

## شناسایی نوسان توان پایدار و ناپایدار با استفاده از معیار سطوح معادل بسط یافته در حوزه زمان

سید رضا احمدی<sup>۱</sup> و کاظم مظلومی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی دانشگاه زنجان، reza\_ahmadi@znu.ac.ir

<sup>۲</sup>نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی دانشگاه زنجان، kmazlumi@znu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۷/۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۲۷)

**چکیده:** در این مقاله معیار سطوح معادل در حوزه زمان که نتیجه نگاشت منحنی توان-زاویه به منحنی توان-زمان می باشد جهت شناسایی نوسان توان پایدار و ناپایدار معرفی شده است. عملکرد این الگوریتم برای سیستم تک ماشین به شین بینهایت بررسی شده است که نتایج به دست آمده منطبق بر معیار سطوح معادل منحنی توان-زاویه می باشد ولی در سیستم های چند ماشینه این الگوریتم در تمامی حالات درست عمل نمی کند. برای این منظور در سیستم های چند ماشینه از معیار بسط یافته این الگوریتم که بر مبنای تبدیل شبکه به دو دسته ماشین های بحرانی و غیر بحرانی می باشد استفاده شده است. با توجه به اینکه استفاده از معیار سطوح معادل در حوزه زمان به صورت یک الگوریتم محلی برای همه ژنراتورهای شبکه پاسخ جامع و درستی نمی دهد، این معیار را برای سیستم چند ماشینه به صورت گسترده یعنی استفاده از اطلاعات توان خروجی همه ژنراتورهای شبکه که توسط واحدهای اندازه گیری فازور PMU به مرکز کنترل ارسال می شود اعمال شده است. این روش بر روی دو شبکه نمونه با استفاده از نرم افزار Digsilent شبیه سازی شده، که نتایج حاصل نشان دهنده صحت، دقت و سرعت بالای روش پیشنهادی می باشند.

**کلمات کلیدی:** نوسان توان، پایداری سیستم، معیار سطوح معادل، حفاظت خطوط انتقال

### ۱- مقدمه

وقوع خطاها و اختلالات کوچک و بزرگ در یک شبکه امری جدانشدنی از سیستم های قدرت می باشد. این خطاها و اختلالات ایجاد شده، بسته به قدرت و میزان تاثیر آن ها بر روی پارامترهای سیستم، می توانند باعث ایجاد نوسان توان در سیستم قدرت شوند. علت اصلی نوسان توان در یک سیستم، رخداد خطاهای اتصال کوتاه، تریپ یکی از ژنراتورها، خارج شدن بارهای بزرگ از شبکه و نظایر آن ها می باشد [۱-۲]. به ازای تغییرات کوچک در ساختار شبکه، نوسانی که در سیستم بوجود می آید، کوچک بوده و سریعاً نیز میرا می شود ولی به ازای تغییراتی همچون خروج ناگهانی یک بار بزرگ از شبکه، این پدیده شدیدتر بوده و در بعضی مواقع با افزایش دامنه نوسانات نیز همراه است که منجر به ناپایداری شبکه می گردد [۳].

نوسان توان پدیده ای متفاوت از وقوع خطا در سیستم بوده که نباید قسمت های مختلف سیستم در حالت نوسان توانی که باعث ناپایداری شبکه نمی شود، قطع گردد. با این حال امروزه وقوع چنین پدیده ای باعث بسیاری از خاموشی ها در سیستم قدرت شده است. بنابراین ارائه روش هایی برای شناخت ابعاد این پدیده جهت تمیز دادن بین نوسان توان پایدار و نوسان توانی که باعث

ناپایداری سیستم می‌شود، لازم و ضروری می‌باشد [۴]. روش‌های مختلف و متفاوتی برای شناسایی و تشخیص نوسان توان وجود دارد که یک روش مرسوم و معمول برای این کار استفاده از رله دیستانس به همراه زون استارتر و تایمر می‌باشد. در این روش از تفاوت سرعت تغییر امپدانس دیده شده توسط رله در حالت خطا با نوسان توان استفاده می‌شود [۵]. در این روش جهت تنظیم زون‌های رله و تایمر نیازمند آگاهی از پارامترهای سیستم قدرت می‌باشد که در نتیجه با تغییر شبکه، می‌بایست زون‌های رله و تایمر مجدداً تنظیم گردند که این یکی از مشکلات عمده این روش می‌باشد [۶]. یک روش دیگر مانتورینگ تغییرات ولتاژ مرکز نوسان (SCV)<sup>۱</sup> و مقایسه آن با مقدار ولتاژ تنظیمی می‌باشد. مشکل این روش به دست آوردن شاخص SCV می‌باشد که نیاز به آگاهی از پارامترهای سیستم، اندازه‌گیری و محاسبات فراوان دارد [۷]. با اعمال برخی تقریب‌ها می‌توان شاخص SCV را از محل نصب رله به دست آورد که در نتیجه این روش را مستقل از پارامترهای دیگر سیستم می‌کند، اما باید دقت نمود که این تقریب‌ها زمانی درست می‌باشند که زاویه امپدانس نهایی سیستم نزدیک ۹۰ درجه باشد [۸]. روش‌های دیگری نیز جهت شناسایی نوسان توان در مقالات پیشین ارائه شده است که از جمله آن‌ها، روش شناسایی نوسان توان مبتنی بر رفتار شکل موج جریان [۹]، روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی [۱۰] و الگوریتم‌های هوشمند [۱۱] و استفاده از روش‌های الگوریتم فازی می‌باشد [۱۲]. یک روش دیگر تعیین اختلاف فرکانس ولتاژ در محل نصب رله با فرکانس ولتاژ ژنراتور می‌باشد [۱۳]. روش دیگر تشخیص نوسان توان با استفاده از معیار سطوح معادل (EAC)<sup>۲</sup> در حوزه زاویه روتور ژنراتورها می‌باشد. این روش با استفاده از منحنی‌های توان-زاویه ژنراتورها در قبل از رخداد خطا، حین رخداد خطا و بعد از رفع خطا قادر به شناسایی نوسان توان پایدار و ناپایدار می‌باشد. مشکل این روش در به دست آوردن این منحنی‌ها می‌باشد که نیاز به آگاهی از پیکربندی شبکه در حالت پایدار، اندازه‌گیری‌های فراوان در سایر باس‌ها و نحوه ارتباط سایر دستگاه‌ها باهم می‌باشد [۱۴-۱۵]. یکی دیگر از روش‌های تشخیص نوسان توان استفاده از روش فوق ولی به صورت اصلاح شده در حوزه زمان می‌باشد. در این روش برخلاف روش‌های گذشته، تنها از اطلاعات توان عبوری اندازه‌گیری شده در محل نصب رله استفاده می‌شود و نیازی به داشتن اطلاعات سایر شین‌ها و سایر پارامترهای سیستم نظیر امپدانس خط نمی‌باشد. توان خروجی الکتریکی هر لحظه از ولتاژ و جریانی که در محل نصب رله اندازه‌گیری شده، محاسبه گردیده و انرژی گذرا، از زمان وقوع خطا تا لحظه نوسان توان از روی منحنی توان-زمان<sup>۳</sup> محاسبه گردیده که بر اساس آن، حالت نوسان توان پایدار از حالت نوسان توان ناپایدار تمیز داده شده است [۱۶].

مرجع [۱۶] رویکرد استفاده از معیار سطوح معادل در حوزه زمان را معرفی کرده و صحت آن را برای سیستم تک ماشین به شین بینهایت بررسی کرده است که نتایج به دست آمده نشان از صحت عملکرد این الگوریتم دارد و در ادامه نیز با ایجاد چند مورد اغتشاش خاص و محدود در یک شبکه سه ماشین همراه با شین بینهایت مدعی شده که روش ارائه شده برای سیستم‌های چند ماشین نیز قابلیت تحقق دارد. در حالیکه با مطالعه و انجام چند مورد شبیه‌سازی بر روی شبکه‌های چند ماشین در بخش ۲ مشاهده شده است که عملکرد الگوریتم مذکور در خصوص شبکه‌های چند ماشین صحیح نبوده و الگوریتم معیار سطوح معادل در حوزه زمان به صورت یک الگوریتم محلی در تشخیص پایداری و یا ناپایداری نوسان توان ایجاد شده در سیستم، ناتوان می‌باشد. بنابراین می‌بایست الگوریتمی ارائه شود که برای تمامی شبکه‌ها و کلیه موارد قابل اعمال باشد.

در این مقاله روشی جدید ارائه می‌شود که بر اساس معیار سطوح معادل بسط یافته در حوزه زمان عمل می‌نماید و قادر است پایداری یا عدم پایداری شبکه را پس وقوع نوسان توان، به خوبی مشخص نماید. عملکرد این روش بر مبنای تبدیل شبکه چند ماشین به دو دسته از ماشین‌های بحرانی و غیربحرانی و سپس تبدیل آن به یک شبکه تک ماشین به شین بینهایت می‌باشد. بر همین

<sup>1</sup> Swing Centre Voltage

<sup>2</sup> Equal Area Criterion(EAC)

<sup>3</sup> Pe-Delta

<sup>4</sup> Pe-t

اساس در این مقاله ابتدا چند مورد شبیه سازی بر روی یک شبکه ۴ ماشینه نمونه با استفاده از نرم افزار Digsilent انجام شده که نتایج حاصله نشان از عدم کارایی الگوریتم معیار سطوح معادل در حوزه زمان به عنوان یک حفاظت محلی خروج از همگامی<sup>۱</sup> دارد و در ادامه با استفاده از رویکرد معیار سطوح معادل بسط یافته برای منحنی‌های توان-زاویه، این رویکرد را برای منحنی‌های توان-زمان در سیستم‌های چند ماشینه مورد استفاده قرار می‌شود که نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان از صحت، دقت و سرعت الگوریتم ارائه شده دارد.

لازم به ذکر است، از دیدگاه حفاظت شبکه در برخورد با پدیده نوسان توان دو مسئله مهم وجود دارد. یکی تشخیص نوسان توان و دیگری تشخیص پایداری یا عدم پایداری نوسان که معمولاً آن‌ها را به ترتیب PSB<sup>۲</sup> و OST<sup>۳</sup> می‌نامند. مهمترین هدف از نصب واحد PSB در رله‌ها، تمایز قرار دادن بین نوسان توان و خطا، جلوگیری از عملکرد واحد دیستانس در حین نوسان و همچنین تشخیص وقوع خطای احتمالی در حین نوسان توان است. هدف از نصب واحد OST نیز تمایز نهادن بین نوسان توان پایدار و ناپایدار است. این واحد باید در صورت ناپایدار بودن نوسان، در زمان مناسبی با توجه به زاویه و ولتاژ ژنراتورها، جدا شدن شبکه از مکان‌های مشخص شده را آغاز نماید تا پایداری شبکه حفظ شده و شبکه بتواند به کار خود ادامه دهد، لذا در روش‌های تشخیص پایداری نوسان توان معمولاً از یک واحد PSB برای تشخیص وقوع نوسان توان و آغاز الگوریتم تشخیص پایداری استفاده می‌شود. بنابراین روش ارائه شده در این مقاله و روش مرجع [۱۶]، الگوریتمی جهت تشخیص نوسان توان پایدار و ناپایدار می‌باشد و لذا فرض شده است که ابتدا نوسان توان ایجاد شده در شبکه توسط روش‌هایی (واحد PSB) شناسایی گردد.

## ۲ - بررسی عملکرد معیار سطوح معادل در حوزه زمان به عنوان یک حفاظت محلی

همان‌طور که بیان گردید، معیار سطوح معادل در حوزه زمان (روش ارائه شده در مرجع [۱۶]) در سیستم‌های چند ماشینه به صورت رویکرد محلی کارایی نداشته و قابلیت تشخیص صحیح نوسان توان را ندارد. در واقع هدف از این مقاله رفع اشکال موجود در روش مرجع [۱۶] می‌باشد. بنابراین برای بررسی این موضوع چند مورد شبیه‌سازی بر روی یک شبکه ۴ ماشینه انجام شده که نتایج یکی از این شبیه‌سازی‌ها در ادامه آمده است که نشان از عدم کارایی رویکرد مذکور به عنوان یک حفاظت محلی خروج از همگامی دارد.

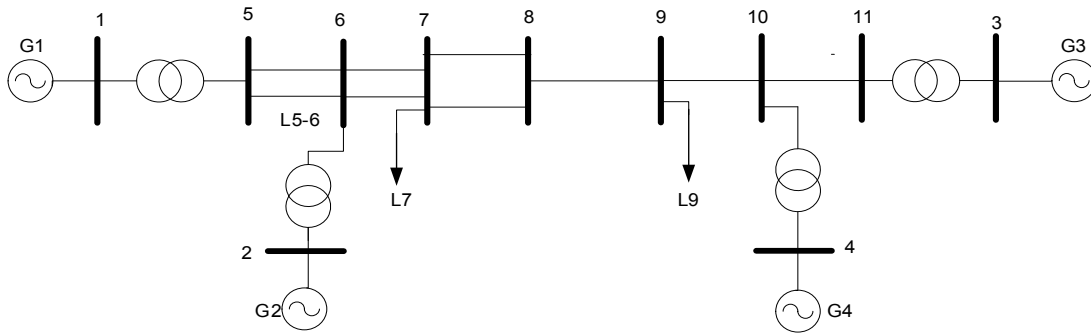
شبکه ۴ ماشینه‌ای که در این مقاله مورد تحلیل قرار گرفته در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۷]. لازم به ذکر است، در این شبکه AVR و Governor برای ژنراتورها مدل‌سازی شده که از مدل‌های استاندارد موجود در نرم‌افزار Digsilent برای این منظور استفاده شده است. برای AVR از مدل EXACIA و برای Governor از مدل GAST استفاده شده است.

با اعمال یک خطای سه فاز روی خط بین باس‌های ۵ و ۶ و رفع آن بعد از ۱۴۰ میلی‌ثانیه در لحظه ۱ ثانیه، شبکه دچار نوسان می‌شود که منحنی‌های توان-زمان و توان-زاویه برای ژنراتور ۱ به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ و استفاده از روابط الگوریتم معیار سطوح معادل در حوزه زمان، مساحت سطح A1 که معادل سطح شتاب دهنده می‌باشد برابر  $pu-s$  ۰/۲۰۸ و مساحت سطح A2 که معادل سطح شتاب گیرنده می‌باشد برابر  $pu-s$  ۰/۱۲۲۲ است که با توجه به کوچکتر بودن سطح A2 از A1 نتیجه می‌شود که این نوسان، یک نوسان ناپایدار است. در حالیکه با توجه به منحنی‌های توان-زمان و توان-زاویه ملاحظه می‌شود که این نوسان پس گذشت مدت زمانی میرا شده و در نتیجه یک نوسان پایدار می‌باشد و الگوریتم مبتنی بر معیار سطوح معادل در تشخیص آن دچار اشتباه شده است.

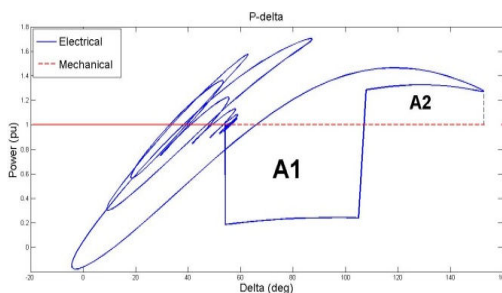
<sup>1</sup> Out Of Step (OOS)

<sup>2</sup> Power Swing Blocking

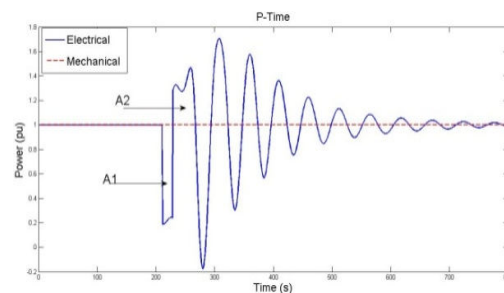
<sup>3</sup> Out of Step Tripping



شکل ۱: شبکه نمونه ۴ ماشینه

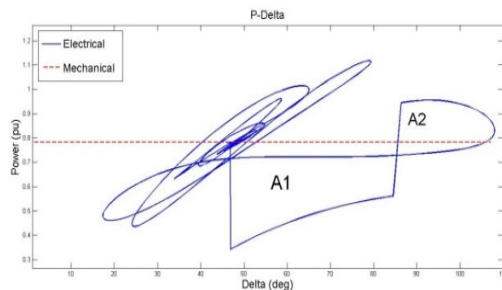


شکل ۳: منحنی توان-زاویه برای ژنراتور ۱

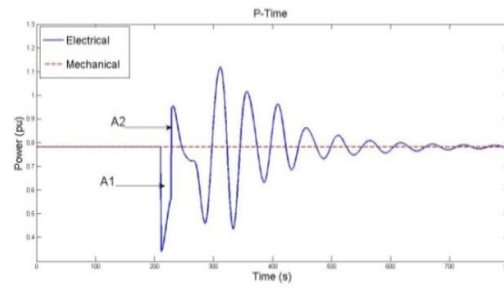


شکل ۲: منحنی توان-زمان برای ژنراتور ۱

همچنین منحنی‌های توان-زمان و توان-زاویه برای ژنراتور ۳ در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است که با توجه به شکل ۴ و عملکرد الگوریتم معیار سطوح معادل در حوزه زمان، مساحت سطح A1 برابر ۰/۱۴۹۸ pu-s و مساحت سطح A2 برابر ۰/۰۳۵۵ می‌باشد. نتایج بدست آمده برای ژنراتور ۳ نیز نشان می‌دهد که با توجه به بزرگتر بودن سطح A1 از سطح A2 این نوسان توان برای این ژنراتور مطابق الگوریتم ارائه شده یک نوسان ناپایدار می‌باشد در حالیکه منحنی‌های توان-زمان و توان-زاویه نشان می‌دهند که ژنراتور بعد از نوساناتی، در نقطه کار قبلی قرار گرفته و این نوسان یک نوسان پایدار می‌باشد. از این رو می‌توان به این نتیجه رسید که معیار سطوح معادل در حوزه زمان با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده، برای شبکه‌های چند ماشینه نمی‌تواند به عنوان یک الگوریتم محلی مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه با استفاده از رویکرد معیار سطوح معادل بسط یافته برای منحنی‌های توان-زاویه، این رویکرد برای منحنی‌های توان-زمان در سیستم‌های چند ماشینه مورد استفاده قرار داده شده است.



شکل ۵: منحنی توان-زاویه برای ژنراتور ۳



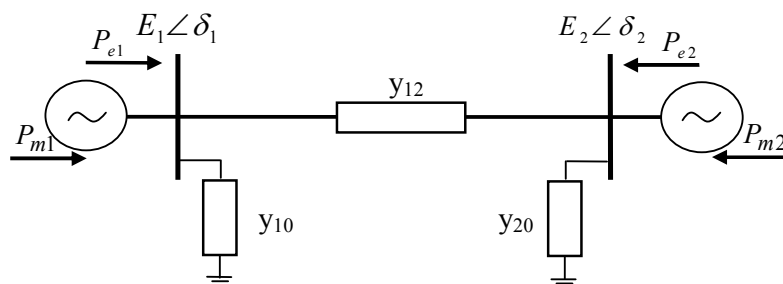
شکل ۴: منحنی توان-زمان برای ژنراتور ۳

### ۳- الگوریتم پیشنهادی

با توجه به نتایج به دست آمده در بخش ۲، ملاحظه گردید که روش معیار سطوح معادل در حوزه زمان نمی‌تواند به عنوان یک حفاظت محلی خروج از همگامی در شبکه‌های چند ماشینه مورد استفاده قرار گیرد، بنابراین در این بخش این رویکرد به صورت معیار سطوح معادل بسط یافته<sup>۱</sup> در حوزه زمان به کار برده شده است. در این روش ابتدا شبکه چند ماشینه به یک شبکه دو ماشینه تبدیل شده و سپس این شبکه دو ماشینه به یک شبکه تک ماشین با شین بینهایت تبدیل شده است که در ادامه روند انجام این کارها شرح داده می‌شود.

#### ۳-۱- معیار سطوح معادل برای سیستم دو ماشینه

برای استفاده از معیار سطوح معادل برای تعیین پایداری خط ارتباطی بین دو شبکه از مدل دو ماشینه سیستم قدرت که در شکل ۶ نشان داده شده است استفاده می‌شود. در مدل دو ماشینه شبکه، سیستم قدرت شامل یک ثابت اینرسی معادل و یک راکتانس گذرای معادل برای هر ماشین و نیز خط ارتباطی بین دو ماشین است که معادل خط یا خطوط ارتباطی بین دو ناحیه می‌باشد.



شکل ۶: مدل کلی دو ماشینه یک سیستم قدرت

معادله نوسان برای سیستم دو ماشینه بصورت زیر می‌باشد [۱۸-۱۹]:

$$M_1 \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = (P_{m1} - P_{e1}) \quad (1)$$

$$M_2 \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = (P_{m2} - P_{e2}) \quad (2)$$

با تفریق روابط فوق و مرتب کردن آنها رابطه ذیل حاصل می‌شود:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (3)$$

در روابط فوق  $M$  ثابت اینرسی معادل،  $P_m$  توان مکانیکی ورودی به ژنراتورها،  $P_e$  توان الکتریکی خروجی از ژنراتورها و  $\delta$  زاویه روتور ژنراتورها می‌باشد. در ضمن  $\delta = \delta_1 - \delta_2$  و  $P_a$  توان شتاب‌دهنده بین دو ماشین است؛ که تابعی از توان مکانیکی معادل ورودی به واحدهای تولید و توان الکتریکی معادل خروجی از واحدها می‌باشد. در معادله‌های فوق روابط زیر حاکم است:

<sup>1</sup> Extended Equal Area Criterion (EEAC)

$$M = \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)} \quad (۴)$$

$$Pm = \frac{(M_2 Pm_1 - M_1 Pm_2)}{M_1 + M_2} \quad (۵)$$

$$Pe = \frac{(M_2 Pe_1 - M_1 Pe_2)}{M_1 + M_2} \quad (۶)$$

با استفاده از روابط فوق سیستم دو ماشین به یک سیستم تک ماشین در مقابل شین بینهایت تبدیل می‌شود که به راحتی با معیار سطوح معادل می‌توان پایداری شبکه را مورد بررسی قرار داد.

### ۳-۲- روابط کلی سیستم تک ماشین به شین بینهایت

در سیستم چند ماشین معادله نوسان برای ماشین  $i$  ام بصورت زیر می‌باشد [۲۰]:

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = Pm_i - Pe_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (۷)$$

در صورتی که فرض شود سیستم چند ماشین در هنگام نوسانات به دو گروه هم‌نوا<sup>۱</sup> تقسیم گردد، سیستم معادل دو ماشین، داری دو گروه ماشین S و A می‌باشد. در هر گروه رابطه‌ها برحسب مرکز زاویه<sup>۲</sup> نوشته می‌شود، که برای ماشین معادل هر گروه رابطه‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$M_S = \sum_{k \in GS} M_k \quad (۸)$$

$$M_A = \sum_{k \in GA} M_k \quad (۹)$$

$$\delta_S = \frac{1}{M_S} \sum_{k \in GS} M_k \delta_k \quad (۱۰)$$

$$\delta_A = \frac{1}{M_A} \sum_{k \in GA} M_k \delta_k \quad (۱۱)$$

لذا برای هر گروه هم‌نوا معادله نوسان بصورت زیر می‌باشد:

$$M_S \frac{d^2 \delta_S}{dt^2} = \sum_{k \in GS} (Pm_k - Pe_k) \quad (۱۲)$$

<sup>۱</sup> Coherent

<sup>۲</sup> Center Of Angle (COA)

$$M_A \frac{d^2 \delta_A}{dt^2} = \sum_{k \in GA} (Pm_k - Pe_k) \quad (۱۳)$$

با دسته‌بندی ژنراتورهای هم‌نوا و به‌دست آوردن ژنراتور معادل هر دسته، می‌توان با اعمال معیار سطوح معادل برای سیستم دو ماشین که در قسمت ۳-۱ شرح داده شد، در مورد پایداری سیستم چند ماشینه تصمیم‌گیری کرد. فرض مهمی که در روابط فوق استفاده شده، دلالت بر این دارد که ژنراتورهای شبکه بعد از بروز اغتشاش به دو دسته بحرانی و غیربحرانی تقسیم می‌شوند. منظور از دسته ژنراتورهای بحرانی، ژنراتورهایی می‌باشند که به‌ازای اغتشاشات مختلف در شبکه، زاویه روتور آن‌ها تغییرات بیشتری از خود نشان می‌دهند. معیار فوق برای شبکه‌های قدرتی که شامل دو ناحیه می‌باشند که این دو ناحیه بعد از وقوع اغتشاش تشکیل دسته ژنراتورهای بحرانی و غیربحرانی را می‌دهند به راحتی قابل اعمال می‌باشد. برای شبکه‌هایی که در آن‌ها بعد از وقوع اغتشاش چند دسته ژنراتور هم‌نوا به‌وجود می‌آید بایستی با استفاده از روش‌های دسته‌بندی ژنراتورهای هم‌نوا، ابتدا این دسته‌ها از هم جدا شوند و بعد از آن می‌توان نسبت به پایداری دسته‌های مختلف ژنراتورهای بحرانی نسبت به هم تصمیم‌گیری کرد [۲۲-۲۱].

با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان به‌طور خلاصه الگوریتم ارائه شده را به این صورت بیان نمود:

در یک شبکه قدرت چند ماشینه ابتدا توان الکتریکی خروجی ژنراتورها به صورت تابعی از زمان اندازه‌گیری شده و توسط لینک-های مخابراتی به مرکز کنترل ارسال می‌شوند. با وقوع اغتشاش در شبکه، توان الکتریکی خروجی ژنراتورها دچار تغییراتی شده که این تغییرات با استفاده از شاخص‌های مربوطه در واحد PSB شناسایی شده و در صورت تشخیص ایجاد نوسان توان در شبکه؛ با استفاده از منحنی‌های زاویه روتور ژنراتورها، دسته ژنراتورهای بحرانی و غیربحرانی تعیین شده و سپس با استفاده از روابط معیار سطوح معادل بسط یافته، ابتدا شبکه چند ماشینه به یک شبکه دو ماشینه و سپس شبکه تک ماشین با شین بینهایت تبدیل می‌گردد. بنابراین از روی منحنی توان-زمان شبکه تک ماشین به شین بینهایت و با استفاده از معیار سطوح معادل در حوزه زمان نسبت به پایداری کل شبکه تصمیم‌گیری می‌شود. لازم به یادآوری است که در شبکه‌های مورد بررسی فرض بر این است که ژنراتورهای شبکه مربوطه، بعد از وقوع اغتشاش به دو دسته بحرانی و غیر بحرانی تقسیم می‌شوند و برای شبکه‌های بزرگتر که رفتار ژنراتورهای آن در مقابل اغتشاشات از قبل قابل پیش‌بینی نیست، بایستی از روش‌های به‌هنگام دسته‌بندی ژنراتورها جهت تعیین ژنراتورهای بحرانی و غیر بحرانی برای اعمال معیار سطوح معادل بسط یافته استفاده کرد [۲۲-۲۱].

## ۴- شبیه‌سازی

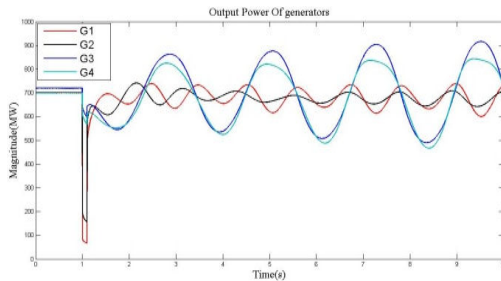
جهت بررسی صحت الگوریتم ارائه شده به شبیه‌سازی و اعمال رویکرد مذکور در ۲ شبکه متفاوت پرداخته می‌شود. شبکه اول، یک شبکه ۴ ماشینه و شبکه دوم، شبکه ۹ باسه استاندارد IEEE می‌باشد. در ادامه دو مورد شبیه‌سازی بر روی هر دو شبکه انجام شده است که اولین حالت یک نوسان توان پایدار بوده و دومین حالت، مربوط به یک نوسان توان ناپایدار می‌باشد.

### ۴-۱- شبکه ۴ ماشینه

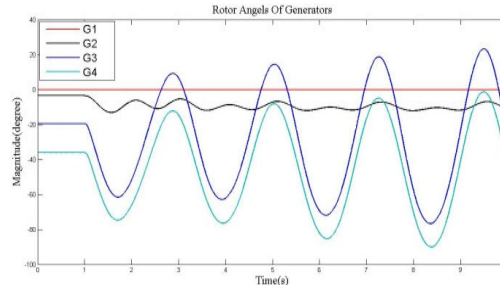
در این شبکه ۴ ژنراتور وجود دارد که تشکیل دو گروه هم‌نوا را می‌دهند و این به دلیل انتقال توانی در حدود ۴۰۰ مگاوات از ناحیه چپ به ناحیه راست می‌باشد که باعث می‌گردد ژنراتورهای دو ناحیه نسبت به اغتشاشات شبکه رفتارهای عکس هم نشان دهند. شبیه‌سازی‌های انجام شده حاکی از آن است که به‌ازای اغتشاشات مختلف در این شبکه، ژنراتورهای ناحیه راست تشکیل ژنراتورهای بحرانی را داده و نسبت به ناحیه سمت چپ نوسانات شدیدتری از خود نشان می‌دهند که بایستی ناپایداری این نوسانات به‌درستی تشخیص داده شود و اقدامات مقتضی از قبیل حذف بار و یا قطع خط ارتباطی در جهت احیای شبکه انجام گیرد.

#### ۴-۱-۱- وقوع خطای اتصال کوتاه سه فاز روی خط بین باس های ۵ و ۶ و رفع آن بعد از ۱۰۰ میلی ثانیه

بعد از وقوع خطا و رفع آن مقادیر زوایای روتور ژنراتورها و توان الکتریکی خروجی آنها اندازه گیری شده که به ترتیب در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

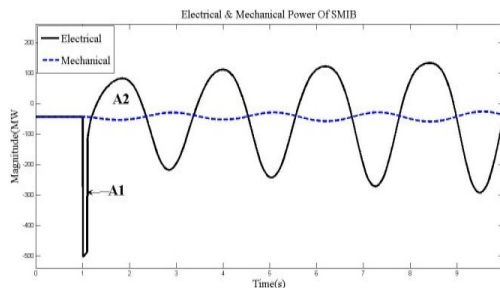


شکل ۸: توان الکتریکی خروجی ژنراتورها

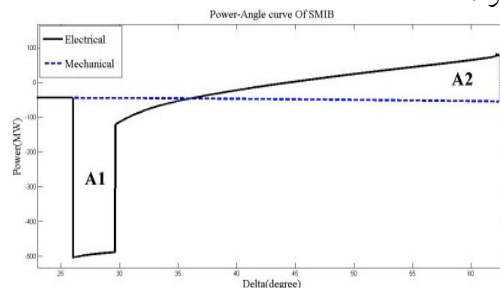


شکل ۷: زاویه روتور ژنراتورها بعد از اغتشاش

با توجه به شکل ۷ مشخص است که ژنراتورهای ۳ و ۴ تشکیل ژنراتورهای بحرانی و ژنراتورهای ۱ و ۲ دسته ژنراتورهای غیر بحرانی را تشکیل می دهند. با استفاده از اطلاعات پارامترهای شبکه [۱۷] و روابط تبدیل سیستم به شبکه دو ماشینه، ثابت اینرسی معادل دسته ژنراتورهای بحرانی و غیر بحرانی محاسبه گردیده که به ترتیب برابر  $70/75$  (MW) و  $74/48$  (MW) می باشند. سپس با استفاده از روابط مدل سیستم تک ماشینه به شین بینهایت (SMIB)، ثابت اینرسی معادل کل شبکه برابر  $36/28$  (MW) می باشد. منحنی های توان-زاویه و توان-زمان، برای ژنراتور شبکه SMIB معادل به ترتیب در شکل های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است که با توجه به شکل ۱۰ و استفاده از عملکرد الگوریتم معیار سطوح معادل بسط یافته در حوزه زمان، مساحت سطح A1 برابر  $(MW-S)$  و مساحت سطح A2 نیز برابر  $48/46$  (MW-S) محاسبه شده است. در ضمن مساحت  $A2_{max}$  که معادل ماکزیمم سطح شتاب گیرنده می باشد برابر  $107/56$  (MW-S) است. با توجه به برابر بودن سطح A2 با سطح A1؛ الگوریتم معیار سطوح معادل بسط یافته در حوزه زمان این نوسان را به درستی یک نوسان پایدار تشخیص داده که این تشخیص در لحظه  $1/75$  ثانیه انجام می شود.



شکل ۱۰: منحنی توان-زمان ماشینه معادل شبکه



شکل ۹: منحنی توان-زاویه ماشینه معادل شبکه

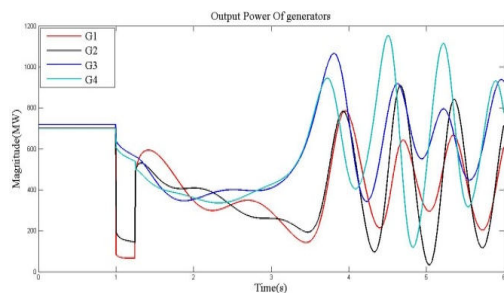
لازم به یادآوری است که در شکل های فوق توان مکانیکی ژنراتورها و به طبع آن، توان مکانیکی ژنراتور شبکه تک ماشینه به شین بینهایت معادل شبکه ۴ ماشینه، به خاطر عملکرد گاورنرهای ژنراتورها به صورت متغیر با زمان رسم شده است که در عمل نیز همین طور می باشد ولی در بازه زمانی محاسبه سطوح شتاب دهنده و شتاب گیرنده تقریباً ثابت است. بنابراین در اینجا نیز برای انجام محاسبات این فرض در نظر گرفته شده است.



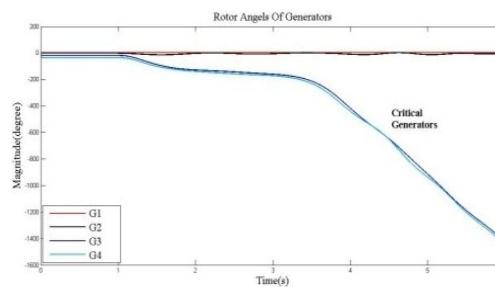
#### ۴-۱-۲- وقوع خطای اتصال کوتاه سه فاز روی خط بین باس‌های ۵ و ۶ و رفع آن بعد از ۲۵۰ میلی‌ثانیه

در این حالت با توجه با افزایش زمان رفع خطا یکی از شرایط خروج از همگامی در شبکه بوجود می‌آید. زاویه روتور ژنراتورها و توان الکتریکی خروجی آن‌ها به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ترسیم شده است. مشخص است که ژنراتورهای ۳ و ۴ در اثر اغتشاش شتاب منفی گرفته و همگامی خود را با بقیه شبکه از دست می‌دهند.

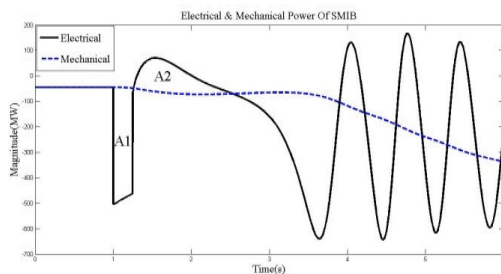
منحنی‌های توان-زاویه و توان-زمان برای ژنراتور معادل شبکه (SMIB) با استفاده از روابط الگوریتم معیار سطوح معادل بسط داده شده در حوزه زمان در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ترسیم شده است. با توجه به شکل ۱۴ و عملکرد الگوریتم مذکور، مساحت سطح A1 برابر  $109/97$  (MW-S) و مساحت سطح A2 برابر  $95/26$  (MW-S) می‌باشد که با توجه به کوچکتر بودن سطح شتاب‌گیرنده A2 از سطح شتاب‌دهنده A1 به علت زیاد بودن زمان رفع خطا، الگوریتم این حالت را به درستی وضعیت خروج از همگامی تشخیص داده و این تشخیص در لحظه  $2/53$  ثانیه انجام می‌شود. برای جلوگیری از، از دست رفتن سنکرونیسم دو ناحیه چپ و راست بایستی اقدامات لازم از قبیل قطع خط بین باس‌های ۸ و ۹، حذف بار در ناحیه سمت راست و یا حذف تولید در ناحیه سمت راست را انجام داد تا بتوان کل شبکه را از فروپاشی نجات داد.



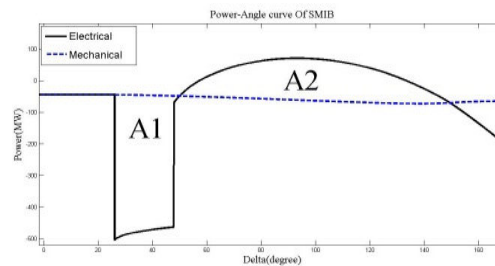
شکل ۱۲: توان الکتریکی خروجی ژنراتورها



شکل ۱۱: زاویه روتور ژنراتورها بعد از اغتشاش



شکل ۱۴: منحنی توان-زمان ماشین معادل شبکه



شکل ۱۳: منحنی توان-زاویه ماشین معادل شبکه

با توجه به اینکه نرم‌افزار Digsilent در خروجی خود وضعیت عملکردی ژنراتورهای شبکه را نشان می‌دهد، با مراجعه به آن مشخص می‌شود که ژنراتورهای ۳ و ۴ در زمان‌های  $4/54$  ثانیه و  $4/55$  ثانیه همگامی خود را با شبکه از دست می‌دهند. از این رو زمانی در حدود ۲ ثانیه جهت انجام اقدامات کنترلی ضروری، جهت جلوگیری از فروپاشی شبکه در اختیار است که زمان قابل توجهی می‌باشد که در صورت اقدام به موقع مرکز کنترل، می‌توان شبکه را نجات داد.

خلاصه‌ای از نتایج شبیه‌سازی‌ها روی شبکه ۴ ماشینه در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول  $T_c$  زمان رفع خطا و  $T_d$  زمان تشخیص نوع نوسان توان می‌باشد.

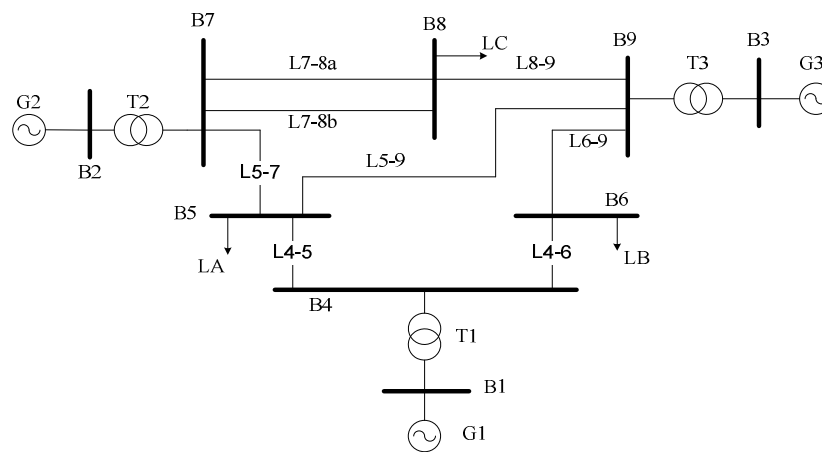
جدول ۱: نتایج شبیه سازی‌ها

نوع و محل خطا	$T_c$ (ms)	A1(MW-s)	A2(MW-s)	Am(MW-s)	Staility	$T_d$ (s)
خطای سه فاز روی خط بین باس‌های ۵ و ۶	۱۰۰	۴۸/۴۶	۴۸/۴۶	۱۰۷/۵۶	پایدار	۱/۷۵
خطای سه فاز روی خط بین باس‌های ۵ و ۶	۱۵۰	۶۸/۹۸	۶۸/۹۸	۶۹/۰۶	پایدار	۱/۸۲
خطای سه فاز روی خط بین باس‌های ۵ و ۶	۲۵۰	۱۰۹/۹۷	۹۵/۲۶	۹۵/۲۶	نا پایدار	۲/۵۳
خطای سه فاز در خط ۹	۲۰۰	۷۰/۹۴	۷۰/۹۴	۱۵۵/۱۳	پایدار	۱/۶۱
خطای سه فاز روی باس ۶	۲۵۰	۱۲۷/۹۹	۸۵/۲	۸۵/۲	نا پایدار	۲/۱

با دقت در جدول ۱ مشاهده می‌شود که با وقوع یک خطای سه فاز روی خط بین باس‌های ۵ و ۶ و رفع آن بعد از ۱۵۰ میلی‌ثانیه، مساحت سطوح A1 و A2 با استفاده از روابط الگوریتم معیار سطوح معادل بسط یافته در حوزه زمان به ترتیب برابر  $68/98$  (MW-S) و  $68/98$  (MW-S) می‌باشند که با توجه به برابر بودن مساحت سطح A2 با A1، نتیجه‌گیری می‌شود که این نوسان؛ یک نوسان توان پایدار است که الگوریتم معیار سطوح معادل بسط یافته در حوزه زمان نیز؛ این نوسان را به درستی یک نوسان پایدار تشخیص می‌دهد. ولی همان‌طور که در بخش ۲ مشاهده گردید با وقوع یک خطای سه فاز روی خط بین باس‌های ۵ و ۶ و رفع آن بعد از ۱۴۰ میلی‌ثانیه الگوریتم معیار سطوح معادل عملکرد مطلوب نداشته و به اشتباه این حالت را یک نوسان توان ناپایدار تشخیص می‌دهد. حال آن‌که شبکه مذکور با وقوع خطای قید شده و رفع آن بعد از ۱۵۰ میلی‌ثانیه نیز همچنان پایدار می‌باشد.

#### ۴-۲- شبکه ۹ باسه استاندارد IEEE

این شبکه متشکل از سه ژنراتور می‌باشد که ساختار آن در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در این شبکه ژنراتور ۱ به عنوان باس مرجع<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده که نوسانات ژنراتورهای ۲ و ۳ نسبت به این ژنراتور سنجیده شده است. با وقوع اغتشاشات مختلف شبکه دچار نوسان می‌شود که بایستی پایداری نوسانات به درستی تشخیص داده شده و اقدامات کنترلی متقابلاً جهت جلوگیری از خاموشی در شبکه انجام شود.

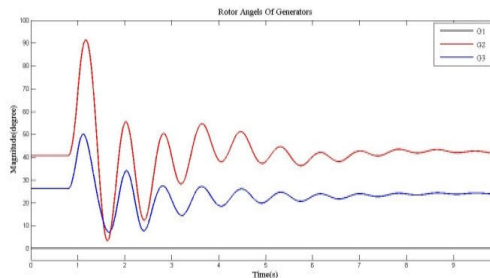
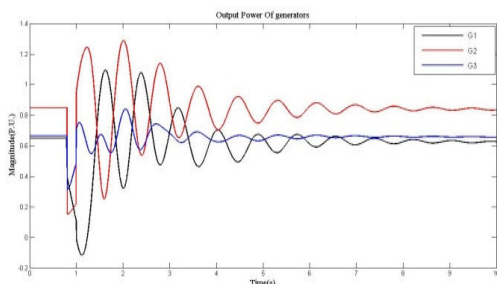


شکل ۱۵: شبکه ۹ باسه IEEE

<sup>1</sup> Slack

#### ۴-۲-۱- وقوع خطای اتصال کوتاه سه فاز روی خط L7-8b و رفع آن بعد از ۲۰۰ میلی ثانیه

در این حالت که خطا در فاصله ۳۰ درصدی از باس B7 روی خط مربوطه اتفاق می افتد، به علت نزدیکی ژنراتور ۲ به محل خطا، نوسانات این ژنراتور شدیدتر بوده و از این رو این ژنراتور، به عنوان ماشین بحرانی در مقابل دو ماشین دیگر در نظر گرفته می شود. منحنی نوسانات روتور ژنراتورها در شکل ۱۶ نشان داده شده است. ملاحظه می شود که تغییرات زاویه روتور ژنراتور ۲ در بازه حین خطا نسبت به دیگر ژنراتورها بیشتر و احتمال ناپایداری آن محتمل می باشد.

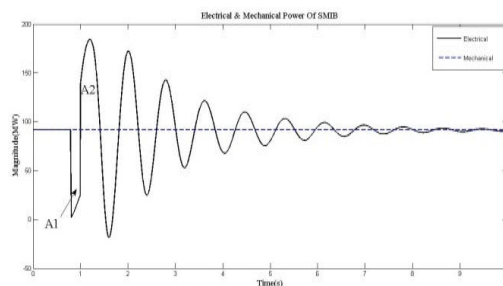


شکل ۱۷: توان الکتریکی خروجی ژنراتورها

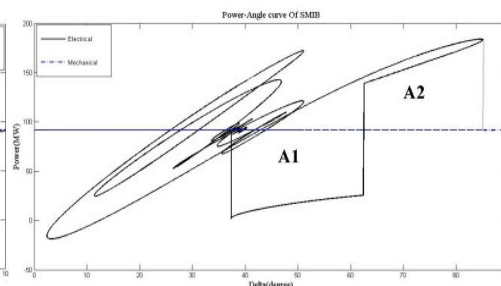
شکل ۱۶: زاویه روتور ژنراتورها بعد از اغتشاش

منحنی توان-زاویه و توان-زمان برای SMIB معادل شبکه به ترتیب در شکل های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۹ و استفاده از عملکرد الگوریتم معیار سطوح معادل بسط یافته در حوزه زمان، مساحت سطح A1 برابر  $15/80$  (MW-S) و مساحت سطح A2 نیز برابر  $15/80$  (MW-S) محاسبه شده است. در ضمن مساحت  $A2_{max}$  که معادل ماکزیمم سطح شتاب گیرنده است برابر  $28/74$  (MW-S) می باشد. با توجه به تساوی سطوح A1 و A2، الگوریتم معیار سطوح معادل بسط یافته در حوزه زمان این نوسان را به درستی یک نوسان پایدار تشخیص داده است.

بنابراین در مقابل این اغتشاش ژنراتور ۲ نسبت به ژنراتورهای باقیمانده پایدار می ماند و نیازی به انجام اعمال اضافی جهت جلوگیری از ناپایداری شبکه نمی باشد.



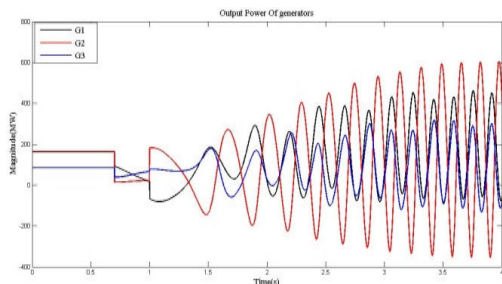
شکل ۱۹: منحنی توان-زمان ماشین معادل شبکه



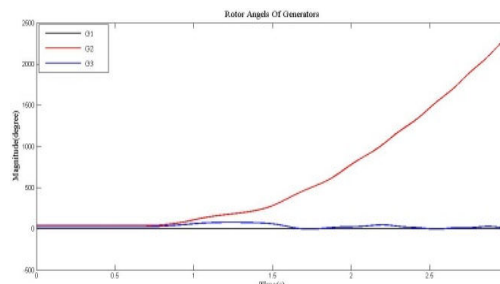
شکل ۱۸: منحنی توان-زاویه ماشین معادل شبکه

#### ۴-۲-۲- وقوع خطای اتصال کوتاه سه فاز روی خط L7-8b و رفع آن بعد از ۳۰۰ میلی ثانیه

در این حالت زمان رفع خطا نسبت به حالت اول ۱۰۰ میلی ثانیه بیشتر شده است. با افزایش زمان رفع خطا انتظار می رود که ژنراتور ۲ شتاب بیشتری گرفته و ناپایدار گردد. تغییرات زاویه روتور ژنراتورهای شبکه در شکل ۲۰ نشان داده شده است و همان طور که ملاحظه می شود زاویه روتور ژنراتور ۲ افزایش شدیدی دارد که باعث ناپایداری آن می شود.



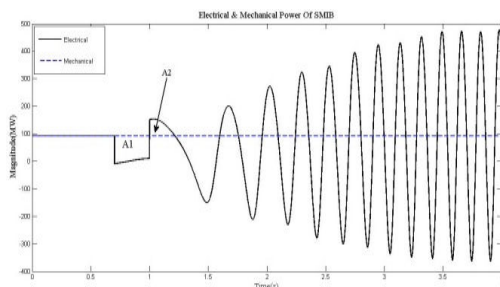
شکل ۲۱: توان الکتریکی خروجی ژنراتورها



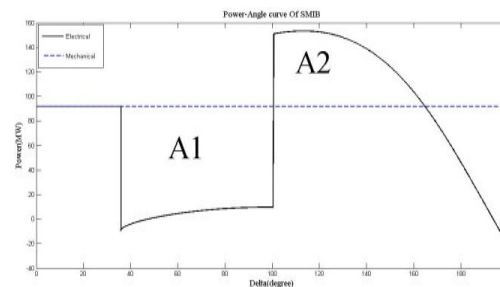
شکل ۲۰: زاویه روتور ژنراتورها بعد از اغتشاش

تغییرات توان الکتریکی ژنراتورهای شبکه نیز در شکل ۲۱ نشان داده شده است. با ناپایدار شدن ژنراتور ۲ عملاً کل شبکه نوسانی شده و عملکرد پایدار آن ممکن نخواهد بود، مگر اینکه ناپایداری شبکه به موقع تشخیص داده شده و با انجام اعمال اصلاحی نظیر حذف بار، امکان عملکرد پایدار شبکه فراهم گردد.

منحنی توان-زاویه و توان-زمان برای SMIB معادل شبکه به ترتیب در شکل‌های ۲۲ و ۲۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲۳ و استفاده از عملکرد الگوریتم معیار سطوح معادل بسط یافته در حوزه زمان، مساحت سطح A1 برابر  $27/01$  (MW-S) و مساحت سطح A2 نیز برابر  $9/02$  (MW-S) محاسبه شده است. با توجه به کوچکتر بودن مساحت سطح A2 از سطح A1، الگوریتم معیار سطوح معادل بسط یافته در حوزه زمان این نوسان را به درستی یک نوسان ناپایدار تشخیص داده است.



شکل ۲۳: منحنی توان-زمان ماشین معادل شبکه



شکل ۲۲: منحنی توان-زاویه ماشین معادل شبکه

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا با چند مورد شبیه سازی نشان داده شد که الگوریتم شناسایی نوسان توان با استفاده از معیار سطوح معادل در حوزه زمان برای سیستم‌های چند ماشینه به صورت رویکرد محلی کارایی نداشته و سپس با ارائه الگوریتم معیار سطوح معادل بسط یافته و تبدیل شبکه چند ماشینه به شبکه دو ماشینه با دسته ژنراتورهای بحرانی و غیر بحرانی و پس از آن تبدیل به یک شبکه با یک ژنراتور و شین بینهایت، نسبت به حل مشکل مذکور اقدام شده است که با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها مشخص گردید که روش ارائه شده بدون نیاز به آگاهی از سایر پارامترهای سیستم از جمله امپدانس خطوط و اندازه گیری آن‌ها، تنها با استفاده از توان الکتریکی خروجی از پایانه ژنراتورها قادر خواهد بود در مورد پایداری نوسانات ژنراتورها و شبکه با اعمال رویکرد تعادل انرژی تصمیم‌گیری نماید.

## مراجع

- [1] P.K. NAYAK et al., "A Fault Detection Technique for the Series-Compensated Line During Power Swing," IEEE transactions on power delivery, vol. 28, No. 2, pp. 714-722, 2013.
- [2] P. K. Kumar, A. K. Pradhan, P. Bajpai, "A Fault Detection Technique for the Series-Compensated Line During Power Swing," Power Delivery, IEEE Transactions on. vol. 28, No. 2, April 2013.
- [3] W. A. Elmore, "Protective Relaying Theory and Applications," 2nd ed. New York: Marcel Dekker, rev. and expanded. ed., 2004.
- [4] S. Gautam, and S.M. Brahma, "Out-of-step blocking function in distance relay using mathematical morphology," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 6, Issue: 4, pp. 313-319, 2012.
- [5] N. Fischer, G. Benmouyal, Daqing Hou, D. Tziouvaras, J. Byrne-Finley, and B. Smyth, "Do system impedances really affect power swings Applying power swing protection elements without complex system studies," Protective Relay Engineers, 2012 65th Annual Conference for. pp. 108-119, 2012.
- [6] K. Seethalekshmi, S. N. Singh, S. C. Srivastava, "A classification approach using support vector machines to prevent distance relay maloperation under power swing and voltage instability". Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 27, No. 3, July 2012.
- [7] V.A. Ambekar, and S.S. Dambhare, "Comparative evaluation of out of step detection schemes for distance relays" Power India Conference, 2012 IEEE Fifth. pp. 1-6, 2012.
- [8] B. Shrestha, R. Gokaraju, and Mohindar Sachdev, "Out-of-Step Protection Using State-Plane Trajectories Analysis," IEEE transactions on power delivery, Vol. 28, No. 2, pp. 1083-1093, 2013.
- [9] S. Lotfifard and J. Faiz, "Detection of Symmetrical Faults by Distance Relays During Power Swing," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 25, No. 1, pp. 12-23, 2010.
- [10] A.F. Abidin, A. Mohamed, and H. Shareef, "Power swing detection for correct distance relay operation using S-transform and neural networks," 5th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), pp. 279-284, 2011.
- [11] Y. Hong, and C. Po-Hsuang, "Genetic-based underfrequency load shedding in a stand-alone power system considering fuzzy loads" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, No. 1, pp. 87-95, 2012.
- [12] P. Jena, A.K. Pradhan, "Directional relaying during power swing and single pole tripping," International Conference on Power Systems, 2009. ICPS '09, pp. 1-6, 2009.
- [13] K. H. So, "Out-of-step detection algorithm using frequency deviation of voltage," Generation, Transmission & Distribution, IET, vol. 1, pp. 119-126, 2007.
- [14] Shengli Cheng, "Real-time power swing detection using equal area criterion," M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan, April 2007.
- [15] A. Y. Abdelaziz et al., Transient stability analysis with equal-area criterion for out of step detection using phasor measurement units, International Journal of Engineering, Science and Technology, Vol. 5, No. 1, 2013, pp. 1-17.

- [16] S. Paudyal, R.Gokaraju, M.S.Sachdev, "Application of Equal Area Criterion Conditions in the Time Domain for Out-of-Step Protection," Power Delivery, IEEE Transactions on. vol. 25, No. 2, April 2010.
- [17] P.Kundur, Power System Stability Control. NewYork: McGraw-Hill, 1994.
- [18] P. McNabb, and J. Bialek, "A priori transient stability indicator of islanded power systems using Extended Equal Area Criterion," Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE, pp. 1-7, 2012.
- [19] K. R.Padiyar, Power system dynamics. BS publications, 2008.
- [20] H. H. Al Marhoon, I. Leevongwat, and P. Rastgoufard, "A practical method for power systems transient stability and security analysis". Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES. IEEE, 2012.
- [21] X. Wang, "Slow coherency grouping based islanding using minimal cutsets and generator coherency index tracing using the continuation method," PhD Thesis, Iowa State University, 2005.
- [22] R. Agrawal, and T. Dhadbanjan, "Support vector clustering-based direct coherency identification of generators in a multi-machine power system". IET Generation, Transmission & Distribution, pp. 1357-1366, 2013.