بررسی اثرگذاری ادوات FACTS بر کاهش تلفات و پروفیل ولتاژ در بازار نوع اشتراکی

محسن فلکی*[۱]

*۱- کارشناس ارشد برق، گروه برق، شرکت دانش بنیان تروند زعفران، Mohsen.falaki@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۰۹

چکیده: در این مقاله به‌منظور حل مسئله پخش بار بهینه (OPF) در حضور تجهیزات FACTS از ترکیب الگوریتم لاگرانژ تعمیم یافته بر اساس ناحیه اطمینان (TRALM) و الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) استفاده‌شده است. چهار تجهیز TCSC، TCPST UPFC, و SVC مورد تست قرارگرفته اند. مدل سازی ادوات FACTS بر اساس روش تزریق توان می‌باشد. برای مدیریت بهینه تولید، تلفات و پروفیل ولتاژ، یک تابع چهار هدفه حاوی: حداقل هزینه سوخت، حداقل هزینه سرمایه‌گذاری تجهیز، حداقل تلفات انتقال و بهبود پروفیل ولتاژ فرموله شده و در قالب یک مسئله بهینه‌سازی تک هدفه بیان‌شده است. برای رسیدن به نقطه بهینه به سبب در تضاد بودن اهداف از یک سری ضرایب برای نرمالیزه کردن تابع هدف استفاده‌شده است. روش حل بدین صورت است که ابتدا الگوریتم GSA به‌صورت تصادفی تنظیمات تجهیزات FACTS و ضرایب نرمالیزه را تعیین و پس از نصب، الگوریتم TRALM مسئله را در حضور تجهیزات FACTS در بازار نوع اشتراکی حل می‌کند. نتایج آزمون بر روی سیستم تست ۱۴ شینه IEEE بیانگر اثرگذاری مناسب الگوریتم بر اهداف مسئله می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پخش بار بهینه (OPF)؛ تجهیزات FACTS؛ بازار نوع اشتراکی؛ بهینه‌سازی چندهدفه؛ الگوریتم TRALM-GSA

۱-مقدمه

رشد روزافزون مصرف انرژی الکتریکی و پراکندگی منابع و مصرف کنندگان، لزوم آماده سازی انرژی پایدار و با کیفیت را، بیش از پیش ضروری کرده است. برای پاسخگویی به نیاز مصرف کنندگان و بهره‌برداری بهینه از سیستم قدرت، نیازمند یک توزیع اقتصادی مناسب هستیم که علاوه بر تامین پایدار توان، بهره‌برداری بهینه از سیستم را تضمین نماید. دستیابی به این هدف با پخش بار مناسب توسط سیستم، فراهم می‌شود. محاسبات پخش بار بهینه نقش مهمی در برنامه ریزی تولید ایفا می نماید [۳-۱]. استفاده از پخش بار بهینه باعث می‌شود؛ متغیرهای کنترل و حالت به گونه ای تعیین شود که علاوه بر بهینه‌سازی تابع هدف مسئله مجموعه ای از قیود مساوی و نا مساوی به ازای ساز و برگ شبکه تعیین گردد؛ اما از طرفی موانع فیزیکی در مقابل اپراتور و بهره‌بردار سیستم جهت رسیدن به نتیجه ی دلخواه وجود دارد. به عنوان مثال تلفات در سیستم قدرت جزء جدا ناشدنی در تولید، انتقال و توزیع سیستم قدرت است که کاهش بهره وری را بهمراه دارد. عواملی از قبیل محل قرارگیری واحدها، حجم توان انتقالی، نوع تقاضای بار، ضریب توان هارمونیک ها و ... می‌توانند بر تلفات اثرگذار باشند. یکی از گام های که در دهه های گذشته توسط محققین جهت افزایش بازدهی سیستم قدرت برداشته شده، تفکیک بخش های مختلف و خصوصی سازی بازار برق در بخش های گوناگون است. این تغییرات که ابتدا در اثرگذاری مناسب آن تردید وجود داشت به خوبی منجر به افزایش بازده سیستم شد و موانع پیش رو را با پیروزی پشت سر گذاشت. البته نیاز روزافزون انرژی، امنیت سیستم قدرت را به طور مداوم مطالبه می‌کند. به همین سبب، مطالعات پایداری و بهبود پروفیل ولتاژ، نقش مؤثری در امنیت سیستم اجرا می‌کند. با توجه به تضاضای انرژی، توسعه سیستم می‌تواند از روش های مختلفی از قبیل احداث خطوط جدید، ساخت نیروگاه های دیزل و تولید پراکنده یا استفاده از تجهیزات FACTS صورت پذیرد. واضح است احداث خطوط جدید و احداث نیروگاه به سبب هزینه های بالای

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.3.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019

خرید زمین و ساخت، زمان احداث و تعمیر و نگه داری باعث تحمیل هزینه های گذاف اقتصادی و زیست محیطی می‌شود و با قوانین سخت گیرانه وضع شده در زمینه محیط زیست امری دشوار به نظر می رسد. از طرفی لزوم تامین پایدار انرژی و تقاضای روز افزون آن پاسخگویی سریع مصرف کنندگان را الزامی می‌کند. در این حالت تجهیزات FACTS می‌توانند با اثرگذاری بر پارامترهای سیستم قدرت پاسخگوی نیاز بازیگران بازار باشند. برخی محققین بر این عقیده اند که افزایش میل به این تجهیزات به دلیل پیشرفت در الکترونیک قدرت است که بهره‌برداری ادوات را مقرون به صرفه کرده است. همچنین تولید کننده و توریع کننده، همانند روش قطع یا زمان بندی بار، درگیر پیچیدگی نمی‌شوند. بر حسب استاندارد IEEE تجهیزات FACTS قابلیت سیستم را در موارد کنترل منظم پخش بار، کاهش هزینه های تولید و بهره‌برداری، بارپذیری خطوط تا حد حرارتی، کنترل سیلان توان و ارتقا پایداری دینامیکی سبستم افزایش می‌دهد [۱۱-۴].

مطالعه ی پژوهش محققین نشان می‌دهد، کاربرد تجهیزات FACTS به‌صورت گسترده در سیستم های قدرت استفاده‌شده است. کاظمی و همکاران [۱۲] برای مدیریت تراکم در شرایط نرمال و وقوع احتمال تراکم بهترین موقعیت TCPST را تعیین کرده است. مرجع [۱۳] جهت کاهش هزینه تولید و انتقال از تجهیز TCSC استفاده کرده است. جورابیان [۱۴] یک روش با UPFC برای بهبود پروفیل ولتاژ و هزینه‌ی تولید ارائه کرده است. همچنین ایشان جهت مدیریت تراکم TCSC و TCPST را با روش پیشنهادی ترکیب OPF و congestion rate جایابی و تنظیم پارامتر نموده است[۱۵]. مرجع[۱۶] برای افزایش ظرفیت انتقال در دسترس (ATC) از تجهیزات TCSC TCPST SVC استفاده کرده است. مرجع [۱۶] بهینه یاب جدیدی مبتنی بر الگوریتم جستجوی گرانشی برای حل مسائل چندهدفه ولتاژ، تلفات و هزینه تولید پیشنهاد داده است. مرجع [۱۶] از تجهیزات FACTS، جهت افزایش امنیت و کاهش تلفات، استفاده ار الگوریتم ژنتیک را جهت جایابی پیشنهاد داده است. صادقی و همکاران [۱۷] جهت مدیریت تراکم و کاهش تلفات تجهیزات FACTS را پیشنهاد کرده است. عباسیان و همکاران [۱۸] چندین روش بهینه‌سازی از جمله الگوریتم جستجوی گرانشی بر مبنای بهینه پرتو، مورد برسی و مقایسه قرارداده است. بررسی مقالات نشان می دهد که اگر تنظیمات تجهیز FACTS به درستی صورت گیرد، دسترسی به اهداف مسئله را ممکن می سازد. بر همین اساس، این مقاله هدف خود را بر دستیابی به موقعیت مناسب تجهیز و تعیین مقدار آن بر اساس تابع هدفی جامع بر مبنای نرمالیزه کردن به‌صورت تک هدفه با دسترسی به اهداف مختلف، بنا نهاده است. بدین معنی که مکان یابی تجهیزات FACTS بر مبنای کاهش هزینه تولید، کاهش تلفات خطوط، حداقل سازی هزینه های نصب تجهیز با کمترین انحراف ولتاژ، صورت گرفته است.

روش حل مسئله برای پخش بار بهینه براساس ترکیب الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) و الگوریتم لاگرانژ تعمیم یافته مبتنی بر روش ناحیه اعتماد (TRALM) است. حل مسئله بدین صورت است که پخش بار بهینه در ترکیب با تجهیز FACTS برمبنای روش TRLAM حل می‌شود و حداقل سازی تابع هدف و انجام تنظیمات تجهیز FACTS توسط الگوریتم جستجوی گرانشی صورت می پذیرد. در این پژوهش چهار تجهیز TCSC,TCPST,SVC UPFC برای بررسی و مقایسه انتخاب شده اند. محاسبات مسئله در سیستم قدرت تجدید ساختار یافته با بازار نوع اشتراکی (POOL) ارائه شده است. برای مدل سازی تجهیزاتFACTS (TCSC,TCPST,SVC) روش تزریق توان انتخاب شده و حالت‌های مورد بررسی با ملاحظات قیود پخش بار بهینه و ظرفیت نامی خطوط انجام شده است.

ادامه مقاله بدین صورت است که، در بخش دوم مدل سازی تجهیزات FACTS مطرح می‌شود. بخش سوم فرمول بندی مسئله OPF بیان می‌شود و قیود مختلف مسئله بررسی می‌گردد. بخش چهارم تابع هدف مسئله با اهداف مختلف فرموله شده و بخش پنجم الگوریتم حل مسئله OPF را بیان می‌کند. الگوریتم جستجوی گرانشی به تفضیل در بخش شش مورد بحث قرار می گرفته و بخش هفتم، روش پیشنهادی بر روی سیستم تست ۱۴ شینه IEEE استاندارد، تست می‌شود. در نهایت تحلیل و نتیجه‌گیری مسئله مورد ارزیابی قرار می گیرد.

۲-مدل سازی تجهیزات FACTS

برای کاربرد استاتیکی ادوات FACTS، می‌توان از مدل تزریق توان استفاده نمود. مدل تزریق توان (PIM) برای تجهیز FACTS بدین صورت است که تجهیز، مقدار مشخصی توان اکتیو و راکتیو به گره، تزریق می‌کند. مزیت استفاده از این مدل، عدم تغییر ماتریس ادمیتانس است[۱۹].

۲-۱ TCSC

تجهیز TCSC ترکیبی موازی از یک راکتور کنترل‌شده با تریستور و یک خازن ثابت می‌باشد؛ که این مجموعه به‌صورت سری، در خط انتقال نصب می‌شود. در حالت پایدار TCSC را می‌توان به‌عنوان یک راکتانس استاتیک jXc– در نظر گرفت. این مقدار به‌عنوان متغیر کنترلی تجهیز TCSC در معادلات پخش بار استفاده می‌شود. مدل تزریق توان مربوط به TCSC در شکل (۱) نشان داده‌شده است. توان اکتیو و راکتیو تزریقی خازن سری (TCSC) در باس های i و j بنابر روابط معادلات (۱) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود[۱۹].

$$P_i^F=Vi^2\Delta Gij\text{-}ViVj[\Delta Gij\cos(\delta_{ij})+\Delta Bij\sin(\delta_{ij})] \quad (۱)$$

$$Q_j^F=-Vi^2\Delta Bij\text{-}ViVj[\Delta Gij\sin(\delta_{ij})+\Delta Bij\cos(\delta_{ij})]$$

$$Pj^F=Vj^2\Delta Gij\text{-}ViVj[\Delta Gij\cos(\delta_{ij})-\Delta Bij\sin(\delta_{ij})]$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.3.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019

Qj^F=-Vj^2 ΔBij+Vi Vj[Δ Gij sin(δ_{ij})+ Δ Bij cos(δ_{ij})]

$$\Delta Gij= \frac{Xc\ rij(Xc-2Xij)}{(r^2ij+x^2ij)[r^2ij+(xij-Xc)^2}$$

$$\Delta Bij= \frac{Xc(rij^2-x^2ij+XcXij)}{(r^2ij+x^2ij)[r^2ij+(xij-Xc)^2}$$

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$$

TCPST ۲-۲

$$P_{si} = rb_sV_iV_j \sin(\theta_{ij} + \gamma_{se})$$

$$Q_{si} = rb_sV_i^2 \cos(\gamma_{se}) + Q_{inj\,sh}$$

$$P_{sj} = -rb_sV_iV_j \sin(\theta_{ij} + \gamma_{se})$$

$$Q_{sj} = -rb_sV_iV_j \cos(\theta_{ij} + \gamma_{se})$$

مدل استاتیک TCPST در خط انتقال بین باس های i و j را می‌توان با مدل ترانسفورماتور شیفت فاز (PST) و کنترل پارامتر (φ) مدل کرد. مدل تزریق توان TCPST را می‌توان در شکل (۲) نشان داد. توان اکتیو و راکتیو تزریقی در باس i و j مطابق روابط (۲) محاسبه می‌گردد [۲۰]

$$P_i^s = -V_i^2K^2G_{ij} - \tau[G_{ij}\sin\delta_{ij} - B_{ij}\cos\delta_{ij} \qquad (۲)$$

$$Q_i^s = V_i^2K^2B_{ij} + \tau[G_{ij}\cos\delta_{ij} + B_{ij}\sin\delta_{ij}]$$

$$\mathbf{P_j^s = -\tau[G_{ij}\sin\delta_{ij} + B_{ij}\cos\delta_{ij}]}$$

1. $$\mathbf{Q_j^s = -\tau[G_{ij}\cos\delta_{ij} - B_{ij}\sin\delta_{ij}]}$$

$$K = \tan\varphi$$

$$\mathbf{\tau = V_iV_j\tan\varphi}$$

SVC ۳-۲

مدل استاتیک SVC و حالت تزریق توان راکتیو به باس i در شکل (۳) نشان داده‌شده است. SVC به‌صورت موازی به باس منتخب متصل شده و با تزریق توان راکتیو، ولتاژ باس را کنترل می‌کند. SVC شامل یک راکتور کنترل شده با تریستور (TCR) و خازن سوییچ شده با تریستور (TSC) است. توان راکتیو تزریقی برای تجهیز SVC مطابق با معادلات (۳) محاسبه می‌گردد. k پارامتر کنترلی تنظیم توان راکتیو تزریقی تجهیز می‌باشد [۲۱].

$$Qbusnew=Qbus+KQsvc \qquad (۳)$$

$$-100MVAR = Qsvc$$

UPFC ۴-۲

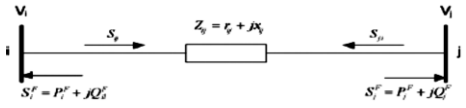
یک ولتاژ سری ورودی و زاویه فاز ولتاژ ورودی آن، می‌تواند اثرگذاری تجهیز UPFC در شبکه سیستم قدرت را مدل کند. ولتاژ ورودی تجهیز می‌تواند حداکثر تا ۰.۱ بزرگی ولتاژ نامی خطی باشد که UPFC به آن متصل شده است. این مدل توسط دو ترانسفورماتور با یکدیگر کوپل شده و به‌صورت یکپارچه به خط انتقالی مدل شده متصل می‌شوند. مدل یک UPFC برای نمایش نحوه متصل شدن و مدل‌سازی در خط در شکل (۴) به نمایش آمده است. فرمول‌بندی مسئله به صورت روابط زیرمی‌باشد:

$$P_{si} = rb_sV_iV_j \sin(\theta_{ij} + \gamma_{se}) \qquad (۴)$$

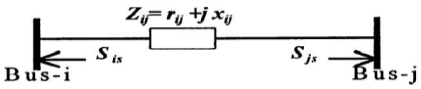
$$Q_{si} = rb_sV_i^2 \cos(\gamma_{se}) + Q_{inj\,sh}$$

$$P_{sj} = -rb_sV_iV_j \sin(\theta_{ij} + \gamma_{se})$$

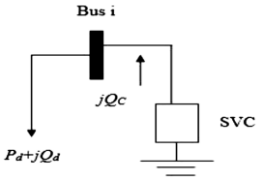
$$\mathbf{Q_{sj} = -rb_sV_iV_j \cos(\theta_{ij} + \gamma_{se})}$$



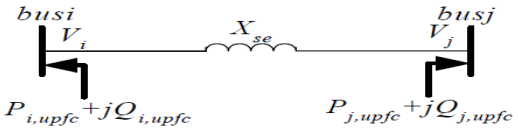
شکل (۱): مدل PIM TCSC



شکل (۲): مدل PIM TCPST



شکل (۳): مدل PIM SVC



شکل (۴): مدل تزریق توان UPFC

۳- فرمول بندی مسئله OPF

برای بهینه‌سازی در هر مسئله، یک یا چند تابع هدف جهت پیش برد مسئله انتخاب می‌گردد. حل مسئله OPF باعث می‌شود مجموعه ای از متغیر های کنترلی برای هدف از پیش تعیین‌شده با در نظر گرفتن مجموعه ای از قیود سیستم بهینه‌سازی گردد. مسئله OPF در چهار چوب روابط (۵) قابل محاسبه است [۲۲].

Minimize (۵)

F(x,u)

Subject g(x,u)=0

And h(x,u)≤0

که در این روابط، u بردار متغیر های مستقل و x بردار متغیر های کنترلی هستند. همچنین F(x,u)، تابع بهینه‌سازی مسئله، g(x,u)

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.3.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019

مجموعه قیود مساوی و h(x,u) قیود نامساوی مسئله را مشخص می نمایند.

۳-۱ متغیرهای کنترل

متغییر های کنترلی سیستم قدرت در روابط مسئله OPF به شرح روابط (۶) گنجانده شده است و پارامترها آن شامل:

P_G: توان اکتیو تولیدی در باس PV به غیر از باس اسلک
V_G: دامنه ولتاژ در باس های PV
T: تنظیم تپ ترانسفورماتور ها
δ: زاویه ولتاژ باس است.

با توجه به پارامترها، بردار کنترل u را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$u^T = [P_{G2} \dots P_{G_{NG}}, V_{G_1} \dots V_{G_{NG}}, T_1 \dots T_{NT}, \ \delta_{B_1} \dots \delta_{B_N}] \quad (۶)$$

که در آن NG, NT, B_N به ترتیب تعداد ژنراتورها، تعداد ترانسفورماتورهای تنظیم کننده و تعداد زاویه باس هستند.

۳-۲ متغیرهای حالت

مجموعه متغیرهای حالت در روابط مسئله OPF به شرح بیان‌شده است:

P_{G1} : توان اکتیو تولیدی در باس PV اسلک
V_B: دامنه ولتاژ در باس PQ
Q_G: توان راکتیو خروجی واحد های تولیدی
S_L: حد بارگذاری توان در خطوط

متغیر های حالت x را می‌توان به‌صورت رابطه (۷) بیان کرد.

$$x^T = [P_{G_1}, V_{L_1} \dots V_{L_{NL}}, Q_{G_1} \dots Q_{N_G}, S_{L_1} \dots S_{L_N}] \quad (۷)$$

که L_N, N_G, N_L که به ترتیب تعداد باس بار ها، تعداد ژنراتورهای تولید کننده توان راکتیو و تعداد خطوط سیستم است.

۳-۳ قیود مسئله

مسئله OPF شامل دو دسته قیود تساوی و قیود نامساوی می باشند که بیانگر وضعیت فنی سیستم تست هستند.

۳-۳-۱قیود مساوی

قیود تساوی مسئله برای تامین توان اکتیو و راکتیو در قالب روابط (۸) بیان می‌گردد.

$$P_{G_i} - P_{D_i} - \sum_{j=1}^{NB} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (۸)$$

$$Q_{G_i} - Q_{D_i} - \sum_{j=1}^{NB} |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0$$

که $Q_{D_i}, Q_{G_i} P_{G_i}, P_{D_i}$, توان اکتیو و راکتیو ژنراتور و بار در شین i، $|Y_{ij}|$ و θ_{ij} عناصر ij ماتریس ادمیتانس و $V_i \angle \delta_i$ دامنه و فاز ولتاژ باس در شین i می‌باشد. اگر تجهیز FACTS در خط انتقال بین باس i و j قرار بگیرد، معادلات توازن توان به شکل روابط (۹) تغییر خواهد کرد:

$$P_{G_i} - P_{D_i} - \sum_{j=1}^{NB} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + P_j^{FACTS} = 0 \quad (۹)$$

$$Q_{G_i} - Q_{D_i} - \sum_{j=1}^{NB} |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + Q_i^{FACTS} = 0$$

$$P_{G_j} - P_{D_j} - \sum_{i=1}^{NB} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + P_j^{FACTS} = 0$$

$$Q_{G_j} - Q_{D_j} - \sum_{i=1}^{NB} |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + Q_j^{FACTS} = 0$$

۳-۳-۲ قیود نامساوی

این قیود تعیین کننده محدودیت های امنیتی و کاری سیستم قدرت است و به‌صورت زیر بیان می گردد.

۳-۳-۲-۱قیود فنی ژنراتور

این قیود به ترتیب شامل: خروجی توان اکتیو، خروجی توان راکتیو، دامنه ولتاژ در باس های تنظیم ولتاژ و تپ ترانسفورماتورها مطابق رابطه (۱۰) می‌شود.

$$P_{G_i}^{min} \le P_{G_i} \le P_{G_i}^{max} \quad (۱۰)$$

$$Q_{G_i}^{min} \le Q_{G_i} \le Q_{G_i}^{max}$$

$$V_{G_i}^{min} \le V_{G_i} \le V_{G_i}^{max}$$

$$\boldsymbol{T_{G_i}^{min} \le T_{G_i} \le T_{G_i}^{max}}$$

۳-۳-۲-۲ قیود امنیت سیستم قدرت

امنیت سیستم قدرت قیود بصورت روابط (۱۱) بیان می‌شود:

$$V_{B_i}^{min} \le V_{B_i} \le V_{B_i}^{max} \quad (۱۱)$$

$$|S_{ij}(\theta, V)| \le S_{ij}^{max}$$

$$-0.8 \le X_c \le 0$$

$$-5 \le \varphi \le 5$$

$$-1 \le K \le 0$$

$$0 \le \rho \le 0.1 Vline$$

$$-\pi \le r \le \pi$$

$$1 \le LOCATION \le 20 \quad \epsilon \mathbb{N}$$

که هر کدام از آن ها به ترتیب: حدود پایین و بالای ولتاژ باس بارها، حد حرارتی خطوط انتقال، حداقل و حداکثر جبران سازی TCSC، حداقل و حداکثر جبران سازی TCPST و حداقل و حداکثر توان راکتیو تزریقی تجهیز SVC می‌باشد. لازم به ذکر است ولتاژ باس ها در تمامی شین های شبکه به‌صورت $0.95 \le V_i \le 1.05$ در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.3.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019

۴- تابع هدف مسئله

در این مقاله تابع هدف شامل چهار قسمت می باشد که به‌صورت زیر در نظر گرفته‌شده است:

۴-۱ حداقل سازی هزینه سوخت واحدها

اولین قسمت برای تابع هدف مسئله، حداقل سازی سوخت واحد های تولیدی می‌باشد که به‌صورت یک تابع درجه دوم، مطابق (۱۲) بیان می‌گردد

$$F_1 = min \sum_{i=1}^{NG} C_{Gi}(P_{Gi}) \quad (۱۲)$$

$$\sum_{i=1}^{NG} C_{Gi}(P_{Gi}) = (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i)$$

که P_{Gi} توان اکتیو تولیدی ژنراتور i ام است و $a_i, b_i c_i$ ضرایب هزینه تولید ژنراتورها می باشند و بسته به نوع سوخت واحد می‌توانند ضرایب متفاوتی در نظر گرفته شوند.

۴-۲ هزینه نصب و نگهداری ادوات FACTS

دومین تابع هدف، حداقل نمودن هزینه نصب و نگهداری ادوات FACTS است که می‌توان بر اساس پایگاه اطلاعاتی شرکت های زیمنس و ABB به‌صورت زیر بیان نمود[۲۳] :

(۱۳)

$$C_{TCPST=} dP_{MAX} + IC$$
$$C_{TCSC=} 0.0015 S_{TCSC^2} - 0.713 S_{TCSC} + 153.75$$
$$C_{SVC=} 0.0.003 S_{SVC^2} - 0.3051 S_{SVC} + 127.38$$
$$C_{TCSC=} 0.003 S_{UPFC^2} - 0.02691 S_{UPFC} + 188.22$$

برای تجهیز TCPST، IC یک مقدار ثابت است و نشان دهنده هزینه سرمایه TCPST و IC برابر با هزینه نصب TCPST در نظر گرفته‌شده است. Pmax حداکثر حد حرارتی خطی می‌باشد که TCPST در آن نصب شده است.

این روابط برای تجهیزات برحسب دلار بر کیلو وار است که باید مطابق رابطه (۱۴) به دلار تبدیل شود.

$$IC_{FACTS=} C_{FACTS} \ * S_{FACTS} * 100 \quad (۱۴)$$

S_{TCSC} در رابطه فوق برابر، $I^2 \times Xc$ است [۲۴]؛ که در آن Xc راکتانس TCSC برحسب اهم و I جریان خط موردنظر است. برای |Q2-Q1|=Scvc، (Q1) برابر توان راکتیو باس قبل از نصب تجهیز و (Q2) توان راکتیو باس بعد از نصب تجهیز SVC است [۲۵].

جهت محاسبه هزینه تجهیز در سال با در نظر گرفتن فاکتور بازگشت سرمایه از رابطه (۱۵) استفاده‌شده است؛ که α در رابطه (۱۶) جهت در نظر گرفتن نرخ بازگشت سرمایه در یک دوره زمانی می باشد.

$$AIC \quad _{FACTS} = \alpha \times IC_{(FACTS)} \ \$/Year \quad (۱۵)$$

$$\alpha = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (۱۶)$$

AIC_{FACTS} هزینه سالانه تجهیز FACTS با در نظر گرفتن بازگشت سرمایه در سال است که باید این مقدار برحسب دلار بر ساعت محاسبه گردد. در این مقاله مدت‌زمان بازگشت سرمایه(n) 5 سال و نرخ بهره 0.05 (r) در نظر گرفته‌شده است. رابطه (۱۷) دومین تابع هدف است.

$$\text{MinF}_2 = \frac{AIC_{FACTS}}{8760} \quad (۱۷)$$

۴-۳ کمینه‌سازی انحراف ولتاژ کل

سومین تابع هدف، مسئله مینیمم سازی انحراف ولتاژ باس ها می‌باشد. حداقل ساختن انحراف ولتاژ کل، باعث بهبود عملکرد و ایمنی سیستم قدرت می‌شود. این تابع به شرح رابطه (۱۸) است که N_B، تعداد باس بارهای کل سیستم، VLi اندازه ولتاژ در باس i ام و V_{Li}^{ref} اندازه ولتاژ مرجع در باس بار i ام است که معمولا یک پریونیت انتخاب می‌گردد[۲۶].

$$V_D = MinF_3 = \frac{1}{N_B} \sum_{i=1}^{NB} \left| V_{L_i} - V_{L_i}^{ref} \right| \quad (۱۸)$$

۴-۴ تابع تلفات اکتیو شبکه

چهارمین تابع هدف، حداقل نمودن مجموع تلفات شبکه با توجه به رابطه (۱۹) است.

$$F_3 = P_L = \sum_{i=1}^{NB} \sum_{j=1}^{NB} V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_{ij}) \quad (۱۹)$$

تحت شرایط (۲۰)

$$\sum_{i=1}^{NG} P_{G_i} - P_{D_i} - P_L = 0 \quad (۲۰)$$

$$\sum_{i=1}^{NQ} Q_{G_i} - Q_{D_i} - Q_L = 0$$

که در آن V_i ,V_j ,Y_{ij}، به ترتیب دامنه عناصر واقع در سطر i ام و ستون j ماتریس ادمیتانس، ولتاژهای شین i و j و θ_{ij}وδ_{ij} زاویه ولتاژ بین دو شین و زاویه عنصر واقع در سطر i ام و j ام ماتریس ادمیتانس هستند.

۴-۵ فرمول بندی چندهدفه

با توجه به اینکه اهداف مسئله بهینه‌سازی از یک جنس نبوده و گاها اهداف با یکدیگر در تضاد می باشند پاسخ های مسئله در محدوده متفاوتی از جواب ها قرار می گیرند. لذا جمع وزنی اهداف بدون نرمالیزه کردن آن قادر به ارائه یک جواب بهینه و کارآمد نخواهد بود؛ بنابراین در این مقاله برای نرمالیزه کردن اهداف مسئله در بازه [0 1] چهار ضریب وزنی برای هر کدام از اهداف در نظر گرفته‌شده و این ضرایب با توجه به اهمیت آن هدف انتخاب می‌شود. از آن جا که انتخاب ضرایب بسته به شرایط و روش های آزمون خطا دارد؛ انتخاب

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.3.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019

ضرایب مناسب برای پاسخ بهینه، دشوار است. لذا در این مطالعه انتخاب ضرایب توسط الگوریتم جستجوی گرانشی انجام می می‌شود. در این مقاله، الگوریتم جستجوی گرانشی برای هر ضریب یک مقدار اختصاص داده و پس از انجام تنظیمات تجهیز، مسئله OPF در حضور تجهیزات FACTS را حل می‌کند. الگوریتم با هدف بهترین جواب کلی سعی در بهبود ضرایب و انتخاب مناسب پارامتر تجهیز FACTS برای پاسخ بهینه دارد؛ اما چون اهداف با یکدیگر در تضاد هستند، تابع جریمه ای تعریف شده که مسئله فوق به یک بهینه‌سازی تک هدفه تبدیل می‌شود. تابع جریمه هدف مسئله را به گونه ای هدایت می‌کند که چهار هدف به‌صورت هم‌زمان در نقطه ی بهینه خود که با اهداف دیگر در تضاد نباشد قرار گیرد. همچنین علاوه بر قادر کردن هدف مسئله برای نقطه بهینه نزدیک به سراسری، استفاده از این روش باعث کوچک‌تر شدن فضای جستجوی مسئله شده و از انحراف مسئله به پاسخ نامناسب جلوگیری می نماید. در حقیقت الگوریتم جستجوی گرانشی وظیفه انتخاب ضرایب و پارامترهای بهینه تجهیز را بر عهده دارد و الگوریتم TRALM مسئله OPF در حضور تجهیز را حل می نماید. تابع تک هدفه مطابق رابطه (۲۱) بیان می‌شود.

$$F_T = W1 \times \frac{F1}{F'1} + W2 \times \frac{F2}{F'2} + W3 \times \frac{F3}{F'3} + W4 \times \frac{F4}{F'4} + PENALTY \quad (۲۱)$$

که در این رابطه W ضرایب هر کدام از اهداف است و به ترتیب F'1, هزینه سوخت واحدها از حل مسئله OPF بدون قرارگیری تجهیز وF1 هزینه سوخت بعد ار نصب تجهیزاست. F'2, هزینه سرمایه‌گذاری تجهیز در حالت حداکثری وF2 هزینه تجهیز در حالت نصب می‌باشد. F'3, انحراف ولتاژ پایه در حل مسئله OPF وF3 انحراف ولتاژ بعد از نصب تجهیز هستند. F'4, تلفات مسئله از حل OPF بدون حضور تجهیز FACTS وF4 تلفات در حضور تجهیز FACTS می‌باشد. تابع PENALTY مطابق با معادله (۲۲) تعیین می‌شود.

$$PENALTY = \begin{cases} 1 & if \begin{cases} F1 \geq F'1 \\ F2 \geq F'2 \\ F3 \geq F'3 \\ F4 \geq F'4 \end{cases} \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (۲۲)$$

۵- الگوریتم حل مسئله OPF

الگوریتم حل مسئله OPF در این مقاله بر اساس روش لاگرانژ تعمیم یافته (ALM) است. در روش ALM مسئله OPF به یک دنباله از مسائل بهینه‌سازی مقید با قیود مجاز مطابق معادله (۲۳) تبدیل می‌شود [۲۷].

$$\begin{aligned} &\underset{x}{Min}\ L^K(x,u) = \\ &f(x,u) + (\lambda^k)^T H(x,u) + \frac{1}{2} H(x,u)^T [W^k] H(x,u) + \\ &\sum_{j=1}^{ni} \frac{1}{2U_j^k} \{(\max[\mu_j^k + \mu_j^k G_j(x,u), 0])^2 - (\mu_j^k)^2\}. \end{aligned} \quad (۲۳)$$

در رابطه فوق، ni برابر تعداد قیود نابرابر، λ^k و μ^k برابر ضرایب لاگرانژ، W^k و U^k برابر ضرایب جریمه مسئله هستند.

برای حل مسئله فوق از الگوریتم تعمیم یافته مبتنی بر روش Trust Region استفاده می‌شود(TRALM). Trust Region ناحیه ای است که تمام قیود مسئله بر آورده شده و روشی بر پایه تکرار، جهت سنجش و بهبود عملگرد همگرایی و پیشرفت حل مسئله بهینه‌سازی است. پارامترهای فوق پس از هر بار حل مسئله بهینه‌سازی مطابق روابط (۲۴) بروز رسانی می‌شوند.

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + [W^k] H(x,u)^k \quad (۲۴)$$

$$\mu_j^{k+1} = \max\{\mu_j^k + U_j^k G_j(x,u)^k, 0\}$$

$$W_j^{k+1} = max \begin{cases} \beta_w W_j^k & if\ |H_j(x,u)^k| > rw |H_j(x,u)^{k-1}| \\ W_j^k & if\ |H_j(x,u)^k| \leq rw |H_j(x,u)^{k-1}| \end{cases}$$

$$U_j^{k+1} = \begin{cases} \beta_U U_j^k & if\ G_j(x,u)^k > ruG_j(x,u)^{k-1} \\ U_j^k & if\ G_j(x,u)^k \leq ruG_j(x,u)^{k-1} \end{cases}$$

بصورتیکه $(x,u)^k$ پاسخ بدست آمده از حل رابطه $0 > rw$، $0 > ru$ و $\beta_U, \beta_w > 1$ هستند. شرط همگرایی مسئله به‌صورت شروط معادله (۲۵) مطرح می‌شود:

$$\|\nabla_x L_x(x,u)^k\| \leq \varepsilon^k \quad (۲۵)$$

$$\|\lambda^{k+1} - \lambda^k\| / (1 + \|\lambda^k\|_\infty) \leq \varepsilon_\lambda$$

$$\|\mu^{k+1} - \mu^k\| / (1 + \|\mu^k\|_\infty) \leq \varepsilon_\mu$$

در این روابط ε برابر شعاع ناحیه اطمینان است و ε_λ با افزایش k از یک مقدار غیر صفر تا ε_∞ افزایش می یابد. نقطه مینیمم بدست آمده تابع لاگرانژ همان نقطه بهینه تابع هدف OPF است.

۶- الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA)

الگوریتم جستجوی گرانشی یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فرا ابتکاری هوش جمعی است که اولین بار توسط راشدی و همکاران در سال ۲۰۰۹ برای مسائل بهینه‌سازی تک هدفه (sop) با الهام از قانون جاذبه و مفهوم جرم ارائه شده است[۳۰-۲۸]. نظریه فیزیکی که این الگوریتم از آن ایده گرفته، تئوری نیوتن است که بیان می‌کند« هر ذره در جهان ذره دیگری را با یک نیرویی که به طور مستقیم با حاصل ضرب جرم آن دو ذره و به‌طور معکوس با مجذور فاصله بین آن ها ارتباط دارد، جذب می‌کند.» کارایی الگوریتم جستجوی گرانشی در توابع آزمون استاندارد، جهت بهینه‌سازی تک هدفه به اثبات رسیده است. این الگوریتم را می‌توان به‌عنوان گروهی از عوامل (راه حل های کاندید) در نظر گرفت، که دارای جرم متناسب با مقدار خود در تابع شایستگی هستند. هنگام اجرای الگوریتم همه‌ی جمعیت توسط نیروی جاذبه بین همدیگر خود را جذب می کنند. مطابق با قوانین نیوتن هر چه جرم سنگین تر باشد، نیروی جاذبه اش بیشتر است. نتیجتا جرم های سنگین تر که احتمالا نزدیکترین جرم ها به مینیمم کلی هستند سایر اجرام را متناسب با فاصله آن ها جذب می کنند. مطابق با مرجع اگر یک سیستم با N عامل و جود داشته باشد، موقعیت هر عامل(جرم) یک کاندید حل مسئله است و به‌صورت رابطه ی (۲۶) تعریف می‌شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.3.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019

$$x_i = \left(x_i^1, \dots, x_i^d, \dots, x_i^n\right) \quad \forall i = 1,2, \dots, N \qquad (۲۶)$$

که در آن N بیانگر بعد مسئله و x_i^d مبین موقعیت عامل i ام در بعد dام است. شروع کار الگوریتم با قراردادن عوامل به طور تصادفی در فضای جستجوی آغاز می‌شود. در طول هر تکرار، نیروی گرانشی از عامل j ام بر عامل i ام در زمان خاص t به‌صورت رابطه (۲۷) تعریف می‌شود.

$$F_{ij}^d(t) = G(t)\frac{M_{pi}(t)\times M_{ai}(t)}{R_{ij}(t)+\varepsilon} \times (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \qquad (۲۷)$$

که در آن M_{ai} جرم گرانشی اکتیو عامل i ام، M_{pi} جرم گرانشی پسیو عامل j ام و $G(t)$ ثابت گرانش در لحظه t، ε یک ثابت کوچک و $R_{ij}(t)$ فاصله اقلیدسی بین عوامل i و j است. ثابت گرانشی G و فاصله اقلیدسی بین عوامل i و j به ترتیب به‌صورت روابط (۲۸) و (۲۹) محاسبه می‌شود:

$$G(t) = G_0 \times \exp(-\alpha \times iter/_{Max\ iter}) \qquad (۲۸)$$

$$R_{ij}(t) = \left\|X_i(t), X_j(t)\right\|_2 \qquad (۲۹)$$

که α پارامتر ضریب نزولی، G_0 ثابت گرانش اولیه، iter تعداد تکرار فعلی و Max iter نشان دهنده حداکثر تعداد تکرار است. اگر فضای مسئله d بعد باشد، نیروی کلی که بر عامل i ام اثر می گذارد مجموع وزندار شده تصادفی از d امین مولفه نیروهای اعمال شده از طرف سایر عوامل مطابق(۳۰) است.

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j\neq i}^{N} rand_j F_{ij}^d(t) \qquad (۳۰)$$

که $rand_j$ نشان دهنده عددی تصادفی در بازه [۰و۱] است. مطابق با قانون حرکت، شتاب عامل i ام در لحظه t و بعد d مطابق رابطه (۳۱) خواهد بود:

$$a_i^d = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \qquad (۳۱)$$

در قانون حرکت، شتاب یک عامل به طور مستقیم با نیروی برآیند و به‌طور معکوس با جرم آن رابطه دارد. در رابطه (۳۲) d مبین بعد مسئله و t معرف یک زمان خاص و M_i جرم اینرسی عامل i ام است. محاسبه ی موقعیت و سرعت i امین ذره به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_i^d(t+1) = rand_i \times V_i^d(t) + a_i^d(t) \qquad (۳۲)$$
$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + V_i^d(t+1)$$

که $rand_i$ یک عدد تصادفی در بازه [۰و۱] است که برای ایجاد خاصیت تصادفی بودن جستجو، از آن استفاده می‌شود. از روابط مطرح شده چنان استنباط می‌شود که سرعت فعلی یک عامل به‌صورت کسری از آخرین سرعت است که به شتاب آن اضافه می‌شود. همچنین، موقعیت فعلی یک عامل برابر با آخرین موقعیت خودش می‌باشد که سرعت کنونی آن اضافه شده است.

تابع شایستگی با ارزیابی جرم عوامل صورت می پذیرد. مفهوم این قضیه را می‌توان بدین صورت بیان کرد که عاملی با جرم سنگین تر، کارآمد تر است و سنگین ترین جرم کارآمدترین عامل است. از مجموعه معادلات بالا می‌توان نتیجه گرفت ، هر چه جرم جسم عامل سنگین تر باشد، نیروی جاذبه بیشتر و حرکت آن آهسته تر است.

جاذبه بیشتر را می‌توان با قانون جاذبه (۲۷) و جنبش آهسته را با قانون حرکت رابطه (۳۱) بیان کرد. با فرض تساوی جرم گرانش و جرم اینرسی، مقادیر اجرام با نگاشت شایستگی محاسبه شده و جرم گرانشی و جرم اینرسی با رابطه زیر بروز می‌شوند:

$$M_{ai} = M_{pi} = M_{ii} = M_i, \ \ i = 1,2, \dots, N, \qquad (۳۳)$$
$$M_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{\sum_{j=1}^{N}(best(t) - worst(t))}$$

که fit_i نشانگر ارزش شایستگی عامل i ام در زمان t، best(t) قوی ترین عامل در زمان t و worst(t) بیانگر ضعیف ترین عامل در زمان t است. محاسبات best(t) و worst(t) برای حداقل سازی مسئله به‌صورت معادلات (۳۴) و (۳۵) می‌باشد:

$$best(t) = \min_{j\in\{1,\dots,N\}} fit_j(t) \qquad (۳۴)$$
$$worst(t) = \max_{j\in\{1\dots,N\}} fit_j(t) \qquad (۳۵)$$

برای نرمال سازی جرم محاسبه شده رابطه(۳۳) به‌صورت رابطه (۳۶) عمل می‌شود:

$$M_i(t) = \frac{M_i(t)}{\sum_{j=1}^{N} M_j(t)} \qquad (۳۶)$$

در این الگوریتم مانند سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری هر عامل یک‌راه حل کاندید محسوب می‌شود. الگوریتم جستجوی گرانشی ابتدا تمام عوامل را با مقادیر تصادفی مقداردهی اولیه می‌کند، ازآن‌پس سرعت و موقعیت همه‌ی عوامل از روابط (۳۲) و (۳۳) محاسبه می‌گردد. ثابت‌های دیگر مانند ثابت گرانش و جرم توسط روابط (۲۸) و (۳۳) محاسبه می‌شود. شرط پایان‌پذیری الگوریتم، کوچک‌تر شدن F_T از یک و سپس تعداد تکرار می‌باشد.

۷- نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله الگوریتم پیشنهادی حل مسئله OPF در شبکه ۱۴ شینه IEEE استاندارد با استفاده از بسته کمکی MATPOWER انجام‌شده است. این ابزار دارای حل مسئله پخش بار، سیستم تست و ... می‌باشد و برای محققین بسیار مفید فایده است [۲۲]. مشخصات شبکه در مرجع [۲۲] موجود است. روش حل مسئله بهینه‌سازی بدین شکل است که ابتدا ضرایب W توسط الگوریتم مقداردهی شده و پارامترهای تجهیز FACTS انتخاب می‌شوند (به‌طور تصادفی). با قرارگیری تجهیز در مکان تعیین‌شده، مسئله OPF با الگوریتم TRALM حل‌شده و با حرکت به سمت نقطه بهینه و شرایط توقف الگوریتم روند ادامه پیدا می‌کند.

شبکه موردمطالعه دارای پنج ژنراتور با ضرایب برگرفته از مرجع [۱۹] ۲۰ خط انتقال، ۱۴ باس، ۱۱ بار و سه ترانسفورماتور است. ظرفیت خطوط مطابق با استاندارد مرجع [۳۱] محدودشده است. هدف مسئله حل پخش بار بهینه برای دستیابی به متغیرهای کنترلی آن و تنظیم بهینه پارامتر تجهیز FACTS در محل مناسب جهت رسیدن

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.3.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019

به نقطه بهینه می‌باشد. به‌منظور بررسی روش پیشنهادی پنج حالت موردبررسی و مقایسه قرارگرفته است:

- اجرای OPF بدون حضور تجهیز FACTS
- اجرای OPF در حضور تجهیز TCSC
- متناظر باحالت اول و در حضور TCPST
- مشابه حالت اول و در حضور SVC
- اجرای OPF در حضورUPFC

مطالعات مسئله با این فرض است که در بازار نوع اشتراکی هیچ قرارداد دوجانبه‌ای بین بازیگران منعقد نشده و بهره‌بردار مستقل سیستم(ISO) بعد از دریافت پیشنهادهای بازیگران، بازار را با در نظر گرفتن امنیت شبکه قدرت تسویه می‌نماید. در پایان تابع FT به‌صورت چندهدفه با معرفی فاکتور جریمه به یک مسئله بهینه‌سازی تک هدفه تبدیل و ارزیابی می‌شود. تنظیمات مقادیر الگوریتم GSA مطابق با جدول (۱) می‌باشد.

جدول (۱): تنظیمات الگوریتم GSA

الگوریتم	GSA
α فاکتور	۲۰
ثابت گرانش	۱
سرعت جاذبه	Rand[0,1]
سرعت اولیه	۰
گرانش اولیه	۰
جمعیت	۲۰۰
تکرار	۲۰

فلوچارت الگوریتم TRALM در شکل (۵) نشان داده‌شده است. نتایج بررسی برای حالت‌های مختلف در جدول (۳) بیان‌شده است. در تمام حالت‌های تست، بار شبکه ثابت در نظر گرفته‌شده است نتایج برای حداقل سازی هزینه سوخت، حداقل سازی تلفات و حداقل سازی انحراف معیار تست می‌گردد. لازم به ذکر است برای حداقل هزینه تجهیز FACTS، حالت عدم نصب آن است که شبکه هزینه‌ای برای تجهیز متقبل نمی‌شود. گرچه هزینه تجهیز FACTS در مطالعه FT مدنظر قرارگرفته و در Total Cost وجود دارد. سیستم ابتدا برای تست، به‌منظور ارزیابی هریک از توابع هدف، الگوریتم را به‌صورت تک هدفه اجرا می‌کند.

جدول (۲) نتایج OPF با روش حل TRALM

objective function	Classic OPF
$P_{G\ TOTAL}$	۲۶۴/۰۴
$Q_{G\ TOTAL}$	۵۱/۵۲
P_{LOAD}	۲۵۹
$Q_{\ LOAD}$	۷۳/۵
$P_{LOSS\ TOTAL}$	۵/۰۴
$Q_{LOSS\ TOTAL}$	۱۹/۷۱
V_D	۰/۰۲۵۹
Total Cost	۶۲۷۹/۷

$$
\begin{aligned}
&Let\ 0 < \tau < \eta < 1, 0 < \gamma_{<1} \\
&\qquad < \gamma_2, \Delta_0 > 0, \\
&and\ X_0\ be\ given, t \leftarrow 0 \\
&\textbf{while}\ \|\nabla_X L(X_t)\| > \varepsilon\ \textbf{do} \\
&\psi_t(S) \equiv \nabla_X L(X_t)^T S \\
&\qquad + \frac{1}{2} S^T \nabla_X^2 L(X_t) S \\
&S_t = \arg \min_{\|S\| \leq \Delta_t} \psi_t(S) \\
&\rho_t = L(X_t + S_t)/\psi_t(S_t) \\
&\textbf{if}\ \rho_t > \tau, X_{t+1} \\
&\qquad \leftarrow X_t \\
&\qquad + S_t\ \textbf{else}\ X_{t+1} X_t \\
&\qquad \leftarrow\ \textbf{end if} \\
&\textbf{if}\ \rho_t \leq \boldsymbol{\tau}, \Delta_{t+1} \leftarrow \gamma_1 \|S_t\| \\
&\textbf{else if}\ \rho_t > \eta\ and\ \|S_t\| \\
&\qquad = \Delta_t, \Delta_{t+1} \leftarrow \gamma_2 \Delta_t \\
&\textbf{else}\ \Delta_{t+1} \leftarrow \Delta_t\ \textbf{end if}
\end{aligned}
$$

شکل (۵): الگوریتم TRALM

۷-۱ تحلیل نتایج

بررسی نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد تجهیزات سری FACTS در برآورد اهداف مسئله نتایج مطلوبی دارند.

از جدول (۳) ملاحظه می‌شود که هزینه سوخت تحت معیار کمینه‌سازی هزینه تولید برای هر چهار تجهیز از حالت پایه کمتر شده است. در این حالت کمترین هزینه متعلق به UPFC است، هرچند TCPST نیز عملکرد قابل قبولی ارائه داده است. در این حالت بهترین پروفیل ولتاژ را TCSC و کمترین تلفات را SVC داشته است.

در حالت تک هدفه برای تست کمترین تلفات توان، TCPST با کاهش 61.7% بهترین عملکرد را به همراه داشته اما با افزایش 62% هزینه تولید روبه‌رو هستیم درحالی‌که TCSC با کاهش 30.3%، با افزایش 13.8% هزینه سوخت، افزایش متعادل‌تری را دارا می‌باشد. علاوه بر آن از پروفیل ولتاژ بهتری برخورداراست. تجهیز SVC با کاهش 47.4% تلفات و افزایش هزینه تولید 59.8% نمی‌تواند گزینه مناسبی برای انتخاب باشد. در این حالت انتخاب مناسب متعلق به UPFC می باشد

بهترین پروفیل ولتاژ در تابع هدف VD در حضور SVC با بهبود 72.2% پروفیل ولتاژ و افزایش هزینه تولید به میزان 2% است، هرچند به‌عنوان گزینه برتر باوجود اثرگذاری تجهیز TCSC با 64% بهبود پروفیل ولتاژ به همراه کاهش 5.2% هزینه تولید نیاز به دقت در شرایط دارد. همچنین TCPST با بهبود 40%پروفیل ولتاژ، کاهش هزینه‌ی تولید 6.1% و کمترین تلفات، عملکرد مطلوبی داشته است. UPFC نیز با 40% کاهش تلفات و افزایش 2% گزینه مناسبی به نظر نمی رسد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.3.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019

تابع F_T که به‌صورت هم‌زمان کاهش هزینه سوخت واحدها، کاهش هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات FACTS، کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ را بررسی کرده، TCSC در کاهش تلفات 11.3%، 32.8% بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش هزینه 0.85% عملکرد مناسبی داشته است. تجهیز TCPST با کاهش 3.8%تلفات، بهبود32%پروفیل ولتاژ و کاهش 1.14% اهداف موردنظر را محقق کرده است. تجهیز SVC با 0.79%کاهش تلفات، بهبود 2.7% پروفیل ولتاژ و 0.2% کاهش هزینه تولید در کاهش اهداف مسئله نقش ایفا کرده است. UPFC نیز با کاهش 3.7% تلفات، 3% بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش 2% هزینه تولید گزینه مناسب بنظر می رسد.

۸- نتیجه گیری

ادوات FACTS با کنترل سیلان توان، می‌توانند با اهداف مختلف در شبکه قدرت حضور یابند. در این مقاله پنج حالت مختلف برای تجهیزات UPFC،TCSC,TCPST,SVC موردبررسی قرارگرفته است. تجهیزات FACTS در تمام اهداف مسئله نقش اثرگذاری داشته‌اند. هرچند اگر بررسی به‌صورت تک هدفه باشد، به دلیل متضاد بودن اهداف، با کاهش یک پارامتر، شاخص‌های دیگر دستخوش تغییر می‌شوند. به همین جهت نظر بهره‌بردار بازار نسبت به اولویت هدف بسیار بااهمیت است. لذا این مقاله علاوه بر بررسی تک هدفه، تابعی چندهدفه را، برای بررسی شاخص‌های مسئله پیشنهاد داده است. حل مسئله با الگوریتم ترکیبی TRALM-GSA صورت گرفته است. الگوریتم GSA جهت انجام تنظیمات تجهیز و انتخاب ضرایب مناسب برای رسیدن به پاسخ بهینه و الگوریتم TRALM جهت حل مسئله پخش بار بهینه استفاده‌شده است. زمان همگرایی الگوریتم مناسب بوده و در هیچ حالتی بیشتر از ۱۸۵ ثانیه نبوده است. برای کاهش هزینه سوخت UPFC بهترین عملکرد را داشته، هرچند TCPST با اختلاف اندک، نتیجه مؤثری داشته است. همچنین TCPST با بیشترین کاهش تلفات در بررسی تک هدفه تلفات، بهترین کارکرد را داشته، ولو با افزایش بسیار زیاد هزینه سوخت، می‌توان UPFC را برای استفاده پیشنهاد کرد. تجهیز SVC با بهترین پروفیل ولتاژ عملکرد مناسبی داشته، گرچه با افزایش هزینه تولید این تجهیز، TCSC و TCPST انتخاب‌های مناسب‌تری به نظر می‌رسند. در تابع F_T که هزینه سوخت، کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش هزینه تجهیز FACTS مدنظر قرار دارد عملکرد TCSC جهت کاهش تلفات و بهبود ولتاژ مناسب‌تر از سایرین است، گرچه UPFC با کاهش بیشتر هزینه تولید و اثرگذاری مناسب بر سایر شاخص‌ها، می‌تواند بسته به اهمیت اهداف شبکه، گزینه منتخب باشد. تجهیز SVC با اثرگذاری اندک بر بهبود پارامترها گزینه مناسبی جهت انتخاب به نظر نمی‌رسد. لازم به ذکر است، اهمیت یک شاخص در انتخاب تجهیز مناسب برای سیستم قدرت در برنامه ریزی های مهندسین نقش مهم تری در انتخاب تجهیز موردنظر اعمال می‌کند. در این مقاله با انتخاب ضرایب وزن دار برای بهینه کلی، سعی بر این شده که بهترین حالت ممکن برای هر تجهیز فرا از اعمال نظر یکجانبه، بدست آید، هرچند ساختار برنامه پخش بار بهینه متمرکز بر هزینه تولید می‌باشد که در نتایج قابل مشاهده است.

جدول (۳): نتایج شبیه سازی تجهیزات سری FACTS

objective function	Parameter	TCSC	TCPST	SVC	UPFC
Min Full Cost (کمترین هزینه تولید)	P_G Total	۲۶۳/۹۳	۲۶۵/۲۴	۲۶۴/۶	۲۶۴/۰۵
	Q_G Total	۵۱/۴۳	۵۵/۸۵	-۳/۳۱-	۶۲/۶۸
	P_{LOSS} Total	۶/۹۳	۶/۲۴	۵/۶۱	۵/۸۸
	Q_{LOSS} Total	۲۱/۰۶	۲۴/۶۶	۲۱/۶۹	۲۴/۳۸
	VD Total	۰/۰۱	۰/۰۱۷۸	۰/۰۲۴۴	۰/۰۲۴۸
	Install	Line 4	Line3	Bus 5	Line3
	Compensator factor	۰/۷۹	۲/۵۳	-۰/۵۶۴	۰/۱۴۹& ۱/۱۹۱
	Cost	۵۹۴۳/۷	۵۸۸۸/۹	۶۲۵۶/۲	۵۵۱۴/۱
Min PLOSS (کمترین تلفات خطوط)	P_G Total	۲۶۲/۵۱	۲۶۰/۴	۲۶۱/۶	۲۶۲/۹
	Q_G Total	۴۳/۸۷	۴۳/۹۱	-۵۱/۰۶	۶۲/۵
	P_{LOSS} Total	۳/۵۱	۱/۹۳	۲/۶۵	۳/۵
	Q_{LOSS} Total	۱۱/۷۸	۹/۰۶	۱۲/۶۳	۱۵
	VD	۰/۰۲۴۴	۰/۰۳۱۲	۰/۰۳۱۴	۰/۰۲۳۵
	Install	Line 3	Line 7	Bus 4	Line14
	Compensator factor	-۰/۷۹	۳/۷۷	-۰/۹۸	۰/۰۸۵& ۱/۱۳۹
	Cost	۷۱۸۵	۱۰۲۰۱	۱۰۰۳۵	۶۶۱۵/۳
Min VD (کمترین انحراف ولتاژ)	P_G Total	۲۶۶	۲۶۵/۲۸	۲۶۳/۶۳	۲۶۵/۰۶
	Q_G Total	۵۲/۵	۵۶/۶۵	-۲۹/۵۸	۵۱/۱
	P_{LOSS} Total	۶/۹۸	۶/۲۸۳	۴/۶۳	۶/۰۶
	Q_{LOSS} Total	۲۲	۲۴/۸۲	۲۰/۹۸	۲۶
	VD Total	۰/۰۰۹۳	۰/۰۱۵۵	۰/۰۰۷۲	۰/۰۱
	Install	Line 4	Line 3	Bus 5	Line18
	Compensator factor	-۰/۷۶	۲/۶۶	- ۰/۸۱۹۷	۰/۷۵&۱/۶
	Cost	/۴۷ ۵۹۵۰	/۶۷ ۵۸۹۱	/۱۸ ۶۴۶۲	۶۴۲۳
FT (تابع جامع)	P_G Total	۲۶۳/۴۷	۲۶۳/۸۵	۲۶۴/۱	۲۶۳/۹
	Q_G Total	۴۶/۵۸	۵۰/۶۶	-۱۶/۹۲	۵۲
	P_{LOSS} Total	۴/۴۷	۴/۸۴۵	۵	۴/۸
	Q_{LOSS} Total	۱۵/۰۵	۱۹/۲۷	۲۰/۴۵	۱۹/۵
	VD Total	۰/۰۱۷۴	۰/۰۱۷۶	۰/۰۲۵۲	۰/۰۲۴۵
	Install	Line 2	Line 7	Bus 5	Line 4
	Compensator factor	۰/۵۹	۰/۹۴	- ۰/۶۷۳۲	۰/۰۲۸& ۲/۰۹
	Total Cost	۶۲۲۵/۷	۶۲۰۸	۶۲۶۶/۶	۶۱۱۸

مراجع

[۱] حسامی نیا ا. حسینیان ح.، **پخش بار بهینه در شبکه‌های قدرت شامل عناصر FACTS به روش PSO**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۷.

[۲] شکیبا حرفه ع. حقی فام م.، **پخش بار بهینه در سیستم های قدرت مجهز به ادوات FACTS**، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۲.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.3.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019

[۳] امجدی ن. فاطمی ح.، **پخش بار بهینه سیستم های قدرت با در نظر گرفتن محدودیت های ایمنی و آلودگی با استفاده از روش توسعه یافته جستجوی باکتریایی**، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۰.

[٤] جی هینگورانی.، **آشنایی با ادوات فکتس**، نارین. ترجمه احمد فریدون درخشان، انتشارات مهندسین مشاور قدس نیرو، ۸۴.

[5] S. N. Singh and A. K. David, 2001 *"A New Approach for Placement of FACTS Devices in Open Power Markets"*, Power Engineering Review, IEEE, vol. 21, Issue: 9, pp. 58–60, Sep.

[6]] S. N. Singh, K. S. Verma and H. O. Gupta, 2001 *"Optimal Power Flow Control in Open Power Market using Unified Power Flow Controller"*, The IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 3, 15-19 July, pp. 1698–1703.

[7] S. N. Singh, 2001 *"Location of FACTS Devices for Enhancing Power Systems' Security"*, Power Engineering, 2001, LESCOPE'01, 2001 Large Engineering System Conference on, 11-13 July, pp. 162-166.

[8] S. N. Singh and A. K. David, 2000 *"Placement of FACTS Devices in Open Power Market"*, Proceeding of the 5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2000), Hong Kong, 29 Oct.-1 Nov. 2000, pp. 173-177.

[9] L. J. Cai, I. Erlich, G. Stamtsis and Y. Luo, 2004 *"Optimal Choice and Allocation of FACTS Devices in Deregulated Electricity Market using Genetic Algorithms"*, IREP 2004, Cortina-Italy, Augst.

[10] H. Barati, M. Ehsan and M. Fotuhi-Firuzabad, 2006 *"Location of Unified Power Flow Controller and its Parameters setting for Congestion Management in Pool Market Model Using Genetic Algorithm"*, The IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth 2006 (PEDES-2006), Delhi, India, 12-15 Dec.

[11] F. G. M. Lima, J. Munoz, I. Kokar and F. D. Galiana, 2002 *"Optimal Location of Phase Shifter in a Competitive Market by Mixed Integer Linear Programming"*, 14th PSCC, Sevilla, 24-28 June, session 43, paper 2, page 1.

[12] A. Kazemi, R. Sharifi, *"Optimal Location of Thyristor Controlled Phase Shifter in Restructured Power Systems By Congestion Management"*, Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on, 15-17 Dec. 2006

[13] S.N. Singh and A.K. David, *"Congestion Management by Optimizing FACTS Device Location"*, DRPT, PP. 23-28, April 2000.

[14] Joorabian M. et al.2011. *"Locating and Parameters Setting of TCSC for Congestion Management in Deregulated Electricity Market"*, 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications.

[15] Sepahvand H at al.2013.*" Optimal Location and Setting of TCSC and TCPST to Reduce Transmission Congestion in Deregulated Electricity Market"*, International Journal on Energy Conversion (I.R.E.CON.), Vol. 1, N. 1

[16] R. M. Idris, A. Kharuddin, and M. W. Mustafa, *"Optimal Choice of FACTS Devices for ATC Enhancement using Bees Algorithm"*, Power Engineering Conf. , pp. 1–6, 2009.

[۱۷] صادقی، محمدعلی؛ عباس اسماعیلی دهج و فرید کربلایی، **"مدیریت تراکم خطوط و کاهش تلفات توان با استفاده از ادوات چندنوعی FACTS"**، چهاردهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی برق ایران، کرمانشاه، دانشگاه کرمانشاه، سازمان علمی دانشجویی مهندسی برق کشور، ۱۳۹۰.

[۱۸] عباسیان، محمدامیر و حسین نظام آبادی پور، **"الگوریتم جستجوی گرانشی چند هدفه مبتنی بر مرتب سازی جبه های مغلوب نشده"**، فصلنامه مهندسی برق دانشگاه تبریز ۱۳۹۰،۴۱.

[19] Nagarajakumari CH, K.Chandra Sekhar. 2014. *"Optimal Placement of SVC fo rthe Transmission Congestion Management"*, Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering Print ISSN: 2349- 5804; Online ISSN: 2349-5812 Volume 1, Number 5 (2014) pp. 54-58.

[20] M. Basu.2011. *"Multi-objective optimal power flow with FACTS devices"*, Energy Conversion and Management 52 (2011) 903–910.

[21] [26] Walters DC, Sheble GB.1993. "*Genetic algorithm solution of economic dispatch with.valve point loading"*, IEEE Trans Power Syst 1993.8.3.1325–32.

[22] Zimmerman R.D. and al. 2011. MATPOWER:"*Steady-State Operations, Planning", and Analysis Tools for Power Systems Research and Education"*, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 26, No. 1.

[23] ABB.http://www.abb.com/cawp/seitp202/7aa248407422d96c44257bba00524f05.aspx [Accessed 6 Decmber 2017].

[24] [28] W. S. Sakr at al.2016. "*Optimal Allocation of Thyristor-Controlled Series Compensators by Adaptive Differential Evolution Algorithm"*, IET Generation, Transmission & Distribution . Volume: 10, Issue: 15, 11 17 2016.

[25] [16] Sharmila D. Medeswaran R.2014. *"Optimal Location Of Tcsc And Svc Devices To Enhance Power System Security"*, International Journal Of Engineering Sciences & Research Technology.649-656.

[۲۶] محمود عبادیان. رضا ابولی. محسن فرشاد. **"استفاده از ویرایش جدید الگوریتم توسعه یافته اجتماع ذرات در مدیریت بهینه اقتصادی – امنیتی توان رآکتیو در سیستم‌های قدرت"**. هوش محاسباتی در مهندسی برق. دوره ۲، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۰، صفحه ۸۰-۶۷.

[27] H. Wang, C. E. Murillo-S´anchez, R. D. Zimmerman, and R. J. Thomas, *"On Computational Issues of Market-Based Optimal Power Flow"*, Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 22, no. 3, pp. 1185–1193, August 2007.

[28] Rashedi, E., Nezamabadi-pour, H. and Saryazdi, S., "*GSA: A Gravitational Search Algorithm*", Information Sciences, Vol.179, No.13, pp.22322248, 2009.

[۲۹] سید محمد رضا موسوی و همکاران. **"دسته بندی اهداف سونارى با استفاده از روش ترکیب ازدحام ذرات و جستجوی گرانشی"**. دو فصل نامه علمی-پژوهشی دریافنون، سال سوم بهار و تابستان ۹۵.

[30] Rashedi, E., Nezamabadi-pour, H. and Saryazdi, S., "*BGSA: Binary Gravitational Search Algorithm*", Natural Computing, Vol.9, No.3, pp.727-745, 2010.

[31] PowerSystemTestCaseAchieves,Retrieved10December2004.Fromhttp://www.ee.washingto .edu/research/pstca.

رزومه

محسن فلکی در قاین متولد شده است (۱۳۶۷). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- مخابرات از دانشگاه صنعتی سجاد(۱۳۸۹)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد (۱۳۹۶) سپری کرده است.فعالیت-های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه ادوات FACTS، پخش بار بهینه با الگوریتم های هوشمند، و بهره‌برداری در سیستم‌های توزیع است و در حال حاضر کارشناس ارشد برق شرکت تروند زعفران قاین می‌باشد.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.3.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019

Reviewing the Impact of FACTS Devices to Reduce Losses and Voltage Profile in the Pool Market

Mohsen Falaki[1]

1- Senior Electrical Engineer, Power Group, Tarvand Saffron Knowledge Based Company, Mohsen.falaki@yahoo.com

Abstract: In this paper, a generalized Lagrangian-based algorithm (TRALM) and gravitational search algorithm (GSA) are used to solve the Optimal Load Distribution Problem (OPF) in the presence of FACTS equipment. Four TCSC, TCPST UPFC and SVC equipment's have been tested. Modeling of FACTS equipment is based on power injection method. To optimally manage production, losses and voltage profiles, a four-objective function is formulated: Minimum fuel cost, Minimum investment cost of equipment, Minimum loss of transmission and voltage profile improvement and formulated in a single-objective optimization problem. To achieve the optimal point due to the contradiction of the goals, a series of coefficients are used to normalize the objective function. The solution is that the GSA algorithm first randomly determines the FACTS equipment configuration and normalization coefficients, and after installation, the TRALM algorithm solves the problem in the presence of FACTS equipment in the common market. The test results on the BUSIEEE 14 test system indicate that the algorithm has a good effect on the problem objectives.

Keywords: OPF, FACTS Devise, Multi-objective optimization, Pool Market, TRALM-GSA Algorithm.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1397.7.2.3.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 7-No. 2- Autumn 2018 & Winter 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]