

بهینه‌سازی توان راکتیو در حضور ادوات FACTS با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی بر پایه منطق فازی

ساسان قاسمی^(۱) - اسکندر قلی‌پور^(۲)

(۱) دانشجوی دکتری - دانشکده فنی مهندسی، گروه برق، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

(۲) دانشیار - دانشکده فنی مهندسی، گروه برق، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۷/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۲۷

خلاصه: در این مقاله برای تنظیم پارامترهای سیستم قدرت و ادوات FACTS از روش‌های بهینه‌سازی ژنتیک، ازدحام ذرات، ترکیب منطق فازی با الگوریتم ژنتیک و ترکیب منطق فازی با الگوریتم تکامل دیفرانسیل استفاده شده است. در اینجا دو نوع از ادوات FACTS، جبران‌ساز سری کنترل شده با تریستور (TCSC) و جبران‌ساز توان راکتیو استاتیک (SVC) برای بهینه‌سازی مصرف توان راکتیو شبکه و کاهش تراکم خطوط مورد استفاده قرار گرفته است. جایابی بهینه ادوات FACTS در شبکه، که در شرایط بارگذاری سنگین قرار دارد سبب کاهش تلفات توان، کنترل توان راکتیو، بهبود پروفیل ولتاژ شبکه و در نتیجه سبب کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. در روش ارائه شده در این مقاله از توابع عضویت فازی برای مشخص کردن باس‌های ضعیف شبکه به منظور نصب SVC و از محاسبه مقدار توان راکتیو عبوری از خطوط شبکه برای مکان‌یابی محل نصب TCSC استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، برتری ترکیب منطق فازی و الگوریتم‌های تکاملی بر الگوریتم‌های تکاملی معمول در زمینه‌ی تنظیم بهینه‌ی پارامترهای شبکه و ادوات FACTS را به خوبی نشان می‌دهد. روش ارائه شده در این مقاله با سایر روش‌های به کار برده شده در این زمینه، که از آنالیز مقادیر ویژه برای جایابی بهینه ادوات FACTS استفاده کرده‌اند، مقایسه شده است.

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

Reactive Power Optimization in the Presence of FACTS Devices Using Evolutionary Algorithms based on Fuzzy Logic

Sasan Ghasemi⁽¹⁾ - Eskandar Gholipour⁽²⁾

(1) Ph.D Candidate - Department of Electrical Engineering, University of Esfahan, Esfahan, Iran

ghasemi.sasan@gmail.com

(2) Associate Professor - Department of Electrical Engineering, University of Esfahan, Esfahan, Iran

e.gholipour@eng.ui.ac.ir

In this paper to set the parameters of FACTS devices, genetics and particle swarm optimization with fuzzy logic techniques have been used. To optimize the reactive power consumption and reduce the line congestion, two types of FACTS devices; thyristor controlled series compensator (TCSC) and static var compensator (SVC), are used. Optimal location of FACTS devices on the network, which is under heavy loads, results to reduce the power losses, reactive power control and thus reduces the operating costs of the power system. In this paper, the fuzzy membership functions are used in order to determine the weak network buses in order to install the SVC. The values of reactive power through the lines are leads to locate the line which the TCSC should be installed. The method presented in this paper have been compared with other methods (e.g. analysis of eigenvalues) for optimal location of FACTS devices. The results of the simulations presented in this paper, proves the efficiency of the proposed method.

Index Terms: FACTS, evolutionary algorithm, reactive power optimization, TCSC, SVC.

۱- مقدمه

(TCSC) و دیگری جبران‌ساز توان راکتیو استاتیک (SVC) است. هدف اصلی این مقاله جایابی بهینه این تجهیزات به منظور کاهش تلفات توان و هزینه‌های بهره‌برداری از شبکه تحت شرایط بارگذاری متفاوت است. به منظور تنظیم بهینه پارامترهای شبکه و ادوات FACTS اشاره شده، از ترکیب منطق فازی با الگوریتم ژنتیک (فازی-ژنتیک)^۵، ترکیب منطق فازی با الگوریتم تکامل دیفرانسیل (فازی-تکامل دیفرانسیل)^۶، الگوریتم ژنتیک^۷ و الگوریتم ازدحام^۸ ذرات استفاده شده است. همزمان با کاهش تلفات شبکه، ظرفیت خطوط شبکه نیز افزایش می‌یابد. پس می‌توان گفت تابع هدف مسئله به صورت غیر مستقیم شامل افزایش ظرفیت خطوط شبکه نیز است. 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. روش ارائه شده در این مقاله بر روی شبکه استاندارد ۳۰ باسه IEEE تست شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که استفاده از منطق فازی کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد.

۲- مدل کردن ادوات FACTS

برای شبکه‌های قدرت به هم پیوسته، ادوات FACTS را می‌توان به صورت مدل تزریق توان بیان کرد. مدل تزریق توان بیان می‌کند که عناصر FACTS به یک مقدار مشخص توان اکتیو و راکتیو به شبکه تزریق می‌کنند. SVC و TCSC هر دو با تنظیم راکتانس شبکه توان عبوری از خطوط و ولتاژ شبکه را کنترل می‌کنند. در ادامه مدل تزریق توان این دو عنصر ارائه می‌گردد.

۲-۱- جبران‌ساز سری کنترل شده با ترستور (TCSC)

مدل خط انتقال به همراه یک TCSC در شکل (۱) 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. مدل تزریقی توان TCSC در شکل (۲) نشان داده شده است. ادمیتانس شبکه در حضور TCSC به صورت زیر معرفی می‌گردد:

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

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

۲-۲- جبران‌ساز توان راکتیو استاتیک (SVC)

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 اینرو با هموار کردن پروفیل ولتاژ شبکه تلفات شبکه را کاهش می‌دهد. مدل SVC در شکل (۳) آمده است.

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 اینرو باید با 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.

در مقاله [۲] از TCSC برای افزایش ظرفیت خطوط انتقال شبکه استفاده شده است. TCSC با کار در دو حالت راکتوری یا خازنی سبب تغییر در اмпیدانس خطوط شبکه شده و از این طریق ظرفیت خطوط تغییر ایجاد می‌کند. برنامه‌ریزی توان راکتیو تولیدی ژنراتورهای شبکه به منظور مدیریت تراکم^۱ در مقاله [۳] ارائه شده است. در این روش قبودی 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 مقاله [۴] ارائه شده است. جایابی بهینه و مقادیر بهینه ادوات FACTS با استفاده از الگوریتم ژنتیک در مقاله [۵] ارائه شده است.

در این روش به منظور سهولت استفاده کاربر، از یک رابط گرافیکی استفاده شده است. در مقاله [۶] به منظور حل مسئله پخش بار بهینه و تنظیم بهینه پارامترهای تأثیرگذار شبکه از ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات و فازی استفاده شده است. بهینه‌سازی توزیع توان راکتیو روزانه شبکه به منظور بهبود پایداری ولتاژ در مقاله [۷] ارائه شده است. در مقاله [۸]، به منظور توزیع بهینه همزمان توان اکتیو و راکتیو شبکه در حضور عدم قطعیت‌های موجود در بار و مزارع بادی از الگوریتم کرم شب‌تاب^۲ استفاده شده است. در مقاله [۸] برای کنترل توان راکتیو شبکه متغیرهایی همچون تپ ترانس‌ها، توان تزریقی خازن‌های شبکه و ولتاژ باس‌های PV شبکه و برای کنترل توان اکتیو شبکه، فاکتورهای پخش بار اقتصادی و تلفات در نظر گرفته شده است. در [۹] به منظور بهینه‌سازی توان راکتیوی تزریقی توسط ادوات FACTS شبکه از الگوریتم جستجوی جستجوی گرانشی^۳ استفاده شده است که تابع هدف مسئله نیز شامل تلفات و انحرافات ولتاژ باس‌های شبکه است. از الگوریتم جستجوی ارگانیسم‌های همزیست^۴ برای حل مسئله پخش بار بهینه منابع تولید توان و ادوات FACTS شبکه در مقاله [۱۰] استفاده شده است. در [۱۰]، توابع هدف در نظر گرفته شده شامل هزینه سوخت واحدهای تولیدی، تلفات توان خطوط شبکه و هزینه‌های محیطی و اقتصادی می‌باشد. در این مقاله دو نوع از ادوات FACTS مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی جبران‌ساز سری کنترل شده با ترستور

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

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

$$C(T) = C_1(E) + C_2(F) \quad (5)$$

که $C_1(E)$ هزینه‌ی تلفات توان، $C_2(F)$ هزینه‌ی بهره‌برداری از ادوات FACTS شبکه و $C(T)$ کل هزینه‌ی بهره‌برداری شبکه است. در طی جایابی بهینه‌ی ادوات FACTS، قیودی که باید رعایت گردند به قرار زیر هستند:

$$\begin{aligned} P_{ni}^{\min} &\leq P_{ni} \leq P_{ni}^{\max} \\ Q_{ni}^{\min} &\leq Q_{ni} \leq Q_{ni}^{\max} \\ V_{ni}^{\min} &\leq V_{ni} \leq V_{ni}^{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

که 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.

پس از نصب ادوات FACTS در شبکه، معادلات پخش بار به صورت زیر تغییر می‌یابند که باید در پروسه حل مسئله نیز برقرار باشند [۱۲].

$$P_{ij} = V_i^2 G' - V_i V_j (G'_{ij} \cos \delta_{ij} + B'_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (7)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 B'_{ij} - V_i V_j (G'_{ij} \sin \delta_{ij} - B'_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (8)$$

$$P_{ji} = V_j^2 G' - V_i V_j (G'_{ij} \cos \delta_{ij} - B'_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (9)$$

$$Q_{ji} = -V_j^2 B'_{ij} + V_i V_j (G'_{ij} \sin \delta_{ij} + B'_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (10)$$

که G' و B' به ترتیب قسمت حقیقی و موهومی ماتریس ادmittانس شبکه در حضور ادوات FACTS می‌باشند. زمانی که یک TCSC به یکی از خطوط شبکه اضافه می‌شود، اثر خود را با تغییر در راکتانس آن خط نشان می‌دهد از اینرو برای در نظر گرفتن TCSC ماتریس ادmittانس شبکه باید به صورت زیر اصلاح گردد:

$$Z(\text{TCSC_pos}(i)) = Z(\text{TCSC_pos}(i)) - j(\text{TCSC_value})$$

for $i=1:n_{\text{TCSC}}$

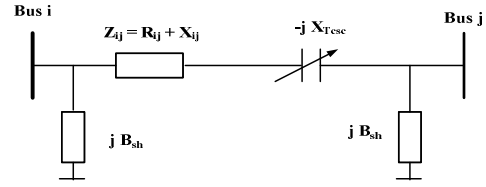
که Z ماتریس ادmittانس شبکه می‌باشد. SVC نیز در باس‌های ضعیف شبکه نصب می‌گردد که با تزریق توان راکتیو به آن باس، توان راکتیو عبوری از خطوط مجاور را کاهش می‌دهد. از اینرو ماتریس ادmittانس شبکه در حضور SVC نیز باید به صورت زیر اصلاح گردد:

$$Y(\text{SVC_pos}(j)) = Y(\text{SVC_pos}(j)) + j(\text{SVC_value})$$

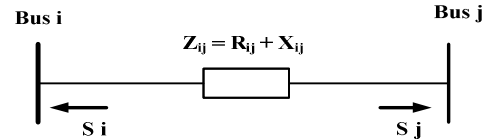
for $j=1:n_{\text{SVC}}$

که Y ماتریس ادmittانس شبکه است. n_{SVC} ، n_{TCSC} و $\text{TCSC_pos}(i)$ و $\text{SVC_pos}(j)$ نیز به ترتیب تعداد TCSC، SVC، مکان نصب TCSC و مکان نصب SVC در شبکه هستند. بنابراین ماتریس ادmittانس شبکه به صورت زیر اصلاح می‌گردد:

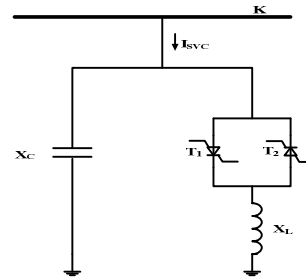
$$Y_{\text{bus}} = G' - jB' \quad (11)$$



شکل (۱): مدل خط انتقال به همراه یک TCSC
Fig. (1): Transmission line model with a TCSC



شکل (۲): مدل تزریقی توان TCSC
Fig. (2): TCSC injection model



شکل (۳): مدل سوسپتانس متغیر SVC
Fig. (3): Variable susceptance model of SVC

۳- تابع هزینه و فرموله کردن مسئله

مطابق [۱۱] هزینه TCSCها و SVCها به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$C_{\text{TCSC}} = 0.0015(\text{TCSC_value})^2 - 0.7130(\text{TCSC_value}) + 153.75 \text{ (US/kVar)} \quad (2)$$

هزینه SVC:

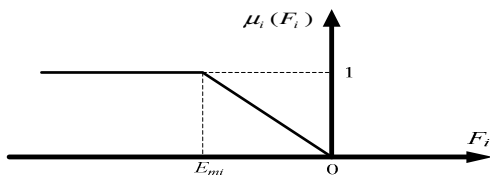
$$C_{\text{SVC}} = 0.0003(\text{SVC_value})^2 - 0.3051(\text{SVC_value}) + 127.38 \text{ (US/kVar)} \quad (3)$$

که TCSC_value و SVC_value به ترتیب مقادیر قدرت بهره‌برداری این ادوات FACTS بر مبنای مگاوار هستند [۱۱]. هزینه تلفات نیز طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$C_{\text{loss}} = P_{\text{loss}} \times \text{EC} \times 8760 \text{ (\$)} \quad (4)$$

که P_{loss} تلفات توان شبکه برحسب کیلووات، EC هزینه انرژی بر حسب دلار بر کیلووات ساعت و C_{loss} هزینه تلفات بر حسب دلار است. هدف اصلی این مقاله جایابی بهینه ادوات ذکر شده با رعایت قیود شبکه به منظور کاهش هزینه‌ی تلفات و هزینه بهره‌برداری در شرایط بارگذاری مختلف شبکه است. هزینه بهره‌برداری ادوات FACTS شبکه شامل هزینه TCSCها و SVCهای شبکه بوده که به ترتیب در معادلات (۲) و (۳) آمده‌اند.

مقدار حساسیت باس‌های مختلف شبکه طبق تابع عضویت نشان داده شده در شکل (۴) محاسبه می‌گردد. رشته‌ی معرف متغیرهای سیستم در روش فازی-ژنتیک و فازی-تکامل دیفرانسیل در جدول (۱) نمایش داده شده است. یکی از اهداف اصلی این مقاله مشخص کردن مکان‌های کاندید مناسب برای نصب SVC و TCSC است. برای انتخاب خطوط مناسب جهت نصب TCSC از مشاهده‌ی توان راکتیو عبوری از خطوط شبکه استفاده می‌شود به‌گونه‌ای که خطوطی که بیشترین مقدار توان راکتیو را حمل می‌کنند از اولویت بالاتری نسبت به بقیه خطوط برای نصب TCSC برخوردار هستند. همان‌گونه که قبلاً نیز بیان شد، در روش‌های فازی-ژنتیک و فازی-تکامل دیفرانسیل باس‌هایی با بیشترین مقدار عضویت فازی به‌عنوان باس‌های کاندید برای نصب SVC انتخاب می‌شوند اما در روش‌های ژنتیک و ازدحام ذرات پس از آنالیز مدال شبکه، باس‌های کاندید مشخص می‌گردند شکل (۵) توان راکتیو عبوری از خطوط شبکه را برای بارگیری ۲۰۰ درصد توان راکتیو را نشان می‌دهد. طبق این شکل، به ترتیب خطوط ۱۵، ۸، ۱۶، ۲۷، ۱۳ و ۱۴ بیشترین توان راکتیو را از خود عبور می‌دهند. از میان خطوطی که به‌صورت مستقیم به هم وصل شده‌اند باید خطی که بیشترین توان راکتیو را عبور می‌دهد انتخاب کرد. از این‌رو از میان خطوط ۱۵ و ۱۶ خط ۱۵ و از میان خطوط ۱۳ و ۱۴، خط ۱۳ انتخاب می‌شوند. پس خطوط کاندید برای نصب TCSC عبارتند از خطوط ۱۵، ۸، ۲۷ و ۱۳. مقادیر عضویت برای چند باس مختلف شبکه که بیشترین حساسیت را دارند، در جدول (۲) آورده شده است. V_{old} برای تمام باس‌های شبکه ۱ پریونیت در نظر گرفته شده است و V_{new} نیز ولتاژ باس‌های شبکه پس از پخش بار است.



شکل (۴): تابع عضویت فازی
Fig (4): Fuzzy membership function

Table (1): Strings representing the variables for FGA and FDE
جدول (۱): رشته معرف متغیرهای سیستم در روش‌های فازی-ژنتیک و فازی-تکامل دیفرانسیل

TCSC	SVC	Transformer Tap	Reactive Generation of Generators
متغیر ۴	متغیر ۳	متغیر ۴	متغیر ۵

۴- مشخص کردن باس‌های ضعیف شبکه با استفاده از منطق فازی
یکی از اهداف اصلی این مقاله جایابی بهینه ادوات FACTS در شبکه با در نظر گرفتن قیود ذکرشده است. 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 ارائه‌شده برای محاسبه حساسیت تلفات به ولتاژ باس‌های مختلف شبکه از آنالیز مدال استفاده شده است که در این مقاله علاوه بر آنالیز مدال، منطق فازی نیز بکار برده شده است. روش ارائه‌شده در این مقاله بر روی شبکه ۳۰ باسه استاندارد IEEE [۱۳] تست شده است. ضریب بار در نظر گرفته شده برای شبکه ۰/۸۵ است [۱۴].

تلفات انتقال در یک سیستم قدرت به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{loss} = \sum_{k=1}^n g_k [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i^* V_j^* \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (12)$$

که g_k رسانایی خط k ام، V_i دامنه ولتاژ باس i ام، 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:

$$[\Delta P_{loss}] = \left[\frac{\partial P_{loss}}{\partial V_1} \quad \frac{\partial P_{loss}}{\partial V_2} \quad \dots \quad \frac{\partial P_{loss}}{\partial V_n} \right] [\Delta V_1 \quad \Delta V_2 \quad \dots \quad \Delta V_n]^T \quad (13)$$

به عبارت دیگر:

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

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

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

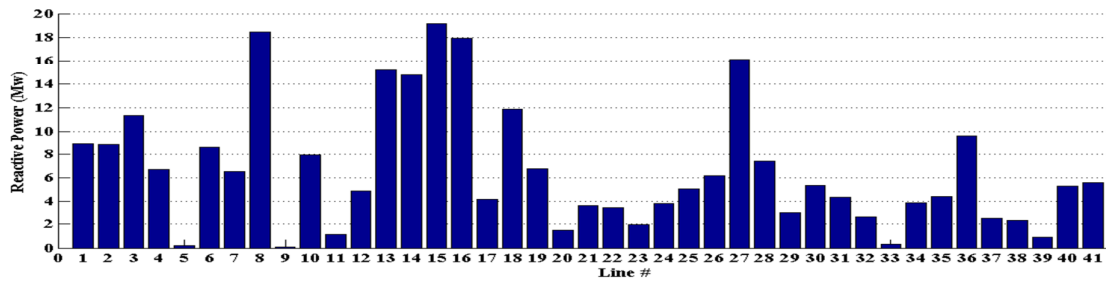
$$\begin{aligned} F_1 &= C_1 . \Delta V_1 \\ F_2 &= C_2 . \Delta V_2 \\ &\dots \\ F_n &= C_n . \Delta V_n \end{aligned} \quad (14)$$

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

پس اگر C_i ها منفی و ΔV_i ها 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:

$$\mu_i(F_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } F_i \leq E_{mi} \\ F_i / E_{mi} & \text{if } E_{mi} < F_i < 0 \\ 0 & \text{if } 0 \leq F_i \end{cases} \quad (15)$$



شکل (۵): توان راکتیو عبوری از خطوط شبکه در بارگذاری ۲۰۰ درصد توان راکتیو نامی
 Fig. (5): Reactive power flow through network lines for 200% reactive loading

Table (2): Membership functions of different buses which have the highest amount

جدول (۲): توابع عضویت باس‌های مختلف شبکه که بیشترین مقدار توابع عضویت را دارند

Bus	$\Delta P_{loss}/dv$	$\Delta V = V_{old} - V_{new}$	F_i	$\mu_i(F_i)$	Rank
3	0.0466	-0.013	-0.00061	0.0690	6
2	0.2390	-0.037	-0.00884	1	1
5	0.0768	-0.011	-0.00085	0.0962	5
10	0.3674	-0.004	-0.0015	0.17	4
12	0.3100	-0.027	-0.0084	0.95	2
22	0.0163	-0.011	-0.0002	0.023	7
27	0.1422	-0.011	-0.0016	0.181	3

هزینه‌ی تلفات، هزینه‌ی ادوات FACTS شبکه نیز کمینه گردد. در این مقاله پس از مشخص کردن خطوط و باس‌های کاندید برای نصب SVC و TCSC، برای تنظیم بهینه پارامترهای شبکه (پارامترهای ادوات FACTS شبکه، تپ ترانس‌ها و تنظیم توان ژنراتورها) از الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات، فازی-ژنتیک و فازی-تکامل دیفرانسیل استفاده شده است.

نمای کلی از روش ارائه شده در این مقاله در فلوجارت شکل (۶) نشان داده شده است. در ادامه شرح مختصری از این الگوریتم‌ها ارائه می‌گردد.

۵-۱- الگوریتم تکامل دیفرانسیل

این الگوریتم یکی از روش‌های محاسبه مقادیر حقیقی با استفاده از استراتژی‌های تکاملی است. روند تکامل در این الگوریتم مبتنی بر ایجاد بهبود تدریجی و مستمر در حدس اولیه (پاسخ کاندید) بوده و طبق اصول تمامی الگوریتم‌های رده تکاملی، به یک تابع برازندگی^۹ جهت مقایسه پاسخ‌ها نیاز دارد.

نقطه قوت الگوریتم تکامل دیفرانسیل در مقایسه با روش‌های حل معادلات حقیقی دیگر (مانند روش نیوتن)، عدم نیاز آن به گرادینان یا شیب تابع است. در نتیجه با استفاده از این الگوریتم، بدون وجود هرگونه اطلاعاتی در مورد نوع تابع می‌توان به محاسبه یک پاسخ نسبتاً بهینه برای انواع توابع چند بعدی پیوسته/غیر پیوسته، متغیر زمانی و نامنظم امیدوار بود.

مراحل الگوریتم تکامل دیفرانسیل به‌صورت زیر است:

(۱) تولید جمعیت اولیه از پاسخ‌های کاندید. هر پاسخ کاندید، یک بردار از اعداد حقیقی به تعداد ابعاد مسئله (پارامترهای مجهول) می‌باشد.

(۲) به ازای هر پاسخ کاندید X ، سه پاسخ متمایز a ، b ، c از جمعیت انتخاب می‌شود.

(۳) تعیین پارامتر تصادفی R ، در محدوده $[0, 1]$ و ابعاد مسئله.

بر اساس تابع عضویت فازی ارائه شده در بالا، به ترتیب باس‌های ۲، ۱۲، ۲۷، ۱۰، ۵ و ۳ از اولویت بالاتری نسبت به سایر باس‌های شبکه برای نصب SVC برخوردارند. حال از میان این مکان‌های کاندید بهترین مکان‌ها برای نصب SVC به شرح زیر انتخاب می‌شوند:

- باس ۲ به باس ۱ وصل است که یک ژنراتور در باس یک وجود دارد، پس باس ۲ لیست باس‌های کاندید برای نصب SVC حذف می‌شود.
- باس ۱۲ به خط ۱۵ وصل است که به عنوان کاندید برای نصب TCSC در نظر گرفته شده است، پس باس ۱۲ از لیست باس‌های کاندید برای نصب SVC حذف می‌شود.
- باس ۱۰ به خط ۲۷ وصل است که به عنوان کاندید برای نصب TCSC در نظر گرفته شده است، پس باس ۱۰ از لیست باس‌های کاندید برای نصب SVC حذف می‌شود.
- باس ۵ به خط ۸ وصل است که به عنوان کاندید برای نصب TCSC در نظر گرفته شده است، پس باس ۵ از لیست باس‌های کاندید برای نصب SVC حذف می‌شود.

پس در روش‌های فازی-ژنتیک و فازی-تکامل دیفرانسیل، باس‌های ۲۲، ۲۷ و ۳ به عنوان باس‌های کاندید برای نصب SVC انتخاب می‌گردند. در الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات باس‌های کاندید برای نصب SVC پس از آنالیز مدال شبکه به دست می‌آیند که عبارتند از باس‌های ۲۱، ۷، ۱۷ و ۱۵.

۵- روش پیشنهادی

هدف این مقاله کاهش هزینه کل بهره‌برداری از شبکه است. از اینرو تابع هدف مسئله که باید کمینه شود یک تابع هدف ترکیبی است. این بدین معناست که کمینه کردن هزینه تلفات به تنهایی هدف این مقاله را محقق نمی‌کند و نیاز است به صورت همزمان با کمینه کردن

انتخاب: پس از آنکه عملگر برازش بر روی جمعیت فعلی انجام پذیرفت، عملگر انتخاب کار خود را آغاز می‌کند. وظیفه‌ی این عملگر انتخاب کروموزوم‌هایی از میان جمعیت فعلی برای ترکیب شدن می‌باشد. عملگر انتخاب از مقادیر تولید شده برای هر کروموزوم از عملگر برازش در مرحله قبل استفاده کرده و از میان جمعیت، کروموزوم‌هایی را برای ترکیب شدن انتخاب می‌کند. کروموزوم‌های با مقدار برازش بیشتر، شانس بیشتری برای انتخاب شدن خواهند داشت. در صورتی که تعداد جمعیت K کروموزوم باشد، جمعیت میانی حاصل از اعمال عملگر انتخاب نیز باید K کروموزوم داشته باشد.

روش‌های مختلفی برای انتخاب کروموزوم‌ها وجود دارد. یکی از رایج‌ترین روش‌ها، روش رقابتی می‌باشد. در روش رقابتی دو یا چند کروموزوم را به صورت تصادفی انتخاب کرده و از میان آنها کروموزومی که برازش آن بهتر از دیگر کروموزوم‌های انتخاب شده باشد، انتخاب می‌شود. این عمل به تعداد کروموزوم‌های جمعیت اولیه انجام می‌شود. محصول نهایی عملگر انتخاب، جمعیت میانی می‌باشد که از این جمعیت در مراحل بعدی استفاده خواهد شد.

ادغام: پس از انجام دو مرحله‌ی فوق، شرایط برای ترکیب کروموزوم‌ها با یکدیگر مهیا شده است. عملگر ادغام از کروموزوم‌های جمعیت میانی استفاده کرده و آنها را با هم ترکیب می‌کند.

جهش: عملگر جهش هنگامی که بر روی کروموزومی اعمال می‌شود باعث بروز جهش در آن کروموزوم می‌گردد. روش معمول برای جهش تغییر دادن یک یا چند ژن از کروموزوم به صورت تصادفی می‌باشد. برای حل مسئله با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک، ابتدا جمعیت اولیه‌ای شامل K کروموزوم تولید می‌شود. هر کروموزوم نشان دهنده یک جواب مسئله خواهد بود. سپس با استفاده از عملگر برازش میزان مطلوب بودن هر کروموزوم محاسبه شده و در مرحله بعد با استفاده از مقادیر محاسبه شده در مرحله برازش، کروموزوم‌هایی را انتخاب کرده و جمعیت میانی تولید می‌شود. در نهایت نیز عملگر جهش بر روی کروموزوم‌های جمعیت میانی اعمال می‌شود. پس از اعمال عملگر جهش، جمعیت میانی جایگزین جمعیت اولیه می‌شود. این مراحل تا زمانی که شرط خاتمه الگوریتم حاصل نشود ادامه خواهد داشت.

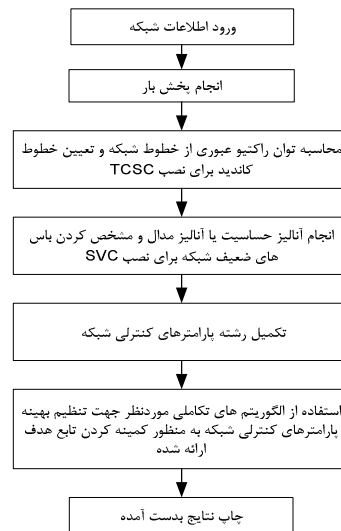
۵-۳- الگوریتم ازدحام ذرات

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، مقداردهی می‌شود و سپس جستجو برای رسیدن به بهترین جواب آغاز می‌گردد. در هر مرحله از تکرار الگوریتم، ذره به سمت موقعیت بهتر جابجا می‌شود. موقعیت بعدی هر ذره با توجه به دو مقدار به دست می‌آید: اولین مقدار، بهترین موقعیتی است که ذره تاکنون داشته است ($pbest$) و دومین مقدار، بهترین موقعیتی است که تا بحال توسط کل ذرات آن

(۴) محاسبه پاسخ بهبودیافته‌ی Y به این صورت که به ازای هر $X(i)$ از X ، در صورت برابر بودن R با i یا برآورده شدن احتمال ترکیب $p(i)$ ، از فرمول برآورد $Y(i) = a(i) + F*(b(i) - c(i))$ برای محاسبه $y(i)$ استفاده می‌شود. در غیر این صورت خود $X(i)$ بجای $Y(i)$ انتخاب می‌شود.

(۵) پذیرش پاسخ جدید Y ، در صورتی که برازندگی آن از X بیشتر باشد. (۶) تکرار مراحل ۲ تا ۵ تا زمان تحقق شرط خاتمه.

لازم به ذکر است که پارامتر CR همان احتمال ترکیب است (مانند ژنتیک) و $p(i)$ نیز شانس تحقق ترکیب برای هر بُعد از پاسخ می‌باشد. مقدار F نیز یک مقدار صحیح و ثابت می‌باشد که با توجه به نوع مسئله انتخاب می‌گردد.



شکل (۶): فلوچارت روش پیشنهادی

Fig. (6): The flow chart of proposed method

۵-۲- الگوریتم ژنتیک

در الگوریتم‌های ژنتیک ابتدا به صورت تصادفی یک جمعیت اولیه جواب برای مسئله تولید می‌شود. سپس با استفاده از عملگرهای الگوریتم ژنتیک پس از انتخاب کروموزوم‌های بهتر، کروموزوم‌ها با هم ترکیب شده و جهشی در آنها ایجاد می‌شود. در نهایت نیز جمعیت فعلی با جمعیت جدیدی که از ترکیب و جهش در کروموزوم‌ها حاصل شده است، ترکیب می‌شود.

برای انتخاب، ترکیب و ایجاد جهش در کروموزوم‌ها عملگرهای مختلفی وجود دارد اما غالباً الگوریتم‌های ژنتیک از چهار عملگر زیر برای حل مسائل استفاده می‌کنند:

- برازش (Fitness)
- انتخاب (Selection)
- ادغام (Crossover)
- جهش (Mutation)

برازش: با استفاده از این عملگر، میزان بهینگی هر کروموزوم تعیین می‌گردد.

مکان‌های نصب SVC و TCSC در الگوریتم‌های مختلف و محدوده مجاز پارامترهای کنترلی شبکه به ترتیب در جدول‌های (۳) و (۴) آمده‌اند. جدول (۵) مجموع توان راکتیو عبوری از خطوط شبکه را در دو حالت بدون ادوات FACTS و همراه با ادوات FACTS تنظیم شده با الگوریتم‌های مختلف را در شرایط بارگذاری توان راکتیو ۱۰۰٪ و ۲۰۰٪ بار مبنای شبکه را نشان می‌دهد.

Table (3): Locations of TCSC and SVC for different algorithms
جدول (۳): مکان‌های نصب SVC و TCSC برای الگوریتم‌های مختلف

SVC باس‌های نصب		TCSC خطوط نصب
الگوریتم‌های Fuzzy- Fuzzy-DE و GA	الگوریتم‌های PSO و GA	خطوط ۸، ۱۳، ۱۵ و ۲۷
۲۷، ۲۲ و ۳	۱۵ و ۱۷، ۷، ۲۱	

Table (4): Limits of controlling parameters of IEEE 30 bus system
جدول (۴): محدوده مجاز پارامترهای کنترلی سیستم ۳۰ باسه IEEE

Reactive Generation (pu)	Transformer Tap position (pu)	SVC (pu)	TCSC (pu)
محدوده مجاز توان راکتیوی ژنراتورها در سیستم ۳۰ باسه IEEE	حداقل ۰.۹ حداکثر ۱.۱	حداقل ۰ حداکثر ۰.۶	حداقل ۰ حداکثر ۰.۶

Table (5): Total reactive power flow in system for different reactive loading conditions

جدول (۵): مجموع توان راکتیو عبوری از خطوط شبکه در شرایط بارگذاری توان راکتیو مختلف

در حضور ادوات FACTS (pu)				بدون ادوات FACTS (pu)	بارگذاری توان راکتیو (%)
Fuzzy-GA	Fuzzy-DE	GA	PSO		
0.4134	0.42499	0.4115	0.6945	0.28971	100
1.4054	0.88219	2.4414	1.4164	1.35294	200

با توجه به جدول (۵) دیده می‌شود که مجموع توان راکتیو عبوری از خطوط شبکه در حالتی که پارامترهای کنترلی شبکه توسط ترکیب منطق فازی و الگوریتم‌های تکاملی تنظیم شده باشند، کمتر از حالتی است که این پارامترها تنها توسط الگوریتم‌های تکاملی تنظیم شده باشند. به‌عنوان مثال، در بارگذاری ۲۰۰ درصد توان راکتیو نامی شبکه و در حضور ادوات FACTS، کمترین میزان مجموع توان راکتیو عبوری از خطوط شبکه برابر ۰/۸۸۲۱۹ پریونیت است که توسط ترکیب منطق فازی و الگوریتم تکاملی دیفرانسیل به دست آمده است. جدول (۶) دامنه و زاویه فاز ولتاژ باس‌های شبکه را قبل و بعد از نصب SVC در شبکه توسط الگوریتم‌های PSO و GA را در شرایط بارگذاری ۲۰۰٪ توان راکتیو را نشان می‌دهد. جدول (۷) دامنه و زاویه فاز ولتاژ باس‌های شبکه را قبل و بعد از نصب SVC در شبکه توسط الگوریتم‌های Fuzzy-GA و Fuzzy-DE را در شرایط بارگذاری ۲۰۰٪ توان راکتیو را نشان می‌دهد.

اجتماع به دست آمده است (gbest). این فرایند تا زمان رسیدن به شرط خاتمه الگوریتم ادامه خواهد داشت.

با توجه به مقادیر pbest و gbest هر ذره از روابط زیر برای تعیین موقعیت بعدی خود استفاده می‌کند:

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_1(pbest - x_{ij}(t)) + c_2r_2(gbest - x_{ij}(t)) \quad (16)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1)$$

ثابت‌های c_1 و c_2 به ترتیب پارامترهای یادگیری برای pbest و gbest 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 می‌کند.

در این مقاله مقادیر این پارامترها به‌صورت زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$w_{max}=0.8; w_{min}=0.2; c_1=c_2=2$$

۶- نتایج شبیه‌سازی

این مقاله بر مزیت ترکیب منطق فازی با الگوریتم‌های تکاملی نسبت به الگوریتم‌های تکاملی معمول تأکید دارد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد هرچند مشخص کردن باس‌های ضعیف شبکه با استفاده از تکنیک‌های استاندارد شبیه آنالیز مدال و استفاده همزمان از الگوریتم‌های تکاملی معمول (شبیه الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات) جهت تنظیم پارامترهای کنترلی شبکه سبب کاهش هزینه تلفات و بهره‌برداری شبکه می‌شود اما کاهش چشمگیر در این هزینه‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که از منطق فازی برای مشخص کردن باس‌های ضعیف شبکه به همراه الگوریتم‌های ژنتیک و تکامل دیفرانسیل استفاده شود. تفاوت منطق فازی و آنالیز مدال در نحوه‌ی مشخص کردن باس‌های ضعیف شبکه سبب شده که باس‌های کاندید مشخص شده توسط این دو روش در نصب SVC متفاوت باشند به‌گونه‌ای که مکان‌های کاندید پیشنهاد شده توسط منطق فازی، باس‌های ۳، ۲۲ و ۲۷ می‌باشند در حالی که مکان‌های کاندید پیشنهاد شده توسط آنالیز مدال، باس‌های ۲۱، ۱۷، ۷ و ۱۵ می‌باشند.

خطوط کاندید برای نصب TCSC با توجه به توان راکتیو عبوری از خطوط مشخص می‌شوند به‌گونه‌ای که خطوطی با توان راکتیو عبوری بیشتر در اولویت بالاتری برای نصب TCSC قرار دارند. پس از انجام پخش بار بر روی شبکه ۳۰ باسه IEEE دیده می‌شود که خطوط ۸، ۱۳، ۱۵ و ۲۷ بیشترین توان راکتیو را نسبت به سایر خطوط از خود عبور می‌دهند، پس این خطوط به‌عنوان خطوط کاندید برای نصب TCSC مورد بررسی قرار می‌گیرند. پس مکان نصب TCSC در هر دو روش ترکیب فازی با الگوریتم‌های تکاملی و ترکیب آنالیز مدال با الگوریتم‌های تکاملی یکسان است.

سایر پارامترهای کنترلی شبکه نظیر تپ ترانس‌ها و توان راکتیو خروجی ژنراتورها به‌صورت همزمان با پارامترهای TCSC و SVCها توسط الگوریتم‌های در نظر گرفته شده بهینه می‌شوند.

جدول (۸) مقدار تلفات شبکه را پس تنظیم پارامترهای کنترلی شبکه توسط الگوریتم‌های PSO، GA، Fuzzy-GA و Fuzzy-DE را نشان می‌دهد. مقایسه هزینه بهره‌برداری از سیستم در حضور و عدم حضور ادوات FACTS در شرایط بارگذاری متفاوت را برای الگوریتم‌های مختلف در جدول‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده‌است.

Table (6): Bus voltages and phase angles with and without SVC for 200% reactive loading using GA and PSO
جدول (۶): دامنه و زاویه فاز ولتاژ باس‌های شبکه را قبل و بعد از نصب SVC در شبکه توسط الگوریتم‌های PSO و GA در ۲۰۰ درصد توان راکتیو نامی شبکه

باس	دامنه ولتاژ بدون FACTS	زاویه ولتاژ بدون FACTS	دامنه ولتاژ با FACTS	زاویه ولتاژ با FACTS
7	0.9936	-7.9367	0.996	-2.849
15	1.0001	-9.9888	0.977	-2.595
17	0.9971	-9.9989	0.968	-3.037
21	0.9866	-10.1912	0.965	-2.884

Table (7): Bus voltages and phase angles with and without SVC for 200% reactive loading using FGA and FDE
جدول (۷): دامنه و زاویه فاز ولتاژ باس‌های شبکه را قبل و بعد از نصب SVC در شبکه توسط الگوریتم‌های Fuzzy-GA و Fuzzy-DE در ۲۰۰ درصد توان راکتیو نامی شبکه

باس	دامنه ولتاژ بدون FACTS (pu)	زاویه ولتاژ بدون FACTS (deg)	دامنه ولتاژ با FACTS (pu)	زاویه ولتاژ با FACTS (deg)
3	1.0126	-4.4881	1.025	-1.465
22	0.9885	-10.1033	0.986	-3.848
27	0.9889	-10.2336	0.988	-5.119

Table (8): Comparative analysis of active power loss using PSO, GA, FGA and FDE
جدول (۸): مقایسه تلفات شبکه به دست آمده توسط الگوریتم‌های PSO، GA، Fuzzy-GA و Fuzzy-DE

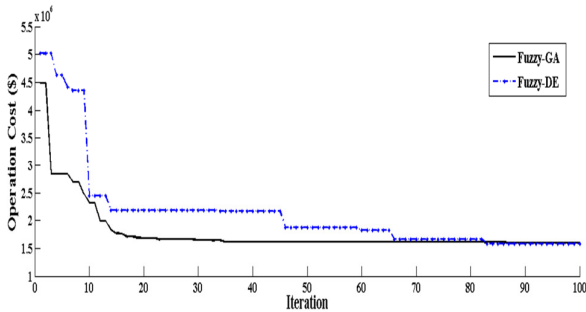
بارگذاری توان راکتیو (%)	تلفات شبکه در حضور ادوات FACTS (MW)			
	Fuzzy-DE	Fuzzy-GA	GA	PSO
100	2.2988	2.1798	2.2804	2.2176
150	2.5632	2.8591	2.5769	2.4694
200	3.0001	2.8940	3.6529	2.9229

Table (9): Operating costs with and without FACTS devices using PSO, GA and FGA
جدول (۹): هزینه بهره‌برداری از سیستم در حضور و عدم حضور ادوات FACTS توسط PSO، GA و Fuzzy-GA

بارگذاری توان راکتیو (%)	هزینه بهره‌برداری ناشی از تلفات (میلیون دلار) (a)	هزینه‌های بهره‌برداری با ادوات FACTS (میلیون دلار) (b)	هزینه‌های بهره‌برداری با ادوات FACTS (میلیون دلار) (c)	هزینه‌های بهره‌برداری با ادوات FACTS (میلیون دلار) (d)	صرفه‌جویی اقتصادی توسط PSO (میلیون دلار) (a-c)	صرفه‌جویی اقتصادی توسط Fuzzy-GA (میلیون دلار) (a-d)
100	3.7988	1.2724	1.2756	1.1875	2.5264	2.6113
150	3.9476	1.3829	1.3993	1.3756	2.5647	2.572
200	4.233	1.9494	1.6470	1.5981	2.2836	2.6349

Table (10): Operating costs with and without FACTS devices using PSO, GA and FDE
جدول (۱۰): هزینه بهره‌برداری از سیستم در حضور و عدم حضور ادوات FACTS توسط PSO، GA و Fuzzy-DE

بارگذاری توان راکتیو (%)	هزینه بهره‌برداری ناشی از تلفات (میلیون دلار) (a)	هزینه‌های بهره‌برداری با ادوات FACTS (میلیون دلار) (b)	هزینه‌های بهره‌برداری با ادوات FACTS (میلیون دلار) (c)	هزینه‌های بهره‌برداری با ادوات FACTS (میلیون دلار) (d)	صرفه‌جویی اقتصادی توسط PSO (میلیون دلار) (a-c)	صرفه‌جویی اقتصادی توسط Fuzzy-DE (میلیون دلار) (a-d)
100	3.7988	1.2724	1.2756	1.2180	2.5264	2.5808
150	3.9476	1.3829	1.3993	1.3474	2.5647	2.6002
200	4.233	1.9494	1.6470	1.5843	2.2836	2.6487



شکل (۹): تغییرات هزینه‌های بهره‌برداری شبکه را در حالت بارگذاری ۲۰۰ درصد بار راکتیو مبنای شبکه به دست آمده توسط الگوریتم‌های Fuzzy-GA و Fuzzy-DE

Fig. (9): Variations of operating costs for 200% reactive loading using FGA and FDE

طبق مقایسه نتایج نشان داده شده در جدول‌های (۸)، (۹) و (۱۰)، دیده می‌شود که روش‌های تکاملی ترکیب شده با منطق فازی در هر دو زمینه کاهش تلفات و هزینه‌های سرمایه‌گذاری به نتایج بهتری نسبت به الگوریتم‌های تکاملی معمول دست می‌یابند. همان‌گونه که دیده شد رفتار سیستم از نظر تلفات، پروفیل ولتاژ و هزینه‌های بهره‌برداری سیستم در شرایط بارگذاری ۱۰۰ تا ۲۰۰ درصد بار راکتیو نامی شبکه مورد تحقیق قرار گرفته است که مقدار بهینه متغیرهای شبکه به دست آمده در این راستا، توسط روش فازی و غیر فازی در جدول‌های (۱۱) و (۱۲) آمده است.

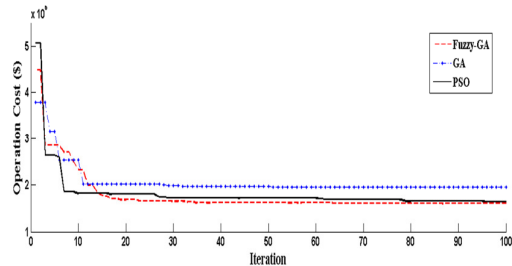
۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله از تابع عضویت فازی برای مشخص کردن باس‌های ضعیف شبکه و بهینه‌سازی همزمان پارامترهای شبکه در حضور ادوات FACTS استفاده شده است. کارایی روش ارائه شده بر روی شبکه ۳۰ باس IEEE آزمایش شده و نتایج به دست آمده با سایر روش‌های بهینه‌سازی معمول مورد مقایسه قرار گرفته است. اگرچه رفتار سیستم با افزایش بار شبکه با چالش‌های جدی روبرو می‌شود، اما با اعمال روش ارائه شده در این مقاله بر روی سیستم در شرایط اضافه باری، دیده می‌شود که سیستم از لحاظ تلفات و هزینه‌های شبکه در شرایط خوبی قرار می‌گیرد. پس روش ارائه شده در این مقاله را می‌توان به عنوان یک روش مناسب جهت هماهنگ‌سازی ادوات FACTS با سایر منابع تولید توان راکتیو شبکه مورد استفاده قرار داد.

پی‌نوشت:

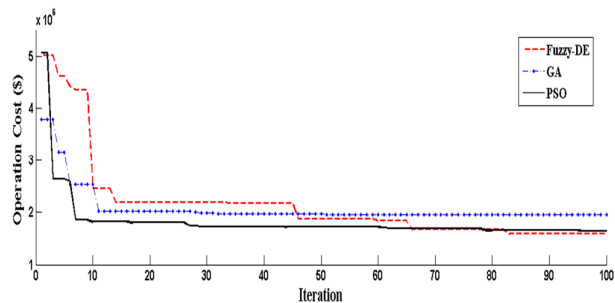
1. Congestion management
2. Firefly Algorithm (FA)
3. Gravitational Search Algorithm (GSA)
4. Symbiotic Organisms Search (SOS)
5. Fuzzy-Genetic (FGA)
6. Fuzzy-Differential Evolution (FDE)
7. Genetic Algorithm (GA)
8. Particle Swarm Optimization (PSO)
9. Fitness function

شکل (۷)، تغییرات هزینه‌های بهره‌برداری شبکه در حالت بارگذاری ۲۰۰ درصد بار راکتیو مبنای شبکه به دست آمده توسط الگوریتم‌های GA، PSO و Fuzzy-GA در تکرارهای مختلف این روش‌ها را نشان می‌دهد. به صورت مشابه، شکل (۸) تغییرات هزینه‌های بهره‌برداری شبکه در حالت بارگذاری ۲۰۰ درصد بار راکتیو مبنای شبکه به دست آمده توسط الگوریتم‌های GA، PSO و Fuzzy-DE در تکرارهای مختلف این روش‌ها را نشان می‌دهد. شکل (۹) نیز مقایسه نتایج به دست آمده توسط روش‌های Fuzzy-GA و Fuzzy-DE را در حالت بارگذاری ۲۰۰ درصد بار راکتیو مبنای شبکه را نشان می‌دهد.



شکل (۷): تغییرات هزینه‌های بهره‌برداری شبکه را در حالت بارگذاری ۲۰۰ درصد بار راکتیو مبنای شبکه به دست آمده توسط الگوریتم‌های PSO، GA و Fuzzy-GA

Fig. (7): Variations of operating costs for 200% reactive loading using PSO, GA and FGA



شکل (۸): تغییرات هزینه‌های بهره‌برداری شبکه را در حالت بارگذاری ۲۰۰ درصد بار راکتیو مبنای شبکه به دست آمده توسط الگوریتم‌های PSO، GA و Fuzzy-DE

Fig. (8): Variations of operating costs for 200% reactive loading using PSO, GA and FDE

Table (11): Optimal Amount of controlling parameters by GA and FGA
 جدول (۱۱): مقادیر بهینه پارامترهای کنترلی به دست آمده توسط الگوریتم‌های GA و Fuzzy-GA

تپ ترانسفورماتورها (pu)		توان راکتیو ژنراتورها (pu)		راکتانس TCSC (pu)		سوسپتانس SVC (pu)		بارگذاری توان راکتیو (%)
Fuzzy-GA	GA	Fuzzy -GA	GA	Fuzzy -GA	GA	Fuzzy-GA	GA	
1.0935	1.0139	0.13307	0.083284	0.000478	0.001642	0.20791	0.27311	100
1.0306	1.0177	0.22217	0.20774	0.04977	0.038385	0.02406	0.15632	
1.0210	1.0406	0.033959	0.056271	0.002181	0.001578	0.04484	0.12249	
0.9926	1.0289	0.16875	0.079355	0.000568	0.001955		0.002796	
1.0005	1.0098	0.84269	0.31689	0.006994	0.001021	0.028260.5	0.025107	200
1.0393	0.9607	0.4933	0.53686	0.055786	0.02757	0.30082	0.10994	
0.9736	0.9741	0.4681	0.43835	0.004722	0.01884	0.22342	0.03735	
0.9804	0.9324	0.2863	0.021155	0.004567	0.004362		0	

Table (12): Optimal amount of controlling parameters by PSO and FDE
 جدول (۱۲): مقادیر بهینه پارامترهای کنترلی به دست آمده توسط الگوریتم‌های PSO و Fuzzy-DE

تپ ترانسفورماتورها (pu)		توان راکتیو ژنراتورها (pu)		راکتانس TCSC (pu)		سوسپتانس SVC (pu)		بارگذاری توان راکتیو (%)
Fuzzy-DE	PSO	Fuzzy-DE	PSO	Fuzzy-DE	PSO	Fuzzy-DE	PSO	
		0.03448	0.21014	0.000593	0.000222	0	0.18907	100
1.0791	0.9916	-0.06	0.12688	0.010777	0.020389	0.059745	0.186513	
1.0665	1.0456	0.1536	0.29206	0.003551	0.002623	0	0.23434	
1.0689	1.0312	0.32757	-0.3363	0	0.02897		0.268698	
0.9843	1.0310	0.07221	0.035845					
		0.19881						
		0.0505	0.376707	0	0.002487	0	0.17929	200
0.9989	0.9806	-0.08	0.26672	0.044093	0.06131	0	0.226787	
1.0167	1.0372	0.26907	0.386608	0.005337	0.001060	0	0.163165	
1.0515	1.0310	0.44969	0.27008	0	0.002965	0	0.261999	
0.9585	0.9615	0.4000	0.25554					
		0.35803						

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, 2013.
- [6] S. Kumar, D.K. Chaturvedi, "Optimal power flow solution using fuzzy evolutionary and swarm optimization", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 47, pp. 416-423, 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, 2015.
- [8] R.H. Liang, J.C. Wang, Y.T. Chen, W.T. Tseng, "An enhanced firefly algorithm to multi-objective optimal active/reactive power dispatch with uncertainties consideration", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 64, pp. 1088-1097, 2015.
- [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, 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, In Press Available online 12 Aug. 2015.
- [11] 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.
- [12] B. Bhattacharyya, V. Kumar-Gupta, "Fuzzy based evolutionary algorithm for reactive power optimization with FACTS devices", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 61, pp. 39-47, 2014.
- [13] 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.
- [14] Fangxing Li, Rui Bo, "Small test systems for power system economic studies", Proceeding of the IEEE/PES, pp. 1-4, Minneapolis, MN, pp. 1-4, July 2010.