار هستند و تمام آن‌ها به‌طور دقیق مقادیر مشابه پخش بار را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود اطلاعات خروجی باس‌ها و خطوط تخمین زده‌شده، به مقادیر اندازه‌گیری



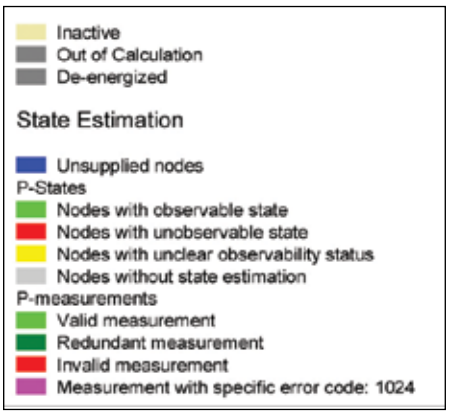
شکل ۳: خروجی گرافیکی سناریوی اول تخمین حالت با اندازه‌گیری درست و به تعداد مناسب [۱۳]



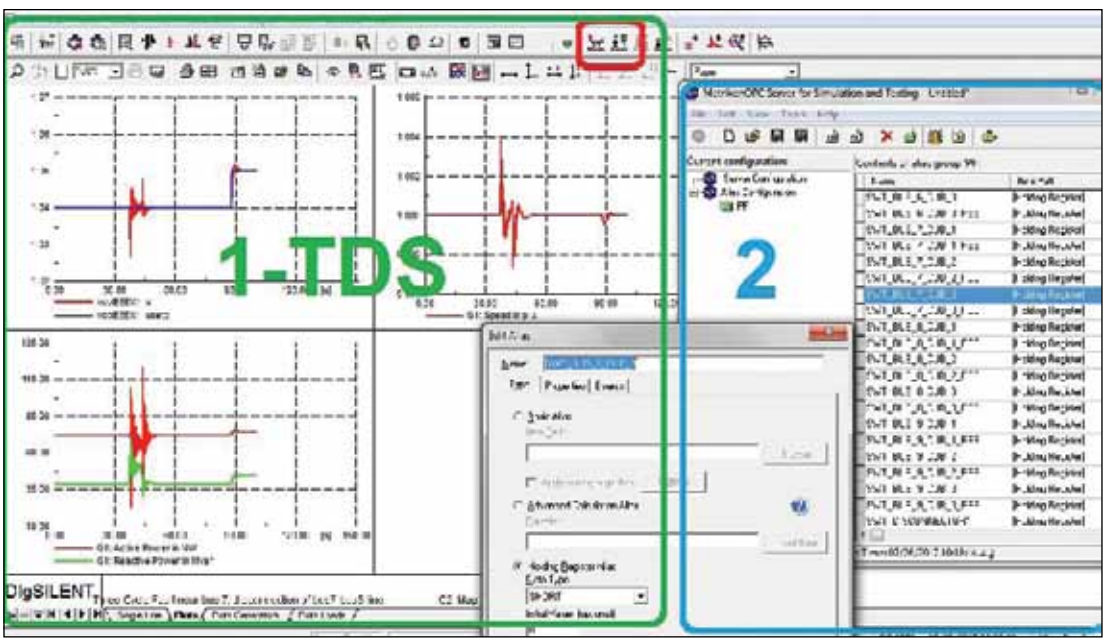
شکل ۴: خروجی گرافیکی سناریوی دوم تخمین حالت با اندازه‌گیری نویزی و به تعداد مناسب [۱۳]



شکل ۵:خروجی گرافیکی سناریوی سوم تخمین حالت با اندازه‌گیری نویزی و به تعداد نامناسب [۱۳]



شکل ۶ : نمایش نحوه رنگ‌بندی خروجی گرافیکی تخمین حالت [۱۳]



شکل ۷: اجرای کنترل لحظه‌ای شبکه موردمطالعه در نرم‌افزار دیگسایلنت از راه دور به‌صورت بر خط

شده نزدیک است و تمام باس‌ها مشاهده‌پذیر بوده و اندازه‌گیری‌ها معتبرند.

ب- اندازه‌گیری مختل‌شده: در این سناریو فرض شده است تمام اندازه‌گیرها در مدار هستند ولی بعضی از آن‌ها دارای نویز می‌باشند. همان‌طور که در شکل (۴) دیده می‌شود اطلاعات خروجی باس‌ها و خطوط تخمین زده‌شده، به مقادیر پخش بار نزدیک است ولی نرم‌افزار تشخیص داده است که بعضی از اندازه‌گیری‌ها نامعتبرند.

ج- شبکه غیرقابل مشاهده: در این سناریو، علاوه بر اینکه تعدادی از اندازه‌گیرها از مدار خارج‌شده‌اند تعدادی از اندازه‌گیرهای موجود هم دارای نویز بوده و مقادیر اشتباهی ارسال می‌کنند. همان‌طور که در شکل (۵) دیده می‌شود نرم‌افزار تمام اندازه‌گیری‌های نامعتبر را تشخیص داده است. در این حالت امکان پخش بار به دلیل کمبود اطلاعات وجود ندارد ولی برنامه تخمین حالت می‌تواند علاوه برگرفتن پخش بار، اطلاعات درست را از غلط تشخیص بدهید.

همان‌طور که در شکل (۶) دیده می‌شود نرم‌افزار پس از هر بار تخمین حالت یک شبکه، با رنگ‌بندی مشخص می‌کند که اطلاعات نمایش داده‌شده برای هر باس، در چه وضعیتی قرار دارد. که باعث می‌شود فقط با یک نگاه، اطلاعات کلی از تخمین حالت شبکه به دست بیاید.

این اطلاعات به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

- باس مشاهده‌پذیر است
- باس مشاهده‌پذیر نیست
- باس حالت نامعلومی از مشاهده‌پذیری دارد.
- در باس، تخمین حالت انجام‌نشده است.
- اندازه‌گیری انجام‌شده، معتبر است.
- اندازه‌گیری انجام‌شده، اضافه است.
- اندازه‌گیری انجام‌شده، نامعتبر است.
- اندازه‌گیری انجام‌شده، یک خطای مشخص دارد.

۶- شبیه‌سازی در حوزه زمان به‌صورت بر خط

یکی دیگر از نیازمندی‌های بهره‌برداران شرکت‌های برق، شبیه‌سازی در حوزه زمان به‌صورت برخط است. برای این‌کار بی‌گمان باید توانایی پخش بار و تخمین حالت برخط نیز در نرم‌افزار مورداستفاده وجود داشته باشد.

نرم‌افزار قادر است پخش بار، تخمین حالت و شبیه‌سازی حوزه زمان را به‌صورت بر خط و از راه دور انجام دهد برای این‌کار به نرم‌افزارها و سخت‌افزارهای زیر نیاز داریم [۱۷-۱۸]:

- نرم‌افزار دیگسایلنت (که در تمام شرکت‌های توزیع و برق منطقه‌ای موجود است)
- نرم‌افزار شبیه‌ساز سرور ماتریکون[11] که یک نرم‌افزار رایگان قابل دریافت از سایت ماتریکون است[12].
- یک کامپیوتر ترجیحاً ۶۴ بیتی

حال با طی کردن گام‌های زیر می‌توان به‌راحتی، شبیه‌سازی‌های مورد نیاز را به‌صورت برخط انجام داد.

گام نخست: پس از نصب نرم‌افزار ماتریکون، باید سیگنال‌ها و اندازه‌گیرها، در تمام سطح شبکه تعریف شوند تا بتوان از بیرون، مقادیر محاسبه‌شده را رویت کرده و دستورات لازم را نیز به شبکه ارسال کرد [۱۸].

گام دوم: ساخت فایلی با پسوند (csv) که تمام کنترل‌کننده‌ها و اندازه‌گیرها را مشخص کرده است مثلاً کلید ۳ باس ۷ به‌صورت (PF. SWT_BUS_7_CUB_3)

گام سوم: خواندن فایل csv با نرم‌افزار ماتریکون و تغییرات لازم در نرم‌افزار دیگسایلنت

گام چهارم: اجرای برنامه شبیه‌سازی در حوزه زمان شبکه مورد مطالعه (کامپیوتر شماره یک)

گام پنجم: باز و بسته کردن کلید ۳ باس ۷ در نرم‌افزار ماتریکون (کامپیوتر شماره دو)

گام ششم: نمایش تغییرات لحظه‌ای آن در نرم‌افزار دیگسایلنت (کامپیوتر شماره یک)

دو نرم‌افزار نصب‌شده قادر هستند از طریق شبکه، اطلاعات قطع و وصل شدن کلیدها و یا تغییرات احتمالی در نرم‌افزار را با یکدیگر به اشتراک بگذارند.

نتیجه نهایی این مراحل در شکل (۷) آورده شده است. در شکل (۷) دیده می‌شود که با تغییر اطلاعات کلید در کامپیوتر شماره ۲، با تغییر کد ۰ به ۱، به‌صورت آنلاین در کامپیوتر شماره یک، که در حال شبیه‌سازی در حوزه زمان می‌باشد؛ این تغییرات رؤیت شده و به آن پاسخ می‌دهد.

تغییرات نرم‌افزار ماتریکون می‌تواند از بخش اتوماسیون شرکت‌های برای نرم‌افزار اصلی سیستم قدرت در محل بهره‌برداری ارسال شود.

مانند همین روشی که برای شبیه‌سازی در حوزه زمان انجام شد می‌توان پخش بار و تخمین حالت را نیز انجام داد که از حوصله این مقاله خارج است.

۷-نتیجه‌گیری

همان‌طور که در این مقاله نشان داده‌شده است با آنکه خرید نرم‌افزارهای زیادی در دستور کار بیشتر شرکت‌های برق منطقه‌ای و شرکت‌های توزیع وجود دارد ولی استفاده از تمام امکانات نرم‌افزار خریداری‌شده، در دستور کار نیست. در این مقاله نشان داده‌شده است نرم‌افزار دیگسایلنت، توانایی انجام تخمین حالت و شبیه‌سازی در حوزه زمان شبکه‌های واقعی را به‌صورت برون‌خط و بر خط دارد و علت عدم استفاده از این امکان، عدم آشنایی با توانایی این نرم‌افزار خریداری‌شده است. همچنین برای انجام این‌کار، نیازی به نوشتن برنامه‌های جانبی به زبان متلب و C++ نیست.

پی‌نوشت‌ها

1 State Estimation (SE)
2 Time Domain Simulation (TDS)
3 DIgSILENT
4 Offline
5 Online
6 Matlab
7 OPC (Object Linking and Embedding (OLE) for process control)
8 Maximum Likelihood
9 Weighted Least Squares
10 Minimum Variance
11 MatrikonOPC Simulation Server
12 http://www.matrikonopc.com/downloads

مراجع

[۱] مهرداد طرفدار حق، مهدی احمدی جیردهی، پدرام صالحپور، بابک اسدزاده، افشین روشن میلانی،"پیاده‌سازی برنامه تخمین حالت در مرکز دیسپاچینگ شمال غرب کشور"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۵، شماره ۱، بهار ۹۴، صص: ۴۳-۵۱، ۱۳۹۴.

[۲] علی حسامی نقش‌بندی، فرشاد خاوری، "مقایسه دو روش حداقل مربعات وزن‌دارشده و حداقل قدرمطلق وزن‌دارشده به‌منظور بهبود عملکرد تخمین حالت در سیستم‌های قدرت"، بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۸۴

[۳] سید محسن موسوی، میثم پوراحمدی نخلی، فریدون شعبانی‌نیا، فریدون، "تخمین حالت استاتیکی شبکه انتقال فارس با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی"، بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۸۴.

[۴] سید مهدی مهائی، مهرداد طرفدارحق، "جایابی بهینه واحدهای اندازه‌گیر فازوری در شبکه درحال توسعه آذربایجان"، بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۸۴.

[۵] مهرداد طرفدارحق، مهدی احمدی جیردهی، "تخمین حالت سیستم‌های قدرت شامل UPFC به روش گرادیان مزدوج"، هفدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، دانشگاه علم و صنعت، جلد دوم، قدرت- سیستم، صفحات۱۲۱-۱۳۲، ۲۲ الی ۲۵ اردیبهشت ۱۳۸۸.

[۶] محسن خسروی، مهدی بانژاد، "تخمین حالت مقاوم در سیستم‌های قدرت به کمک آنالیز اجزای اصلی اطلاعات اندازه‌گیرها"، بیست و هشتمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۸۷.

[۷] مجید غفاریان‌فر، محسن اصیلی، "معیار حداکثر تشابه برای تخمین حالت در سیستم‌های توزیع باوجود زیرساخت ابزارهای اندازه‌گیری هوشمند برق"، بیست و نهمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۹۳.

[۸] مهدی رحیمی، صادق جمالی، ۱۳۸۸، "تخمین حالت به روش تخمین شاخه در سیستم‌های توزیع شعاعی"، بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۸۸.

[۹] علی مذهب‌جعفری، مهدی کبیری کوچکسرایی، خسرو خانقلی، صبا قیامی، "تجارب میدانی حاصل از اجرای برنامه تخمین حالت در شبکه برق ایران"، بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۸۸.

[۱۰] کورش امامی، یوسف علی‌نژاد، زهرا مروج، میثم توکلی، "تخمین حالت با استفاده از داده‌های سنتی و واحدهای اندازه‌گیری فازور و پردازش داده بد با استفاده از رگرسیون خطی"، بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۹۱.

[۱۱] حامد اسدی، مجید صنایع‌پسند، مهدی داورپناه، "معرفی یک روش جدید برای تخمین به‌هنگام ناپایداری ولتاژ در شبکه‌های قدرت بر مبنای حفاظت گسترده شبکه"، مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران- سال چهارم- شماره دوم - پائیز و زمستان، ۱۳۸۶.

[۱۲]مصطفی عیدیانی، "پیاده‌سازی استاتیکی و دینامیکی اطلاعات شبکه خراسان در نرم‌افزار مطلب"، پروژه شرکت برق منطقه‌ای خراسان، ۱۳۹۱.

[۱۳] مصطفی عیدیانی، "انتقال اطلاعات از خروجی‌های اتوماسیون شبکه به نرم‌افزار دیگسایلنت برای استفاده در برنامه‌ریزی شبکه خراسان"،پروژه شرکت برق منطقه‌ای خراسان، ۱۳۹۵.

[14] V. Akhmatov, «Bornholm Power System Model: Load-flow and State Estimation using DIgSILENT PowerFactory», Client User Manual, July 2009.

[15] V. Akhmatov, J. E. Nielsen, J. Østergaard, A. H. Nielsen, «State-Estimation of Wind Power System of the Danish Island of Bornholm», Nordic Wind Power Conference, NWPC, September 10-15, Bornholm, Denmark, 2009.

[16] J. Alber , «State Estimation in PowerFactory: Algorithmic Aspects», RTE-VT workshop, Paris, May 29-30, 2006.

[17] PowerFactory OPC (Object Linking and Embedding (OLE) for process control) Guide, Version V005, May , 2016.

[18] DIgSILENT PowerFactory, Advanced Tutorial, PowerFactory OPC Example, Ver. 1, Edit. 1, Feb. 2017.

[19] State Estimation, DIgSILENT PowerFactory, 2017.

***