جایابی بهینه چند هدفه UPFC جهت برنامه‌ریزی بهره‌برداری سیستم‌های قدرت با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب در طبیعت

امیر شیرین زبان[۱]، حسن براتی*[۲]، محمد نصیر[۳]

۱-دانشجوی کارشناسی‌ارشد برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، shirinzabanamir@gmail.com

۲-استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، barati216@gmail.com

۳-گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، moh.nasir220@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۲۳

چکیده: کنترل‌کننده یکپارچه پخش توان (UPFC) از جمله ادوات FACTS است که نقش مهمی در تنظیم و کنترل همزمان توان اکتیو و راکتیو، بهبود بارپذیری سیستم، کاهش تراکم و هزینه تولید ایفا می‌کند. ازاینرو، تعیین مکان بهینه چنین تجهیزاتی در راستای بهبود عملکرد شبکه از اهمیت قابل توجه‌ای برخوردار است. در این مقاله، برای اولین بار از الگوریتم فراابتکاری چرخه آب در طبیعت (WCA) به منظور مکان‌یابی بهینه UPFC استفاده شده است. الگوریتم WCA الهام گرفته از طبیعت بوده و براساس مشاهدات آب و روند چرخه آب و چگونگی تشکیل رودخانه‌ها و نهرها و جریان آنها به سمت دریا در جهان واقعی می‌باشد. این الگوریتم قابلیت بالایی در فرار از بهینه‌های محلی و همچنین سرعت زیادی در رسیدن به بهینه سراسری دارد. برای مدل‌سازی UPFC، از مدل تزریق توان استفاده شده و مسئله OPF-UPFC با توابع هدف مختلفی همچون هزینه سوخت ژنراتورها، تلفات شبکه و بارپذیری سیستم بصورت تک هدفه و چند هدفه حل شده است. همچنین، نتایج حاصل از توابع هدف مختلف با هم و سایر مراجع مقایسه شده است. نتایج حاصله، کارآمدی و سرعت الگوریتم چرخه آب در طبیعت در مقایسه با برخی از الگوریتم‌های هوشمند دیگر را نشان می‌دهد. برنامه کامپیوتری در محیط نرم‌افزاری MATLAB نوشته شده و بروی شبکه ۱۴ شینه IEEE پیاده‌سازی شده است.

کلمات کلیدی: کنترل‌کننده یکپارچه پخش توان، پخش‌بار بهینه، الگوریتم WCA، هزینه سوخت ژنراتورها، تلفات شبکه، بارپذیری سیستم

۱- مقدمه:

در طی چند دهه گذشته تجهیزات کنترلی متعددی تحت عنوان تکنولوژی سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر AC (FACTS) طراحی و تکمیل شده‌اند. تجهیزات FACTS را می‌توان بطور موثری برای کنترل عبور توان، کنترل توان گردشی، تقسیم سیستم بار بین کریدورهای موازی، تنظیم ولتاژ، افزایش پایداری گذرا و تعدیل نوسانات سیستم بکار برد. عبور توان اکتیو و راکتیو در خطوط انتقال از امپدانس خطوط، دامنه ولتاژ و اختلاف زاویه ولتاژ طرفین خطوط تبعیت می‌کنند. در نتیجه میزان و مسیر عبور توان، ناشی از توزیع بار و ساختار شبکه می‌باشد. از طرفی با توجه به محدودیت‌های عبور توان در خطوط ناشی از دو محدودیت عمده حرارتی و پایداری، استفاده کامل از شبکه‌های بهم پیوسته عملی نیست. با توجه به این محدودیت‌ها، نیاز به بهره‌برداری کامل و اقتصادی از تجهیزات منصوبه با حفظ قابلیت اطمینان و نیز امنیت سیستم در مقابل انواع اغتشاشات، مبنای مطالعات، توسعه و نصب ادوات FACTS در دنیا گردید.

از آنجا که ادوات FACTS از جمله UPFC شرایط و امکان کنترل پارامترهای مؤثر بر توان انتقالی در سطح شبکه انتقال را فراهم می‌سازند، استفاده از این ادوات نیز می‌تواند برای مدیریت پرشدگی خطوط توأم با جبران افت ولتاژ باس‌های شبکه و همچنین کاهش تلفات و افزایش بارپذیری سیستم و ظرفیت خطوط انتقال مفید باشد.

در مسئله جایابی بهینه، یک سری تجهیزات در حالت کلی مسئله، از لحاظ مکان قرارگیری، ظرفیت و تنظیم پارامترها، نامعلوم می‌باشد و سعی بر این است که وضعیت تجهیزات جایابی شونده، جهت رسیدن به بهترین وضعیت یک تابع هدف به دست آید. این مسئله در دل خود

[DOR: 20.1001.1.23224468.1398.8.1.5.6] [Downloaded from ijnrs.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

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

یک مسأله پخش بار بهینه دارد. در واقع، در مسائل جایابی ابتدا یک محل برای تجهیز جایابی شونده مشخص می‌شود سپس برای آن حالت یک پخش بار بهینه حل شده و با استفاده از آن مقدار تابع هدف محاسبه می‌گردد.

در خصوص جایابی بهینه ادوات FACTS و بویژه UPFC، از روش‌های بهینه‌سازی مختلفی در منابع گوناگون بهره گرفته شده است.

در مرجع [۱] از برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح (MINLP) در محیط GAMS جهت بهینه‌سازی چند هدفه برای جایابی بهینه کنترل‌کننده‌های FACTS سری-موازی استفاده شده است. عیب این روش پیچیدگی محاسباتی است. اگرچه مرجع [۲] از دو الگوریتم CMAES[1] و NSGA-II[2] جهت جایابی و تعیین اندازه UPFC برای کمینه‌سازی هزینه استفاده نموده است، ولی این روش از زمان محاسبات زیاد نسبت به روش‌های دیگر رنج می‌برد. در این مرجع برای کاهش پیچیدگی محاسبات از مدل ترانسفورماتوری UPFC در اهداف شبیه‌سازی استفاده شده است. سوزانتا و همکاران در [۳] از الگوریتم واکنش شیمیایی ترکیبی مبتنی بر روش واکنش شیمیایی و روش تکامل تفاضلی جهت جایابی UPFC در شبکه انتقال با سه تابع هدف استفاده نموده‌اند. علاوه بر بهبود کیفیت راه‌حل الگوریتم واکنش شیمیایی با ترکیب این دو روش، نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی از روش‌های GA و PSO نیز بهتر است. در [۴] از الگوریتم ایمنی ترکیبی جهت کمینه‌سازی هزینه کل تولید توان اکتیو و راکتیو ژنراتورها و هزینه نصب UPFC استفاده شده است. تحت قیود برابر، الگوریتم ایمنی ترکیبی تابع هدف را بهتر از روش‌های GA، PSO و IA کمینه می‌کند و روش IPSO حداقل هزینه بهتری را نسبت به روش IGA نتیجه می‌دهد. پخش بار بهینه و مدیریت تراکم با استفاده از الگوریتم‌های الگوریتم جستجوی گرانشی و الگوریتم ایمنی جهت جایابی UPFC انجام شده است [۵و۶]. نتایج نشان می‌دهد روش جستجوی گرانشی قابلیت و کیفیت راه‌حل مناسبی در مسائل بهره-برداری و برنامه‌ریزی سیستم قدرت دارد. در [۷] نیز مکان‌یابی بهینه UPFC و سایر ادوات FACTS با روش ازدحام ذرات (PSO) با هدف کمینه‌سازی هزینه نصب و راه‌اندازی ادوات FACTS و به منظور بهبود بارپذیری سیستم انجام گرفته است. مکان‌یابی و تعیین اندازه مناسب ادوات FACTS برای انعطاف‌پذیری بیشتر و استفاده از یک رابط کاربر گرافیکی[3] (GUI) براساس الگوریتم ژنتیک (GA) مطلبی است که در مرجع [۸] انجام پذیرفته است. از الگوریتم ترکیبی کلونی زنبور مصنوعی و جستجوی گرانشی جهت تعیین محل و اندازه بهینه UPFC به منظور بهبود پایداری دینامیکی استفاده شده است. روش ترکیبی پیشنهادی پایداری دینامیکی سیستم را نسبت به روش‌های ABC و GS بهبود داده است [۹]. در [۱۰] جایابی بهینه UPFC با هدف میرایی نوسانات در سیستم قدرت انجام شده است. الگوریتم تکامل تفاضلی یک روش بهینه‌سازی است که از آن جهت جایابی بهینه و تنظیم پارامتر UPFC برای افزایش امنیت سیستم قدرت استفاده شده است [۱۱]. در مرجع [۱۲]، مؤلفان از تکنیک‌های هوش محاسباتی برای یافتن مکان بهینه UPFC و تنظیم پارامترهای آن به منظور افزایش امنیت سیستم قدرت تحت احتمالات تک خطی استفاده نموده‌اند. در [۱۳] از ترکیب منطق فازی[4] و الگوریتم ژنتیک برای جایابی و تعیین اندازه ادوات FACTS موازی استفاده شده است. استفاده از الگوریتم جستجوی ارگانیسم‌های همزیستی یکی از روش-هایی است که از آن برای حل مسأله پخش بار در سیستم قدرت مجهز به ادوات FACTS جهت کمینه‌سازی هزینه سوخت، کمینه‌سازی تلفات توان اکتیو، کاهش انتشار، کمینه‌سازی هزینه‌های اقتصادی و زیست محیطی استفاده شده است [۱۴].

همچنین، در مرجع [۱۵] یک الگوریتم ترکیبی متشکل از الگوریتم کرم شب‌تاب و الگوریتم جستجوی فاخته برای جایابی و تعیین اندازه UPFC به منظور بهبود پایداری دینامیکی سیستم قدرت معرفی شده است. مزیت روش پیشنهادی، قابلیت و استحکام آن در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده است. نتایج، مؤثر بودن روش ارائه شده نسبت به روش‌های ABC-GSA، GSA-BAT و BA-TFF را نشان می‌دهد. در مرجع [۱۶] نیز از یک الگوریتم ترکیبی متشکل از الگوریتم کرم شب‌تاب و الگوریتم ژنتیک برای جایابی و تعیین اندازه UPFC به منظور حل مسئله پخش بار راکتیو در شرایط نامتعادل استفاده است. روش پیشنهادی عملکرد بهتر در توابع هدف چندگانه را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج با نتایج حاصل از بکارگیری روش‌های ژنتیک، کرم شب-تاب و ازدحام ذارت برتری این روش را نشان می‌دهد.

در این مقاله، برای اولین بار جهت جایابی و تعیین اندازه UPFC و کمینه‌سازی توابع هدف هزینه سوخت ژنراتورها، تلفات شبکه و بارپذیری سیستم (به صورت انفرادی و ترکیبی) و در نظر گرفتن هزینه نصب UPFC، از الگوریتم چرخه آب در طبیعت (WCA) استفاده شده است. این الگوریتم قابلیت بالایی در فرار از بهینه‌های محلی و همچنین سرعت زیادی در رسیدن به بهینه سراسری دارد. الگوریتم WCA در نرم‌افزار MATLAB و بر روی شبکه ۱۴ شینه استاندارد IEEE پیاده‌سازی شده و نتایج حاصله با نتایج سایر مراجع مقایسه گردیده است.

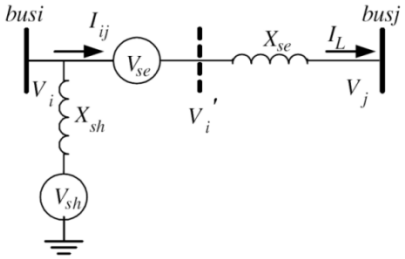
در ادامه سازماندهی مقاله عبارت است از: مدل تزریق توان UPFC در بخش دوم، فرمول‌بندی مسئله OPF با حضور UPFC در بخش سوم، بررسی اجمالی الگوریتم WCA در بخش چهارم، پیاده‌سازی الگوریتم WCA جهت حل مسئله جایابی UPFC در بخش پنجم، نتایج شبیه-سازی و تحلیل آنها در بخش ششم و نتیجه‌گیری در بخش هفتم.

۲- مدل تزریق توان UPFC

UPFC را می‌توان توسط دو منبع ولتاژ سری و موازی و یک راکتانس پراکندگی مطابق شکل (۱) مدل کرد.

[1] Covariance Matrix Adapted Evolution Strategy
[2] Nondominated Sorting Genetic Algorithm
[3] Graphical User Interface
[4] Fuzzy Logic

[DOR: 20.1001.1.23224468.1398.8.1.5.6]
[Downloaded from jnps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Electrical Power [Vol. 8-No. 1- Spring 2019]



شکل (۱): مدل منبع ولتاژ UPFC [۱۷].

در این شکل V_i به عنوان ولتاژ مبنا و $V_i' = V_{SE} + V_i$ گرفته شده همچنین اندازه و زاویه هر دو منبع ولتاژ قابل کنترل هستند. r و γ به ترتیب اندازه (برحسب pu) و زاویه فاز منبع ولتاژ سری هستند که می‌توان مقدار آنها را به وسیله رابطه (۱) در یک محدوده خاص معین کرد [۱۷].

$$0 \le r \le r_{\max}, -\pi \le \gamma \le \pi \quad (۱)$$

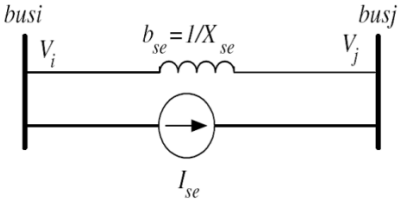
با توجه به اینکه دامنه و فاز ولتاژ V_{se} هر دو قابل کنترل هستند، این ولتاژ می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$V_{se} = rV_i e^{j\gamma} \quad (۲)$$

با جایگزینی منبع ولتاژ با یک منبع جریان به مدل تزریق جریان می‌رسیم، که نتیجه آن در شکل (۲) نشان داده شده است.

$$I_{se} = -b_{se}V_{se} \quad (۳)$$

$$b_{se} = \frac{1}{x_{se}} \quad (۴)$$



شکل (۲): تبدیل منبع ولتاژ به منبع جریان [۱۷].

براساس شکل (۲) روابط توان مختلط در شین‌های i و j عبارتند از:

$$S_{is} = V_i(-I_{se})^* \quad (۵)$$

$$S_{js} = V_j(I_{se}) \quad (۶)$$

بعد از ساده‌سازی توان‌های تزریقی S_{is} و S_{js} داریم:

توان‌های تزریقی اکتیو و راکتیو ناشی از منبع ولتاژ سری در شین i عبارتند از:

$$S_{is} = -rb_{se}V_i^2 \sin\gamma - jrb_{se}V_i^2 \cos\gamma \quad (۷)$$

$$S_{is} = P_{is} + jQ_{is} \quad (۸)$$

$$P_{is} = -rb_{se}V_i^2 \sin\gamma \quad (۹)$$

$$Q_{is} = -rb_{se}V_i^2 \cos\gamma \quad (۱۰)$$

توان‌های تزریقی اکتیو و راکتیو ناشی از منبع ولتاژ سری در شین j عبارتند از:

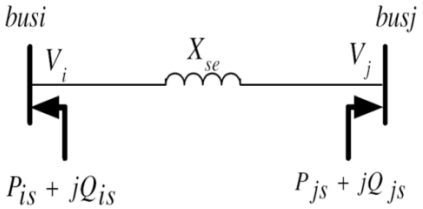
$$S_{js} = V_iV_jb_{se}r\sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) + jV_iV_jb_{se}r\cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (۱۱)$$

$$S_{js} = P_{js} + jQ_{js} \quad (۱۲)$$

$$P_{js} = V_iV_jb_{se}r\sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (۱۳)$$

$$Q_{js} = V_iV_jb_{se}r\cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (۱۴)$$

بر اساس روابط فوق مدل تزریق توان مبدل سری به صورت نشان داده شده در شکل (۳) می‌باشد.



شکل (۳): مدل تزریق توان مبدل سری [۱۷].

در UPFC، شاخه موازی به منظور دو هدف، تامین توان حقیقی سری (P_{series}) و تامین تلفات داخل UPFC بکار می‌رود. کل تلفات سوییچینگ دو مبدل در حدود ۰٫۲ توان انتقالی UPFC در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس، توان حقیقی منبع ولتاژ موازی برابر با ۱/۰۲ توان حقیقی مبدل سری است به عبارتی [۱۷]:

$$P_{shunt} = -1.02P_{series} \quad (۱۵)$$

از طرفی توان ظاهری مبدل سری طبق رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$S_{series} = V_{se}I_{ij}^* = re^{j\gamma}V_i\left(\frac{V_i' - V_j}{jX_{se}}\right)^* \quad (۱۶)$$

بعد از ساده‌سازی، توان اکتیو و راکتیو مبدل سری را با توجه به رابطه بالا می‌توان به فرم زیر استخراج کرد:

$$S_{series} = P_{series} + jQ_{series} \quad (۱۷)$$

$$P_{series} = rb_{se}V_iV_j\sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) - rb_{se}V_i^2\sin\gamma \quad (۱۸)$$

$$Q_{series} = -rb_{se}V_iV_j\cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) + rb_{se}V_i^2\cos\gamma + r^2b_{se}V_i^2 \quad (۱۹)$$

توان راکتیو مبادله شده توسط مبدل موازی، می‌تواند به صورت جداگانه کنترل شود، لذا به صورت یک منبع توان راکتیو مستقل و موازی مدل‌سازی می‌شود. ولی در حال حاضر توان راکتیو این مبدل صفر فرض می‌شود.

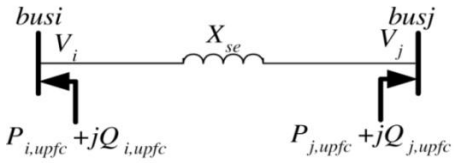
در نهایت مدل تزریق توان UPFC با اضافه کردن P_{shunt} در شین i بدست می‌آید. این مدل همانند آن‌چه در شکل (۴) نشان داده شده می‌باشد، که در آن روابط زیر حاکم است:

$$P_{i,UPFC} = 0.02rb_{se}V_i^2\sin\gamma - 1.02rb_{se}V_iV_j\sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (۲۰)$$

$$P_{j,UPFC} = rb_{se}V_iV_j\sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (۲۱)$$

$$Q_{i,UPFC} = -rb_{se}V_i^2\cos\gamma \quad (۲۲)$$

$$Q_{j,UPFC} = rb_{se}V_iV_j\cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (۲۳)$$



شکل (۴): مدل تزریق توان UPFC [۱۷].

[DOR: 20.1001.1.23224468.1398.8.1.5.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power [Vol. 8-No. 1- Spring 2019]
[Downloaded from ijnps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

۳- فرمول‌بندی مسئله OPF با حضور UPFC

هدف از OPF با حضور UPFC، بهینه‌سازی انفرادی و ترکیبی توابع هدف شامل هزینه سوخت ژنراتورها، تلفات شبکه و بارپذیری در سیستم قدرت با در نظرگرفتن قیود بهره برداری و امنیت و نیز هزینه نصب UPFC می‌باشد.

۳-۱- تابع هزینه سوخت ژنراتورها

حداقل نمودن این تابع هدف به معنی تعیین توان‌های تولیدی هر واحد نیروگاهی در شبکه است به گونه‌ای که حداقل هزینه کل بدست آید. این تابع به فرم رابطه (۲-۳۳) نشان داده می‌شود [۱۸]:

$$F_1 = \sum_{i=1}^{NG} C_i(P_{Gi}) = \sum_{i=1}^{NG} a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (\$/h) \qquad (۲۴)$$

که در آن P_{Gi} توان خروجی ژنراتور iام برحسب MW، a_i، b_i و c_i نیز ضرائب ثابت مربوط به واحد نیروگاهی iام می‌باشند.

۳-۲- تابع تلفات توان اکتیو شبکه

حداقل نمودن مجموع تلفات توان اکتیو در شبکه بدین معنی است که تولید واحدهای نیروگاهی و توان عبوری از خطوط به گونه ای تنظیم شوند که حداقل تلفات در شبکه بدست آید [۱۹]:

$$F_2 = P_{LOSS}(x,u) = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} V_i . V_j . Y_{ij} . cos(\alpha_{ij} + \theta_j - \theta_i) \qquad (۲۵)$$

V_i اندازه ولتاژ شین iام، Y_{ij} اندازه درایه ij ماتریس ادمیتانس شبکه (Y_{BUS})، θ_i زاویه ولتاژ شین iام، و α_{ij} زاویه درایه ij ماتریس ادمیتانس شبکه (Y_{BUS}) می باشد.

۳-۳- شاخص بارپذیری شبکه

هدف از ماکزیمم نمودن بارپذیری در شبکه، استفاده مؤثر از ظرفیت خالی خطوط به منظور افزایش انتقال توان است و به صورت رابطه (۲۶) بیان می‌شود. در این رابطه ρ می‌تواند با ضریب ثابت برای هر بار در معادلات تعادل توان اکتیو و راکتیو ((۲۷) و (۲۸)) بدست آید [۲۰].

$$F_3 = \rho(x,u) \qquad (۲۶)$$

$$P_{Gi} - \rho P_{Di} = f_{Pi}(x,u) \qquad (۲۷)$$

$$Q_{Gi} - \rho Q_{Di} = f_{Qi}(x,u) \qquad (۲۸)$$

P_{Gi} و Q_{Gi} بردارهای توان اکتیو و راکتیو ژنراتور iام، P_{Di} و Q_{Di} بردارهای توان اکتیو و راکتیو بار شین iام، $f_{pi}(x,u)$ و $f_{Qi}(x,u)$ بردارهای پخش بار اکتیو و راکتیو در شین iام می‌باشند.

۳-۴- هزینه سرمایه‌گذاری عنصر UPFC

هزینه سرمایه‌گذاری ادوات FACTS به شکل زیر بیان می‌شود:

$$F_4 = \frac{C_{FACTS} \times 1000 \times S}{8760 \times 5} \quad (\$/h) \qquad (۲۹)$$

که C_{FACTS} تابع هزینه FACTS مربوطه و S ظرفیت ادوات FACTS برحسب MVA می‌باشد که تابع هزینه UPFC بر مبنای پایگاه اطلاعاتی شرکت زیمنس به صورت معادله (۳۰) می‌باشد [۲۱و۲۲]:

$$C_{\mathrm{UPFC}} = 0.0003S^2 - 0.2691S + 188.22 \quad (US\$/\mathrm{KVA}) \qquad (۳۰)$$

برای مدت سرمایه‌گذاری در مورد UPFC در مراجع مختلف مدت ۳، ۵ و یا ۱۰ ساله انتخاب شده است. در این مقاله یک دوره ۵ ساله سرمایه‌گذاری در نظر گرفته شده است.

۳-۵- قیود و محدودیت‌های مسأله

۳-۵-۱- قیود تساوی (معادلات پخش بار)

معادلات پخش بار بدون حضور UPFC عبارتند از [۱۷]:

$$(P_{Gi} = P_{Di} + \sum_{j=1}^{NB} V_i V_j Y_{ij} cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \ \ \forall i,j \in NB \qquad (۳۱)$$

$$Q_{Gi} = Q_{Di} + \sum_{j=1}^{NB} V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \ \ \forall i,j \in NB \qquad (۳۲)$$

NB تعداد شین‌های سیستم، P_{Gi} و Q_{Gi} توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی در شین iام، Q_{Di} و P_{Di} توان‌های اکتیو و راکتیو تقاضا شده در شین iام، V_{i} , δ_{j} دامنه و زاویه فاز ولتاژ شین شین iام، δ_{j} و V_{j} دامنه و زاویه فاز ولتاژ شین jام.

معادلات پخش بار با حضور UPFC عبارتند زا:

$$P_{\mathrm{Gi}} + \mathrm{P_{UPFC}} = P_{\mathrm{Di}} + \sum_{\mathrm{j=1}}^{\mathrm{NB}} \mathrm{V_i V_j Y_{ij}} \cos(\theta_{\mathrm{ij}} + \delta_{\mathrm{j}} - \delta_{\mathrm{i}}) \ \forall \mathrm{i,j} \in \mathrm{NB} \qquad (۳۳)$$

$$Q_{Gi} + Q_{UPFC} = Q_{Di} + \sum_{j=1}^{NB} V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \ \forall i,j \in NB \qquad (۳۴)$$

که در این روابط $\mathrm{Q_{UPFC}}$ و P_{UPFC} توان‌های تزریقی می‌باشند که با در نظر گرفتن اندیس‌های j و i (شماره شین‌های ابتدایی و انتهایی) به طرز صحیحی به معادلات تعادل توان اضافه می‌گردند.

۳-۵-۲- قیود نامساوی (قیود بهره‌برداری)

حدود مجاز تولید: توان اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتورها توسط حدود بالا و پایین آن بصورت زیر محدود می‌شود:

$$P_{\mathrm{Gi}}^{\min} \le P_{Gi} \le P_{Gi}^{max} \qquad (۳۵)$$

$$Q_{\mathrm{Gi}}^{\min} \le Q_{Gi} \le \mathrm{Q_{Gi}^{max}} \qquad (۳۶)$$

حدود مجاز انتقال: حد مجاز عبور توان برحسب MVA در خط انتقال به صورت زیر است:

$$|S_{ij}| \le \mathrm{S_{ij}^{max}} \qquad (۳۷)$$

حدود مجاز ولتاژ: محدوده مجاز ولتاژ در هر شین به صورت زیر است.

$$V_{\mathrm{i}}^{\min} \le \mathrm{V_i} \le \mathrm{V_i^{max}} \qquad (۳۸)$$

حداکثر توان تزریقی FACTS: محدوده توانی که توسط عنصر FACTS به شبکه تزریق می‌شود:

$$|S_{FACTS}| \le \mathrm{S_{FACTS}^{max}} \qquad (۳۹)$$

۳-۵-۳- قیود عنصر UPFC

حدود مجاز UPFC شامل اندازه و زاویه ولتاژ تزریقی سری عبارتند از:

$$r^{\min} \le r \le r^{max} \qquad (۴۰)$$

$$\gamma^{min} \le \gamma \le \gamma^{max} \qquad (۴۱)$$

۳-۶- روش وزن‌دهی

یکی از روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه روش وزن‌دهی است که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، همه هدف‌ها

[DOR: 20.1001.1.23224468.1398.8.1.5.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power [Downloaded from jnps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Vol. 8-No. 1- Spring 2019

توسط بردار وزنی به یک هدف به صورت معادله زیر تبدیل می‌شوند [۱]:

$$\begin{matrix}\text{Min } f(x) = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) + \cdots + w_k f_k(x), \\ \sum_{i=1}^{k} w_i = 1\end{matrix} \quad (۴۲)$$

۴- بررسی اجمالی الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب در طبیعت

این الگوریتم از رفتار چرخه آب در طبیعت الهام گرفته شده است. آب به شکل جویبارها و رودخانه‌ها از بلندی‌های کوه‌ها به سمت دریاها حرکت می‌کند. آب رودخانه و دریاچه‌ها هنگامی که گیاهان در طی فرآیند تبخیر، آب را پس می‌دهند، بخار می‌گردد و هنگامی که در اتمسفر بالا می‌رود، ابرها تشکیل می‌گردند. ابرها پس از سرد شدن در اتمسفر متراکم شده، و آب را به شکل باران بازپس می‌دهند. جمعیت اولیه قطرات باران نامیده می‌شود. بهترین قطرات باران به صورت دریا، تعدادی از قطرات خوب به عنوان رودخانه و باقی به صورت جویبارهایی که به رودخانه‌ها یا مستقیماً به دریا می‌ریزند انتخاب می‌شوند [۲۳].

۴-۱- ایجاد جمعیت اولیه

جمعیت اولیه برای یک مسئله N بعدی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\text{قطره باران} = [X_1 . X_2 . \ldots . X_N] \quad (۴۳)$$

با N_{pop} قطره، ماتریس قطرات باران به صورت زیر بسط داده می‌شود:

$$\text{جمعیت قطرات باران} = \begin{bmatrix} \text{raindrops}_1 \\ \text{raindrops}_2 \\ \text{raindrops}_3 \\ \vdots \\ \text{raindrops}_{\text{N}_{\text{pop}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{x}_1^1 & \text{x}_2^1 & \text{x}_3^1 & \cdots & \text{x}_{\text{N}_{\text{var}}}^1 \\ \text{x}_1^2 & \text{x}_2^2 & \text{x}_3^2 & \cdots & \text{x}_{\text{N}_{\text{var}}}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{x}_1^{\text{N}_{\text{pop}}} & \text{x}_2^{\text{N}_{\text{pop}}} & \text{x}_3^{\text{N}_{\text{pop}}} & \cdots & \text{x}_{\text{N}_{\text{var}}}^{\text{N}_{\text{pop}}} \end{bmatrix} \quad (۴۴)$$

که N_{pop} تعداد قطرات باران و N_{var} تعداد متغیرها است. برازندگی یا ارزش هر سطر با استفاده از تابع هزینه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{matrix} C_i = Cost_i = f(X_1^i . X_2^i . \ldots . X_{N_{var}}^i), \\ i = 1,2, \ldots, N_{\text{pop}} \end{matrix} \quad (۴۵)$$

پس از تشکیل N_{pop} قطره، تعداد N_{sr} تا از بهترین آنها به عنوان رودخانه و دریا انتخاب می‌شوند. قطره با بهترین مقدار تابع، به عنوان دریا انتخاب شده و بقیه قطره‌ها به عنوان جویبارهایی که ممکن است به رودخانه یا مستقیماً به دریا بریزند، انتخاب می‌گردند.

$$N_{\text{sr}} = \text{Number of Rivers} + 1(\text{sea}) \quad (۴۶)$$

$$N_{\text{raindrops}} = N_{\text{pop}} + N_{\text{sr}} \quad (۴۷)$$

بسته به شدت جریان آب، که از معادله زیر محاسبه می‌گردد، تعداد جویبارهایی که به رودخانه‌ها و دریا می‌ریزند محاسبه می‌شود:

$$\begin{matrix} NS_n = round\left\{\left|\frac{cost_n}{\sum_{i=1}^{N_{sr}} cost_i}\right| \times N_{raindrops}\right\} , \\ n = 1, 2, \ldots, N_{\text{sr}} \end{matrix} \quad (۴۸)$$

که در این رابطه، NS_n تعداد جویبارها است، که به رودخانه یا دریای معینی می‌ریزد.

۴-۲- چگونگی جاری شدن جویبارها به دریا یا رودخانه

در حالت کلی همه رودخانه‌ها و جویبارها در نهایت به دریا ختم می‌شوند (بهترین نقطه بهینه). حرکت یک جویبار به سمت یک رودخانه در امتداد خطوط ارتباطی بین آنها، توسط یک مسافت انتخابی تصادفی و به صورت زیر اعمال می‌گردد:

$$X \in (0, C \times d), \quad C > 1 \quad (۴۹)$$

که C یک مقدار تعریف شده توسط کاربر و بین ۱ و ۲، d مسافت حاضر بین رودخانه و جویبار، و X عددی بین صفر و $C \times d$ است. مکان جدید جویبارها و رودخانه‌ها با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$X_{\text{stream}}^{i+1} = X_{\text{stream}}^{i} + rand \times C \times \left(X_{\text{river}}^{i} - X_{\text{stream}}^{i}\right) \quad (۵۰)$$

$$X_{\text{stream}}^{i+1} = X_{\text{stream}}^{i} + rand \times C \times (X_{\text{sea}}^{i} - X_{\text{stream}}^{i}) \quad (۵۱)$$

$$X_{\text{river}}^{i+1} = X_{\text{river}}^{i} + rand \times C \times (X_{\text{sea}}^{i} - X_{\text{river}}^{i}) \quad (۵۲)$$

که $rand$ یک عدد تصادفی توزیعی بین صفر و یک است.

۴-۳- شرایط تبخیر

این فرآیند نقش مهمی برای جلوگیری از گیر افتادن در بهینه محلی و همگرایی سریع دارد. در این پروسه، جویبارهای جدید حاصل از تبخیر آب دریا یا رودخانه به صورت معادلات زیر تشکیل می‌شوند:

$$\left|X_{sea}^{i} - X_{river}^{i}\right| < d_{max} \qquad i = 1, 2, \ldots, (N_{\text{sr}} - 1) \quad (۵۳)$$

$$\left|X_{stream}^{i} - X_{sea}^{i}\right| < d_{max} \quad (۵۴)$$

که d_{max} نزدیک به صفر، و عمق جستجوی نزدیک دریا را نشان می‌دهد.

$$d_{max}^{i+1} = d_{max}^{i} - \frac{d_{max}^{i}}{\text{max iteration}} \quad (۵۵)$$

۴-۴- فرآیند بارش

در این فرآیند قطره‌های باران به‌عنوان جویبارهای جدیدی که به رودخانه یا مستقیماً به دریا می‌ریزند، بصورت زیر در نظر گرفته می‌شوند.

$$X_{\text{stream}}^{\text{new}} = LB + rand \times (UB - LB) \quad (۵۶)$$

و برای جویبارهایی که مستقیماً به دریا می‌ریزند، داریم:

$$X_{stream}^{new} = X_{sea} + \sqrt{U} \times rand(1.N_{\text{var}}) \quad (۵۷)$$

که در این رابطه U مفهوم واریانس را بیان می‌کند.

۴-۵-گام به گام الگوریتم چرخه آب در طبیعت

مراحل الگوریتم WCA به شرح زیر خلاصه شده است [۲۳]:

گام ۱: پارامترهای اولیه WCA شامل N_{pop} (جمعیت اولیه)، N_{sr}

[DOR: 20.1001.1.23224468.1398.8.1.5.6]
[Downloaded from ijnps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

(تعداد رودخانه و دریا)، N_{var} (تعداد متغیرها)، UB و LB (ماکزیمم و مینیمم تولید متغیرها) و حداکثر تکرار را انتخاب کنید.

گام ۲: جمعیت اولیه را بصورت تصادفی و با استفاده از ماتریس زیر و با آرایه‌های تصادفی [R] و به شکل جویبارهای اولیه تعیین کنید.

$$\left[\mathrm{Firstpop}^{i}\right] = [LB] + [\mathrm{R}]_{1\times 1} \times [UB - LB], \quad \mathrm{i} = 1, 2, \dots, N_{\mathrm{pop}} \tag{۵۸}$$

گام ۳: هزینه هر قطره را با استفاده از معادله (۴۵) محاسبه کنید.

گام ۴: درایه با بهترین مقدار برازندگی را به عنوان دریا انتخاب نمائید. سپس با استفاده از معادلات (۴۶) و (۴۷) از بهترین درایه‌ها رودخانه انتخاب کرده، و باقی را به عنوان جویبار انتخاب نمائید.

گام ۵: بسته به شدت جریان آب، تعداد جویبارهایی که به رودخانه و یا دریا می‌ریزند را با استفاده از معادله (۴۸) محاسبه کنید.

گام ۶: در این مرحله جویبارهای مرحله قبل، طبق معادلات (۵۰) و (۵۱) به رودخانه‌ها و یا دریا ریخته و جویبارهای جدیدی را تشکیل می‌دهند. در این حالت اگر جویباری با برازندگی بهتر از رودخانه و یا دریا ایجاد شود، جای رودخانه و یا دریا با جویبار را عوض نمائید.

گام ۷: مطابق معادله (۵۲) رودخانه‌ها به دریا ریخته و رودخانه‌های جدیدی را شکل می‌دهند. در این حالت اگر رودخانه‌ای با برازندگی بهتر از دریا ایجاد شد، جای رودخانه با دریا را عوض نمائید.

گام ۸: با استفاده از معادلات (۵۳) و (۵۴)، جویبارها و رودخانه‌هایی که در آنها تبخیر اتفاق می‌افتد را تعیین کنید.

گام ۹: در صورت برقرار بودن شرط تبخیر، بارش باران و تشکیل قطرات جدید با استفاده از معادلات (۵۶) و (۵۷) رخ خواهد داد.

گام ۱۰: با برقرار نبودن شرط تبخیر، d_{max} را با استفاده از معادله (۵۵) کاهش دهید.

گام ۱۱: شرایط توقف الگوریتم را بررسی نمائید. در صورت برقراری شرایط توقف، الگوریتم متوقف می‌شود، و در غیراینصورت به گام ۲ باز گردید.

فلوچارت الگوریتم چرخه آب در طبیعت (WCA) در شکل (۵) نشان داده شده است.

۵- پیاده‌سازی الگوریتم WCA جهت حل مسئله جایابی UPFC

در WCA، رودخانه‌ها به عنوان نقطه هدایت برای راهنمایی دیگر افراد به سمت موقعیت‌های بهتر، علاوه بر به حداقل رساندن و یا جلوگیری از جستجو در مناطق نامناسب، در راه‌حل‌های نزدیک به بهینه عمل می‌کنند. علاوه بر این، رودخانه‌ها به سمت دریا (بهترین راه‌حل) حرکت می‌کنند. این روش (حرکت جویبارها به رودخانه‌ها و سپس حرکت رودخانه‌ها به دریا) منجر به حرکت به سمت بهترین راه‌حل می‌شود. روندنمای حل مساله OPF با حضور UPFC با الگوریتم WCA در شکل (۶) نشان داده شده است.

۶- نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری و تحلیل آنها

در این بخش، با پیاده‌سازی الگوریتم در محیط MATLAB به تحلیل نتایج شبیه‌سازی بر روی سیستم ۱۴شینه IEEE پرداخته شده است. شبکه ۱۴ شینه دارای ۵ ژنراتور در شین‌های ۱، ۲، ۳، ۶، ۸ و همچنین ۲۰ خط انتقال می‌باشد. در این مقاله، هفت حالت مختلف از ترکیب توابع هدف جهت بهینه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرند که عبارتند از: ۱- پخش‌بار بهینه تک هدفه شامل هزینه سوخت ژنراتورها (F1)، تلفات توان اکتیو شبکه (F2)، و بارپذیری سیستم (F3)، و ۲- پخش‌بار بهینه چند هدفه شامل هزینه سوخت ژنراتورها و تلفات توان اکتیو شبکه (F1وF2)، هزینه سوخت ژنراتورها و بارپذیری سیستم (F1وF3)، تلفات توان اکتیو شبکه و بارپذیری سیستم (F2وF3)، هزینه سوخت ژنراتورها و تلفات توان اکتیو شبکه و بارپذیری سیستم (F1وF2وF3).

UPFC قابلیت نصب بر روی خطوط انتقال دارای ترانسفورماتور را ندارد و مکان‌یابی محل نصب UPFC می‌بایست با در نظر گرفتن قیود بهره‌برداری و امنیت جهت دستیابی به بهترین حالت برای هر یک از توابع هدف فوق صورت پذیرد. در این مقاله، جهت بررسی مسأله توجیه اقتصادی نصب UPFC در شبکه، تابع هزینه آن در نظر گرفته شده است و پس از انجام پخش بار بهینه با هر یک از هفت حالت فوق، هزینه نصب UPFC محاسبه و نشان داده می‌شود. همچنین، در هر حالت و تابع هدف معین، مسئله پخش بار بهینه با و بدون حضور UPFC با روش WCA حل شده است.

در جداول (۱) و (۲)، اطلاعات اولیه و پارامترهای ورودی الگوریتم و در جدول (۳) ضرایب وزن‌دهی توابع چند هدفه آمده است.

نتایج بهینه‌سازی تک هدفه در جدول (۴) آمده است. نتایج شامل مقادیر توابع هدف و مشخصات مربوط به UPFC شامل هزینه سرمایه-گذاری، توان، تنظیمات بهینه و مکان بهینه و زمان محاسبات الگوریتم است. با توجه به جدول با حضور و تنظیم بهینه UPFC مقادیر توابع هدف انفرادی، بهبود یافته‌اند. همچنین، زمان محاسبات در تمام حالات کمتر از ۱۰ ثانیه و بارپذیری سیستم در حالت سوم با حضور UPFC به ۱/۷۰۳ افزایش یافته است.

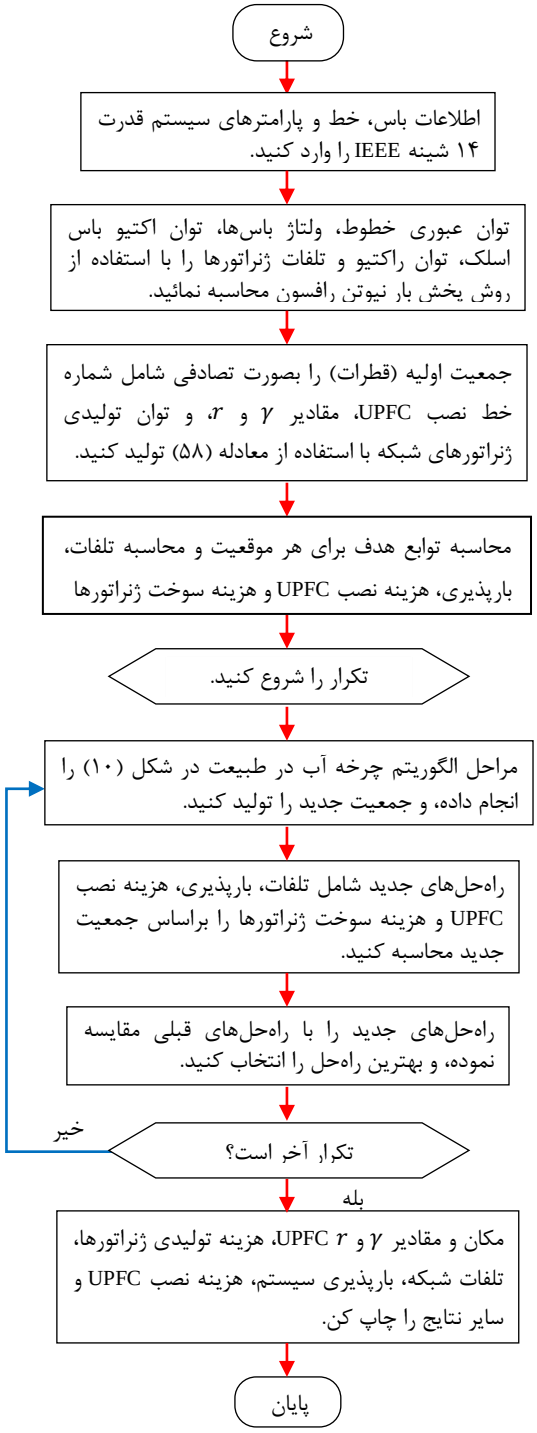
جدول (۱): پارامترهای اولیه الگوریتم WCA

پارامتر	مقدار
nvars	۸
Npop	۱۵
Nsr	۴
dmax	۳
max_it	۱۵۰

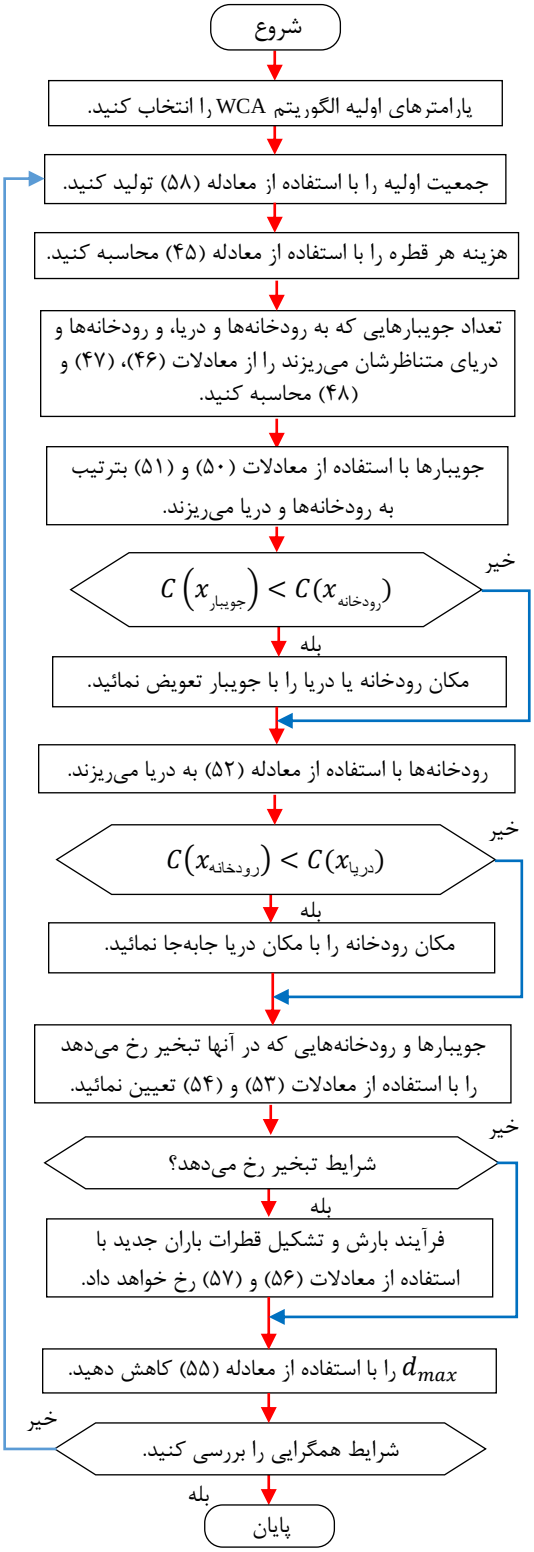
جدول (۲): پارامترهای ورودی (متغیرها) الگوریتم WCA

متغیرهای الگوریتم	پارامترهای معادل
متغیر اول	شماره خط انتقال
متغیر دوم	r
متغیر سوم	γ
متغیر چهارم	P1(توان اکتیو ژنراتور۱)
متغیر پنجم	P2(توان اکتیو ژنراتور۲)
متغیر ششم	P3(توان اکتیو ژنراتور۳)
متغیر هفتم	P4(توان اکتیو ژنراتور۴)
متغیر هشتم	P5(توان اکتیو ژنراتور۵)

[DOR: 20.1001.1.23224468.1398.8.1.5.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power [Downloaded from ijnsdezful.iau.ir on 2026-11-13]
Vol. 8-No. 1- Spring 2019



شکل (۶): روندنمای حل مساله OPF-UPFC با الگوریتم WCA.



شکل (۵): فلوچارت الگوریتم چرخه آب در طبیعت [۱۵]

[DOR: 20.1001.1.23224468.1398.8.1.5.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power [Downloaded from jnps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Vol. 8-No. 1- Spring 2019

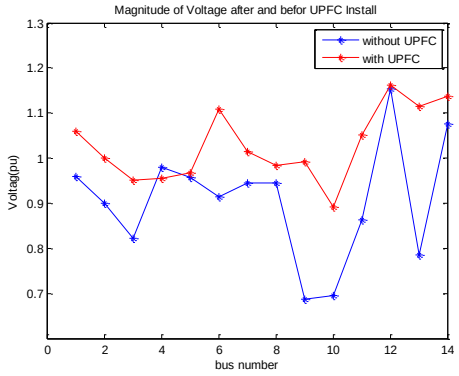
جدول (۳): ضرایب وزن‌دهی توابع چند هدفه

توابع هدف	ضرایب وزن‌دهی
هزینه سوخت ژنراتورها و تلفات توان اکتیو شبکه(F1 و F2)	$W1 = ۰/۰۰۰۴, W2 = ۰/۹۹۹۶$
هزینه سوخت ژنراتورها و بارپذیری سیستم (F1 و F3)	$W1 = ۰/۰۰۰۴, W2 = ۰/۹۹۹۶$
تلفات توان اکتیو شبکه و بارپذیری سیستم (F2 و F3)	$W1 = ۰/۵, W2 = ۰/۵$
هزینه سوخت ژنراتورها و تلفات توان اکتیو شبکه و بارپذیری سیستم (F1وF3وF2)	$W1 = ۰/۰۰۰۴, W2 = ۰/۷۹۹۶, W3 = ۰/۲$

جدول (۴): نتایج بهینه‌سازی تک هدفه برای سیستم قدرت ۱۴ شینه IEEE

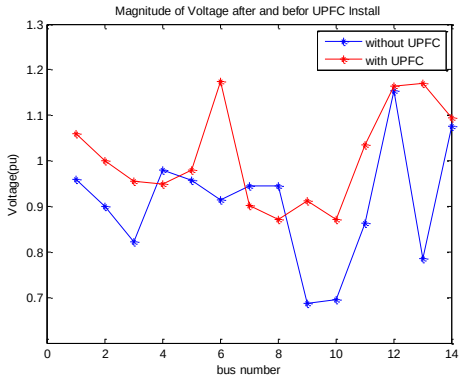
تابع هدف	پارامتر	قبل از نصب UPFC	بعد از نصب UPFC
هزینه سوخت ژنراتورها (F1)	هزینه سوخت ژنراتورها $\left(\frac{\$}{h}\right)$	۷۰۲۸/۰۰۴	۷۰۲۸/۰۰۴
	تلفات توان اکتیو (MW)	۱/۲۰۸	۱/۱۲۴
	بارپذیری سیستم	۰/۱۶۵	۰/۱۳۳
	هزینه سرمایه‌گذاری UPFC $\left(\frac{\$}{h}\right)$	-	۲۰۶/۳۱
	توان UPFC (MVA)	-	۱۱۰/۰۱۶
	تنظیمات بهینه UPFC	-	$r = ۰/۰۰۷ , \gamma = ۰/۹۱^{\circ}$
	مکان بهینه UPFC (شین- شین)	-	۲-۱
	زمان محاسبات الگوریتم (S)	۵/۳۱۴	۸/۲۱۲
تلفات توان اکتیو شبکه (F2)	هزینه سوخت ژنراتورها $\left(\frac{\$}{h}\right)$	۱۰۵۰۵/۸۱۹	۹۰۳۴/۷۰۷
	تلفات توان اکتیو (MW)	۰/۶۶۲	۰/۶۵۲
	بارپذیری سیستم	۰/۵۶۵	۰/۳۹۴
	هزینه سرمایه‌گذاری UPFC $\left(\frac{\$}{h}\right)$	-	۱۴۷/۲۷۲
	توان UPFC (MVA)	-	۱۰۴/۱۵۶
	تنظیمات بهینه UPFC	-	$r = ۰/۱۳ , \gamma = ۰/۵۹۱^{\circ}$
	مکان بهینه UPFC (شین- شین)	-	۲-۴
	زمان محاسبات الگوریتم (S)	۵/۴۰۳	۸/۳۶۱
بارپذیری سیستم (F3)	هزینه سوخت ژنراتورها $\left(\frac{\$}{h}\right)$	۲۰۲۸۷/۶۰۵	۲۰۴۶۶/۲۹۰
	تلفات توان اکتیو (MW)	۱/۱۹۴	۱/۲۴۱
	بارپذیری سیستم	۱/۶۸۸	۱/۷۰۳
	هزینه سرمایه‌گذاری UPFC $\left(\frac{\$}{h}\right)$	-	۱۲۶/۷۲۸
	توان UPFC (MVA)	-	۹۱/۱۴۰
	تنظیمات بهینه UPFC	-	$r = ۰/۷۷۷ , \gamma = -۲۷/۷۸۸^{\circ}$
	مکان بهینه UPFC (شین- شین)	-	۹-۷
	زمان محاسبات الگوریتم (S)	۸/۲۶۸	۸/۴۶۹

به منظور امکان مشاهده تاثیر نصب UPFC در شبکه نمونه، در شکل (۷) نمودار اندازه ولتاژ شین‌ها قبل و بعد از نصب UPFC در حالت تابع (F1) ارائه شده است.



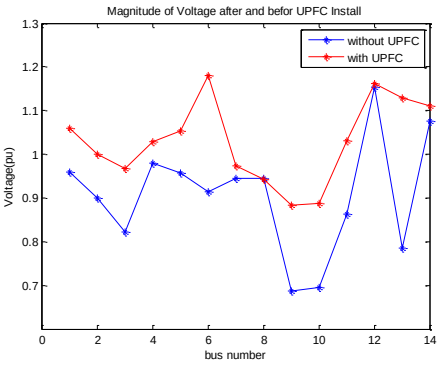
شکل (۷): نمودار اندازه ولتاژ شین‌های سیستم مورد مطالعه قبل و بعد از نصب UPFC در حالت تابع (F1)

همچنین، در شکل‌های (۸) و (۹) نمودار اندازه ولتاژ شین‌ها بر حسب پریونیت قبل و بعد از نصب UPFC در حالت توابع (F2) و (F3) ارائه شده است.

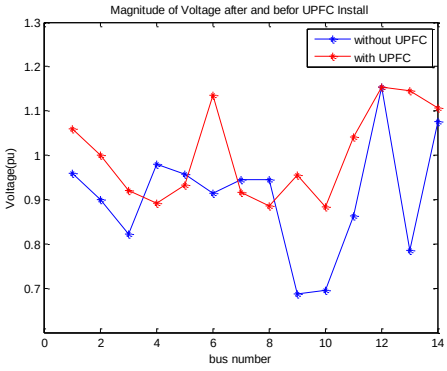


شکل (۸): نمودار اندازه ولتاژ شین‌های سیستم مورد مطالعه قبل و بعد از نصب UPFC در حالت حالت تابع (F2)

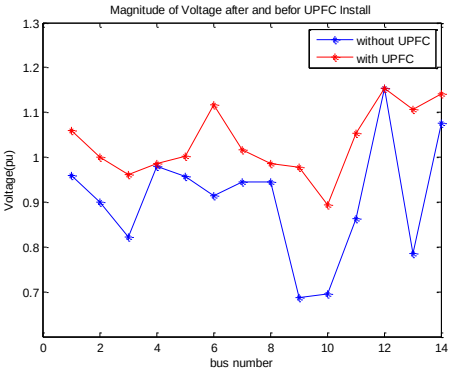
[DOR: 20.1001.1.23224468.1398.8.1.5.6]
[Downloaded from ijnrs.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Electrical Power Vol. 8-No.1- Spring 2019



شکل (۹): نمودار اندازه ولتاژ شین‌های سیستم مورد مطالعه قبل و بعد از نصب UPFC در حالت تابع (F3)



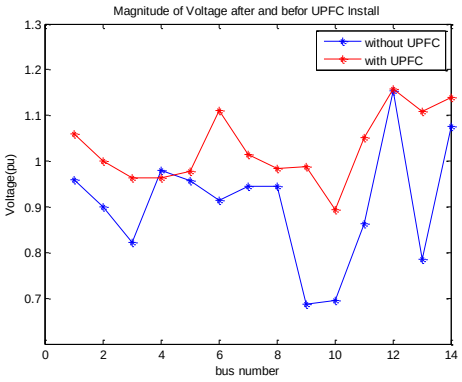
شکل (۱۰): نمودار اندازه ولتاژ شین‌های سیستم مورد مطالعه قبل و بعد از نصب UPFC در حالت توابع (F1 وF2)



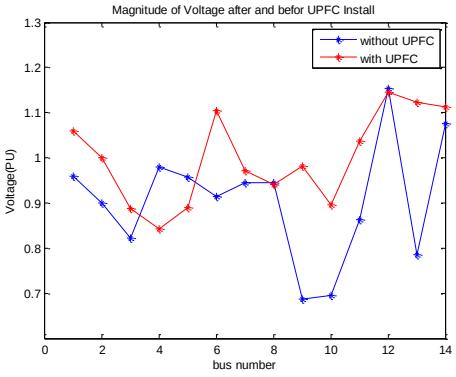
شکل (۱۱): نمودار اندازه ولتاژ شین‌های سیستم مورد مطالعه قبل و بعد از نصب UPFC در حالت توابع (F1 وF3)

در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نمودار اندازه ولتاژ شین‌ها بر حسب پریونیت قبل و بعد از نصب UPFC در حالت توابع (F2 وF3) و (F1وF3وF2) ارائه شده‌است.

جدول (۶)، نتایج بهینه‌سازی چند هدفه را نشان می‌دهد. در حالت ترکیب هزینه سوخت ژنراتورها با سایر توابع هدف با حضور UPFC، هزینه تولید کم شده است. اگر چه در حالت ترکیب تلفات توان اکتیو شبکه با سایر توابع هدف با حضور UPFC، تلفات توان اکتیو افزایش یافته است که ناشی از حضور UPFC و هدایت جریان عبوری از خطوط با مقاومت بالا می‌باشد. بیشینه بارپذیری سیستم در حالت ترکیب تلفات توان اکتیو شبکه و بارپذیری سیستم با حضور UPFC برابر ۱/۶۱۱ می‌باشد و زمان محاسبات الگوریتم در تمام حالات چند هدفه کمتر از ۸ ثانیه است. در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نمودار اندازه ولتاژ شین‌ها قبل و بعد از نصب UPFC در حالت توابع (F1 وF2) و (F1 وF3) ارائه شده است.



شکل (۱۲): نمودار اندازه ولتاژ شین‌های سیستم مورد مطالعه قبل و بعد از نصب UPFC در حالت توابع (F2 و F3)



شکل (۱۳): نمودار اندازه ولتاژ شین‌های سیستم مورد مطالعه قبل و بعد از نصب UPFC در حالت توابع (F1وF3وF2)

برای اعتبارسنجی الگوریتم WCA، نتایج حاصل از بکارگیری این الگوریتم با نتایج حاصل از بکارگیری سایر روش‌های بهینه-سازی مقایسه شده و در جداول (۶) و (۷) ارائه شده است. بررسی نتایج نشان از کارایی مؤثر در دقت و سرعت جواب‌ها با استفاده از الگوریتم WCA است. همچنان که می‌توان از جدول (۵) مشاهده نمود، مقدار تابع هدف حاصله توسط الگوریتم پیشنهادی از روش‌های بهینه‌سازی مراجع دیگر بهتر است.

جدول (۵): مقایسه نتایج حاصل از WCA با سایر روش‌ها برای تابع هدف هزینه سوخت ژنراتورها (F1)

الگوریتم	مقدار عددی تابع هدف ($)
WCA	۷۰۲۸/۰۰۴
HCRO [۳]	۷۸۸۰/۳۲
CRO [۳]	۸۰۱۴/۲۱
IPSO[۳]	۷۱۲۲
PSO [۳]	۸۷۰۰/۹۸
GA [۳]	۹۷۲۳/۷
IA [۳]	۷۶۷۱/۷
LGA [۳]	۷۶۱۲/۶

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

[DOR: 20.1001.1.23224468.1398.8.1.5.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power [Vol. 8-No. 1- Spring 2019

جدول (۶): نتایج بهینه‌سازی چند هدفه برای سیستم قدرت ۱۴ شینه IEEE

تابع هدف	پارامتر	قبل از نصب UPFC	بعد از نصب UPFC
هزینه سوخت ژنراتورها و تلفات توان اکتیو شبکه (F1 و F2)	هزینه سوخت ژنراتورها $\left(\frac{\$}{h}\right)$	۷۹۱۴/۸۶۱	۷۰۲۸/۰۰۴
	تلفات توان اکتیو (MW)	۰/۶۹۰	۰/۸۱۲
	بارپذیری سیستم	۰/۱۸۱	۰/۷۹۶
	هزینه سرمایه گذاری UPFC $\left(\frac{\$}{h}\right)$	-	۳۷/۰۱۳
	توان UPFC (MVA)	-	۸۱/۲۰۴
	تنظیمات بهینه UPFC	-	$r = ۰/۰۰۷,\ \gamma = -۸۴/۲۲۴^{\circ}$
	مکان بهینه UPFC (شین- شین)	-	۷-۹
	زمان محاسبات الگوریتم (S)	۷/۵۴۵	۵/۱۱۱
هزینه سوخت ژنراتورها و بارپذیری سیستم (F1 و F3)	هزینه سوخت ژنراتورها $\left(\frac{\$}{h}\right)$	۱۴۴۰۰/۹۹۹	۱۱۳۹۵/۹۱۷
	تلفات توان اکتیو (MW)	۰/۷۵۸	۰/۷۲۸
	بارپذیری سیستم	۱/۱۹۰	۰/۶۹۵
	هزینه سرمایه‌گذاری UPFC $\left(\frac{\$}{h}\right)$	-	۱۴۲/۴۴۱
	توان UPFC (MVA)	-	۱۸/۸۵۰
	تنظیمات بهینه UPFC	-	$r = ۰/۱۳۴,\ \gamma = -۱۷۹/۹^{\circ}$
	مکان بهینه UPFC (شین- شین)	-	۲-۴
	زمان محاسبات الگوریتم (S)	۹/۰۰۸	۷/۷۴۳
تلفات توان اکتیو شبکه و بارپذیری سیستم (F2 و F3)	هزینه سوخت ژنراتورها $\left(\frac{\$}{h}\right)$	۱۵۰۷۶/۹۲۷	۱۷۵۰۳/۴۱۵
	تلفات توان اکتیو (MW)	۰/۷۵۳	۰/۷۶۴
	بارپذیری سیستم	۱/۱۱۱	۱/۶۱۱
	هزینه سرمایه‌گذاری UPFC $\left(\frac{\$}{h}\right)$	-	۵۶۹۹/۲۳۴
	توان UPFC (MVA)	-	۲۱/۷۴۸
	تنظیمات بهینه UPFC	-	$r = ۰/۱۵,\ \gamma = -۱۷۴/۱۵۱^{\circ}$
	مکان بهینه UPFC (شین- شین)	-	۲-۴
	زمان محاسبات الگوریتم (S)	۷/۴۰۳	۷/۷۶۵
هزینه سوخت ژنراتورها و تلفات توان اکتیو شبکه و بارپذیری سیستم (F1و F3و F2)	هزینه سوخت ژنراتورها $\left(\frac{\$}{h}\right)$	۷۴۹۰/۷۸۰۷	۷۳۶۵/۴۹۸۱
	تلفات توان اکتیو (MW)	۰/۷۵۰۷	۰/۹۴۴۱
	بارپذیری سیستم	۰/۷۵۶۳	۰/۸۴۶۵
	هزینه سرمایه‌گذاری UPFC $\left(\frac{\$}{h}\right)$	-	۱۵۱/۷۰۲
	توان UPFC (MVA)	-	۶۸/۷۳۹
	تنظیمات بهینه UPFC	-	$r = ۰/۰543,\ \gamma = -۱۸۰/۰۰۴^{\circ}$
	مکان بهینه UPFC (شین- شین)	-	۲-۴
	زمان محاسبات الگوریتم (S)	۷/۹۵۴۸	۷/۶۹۵

جدول (۷): مقایسه نتایج حاصل از WCA با توابع هدف مختلف قبل و بعد از نصب UPFC در مقایسه با مرجع [۱]

تابع هدف	پارامتر	قبل از نصب UPFC		بعد از نصب UPFC	
		WCA	مرجع [۱]	WCA	مرجع [۱]
F1	هزینه سوخت ژنراتورها	۷۰۲۸/۰۰۴	۱۷۲۷۸/۸۰۴	۷۰۲۸/۰۰۴	۱۷۱۵۹/۴۳
F2	تلفات توان اکتیو شبکه	۰/۶۶۲	۱/۱۲۸	۰/۶۵۲	۰/۷۸۳
F3	بارپذیری سیستم	۱/۶۸۸	۱/۵۵۶	۱/۷۰۳	۱/۵۷۵
F1 & F2	هزینه سوخت ژنراتورها	۷۹۱۴/۸۶۱	۱۷۵۳۳/۷۰۳	۷۰۲۸/۰۰۴	۱۷۲۱۵/۹۷
	تلفات توان اکتیو شبکه	۰/۶۹۰	۱/۳	۰/۸۱۲	۰/۹۱۱
F1 & F3	هزینه سوخت ژنراتورها	۱۴۴۰۰/۹۹۹	۲۵۲۷۴/۴۴۴	۱۱۳۹۵/۹۱۷	۲۰۶۸۵/۳۶
	بارپذیری سیستم	۱/۱۹۰	۱/۳۶۱	۰/۶۹۵	۱/۱۸۸
F2 & F3	تلفات توان اکتیو شبکه	۰/۷۵۳	۴/۷۲۲	۰/۷۶۴	۳/۳۹۱
	بارپذیری سیستم	۱/۱۱۱	۱/۴۲۷	۱/۶۱۱	۱/۴۴۸
F1 & F2 & F3	هزینه سوخت ژنراتورها	۷۴۹۰/۷۸۰۷	۲۱۶۲۲/۱۶۸	۷۳۶۵/۴۹۸۱	۲۳۹۳۷/۲۱
	تلفات توان اکتیو شبکه	۰/۷۵۰۷	۳/۲۸۷۴	۰/۹۴۴۱	۴/۰۹۲۴
	بارپذیری سیستم	۰/۷۵۶۳	۱/۲۰۹	۰/۸۴۶۵	۱/۳۱۱

[DOR: 20.1001.1.23224468.1398.8.1.5.6]
[Downloaded from ijnrs.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Electrical Power [Vol. 8-No. 1- Spring 2019

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به منظور برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه از سیستم-های قدرت با حضور UPFC از توابع تک هدفه و چند هدفه استفاده شد. جهت بهینه‌سازی توابع هدف با و بدون حضور UPFC از الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب در طبیعت استفاده شد. بررسی نتایج و مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی نشان می‌دهد که نتایج حاصل از الگوریتم WCA، وضعیت بسیار مناسب‌تری نسبت به نتایج سایر مراجع دارد. همچنین یکی دیگر از برتری‌های الگوریتم چرخه آب در این مقاله، زمان کوتاه محاسبه می‌باشد. در ادامه کار می‌توان، نتایج حاصل از الگوریتم WCA را با نتایج حاصل از الگوریتم‌های جدیدی همچون: بهینه‌سازی نهنگ (WOA)، الگوریتم بهینه‌سازی پروانه شعله (MFOI)، الگوریتم سنجاقک (DA)، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO) و .... مقایسه کرد.

مراجع

[1]. A. Lashkar Ara, A. Kazemi, S. A. Nabavi Niaki, "Multiobjective Optimal Location of FACTS Shunt-Series Controllers for Power System Operation Planning", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, No. 2, April 2012, pp. 481-490.

[2]. Somasundaram Alamelu, S. Baskar, C.K. Babulal, S. Jeyadevi, "Optimal siting and sizing of UPFC using evolutionary algorithms", ELSEVIER, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 69, 2015, pp. 222-231.

[3]. Susanta Dutta, Provas Kumar Roy, Debashis Nandi, "Optimal location of UPFC controller in transmission network using hybrid chemical reaction optimization algorithm", ELSEVIER, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 64, 2015, pp. 194-211.

[4]. Seyed Abbas Taher, Muhammad Karim Amooshahi, "New approach for optimal UPFC placement using hybrid immune algorithm in electric power systems", ELSEVIER, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 43, 2012, pp. 899-909.

[5]. Jayanti Sarker, S.K. Goswami, "Solution of multiple UPFC placement problems using Gravitational Search Algorithm", ELSEVIER, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 2014, pp. 531-541.

[6]. Seyed Abbas Taher, Muhammad Karim Amooshahi, "Optimal placement of UPFC in power systems using immune algorithm", ELSEVIER, Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 19, 2011, pp. 1399-1412.

[7]. M. Saravanan, S. Mary Raja Slochanal, P. Venkatesh, J. Prince Stephen Abraham, "Application of particle swarm optimization technique for optimal location of FACTS devices considering cost of installation and system loadability", ELSEVIER, Electric Power Systems Research, Vol. 77, 2007, pp. 276-283.

[8]. Esmaeil Ghahremani and Innocent Kamwa, "Optimal Placement of Multiple-Type FACTS Devices to Maximize Power System Loadability Using a Generic Graphical User Interface", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No. 2, May 2013, pp. 764 – 778.

[9]. B. Vijay Kumar, N.V. Srikanth, "Optimal location and sizing of Unified Power Flow Controller (UPFC) to improve dynamic stability: A hybrid technique", ELSEVIER, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 64, 2015, pp. 429-438.

[10]. N. Magaji, M.W. Mustafa, "Optimal location and signal selection of UPFC device for damping oscillation", ELSEVIER, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 33, 2011, pp. 1031-1042.

[11]. Husam I. Shaheen, Ghamgeen I. Rashed, S.J. Cheng, "Optimal location and parameter setting of UPFC for enhancing power system security based on Differential Evolution algorithm", ELSEVIER, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 33, 2011, pp. 94-105.

[12]. H.I. Shaheen , G.I. Rashed , S.J. Cheng, "Application and comparison of computational intelligence techniques for optimal location and parameter setting of UPFC", ELSEVIER, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 23, 2010, pp. 203-216.

[13]. [13] A.R. Phadke, Manoj Fozdar, K.R. Niazi, "A new multi-objective fuzzy-GA formulation for optimal placement and sizing of shunt FACTS controller", ELSEVIER, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 40, 2012, pp. 46-53.

[14]. [14] Dharmbir Prasad, V. Mukherjee, "A novel symbiotic organisms search algorithm for optimal power flow of power system with FACTS devices", ELSEVIER, an International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 19, No. 1, 2016, pp. 79-89.

[15]. [15] B.Vijay Kumar, N.V.Srikanth, A hybrid approach for optimal location and Capacity of UPFC to improve the dynamic stability of the power system, Applied Soft Computing Journal, 2017, pp. 974-986.

[16]. [16] Shilpa S. Shrawane Kapse, Manoj B. Daigavane & Prema M. Daigavane (2018): Optimal Localization and Sizing of UPFC to Solve the Reactive Power Dispatch Problem

[DOR: 20.1001.1.23224468.1398.8.1.5.6]
[Downloaded from ijns.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Electrical Power Vol. 8-No. 1- Spring 2019

under Unbalanced Conditions, IETE Journal of Research.

[17]. [17] A. M. Vural, M. Tumay, "Mathematical modeling and analysis of a unified power flow controller: A comparison of two approaches in power flow studies and effects of UPFC location", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 29, 2007, pp. 617-629.

[18]. [18] T. S. Chung, Y. Z. Li, "A hybrid GA approach for OPF with consideration of FACTS devices", IEEE Power Engineering Review, Vol. 20, No. 8, 2001, pp. 47-50.

[19]. J.A. Dom nguez-Navarro, L. Bernal-Agustin, A. Diaz, D. Requenac, E.P. Vargas, "Optimal parameters of FACTS devices in electric power systems applying evolutionary strategies" Electrical Power and Energy Systems, Vol. 29, 2007, pp. 83-90.

[20]. G. M. L. Flavio, D. Galiana, "Phase Shifter Placement in Large-Scale Systems via Mixed Integer Linear Programming" IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 18, No. 3, 2003, pp. 1029-1034.

[21]. K. Habur, D. Oleary, [Accessed 23.5.2016], "FACTS – flexiable AC Transmission Systems, for cost effective and reliable transmission of electrical energy", http://www.simenstd.com /Trans Sys/pdf /cost Effective Reliab Trans, pdf.

[22]. M. Saravanan, S. Mary Raja Slochanal, P. Venkatesh, J. Prince Stephen Abraham, "Application of PSO technique for optimal location of FACTS devices considering cost of installation and system loadability", , IPEC, The 7th International of Power Engineering Conference, Vol. 2, 2005, pp. 716-721.

[23]. Hadi Eskandar, Ali Sadollah, Ardeshir Bahreininejad, Mohd Hamdi, 2012 "Water cycle algorithm–A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems", Computers and Structures, 110-111, pp 151–166.

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

[DOR: 20.1001.1.23224468.1398.8.1.5.6]
Journal of Novel Researches on Electrical Power Vol. 8-No. 1- Spring 2019

Optimal Multi-Objective Placement of UPFC for Planning the Operation of Power Systems Using the Water Cycle Optimization Algorithm

Amir Shirinzaban[1], Hassan Barati[2*], Mohammad Nasir[3]

1-MSc student, Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran
2-Associate Professor - Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran, barati216@gmail.com
3-Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

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: Unified Power Flow Controller (UPFC); Optimal power flow; Water Cyclw Algorithm (WCA); Generators fuel cost; Network losses; System loadability.

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

[DOR: 20.1001.1.23222468.1398.8.1.5.6]