یک مدل ترکیبی برای پایداری گذرا مقید به پخش بار بهینه بر اساس انحراف زاویه روتور

بابک بهشتی مآل[1]، دانشجوی دکتری، غضنفر شاهقلیان[2]، دانشیار

۱- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند- واحد نجف‌آباد- دانشگاه آزاد اسلامی- نجف‌آباد- ایران
beheshti2009@gmail.com
۲- دانشکده مهندسی برق- واحد نجف‌آباد- دانشگاه آزاد اسلامی- نجف‌آباد- ایران
shahgholian@iaun.ac.ir

چکیده: پخش بار بهینه با قید پایداری گذرا یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی با معادله‌های جبری و دیفرانسیلی است. در این مقاله با بهره‌گیری از الگوریتم رقابت استعماری به عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی و شبکه عصبی مصنوعی به منظور توسعه قوی و موثر طرح ترکیبی برای حل مسأله پخش بار بهینه با قید پایداری گذرا آمده است. در اولین مرحله یک شبکه عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی حاشیه پایداری گذرای زاویه روتور و سپس به عنوان تخمین پایداری گذرای زاویه روتور مقید به پخش بار بهینه در نظر گرفته شده‌است. برای حل مسأله پخش بار بهینه با قید پایداری گذرا از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری استفاده شده‌است. عملکرد روش پیشنهادی بر روی سیستم سه ماشینه-نه باسه کنسول هماهنگی سیستم غربی[1] (WSCC) و IEEE سی باسه تحت شرایط بارگذاری مختلف و حالت خطا در نظر گرفته شده و در انتها نتایج با شبکه ۳۹ باسه نیوانگلند[2] انجام شده‌است.

واژه‌های کلیدی: پخش بار بهینه، رقابت استعماری، شبکه عصبی مصنوعی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۴/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۱۰/۲۱

نام نویسنده‌ی مسئول: غضنفر شاهقلیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: اصفهان- نجف‌آباد- دانشگاه آزاد اسلامی- دانشکده مهندسی برق

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.8.4]

۱- مقدمه

امروزه سیستم‌های قدرت مدرن نزدیک به محدوده‌ی پایداری به واسطه افزایش سریع تقاضای الکتریکی و محیط رقابتی حاصل از سیستم قدرت تجدید ساختار یافته کار می‌کنند. این مسأله احتمال پدیده ناپایداری مانند ناپایداری گذرای زاویه روتور را افزایش می‌دهد. یک اغتشاش شدید می‌تواند نوسانات شدید را در زاویه روتور ژنراتور سنکرون ایجاد کند. هنگامی که یک ژنراتور سنکرونیزم خود را از دست می‌دهد رله‌ها تریپ می‌خورد و حوادث آبشاری اتفاق می‌افتد. بنابراین پیش‌بینی ناپایداری گذرا در یک سیستم قدرت می‌تواند بسیار مفید برای جلوگیری از خاموشی‌های گسترده باشد. بارگذاری اولیه ژنراتورها (قبل از اغتشاش شدید) به طور قابل توجهی حاشیه پایداری گذرا را تحت تاثیر قرار می‌دهد. خروجی‌های توان اکتیو ژنراتورها توسط مطالعه پخش بار اقتصادی برنامه‌ریزی شده انجام می‌شود. در واقع پخش بار اقتصادی به عنوان مسأله پخش بار بهینه با هدف حداقل کردن هزینه تولید مدل شده‌است. فرمول‌بندی پخش بار بهینه (OPF)[۳] با در نظر گرفتن قید پایداری گذر پخش بار بهینه با قید پایداری گذرا (TSCOPF)[۴] نامیده می‌شود. مسأله TSCOPF یک مسأله برنامه‌ریزی شده غیرخطی با معادلات دیفرانسیلی جبری است [۱،۲]. هدف از حل مسأله پخش بار بهینه، بهینه کردن یک تابع هدف انتخاب شده از قبیل هزینه تولید از طریق تنظیم متغیرهای سیستم قدرت هنگامی که همزمان قیود مساوی و نامساوی را برآورده سازد، می‌باشد. مشکل کنترل متغیرها شامل توان اکتیو ژنراتورها، ولتاژ باس ژنراتور و نسبت تپ ترانسفورماتور است. مسأله پخش بار بهینه به صورت یک تابع هدف درجه دوم و قیود خطی بهره‌برداری نظیر تعادل توان و امنیت سیستم مدل می‌شود. در مدل کلاسیک سیستم قدرت در مطالعات پایداری، ژنراتور با یک EMF ثابت پشت راکتانس گذرای غیراشباع نمایش داده می‌شود. برای این کار یک تابع هدف $f(x,u)$ که از کل هزینه تولید به دست می‌آید، مینیمم می‌گردد به صورتی‌که قیود مساوی $g(x,u)=0$ از معادله پخش بار و قیود نامساوی $h(x,u)\geq 0$ از قیود امنیت دینامیکی و استاتیکی به دست می‌آید. بردارهای u و x که متغیرهای مسأله بهینه سازی هستند به ترتیب بردار کنترل و متغیر حالت نامیده می‌شوند.

یکی از روش‌های بررسی پایداری گذرا استفاده از شاخص سطوح برابر است. همچنین مسأله با استفاده از روش تک ماشین معادل[۵] (SIME) برای تحلیل پایداری گذرای سیستم قدرت مورد استفاده قرار گرفته است که در آن سیستم چند ماشینه اصلی را با استفاده از مفهوم تک ماشین معادل (SIME) به یک تک ماشین متصل به شین بی‌نهایت[۶] (OMIB) معادل کاهش داده می‌شود [۳،۴]. برای تعیین حاشیه پایداری گذرا معادلات نوسان هر ژنراتور در فرمول‌بندی OPF ضروری است. در مرجع [۵] مدل پایداری گذرای سیستم قدرت را به صورت یک مجموعه جبری از معادلات در حوزه زمان تبدیل کرده است. برای بررسی حاشیه پایداری و زمان بحرانی رفع خطا حل معادلات غیر خطی سیستم با استفاده از یکی از روش‌های رانگ کوتا و اویلر ضروری است. در مرجع [۶] تشخیص پایداری گذرا صورت گرفته و یک محدوده برای تولید توان اکتیو ماشین‌های بحرانی در مسأله OPF استفاده شده است. از مزیت‌های این روش سرعت بالا در دستیابی به پاسخ است. البته اشکال اصلی در عدم تضمین دستیابی به یک حل بهینه است.

دو جنبه متفاوت در بررسی مدل‌های پخش بار بهینه با در نظر گرفتن قید پایداری گذرا که در مقالات متفاوت پیشنهاد می‌شوند به صورت چگونگی اعمال قید پایداری گذرا در مسأله OPF و چگونگی تشخیص پایداری گذرا است [۷،۸]. یک روشی که برای تعیین انرژی بحرانی سیستم ارائه شده‌است، در آن از سطح انرژی نزدیکترین نقطه تعادل ناپایدار نسبت به نقطه تعادل پایدار سیستم بعد از خطا استفاده نموده است. در سال ۱۹۷۸ کاکیموتو به کمک روش سطح مرزی انرژی پتانسیل[۷] (PEBS) با تقریب مرز پایداری سیستم نتایج بسیارخوبی را ارائه داد [۹،۱۰]. سطح مرزی انرژی پتانسیل در یک مسیر اغتشاش فرضی، یک تقریب محلی از مرز پایداری است. تئوری این روش در مرجع [۱۰] آمده است. نقطه تعادل کنترل‌کننده، نقطه تعادل ناپایداری است که در مسیر حرکت سیستم تحت خطا قرار دارد. تعیین نقطه تعادل کنترل‌کننده بسیار مشکل است و روش‌های متنوعی جهت محاسبه آن ارائه شده‌اند که از مهمترین آنها روش مد اغتشاش و روش کنترل مرز ناپایداری (BCU)[۸] را می‌توان نام برد [۱۰،۱۱]. در روش BCU از مرز پایداری یک سیستم کاهش یافته که تنها در زیرفضای زاویه تعریف می‌گردد به عنوان تقریبی محلی از مرز پایداری سیستم اصلی استفاده می‌شود به طوریکه تقریب مرز پایداری سیستم تعیین شده و سپس با حل یک مجموعه معادله جبری غیرخطی به روش نیوتن ـ رافسون بهبود یافته، نقطه تعادل ناپایدار کنترل‌کننده، محاسبه می‌گردد. بنابراین در هر تکرار مسأله TSCOPF علاوه بر معادلات پخش بار حالت پایدار، به حل معادلات دیفرانسیل غیرخطی برای هر ژنراتور نیاز است. به عبارت دیگر راه حل مسأله TSCOPF به عنوان مجموعه‌ای از مشتق معادلات جبری با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی تحلیلی در دسترس، دشوار و وقت‌گیر است. یک روش شناخته شده برای مسأله TSC-OPF تبدیل معادلات دیفرانسیل به شکل جبری خود است. یکی دیگر از روش‌های پیشنهادی تبدیل ابعاد بی‌نهایت مسأله TSCOPF به مسأله برنامه‌ریزی محدود قابل حل بر اساس تکنیک‌های توابع انتقال است. بیشتر روش‌های پیشنهادی از حداکثر انحراف زاویه روتور به عنوان شاخص پایداری گذرا[۹] (TSI) استفاده کرده‌اند. برخی دیگر توابع انرژی گذرا توسعه یافته است که توسط تعیین انرژی جنبشی و پتانسیل یک سیستم قدرت، به عنوان یک شاخص کمی از حاشیه پایداری‌گذرا استفاده می‌شود. روش تابع انرژی گذرا مبتنی بر روش لیاپانوف در تحلیل سیستم‌های غیرخطی است. از روش تابع انرژی گذرا به عنوان ابزاری برای ارزیابی امنیت دینامیکی استفاده می‌کنند. در بررسی پاسخ

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.8.4]

سیستم در مقابل تغییرات و اغتشاشات، فاصله زمانی بین لحظه وقوع خطا و شرایط ماندگار در مطالعات سیستم‌های قدرت دارای اهمیت است. ارزیابی پایداری گذرا در این روش فقط برای آخرین گذرا انجام می‌گیرد. بنابراین زمانی که چندین کلیدزنی انجام شود ارزیابی پایداری به روش تابع انرژی گذرا فقط می‌تواند برای آخرین کلیدزنی انجام گیرد. زمان بحرانی رفع خطا[۱۰](CCT) به عنوان شاخص پایداری گذرا به کار می‌رود. این شاخص بزرگترین زمان ممکن، برای یک سیستم قدرت است که می‌تواند در شرایط خطا بدون از دست دادن پایداری باقی بماند. این شاخص باید با در نظر گرفتن تمام احتمالات معتبر تعیین شود. برای غلبه بر معایب تکنیک‌های بهینه‌سازی تحلیلی، تکنیک‌های بهینه‌سازی اکتشافی مدرن مانند الگوریتم تکاملی برای حل مسأله TSCOPF استفاده شده‌است [۱۲،۱۳]. ارزیابی پایداری با استفاده از حوزه زمان برخط برای نتایج اثر بخش شکست می‌خورد. بنابراین برای توسعه جایگزین برآوردگرهای پایداری گذرا، ارزیابی پایداری می‌تواند با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی انجام شود. در این مقاله، یک پرسپترون چند لایه جهت تخمین و برآورد زمان بحرانی رفع خطای سیستم قدرت استفاده شده‌است. به عبارت دیگر به جای محاسبه مستقیم از حاشیه پایداری (به عنوان مثال پایداری حاشیه گذرا) یک تخمین‌گر پرسپترون چند لایه (MLP)[۱۱] استفاده می‌شود. با استفاده لیستی از سناریوهای خطاها و سپس در فرمول OPF به عنوان تخمین‌گر TSI قرار داده می‌شود. با توجه به معادلات دیفرانسیل، پیشنهاد حل پخش بار بهینه با قید پایداری گذرا با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ریاضی امکان پذیر نیست. بنابراین یک روش استفاده از الگوریتم رقابت استعماری برای حل TSCOPF بر پایه شبکه عصبی بیان شده‌است. در این مقاله یک روش جدید جهت حل مسأله پخش بار بهینه با در نظر گرفتن قید پایداری گذرا ارائه می‌شود و از شبکه عصبی برای تخمین زمان بحرانی رفع خطا استفاده شده‌است. در قسمت دوم تابع هزینه تعریف شده و قیود مسئله پایداری گذرا بیان شده‌است. در قسمت سوم مدل سیستم قدرت براساس معادلات جبری ماشین سنکرون مرتبه چهار آمده‌است. در قسمت چهارم مروری بر الگوریتم رقابت استعماری همراه با فلوچارت آن و در قسمت پنجم طرح شبکه عصبی مصنوعی پیشرو سه لایه آمده است. در قسمت‌های ششم و هفتم به ترتیب نتایج شبیه‌سازی در سیستم قدرت در حین اختلال و پس از اختلال برای دو سیستم قدرت نه باسه و سی باسه آمده است. در انتها نتیجه‌گیری مقاله و بیان مزایای روش استعماری برای حل مسئله در قسمت هشتم آمده است.

۲- تابع هزینه و قیود مساله پایداری گذرا

به منظور حل مسأله TSCOPF دو نکته اصلی روش مدل کردن پایداری گذرا در مسأله OPF و روش بهینه‌سازی برای حل مسأله OPF باید در نظر گرفته شود. تابع هزینه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_{cost} = \sum_{i=1}^{N_g} (a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2) \quad (۱)$$

که در آن F_{cost} کل هزینه تولید برحسب دلار بر ساعت، P_{gi} خروجی توان اکتیو ژنراتور برحسب مگاوات، N_g تعداد کل ژنراتورها می‌باشند. همچنین a_i، b_i و c_i ضرایب تابع هزینه می‌باشند. برای قیود مساوی بالانس توان براساس روش نیوتن رافسون در نظر گرفته می‌شود. N تعداد کل باس‌های شبکه و P_{gi} و Q_{gi} به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو iامین ژنراتور است. P_{di} و Q_{di} به ترتیب کل توان‌های اکتیو و راکتیو بارهای iامین باس است. G_{ij} کندوکتانس و B_{ij} سوسپتانس انتقالی بین باس‌های i و j ماتریس ادمیتانس (Y_{BUS}) است. قیود مساوی عبارتند از:

$$P_{gi} - P_{di} - V_i \sum_{j=1}^{N} V_j (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}) = 0 \quad (۲)$$

$$Q_{gi} - Q_{di} - V_i \sum_{j=1}^{N} V_j (G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}) = 0 \quad (۳)$$

برای بهره‌برداری پایدار، توان اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتورها توسط حدود بالا و پایین آن محدود می‌شود.

$$P_{gi}^{min} \le P_{gi} \le P_{gi}^{max} \quad (۴)$$

$$Q_{gi}^{min} \le Q_{gi} \le Q_{gi}^{max} \quad (۵)$$

همچنین اندازه ولتاژ شین (V_i) و بار خطوط انتقالی (S_{Li}) باید در محدوده مجاز باشد.

$$V_i^{min} \le V_i \le V_i^{max} \quad (۶)$$

$$S_{Li} \le S_{Li}^{max} \quad (۷)$$

برای بهره‌برداری سیستم و به‌واسطه زنجیره‌ای از اغتشاشات که می‌تواند سیستم را ناپایدار کند به دنبال شناسایی تغییراتی هستیم که اگر این تغییرات در شرایط بهره‌برداری به سیستم اعمال شود از لحاظ پایداری، پایدار بماند. یکی از معیارهای این تغییرات، میزان انحراف زاویه ژنراتورها و زمان رفع خطا است.

۳- مدل‌سازی سیستم قدرت در مطالعات پایداری گذرا

مدل مرتبه چهار برای توصیف رفتار دینامیکی هر ماشین سنکرون در سیستم قدرت با معادلات زیر نظر گرفته می‌شود [۶]:

$$E'_d + JE'_q = V_g \quad (۸)$$

$$I_d + JI_q = I_g \quad (۹)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_S \quad (۱۰)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_S}{2H}(T_m + T_e - D(\omega - \omega_S)) \quad (۱۱)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.8.4]

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{1}{T'_{qo}}(-E'_d - (x_q - x'_q) I_q) \quad (۱۲)$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}}(E_{fd} - E'_q - (x_d - x'_d) I_d) \quad (۱۳)$$

$$T_e = E'_d I_d + E'_q I_q - (x'_d - x'_q) I_q I_d \quad (۱۴)$$

در مدل‌سازی اجزای سیستم و تاثیرگذار در حرکت روتور ژنراتور و گشتاورهای الکتریکی ژنراتورها در نظر گرفته شده‌است. برای قیود نامساوی تابع جریمه همه حدود بهره‌برداری در معادلات امنیت و محدودیت زاویه روتور باید صدق کنند:

$$F_i = F_{\cos t} + k_p[h(P_{slack})] + k_Q \sum_{i=1}^{N_g} h\ (Q_{gi}) + k_V \sum_{i=1}^{N_L} h\ (V_{Li}) + k_T \sum_{i=1}^{N_L} h\ (\delta_i^{relative}) + k_S \sum_{i=1}^{NLine} h\ (S_i) \quad (۱۵)$$

که در آن $h(P_{slack})$ و $h(Q_{gi})$ و $h(V_{Li})$ و $h(\delta_i^{relative})$ و $h(S_i)$ به ترتیب توابع جریمه توان اکتیو خروجی، باس اسلک، توان راکتیو خروجی ژنراتور، اندازه ولتاژ باس بار، زاویه روتور نسبی و بارگذاری خطوط انتقال است. N_L تعداد کل باس‌بار است. از روی داده‌های پخش بار در شبکه پیش از اغتشاش، اطلاعات شبکه استخراج شده و ماتریس ادمیتانس شبکه تشکیل می‌شود. با فرض اینکه بار با مدل امپدانس ثابت نشان داده شود، قطع بار با یک تغییر ناگهانی در امپدانس باس‌ها مدل می‌گردد که این مسأله باعث تغییر در درایه‌های ماتریس امپدانس می‌شود.

۴- الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری (ICA) یک الگوریتم تکاملی جدید برای پیدا کردن راه حل بهینه از یک مسأله بهینه است. این روش دارای شباهت‌های بسیاری به الگوریتم ژنتیک است. الگوریتم ICA با جمعیت اولیه شروع می‌شود. در یک مسأله‌ی بهینه‌سازی Nvar بعدی، یک کشور، یک آرایه‌ی $1*N_{VAR}$ است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$country = [P_1, P_2, P_3, \ldots P_{NVAR}] \quad (۱۶)$$

برای شروع روش، تعداد $N_{COUNTRY}$ کشور اولیه ایجاد می‌شود. $N_{imp.}$ تا از بهترین اعضای این جمعیت (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه) را به عنوان امپریالیست انتخاب می‌شوند. باقیمانده N_{col} تا از کشورها، مستعمراتی را تشکیل می‌دهند که هر کدام به یک امپراطوری تعلق دارند. برای تقسیم مستعمرات اولیه بین امپریالیست‌ها، به هر امپریالیست، تعدادی از مستعمرات را که این تعداد متناسب با قدرت آن است، داده می‌شود. برای انجام آن با داشتن هزینه همه امپریالیست‌ها، هزینه نرمالیزه آنها به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$C_n = \max\{C_i\} - c_n \quad (۱۷)$$

که در آن c_n هزینه امپریالست nام، $\max\{C_i\}$ بیشترین هزینه میان امپریالیست‌ها و C_n هزینه نرمالیزه شده این امپریالیست است. هر امپریالیستی که دارای هزینه بیشتری Cn است (امپریالیست ضعیفتری باشد)، دارای هزینه نرمالیزه کمتری خواهد بود. با داشتن هزینه نرمالیزه، قدرت نسبی نرمالیزه‌ی هر امپریالیست، به صورت زیر محاسبه شده و بر مبنای آن کشورهای مستعمره، بین امپریالسیتها تقسیم می‌شوند:

$$P_n = \left| \frac{C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} C_i} \right| \quad (۱۸)$$

از طرف دیگر قدرت نرمالیزه شده یک امپریالیست، نسبت مستعمراتی است که توسط آن امپریالیست اداره می‌شود. بنابراین تعداد اولیه مستعمرات یک امپریالیست برابر خواهد بود با:

$$N.C_n = round\{P_n . (N_{col})\} \quad (۱۹)$$

که در آن N.Cn تعداد اولیه مستعمرات یک امپراطوری و Ncol نیز تعداد کل کشورهای مستعمره موجود در جمعیت کشورهای اولیه است. Round نیز تابعی است که نزدیکترین عدد صحیح به یک عدد اعشاری را می‌دهد. با در نظر گرفتن N.Cn برای هر امپراطوری، به این تعداد از کشورهای مستعمره اولیه را به صورت تصادفی انتخاب کرده و به امپریالیست nام می‌دهیم. با داشتن حالت اولیه تمام امپراطوری‌ها، الگوریتم رقابت استعماری شروع می‌شود. روند تکامل در یک حلقه قرار دارد که تا برآورده شدن یک شرط توقف، ادامه می‌یابد. قدرت یک امپراطوری برابر است با قدرت کشور استعمارگر به اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن. بنابراین هزینه کل یک امپراطوری برابر است با:

$$T.C_n = Cost(imperialist_n) + \zeta mean\{Cost(colonies\ of\ empire_n)\} \quad (۲۰)$$

که در آن $T.C_n$ هزینه کل امپراطوری n ام و ζ عددی مثبت است که معمولاً بین صفر و یک و نزدیک به صفر در نظر گرفته می‌شود. کوچک در نظر گرفتن ζ، باعث می‌شود که هزینه کل یک امپراطوری، تقریباً برابر با هزینه حکومت مرکزی آن (کشور امپریالیست)، شود و افزایش ζ نیز باعث افزایش تاثیر میزان هزینه مستعمرات یک امپراطوری در تعیین هزینه کل آن می‌شود [۱۴]. شکل (۱) فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری را نشان می‌دهد.

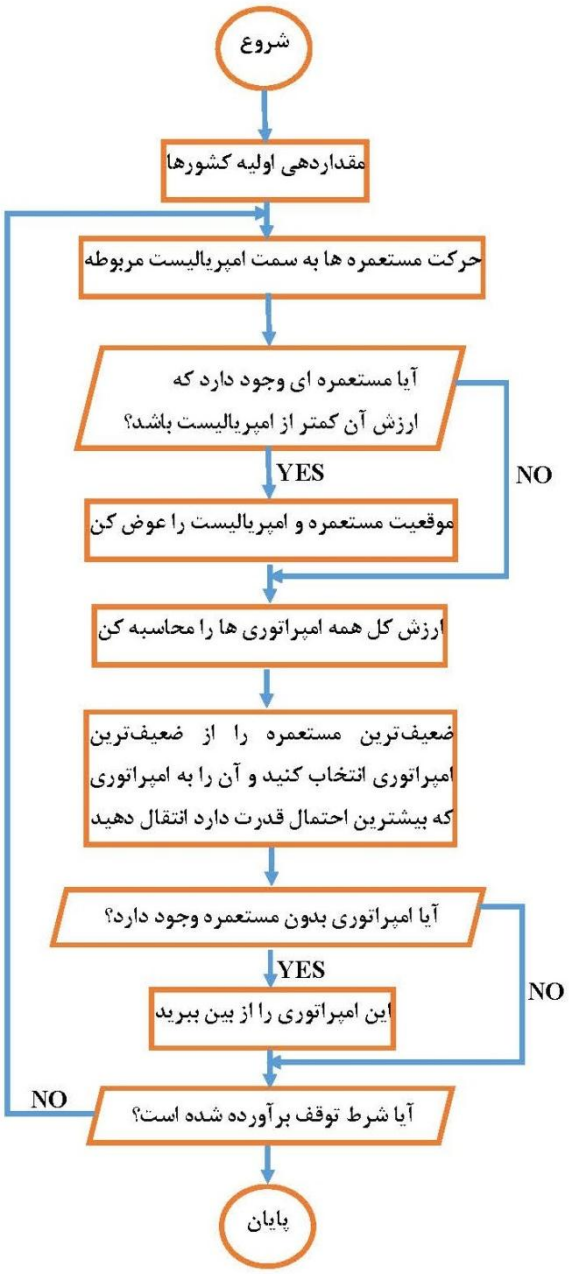
۵- شبکه عصبی

یک شبکه عصبی رو به جلو چند لایه برای تخمین زمان بحرانی رفع خطا در مسأله پخش بار بهینه با قید پایداری گذرا استفاده شده‌است. شبکه رو به جلو چندلایه توانایی برای تقریب توابع صاف با استفاده گره کافی و لایه‌ها را دارد. یک شبکه عصبی، متشکل از چندین لایه، گره‌ها و اتصالات بین آنها است. یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک یا چندلایه مخفی است. مدل شبکه عصبی در شکل (۲) دیده می‌شود.

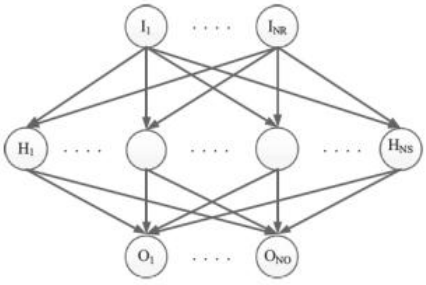
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.8.4]

شبکه شامل سلول‌های عصبی NR در لایه ورودی، NO نرون در لایه خروجی، و سلول‌های عصبی NS در یک یا چند لایه پنهان است.



شکل (۱): فلوچارت آلگوریتم رقابت استعماری



شکل (۲): طرح شبکه مصنوعی سه لایه پیشرو

تمام گره‌ها به جز گره در لایه ورودی توابع انتقال که تبدیل مقادیر ورودی از گره به یک خروجی است. تمام عملیات ریاضی در لایه‌های پنهان و خروجی انجام شده‌است. خروجی هر گره با استفاده از تابع انتقال به دست آمده عبارت است از:

$$O_i = f_i[\sum_{j=1}^{N} \omega_{ij} I_j + \theta_i] \quad (۲۱)$$

که در آن f_i، θ_i و O_i اشاره به خروجی، انحراف و تابع انتقال گره دارد. اتصال وزنی بین گره‌های i و j با ضریب ω_{ij} در نظر گرفته می‌شود و N تعداد ورودی‌های اتصال یافته به iامین گره است. به طور کلی تابع انتقال گره یک تابع غیرخطی مانند تابع Heaviside یا تابع سیگموئید است. یک تابع انتقال سیگموئید برای لایه مخفی خطی با تابع انتقال خطی در لایه خروجی استفاده می‌شود. این طرح به توانایی ارزیابی خطی و رابطه‌ی غیرخطی بین ورودی و خروجی مدل شبکه عصبی مصنوعی اجازه می‌دهد. دو لایه مورد استفاده شبکه پس انتشار (BP) دارای توانایی تخمین هر تابع ناشناخته با تعداد متناهی از نقاط ناپیوستگی است. پس از آموزش شبکه عصبی دقت آن با استفاده از میانگین مربعات خطا ارزیابی می‌شود [۱۳].

۶- نتایج شبیه‌سازی در سیستم قدرت در اثر اختلال

در این قسمت روش پیشنهادی بر روی شبکه سه ماشینه نه باسه کنسول هماهنگی سیستم غربی بررسی شده‌است. شکل (۳) دیاگرام شبیه‌سازی شبکه ۹ باسه WSCC را نشان می‌دهد. اطلاعات شبکه تست در مرجع [۱۵] آمده است. ژنراتور G1 به عنوان باس اسلک در نظر گرفته شده‌است. آموزش مدل ANN جهت سناریوهای آماده با توجه به احتمالات توپولوژیکی شبکه شبیه‌سازی شده‌است. زمان بحرانی هر سناریو با استفاده از اعمال یک اتصال کوتاه سه فاز در مکان مختلف پس از قطع خط در نظر گرفته شده‌است. هر جفت ورودی و خروجی به صورت x,y در نظر گرفته می‌شود.

$$(x,y)=\begin{cases} x \cong (P2, P3, |V1|, |V2|, |V3| \\ y \cong (CCT) \end{cases} \quad (۲۲)$$

در این مطالعه، نرم افزار DIgSILENT برای شبیه‌سازی پایداری گذرا استفاده شده‌است. توانایی ژنراتور سنکرون در حفظ سنکرونیزم بسته به بار اولیه و اندازه ولتاژ ترمینال، نوع خطای اتصال کوتاه، نزدیکی خطا به محل ژنراتور و ثابت زمان اینرسی دارد. قید پایداری گذرا به صورت یک قید نامساوی به صورت معادله زیر بر پایه زاویه ناپایداری روتور انتخاب شده‌است:

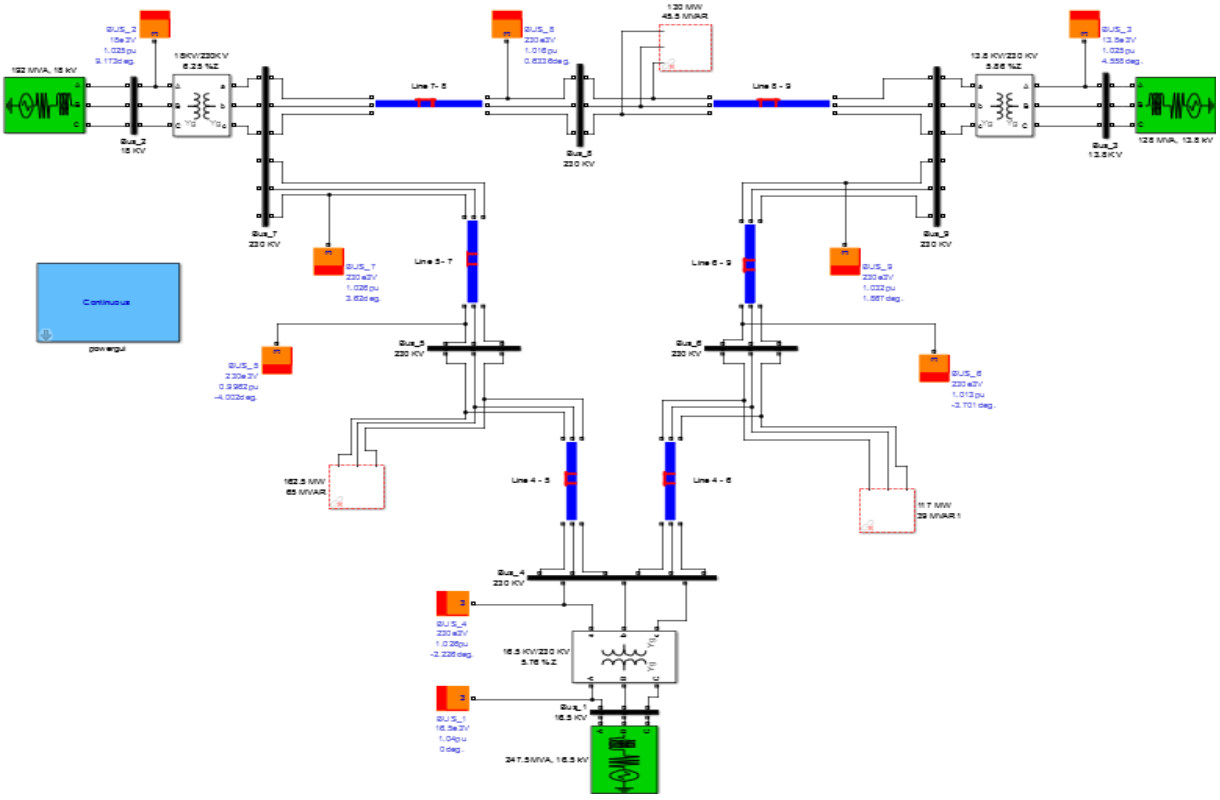
$$\delta_i \leq \delta_{max} \quad (۲۳)$$

شکل (۴) نوسانات روتور شماره دو نشان داده شده که جهت مشاهده نوسانات روتور حداکثر دوره زمانی در ۵ ثانیه در نظر گرفته شده‌است. محور عمودی انحراف زاویه روتور از صفر درجه

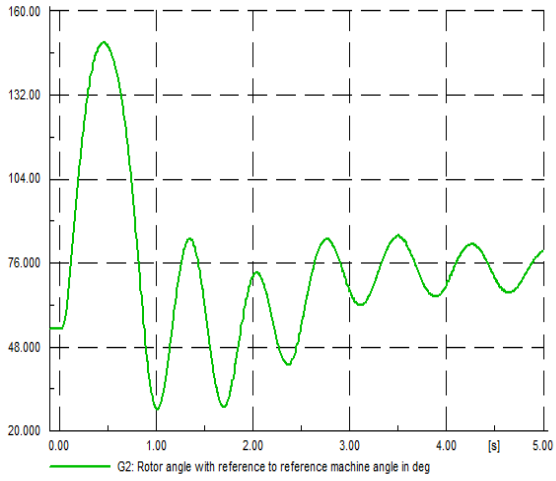
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.8.4]

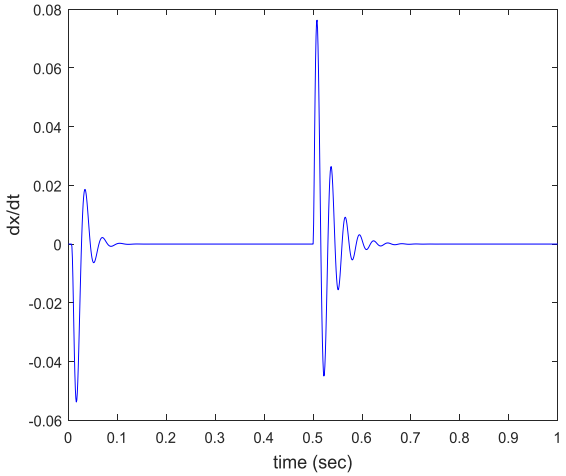
تا ۱۸۰ درجه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد قید پایداری گذرا به صورت یک قید نامساوی بیان شده در معادله ۲۳ رعایت شده است.



شکل (۳): شبکه ۹ باسه



شکل (۴): انحراف و پایداری زاویه روتور



شکل (۵): نتیجه حل معادلات زمانی ماشین برای پایداری گذرا در t=0.02sec , t=0.5sec

در مطالعات پایداری گذرا، پایداری سیستم قدرت در طی یک اغتشاش مورد توجه است که در آن تغییرات بزرگی در بسیاری از متغیرهای سیستم ایجاد می‌شود. بنابراین، غیرخطی بودن معادله‌های سیستم در نمایش پایداری گذرا باید در نظر گرفته شود. در هنگام وقوع یک خطا تغییرات ناگهانی در توان خروجی ژنراتورها به وجود می‌آید که باعث یک انرژی گذرای اضافی می‌گردد. در شکل (۵) تغییرات راکتانس گذرای ماشین در اثر یک خطای سه فاز در پایانه ماشین در زمان ۰/۱ ثانیه نشان داده شده‌است.

در بررسی مدل‌های پخش بار بهینه با در نظر گرفتن قید پایداری گذرا مسأله چگونگی اعمال قید پایداری گذرا و تشخیص پایداری گذرا مطرح می‌باشد مدل پایداری گذرا جهت بررسی خطای چند گانه[۱۲] (MC) در شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

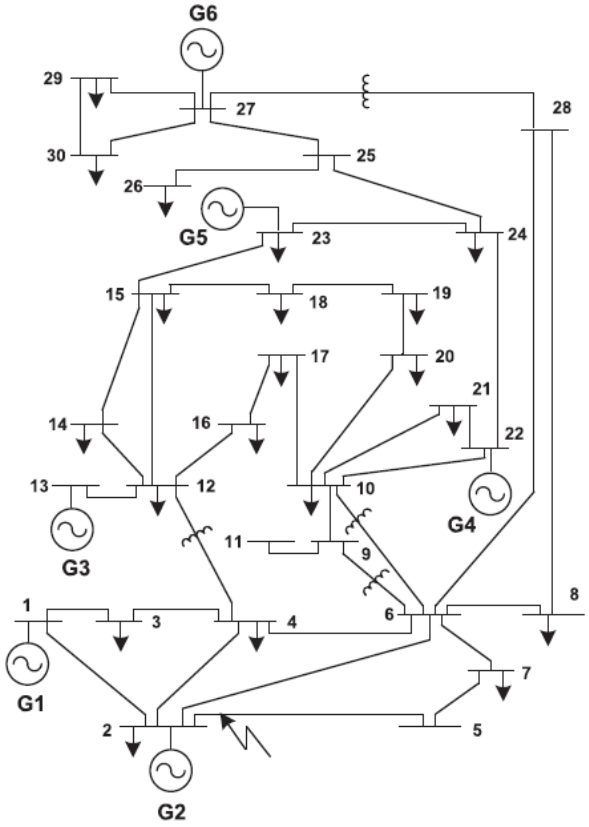
به دلیل استفاده از ماتریس ادمیتانس کاهش یافته تعداد قیود کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است. در شبیه‌سازی انجام شده مدل دینامیکی کامل سیستم مورد مطالعه قرار گرفته است و بدین صورت

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.8.4]

عمل می‌کند که در هر مقطع زمانی انحراف زاویه روتور ماشین‌ها بررسی می‌شود. به منظور به دست آوردن حدود پایداری از طریق شبیه‌سازی باید زوایای ژنراتور و نیز سایر متغیرها در زمان‌های مختلف محاسبه گردند تا رفتار سیستم تحلیل گردد.

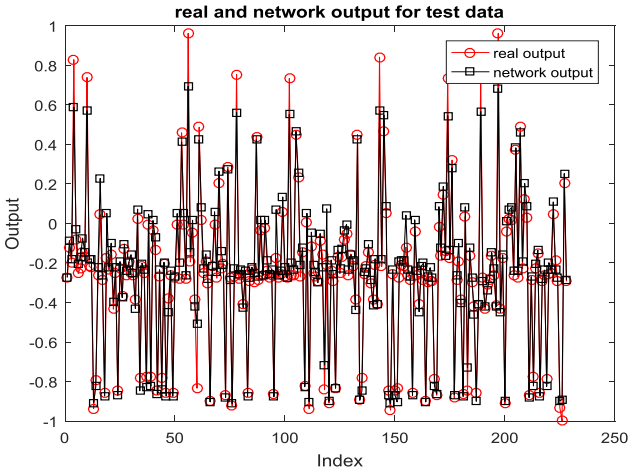
شکل (۶) شبکه تست سی باسه IEEE را نشان می‌دهد. شکل (۷) در شبکه ۳۰ باسه IEEE انحراف زاویه روتور را با وجود خطا در باس شماره ۱۷ و با ۲۵۰ داده، مقدار واقعی را با مقدار اصلی مقایسه کرده و در شکل (۸) آموزش شبکه را نشان می‌دهد. وجود خطا و پیشامد قطع خطوط و بررسی زاویه روتور براساس توپولوژی شبکه صورت می‌پذیرد.



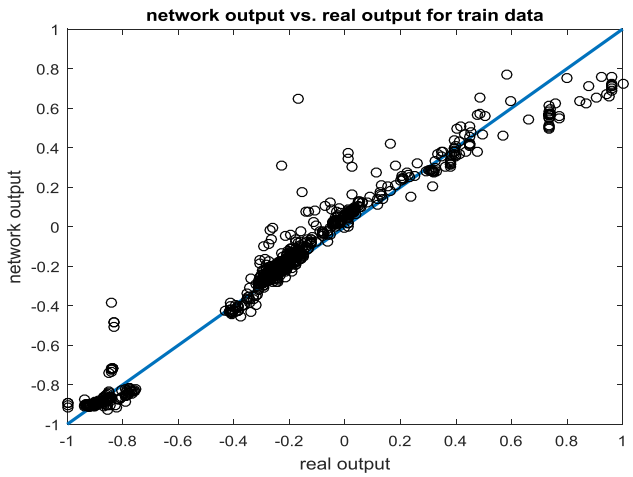
شکل (۶) شبکه تست سی باسه IEEE

شکل (۹) پاسخ سیستم را برای یک مقدار از CCT برابر ۰/۱۶ ثانیه نشان می‌دهد. در این نقطه سیستم پایدار می‌گردد. همچنین در شکل (۱۰) پایداری گذرا در شبکه نه باسه با استفاده از نرم افزار ETAP نشان داده شده است [۲۲-۱۵]. جهت مشاهده نوسانات روتور حداکثر دوره زمانی ۵ ثانیه در نظر گرفته شده‌است.

در تعیین محدوده توان در سیستمی که از دید پایداری دچار محدودیت شده این ژنراتورها مورد توجه قرار می‌گیرند. بنابراین هنگام افزایش بارگذاری باید اثر آن بر روی این ژنراتورها مورد توجه قرار گیرد. این موضوع که ژنراتورهای یک شبکه چگونه به یک اغتشاش پاسخ می‌دهند هم به شدت اغتشاش و هم به مقاوم بودن شبکه پس از اغتشاش بستگی دارد. اگرچه در بین اغتشاشات خطاها بیشتر تحلیل می‌گردد ولی عوامل دیگری مانند باز شدن خط باردار و اغتشاش خروج تولید به صورت تغییرات ناگهانی بر زوایای روتور در لحظه‌ای که ژنراتور از مدار خارج می‌شود سهم موثری دارد. بر اساس نوع اغتشاش و نیز اطلاعات کلیدزنی، ماتریس ادمیتانس به صورت بهینه‌ای مرتب می‌شود و مرتبه آن کاهش می‌یابد تا تمام باس‌های ثابت حذف شود. ژنراتورهایی که زاویه روتور آنها در مد اغتشاش پیشرو است، ژنراتورهایی است که بیشتر در وضعیت بحرانی قرار گرفته‌اند.



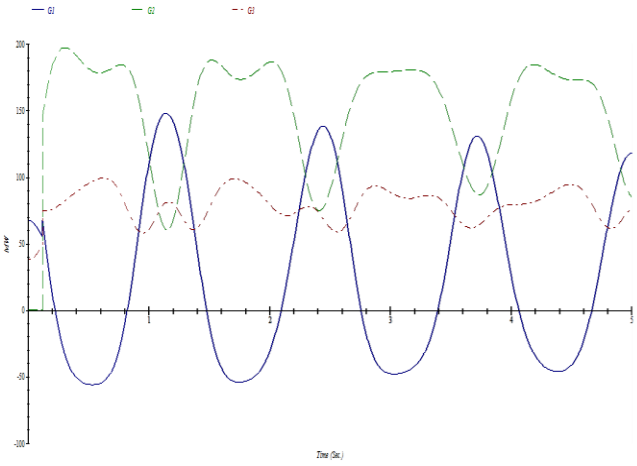
شکل (۷): پیش‌بینی زمان بحرانی رفع خطا



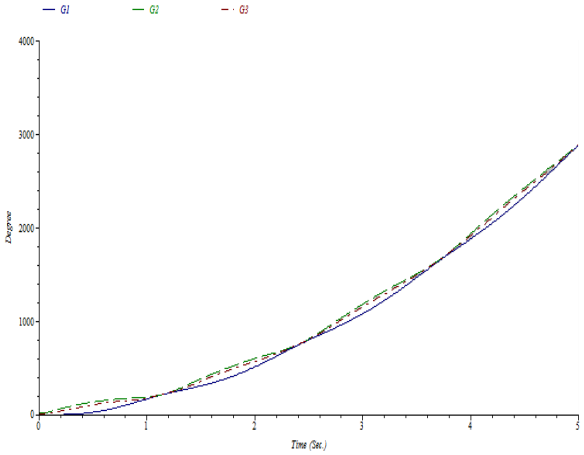
شکل (۸): آموزش شبکه تست

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.8.4]



شکل (۹): پایداری گذرا شبکه نه باسه با وجود خطا در باس شماره ۳ با استفاده از نرم افزار etap



شکل (۱۰): پایداری زاویه روتور با استفاده از نرم افزار ETAP

در جدول (۱) با استفاده از نرم‌افزار متلب در شبکه سی باسه پس از محاسبات پخش‌بار، زاویه روتور محاسبه شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود باس یازده دارای بالاترین مقدار ولتاژ است در صورتی‌که زاویه روتور دارای کمترین مقدار ممکن نمی‌باشد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که نتایج به دست آمده از رهیافت پخش بار بهینه مقید به پایداری گذرا باعث افزایش شاخص زمان بحرانی رفع خطا در سیستم نیز می‌شود که این شاخص معیار مناسبی برای ارزیابی پایداری گذراست. از حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده می‌توان نتیجه گرفت که پایداری گذرای ژنراتور به عوامل زیر وابسته است:

الف- به چه مقدار ژنراتورها در سیستم مورد بحث تحت بار است. ب- به مکان خطا و نوع آن و خروجی ژنراتور در حین خطا بستگی دارد. ج- به راکتانس ژنراتور بستگی دارد. د- به زمان رفع خطا بستگی دارد.

قطع انتخابی ژنراتورها برای خروج‌های خط انتقال به صورت گسترده‌ای برای افزایش پایداری استفاده شده‌است. قطع تولید نوعی کنترل توان بوده و با توجه به توپولوژی شبکه انجام می‌گیرد. در بیشتر موارد، معیار پایداری گذرا شامل توانایی سیستم برای حفظ سنکرونیزم در برابر خطای سه فاز است.

۷- نتایج شبیه‌سازی پس از اختلال

در این سیستم با فرض وقوع اتصال کوتاه در نقاط مختلف سیستم قدرت درمجموع برای ۱۰۰ حالت مختلف کاری، شبیه‌سازی زمانی صورت گرفته و ۲۵۰ نمونه اطلاعات ورودی و خروجی ایجاد شده است. از مجموع اطلاعات ایجادشده، ۷۰ درصد برای آموزش شبکه عصبی و ۳۰ درصد باقیمانده جهت آزمایش استفاده می‌شود.

جدول (۱): محاسبه پخش بار شبکه ۳۰ باسه با روش نیوتن- رافسون

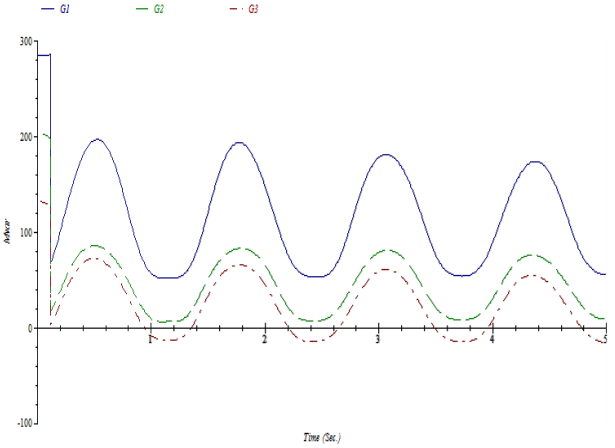
شماره باس	ولتاژ (پریونیت)	زاویه (درجه)	توان اکتیو تزریقی (پریونیت)	توان راکتیو تزریقی (پریونیت)
۱	۱/۰۶۰۰	۰/۰۰۰۰	۲/۶۱۵۵	-۰/۲۲۵۶
۲	۱/۰۴۳۰	-۵/۴۹۴۴	۰/۱۸۳۰	۰/۳۲۰۷
۳	۱/۰۲۷۳	-۸/۰۹۹۹	-۰/۰۲۴۰	-۰/۰۱۲۰
۴	۱/۰۱۹۱	-۹/۷۵۹۶	-۰/۰۷۶۰	-۰/۰۱۶۰
۵	۱/۰۱۰۰	-۱۴/۲۴۸۷	-۰/۹۴۲۰	۰/۱۳۴۲
۶	۱/۰۱۲۴	-۱۱/۴۹۹۹	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
۷	۱/۰۳۱۴	-۱۳/۱۱۱۹	-۰/۲۲۸۰	-۰/۱۰۹۰
۸	۱/۰۱۰۰	-۱۲/۲۱۴۵	-۰/۳۰۰۰	۰/۰۰۵۰
۹	۱/۰۴۱۴	-۱۴/۸۲۴۷	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
۱۰	۱/۰۳۶۶	-۱۶/۵۴۱۲	-۰/۰۵۸۰	۰/۱۷۰۰
۱۱	۱/۰۸۲۰	-۱۴/۸۲۴۷	۰/۰۰۰۰	۰/۲۱۱۲
۱۲	۱/۰۳۳۱	-۱۵/۳۹۳۵	-۰/۱۱۲۰	-۰/۰۷۵۰
۱۳	۱/۰۶۱۰	-۱۵/۳۹۳۵	۰/۰۰۰۰	۰/۲۱۱۲
۱۴	۱/۰۱۸۶	-۱۶/۳۷۵۲	-۰/۰۶۲۰	-۰/۰۱۶۰
۱۵	۱/۰۱۴۲	-۱۶/۵۳۳۷	-۰/۰۸۲۰	-۰/۰۲۵۰
۱۶	۱/۰۱۶۶	-۱۶/۷۸۹۸	-۰/۰۳۵۰	-۰/۰۱۸۰
۱۷	۱/۰۲۵۲	-۱۶/۸۳۷۶	-۰/۰۹۰۰	-۰/۰۵۸۰
۱۸	۰/۹۹۲۰	-۱۷/۳۳۸۳	-۰/۰۳۲۰	-۰/۰۰۹۰
۱۹	۰/۹۸۲۱	-۱۷/۶۱۸۸	-۰/۰۹۵۰	-۰/۰۳۴۰
۲۰	۰/۹۸۲۶	-۱۷/۴۵۲۰	-۰/۰۲۲۰	-۰/۰۰۷۰
۲۱	۱/۰۱۸۴	-۱۷/۰۱۹۷	-۰/۱۷۵۰	-۰/۱۱۲۰
۲۲	۱/۰۲۷۵	-۱۶/۸۵۴۵	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
۲۳	۱/۰۱۷۲	-۱۷/۰۱۱۲	-۰/۰۳۲۰	-۰/۰۱۶۰
۲۴	۱/۰۱۵۳	-۱۷/۱۸۸۶	-۰/۰۸۷۰	-۰/۰۲۴۰
۲۵	۱/۰۱۵۲	-۱۶/۷۱۶۹	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
۲۶	۰/۹۹۷۵	-۱۷/۱۳۸۴	-۰/۰۳۵۰	-۰/۰۲۳۰
۲۷	۱/۰۲۳۶	-۱۶/۱۶۱۵	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.8.4]

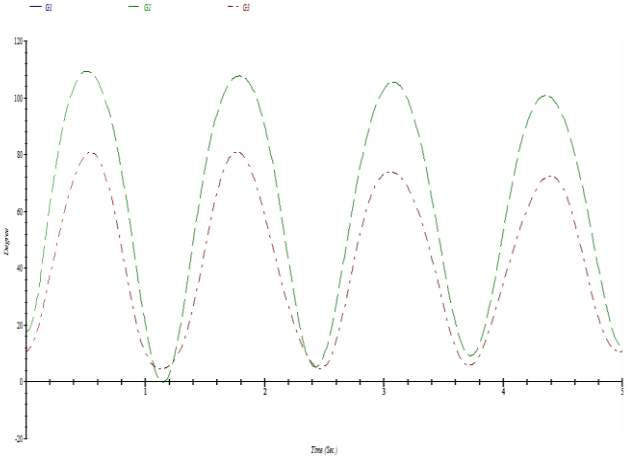
۲۸	۱/۰۱۰۷	-۱۲/۱۶۹۹	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
۲۹	۱/۰۰۳۸	-۱۷/۳۹۰۴	-۰/۰۲۴۰	-۰/۰۰۹۰
۳۰	۰/۹۹۲۳	-۱۸/۲۷۲۷	-۰/۱۰۶۰	-۰/۰۱۹۰

بعد از انجام مراحل آموزش، شبکه با ۳۰ درصد باقیمانده اطلاعات ایجادشده، جهت تخمین زمان بحرانی رفع خطا تحت آزمایش قرار می‌گیرد. نتایج، نشاندهنده کارایی خوب شبکه عصبی جهت تخمین زمان بحرانی رفع خطا است. برای تولید اطلاعات کافی جهت آموزش و آزمایش شبکه عصبی، اتصال کوتاه روی شین‌های مختلف ایجاد شده و به ازای هر اتصالی، توان-های مختلفی برای مولدها در نظر گرفته شده‌است. رفع اتصالی در شین‌های مختلف به دو صورت انجام شده است. در حالت اول، اتصالی با قطع خط رفع می‌شود و در حالت دوم اتصالی خودبه‌خود و بدون قطع خط برطرف می‌گردد. شبیه‌سازی‌ها در دو سیستم ۹ و ۳۰ شینه IEEE انجام شده‌است.

در شبکه نه باسه پاسخ سیستم برای مقادیر مختلف زمان رفع خطا (FCT)[۱۳] داده شده است. در شکل‌های شماره (۱۱) و (۱۲) به‌ترتیب نمودار توان راکتیو ژنراتور برحسب زمان در شبکه نه باسه و زاویه توان ژنراتور برحسب زمان را با FCT برابر ۰/۱ نشان می‌دهد.



شکل(۱۱): نمودار توان راکتیو ژنراتور برحسب زمان در شبکه نه باسه



شکل (۱۲): زاویه توان ژنراتور برحسب زمان

در شکل (۱۳) پایداری گذرا در شبکه سی باسه IEEE با استفاده از نرم افزار متلب به دست آمده است. محور افقی زمان برحسب ثانیه و محور عمودی میزان انحراف زاویه روتور است. شکل (۱۴) نمودار ولتاژ با انحراف زاویه روتور در شبکه سی باسه را نشان می‌دهد. محور افقی زاویه روتور با واحد درجه و محور عمودی ولتاژ باس با واحد پریونیت است. اطلاعات شبکه تست سی باسه IEEE در مرجع [۲۲] آمده‌است. همچنین برای مقایسه اگر شبکه ۳۹ باسه نیوانگلند در نظر گرفته‌شود، با استفاده از آلگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری نتایج زیر مطابق جدول (۴) حاصل می‌شود. در جدول (۴) مشاهده می‌شود که هزینه سوخت در روش رقابت استعماری نیز کاهش یافته است.

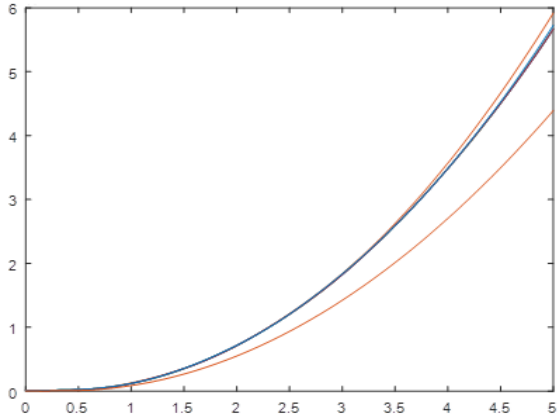
جدول (۲): محاسبه زاویه روتور شبکه ۳۰ باسه با نرم افزار پاورمت

زاویه (درجه)	ولتاژ (پریونیت)	شماره باس
۰	۱/۰۶	۱
-۵/۳۸۰	۱/۰۴۵	۲
-۷/۵۳۱	۱/۰۲۱	۳
-۹/۲۸۲	۱/۰۱۲	۴
-۱۴/۱۵۱	۱/۰۱۱	۵
-۱۱/۰۵۸	۱/۰۱۱	۶
-۱۲/۸۵۵	۱/۰۰۳	۷
-۱۱/۸۰۱	۱/۰۱۰	۸
-۱۴/۱۰۳	۱/۰۵۱	۹
-۱۵/۶۹۳	۱/۰۴۵	۱۰
-۱۴/۱۰۳	۱/۰۸۲	۱۱
-۱۴/۹۳۸	۱/۰۵۷	۱۲
-۱۴/۹۳۸	۱/۰۷۱	۱۳
-۱۵/۸۲۹	۱/۰۴۳	۱۴
-۱۵/۹۲۱	۱/۰۳۸	۱۵
-۱۵/۵۲۰	۱/۰۴۵	۱۶
-۱۵/۸۵۵	۱/۰۴۰	۱۷
-۱۶/۵۳۶	۱/۰۲۸	۱۸
-۱۶/۷۰۹	۱/۰۲۶	۱۹
-۱۶/۵۱۳	۱/۰۳۰	۲۰
-۱۶/۱۳۶	۱/۰۳۳	۲۱
-۱۶/۱۲۲	۱/۰۳۴	۲۲
-۱۶/۳۱۲	۱/۰۲۷	۲۳
-۱۶/۴۸۸	۱/۰۲۲	۲۴
-۱۶/۰۵۹	۱/۰۱۸	۲۵
-۱۶/۴۷۹	۱.۰۰۰	۲۶

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.8.4]

۲۷	۱/۰۲۴	-۱۵/۵۳۴
۲۸	۱/۰۰۷	-۱۱/۶۸۱
۲۹	۱/۰۰۴	-۱۶/۷۶۴
۳۰	۰/۹۹۲	-۱۷/۶۴۶



شکل (۱۳): نمودار پایداری گذرا در شبکه سی باسه IEEE

جدول (۳): انحراف زاویه روتور با وجود خطا در باس ۱۷ در تکرار اول در شبکه ۳۹ باسه نیو انگلند

شماره باس ژنراتور	تغییرات ماکزیمم روتور برای خطا در باس ۱۷
۳۰	۰/۶۷۵۸۰۴
۳۲	۰/۵۸۲۱۸۹
۳۳	۰/۶۰۳۵۹۵
۳۴	۱/۴۰۸۹۲۲
۳۵	۰/۸۵۸۳۵۸
۳۶	۰/۸۴۳۴۸۴
۳۷	۱/۴۴۷۲۶۰
۳۸	۱/۱۷۹۵۵۶
۳۹	۱/۲۹۴۴۶۲

جدول (۴): مقایسه دو روش الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری برحسب دلار بر ساعت

الگوریتم رقابت استعماری	الگوریتم ژنتیک	خطا در باس ۱۷
۴۱۷۲۱/۴۲۱	۴۴۲۸۳/۹۴۰	حداقل هزینه

مسأله TSC-OPF با فرمول‌بندی پخش بار بهینه با اضافه نمودن قیودی که مرتبط با ضوابط پایداری است، توسعه داده‌می‌شود. این ضابطه می‌تواند به شکل زیر نوشته شود:

$$CCT_k(P_g, Q_g, U, \theta) \geq CCT_{min} \qquad k=1,\ldots,N \qquad (۲۴)$$

زیرنویس k،k امین حالت محتمل‌الوقوع است (contingency) به هر جهت تابع تحلیلی برای معادله (۲۴) وجود ندارد و به این علت است که برای تعیین CCT باید شبیه‌سازی‌های دامنه-زمان صورت پذیرد [۲۳]. در جدول (۵) مقایسه هزینه در سه سیستم با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری انجام شده‌است.

جدول (۵): مقایسه هزینه در سه سیستم با استفاده از روش رقابت استعماری

۳۹ باسه نیوانگلند	IEEE سی باسه	نه باسه کنسول هماهنگی سیستم غربی	رقابت استعماری
۴۱۷۲۱/۴۲۱	۸۰۲/۷۴	۷۹۹۴/۲	هزینه دلار بر ساعت

شکل(۱۴) نمودار ولتاژ با انحراف زاویه روتور در شبکه ۳۰ باسه را نشان می‌دهد.

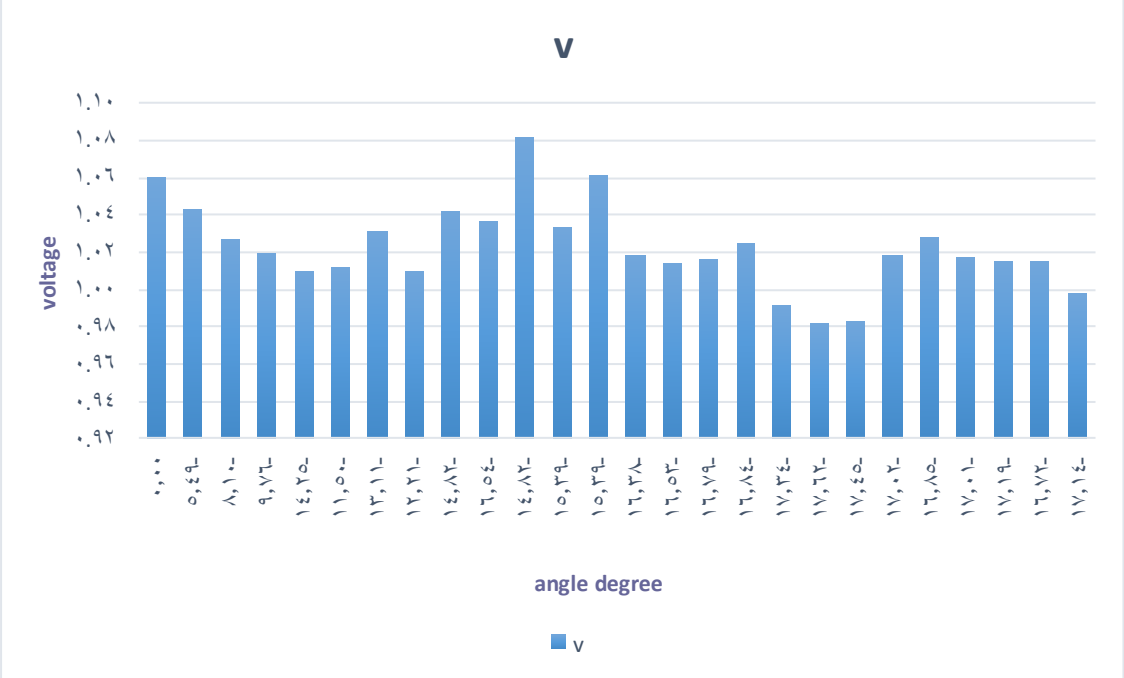
۸- نتیجه‌گیری

الگوریتم رقابت استعماری روشی در حوزه محاسبات تکاملی است که به یافتن پاسخ بهینه مسائل مختلف بهینه‌سازی می‌پردازد. این الگوریتم با مدلسازی ریاضی فرآیند تکامل اجتماعی- سیاسی، الگوریتمی برای حل مسائل ریاضی ارائه می‌دهد. . با در نظر گرفتن شرایط عملی، مشخصات غیرخطی واحدها و معادلات پخش بار وارد فضای مسأله می‌شوند. در این شرایط، مسأله مذکور به یک مسأله نامحدب و گسسته، تبدیل می‌شود. روش‌های تحلیلی و هوشمند با بوجود آمدن فضای مسأله گسسته و مشتق‌ناپذیر، کلیه روش‌های متکی بر مشتق اول یا مشتق دوم با مشکل روبرو می‌شوند. عمده ضعف روش‌های تحلیلی، عدم کارآیی درهنگام استفاده در سیستم‌های بزرگ و واقعی و ضعف در مدیریت متغیرهای گسسته است. گذشته از این نواقص، برقرار نبودن شرایط لازم برای حل با استفاده از روش‌های تحلیلی (مانند مشتق‌پذیری و محدب بودن)، همگرایی به کمینه محلی و لزوم تغییرات وسیع در الگوریتم حل مسئله با تغییر تابع هدف و قیود از دیگر موانع در این روش‌ها است. برای غلبه بر این چالش‌ها روش‌های هوشمند برای حل این مسأله مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این مقاله از الگوریتم ICA با توجه به سرعت بالا و کارآیی آن در شبکه های پیچیده برای پخش بار بهینه در سیستم قدرت استفاده شد. این الگوریتم کمتر در مینیمم‌های محلی گیر می‌کند، و به همین دلیل تابع هدف را کمتر فراخوانی می‌کند که باعث افزایش سرعت آن می‌گردد و همچنین این الگوریتم پیچیدگی کمتری دارد که همین مسئله باعث می‌شود زمان حل مسئله با الگوریتم رقابت استعماری نسبت به سایر روش‌ها در این مقاله کمتر باشد. تابع هدف مناسبی تعریف شد. شاخص CCT معیار مهمی برای ارزیابی میزان پایداری گذرای یک سیستم است. طبق تعریف این شاخص عبارت است از حداکثر زمان تداوم خطا در سیستم قدرت، به گونه‌ای که سیستم

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.8.4]

سنکرونیزم خود را حفظ نماید و ناپایدار نشود. هر چه قدر این زمان برای شبکه بزرگتر باشد، نشان‌دهنده پایداری بیشتر شبکه در برابر وقوع خطاها و در نتیجه دیرتر ناپایدار شدن آن است. همچنین در این مقاله یک شبکه عصبی رو به جلو چند لایه برای تخمین CCT در مسئله TSC-OPF استفاده شده است.



شکل(۱۴) نمودار ولتاژ با انحراف زاویه روتور در شبکه ۳۰ باسه

مراجع

[1] P. Kundur," Power system stability and control", New York, McGraw-Hill companies, 1994.
[2] H. Saadat, "Power system analysis", United States, PSA Pub., 2010.
[3] A. Pizano-Martínez, C.R. Fuerte-Esquivel, D. Ruiz-Vega, "Global transient stability constrained optimal power flow using an OMIB reference trajectory", IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 25, No. 1, pp. 392-403, Feb. 2010.
[4] S.W. Xia, B. Zhou., K.W. Chan, Z.Z. Guo, "An improved GSO method for discontinuous non-convex transient stability constrained optimal power flow with complex system model", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 64, pp. 483-492, Jan. 2015.
[5] S. Xia, K.W. Chan, Z. Guo, "A novel margin sensitivity based method for transient stability constrained optimal power flow", Electric Power Systems Research, Vol. 108, pp. 93-102, March 2014.
[6] H. Ahmadi, H. Ghasemi, A. M. Haddadi, H. Lesani, " Two approaches to transient stability constrained optimal power flow "International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 47, pp. 181-192, May 2013.
[7] S. Xia, K.W. Chan, Z. Guo, "A novel margin sensitivity based method for transient stability constrained optimal power flow", Electric Power Systems Research, Vol. 108, pp. 93-102, March 2014.
[8] A. Pizano-Martínez, C. R. Fuerte-Esquivel, E. Zamora-Cárdenas, D. Ruiz-Vega, "Selective transient stability-constrained optimal power flow using a SIME and trajectory sensitivity unified analysis", Electric Power Systems Research, Vol. 109, pp. 32-44, April 2014.
[9] H. D. Chiang, F. F. Wu, P. P. Varaiya , "A BCU method for direct analysis of power system transient stability", IEEE Transactions on power systems, Vol. 9, No. 3, pp. 1194-1208, August 1994 .
[10] M. Oluic, M. Ghandhari, B. Berggren, "Methodology for rotor angle transient stability assessment in parameter space", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 32, No. 2, pp. 1202-1211, March 2017.
[11] M. Oluić, M. Ghandhari, "On the parametrization of rotor angle transient stability region", North American Power Symposium (NAPS), 4-6 Oct. 2015.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.8.4]

[12] Y. Xu, Z.Y. Dong, Z. Xu ,K.P. Wong, "Power system transient stability constrained optimal power flow: A comprehensive review", Proceeding of the IEEE/PESGM, pp. 1-7, San Diego, CA, USA, July 2012.
[13] R.A. Lajimi, T. Amraee, "A two stage model for rotor angle transient stability constrained optimal power flow", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 76, pp. 82–89, March 2016.
[14] E. Atashpaz gargary, C. Lucas, "Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition", Proceeding of the IEEE/CEC, pp.4661-4667, Singapore, Sep. 2007.
[15] P.M. Anderson, A.A. Fouad, "Power system control and stability", The Iowa State University Press, 1977.
[16] R. D. Zimmerman "MATPower 4.02b2" Power systems engineering research center, March 2010.
[17] R. Patel, T.S. Bhatti, D.P. Kothari, "MATLAB/simulink-based transient stability analysis of a multimachine power system", International Journal of Electrical Engineering Education, pp. 320-336, Oct. 2002.
[18] H.R. Cai, C.Y. Chung, K.P. Wong, "Application of differential evolution algorithm for transient stability constrained optimal power flow", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 23, No. 2, pp. 719-728, May 2008.
[19] "WSCC 9-Bus System," University of Illinois vol. Coordinated Science Laboratory, 2013.
[20] X. Yan, D. Zhao Yang, M. Ke, Z. Jun Hua, and W. Kit Po, "A hybrid method for transient stability-constrained optimal power flow computation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 27, pp. 1769-1777, Nov. 2012.
[21] A. Zerigui, L. A. Dessaint, R. Hannat, R. T. F. Ah King, I. Kamwa," Statistical approach for transient stability constrained optimal power flow", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 9, Issue 14, pp. 1856 – 1864, Nov. 2015.
[22] K. Ayan, U. Kilic, B. Barakli, "Chaotic artificial bee colony algorithm based solution of security and transient stability constrained optimal power flow ", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 64, pp. 136-147, Jan. 2015.
[23] H. Nguyen. Duc, L. Tran Hoai, D. Vo Ngoc, "A novel approach to solve transient stability constrained optimal power flow problems", Turkish Journal of Electrical Engineering& Computer Science, Vol. 25, pp. 4696-4705, March 2017.

زیرنویس‌ها

[1] Western System Coordinating Council (WSCC)
[2] New England
[3] Optimal Power Flow (OPF)
[4] Transient Stability Constraints Optimal Power Flow (TSCOPF)
[5] Single Machine Equivalen (SIME)
[6] One Machine Infinite Bus (OMIB)
[7] Potential Energy Boundary Surface (PEBS)
[8] Boundary Controlling Unstable (BCU)
[9] Transient Stability Index (TSI)
[10] Critical Clearing Time (CCT)
[11] Multi Layer Perceptron (MLP)
[12] Multi Contingency
[13] Fault Clearing Time (FCT)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-22]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1397.7.2.8.4]