

مکان‌یابی بهینه ادوات جبران‌ساز SVC و TCSC در سیستم قدرت با به کارگیری الگوریتم کرم شب‌تاب

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۴

کد مقاله: ۶۵۲۰۵

مجید جهاندار^۱، زهرا جهاندار^{۲*}

چکیده

ادوات جبران‌ساز انعطاف‌پذیر FACTS قادر به کنترل فلووی توان اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط انتقال و همچنین کنترل ولتاژ باسهایی که به آنها اتصال می‌یابند، هستند. تحت شرایط استاتیکی می‌توان با تعیین مکان و پارامترهای بهینه آنها علاوه بر افزایش بارپذیری شبکه و کاهش تلفات شبکه موجب بهبود پروفیل ولتاژ شبکه انتقال شود و طرح‌های سرمایه‌گذاری توسعه خطوط را به تأخیر انداخت. در این مقاله، دو نوع تجهیز جبران‌ساز FACTS شامل SVC و TCSC به طور مجزا و همزمان از طریق الگوریتم کرم شبتاب (FA) انجام می‌شود. سه تابع هدف برای مسئله بهینه‌سازی مذکور شامل کمینه‌سازی کل تلفات اهمی شبکه، هزینه کل سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از ادوات FACTS و معکوس بارپذیری شبکه در نظر گرفته شده است و قیود فنی شامل معادلات پخش بار بهینه OPF می‌باشد. بمنظور اعتبارسنجی و تأیید کارایی مدل‌های پیشنهادی، مطالعات عددی بر روی یک شبکه ۳۰-باسه تست استاندارد IEEE انجام می‌شود و نتایج جایابی و تنظیم پارامتر بهینه حاصله از کرم شبتاب با ژنتیک مقایسه می‌گردد.

واژگان کلیدی: ادوات جبران‌ساز انعطاف‌پذیر FACTS، تلفات و بارپذیری شبکه، پخش بار بهینه OPF، الگوریتم کرم شبتاب (FA).

۱- دپارتمان مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نور، نور

۲- دپارتمان فنی مهندسی برق، دانشگاه غیرانتفاعی علامه محدث نوری، نور (نویسنده مسئول)

Jahandar_zahra1987@yahoo.com

سیستم انتقال AC دارای محدودیت‌های استاتیکی و دینامیکی است. این محدودیت‌های ذاتی شبکه تبادلات توان را محدود می‌کند و منجر به عدم استفاده بهینه آن می‌شود. تجهیزات جبران‌ساز FACTS در کاربردهایی حالت دائمی شامل، کنترل ولتاژ، افزایش ظرفیت انتقال توان، کاهش سطح جریان اتصال کوتاه، کنترل فلوی عبوری از خطوط انتقال و کاربردهای دینامیکی شامل بهبود پایداری گذرا، میراسازی نوسانات، بهبودی پایداری ولتاژ استفاده می‌شوند [1]. مطالعات بهبود بارپذیری سیستم باید در چندین مرحله انجام می‌گردد که شامل بررسی قیود پایداری، حدود ولتاژی باسها و حد حرارتی خطوط شبکه انتقال است تا تعیین شود که سیستم نیازمند نصب خطوط انتقال جدید است و یا اینکه نیازمند توزیع بهتر منابع تولیدی می‌باشد [2]. مطالعات دیگر برای استفاده از تجهیزات با هدف کنترل توان می‌باشد [3] البته هر دو روش نیاز به هزینه‌های سرمایه‌گذاری داشته اما گسترش تولید و انتقال انرژی مستلزم مسائل زیست محیطی و سیاسی نیز می‌باشد. ادوات جبران‌ساز FACTS می‌توانند برای کاهش توان در خطوط دارای اضافه بار و استفاده از مسیرهای جایگزین برای افزایش ظرفیت سیستم بکار روند بدین ترتیب امکان استفاده حداکثری از ظرفیت خطوط ظرفیت انتقال سیستم فراهم شود. اما با توجه به تاثیر متقابل ادوات بر روی یکدیگر تعیین تعداد و مکان نصب مناسب آنها با توجه به مسائل اقتصادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [4]. تا کنون در اغلب مطالعات جایابی انواع ادوات FACTS برای کلیه کاربردها، تعیین مکان مناسب نصب و چگونگی تنظیم پارامترهای آنها با توجه به بازگشت سرمایه بر روی ادوات جبران‌ساز FACTS مورد توجه بوده است. تکنیک‌هایی که تا کنون برای جایابی تجهیزات FACTS استفاده شده‌اند به دو دسته روش‌های مبتنی بر آنالیز حساسیت و روش‌های بهینه‌سازی متاهیورستیک نظیر گرگ خاکستری، ژنتیک، اجتماع گروه ذرات و غیره تقسیم می‌شود که به صورت تک هدفه یا چندین هدفه فنی-اقتصادی تعریف شده‌اند [5]-[9]. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که بکارگیری ادوات جبران‌ساز FACTS در شبکه انتقال علاوه بر افزایش بارپذیری شبکه، هر یک از ژنراتورهای شبکه را قادر می‌سازد تا به طور موثر ظرفیت بیشتری را به تولید توان اکتیو اختصاص دهند در نتیجه تلفات و هزینه بهره‌برداری در مقایسه با عدم حضور این تجهیزات در شبکه به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. با توجه به اهمیت ویژه این ادوات جبران‌ساز در این مقاله یک مدل جدید جایابی بهینه ادوات جبران‌ساز SVC و TCSC در سیستم قدرت با بکارگیری الگوریتم کرم شتاب ارائه می‌گردد. مابقی قسمتهای مقاله برترتیب زیر سازماندهی شده است: در بخش دوم، مدل‌سازی انواع ادوات جبران‌ساز SVC و TCSC بر اساس دو روش راکتانس متغیر و تزریق توان ارائه می‌گردد. در بخش سوم، فرمولاسیون مسئله بهینه‌سازی جایابی ادوات جبران‌ساز مذکور به طور همزمان با توجه به توابع هدف بهبود بارپذیری، تلفات و هزینه بهره‌برداری از ادوات جبران‌ساز FACTS مبتنی بر قیود پخش بار بهینه OPF در سیستم‌های قدرت انجام می‌شود، سپس فلوجارت و روند کدسازی مسئله مذکور در الگوریتم کرم شتاب ارائه می‌شود. در بخش چهارم، بمنظور اعتبارسنجی و تایید کارایی مدل پیشنهادی، مطالعات عددی با هدف جایابی بهینه ادوات بر روی سیستم ۳۰-باسه تست استاندارد IEEE انجام می‌شود. در بخش پنجم، نتایج مفهومی حاصل از مطالعات شبیه‌سازی بیان می‌گردد.

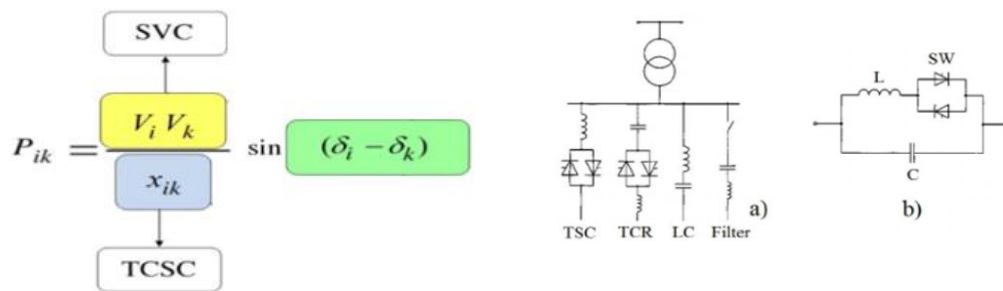
۲- مدل‌سازی انواع ادوات جبران‌ساز SVC و TCSC

مدل‌های مختلفی در مراجع [10] تا [12] برای ادوات جبران‌ساز FACTS ارائه شده است. اولین روش مدل‌های تزریق توان هستند که مشخصه عملکردی ادوات جبران‌ساز به صورت تزریق توان ایجاد می‌گردد. روش دیگر مدل‌های راکتانس متغیر می‌باشند. **جبران‌ساز توان راکتیو استاتیکی SVC:** این تجهیز جبران‌ساز از ترکیب بانک خازنی موازی با راکتور کنترل شونده تاپریستوری ساخته می‌شود که عموماً به عنوان کنترل کننده ولتاژ در یک یا چندین باس از سیستم‌های قدرت نصب می‌شود. این تجهیز می‌تواند با تغییر زاویه آتش گیت تریستورهای موجود در آن هم توان راکتیو را جذب و هم تولید کند به نحوی که ولتاژ در رنج خاصی برای یک شین که به آن متصل می‌گردد، تثبیت شود. در این مقاله، این مدل‌سازی برای SVC به صورت راکتانس متغیر متصل به یک باس شبکه به فرم شنت است.

جبران‌ساز کنترل شده تاپریستوری TCSC: این تجهیز به صورت سری در خطوط قرار می‌گیرند در حقیقت تاثیر TCSC را می‌توان با یک امپدانس کنترل پذیر در خطوط انتقال مدل‌سازی کرد بنابراین جهت افزایش توان عبوری از خطوط انتقال TCSC ها با کاهش میزان راکتانس خطوط این هدف را برآورده می‌سازند. همچنین با کاهش میزان راکتانس انتقالی میزان تلفات توان راکتیو نیز کاهش می‌یابد، در حقیقت TCSC مانند یک خازن سری عمل می‌کند در نتیجه پروفیل ولتاژ نیز در خط بهبود می‌یابد. در این مقاله مدل تجهیز TCSC به فرم راکتانس متغیر متصل به فرم سری با خطوط انتقال که مشخصه عملکردی آنها به زاویه آتش تریستورها وابسته است، انجام می‌شود.

شماتیک مدل‌سازی استاتیکی ادوات جبران‌ساز SVC و TCSC در شکل (۱) نمایش شده است. هر یک از ادوات جبران‌ساز ویژگی‌های و مدل خود را دارند و برای کاربرد خاصی در مدل پخش بار بهینه OPF وارد می‌شوند و تاثیر مشخصی بر روی عملکرد شبکه قدرت دارند. در شکل (۲) می‌توان مشاهده کرد که هر یک از تجهیزات جبران‌ساز در صورت نصب بر روی باسها یا

خطوط بر روی کدام یک از پارامترهای الکتریکی تاثیرگذار هستند. تجهیزات SVC بر روی دامنه ولتاژ باسهای که به آن اتصال می‌یابند تاثیر می‌گذارند و تجهیز TCSC بر روی راکتانس خطی که بر روی آن نصب می‌گردد.



شکل (۱): شماتیک مدل‌سازی استاتیکی پنج نوع ادوات
شکل (۲): دیاگرام تاثیرگذاری ادوات جبران‌ساز بر روی توان اکتیو انتقالی بین باسهای ابتدا و انتهای خطوط جبران‌ساز SVC (a) و TCSC (b)

۳- فرمولاسیون مسئله بهینه‌سازی مکان‌یابی و تنظیم پارامتر ادوات SVC و TCSC

بمنظور تعیین مکان بهینه نصب و تنظیم پارامترهای به طور مستقل و همزمان انواع ادوات جبران‌ساز SVC و TCSC با هدف کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری از ادوات جبران‌ساز و تلفات و همچنین بهبود بارپذیری سیستم قدرت، فرمولاسیون ریاضیاتی مسئله بهینه‌سازی مذکور در دو بخش شامل توابع هدف و قیود فنی ارائه می‌شود. برای بکارگیری الگوریتم‌های کرم شتاب در حل مسئله جایابی ادوات جبران‌ساز ابتدا باید فرمولاسیون سه تابع هدف به طور دقیق بر اساس بلوک روابط (۱) تا (۳) بیان شوند.

$$OF_1^{LOSS}(N_{svc}, N_{tcsc}, \lambda) = \sum_{linej=1}^{N_{line}} P_{linej}^{Loss} \dots P_{linej}^{Loss} = R_{linej} |I_{linej}|^2 \quad (1)$$

$$OF_2^{OC-FACTS}(N_{svc}, N_{tcsc}, \lambda) = \sum_{i=1}^{N_{svc}} Cost^{SVC} + \sum_{i=1}^{N_{tcsc}} Cost^{TCSC} \quad (2)$$

$$OF_3^{Loading}(N_{svc}, N_{tcsc}, \lambda) = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

با توجه به اینکه تعداد N_{line} خط انتقال و N_{Bi} تعداد باسهای شبکه انتقال و تعداد تجهیزات جبران‌ساز SVC و TCSC به ترتیب N_{svc} و N_{tcsc} مفروض باشد. در رابطه فوق، کمینه‌سازی سه تابع هدف در مسئله بهینه‌سازی جایابی ادوات FACTS شامل کل تلفات اهمی شبکه (OF_1^{LOSS})، هزینه کل سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از ادوات FACTS ($OF_2^{OC-FACTS}$) و معکوس بارپذیری شبکه ($OF_3^{Loading}$) مورد توجه هستند. هدف از بکارگیری پخش بار بهینه یافتن مکان و تنظیم مقادیر پارامترهای انواع ادوات جبران‌ساز SVC و TCSC است به طوری که مقادیر کمینه برای توابع هدف به طور همزمان محقق شود و در عین حال قیود امنیتی و عملکردی سیستم رعایت شود. قیود فنی تساوی و نامساوی در هر سطح بار شامل حداقل و حداکثر تولید ژنراتورها، حداقل و حداکثر دامنه ولتاژ شینه‌ها، حد حرارتی خطوط انتقال، توازن توان اکتیو و راکتیو در شینه‌های شبکه و همچنین قیود عملکردی ادوات جبران‌ساز SVC و TCSC می‌باشد. هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری از تجهیز جبران‌ساز SVC و جبران‌ساز TCSC طبق روابط (۴) و (۵) تعیین می‌شود که S مقدار ظرفیت بهره‌برداری از تجهیز جبران‌ساز می‌باشد.

$$Cost^{SVC} = 0.0003 S_{svc}^2 - 0.3051 S_{svc} + 127.38 (US\$ / kVar) \quad (4)$$

$$Cost^{TCSC} = 0.0015 S_{tcsc}^2 - 0.7130 S_{tcsc} + 153.75 (US\$ / kVar) \quad (5)$$

معادلات پخش بار بهینه OPF به عنوان قیود تساوی تحت شرایط نرمال شبکه انتقال مطابق بلوک روابط (۶) می‌باشد که تعادل توان اکتیو و راکتیو را با توجه به نوع باسها PV و یا اسلک و همچنین PQ در مسئله جایابی ادوات FACTS مدل‌سازی می‌شود.

$$g(V, \theta) = 0$$

$$g(V, \theta) = \begin{cases} P_i(V_i, \theta) - P_i^{net} \\ Q_i(V_i, \theta) - Q_i^{net} \\ P_k(V_k, \theta) - P_k^{net} \end{cases} \quad (6)$$

اندیس‌های P_i و Q_i مقادیر محاسبه شده توان اکتیو و راکتیو در باس i از نوع PQ می‌باشد، اندیس‌های P_i^{net} و Q_i^{net} مقادیر معلوم برای توان اکتیو و راکتیو در باس i از نوع PQ می‌باشند و همچنین P_k و Q_k^{net} بترتیب مقادیر محاسبه شده و معلوم توان اکتیو در باس k از نوع PV (به استثنای باس اسلک) می‌باشد و اندیس θ_i زاویه فاز ولتاژ در باس i می‌باشد. قید افزایش بارپذیری شبکه از طریق شاخص ML بر اساس پارامترهای استاتیکی شبکه شامل تخطی فلوئی عبوری از خطوط و ولتاژ باس‌های شبکه از مقادیر مجاز مطابق رابطه (۷) تعیین می‌گردد.

$$ML = 2 - \left(\prod_{line} OVL^{Line} + \prod_{Bus} VLB^{Bus} \right)$$

$$OVL^{Line} = \begin{cases} 1 \rightarrow S_l \leq S_{lmax} \\ \exp\left(\mu \left| 1 - \frac{S_l}{S_{lmax}} \right| \right) \rightarrow S_l \geq S_{lmax} \end{cases} \quad (7)$$

$$VLB_i = \begin{cases} 1 \rightarrow |\Delta V_{bi}| \leq 0.05 \\ \exp\left(\mu \left| 0.05 - \Delta V_{bi} \right| \right) \rightarrow |\Delta V_{bi}| \geq 0.05 \end{cases}$$

دو متغیر OVL^{Line} و VLB^{Line} در تابع هدف بارپذیری شبکه مطابق رابطه (۳) پس از انجام پخش بار قابل محاسبه می‌باشند که $\mu 1$ و $\mu 2$ ضرایب ثابت و S_l توان ظاهری عبوری از خطوط و S_{lmax} حداکثر توان ظاهری مجاز یا حد حرارتی خط می‌باشد. معادلات عملکردی ادوات FACTS نیز برخی به عنوان قیود تساوی و برخی دیگر به عنوان قیود نامساوی مطابق روابط ذیل مدلسازی می‌شوند. که برای تجهیز SVC مقدار سوسپتانس شنت قابل کنترل به عنوان یک تزریق توان منفی از رابطه (۸) قابل محاسبه می‌باشد.

$$B_{SVC} = B_L(\alpha) + B_C$$

$$B_L(\alpha) = -\frac{1}{LW} \cdot \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi}\right), B_C = W \times C$$

$$Q_{SVC} = -V^2 \kappa \cdot B_{SVC}$$

$$Q_{SVC-MIN} \leq Q_{SVC} \leq Q_{SVC-MAX}$$

توان راکتیو تزریقی یا جذبی تجهیز جبران‌ساز SVC به عنوان یک سوسپتانس متغیر B_{SVC} در شبکه را می‌توان بر اساس دامنه ولتاژ باس اتصال یافته به آن و مقدار ادمیتانس سلفی و خازنی تجهیز بر اساس زاویه آتش ترستورها محاسبه نمود. معمولاً تجهیز TCSC قابلیت تغییر جبران‌سازی امپدانس سری خط از یک راکتانس خازنی $(-0.8X_{line})$ تا یک راکتانس سلفی $(0.2X_{line})$ را دارا می‌باشد. مقدار امپدانس جدید خط انتقال پس از نصب تجهیز جبران‌ساز TCSC مطابق رابطه (۹) در روابط پخش بار شبکه به فرم قیود تساوی و نامساوی قابل مدلسازی هستند.

$$X_{ij} = X_{Line} + X_{TCSC} = r_{TCSC} \cdot X_{Line}$$

$$-0.8X_{Line} \leq r_{TCSC} \leq 0.2X_{Line} \quad (9)$$

۴- کدسازی مسئله جایابی ادوات جبران‌ساز FACTS توسط الگوریتم کرم شتاب

در این بخش، برای حل مدل جایابی و تنظیم پارامتر ادوات جبران‌ساز FACTS از الگوریتم کرم شتاب کمک گرفته می‌شود. برای کدسازی مسئله باید موقعیت کرم‌های شتاب را بعنوان جواب‌های به القوه مسئله و میزان درخشندگی آنها بر اساس بر اساس تابع هدف رابطه (۱) یا (۲) و یا (۳) تعیین گردد. کرم شتابی که فینس بهتری دارد کرم‌های همسایه خود را جذب می‌کند. تابع هدف بمنظور برازش موقعیت هر یک از کرم‌های شتاب در روند حل محاسبه می‌شود. مقدار لوسی فرین هر کرم طی هر تکرار با توجه به مقدار برازندگی موقعیت مکانی آن کرم تعیین می‌شود به این ترتیب که در هر تکرار با توجه به مقدار برازندگی و متناسب با آن مقداری به لوسی فرین فعلی کرم افزوده می‌شود. ضمن اینکه به منظور مدلسازی افت تدریجی با زمان مقداری از لوسی فرین فعلی با ضریبی کمتر از ۱ از آن کم می‌شود. موقعیت مکانی اولیه برای هر یک از کرم‌های شتاب به طور تصادفی تولید می‌شود که ابعاد آن معادل با تعداد متغیرهای مستقل مسئله برابر می‌باشد. برای هر تجهیز فکتس در یک موقعیت مکانی کرم شتاب خاص سه ژن تخصیص می‌یابد اولین ژن متناظر با نوع تجهیز، دومی مکان و سومین ژن متناظر با پارامتر تنظیمی تجهیز می‌باشد که برای مثال برای SVC مطابق جدول (۱) می‌باشد.

جدول (۱): یک نمونه کروموزوم برای تجهیز جبران‌ساز SVC

نوع تجهیز جبران‌ساز (۱) SVC یا ۲ TCSC	مکان نصب تجهیز جبران‌ساز (B1 ---Bn)	پارامتر تنظیمی تجهیز جبران‌ساز (B_{TCSC} یا B_{SVC})
--	--	---

مطابق جدول فوق، موقعیت مکانی یک کرم شبتاب بر اساس نوع، مکان نصب و تنظیم پارامترهای تجهیزات جبران‌ساز (SVC یا TCSC) در باسهای مختلف تعریف می‌گردد. در نهایت، با در نظر گرفتن یک تابع هدف (۱) تا (۳) بعنوان مبنای کار، پس از اجرا و اتمام روند حل توسط الگوریتم کرم شبتاب کلیه تجهیزات جبران‌ساز بر روی شبکه انتقال نصب و تنظیم پارامتر می‌گردند. ابعاد متناظر متناظر با پارامتر تنظیمی تجهیز جبران‌ساز به صورت پریونیت یعنی یک عددی تصادفی بین ۰ تا ۱ می‌باشد و با تعیین این مقدار، پارامتر تنظیمی تجهیز B_{SVC} بین مقدار مینیمم و ماکزیمم آن مطابق با رابطه (۱۰) تعیین می‌شود.

$$B_{SVC} = B_{SVC}^{Min} + (B_{SVC}^{Max} - B_{SVC}^{Min}) \cdot B_{pu} \quad (10)$$

روند اجرای برنامه بدین صورت است که ابتدا اطلاعات شبکه مورد نظر شامل اطلاعات فنی ژنراتورها، ساختار شبکه و تقاضای بار پایه اکتیو و راکتیو وارد برنامه می‌شود سپس، برای ضرب بار λ معادل ۱ یعنی تقاضای بار پایه تعداد ادوات جبران‌ساز FACTS مورد نظر انتخاب می‌شود و در ادامه جمعیت های اولیه کرم‌های شبتاب به طور تصادفی بعنوان جواب‌های اولیه برای مکان نصب و تنظیم پارامتر تجهیزات جبران‌ساز بر اساس رابطه (۱۰) ایجاد می‌شود. سپس مطالعه پخش بار بهینه شبکه OPF پس از نصب ادوات جبران‌ساز و تنظیم پارامترهای آنها (جمعیت تصادفی اولیه) با توجه به سیستم تولید و بار و ساختار جدید شبکه انتقال انجام می‌شود و هر یک از توابع هدف که بعنوان مبنای کار قرار گرفته اند، تعیین می‌شوند. در نتیجه، فیتنس یا درخشندگی کرم شبتاب را بر اساس رابطه (۱۱) را می‌توان محاسبه کرد.

$$fitness(k, x_i^k) = \frac{1}{\left\{ \begin{matrix} OF_1^{Loss}(k) \\ OF_2^{OC-facts}(k) \\ OF_3^{Loading}(k) \end{matrix} \right\} + penalties(k)} \quad (11)$$

با توجه به ابعاد هر کرم شبتاب، طبق رابطه (۱۲) میزان تخطی از قیود فنی مدل شامل روابط (۴) تا (۹) به صورت پنالتی قابل اضافه نمودن به تابع هدف می‌باشد.

$$Penalty \rightarrow Pen = \sum_{Limits \text{ Violations}}^{V^M \geq V^{Permit}} (V^M - V^{Permit}) \times 10^{+3} \quad (12)$$

در هر مرحله، کرم شبتاب با بهترین برازش از موقعیت مکانی انتخاب می‌شوند و مقدار برازش میزان جذابیت کرم شبتاب را نشان می‌دهد، بنابراین کرم شبتاب با برازش یا درخشندگی بیشتر مابقی کرم‌های شبتاب را به سمت خود جذب می‌کند. از دیدگاه الگوریتم این بدین معنی است که تغییر در جواب‌های فعلی مسئله تعبیه سرویس مجازی مقاوم در مقابل خطاء ایجاد می‌شود. مقدار لوسی فرین در تکرار حل K ام توسط میزان لوسی فرین در تکرار حل قبلی و برازش در تکرار K ام طبق رابطه (۱۳) بروزرسانی می‌شود.

$$L_i^k(t) = (1 - \rho) \cdot L_i^k(t-1) + \gamma \cdot fitness(x_i^k(t)) \quad (13)$$

اندیس‌های ρ و γ شماره‌های ثابت برای مدلسازی افت تدریجی و تاثیر فیتنس بر روی لوسی فرین کرم شبتاب هستند. در فاز حرکت تکرار حل k ام، هر کرم شبتاب λ ام احتمالاً مطابق رابطه (۱۴) به سمت یکی از همسایه‌ها یعنی کرم شبتاب λ ام حرکت می‌کند که درخشندگی بیشتری بواسطه لوسی فرین بیشتر دارد.

$$P_{ij}^k(t) = \frac{L_j^k(t) - L_i^k(t)}{\sum_{l \in N_i} (L_l^k(t) - L_i^k(t))} \quad (14)$$

اندیس N_i مجموعه همسایه‌های کرم شبتاب λ ام است. حرکت زمان-گسسته برای یک کرم شبتاب را می‌توان مطابق روابط (۱۵) تا (۱۷) نوشته شود.

$$x_i^k(t+1) = (1 - \beta) \cdot x_i^k(t) + \beta \cdot x_j^k(t) + \alpha \cdot \varepsilon_i(t) \quad (15)$$

$$\beta^k = (1 - \beta_{min}) \cdot e^{-\gamma_{ij}^k} (t) + \beta_{min} \quad (16)$$

$$r_{ij}^k = \frac{x_j^k(t) - x_i^k(t)}{|x_j^k(t) - x_i^k(t)|} \quad (۱۷)$$

معیار همگرایی برای حد بارپذیری شبکه یعنی ML معادل صفر چک می‌شود و در صورت برقرار این شرط ضریب بار برای تکرار بعدی ۰٫۱ افزایش می‌یابد و مجدداً این روند تکرار می‌شود تا به ناپایداری شبکه برسیم.

۵- مطالعات عددی و نتایج شبیه‌سازی

در این بخش مقاله، بمنظور تایید کارایی و اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی مطالعات عددی و نتایج شبیه‌سازی بر روی یک سیستم ۳۰-باسه تست استاندارد IEEE انجام می‌شود. مقدار ظرفیت ماکزیمم برای تجهیز SVC معادل سلفی تا خازنی بر حسب پریونیت در نظر گرفته شده است. ظرفیت ماکزیمم و مینیمم عملکرد تجهیز TCSC می‌تواند امپدانس معادل ۰٫۲ راکتانس کل خط انتقال را به صورت سلفی به آن اضافه و یا معادل ۰٫۸ راکتانس کل خط را به طور خازنی از راکتانس کل خط کم نماید. تعداد تکرارهای الگوریتم کرم شبتاب ۵۰ دفعه می‌باشد که تعداد جمعیت اولیه تصادفی تولیدی برای حل مسئله ۱۵ عدد می‌باشد پارامترهای الگوریتم شامل تعداد جمعیت کرم‌های شبتاب، تکرار و ضرایب الف، بتا و گاما بترتیب ۱۵، ۵۰، ۰٫۵۵، ۰٫۸۵ و ۱ فرض شده است. با بکارگیری الگوریتم حل مکانهای نصب و تنظیمات بهینه ادوات جبران‌ساز FACTS در شبکه با توجه به تعداد از پیش تعیین شده ادوات توابع هدف شامل حد بارپذیری، تلفات و هزینه سرمایه‌گذاری برای بهترین جمعیت‌ها تعیین می‌شود. برای بررسی روش پیشنهاد شده برنامه‌ای در نرم افزار متلب نوشته شد که از کد پخش بار بهینه OPF موجود در بسته نرم متیور استفاده می‌کند. با استفاده از مدل‌های ارائه شده برای ادوات جبران‌ساز FACTS کدهای آماده این نرم افزار به گونه‌ای اصلاح شد تا امکان انجام پخش بار بهینه در هر سیستم قدرت مجهز به این عناصر فراهم آید. شبیه‌سازی‌ها بر روی یک لپ‌تاپ ASUS با قدرت پردازش 2.53 گیگاهرتزی با ۴ گیگابایت حافظه RAM انجام شده است. دو نوع سناریو برای جابجایی ادوات جبران‌ساز مطابق ذیل در نظر گرفته شده است:

- سناریو ۱: جابجایی یک نوع جبران‌ساز FACTS به تعداد دلخواه بر روی شبکه ۳۰-باسه.

- سناریو ۲: جابجایی چندین نوع جبران‌ساز FACTS به تعداد دلخواه بر روی شبکه ۳۰-باسه.

فرض بر این است که برای سناریو ۱ ابتدا یک عدد و برای دفعه بعد دو عدد از هر یک ادوات جبران‌ساز را به تنهایی با استفاده از الگوریتم‌های کرم شبتاب و ژنتیک در سه شبکه مورد نظر جابجایی و نتایج آن طبق جدول (۲) ارائه می‌گردد. برای سناریو دوم از کلیه انواع یک عدد تجهیز جبران‌ساز و سپس از کلیه انواع دو عدد تجهیز جبران‌ساز برای جابجایی در شبکه مذکور توسط الگوریتم‌های مذکور بکار گرفته می‌شود و پس از اجرای مدل مکان‌های بهینه نصب و تنظیم پارامترهای تجهیزات جبران‌ساز مذکور به همراه افزایش سطح بارپذیری شبکه نسبت به زمان عدم حضور این تجهیزات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

از نتایج شبیه‌سازی به وضوح دیده می‌شود که الگوریتم کرم شبتاب در مقایسه با ژنتیک به نتایج بهتری منجر می‌شوند به ویژه در شرایطی که دو تجهیز جبران‌ساز از یک نوع برای جابجایی انتخاب می‌شود. مکان و تنظیم پارامترهای بهینه ادوات FACTS بهره‌برداری برای شبکه ۳۰-باسه مورد مطالعه توسط الگوریتم ژنتیک در جدول (۳) نمایش شده است. بعلاوه دیده می‌شود که حضور انواع مختلف تجهیزات جبران‌ساز در شبکه‌های با اندازه متوسط به نتایج بسیار خوبی منجر نمی‌شود و تنظیم هماهنگ پیچیده بین آنها نتیجه کار را رضایت بخش نمی‌سازد. جابجایی دو تجهیز SVC و TCSC موجب فراهم آمدن امکان ۳۲٪ و ۲۴٪ افزایش تقاضا در سمت بار و تولید بدون برخورد با قیود تراکم سیستم قدرت بترتیب توسط الگوریتم‌های کرم شبتاب و ژنتیک می‌شود.

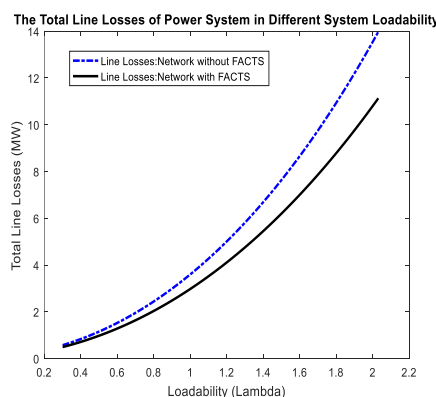
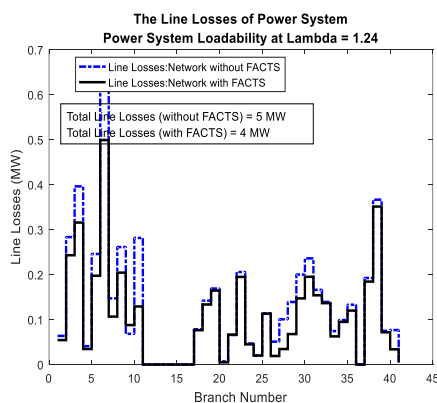
جدول (۲): مکان و تنظیم پارامترهای بهینه ادوات FACTS بهره‌برداری برای شبکه ۳۰-باسه مورد مطالعه

30-Bus IEEE test system (FA)			
FACTS Types	Locations	Parameters setting	-With FACTS λ_{max}
Svc (n=1)	Bus8	0.41935	1.08
Svc (n=2)	Bus8 and Bus13	0.41917 and 0.49655	1.16
TCSC (n=1)	Branch10	0.19082	1.09
TCSC (n=2)	Branch10 and Branch31	0.59994 and 1	1.21
Svc, TCSC (n=1)	Bus8	0.4455	1.17
	Branch22	0.53549	
Svc, TCSC (n=2)	Bus8	0.64912	1.11
	Bus24	0.44914	
	Branch16	0.51049	
	Branch22	0.69451	

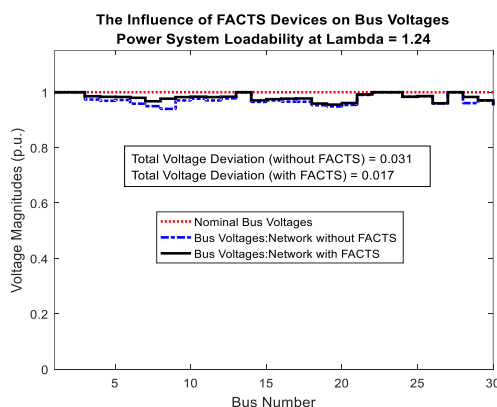
جدول (۳): مکان و تنظیم پارامترهای بهینه ادوات FACTS بهره‌برداری برای شبکه ۳۰-باسه مورد مطالعه

30-Bus IEEE test system (GA)			
Svc (n=1)	Bus10	0.43681	1.05
Svc (n=2)	Bus1 and bus6	0.98146 and 0.47943	1.1
TCSC (n=1)	Branch10	0.52404	1.07
TCSC (n=2)	Branch10 and Branch1	0.29886 and 1	1.13
Svc, TCSC (n=1)	Bus8 Branch20	0.4455 0.43549	1.2
Svc, TCSC (n=2)	Bus8 Bus22 Branch16 Branch12	0.64812 0.34214 0.41149 0.69451	1.18

این نتایج با انتخاب تابع هدف تلفات حاصل می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی شامل مکان و تنظیم پارامترهای تجهیزات جبران‌ساز می‌شود، که می‌توان درصد تلفات، پروفیل ولتاژ و حد پایداری را برای حالت بار پایه و بیشترین حد بارپذیری شبکه مورد مقایسه و بحث قرار داد. برای مثال در حد بارگذاری شبکه به میزان $\lambda=1.24$ مقایسه پروفیل تلفات بر حسب حد بارگذاری λ با حالت بار پایه در شکل (۳) آمده است.



شکل (۷): مقایسه تلفات کل و تک تک شاخه‌ها در $\lambda=1.24$ و تقاضای بار پایه در حضور و عدم حضور دو عدد تجهیز تجهیزات جبران‌ساز



شکل (۸): مقایسه انحراف ولتاژ باس‌های شبکه در $\lambda=1.24$ و تقاضای بار پایه در حضور و عدم حضور دو تجهیزات جبران‌ساز

همان‌طور که از نتایج دیده می‌شود جایابی بهینه منجر به کاهش ۱ مگاوات تلفات در مجموعه خطوط شبکه می‌شود. با حضور ادوات جبران‌ساز طبیعتاً انتظار داریم که پروفیل ولتاژ شبکه بهبود یابد به نحوی که در مقایسه با حالت بار پایه ملموس باشد این مقایسه در شکل (۸) به نمایش در آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود میزان انحراف ولتاژ در عدم حضور ادوات جبران‌ساز 0.032 بوده است که این مقدار با حضور دو تجهیز جبران‌ساز با تنظیم پارامترهای بهینه به مقدار 0.017 کاهش می‌یابد. تنظیمات ادوات جبران‌ساز به طور بهینه در باسها و شاخه‌ها به نحوی تعیین می‌گردد که حتی با پرسدن کلیه خطوط تا بیشینه مقدار ظرفیت خود بازهم ولتاژ باسهای شبکه بین 0.99 تا 1.02 پروتیت قرار می‌گیرند تحت این شرایط ضعیف‌ترین باسهای شبکه به لحاظ ولتاژی در شینه های ۸ و ۹ شبکه ۳۰-باسه استاندارد IEEE واقع شده‌اند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از جدید الگوریتم‌های بهینه‌سازی کرم شبتاب برای جابایی بهینه ادوات SVC و TCSC اقدام شده است. مدلسازی این تجهیزات به فرم راکتانس متغیر و تزریق توان در معادلات پخش بار بهینه مدلسازی شده اند. کدسازی برای حل مسئله توسط الگوریتم کرم شبتاب با سه تابع هدف تلفات، هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات و بارپذیری شبکه در نظر گرفته شده است. بمنظور تایید کارایی الگوریتم حل پیشنهادی مطالعات شبیه‌سازی بر روی یک شبکه ۳۰-بسه تست استاندارد IEEE بکار گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با ژنتیک با سرعت و دقت مناسبتری قادر به تعیین مکان و تنظیم پارامترهای ادوات جبران‌ساز می‌باشد و قابلیت اعمال به شبکه‌های بزرگ مقیاس را نیز دارا می‌باشد.

منابع

- [1] MH. Sulaiman, and Z. Mustaffa, "Optimal placement and sizing of FACTS devices for optimal power flow using metaheuristic optimizers", Results Control Optimization, 2022, Vol. 8:100145, Doi: 10.1016/j.rico.2022.100145.
- [2] B. Bhattacharya and S. Kumar, "Loadability enhancement with FACTS devices using gravitational search Algorithm", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, Vol. 78, pp. 470-479.
- [3] B. Singh and G. Agrawal, "Enhancement of voltage profile by incorporation of SVC in power system network by using optimal load flow method in MATLAB/Simulink environments", energy report, 2018, Vol. 4, pp. 418-434.
- [4] R. Agrawal, SK. Bharadwaj, DP Kothari, "Population-based evolutionary optimization techniques for optimal allocation and sizing of thyristor controlled series capacitor", Journal of Electric System and Information Technology, 2018, Vol. 5, pp. 484-501. <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2017.04.004>.
- [5] S. Li, T. Wang, H. Zhang, L. Wang, Y. Jiang, and J. Xue, "Sensitivity-based coordination to controllable ranges of U.P.F.C.'s avoids active power loop flows", International Journal of Electric Power and Energy System, 2020, Vol. 114, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105383> 92.
- [6] M. Nadeem, K. Imran, and A. Khattak, "Optimal placement, sizing and coordination of FACTS devices in transmission network using whale optimization algorithm. Energies", 2020, Vol. 13, No. 3, doi:10.3390/en13030753.
- [7] G. Swetha Shekarappa, S. Mahapatra, S. Raj, "A novel meta-heuristic approach for optimal RPP using series compensated FACTS controller", Intelligence System and Application, Vol. 18:200220. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2023.200220>.
- [8] NR. Babu, T. Chiranjeevi, R. Devarapalli, and SK. Bhagat, "Optimal location of FACTS devices in LFC studies considering the application of RT-Lab studies and emperor penguin optimization algorithm", Journal of Engineering Research, Vol. 11, No. 2, <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100060>.
- [9] D. Gupta, and SK. Jain, "Available transfer capability enhancement by FACTS devices using metaheuristic evolutionary particle swarm optimization (Meepso) technique", Energies, Vol. 14, No. 4, <https://doi.org/10.3390/en14040869>.
- [10] M. Taleb, A. Salem, AA. Ali, and MA. Azuma, "Optimal allocation of T.C.S.C. using adaptive cuckoo search algorithm. In: 2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (M.E.P.C.O.N.)", IEEE, pp 387-391. <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2016.7836920>.
- [11] M. Shafk, "Adaptive multiobjective parallel seeker optimization algorithm for incorporating T.C.S.C. devices into optimal power fow framework", IEEE Access, Vol. 7, pp. 36934-36947, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2905266>.
- [12] OE. Bekri, A. Chehri, T. Djamah and MK. Fellah, "SVC device optimal location for voltage stability enhancement based on a combined particle swarm optimization-continuation power flow technique", Telecommunication, Computing, Electronics and Control, 2020, Vol. 18, No. 4, pp. 2101-2111. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v18i4.13073>.