

جبران سازی توان راکتیو و کاهش تلفات شبکه انتقال توسط مکان یابی بهینه ادوات FACTS سری و موازی با روش فازی - تکاملی

علی متقی^(۱) - محسن علیزاده^(۲) - محمدعلی عباسیان^(۳)

- (۱) کارشناسی ارشد - گروه برق قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران
(۲) استادیار - گروه قدرت، دانشکده برق، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهر ری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
(۳) استادیار - گروه قدرت، دانشکده برق، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۶/۲۳

خلاصه: با گسترش روز افزون مصرف انرژی در دنیا، توسعه شبکه‌های قدرت امری ضروری است. اما ایجاد خطوط انتقالی جدید مستلزم صرف زمان و هزینه‌های گزاف بوده و لذا در صورت امکان استفاده از همان خطوط با ظرفیت انتقال بالاتر بسیار مقرون به صرفه می‌باشد. در همین راستا در سال‌های اخیر با معرفی ادوات FACTS به شبکه‌های قدرت، استفاده از آن‌ها در کشورهای صنعتی جهت افزایش ظرفیت خطوط انتقال متداول شده است. در این مقاله با تنظیم بهینه منابع توان راکتیو موجود در شبکه قدرت همراه با ادوات FACTS سری و موازی شامل (SVC، TCSC) به منظور هماهنگی آنها با یکدیگر و با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مثل ازدحام ذرات به کاهش تلفات توان اکتیو، هزینه‌های عملیاتی سیستم از جمله هزینه ادوات FACTS و تراکم در شبکه‌های انتقال کمک می‌شود و در پایان با شبیه‌سازی شبکه تست ۳۰ باسه IEEE و قرار دادن ادوات FACTS در آن این امر اثبات می‌شود.

کلمات کلیدی: ادوات FACTS، الگوریتم‌های تکاملی، بهینه‌سازی راکتیو، SVC، TCSC.

Reactive Power Compensation and Reducing Network Transmission Losses by Optimal Placement of Parallel and Series FACTS Devices with Fuzzy-Evolutionary Method

Ali Motaghi⁽¹⁾ – Mohsen Alizadeh⁽²⁾ – Mohammad Ali Abbasian⁽³⁾

- (1) MSc – Dept. of Power Engineering, Khorasgan Branch, Islamic Azad University, Esfahan, Iran
ali.motaghi@gmail.com
(2) Assistant Professor - Electrical Engineering, Islamic Azad University, Yadgar Imam Branch
m.alizadeh.b@gmail.com
(3) Assistant Professor - Electrical Engineering, Islamic Azad University, Esfahan, Iran
abbasian@gmail.com

Abstract: The growing use of energy in the world necessitates the development of power networks. However, developing new transmission lines requires a great deal of time and cost, so it will be very cost-effective to use the same lines with higher transmission capacities, if possible. In this regard, in recent years, by introducing of FACTS to power networks, their use in industrialized countries has become commonplace to increase the capacity of transmission lines. In this paper, the optimal adjustment of reactive power sources in the power network with FACTS series and parallel devices (TCSC, SVC) in order to coordinate them with each other and using fuzzy logic based on evolutionary algorithms such as particle swarm to reduce active power losses, operating system costs including the cost of FACTS devices and congestion in transmission networks. Finally, this will be proven by simulating the IEEE 30-Bus test network and placing FACTS devices on it.

Index Terms: FACTS devices, evolutionary algorithms, reactive optimization, SVC, TCSC

نویسنده مسئول: محسن علیزاده، استادیار - گروه قدرت، دانشکده برق، واحد یادگار امام خمینی (ره) شهر ری، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،
m.alizadeh.b@gmail.com

۱- مقدمه

استفاده از روش فازی- تکاملی به بهینه‌سازی توان راکتیو و کاهش تلفات شبکه انتقال توسط مکان‌یابی بهینه‌ی ادوات FACTS سری و موازی می‌پردازیم. هدف اصلی این مقاله پیدا کردن پارامترهای بهینه از جمله توان راکتیو خروجی ژنراتورها، تپ مناسب ترانسفورماتورها و ظرفیت و مکان نصب ادوات FACTS سری موازی می‌باشد. همچنین در این مقاله دو روش مختلف برای تعیین پارامترهای بهینه ذکر شده به کار برده شده است. در روش اول مکان نصب این ادوات توسط یک منطق فازی و به کمک آنالیز حساسیت تعیین شده و در مرحله بعد توسط الگوریتم اجتماع ذرات ظرفیت بهینه تعیین می‌شود. در روش دوم اجازه داده می‌شود تا مکان بهینه ادوات FACTS توسط الگوریتم اجتماع ذرات تعیین شود. در این روش نقطه اولیه ذرات در الگوریتم بهینه‌سازی به منظور کاهش زمان محاسبات توسط منطق فازی و آنالیز حساسیت تعیین می‌شود. به این روش از طرفی مکان احتمالی توسط روش فازی که در پژوهش‌هایی قبلی می‌باشد به الگوریتم اجتماع ذرات داده می‌شود تا فضای جستجو کمتری را پیش رو داشته باشد و حجم محاسبات و مدت زمان اجرای برنامه کاهش یابد و از طرف دیگر با حدس اولیه مکان ادوات، نقطه بهینه تعیین شده توسط الگوریتم اجتماع ذرات به مراتب مطمئن‌تر از حالتی است که مکان نصب ادوات فقط توسط منطق فازی و یا فقط توسط اجتماع ذرات انجام شود.

ادامه مقاله به صورت زیر بخش‌بندی شده است. در بخش دوم مدل‌سازی ادوات FACTS ارائه می‌شود. در این بخش ادوات SVC و TCSC مدل‌سازی می‌شوند. در بخش سوم تابع هزینه و روابط ریاضی برای تعریف تابع هدف بیان می‌شود. در بخش چهارم پارامترهای الگوریتم مورد استفاده در این مقاله یعنی ازدحام ذرات ارائه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در بخش پنجم ارائه می‌شود. در پایان نتیجه و پیشنهادات در بخش ششم ارائه می‌شود.

۲- مدل‌سازی ادوات FACTS

با توجه به اطلاعات موجود در منبع [۶] کنترل‌کننده‌های FACTS بر حسب نحوه قرارگیری در شبکه انتقال به سه دسته تقسیم می‌شوند و برای هر یک از انواع مورد استفاده در این مقاله مدل مناسب ارائه خواهد شد.

۱. عناصر FACTS سری: این عناصر به صورت سری در خط انتقال قرار می‌گیرند و معمولاً با تغییر راکتانس خط به تولید یا جذب توان راکتیو می‌پردازند. پرکاربردترین عضو این خانواده TCSC می‌باشد.
۲. عناصر FACTS موازی: این عناصر به صورت موازی در شبکه قرار می‌گیرند و معمولاً به یکی از شین‌های شبکه متصل شده با جذب یا تزریق توان راکتیو به شبکه ولتاژ نقطه اتصال را کنترل می‌کند. معروف‌ترین عضو این مجموعه SVC نام دارد.
۳. عناصر FACTS سری-موازی: این عناصر مجموعه‌ای از دو دسته قبلی می‌باشند و مهم‌ترین عضو این خانواده UPFC می‌باشد که از نظر عملکرد بسیار قوی بوده و تنها محدودیت آن هزینه بالای آن است.

۱-۲- مدل SVC

SVC از یک TCR (امپدانس راکتیو به اندازه X_L به همراه یک کلید تایریستوری دو جهتی) موازی با یک بانک خازنی X_C تشکیل شده است

یکی از مهمترین دغدغه‌های امروزه بشر، تأمین انرژی است. انرژی از ارکان اصلی اقتصاد به شمار می‌آید و در این میان برق به عنوان عالی‌ترین نوع انرژی جایگاه ویژه‌ای دارد. امروزه با افزایش تقاضای مصرف توان و محدودیت‌های احداث خطوط جدید از یک طرف تراکم خطوط شبکه و از طرف دیگر تلفات توان شبکه رو به افزایش است. از این رو باید امکانات موجود در شبکه تا حد امکان تلفات و تراکم خطوط شبکه را کاهش داد. با کنترل بهینه پارامترهای منابع تزریق توان راکتیو در نقاط ضعیف شبکه، پروفیل ولتاژ شبکه بهبود می‌یابد که این خود سبب کاهش تلفات و بهبود عملکرد گذرا و حالت مانای شبکه می‌شود. با پیشرفت‌های اخیر در ادوات FACTS، حال این گزینه موجود است که از این تجهیزات به منظور بهینه کردن توان راکتیو مصرفی شبکه استفاده کرد. مفهوم اولیه ادوات FACTS توسط هینگورانی [۱] ارائه شد. ادوات FACTS تجهیزاتی با قابلیت کنترل پارامترهای شبکه انتقال هستند. Meikandasivam و همکاران از TCSC برای افزایش ظرفیت خطوط انتقال شبکه استفاده کردند. TCSC با کار در دو حالت راکتوری و خازنی سبب تغییر در امپدانس خطوط شبکه شده و از این طریق ظرفیت خطوط تغییر ایجاد می‌کند [۲]. برنامه‌ریزی توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای شبکه به منظور مدیریت تراکم در تحقیق و همکاران کومار ارائه شده است [۳]. در این روش قیودی همچون پایداری ولتاژ و محدودیت ظرفیت خطوط شبکه در نظر گرفته شده است. یک روش جدید برای حل چند هدفه مسئله توزیع توان راکتیو بهینه شبکه با اهداف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ در کار مندل ارائه شده است [۴]. جایابی بهینه و مقادیر بهینه ادوات FACTS با استفاده از الگوریتم ژنتیک در مقاله قهرمانی ارائه شده است [۵]. در این روش به منظور سهولت استفاده کاربر از یک رابط گرافیکی استفاده شده است. در تحقیقات Kumar به منظور حل مسئله پخش بار بهینه و تنظیم بهینه پارامترهای تأییدگذار شبکه الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات و فازی استفاده شده است [۶]. بهینه‌سازی توان راکتیو روزانه شبکه به منظور بهبود پایداری ولتاژ در کار Zhao ارائه شده است [۷]. در مرجع [۸] برای مکان‌یابی بهینه ادوات FACTS الگوریتم PSO به کار رفته است. در مرجع [۹] به منظور بهینه‌سازی توان راکتیوی تزریقی توسط ادوات FACTS شبکه از الگوریتم جستجوی گرانشی استفاده شده است که تابع هدف مسئله نیز شامل تلفات و انحرافات ولتاژ باس‌های شبکه است. از الگوریتم جستجوی ارگانیسم‌های همزیست برای حل مسئله پخش بار بهینه منابع تولید توان و ادوات FACTS شبکه در مقاله Prasad استفاده شده است [۱۰]. در مرجع [۱۰] توابع هدف در نظر گرفته شده شامل هزینه سوخت واحدهای تولیدی، تلفات توان خطوط شبکه و هزینه‌های محیطی و اقتصادی می‌باشد.

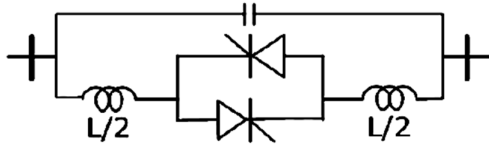
جهت استفاده کامل از توانایی‌های عناصر FACTS لازم است تا بهترین مکان برای این عناصر انتخاب شود. برای این منظور در برخی مقالات از پخش بار بهینه با هدف افزایش سطح بارگذاری یا کاهش تلفات استفاده شده است [۱۱]. از روش هیبرید TS^2/SA^3 و به منظور کمینه‌سازی هزینه‌های تولید این عمل انجام گرفته است [۱۲]. در این مقاله با

$$X_{ij} = X_{line} + X_{TCSC} \quad (4)$$

برای مدل‌سازی بهتر TCSC در مسائل بهینه‌سازی آن را به صورت رابطه (۵) تعریف می‌کنند.

$$X_{TCSC} = r_{TCSC} \times X_{line} \quad (5)$$

که در آن r فاکتور جبران‌سازی TCSC بوده و بسته به اینکه در کدام نقطه از خط قرار گیرد متفاوت خواهد بود رنج آن بین $0/7$ تا $0/2$ قرار دارد (شکل ۲) [۷].

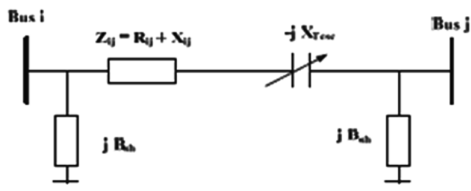


شکل (۳): مدار معادل TCSC [۱]
Fig. (3): TCSC equivalent circuit

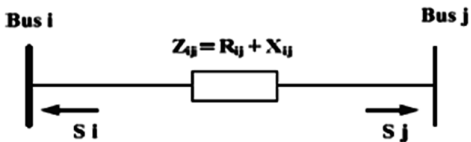
مدل خط انتقال به همراه یک TCSC در شکل (۳) نشان داده شده است. در حالت ماندگار شبکه TCSC را می‌توان با یک راکتانس - jX_{TCSC} مدل کرد. TCSC با تغییر در راکتانس شبکه می‌تواند هم به صورت راکتوری و هم به صورت خازنی عمل کند. با نصب یک TCSC که در حالت خازنی قرار دارد ولتاژ شبکه بهبود پیدا خواهد کرد (شکل ۴). ادمیتانس شبکه در حضور TCSC به صورت زیر معرفی می‌گردد.

$$G_{TCSC} + jB_{TCSC} = \frac{1}{R + j(X_{line} - X_{TCSC})} \quad (6)$$

که R و X_{line} به ترتیب مقاومت و راکتانس خط بدون TCSC هستند و X_{TCSC} نیز راکتانس مربوط به TCSC است.



شکل (۴): مدل خط انتقال به همراه یک TCSC
Fig. (4): Transmission Line Model along with a TCSC



شکل (۵): مدل تزریقی TCSC
Fig. (5): TCSC injection model

در نهایت لازم به یادآوری است که مدل‌های استفاده شده در شبیه‌سازی در این مقاله همگی ایده‌آل هستند.

۳- تابع هدف

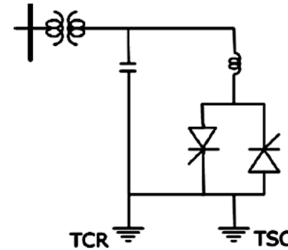
تابع هدف تابعی برای بررسی میزان برازندگی افراد در برنامه می‌باشد که با توجه به هدف بهینه‌سازی توسط کاربر تعریف می‌شود و مهمترین قسمت الگوریتم ژنتیک و اساس کار برنامه بهینه‌سازی می‌باشد. در این مقاله چهار

و در مدار به عنوان یک راکتانس متغیر موازی با جذب یا تولید توان راکتیو ولتاژ نقطه اتصال خود به شبکه را تنظیم کرده و کنترل زاویه آتش تایریستور SVC، را قادر به پاسخ‌گویی تقریباً آنی کرده است (شکل ۱). قسمت قابل کنترل راکتانس TCR، X_V بوده که از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$X_V = \frac{\pi}{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha} \quad (1)$$

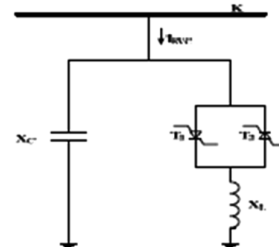
که در آن α زاویه آتش تایریستور می‌باشد. سوسپتانس مؤثر B در TCR به صورت معادله (۲) است.

$$B = \frac{X_V + X_C}{X_V X_C} \quad (2)$$



شکل (۱): شمای مداری FC-TCR (SVC) [۱]
Fig. (1): FC-TCR (SVC) Circuit diagram

SVC می‌تواند در هر دو حالت خازنی و سلفی مورد استفاده قرار گیرد. SVC یا توان راکتیو به باس تزریق می‌کند که سبب افزایش دامنه ولتاژ آن باس شده یا توان راکتیو از باس جذب می‌کند که سبب کاهش دامنه ولتاژ آن می‌گردد. از این رو با هموار کردن پروفیل ولتاژ شبکه تلفات شبکه را کاهش می‌دهد (شکل ۵).



شکل (۲): مدل سوسپتانس متغیر SVC [۱]
Fig. (2): SVC susceptance model

۲-۲- مدل TCSC

TCSC به عنوان یک راکتانس قابل کنترل تزریق شده به خط انتقال عمل می‌کند. TCSC از یک شاخه حاوی یک بانک خازنی و شاخه‌ای موازی با آن شامل تایریستور کنترل شده و بانک سلفی تشکیل شده که با کنترل شاخه سلفی به اصلاح راکتانس خط می‌پردازد. راکتانس TCSC از رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$X_{TCSC} = \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{\pi} [2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha] - X_L} \quad (3)$$

که در آن α زاویه آتش تایریستور X_C ، راکتانس خازنی و X_L راکتانس سلفی می‌باشد. TCSC به صورت سری در خط قرار می‌گیرد و طبق رابطه (۴) با راکتانس خط در ارتباط است.

شبکه شامل هزینه TCSCها و SVCهای شبکه بوده که به ترتیب در معادلات (۲) و (۳) آمده‌اند.

هزینه‌ی بهره‌برداری از ادوات FACTS و هزینه‌ی تلفات شبکه با هم ترکیب شده و تابع هدف اصلی مسئله را تشکیل می‌دهند که باید در حضور ادوات FACTS با تنظیم توان راکتیو عبوری از خطوط و تنظیم سایر پارامترهای تأثیرگذار از جمله میزان تب ترانسفورماتورهای شبکه، توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای شبکه و اضافه کردن خازن‌های موازی در باس‌های ضعیف شبکه تلفات توان اکتیو شبکه را کاهش داد.

مسئله جایابی بهینه‌ی ادوات FACTS را می‌توان به صورت زیر فرموله کرد:

$$C(T) = C_1(E) + C_2(F) + J_v + J_p \quad (13)$$

که در آن $C_1(E)$ هزینه تلفات توان، $C_2(F)$ هزینه بهره‌برداری از ادوات FACTS شبکه و $C(T)$ تابع هزینه نهایی شبکه در واحد پرونیت است. در طی جایابی بهینه‌ی ادوات FACTS قیودی که باید رعایت گردند به قرار زیر هستند.

$$\begin{aligned} P_{ni}^{\min} &\leq P_{ni} \leq P_{ni}^{\max} \\ Q_{ni}^{\min} &\leq Q_{ni} \leq Q_{ni}^{\max} \\ V_{ni}^{\min} &\leq V_{ni} \leq V_{ni}^{\max} \end{aligned} \quad (14)$$

که در آن P_i ، Q_{ni} و V_{ni} به ترتیب توان اکتیو، راکتیو و دامنه ولتاژ باس i ام شبکه هستند و اندیس \min و \max این متغیرها نیز به ترتیب بیانگر ماکزیمم و مینیمم مقدار مجاز آن‌ها است.

۴- الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم PSO شبیه‌ساز رفتار اجتماعی پرندگان است. در این الگوریتم هر پرنده یک جواب ممکن در فضای جستجوی مسئله می‌باشد که آن را ذره می‌نامند. در ابتدا الگوریتم توسط گروهی از پرندگان که به صورت تصادفی در فضای مسئله تولید شده‌اند مقدار دهی می‌شود و سپس جستجو برای رسیدن به بهترین جواب آغاز می‌گردد. در هر مرحله از تکرار الگوریتم ذره به سمت موقعیت بهتر جابه جا می‌شود. موقعیت بعدی هر ذره با توجه به دو مقدار به دست می‌آید. اولین مقدار بهترین موقعیتی است که ذره تاکنون داشته است (p_{best}) و دومین مقدار بهترین موقعیتی است که تا به حال توسط کل ذرات آن اجتماع به دست آمده است (g_{best}). این فرایند تا زمان رسیدن به شرط خاتمه الگوریتم ادامه خواهد داشت.

با توجه به مقادیر p_{best} و g_{best} هر ذره از روابط زیر برای تعیین موقعیت بعدی خود استفاده می‌کند:

$$\begin{aligned} V_{ij}(t+1) &= wV_{ij}(t) + c_1r_1(p_{best} - X_{ij}(t)) + c_2r_2(g_{best} - X_{ij}(t)) \\ X_{ij}(t+1) &= X_{ij}(t) + V_{ij}(t+1) \end{aligned} \quad (15)$$

ثابت‌های C_1 و C_2 به ترتیب پارامترهای یادگیری برای p_{best} و g_{best} هستند که معمولاً هر دو برابر ۲ در نظر گرفته می‌شوند. r_1 و r_2 اعداد تصادفی در محدوده [0 1] هستند. $X_{ij}(t)$ موقعیت کنونی ذره، $V_{ij}(t)$ سرعت حرکت ذره و W ثابتی است که لختی حرکت ذرات را کنترل

هدف به طور همزمان در نظر گرفته شده است که عبارتند از بهبود شاخص‌های امنیت شبکه، شاخص عملکرد توان با در نظر گرفتن تلفات خط انتقال و هزینه‌های تولید انرژی و بهره‌برداری از ادوات FACTS.

۳-۱- پروفیل ولتاژ

برای تعیین امنیت یک سیستم انتقال دو شاخص به صورت توابع (۷) و (۸) تعریف می‌شود [۸].

$$J_v = \sum_i W_i |V_i - V_{iref}|^2 \quad (7)$$

۳-۲- امنیت شبکه

$$J_p = \sum_j W_j \left(\frac{S_j}{S_{j,max}} \right)^2 \quad (8)$$

که در آن V_i و W_i ولتاژ اعمالی و فاکتور توزین متحد i مین باس و S_j و W_j توان ظاهری و فاکتور توزین متحد j مین خط هستند. توان حقیقی عبور از یک خط انتقال به کمک رابطه زیر فرمول گذاری می‌شود.

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{X_{ij}} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (9)$$

که در آن P_{ij} ، توان عبوری، V_i و V_j مقدار ولتاژ باس‌های فرستنده و گیرنده توان X_{ij} راکتانس خط و دو پارامتر دیگر زوایای فاز بین باس‌های فرستنده و گیرنده می‌باشند.

۳-۳- تلفات شبکه

تلفات در سیستم‌های انتقال امری غیر قابل اجتناب بوده که باعث محدود شدن توان انتقالی در خطوط می‌شود و همواره هزینه‌هایی اضافی به شبکه تحمیل می‌کند لذا کاهش هر چه بیشتر آن همواره هدف طراحان خطوط انتقال می‌باشد. در این مقاله تلفات کلی شبکه توسط پخش بار به روش نیوتن-رافسون به دست آمده و به عنوان یکی از فاکتورهای مهم در تابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹].

۳-۴- تابع هزینه و فرموله کردن مسئله

هزینه TCSCها و SVCها به صورت زیر محاسبه می‌گردند.

۳-۴-۱- هزینه TCSC:

$$C_{TCSC} = 0.0015 (TCSC_{value})^2 - 0.7130 (TCSC_{value}) + 153.75 \text{ (US/k Var)} \quad (10)$$

۳-۴-۲- هزینه SVC:

$$C_{SVC} = 0.0003 (SVC_{value})^2 - 0.3051 (SVC_{value}) + 127.3875 \text{ (US/k Var)} \quad (11)$$

که $TCSC_{value}$ و SVC_{value} به ترتیب مقادیر قدرت بهره‌برداری این ادوات FACTS بر مبنای مگاوات هستند.

هزینه تلفات نیز طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$C_{loss} = P_{loss} \times EC \times 8760 \text{ ($) } \quad (12)$$

که P_{loss} تلفات توان شبکه بر حسب کیلو وات، EC هزینه انرژی بر حسب دلار بر کیلووات ساعت C_{loss} هزینه تلفات بر حسب دلار است.

هدف اصلی این پژوهش جایابی بهینه ادوات ذکر شده با رعایت قیود شبکه به منظور کاهش هزینه تلفات و هزینه بهره‌برداری در شرایط بارگذاری مختلف شبکه است. هزینه بهره‌برداری ادوات FACTS

می‌کند. در این مقاله مقادیر این پارامترها به صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$W_{\max}=0.8; W_{\min}=2; C_1=C_2=2$$

$$n_{\text{swarm}}=50; \text{iteration}=500;$$

۵- نتایج شبیه سازی

هدف اصلی این مقاله به دو قسمت تقسیم می‌شود. در وهله اول تعیین مقادیر بهینه عناصر موثر در تولید توان راکتیو و پروفیل ولتاژ شبکه هستند، که شامل توان راکتیو تولیدی توسط ژنراتورهای موجود در شبکه، تپ مناسب ترانس‌های موجود در شبکه می‌باشند. هدف دیگر در مرحله دوم جابجایی و تعیین ظرفیت بهینه تجهیزات ادوات FACTS و TCSC به منظور کاهش تلفات توان و هزینه‌های بهره برداری از شبکه می‌باشد. به منظور تنظیم بهینه پارامترهای شبکه و ادوات FACTS اشاره شده، یک بار از ترکیب منطق فازی با الگوریتم ازدحام ذرات و یکبار از الگوریتم ازدحام ذرات به تنهایی استفاده شده است. در روش اول TCSCها در خطوطی نصب می‌شود که بیشترین مقدار توان راکتیو را از خود عبور می‌دهند و مکان نصب SVCها نیز با انجام آنالیز حساسیت تلفات به ولتاژ باس‌های شبکه از طریق آنالیز مدال و توابع عضویت فازی مشخص می‌شوند که این کار در مرجع [۲۳] پیشنهاد شده است. در روش دوم که روش پیشنهادی این مقاله است، تعیین مکان و ظرفیت TCSC و SVC توسط الگوریتم ازدحام ذرات انجام می‌شود. برای اثبات عملی بودن بحث‌های مطرح شده سیستم تست ۳۰ باس IEEE [۲۳] را در نرم‌افزار Matlab و بسته Matpower شبیه‌سازی می‌شود. این سیستم همانطور که در شکل نشان داده شده است از ۶ ژنراتور تشکیل شده که اطلاعات این ژنراتورها در جدول پ-۱ آورده شده است. فلوجارت پیشنهادی برای شبیه‌سازی روش ارائه شده در این مقاله در شکل ۶ نشان داده شده است.

۵-۱- تعیین پارامترهای بهینه شبکه با استفاده از روش فازی و

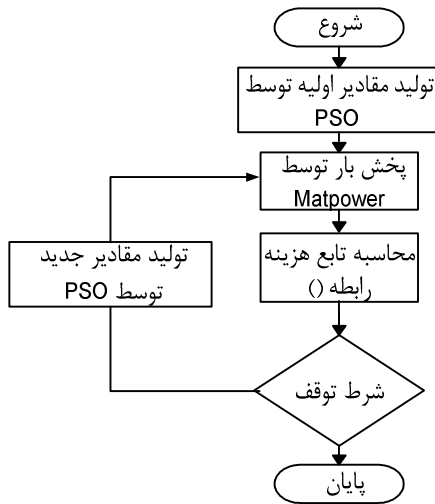
الگوریتم ازدحام ذرات

TCSC در خطوطی نصب می‌گردد که بیشترین توان راکتیو را از خود عبور می‌دهند و SVC نیز در باس‌هایی از شبکه نصب می‌گردد که بیشترین تأثیر را بر روی کاهش تلفات شبکه داشته باشند. در بیشتر مقالات ارائه شده برای محاسبه حساسیت تلفات به ولتاژ باس‌های مختلف شبکه از آنالیز مدال استفاده شده است [۱۲]. در این مقاله علاوه بر آنالیز مدال، منطق فازی نیز به کار برده شده است. لازم به یاد آوری این کار توسط مرجع [۱۲] انجام شده است و استفاده از آن در این بخش فقط جهت مقایسه می‌باشد.

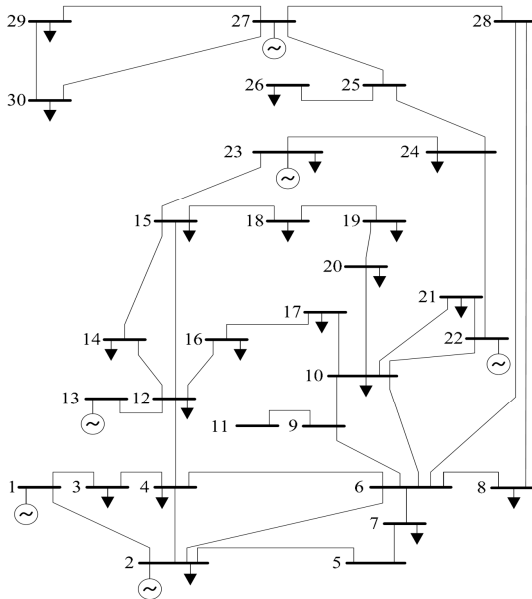
۵-۱-۱- مشخص کردن باس‌های ضعیف شبکه با استفاده از

منطق فازی

روش ارائه شده در این بخش در مرجع [۱۲] بر روی شبکه ۳۰ باس استاندارد IEEE پیاده‌سازی و تست شده است. ضریب بار در نظر گرفته شده برای شبکه ۰/۸۵ است [۱۳].



شکل (۶): فلوجارت شبیه‌سازی
Fig. (6): Simulation flowchart



شکل (۷): دیاگرام تک خطی سیستم تست ۳۰ شینه [۱۱]
Fig. (7): Single line diagram of the IEEE 30-bus test system

تلفات انتقال در یک سیستم قدرت به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۱۴].

$$P_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^n g_k [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i^* V_j^* \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (16)$$

که g_k رسانایی خط k ام، V_i دامنه ولتاژ باس i ام و δ_i زاویه ولتاژ باس i ام، n تعداد خطوط شبکه و P_{loss} تلفات کل شبکه است.

تغییرات تلفات ناشی از تغییر در دامنه ولتاژ باس‌های شبکه نیز به صورت زیر می‌باشد:

$$[\Delta P_{\text{loss}}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_1} & \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_2} & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_n} \end{bmatrix} [\Delta V_1 \Delta V_2 \dots \Delta V_n]^T \quad (17)$$

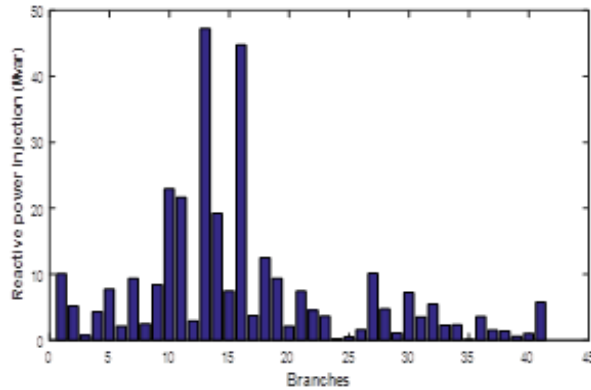
به عبارت دیگر

$$[\Delta P_{\text{loss}}] = [C_1 C_2 \dots C_n] \cdot [\Delta V_1 \Delta V_2 \dots \Delta V_n] = [C] \cdot [\Delta V]^T$$

Table (1): System variables in the proposed method in this paper

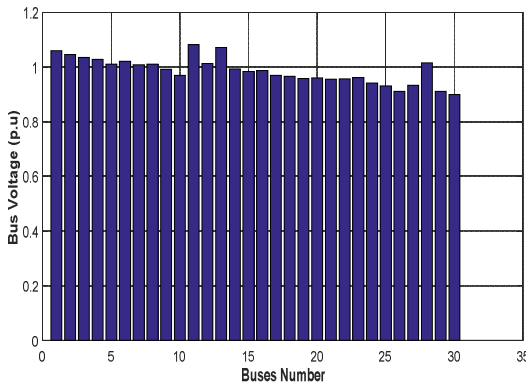
جدول (۱): متغیرهای سیستم در روش پیشنهادی در این مقاله

تپ ترانس	توان راکتیو ژنراتور	TCSC	SVC	متغیرهای سناریو اول (یک عدد SVC و یک عدد TCSC)
۴	۶	۲	۲	متغیرهای سناریو دوم (دو عدد SVC و دو عدد TCSC)
۴	۶	۴	۴	متغیرهای سناریو سوم (سه عدد SVC و سه عدد TCSC)



شکل (۸): توان راکتیو عبوری از خطوط شبکه در بارگذاری ۱۰۰ درصد توان راکتیو نامی

Fig. (8): Reactive power transmission of network lines in 100% loading rated reactive power



شکل (۹): پروفیل ولتاژ شبکه ۳۰ باسه در بارگیری نامی

Fig. (9): Voltage profile of IEEE 30-bus in rated loading

۵-۲- تعیین پارامترهای بهینه شبکه با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات

در این بخش برای تعیین پارامترهای بهینه شبکه سه سناریو به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود که در ادامه نتایج آنها ارائه می‌شود. لازم به یادآوری است که همانطور که گفته شد، نوآوری کار انجام شده در این مقاله جایابی بهینه ادوات توسط الگوریتم به طور مستقیم می‌باشد، که در این قسمت برای سناریوهای مختلف آورده شده است.

که $C_i = \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V_i}$ حساسیت تلفات نسبت به ولتاژ باس i ام است.

دسته‌های فازی برای خطی کردن این تابع هدف به صورت زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\begin{aligned} F_1 &= C_1 \cdot \Delta V_1 \\ F_2 &= C_2 \cdot \Delta V_2 \\ F_n &= C_n \cdot \Delta V_n \end{aligned} \quad (18)$$

که $i=1,2,3,\dots,n$ معرف باس مورد نظر است.

پس اگر C_i ها منفی و ΔV_i بیشترین مقدار مثبت ممکن خود را اختیار کنند. آنگاه F_i ها منفی می‌شوند و در نتیجه بیشترین کاهش در تلفات پیش خواهد آمد.

مقدار زیاد C_i برای باس i ام نشانگر حساسیت بالای تلفات به ولتاژ آن باس است که برای کاهش تلفات شبکه باید ولتاژ آن باس به طریقی اصلاح گردد. حال از منطق فازی برای مشخص کردن مقادیر حساسیت باس‌های مختلف شبکه استفاده می‌شود. اگر بیشترین مقدار ممکن منفی F_i برابر E_{mi} در نظر گرفته شود تابع عضویت فازی به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$\mu_i(F_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } F_i \leq E_{mi} \\ F_i/E_{mi} & \text{if } E_{mi} < F_i < 0 \\ 0 & \text{if } 0 \leq F_i \end{cases} \quad (19)$$

مقدار حساسیت باس‌های مختلف شبکه طبق تابع عضویت نشان داده شده در نمودار ۲ محاسبه می‌گردد.

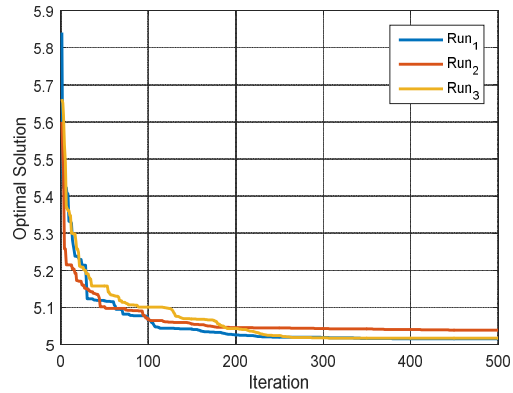
برای انتخاب خطوط مناسب جهت نصب TCSC از مشاهده توان راکتیو عبوری از خطوط شبکه استفاده می‌شود به گونه‌ای که خطوطی که بیشترین مقدار توان راکتیو را حمل می‌کنند از اولویت بالاتری نسبت به بقیه خطوط برای نصب TCSC برخوردار هستند. در روش‌های فازی- ازدحام ذرات باس‌هایی با بیشترین مقدار عضویت فازی به عنوان باس‌های کاندید برای نصب SVC انتخاب می‌شوند اما در روش‌های عادی ازدحام ذرات پس از آنالیز مدال شبکه باس‌های کاندید مشخص می‌گردند.

شکل ۱ توان راکتیو عبوری از خطوط شبکه را برای بارگیری ۱۰۰ درصد توان راکتیو را نشان می‌دهد. طبق این شکل به ترتیب خطوط ۱۳، ۱۶، ۱۰، ۱۱، ۱۴، ۱۸ بیشترین توان راکتیو را از خود عبور می‌دهند. از میان خطوطی که به صورت مستقیم به هم وصل شده‌اند باید خطی که بیشترین توان راکتیو را عبور می‌دهد انتخاب کرد. از این رو از میان خطوط ۱۰ و ۱۱ خط ۱۰ انتخاب می‌شود. پس خطوط کاندید برای نصب TCSC عبارتند از خطوط ۱۰، ۱۳، ۱۴، ۱۶، ۱۸. قابل ذکر است در مرجع [۱۲] بر اساس نتایج شبیه‌سازی فقط ۴ خط به عنوان کاندید نصب TCSC معرفی شده‌اند.

انتخاب مکان‌های کاندید SVC بر اساس منطق فازی مشابه روش گفته شده در مرجع [۱۲]، [۱۳] برای شبکه ۳۰ باسه انجام گرفته و نتایج بدین صورت است که باس‌های ۴، ۸، ۱۸، ۲۵ برای نصب SVC انتخاب شده‌اند. در صورتی که در روش آنالیز حساسیت باس‌های کاندید برای نصب SVC پس از آنالیز مدال شبکه به دست می‌آیند که عبارتند از باس‌های ۲۱، ۷، ۱۷ و ۱۵.

۵-۲-۱- سناریوی اول

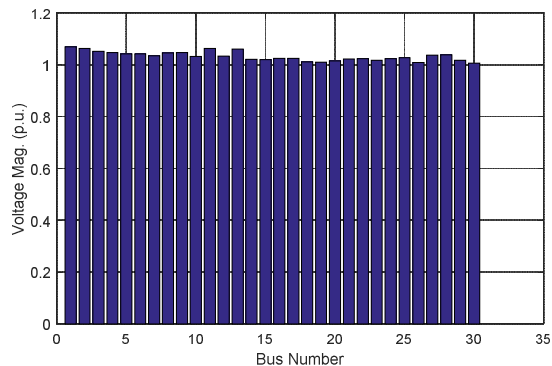
در این سناریو همانطور که قبلاً گفته شد با در نظر گرفتن یک عدد TCSC و SVC جایابی و تعیین ظرفیت بهینه این ادوات به کمک الگوریتم اجتماع ذرات انجام می‌شود.



شکل (۱۰): نمودار همگرایی تابع هزینه در نظر گرفته شده در سناریوی اول برای سه بار اجرای متوالی

Fig. (10): The convergence diagram of the considered cost function in the first scenario for three consecutive implementation

حداقل اندازه ولتاژ در باس ۲۶ به مقدار ۱/۰۰۶ پریونیت و حداکثر اندازه ولتاژ در باس ۱ به مقدار ۱/۰۶۷ پریونیت اتفاق افتاده است. همچنین حداکثر تلفات توان اکتیو و راکتیو در خط ۲-۵ به ترتیب برابر ۰/۸۷ مگاوات و ۳/۶۶ مگاوار می‌باشد (جدول ۳). در انتها با توجه به خروجی برنامه مقادیر بهینه متغیرهای تعریف شده در بخش قبل (۱۴ متغیر) برای سناریوی اول به صورت زیر به دست آمده است.

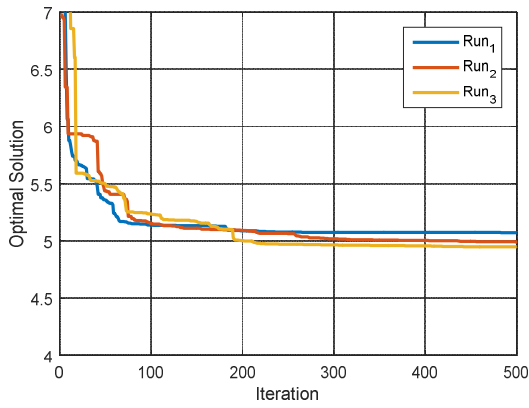


شکل (۱۱): پروفیل ولتاژ شبکه ۳۰ باسه در بارگیری نامی در سناریوی اول
Fig. (11): Voltage profile of IEEE 30-bus in rated loading in the first scenario

$x_{opt} = 1.0689 \ 1.0627 \ 1.0423 \ 1.0459 \ 1.0632 \ 1.0603 \ 0.9824 \ 0.9692 \ 1.0275 \ 0.9764 \ 12.3206 \ 24.1961 \ 22.5545 \ 0.3373$

۵-۲-۲- سناریوی دوم

در این سناریو با در نظر گرفتن دو عدد TCSC و SVC جایابی و تعیین ظرفیت بهینه این ادوات به کمک الگوریتم اجتماع ذرات انجام می‌شود (نمودار ۴).

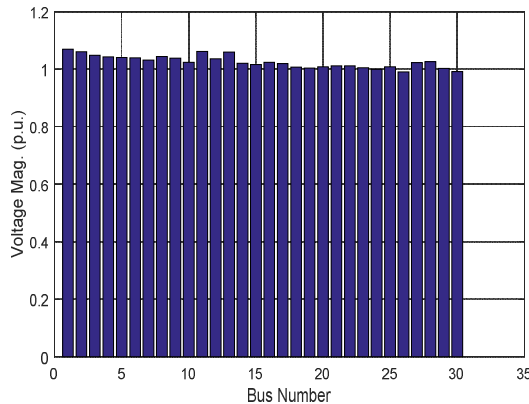


شکل (۱۲): نمودار همگرایی تابع هزینه در نظر گرفته شده برای سه بار اجرای متوالی در سناریوی دوم

Fig. (12): The convergence diagram of the considered cost function in the second scenario for three consecutive implementation

حداقل اندازه ولتاژ در باس ۲۴ به مقدار ۱/۰۰۳ پریونیت و حداکثر اندازه ولتاژ در باس ۱۱ به مقدار ۱/۰۶۸ پریونیت اتفاق افتاده است. همچنین حداکثر تلفات توان اکتیو و راکتیو به ترتیب در خطوط ۲-۶ و ۲-۵ برابر ۰/۹۹ مگاوات و ۳/۷۲ مگاوار می‌باشد (جدول ۴).

در انتها با توجه به خروجی برنامه مقادیر بهینه متغیرهای تعریف شده برای سناریوی دوم (۱۸ متغیر) به صورت زیر به دست آمده است.



شکل (۱۳): پروفیل ولتاژ شبکه ۳۰ باسه در بارگیری نامی در سناریوی دوم
Fig. (13): Voltage profile of IEEE 30-bus in rated loading in the second scenario

$x_{opt} = 1.0674 \ 1.0604 \ 1.0404 \ 1.0436 \ 1.0623 \ 1.0597 \ 0.9970 \ 0.9500 \ 0.9988 \ 0.9689 \ 13.8507 \ 1.8177 \ 14.7868 \ 23.6582 \ 29.2318 \ 20.4011 \ 0 \ 0.5521$

۵-۲-۳- سناریوی سوم

در این سناریو با در نظر گرفتن سه عدد TCSC و SVC جایابی و تعیین ظرفیت بهینه این ادوات به کمک الگوریتم اجتماع ذرات انجام می‌شود. حداکثر اندازه ولتاژ در باس ۲۶ به مقدار ۱/۰۰۷ پریونیت و حداکثر اندازه ولتاژ در باس ۲ به مقدار ۱/۰۶۵ پریونیت اتفاق افتاده است. همچنین حداکثر تلفات توان اکتیو و راکتیو به ترتیب در خطوط ۲-۵ و ۱-۲ برابر ۰/۸۴ مگاوات و ۱۵/۴۳ مگاوار می‌باشد.

۶- نتیجه گیری

با توجه به نتایج شبیه سازی درمی یابیم که استفاده از ادوات FACTS سری و موازی می تواند تاثیر به سزایی روی کاهش تراکم خطوط، کاهش تلفات خطوط و بهبود پروفیل ولتاژ داشته باشد. تعیین تعداد ادوات سری یا موازی یکی از عوامل مؤثر بر افزایش هزینه تحمیل شده به شبکه در کنار کاهش هزینه ناشی از کاهش تلفات می باشد. عدم انتخاب بهینه سایز و مکان احداث ادوات FACTS می تواند باعث افزایش تلفات در شبکه گردد. روش پیشنهادی در این مقاله به دلیل کاهش محاسبات و دقت بالا می تواند روش موثری برای نصب ادوات FACTS در شبکه های بزرگ و واقعی باشد. همچنین نتایج شبیه سازی نشان می دهد که با افزایش تعداد ادوات FACTS سری و موازی پروفیل ولتاژ بهبود می یابد ولی هزینه کل سیستم عامل تعیین کننده نهایی خواهد بود. همچنین به عنوان کار پیشنهادی در آینده می توان به طریقی برنامه نوشت که تعداد SVC و TCSC بهینه توسط الگوریتم انتخاب شود. همچنین تست بر روی شبکه استاندارد بزرگ تر مثل شبکه ۱۱۸ باسه می تواند پیشنهاد دیگری برای بهبود کار فعلی باشد.

پیوست ۱: تولباکس Matpower

تولباکس Matpower یک ابزار مناسب برای شبیه سازی شبکه های استاندارد در قدرت می باشد که به دلیل باز بودن متن آن به راحتی می توان با تغییرات کم شبکه مورد نظر را شبیه سازی کرد. ضمناً این تولباکس قابلیت هایی مثل پخش بار، پخش بار بهینه و قابلیت های دیگر را با دستورات متناظر آسان نموده است.

بخش اول تعریف متغیرهای مورد نیاز به منظور بهینه شدن پارامترها می باشد، که همانطور که گفته شد در شبکه قدرت استاندارد ۳۰ باسه موجود در تولباکس با نام case_ieee30 شامل ولتاژ مرجع ژنراتورها (۶ متغیر X1-X6)، عدد تپ ترانسها (۴ عدد X7-X10) می باشد. از آنجایی که در این مقاله برای روش دوم که با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات به منظور تعیین پارامترهای بهینه استفاده می شود سه سناریو در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول ۴ متغیر از مکان و ظرفیت دو تجهیز TCSC و SVC باید در نظر گرفته شود که متغیرهای X11-X14 هستند. در سناریوی دوم و سوم به ترتیب ۸ و ۱۲ متغیر باید برای ادوات FACTS در نظر گرفته شوند که در متغیرهای X18-X22 -X15 -X19 جای می گیرند.

بخش دوم تعیین بازه تغییرات این متغیرهای تعریف شده است که برنامه اجتماع ذرات اجازه انتخاب از همان بازه را خواهد داشت. این مقادیر مینیمم و ماکزیمم عبارتند از:

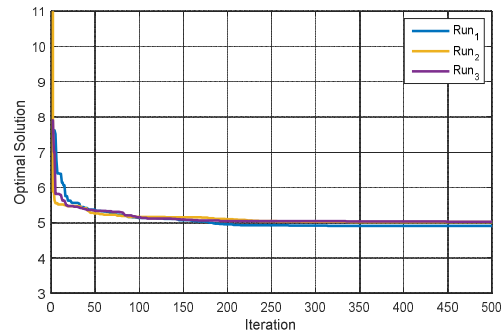
$$0.95 < \text{ولتاژ مرجع ژنراتورها} < 1.05 \text{ p.u.}$$

$$0.95 < \text{تپ ترانس} < 1.05 \text{ p.u.}$$

$$0 < \text{سوسپتانس ادوات موازی} < 0.6$$

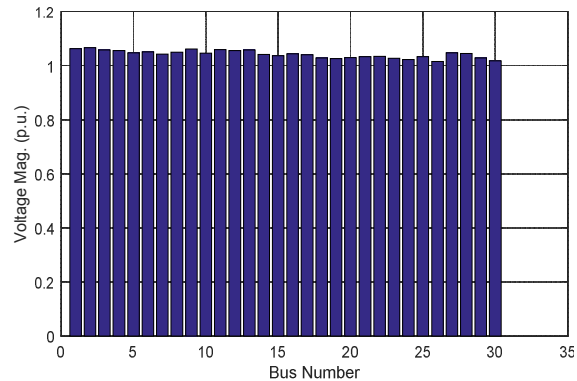
$$0 < \text{مکان ادوات} < 1$$

$$0 < \text{راکتانس ادوات سری} < 0.6$$



شکل (۱۴): نمودار همگرایی تابع هزینه در نظر گرفته شده برای سه بار اجرای متوالی در سناریوی سوم

Fig. (14): The convergence diagram of the considered cost function in the third scenario for three consecutive implementation

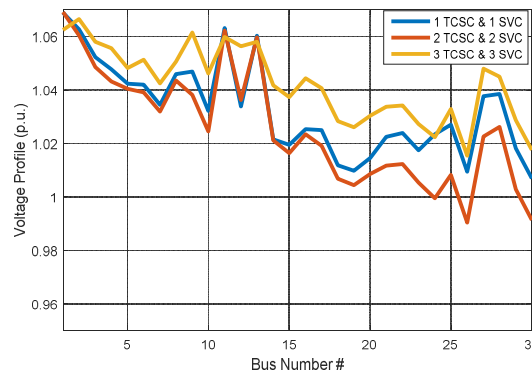


شکل (۱۵): پروفیل ولتاژ شبکه ۳۰ باسه در بارگیری نامی در سناریوی سوم
Fig. (15): Voltage profile of IEEE 30-bus in rated loading in the third scenario

در انتها با توجه به خروجی برنامه مقادیر بهینه متغیرهای تعریف شده (۲۲ متغیر) برای سناریوی سوم به صورت زیر به دست آمده است.

$$X_{opt} = \begin{matrix} 1.0625 & 1.0665 & 1.0482 & 1.0506 & 1.0599 & 1.0581 \\ 0.9606 & 0.9500 & 1.0257 & 0.9652 & 0 & 35.1623 & 26.9207 \\ 26.4250 & 5.5491 & 12.2494 & 2.4630 & 40.4431 & 0.5000 \\ 0.6000 & 0.5284 & 0.5266 & & & & \end{matrix}$$

۵-۲-۴- مقایسه سه سناریو در موارد مختلف



شکل (۱۶): مقایسه پروفیل ولتاژ در شبکه تست برای سه سناریوی در نظر گرفته شده

Fig. (16): Comparison of voltage profile in the test network for three scenarios

ادوات FACTS نیاز است تا آرایش شبکه مورد نیاز تغییر داده شود. لذا برای این منظور می‌توان در ابتدا از دستور loadcase به صورت زیر اطلاعات شبکه در یک آرایه ذخیره شود.

`mpc=loadcase('case_ieee30')`

در مرحله بعد می‌توان هر یک از سطر یا ستون‌های آرایه mpc را بر اساس نیاز اصلاح نمود و از شبکه اصلاح شده که در آرایه mpc ذخیره شده برای پخش بار استفاده کرد.

`runpf(mpc)`

در بخش تابع هزینه برای محاسبه هزینه ادوات به همراه تلفات شبکه محاسبه خواهد شد. برای محاسبه تلفات و نقطه کار ادوات و محاسبه هزینه ادوات نیاز به پخش بار و محاسبات آن در شبکه ۳۰ باسه خواهد بود. در این قسمت از تولباکس Matpower کمک گرفته می‌شود. پخش بار در این تولباکس با روش‌های نیوتن-رافسون و گوس سایدل و یا dc امکان‌پذیر است. چون از بین پخش بارهای ac برای نوع آن تفاوتی در این مقاله وجود ندارد لذا از پیش فرض خود دستور پخش بار استفاده می‌شود. دستور پخش بار به صورت زیر است.

`runpf('case_ieee30')`

نکته قابل اهمیت این است که با این دستور فقط می‌توان شبکه استاندارد شده موجود در تولباکس را استفاده نمود. از آنجایی که برای مکان‌یابی

پیوست ۲: اطلاعات شبکه

Table (2): Generator information available on the IEEE 30-Bus Network

جدول (۲): اطلاعات ژنراتورهای موجود در شبکه ۳۰ باسه IEEE [۱]

Unit	Bus	A (\$/MWh ²)	B (\$/MWh)	C (\$)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Min up time (h)	Min down time (h)	Ramp up (MW)	Ramp down (MW)	Startup Ramp (MW)	Shutdown ramp (MW)
G1	1	0.0200	15.00	0	80	15	2	2	25	25	70	60
G2	2	0.0175	14.75	0	80	15	2	2	25	25	70	60
G3	13	0.0250	16.00	0	50	10	3	3	15	15	70	60
G4	22	0.0625	14.00	0	50	10	4	4	15	15	70	60
G5	23	0.0250	16.00	0	30	5	3	3	10	10	70	60
G6	27	0.0083	15.25	0	55	10	4	4	15	15	70	60

Table (3): Summary of output information by matpower application in the first scenario

جدول (۳): خلاصه اطلاعات خروجی برنامه Matpower در سناریوی اول

System Summary				
How many?	How much?	P (MW)	Q (MVar)	
Buses	30	Total Gen Capacity	435.0	-95.0 to 550.0
Generators	6	On-line Capacity	435.0	-95.0 to 550.0
Committed Gens	6	Generation (actual)	288.4	92.0
Loads	21	Load	283.4	126.2
Fixed	21	Fixed	283.4	126.2
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0
Shunts	1	Shunt (inj)	-0.0	21.0
Branches	41	Losses (I ² * Z)	5.01	23.05
Transformers	4	Branch Charging (inj)	-	36.3
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0
Areas	1			
		Minimum		Maximum
Voltage Magnitude	1.006 p.u. @ bus 26		1.067 p.u. @ bus 1	
Voltage Angle	-11.50 deg @ bus 30		0.00 deg @ bus 1	
P Losses (I ² *R)	-		0.87 MW @ line 2-5	
Q Losses (I ² *X)	-		3.66 MVar @ line 2-5	

Table (4): Summary of output information by matpower application in the second scenario

جدول (۴): خلاصه اطلاعات خروجی برنامه Matpower برای سناریوی دوم

System Summary				
How many?		How much?	P (MW)	Q (MVar)
Buses	30	Total Gen Capacity	435.0	-95.0 to 550.0
Generators	6	On-line Capacity	435.0	-95.0 to 550.0
Committed Gens	6	Generation (actual)	289.4	75.4
Loads	21	Load	283.4	126.2
Fixed	21	Fixed	283.4	126.2
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0
Shunts	2	Shunt (inj)	-0.0	41.5
Branches	41	Losses (I ² * Z)	5.97	26.34
Transformers	4	Branch Charging (inj)	-	35.6
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0
Areas	1			
		Minimum	Maximum	
Voltage Magnitude	1.003 p.u. @ bus 24		1.068 p.u. @ bus 11	
Voltage Angle	-11.81 deg @ bus 30		0.00 deg @ bus 1	
P Losses (I ² *R)	-		0.99 MW @ line 2-6	
Q Losses (I ² *X)	-		3.72 MVar @ line 2-5	

Table (5): Summary of output information by matpower application in the third scenario

جدول (۵): خلاصه اطلاعات خروجی برنامه Matpower برای سناریوی سوم

System Summary				
How many?		How much?	P (MW)	Q (MVar)
Buses	30	Total Gen Capacity	435.0	-95.0 to 550.0
Generators	6	On-line Capacity	435.0	-95.0 to 550.0
Committed Gens	6	Generation (actual)	288.5	71.0
Loads	21	Load	283.4	126.2
Fixed	21	Fixed	283.4	126.2
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0
Shunts	2	Shunt (inj)	-0.0	67.6
Branches	41	Losses (I ² * Z)	5.08	48.98
Transformers	4	Branch Charging (inj)	-	36.6
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0
Areas	1			
		Minimum	Maximum	
Voltage Magnitude	1.007 p.u. @ bus 26		1.065 p.u. @ bus 2	
Voltage Angle	-25.91 deg @ bus 30		0.00 deg @ bus 1	
P Losses (I ² *R)	-		0.84 MW @ line 2-5	
Q Losses (I ² *X)	-		15.43 MVar @ line 1-2	

References

- [1] N.G. Hingorani, "High power electronics and flexible AC transmission system", Power Engineering Review, Vol. 8, No. 7, pp. 3-4, July 1998.
- [2] S. Meikandasivam, R.K. Nema, S.K. Jain, "Fine power flow control by split TCSC", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 45, No. 1, pp. 519-529, Feb. 2013.
- [3] A. Kumar, C. Sekhar, "Congestion management with FACTS devices in deregulated electricity markets ensuring loadability limit", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 46, pp. 258-273, March 2013.
- [4] B. Mandal, P.K. Roy, "Optimal reactive power dispatch using quasi-oppositional teaching learning based optimization", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 46, pp. 258-273, March 2013.
- [5] E. Ghahremani, I. Kamwa, "Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a generic graphical user interface", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 28, No. 2, pp. 764-768, May 2013.
- [6] S. Kumar, D.K. Chaturvedi, "Optimal power flow solution using fuzzy evolutionary and swarm optimization", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 47, pp. 416-423, May 2013.
- [7] J. Zhao, L. Ju, Z. Dai, G. Chen, "Voltage stability constrained dynamic optimal reactive power flow based on branch-bound and primal-dual interior point method", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 73, pp. 601-607, Dec. 2015.
- [8] K. Ravi, M. Rajaram, "Optimal location of facts devices using improved particle swarm optimization", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 49, pp. 333-338, July 2013.
- [9] B. Bhattacharyya, S. Kumar, "Reactive power planning with FACTS devices using gravitational search algorithm", Ain Shams Engineering Journal, Vol. 6, No. 3, pp. 865-871, Sep. 2015.
- [10] D. Prasad, V. Mukherjee, "A novel symbiotic organisms search algorithm for optimal power flow of power system with FACTS devices", Engineering Science and Technology, an International Journal, Vol. 19, No. 1, March 2016.
- [11] J.A. Momoh, J.Z. Zhu, "A new approach to optimal power flow with phase shifter", Proceeding of the IEEE/ICSMC, Vol. 5, pp. 4794-4799, San Diego, CA, USA, USA, Oct. 1998.
- [12] P. Bhasaputra, W. Ongaskul, "Optimal placement of multi-type FACTS devices by hybrid TS/SA approach", Proceeding of the IEEE/ISCAS, Vol. 3, Bangkok, Thailand, May 2003.
- [13] S. Sutha, N. Kamaraj, "Optimal location of multi type FACTS devices for multiple contingencies using particle swarm optimization", International Journal of Electrical and Electronics Engineering, pp. 791-797, 2008.
- [14] Y.H. Song, A.T. Johns, "Flexible AC transmission systems (FACTS)", IEE Press, London, 1999 (ISBN 0-85296-771-3).
- [15] M.M. Farsangi, H. Nezamabadi-pour, Y.H. Song, K.Y. Lee, "Placement of SVCs and selection of stabilizing signals in power systems", IEEE Trans on Power Systems, Vol. 22, No. 3, pp. 1061-1071, Aug. 2007.
- [16] D. Thukaram, A. Lomi, "Selection of static VAR compensator location and size for system voltage stability improvement", Electric Power Systems Research, Vol. 54, No. 2, Vol. 139-150, May 2000..
- [17] L.J. Cai, I. Erlich, G. Stamtsis, "Optimal choice, allocation of FACTS devices in deregulated electricity market using genetic algorithms", Proceeding of the IEEE/PSCE, Vol. 1, pp. 201-207, Oct. 2004.
- [18] M.K. Verma, S.C. Srivastava, "Optimal placement of SVC for static and dynamic voltage security enhancement", International Journal of Emerging Electric Power Systems, pp. 1-16, Jan. 2005.
- [19] S. Garbex, R. Cherkaoui, A.J. Germond, "Optimal location of multi-type FACTS devices in power system by means of genetic algorithm", IEEE Trans on Power Systems, Vol. 16, No. 3, pp. 537-544, Aug. 2001.
- [20] B. Bhattacharyya, S. Kumar, "Approach for the solution of transmission congestion with multi-type FACTS devices", IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 10, No. 11, pp. 2802-2809, Aug. 2016..
- [21] B. Bhattacharyya, V.K. Gupta, "Fuzzy based evolutionary algorithm for reactive power optimization with FACTS devices", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 61, pp. 39-47, Oct. 2014.
- [22] B. Bhattacharyya, V.K. Gupta, "Fuzzy genetic algorithm approach for the optimal placement of flexible ac trans. systems devices in a power system", Electric Power Components and Systems, Vol. 42, No. 8, pp. 779-787, May 2014.
- [23] K.Y. Lee, Y.M. Park, J.L. Ortiz, "A united approach to optimal real and reactive power dispatch", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 104, No. 5, pp. 1147-1153, 1985..

