

کاربرد حفاظت ناحیه گسترده برای مقابله با خاموشی‌های سراسری ناشی از ناپایداری زاویه‌ای

سعید کیارستمی و مجتبی خدرزاده

ناپایداری زاویه‌ای، نوسانات فرکانسی یا ناپایداری‌های دیگر قرار می‌گیرد. بسته به شرایط شبکه از نظر میزان ذخیره گردان و دسترس‌پذیری تجهیزات جایگزین، شدت اختلال می‌تواند بخش‌هایی از شبکه را به صورت جزیره درآورده یا شبکه را به طور کامل از سنکرون خارج کند و یک خاموشی سراسری را پیش آورد. اگر عملیات مقابله‌ای به سرعت و متناسباً انجام نشود (به عنوان مثال حذف بار یا تولید، اصلاح میزان پشتیبانی توان راکتیو، جداسازی بخش‌های مختلف سیستم) شبکه به جزایر غیر برنامه‌ریزی شده یا فروپاشی به صورت مرحله‌ای وارد خواهد شد. برای به حداقل رساندن پتانسیل خاموشی‌های سراسری، طراحی سیستم‌های حفاظتی ویژه به عنوان بخشی از طرح‌های دفاعی ناحیه گسترده که به خوبی هماهنگ شده باشند توسعه یافته و پیاده‌سازی شده‌اند [۱] تا [۹].

کارکرد مطمئن سیستم‌های قدرت در محیط رقابتی جدید، چالش‌های جدیدی را پدید آورده است، به ویژه لازم است که روش‌های پیشرفته‌ای برای مقابله و تخفیف اثر پیشامدهای شدید یعنی پیشامدهایی که شدیدتر از پیشامدهای عادی دیده‌شده در طراحی هستند، به کار گرفته شوند. گرچه تعدادی از شرکت‌های برق طرح‌های دفاعی برای حفاظت در برابر پیشامدهای شدید که می‌توانند در سیستم‌های آنها رخ دهند استفاده نموده‌اند، ولی هیچ روش یا دستورالعملی که مقبولیت عمومی داشته باشد برای این مقصود وجود ندارد. هدف اصلی حفاظت در برابر پیشامدهای شدید آن است که یک نقص در یک ناحیه شبکه نباید باعث خاموشی سراسری در نواحی دیگر شده و چنین شرایطی را باید با طراحی، نگهداری، بهره‌برداری و هماهنگی خوب شبکه قدرت به حداقل رسانید.

امروزه فناوری‌های جدید مانند سیستم‌های اندازه‌گیری سنکرون با استفاده از سیگنال‌های GPS همراه با سیستم‌های ارتباطی مطمئن در سیستم‌های قدرت وارد شده‌اند که قادرند طرح‌های دفاعی موجود را بهبود بخشند یا توسعه آنها را تسهیل نمایند. بنابراین یک ساختار کنترلی برای شبکه به صورت هرمی در حال ظهور در جوار طرح‌های دفاعی است که می‌تواند به عنوان جزئی اصلی از توسعه سیستم قدرت باشد.

حفاظت ناحیه گسترده مفهومی از کاربرد اطلاعات سراسر سیستم و فرستادن اطلاعات محلی انتخاب‌شده به محلی دور به منظور کاهش انتشار اغتشاشات عمده در سیستم قدرت است. با توجه به پیشرفت‌های روزافزون علوم ارتباطات، حفاظت ناحیه گسترده سیستم قدرت راهکاری مناسب در بهبود عملکرد ساختارهای حفاظتی و پایداری سیستم می‌باشد [۹].

تجزیه سیستم قدرت به صورت عمدی و کنترل‌شده به جزایر پایدار، قبل از تشکیل جزایر ناپایدار اجباری به عنوان آخرین راهکار دفاعی برای جلوگیری از خاموشی‌های گسترده در مواقع اضطراری می‌باشد چرا که ایجاد جزایر ناخواسته و اجباری عموماً با مشکل کمبود یا اضافه تولید توان‌های حقیقی یا راکتیو همراه بوده که باعث ناپایداری فرکانسی و

چکیده: در این مقاله یک سیستم حفاظت ناحیه گسترده برای مقابله با خاموشی‌های گسترده ناشی از ناپایداری‌های زاویه‌ای پیشنهاد می‌شود. در ابتدا خاموشی وسیع، مدل‌سازی شده و سپس سناریوهای منجر به خاموشی گسترده استخراج خواهند شد. با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، حوادثی که منجر به وقوع ناپایداری زاویه‌ای در سیستم می‌شوند تعیین می‌گردند. سپس با استفاده از الگوریتمی که از اطلاعات به دست آمده از واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMUها) استفاده می‌کند، ژنراتورهای هم‌نوی سیستم شناسایی شده و با قطع خطوط ضعیف و حذف بار مناسب، سیستم به جزایر پایدار تجزیه می‌شود. صحت روش پیشنهادی بر روی شبکه استاندارد ۳۹ باسه IEEE نشان داده شده است.

کلیدواژه: خروج‌های زنجیره‌ای، سیستم قدرت، شبکه عصبی، ناپایداری زاویه‌ای.

۱- مقدمه

یکی از دلایل عمده‌ای که باعث شده سیستم قدرت را یک سیستم پیچیده بنامند، وقوع پدیده‌هایی است که در اثر به هم پیوستگی اجزای مختلف آن نظیر ژنراتورها، خطوط و سایر تجهیزات به وجود آمده که در رفتار هیچ یک از آنها به تنهایی دیده نمی‌شود. خاموشی‌های سراسری به ندرت اتفاق می‌افتند. آنها معمولاً توسط یک سلسله حوادث دور از انتظار و یا با احتمال کم که عموماً توسط طراحان سیستم قدرت برنامه‌ریزی نشده و نیز توسط اپراتورهای سیستم قابل پیش‌بینی نیستند، اتفاق می‌افتند و سیستم را مستعد بروز خاموشی‌های گسترده قرار می‌دهند. این نوع حوادث معمولاً به دنبال خروج پی در پی تجهیزات در یک سیستم قدرت تحت تنش که فقط به طور حاشیه‌ای معیارهای برنامه‌ریزی را برآورده می‌سازد، اتفاق می‌افتند. زنجیره حوادث معمولاً با خروج تجهیزاتی از یک سیستم که قبلاً تحت تنش بوده یا هنگام بروز خطا آغاز می‌شود. حاشیه اطمینان سیستم در این حالت برای تحمل این گونه رخدادها در حد بسیار جزئی است. به عنوان مثال بعضی از ژنراتورها یا خطوط ممکن است برای انجام تعمیرات از مدار خارج بوده و در این هنگام یک خط بر اثر خطا از مدار خارج شود، همچنین ممکن است خط دیگری بنا بر هر علتی و به طور اتفاقی از مدار خارج شود و در این صورت خطوط دیگر دچار اضافه بار می‌شوند و می‌توانند تا اندازه‌ای بخشی از این اضافه بار را تحمل کنند و اگر شرایط بدین صورت ادامه یابد، شبکه در صورت وجود تجهیزات دارای بار زیاد در معرض ناپایداری و لتاژی،

این مقاله در تاریخ ۲۴ شهریور ماه ۱۳۹۳ دریافت و در تاریخ ۳ مرداد ماه ۱۳۹۴ بازنگری شد.

سعید کیارستمی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی- مهندسی شهید عباسپور، تهران، (email: saeidkiarostami@gmail.com).
مجتبی خدرزاده، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس فنی- مهندسی شهید عباسپور، تهران، (email: m_khederzadeh@sbu.ac.ir).

داده شوند. سپس تریپ‌های متناظر (سمپاتیک^۲) ناشی از خطاهای پنهان سیستم حفاظتی با تولید یک عدد تصادفی برای هر مؤلفه در ناحیه آسیب‌پذیری، شبیه‌سازی می‌شوند. روندنمای اجرای کار در [۱۱] نشان داده شده است.

۳- پایداری زاویه‌ای روتور

با ظهور PMU و دسترسی به اندازه‌گیری‌های به هنگام، مطلوب است که ناپایداری سیستم قبل از وقوع خروج از همگامی پیش‌بینی شود، سپس اقدامات مناسب مانند جزیره‌سازی سیستم صورت گیرد تا برای حفظ تمامیت سیستم از تریپ‌های غیر ضروری جلوگیری گردد. فرض می‌شود PMUها در شین‌های ژنراتوری شبکه نصب شده یا آن که از طریق طراحی سیستم پایش رؤیت‌پذیر قابل حصول هستند. سیگنال‌های GPS^۳ برای سنکرون‌نمودن PMUها با یکدیگر به کار می‌روند. ارتباط بین PMUها و مرکز حفاظت سیستم از طریق فیبر نوری یا دیگر کانال‌های ارتباطی دسترس‌پذیر دایمی تحقق می‌یابد. داده‌های جمع‌آوری شده از PMUها (زاویه و دامنه ولتاژ) باید برای ورودی شبکه عصبی ساماندهی و نرمالیزه شوند. داده‌های ورودی بر اساس تعداد اندازه‌گیری فازور در هر پنجره داده که معمولاً یک سیکل فرکانس اصلی است قرار دارند و معمولاً یک سیکل پس از رفع خطا اطلاعات قابل اعتنا برای ارزیابی پایداری کسب می‌شوند. نرخ تغییرات زاویه و ولتاژ ژنراتورها برای دستیابی به تشخیص حالات ناپایداری دقیق‌تر برای جمعاً دو ورودی در هر ژنراتور محاسبه شده‌اند. بردار ورودی X می‌تواند به صورت زیر نوشته شود

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n\} \quad (1)$$

که در آن

$$X_i = \left\{ \frac{dV_i}{dt}, \frac{d\delta_i}{dt} \right\} \quad (2)$$

در روابط فوق V ولتاژ باس ژنراتوری، δ زاویه باس ژنراتوری، t پنجره زمانی به میزان ۶ سیکل و n تعداد ژنراتورها می‌باشد. شایان ذکر است که نرخ تغییرات زاویه و ولتاژ ژنراتورها مستقیماً از داده‌های PMUها کسب نمی‌شوند و در این راستا روش‌های مختلفی وجود دارند که به عنوان نمونه در [۱۳] از شبکه عصبی برای این منظور استفاده شده است. خروجی شبکه عصبی مورد استفاده در این مقاله برای تشخیص پایداری شامل یک نرون است که حالت سیستم را نشان می‌دهد و مقادیر آن به صورت زیر هستند:

۰ ← پس از رفع خطا، سیستم پایدار است.

۱ ← پس از رفع خطا، سیستم ناپایدار است.

به منظور تست روش شبکه عصبی تعدادی خطا در خطوط مختلف سیستم اعمال می‌شوند. تمام خطاها با بازکردن خط خطادیده رفع خواهند شد و شبیه‌سازی با خطاهای با بازه‌های زمانی متفاوت (از ۸ تا ۱۶ سیکل) انجام می‌گردد. بازه‌های زمانی طولانی به منظور تحت فشار قرار دادن سیستم برای ورود به حالت‌های ناپایدار به کار می‌روند. جدول ۱ تعداد موارد شبیه‌سازی شده بر روی شبکه مثال را نشان می‌دهد.

۴- فرضیات مدل‌سازی

برای شبیه‌سازی از محیط نرم‌افزار MATLAB/Simulink استفاده

جدول ۱: تعداد موارد شبیه‌سازی با شبکه عصبی.

وضعیت موارد شبیه‌سازی شده	تعداد موارد
پایداری سیستم پس از رفع خطا	۳۸
ناپایداری سیستم پس از رفع خطا	۳۴
مجموع	۷۲

ولتاژی جزایر و در نتیجه فروپاشی و خاموشی بخشی از شبکه خواهد شد. در مواقع بحرانی که شبکه به سمت فروپاشی و چند تکه شدن اجباری و ایجاد جزایر ناپایدار میل می‌کند، جزیره‌ای کردن شبکه به صورت کنترل‌شده در قالب جزایر پایدار باعث افزایش کنترل‌پذیری و کاهش ریسک خاموشی‌های شبکه می‌گردد [۱۰].

اگر در فرایند جزیره‌سازی کنترل‌شده سیستم قدرت، ژنراتورهای غیر هم‌نوا با یکدیگر در یک جزیره قرار گیرند، نوسانات بین آنها همچنان تشدید خواهد شد و موجب فروپاشی آن جزیره می‌شود. با جزیره‌ای کردن شبکه قدرت به صورت صحیح می‌توان ژنراتورهای غیر هم‌نوا را از یکدیگر جدا نمود و بنابراین مهم‌ترین یا حداقل اولین مسئله در جزیره‌سازی سیستم قدرت، هم‌نوايي ژنراتورهاست [۱۱] و [۱۲].

در این مقاله برای پیش‌بینی پایداری زاویه‌ای از شبکه عصبی استفاده می‌شود که ورودی آن سرعت و شتاب زوایای ژنراتورها می‌باشد. معیار به کار رفته برای ناپایداری این است که آیا اختلاف بین هر دو زاویه ژنراتور در ثانیه اول پس از رفع خطا از π رادیان تجاوز می‌کند یا خیر [۱۰]. سپس با در نظر گرفتن نوسانات زاویه روتور ژنراتورها و بر اساس گروه‌های هم‌نوايي ژنراتوری، الگوریتمی برای جزیره‌ای کردن شبکه به صورت کنترل‌شده در مواقعی که سیستم به سمت خاموشی سراسری می‌رود، پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی بر روی سیستم ۳۹ باسه IEEE اجرا شده و در آن خطاهای مختلف در مکان‌های متفاوت سیستم به منظور مطالعه موارد گوناگون پایداری سیستم انجام شده است. سپس نتایج شبیه‌سازی خطا برای آموزش شبکه عصبی به کار رفته که در بیش از ۹۹٪ موارد در تعیین حالت سیستم موفق بوده است. موارد ناپایداری که منجر به فروپاشی شبکه می‌گردند برای آزمایش کارآمدی روش تعیین ژنراتورهای هم‌نوا و جزیره‌سازی کنترل‌شده به کار رفته است.

۲- مدل خاموشی سراسری

مدل خاموشی AC توسعه داده شده در دانشگاه منچستر که در [۱۱] و [۱۲] توضیح داده شده است نشان‌دهنده محدوده‌ای از عملیات شامل تریپ‌های متوالی خطوط انتقال، نمایش ناپایداری ژنراتور، پخش مجدد منابع حقیقی و راکتیو پس از اختلال و حذف بار اضطراری برای جلوگیری از خاموشی‌های کامل سیستم می‌باشد.

شبیه‌سازی‌ها از یک حالت عادی سیستم شروع می‌شود که می‌تواند برای مطالعه حالت توانایی سیستم تحت شرایط مختلف، متفاوت باشد. سیستم در آغاز هر آزمایش به این حالت مینا برمی‌گردد. از آنجا که پیش‌بینی نوع و محل خطای اولیه غیر ممکن است برای هر آزمایش، یک اختلال اولیه توسط شبیه‌سازی خروجی تصادفی مؤلفه‌های سیستم تولید می‌شود. فرض خواهد شد که مؤلفه‌های تحت تأثیر حادثه اولیه در یک "ناحیه آسیب‌پذیری"^۱ قرار دارند که شامل تمام مؤلفه‌هایی است که ممکن است به دلیل نقص سیستم حفاظتی در پاسخ به حادثه اولیه، تریپ

خارجی با به کارگیری الگوریتم Agglomerative و شاخص مدولاربودن^۷ مدولاربودن^۷ به چند ناحیه معادل تقسیم می‌گردد. برای به دست آوردن سیستم کاهش‌یافته، باس‌های پتانسیل داخلی همه ژنراتورها را حفظ نموده و تمام باس‌هایی که مشخصات دینامیکی ندارند مانند باس‌های بار، باس‌های ارتباطی و باس‌های ترمینال ژنراتورها حذف می‌شوند. باید اشاره کرد که در شبکه کاهش‌یافته، باس‌های پتانسیل داخلی ژنراتورها به یکدیگر متصل می‌شوند.

۵-۱ تقسیم به دو ناحیه

بر اساس [۱۲]، ماتریس لاپلاسیان وزنی^۸ L برای آنالیز ساختار اجتماع بسیار مهم است. برای گراف بدون جهت و متصل G که متشکل از N گره می‌باشد، ماتریس لاپلاسیان وزنی آن یک ماتریس متقارن $N \times N$ است که درایه قطری L_{ii} برابر با مجموع وزن‌های اضلاع متصل به گره i بوده و درایه غیر قطری L_{ij} متناظر با وزن ضلع اتصال‌دهنده گره‌های i و j می‌باشند

$$L_{ij} = \frac{\omega E_i E_j}{\sqrt{M_i M_j}} (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}), \quad i \neq j \quad (3)$$

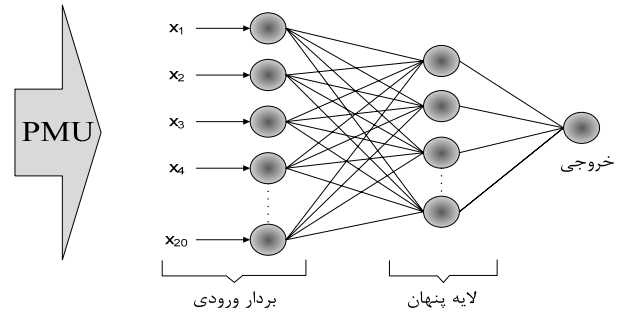
$$L_{ii} = -\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n L_{ij} \quad (4)$$

که در آن $\omega = 2\pi f \approx 314 \text{ rad/s}$ و n تعداد ژنراتورها می‌باشد که برابر با تعداد باس‌ها در شبکه کاهش‌یافته است. پارامتر M_i ثابت لختی ژنراتور i ، E_i پتانسیل گذرای ژنراتور i ام و g_{ij} و b_{ij} بخش‌های حقیقی و موهومی عناصر متناظر ماتریس ادمیتانس شبکه کاهش‌یافته می‌باشند. $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ اختلاف زاویه‌ای روتور بین ژنراتورهای i و j می‌باشد.

با نادیده گرفتن تأثیر فازورها، بخش موهومی ماتریس ادمیتانس سیستم متقارن می‌شود یعنی $b_{ij} = b_{ji}$. به علاوه در سیستم انتقال g_{ij} بسیار ناچیز است یعنی $g_{ij} = 0$ ، پس L متقارن خواهد شد. پس از وقوع خطا کوچک‌ترین مقادیر ویژه ماتریس L دچار کاهش ناگهانی می‌شود و این بدان معنی است که در اثر خطا، اتصال بین باس‌های معین و بقیه شبکه به طور ناگهانی ضعیف‌تر شده و شبکه تمایل شدیدی به تجزیه شدن به دو ناحیه پیدا می‌کند. بنابراین $L(t_f)$ در زمان t_f درست بعد از خطا محاسبه شده و سپس شبکه با استفاده از روش Spectral bisection به دو ناحیه تقسیم می‌شود. بدین منظور در ماتریس لاپلاسیان کوچک‌ترین مقدار ویژه (λ_k) و بردار ویژه مربوط به آن (v_k) محاسبه شده و باس‌های مربوط به عناصر مثبت v_k در یک ناحیه و بقیه باس‌ها در ناحیه دیگر قرار داده می‌شوند.

۵-۲ انتخاب ناحیه مورد مطالعه

عناصر قطری $L_{ii}(t)$ نشان‌دهنده تأثیر حوادث شبکه بر روی ژنراتور i با اینرسی واحد در زمان t هستند. $L_{ii}(t)$ بزرگ‌تر معادل با قابلیت هم‌نوایی بیشتر ژنراتور i می‌باشد. تغییرات در L_{ii} قبل و بعد از خطا منعکس‌کننده تأثیر خطا بر روی قابلیت هم‌نوایی ژنراتور می‌باشد. بنابراین شاخص قابلیت هم‌نوایی F_i به صورت زیر تعریف می‌شود



شکل ۱: ساختار شبکه عصبی.

شده است. برای انجام پیش‌پردازش^۱ داده‌ها با استفاده از دستور mapminmax در $[-1, 1]$ قرار داده شده‌اند که این کار با محاسبه حداقل و حداکثر مجموعه داده‌ها و بردن در بازه مورد نظر انجام می‌شود. داده‌ها به طور معمول به سه دسته آموزش، تأیید و تست تقسیم می‌شوند که در این مقاله ۶۰٪ داده‌ها برای آموزش، ۱۵٪ برای تأیید و ۲۵٪ برای صحت‌سنجی در نظر گرفته شده است. به منظور جلوگیری از ارتباط تصادفی، این مجموعه‌ها به طور تصادفی انتخاب می‌شوند.

برای یافتن بهترین ساختار شبکه، تعداد نرون‌های میانی از ۶ تا ۲۰ نرون قرار گرفت و برای توابع فعال‌سازی، توابع تانژانت هیپربولیک^۲، لگاریتمیک^۳ و خطی^۴ انتخاب شده و برای داده‌های آموزش، تأیید و تست یکسان مورد مقایسه قرار گرفتند. برای آموزش شبکه‌های عصبی الگوریتم‌های متفاوتی وجود دارد اما پرکاربردترین آنها روش آموزش Levenberg-Marquardt است که در این مقاله نیز از این روش استفاده شده است. برای این منظور از الگوریتم "trainlm" در نرم‌افزار MATLAB/Simulink استفاده شده و زمانی آموزش متوقف می‌شود که خطای داده‌های تأیید افزایش یابد. تابع خطای مورد استفاده در این آنالیز میانگین مربعات خطا^۵ است. در این میان شبکه‌ای که کمترین خطا را داشته باشد به عنوان شبکه اصلی انتخاب می‌گردد.

بهترین شبکه به دست آمده دارای یک لایه پس‌انتشار پیش‌رو^۶ با توابع آموزش و فعال‌سازی trainlm و logsig بوده و لایه میانی دارای ۱۵ نرون می‌باشد. لایه ورودی شبکه شامل ۲۰ نرون شامل اندازه ولتاژ و نرخ تغییرات فرکانس هر ژنراتور می‌باشد. این ساختار برای ارائه سریع‌تر و دقیق‌تر نتایج ارائه شده است. این شبکه در ۰/۹۹ موارد موفق به پیش‌بینی درست حالت پایدار یا ناپایدار شبکه می‌گردد و شکل ۱ ساختار شبکه عصبی را نشان می‌دهد.

۵-۳ شناسایی ژنراتورهای هم‌نوا

به منظور شناسایی ژنراتورهای هم‌نوا از الگوریتم هم‌نوایی Coherency-based استفاده شده که در [۱۲] توضیح داده شده است. این الگوریتم شامل سه بخش است. ابتدا شبکه کاهش‌یافته توسط روش Spectral bisection به دو منطقه تقسیم می‌شود. سپس بر اساس قابلیت هم‌نوایی، یک منطقه به عنوان ناحیه مورد بررسی انتخاب شده و دیگری به عنوان ناحیه خارجی در نظر گرفته می‌شود. در آخر ناحیه

1. Preprocessing
2. Tansig
3. Logsig
4. Purelin
5. Mean Square Error
6. Feed-ForwardBack Propagation

7. Modularity Index

8. Weighted Laplacian Matrix

برای جزیره‌سازی سیستم به چند بخش مجزا استفاده شوند. در واقع کاتست‌ها مرز هر جزیره با بقیه سیستم را مشخص می‌کنند. تعیین کاتست‌ها تحت شرایط زیر انجام می‌پذیرد:

- سیستم به تعداد جزیره‌های مورد نظر بر اساس محل خطا و تعریف کاربر تقسیم شود.
- ژنراتورهای هم‌نوا در یک جزیره باشند.
- نامتعادلی بار و تولید کمینه شود.

مرجع [۱۴] از روش مبتنی بر تعیین گراف معادل سیستم قدرت برای تعیین کاتست‌ها استفاده می‌کند. در این روش ابتدا نمایش سیستم به صورت گراف رسم می‌شود. سپس عملیات ساده‌سازی بر گراف اعمال شده و در نهایت با استفاده از روش بخش‌بندی k-way جزیره‌ها تعیین می‌شوند.

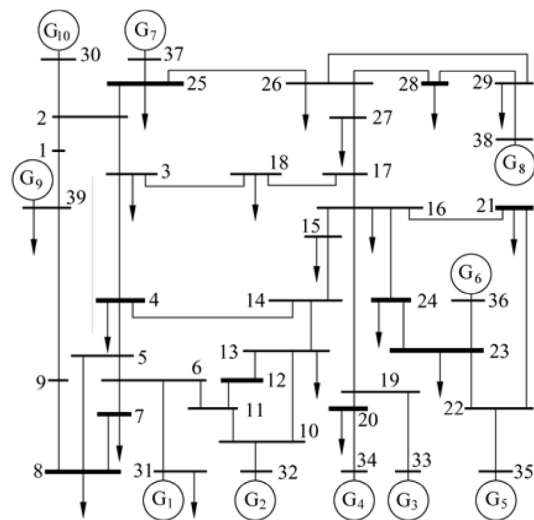
استراتژی بخش‌بندی لاپلاس^۲ به کار رفته در این مرجع، مقدار قدر مطلق توان حقیقی را به عنوان وزن در نظر می‌گیرد و هدف آن یافتن طرح بخش‌بندی با حداقل مجموع قدر مطلق توان حقیقی برای خطوط کاتست در هر جزیره است. ضمناً وقتی که سیستم قدرت به دو بخش مجزا تقسیم می‌شود، توانی که از یک جزیره به جزیره دیگر جاری شده به عنوان نامتعادلی بار- تولید شبکه شناخته می‌شود.

الگوریتم بخش‌بندی به کمک روش لاپلاس را می‌توان به صورت کامل در [۱۴] مشاهده نمود. مرجع [۱۵] نیز نحوه تعیین زاویه ناپایداری را به صورت به هنگام ارائه نموده است.

۷- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش برای نشان‌دادن کارایی روش بیان‌شده برای مقابله با ناپایداری زاویه‌ای و خاموشی سراسری سیستم، الگوریتم‌ها بر روی شبکه استاندارد ۳۹ باسه IEEE (شکل ۲) اعمال شده‌اند.

برای اجرای مراحل شبیه‌سازی باید سناریویی را طراحی نمود که طبق مدل منچستر در [۱۱] منجر به خاموشی سراسری گردیده و از لحاظ زاویه‌ای نیز ناپایدار باشد. بدین منظور ابتدا خط ۹-۳۹ به عنوان حادثه آغازگر دچار خطا می‌شود که این خط ۰٫۲ ثانیه بعد با قطع این خط برطرف می‌گردد. همچنین خط ۷-۸ نیز برای مدل‌سازی خطای پنهان قطع می‌شود. قطع این خطوط منجر به افزایش بار روی خطوط دیگر شده و آنها نیز قطع می‌گردند. اولین خط قطع‌شده، خط ۵-۶ است و پس از آن خط ۴-۱۴ نیز قطع می‌شود. با ادامه این روند، طبق مدل خاموشی منچستر، پخش بار سیستم حتی با وجود حذف بار نیز همگرا نمی‌شود و سیستم دچار فروپاشی می‌گردد. به منظور بررسی پایداری زاویه‌ای سیستم، در مرحله اول و با قطع خطوط ۹-۳۹ و ۷-۸، نرخ تغییرات زاویه و ولتاژ ژنراتورها به عنوان ورودی به شبکه عصبی داده می‌شود. مشاهده می‌گردد که نرون خروجی عدد 5×10^{-4} را نشان می‌دهد که به معنای پایداری سیستم است. در مرحله بعد خط ۵-۶ به دلیل اضافه بار تریپ می‌دهد. این دفعه با دادن ورودی‌ها به شبکه عصبی، ملاحظه می‌شود که عدد ۱ در خروجی قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده ناپایداری زاویه‌ای می‌باشد. شکل‌های ۳ و ۴ ولتاژ و زاویه روتور پس از خطاهای اعمال‌شده را نشان می‌دهند که به خوبی بیانگر ناپایداری سیستم می‌باشند. شایان ذکر است که در برنامه نرم‌افزاری DIGSILENT پس از رسیدن زوایا به 180° زاویه فوراً به 180° بازگشت می‌کند تا زوایا در یک سیکل 360° نوسان کنند، در حالی که عملاً زوایا در حال افزایش هستند.



شکل ۲: شبکه ۳۹ باسه IEEE.

$$F_i = \frac{L_{ii}(t_f)}{L_{ii}(t_s)}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

که در آن $L_{ii}(t_s)$ و $L_{ii}(t_f)$ عناصر قطری ماتریس L در زمان‌های t_s قبل از خطا و t_f بعد از خطا می‌باشند. از معادله بالا می‌توان دریافت که کوچک‌ترین مقدار F_i متناظر با بیشترین تأثیرپذیری ژنراتور i از خطا می‌باشد. ناحیه شامل ژنراتور با کمترین F_i در اثر خطا بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد و به عنوان ناحیه مورد بررسی انتخاب می‌شود.

۳-۵ تقسیم ناحیه خارجی به زون‌های معادل

از روش agglomerative همراه با شاخص ارزیابی میزان مدولاریتودن modularity برای تقسیم ناحیه خارجی به چندین زون معادل استفاده می‌شود با این تضمین که جاذبه داخل یک زون، قوی و بین زون‌ها ضعیف می‌باشد [۱۲]. شاخص ارزیابی به صورت زیر تعریف می‌شود

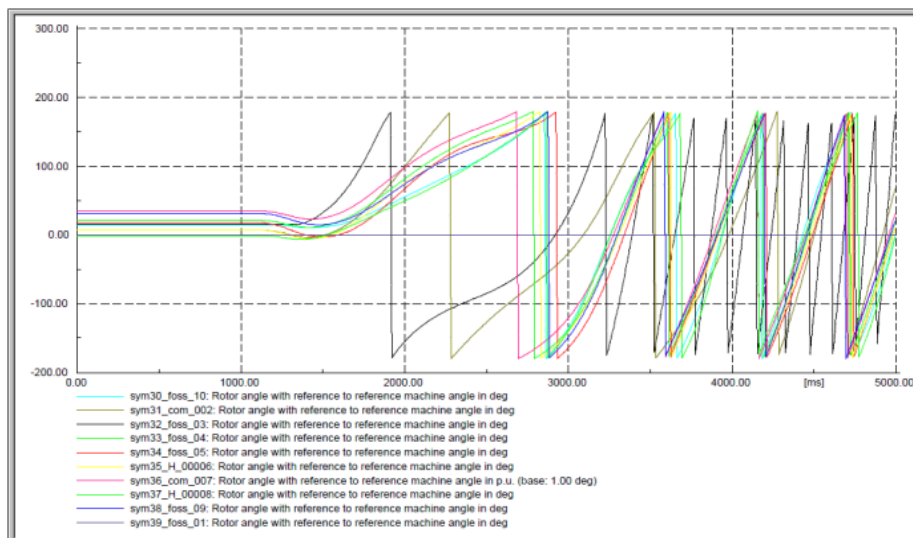
$$Q_{Txy} = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \{ [(-L_{ij}(t_s)) - \frac{L_{ii}(t_s)L_{jj}(t_s)}{2m}] \delta(i, j) \} \quad (6)$$

که در آن $L_{ii} = \sum_{j=1, j \neq i}^n (-L_{ij})$ و $m = \sum_{i=1}^n (L_{ii}/2)$. L_{ij} و L_{jj} عناصر ماتریس لاپلاسین L می‌باشند و m مجموع وزن‌های تمام اضلاع در شبکه می‌باشد. اگر گره‌های i و j در جامعه یکسانی باشند، $\delta(i, j) = 1$ و در غیر این صورت $\delta(i, j) = 0$.

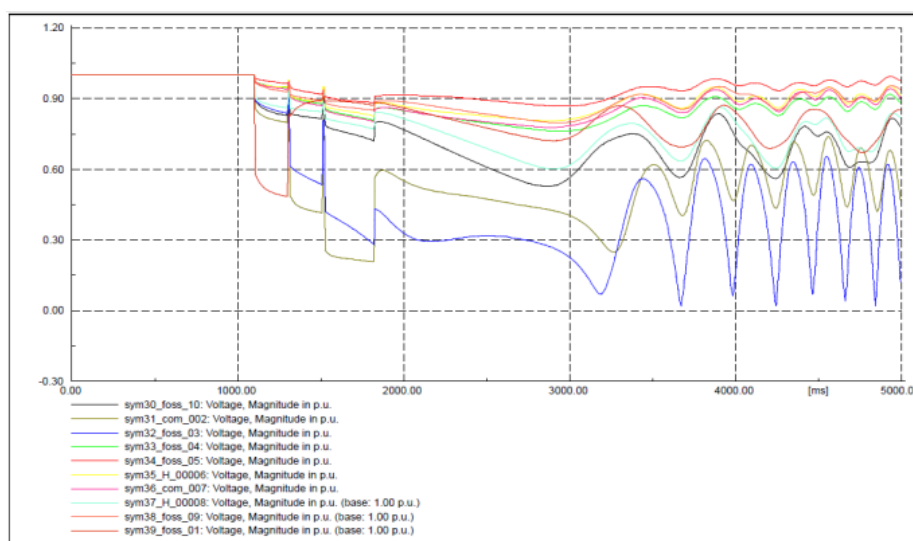
ابتدا هر ژنراتور به عنوان یک زون در ناحیه خارجی منظور شده و برای هر دو زون x و y دلخواه، شاخص Q_{Txy} بعد از ترکیب آنها با هم محاسبه می‌شود. اگر ناحیه به دست آمده با ترکیب زون‌های k و j ماکسیمم شاخص $(\max(Q_T))$ را داشت، این دو ناحیه ترکیب شده و $Q^m = \max(Q_T)$ تنظیم می‌شود که m تعداد تکرارهاست. این فرایند تا زمانی که ناحیه خارجی به یک ناحیه تنها ترکیب شود تکرار می‌گردد. اگر شاخص Q' بعد از t امین تکرار معادل با شاخص modularity ماکسیمم $(\max(Q^m), m = 0, \dots, n_{ex} - 1)$ در این فرایند تکراری باشد، الگو و تعداد نواحی مختلف در تکرار t ، انتخاب ناحیه بهینه می‌باشد.

۶- جزیره‌سازی کنترل‌شده

بر اساس نتایج گروه‌بندی ژنراتورها کاتست‌های^۱ مناسب می‌توانند



شکل ۳: زاویه باس‌های ژنراتوری قبل از جزیره‌سازی.



شکل ۴: ولتاژ باس‌های ژنراتوری قبل از جزیره‌سازی.

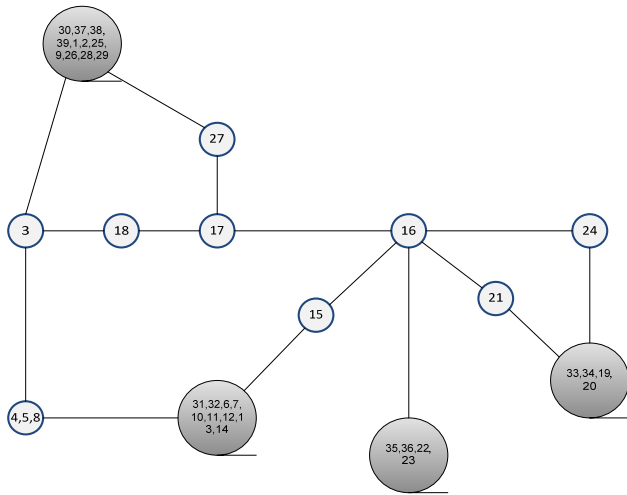
متناظر با این مقدار را استخراج نموده و بر طبق آن می‌توان فهمید که ژنراتورهای G_{31} و G_{32} در یک ناحیه و مابقی ژنراتورها در ناحیه دیگر قرار دارند. برای مشخص شدن نواحی مورد مطالعه و خارجی از روش spectral bisection بهره گرفته می‌شود، بدین منظور F_i متناظر با هر یک از ژنراتورها محاسبه می‌شود. مشاهده می‌گردد که کوچک‌ترین F_i مربوط به ژنراتور G_{32} می‌باشد، بنابراین ژنراتورهای G_{31} و G_{32} در ناحیه مورد مطالعه قرار گرفته و مابقی ژنراتورها در ناحیه خارجی هستند. مقادیر بردار ویژه و F_i متناظر با ژنراتورها در جدول ۲ آمده است. با مشخص شدن نواحی مورد مطالعه و خارجی، نوبت به تعیین ژنراتورهای هم‌نوا در ناحیه خارجی می‌رسد. بدین منظور از روش agglomerative همراه با شاخص modularity استفاده می‌شود. شاخص Q را دو به دو برای ژنراتورهای موجود در ناحیه خارجی محاسبه کرده و در هر مرحله بر اساس حداکثر مقدار آن، ژنراتورهای هم‌نوا تعیین می‌شوند (جدول ۳).

همان‌طور که مشاهده می‌شود ماکسیمم Q برابر با ۰٫۷۲۲۲ است که برای ژنراتورهای G_{33} و G_{34} اتفاق می‌افتد. بنابراین سطر و ستون این دو ژنراتور را ترکیب کرده و در سطر و ستون مربوط به ژنراتور با شماره کمتر یعنی ژنراتور G_{33} قرار داده و مجدداً Q محاسبه می‌گردد. با ادامه این روند، مراحل مختلف محاسبه Q را می‌توان در جدول ۴ مشاهده نمود.

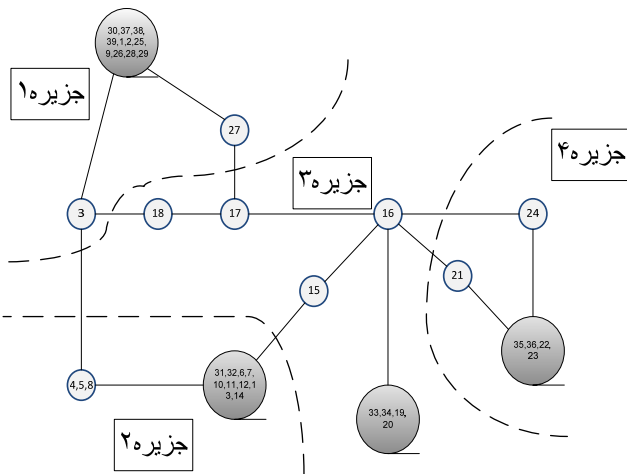
جدول ۲: تقسیم‌بندی نواحی مختلف.

ژنراتور	مؤلفه‌های v_i	F_i	ناحیه
G_{30}	-۰٫۷۷۷	۰٫۵۳۷۳	خارجی
G_{31}	۰٫۹۳۴۸	۰٫۱۷۶۶	مورد مطالعه
G_{32}	۰٫۱۰۰۶	-۰٫۱۶۹۹	مورد مطالعه
G_{33}	-۰٫۱۴۴۷	۰٫۶۴۸۵	خارجی
G_{34}	-۰٫۱۶۷۶	۰٫۶۹۶۲	خارجی
G_{35}	-۰٫۱۳۳۸	۰٫۶۶۳۳	خارجی
G_{36}	-۰٫۱۴۸۸	۰٫۶۸۱۱	خارجی
G_{37}	-۰٫۰۹۸۳	۰٫۶۰۹۶	خارجی
G_{38}	-۰٫۱۴۱۲	۰٫۶۷۱۷	خارجی
G_{39}	-۰٫۰۳۳۲	۰٫۲۴۳	خارجی

از این دو شکل به وضوح می‌توان دریافت که دو ژنراتور G_{31} و G_{32} در اثر خطا هم از لحاظ زاویه و هم ولتاژ، بیشترین تأثیر را می‌پذیرند و شدت ناپایداری به وجود آمده در آنها شدیدتر از سایر ژنراتورهاست. در ادامه بر اساس الگوریتم هم‌نوایی coherency-based، ماتریس لاپلاسی سیستم را تشکیل داده و مقادیر ویژه آن محاسبه می‌شوند. کوچک‌ترین مقدار ویژه برابر با $\lambda_4 = ۰٫۳۸۱$ می‌باشد. حال بردار ویژه



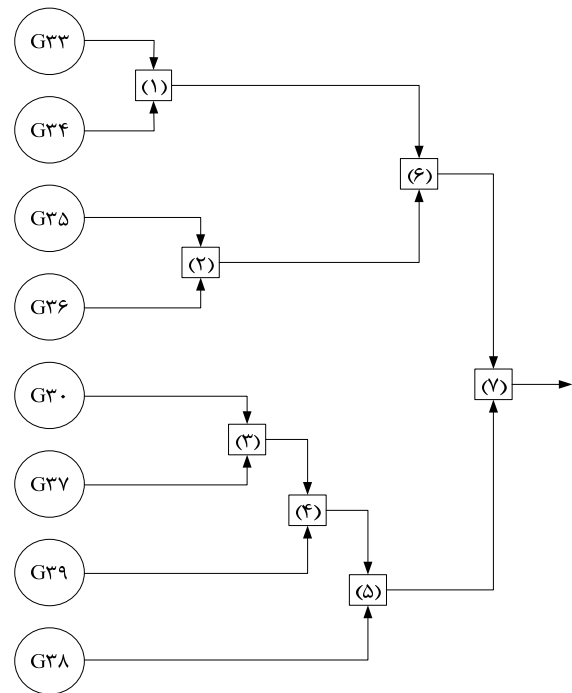
شکل ۶: ساده شده گراف شبکه.



شکل ۷: جزایر تشکیل شده.

مدل خاموشی سراسری استخراج شده و سپس با استفاده از شبکه عصبی، پایداری زاویه‌ای سیستم قدرت مورد ارزیابی قرار گرفت و در صورت ناپایداری، سعی شد تا از طریق جزیره‌سازی سیستم از وقوع خاموشی سراسری جلوگیری شود. برای جزیره‌سازی ابتدا ژنراتورهای هم‌نوا تشخیص داده شدند و سپس با قطع کات‌ست‌های معرفی شده توسط الگوریتم به کار رفته برای جزیره‌سازی، شبکه به چند جزیره تقسیم گردیده است. مشاهده شد که جزایر تشکیل شده از لحاظ پایداری زاویه‌ای و پایداری ولتاژی در شرایط خوبی قرار دارند. برای دستیابی به اهداف ذکر شده در این مقاله، مراحل زیر بر روی شبکه ۳۹ باسه IEEE به عنوان شبکه مثال صورت گرفت:

- ۱) مدل‌سازی خاموشی به روش منجستر از طریق برنامه‌نویسی DPL در نرم‌افزار DIgSILENT بر روی شبکه ۳۹ باسه پیاده‌سازی شده و سناریوهایی که منجر به خاموشی سراسری می‌شوند، استخراج گردیدند.
- ۲) در سناریوی مورد نظر از روی ولتاژ و زاویه روتور ژنراتورها که از طریق PMU ها کسب شده‌اند، نرخ تغییرات ولتاژ و زاویه روتور استخراج گردیده و به عنوان ورودی به شبکه عصبی داده شدند.
- ۳) در صورتی که شبکه عصبی، سیستم را ناپایدار تشخیص دهد الگوریتم شناسایی ژنراتورهای هم‌نوا که با استفاده از برنامه‌نویسی در نرم‌افزار MATLAB/Simulink به اجرا درآمد، ژنراتورهای هم‌نوا را تشخیص می‌دهد. سپس سیستم را به دو ناحیه مورد



شکل ۸: مراحل تعیین ژنراتورهای هم‌نوا.

مراحل تعیین ژنراتورهای هم‌نوا را می‌توان به صورت شکل ۵ نمایش داد. همان طور که مشاهده می‌شود Q_{max} در مرحله ۵ دارای بیشترین مقدار خود می‌باشد و طرح ناحیه‌بندی در این مرحله بهینه است. بنابراین می‌توان ژنراتورهای هم‌نوا را در گروه‌های زیر مشخص نمود:

گروه ۱: G_{33} و G_{34}

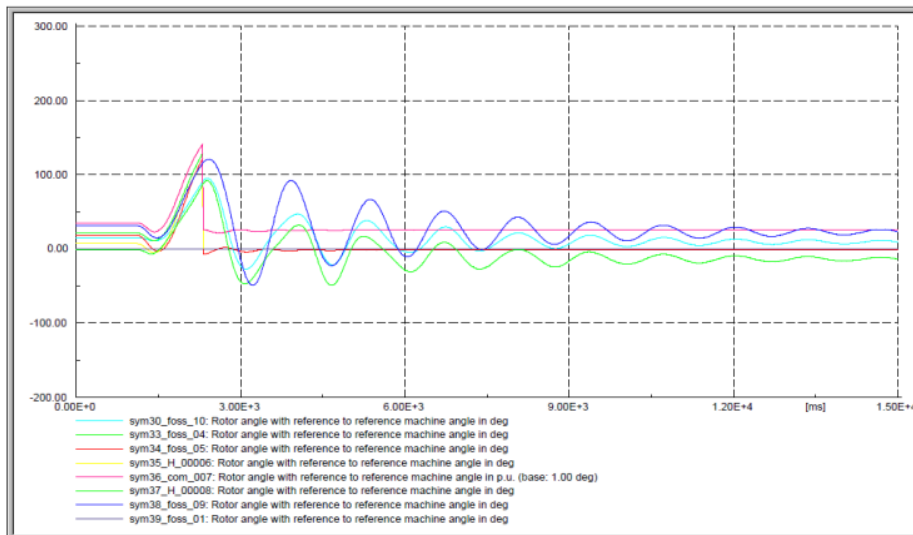
گروه ۲: G_{35} و G_{36}

گروه ۳: G_{30} ، G_{37} ، G_{38} و G_{39}

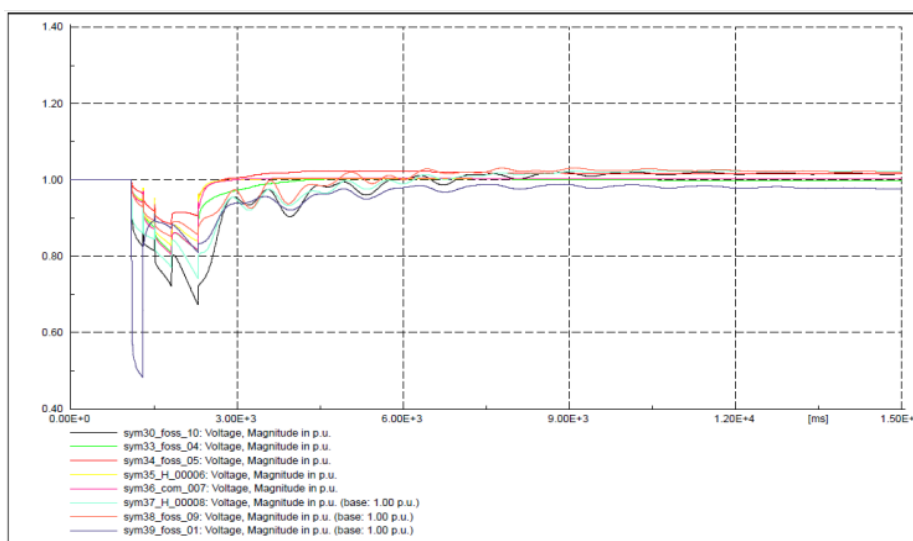
حال که گروه‌های هم‌نوا ژنراتوری مشخص شده‌اند باید با قطع خطوط مناسب بر اساس روش k -way، شبکه را به جزایر جدا از هم تقسیم نمود. برای این کار ابتدا شبکه به صورت یک گراف نمایش داده شده که پس از ساده‌سازی گراف و در نظر گرفتن ژنراتورهای هم‌نوا در یک گروه به شکل ۶ درمی‌آید. در نهایت با اجرای الگوریتم تعیین کات‌ست‌ها، خطوط ۱۷-۲۷، ۳-۱۸، ۳-۴، ۱۴-۱۵، ۱۶-۲۴ و ۱۶-۲۱ به عنوان کات‌ست شناخته شده و جزایر به صورت شکل ۷ تشکیل می‌شوند. حال باید میزان تولید و مصرف را در این جزایر متعادل کرد (نامتعادلی بار و تولید بسیار جزیی می‌باشد) که پس از انجام این کار، هر یک از جزایر به صورت مستقل پایدار خواهند بود. شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهند که جزایر تشکیل شده از لحاظ پایداری نیز در شرایط خوبی به سر می‌برند. شکل‌های ۸ و ۹ زاویه و ولتاژ باس‌های ژنراتوری را در یک بازه ۱۵ ثانیه‌ای نشان می‌دهند که ژنراتورهای G_{31} و G_{32} به دلیل وقوع ناپایداری زاویه‌ای در آنها از مدار خارج شده‌اند. طبق شکل ۸ تا زمان اجرای عملیات جزیره‌سازی، زاویه روتور ژنراتورها در حال افزایش بوده اما در زمان ۲/۳ ثانیه که جزیره‌سازی صورت می‌گیرد این زوایا به صورت نوسانی به حالت پایدار می‌رسند. به خوبی روشن است که عملیات جزیره‌سازی با موفقیت صورت گرفته و منجر به پایداری شبکه شده است.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله الگوریتمی به منظور جلوگیری از خاموشی سراسری سیستم قدرت ناشی از ناپایداری زاویه‌ای مطرح گردید. بدین منظور ابتدا



شکل ۸: زاویه باس‌های ژنراتوری پس از جزیره‌سازی.



شکل ۹: ولتاژ باس‌های ژنراتوری پس از جزیره‌سازی.

جدول ۳: مرحله اول محاسبه Q.

	G۳۳	G۳۴	G۳۵	G۳۶	G۳۷	G۳۸	G۳۹
G۳۰	-۰٫۰۱۴۱	-۰٫۰۱۲۹	-۰٫۰۱۱۷	-۰٫۰۱۲۰	۰٫۰۳۶۱	۰٫۰۰۴۹	۰٫۰۲۴۴
G۳۳		۰٫۰۷۲۲	۰٫۰۰۲۲	-۰٫۰۰۵۸	-۰٫۰۱۴۳	-۰٫۰۰۴۲	-۰٫۰۰۶۶
G۳۴			-۰٫۰۰۸۷	-۰٫۰۱۰۶	-۰٫۰۱۲۶	-۰٫۰۰۶۰	-۰٫۰۰۵۰
G۳۵				۰٫۰۶۴۴	-۰٫۰۱۲۱	-۰٫۰۰۲۸	-۰٫۰۰۴۷
G۳۶					-۰٫۰۱۲۰	-۰٫۰۰۴۶	-۰٫۰۰۶۷
G۳۷						۰٫۰۱۶۲	۰٫۰۱۳۱
G۳۸							۰٫۰۰۰۳

مطالعه و خارجی تقسیم می‌کند و ژنراتورهای موجود در ناحیه خارجی را نیز در چند دسته قرار می‌دهد. (۴) در مرحله بعد سیستم قدرت به صورت گراف به نمایش درآمده و با توجه به ژنراتورهای هم‌نوا، ساده شده و توسط الگوریتم k-way مرزهای هر جزیره با جزایر دیگر مشخص می‌شوند و با قطع کاتست‌های تعیین‌شده، سیستم قدرت به چند جزیره پایدار تقسیم می‌گردد.

جدول ۴: مراحل مختلف محاسبه Q.

مرحله	ژنراتورهای هم‌نوا	Q _{max}
۱	G۳۳ و G۳۴	۰٫۰۷۲۲
۲	G۳۶ و G۳۵	۰٫۱۳۶۶
۳	G۳۷ و G۳۰	۰٫۱۷۲۷
۴	G۳۹ و G۳۷، G۳۰	۰٫۲۱۰۲
۵	G۳۹ و G۳۸، G۳۷، G۳۰	۰٫۲۳۱۶
۶	G۳۶ و G۳۵، G۳۴، G۳۳	۰٫۲۰۸۷
۷	G۳۹ و G۳۸، G۳۷، G۳۶، G۳۵، G۳۴، G۳۳، G۳۰	۰٫۱۸۵۸

International J. of Electrical Power and Energy Systems, vol. 28, no. 9, pp. 627-633, Nov. 2006.

- [12] S. Mei, X. Zhang, and M. Cao, *Power Grid Complexity*, Tsinghua University Press, 2011.
- [13] A. Bahbah and A. A. Girgis, "New method for generators' angles and angular velocities prediction for transient stability assessment of multimachine power systems using recurrent artificial neural network," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 1015-1022, May 2004.
- [14] S. Honglei, W. Junyong, and W. Linfeng, "Controlled islanding based on slow-coherency and KWP theory," in *Proc. IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia, ISGT Asia*, 6 pp., May 2012.
- [15] D. Hu and M. Venkatasubramanian, "New wide area algorithms for detecting angle of instability using synchrophasors," in *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 8 pp., Spokane, WA, USA, 24-28 Jun. 2007.

سعید کیارستمی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی در سال ۱۳۸۹ در رشته مهندسی برق در دانشگاه بوعلی سینا و در مقطع کارشناسی ارشد در سال ۱۳۹۲ در رشته مهندسی برق گرایش حفاظت شبکه در دانشگاه شهید بهشتی به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: حفاظت سیستم‌های قدرت، قابلیت اطمینان و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت.

مجتبی خدرزاده در سال ۱۳۵۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی شریف و در سال ۱۳۶۹ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را در گرایش قدرت از دانشکده فنی دانشگاه تهران دریافت نمود. از سال ۱۳۶۲ الی ۱۳۷۱ نام‌برده به عنوان کارشناس ارشد در شرکت توانیر به کار مشغول بود و پس از آن به دوره دکتری در مهندسی برق در دانشگاه شریف وارد شد و در سال ۱۳۷۵ موفق به اخذ درجه دکتری در مهندسی برق از دانشگاه مذکور گردید. دکتر خدرزاده از سال ۱۳۷۵ در دانشکده مهندسی برق دانشگاه شهید بهشتی در تهران مشغول به فعالیت شد و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده با درجه دانشیاری می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند حفاظت سیستم‌های قدرت، شبکه‌های هوشمند، ایده‌های نو در حفاظت سیستم‌های انتقال جبران شده، سیستم‌های توزیع و ریزشبکه‌ها می‌باشد.

مراجع

- [1] R. Baldick, *et al.*, "Initial review of methods for cascading failure analysis in electric power transmission systems," in *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 8 pp, 20-24 Jul. 2008.
- [2] H. Song and M. Kezunovic, "A new analysis method for early detection and prevention of cascading events," *Electric Power System Research*, vol. 77, no. 8, pp. 1132-1142, Jun. 2007.
- [3] N. Bhatt, *et al.*, "Assessing vulnerability to cascading outages," in *Proc. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE'09*, 9 pp., 15-18 Mar. 2009.
- [4] Z. Guohua, *et al.*, "Vulnerability Assessment of Bulk Power Grid Based on Complex Network Theory," in *Proc. Third Int. Conf. on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, DRPT'08*, pp. 1554-1558. Nanjing China, 6-9 Apr. 2008.
- [5] F. Fonteneau-Belmudes, D. Ernst, and L. Wehenkel, "Cross-entropy based rare-event simulation for the identification of dangerous events in power systems," in *Proc. of the 10th Int. Conf. on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAFS'08*, 7 pp., Rincon, Puerto Rico, 25-29 May 2008.
- [6] F. Fonteneau-Belmudes, D. Ernst, and L. Wehenkel, "A rare event approach to build security analysis tools when N-k ($k > 1$) analyses are needed (as they are in large scale power systems)," in *Proc. of the 2009 IEEE Bucharest Power Tech Conf.*, 8 pp., Bucharest, Romania, 28 Jun.-2 Jul. 2009.
- [7] G. C. Ejebe and B. F. Wollenberg, "Automatic contingency selection," *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.* vol. 98, no. 1, pp. 97-109, Jan/Feb. 1979.
- [8] J. Barkans and D. Zalostiba, *Protection against Blackouts and Self-Restoration of Power Systems*, RTU Publishing House, Riga, 2009.
- [9] M. Begovic, *et al.*, "Wide-area protection and emergency control," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 5, pp. 876-891, May 2005.
- [10] F. Hashiesh, H. E. Mostafa, A. R. Khatib, I. Helal, and M. M. Mansour, "An intelligent wide area synchrophasor based system for predicting and mitigating transient instabilities," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 645-652, Jun. 2012.
- [11] D. P. Nedic, I. Dobson, D. S. Kirschen, B. A. Carreras, and V. E. Lynch, "Criticality in a cascading failure blackout model,"