

جایابی بهینه کنترل کننده پخش توان بین خطوط به منظور کاهش همزمان تلفات، هزینه و بهبود بارپذیری سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم PESA_II

احسان اکبری*

* دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران. e.akbari@ustmb.ac.ir

چکیده

استفاده از ادوات FACTS به دلیل بهبود ظرفیت انتقال خطوط و کاهش تلفات و هزینه‌های مربوط به سیستم قدرت در حال افزایش می‌باشد و به همین دلیل ادوات جدیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از این ادوات، کنترل کننده پخش توان بین خطوط (IPFC) می‌باشد که وظیفه اصلی آن، کنترل توان بین خطوطی سیستم انتقال است و یکی از جدیدترین ادوات FACTS می‌باشد. در این مقاله به جایابی و تنظیم پارامترهای قابل کنترل IPFC به صورت بهینه پرداخته شده است. هدف اصلی این جایابی بهینه IPFC به صورت چند هدفه در شبکه قدرت به منظور کاهش همزمان تلفات سیستم، هزینه و همچنین بهبود بارپذیری سیستم با در نظر گرفتن قیود مربوطه می‌باشد. به منظور انجام مطالعات جایابی از الگوریتم انتخاب مبتنی بر شکل‌دهی پرتو یا PESA_II، استفاده شده است و روند جایابی بر روی شبکه ۳۰ باسه IEEE صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که کلیه شاخص‌ها بهبود یافته است به نحوی که نسبت به حالتی که IPFC در شبکه حضور ندارد، تلفات توان اکتیو ۵۹/۴۳٪ کاهش، بارپذیری ۳۲/۰۸٪ افزایش، تلفات توان راکتیو ۲۶/۶۳٪ کاهش و هزینه سوخت نیروگاه‌ها ۵۹/۰۱٪ کاهش داشته است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی ریاضی، جایابی بهینه IPFC، کاهش تلفات و هزینه.

۱. مقدمه

یک سیستم قدرت از سه بخش عمده مرکز تولید، شبکه انتقال و مراکز مصرف تشکیل شده است. در سیستم های قدرت معمول، کنترل بر روی میزان توان تولیدی در نیروگاه ها اعمال می شود و حالت مطلوب آن است که تعادل بین تولید و مصرف برقرار گردد و بخش انتقال نیز به طور مؤثر، توان را منتقل کند. معمولاً در طراحی اولیه سیستم های قدرت این خواسته ها در نظر گرفته می شود، ولی به مرور زمان با گسترش سیستم قدرت و ایجاد تغییراتی در آن از قبیل رشد مصرف، اتصال دیگر شبکه ها به شبکه قبلی، تأسیس نیروگاه ها و خطوط جدید، این تعادل به هم می خورد و محدودیت هایی در بهره برداری از سیستم قدرت به وجود می آید. در سیستم های قدرت غربالی، عبور توان از مسیرهای ناخواسته، سبب افزایش بار مجاز برخی از خطوط و کاهش بار در خطوط دیگر می شود. به عبارتی دیگر این امر سبب عدم بهره برداری بهینه از سیستم قدرت خواهد شد. از طرفی در سیستم های انتقال که انرژی را در فواصل طولانی با خطوط بلند انتقال می دهند، مسئله پایداری و افت ولتاژ غیر مجاز مسئله ساز می باشد [۱]. این محدودیت باعث می شود که توان عبوری از خطوط در حدی بسیار پایین تر از حد حرارتی خطوط قرار گیرد. بنابراین می توان حالت ایده آل سیستم انرژی الکتریکی را تحت دو شرط کنترل توان در طول مسیر و قرار گیری ظرفیت بهره برداری از خطوط در حد ظرفیت حرارتی دانست. برای مقابله با این محدودیت ها و افزایش توان در سیستم قدرت دو راه حل مطرح می شود [۲]؛ اولین راه حل احداث خطوط جدید می باشد و دومین راه حل، بهبود وضعیت خطوط موجود است. راه حل اول ساده ترین پاسخ به این مشکلات می باشد زیرا احداث خطوط جدید انتقال به دلیل مسائلی مانند قوانین مربوط به حق عبور برای نصب خطوط جدید، محدودیت های زیست محیطی، هزینه بالای نصب خطوط جدید به صرفه نمی باشد و به همین دلیل اخیراً از ایده دوم برای بهبود ظرفیت انتقال سیستم استفاده می شود.

در میان روش هایی که جزو راه حل دوم به شمار می روند، استفاده از سیستم های انعطاف پذیر انتقال AC یا ادوات FACTS^۱ می باشد. این ادوات با قادر کردن بهره برداران به استفاده حداکثری از امکانات انتقال و با افزایش قابلیت اطمینان شبکه، از عوامل اصلی در برطرف نمودن بخشی از مشکلات شبکه از جمله تراکم خطوط انتقال انرژی می باشند. یکی از ادوات نسل جدید، کنترل کننده سیلان توان میان خط یا IPFC^۲ می باشد [۳]. IPFC کنترل کننده جدیدی است که در همین اواخر معرفی شده است، لذا IEEE هنوز تعریفی برای آن ارائه نکرده است. یک تعریف احتمالی عبارت خواهد بود از ترکیبی از دو یا چند جبران ساز سنکرون استاتیکی سری که با واسطه یک رابط DC با هم جفت شده اند تا سیلان یک سویه توان حقیقی را بین ترمینال های SSSC^۳ تسهیل کنند و کنترل آن ها به منظور جبران سازی مستقل توان راکتیو است تا سیلان توان حقیقی در هر خط، تنظیم شده و توزیع مطلوب سیلان توان راکتیو در میان خطوط حفظ شود [۴]. حال در این پژوهش سؤالی که مطرح می شود این است که چگونه می توان با کاربرد IPFC در شبکه قدرت، به حداکثر مزایای ممکن رسیده و مشکلات شبکه را حداقل کنیم. در [۵] به بررسی استفاده از IPFC و ساختار جریان مستقیم ولتاژ بالا بر روی سیستم دو ناحیه ای پرداخته است. نتایج نشان می دهد که دینامیک سیستم با ادغام HVDC و IPFC پویایی بهتری را نشان می دهد. در [۶]، به بررسی جایابی بهینه IPFC در یک شبکه متراکم برق با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی پرداخته است. در این مطالعه یک تابع چند هدفه برای تنظیم پارامترهای IPFC انتخاب شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که هم تلفات توان اکتیو و هم تلفات توان راکتیو در سیستم قدرت پس از هر تکرار تنظیم بهینه IPFC به حداقل می رسد. در [۷] به جایابی بهینه کنترل کننده سیلان توان میان خط تعمیر یافته به منظور بهبود بهره وری شبکه و خطوط انتقال با ارائه یک تابع چند هدفه پرداخته است. در این پژوهش از روش بهینه سازی فازی به منظور بهینه سازی تابع هدف استفاده شده است و نتایج برای شبکه استاندارد ۳۰ باسه IEEE مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی بهبود بهره وری و بار پذیری سیستم قدرت و کاهش تلفات را با

^۱ Flexible Alternating Current Transmission System^۲ Interline Power Flow Controller^۳ Static Synchronous Series Compensator

استفاده از روش پیشنهادی در این مرجع نشان می‌دهد. در [۸] تحلیل استاتیکی RHFC^۴ به عنوان یک عنصر FACTS ترکیبی جدید، بر اساس مدل‌سازی ریاضی جهت پخش بار بهینه را ارائه کرده‌اند. در این مرجع، نواحی عملکردی RHFC استخراج می‌گردد و مسئله بهینه‌سازی RHFC جهت بهینه کردن هزینه سوخت کل ژنراتورها، تلفات شبکه، بارپذیری شبکه و هزینه نصب ادوات FACTS به عنوان توابع هدف مسئله، بر روی شبکه‌های استاندارد ۳۳ شینه IEEE با استفاده از نرم‌افزارهای GAMS و MATLAB بررسی شده است. در این مرجع مسئله بهینه‌سازی، در قالب برنامه‌ریزی غیرخطی و برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته به عدد صحیح در نرم‌افزارهای مذکور مدل می‌شود و به منظور مشخص کردن قابلیت عملکردی RHFC، نتایج شبیه‌سازی با UPFC از لحاظ فنی و اقتصادی مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که می‌توان RHFC را مناسب‌ترین عنصر جهت تأمین بار و انرژی در اقتصادی‌ترین حالت ممکن در بهره‌برداری سیستم‌های قدرت در نظر گرفت. در [۹] راهکاری برای کنترل انتقال توان در شرایط ماندگار با استفاده از ادوات FACTS را ارائه کرده‌اند. در این مرجع از مدل تزریق جریان برای این ادوات و حل مسئله پخش بار بهینه استفاده شده است. قیدهای فیزیکی ادوات FACTS نیز در این مرجع لحاظ شده‌اند. در این مقاله، تمرکز اصلی در استخراج روابط ریاضی و برای اولین بار به دست آوردن نواحی عملکردی RHFC بر پایه مدل‌سازی استاتیکی است. همچنین، مسئله بهینه‌سازی با در نظر گرفتن هزینه سوخت کل ژنراتورها، تلفات شبکه، بارپذیری شبکه به عنوان توابع هدف مسئله جایابی و پخش بار بهینه بر روی شبکه استاندارد ۶۷ شینه IEEE با استفاده از با استفاده از نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی دستیابی به اهداف مورد نظر با استفاده از روش پیشنهادی در این مرجع را نشان می‌دهد. در [۱۰] به معرفی IPFC و ارائه مدل پخش بار مناسب برای آن پرداخته‌اند. در این مرجع به نقش این عنصر در کنترل انتقال توان در چند خط متفاوت اشاره شده است. در [۱۱] به بررسی جایابی بهینه تجهیز IPFC در شبکه قدرت به منظور پخش بار بهینه با استفاده از الگوریتم PSO^۵ پرداخته‌اند. در این مرجع هدف کاهش هزینه سوخت و کاهش تلفات خط انتقال می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی برای دو حالت استفاده از IPFC و عدم استفاده از IPFC برای یک شبکه ۳۰ باس استاندارد IEEE با هم مقایسه شد که نتایج نشان می‌دهد در حالت استفاده از ادوات فکتت به روش پیشنهادی این مرجع، اهداف بهینه‌سازی قابل دسترسی خواهد بود. در [۱۲] به بهینه‌سازی چندهدفه به طور همزمان برای RHFC با در نظر گرفتن سه تابع هدف شامل هزینه سوخت کل ژنراتورها، تلفات شبکه، بارپذیری شبکه با استفاده از روش محدودیت ۴ جهت مجموعه بهینه پارتو استفاده شده است. همچنین با استفاده از تصمیم گیرنده فازی محدوده هر تابع هدف تعیین می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده عملکرد مناسب روش پیشنهادی در دستیابی به اهداف بهینه‌سازی مطرح شده می‌باشد. در [۱۳] به بررسی ساختار و نحوه عملکرد تجهیز IPFC با توجه معادلات حاکم بر آن در پخش بار پرداخته‌اند. در این مرجع معادلات سیستم مذکور ارائه شده و نحوه کنترل این نوع ادوات فکتس تشریح شده است. در [۱۴] به بررسی و مقایسه جایابی بهینه ادوات فکتس برای سه نوع SSSC، UPFC و IPFC پرداخته‌اند. در این مرجع علاوه بر جایابی هر یک از این ادوات، بهینه‌سازی سائز و پارامترهای آن‌ها نیز صورت می‌گیرد که نتایج به دست آمده نشان می‌دهد عملکرد IPFC در افزایش بهره‌وری شبکه انتقال و قدرت بسیار بهتر بوده است.

در این مقاله یک پخش بار بهینه (OPF)^۶ چند هدفه برای جایابی بهینه IPFC به منظور بهبود عملکرد سیستم قدرت ارائه می‌گردد. در این پژوهش پس از بررسی ساختار IPFC و معادلات مربوط به آن به مدل‌سازی IPFC در مطالعات پخش بار پرداخته و مکان‌یابی IPFC با توجه به تابع چند هدفه به منظور بهبود بهره‌برداری از خطوط صورت می‌گیرد. توابع هدف و

^۴ Rotary Hybrid Flow Controller

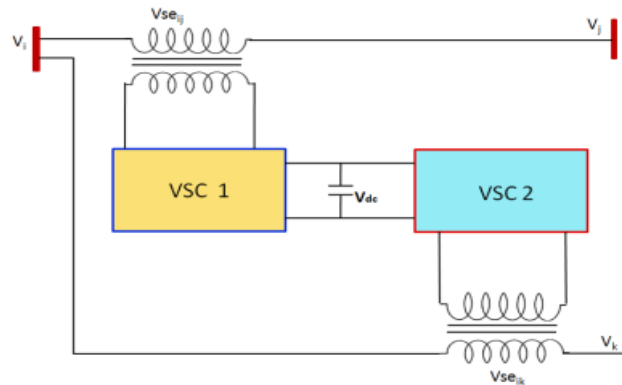
^۵ particle swarm optimization

^۶ Optimal Power Flow

قیود مربوط به مسئله مذکور ارائه می شود و به منظور بهینه سازی تابع چند هدفه از روش برنامه ریزی ریاضی چند هدفه استفاده خواهد شد. در آخر نتایج شبیه سازی برای شبکه استاندارد IEEE پیاده سازی و نتایج مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد. لازم به ذکر می باشد که کلیه شبیه سازی ها در محیط نرم افزار MATLAB صورت می گیرد.

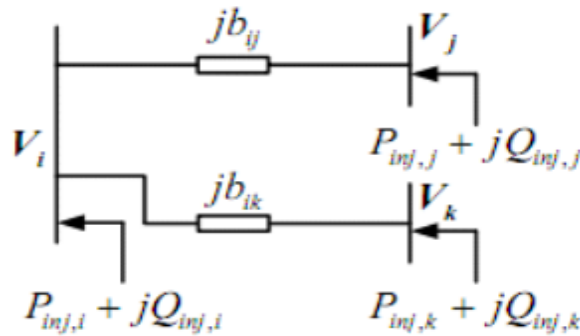
۲. مدل سازی کنترل کننده پخش توان بین خطوط (IPFC)

اساساً IPFC دارای دو مبدل منبع ولتاژ (VSC) و یک خازن DC مشترک بین آن ها می باشد، و توسط دو ترانسفورماتور به صورت سری-سری به شبکه متصل می شود. در شکل (۱) ساختار کلی IPFC قابل مشاهده است [۱۵].

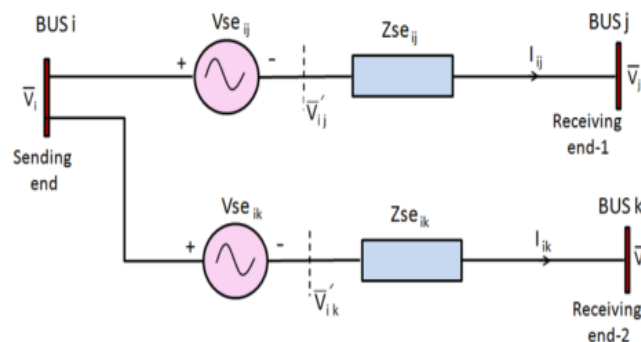


شکل ۱- ساختار کلی IPFC

همچنین مدار معادل مربوط به IPFC به صورت شکل زیر می باشد. که V_i ، V_j و V_k ولتاژهای مختلط در باس های $x = i, j, k$ هستند و V_{sein} منبع ولتاژ تزریق شده سری قابل کنترل است. شکل (۲) مدل تزریقی IPFC را نمایش می دهد [۱۶].



(الف)



(ب)

شکل ۲- (الف) مدار معادل مربوط به IPFC، (ب) مدل تزریق توان مربوط به کانورتر IPFC

امپدانس کوپل شده ترانسفورماتور سری به صورت $Z_{se_{in}}(n=j,k)$ است. توان اکتیو و راکتیو تزریق شده در هر باس می تواند به راحتی با نمایش IPFC بصورت منبع جریان محاسبه شود. از مقاومت ترانسفورماتور کوپل شده سری نیز صرف نظر شده است و توان اکتیو مبادله شده در بین لینک DC برابر صفر است. در نهایت از معادلات مدل تزریقی IPFC که در زیر آورده شده در حل مسئله جایابی بهینه استفاده شده است [۱۶].

$$P_{inj,i} = \sum_{n=j,k} V_i V_{se_{in}} b_{in} \sin(\theta_i - \theta_{se_{in}}) \quad (۱)$$

$$Q_{inj,i} = - \sum_{n=j,k} V_i V_{se_{in}} b_{in} \cos(\theta_i - \theta_{se_{in}}) \quad (۲)$$

$$P_{inj,i} = -V_n V_{se_{in}} b_{in} \sin(\theta_n - \theta_{se_{in}}) \quad (۳)$$

۳. مسئله جایابی بهینه IPFC

همانگونه که قبلا بیان شد هدف اصلی این مقاله جایابی بهینه IPFC به صورت چند هدفه در شبکه قدرت به منظور کاهش تلفات سیستم، هزینه و همچنین بهبود بارپذیری سیستم با در نظر گرفتن قیود مربوطه می باشد. تابع چند هدفه مورد استفاده در این پژوهش به صورت رابطه (۴) می باشد [۱۷].

$$OF = \min(F_1 + F_2 + F_3) \quad (۴)$$

در رابطه فوق، F_1 ، F_2 و F_3 به ترتیب سه تابع مربوط به تلفات سیستم، هزینه و همچنین بارپذیری سیستم می باشد. در ادامه این سه تابع هدف مربوط به مسئله بهینه سازی معرفی می گردد.

۱.۳. توابع هدف

تابع هزینه سوخت ژنراتور:

این تابع هدف برای حداقل کردن هزینه تولید ژنراتورها در حالیکه تمامی قیود مساوی و نامساوی را برآورده کند، می باشد. تابع هدف عبارت است از:

$$F_1 = \left(\sum F_i(P_i) \right) = \sum_{i=1}^{NG} (a_i + b_i p_i + c_i p_i^2) \quad (۵)$$

که در رابطه فوق، $F_i(P_i)$ هزینه سوخت واحد تولیدی i ، P_i توان تولیدی واحد i و NG تعداد ژنراتورها می باشد.

تابع تلفات توان اکتیو شبکه:

حداقل نمودن تلفات توان اکتیو همواره از اهداف طراحان سیستم های قدرت بوده است و تابع هدف آن به صورت زیر بیان می شود.

$$F_2 = P_{loss}(x, u) = \sum_{i=1}^{NL} P_l \quad (۶)$$

که u بردار متغیرهای کنترلی و x بردار متغیرهای وابسته می باشد. P_l تلفات توان اکتیو در خط l بوده و می توان با جمع کردن توان اکتیو در ابتدا و انتهای هر خط آن را محاسبه نمود. N_l تعداد خطوط انتقال است.

شاخص بارپذیری شبکه:

هدف حداکثر نمودن بارپذیری سیستم می باشد و به صورت زیر نشان داده می شود.

$$F_3 = \rho(x, u) \quad (7)$$

که ρ با ثابت گرفتن یک ضریب توان ثابت در هر بار در معادلات تعادل توان اکتیو و راکتیو به صورت زیر به دست می آید.

$$P_{Gi} - \rho P_{Di} = f_{pi}(x, u) \quad (8)$$

$$Q_{Gi} - \rho Q_{Di} = f_{qi}(x, u) \quad (9)$$

که در رابطه فوق، f_{pi} و f_{qi} معادلات پخش بار توان اکتیو و راکتیو در شین i با در نظر گرفتن پارامترهای کنترل کننده های FACTS می باشند. P_{Gi} و Q_{Gi} به ترتیب توان اکتیو و راکتیو ژنراتور در شین i و P_{Di} و Q_{Di} به ترتیب توان اکتیو و راکتیو بار در شین i می باشند.

۲.۳. قیود و محدودیت ها**قیود مربوط به توان اکتیو تولیدی ژنراتور:**

در تمام دوره های زمانی، توان اکتیو تولیدی ژنراتور نباید از محدوده مجاز آن ها تجاوز نماید، به عبارت دیگر، برای هر ژنراتور رابطه (۱۰) باید برقرار شود.

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (10)$$

در این رابطه P_{Gi}^{\min} حداقل توان اکتیو و P_{Gi}^{\max} حداکثر توان اکتیو تولیدی ژنراتور i است.

قیود مربوط به توان راکتیو تولیدی ژنراتور:

مشابه قید مربوط به توان اکتیو، توان راکتیو تولیدی ژنراتورها نیز نباید از محدوده مجاز تجاوز نماید، به عبارت دیگر، برای هر واحد رابطه (۱۱) باید برقرار شود.

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (11)$$

در این رابطه، Q_{Gi}^{\min} و Q_{Gi}^{\max} به ترتیب حداقل و حداکثر توان راکتیو تولیدی ژنراتور i است.

قیود مربوط به ظرفیت جریان خطوط انتقال:

در تمام دوره های زمانی، باید جریان خط مربوط به هر یک از خطوط انتقال از محدوده مجاز آن تجاوز ننماید. به عبارت دیگر، برای هر کدام از خطوط انتقال، نامعادله (۱۲) باید برقرار باشد.

$$S_{li} \leq S_{li}^{\max} \quad (12)$$

قیود مربوط به IPFC:

قیود مربوط به IPFC که شامل اندازه (r) و زاویه ولتاژ تزریقی (φ) سری IPFC می باشد مطابق زیر است [۱۸].

$$\begin{aligned} r^{\min} &\leq r \leq r^{\max} \\ \gamma^{\min} &\leq \gamma \leq \gamma^{\max} \end{aligned} \quad (۱۳)$$

۴. الگوریتم انتخاب مبتنی بر شکل دهی پارتو (PESA-II)

در این مقاله به منظور حل مسئله از الگوریتم انتخاب مبتنی بر شکل دهی پارتو^۷ (PESA-II) استفاده می شود. این الگوریتم یکی از معروف ترین و پرکاربردترین الگوریتم های بهینه سازی ریاضی چند هدفه می باشد که اولین بار توسط کورن و همکاران [۱۹] ارائه شد. PESA-II همانند همه الگوریتم های تکاملی دارای یک آرشیو جمعیت داخلی با اندازه ثابت است، در کنار این آرشیو یک آرشیو جمعیت خارجی با اندازه متغیر نیز دارد. آرشیو داخلی جواب های جدید اعمال حاصل از عملگرهای جهش و ترکیب به اعضای را آرشیو خارجی ذخیره می کند، و مجموعه آرشیو خارجی فقط شامل جواب های نامغلوب کشف شده در فرآیند جستجو می باشد. در این الگوریتم از یک تقسیم شبکه بندی فضای هدف جهت ایجاد تنوع استفاده می شود. تعداد جواب های درون یک فضای چند وجهی^۸ به عنوان چگالی آن فضا معرفی شده و جهت مشخص کردن جواب ها در دو فرآیند انتخاب آمیزشی^۹ و انتخاب محیطی^{۱۰} در یک بهینه سازی چند هدفه به کار می رود. برخلاف بسیاری از الگوریتم های تکاملی چندهدفه (از جمله PESA) که فرآیند آمیزش بصورت فرد-مبنا^{۱۱} صورت می گیرد در PESA-II این عمل منطقه-مبنا^{۱۲} انجام می شود. یعنی ابتدا یک فضای چند وجهی انتخاب شده و سپس بصورت تصادفی از این چند وجهی عضو برای اعمال عملگرهای ژنتیک انتخاب می گردد، بنابراین فضاهای چند وجهی بسیار شلوغ تر نسبت به چند وجهی های کم ازدحام تر سهم کمتری خواهند داشت. در فرآیند انتخاب محیطی، اعضای کاندید موجود در آرشیو داخلی یکی یکی به مجموعه آرشیو خارجی وارد و محیط گریدی گام به گام به روزرسانی می شود. زمانی که کاندید جدیدی به آرشیو وارد می شود، تعدیل مناسب آرشیو و محیط گریدی اجرا می شود. ابتدا، اعضای از آرشیو خارجی که مغلوب هستند از آرشیو حذف شده تا اعضای نامغلوب در این آرشیو باقی بمانند. در گام دوم، تغییر حدود محیط گریدی پس از افزودن اعضای جدید در آرشیو کنترل می شود. در نهایت، اگر افزودن یک کاندید موجب شود اعضای آرشیو از حد تعیین شده بیشتر شود، به دلخواه یک عضو از پرازدحام ترین حذف چند وجهی خواهد شد.

۵. تحلیل و بررسی نتایج شبیه سازی

در این بخش پس از معرفی سیستم تست مورد استفاده در شبیه سازی به بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی پرداخته می شود. شبیه سازی ها در نرم افزار MATLAB انجام شده است.

۱.۵. سیستم تست

سیستم تست مورد بررسی در این مقاله یک سیستم ۳۰ باسه استاندارد می باشد. توان مبنا ۱۰۰ مگا ولت آمپر و ولتاژ مبنا ۱۱ کیلوولت می باشد. دیاگرام تک خطی شبکه و اطلاعات کلی شبکه به ترتیب در شکل (۳) و جدول (۱)، نشان داده شده است.

⁷ Pareto Envelope-Based Selection Algorithm II

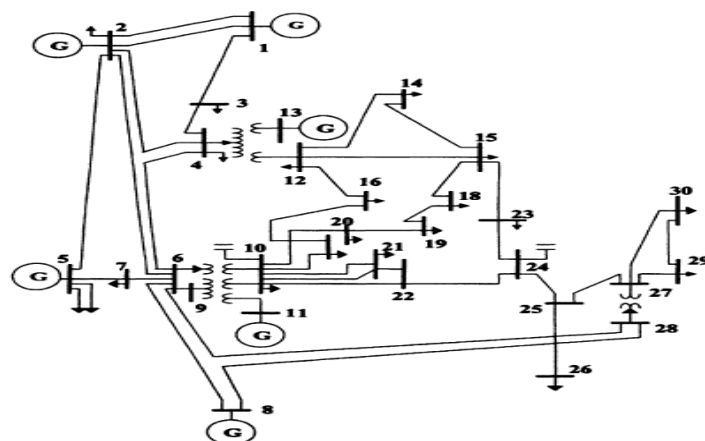
⁸ Hyper box

⁹ mating selection

¹⁰ Environmental selection

¹¹ individual-based

¹² region-based



شکل ۳- سیستم تست ۳۰ باسه IEEE

جدول ۱- اطلاعات کلی سیستم تست ۳۰ باسه IEEE

تعداد باس	تعداد خط	شماره باس اسلک	ولتاژ مبنا	توان مبنا
۳۰	۴۱	۱	۱۱ KV	۱۰۰ MVA

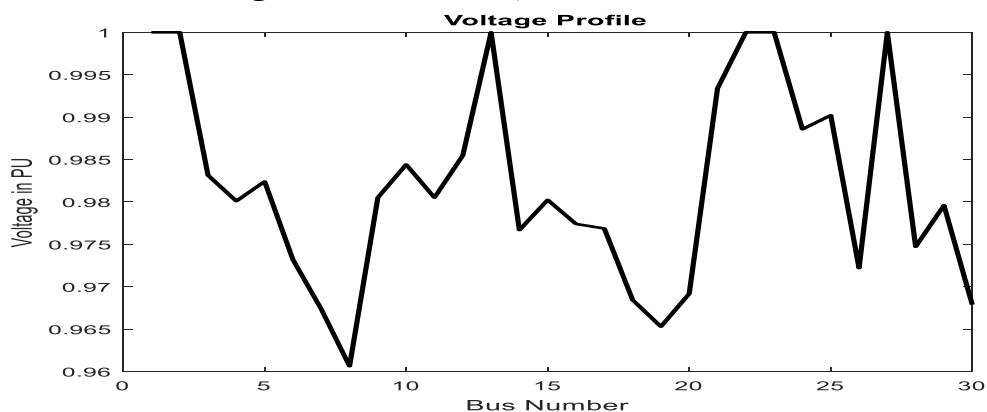
به منظور ارزیابی و بررسی‌های مختلف مسئله‌ی جایابی مطلوب IPFC، مسئله را به دو صورت جداگانه و هم‌زمان به منظور کاهش تلفات، بهبود هزینه و بهبود پروفیل ولتاژ در سیستم‌های قدرت، تقسیم کرده که در ذیل سناریوهای مختلف این تقسیم بندی ذکر شده است.

سناریوی اول: عملکرد عادی شبکه و بدون جایابی IPFC در هیچ خطی از شبکه

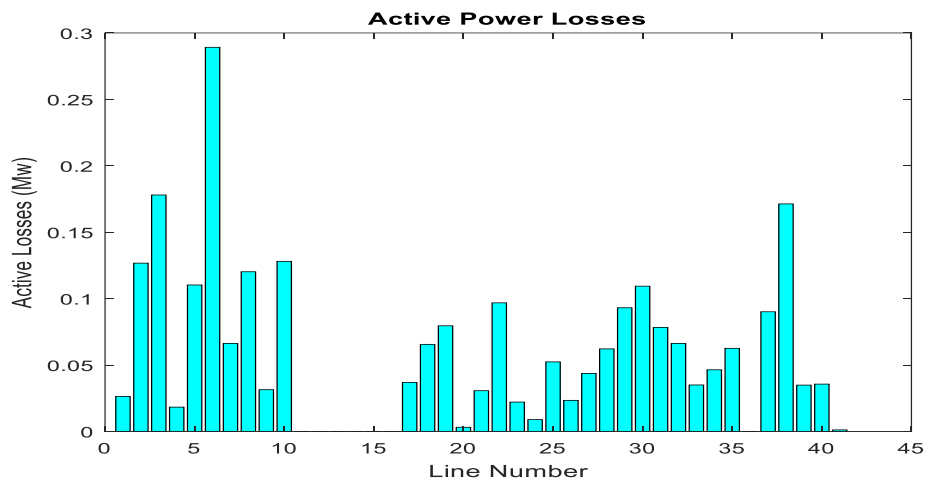
سناریوی دوم: عملکرد شبکه با جایابی بهینه IPFC به روش بهینه‌سازی چندهدفه و هم‌زمان با استفاده از الگوریتم انتخاب مبتنی بر شکل‌دهی پرتو یا PESA_II

۲.۵. سناریوی اول: عملکرد عادی شبکه بدون جایابی IPFC در هیچ خطی از شبکه

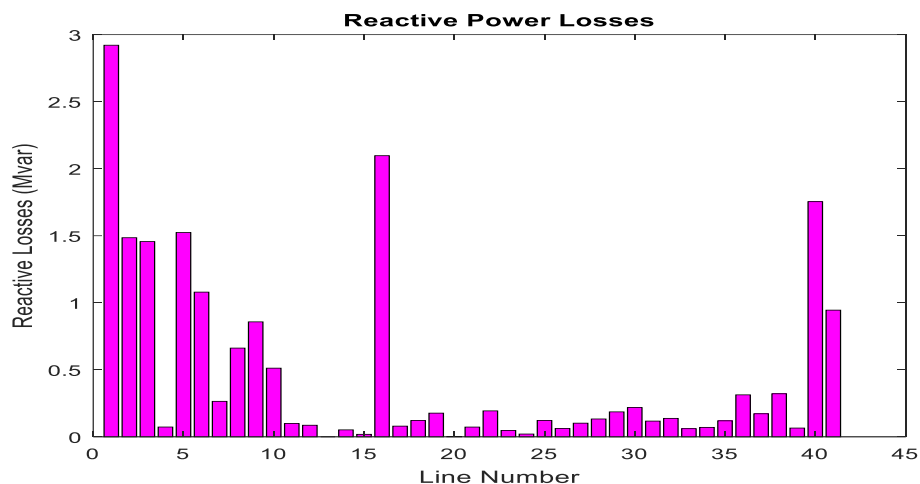
در این سناریو ابتدا مسئله را بدون جای گذاری IPFC در شبکه بررسی کرده و از قرار دادن متغیرهای کنترلی بر روی سیستم تست خودداری می‌شود و عملکرد عادی سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) به ترتیب مقادیر ولتاژ باس‌ها و تلفات توان اکتیو و تلفات توان راکتیو بر روی سیستم تست ۳۰ باسه مشاهده می‌شود.



شکل ۴- پروفیل ولتاژ باس‌های سیستم ۳۰ باسه - سناریوی اول



شکل ۵- تلفات توان اکتیو در خطوط سیستم ۳۰ باسه- سناریوی اول

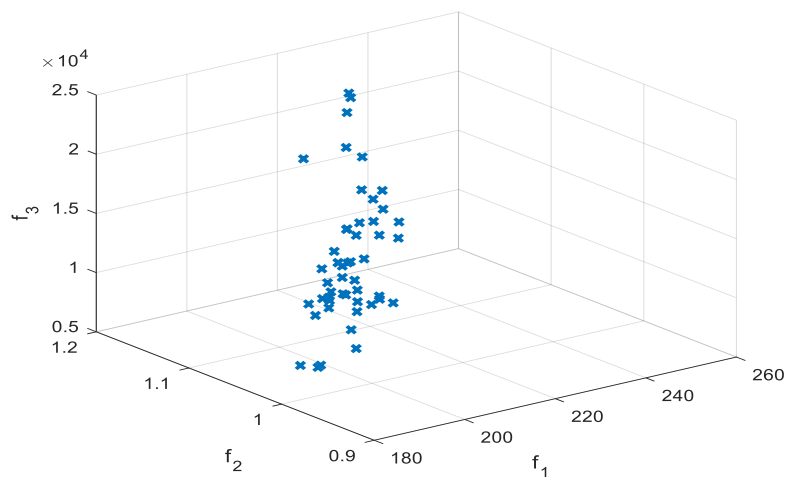


شکل ۶- تلفات توان راکتیو در خطوط سیستم ۳۰ باسه- سناریوی اول

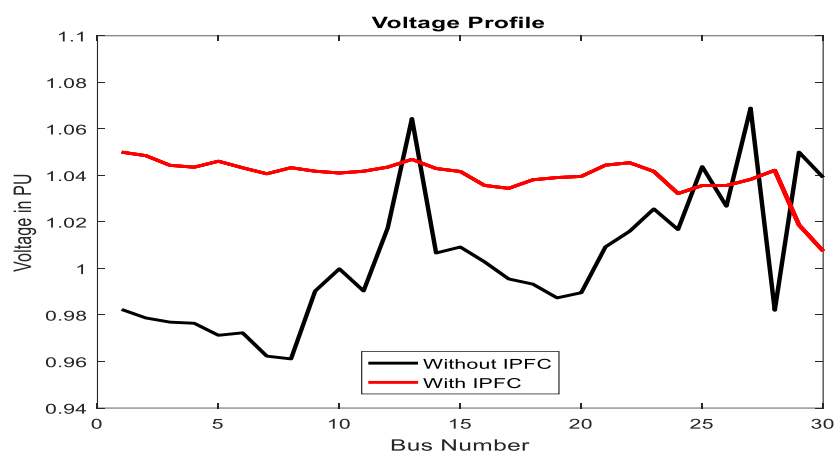
همان طور که از شکل (۴) مشاهده می شود، باس هایی از سیستم وجود دارد که دارای افت ولتاژی نزدیک به ۰/۹۶ پریونیت می باشند. همچنین مطابق شکل (۶) و (۷) در این باس ها نیاز به تزریق توان راکتیو می باشد که از این طریق ولتاژها جبران سازی شوند و تلفات کاهش پیدا کند.

۳.۵. سناریوی دوم: عملکرد شبکه با جایابی بهینه IPFC به روش بهینه سازی چندهدفه با الگوریتم PESA_II

در این سناریو جایابی بهینه IPFC به صورت چند هدفه و همزمان با استفاده از الگوریتم چندهدفه PESA_II در سیستم تست صورت می گیرد. در الگوریتم های چندهدفه، تنها یک جواب بهینه برای حل مسئله وجود ندارد و در پایان الگوریتم، مجموعه ای از جواب های بهینه ایجاد می شود که هیچ کدام بر دیگری ارجحیت ندارد. به این دسته از جواب ها جبهه پرتو گفته می شود. بنابراین جبهه ی پرتو از شماری از جواب های بهینه تشکیل می شود که طراحان و بهره برداران با توجه به علم و بصیرت خود و نوع مسئله نیاز دارند که جواب نهایی را از میان دسته جواب پرتو انتخاب کنند. با در نظر گرفتن عدم قطعیت در نظر بهره بردار و طراح سیستم، روش مصالحه فازی، در انتخاب جواب نهایی می تواند بهترین عملکرد را داشته باشد. شکل (۷) نمودار جبهه پرتو الگوریتم چند هدفه PESA_II در سناریوی سوم را نشان می دهد. همچنین شکل (۸) پروفیل ولتاژ باس های سیستم در سناریوی سوم را نشان می دهد.

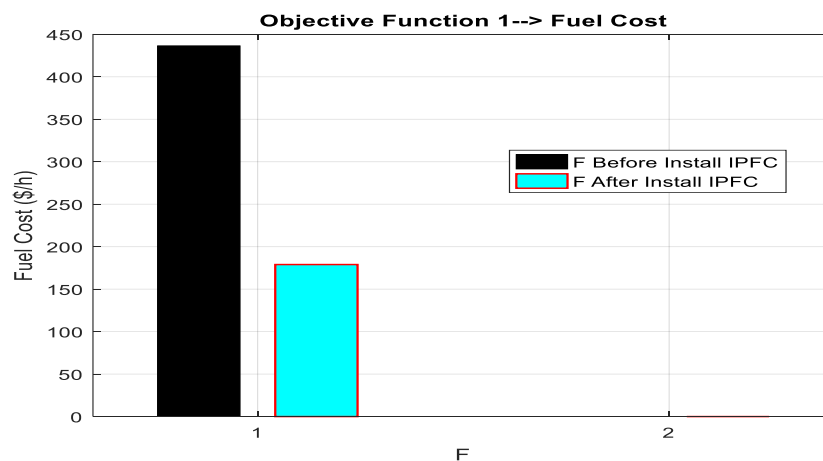


شکل ۷- نمودار جبهه پرتو الگوریتم چند هدفه PESA_II در سناریوی دوم

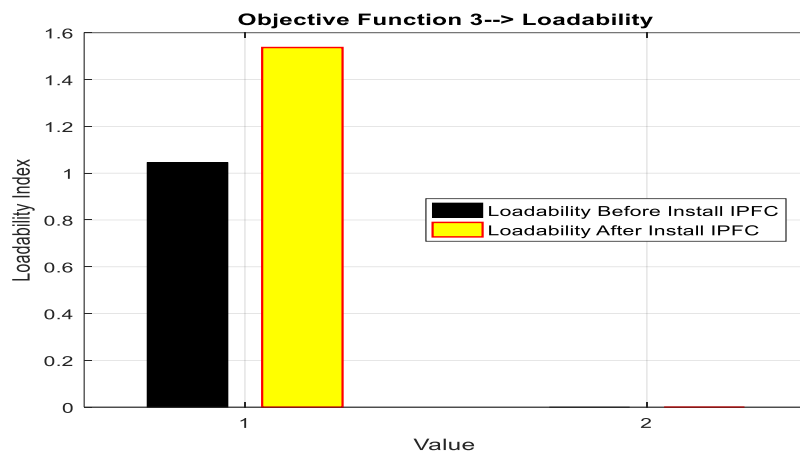


شکل ۸- پروفیل ولتاژ باس های سیستم در سناریوی دوم

مطابق شکل فوق، باس هایی که دارای نامناسب ترین ولتاژ (۰/۹۶ پرینیت) بهبود یافته اند که درصد کاهش این مقادیر چشم گیر است. شکل (۹) و (۱۰) مقدار تابع هدف اول (هزینه سوخت نیروگاه ها) و اندیس قابلیت بارپذیری سیستم (تابع هدف دوم) در این سناریو را نشان می دهد.

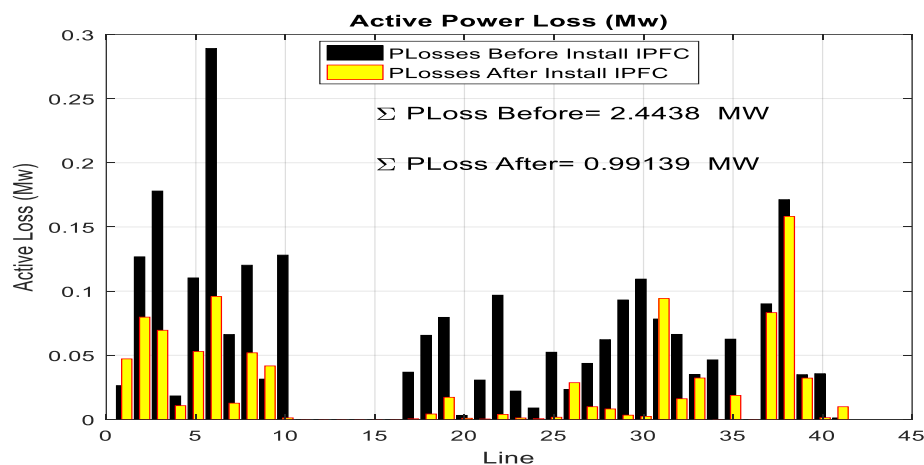


شکل ۹- مقدار تابع هدف اول (هزینه سوخت نیروگاه ها) در سناریوی دوم

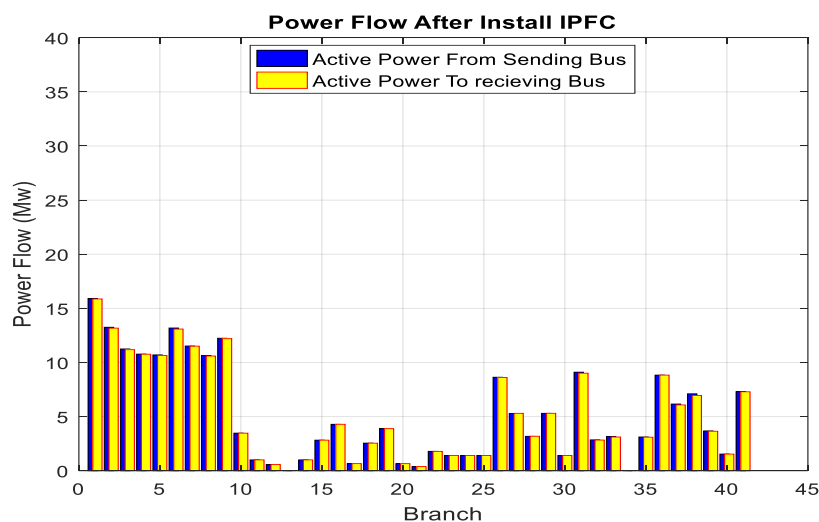


شکل ۱۰- تابع هدف دوم (اندیس قابلیت بارپذیری سیستم) در سناریوی دوم

اندیس بارپذیری سیستم نیز از ۴/۶ درصد در حالت عملکرد عادی به ۳۲/۰۸ درصد در سناریوی سوم افزایش بسیار مناسبی داشته است. همچنین شکل (۱۱) و (۱۲) تلفات توان اکتیو و پخش توان اکتیو در شاخه های سیستم در این سناریو را نشان می دهد.



شکل ۱۱- تلفات توان اکتیو سیستم در سناریوی سوم



شکل ۱۲- پخش توان اکتیو در شاخه های سیستم در سناریوی سوم

همان طور که از شکل های فوق مشاهده می شود، تلفات اکتیو و راکتیو شبکه ۳۰ باسه بعد از قراردادن سه عدد IPFC در شبکه در سناریوی سوم به ترتیب از ۲/۴۴۳۸ مگاوات به ۰/۹۹۱۴ مگاوات یعنی ۵۹/۴۳ درصد کاهش و از ۱۸/۸۰۶۹ مگاوار به ۱۳/۷۹۸۷ مگاوار یعنی ۲۶/۶۳ درصد بهبود یافته است. جدول (۲) به مقایسه پاسخ حاصل از الگوریتم PESA_II (سناریو دوم) و عملکرد عادی شبکه در سناریوی اول می پردازد.

جدول ۲- پاسخ حاصل از الگوریتم PESA_II و مقایسه آن با عملکرد عادی سیستم در سناریوی اول

توابع هدف	عملکرد عادی (شبکه (سناریو اول)	سناریوی دوم
کل تلفات توان اکتیو	(MW) ۲/۴۴۳۸	(MW) ۰/۹۹۱۴
کل تلفات توان راکتیو	(Mvar) ۱۸/۸۰۶۹	(Mvar) ۱۳/۷۹۸۷
مجموع توابع هدف	(PU) ۶/۶۴×۱۰ ^{-۳}	(PU) ۷/۴۸×۱۰ ^{-۳}
هزینه سوخت نیروگاه ها	(\$/h) ۴۳۶/۴۵۰۹	(\$/h) ۱۷۸/۹۷۰۷
بارپذیری سیستم	۱/۰۴۶	۱/۵۴

مطابق جداول فوق، یکی از اهداف مهم کاربرد IPFC در شبکه، کنترل و تنظیم توان اکتیو و راکتیو میان دو یا چند خط شبکه می باشد که مقادیر و مکان های بهینه ی حاصل از الگوریتم چند هدفه انتخاب مبتنی بر شکل دهی پرتو (PESA_II) کاهش ۵۹/۰۱ درصدی در هزینه سوخت نیروگاه ها را نشان می دهد و ضعف هایی مثل کاهش تلفات توان راکتیو، افزایش زیاد بارپذیری و پروفیل ولتاژ، برطرف و پوشش داده شده است.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله جایابی بهینه IPFC به صورت چند هدفه در شبکه قدرت به منظور کاهش همزمان تلفات سیستم، هزینه و همچنین بهبود بارپذیری سیستم با در نظر گرفتن قیود مربوطه مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور ارزیابی و بررسی های مختلف مسئله ی جایابی مطلوب IPFC، مسئله را به دو صورت جداگانه و همزمان به منظور کاهش تلفات، بهبود هزینه و بهبود پروفیل ولتاژ در سیستم های قدرت، تقسیم کرده که به همین منظور دو سناریو شامل عملکرد عادی شبکه و بدون جایابی IPFC در هیچ خطی از شبکه و عملکرد شبکه با جایابی بهینه IPFC به روش بهینه سازی چندهدفه و همزمان با استفاده از الگوریتم انتخاب مبتنی بر شکل دهی پرتو یا PESA_II مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که در حالتی که جایابی بهینه IPFC صورت نگرفته است، هر سه شاخص تلفات سیستم، هزینه و همچنین بهبود بارپذیری سیستم نامناسب می باشد. در این حالت هزینه سوخت نیروگاه ها (\$/h) ۴۵۰۹×۱/۵۰۵۷ و شاخص بارپذیری ۱/۰۴۶ می باشد. در حالت دوم که در واقع هدف این مقاله هم بوده است با استفاده از الگوریتم PESA_II حل مسئله جایابی صورت گرفته است. در این حالت کلیه شاخص ها بهبود یافته است به نحوی که نسبت به حالتی که IPFC وجود ندارد تلفات توان اکتیو (۵۹/۴۳٪) کاهش، بارپذیری (۳۲/۰۸٪) افزایش، تلفات توان راکتیو (۲۶/۶۳٪) کاهش و هزینه سوخت نیروگاه ها (۵۹/۰۱٪) کاهش داشته است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که کلیه اهداف مورد نظر در مسئله جایابی بهینه IPFC در شبکه نمونه مورد استفاده با الگوریتم ارائه شده به خوبی بهبود یافته اند و بهینه سازی به خوبی انجام شده است.

۷. منابع

1. Singh, Ashish, and Aashish Kumar Bohre. (2022) "Congestion Management Using FACTS Devices: A Review with Case Study." *Recent Advances in Power Systems*: 3249-3264.
2. Han, Yun, Genlai Lv, and Elham Mokaramian. (2020) "A review modeling of optimal location and sizing integrated M-FACTS with wind farm and fuel cell." *Journal of Cleaner Production* 268: 121726.
3. Singh, Pradeep, and Nilanjan Senroy. (2021) "Steady-state model of VSC based FACTS devices using flexible holomorphic embedding:(SSSC and IPFC)." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 133: 107256.
4. Murugan, A., and V. Ramakrishnan. (2022) "Enhancement of voltage profile and generation of cost function by hybrid power flow controller using genetic algorithm." *Applied Nanoscience*: 1-11.
5. Babu, Naladi Ram, et al. (2022) "Optimal Location of IPFC on LFC Studies Considering PI-TIDN Controller and RT-Lab." *Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence and Sustainable Technologies*.
6. Chaithanya, K. Krishna, et al. (2022) "Optimal setting of interline power flow controller in deregulated power systems congestion management by using artificial intelligent controllers." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2070. No. 1.
7. Kazemi, A., Rezaeipour, R., & Lashkarara, A. (2018). Optimal location of Rotary Hybrid Flow Controller (RHFC) through multi-objective mathematical programming. *Scientia Iranica*, 19(6), 1771-1779.
8. Rezaeipour, R., Kazemi, A., (2019). Steady State Analysis and Optimal Location of RHFC Considering Its Installation Cost. *Tabriz Journal of Electrical Engineering*, vol. 47, no. 3.
9. Xiao, Y., Song, Y. H., & Sun, Y. Z. (2019). Power flow control approach to power systems with embedded FACTS devices. *IEEE Transactions on power systems*, 17(4), 943-950.
10. Mishra, A. (2022). Congestion management of deregulated power systems by optimal setting of Interline Power Flow Controller using Gravitational Search algorithm. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 4(1), 198-212.
11. Praveen, J., & Rao, B. S. (2019). Multi objective optimization for optimal power flow with IPFC using PSO. In 2016 3rd International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES) (pp. 85-90). IEEE.
12. Kazemi, A., Rezaeipour, R., & Lashkarara, A. (2021). Optimal location of Rotary Hybrid Flow Controller (RHFC) through multi-objective mathematical programming. *Scientia Iranica*, 19(6), 1771-1779.
13. Bahravar, S., Hosseinian, H. S., Nazari, M. E., & Olamaei, J. (2020). Modeling and coordinated control of IPFC and SVC to improve the low frequency oscillation damping. In *Electrical Engineering (ICEE), Iranian Conference on* (pp. 1310-1315). IEEE.
14. Hussain, A., Amin, M., Khan, R. D., & Chaudhry, F. A. (2021). Optimal Allocation of Flexible AC Transmission System Controllers in Electric Power Networks. *Inae Letters*, 1-24.
15. Kazemi, A.; Karimi, E, (2022) "The Effect of Interline Power Flow Controller (IPFC) on Damping Inter-area Oscillations in the Interconnected Power Systems", *Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium*, Volume 3, pp. 6911 – 6915.
16. Kazemi, A., R. Rezaeipour, and A. Lashkarara. (2019) "Optimal location of Rotary Hybrid Flow Controller (RHFC) through multi-objective mathematical programming." *Scientia Iranica* 19.6: 5771-5779.
17. Zhang, X-P. (2017) "Robust modeling of the interline power flow controller and the generalized unified power flow controller with small impedances in power flow analysis." *Electrical Engineering* 89.1: 768-779.
۱۸. رضایی پور. "تحلیل استاتیکی و جایابی بهینه کنترل کننده توان چرخشی (RHFC) با در نظر گرفتن هزینه نصب آن." *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز* ۴۷.۳ (۲۰۱۹): ۱۰۳۵-۱۰۴۶.
19. Corne, David W., et al. (2021) "PESA-II: Region-based selection in evolutionary multiobjective optimization." *Proceedings of the 32rd Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*. Morgan Kaufmann Publishers Inc.

Optimum placement of Interline Power Flow Controller (IPFC) to simultaneously reduce losses, cost and improving the power system load ability using PESA_II algorithm

Ehsan Akbari

Department of Electrical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology,
Babol, Iran.

e.akbari@ustmb.ac.ir

Abstract: The use of FACTS devices is increasing due to the improvement of the transmission capacity of lines and the reduction of losses and costs related to the power system, and for this reason, new devices are used. One of these tools is the of interline power flow controller (IPFC), whose main task is to control the inter-line power of the transmission system, and it is one of the newest FACTS tools. In this article, the placement and regulation of the controllable parameters of IPFC has been discussed in an optimal way. The main goal of this optimal placement of IPFC in a multi-objective manner in the power network is to simultaneously reduce system losses, cost, and also improve system load taking into account the relevant constraints. In order to carry out placement studies, the selection algorithm based on beam forming or PESA_II has been used, and the placement process has been carried out on the IEEE 30-bus network. The results show that all indicators have improved so that compared to the case where IPFC is not present in the network, active power loss (%) is reduced by 59.43, load capacity (%) is increased by 32.08, reactive power loss (26.63% reduction and power plant fuel cost has decreased 59.01%.document.

Keywords: Optimization algorithm, mathematical programming, optimal placement of IPFC, reduction of losses and cost.