

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 پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۹

چکیده: این مقاله به منظور ارزیابی عملکرد تجهیز FACTS بر متغیرهای 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 پخش بار 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، پخش بار بهینه.

۱- مقدمه

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 نتیجه 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 بخش‌های گوناگون بود. این تغییرات که

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 پخش بار مناسب توسط سیستم، فراهم می‌شود. محاسبات پخش بار بهینه، نقش مهمی در برنامه‌ریزی تولید، ایفا می‌نماید [۱-۳]. حل مسائل پیچیده مهندسی، روش‌های متفاوتی دارند که هر کدام به نسبت می‌تواند پاسخ متفاوت پیدا کند. استفاده از پخش بار بهینه باعث می‌شود متغیرهای کنترل و حالت، به گونه‌ای تعیین شود که علاوه بر بهینه‌سازی تابع هدف مسئله،

از جمله الگوریتم جستجوی گرانشی بر مبنای بهینه پارتو، مورد بررسی و مقایسه قراردادده است. مرجع [۱۹] مدیریت تراکم را برای TCSC با روش‌های مختلف بررسی کرده است.

بررسی مقالات نشان می‌دهد 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 به صورت 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 بهینه‌سازی تک هدفه مشهود است. این روش توانسته تمام اهداف را به طور همزمان بهینه نماید.

این پژوهش برای بهینه‌سازی از مسئله پخش بار بهینه با کمک حل‌کننده IPOPT به دلیل مزایا و توانایی آن، استفاده کرده است. روش بهینه‌سازی این‌گونه است که ابتدا سیستم قدرت (OPF) را با IPOPT 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 تریق توان و بازار مدنظر، به صورت اشتراکی می‌باشد. پارامترهای تجهیز شامل مکان نصب، p (زاویه فاز UPFC) و r (محدوده عملکرد UPFC) است.

ساختار مقاله در ادامه بدین صورت 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 به صورت تک هدفه فرموله شده و در نهایت با ترکیب اهداف، تابع جامع به دست می‌آید. حل مسئله OPF به کمک حل‌کننده IPOPT در بخش ششم مشخص شده و بخش هفتم روش حل الگوریتم فرا ابتکاری را بیان خواهد کرد بخش هشتم، روش پیشنهادی بر روی یک سیستم ۱۴ باسه IEEE تست شده و سپس با توجه به دستاوردها، نتایج مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مدل‌سازی و فرمول‌بندی مسئله

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

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 گداف اقتصادی و زیست محیطی می‌شود و با قوانین سخت‌گیرانه وضع شده در زمینه محیط زیست، امری دشوار به نظر می‌رسد. به علاوه تراکم 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 توزیع کننده، همانند روش قطع یا زمان‌بندی بار، درگیر پیچیدگی نمی‌شوند. بر حسب استاندارد IEEE تجهیزات FACTS قابلیت سیستم را در موارد کنترل منظم پخش بار، 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 استفاده شده 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

$$u^T = [P_{G2} \dots P_{G_{NG}}, V_{G1} \dots V_{G_{NG}}, T_1 \dots T_{NT}, \delta_{B1} \dots \delta_{B_N}] \quad (8)$$

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 بیان شده است:

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

V_B : دامنه ولتاژ در باس PQ

Q_{GI} : توان راکتیو خروجی واحدهای تولیدی

S_L : حد بارگذاری توان در خطوط

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

$$x^T = [P_{G1}, V_{L1} \dots V_{L_{NL}}, Q_{G1} \dots Q_{N_G}, S_{L1} \dots S_{L_N}] \quad (9)$$

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.

۲-۳-۱- قیود مساوی

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

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^{NB} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (10)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^{NB} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) = 0 \quad (11)$$

که $P_{Di}, Q_{Di}, P_{Gi}, Q_{Gi}$ توان راکتیو ژنراتور و بار در شین i و $|Y_{ij}|$ و θ_{ij} عناصر i, j ماتریس ادمیتانس و V_i, δ_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:

۱-۲- مدلسازی تجهیز UPFC

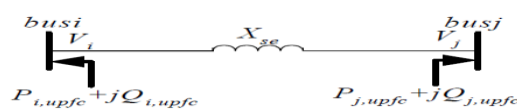
یک ولتاژ سری ورودی و زاویه فاز ولتاژ ورودی آن، می‌تواند اثرگذاری تجهیز UPFC در شبکه سیستم قدرت را مدل کند. ولتاژ ورودی تجهیز می‌تواند حداکثر تا ۰.۱ بزرگی ولتاژ نامی خطی باشد که UPFC به آن متصل شده است. این مدل توسط دو ترانسفورماتور با یکدیگر کوپل شده و به صورت یکپارچه به خط انتقالی مدل شده متصل می‌شوند. در شکل (۱) مدل یک UPFC برای نمایش نحوه متصل شدن و مدلسازی در خط نمایش داده شده است. فرمول‌بندی مسئله به صورت روابط (۱) تا (۴) می‌باشد.

$$P_{si} = r b_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma_{se}) \quad (1)$$

$$Q_{si} = r b_s V_i^2 \cos(\gamma_{se}) + Q_{inj\ sh} \quad (2)$$

$$P_{sj} = -r b_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma_{se}) \quad (3)$$

$$Q_{sj} = -r b_s V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma_{se}) \quad (4)$$



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 متغیرهای کنترلی برای هدف از پیش تعیین‌شده با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از قیود سیستم بهینه‌سازی گردد. مسئله OPF در چهار چوب روابط (۵) تا (۷) قابل‌محاسبه است [۲۲].

$$\text{Minimize } F(x, u) \quad (5)$$

$$\text{Subject } g(x, u) = 0 \quad (6)$$

$$\text{And } h(x, u) \leq 0 \quad (7)$$

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.

۱-۲-۲- متغیرهای کنترل

متغیرهای 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 به صورت رابطه (۸) کرد.

۲-۲-۴- تابع هدف مسئله

در این مقاله تابع هدف، شامل چهار قسمت می‌باشد که به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

۲-۲-۴-۱- حداقل سازی هزینه سوخت واحدها

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

$$F_{11} = \min \sum_{i=1}^{NG} C_{Gi}(P_{Gi}) \quad (25)$$

$$\sum_{i=1}^{NG} C_{Gi}(P_{Gi}) = (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) \quad (26)$$

که P_{Gi} توان اکتیو تولیدی ژنراتور i ام است و a_i و b_i و c_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 به صورت زیر بیان نمود [۲۳]:

$$C_{upfc} = 0.0003 \times Supfc^2 - 0.02691 \times Supfc + 188.22 \quad (27)$$

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

$$IC(FACTS) = C(FACTS) \times S(FACTS) \times 1000 \quad (28)$$

برای $Supfc = |Q2 - Q1|$ ، 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) استفاده شده است؛ که α در رابطه (۳۰) جهت در نظر گرفتن نرخ بازگشت سرمایه در یک دوره زمانی می‌باشد.

$$AIC_{FACTS} = \alpha \times IC(FACTS) \text{ \$Year} \quad (29)$$

$$\alpha = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (30)$$

AIC_{FACTS} هزینه سالانه تجهیز FACTS با در نظر گرفتن بازگشت سرمایه در سال است که باید این مقدار بر حسب دلار بر ساعت محاسبه گردد. این مقاله مدت‌زمان بازگشت سرمایه n را ۱۰ سال و نرخ بهره r را ۰.۰۵ در نظر گرفته است. رابطه (۳۱) جزء دوم تابع هدف اول است.

$$MinF_{22} = \frac{AIC_{FACTS}}{8760} \quad (31)$$

$$F_1 = \min(F_{11} + F_{22}) \quad (32)$$

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^{NB} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + P_j^{FACTS} = 0 \quad (12)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^{NB} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + Q_i^{FACTS} = 0 \quad (13)$$

$$P_{Gj} - P_{Dj} - \sum_{i=1}^{NB} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + P_j^{FACTS} = 0 \quad (14)$$

$$Q_{Gj} - Q_{Dj} - \sum_{i=1}^{NB} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) + Q_j^{FACTS} = 0 \quad (15)$$

۲-۳-۲-۲- قیود نامساوی

این قیود تعیین‌کننده محدودیت‌های امنیتی و کاری سیستم قدرت است و به صورت 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 باس‌های تنظیم ولتاژ و تپ ترانسفورماتورها مطابق رابطه (۱۶) تا (۱۹) می‌شود.

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max} \quad (16)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \quad (17)$$

$$V_{Gi}^{min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi}^{max} \quad (18)$$

$$T_{Gi}^{min} \leq T_{Gi} \leq T_{Gi}^{max} \quad (19)$$

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

$$V_{Bi}^{min} \leq V_{Bi} \leq V_{Bi}^{max} \quad (20)$$

$$|S_{ij}(\theta, V)| \leq S_{ij}^{max} \quad (21)$$

$$0 \leq \rho \leq 0.1Vline \quad (22)$$

$$1 \leq LOCATION \leq 20 \quad \epsilon \mathbb{N} \quad (23)$$

$$-\pi \leq r \leq \pi \quad (24)$$

که هر کدام 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 به صورت $0.95 \leq V_i \leq 1.05$ در نظر گرفته شده است.

$$F_4 = \min \sum_{k=1}^{N_L} DLMP_{ij} \quad (42)$$

۲-۲-۶- فرمول بندی 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 هر کدام از اهداف در نظر گرفته شده و این ضرایب با توجه به اهمیت آن هدف، انتخاب می‌شود. از آنجا 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 به صورت 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 به صورت 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 تعریف شده که مسئله فوق، به یک بهینه‌سازی تک هدفه تبدیل می‌شود. تابع جریمه، هدف مسئله را به گونه‌ای هدایت می‌کند که چهار هدف به صورت هم‌زمان، در نقطه‌ای 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.

$$F_T = W1 \times \frac{F1}{F'1} + W2 \times \frac{F2}{F'2} + W3 \times \frac{F3}{F'3} + W4 \times \frac{F4}{F'4} + PENALTY \quad (43)$$

۲-۲-۳- کمیته‌سازی 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، V_{Li} اندازه ولتاژ در باس i ام و V_{Li}^{ref} اندازه ولتاژ مرجع در باس i ام است که معمولاً یک پریونیت انتخاب می‌گردد [۲۶].

$$V_D = \min F_2 = \frac{1}{N_B} \sum_{i=1}^{N_B} |V_{Li} - V_{Li}^{ref}| \quad (33)$$

۲-۲-۴- تابع تلفات اکتیو شبکه

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

$$F_3 = P_L = \sum_{i=1}^{N_B} \sum_{j=1}^{N_B} V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_{ij}) \quad (34)$$

تحت شرایط

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{G_i} - P_{D_i} - P_L = 0 \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^{N_Q} Q_{G_i} - Q_{D_i} - Q_L = 0 \quad (36)$$

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 θ_{ij} 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 باس‌ها)، 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.

$$LMP = \lambda + \lambda \frac{\partial P_L}{\partial P_{Li}} + \sum_{ij=1}^{N_L} \mu_{Lij} \frac{\partial P_{ij}}{\partial P} \quad (37)$$

$$P_i = \lambda + \lambda_{Li} + \lambda_{Ci} \quad (38)$$

$$TCC = \sum_{ij=1}^{N_L} \Delta \rho_{ij} \times P_{ij} \quad (39)$$

$$\Delta \rho_{ij} = |LMP_i - LMP_j| \quad (40)$$

$$DLMP_i = \Delta \rho_{ij} \times P_{ij} \quad (41)$$

$$W_j^{k+1} = \max \begin{cases} \beta_w W_j^k & \text{if } |H_j(x,u)^k| > rw |H_j(x,u)^{k-1}| \\ W_j^k & \text{if } |H_j(x,u)^k| \leq rw |H_j(x,u)^{k-1}| \end{cases} \quad (48)$$

$$U_j^{k+1} = \begin{cases} \beta_u U_j^k & \text{if } G_j(x,u)^k > ru G_j(x,u)^{k-1} \\ U_j^k & \text{if } G_j(x,u)^k \leq ru G_j(x,u)^{k-1} \end{cases} \quad (49)$$

که $(x, u)^k$ پاسخ به دست آمده از حل رابطه $0 > ru$ و $0 > rw$ و $\beta_u, \beta_w > 1$ شرط همگرایی مسئله به صورت شروط معادله (۵۰) تا (۵۲) مطرح می شود:

$$\| \nabla_x L_x(x,u)^k \| \leq \varepsilon^k \quad (50)$$

$$\| \lambda^{k+1} - \lambda^k \| / (1 + \| \lambda^k \|_\infty) \leq \varepsilon_\lambda \quad (51)$$

$$\| \mu^{k+1} - \mu^k \| / (1 + \| \mu^k \|_\infty) \leq \varepsilon_\mu \quad (52)$$

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 به دست آمده تابع لاگرانژ همان نقطه بهینه تابع هدف OPF است. این مسئله با ۱۲ بار تکرار، شرط مسئله را ارضا می نماید.

۳-۲- الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA)

الگوریتم جستجوی گرانشی، یکی از جدیدترین الگوریتم های فرا ابتکاری هوش جمعی است که اولین بار توسط راشدی و همکاران در سال ۲۰۰۹ برای مسائل بهینه سازی 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 می کند «هر ذره در جهان ذره دیگری را با یک نیرویی که به طور مستقیم با حاصل ضرب جرم آن دو ذره و به طور معکوس، با مجذور فاصله بین آن ها ارتباط دارد، جذب می کند.» کارایی الگوریتم جستجوی گرانشی در توابع آزمون استاندارد، جهت بهینه سازی تک هدفه به اثبات رسیده است. این الگوریتم را می توان به عنوان گروهی از عوامل (راه حل های کاندید) در نظر گرفت که دارای جرم متناسب با مقدار خود در تابع شایستگی هستند. هنگام اجرای الگوریتم، همه ی 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. در نتیجه جرم های سنگین تر که احتمالاً نزدیک ترین جرم ها به مینیمم کلی هستند، سایر اجرام را متناسب بافاصله آن ها جذب می کنند. اگر یک سیستم با N عامل وجود داشته باشد، موقعیت هر عامل (جرم) یک کاندید حل مسئله است و به صورت رابطه ی (۵۳) تعریف می شود.

$$x_i = (x_i^1, \dots, x_i^d, \dots, x_i^n) \quad \forall i=1,2,\dots,N \quad (53)$$

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 به طور تصادفی در فضای جستجوی آغاز می شود. در طول هر تکرار، نیروی گرانشی از عامل i ام بر عامل j ام در زمان خاص t به صورت رابطه (۵۴) تعریف می شود.

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 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 می باشد. تابع PENALTY مطابق با معادله (۴۴) تعیین می شود.

$$PENALTY = \begin{cases} 1 & \text{if } \begin{cases} F1 \geq F'1 \\ F2 \geq F'2 \\ F3 \geq F'3 \\ F4 \geq F'4 \end{cases} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (44)$$

۳- روش حل مسئله

در این بخش به منظور ارائه روش های حل مسئله، به تشریح الگوریتم های مربوطه پرداخته می شود.

۳-۱- الگوریتم حل مسئله OPF

الگوریتم حل مسئله OPF در این مقاله، بر اساس روش لاگرانژ تعمیم یافته (ALM) است. در روش ALM، روش OPF به یک دنباله از مسائل بهینه سازی مقید با قیود مجاز مطابق معادله (۴۵) تبدیل می شود [۲۷].

$$\begin{aligned} \min_x L^k(x,u) = & f(x,u) + (\lambda^k)^T H(x,u) \\ & + \frac{1}{2} H(x,u)^T [W^k] H(x,u) \\ & + \sum_{j=1}^{ni} \frac{1}{2U_j^k} \{ (\max[\mu_j^k + \mu_j^k G_j(x,u), 0])^2 - (\mu_j^k)^2 \}. \end{aligned} \quad (45)$$

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 تعمیم یافته مبتنی به روش Trust Region استفاده می شود، که ناحیه ای است که تمام قیود مسئله برآورده شده و روشی بر پایه تکرار، جهت سنجش و بهبود عملکرد همگرایی و پیشرفت حل مسئله بهینه سازی است. پارامترهای فوق پس از هر بار حل مسئله بهینه سازی، مطابق روابط (۴۶) تا (۴۹) بروز رسانی می شوند.

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + [W^k] H(x,u)^k \quad (46)$$

$$\mu_j^{k+1} = \max \{ \mu_j^k + U_j^k G_j(x,u)^k, 0 \} \quad (47)$$

مقادیر اجرام با نداشت شایستگی محاسبه شده و جرم گرانشی و جرم اینرسی با رابطه زیر بروز می شوند.

$$M_{ai}=M_{pi}=M_{ji}=M_i, \quad i=1,2,\dots,N, \quad (61)$$

$$M_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{\sum_{j=1}^N (best(t) - worst(t))} \quad (62)$$

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 به صورت معادلات (۶۳) و (۶۴) می باشد:

$$best(t) = \min_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (63)$$

$$worst(t) = \max_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (64)$$

برای نرمال سازی جرم محاسبه شده رابطه (۶۰) به صورت رابطه (۶۵) عمل می کند:

$$M_i(t) = \frac{M_i(t)}{\sum_{j=1}^N M_j(t)} \quad (65)$$

این الگوریتم مانند سایر الگوریتم های فرا ابتکاری هر عامل، یک راه حل کاندید محسوب می شود. الگوریتم جستجوی گرانشی ابتدا تمام عوامل را با مقادیر تصادفی مقداردهی اولیه می کند، از آن پس سرعت و موقعیت همه ی عوامل از روابط (۵۹) و (۶۰) محاسبه می گردد. ثابت های دیگر مانند ثابت گرانش و جرم توسط روابط (۵۵) و (۶۰) محاسبه می شود. شرط پایان پذیری الگوریتم، کوچک تر شدن F_T از یک و سپس تعداد تکرار می باشد.

۴- نتایج شبیه سازی

الگوریتم پیشنهادی مقاله جهت حل OPF در شبکه ۱۴ باسه IEEE استاندارد، با استفاده از بسته کمکی MATPOWER انجام شده است. این ابزار دارای حل مسئله پخش بار، سیستم تست و ... می باشد و برای محققین بسیار مفید فایده است [۲۲]. مشخصات شبکه در مرجع [۲۲] موجود است. روش حل مسئله بهینه سازی بدین شکل است که ابتدا ضرایب W توسط الگوریتم GSA مقداردهی شده، سپس توسط قواعد فازی نرمالیزه شده و پارامترهای تجهیز FACTS انتخاب می شوند (به طور تصادفی با FUZZY-GSA). با قرارگیری تجهیز در مکان تعیین شده، روش OPF با الگوریتم IPOPT حل شده و با حرکت به سمت نقطه بهینه و شرایط توقف الگوریتم، روند ادامه پیدا می کند. شبکه مورد مطالعه 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 پخش بار بهینه برای دستیابی به متغیرهای کنترلی آن و تنظیم بهینه پارامتر تجهیز FACTS در محل مناسب جهت رسیدن به نقطه بهینه می باشد. به منظور بررسی روش پیشنهادی شش حالت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

اول: اجرای OPF بدون حضور تجهیز FACTS

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \times M_{ai}(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} \times (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (54)$$

که در آن M_{ai} جرم گرانشی اکتیو عامل i ام، M_{pi} جرم گرانشی پسیو عامل z ام و $G(t)$ ثابت گرانش در لحظه t می باشد، 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 به صورت روابط (۵۵) و (۵۶) محاسبه می شود.

$$G(t) = G_0 \times \exp(-\alpha \times iter / Max\ iter) \quad (55)$$

$$R_{ij}(t) = \|X_i(t), X_j(t)\|_2 \quad (56)$$

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 وزن دار شده تصادفی از d امین مؤلفه نیروهای اعمال شده از طرف سایر عوامل مطابق (۵۷) است.

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N rand_j F_{ij}^d(t) \quad (57)$$

که $rand_j$ نشان دهنده عددی تصادفی در بازه [۰ و ۱] است. مطابق با قانون حرکت، شتاب عامل i ام در لحظه t و بعد d مطابق رابطه (۵۸) خواهد بود:

$$a_i^d = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \quad (58)$$

در قانون حرکت، شتاب یک عامل به طور مستقیم با نیروی برآیند و به طور معکوس با جرم آن رابطه دارد. در رابطه (۵۹)، d مبین بعد مسئله، t معرف یک زمان خاص و M_i جرم اینرسی عامل i ام است. محاسبه ی موقعیت و سرعت i امین ذره به صورت (۶۰-۵۹) محاسبه می شود:

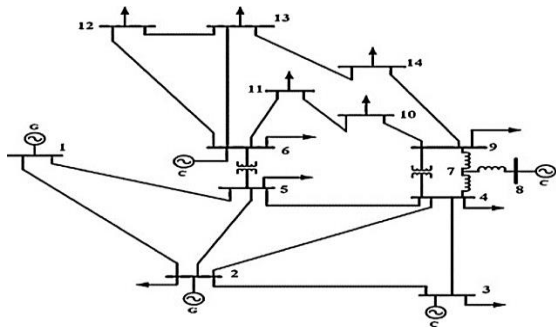
$$V_i^d(t+1) = rand_i \times V_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (59)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + V_i^d(t+1) \quad (60)$$

که $rand_i$ یک عدد تصادفی در بازه [۰ و ۱] است، که برای ایجاد خاصیت تصادفی بودن جستجو، از آن استفاده می شود. از روابط مطرح شده چنین استنباط می شود که سرعت فعلی یک عامل به صورت کسری از آخرین سرعت است که به شتاب آن اضافه می شود. همچنین، موقعیت فعلی یک عامل برابر با آخرین موقعیت خودش می باشد که سرعت کنونی آن اضافه شده است.

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

جاذبه بیشتر را می توان با قانون جاذبه (۵۴) و جنبش آهسته را با قانون حرکت رابطه (۵۸) بیان کرد. با فرض تساوی جرم گرانش و جرم اینرسی،

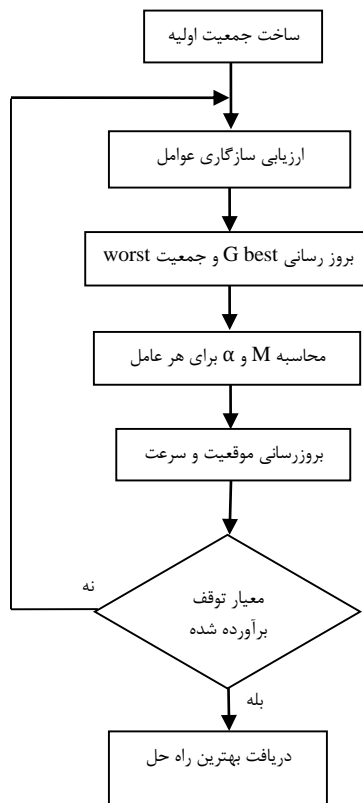


شکل (۳) سیستم ۱۴ باس IEEE

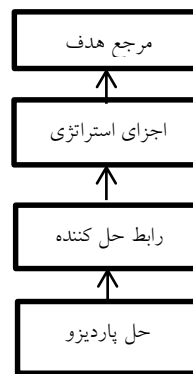
```

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

شکل (۴) الگوریتم IPOPT



شکل (۵) الگوریتم GSA



شکل (۲) فلوچارت الگوریتم IPOPT

پنج حالت بعدی مربوط به حالت اجرای OPF در حضور تجهیز

UPFC می باشد 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- بهینه سازی 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 می گردد. لازم به ذکر است برای حداقل سازی هزینه FACTS، حالت عدم نصب آن است که شبکه هزینه ای برای تجهیز متقبل نمی شود. گرچه هزینه تجهیز FACTS در مطالعه FT مدنظر قرار گرفته و در Total Cost وجود دارد. ابتدا برای تست سیستم، به منظور ارزیابی هر یک از توابع هدف، الگوریتم، به صورت تک هدفه اجرا می شود. تنظیمات مقادیر الگوریتم GSA مطابق با جدول (۱) هست. فلوچارت الگوریتم GSA و IPOPT در اشکال (۵) و (۲) نشان داده شده است. نتایج بررسی برای حالت های مختلف در جدول (۲) بیان شده است. در تمام حالت های تست، بار شبکه ثابت در نظر گرفته شده است. مطالعات مسئله با این فرض است که در بازار نوع اشتراکی هیچ قرارداد دوجانبه ای بین بازیگران منعقد نشده و بهره بردار مستقل سیستم (ISO) بعد از دریافت پیشنهادهای بازیگران، بازار را با در نظر گرفتن امنیت شبکه قدرت تسویه می نماید. در پایان تابع FT به صورت چندهدفه با معرفی فاکتور جریمه به یک مسئله بهینه سازی تک هدفه تبدیل و ارزیابی می شود. برنامه نویسی ALM در شکل (۴) نوشته شده است.

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 قابل توجهی 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 پیدا کرده که رقم افزایش ۱٫۶٪ می‌باشد. پروفیل ولتاژ نیز بهبود یافته و ۰٫۸٪ پروفیل صاف‌تری، داشته است.

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

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	F_1	F_2	F_3	F_4	FT	Q_{loss}	LOCATION	ρ	r	Q_{upfc}	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

تراکم در خطوط به‌طور خاص کاهش پیدا کرده 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 مشخص شده و هزینه کل، کاهش ۳۱٪ داشته است. حالت چهارم هدف از نصب UPFC کاهش تلفات، سیستم است. در این حالت، تلفات ۳۱ درصد کاهش پیدا کرده اما هزینه تولید و تراکم افزایش یافته است. این بدان علت است که برای کاهش تلفات خطوط،

تابع هزینه کل که مدنظر می‌باشد ۳۱٪ کاهش پیدا کرده 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 محاسبه شده 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 پیدا کرده است و خرید از ژنراتورهای ازران تر ممکن شده است. هزینه

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 مورد استفاده، هفت حالت مختلف را در نظر گرفته است. حالت پایه، تجهیز در شبکه وجود ندارد و شش حالت دیگر، در حضور تجهیز UPFC بررسی شده 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 مورد مطالعه 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 بهینه شده است. آزمون چهارم و پنجم نیز حداقل تلفات و حداقل انحراف ولتاژ به دست آمده 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 پناستی، تعریف شده 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] تعیین شده و سپس با استفاده از قواعد فازی مقادیر بهینه می‌شوند. این امر بدین صورت است که قواعد فازی با توجه به درجه اهمیت تابع به سمت بهبود ضرایب، برای تابع هدف برنامه‌ریزی شده‌اند. 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 تعریف شده 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 آن یک 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.

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 استفاده شده‌اند. به همین دلیل تلفات کاهش و هزینه‌ها افزایش یافته اما چون از خطوط حداکثر استفاده شده پروفیل ولتاژ نیز، بهبود یافته 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 تبدیل شده 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 به صورت 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 گنجانده شده است. روش حل بدین صورت 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 بیان شده تضاد اهداف مطرح می‌شود. انتخاب این ضرایب برای جلوگیری از رخ دادن تضاد بین اهداف مشکل است و با آزمون خطا به دست می‌آید. از آنجا که 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 مشخص شده 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 گرفته شده 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 بهینه شده بدون آنکه مانند حالات قبل، اثر منفی روی یکدیگر به‌گذارند. در این حالت هزینه تولید ۴ درصد کاهش داشته و هزینه تجهیز ۱۵,۶۴ دلار در ساعت است. هزینه تراکم ۱۲٪ کاهش پیدا کرده است. تلفات ۳ درصد و پروفیل ولتاژ ۲ درصد بهبود یافته 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

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 December 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”, *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 67-80, 2011.
- [27] H. Wang, C. E. Murillo-Sanchez, 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.
- [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. Esmaceli 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*

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