جایابی و تنظیم بهینه UPFC برای بهینه‌سازی چند هدفه با روش حل IPOPT در بازار نوع اشتراکی

محسن فلکی *[۱]

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۹

چکیده: این مقاله به منظور ارزیابی عملکرد تجهیز FACTS بر متغییرهای سیستم قدرت، از الگوریتم ترکیبی نوین، برای محاسبه ی اجزای شبکه و بهینه ساختن آنها، استفاده کرده است. از بین انواع مختلف تجهیزات FACTS، UPFC به جهت عملکرد مطلوب در قیاس با سایر تجهیزات انتخاب شده است. بهینه‌سازی انجام شده عبارت است از تعریف تابع هدف شامل کاهش هزینه تولید، هزینه تجهیز UPFC، هزینه تراکم، کمترین انحراف پروفیل ولتاژ و کمترین تلفات سیستم است. اهداف ابتدا به صورت تک هدفه بهینه شده و در مرحله بعد با یک تابع تک هدفه فرمول‌بندی شده و با استفاده از ضرایب نرمالیزه که با قواعد فازی تولید شده است، نقطه بهینه پارتو مساله بدست آمده است. روش حل بدین گونه خواهد بود که برای بدست آوردن پارامترهای مسئله، حل کننده IPOPT روش پخش‌بار بهینه(OPF) را محاسبه و پارامترهای مورد نیاز بدون حضور تجهیز را بدست آورده است. سپس الگوریتم FUZZY-GSA با روش OPF جهت جایابی و تنظیم پارامتر تجهیز ترکیب شده و با روش حل IPOPT برای رسیدن به پاسخ محاسبه خواهد شد. برای بررسی روش پیشنهادی، سیستم ۱۴ باسه IEEE انتخاب و نتایج نشان از عملکرد مناسب الگوریتم و تجهیز دارد.

واژه‌های کلیدی: بازار نوع اشتراکی، بهینه‌سازی چند هدفه، پخش‌بار بهینه.

۱- مقدمه

رشد روزافزون مصرف انرژی الکتریکی و پراکندگی منابع و مصرف کنندگان، لزوم آماده‌سازی 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 پخش‌بار مناسب توسط سیستم، فراهم می‌شود. محاسبات پخش‌بار بهینه، نقش مهمی در برنامه‌ریزی تولید، ایفا می‌نماید[۳-۱]. حل مسائل پیچیده مهندسی، روش‌های متفاوتی دارند که هر کدام به نسبت می‌تواند پاسخ متفاوت پیدا کند. استفاده از پخش‌بار بهینه باعث می‌شود متغییرهای کنترل و حالت، به گونه‌ای تعیین شود که علاوه بر بهینه‌سازی تابع هدف مسئله، مجموعه‌ای از قیود مساوی و نامساوی به ازای ساز و برگ شبکه تعیین گردد، اما از طرفی موانع فیزیکی در مقابل اپراتور و بهره‌بردار سیستم جهت رسیدن به نتیجه‌ی دلخواه وجود دارد. حجم توان انتقالی خطوط، بهره‌برداری محدود از نیروگاه‌ها و تقاضای بار در نقاط مختلف، مانع از ایجاد شرایط آرمانی می‌شود. یکی دیگر از عوامل موثر، تلفات در سیستم قدرت است. تلفات جزء جدا ناشدنی در تولید، انتقال و توزیع سیستم قدرت است که کاهش بهره‌وری را به همراه دارد. عواملی از قبیل: محل قرارگیری واحدها، حجم توان انتقالی، نوع تقاضای بار، ضریب توان، هارمونیک‌ها و ... می‌توانند بر تلفات اثرگذار باشند.

یکی از گام‌هایی که در دهه‌های گذشته توسط محققین جهت افزایش بازدهی سیستم قدرت برداشته شد، تفکیک بخش‌های مختلف و خصوصی‌سازی بازار برق در بخش های گوناگون بود. این تغییرات که

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.4.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019

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 تقاضای انرژی، توسعه سیستم، می‌تواند از روش‌های مختلفی از قبیل احداث خطوط جدید، ساخت نیروگاه‌های دیزل و تولید پراکنده یا استفاده از تجهیزات FACTS صورت پذیرد. واضح است احداث خطوط جدید و ساخت نیروگاه به سبب هزینه‌های بالای خرید زمین و زمان احداث و تعمیر و نگهداری، باعث تحمیل هزینه‌های گذاف اقتصادی و زیست محیطی می‌شود و با قوانین سخت‌گیرانه وضع شده در زمینه محیط زیست، امری دشوار به نظر می‌رسد. به علاوه متراکم شدن خطوط، نقش مهمی در افزایش هزینه‌های سیستم و کاهش مانور اپراتور جهت بهبود وضعیت سیستم، برای تغییر تبادلات انرژی دارد. از طرفی لزوم تامین پایدار انرژی و تقاضای روز افزون آن پاسخگویی سریع به 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 عقیده‌اند که افزایش میل به این تجهیزات، به دلیل پیشرفت در الکترونیک قدرت است که بهره‌برداری ادوات را مقرون به صرفه کرده است. همچنین، تولیدکننده و توریع کننده، همانند روش قطع یا زمان‌بندی بار، درگیر پیچیدگی نمی‌شوند. بر حسب استاندارد IEEE تجهیزات FACTS قابلیت سیستم را در موارد کنترل منظم پخش‌بار، کاهش هزینه‌های تولید و بهره‌برداری، بارپذیری خطوط تا حد حرارتی، کنترل سیلان توان و ارتقا پایداری دینامیکی سیستم، افزایش می‌دهند[۱۱-۴].

مطالعه‌ی پژوهش محققین نشان می‌دهد، بهره‌گیری از عملکرد تجهیزات FACTS به صورت گسترده در سیستم‌های 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 و همچنین ایشان جهت مدیریت تراکم، TCSC و TCPST را با روش پیشنهادی ترکیب OPF و نرخ تراکم، جایابی و تنظیم پارامتر نموده است [۱۵]. مرجع [۱۶] برای افزایش ظرفیت انتقال در دسترس (ATC)، از تجهیزات TCSC، TCPST و SVC استفاده کرده است. مرجع [۱۶] بهینه‌یاب 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 از الگوریتم ژنتیک را جهت جایابی، پیشنهاد داده است. صادقی و همکاران [۱۷] جهت مدیریت تراکم و کاهش تلفات، تجهیزات FACTS را پیشنهاد داده است. عباسیان و همکاران [۱۸] چندین روش بهینه‌سازی از جمله الگوریتم جستجوی گرانشی بر مبنای بهینه پارتو، مورد بررسی و مقایسه قرارداده است. مرجع [۱۹] مدیریت تراکم را برای TCSC با روش‌های مختلف بررسی کرده است.

بررسی مقالات نشان می دهد که، اگر تنظیمات تجهیز UPFC به درستی صورت گیرد، دسترسی به اهداف مسئله را ممکن می‌سازد. 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 به روش فازی به‌صورت تک هدفه، با دسترسی به اهداف مختلف، در بازار نوع اشتراکی، بنا نهاده است. بدین معنی که مکان‌یابی تجهیزات FACTS بر مبنای بهینه‌سازی مبتنی بر کاهش هزینه تولید و کاهش هزینه نصب UPFC، کاهش هزینه تراکم، کاهش تلفات خطوط و کمترین انحراف پروفیل ولتاژ، صورت گرفته است. تضاد اهداف در بهینه-سازی تک هدفه مشهود است. این روش توانسته تمام اهداف را به طور همزمان بهینه نماید.

این پژوهش برای بهینه‌سازی از مسئله پخش‌بار بهینه با کمک حل‌کننده IPOPT به دلیل مزایا و توانایی آن، استفاده کرده است. روش بهینه‌سازی این‌گونه است که ابتدا سیستم قدرت (OPF) را باIPOPT حل می‌کند و پارامترهای شبکه که نیاز به بهینه‌سازی دارند در اختیار، قرار می‌دهد. سپس، الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی FUZZY-GSA با OPF ترکیب شده و با حل‌کننده IPOPT شروع به حل و پایش مسئله جهت انتخاب بهترین نقطه بهینه سراسری می‌کنند. در حقیقت الگوریتم GSA وظیفه مکان‌یابی و تعیین پارامترهای تجهیز را بر عهده دارد و قواعد فازی ضرایب نرمالیزه را انتخاب می‌نمایند. انتخاب تجهیز UPFC به دلیل قدرت بالای عملکرد آن، بوده است. مدل‌سازی تجهیز به روش تزریق توان و بازار مدنظر، به‌صورت اشتراکی می‌باشد. پارامترهای تجهیز شامل مکان نصب، ρ (زاویه فاز UPFC) و r (محدوده عملکرد UPFC) است.

ساختار مقاله در ادامه بدین‌صورت است که در بخش دوم مدل‌سازی UPFC مطرح می‌شود. بخش سوم فرمول‌بندی مسئله OPF و بخش چهارم، قیود مسئله را مشخص می‌کند. بخش پنجم تابع هدف مسئله به‌صورت تک هدفه فرموله شده و درنهایت با ترکیب اهداف، تابع جامع به دست می‌آید. حل مسئله OPF به کمک حل‌کننده IPOPT در بخش ششم مشخص‌شده و بخش هفتم روش حل الگوریتم فرا ابتکاری را بیان خواهد کرد بخش هشتم، روش پیشنهادی بر روی یک سیستم ۱۴ باسه ی IEEE تست‌شده و سپس با توجه به دستاوردها، نتایج مورد تحلیل و ارزیابی قرارگرفته است.

۲- مدلسازی و فرمول‌بندی مسئله

در این بخش به فرمول‌بندی مسئله و بررسی قیود و معرفی تابع هدف مسئله پرداخته می‌شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.4.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019

۲-۱- مدلسازی تجهیز UPFC

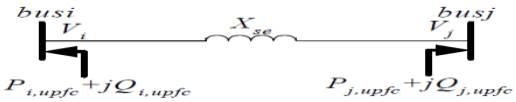
یک ولتاژ سری ورودی و زاویه فاز ولتاژ ورودی آن، می‌تواند اثرگذاری تجهیز UPFC در شبکه سیستم قدرت را مدل کند. ولتاژ ورودی تجهیز می‌تواند حداکثر تا ۰٫۱ بزرگی ولتاژ نامی خطی باشد که UPFC به آن متصل شده است. این مدل توسط دو ترانسفورماتور با یکدیگر کوپل شده و به‌صورت یکپارچه به خط انتقالی مدل شده متصل می‌شوند. در شکل (۱) مدل یک UPFC برای نمایش نحوه متصل شدن و مدل‌سازی در خط نمایش داده شده است. فرمول‌بندی مسئله به‌صورت روابط(۱) تا (۴) می‌باشد.

$$P_{si} = rb_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma_{se}) \quad (۱)$$

$$Q_{si} = rb_s V_i^2 \cos(\gamma_{se}) + Q_{inj\,sh} \quad (۲)$$

$$P_{sj} = -rb_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma_{se}) \quad (۳)$$

$$Q_{sj} = -rb_s V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma_{se}) \quad (۴)$$



شکل (۱) مدل تزریق توان UPFC

۲-۲- فرمول‌بندی مسئله

برای بهینه‌سازی در هر مسئله، یک یا چند تابع هدف جهت پیش‌برد مسئله انتخاب می‌گردد. حل مسئله OPF باعث می‌شود مجموعه‌ای از متغییرهای کنترلی برای هدف از پیش تعیین‌شده با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از قیود سیستم بهینه‌سازی گردد. مسئله OPF در چهارچوب روابط (۵) تا (۷) قابل‌محاسبه است [۲۲].

$$Minimize\ F(x,u) \quad (۵)$$

$$Subject\ g(x,u)=0 \quad (۶)$$

$$And\ h(x,u)\leq 0 \quad (۷)$$

که در این روابط، u بردار متغیرهای مستقل و x بردار متغیرهای کنترلی هستند. همچنین $F(x,u)$، تابع بهینه‌سازی مسئله، $g(x,u)$ مجموعه قیود مساوی و $h(x,u)$ قیود نامساوی مسئله را مشخص می‌نمایند.

۲-۲-۱- متغییر های کنترل

متغییرهای کنترلی سیستم قدرت در روابط مسئله OPF به شرح روابط (۸) گنجانده شده است و پارامترها آن شامل:

P_G: توان اکتیو تولیدی در باس PV بغیر از باس اسلک

V_G: دامنه ولتاژ در باس های PV

T: تنظیم تپ ترانسفورماتورها

δ: زاویه ولتاژ باس است.

با توجه به پارامترها، بردار کنترل u را می‌توان به‌صورت رابطه (۸) کرد.

$$u^T = [P_{G2} \dots P_{G_{NG}}, V_{G_1} \dots V_{G_{NG}}, T_1 \dots T_{NT}, \delta_{B_1} \dots \delta_{B_N}] \quad (۸)$$

که در آن B_N و N_G و N_T به ترتیب تعداد ژنراتورها، تعداد ترانسفورماتورهای تنظیم‌کننده و تعداد زاویه باس هستند.

۲-۲-۲- متغیرهای حالت

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

P_{G1}: توان اکتیو تولیدی در باس PV اسلک

V_B: دامنه ولتاژ در باس PQ

Q_G: توان راکتیو خروجی واحدهای تولیدی

S_L: حد بارگذاری توان در خطوط

متغیرهای حالت x را می‌توان به‌صورت رابطه (۹) بیان کرد.

$$x^T = [P_{G_1}, V_{L_1} \dots V_{L_{NL}}, Q_{G_1} \dots Q_{N_G}, S_{L_1} \dots S_{L_N}] \quad (۹)$$

که L_N و N_G و N_L که به ترتیب تعداد باس بارها، تعداد ژنراتورهای تولیدکننده توان راکتیو و تعداد خطوط سیستم است.

۲-۲-۳- قیود مسئله

مسئله OPF شامل دو دسته قیود مساوی و قیود نامساوی می‌باشد که بیانگر وضعیت فنی سیستم مورد مطالعه هستند.

۲-۲-۳-۱- قیود مساوی

قیود مساوی مسئله برای تأمین توان اکتیو و راکتیو در قالب روابط (۱۰) و (۱۱) بیان می‌شود.

$$P_{G_i} - P_{D_i} - \sum_{j=1}^{NB} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (۱۰)$$

$$Q_{G_i} - Q_{D_i} - \sum_{j=1}^{NB} |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (۱۱)$$

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 (۱۲) تا (۱۵) تغییر خواهد کرد:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.4.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019

$$P_{G_i} - P_{D_i} - \sum_{j=1}^{NB} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + P_j^{FACTS} = 0 \quad (۱۲)$$

$$Q_{G_i} - Q_{D_i} - \sum_{j=1}^{NB} |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + Q_i^{FACTS} \quad (۱۳)$$

$$P_{G_j} - P_{D_j} - \sum_{i=1}^{NB} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + P_j^{FACTS} = 0 \quad (۱۴)$$

$$Q_{G_j} - Q_{D_j} - \sum_{i=1}^{NB} |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + Q_j^{FACTS} = 0 \quad (۱۵)$$

۲-۲-۳-۲- قیود نامساوی

این قیود تعیین‌کننده محدودیت‌های امنیتی و کاری سیستم قدرت است و به‌صورت زیر بیان می‌گردد که شامل قیود فنی ژنراتور و قیود امنیت سیستم قدرت می‌باشند.

قیود فنی ژنراتور به ترتیب شامل: خروجی توان اکتیو، خروجی توان راکتیو، دامنه ولتاژ در باس های تنظیم ولتاژ و تپ ترانسفورماتورها مطابق رابطه (۱۶) تا (۱۹) می‌شود.

$$P_{G_i}^{min} \le P_{G_i} \le P_{G_i}^{max} \quad (۱۶)$$

$$Q_{G_i}^{min} \le Q_{G_i} \le Q_{G_i}^{max} \quad (۱۷)$$

$$V_{G_i}^{min} \le V_{G_i} \le V_{G_i}^{max} \quad (۱۸)$$

$$T_{G_i}^{min} \le T_{G_i} \le T_{G_i}^{max} \quad (۱۹)$$

قیود امنیت سیستم قدرت به‌صورت روابط (۲۰) تا (۲۴) بیان می‌شود:

$$V_{B_i}^{min} \le V_{B_i} \le V_{B_i}^{max} \quad (۲۰)$$

$$|S_{ij}(\theta, V)| \le S_{ij}^{max} \quad (۲۱)$$

$$0 \le \rho \le 0.1 Vline \quad (۲۲)$$

$$1 \le LOCATION \le 20 \quad \epsilon \mathbb{N} \quad (۲۳)$$

$$-\pi \le r \le \pi \quad (۲۴)$$

که هرکدام از آن‌ها به ترتیب: حدود پایین و بالای ولتاژ باس بارها، حد حرارتی خطوط انتقال و ولتاژ سری و سایر موارد قیود امنیتی تجهیز می‌باشد، لازم به ذکر است ولتاژ باس‌ها در تمامی شین‌های شبکه به‌صورت $0.95 \le V_i \le 1.05$ در نظر گرفته‌شده است.

۲-۲-۴- تابع هدف مسئله

در این مقاله تابع هدف، شامل چهار قسمت می‌باشد که به‌صورت زیر در نظر گرفته‌شده است:

۲-۲-۴-۱- حداقل‌سازی هزینه سوخت واحدها

اولین قسمت برای تابع هدف مسئله، حداقل‌سازی سوخت واحدهای تولیدی می‌باشد، که به‌صورت یک تابع درجه دوم، مطابق رابطه (۲۵) و (۲۶) بیان می‌گردد:

$$F_{11} = min \sum_{i=1}^{NG} C_{Gi}(P_{Gi}) \quad (۲۵)$$

$$\sum_{i=1}^{NG} C_{Gi}(P_{Gi}) = (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) \quad (۲۶)$$

که P_{Gi} توان اکتیو تولیدی ژنراتور i ام‌است و c_i و b_i و a_i ضرایب هزینه تولید ژنراتورها می‌باشند و بسته به نوع سوخت واحد، می‌توانند ضرایب متفاوتی در نظر گرفته شوند.

۲-۲-۴-۲- هزینه نصب و نگهداری تجهیز UPFC

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

$$C_{upfc}=0.0003 \times Supfc^2-0.02691 \times Supfc+188.22 \quad (۲۷)$$

این روابط برای تجهیز برحسب دلار بر کیلو وار است که باید مطابق رابطه (۲۸) به دلار تبدیل شود.

$$IC(FACTS)=C(FACTS) \times S(FACTS) \times 1000 \quad (۲۸)$$

برای $Supfc=|Q2-Q1|$، *(Q1)* برابر توان راکتیو باس قبل از نصب تجهیز و *(Q2)* توان راکتیو باس بعد از نصب تجهیز UPFC است[۲۵]. جهت محاسبه هزینه تجهیز در سال، با در نظر گرفتن فاکتور بازگشت سرمایه از رابطه (۲۹) استفاده‌شده است؛ که α در رابطه (۳۰) جهت در نظر گرفتن نرخ بازگشت سرمایه در یک دوره زمانی می‌باشد.

$$AIC_{FACTS} = \alpha \times IC_{(FACTS)} \ \$/Year \quad (۲۹)$$

$$\alpha = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (۳۰)$$

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. این مقاله مدت‌زمان بازگشت سرمایه(n) را 10 سال و نرخ بهره (r) را 0.05 درنظر گرفته است. رابطه (۳۱) جزء دوم تابع هدف اول است.

$$MinF_{22} = \frac{AIC_{FACTS}}{8760} \quad (۳۱)$$

$$F_1 = min(F_{11} + F_{22}) \quad (۳۲)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.4.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019

۲-۲-۴-۳- کمینه‌سازی انحراف ولتاژ کل

تابع هدف بعد، مربوط به مینیمم‌سازی انحراف ولتاژ باس‌ها می‌باشد. حداقل ساختن انحراف ولتاژ کل، باعث بهبود عملکرد و ایمنی سیستم قدرت می‌شود. این تابع به شرح رابطه (۳۳) است که N_B، تعداد باس بارهای کل سیستم، VL_i اندازه ولتاژ در باس i ام و V_{Li}^{ref} اندازه ولتاژ مرجع در باس بار i ام است که معمولاً یک پریونیت انتخاب می‌گردد[۲۶].

$$V_D = MinF_2 = \frac{1}{N_B}\sum_{i=1}^{NB}\left|V_{L_i} - V_{L_i}^{ref}\right| \qquad (۳۳)$$

۲-۲-۴-۴- تابع تلفات اکتیو شبکه

تابع هدف بعدی مربوط به حداقل نمودن مجموع تلفات شبکه با توجه به رابطه (۳۴) است.

$$F_3 = P_L = \sum_{i=1}^{NB}\sum_{j=1}^{NB} V_i V_j Y_{ij} cos(\theta_{ij} + \delta_{ij}) \qquad (۳۴)$$

تحت شرایط

$$\sum_{i=1}^{NG} P_{G_i} - P_{D_i} - P_L = 0 \qquad (۳۵)$$

$$\sum_{i=1}^{NQ} Q_{G_i} - Q_{D_i} - Q_L = 0 \qquad (۳۶)$$

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

۲-۲-۵- هزینه تراکم

تابع بعدی که باید حداقل‌سازی شود، هزینه تراکم است. قیمت حاشیه‌ای یا همان LMP هزینه حدی تأمین یک مگاوات برق در یک نقطه‌ی خاص شبکه، با در نظر گرفتن هزینه حدی تولید و قیود فیزیکی انتقال است و از سه جزء تشکیل شده است؛ که در آن جزء اول قیمت حاشیه‌ای در باس مرجع(یکسان برای همه باس ها)، جزء دوم تلفات حاشیه‌ای و جزء آخر تراکم است. کل تراکم شبکه برابر با TCC و هزینه تراکم کل برابر با تابع مربوط به رابطه (۴۲) است.

$$\mathrm{LMP} = \lambda + \lambda_{\frac{\partial \mathrm{P_L}}{\partial \mathrm{P_{Li}}}} + \sum_{\mathrm{ij}=1}^{\mathrm{N_L}} \mu_{\mathrm{L_{ij}}} \frac{\partial \mathrm{P_{ij}}}{\partial \mathrm{P}} \qquad (۳۷)$$

$$\mathrm{P_i} = \lambda + \lambda_{\mathrm{Li}} + \lambda_{\mathrm{Ci}} \qquad (۳۸)$$

$$\mathrm{TCC} = \sum_{\mathrm{ij}=1}^{\mathrm{N_L}} \Delta\rho_{\mathrm{ij}} \times \mathrm{P_{ij}} \qquad (۳۹)$$

$$\Delta\rho_{ij} = \left|LMP_i - LMP_j\right| \qquad (۴۰)$$

$$DLMP_i = \Delta\rho_{ij} \times P_{ij} \qquad (۴۱)$$

$$F_4 = min\sum_{k=1}^{N_L} DLMP_{ij} \qquad (۴۲)$$

۲-۲-۶- فرمول‌بندی چندهدفه

با توجه به اینکه اهداف مسئله بهینه‌سازی از یک جنس نبوده و گاهی اهداف با یکدیگر در تضاد می‌باشند، پاسخ‌های مسئله در محدوده متفاوتی از جواب‌ها قرار می‌گیرند. 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 هرکدام از اهداف در نظر گرفته‌شده و این ضرایب با توجه به اهمیت آن هدف، انتخاب می‌شود. ازآنجا که انتخاب ضرایب بسته به شرایط و روش‌های آزمون خطا دارد، انتخاب ضرایب مناسب برای پاسخ بهینه، دشوار است. لذا در این مطالعه انتخاب ضرایب توسط مجموعه فازی به‌صورت پیوسته تعیین می‌شود. درجه تعلق همان‌طور که بیان شد بستگی به اهمیت اهداف و تأثیر بر میزان بهینه‌سازی دارد. این مقادیر توسط توابع عضویت گوسی به دست می‌آید و به ترتیب الگوریتم جستجوی گرانشی به‌صورت تصادفی، مقادیر اولیه را به قواعد استنتاج فازی می‌دهد. در این مقاله، الگوریتم جستجوی گرانشی برای هر ضریب یک مقدار اختصاص داده و پس از انجام تنظیمات تجهیز، روش OPF در حضور تجهیز FACTS ، حل می‌شود. سپس تصمیمات بر اساس مجموعه قواعد فازی اگر آنگاه، جهت تعیین ضریب مرحله بعد، گرفته می‌شود. الگوریتم باهدف بهترین جواب کلی سعی در بهبود ضرایب توسط قواعد فازی و انتخاب مناسب پارامتر تجهیز FACTS توسط الگوریتم GSA برای پاسخ بهینه دارد، اما چون اهداف با یکدیگر در تضاد هستند، تابع جریمه‌ای تعریف‌شده که مسئله فوق، به یک بهینه‌سازی تک هدفه تبدیل می‌شود. تابع جریمه، هدف مسئله را به‌گونه‌ای هدایت می‌کند که چهار هدف به‌صورت هم‌زمان، در نقطه‌ی بهینه خود که با اهداف دیگر در تضاد نباشد، قرار گیرند. 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 می‌نماید. در حقیقت، الگوریتم جستجوی گرانشی وظیفه انتخاب پارامترهای بهینه تجهیز و مجموعه قواعد فازی، ضرایب توابع هدف را انتخاب می‌کنند. ضریب جریمه در کنار قواعد فازی، می‌تواند نقطه بهینه نسبی سراسری را در فضای بسیار کمتر، با زمان و تکرار کمتر به دست آورد و الگوریتم IPOPT روش OPF در حضور تجهیز را، حل می‌نماید. تابع تک هدفه مطابق رابطه (۴۳) بیان می‌شود.

$$F_T = W1 \times \frac{F1}{F'1} + W2 \times \frac{F2}{F'2} + W3 \times \frac{F3}{F'3} + W4 \times \frac{F4}{F'4} + PENALTY \qquad (۴۳)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.4.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019

که در این رابطه W ضرایب هرکدام از اهداف است و به ترتیب $F'1$، هزینه سوخت واحدها از حل مسئله OPF بدون قرارگیری تجهیز و F1 هزینه سوخت و هزینه تجهیز بعد از نصب تجهیز UPFC، است. $F'2$، دومین تابع هدف و برابر انحراف ولتاژ پایه و F2 انحراف ولتاژ بعد از نصب تجهیز است. $F'3$، تلفات پایه در حل مسئله OPF و F3 تلفات اکتیو بعد از نصب تجهیز هستند. $F'4$، هزینه تراکم مسئله بعد از حل OPF بدون حضور تجهیز FACTS و $F4$ هزینه تراکم در حضور تجهیز FACTS می‌باشد. تابع PENALTY مطابق با معادله (۴۴) تعیین می‌شود.

$$PENALTY=\begin{cases}1 & if \begin{cases}F1\geq F'1\\F2\geq F'2\\F3\geq F'3\\F4\geq F'4\end{cases}\\0 & otherwise\end{cases} \quad (۴۴)$$

۳- روش حل مسئله

در این بخش به منظور ارائه روش‌های حل مسئله، به تشریح الگوریتم‌های مربوطه پرداخته می‌شود.

۳-۱- الگوریتم حل مسئله OPF

الگوریتم حل مسئله OPF در این مقاله، بر اساس روش لاگرانژ تعمیم‌یافته (ALM) است. درروش ALM، روش OPF به یک دنباله از مسائل بهینه‌سازی مقید با قیود مجاز مطابق معادله (۴۵) تبدیل می‌شود[۲۷].

$$\begin{aligned}\underset{x}{Min}\ L^K(x,u)=&f(x,u)+(\lambda^k)^T H(x,u)\\&+\frac{1}{2}H(x,u)^T[W^k]H(x,u)\\&+\sum_{j=1}^{ni}\frac{1}{2U_j^k}\{(max[\mu_j^k+\mu_j^k G_j(x,u),0])^2-(\mu_j^k)^2\}.\end{aligned} \quad (۴۵)$$

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

برای حل مسئله فوق از الگوریتم تعمیم‌یافته مبتنی به روش Trust Region استفاده می‌شود، که ناحیه‌ای است که تمام قیود مسئله برآورده شده و روشی بر پایه تکرار، جهت سنجش و بهبود عملکرد همگرایی و پیشرفت حل مسئله بهینه‌سازی است. پارامترهای فوق پس از هر بار حل مسئله بهینه‌سازی، مطابق روابط (۴۶) تا (۴۹) بروز رسانی می‌شوند.

$$\lambda^{k+1}=\lambda^k+\ [W^k]H(x,u)^k \quad (۴۶)$$

$$\mu_j^{k+1}=max\{\mu_j^k+U_j^k G_j(x,u)^k,0\} \quad (۴۷)$$

$$W_j^{k+1}=max\begin{cases}\beta_w W_j^k & if\ \ |H_j(x,u)^k|>rw|H_j(x,u)^k\\W_j^k & if\ |H_j(x,u)^k|\leq rw|H_j(x,u)^{k-1}|\end{cases} \quad (۴۸)$$

$$U_j^{k+1}=\begin{cases}\beta_U U_j^k\ if\ G_j(x,u)^k>ruG_j(x,u)^{k-1}\\U_j^k\ \ if\ G_j(x,u)^k\leq ruG_j(x,u)^{k-1}\end{cases} \quad (۴۹)$$

که $(x,u)^k$ پاسخ به‌دست‌آمده از حل رابطه $0>rw$ و $0>ru$ و $\beta_U,\beta_w>1$ هستند. شرط همگرایی مسئله به‌صورت شروط معادله (۵۰) تا (۵۲) مطرح می‌شود:

$$\left\|\nabla_x L_x(x,u)^k\right\|\leq\varepsilon^k \quad (۵۰)$$

$$\|\lambda^{k+1}-\lambda^k\|/(1+\|\lambda^k\|_\infty)\leq\varepsilon_\lambda \quad (۵۱)$$

$$\|\mu^{k+1}-\mu^k\|/(1+\|\mu^k\|_\infty)\leq\varepsilon_\mu \quad (۵۲)$$

در این روابط ε برابر شعاع ناحیه اطمینان است و ε_λ با افزایش k از یک مقدار غیر صفر تا ε_∞ افزایش می‌یابد. نقطه مینیمم به‌دست‌آمده تابع لاگرانژ همان نقطه بهینه تابع هدف OPF است. این مسئله با ۱۲ بار تکرار، شرط مسئله را ارضا می‌نماید.

۳-۲- 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 ارائه‌شده 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 به‌طور مستقیم با حاصل‌ضرب جرم آن دو ذره و به‌طور معکوس، با مجذور فاصله بین آن‌ها 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(راه‌حل‌های 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 می‌کنند. مطابق با قوانین نیوتن هر چه جرم سنگین‌تر باشد، نیروی جاذبه‌اش بیشتر است. در نتیجه جرم‌های سنگین‌تر که احتمالاً نزدیک‌ترین جرم‌ها به مینیمم کلی هستند، سایر اجرام را متناسب بافاصله آن‌ها جذب می‌کنند. اگر یک سیستم با N عامل وجود داشته باشد، موقعیت هر عامل (جرم) یک کاندید حل مسئله است و به‌صورت رابطه‌ی (۵۳) تعریف می‌شود.

$$x_i=\left(x_i^1,...,x_i^d,...,x_i^n\right)\quad \forall i=1,2,...,N \quad (۵۳)$$

که در آن N بیانگر بعد مسئله و x_i^d مبین موقعیت عامل i ام در بعد d ام است. شروع کار الگوریتم با قرار دادن عوامل به‌طور 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 (۵۴) تعریف می‌شود.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.4.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019

$$F_{ij}^{d}(t) = G(t)\frac{M_{pi}(t)\times M_{ai}(t)}{R_{ij}(t)+\varepsilon} \times (x_j^d(t) - x_i^d(t) \qquad (۵۴)$$

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 می‌باشد، 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 (۵۵) و (۵۶) محاسبه می‌شود.

$$G(t) = G_0 \times \exp(-\alpha \times iter/_{Max\ iter}) \qquad (۵۵)$$

$$R_{ij}(t) = \|X_i(t), X_j(t)\|_2 \qquad (۵۶)$$

که α پارامتر ضریب نزولی، G_0 ثابت گرانش اولیه، $iter$ تعداد تکرار فعلی و $Max\ iter$ نشان‌دهنده حداکثر تعداد تکرار است. اگر فضای مسئله d بعد باشد، نیروی کلی که بر عامل i ام اثر می‌گذارد مجموع وزن‌دار شده تصادفی از d امین مؤلفه نیروهای اعمال‌شده از طرف سایر عوامل مطابق(۵۷) است.

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1,j\neq i}^{N} rand_j F_{ij}^d(t) \qquad (۵۷)$$

که $rand_j$ نشان‌دهنده عددی تصادفی در بازه [۰و۱] است. مطابق با قانون حرکت، شتاب عامل i ام در لحظه t و بعد d مطابق رابطه (۵۸) خواهد بود:

$$a_i^d = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \qquad (۵۸)$$

در قانون حرکت، شتاب یک عامل به‌طور مستقیم با نیروی برآیند و به‌طور معکوس با جرم آن رابطه دارد. در رابطه (۵۹)، d مبین بعد مسئله، t معرف یک‌زمان خاص و M_i جرم اینرسی عامل i ام‌است. محاسبه‌ی موقعیت و سرعت i امین ذره به‌صورت (۶۰-۵۹) محاسبه می‌شود:

$$V_i^d(t+1) = rand_i \times V_i^d(t) + a_i^d(t) \qquad (۵۹)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + V_i^d(t+1) \qquad (۶۰)$$

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

تابع شایستگی با ارزیابی جرم عوامل صورت می‌پذیرد. مفهوم این قضیه را می‌توان بدین‌صورت بیان کرد که عاملی با جرم سنگین‌تر، کارآمدتر است و سنگین‌ترین جرم کارآمدترین عامل است. از مجموعه معادلات بالا می‌توان نتیجه گرفت، هر چه جرم جسم عامل سنگین‌تر باشد، نیروی جاذبه بیشتر و حرکت آن آهسته‌تر است.

جاذبه بیشتر را می‌توان با قانون جاذبه (۵۴) و جنبش آهسته را با قانون حرکت رابطه (۵۸) بیان کرد. با فرض تساوی جرم گرانش و جرم اینرسی، مقادیر اجرام با نگاشت شایستگی محاسبه‌شده و جرم گرانشی و جرم اینرسی با رابطه زیر بروز می‌شوند.

$$M_{ai}=M_{pi}=M_{ii}=M_i, \quad i=1,2,...,N, \qquad (۶۱)$$

$$M_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{\sum_{j=1}^{N}(best(t) - worst(t))} \qquad (۶۲)$$

که fit_i نشانگر ارزش شایستگی عامل i ام در زمان t، $best(t)$ قوی‌ترین عامل در زمان t و $worst(t)$ بیانگر ضعیف‌ترین عامل در زمان t است. محاسبات $best(t)$ و $worst(t)$ برای حداقل سازی مسئله به‌صورت معادلات (۶۳) و (۶۴) می‌باشد:

$$best(t) = \min_{j\in\{1,...,N\}} fit_j(t) \qquad (۶۳)$$

$$\text{worst(t)} = \max_{\text{j}\in\{1...,\text{N}\}} \text{fit}_\text{j}(\text{t}) \qquad (۶۴)$$

برای نرمال‌سازی جرم محاسبه‌شده رابطه (۶۰) به‌صورت رابطه (۶۵) عمل می‌کند:

$$M_i(t) = \frac{M_i(t)}{\sum_{j=1}^{N} M_j(t)} \qquad (۶۵)$$

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 (۵۹) و (۶۰) محاسبه می‌گردد. ثابت‌های دیگر مانند ثابت گرانش و جرم توسط روابط (۵۵) و (۶۰) محاسبه می‌شود. شرط پایان‌پذیری الگوریتم، کوچک‌تر شدن F_T از یک و سپس تعداد تکرار می‌باشد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

الگوریتم پیشنهادی مقاله جهت حل OPF در شبکه 14 باسه IEEE استاندارد، با استفاده از بسته کمکی MATPOWER انجام‌شده است. این ابزار دارای حل مسئله پخش‌بار، 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 GSA مقداردهی شده، سپس توسط قواعد فازی نرمالیزه شده و پارامترهای تجهیز FACTS انتخاب می‌شوند (به‌طور تصادفی با)FUZZY-GSA. با قرارگیری تجهیز در مکان تعیین‌شده، روش OPF با الگوریتم IPOPT 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 و مطابق شکل (۳) است. ظرفیت خطوط مطابق با استاندارد مرجع [۳۱] محدود شده است. هدف مسئله حل پخش‌بار بهینه برای دستیابی به متغیرهای کنترلی آن و تنظیم بهینه پارامتر تجهیز FACTS در محل مناسب جهت رسیدن به نقطه بهینه می‌باشد. به‌منظور بررسی روش پیشنهادی شش حالت موردبررسی و مقایسه قرارگرفته است.

اول: اجرای OPF بدون حضور تجهیز FACTS

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.4.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

پنج حالت بعدی مربوط به حالت اجرای OPF در حضور تجهیز UPFC می‌باشند که شامل موارد زیر است:

۱- فقط کاهش هزینه تولید و تجهیز

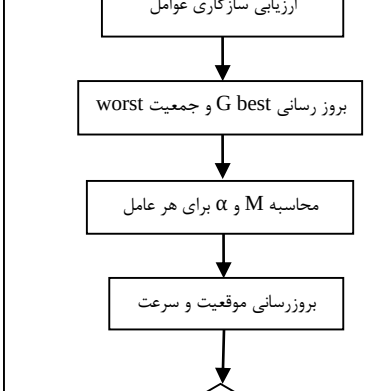
۲- فقط کاهش هزینه تراکم

۳- فقط کاهش تلفات

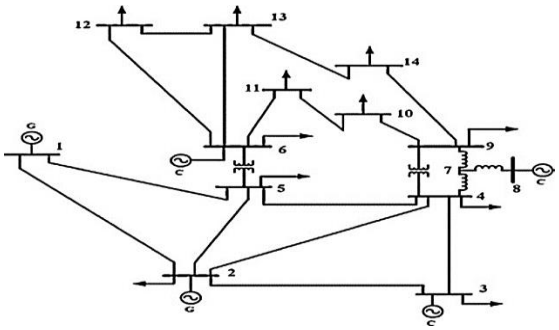
۴- فقط بهبود انحراف پروفیل ولتاژ

۵- بهینه‌سازی تابع کلی چند هدفه با تبدیل به تک هدفه

نتایج برای حداقل سازی هزینه سوخت و هزینه نصب تجهیز، حداقل-سازی تلفات، حداقل سازی انحراف معیار ولتاژ و حداقل سازی هزینه تراکم 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 F_T مدنظر قرارگرفته و در Total Cost وجود دارد. ابتدا برای تست سیستم، به‌منظور ارزیابی هریک از توابع هدف، الگوریتم، به‌صورت تک هدفه اجرا می‌شود. تنظیمات مقادیر الگوریتم GSA مطابق با جدول (۱) هست. فلوچارت الگوریتم GSA و IPOPT در اشکال (۵) و (۲) نشان داده‌شده است. نتایج بررسی برای حالت‌های مختلف در جدول (۲) بیان‌شده است. در تمام حالت‌های تست، بار شبکه ثابت در نظر گرفته‌شده است. 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 F_T به‌صورت چندهدفه با معرفی فاکتور جریمه به یک مسئله بهینه‌سازی تک‌هدفه تبدیل و ارزیابی می‌شود. برنامه‌نویسی ALM در شکل (۴) نوشته شده است.



شکل (۲) فلوچارت الگوریتم IPOPT



شکل (۳) سیستم ۱۴ باس IEEE

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

شکل (۴) الگوریتم IPOPT

شکل (۵) الگوریتم GSA

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.4.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019

در این مقاله پنج حالت مختلف بررسی شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. حالت پایه معادلات پخش‌بار بهینه بدون حضور تجهیز در شبکه، پارامترهای مورد بررسی سایر بخش ها جهت فرمول‌بندی مسئله در اختیار گذاشته است. در این مورد OPF اجراشده و با حل کننده IPOPT حل می‌گردد. پارامترهای موردنیاز شامل F' در هر بخش می‌شود.

حالت دوم UPFC با کاهش ۱۲,۲٪ خود توانسته هزینه تولید را کاهش دهد. این کاهش هزینه با در نظر گرفتن هزینه نصب تجهیز UPFC می‌باشد. در این حالت هزینه تراکم کاهش قابل‌توجه‌ای داشته و با ۷۷٪ توانسته تاثیر عمده‌ای در کاهش هزینه نهایی داشته باشد، اما در این حالت به دلیل استفاده از خطوط با تراکم کم و تلفات بالا، اندکی تلفات افزایش پیداکرده که رقم افزایش ۱۶٪ می‌باشد. پروفیل ولتاژ نیز بهبود یافته و ۰,۸٪ پروفیل صاف‌تری، داشته است.

جدول (۱) تنظیمات الگوریتم GSA

iteration	population	Value First Gravity	Value First velocity	First speed Gravity	Gravity constant	α factor	parameter
5	100	0	0	Rand[0,1]	1	20	GSA

جدول (۲) نتایج حل مسئله در حالت‌های مختلف

Parameter	P_G	Q_G	F1	F2	F3	F4	FT	Qloss	LOCATION	ρ	r	Qupfc	Cost upfc
حالت پایه	264.05	51.5	6279.9	2733.5	5.04	0.0250	9013	19.71	–	–	–	–	–
حالت دوم	264.85	62.68	5514.1	605.45	5.88	0.0248	6144.1	24.38	3	0.149	1.191	8.84	24.57
حالت سوم	265.61	63.14	5525.1	572.2	6.61	0.0262	6143.5	27.50	3	0.085	1.139	16.59	46.09
حالت چهارم	262.9	62.5	6615.3	3103	3.5	0.0235	9734.4	15	14	0.57	1.60	49.8	138.18
حالت پنجم	265.06	51.1	6423.1	66476	6.06	0.0101	13014	26	18	0.026	0.261	12	33.22
حالت ششم	263.96	52.55	6118	2437	4.9	0.0245	8571	19.65	4	0.028	2.09	5.62	15.64

تابع هزینه کل که مدنظر می‌باشد ۳۱٪ کاهش پیداکرده است. در این حالت بجز افزایش اندک تلفات، سایر موارد با پیشرفت قابل قبولی بهینه شده‌اند. همان‌طور که در جدول مشخص است مکان و پارامترهای UPFC جهت این مورد به دست آمده و توان راکتیو تزریقی ۸,۸۴ مگا وار است و هزینه آن با نرخ بهره و بازگشت سرمایه در دوره مدنظر، هر ساعت ۲۴,۵۷$/h محاسبه‌شده است.

حالت سوم با حضور UPFC؛ حل مسئله تک هدفه کاهش هزینه تراکم مدنظر هست. در این مورد ۱۲٪ هزینه تولید به دلیل معادلات پخش بار بهینه مناسب، توسط تجهیز و کنترل سیلان توان، کاهش پیداکرده است و خرید از ژنراتورهای ارزان تر ممکن شده است. هزینه تراکم در خطوط به‌طور خاص کاهش پیداکرده و ۸۰٪ است که می‌توان به بهره‌برداری مناسب و کاهش قیمت‌های حاشیه‌ای در این خصوص دست یافته شود. افزایش تلفات و انحراف ولتاژ نیز به دلیل استفاده از ظرفیت خطوط با تلفات بالا می‌باشد که همان‌طور که انتظار می‌رفت جز موارد بهینه‌سازی نبوده است. همچنین کاهش تراکم باعث افزایش ولتاژ در شین‌ها شده است. در این قسمت نیز مکان و پارامتر تجهیز مشخص‌شده و هزینه کل، کاهش ۳۱٪ داشته است

حالت چهارم هدف از نصب UPFC کاهش تلفات، سیستم است. در این حالت، تلفات ۳۱ درصد کاهش پیداکرده اما هزینه تولید و تراکم افزایش‌یافته است. این بدان علت است که برای کاهش تلفات خطوط،

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.4.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019 [Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

شبکه از خطوط با تلفات کم حداکثر استفاده را برده و تا توان نامی پرشده‌اند اما خطوط که هزینه کمتری داشته و تلفات بیشتر، با ظرفیت کمتری استفاده‌شده‌اند. به همین دلیل تلفات کاهش و هزینه‌ها افزایش‌یافته اما چون از خطوط حداکثر استفاده‌شده پروفیل ولتاژ نیز، بهبودیافته است.

حالت پنجم حداقل سازی انحراف ولتاژ مدنظر بوده که ۶۰ درصد پروفیل صاف‌تری به ارمغان آورده است. این بدان معنی است که ولتاژها در شبکه نزدیک به هم بوده و سیلان توان در خطوط گران‌تر اتفاق افتاده است. با افزایش سه برابری هزینه تراکم خطوط این مورد کاملاً مشخص می‌شود. به طبع هزینه کل شبکه نیز با افزایش زیادی روبه‌رو شده است.

در حالت ششم مسئله چندهدفه به تک هدفه تبدیل‌شده است. همان‌طور که مشخص است برای بهینه‌سازی در مسئله چندهدفه، بعضی از اهداف با یکدیگر در تضاد هستند. به همین دلیل با افزایش یا کاهش یکی دیگری نیز تغییر می‌کند. به همین سبب رسیدن به نقطه‌ای که تمام اهداف در آن به‌صورت بهینه باشد مشکل است. این نقطه باید تمام اهداف را ارضا کرده و با تغییر از آن پارامترها از حالت بهینه خارج می‌شوند. در این تحقیق مهم‌ترین بخش مسئله در این هدف گنجانده‌شده است. روش حل بدین‌صورت است که بعد از به دست آمدن حالت پایه، مسئله را مانند Ft فرموله می‌نماییم و برای هر یک ضرایبی را جهت نرمال‌سازی قرار می‌دهیم. این ضرایب به همان علت بیان‌شده تضاد اهداف مطرح می‌شود. انتخاب این ضرایب برای جلوگیری از رخ دادن تضاد بین اهداف مشکل است و با آزمون خطا به دست می‌آید. ازآنجاکه در آزمون خطا احتمال اینکه حالت بهینه در نظر گرفته نشود بسیار است؛ این مقاله از روش الگوریتم نوینی استفاده کرده است که فقط در ابتدا ضرایبی بین صفر و یک به مسئله اختصاص می‌دهد. این کار توسط الگوریتم GSA صورت گرفته سپس قواعد فازی وارد عمل شده و ضرایب را جهت هدف مشخص‌شده با روش اگر آنگاه و تابعی گوسی، نرمالیزه می‌کنند. این کار به خاطر در نظر گرفتن طیف مناسب و حرکت رو به بهبود از ایجاد خطا کم کرده و می‌تواند به نقطه بهینه سراسری نزدیک شود. بعلاوه اینکه تعداد تکرار و زمان اجرا فوق‌العاده کم می‌گردد. الگوریتم GSA سپس شروع به انتخاب پارامتر برای تجهیز کرده و در هر تکرار مسئله OPF با روش IPOPT حل می‌شود. در این حالت، ضریب جریمه‌ای در نظر گرفته‌شده که باعث می‌شود فضای مسئله کوچک‌تر شده و زودتر به پاسخ دست‌یافت. پاسخ‌های غیر بهینه با ضریب جریمه حذف می‌شوند و حرکت به سمت محدوده بهینه ادامه پیدا می‌کند. همان‌طور که در جدول مشخص است کلیه موارد بهینه‌شده بدون آنکه مانند حالات قبل، اثر منفی روی یکدیگر به گذارند. در این حالت هزینه تولید ۴ درصد کاهش داشته و هزینه تجهیز ۱۵،۶۴ دلار در ساعت است. هزینه تراکم ۱۲٪ کاهش پیداکرده است. تلفات ۳ درصد و پروفیل ولتاژ ۲ درصد بهبودیافته است. هزینه کلی نیز ۵٪ کاهش داشته است که نشان می‌دهد همه‌ی اهداف توانسته‌اند کاهش داشته باشند. این مورد نشان می‌دهد که روش و تجهیز از قابلیت مناسب برخوردارند. مکان نصب و پارامترهای تجهیز در همه حالت‌ها مشخص است.

۵- نتیجه‌گیری

استفاده از UPFC باعث می‌شود با اثرگذاری بر سیل توان، اهداف مختلف مسئله در شبکه برآورده شود. این مقاله برای نشان دادن کارایی الگوریتم پیشنهادی و همچنین تجهیز مورداستفاده، هفت حالت مختلف را در نظر گرفته است. حالت پایه، تجهیز در شبکه وجود ندارد و شش حالت دیگر، در حضور تجهیز UPFC بررسی‌شده است. UPFC در تمامی مراحل تست توانسته تابع هدف مدنظر را بهینه نماید.

ابتدا پارامترهای موردنیاز در حالت پایه، با اجرای روش OPF به دست آمده، سپس حالت‌های موردمطالعه بررسی می‌شود. بررسی و تحلیل نتایج اثرگذاری چشم‌گیر بر هزینه تولید را نشان می‌دهد. هزینه تولید در همه موارد با جزء هزینه تجهیز جمع شده است. سومین آزمون با کاهش هزینه تراکم هزینه‌های نهایی شبکه نیز به مقدار ۲۸۷۰ دلار در ساعت بهینه‌شده است. آزمون چهار و پنج نیز حداقل تلفات و حداقل انحراف ولتاژ به‌دست‌آمده اما هزینه نهایی به دلیل استفاده از خطوط با تلفات کمتر، بسیار زیاد شده است.

آزمون ششم به دلیل تضاد اهداف با یکدیگر، تابع جامع با یک سری ضرایب و تابع پنالتی، تعریف‌شده است. این تضاد باعث استفاده از یک سری ضرایب w می‌شود؛ که کاربرد آن اثرگذاری بر نرمالیزه کردن اهداف است. برای این مهم الگوریتم نوینی بهره گرفته شد؛ که در تست‌های شبکه قدرت عملکرد خود را نشان داد.

برای حل مسئله ابتدا توسط الگوریتم GSA، مقادیر اولیه برای اعداد نرمالیزه در بازه [0,1] تعیین‌شده و سپس با استفاده از قواعد فازی مقادیر بهینه می‌شوند. این امر بدین‌صورت است که قواعد فازی با توجه به درجه اهمیت تابع به سمت بهبود ضرایب، برای تابع هدف برنامه‌ریزی‌شده‌اند. در هر مرحله الگوریتم GSA مقادیر و مکان تجهیز را جستجو کرده و پس از نصب توسط روش OPF با حل کننده IPOPT مسئله را حل کرده و این سیکل تا رسیدن به جواب مناسب ادامه دارد. برای جلوگیری از خروج از محدوده بهینه، ضریب جریمه تعریف‌شده است. مجموع عوامل باعث می‌شوند با تعداد تکرار کم فضای محدود اطراف نقطه بهینه پایش شود. تابع جامع با بهینه‌سازی یک هدف تجمعی با استخراج اهداف از مقادیر پایه، بهینه می‌شود. مسئله، به دلیل استفاده از الگوریتم نوین توانست در یک تابع جامع تمامی اهداف را ارضا کرده و بهینه نماید. یافته‌ها نشان می‌دهد الگوریتم و تجهیز در کنار روش حل IPOPT به‌خوبی توانسته‌اند چالش‌ها را برطرف و پاسخ بهینه را بیابند. بعلاوه اینکه این فرصت را به بهره‌بردار می‌دهند تا در شرایط اضطرار با تغییر UPFC و پارامتر آن‌یک هدف را بهینه کلی نمایند. زمان همگرایی در همه موارد کمتر از یک دقیقه و شبیه‌سازی‌ها در یک سیستم خانگی با مشخصات: Processor(2.6GHz) و RAM(8GB) و Windows 10 و MATLAB 2016a انجام شده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.4.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019

مراجع

[1] A. Hesami nia, H. Hoseininan, “Optimal load distribution on power grids including FACTS elements using PSO algorithm”, Ms thesis, Amirkabir University of Technology, 2008.

[2] A. Shakiba, M. Haghi Fam, “Optimal load distribution on power systems equipped with FACTS devices” Ms thesis, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, 2013.

[3] N. Amjadi, H. Fatemi, “Optimal load distribution of power systems with consideration of safety and pollution constraints using the advanced bacterial search method” , Ms thesis, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, 2011.

[4] J. Hingoryani, “Considering Faktes Naryn devices”, Ghods Niroo Consulting Engineers Publishing, 1984.

[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, pp. 58–60, Sep.2011

[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, pp. 1698–1703, July 2009.

[7] S. N. Singh, 2001 “Location of FACTS Devices for Enhancing Power Systems’ Security”, Power Engineering, LESCOPE’01, 2001 Large Engineering System Conference on, Vol. 11, pp. 162-166, July 2001.

[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 ,Hong Kong,Vol. 29, pp. 173-177, oct 2001.

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

[10] H. Barati, M. Ehsan and M. Fotuhi-Firuzabad, “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 Delhi, India, Dec 2006.

[11] F. G. M. Lima, J. Munoz, I. Kokar and F. D. Galiana, “Optimal Location of Phase Shifter in a Competitive Market by Mixed Integer Linear Programming”, 14th PSCC, Sevilla,Vol. 24, pp. 12-21, Dec 2002.

[12] A. Kazemi, R. Sharifi, “Optimal Location of Thyristor Controlled Phase Shifter in Restructured Power Systems By Congestion Management”, Industrial Technology, IEEE International Conference on, pp. 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, 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2011.

[15] Sepahvand H at al, 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, 2013.

[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.

[17] M. A. Saeghi, A. Esmaeili and F. Karbalaii, “Manage line condensation and reduce power losses using devices”, proceedings of 14th Iranian Student Conference on Electrical Engineering, 2011.

[18] M. A. Abbasian, H. Nezam abadi pour, “Multi-objective gravity search algorithm based on ungraded faces sorting”, Tabriz Journal of Electrical Engineering (TJEE) Vol. 41, No. 1,

[19] Nagarajakumari CH, K.Chandra Sekhar, Optimal Placement of SVC fo rthe Transmission Congestion Management. Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering Print ISSN: 2349- 5804; Online ISSN: 2349-5812 Vol. 1, pp. 54-58, 2013.

[20] M. Basu.2011. Multi-objective optimal power flow with FACTS devices. Energy Conversion and Management, Vol. 59, pp. 903–910, 2011.

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

[22]Zimmerman R.D. and al. MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 26, pp. 15-22, 2011.

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

[24] 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, pp. 11-17, 2016.

[25] Sharmila D. Medeswaran R. Optimal Location of TCSC and SVC Devices To Enhance Power System Security .International Journal Of Engineering Sciences & Research Technology, pp. 649-656, 2014.

[26] M. Ebadian, M. Aboli, M. Farshad, “Using the new version of particle swarm algorithm for optimal management of economic development - security of reactive power in power systems”, Computatinal Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 2, No. 2, pp. 67-80, 2011.

[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. 2232-2248, 2009.

[29] S. M. R. Mosavi et al., Categorization of Sonar Objectives Using Particle Condensation and Gravitational Search, Iranian Journal of Marine Technology, Vol. 3, No. 2, pp.99-112, 2016.

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

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.4.5]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

UPFC Placement and Setting Optimized for Multi-objective Optimization Methods to Solve IPOPT in Pool Market

Mohsen Falaki[1*]

*1- Senior Electrical Engineer, Power Group, Trend Saffron Knowledge Base Company, Mohsen.falaki@yahoo.com

Abstract: Unified Power Flow Controller (UPFC) is one of the FACTS devices which plays a crucial role in simultaneous regulating active and reactive power, improving system load, reducing congestion and cost of production. Therefore, determining the optimum location of such equipment in order to improve the performance of the network is significant. In this paper, WCA algorithm is used to locate the optimal placement of UPFC. The concepts and ideas underlying this approach are inspired by nature and are based on observations of water and the process of the water cycle and the formation of rivers and streams and their flow to the sea in the real world. This algorithm has a high potential for escaping local optimizations as well as speeding up global optimization. For UPFC modeling, the power injection model has been used and the OPF-UPFC problem has been solved with various objective functions such as generators fuel cost, network losses and system loading, both single-objective and multi-objective. Also, the results obtained from different objective functions are compared with other references. The results acquired show the efficiency and speed of the water cycle algorithm compared to some other intelligent algorithms. The computer program has been written in the MATLAB software environment and implemented on the IEEE 14-bus network.

Keywords: Fuzzy-GSA-OPF Algorithm, IPOPT Solver, OPF, UPFC

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.4.5]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 8-No. 1- Spring 2019