

مهندسی در به‌کارگیری ابزار محاسباتی برای تسریع در زمان تشخیص ناپایداری ولتاژ

مهتاب خلیلی فر^۱، محمود جورابیان^{۲*}، سید قدرت‌اله سیف‌السادات^۳ و سید محمد شهرتاش^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۱۰	شبهه‌سازی در حوزه زمان یک ابزار ضروری برای ارزیابی دینامیکی شبکه‌های قدرت است. در حال حاضر، پیچیدگی‌های زمان محاسباتی مانعی در به‌کارگیری این ابزار در تصمیم‌گیری‌های حوزه زمان واقعی است. در این مقاله، مهندسی در به‌کارگیری ابزار محاسباتی نرم‌افزار DigSILENT برای تسریع در زمان تشخیص ناپایداری ولتاژ بلندمدت به عنوان اولین ابزار در سیستم تشخیص و جلوگیری از وقوع ناپایداری ولتاژ ارائه شده است. بدین منظور سه پارامتر اساسی در به‌کارگیری شبهه‌سازها که عبارتند از: پله زمان محاسباتی، پله زمان گزارش‌گیری و متغیرهای گزارش‌گیری مورد بررسی و زمان رسیدن به پاسخ (زمان ناپایداری) به ازای مقادیر مختلف آنها مقایسه شده‌اند تا مقادیر مناسب برای آنها ارائه شوند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که معماری پیاده‌سازی شده برای شبکه تست Nordic32 در یک پردازنده متوسط، منجر به بیش از نود درصد کاهش زمان تشخیص نسبت به زمان واقعی ناپایداری می‌شود. این موفقیت در تسریع تشخیص زمان ناپایداری فرصت کاربر را در انتخاب و به‌کارگیری اقدامات اصلاحی افزایش می‌دهد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۹	
واژگان کلیدی: نرم‌افزار شبهه‌ساز، ناپایداری ولتاژ، تسریع زمان محاسباتی، پله محاسباتی، متغیرهای گزارش‌گیری.	

۱- مقدمه

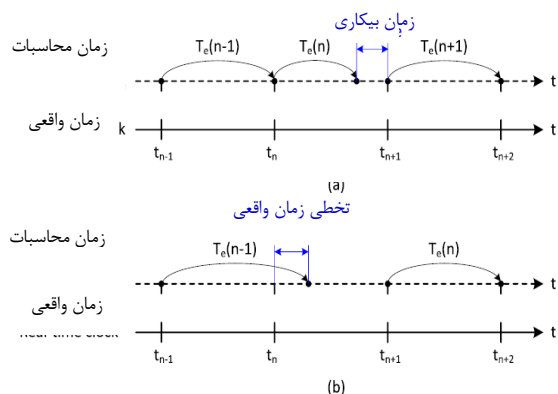
از دیدگاه اطلاعات مورد استفاده برای ارزیابی رفتار شبکه در مطالعات زمان واقعی، سه رویکرد متفاوت مطرح می‌شود: (الف) تحلیل شبکه بر پایه اطلاعات به دست آمده از انجام شبهه‌سازی با استفاده از مدل نرم‌افزاری [۱-۷]، (ب) تحلیل شبکه با استفاده از اطلاعات همزمان اندازه‌گیری شده از متغیرهای شبکه [۸-۱۱] و (ج) تحلیل شبکه با استفاده توأمان از اطلاعات اندازه‌گیری شده و اطلاعات به دست آمده از نتایج شبهه‌سازی‌های زمانی [۱۲ و ۱۳]. در رویکردهای مبتنی بر به‌کارگیری ابزار شبهه‌سازی، ارزیابی وضعیت پایداری شبکه با استفاده از مدل ریاضی شبکه که در آن کلیه تجهیزات و کنترل‌کننده‌ها توسط

کاربر به صورت دقیق تعریف شده است، صورت می‌پذیرد. از جمله نقاط قوت روش‌های مبتنی بر مدل می‌توان به امکان دقیق بودن نتایج (مشروط به دقیق بودن مدل‌ها و مدلسازی) و در اختیار داشتن کلیه متغیرهای شبکه (اعم از متغیرهای اندازه‌گیری شده و غیر قابل اندازه‌گیری در شرایط واقعی، متغیرهای محاسباتی شامل سیگنال‌های ورودی، میانی و خروجی هر یک از کنترل‌کننده‌ها) و از جمله نقاط ضعف بالقوه آن می‌توان به بالا بودن حجم محاسبات اشاره نمود [۱۳ و ۱۴].

در روش‌های مبتنی بر اطلاعات اندازه‌گیری، فرض بر آن است که با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری که خود می‌تواند محدود به اطلاعات یک نقطه، یک بخش یا کل شبکه گردد،

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mjoorabian@scu.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز
 ۲. دانشجوی دکتری مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز
 ۳. استاد دانشکده مهندسی، گروه برق، دانشگاه شهید چمران اهواز
 ۴. استاد دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران



شکل ۱- توصیف یک شبیه سازی با قابلیت به کارگیری در کاربردهای زمان واقعی یا خارج زمان واقعی بر مبنای مقایسه پله زمان محاسباتی و پله زمان واقعی [۱۷]

$$\begin{aligned} \mathcal{K} &= f(x, y, \lambda) \\ 0 &= g(x, y, \lambda) \end{aligned} \quad (1)$$

به طور کلی، برای یک اغتشاش مشخص، مثلاً خروج خط ارتباطی بین دو قسمت از شبکه که در واقعیت بعد از چند یا چند ده ثانیه منجر به وقوع ناپایداری ولتاژ می شود، زمان محاسبات شبیه سازی به مواردی چون: امکانات سخت افزاری، مشخصات الگوریتم (به صورت مشخص رویکرد الگوریتم در انتخاب پله های زمانی محاسبات برای حل معادلات دیفرانسیلی و جبری شبکه در بازه های زمانی مختلف برای یک اغتشاش) و آرایش متغیرهای خروجی وابسته است. در این مقاله مجموعه ای از رویه ها در به کارگیری ابزار محاسباتی برای تسریع در زمان ناپایداری ولتاژ معرفی شده است. صورت مسئله در این بررسی، فراهم نمودن ابزاری است که در آن بهره بردار شبکه برای اغتشاش های منجر به ناپایداری ولتاژ، قادر به پیش بینی زمان وقوع ناپایداری در بازه زمانی به اندازه کافی دور از زمان ناپایداری باشد. اهمیت این پیش بینی، فراهم آوردن امکان تصمیم گیری در خصوص اقدامات کنترلی در فرصت زمانی بیشتری تا زمان وقوع ناپایداری پیش رو است. شایان ذکر است، تشخیص زمان ناپایداری یکی از زیربرنامه های اصلی در برنامه جلوگیری از وقوع ناپایداری است.

پیش از ورود به بحث اصلی، توجه به این نکته ضروری است که کاربرد نرم افزارهای شبیه ساز حوزه زمان یا محیطی برای باز ایجاد سیگنال های پاسخ شبکه به اغتشاشات تعریف شده در مسیر استخراج الگو هستند و یا محیطی برای شناخت رفتار شبکه و استفاده مستقیم از نتایج آنها برای اقدام مقتضی در شبکه. در این میان برای هر دو کاربرد و با تأکید

الگوریتم قادر به استخراج ویژگی های مناسب و نهایتاً ارزیابی شبکه خواهد بود. بدهی است بدون در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به خطاهای اندازه گیری و با فرض اینکه همه اطلاعات مورد نیاز قابل رویت باشند، اطلاعات اندازه گیری شده نمایش واقعی تری از دینامیک شبکه را در اختیار قرار می دهد.

مطالعات انجام شده در این مقاله، با هدف ایجاد بستر مناسب جهت کاهش حجم محاسباتی برای الگوریتم های مبتنی بر شبیه سازی ارائه شده است.

در سه دهه اخیر همراه با رشد سریع تکنولوژی های محاسباتی، ابزارهای شبیه سازی نیز ارتقاء یافته اند. امروز از ابزارهای شبیه سازی به طور گسترده برای مقاصد: طراحی، برنامه ریزی، توسعه و بهره برداری شبکه های قدرت استفاده می شوند [۱۵-۱۸]. پیچیدگی های محاسباتی یکی از نگرانی های دراز مدت در زمینه ارزیابی امنیت دینامیکی شبکه است که با افزایش اندازه شبکه افزایش می یابد. در مواردی که تحلیل های پایداری در شرایط زمان واقعی اجرا شوند، اپراتور با استفاده از زیرسیستم های کنترل زمان واقعی، قادر به تصمیم گیری و نهایتاً جلوگیری از وقوع ناپایداری و خاموشی های پشت سر هم، خواهد بود [۱۵]. شبیه سازهای حوزه زمان یکی از ابزارهای موجود برای تأمین این خواسته با در نظر گرفتن زمان اجرای فرآیند به عنوان یکی از مهم ترین معیارهای ارزیابی کارایی است.

در طول یک شبیه سازی زمان گسسته، زمان محاسبه معادلات و توابع توصیف کننده رفتار سیستم در پایان یک پله زمانی شبیه سازی نسبت به زمان واقعی مطابق شکل (۱)، در دو وضعیت ممکن کوچکتر و بزرگتر قرار می گیرد [۱۷]. اگر زمان محاسبات (T_e) در هر یک از پله های زمانی کوچکتر از زمان واقعی باشد، شبیه سازی زمان واقعی است و متناسب با اختلاف زمان محاسبات و زمان واقعی، کارایی آن در تصمیم گیری ها و ارزیابی های حوزه ی زمان ارزش گذاری شده و در غیر این صورت، شبیه سازی خارج حوزه ی زمان است. منظور از معادلات سیستم، همان دسته معادلات دیفرانسیلی- جبری حاکم بر رفتار سیستم مطابق روابط (۱) است، که در آن f تابع مربوط به معادلات دیفرانسیلی شبکه، g تابع مربوط به معادلات جبری شبکه، x متغیرهای حالت شبکه، y متغیرهای جبری شبکه و λ متغیرهایی مانند بار شین ها است که بر اثر تغییر آنها نقطه کار سیستم تغییر می کند.

• استفاده از پله‌های محاسباتی مختلف^۲ برای متغیرهای حالت مختلف- این تکنیک نخستین بار توسط Gear در ۱۹۷۴ مطرح شد [۲۲]. اساس این روش انتگرال گیری استفاده از پله‌های زمانی متغیر برای متغیرهای مختلف سیستم است. در این روش، کوپلینگ بین متغیرهای زیرسیستم آهسته به سریع با درون‌یابی متغیرهای زیرسیستم آهسته و کوپلینگ متغیرهای زیرسیستم سریع به زیرسیستم آهسته با میانگین‌گیری متغیرهای سریع مدل‌سازی شده است. از آنجایی که در اغلب موارد متغیرهای حالت زیرسیستم آهسته بدون مؤلفه‌های گذراهای سریع هستند، لذا پله انتگرال‌گیری بزرگ می‌تواند برای این زیرسیستم در مقایسه با زیرسیستم سریع استفاده شود. در دسته‌بندی زیرسیستم‌ها، کلیه متغیرهای حالت الکتریکی شبکه مثل جریان عبوری از خطوط، ولتاژ بارها، جریان استاتور و ... متعلق به زیرسیستم سریع با مقادیر ویژه بزرگ و کلیه متغیرهای مکانیکی و متغیرهای حالت مربوط به روتور، متعلق به زیرسیستم آهسته با مقادیر ویژه کوچک هستند. برای سیستم‌های با پاسخ زمانی متفاوت، با هدف کاهش بار محاسباتی، این روش یکی از بهترین پیشنهادهای ممکن است [۱۵].

• استفاده از پله‌های محاسباتی تطبیقی^۳ در این روش، تنظیم پله محاسباتی بر مبنای خطای تخمینی در هر پله صورت می‌گیرد. مقایسه این خطای محاسباتی با خطای مجاز در بازه زمانی انتخاب شده، مبنای تصمیم‌گیری برای انتخاب بازه زمانی بعدی است. بدین ترتیب که:

- ۱- اگر خطا بزرگتر از خطای مجاز باشد، خروجی دور ریخته می‌شود و شبیه‌سازی مجدداً با کاهش (برای مثال نصف کردن) پله محاسباتی تکرار می‌شود؛
- ۲- اگر خطا کوچکتر از خطای مجاز باشد، خروجی مورد تأیید است، در این شرایط،

۱-۲. اگر خطا با بزرگ کردن (برای مثال دو برابر کردن) پله محاسباتی بزرگتر از خطای مجاز باشد، پله محاسباتی در گام بعدی بدون تغییر باقی می‌ماند.

بیشتر برای کاربرد دوم، اعتبارسنجی مدل‌سازی صورت گرفته و آگاهی از محدودیت‌های نرم‌افزار شبیه‌ساز برای اطمینان خاطر از صحت پاسخ‌های اعلام شده توسط نرم افزار برای تنوع قابل قبولی از حوادث، با هدف فراهم آوردن شرایط لازم به‌کارگیری نتایج برای تصمیمات حوزه زمان واقعی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آنچه در این مقاله دنبال شده است، معرفی سه پارامتر تأثیرگذار پله محاسباتی، تعداد متغیرهای گزارش‌گیری و بازه زمانی گزارش‌گیری بر تسریع زمان تشخیص ناپایداری و بررسی این پارامترها برای شبکه تست نمونه در محیط DIgSILENT به عنوان یکی از نرم‌افزارهای شبکه قدرت است.

سازماندهی مطالب ارائه شده در ادامه بدین قرار است: در بخش دوم، مسئله پله زمانی محاسبات در پدیده‌های دینامیکی مطرح و نتایج دو رویکرد استفاده از پله‌ی زمانی ثابت و متغیر در شبیه‌سازی‌ها از دو دیدگاه سرعت و دقت برای چهار سناریوی منجر به وقوع ناپایداری در شبکه Nordic32، بررسی و مقایسه شده است. در بخش سوم، تأثیر پارامترهای گزارش‌گیری (تعداد متغیرها و فرکانس گزارش‌گیری) بررسی شده و در پایان، جمع‌بندی بحث، در بخش چهارم ارائه شده است.

۲- تأثیر پله زمانی محاسبات بر زمان محاسبات

گذراها در سیستم قدرت با مقادیر ویژه مشخص می‌شوند و بزرگترین پله زمانی محاسبات نیز بر مبنای بزرگترین مقدار ویژه سیستم تعیین می‌شود [۱۹]. سیستم قدرت را می‌توان، ترکیبی از دو زیرسیستم آهسته با مقادیر ویژه کوچک معرف گذراهای الکترومکانیکی و زیرسیستم سریع با مقادیر ویژه بزرگ معرف گذراهای الکترومغناطیسی، در نظر گرفت [۲۰ و ۲۱]. متناسب با رویکرد محققین در ارتباط با پله زمانی محاسبات، مراجع و نرم‌افزارهای شبیه‌ساز سیستم قدرت را می‌توان در یکی از سه دسته زیر قرار داد:

• استفاده از پله زمانی ثابت در محاسبات^۱- زمان محاسبات در این رویکرد به دلیل حجم بالای محاسبات، نسبت به دو رویکرد دیگر بزرگتر است. این روش محاسبات، معمولاً پیش‌فرض نرم‌افزارهای شبیه‌ساز سیستم قدرت است.

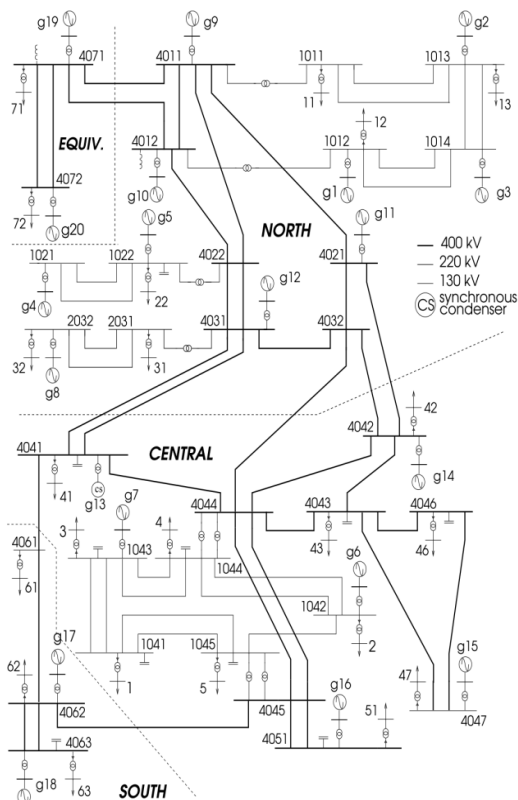
³ Adaptive Step Size

¹ Fixed Step Method

² Multi-rate Method

حادثه خروج خط و دو سناریوی تغییرات بار منجر به وقوع ناپایداری بلندمدت بررسی شده است. شبکه تست، Nordic32 با مدل‌سازی کلیه تجهیزات کنترلی برای واحدهای تولید (AVR، GOV و PSS) و تپ‌چنجر برای ترانسفورماتورهای بار [۲۴] در نرم‌افزار DIgSILENT، مطابق شکل (۲) است. مفروضات در این مطالعه به قرار زیر است:

- ا. زمان ایجاد اغتشاش در کلیه حوادث ثانیه ۵ام شبیه‌سازی است.
- ب. پله محاسباتی در روش پله زمانی ثابت برابر با ۰/۰۱ ثانیه است که این مقدار کوچکتر از کوچکترین ثابت زمانی کنترل‌کننده‌های دینامیکی به‌کارگرفته شده در شبکه و بزرگترین مقدار ویژه محاسبه شده است.
- ج. پله زمانی گزارش‌گیری در هر دو روش پله زمانی ثابت و پله محاسباتی تطبیقی برابر با پله زمانی محاسباتی است.
- د. متغیرهای گزارش‌گیری در هر دو روش، دامنه ولتاژ برای ۲۲ شینه بار، جریان تحریک و زاویه نسبی روتور برای ۲۰ واحد تولیدی و موقعیت تپ‌چنجر برای ۲۲ ترانسفورماتور بار، تعریف شده است.



شکل ۲- دیاگرام تک خطی شبکه تست در محیط نرم‌افزاری برای ایجاد ناپایداری ولتاژ [۲۴]

۲-۲. اگر خطا با بزرگ کردن (برای مثال دو برابر کردن) پله محاسباتی کوچکتر از خطای مجاز باشد، پله محاسباتی در گام بعدی بزرگ (برای مثال دو برابر) می‌شود.

شایان ذکر است، استفاده از متغیر ثابت برای افزایش یا کاهش پله، الزام‌آور نبوده و صرفاً ارائه نمونه‌ای متداول در محاسبات برای بیان بهتر موضوع است. تغییر پله محاسباتی در نرم‌افزارهایی که قابلیت تغییر پله را داشته باشند، عموماً از این نوع است [۲۱ و ۲۳].

روش‌های مختلفی متناسب با بازه فرکانسی محتوای سیگنال مورد بررسی برای محاسبه خطا در هر پله زمانی وجود دارد که از جمله این روش‌ها می‌توان به روش عددی مرتبه دوم در [۲۳] اشاره نمود. در این روش اگر جواب دقیق در زمان $t + \Delta t$ برابر $y(t + \Delta t)$ و جواب تخمینی با استفاده از پله محاسباتی Δt و $\Delta t/2$ به ترتیب برابر y_1 و y_2 باشد، آنگاه با فرض صرفنظر کردن از مولفه‌های مرتبه بالاتر $O(t)$ ، $A(t)$ مطابق (۳) محاسبه می‌شود:

$$y(t + \Delta t) = y_1 + A(t)\Delta t^3 + O(\Delta t^4)$$

$$y(t + \Delta t) = y_2 + A(t)\left(\frac{\Delta t}{2}\right)^3 + O\left(\frac{\Delta t}{2}\right)^4$$

$$(۲)$$

$$A(t) \approx \frac{8}{7} \frac{y_2 - y_1}{\Delta t^3} \quad (۳)$$

در این شرایط خطای برش با استفاده از (۲) و (۳)، مطابق (۴) به دست می‌آید:

$$LT = |y(t + \Delta t) - y_1| \approx \frac{8}{7} |y_2 - y_1| \quad (۴)$$

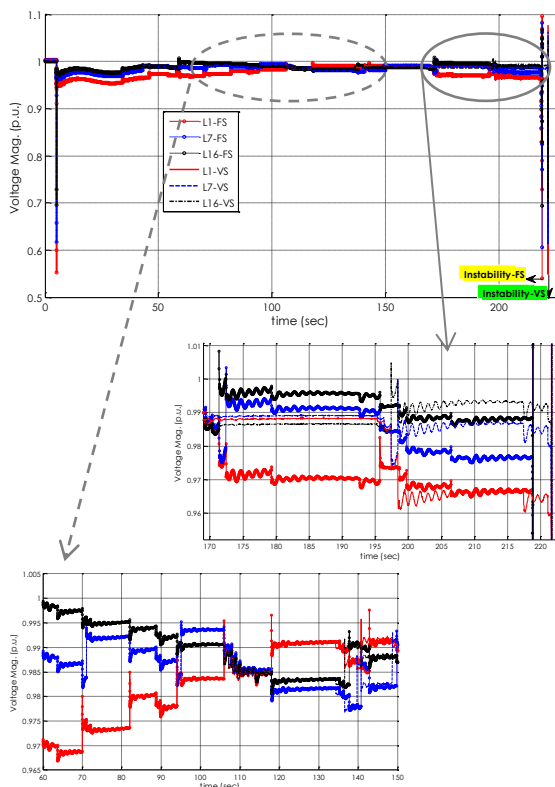
از آنجایی که پروسه محاسبه خطا به ذات یک عامل تأخیری است، لذا در تکنیک استفاده از پله‌های محاسباتی تطبیقی، هر پله محاسباتی حداقل دارای دو بار محاسباتی است (در بهترین حالت که تکرارهای مجدد وجود ندارد) یکی بار محاسباتی محاسبه خطا و دیگری بار محاسباتی پیاده‌سازی پله زمانی. بر این اساس با افزایش تعداد سعی و خطاها برای پیدا کردن پله تطبیقی مناسب، بار محاسباتی نیز افزایش می‌یابد، این وضعیت در شرایطی اتفاق می‌افتد که تغییرات سریع‌تری در عملکرد سیستم‌های کنترلی شبکه مشاهده شود.

۲-۱- تأثیر بهبود پله زمانی محاسبات

در این بخش تأثیر بهبود پله زمانی محاسبات بر تسریع زمان تشخیص ناپایداری ولتاژ با مقایسه دو روش پله محاسباتی ثابت و پله‌های محاسباتی تطبیقی برای دو

جدول ۱- مقایسه نتایج شبیه‌سازی ناپایداری ولتاژ برای دو پله محاسباتی ثابت و تطبیقی

پله محاسباتی تطبیقی	پله محاسباتی ثابت	ملاحظات	
۱۰۰/۸۷	۱۰۰/۱۴	زمان وقوع ناپایداری (ثانیه)	خروج خطوط ۴۰۴۵-۴۰۵۱ و ۴۰۴۵-۴۰۶۲
۱۱/۷۸	۱۲/۳۶	زمان محاسباتی تشخیص وقوع ناپایداری (ثانیه)	
۳۵۵۵	۱۰۰۱۴	تعداد پله‌های محاسباتی	
۱۱۸ (۳/۳٪ کل پله‌های محاسباتی)		تعداد تکرارهای گام شبیه‌سازی در روش پله محاسباتی تطبیقی	
۱۲۵/۲۱	۱۲۵/۲۶	زمان وقوع ناپایداری (ثانیه)	خروج خط ۴۰۴۴-۴۰۳۲
۱۳/۰۰	۱۴/۴۰	زمان محاسباتی تشخیص وقوع ناپایداری (ثانیه)	
۴۲۱۹	۱۲۵۲۶	تعداد پله‌های محاسباتی	
۱۵۲ (۳/۶٪ کل پله‌های محاسباتی)		تعداد تکرارهای گام شبیه‌سازی در روش پله محاسباتی تطبیقی	
۲۲۱/۷۰	۲۱۸/۷۵	زمان وقوع ناپایداری (ثانیه)	سناریوی تغییرات بار ٪۲۰ L1,11,12,13 22,31,32
۲۳/۱۳	۲۳/۲۶	زمان محاسباتی تشخیص وقوع ناپایداری (ثانیه)	
۷۷۴۳	۲۱۸۷۵	تعداد پله‌های محاسباتی	
۲۴۳ (۳/۱٪ کل پله‌های محاسباتی)		تعداد تکرارهای گام شبیه‌سازی در روش پله محاسباتی تطبیقی	
۱۶۷/۹۷	۱۶۹/۱۵	زمان وقوع ناپایداری (ثانیه)	سناریوی تغییر بار ٪۵۰ L41
۱۶/۳۵	۱۸/۰۵	زمان محاسباتی تشخیص وقوع ناپایداری (ثانیه)	
۵۷۹۵	۱۶۹۱۵	تعداد پله‌های محاسباتی	
۱۸۷ (۳/۲٪ کل پله‌های محاسباتی)		تعداد تکرارهای گام شبیه‌سازی در روش پله محاسباتی تطبیقی	



شکل ۳- پروفیل ولتاژ شینه‌های بار با بیشترین اختلاف بین دو پله محاسباتی ثابت و تطبیقی در حادثه افزایش بار ٪۲۰ در بخشی از شبکه (FS خروجی مطالعات پله محاسباتی ثابت و VS خروجی مطالعات پله تطبیقی متغیر)

نتایج شبیه‌سازی برای چهار سناریوی بررسی شده در قالب مقایسه زمان واقعی و زمان محاسباتی تشخیص وقوع ناپایداری هر یک از دو روش محاسباتی، تعداد پله‌های زمانی گزارش شده در طول شبیه‌سازی و تعداد تکرارهای گام شبیه‌سازی در روش پله محاسباتی تطبیقی در جدول ۱ و برای تک سناریوی افزایش بار ٪۲۰ بخشی از شبکه در قالب پروفیل ولتاژ شینه‌های بار برای سه مورد با بیشترین افت ولتاژ (L1, L7, L16) در شکل (۳)، جریان تحریک و زاویه نسبی روتور ژنراتورها برای سه مورد با بیشترین تغییرات و عملکرد سیستم اضافه تحریک (G7, Ge14) و به ترتیب در شکل (۴) و شکل (۵) و در قالب پله محاسباتی در روش پله محاسباتی تطبیقی در شکل (۶) نشان داده شده است.

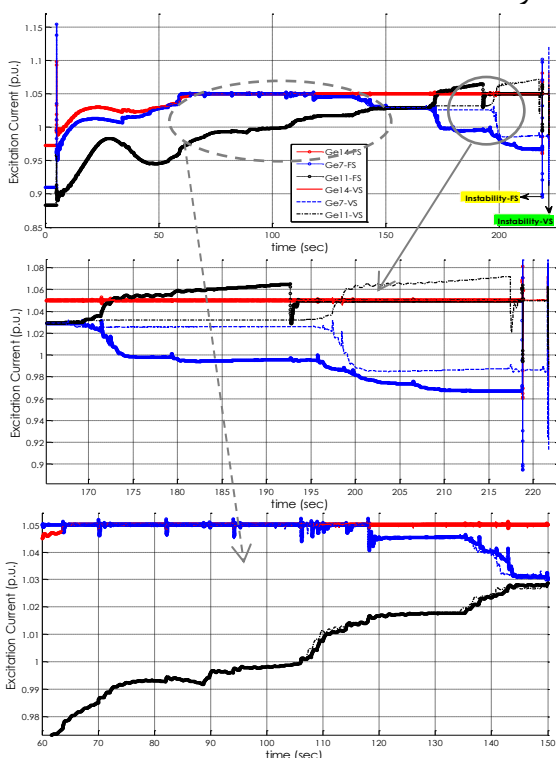
شایان ذکر است تعداد صفر شدن‌های مشاهده شده در شکل (۶) بیانگر تعداد دور ریز محاسبات به دلیل انتخاب پله اشتباه با خطای محاسباتی غیر قابل قبول و انجام مجدد شبیه‌سازی با کاهش پله زمانی است.

مطابق این نتایج مشاهده می‌شود که،

- مقایسه زمان محاسباتی برای تشخیص وقوع ناپایداری برای دو روش محاسباتی پله زمانی ثابت و تطبیقی اختلاف ۰/۰۴ تا ۱/۳ درصدی برای کلیه سناریوهای بررسی شده را نشان

پروسه نیست. از این رو ضروری است پیش از شروع شبیه سازی، متغیرهای گزارش گیری به درستی تعریف شوند. با تعریف تجهیزات در شبیه سازی، نرم افزار بصورت پیش فرض یک سری متغیرهای متداول گزارش گیری برای هر تجهیز ایجاد می نماید. برای مثال، با تعریف ژنراتور به عنوان تجهیز در شبیه سازی، در محیط نرم افزاری DigSILENT به صورت خودکار ۱۲ متغیر شامل: ولتاژ پایانه، جریان استاتور و روتور، زاویه نسبی روتور، سرعت و... برای این ژنراتور اختصاص دهی می شود. جلوگیری از تعریف متغیرهای بدون اهمیت، از دیدگاه مطالعات انجام شده و بررسی تاثیر کاهش تعداد متغیرهای گزارش گیری در راستای تسریع زمان تشخیص ناپایداری ولتاژ، هدف دنبال شده در این بخش است.

مقایسه نتایج زمان شبیه سازی ناپایداری با پله محاسباتی ثابت و بازه زمانی گزارش گیری برابر با پله محاسباتی، برای چهار حادثه اشاره شده در بخش دوم، با تعریف سه مجموعه متفاوت برای متغیرهای گزارش گیری به ترتیب با تعداد کل متغیرهای گزارش گیری برابر با صفر، ۱۲۲ و ۳۷۲ در جدول ۲، ارائه شده است.



شکل ۴- پروفیل جریان تحریک ژنراتورهای با بیشترین اختلاف بین دو پله محاسباتی ثابت و تطبیقی در حادثه افزایش بار ۲۰٪ در بخشی از شبکه (FS خروجی مطالعات پله محاسباتی ثابت و VS خروجی مطالعات پله تطبیقی متغیر)

می دهد و این اختلاف کم بیانگر صحت مدل سازی روش محاسباتی پله زمانی تطبیقی در محیط نرم افزاری و دقت قابل قبول این روش است.

- مستقل از نوع حادثه اولیه منتهی به ناپایداری (خروج خط یا تغییر بار)، در کلیه سناریوها تعداد پله های محاسباتی روش پله زمانی ثابت، در محدوده ۲۸۰ تا ۲۹۶ درصد تعداد پله های محاسباتی برای روش پله زمانی تطبیقی است و این در حالی است که در این سناریوها نسبت تسریع در محاسبات روش پله زمانی تطبیقی به روش پله زمانی ثابت مقداری در محدوده ۱ تا ۱۰ درصدی است.
- برای کلیه سناریوهای بررسی شده، نسبت تعداد تکرارهای مجدد پله محاسباتی برای روش پله زمانی تطبیقی (دورریز زمانی) مقداری در محدوده ۳/۱ تا ۳/۶ درصد است. مقایسه زمان محاسبات برای شبیه سازی سناریوی ناپایداری طی بازه های زمانی مختلف این پروسه زمانی، حاکی از آن است که در زمان های کم- تحرکی سیستم های کنترل کننده شبکه، استفاده از ابزار گام محاسباتی تطبیقی از دیدگاه بار محاسباتی بسیار مفید و مقرون به صرفه است اما این در حالی است که با افزایش عملکردهای سیستم های کنترلی، بار محاسباتی مجموع پروسه های محاسبه خطا و انتخاب گام محاسباتی، شبیه سازی گام زمانی انتخاب شده و بعضاً تکرار گام زمانی در روش پله زمانی تطبیقی، از تک پروسه شبیه سازی در روش پله زمانی ثابت بیشتر می شود و این پروسه به گونه ای ادامه می یابد که نهایتاً مقایسه زمان محاسباتی دو روش مختلف برای پیش- بینی وقوع ناپایداری، اختلاف قابل توجهی را ارائه نمی- دهد (تسریع ۱ تا ۱۰ درصدی).

۳- تأثیر متغیرهای گزارش گیری بر زمان محاسبات

به طور کلی ذخیره سازی یا نمایش همه اطلاعات محاسبه شده در هر گام زمانی توجیه و ضرورتی ندارد و این در حالی است که کاهش اطلاعات گزارش گیری منجر به کاهش زمان شبیه سازی می شود. در این بخش تأثیر تعداد متغیرها و بازه زمانی گزارش گیری بر روند تسریع زمان تشخیص ناپایداری، بررسی شده است. انجام پروسه شبیه سازی به معنای ذخیره سازی کلیه متغیرهای محاسبه شده در این

مطابق جدول ۲،

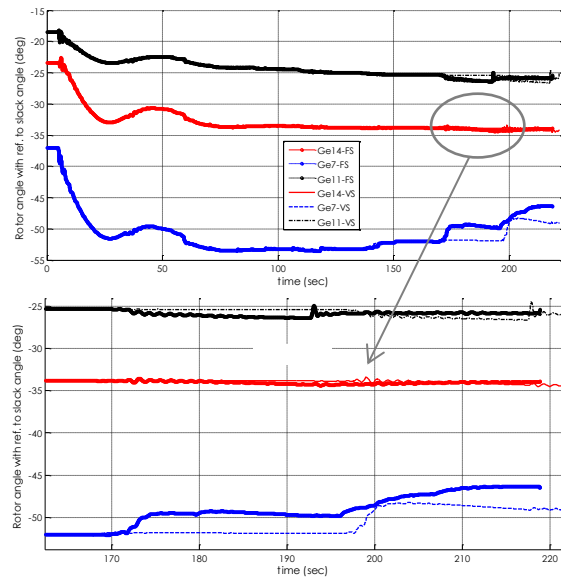
- زمان تشخیص ناپایداری برای تعداد متغیر صفر گزارش گیری یا به عبارتی در شرایطی که خروجی زیربرنامه صرفاً زمان تشخیص ناپایداری باشد نه تأمین اطلاعات ورودی به سایر زیربرنامه‌ها، سریع‌ترین زمان تشخیص است. بر این اساس، نسبت بهترین زمان تشخیص ناپایداری برای این تعداد متغیر برای چهار حادثه بررسی شده عبارتند از: ۱۰، ۹/۲، ۸/۷ و ۸/۹ درصد از زمان واقعی ناپایداری.
- افزایش حجم محاسبات زمانی با تغییر از صفر به ۱۲۲ برای چهار سناریو به ترتیب برابر است با ۲۴/۹، ۲۳/۸ و ۲۲ و ۲۰/۴ درصد.
- افزایش حجم محاسبات زمانی با تغییر از صفر به ۳۷۲ برای چهار سناریو به ترتیب برابر است با ۳۸/۸، ۳۶/۴ و ۳۳/۴ و ۳۱/۹ درصد.

۳-۱- تأثیر بازه زمانی گزارش‌گیری

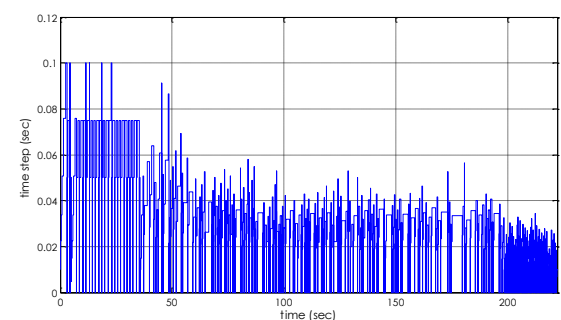
در صورتی که از پله محاسباتی ثابت برای انجام شبیه‌سازی استفاده شود، کاربر می‌تواند بازه زمانی گزارش‌گیری را تعیین نماید. حد پایین این بازه به پله محاسباتی محدود می‌شود و حد بالای این بازه توسط کاربر و متناسب با نیاز برنامه‌ریزی شده برای تحلیل متغیرها تعیین می‌شود. در این بررسی سه بازه زمانی تعریف شده برای گزارش‌گیری از نرم‌افزار عبارتند از: پله محاسباتی (۰/۱ ثانیه)، ۱۰ برابر پله محاسباتی (۰/۱ ثانیه) و ۱۰۰ برابر پله محاسباتی (۱ ثانیه). مقایسه نتایج زمان شبیه‌سازی ناپایداری با پله محاسباتی ثابت و تعداد متغیرهای گزارش‌گیری ۱۲۲، برای چهار حادثه اشاره شده در بخش دوم، با تعریف سه بازه زمانی گزارش‌گیری در جدول ۳ ارائه شده است.

مطابق این جدول مشاهده می‌شود که

- با افزایش بازه زمانی گزارش‌گیری به ۰/۱ ثانیه، میزان تسریع در زمان محاسبات به ترتیب برای چهار سناریوی بررسی شده ۱۱/۴، ۷/۳، ۴/۸ و ۱/۹ درصد زمان گزارش‌گیری با پله زمانی محاسبات است.
- با افزایش بازه زمانی گزارش‌گیری به ۱ ثانیه، میزان تسریع در زمان محاسبات به ترتیب برای چهار سناریوی بررسی شده ۲۱/۵، ۱۷/۶، ۱۶ و ۱۳/۱ درصد زمان گزارش‌گیری با پله زمانی محاسبات است.



شکل ۵- پروفیل زاویه نسبی روتور ژنراتورهای با بیشترین اختلاف بین دو پله محاسباتی ثابت و تطبیقی در حادثه خروج خط ۴۰۲۱-۴۰۴۲ (FS خروجی مطالعات پله محاسباتی ثابت و VS خروجی مطالعات پله تطبیقی متغیر)



شکل ۶- پله محاسباتی در الگوریتم پله تطبیقی برای حادثه خروج خط ۴۰۲۱-۴۰۴۲

جدول ۲- مقایسه زمان تشخیص ناپایداری ولتاژ برحسب ثانیه در تغییر متغیرهای گزارش‌گیری

تعداد متغیرهای گزارش‌گیری			ملاحظات
۳۷۲**	۱۲۲*	۰	
خروج خطوط			
۱۳/۲۵	۱۲/۳۶	۹/۹۸	۴۰۴۵-۴۰۴۲ و ۴۰۴۵-۴۰۵۱
۴۰۴۵			
خروج خط ۴۰۳۲-۴۰۴۴			
۱۶/۰۰	۱۴/۴۰	۱۱/۵۳	
سناریوی تغییرات بار ۲۰٪			
۲۵/۴۳	۲۳/۲۶	۱۹/۰۶	
سناریوی تغییرات بار ۵۰٪			
۱۹/۸۶	۱۸/۰۵	۱۵/۰۶	

* چهار متغیر برای هر یک از ۲۲ تپ چنجر، دوازده متغیر برای هر یک از ۲۰ ژنراتور و دو متغیر برای هر یک از ۲۲ شینه بار
 ** یک متغیر برای هر یک از ۲۲ تپ‌چنجر، دو متغیر برای هر یک از ۲۰ ژنراتور و یک متغیر برای هر یک از ۲۲ شینه بار

جدول ۳- مقایسه زمان تشخیص ناپایداری ولتاژ برحسب ثانیه در تغییر بازه زمانی گزارش‌گیری

ملاحظات	بازه زمانی گزارش‌گیری		
	(ثانیه)		
	۰/۱	۰/۱	۱
خروج خطوط ۴۰۴۵-۴۰۵۱ و ۴۰۴۵-۴۰۶۲	۱۲/۳۶	۱۰/۹۵	۹/۶۳
خروج خط ۴۰۳۲-۴۰۴۴	۱۴/۴۰	۱۳/۳۵	۱۱/۷۸
سناریوی تغییرات بار ۲۰٪	۲۳/۲۶	۲۲/۱۵	۱۹/۵۳
سناریوی تغییرات بار ۵۰٪	۱۸/۰۵	۱۷/۷۰	۱۵/۶۸

۴- نتیجه‌گیری

مستقل از نوع مسئله ناپایداری و یا حتی استراتژی مدیریتی در بررسی مسئله، دو مرحله اساسی برای انجام اقدامات کنترلی جهت جلوگیری از ناپایداری عبارتند از:

- شناسایی وضعیت موجود از طریق تشخیص ناپایداری و تعیین فاصله تا ناپایداری؛
- تعیین مؤثرترین راهکارهای اصلاحی.

شبیه‌سازی حوزه زمان یک ابزار ضروری برای ارزیابی دینامیکی شبکه‌های قدرت در هر دو مرحله است. در حال حاضر، پیچیدگی‌های زمان محاسباتی مانعی در به‌کارگیری این ابزار در تصمیم‌گیری‌های حوزه زمان واقعی است. در این مقاله معماری به‌کارگیری ابزار محاسباتی نرم‌افزار DIGSILENT برای تسریع در زمان تشخیص ناپایداری ولتاژ بلندمدت به عنوان اولین زیرسیستم در سیستم اصلی جلوگیری از وقوع ناپایداری ولتاژ ارائه شده است. متغیرهای بررسی شده در تحقق این تسریع عبارتند از: پله زمان محاسباتی، متغیرهای گزارش‌گیری و پله زمان گزارش‌گیری. نتایج به دست آمده در شبیه‌سازی حوادث ناپایداری ولتاژ در شبکه تست Nordic32 در یک پردازنده دو هسته ای با سرعت پردازش ۲/۸ گیگاهرتز و حافظه موقت ۴ گیگا بایت به قرار زیر است:

- زمان تشخیص ناپایداری در شرایط یکسان برای متغیرهای گزارش‌گیری، وابسته به الگوریتم انتخاب شده توسط کاربر برای پله محاسباتی ثابت یا تطبیقی است. برای معماری پیشنهادی، پله محاسباتی ثابت، انتخاب و پیشنهاد شده است. برای حوادث بررسی شده با تعداد متغیرهای کل ۱۲۲ و بازه زمانی گزارش‌گیری برابر با پله محاسباتی، نسبت زمان محاسباتی تشخیص

ناپایداری به زمان واقعی وقوع ناپایداری، در شبکه مورد مطالعه، مقداری در محدوده ۱۰/۶ تا ۱۲/۳ درصد است یعنی ۸/۱ تا ۹/۴ برابر سریع‌تر از زمان وقوع است.

- شایان ذکر است، اگرچه در حال حاضر امکان پیاده‌سازی ساختاری که در آن بهره‌بردار قادر به تعریف چندین بازه زمانی با پله زمانی محاسباتی مختلف باشد، وجود ندارد؛ اما در صورت وجود چنین ابزاری، پیشنهاد این نویسندگان تعریف حداقلی دو بازه زمانی در مطالعات است. بازه زمانی اول، از ابتدای مطالعات (شروع حادثه اولیه) تعریف می‌شود و تا، به طور مثال، عملکرد دومین تپ چنجر شبکه (برای شبکه با پارامترهای زمانی بررسی شده، برابر با ۴۰ ثانیه) ادامه می‌یابد. در این بازه کنترل کننده تجهیزات شبکه وارد محدوده عملکرد خود نشده و به‌کارگیری ابزار پله زمانی تطبیقی به تسریع در فرآیند محاسبات کمک می‌کند. بازه زمانی دوم که هسته شکل‌گیری ناپایداری بلند مدت است و به‌کارگیری پله محاسباتی ثابت (برای جلوگیری کردن از پروسه سعی و خطا برای پیدا کردن پله زمانی مناسب در الگوریتم پله زمانی تطبیقی) پیشنهاد می‌شود. این بازه زمانی پس از بازه زمانی اول شروع شده و تا انتهای محاسبات ادامه می‌یابد.
- زمان تشخیص ناپایداری در شرایط یکسان برای پله زمانی گزارش‌گیری، وابسته به تعداد متغیرهای تعریف شده است. بهترین زمان تشخیص ناپایداری بر حسب زمان واقعی ناپایداری در شرایطی که تعداد متغیرهای گزارش‌گیری صفر باشد و خروجی زیربرنامه صرفاً زمان تشخیص ناپایداری باشد، به دست می‌آید. این زمان برای بازه گزارش‌گیری برابر با پله محاسباتی، برای چهار حادثه بررسی شده در شبکه مورد مطالعه، مقداری در محدوده ۸/۷ تا ۱۰ درصد است یعنی ۱۰ تا ۱۱/۵ برابر سریع‌تر از زمان وقوع ناپایداری است.
- زمان تشخیص ناپایداری در شرایط یکسان از تعداد متغیرهای گزارش‌گیری، وابسته به بازه زمانی گزارش‌گیری است. بهترین زمان تشخیص ناپایداری با انتخاب بزرگترین زمان گزارش‌گیری محقق می‌گردد. برای حوادث بررسی شده با تعداد متغیرهای کل ۱۲۲ و بازه زمانی گزارش‌گیری یک ثانیه، نسبت زمان محاسباتی تشخیص ناپایداری به زمان واقعی وقوع ناپایداری، در شبکه مورد مطالعه، مقداری در محدوده ۸/۹ تا ۹/۶

ساختار که با استفاده از سه ابزار پله زمانی محاسبات، تعداد متغیرهای گزارش‌گیری و فاصله زمانی گزارش‌گیری مطرح گردید، با هدف تسریع در زمان تشخیص ناپایداری ولتاژ به‌کارگرفته شد. بدیهی است ساختار پیشنهادی بر روی هر یک از مطالعات حوزه زمان، به نحو مقتضی در راستای کاهش زمان محاسباتی، قابل پیاده‌سازی است.

درصد است یعنی ۱۰/۴ تا ۱۱/۲ برابر سریع‌تر از زمان وقوع است. از مهم‌ترین دستاوردهای ساختار پیشنهادی، مهندسی در به‌کارگیری ابزار محاسباتی، تعیین راهکارهای در اختیار کاربر برای تسریع در زمان انجام محاسبات با تکیه بر قابلیت‌های نرم‌افزار و بدون انجام ساده‌سازی‌هایی همچون به‌کارگیری و یا استفاده از شبکه‌های معادل است. این

مراجع

- [1] F. Capitanescu, T.V. Cutsem and L. Wehenkel, "Coupling Optimization and Dynamic Simulation for Preventive-Corrective Control of Voltage Instability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 2, 2009, pp. 796–805.
- [2] P. Aristidou and T. Van Cutsem, "Dynamic simulations of combined transmission and distribution systems using parallel processing techniques", Power Systems Computation Conference, Wroclaw, 2014, pp. 1–7.
- [3] L. Papangelis, P. Panciatici, T. Van Cutsem and M. S. Deby, "A dynamic simulation approach to identify additional reactive reserves against long-term voltage instability", IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven, 2015, pp. 1–6.
- [4] T. Weckesser, V. Franz, E. Grebe and T. Van Cutsem, "A model reduction approach for simulation of long-term voltage and frequency dynamics", IEEE Manchester PowerTech, Manchester, 2017, pp. 1–6
- [۵] م. درفشیان مرام، ن. امجدی، "جلوگیری از رخداد ناپایداری‌های گذرا و ولتاژ با استفاده از یک طرح اقدامات اصلاحی مبتنی بر قطع تولید و حذف بار"، مجله علمی و پژوهشی مدل‌سازی در مهندسی، دانشگاه سمنان، دوره ۱۴، شماره ۴۶، ۱۳۹۵، صفحه ۱۳۷–۱۵۰.
- [۶] م.ح. ولایتی، ن. امجدی، ع. خواجه‌وندی، "ارزیابی تأثیر راه‌کار کنترل توان راکتیو مبتنی بر ولتاژ ترمینال ژنراتورها بر دوشاخگی LIB و حد دینامیکی پایداری ولتاژ"، مجله علمی و پژوهشی مدل‌سازی در مهندسی، دانشگاه سمنان، دوره ۱۱، شماره ۳۳، ۱۳۹۲، صفحه ۶۹–۸۱.
- [۷] ن. امجدی، م.ح. ولایتی، "بررسی تأثیر مدل‌های بار، پارامترهای سیستم تحریک و محدودیت توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای سیستم قدرت در حد دینامیکی پایداری ولتاژ با استفاده از یک آنالیز ترکیبی"، مجله علمی و پژوهشی مدل‌سازی در مهندسی، دانشگاه سمنان، دوره ۸، شماره ۲۰، ۱۳۸۹، صفحه ۳۹–۵۵.
- [8] M. Glavic and T. Van Cutsem, "Wide-Area Detection of Voltage Instability From Synchronized Phasor Measurements. Part I: Principle", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 3, 2009, pp. 1408–1416.
- [9] R. Sodhi, S. C. Srivastava and S. N. Singh, "A Simple Scheme for Wide Area Detection of Impending Voltage Instability", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 2, 2012, pp. 818–827.
- [10] C. D. Vournas, C. Lambrou and P. Mandoulidis, "Voltage Stability Monitoring From a Transmission Bus PMU", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 32, No. 4, 2017, pp. 3266–3274.
- [11] M.M.M. Kamel, A.A. Karrar and A.H. Eltom, "Development and Application of a New Voltage Stability Index for On-Line Monitoring and Shedding", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 33, No. 2, 2018, pp. 1231–1241.

- [12] A. Ashrafi and S.M. Shahrtash, "Dynamic Wide Area Voltage Control Strategy Based on Organized Multi-Agent System", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 29, No. 6, 2014, pp. 2590–2601.
- [13] J.H. Liu and C.C. Chu, "Wide-Area Measurement-Based Voltage Stability Indicators by Modified Coupled Single-Port Models", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 29, No. 2, 2014, pp. 756–764.
- [14] Tushar, S.S. Biswas and A.K. Srivastava, "A comparative study of model and measurement based voltage stability approaches", *North American Power Symposium (NAPS)*, Charlotte, NC, USA, 4–6 Oct. 2015, pp. 1–6.
- [15] J. Chen and M.L. Crow, "A Variable Partitioning Strategy for the Multirate Method in Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, 2008, pp. 259–266.
- [16] J. Blanger, P. Venne and J.-N. Paquin, "The what, where and why of real-time simulation", *IEEE PES General Meeting*, 2010, pp. 37–49
- [17] M.D.O. Faruque, T. Strasser, G. Lauss, V. Jalili-Marandi, P. Forsyth, C. Dufour, et al., "Real-Time Simulation Technologies for Power Systems Design, Testing, and Analysis", *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, Vol. 2, No. 2, 2015, pp. 63–73.
- [18] B. Haut, V. Savcenco, and P. Panciatici, "A Multirate Approach for Time Domain Simulation of Very Large Power Systems", *International Conference on System Science (HICSS)*, 2012, pp. 2125–2132.
- [19] E. Gawronska, N. Sczygiol, "Relationship between Eigenvalues and Size of Time Step in Computer Simulation of Thermomechanics Phenomena", in *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists (IMECS)*, 2014, pp. 881–885
- [20] M. PÄoller and M. Schmieg, "The efficient simulation of multiple time scale systems", in *Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, 1997, pp. 22–26.
- [21] M. PÄoller and M. Schmieg, "Exploiting multiple time scale properties for fast simulation algorithms", in *Proceeding of the Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 1999, pp. 1–7.
- [22] C. Gear, "Multirate Methods for Ordinary Differential Equations", *University Illinois at Urbana-Champaign*, Technical Report, 1974.
- [23] P.I. Hwang, S.J. Ahn, S.I. Hur, Y.T. Yoon, and S.I. Moon, "Adaptive step size method for the power system model of dispatcher training simulator", in *IEEE PES General Meeting*, 2010, pp. 1–7.
- [24] Test Systems for Voltage Stability Analysis and Security Assessment, *IEEE PES-TR19*, prepared by the Power System Dynamic Performance Committee, Power System Stability Subcommittee, 2015.