

# تخمین برخط پایداری گذرا در سیستم قدرت دوناحیه‌ای بر اساس ترکیب اندازه‌گیری‌های محلی و ناحیه گسترده

مهرداد عرب‌زاده، حسین سیفی و محمدکاظم شیخ‌الاسلامی

دسته‌ای از مراجع به آن پرداخته شده و مجموعه‌ای از اقدامات پیش‌گیرانه برای حفظ پایداری گذرای شبکه پیشنهاد شده است [۳] تا [۱۰]. در این روش‌ها چنانچه نتایج شبیه‌سازی ناپایداری شبکه را در صورت وقوع یک خطای مشخص نشان دهد، نقطه کار ژنراتورها با انجام پخش بار بهینه مقید به پایداری گذرا به نحوی تغییر داده می‌شود که در صورت وقوع پیشامدهای معین، شبکه دچار ناپایداری نشود. در [۱۱] نیز مسأله پخش بار بهینه مقید به پایداری گذرا مورد بررسی قرار گرفته که مسأله فوق به ۳ زیرمسأله شامل ارزیابی پایداری گذرا، تشکیل قید پایداری گذرا و حل مسأله پخش بار بهینه مقید به قید پایداری گذرا تقسیم شده است که این ۳ زیرمسأله تا رسیدن به نقطه کار بهینه به صورت تکراری حل می‌شود. در [۱۲] روشی برای پایش پایداری گذرای شبکه ارائه شده که در آن پس از ساده‌سازی شبکه به روش SIME، پارامترهای منحنی نوسان توان بر حسب زمان نظیر دامنه، ضریب میرایی و فرکانس نوسانات تخمین زده می‌شود و شاخصی به عنوان معیار پایداری گذرا بر اساس مساحت بین منحنی نوسان و محور زمان محاسبه می‌شود. در [۱۳]، ۲ روش شبیه‌سازی حوزه زمان و معیار مساحت‌های برابر برای ارزیابی پایداری گذرای سیستم قدرت با یکدیگر مقایسه شده که ناچیزبودن اختلاف دو روش فوق نتیجه گرفته شده است.

با توجه به این که در مراجع فوق روش‌های ارزیابی پایداری گذرا و اقدامات پیش‌گیرانه بر اساس مطالعات و شبیه‌سازی‌های آفلاین طراحی می‌شود، ریسک عملکرد نادرست آنها در شرایط زمان حقیقی وجود دارد. لذا در برخی از مراجع به منظور کاهش ریسک عملکرد نامطلوب سیستم حفاظت ویژه، استفاده از روش‌های برخط و در نظر گرفتن داده‌های به‌هنگام<sup>۳</sup> واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMU) پیشنهاد شده که بر اساس آن اجازه بهره‌برداری از سیستم قدرت تا مرزهای ناپایداری داده می‌شود و از یک سیستم حفاظت ویژه برخط برای تضمین پایداری شبکه قدرت استفاده می‌کند که در صورت وقوع پیشامد مجموعه اقدامات اصلاحی لازم را برای حفظ پایداری شبکه اتخاذ می‌کند [۱۴] تا [۱۶]. در [۱۴] به منظور کاهش ریسک سیستم حفاظت ویژه، استفاده از یک روش برخط برای پیش‌بینی پایداری گذرای سیستم پیشنهاد شده که بر اساس داده‌های واحدهای اندازه‌گیری فاز عمل می‌کند. سیستم حفاظت ویژه مورد بحث در این مرجع وظیفه خروج واحدهای ژنراتوری محدودی از شبکه به‌هنگام ناپایداری گذرای سیستم را به عهده دارد تا از ناهمگام‌شدن سایر واحدهای نیروگاهی جلوگیری شود. در روش ارائه‌شده در این مرجع، زاویه رتور ژنراتورها با یک منحنی چندجمله‌ای درجه چهارم بر حسب زمان مدل می‌شود و بر اساس اندازه‌گیری زاویه شین متصل به ژنراتور توسط PMU، این منحنی قبل از ناپایدارشدن ژنراتور تخمین زده می‌شود و با انجام اقدام

چکیده: پایداری گذرا یکی از مسایل پراهمیت در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است و لذا ارزیابی وضعیت پایداری گذرای شبکه امری ضروری است. روش‌های معمول ارزیابی وضعیت پایداری گذرا به صورت آفلاین می‌باشد که بر اساس آن مجموعه‌ای از اقدامات پیش‌گیرانه اتخاذ می‌شود و یا مجموعه‌ای از اقدامات اصلاحی تحت عنوان تدابیر ویژه حفاظتی برای عملکرد در شرایط زمان واقعی طراحی می‌شود. به منظور کاهش ریسک تدابیر اتخاذشده در شرایط زمان واقعی، در این مقاله روشی جدید برای تخمین برخط پایداری گذرا ارائه شده است که بر اساس ترکیب اندازه‌گیری‌های محلی و ناحیه گسترده عمل می‌کند. بر اساس این روش ابتدا سیستم قدرت دوناحیه‌ای با دسته‌بندی ژنراتورهای هم‌نوا و بر اساس روش تک‌ماشین معادل ساده‌سازی شده و سپس از معیار سطوح برابر برای پیش‌بینی پایداری گذرای آن استفاده می‌شود. بر اساس نوآوری روش پیشنهادی، سطح شتاب‌دهنده منحنی توان الکتریکی بر حسب زاویه رتور شبکه تک‌ماشین معادل در لحظات وقوع خطا از روی سطوح شتاب‌دهنده محاسبه شده در هر یک از شین‌های ژنراتوری به صورت محلی محاسبه می‌شود که دقت محاسبات را افزایش می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده بر روی شبکه‌های نمونه ۱۱ شینه با چهار ژنراتور سنکرون و ۳۹ شینه با ۱۰ ژنراتور سنکرون، کارآمدی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه: اندازه‌گیری‌های ناحیه گسترده، تدابیر ویژه حفاظتی، تخمین پایداری گذرا، روش تک‌ماشین معادل، معیار سطوح برابر.

## ۱- مقدمه

امروزه به دلایل مختلف اقتصادی و زیست‌محیطی، احداث خطوط جدید برای انتقال توان با مشکلات فراوانی همراه است، لذا استفاده از سیستم حفاظت ویژه<sup>۱</sup> به عنوان یک جایگزین برای احداث خطوط انتقال جدید به حساب می‌آید که با هزینه کمتر و راه‌اندازی سریع‌تر، امکان بهره‌برداری از سیستم را تا مرزهای پایداری امکان‌پذیر می‌کند و به عبارتی قابلیت انتقال<sup>۲</sup> سیستم را افزایش می‌دهد [۱] و [۲]. در اکثر سیستم‌های حفاظت ویژه مجموعه‌ای از اقدامات از پیش تعیین شده به هنگام وقوع پیشامدهای معینی اتخاذ می‌شود که این اقدامات بر اساس مطالعات و شبیه‌سازی‌های آفلاین طراحی می‌شود. یکی از مسایل پراهمیت در این زمینه، حفظ پایداری گذرای سیستم قدرت می‌باشد که در

این مقاله در تاریخ ۱۷ آبان ماه ۱۳۹۴ دریافت و در تاریخ ۱۹ مهر ماه ۱۳۹۵ بازنگری شد.

مهرداد عرب‌زاده، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: mehrdad.arabzadeh@gmail.com).

حسین سیفی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: seifi\_ho@modares.ac.ir).

محمدکاظم شیخ‌الاسلامی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، (email: aleslam@modares.ac.ir).

3. Real Time

4. Phasor Measurement Unit

1. Special Protection System

2. Transfer Capability

شبیه‌سازی بر روی شبکه نمونه کارآمدی روش پیشنهادی نشان داده و نتایج این مقاله نیز در بخش پایانی ارائه می‌شود.

## ۲- مدل معادل تک‌ماشین به شین بی‌نهایت

پس از وقوع یک خطا در شبکه قدرت، ژنراتورهای سنکرون موجود در شبکه شروع به نوسان می‌کند که ساده‌ترین معادلات توصیف‌کننده نوسان یک ژنراتور سنکرون، معادلات مرتبه دوم زیر است [۴]

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\omega}{M_i} (P_i^{mec} - P_i^e) \quad (۱)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega \quad (۲)$$

با توجه به محل خطا، ژنراتورهای شبکه به گروه‌های هم‌نوا تقسیم می‌شود که هر دسته به صورت هماهنگ با یکدیگر نوسان می‌کند. گروهی از ژنراتورهای هم‌نوا که به محل خطا نزدیک‌تر می‌باشد به اصطلاح ژنراتورهای بحرانی و سایر ژنراتورها غیر بحرانی نامیده می‌شود. بر اساس این تقسیم‌بندی، شبکه مورد مطالعه در حین اغتشاش را می‌توان با یک شبکه دوماشینه معادل کرد که پارامترهای مربوط به آن بر اساس معادلات زیر به دست می‌آید [۴]

$$M_{C_1} = \sum_{i \in C_1} M_i \quad (۳)$$

$$M_{C_2} = \sum_{j \in C_2} M_j \quad (۴)$$

$$\delta_{C_1}(t) = M_{C_1}^{-1} \sum_{i \in C_1} M_i \delta_i(t) \quad (۵)$$

$$\delta_{C_2}(t) = M_{C_2}^{-1} \sum_{j \in C_2} M_j \delta_j(t) \quad (۶)$$

در معادلات فوق  $C_1$  و  $C_2$  دو مجموعه هم‌نوی ژنراتوری،  $M_{C_1}$  و  $M_{C_2}$  به ترتیب ممان اینرسی معادل ژنراتورهای بحرانی و غیر بحرانی شبکه و  $\delta_{C_1}$  و  $\delta_{C_2}$  متناظر با مراکز زاویه  $\delta_{COA}$  (۴) دو دسته ژنراتوری مذکور می‌باشد. در نهایت با نوشتن معادلات ریاضی می‌توان مدل سیستم دوماشینه را به مدل تک‌ماشین به شین بی‌نهایت تبدیل کرد که با داشتن پارامترهای مربوط به هر ژنراتور شبکه، پارامترهای مربوط به مدل معادل OMIB به صورت زیر می‌باشد

$$\delta(t) = \delta_{C_1}(t) - \delta_{C_2}(t) = M_{C_1}^{-1} \sum_{i \in C_1} M_i \delta_i(t) - M_{C_2}^{-1} \sum_{j \in C_2} M_j \delta_j(t) \quad (۷)$$

$$\omega(t) = \omega_{C_1}(t) - \omega_{C_2}(t) = M_{C_1}^{-1} \sum_{i \in C_1} M_i \omega_i(t) - M_{C_2}^{-1} \sum_{j \in C_2} M_j \omega_j(t) \quad (۸)$$

$$P^e(t) = MM_{C_1}^{-1} \sum_{i \in C_1} P_i^e(t) - MM_{C_2}^{-1} \sum_{j \in C_2} P_j^e(t) \quad (۹)$$

$$P^{mec}(t) = MM_{C_1}^{-1} \sum_{i \in C_1} P_i^{mec}(t) - MM_{C_2}^{-1} \sum_{j \in C_2} P_j^{mec}(t) \quad (۱۰)$$

که در این روابط  $M = (M_{C_1} M_{C_2}) / (M_{C_1} + M_{C_2})$  است و بدین ترتیب پارامترهای شبکه معادل OMIB قابل محاسبه می‌باشد.

حفاظتی از شبکه جدا می‌شود. برای تخمین پارامترهای مجهول منحنی درجه چهارم از روش حداقل مربعات<sup>۱</sup> استفاده شده است. در [۱۵] به ارزیابی ریسک و مقایسه میان سیستم حفاظت ویژه برخط و آفلاین پرداخته شده است. در این مرجع نیز برای تعیین وضعیت پایداری گذرا و لزوم قطع ژنراتور از شبکه در صورت احتمال ناپایداری، از روش تخمین منحنی درجه چهارم زاویه رتور از طریق داده‌های PMU استفاده شده و انتخاب بهینه پارامترهای تخمین مانند زمان شروع و همچنین طول پنجره داده‌ها مورد بحث قرار گرفته است. روش مطرح شده در مراجع فوق علی‌رغم بار محاسباتی نسبتاً کم و امکان‌پذیر بودن انجام آن در شرایط زمان واقعی، در برخی از موارد تخمین نادرستی از وضعیت پایداری گذرای شبکه نتیجه می‌دهد. در [۱۶] با انجام شبیه‌سازی بسیار سریع مدل کاهش مرتبه یافته شبکه در حوزه زمان بر اساس داده‌های دریافتی از PMU، پایداری گذرای شبکه به صورت زمان واقعی تخمین زده می‌شود. در این روش به هنگام وقوع خطا در شبکه، از روی داده‌های واحدهای اندازه‌گیری فازور موجود در شین‌های ژنراتوری، ابتدا مدل کاهش مرتبه یافته شبکه برای تحلیل هر ژنراتور به صورت مجزا به دست می‌آید و سپس با تعیین شرایط اولیه هر ژنراتور برای زمان پس از خطا با انجام یک شبیه‌سازی سریع زمانی پایداری آن تخمین زده می‌شود. با در نظر گرفتن سیستم‌های قدرت واقعی بزرگ اندازه، استفاده از این روش به دلیل بالا رفتن حجم محاسبات زمان واقعی برای ارزیابی برخط وضعیت پایداری گذرای شبکه با مشکل روبه‌رو می‌شود.

با توجه به کمبودهای ذکر شده در مراجع فوق، در این مقاله روشی برای تخمین برخط وضعیت پایداری گذرای سیستم قدرت بر اساس داده‌های زمان واقعی محلی و ناحیه گسترده پیشنهاد می‌شود که علاوه بر بهبود دقت، دارای حجم محاسباتی کم و مناسب برای ارزیابی شبکه در شرایط زمان واقعی می‌باشد. این روش برای سیستم‌های قدرتی ارائه شده که قابل تقسیم به دو ناحیه با ژنراتورهای هم‌نوا باشد. روش‌های نوین در تشخیص گروه‌های هم‌نوی ژنراتوری سیستم‌های قدرت در [۱۷] و [۱۸] مطرح شده و در این مقاله فرض بر این است که گروه‌های هم‌نوی بر اساس مطالعات آفلاین و روش‌های موجود از قبل تعیین شده است. لذا در روش پیشنهادی با فرض مشخص بودن ژنراتورهای هم‌نوا، شبکه قدرت بر اساس روش تک‌ماشین معادل<sup>۲</sup> (SIME) ساده‌سازی شده و سپس از معیار سطوح برابر برای پیش‌بینی پایداری گذرای آن استفاده می‌شود که در آن ترکیبی از اندازه‌گیری‌های محلی در شین‌های ژنراتوری و اندازه‌گیری‌های ناحیه گسترده PMUهای موجود در این شین‌ها به کار برده شده است. بر اساس روش پیشنهادی، سطح شتاب‌دهنده منحنی توان الکتریکی- زاویه رتور شبکه OMIB معادل در لحظات وقوع خطا از روی سطوح شتاب‌دهنده محاسبه شده در هر یک از شین‌های ژنراتوری به صورت محلی محاسبه می‌شود. همچنین به منظور محاسبه سطح شتاب‌گیرنده، از تخمین منحنی فوق در لحظات پس از خطا<sup>۳</sup> بر اساس داده‌های ارسالی از PMUهای شین‌های ژنراتوری استفاده می‌شود.

ساختار ادامه این مقاله به این صورت می‌باشد: در بخش دوم روابط مربوط به مدل معادل تک‌ماشین به شین بی‌نهایت ارائه می‌شود و پس از آن در بخش سوم جزئیات و فرمول‌بندی مربوط به روش جدید پیشنهادی برای تخمین برخط پایداری گذرا مطرح می‌شود. در بخش چهارم با انجام

1. Least Square
2. Single Machine Equivalent
3. Post Fault

بخش سوم آورده شده است. به این ترتیب با محاسبه هر یک از سطوح فوق با استفاده از داده‌های زمان واقعی و مقایسه آنها، وضعیت پایداری گذرای شبکه به صورت برخط تخمین زده می‌شود.

### ۳-۱ روش پیشنهادی برای محاسبه سطح شتاب‌دهنده در مدل معادل OMIB از روی سطوح شتاب‌دهنده هر ژنراتور

سطح شتاب‌دهنده در منحنی  $P_e - \delta$  مربوط به مدت زمان برقراری خطا در شبکه می‌باشد که این زمان به سرعت تشخیص رله‌های حفاظتی و سرعت عملکرد کلیدهای قدرت بستگی دارد. برای محاسبه دقیق این سطح لازم است رابطه توان الکتریکی بر حسب زاویه رتور در مدل OMIB در طول مدت برقراری خطا موجود باشد. با توجه به مشخص نبودن این رابطه و همچنین به دلیل زمان نسبتاً کوتاه وقوع خطا، تعداد نمونه‌های ارسالی توسط واحدهای PMU برای مرکز کنترل با فرض صحیح بودن، برای تعیین دقیق این سطح کافی نمی‌باشد. لذا در این قسمت از مقاله روشی برای محاسبه سطح شتاب‌دهنده مدل OMIB بر حسب سطوح اندازه‌گیری شده محلی در شین‌های ژنراتوری ارائه می‌شود. در این روش فرض می‌شود در هر یک از شین‌های ژنراتوری برای لحظات برقراری خطا، دسته‌ای از محاسبات توسط یک واحد محاسبه از روی داده‌های محلی که با نرخ بالا در دسترس است، انجام می‌شود و نتایج آن پس از عملکرد سیستم حفاظتی برای مرکز کنترل ارسال می‌شود. در مرکز کنترل نیز با انجام محاسبات ساده ریاضی بر روی این داده‌ها، سطح شتاب‌دهنده معادل با تقریب خوبی محاسبه می‌شود. سطح شتاب‌دهنده در مدل تک‌ماشین به شین بی‌نهایت برابر است با

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P^{mec} - P^e) d\delta \quad (11)$$

با جایگذاری (۹) و (۱۰) در (۱۱) می‌توان نوشت

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_c} ((MM_{C_t}^{-1} \sum_{i \in C_t} P_i^{mec}(t) - MM_{C_t}^{-1} \sum_{j \in C_t} P_j^{mec}(t)) - (MM_{C_t}^{-1} \sum_{i \in C_t} P_i^e(t) - MM_{C_t}^{-1} \sum_{j \in C_t} P_j^e(t))) d\delta \quad (12)$$

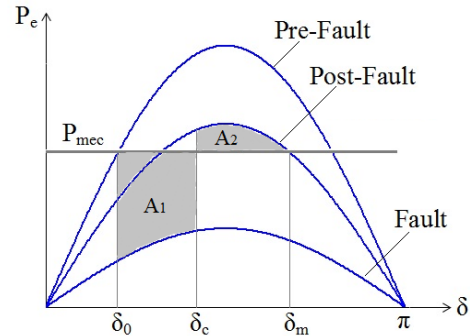
رابطه (۱۲) به صورت زیر خلاصه می‌شود

$$A_1 = MM_{C_t}^{-1} \int_{\delta_0}^{\delta_c} \sum_{i \in C_t} (P_i^{mec} - P_i^e) d\delta - MM_{C_t}^{-1} \int_{\delta_0}^{\delta_c} \sum_{j \in C_t} (P_j^{mec} - P_j^e) d\delta \quad (13)$$

با جایگذاری (۷) در (۱۳) و تغییر متغیر انتگرال‌گیری به حوزه زمان، (۱۴) را خواهیم داشت. با توجه به این که  $d\delta_m(t)/dt = \omega_m(t) - \omega$  همچنین با در نظر گرفتن  $\frac{d\delta_m(t)/dt}{d\delta_n(t)/dt} = \frac{\omega_m(t) - \omega}{\omega_n(t) - \omega} = K_{mn}(t)$ ، (۱۴)

به صورت (۱۵) بازنویسی می‌شود

$$A_1 = MM_{C_t}^{-1} \int_t^{t_c} (\sum_{i \in C_t} (P_i^{mec}(t) - P_i^e(t)) (M_{C_t}^{-1} \sum_{m \in C_t} M_m \frac{d\delta_m(t)}{dt} - M_{C_t}^{-1} \sum_{n \in C_t} M_n \frac{d\delta_n(t)}{dt})) dt - MM_{C_t}^{-1} \int_t^{t_c} (\sum_{j \in C_t} (P_j^{mec}(t) - P_j^e(t)) (M_{C_t}^{-1} \sum_{m \in C_t} M_m \frac{d\delta_m(t)}{dt} - M_{C_t}^{-1} \sum_{n \in C_t} M_n \frac{d\delta_n(t)}{dt})) dt \quad (14)$$



شکل ۱: بررسی معیار سطوح برابر از روی منحنی توان الکتریکی بر حسب زاویه رتور در مدل OMIB.

### ۳-۲ روش جدید تخمین برخط پایداری گذرا بر اساس ترکیب اندازه‌گیری‌های محلی و ناحیه گسترده

در روش تخمین برخط وضعیت پایداری گذرای شبکه مطرح شده در [۱۴] و [۱۵] منحنی زاویه رتور بر حسب زمان به صورت یک چندجمله‌ای درجه چهارم  $\delta(t) = a + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4$  در نظر گرفته می‌شود و از طریق داده‌های PMU موجود در شین‌های ژنراتوری این منحنی برای زمان پس از خطا با روش حداقل مربعات تخمین زده شده و وضعیت پایداری شبکه از روی آن بررسی می‌گردد. این روش با وجود حجم محاسباتی نسبتاً کم و امکان‌پذیر بودن انجام آن در شرایط زمان واقعی، در برخی از موارد تخمین نادرستی از وضعیت پایداری گذرای شبکه نتیجه می‌دهد. در این مقاله روشی جدید در این زمینه پیشنهاد می‌شود که علاوه بر حجم محاسباتی کم، دارای دقت بالایی می‌باشد. روش پیشنهادی بر مبنای معیار ارزیابی سطوح برابر است با این تفاوت که به جای انجام شبیه‌سازی آف‌لاین شبکه، از ترکیب اندازه‌گیری‌های زمان واقعی محلی و ناحیه گسترده برای انجام محاسبات به صورت به‌هنگام و در نتیجه تخمین برخط وضعیت پایداری گذرای شبکه استفاده می‌شود. با توجه به این که معیار سطوح برابر برای شبکه تک‌ماشین متصل به شین بی‌نهایت مطرح شده است، ابتدا سیستم قدرت چندماشینه با مدل معادل تک‌ماشین متصل به شین بی‌نهایت ساده‌سازی می‌شود که پارامترهای آن را می‌توان بر اساس روابطی که در بخش قبل مطرح شد بر حسب پارامترهای دسته ژنراتورهای بحرانی و غیر بحرانی محاسبه کرد. همچنین بر اساس این معیار لازم است مطابق شکل ۱ سطوح شتاب‌دهنده ( $A_1$ ) و شتاب‌گیرنده ( $A_2$ ) منحنی توان الکتریکی بر حسب زاویه رتور محاسبه و با یکدیگر مقایسه شود. بدین منظور در این مقاله روشی جدید برای محاسبه سطح شتاب‌دهنده در مدل معادل OMIB از روی سطوح شتاب‌دهنده هر ژنراتور ارائه شده که بر اساس داده‌های زمان واقعی محلی هر ژنراتور در حین خطا می‌باشد و فرمول‌بندی مربوط به آن به صورت مفصل در بخش سوم مطرح می‌شود. همچنین به منظور محاسبه سطح شتاب‌گیرنده از روش ارائه‌شده در [۱۹] استفاده شده که بر اساس آن منحنی توان الکتریکی بر حسب زاویه رتور برای لحظات پس از خطا از روی داده‌های ناحیه گسترده قبل از رسیدن به لحظه ناپایداری تخمین زده می‌شود و سطح شتاب‌گیرنده محاسبه می‌شود. فرمول‌بندی مربوط به این محاسبات نیز در

$$A_i = MM_{C_i}^{-1} \sum_{i \in C_i} \int_{t_i}^{t_c} ((P_i^{mec}(t) - P_i^e(t))(M_{C_i}^{-1} \sum_{m \in C_i} \frac{M_m}{K_{im}(t)} - M_{C_i}^{-1} \sum_{n \in C_i} \frac{M_n}{K_{in}(t)})(\omega_i(t) - \omega)) dt -$$

$$MM_{C_i}^{-1} \sum_{j \in C_i} \int_{t_i}^{t_c} ((P_j^{mec}(t) - P_j^e(t))(M_{C_i}^{-1} \sum_{m \in C_i} \frac{M_m}{K_{jm}(t)} - M_{C_i}^{-1} \sum_{n \in C_i} \frac{M_n}{K_{jn}(t)})(\omega_j(t) - \omega)) dt$$
(۱۵)

$$A_i = MM_{C_i}^{-1} \sum_{i \in C_i} \int_{t_i}^{t_c} ((P_i^{mec}(t) - P_i^e(t))(M_{C_i}^{-1} \sum_{m \in C_i} \frac{M_m}{K_{im}(t)} - M_{C_i}^{-1} \sum_{n \in C_i} \frac{M_n}{K_{in}(t)})(\omega_i(t) - \omega)) dt -$$

$$MM_{C_i}^{-1} \sum_{j \in C_i} \int_{t_i}^{t_c} ((P_j^{mec}(t) - P_j^e(t))(M_{C_i}^{-1} \sum_{m \in C_i} \frac{M_m}{K_{jm}(t)} - M_{C_i}^{-1} \sum_{n \in C_i} \frac{M_n}{K_{jn}(t)})(\omega_j(t) - \omega)) dt$$
(۱۷)

### ۲-۳ محاسبه سطح شتاب گیرنده در مدل OMIB

برای محاسبه سطح شتاب گیرنده در مدل تک ماشین معادل، ابتدا معادله منحنی توان الکتریکی بر حسب زاویه رتور از روی داده‌های ناحیه گسترده تخمین زده می‌شود. مطابق روش ارائه شده در [۱۹] برای تخمین مشتق دوم زاویه رتور بر حسب زاویه رتور با یک رابطه سینوسی و با توجه به رابطه خطی میان توان الکتریکی خروجی ژنراتور و مشتق دوم زاویه رتور مطابق (۱)، رابطه میان توان الکتریکی خروجی ژنراتور و زاویه رتور نیز مطابق معادله زیر به صورت سینوسی می‌تواند نوشته شود

$$P^e = A + B \cos \delta + C \sin \delta \quad (۲۲)$$

با جمع‌آوری تعداد  $n$  نمونه از داده‌های PMUهای مستقر در شین‌های ژنراتوری و محاسبه مقادیر نظیر آن در مدل OMIB می‌توان بر اساس الگوریتم حداقل مربعات خطا، مقادیر  $A$ ،  $B$  و  $C$  را به صورت زیر محاسبه کرد که به عبارت دیگر به معنای تخمین منحنی  $P_e - \delta$  است

$$\begin{bmatrix} P^e(\cdot) \\ P^e(-\Delta t) \\ \vdots \\ P^e(-n\Delta t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sin(\delta(\cdot)) & \cos(\delta(\cdot)) \\ \sin(\delta(-\Delta t)) & \cos(\delta(-\Delta t)) \\ \vdots & \vdots \\ \sin(\delta(-n\Delta t)) & \cos(\delta(-n\Delta t)) \end{bmatrix}}_R \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \quad (۲۳)$$

با در نظر گرفتن  $X$  به عنوان ماتریس مجهولات می‌توان نوشت

$$Z = RX \quad (۲۴)$$

با هدف داشتن حداقل مجموع مربعات خطا، ماتریس مربوط به ضرایب مجهول به روش شبه معکوس<sup>۱</sup> زیر محاسبه می‌شود

$$X = (R'R)^{-1} R'Z \quad (۲۵)$$

پس از تخمین منحنی  $P_e - \delta$  برای بازه زمانی پس از خطا، سطح شتاب گیرنده از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$A_i = \int_{\delta_c}^{\delta_n} (P^e - P^{mec}) d\delta =$$

$$\int_{\delta_c}^{\delta_n} (A + B \sin \delta + C \cos \delta - P^{mec}) d\delta \quad (۲۶)$$

بر اساس آنچه در بخش پنجم این مقاله و با انجام شبیه‌سازی بر روی یک شبکه نمونه نشان داده می‌شود، مقدار  $K_{mn}(t)$  در طول دوره خطا را می‌توان تقریباً برابر مقدار ثابتی در نظر گرفت. بنابراین مقدار این ضریب از روی سرعت متوسط ژنراتورها در طول بازه وقوع خطا ( $\bar{\omega}$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$K_{mn}(t) \approx K_{mn} = \frac{\bar{\omega}_m - \omega}{\bar{\omega}_n - \omega}, \quad \forall t \in [t_i, t_c] \quad (۱۶)$$

در نتیجه (۱۵) به صورت (۱۷) خلاصه‌نویسی می‌شود و با در نظر گرفتن  $W_i = (M_{C_i}^{-1} \sum_{m \in C_i} M_m / K_{im} - M_{C_i}^{-1} \sum_{n \in C_i} M_n / K_{in})$  به فرم زیر بازنویسی می‌شود

$$A_i = MM_{C_i}^{-1} \sum_{i \in C_i} W_i \int_{t_i}^{t_c} ((P_i^{mec}(t) - P_i^e(t))(\omega_i(t) - \omega)) dt -$$

$$MM_{C_i}^{-1} \sum_{j \in C_i} W_j \int_{t_i}^{t_c} ((P_j^{mec}(t) - P_j^e(t))(\omega_j(t) - \omega)) dt$$
(۱۸)

از طرفی سطح شتاب دهنده ژنراتور  $k$  ام برابر است با

$$A_k^a = \int_{\delta}^{\delta_c} (P_k^{mec} - P_k^e) dt =$$

$$\int_{t_i}^{t_c} ((P_k^{mec}(t) - P_k^e(t))(\omega_k(t) - \omega)) dt$$
(۱۹)

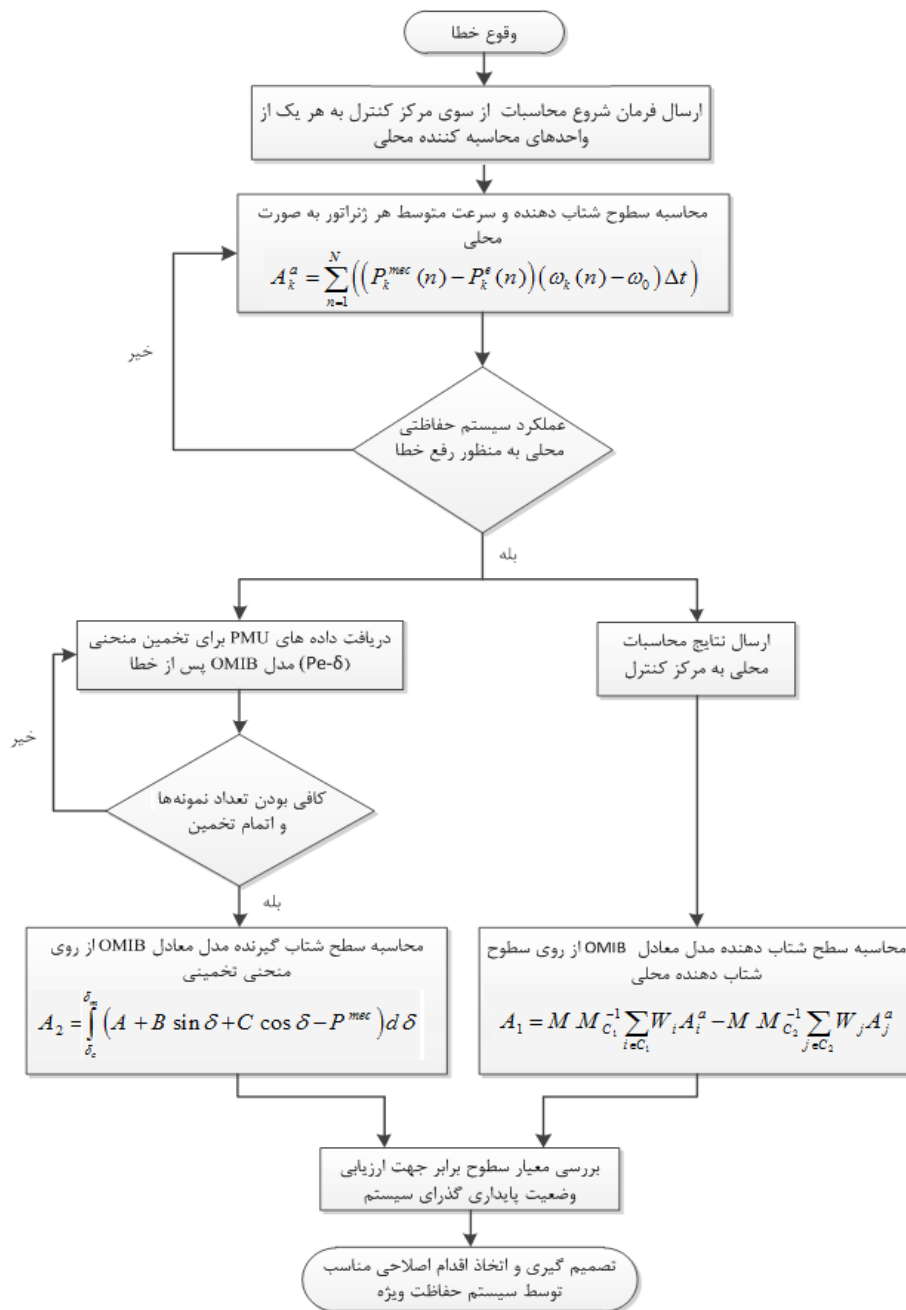
چنانچه نرخ نمونه برداری به اندازه کافی بالا باشد، این سطح را می‌توان تقریب قابل قبولی از روی روش عددی زیر برای تمامی ژنراتورهای شبکه به صورت محلی محاسبه نمود

$$A_k^a = \sum_{n=1}^N ((P_k^{mec}(n) - P_k^e(n))(\omega_k(n) - \omega)) \Delta t \quad (۲۰)$$

که در این رابطه  $\Delta t = (t_c - t_i) / N$  می‌باشد. در نهایت با جایگذاری (۱۹) در (۱۸)، رابطه میان سطوح شتاب دهنده محلی و سطح شتاب دهنده شبکه تک ماشینه معادل به صورت زیر حاصل می‌شود

$$A_i = MM_{C_i}^{-1} \sum_{i \in C_i} W_i A_i^a - MM_{C_i}^{-1} \sum_{j \in C_i} W_j A_j^a \quad (۲۱)$$

بنابراین در طول مدت زمان برقراری خطا، سطح شتاب دهنده هر یک از ژنراتورها به صورت محلی محاسبه می‌شود و بلافاصله پس از عملکرد سیستم حفاظتی جهت رفع خطا، مقدار سطوح محاسبه شده به همراه سرعت متوسط هر ژنراتور به مرکز کنترل ارسال می‌شود. در مرکز کنترل در ابتدا با استفاده از سرعت ژنراتورها ضرایب  $W$  برای هر ژنراتور محاسبه می‌شود و از روی آن مقدار سطح شتاب دهنده در مدل OMIB به دست می‌آید.



شکل ۲: روندنمای روش پیشنهادی برای ارزیابی پایداری گذرا.

که در رابطه فوق  $\delta_c$  زاویه رتور ماشین معادل در لحظه رفع خطا و  $\delta_m$  بیشینه زاویه رتور ممکن برای ماشین معادل در یک نوسان پایدار می‌باشد که از حل عددی معادله زیر قابل محاسبه است

$$A + B \sin \delta_m + C \cos \delta_m = P^{mec} \quad (27)$$

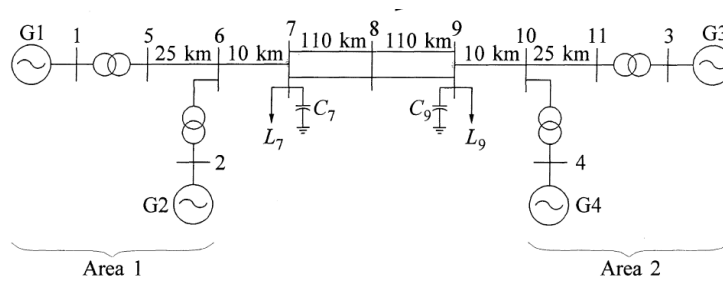
بنابراین پس از رسیدن تعداد نمونه‌های کافی، منحنی توان الکتریکی-زاویه رتور برای لحظات پس از خطا تخمین زده می‌شود و بر اساس آن حداکثر سطح شتاب‌گیرنده محاسبه می‌شود. بلافاصله پس از محاسبه این سطح بیشینه، ارزیابی وضعیت پایداری گذرای شبکه توسط مرکز کنترل قابل انجام است و چنانچه احتمال وقوع ناپایداری گذرا وجود داشته باشد، زمان کافی برای اتخاذ تدابیر ویژه حفاظتی نظیر حذف بار و حذف تولید جهت حفظ پایداری شبکه وجود خواهد داشت. در شکل ۲ روندنمای روش پیشنهادی رسم شده که با وقوع یک خطا در شبکه قدرت آغاز و با اتخاذ تصمیم اصلاحی توسط سیستم حفاظت ویژه پایان می‌پذیرد.

#### ۴- شبیه‌سازی

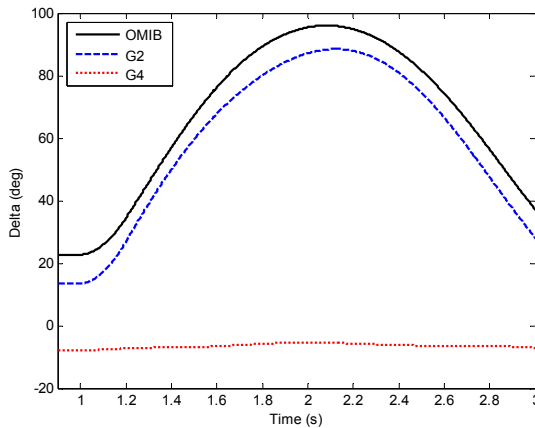
در این بخش از مقاله نتایج شبیه‌سازی روش پیشنهادی بر روی دو سیستم قدرت نمونه ۱۱ شینه با چهار ژنراتور سنکرون [۱۸] و ۳۹ شینه با ۱۰ ژنراتور سنکرون [۱۹] ارائه می‌شود.

##### ۴-۱ شبکه مورد مطالعه اول

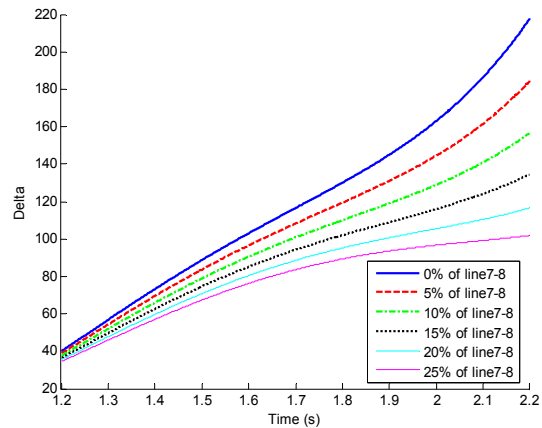
مطابق شمای تک‌خطی شبکه ۱۱ شینه مورد مطالعه که در شکل ۳ نشان داده شده است، این شبکه از دو ناحیه تشکیل گردیده که اتصال این دو ناحیه از طریق دو خط انتقال موازی صورت گرفته است و اطلاعات مربوط به ژنراتورها، بارها و خطوط این شبکه در پیوست موجود است. در حالت عملکرد عادی این شبکه، ناحیه دوم کمبود تولید دارد و لذا جهت توان عبوری از خطوط اتصالی دو ناحیه از طرف ناحیه یک به ناحیه دو می‌باشد.



شکل ۳: شبکه دوناحیه ۱۱ شینه مورد مطالعه [۱۸].



شکل ۵: منحنی‌های زاویه رتور ژنراتورها و مدل معادل OMIB بر حسب زمان.

شکل ۴: منحنی‌های تخمینی زاویه رتور بر حسب زمان به روش [۱۴] و [۱۵] برای خط‌های سه‌فاز در فواصل مختلف خط  $Line_{v-a}$ .جدول ۱: مقایسه تخمین پایداری گذرا به روش پیشنهادی با روش [۱۴] و [۱۵] برای خط‌های روی خط  $Line_{v-a}$ .

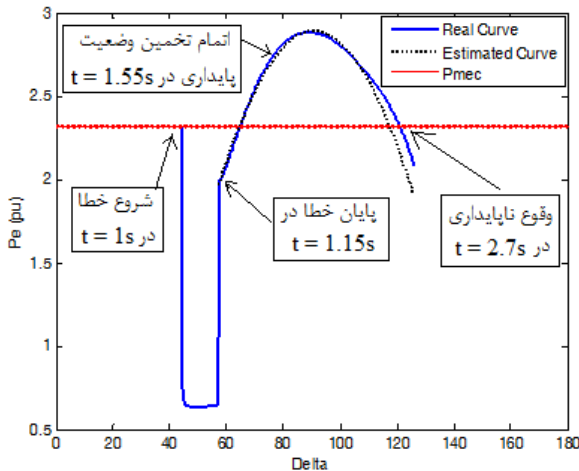
محل خطای سه‌فاز	سطح شتاب‌دهنده واقعی	سطح شتاب‌دهنده تخمینی	سطح شتاب‌گیرنده تخمینی	تخمین پایداری به روش پیشنهادی	تخمین پایداری به روش [۱۴] و [۱۵]	وضعیت پایداری
ابتدای خط $Line_{v-a}$	۱۲۳٫۷۴	۱۲۳٫۴	۴۰٫۱۶	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
۵٪ خط $Line_{v-a}$	۱۰۶٫۳۳	۱۰۵٫۹۷	۴۹٫۶۳	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
۱۰٪ خط $Line_{v-a}$	۹۰٫۵۳	۹۰٫۱۸	۵۰٫۶۶	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
۱۵٪ خط $Line_{v-a}$	۷۷٫۱۲	۷۶٫۸	۶۲٫۳	ناپایدار	ناپایدار	پایدار
۲۰٪ خط $Line_{v-a}$	۶۵٫۹۳	۶۵٫۶۳	۶۷٫۵	پایدار	ناپایدار	پایدار
۲۵٪ خط $Line_{v-a}$	۵۶٫۶	۵۶٫۳۴	۷۳٫۱۷	پایدار	ناپایدار	پایدار

منحنی  $\delta - P_e$  در لحظات پس از خطا، با توجه به وجود سه ضریب مجهول در (۲۲)، دریافت ۱۰ نمونه زمانی توسط مرکز کنترل کافی در نظر گرفته شده که در این صورت محاسبه سطح شتاب‌گیرنده و در نتیجه تصمیم‌گیری متعاقب آن در زمینه وضعیت پایداری گذرای شبکه در حدود ۲۰۰ میلی‌ثانیه پس از عملکرد کلیدهای دو سر خط صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که در این مقاله تنها به پیش‌بینی وضعیت پایداری گذرای شبکه پرداخته شده و نوع اقدامات ویژه حفاظتی که در صورت لزوم باید اتخاذ شود مورد بحث قرار نگرفته است.

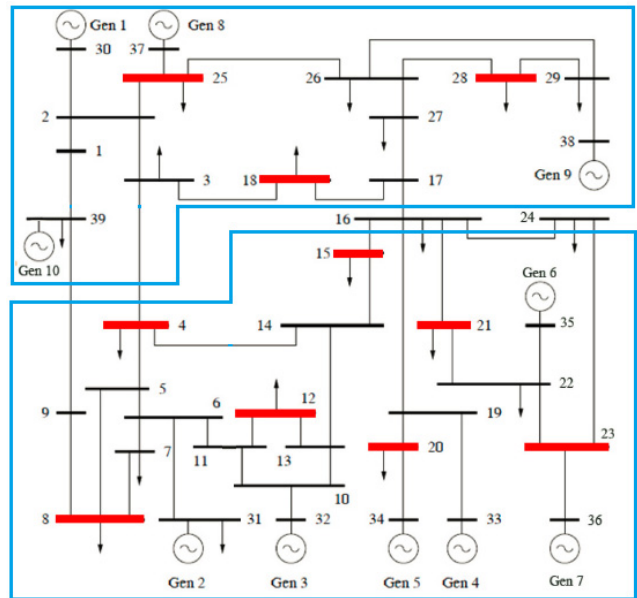
همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، تخمین وضعیت پایداری گذرای شبکه به روش پیشنهادی به جز یک مورد در سایر موارد صحیح می‌باشد در حالی که روش تخمین [۱۴] و [۱۵] برای خط‌های در فاصله ۱۵٪ و ۲۵٪ از خط  $Line_{v-a}$  وضعیت پایداری شبکه را نادرست پیش‌بینی کرده است. در شکل ۴ منحنی‌های تخمینی زاویه رتور بر حسب زمان به روش [۱۴] و [۱۵] برای خط‌های سه‌فاز در فواصل مختلف خط  $Line_{v-a}$  رسم شده که بر اساس آن در همه موارد زاویه رتور ناپایدار تخمین زده شده است. همچنین منحنی زاویه رتور مدل OMIB و یک ژنراتور از هر یک از گروه‌های هم‌نوا برای خطای اتصال کوتاه در فاصله ۲۵٪ از خط  $Line_{v-a}$  در شکل ۵ رسم شده است.

چنانچه خطایی روی یکی از خطوط بین دو ناحیه رخ دهد و با عملکرد سیستم حفاظتی کلیدهای دو سر آن باز شود، ژنراتورهای  $G_1$  و  $G_2$  واقع در ناحیه اول در یک گروه هم‌نواپی و ژنراتورهای  $G_3$  و  $G_4$  واقع در ناحیه دوم در گروه هم‌نواپی دیگری شروع به نوسان می‌کند. شدت خطا و مدت زمان برقراری آن ممکن است سبب خروج از همگامی<sup>۱</sup> برخی از ژنراتورهای شبکه شود که در نتیجه سیستم دچار ناپایداری گذرا می‌شود. در این قسمت از مقاله با انجام شبیه‌سازی نشان داده می‌شود که چگونه روش پیشنهادی قادر است این ناپایداری محتمل را پیش‌بینی کند. بدین منظور مجموعه‌ای از خط‌های سه‌فاز در فواصل مختلف خط  $Line_{v-a}$  شبیه‌سازی شده که در  $t = 1s$  شروع و در  $t = 1.2s$  قطع شدن خط خادار رفع می‌شود. روش تخمین پایداری گذرای مطرح‌شده در این مقاله با روش [۱۴] و [۱۵] برای تخمین آنلاین وضعیت پایداری شبکه مقایسه شده که نتایج این مقایسه در جدول ۱ درج شده است. مشابه با فرض مراجع فوق، هر کدام از شین‌های ژنراتوری مجهز به یک PMU با نرخ نمونه‌برداری ۱ KHz در نظر گرفته شده است و در هر سیکل یک نمونه از داده‌های اندازه‌گیری شده به مرکز کنترل ارسال می‌شود. برای تخمین

1. Out of Step



شکل ۷: منحنی واقعی و تخمینی توان الکتریکی بر حسب زاویه رتور در مدل OMIB.



شکل ۶: شبکه دوناحیه ۳۹ شینه مورد مطالعه [۲۰].

جدول ۲: مقایسه تخمین پایداری گذرا به روش پیشنهادی با روش [۱۴] و [۱۵] برای خطاهای روی خط Line<sub>۳-۶</sub>.

محل خطای سه‌فاز	سطح شتاب‌دهنده واقعی	سطح شتاب‌دهنده تخمینی	سطح شتاب‌گیرنده تخمینی	تخمین پایداری به روش پیشنهادی	تخمین پایداری به روش [۱۴] و [۱۵]	وضعیت پایداری
Line <sub>۳-۶</sub> خط ۱۰٪	۱۶۳٫۷	۱۶۲٫۶۴	۱۵۵٫۳	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
Line <sub>۳-۶</sub> خط ۲۰٪	۱۶۶٫۵	۱۶۵٫۳	۱۶۴٫۲۱	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
Line <sub>۳-۶</sub> خط ۳۰٪	۱۷۰٫۱۴	۱۶۸٫۹۳	۱۷۱	پایدار	ناپایدار	ناپایدار
Line <sub>۳-۶</sub> خط ۴۰٪	۱۷۴٫۷۷	۱۷۳٫۶	۱۷۶٫۲	پایدار	ناپایدار	پایدار
Line <sub>۳-۶</sub> خط ۵۰٪	۱۸۰٫۴۵	۱۷۹٫۳۱	۱۸۳٫۱۵	پایدار	ناپایدار	پایدار

از ژنراتورهای شبکه شود که مطابق نتایج شبیه‌سازی پیشامدهای فوق، سریع‌ترین زمان شروع ناهمگامی لحظه  $t = ۲٫۷s$  می‌باشد و بنابراین میان لحظه تخمین وضعیت پایداری و لحظه وقوع ناپایداری احتمالی، بیشتر از ۱ s برای اتخاذ اقدام اصلاحی مناسب زمان وجود دارد. نتایج مقایسه دقت روش تخمین پایداری گذرای مطرح‌شده در این مقاله با روش [۱۴] و [۱۵] در جداول ۳ تا ۵ درج شده است.

### ۵- بحث در مورد ضرایب $K_{mn}(t)$

در این قسمت از مقاله در مورد ضرایب  $K_{mn}(t)$  در (۱۶) و ثابت‌ماندن تقریبی آن در طول مدت زمان برقراری خطا بحث می‌شود. در لحظات اولیه وقوع خطا با توجه به ثابت‌بودن تقریبی مقادیر توان الکتریکی خروجی و مکانیکی هر ژنراتور می‌توان تغییرات سرعت زاویه‌ای آن را بر حسب زمان بر اساس (۱) به صورت خطی در نظر گرفت که در نتیجه می‌توان نوشت

$$\Delta\omega_i(t) = \omega_i(t) - \omega = \alpha_i t, \quad \forall t \in [t_s, t_c] \quad (28)$$

که در رابطه فوق  $\alpha_i = (\omega/M_i)(P_i^{mec} - P_i^e)$  می‌باشد. در نتیجه با جایگذاری (۲۸) در (۱۶) خواهیم داشت

$$K_{mn}(t) = \frac{\alpha_m t}{\alpha_n t} = \frac{\alpha_m}{\alpha_n}, \quad \forall t \in [t_s, t_c] \quad (29)$$

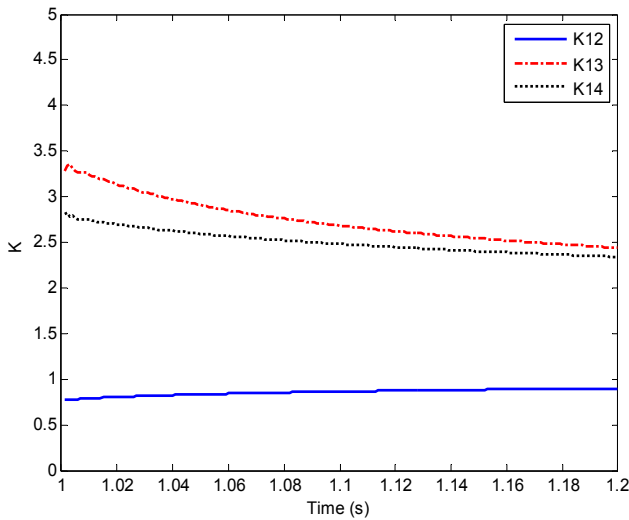
در رابطه فوق مقدار  $\alpha_m/\alpha_n$  همان ضریب  $K_{mn}$  می‌باشد که در طول مدت زمان خطا تقریباً ثابت است. علاوه بر اثبات ریاضی فوق، در این قسمت از روی نتایج شبیه‌سازی نیز ثابت‌بودن تقریبی این ضریب نشان

چنانچه الگوریتم پیشنهادی برای مجموعه‌ای از خطاهای سه‌فازی که در بازه زمانی  $[۱s - ۱٫۲۵s]$  و در فواصل مختلف خط  $Line_{۳-۶}$  رخ داده تکرار شود، نتایجی مطابق با جدول ۲ به دست می‌آید که این نتایج نیز کارآمدتر بودن روش پیشنهادی را نسبت به روش [۱۴] و [۱۵] نشان می‌دهد.

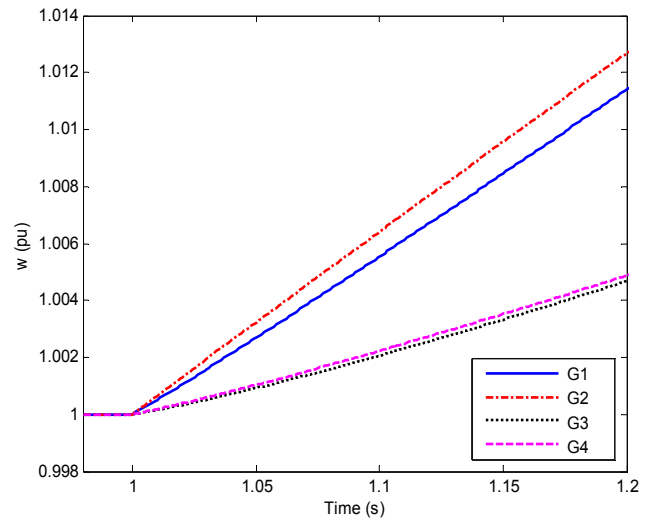
### ۴-۲ شبکه مورد مطالعه دوم

در شکل ۶ شمای تک‌خطی شبکه ۳۹ شینه نشان داده شده که دارای ۱۰ ژنراتور سنکرون می‌باشد [۲۰]. مطابق این شکل، شبکه مورد مطالعه به دو ناحیه تقسیم شده که ژنراتورهای  $Gen_1, Gen_4, Gen_8$  و  $Gen_9$  در ناحیه اول و ژنراتورهای  $Gen_2$  تا  $Gen_7$  در ناحیه دوم قرار می‌گیرد. فرض شده که هر کدام از این شین‌های ژنراتوری به واحد اندازه‌گیری فازور با نرخ نمونه‌برداری ۱ kHz مجهز می‌باشد و در هر سیکل یک نمونه از داده‌های اندازه‌گیری شده به مرکز کنترل ارسال می‌شود.

به منظور بررسی کارایی روش تخمین پایداری گذرای ارائه‌شده، مجموعه‌ای از خطاهای اتصال کوتاه سه‌فاز در بازه زمانی  $[۱s - ۱٫۱۵s]$  و در فواصل مختلف خطوط بین ناحیه‌ای  $Line_{۳-۶}, Line_{۱۶-۱۷}, Line_{۱۶-۲۱}$  در نظر گرفته شده است. هر یک از این خطاها با عملکرد کلیدهای دو سر خط برطرف می‌شود و ۴۰۰ ms پس از آن وضعیت پایداری گذرای شبکه تخمین زده می‌شود. در شکل ۷ نمونه‌ای از منحنی توان الکتریکی بر حسب زاویه رتور در مدل OMIB نشان داده شده که در آن منحنی واقعی و منحنی تخمین زده شده در لحظات پس از خطا مشاهده می‌شود. شدت خطا و مدت زمان برقراری آن ممکن است سبب خروج از همگامی برخی



شکل ۹: ثابت ماندن تقریبی ضرایب  $K_{mn}(t)$  در طول مدت زمان وقوع خطا.



شکل ۸: رابطه خطی سرعت زاویه‌ای ژنراتورهای شبکه مورد مطالعه با زمان در طول مدت زمان وقوع خطا.

جدول ۳: مقایسه تخمین پایداری گذرا به روش پیشنهادی با روش [۱۴] و [۱۵] برای خطاهای روی خط  $Line_{۶-۷}$ .

محل خطای سه‌فاز	سطح شتاب‌دهنده واقعی	سطح شتاب‌دهنده تخمینی	سطح شتاب‌گیرنده تخمینی	تخمین پایداری به روش پیشنهادی	تخمین پایداری به روش [۱۴] و [۱۵]	وضعیت پایداری
$Line_{۶-۷}$ خط ۳۰٪	۳۹۳٫۶	۳۹۸٫۳	۲۷۸٫۳	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
$Line_{۶-۷}$ خط ۴۰٪	۳۸۰٫۵	۳۸۵٫۱	۳۰۴٫۴	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
$Line_{۶-۷}$ خط ۵۰٪	۳۶۸٫۸	۳۷۳٫۴	۳۲۷٫۸	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
$Line_{۶-۷}$ خط ۶۰٪	۳۵۹	۳۶۳٫۳	۳۴۸٫۶	ناپایدار	ناپایدار	پایدار
$Line_{۶-۷}$ خط ۷۰٪	۳۵۰٫۳	۳۵۴٫۸	۳۶۷٫۱	پایدار	ناپایدار	پایدار
$Line_{۶-۷}$ خط ۸۰٪	۳۴۳٫۲	۳۴۷٫۶	۳۸۵٫۵	پایدار	پایدار	پایدار

جدول ۴: مقایسه تخمین پایداری گذرا به روش پیشنهادی با روش [۱۴] و [۱۵] برای خطاهای روی خط  $Line_{۶-۲۱}$ .

محل خطای سه‌فاز	سطح شتاب‌دهنده واقعی	سطح شتاب‌دهنده تخمینی	سطح شتاب‌گیرنده تخمینی	تخمین پایداری به روش پیشنهادی	تخمین پایداری به روش [۱۴] و [۱۵]	وضعیت پایداری
$Line_{۶-۲۱}$ خط ۳۰٪	۳۴۲٫۵	۳۴۲٫۶	۲۹۲٫۴	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
$Line_{۶-۲۱}$ خط ۴۰٪	۳۱۵٫۱	۳۱۴٫۴	۲۷۸٫۲	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
$Line_{۶-۲۱}$ خط ۵۰٪	۲۹۲٫۷	۲۹۰٫۵	۲۶۴٫۶	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
$Line_{۶-۲۱}$ خط ۶۰٪	۲۷۱٫۴	۲۶۸٫۳	۲۵۱٫۸	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
$Line_{۶-۲۱}$ خط ۷۰٪	۲۱۷٫۱	۲۱۴	۲۳۹٫۶	پایدار	ناپایدار	پایدار
$Line_{۶-۲۱}$ خط ۸۰٪	۲۰۹٫۳	۲۰۶٫۱	۲۲۸٫۱	پایدار	ناپایدار	پایدار

جدول ۵: مقایسه تخمین پایداری گذرا به روش پیشنهادی با روش [۱۴] و [۱۵] برای خطاهای روی خط  $Line_{۷-۸}$ .

محل خطای سه‌فاز	سطح شتاب‌دهنده واقعی	سطح شتاب‌دهنده تخمینی	سطح شتاب‌گیرنده تخمینی	تخمین پایداری به روش پیشنهادی	تخمین پایداری به روش [۱۴] و [۱۵]	وضعیت پایداری
$Line_{۷-۸}$ خط ۳۰٪	۵۶۱٫۷	۵۵۴٫۱	۷۰۵٫۴	پایدار	پایدار	پایدار
$Line_{۷-۸}$ خط ۴۰٪	۵۲۱٫۶	۵۱۸٫۳	۶۷۳٫۱	پایدار	پایدار	پایدار
$Line_{۷-۸}$ خط ۵۰٪	۴۹۸٫۲	۴۹۴٫۷	۶۲۱٫۸	پایدار	ناپایدار	پایدار
$Line_{۷-۸}$ خط ۶۰٪	۴۸۲٫۸	۴۸۱٫۶	۵۴۸٫۸	پایدار	ناپایدار	ناپایدار
$Line_{۷-۸}$ خط ۷۰٪	۴۷۷٫۱	۴۷۸	۴۵۴٫۷	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار
$Line_{۷-۸}$ خط ۸۰٪	۴۸۲٫۴	۴۸۳٫۵	۳۴۵٫۹	ناپایدار	ناپایدار	ناپایدار

داده شده است. در شکل ۸ منحنی سرعت زاویه‌ای چهار ژنراتور شبکه مورد مطالعه اول بر حسب زمان در حین وقوع خطای اتصال کوتاه روی خط ۱۵٪  $Line_{۶-۸}$  نشان داده شده است و همان طور که مشاهده می‌شود، رابطه میان سرعت رتور ژنراتورها بر حسب زمان در بازه زمانی

داده شده است. در شکل ۸ منحنی سرعت زاویه‌ای چهار ژنراتور شبکه مورد مطالعه اول بر حسب زمان در حین وقوع خطای اتصال کوتاه روی خط ۱۵٪  $Line_{۶-۸}$  نشان داده شده است و همان طور که مشاهده می‌شود، رابطه میان سرعت رتور ژنراتورها بر حسب زمان در بازه زمانی

شکل ۹ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۶ مقادیر محاسبه شده  $K_{mn}(t)$  بر اساس (۱۶) برای بازه زمانی وقوع خطا درج شده است.



جدول پ-۲: اطلاعات بارهای شبکه مورد مطالعه.

	$P$ (pu)	$Q_L$ (pu)	$Q_C$ (pu)
BUS ۷	۱٫۰۷۵	۰٫۱۱	۰٫۲۲
BUS ۹	۱٫۹۶۳	۰٫۱۱	۰٫۳۹

جدول پ-۳: اطلاعات خطوط شبکه مورد مطالعه.

$R$ (pu/km)	$X$ (pu/km)	$B$ (pu/km)
۰٫۰۰۰۹	۰٫۱۰۰۹	۰٫۰۱۵۷۵

جدول ۶: مقادیر ضرایب  $K_{mn}(t)$  در طول مدت زمان وقوع خطا.

	$t = ۱٫۰۵s$	$t = ۱٫۱s$	$t = ۱٫۱۵s$	$t = ۱٫۲s$
$K_{1r}$	۰٫۸۴	۰٫۸۶	۰٫۸۸۵	۰٫۸۹
$K_{1r}$	۲٫۸۸	۲٫۷۵	۲٫۵۹	۲٫۴۵
$K_{1r}$	۲٫۵۶	۲٫۴۷	۲٫۴۰	۲٫۳۴
$K_{1r}$	۲٫۹۳	۲٫۸۲	۲٫۷۷	۲٫۷۲
$K_{1r}$	۲٫۸۹	۲٫۷۶	۲٫۶۸	۲٫۶۱
$K_{1r}$	۰٫۹۰	۰٫۹۲	۰٫۹۴	۰٫۹۵

جدول پ-۱: اطلاعات ژنراتورهای شبکه مورد مطالعه.

	$P$ (pu)	$Q$ (pu)	$H$ (s)	$X_d$	$X_q$	$X_l$	$X'_d$	$X'_q$	$X''_d$	$X''_q$	$T'_d$	$T'_q$	$T''_d$	$T''_q$
$G_1$	۰٫۷۸	۰٫۲	۶٫۵	۱٫۸	۱٫۷	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۵۵	۰٫۲۵	۰٫۲۵	۸	۰٫۴	۰٫۰۳	۰٫۰۵
$G_2$	۰٫۷۸	۰٫۲۶	۶٫۵	۱٫۸	۱٫۷	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۵۵	۰٫۲۵	۰٫۲۵	۸	۰٫۴	۰٫۰۳	۰٫۰۵
$G_3$	۰٫۸	۰٫۱۹	۶٫۱۷۵	۱٫۸	۱٫۷	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۵۵	۰٫۲۵	۰٫۲۵	۸	۰٫۴	۰٫۰۳	۰٫۰۵
$G_4$	۰٫۷۸	۰٫۲۳	۶٫۱۷۵	۱٫۸	۱٫۷	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۵۵	۰٫۲۵	۰٫۲۵	۸	۰٫۴	۰٫۰۳	۰٫۰۵

## مراجع

- [1] —, Special Protection Schemes and Remedial Action Schemes, NERC Report, Apr. 2013.
- [2] —, *Special Protection Schemes*, ENTSOE Subgroup-System Protection and Dynamics, Mar. 2012.
- [3] A. P. Martinez, C. R. Fuerte, and D. R. Vega, "Global transient stability-constrained optimal power flow using an OMIB reference trajectory," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 392-403, Feb. 2010.
- [4] Y. Xu, Z. Y. Dong, and J. Zhao, "Trajectory sensitivity analysis on the equivalent one-machine-infinite-bus of multi-machine systems for preventive transient stability control," *IET Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 9, no. 3, pp. 276-286, 2015.
- [5] M. Yin, C. Y. Chung, and K. P. Wong, "An improved iterative method for assessment of multi-swing transient stability limit," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2023-2029, Nov. 2011.
- [6] B. Y. Bagde and P. M. Meshram, "A hybrid decomposition method for transient stability assessment of large power system," in *Proc. IEEE Conf. Emerging Trends in Engineering and Technology, ICETET'10*, pp. 401-406, Nov. 2010.
- [7] A. P. Martinez, C. R. Fuerte, and D. R. Vega, "SIME and trajectory sensitivity-based transient stability-constrained optimal power flow," in *Proc. IEEE Conf., Power and Energy Society General Meeting PES'13*, 5 pp., Jul. 2013.
- [8] Y. Xu and Z. Y. Dong, "A hybrid method for transient stability-constrained optimal power flow computation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 4, pp. 1769-1777, Nov. 2012.
- [9] X. Tu and L. A. Dessaint, "A global approach to transient stability constrained optimal power flow using a machine detailed model," *IEEE J. of Electrical and Computer Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 32-41, Feb. 2013.
- [10] A. P. Martinez, C. R. Fuerte, and D. R. Vega, "A new practical approach to transient stability-constrained optimal power flow," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1686-1696, Aug. 2011.
- [11] J. Zhao and G. Chen, "A novel SIME and sensitivity based model and algorithm of transient stability constrained optimal power flow," in *Proc. Power and Energy Society General Meeting, PES'15*, pp. 26-30, Jul. 2015.
- [12] T. Hiraiwa, T. Omi, and K. Nakamura, "A novel transient stability screening approach using prony analysis and SIME," in *Proc. IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf., APPEEC'14*, pp. 113-119, 7-10 Dec. 2014.
- [13] Y. Oubbati and S. Arif, "Securing transient stability assessment using single machine equivalent SIME method," in *Proc. Int. Conf. on Electrical Engineering, ICEE'15*, 6 pp., 13-15 Dec. 2015.
- [14] I. R. Pordanjani, H. A. Abyaneh, and K. Mazlumi, "Risk reduction in special protection systems by using an online method for transient instability prediction," *Elsevier, Electrical Power and Energy Systems*, vol. 7, no. 9, pp. 156-162, Feb. 2010.

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله روشی برای ارزیابی برخط پایداری گذرای سیستم قدرت چندناحیه‌ای بر اساس معیار سطوح برابر مدل تک‌ماشین به شین بی‌نهایت ارائه شد که در آن ترکیبی از اندازه‌گیری‌های محلی و ناحیه گسترده استفاده می‌شود. در این روش با به وقوع پیوستن یک خطا در شبکه، هر کدام از ژنراتورها در طول مدت برقراری خطا و بر اساس اندازه‌گیری‌های محلی موجود، مقدار سطح شتاب‌دهنده مربوط به خود را اندازه‌گیری نموده و این داده‌ها را به همراه سرعت متوسط ژنراتور در طول این مدت برای مرکز کنترل ارسال می‌نماید و از روی این داده‌ها مقدار سطح شتاب‌دهنده مدل OMIB محاسبه می‌شود. همچنین در مرکز کنترل بر اساس داده‌های دریافتی از واحدهای اندازه‌گیری فاز، منحنی توان الکتریکی بر حسب زاویه رتور برای مدل تک‌ماشین به شین بی‌نهایت برای زمان پس از خطا تخمین زده شده و بر اساس آن سطح شتاب‌گیرنده مدل OMIB محاسبه می‌شود. در نتیجه با مقایسه سطوح محاسبه‌شده وضعیت پایداری گذرای شبکه مشخص می‌شود. با توجه به هزینه بالای نصب PMU بر روی تمامی شین‌های ژنراتوری، اصلاح روش پیشنهادی در این مقاله بر اساس تعداد بهینه PMUها به عنوان یکی از کارهای تکمیل‌کننده این مقاله در آینده است. همچنین با توجه به وجود خطاهای احتمالی در روش تخمین پیشنهادی این مقاله و لزوم اتخاذ تصمیمات حفاظتی به صورت محافظه‌کارانه، به منظور بالابردن قابلیت اطمینان و کاهش خطاهای فوق، در نظر گرفتن حاشیه مناسب در تخمین‌های این روش و توأم کردن آن با خروجی سایر روش‌های ارزیابی پایداری در اتخاذ اقدام حفاظتی اصلاحی پیشنهاد می‌شود.

## پیوست

در جداول پ-۱ تا پ-۳ داده‌های مربوط به ژنراتورها، بارها و خطوط شبکه مورد مطالعه درج شده است [۲۱]. تمامی مقادیر بر حسب پریونیت است که مقدار توان مینا ۹۰۰ MVA، ولتاژ مینا برای ژنراتورها ۲۰ kV و برای خطوط انتقال ۲۳۰ kV می‌باشد.

**مهرداد عربزاده** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش قدرت را در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ از دانشگاه تهران به پایان رسانده و هم‌اکنون دانشجوی دکترای مهندسی برق در دانشگاه تربیت مدرس است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان حفاظت، دینامیک و پایداری سیستم‌های قدرت است.

**حسین سیفی** تحصیلات خود در مقطع کارشناسی را در سال ۱۳۵۹ در رشته مهندسی برق در دانشگاه شیراز به اتمام رساند و مقاطع کارشناسی ارشد و دکترای خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۶۸ در زمینه مهندسی برق گرایش قدرت در دانشگاه UMIST انگلستان با موفقیت سپری نمود. هم‌اکنون ایشان استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس و رئیس مرکز ملی مطالعات و برنامه‌ریزی شبکه‌های قدرت می‌باشد. زمینه‌های مورد علاقه ایشان برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و دینامیک سیستم‌های قدرت است.

**محمد کاظم شیخ‌السلامی** دانش آموخته دوره کارشناسی مهندسی برق گرایش قدرت در سال ۱۳۷۱ از دانشگاه تهران می‌باشد. نام‌برده مقاطع کارشناسی ارشد و دکترای خود را به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۴ در رشته مهندسی برق دانشگاه تربیت مدرس گذراند. هم‌اکنون ایشان عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس است. زمینه‌های مطالعاتی و پژوهشی مورد علاقه ایشان شامل بازارهای برق رقابتی، تجدید ساختار و بهینه‌سازی سیستم‌های قدرت است.

- [15] M. Esmaili, A. A. Hajnoroozi, and H. A. Shayanfar, "Risk evaluation of online special protection systems," *Elsevier, Electrical Power and Energy Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 137-144, Mar. 2012.
- [16] M. Liu, H. Sun, and B. Zhang, "PMU measurements and EMS models based transient stability online forecasting," in *Proc. Power & Energy Society General Meeting, PES'09*, 8 pp., 26-30 Jul. 2009.
- [17] T. Jiang, H. Jia, and N. Zhou, "Projection pursuit: a general methodology of wide-area coherency detection in bulk power grid," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, pp. 2776-2786, Jul. 2016.
- [18] A. Vahidinia, G. Ledwich, and E. Palmer, "Generator coherency and area detection in large power systems," *IET Generation, Transmission, and Distribution*, vol. 6, no. 9, pp. 874-883, Sept. 2012.
- [19] Y. J. Wang and C. W. Liu, "A PMU based special protection scheme: a case study of Taiwan power system," *Elsevier, Electrical Power and Energy Systems*, vol. 7, no. 6, pp. 215-223, Mar. 2006.
- [20] Y. J. Wang and C. W. Liu, "Voltage stability indices comparison on the IEEE-39 bus system using RTDS," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Power System Technology POWERCON'12*, 6 pp., 30 Oct.-2 Nov. 2012.
- [21] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, in Power Engineering, New York: McGraw-Hill, 1994.