

پخش بار بهینه مقید به پایداری سیگنال کوچک با استفاده از الگوریتم ژنتیک

علی حسامی نقشبندی^۱، استادیار؛ هیوا شمس^۲، کارشناس ارشد

۱- دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران - hesami@uok.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران - hiwa2006@gmail.com

چکیده: این مقاله با استفاده از الگوریتم تکاملی ژنتیک به حل پخش بار بهینه با در نظر گرفتن توابع هدف مختلف در شرایط احتمالی متفاوت با محوریت قرار دادن قید پایداری سیگنال کوچک می‌پردازد. هدف نهایی از پخش بار بهینه (OPF)، پیدا کردن نقطه کار بهینه در یک سیستم قدرت با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود می‌باشد. با اضافه کردن قید پایداری سیگنال کوچک به محدودیت‌های پخش بار بهینه می‌توان یک حالت تدافعی و پیشگیرانه را برای جلوگیری از ناپایداری‌های سیگنال کوچک در نقطه کار بهینه سیستم به وجود آورد و نیز اطمینان حاصل نمود که هرگاه اختلالات کوچکی در سیستم رخ دهند، نوسانات الکترومکانیکی ایجاد شده به‌طور مؤثری میرا خواهند شد و سیستم به نقطه کار عادی خود باز خواهد گشت. دو نوع تابع هدف مورد استفاده در این مقاله شامل تابع هدف کمینه کردن هزینه ژنراتورها و تابع هدف امنیت اجتماعی مورد انتظار ضمن برآورده شدن قیود مسئله، به‌طور مناسبی به وسیله الگوریتم تکاملی ژنتیک بهینه می‌شوند. استراتژی پیشنهادی قادر به حل مسئله SSSC-OPF و پیدا کردن نقاط قبل و بعد از بروز اختلال می‌باشد. نتایج حاصل از پیاده سازی الگوریتم و نیز شبیه سازی‌های انجام شده بر روی دو سیستم آزمون ۹ و ۲۴ شینه IEEE نشان‌دهنده کارایی و اعتبار روش پیشنهادی است.

واژه‌های کلیدی: پخش بار بهینه، پایداری سیگنال کوچک، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی مقادیر ویژه.

Small Signal Stability Constrained Optimal Power Flow using Genetic Algorithm

A. Hesami Naghshbandy¹, Assistant Professor; H. Shams², MSc

1- Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, Email: hesami@uok.ac.ir

2- Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, Email: hiwa2006@gmail.com

Abstract: This paper presents a solving methodology for small signal stability constrained Optimal Power Flow (SSSC-OPF) using evolutionary genetic algorithm (GA) considering various objective functions under different contingency scenarios. The final goal of OPF is finding of optimal operating point of power system according to various constraints. By adding small signal stability constraint to the OPF problem, a preventive state for avoiding from small signal oscillatory instability is achieved. Hence, it can be guaranteed to damp electromechanical oscillations triggered by small disturbances in the system and return the operating point to the optimal condition. Two objective functions, namely minimization of total generation cost and expected-security cost subjected to the problem constraints have been considered and optimized by genetic algorithm. The proposed strategy enables to solve the SSSC-OPF problem and finds optimum operating points of the power system before and after the occurrence of disturbance. The performance and effectiveness of the proposed method have been studied and simulated on the IEEE 9 and 24-bus test systems.

Keywords: Optimal power flow, small signal stability, genetic algorithm, eigenvalues optimization.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۳۰

نام نویسنده مسئول: علی حسامی نقشبندی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سنندج - بلوار پاسداران - دانشگاه کردستان - دانشکده مهندسی.

۱- مقدمه

امروزه با گسترش شبکه‌های قدرت، مسئله پایداری سیستم ضمن به حداقل رساندن هزینه تولید نیروگاه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. وظیفه اصلی بهره‌بردار سیستم قدرت این است که به تنظیم برخی متغیرهای کنترل‌پذیر سیستم مانند توان اکتیو نیروگاه‌ها، ولتاژ پایانه ژنراتورها، توان راکتیو جبران‌سازها و تغییر تپ ترانسفورماتورهای در زیر بار و ... بپردازد؛ به گونه‌ای که بهترین نقطه عملکرد سیستم را به دست آورد. پخش بار بهینه (OPF)^۱ یک ابزار مهم در اختیار بهره‌بردارهای سیستم قدرت است که می‌تواند اهداف گوناگونی همچون کمینه کردن هزینه کل، بیشینه کردن سود کل شبکه و حداکثر کردن رفاه اجتماعی را تأمین نماید. این در حالی است که باید قیود خاصی را از جمله دامنه ولتاژ شین‌ها، جریان خط، توان راکتیو تولیدی و ... برآورده کند [۱-۳]. در این مقاله دو تابع هدف مورد بررسی قرار می‌گیرند؛ یکی تابع هدف استاندارد پخش بار بهینه، به عبارتی کمینه کردن هزینه ژنراتورها و دیگری تابع هدف رفاه اجتماعی پیش‌بینی‌شده (سود خالص) است. سود خالص از تفاوت سود ناشی از مصرف توان اکتیو با هزینه تولید توان اکتیو و هزینه‌های امنیتی سیستم حاصل می‌شود [۴].

پخش بار بهینه در سال ۱۹۶۲ توسط کارپنتر^۲ معرفی شد و تا سال ۲۰۰۰ روش‌های برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی با تغییرات و تکامل خود برای جواب‌گویی مناسب‌تر و سریع‌تر در سیستم‌های بزرگ‌تر، با هم در تقابل و رقابت بودند، سپس با ارائه روش نقطه درونی در حل مسئله OPF و تکامل این روش، بهینه‌سازی بهتر و آسان‌تری صورت گرفت. با ارائه الگوریتم‌های تکاملی در حل مسئله پخش بار بهینه و مزایای زیاد این الگوریتم‌ها، تحولی نو در مسائل پخش بار بهینه صورت گرفت. الگوریتم ژنتیک یکی از بهترین این الگوریتم‌ها در حل مسائل بهینه‌سازی است که در حل مسئله پخش بار بهینه بسیار مفید و مؤثر بوده است. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک دودویی برای حل مسئله پخش بار بهینه مقید به پایداری سیگنال کوچک (SSSC-OPF)^۳، به منظور افزایش سرعت تحلیل استفاده می‌شود.

با اضافه شدن قیود امنیتی به پخش بار بهینه، مسئله پخش بار امنیتی (SC-OPF)^۴ ظهور پیدا کرد؛ که در آن محدودیت‌های امنیتی یک حالت پیشگیرانه و تدافعی را در پخش توان تولیدی سیستم به وجود می‌آورند به طوری که OPF سیستم را وادار به کار کردن تحت شرایطی می‌کند که انگار در هر لحظه‌ای ممکن است حادثه‌ای از قبل پیش‌بینی‌شده به وقوع بپیوندد. اضافه کردن قید پایداری سیگنال کوچک به پخش بار بهینه، نیز چنین وضعیتی را ایجاد می‌کند. درواقع مسئله SSSC-OPF یک حالت حفاظتی را در برابر اختلالات سیگنال کوچک در سیستم به وجود می‌آورد، به طوری که اطمینان حاصل شود که رخدادهای محتمل از قبل پیش‌بینی‌شده هیچ تأثیری بر پایداری سیگنال کوچک سیستم ندارد. مسئله SSSC-OPF جایگزینی برای کنترل‌کننده‌های نوسان مانند PSS ها نیست بلکه مکمل آن‌هاست و

باعث افزایش اطمینان از پایداری سیگنال کوچک سیستم می‌گردد [۵، ۶].

اولین بار در سال ۲۰۰۶ مسئله SSSC-OPF مطرح و از روش نقطه درونی برای حل مسئله استفاده شد [۷]. در سال ۲۰۱۱ یک روش توزیع مجدد^۵ برای پاسخ به این مسئله به کار گرفته شد [۸]. در سال ۲۰۱۳ از الگوریتم برنامه‌ریزی غیرخطی نیمه‌معین NLSDP^۶ جهت حل مسئله SSSC-OPF استفاده گردید [۹] و در نهایت در سال ۲۰۱۴ برای اولین بار یک الگوریتم تکاملی تجمع ذرات PSO^۷ جهت حل مسئله SSSC-OPF مورد استفاده قرار گرفت [۱۰]. در این مقاله ساختاری طراحی می‌شود که با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مسئله SSSC-OPF همراه با قیود مربوطه در شرایط احتمالی متفاوتی بررسی می‌گردد، همچنین شرایط احتمالی مورد آزمایش در حل SSSC-OPF شامل احتمالات قطع خطوط، افزایش بار، افزایش حاشیه پایداری سیگنال کوچک و ترکیب این احتمالات است. سازمان‌دهی مقاله به گونه‌ای است که در بخش ۲ به پایداری سیگنال کوچک و مدل ریاضی آن پرداخته می‌شود. در بخش ۳ پخش بار بهینه همراه با توابع هدف مختلف و قیود آن معرفی شده و در بخش ۴ مدل الگوریتم تکاملی ژنتیک برای حل این مسئله، پیشنهاد می‌گردد، سپس در بخش ۵ به شبیه‌سازی و تحلیل نتایج روش پیشنهادی بر روی سیستم‌های ۹ و ۲۴ شینه IEEE پرداخته می‌شود. بخش ۶ نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

۲- پایداری سیگنال کوچک

پایداری سیگنال کوچک به توانایی سیستم قدرت در حفظ سنکرونیسم تحت اختلالات کوچک اطلاق می‌شود. ناپایداری سیگنال کوچک بستگی به شرایط عملیاتی سیستم دارد و بیش‌تر در قالب افزایش دامنه نوسانات روتور به دلیل نبود گشتاور میرایی کافی ظاهر می‌گردد. برای مطالعات پایداری سیگنال کوچک رفتار سیستم قدرت توسط معادلات دیفرانسیل و جبری زیر توصیف می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x, y, p) \\ g(x, y, p) \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن x بردار متغیرهای حالت، y بردار متغیرهای جبری، p بردار متغیرهای کنترلی و f یک تابع برداری غیرخطی برای نشان دادن معادلات دیفرانسیل سیستم است. برای تجزیه و تحلیل پایداری سیگنال کوچک و خطی‌سازی سیستم قدرت، اختلالات به اندازه کافی کوچک در نظر گرفته می‌شوند. خطی‌سازی تقریب مرتبه اول بسط تیلور معادله (۱) حول نقطه تعادل منجر به معادله زیر می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{A} & \tilde{B} \\ \tilde{C} & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (2)$$

با فرض اینکه $\tilde{D}$ غیر منفرد است متغیرهای جبری Δy را می‌توان از (۲) برای به دست آوردن معادله حالت سیستم حذف کرد.

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x \quad (3)$$

اجتماعی پیش‌بینی‌شده) برای سیستم که شامل هزینه امنیت سیستم نیز می‌شود، بهینه گردد. رفاه اجتماعی یک مفهوم اقتصادی است. رفاه اجتماعی یعنی سود خالص (سود منهای هزینه) که از تولید و مصرف یک کالا به دست می‌آید. این کالا می‌تواند توان اکتیو تولیدی نیروگاه‌ها باشد در این صورت سود کالا همان سود ناشی از مصرف توان اکتیو است [۱۷-۱۵]. در اینجا، از سود خالص به جای رفاه اجتماعی استفاده می‌شود. سود خالص پیش‌بینی‌شده برای سیستم $E(SW)$ برابر ترکیبی از سود خالص سیستم در شرایط قبل از رخداد پیشامد و سود خالص سیستم در شرایط پس از رخداد پیشامد در سیستم می‌باشد که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$E(SW) = \Pi^0 * SW^0 + \sum_{k=1}^k \Pi^k * SW^k \quad (7)$$

$$\Pi^0 = 1 - \sum_{k=1}^k \Pi^k \quad (8)$$

در تمامی روابط آورده شده متغیرهای دارای اندیس k مربوط به شرایط وقوع پیشامد k ، اندیس صفر مربوط به حالت عادی کار سیستم است، Π^0 احتمال نبود پیشامد، Π^k احتمال بروز پیشامد k و SW^0 سود خالص سیستم در شرایط عادی سیستم است که عبارت است از تفاوت سود ناشی از مصرف توان اکتیو توسط مصرف کننده و هزینه تولید توان اکتیو در نیروگاه‌ها که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$SW^0 = \sum_{j \in S_d} B_j(P_{Lj}^0) - \sum_{i \in S_g} C_{Gi}(P_{Gi}^0) \quad (9)$$

$$C_{Gi}(P_{Gi}^0) = a_{2Gi}(P_{Gi}^0)^2 + a_{1Gi}(P_{Gi}^0) + a_{0Gi}, i \in S_g \quad (10)$$

$$B_j(P_{Lj}^0) = a_{2Lj}(P_{Lj}^0)^2 + a_{1Lj}(P_{Lj}^0) + a_{0Lj}, j \in S_l \quad (11)$$

$C_{Gi}(P_{Gi}^0)$ منحنی هزینه ژنراتور شین i ام، $B_j(P_{Lj}^0)$ منحنی سود مصرف کننده شین j ام، a_{0Gi} ، a_{1Gi} و a_{2Gi} ضرایب منحنی هزینه ژنراتور i ام، a_{0Lj} ، a_{1Lj} و a_{2Lj} ضرایب هزینه منحنی بار، P_{Gi}^0 توان ژنراتور i ام در شرایط عادی سیستم، P_{Lj}^0 توان مصرفی بار شین j ام در شرایط عادی سیستم، S_g مجموعه شین‌های دارای ژنراتور و S_l مجموعه شین‌های بار است. سود خالص سیستم در شرایط پراسترس، برابر ترکیبی از سود ناشی از مصرف توان اکتیو بارها، هزینه تولید نیروگاه‌ها، هزینه افزایش یا کاهش توان اکتیو ژنراتورها و هزینه تغییرات بار است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$SW^k = \sum_{j \in S_d} B_j(P_{Lj}^k) - \sum_{i \in S_g} C_{Ri}(P_{Gi}^0, P_{Gi}^k) - \sum_{i \in S_g} C_{Gi}(P_{Gi}^k) - \sum_{j \in S_d} C_{Ij}(P_{Lj}^0, P_{Lj}^k) \quad (12)$$

$$C_{Ri}(P_{Gi}^0, P_{Gi}^k) = B_{Ri} * |P_{Gi}^0 - P_{Gi}^k|, i \in S_g, k = 1, 2, \dots, k \quad (13)$$

$$C_{Ij}(P_{Lj}^0, P_{Lj}^k) = B_{Ij} * |P_{Lj}^0 - P_{Lj}^k|, i \in S_g, k = 1, 2, \dots, k \quad (14)$$

که در آن A ماتریس حالت سیستم است و می‌توان آن را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$A = \tilde{A} - \tilde{B}\tilde{D}^{-1}\tilde{C} \quad (4)$$

پایداری سیگنال کوچک را می‌توان بر اساس مقادیر ویژه ماتریس A ارزیابی کرد و در صورتی که تمام مقادیر ویژه ماتریس حالت دارای قسمت حقیقی منفی باشند نقطه تعادل سیستم پایدار مجانبی و در نتیجه سیستم پایدار است.

$$\alpha(A) = \max \{ \text{Real}(\beta) | \beta \in \beta(A) \} < 0 \quad (5)$$

که در آن $\beta(A)$ مجموعه تمام مقادیر ویژه ماتریس حالت A ، $\text{Real}(\beta)$ بخش حقیقی مقادیر ویژه و $\alpha(A)$ قسمت حقیقی بزرگ‌ترین مقادیر ویژه سیستم می‌باشند، همچنین $\alpha(A)$ به نقطه کار سیستم قدرت بستگی دارد که با تغییر در نقطه کار سیستم می‌توان حاشیه پایداری لازم را فراهم کرد. نحوه پیدا کردن ماتریس حالت و مقادیر ویژه و تجزیه و تحلیل آن در شرایط احتمالی و در شرایط عادی در مراجع [۱۴-۱۱] به طور کامل توضیح داده شده است.

۳- پخش بار بهینه با قید پایداری سیگنال کوچک

پخش بار بهینه به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی مقید، شامل یک تابع هدف و مجموعه محدودیت‌های تساوی و محدودیت‌های نامساوی است. این محدودیت‌ها باید در شرایط عملیاتی عادی سیستم و در شرایط پراسترس (از جمله: افزایش بار سیستم و یا خروج اضطراری خطوط) در نظر گرفته شوند.

۳-۱- توابع هدف

۳-۱-۱- تابع هدف استاندارد

در تابع هدف استاندارد، هدف حداقل‌سازی هزینه تولیدی ژنراتورهای سیستم مورد مطالعه است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Min } F_T = \sum_{i=1}^{Ng} (a_{2i}P_{Gi}^2 + a_{1i}P_{Gi} + a_{0i}), i \in S_g \quad (6)$$

که Ng شماره ژنراتورها و P_{Gi} توان اکتیو خروجی ژنراتور i ام است و a_{0i} ، a_{1i} و a_{2i} ضرایب هزینه ژنراتور i ام هستند؛ و S_g مجموعه ژنراتورهای سیستم قدرت می‌باشد.

۳-۱-۲- تابع هدف امنیت اجتماعی

اگر سیستم قدرت بتواند بار مورد نیاز را همراه با قیود لازم برآورده نماید می‌توان نتیجه گرفت که سیستم دارای امنیت است. هزینه حذف بار و هزینه افزایش یا کاهش توان اکتیو ژنراتورها به منظور برآورده کردن قیود سیستم را هزینه امنیت سیستم گویند که به ازای همه رخدادهایی که ممکن است در سیستم روی دهد محاسبه می‌شود. برای انجام پخش بار بهینه با در نظر گرفتن تابع هدف امنیت اجتماعی باید هزینه‌های امنیت سیستم را بهینه نمود. برای این کار باید سود خالص پیش‌بینی‌شده (رفاه

که $\bar{\alpha}$ حداکثر مقدار حقیقی مقادیر ویژه سیستم، یا همان حاشیه پایداری مورد نیاز است که توسط کاربر تعریف می شود.

۴- حل مسئله SSSC-OPF با الگوریتم ژنتیک

در این بخش ابتدا توضیح مختصری در مورد الگوریتم ژنتیک ارائه شده و سپس به بیان حل مسئله با این الگوریتم تکاملی پرداخته می شود.

۱-۴ الگوریتم ژنتیک

این الگوریتم از خانواده الگوریتم های تکاملی است که مدل محاسباتی آن، از طبیعت الهام گرفته شده است. در واقع الگوریتم ژنتیک یک جستجوی تصادفی قدرتمند مبتنی بر سازوکار انتخاب طبیعی برای انتخاب ژن ها در تولیدمثل و ایجاد نسلی سازگارتر با طبیعت است. از مزایای این الگوریتم می توان به قابلیت فرار از بهینه های محلی و مناسب بودن برای پردازش های موازی اشاره کرد. همچنین این الگوریتم جستجو را با مجموعه ای از نقاط به طور هم زمان شروع می کند؛ بنابراین، احتمال یافتن یک نقطه بهینه کاذب، نسبت به روش هایی که نقطه به نقطه حرکت می کنند، کم تر است. در حالت کلی می توان ساختار این الگوریتم را به ۵ مرحله اصلی به صورت زیر تقسیم بندی کرد [۱۸-۲۰]:

- ۱) ایجاد جمعیت تصادفی (جمعیت اصلی) و ارزیابی آن ها
- ۲) انتخاب والدین و ترکیب آن ها برای ایجاد جمعیت فرزندان، اصطلاحاً به این مرحله تقاطع (cross over) گفته می شود.
- ۳) انتخاب اعضای جمعیت برای اعمال جهش و ایجاد جمعیت جهش یافتگان
- ۴) ادغام جمعیت اصلی، فرزندان و جهش یافتگان و ایجاد جمعیت اصلی جدید
- ۵) در صورت محقق نشدن شرایط خاتمه، روند الگوریتم از مرحله دوم تکرار شده و در غیر این صورت الگوریتم کامل می گردد.

۲-۴ حل مسئله SSSC-OPF با الگوریتم ژنتیک

تاکنون مسئله OPF با استفاده از الگوریتم ژنتیک به روش های مختلفی حل شده است [۱۷-۱۵]. هدف این مقاله تغییر توان اکتیو تولیدی ژنراتورها و تغییر نقطه کار سیستم قدرت برای دستیابی به کم ترین هزینه ممکن توان اکتیو تولیدی در کنار برآورده شدن محدودیت ها از جمله پایداری سیگنال کوچک است. در این تحقیق برای برآورده کردن این هدف از کدنویسی دودویی (باینری) استفاده شده است. روند نمای کلی روش حل SSSC-OPF با الگوریتم ژنتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. مراحل این ساختار در ادامه تشریح می شود:

- ۱) ابتدا برای تولید جمعیت تصادفی اصلی، توان اکتیو خروجی هر یک از ژنراتورها به صورت یک رشته دودویی از ۰ و ۱ به طول M تبدیل می شود که اصطلاحاً به این رشته ها کروموزوم می گویند.

- ۲) در این مرحله جمعیت والدین بر اساس معیار شایستگی و تابع احتمال نمایی ساخته می شود و سپس با انجام تقاطع و

که $C_{Ri}(P_{Gi}^0, P_{Gi}^k)$ هزینه تغییرات توان ژنراتور i ام در شرایط پس از بروز پیشامد k و $C_{Ij}(P_{Lj}^0, P_{Lj}^k)$ هزینه تغییرات بار در شین i ام در شرایط بروز پیشامد k است.

۲-۳ محدودیت های مساوی

- ۱- معادلات پخش بار در شرایط عملیاتی عادی [۹].

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - \sum_{j \in S_b} V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Li} - \sum_{j \in S_b} V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) = 0 \end{cases}, i \in S_b \quad (15)$$

که S_b مجموعه تمام شین ها، P_{Li} و Q_{Li} به ترتیب توان راکتیو و اکتیو بار مربوط به شین i ام، $Y_{ij} e^{j\delta_{ij}}$ عناصر ماتریس ادمیتانس شین، Q_{Gi} توان راکتیو خروجی ژنراتور i ام و $V_i e^{j\theta_i}$ ولتاژ مختلط شین i ام است.

- ۲- معادلات پخش بار در شرایط پراسترس [۱۸].

$$\begin{cases} P_{Gi}^s - P_{Li}^s - \sum_{j \in S_b} V_i^s V_j^s \cos(\theta_i^s - \theta_j^s - \delta_{ij}^s) = 0 \\ Q_{Gi}^s - Q_{Li}^s - \sum_{j \in S_b} V_i^s V_j^s \sin(\theta_i^s - \theta_j^s - \delta_{ij}^s) = 0 \end{cases}, i \in S_b \quad (16)$$

در این مقاله، کلیه کمیت های مربوط به شرایط پراسترس سیستم قدرت با بالانویس S مشخص شده است.

۳-۳ محدودیت های نامساوی

۱-۳-۳ محدودیت های فنی در شرایط عملیاتی عادی

که شامل ولتاژ شین ها و توان اکتیو و راکتیو ژنراتورها است که نباید از مقدار حداقل و حداکثر خود تجاوز کنند، همچنین جریان عبوری از خطوط بایستی کم تر از حد حرارتی خود باشند.

$$\begin{cases} V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \\ P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \\ |LF_k| \leq LF_k^{\max} \end{cases} \quad (17)$$

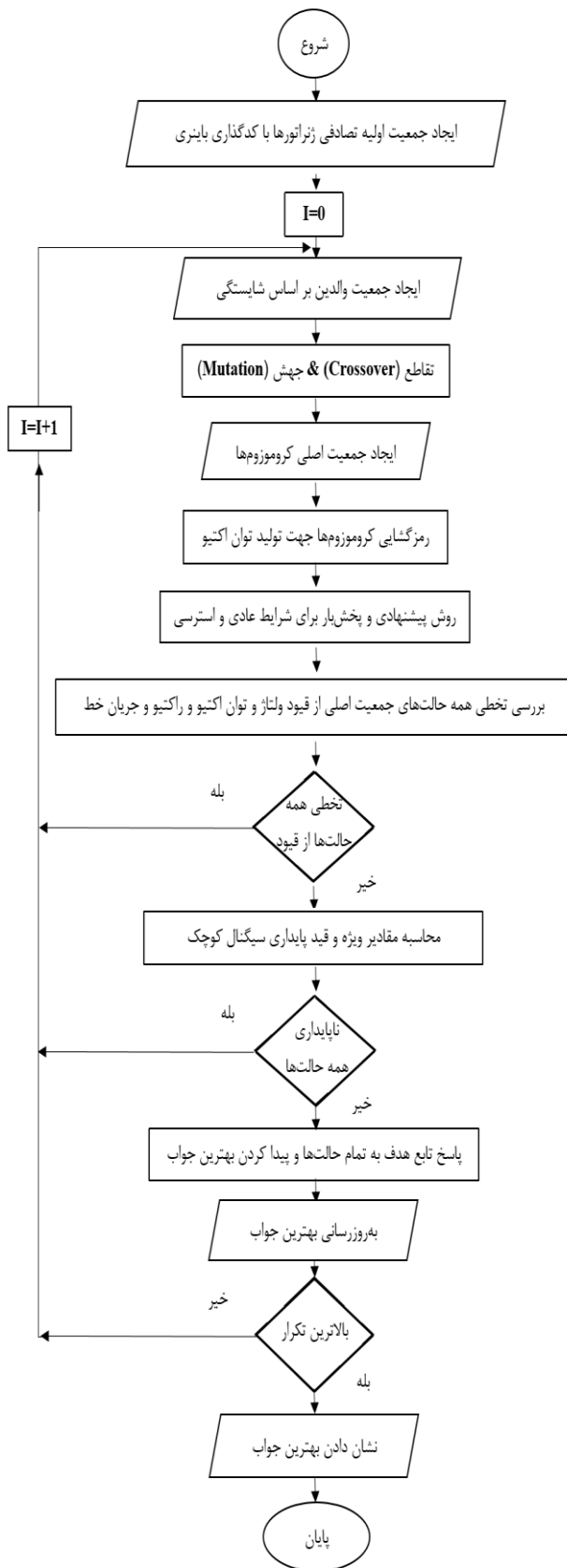
۲-۳-۳ محدودیت های فنی در شرایط عملیاتی پراسترس

محدودیت های فنی تحت شرایط پراسترس نیز نباید از حداقل و حداکثر خود تخطی کنند.

$$\begin{cases} V_i^{\min} \leq V_i^s \leq V_i^{\max} \\ P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi}^s \leq P_{Gi}^{\max} \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi}^s \leq Q_{Gi}^{\max} \\ |LF_k^s| \leq LF_k^{\max} \end{cases} \quad (18)$$

۳-۳-۳ محدودیت پایداری سیگنال کوچک

$$\begin{cases} \alpha(A) = \max\{\text{Real}(\beta) \in \beta(A)\} \\ \alpha(A) \leq \bar{\alpha} \end{cases} \quad (19)$$



شکل ۱: روندنمای الگوریتم پیشنهادی

جهش روی کروموزومها، به ترتیب جمعیت فرزندان و جهش‌یافتگان تشکیل می‌شود.

(۳) در این مرحله با ادغام سه جمعیت والدین، فرزندان و جهش‌یافتگان به تولید جمعیت اصلی جدید پرداخته می‌شود.

(۴) سپس توسط رابطه زیر هرکدام از کروموزومهای جمعیت اصلی جدید به توان اکتیو واقعی ژنراتورها (که در محدوده حداکثر و حداقل خود هستند) تبدیل یا اصطلاحاً رمزگشایی می‌شود:

$$P_{Gi} = \frac{P_{Gi\max} - P_{Gi\min}}{2^M - 1} \quad (20)$$

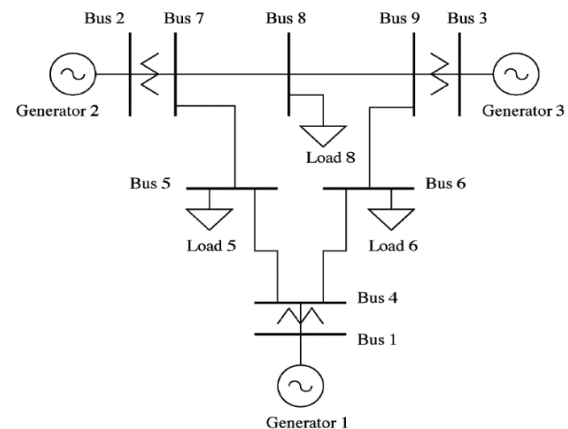
(۵) در این مرحله پخش بار برای شرایط عادی و پراسترس اجرا می‌گردد. ممکن است که توان‌های انتخابی ژنراتورها (حاصل‌شده از کروموزومها) به گونه‌ای باشد که پخش بار همگرا نشود، یا توان اکتیو ژنراتور مرجع (تنها توان اکتیوی که در طول پخش بار برای برقراری تعادل بین توان تولیدی با تلفات و بار مصرفی تغییر می‌کند) از مقدار حداکثر و یا حداقل خود خارج شود. برای رفع این مشکل می‌توان حالت‌هایی را که سبب ایجاد چنین مشکلی می‌شوند، بعد از پخش بار حذف کرد؛ اما به این دلیل که حذف حالت‌ها بعد از پخش بار صورت می‌گیرد هیچ تأثیری بر ناهمگرا شدن پخش بار ندارد و باعث کاهش جمعیت تصادفی می‌شود. نویسنده با اجرای یک روش پیشنهادی قبل از اجرای پخش بار، این مشکل را برطرف کرده است؛ که در پیوست توضیح داده شده است.

(۶) بعد از اجرای پخش بار، تخطی از قیود مسئله شامل ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو و جریان خط بررسی می‌شود و در صورت عدم تخطی از این قیود، مقادیر ویژه سیستم به دست می‌آید و اگر حاشیه پایداری لازم برای سیستم فراهم شده باشد، مرحله نهایی اجرا می‌گردد.

(۷) در این مرحله تابع هدف را برای حالت‌های مختلف بررسی کرده و کم‌ترین هزینه ثبت می‌شود و سپس اگر حداکثر تعداد تکرارهای موردنظر به پایان نرسیده باشد، به تعداد تکرارها یک واحد اضافه شده و حلقه از مرحله دوم، دوباره تکرار می‌شود و در صورت رسیدن به حداکثر تکرار موردنظر با نشان دادن بهینه‌ترین جواب برای هزینه تولید، روند الگوریتم به اتمام می‌رسد.

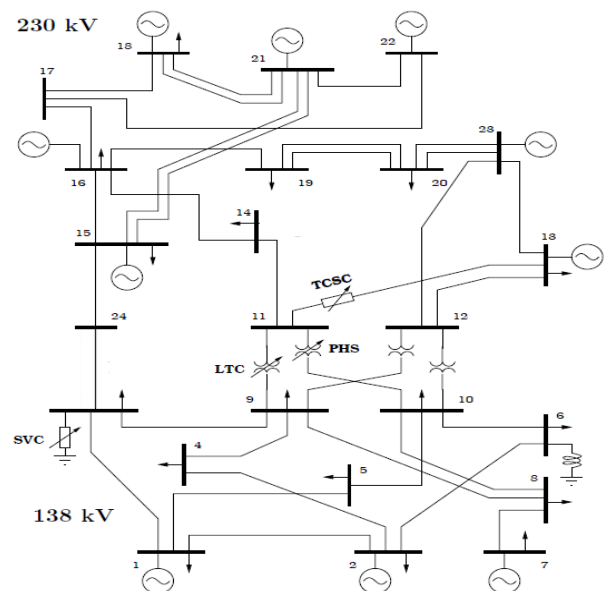
۵- شبیه‌سازی

در این مقاله دو سیستم آزمون ۹ و ۲۴ شینه IEEE مورد بررسی قرار می‌گیرند. سیستم ۹ شینه دارای ۳ ژنراتور است که دیاگرام تک‌خطی آن در شکل ۲ نشان داده شده است. این سیستم غالباً برای تحلیل پایداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشخصات سیستم شامل ضرایب هزینه ژنراتورها، محدوده توان اکتیو و داده‌های امنیتی آن، از مرجع [۷] اقتباس شده و نیز محدوده توان راکتیو در جدول ۸ آمده است.



شکل ۲: نمودار تک‌خطی سیستم ۹ شینه IEEE

همچنین مشخصات سیستم ۲۴ شینه ۱۰ ژنراتوری از مرجع [۲۱] قابل دسترسی بوده و دیاگرام تک‌خطی آن نیز در شکل ۳ نشان داده شده است.

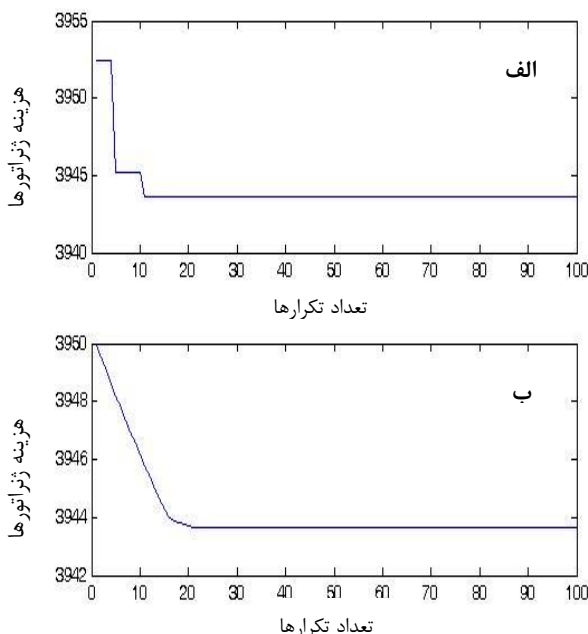


شکل ۳: نمودار تک‌خطی سیستم ۲۴ شینه IEEE

در شبیه‌سازی‌ها به‌منظور انجام پخش بار و به‌دست آوردن مقادیر ویژه از نرم‌افزار PSAT [۲۲] استفاده شده است. ۴ مورد از شرایط احتمالی به‌شرح ذیل مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار می‌گیرند:

- ❖ مورد ۱: حالت پایه (مدل استاندارد) OPF بدون اعمال قید پایداری سیگنال کوچک
- ❖ مورد ۲: اجرای SSSC-OPF با محدودیت‌های متفاوت پایداری سیگنال کوچک
- ❖ مورد ۳: اجرای SSSC-OPF با احتمالات مختلف خروج خط در یک حاشیه پایداری سیگنال کوچک معین
- ❖ مورد ۴: اجرای SSSC-OPF با افزایش بار سیستم، ضمن وجود و یا عدم وجود یک حاشیه پایداری سیگنال کوچک معین

مورد ۱: در این مورد پخش بار بهینه بدون اعمال محدودیت سیگنال کوچک اجرا می‌شود. نتایج این مورد در سطر اول جدول ۱ ارائه شده است. در این سطر با توجه به اینکه برای به‌دست آوردن کم‌ترین هزینه توان تولیدی، توان اکتیو ژنراتور G2 بیش‌ترین مقدار را در بین ژنراتورها دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت که این ژنراتور از نظر تولید توان ارزان‌ترین است و سپس با توجه به سطر اول جدول ۱، گران‌ترین تولید توان اکتیو نیز مربوط به ژنراتور G1 است و ژنراتور G3 نیز برای ایجاد کم‌ترین هزینه تولید، مقدار کمی توان اکتیو تولید می‌کند. در شکل ۴(الف) نمودار تابع هزینه تولیدی نیروگاه‌ها در تکرارهای مختلف برای مسئله پخش بار بهینه نمایش داده شده است، همچنین در شکل ۴(ب) نمودار صاف‌شده تابع هزینه در تکرارهای مختلف ارائه شده است که نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی بدون هیچ‌گونه نوسانی به مقدار بهینه همگرا می‌شود.



شکل ۴: (الف): نمودار تابع هزینه در تکرارها، (ب): نمودار صاف‌شده تابع هزینه در تکرارها، در حل مسئله OPF بدون محدودیت پایداری سیگنال کوچک

مورد ۲: همان طوری که از جدول ۱ دیده می شود، حاشیه پایداری حالت پایه ۰/۱۹۶۵- است. در ردیف دوم این حاشیه محدودتر شده و به ۰/۲- تغییر یافته و سپس در هر ردیف به اندازه ۰/۰۵ واحد حاشیه امنیتی

افزایش یافته است. تغییرات توان اکتیو و راکتیو و هزینه تولید و تابع SW در جدول ۱ داده شده است.

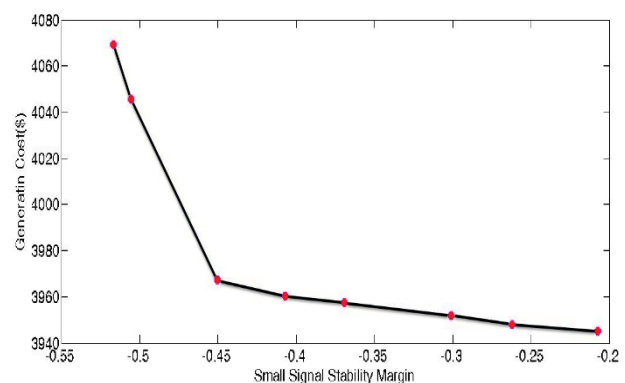
جدول ۱: خلاصه نتایج SSSC-OPF با الگوریتم ژنتیک و محدودیت های مختلف سیگنال کوچک

ردیف	محدودیت پایداری سیگنال کوچک، α	هزینه تولید (\$/h)	SW	حاشیه پایداری α	PG1 (MW)	PG2 (MW)	PG3 (MW)	QG1 (Mvar)	QG2 (Mvar)	QG3 (Mvar)
۱	حالت پایه	۳۹۴۳/۶	۲۳۱۴/۴	-۰/۱۹۶	۷۸/۶۵	۱۵۵/۶	۸۵	۲۶/۲	۵/۳۴	-۱۱/۲
۲	$-۰/۲ \leq \alpha$	۳۹۴۵/۱	۲۳۱۲/۹	-۰/۲۰۷	۹۴/۸۳	۱۵۵/۶۷	۶۸/۳۳	۲۵/۰۱	۴/۹۸	-۱۱/۵۹
۳	$-۰/۲۵ \leq \alpha$	۳۹۴۸	۲۳۰۹/۸	-۰/۲۶۲	۹۴/۰۲۲	۱۲۳	۱۰۱/۶۷	۲۴/۸۵	۱/۳۵	-۱۱/۳۵
۴	$-۰/۳ \leq \alpha$	۳۹۵۱/۷	۲۳۰۶/۳	-۰/۳۰۱	۱۰۶/۸۷	۱۱۱/۹۴	۹۹/۵۱	۲۴/۲۴	۰/۲۹	-۱۱/۶
۵	$-۰/۳۵ \leq \alpha$	۳۹۵۷/۴	۲۳۰۰/۶	-۰/۳۶۹	۱۱۴/۴۸	۱۰۷/۵۸	۱۰۷/۵۸	۲۴/۳۲	-۰/۵۳	-۱۱/۶۹
۶	$-۰/۴ \leq \alpha$	۳۹۶۰/۳	۲۲۹۷/۷	-۰/۴۰۷	۱۱۴/۳۸	۸۸/۲۲	۱۱۵/۶۵	۲۴/۴۲	-۰/۶۸	-۱۰/۵۸
۷	$-۰/۴۵ \leq \alpha$	۳۹۶۷/۳	۲۲۹۰/۷	-۰/۴۵۰	۱۰۶/۴۴	۷۲/۴۱	۱۳۹/۸۴	۲۵/۶۲	-۰/۲۸	-۸/۱۱
۸	$-۰/۵ \leq \alpha$	۴۰۴۵/۶	۲۲۱۲/۴	-۰/۵۰۵	۲۲۷/۰۵	۴۸/۷۱	۴۳/۰۶	۳۶/۴۵	۰/۲۶	-۶/۸۲
۹	$\leq \min \alpha$	۴۰۶۹/۳	۲۱۸۸/۷	-۰/۵۱۶	۲۴۳/۸	۳۶/۶۱	۳۸/۹۶	۴۰/۸۹	۴/۵	-۴/۹۸

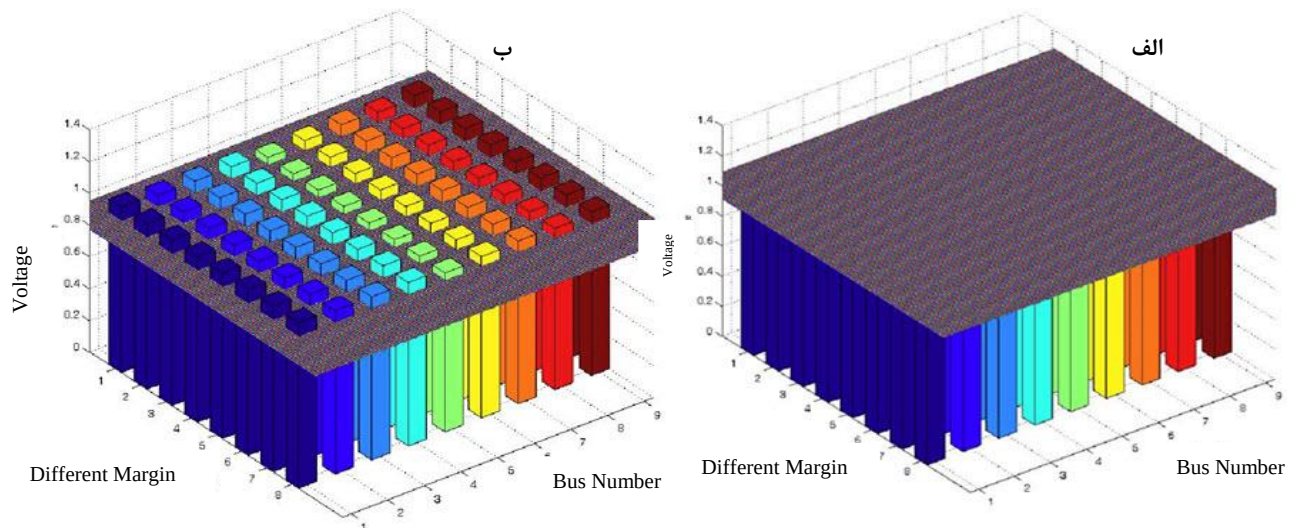
در شکل ۶ دامنه های ولتاژ برای ۸ حالت افزایش حاشیه (ردیف ۲ تا ردیف ۸) در شین های سیستم و نیز حداقل دامنه ولتاژ به وسیله یک صفحه با دامنه ۰/۹۵۵ نشان داده شده است؛ مشخص است که این صفحه تمام پروفیل ولتاژها را قطع کرده و همه ولتاژها بالاتر از این صفحه قرار می گیرند و این نشان می دهد که هیچ ولتاژی از حداقل خود تجاوز نکرده است. همچنین حداکثر دامنه ولتاژ به وسیله یک صفحه با دامنه ۱/۰۹ نشان داده شده است و مشخص است که این صفحه هیچ کدام از پروفیل های ولتاژ را قطع نمی کند و همه ولتاژها پایین تر از این صفحه قرار دارند و این نشان می دهد که هیچ ولتاژی از حداکثر خود تجاوز نکرده است.

مورد ۳: در این مورد، چهار رخداد محتمل در سیستم ۹ شینه شامل قطع خطوط ۷-۵، ۹-۸، ۷-۶، ۹-۸ با حاشیه پایداری ثابت ۰/۲۵- با استفاده از SSSC-OPF تحلیل و بررسی می شود. نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است. این جدول نشان می دهد که برای همه حالت های قطع خطوط حاشیه پایداری سیگنال کوچک مورد نظر، فراهم شده است. اگر احتمال قطع هر کدام از خطوط یک درصد باشد، امنیت اجتماعی از مقدار ۲۳۱۴/۴ به مقدار ۲۳۰۸/۳۶ کاهش می یابد و این خود نشان دهنده میزان ضرر و زیان اقتصادی وارده به سیستم در صورت قطع خطوط و با وجود پایداری سیگنال کوچک می باشد. همچنین تأثیرات ۵ رخداد محتمل در قطع خطوط ۱۰-۵، ۲۲-۱۷، ۹-۴، ۲۳-۱۲، ۹-۳ در سیستم ۲۴ شینه بر تغییرات حاشیه پایداری و حداقل هزینه تولیدی ژنراتورها در جدول ۳ نشان داده شده است. در شکل ۷ دامنه ولتاژ سیستم ۹ شینه و در شکل ۸ دامنه ولتاژ شین های P-Q در سیستم ۲۴ شینه در حل مسئله پخش بار بهینه با قطع خطوط نشان داده شده است؛ و حداقل و حداکثر دامنه ولتاژ به وسیله صفحاتی مشخص شده است که خود نشان دهنده عدم تخطی قید ولتاژ است.

هرچه حاشیه پایداری بیش تر شود هزینه تولید برای تأمین این حاشیه افزایش و میزان تابع SW کاهش می یابد که به منزله کاهش یافتن سود خالص دریافتی است. با دقت در توان اکتیو ژنراتورهای اول و دوم در جدول ۱ مشاهده می شود که توان اکتیو ژنراتور G1 با افزایش حاشیه پایداری افزایش می یابد، حال آنکه توان اکتیو ژنراتور G2 کاهش یافته که آن به دلیل ایترسی زیاد ژنراتور G1 و ایترسی کم ژنراتور G2 است. همچنین می توان گفت که هرچه توان اکتیو تولیدی ژنراتور G1 بیش تر و توان اکتیو تولیدی ژنراتور G2 کمتر باشد، سیستم از نظر سیگنال کوچک پایدارتر است. در شکل ۵ تقابل بین حاشیه پایداری سیگنال کوچک و هزینه تولیدی بر اساس داده های جدول ۱ نمایش داده شده است. هرچه حاشیه پایداری مورد نیاز بیش تر شود، هزینه تولیدی افزایش و در نتیجه سود خالص (SW) کاهش می یابد. افزایش هزینه ها تا یک حاشیه مشخص، تقریباً دارای یک نمو خطی است. این در حالی است که به حداکثر رساندن حاشیه امنیتی که هزینه های تولیدی زیادی را به همراه دارد، مقرون به صرفه نبوده و نیز در عمل لازم نمی باشد.



شکل ۵: هزینه تولید ژنراتورها در مسئله SSSC-OPF در سیستم ۹ شینه IEEE و حاشیه های مختلف پایداری



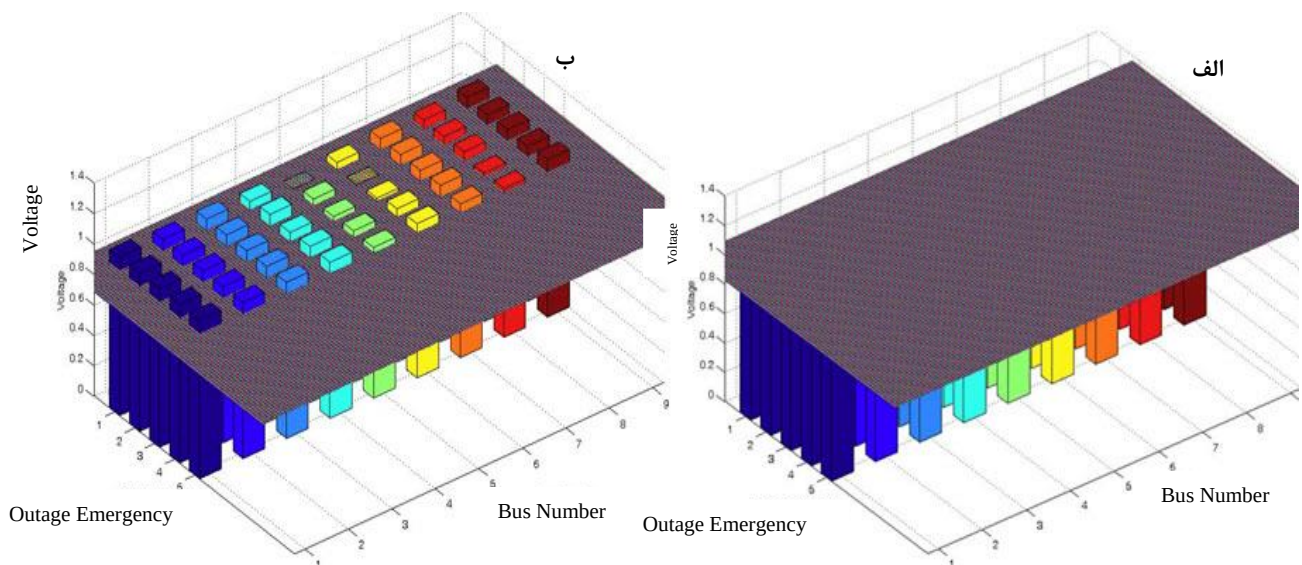
شکل ۶: الف) حد بالا دامنه ولتاژ، ب) حد پایین دامنه ولتاژ - برای حل مسئله SSSC-OPF در حالت‌های افزایش حاشیه پایداری سیگنال کوچک سیستم ۹ شینه IEEE

جدول ۲: خلاصه نتایج SSSC-OPF با الگوریتم ژنتیک، برای قطع خطوط با حاشیه پایداری ۰/۲۵- در سیستم ۹ شینه IEEE

ردیف	قطع خط	SW	هزینه تولید (\$/h)	حاشیه پایداری α	PG1 (MW)	PG2 (MW)	PG3 (MW)	QG1 (Mvar)	QG2 (Mvar)	QG3 (Mvar)
۱	حالت پایه	۲۳۰۹/۸	۳۹۴۸	-۰/۲۵۴	۸۱/۹	۱۲۳/۳	۱۱۳/۴	۲۵/۸	۱/۸۲	-۱۰/۴
۲	۷-۵	۲۲۵۵/۶	۴۰۰۰/۲	-۰/۲۸۷	۱۸۰/۸	۷۹	۵۸/۶۲	۶۱/۱	۳/۷۸	-۵/۹
۳	۹-۶	۲۲۵۸/۹	۳۹۹۹/۱	-۰/۲۵۴	۱۳۲/۵	۸۰/۳	۱۰۷/۵	۵۴/۱	۱۰	۵/۱۳
۴	۸-۷	۲۲۸۱/۲	۳۹۷۶/۸	-۰/۲۵۶	۹۱/۱	۶۴/۵	۱۶۴	۲۹/۱	۴/۱۷	۱۸/۱
۵	۹-۸	۲۳۰۰/۴	۳۹۵۷/۶	-۰/۲۵۶	۱۲۳/۸	۱۴۳/۵	۵۱/۱	۲۹/۴	۲۹/۲۳	-۱۵
$E(SW)=۲۳۰۸/۳۶۹$										

جدول ۳: خلاصه نتایج SSSC-OPF با الگوریتم ژنتیک در قطع خطوط در سیستم ۲۴ شینه

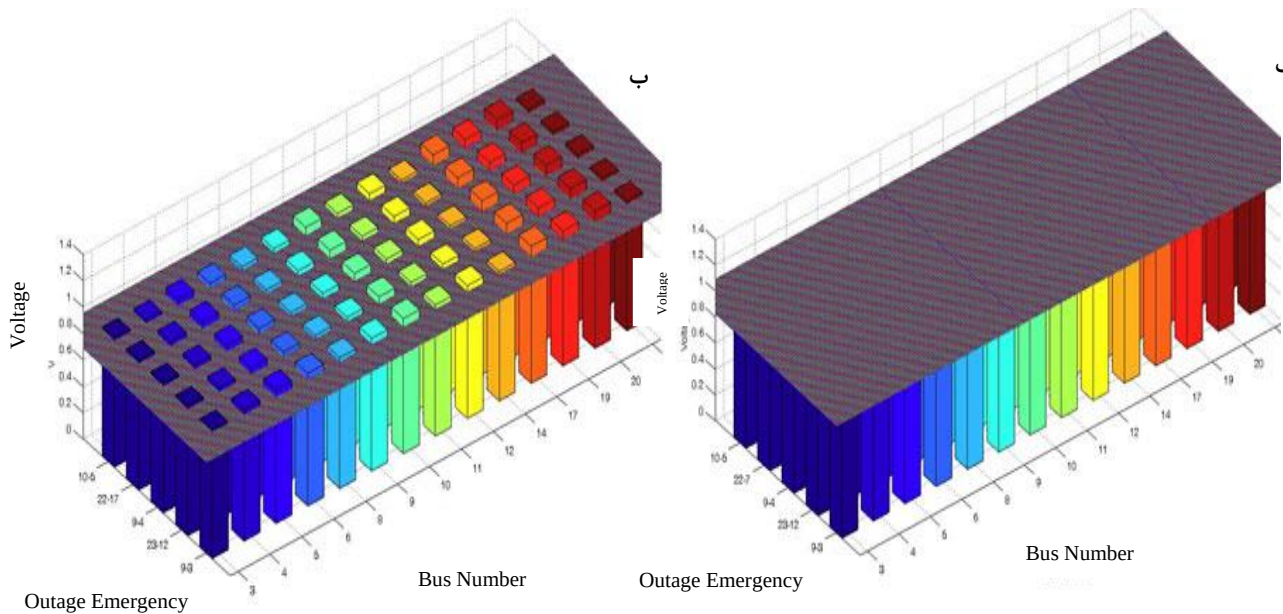
خروج خط	حالت پایه	۵-۱۰	۱۷-۲۲	۴-۹	۱۲-۲۳	۳-۹
هزینه تولید (\$/h)	۳۶۱۲۹	۳۶۴۰۳	۳۶۱۶۵	۳۶۳۱۱	۳۶۰۸۲	۳۷۱۱۲
حاشیه پایداری α	-۰/۱۱۰۱۹	-۰/۱۲۶۸	-۰/۱۳۲۳۱	-۰/۱۱۶۱	-۰/۱۱۸۱	-۰/۱۳۶۳



شکل ۷: الف) حد بالا دامنه ولتاژ، ب) حد پایین دامنه ولتاژ - برای حل مسئله SSSC-OPF برای حالت‌های خروج خط در سیستم ۹ شینه IEEE

الف

ب



شکل ۸: الف) حد بالا دامنه ولتاژ شین‌های P-Q، ب) حد پایین دامنه ولتاژ شین‌های P-Q - برای حل مسئله SSSC-OPF در قطع خطوط در سیستم ۲۴ شینه IEEE

جدول ۴: خلاصه نتایج SSSC-OPF با الگوریتم ژنتیک با افزایش بار در سیستم ۹ شینه IEEE

ردیف	ضریب بار τ	هزینه تولید (\$/h)	حاشیه پایداری α	SW	PG1 (MW)	PG2 (MW)	PG3 (MW)	QG1 (Mvar)	QG2 (Mvar)	QG3 (Mvar)
۱	۱/۰۵	۴۱۴۵/۹	-۰/۱۹	۵۳۷/۱	۸۷/۳	۱۶۳	۸۵	۳۰/۴	۹/۲۸	-۸/۵
۲	۱/۱	۴۳۴۸/۶	-۰/۱۸۴	-۱۲۴۰	۹۴/۵	۱۷۲	۸۵	۳۴/۹	۱۳/۶	-۵/۷
۳	۱/۱۵	۴۵۵۱/۹	-۰/۱۸۲	-۳۰۱۸	۹۴/۲	۱۷۲	۱۰۱	۱۶/۹	-۲/۴	-۱۸/۲
۴	۱/۲	۴۷۵۵/۳	-۰/۱۸۶	-۴۷۹۷	۱۱۰	۱۷۲	۱۰۱	۴۴/۱	۱۹/۸	۰/۷۳
۵	۱/۲۵	۴۹۵۹/۵	-۰/۱۷۴	-۶۵۷۶	۱۱۰/۳	۱۸۸/۳	۱۰۱/۶۷	۴۹/۷	۲۶	۳/۴
۶	۱/۳	۵۱۶۴/۷	-۰/۱۷۴	-۸۳۵۶	۱۱۰/۴	۱۸۸/۳	۱۱۸/۳	۵۵/۱	۲۹/۶	۷/۳۱
۷	۱/۳۵	۵۳۶۸/۹	-۰/۱۷۶	-۱۰۱۳۶	۱۲۵/۹	۱۸۸/۳	۱۱۸/۳	۵۹/۷	۳۲/۶	۹/۹۱
E(SW)=۱۸۱۶/۵۳۳										

جدول ۵: خلاصه نتایج SSSC-OPF با الگوریتم ژنتیک با افزایش بار در سیستم ۲۴ شینه IEEE

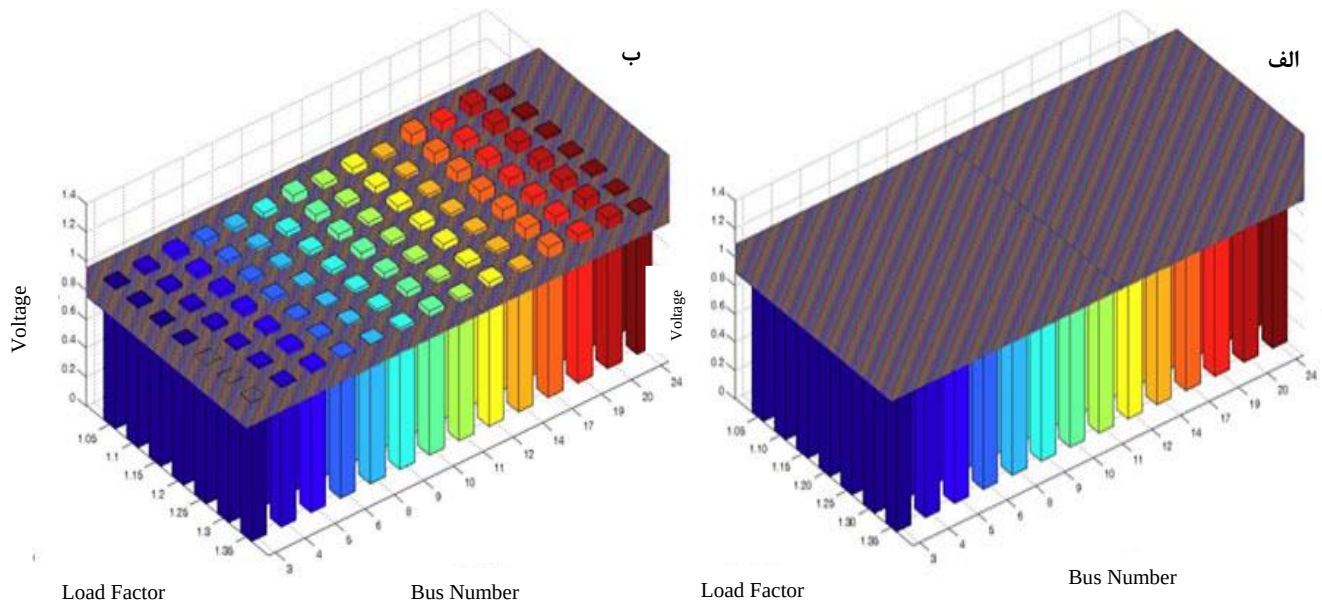
افزایش بار τ	۱/۰۵	۱/۱	۱/۱۵	۱/۲	۱/۲۵	۱/۳۰	۱/۳۵
هزینه تولید (\$/h)	۳۹۵۴۳	۴۲۶۴۶	۴۵۹۴۶	۴۹۹۸۴	۵۲۹۶۱	۵۷۵۷۱	۶۰۹۲۹
حاشیه پایداری α	-۰/۱۱۶۱	-۰/۱۲۵۱	-۰/۱۲۷	-۰/۱۲۴۹	-۰/۱۳۶۸	-۰/۱۳۱۱	-۰/۱۲۸

نشان‌دهنده زیان است، درواقع تابع SW هنگامی منفی می‌شود که درآمد ناشی از فروش توان اکتیو از هزینه تولید آن کم‌تر باشد که این به‌نوبه خود موجب کاهش امنیت اجتماعی می‌شود، به صورتی که اگر احتمال هرکدام از این افزایش بارها برابر با یک درصد در نظر گرفته شود، تابع امنیت اجتماعی که در حالت عادی مقدار ۲۳۱۴/۴ را به خود اختصاص داده است، به مقدار ۱۸۱۶/۵۳۳ می‌رسد که نشان‌دهنده کاهش شدید امنیت اجتماعی است. همچنین تأثیرات افزایش بار در حاشیه پایداری و هزینه ژنراتورها در سیستم ۲۴ شینه در جدول ۵ نشان داده شده است. در شکل ۹ حدود بالا و پایین دامنه ولتاژ شین‌های P-Q در حل مسئله SSSC-OPF با افزایش بار در سیستم ۲۴ شینه IEEE و عدم تخطی قید ولتاژ نشان داده شده است.

مورد ۴-۱: در این بخش مسئله SSSC-OPF در سطوح مختلف افزایش بار سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. سطوح مختلف بار با ضریب بار τ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_L = \tau P_{L0}, \quad Q_L = \tau Q_{L0} \quad (21)$$

P_{L0} و Q_{L0} حالت پایه بار هستند. جدول‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهند که با وجود افزایش بار در دو سیستم ۹ و ۲۴ شینه IEEE حاشیه پایداری سیگنال کوچک همچنان فراهم شده و سیستم ناپایدار نشده است. در جدول ۴ در صورت افزایش بار در سیستم ۹ شینه IEEE، امنیت اجتماعی کاهش و هزینه تولید افزایش می‌یابد. همچنین تابع SW یا همان سود خالص با افزایش بار کاهش می‌یابد و سود خالص منفی



شکل ۹: (الف) حد بالا ولتاژ شین‌های P-Q، (ب) پایین دامنه ولتاژ شین‌های P-Q - در حل مسئله SSSC-OPF، با افزایش بار در سیستم ۲۴ شینه IEEE

جدول ۶: خلاصه نتایج SSSC-OPF با الگوریتم ژنتیک، در افزایش بار با حاشیه پایداری ۰/۳- در سیستم ۹ شینه IEEE

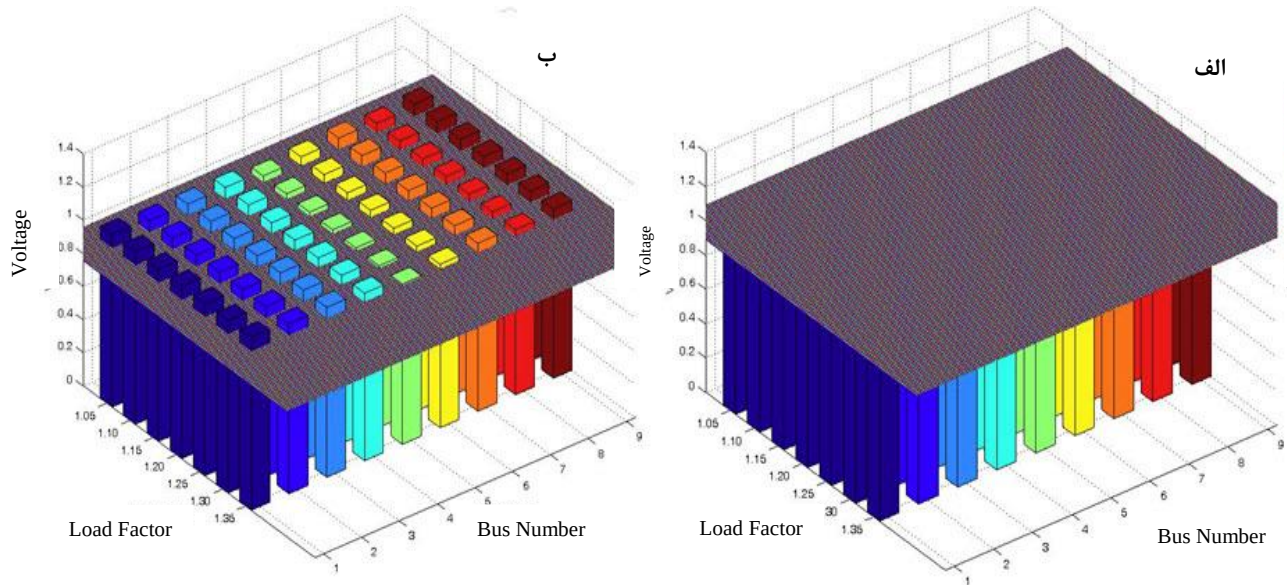
ردیف	ضریب بار τ	هزینه تولید (\$/h)	حاشیه پایداری α	PG1 (MW)	PG2 (MW)	PG3 (MW)	QG1 (Mvar)	QG2 (Mvar)	QG3 (Mvar)
۱	۱/۰۵	۴۱۵۵/۱	-۰/۳۰۷	۱۱۴/۸	۱۱۱/۹	۱۰۷/۵	۲۸/۸	۳/۳۲	-۸/۶
۲	۱/۱	۴۳۵۹/۸	-۰/۳۰۶	۱۳۲/۶	۱۱۵/۶	۱۰۱/۹	۳۳/۳	۶/۴۶	-۶/۲۶
۳	۱/۱۵	۴۵۶۳/۳	-۰/۳۰۶	۱۱۵/۳	۱۱۱/۹	۱۳۹/۸	۳۹	۱۰/۱	-۰/۵
۴	۱/۲	۴۷۶۷/۴	-۰/۳۰۱	۱۴۷	۱۱۹/۸	۱۱۵/۶	۴۳/۴	۱۳/۱	-۰/۰۳
۵	۱/۲۵	۴۹۷۱/۵	-۰/۳۰۰	۱۴۷/۲	۱۱۹/۸	۱۳۱/۷	۴۸/۶	۱۶/۶	۴/۰۵
۶	۱/۳	۵۱۷۸/۱	-۰/۳۰۱	۱۶۵/۸	۱۲۳/۳	۱۲۵/۵	۵۴/۳	۲۰	۶/۴
۷	۱/۳۵	۵۳۸۳/۸	-۰/۳۰۴	۱۵۵/۸	۱۱۹/۸	۱۵۵/۹	۵۹/۷	۲۳/۸	۱۲/۵

جدول ۷: هزینه تولیدی نیروگاه در افزایش بار با اعمال حاشیه پایداری و بدون اعمال حاشیه پایداری ۰/۳- در سیستم ۹ شینه IEEE

ضریب بار τ	۱/۰۵	۱/۱	۱/۱۵	۱/۲	۱/۲۵	۱/۳	۱/۳۵
هزینه تولیدی بدون حاشیه (\$/h)	۴۱۴۵/۹	۴۳۴۸/۶	۴۵۵۱/۹	۴۷۵۵/۳	۴۹۵۹/۵	۵۱۶۶/۷	۵۳۶۸/۹
هزینه تولیدی در حاشیه ۰/۳- (\$/h)	۴۱۵۵/۱	۴۳۵۹/۸	۴۵۶۳/۳	۴۷۶۷/۴	۴۹۷۱/۵	۵۱۷۸/۱	۵۳۸۳/۸

ضریب بارهای مختلف در حاشیه پایداری ۰/۳- در سیستم ۹ شینه IEEE و عدم تخطی قید ولتاژ نشان داده شده است. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که روند تغییرات توان اکتیو ژنراتورها در حالت افزایش بار بدون حاشیه پایداری و با حاشیه پایداری ۰/۳- با هم متفاوت است و در حالتی که افزایش بار با حاشیه ۰/۳- انجام می‌شود، ژنراتورهای ۱ و ۳ سهم بیشتری را در تولید توان اکتیو تولیدی به خود اختصاص می‌دهند و ژنراتور ۲ نسبت به حالت بدون ایجاد حاشیه، سهم کمتری دارد که این به دلیل اینرسی کم ژنراتور ۲ است که برای ایجاد حاشیه پایداری سیگنال کوچک باید سهم کمتری در تولید توان اکتیو داشته باشد؛ اما در حالت بدون در نظر گرفتن حاشیه پایداری، از آنجایی که ژنراتور ارزان‌تری از نظر تولید است، لذا بخش عمده‌ای از تولید توان اکتیو را به خود اختصاص می‌دهد.

مورد ۴-۲: در این حالت الگوریتم SSSC-OPF با افزایش بار ضمن حاشیه پایداری ۰/۳- $\alpha \leq$ در مورد سیستم ۹ شینه IEEE اجرا می‌گردد که در جدول ۶ میزان تابع هزینه، توان اکتیو و راکتیو تولیدی نیروگاه‌ها و همچنین حاشیه پایداری ایجاد شده در گام‌های ۵ واحدی افزایش بار با حاشیه ۰/۳- نشان داده شده است. این جدول نشان می‌دهد که توان اکتیو و راکتیو تولیدی نیروگاه‌ها از محدوده مجاز خود خارج نشده‌اند. در جدول ۷ هزینه تولیدی نیروگاه در حالت افزایش بار با اعمال حاشیه پایداری و بدون اعمال حاشیه پایداری با هم مقایسه شده است و نشان می‌دهد که برای افزایش بارهای یکسان، هزینه ایجاد حاشیه پایداری سیگنال کوچک ۰/۳-، بیش‌تر از حالت بدون حاشیه پایداری است. در شکل ۱۰ حد بالا و پایین دامنه ولتاژ برای حل مسئله SSSC-OPF برای



شکل ۱۰: الف) حد بالا دامنه ولتاژ، ب) پایین دامنه ولتاژ - برای حل مسئله SSSC-OPF برای ضریب بارهای مختلف در حاشیه پایداری ۰/۳- در سیستم ۹ شینه IEEE

به دست آورد، همچنین این روش قادر به در نظر گرفتن قیود بیش‌تری در مسئله بهینه‌سازی مورد نظر می‌باشد.

پیوست

در این پیوست روشی برای جلوگیری از ناهمگرایی پخش بار یا خروج توان اکتیو ژنراتور مرجع، از مقدار حداکثر و حداقل خود ارائه می‌شود. این روش راهکاری ساده از تعادل توان‌های اکتیو تولیدی و مصرفی و نیز تلفات می‌باشد که در رابطه زیر مشخص شده است:

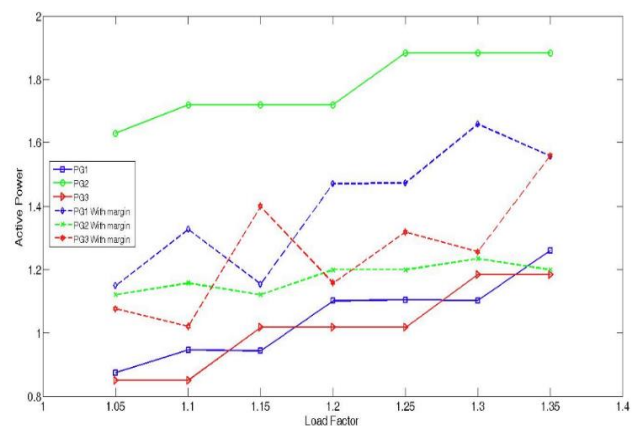
$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{Gi} = \sum_{j=1}^{N_l} P_{Li} + P_{loss} \quad (22)$$

که در آن N_l شماره بار، P_{Li} توان اکتیو بار i ام و P_{loss} توان اکتیو تلف شده در سیستم است. با توجه به رابطه ۲۱، توان اکتیو همه ژنراتورها در محدوده مجاز حداکثر و حداقل خود قرار می‌گیرند؛ اما توان اکتیو ژنراتور مرجع در حین پخش بار تغییر می‌کند. اگر طرف راست رابطه ۲۲، یعنی مجموع توان بار و تلفات از طرف چپ معادله یعنی توان اکتیو تولیدی ژنراتورها بیش‌تر باشد. به منظور برابری توان اکتیو همه ژنراتورها به جز ژنراتور مرجع بایستی رابطه زیر برقرار باشد:

$$P_{Gs} \min \geq \sum_{j=1}^{N_l} P_{Li} + P_{loss} - \sum_{i=1}^{N_{lg}} P_{Gi} \quad (23)$$

که در N_{lg} شماره ژنراتورها به جز ژنراتور مرجع و P_{Gs} توان اکتیو ژنراتور مرجع است؛ و اگر سمت راست ۱۳ از سمت چپ کم‌تر باشد، باید مقدار اضافی را با توجه به محدوده قابل تغییر ژنراتورها به گونه‌ای از توان اکتیو همه ژنراتورها به جز ژنراتور مرجع کم شود که رابطه زیر برقرار باشد:

$$\sum_{j=1}^{N_l} P_{Li} + P_{loss} - \sum_{i=1}^{N_{lg}} P_{Gi} \leq P_{Gs} \max \quad (24)$$



شکل ۱۱: توان اکتیو ژنراتورها در حالت اعمال حاشیه ۰/۳- و بدون اعمال حاشیه در سیستم ۹ شینه IEEE

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار، با استفاده از الگوریتم تکاملی ژنتیک به حل مسئله پخش بار بهینه مقید به پایداری سیگنال کوچک با دو تابع هدف کمینه کردن هزینه ژنراتورها و به حداکثر رساندن امنیت اجتماعی مورد انتظار پرداخته شد و مسئله در شرایط احتمالی متفاوت شامل: افزایش بار، قطع خطوط و افزایش حاشیه پایداری بر روی سیستم‌های ۹ و ۲۴ شینه IEEE مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفت و نتایج حاصله نشان می‌دهد که روش استفاده شده برای ایجاد پایداری سیگنال کوچک و برآورده کردن قیود مختلف پخش بار بهینه در شرایط احتمالی متفاوت در سیستم مورد بررسی، مفید و کارآمد است. این روش توانسته است که همه قیود تساوی و نامساوی مسئله از جمله حاشیه پایداری سیگنال کوچک را برآورده کرده و بهینه‌ترین جواب را در همه شرایط احتمالی

- [8] R. Zárate-Miñano, A. J. Conejo and F. Milano, "An OPF methodology to ensure small-signal stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1050 – 1061, August 2011.
- [9] P. Li, H. Wei, B. Li, and Y. Yang, "Eigenvalue-optimization-based optimal power flow with small-signal stability constraints," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, no. 5, pp. 440 – 450, 2013.
- [10] D. M. Anumod and M. Devesh Raj, "PSO based OPF technique ensuring small signal stability," *International Conference on Magnetism, Machines & Drives (AICERA-2014 ICMMD)*.
- [11] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York: McGraw Hill, 1994.
- [12] P. W. Sauer and M. A. Pai, *Power System Dynamics and Stability*, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1998.
- [13] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, 2008.
- [14] R. Ramanujan, *Power System Dynamics Analysis and Design*, PHI Learning, 2010.
- [15] A. Monticelli, M. V. F. Pereira and S. Granville, "Security-constrained optimal power flow with post contingency corrective rescheduling," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 175 – 181, Feb. 1987.
- [16] P. Damrongkulkarnjorn, *Optimal Power Flow with Expected Security Costs*, Ph.D. dissertation, Oklahoma State Univ., Stillwater, 1999.
- [17] J. Condren, T. W. Gedra, and P. Damrongkulkarnjorn, "Optimal power flow with expected security costs," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 541 – 547, May 2006.
- [18] C. N. Ravi and C. C. A. Rajan, "A comparative analysis of differential evolution and genetic algorithm for solving optimal power flow," *Power India Conference, 2012 IEEE Fifth*.
- [19] A. G. Bakirtzis, P. N. Biskas, C. E. Zoumas and V. Petridis, "Optimal power flow by enhanced genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 2, pp. 229 – 236, May 2002.
- [20] D. Devaraj and B. Yegnanarayana, "Genetic-algorithm-based optimal power flow for security enhancement," *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 152, no. 6, pp. 899 – 905, November 2005
- [21] C. Grigg, P. Wong and Others, "The IEEE reliability test system-1996. A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 3, pp. 1010 – 1020, Aug. 1999.
- [22] F. Milano, "An open source power system analysis toolbox," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 1199 – 1206, Aug. 2005.

اگر قبل از پخش بار روابط ۱۴ و ۱۵ برقرار باشند هیچ‌گاه توان ژنراتور مرجع از محدوده مجاز خود تجاوز نمی‌کند.

جدول ۸: محدوده توان‌های اکتیو و راکتیو برای

ژنراتورهای سیستم ۹ شینه IEEE

توان	نام ژنراتور		
	ژنراتور ۱ (G1)	ژنراتور ۲ (G2)	ژنراتور ۳ (G3)
PG max(MW)	۲۵۰	۲۷۰	۲۸۵
PG min(MW)	۲۵	۲۵	۳۵
QG max(Mvar)	۶۵	۴۰	۲۰
QG min(Mvar)	-۵	-۵	-۲۰

مراجع

- [1] H. W. Dommel and W. F. Tinney, "Optimal power flow solutions," *IEEE Trans. PAS.*, vol. 87, no. 10, pp. 1866 – 1876, 1968.
- [2] O. Alsac and B. Stott, "Optimal load flow with steady state security," *IEEE Trans. PAS.*, vol. 93, no. 3, pp. 745 – 751, 1974.
- [۳] مجید نیری‌پور، حسین فلاح‌زاده ابرقوئی و سعید حسنونند «مدیریت توزیع‌شده و سلسله مراتبی ولتاژ در شبکه هوشمند با مشارکت مولدهای پراکنده»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵.
- [۴] عباس ربیعی و مرتضی محمدی «پخش بار بهینه احتمالی مقید به پایداری گذرا: رهیافت برنامه‌ریزی تصادفی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵.
- [5] D. Gan, R. J. Thomas and R. D. Zimmerman, "Stability-constrained optimal power flow," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 535 – 540, May 2000.
- [6] S. K. M. Kodsai and C. A. Canizares, "Application of a stability constrained optimal power flow to tuning of oscillation controls in competitive electricity markets," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 1944 – 1954, November 2007.
- [7] J. Condren and T. W. Gedra, "Expected-security-cost optimal power flow with small signal stability constraints," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 1736 – 1743, 2006.

زیرنویس‌ها

⁵ Redispatching

⁶ Non-linear Semi-Definite Programming

⁷ Particle Swarm Optimization

¹ Optimal Power Flow

² Carpentier

³ Small Signal Stability Constrained Optimal Power Flow

⁴ Security Constrained Optimal Power Flow