

حداقل سازی هزینه‌ی فروافتادگی ولتاژ و تلفات توان با استفاده از مکان یابی بهینه‌ی تولیدات پراکنده و ادوات FACTS

سجاد قرایی^۱، سید حسین طباطبایی^۲ و علیرضا جلیلیان^۳

^۱ دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی برق Sajjad_gharaei@elec.iust.ac.ir

^۲ دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی برق H_tabatabaei@elec.iust.ac.ir

^۳ دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی برق قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت Jalilian@iust.ac.ir

چکیده-امروزه از جمله مشکلات شبکه‌های توزیع وجود فروافتادگی ولتاژ و بالابودن تلفات و مناسب نبودن پروفیل ولتاژ در آنها می باشد. با جایابی بهینه منابع تولید پراکنده، می توان تا حد ممکن این مشکلات را بر طرف کرد. از سوی دیگر ادوات FACTS نیز به عنوان یک راه حل اقتصادی موثر برای حفاظت بارهای حساس از فروافتادگی ولتاژ مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مقاله شامل دو بخش اصلی می‌باشد که در بخش اول با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با هدف کاهش فروافتادگی ولتاژ و کاهش تلفات، واحدهای تولید پراکنده جایابی شده‌اند. در بخش دوم ادوات FACTS با استفاده از این الگوریتم و با همان اهداف جایابی شده‌اند و در نهایت میزان اثر بخشی این دو روش بر فروافتادگی ولتاژ مقایسه گردیده و در هر بخش میزان صرفه جویی اقتصادی معین شده است. شبیه سازی بر روی یک شبکه توزیع نمونه ۳۴ باسه پیاده سازی شده است. نتایج نشان دهنده‌ی این حقیقت است که هنگامی که کاهش تلفات و فروافتادگی ولتاژ در یک سیستم به عنوان یک هدف مورد نظر باشد، به دلیل هزینه‌ی بالای ادوات FACTS و اثر بخشی کم آنها بر کاهش تلفات سیستم، این ادوات دارای کارایی اقتصادی کمتری نسبت به تولیدات پراکنده، می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، تولیدات پراکنده، ادوات FACTS، جایابی بهینه، فروافتادگی ولتاژ.

۱- مقدمه

به منظور کاهش فروافتادگی ولتاژ و همچنین کاهش تلفات در شبکه راه کارهای دیگری نیز وجود دارد. از جمله این راه کارها استفاده از ادوات FACTS می‌باشد. این ادوات می‌توانند پارامترهای شبکه (جریان، ولتاژ و امپدانس) و از جمله جبران/تعدیل فروافتادگی ولتاژ را کنترل نمایند. ادوات FACTS مانند STATCOM، SVC و DVR تکنولوژی‌هایی هستند که به خوبی توسعه یافته‌اند و در سرتاسر جهان به صورت معقول و به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴] و [۵].

به منظور به کارگیری واحدهای تولید پراکنده و ادوات FACTS در شبکه به گونه‌ای که بهترین کارایی را در کاهش فروافتادگی

مبحث کیفیت انرژی الکتریکی یا کیفیت توان یکی از موضوعاتی است که در سالیان اخیر بطور جدی مورد توجه بهره‌برداران و مصرف‌کنندگان شبکه‌های الکتریکی قرار گرفته است. فروافتادگی ولتاژ به عنوان مهم‌ترین پدیده‌ی کیفیت توان به شمار می‌آید و لذا در سالیان اخیر تلاش شده است تا میزان آن در شبکه‌های الکتریکی کاهش یابد. واحدهای تولید پراکنده می‌توانند به عنوان یک راه کار برای کاهش فروافتادگی ولتاژ مورد استفاده قرار گیرند. [۱] و [۲]. منافع فنی این واحدها شامل بهبود ولتاژ، کاهش تلفات، انتقال زدایی^۱ و توزیع تراکم^۲، بهبود قابلیت اطمینان تجهیزات و کیفیت توان می باشد [۳].

² Distribution Congestion

¹ Transmission Relieved

پارامترهای سیستم شامل ساختار سیستم، امیدانس اجزا و خطوط، اتصالات ترانسفورماتور، محل‌ها و انواع رله‌های حفاظتی و تنظیمات متناظر با آنها می‌باشد. پارامترهای مربوط به رخ داد خطا شامل نوع خطا، محل خطا، امیدانس خطا و فرکانس رخ داد خطا و ... می‌باشد. این پارامترها اساسا دارای ماهیتی اتفاقی می‌باشند و از این رو هیچ دانشی برای پیش بینی آنها در دسترس نیست.

نرخ خطای سیستم مورد فرض برای کار پیش رو، در جدول یک دسته بندی شده است. در این مقاله چهار نوع خطا در نظر گرفته شده است: (الف) خطای سه فاز به زمین، (ب) خطای خط به خط به زمین (ج) خطای تک فاز به زمین و (د) خطای خط به خط. معمولا، انواع خطاها و تعداد هر کدام بر اساس داده‌های تاریخی یعنی آمارهای خطای در دسترس و جزئیات شبکه به دست آمده‌اند. در این مقاله فرض بر این است که آنها در نرخ هایی بر حسب درصد به ترتیب از ۵٪: ۴٪: ۸۳٪: ۸٪: توزیع شده‌اند [۱]. خطاها در محل های تصادفی رخ داده و امیدانس خطا در بدترین حالت در نظر گرفته شده و برابر صفر می‌باشد.

در این مقاله ظرفیت کیلو یا مگا ولت آمپر اغتشاش بارها به علت فروافتادگی ولتاژ به عنوان یک شاخص از شدت فروافتادگی ولتاژ در نظر گرفته شده است. از این رو، در این کار کل بارهای مختل شده^۳، بر حسب مگا ولت آمپر، در طی زمان خطا، به عنوان یک هدف مهم شناخته است.

جدول ۱: نرخ خطاهای سیستم [۱]

نوع خطا	نرخ رخ داد خطا در باس (وقوع/سال)	نرخ رخ داد خطا در خط (وقوع/۱۰۰ کیلومتر/سال)
خطای تک فاز به زمین	۲,۴	۳۰,۰۴
خطای دو فاز	۰,۱۵	۱,۳۳۵
خطای دو فاز به زمین	۰,۳۳	۲,۷۹۳
خطای سه فاز	۰,۱۲	۱,۰۰

حال به بررسی ولتاژ باس‌ها بعد از رخ داد خطا می‌پردازیم. مقادیر سه فاز افت ولتاژ از یک خطای نامتعادل سیستم عموما اندازه‌های مختلف و جابجایی فازهای مختلفی را نشان می‌دهد. از این رو برای هر نوع خطا، ولتاژ تمامی باس‌ها بر اساس روابطی به دست می‌آید و در اینجا روابط مربوط به خطای تک

ولتاژ از خود نشان دهند، نیاز است از الگوریتم‌های بهینه سازی استفاده شود تا محل و اندازه‌ی بهینه‌ی هر کدام از این واحدها تعیین گردد. بدین منظور روش‌های بهینه‌سازی گوناگونی تعریف شده است که از آن جمله روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک می‌باشد که در این مقاله بهینه‌سازی با استفاده از آن صورت گرفته است. در این مقاله با در نظر گرفتن هزینه‌ی فروافتادگی ولتاژ، هزینه‌ی تلفات و همچنین هزینه‌ی تجهیزات مورد استفاده، یک تابع هدف تعیین شده است تا علاوه بر در برداشتن این اهداف، قیود بهره‌برداری را نیز در خود جا دهد.

برای هر راه حل بالقوه که با استفاده از الگوریتم ژنتیک در هر نسل، ایجاد شده است محاسبات پخش بار انجام می‌شود و سپس تحلیل فروافتادگی ولتاژ با استفاده از داده‌های آماری قابلیت اطمینان که در طول زمان به دست آمده‌اند، و به کمک تحلیل مولفه‌های متقارن انجام می‌شود [۶].

در پایان با تعیین محل و اندازه‌ی واحد تولید پراکنده توسط الگوریتم ژنتیک، میزان صرفه جویی اقتصادی ناشی از به کارگیری این واحدها در شبکه، معین گردیده است.

سایر بخش‌های مقاله به صورت زیر سازمان یافته است: بخش دوم جزئیات تحلیل افت ولتاژ را در شبکه‌ی توزیع ارائه می‌نماید. بخش سوم یک فرمولاسیون از مسئله‌ی بهینه‌سازی را توصیف می‌نماید. بخش چهارم چگونگی به کار گیری الگوریتم ژنتیک به منظور حل مسئله را نشان می‌دهد. بخش پنجم عملکرد روش و عملکرد آن را برای شبکه‌ی توزیع ۳۴ باسه‌ی شعاعی را توصیف می‌نماید.

۲- تحلیل افت ولتاژ

فروافتادگی ولتاژ به طور مرسوم به عنوان کاهش اندازه‌ی موثر ولتاژ بین مقدار ۰,۱ تا ۰,۹ پریونیت در فرکانس نامی و برای بازه‌ی زمانی بین نیم سیکل تا یک دقیقه تعریف می‌شود [۷] و [۸].

اساسا دو نوع از داده‌ها برای تخمین عملکرد فروافتادگی ولتاژ مورد نیاز می‌باشد: (الف) پارامترهای سیستم و (ب) پارامترهای مربوط به رخ داد خطا.

³ Total Load Disturbed, S_{DIST}

شده است. و لذا اساسا این یک مسئله‌ی چند هدفی بهینه سازی می‌باشد که در آن تابع هدف شامل سه مولفه می‌باشد یعنی سه هدف، که هر کدام از آنها به طور اختصاصی باید حداقل سازی شوند :

- ✓ هدف اول: حداقل سازی تلفات توان اکتیو.
- ✓ هدف دوم: حداقل سازی بار مختل شده.
- ✓ هدف سوم: حداقل سازی هزینه‌ی کل تولیدات پراکنده.

در حل این مسئله قیود بهره‌بردی نیز وجود دارند که باید در محدوده‌ی مجاز حفظ شوند. این قیود عبارت اند از:

- ✓ قید اول: محدودیت‌های پخش بار (حد حرارتی خط).
- ✓ قید دوم: ولتاژ باس ها .
- ✓ قید سوم: ظرفیت تولیدات پراکنده .

در این مقاله تلاش بر این است تا این تابع هدف از طریق واحدهای تولید پراکنده و ادوات FACTS حداقل شود. لذا در هر بخش یک تابع هدف تعیین می‌گردد.

۳-۱- تابع هدف برای جایابی بهینه‌ی تولیدات پراکنده:

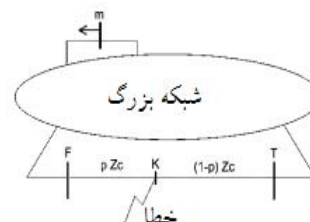
به منظور جایابی بهینه‌ی تولیدات پراکنده، تمامی قیود و اهدافی که در بخش قبل ذکر گردید، در قالب تابع هدف زیر، گنجانده شده اند [۱] :

= (محل، نوع و اندازه) $f =$ هزینه

$$w_e k_e \sum_{k=1}^{N_{sc}} LOSS_k + w_s k_s \sum_{k=1}^{N_F} L_{DIST_i} + w_c k_c \sum_{k=1}^{N_{DG}} P_{DG} + K_{th} \\ \times \sum_{k=1}^{N_{sc}} \delta_{1k} |S_k - S_{kmax}| + K_v \times \sum_{k=1}^{N_{sc}} \delta_{2k} |V_k - V_{kmin/max}|$$

در این تابع تلفات توان اکتیو با ضریب وزنی w_e و ضریب هزینه k_e ، بار مختل شده با ضریب وزنی w_s و ضریب هزینه k_s و هزینه نصب و تعمیرات واحد تولید پراکنده با ضریب وزنی w_c و ضریب هزینه k_c مشخص شده‌اند. در این تابع قیود در قالب دو جمله‌ی انتهایی و با استفاده از دو پرچم δ_k تعریف شده‌اند و در صورتیکه هر یک از این دو قید رعایت نشوند پرچم مربوطه ۱ می‌شود و سبب ضرب شدن یک پارامتر بزرگ (k_v و k_{th}) در آن می‌گردد و

فاز به زمین و در قالب روابط ۱ تا ۵ بیان شده است و روابط کامل برای انواع دیگر خطا در مرجع [۹] توصیف می‌شود. در این روابط ولتاژهای فاز در طی خطا، در باس اتفاقی m مربوط به انواع خطاها در محل k در یک خط (مطابق شکل ۱) فرموله شده است.



شکل ۱: باس حساس m و خطای اتصال کوتاه در خط F-T [۱۰]

خطای تک فاز به زمین

$$V_{A,m}^{fault} = V_{A,m}^{pref} - \frac{Z_{mk}^0 + Z_{mk}^1 + Z_{mk}^2}{Z_{kk}^0 + Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2} V_k^{pref} \quad (1)$$

$$V_{B,m}^{fault} = \alpha^2 V_{A,m}^{pref} - \frac{Z_{mk}^0 + \alpha^2 Z_{mk}^1 + \alpha^2 Z_{mk}^2}{Z_{kk}^0 + Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2} V_k^{pref} \quad (2)$$

$$V_{C,m}^{fault} = \alpha V_{A,m}^{pref} - \frac{Z_{mk}^0 + \alpha Z_{mk}^1 + \alpha^2 Z_{mk}^2}{Z_{kk}^0 + Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2} V_k^{pref} \quad (3)$$

که در این روابط مقادیر Z_{mk}^{012} بر اساس روابط زیر به دست می‌آیند :

$$Z_{mk}^{012} = Z_{mF}^{012} + (Z_{mT}^{012} - Z_{mF}^{012})p \quad (4)$$

و برای Z_{kk}^{012} داریم :

$$Z_{kk}^{012} = (Z_{FF}^{012} + Z_{TT}^{012} - 2Z_{FT}^{012} - Z_c^{012})p^2 + Z_{FF}^{012} \\ + \{Z_c^{012} - 2(Z_{FF}^{012} - Z_{FT}^{012})\}p \quad (5)$$

در این معادلات $V_{A,m}^{pref}$ ولتاژ قبل از خطای باس m در فاز A می‌باشد. Z_{mk}^{012} امپدانس انتقال توالی مربوط به باس k و m می‌باشد. Z_{kk}^{012} امپدانس توالی نقطه‌ی تحریک در k می‌باشد. α عملگر عدد مختلط می‌باشد (e^{j120°).

۳-۲- تابع هدف

همانطور که قبلا ذکر گردید مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی تولیدات پراکنده و ادوات FACTS در این کار با یک هدف حداقل سازی همزمان خطرات فنی و هزینه‌های اقتصادی وارده، قاعده سازی

بدین ترتیب میزان هزینه بسیار زیاد شده و سبب حذف راه حل پیشنهادی حاصل از الگوریتم ژنتیک می شود.

۳-۲- تابع هدف به منظور جایابی بهینه‌ی ادوات FACTS

در این بخش به دنبال تعیین تابع هدف به گونه‌ای هستیم که با استفاده از جایابی بهینه‌ی ادوات FACTS اهداف ذکر شده در بخش قبلی تحویل گردد. در این حالت تابع هدف به صورت زیر تعریف می‌گردد:

= (محل، نوع و اندازه) f = هزینه

$$w_e k_e \sum_{k=1}^{N_{sc}} LOSS_k + w_s k_s \sum_{k=1}^{N_F} L_{DIST_i} + w_c k_c \sum_{k=1}^{N_{FACTS}} S_{FACTS} + K_{th} \times \sum_{k=1}^{N_{sc}} \delta_{1k} |S_k - S_{kmax}| + K_v \times \sum_{k=1}^{N_{sc}} \delta_{2k} |V_k - V_{kmin/max}|$$

پارامترهای به کار رفته در این حالت مشابه حالت قبل تعریف می‌گردند. در این تابع، هزینه عناصر SVC و D-STATCOM بر اساس معادله ۶ محاسبه می‌گردد [۱۶]:

$$C_{STATCOM} = 553 \times (0.0004 \times S_{STATCOM}^2 - 0.3225 \times S_{STATCOM} + 127.38) EMVAr$$

$$C_{SVC} = 553 \times (0.0004 \times S_{STATCOM}^2 - 0.2662 \times S_{STATCOM} + 81.5) EMVAr \quad (6)$$

۴- حل مسئله با به کارگیری الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک^۴ یکی از ابتدایی ترین تکنیک‌های جستجوی تصادفی پیشنهاد شده می‌باشد، که هنوز به طور گسترده برای مسائل چند بعدی، غیر خطی فیزیکی، مسائل بهینه سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۱].

هر طرح الگوریتم ژنتیک با ایجاد تصادفی یک جمعیت اولیه آغاز می‌شود و سپس در هر نسل یک جستجوی دو مرحله‌ای تکرار شونده انجام می‌شود که در آن در مرحله‌ی اول آنها یک تابع تناسب را ارزیابی می‌کنند و سپس در مرحله‌ی دوم یک جمعیت جدید از عوامل با استفاده از طرح های تقاطع و جهش از بخش‌ها مختلف به وجود می‌آید.

⁴ Genetic Algorithm

فرآیند تکرار شونده ادامه می‌یابد تا تابع هدف به اندازه‌ی مطلوب حداقل شود و یا تعداد نسل‌ها به تعداد مطلوب برسد. هر راه حل خاص، در یک طرح الگوریتم ژنتیک کروموزوم نامیده می‌شود. در پایان، کروموزومی که بهترین عملکرد تابع هدف را تولید نموده است به عنوان مناسب ترین فرد در نظر گرفته می‌شود و به عنوان یک راه حل در دسترس برای این مسئله می‌باشد.

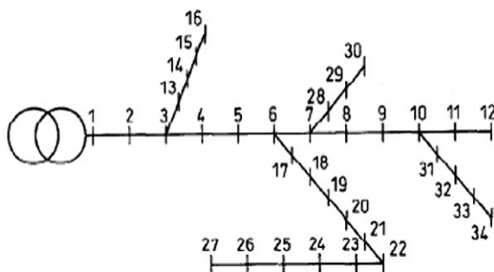
در این مقاله، هر کروموزوم به عنوان یک بردار که در شکل ۲ نشان داده شده، کدگذاری شده است که در آن تعداد واحدهای تولید پراکنده به همراه محل خاص آنها و اندازه‌ی هر کدام کدگذاری شده است. هر واحد تولید پراکنده به صورت بالقوه می‌تواند در هر باسی به جز باس مبنا قرار گیرد. راه حل‌ها بر مبنای الگوریتم ژنتیک تکرار شونده، تلاش می‌کنند بهترین کروموزوم را به دست دهند که در آن تابع هدف حداقل است.

اندازه‌ی توان اکتیو واحد k ام (P_{DGk}) برای $k = 1, \dots, m$	محل L_j (شماره باس) برای $j = 2, \dots, n$
---	--

شکل ۲: کدگذاری کروموزوم در i امین بخش (m شماره‌ی بخش می‌باشد)

۵- مطالعه عددی

در این کار به منظور آزمایش طرح پیشنهادی یک سیستم توزیع ۳۴ باسه مورد استفاده قرار گرفته است. کل طول خطوط موجود در شبکه ۱۳،۵ کیلومتر می‌باشد و دیاگرام تک خطی شبکه در شکل ۳ نشان داده شده است. شبکه شامل محل ۳۴ باس می‌باشد که توسط ۳۳ خط متصل شده‌اند. خطوط انتقال دارای ولتاژ یکسان می‌باشد. جزئیات در باره‌ی امپدانس و داده‌های نامی برای خطوط از مرجع [۱۲] در دسترس می‌باشد. تمامی محاسبات داده‌ها بر حسب پریونیت انجام شده است و مقادیر مبنای انتخاب شده ۱۰۰ مگاوات آمپر و ۱۱ کیلو ولت می‌باشند.

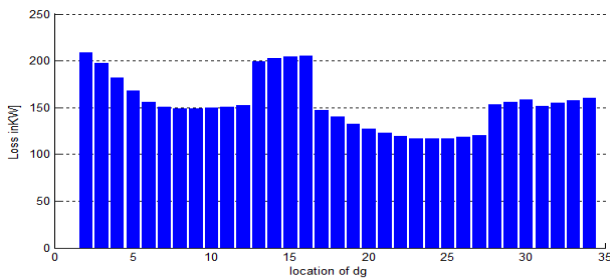


شکل ۳: دیاگرام تک خطی از سیستم توزیع شعاعی ۳۴ باسه در نظر

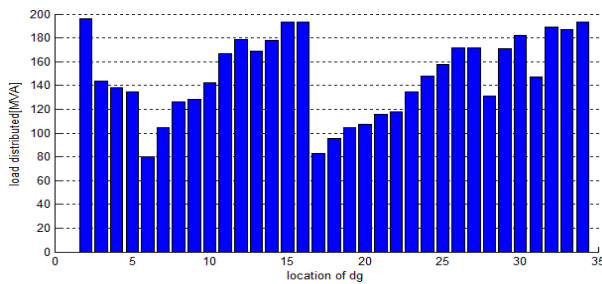
گرفته شده [۱۲]

۵-۱- جایابی بهینه‌ی تولیدات پراکنده

در گام بعدی هدف این است که یک واحد تولید پراکنده با ظرفیت ۱٫۵ مگاوات در در نقاط مختلف سیستم توزیع ذکر شده، به جز باس مینا، قرار داده شود. میزان تلفات و بار مختل شده با تغییر محل این واحد، در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است. این مشاهده می‌شود که تلفات برای جایابی در محل باس ۲۴، حداقل (۱۱۶٫۳۲ کیلووات) شده است در حالی که خروج بار برای جایابی در محل باس ۶، حداقل شده (۷۵٫۸۸ مگاوات آمپر) است.

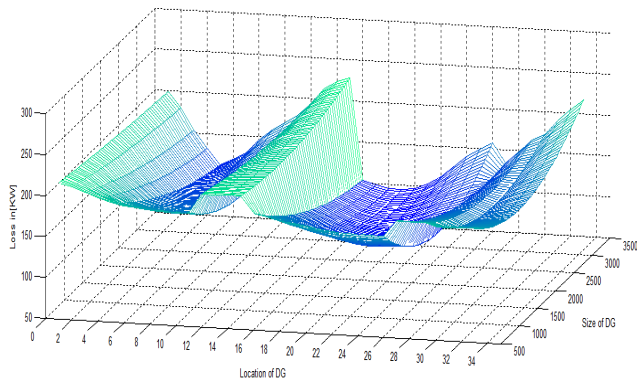


شکل ۶: تغییر تلفات با تغییر محل واحد تولید پراکنده



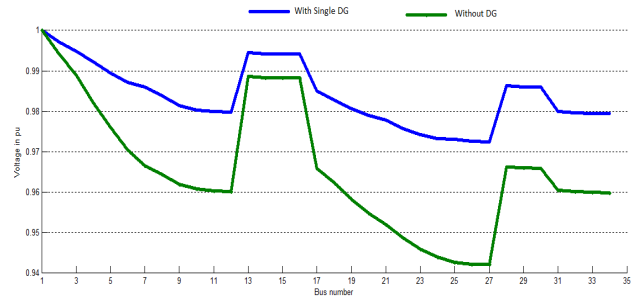
شکل ۷: تغییر بار مختل شده با تغییر محل واحد تولید پراکنده

با تغییر ظرفیت واحد از ۰٫۵ تا ۲٫۱ مگاوات و محل آن از باس ۲ تا ۳۴، تغییرات تلفات سیستم مطابق شکل ۸ می‌باشد. از این نمودار سه بعدی به روشنی برداشت می‌شود که تعداد حداقل برای محل و اندازه‌ی از تولید پراکنده، وجود دارد.



شکل ۸: تغییرات تلفات با تغییر محل و اندازه‌ی واحد تولید پراکنده

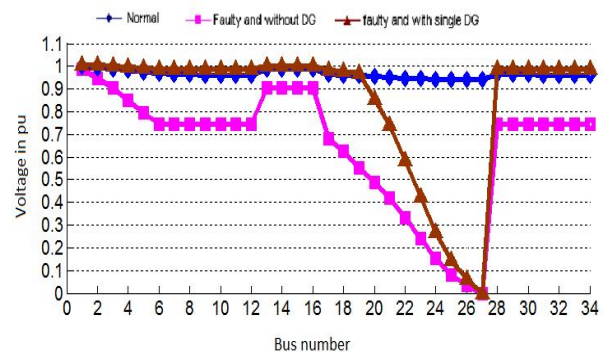
به منظور مشاهده‌ی تاثیر قرار گیری یک واحد تولید پراکنده در شبکه بر پروفیل ولتاژ و در شرایط کار در حالت عادی، یک واحد تولید پراکنده با ظرفیت ۱٫۵ مگاوات در باس ۲۱ نصب شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌کنید سطح ولتاژ در تمام باس‌های شبکه به میزان مناسبی افزایش می‌یابد.



شکل ۴: پروفیل ولتاژ قبل و بعد از نصب واحد تولید پراکنده در باس ۲۱

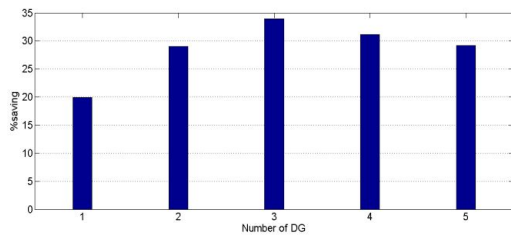
حال هدف این است که با اعمال خطا در نقاط مختلف شبکه و به صورت تصادفی، سطح ولتاژ را در شبکه کاهش داده و سپس به تحلیل و بررسی تاثیر قرار گیری واحدهای تولید پراکنده به منظور بهبود این شرایط پردازیم. جدول ۱ نشان دهنده‌ی انواع مختلف خطا و تعداد آنها می‌باشد.

حال به منظور مشاهده‌ی تاثیر خطا در ولتاژ باس‌های شبکه فرض کنید یک خطای تک فاز به زمین در باس ۲۷ رخ داده است، همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌کنید ولتاژ سایر باس‌های شبکه نیز به شدت افت می‌کند. با نصب یک واحد تولید پراکنده با ظرفیت ۱٫۵ مگاوات در باس ۲۱ پروفیل ولتاژ تا حد قابل قبولی بهبود می‌یابد.



شکل ۵: پروفیل ولتاژ با رخ داد خطا در باس ۲۷ و نصب واحد تولید پراکنده در باس ۲۱

تغییرات در میزان صرفه جویی به صورت نمودار میله‌ای در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

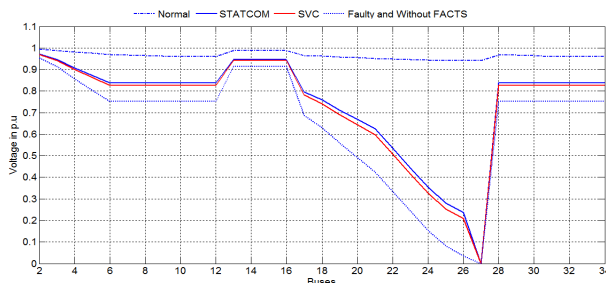


شکل ۱۰: تغییرات در درصد صرفه جویی اقتصادی

۵-۲- جایابی بهینه‌ی ادوات FACTS

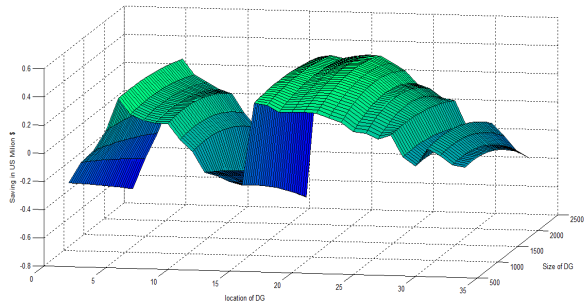
در این بخش هدف این است که در شبکه‌ی توزیع مورد نظر و با توجه به تابع هدف تعیین شده در بخش ۳-۲، همان فرآیند انجام شده در بخش جایابی تولیدات پراکنده با استفاده از ادوات FACTS انجام شود و بدین ترتیب تاثیر قرار گیری واحد تولید پراکنده و ادوات FACTS با یکدیگر مقایسه گردد. از میان ادوات FACTS، SVC و D-STATCOM برای این هدف مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل صورت گرفته به منظور تعیین نقش ادوات FACTS در محاسبات خطا و فروافتادگی ولتاژ به صورت کامل در مرجع [۱۴] و [۱۵] آورده شده است و محاسبات انجام شده در این بخش بر اساس این تحلیل می‌باشد.

حال در قدم اول، مشابه حالتی که برای تولید پراکنده در نظر گرفته شد، فرض کنید یک D-STATCOM با ظرفیت ۰,۰۵ مگاوات و در حالت دیگر یک SVC، با همین ظرفیت در باس ۲۱ قرار گرفته است. خطا در باس ۲۷ رخ داده است و از نوع تک فاز به زمین می‌باشد. در شکل ۱۱ پروفیل ولتاژ را در شرایط عادی و در شرایط خطا با حضور و عدم حضور عناصر FACTS نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود STATCOM نسبت به SVC، در بهبود ولتاژ موثرتر واقع شده است.



شکل ۱۱: مقایسه پروفیل ولتاژ در حالت عادی، رخ داد خطا

در این مسئله، هزینه‌ی واحد تولید پراکنده (K_c) و هزینه‌ی تلفات توان (k_e) به راحتی در دسترس می‌باشند [۱۳]. اما هزینه‌ی بار مختل شده به سیستم واقعی و ساختار بار وابسته می‌باشد و بنابراین ممکن است به راحتی در دسترس نباشد. در چنین وضعیتی، دسترسی به یک فرمولاسیون چند هدفی، راحت‌تر است. به عبارت دیگر، هنگامی که هزینه‌ها به راحتی در دسترس هستند تبدیل یک هدف واحد دارای تاثیر برابر می‌باشد و ممکن است راحت‌تر باشد. بنابراین به تمامی ضرایب وزنی یک مقدار مساوی ۰,۳۳ تخصیص داده شده به گونه‌ای که جمع آنها برابر ۱ می‌باشد. بدین ترتیب با تغییر ظرفیت واحد از ۰,۵ تا ۲,۱ مگاوات و محل آن از باس ۲ تا ۳۴، تغییرات میزان صرفه جویی مطابق شکل ۹ می‌باشد. به وضوح می‌توان دید که این یک تابع چند مدلی است که شامل بیش از یک نقطه‌ی بهینه است.



شکل ۹: تغییرات هزینه با تغییر محل و اندازه‌ی واحد تولید پراکنده

حال چنانچه تعداد واحدهای تولید پراکنده را بیش از یک واحد در نظر بگیریم، مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی تولیدات پراکنده با استفاده از الگوریتم ژنتیک به نتایج مندرج در جدول ۲ منتج می‌شود. از این داده‌ها به روشنی می‌توان دریافت بیشترین صرفه جویی اقتصادی هنگامی حاصل می‌شود که سه واحد تولید پراکنده و در باس‌های ۱۰، ۱۸ و ۲۳ و به ترتیب با ظرفیت‌های ۶۰۰، ۵۵۰ و ۱۰۰۰ کیلووات قرار گرفته‌اند.

جدول ۲: عملکرد مسئله‌ی جایابی بهینه‌ی تولیدات پراکنده

تعداد	محل (شماره‌ی باس)	اندازه‌ی واحد تولید پراکنده (مگاوات)	صرفه جویی اقتصادی بر حسب درصد
۱	۲۲	۱,۵	۱۹,۹۵
۲	۲۲ ۱۷	۰,۵۵ ۰,۸۵	۲۹,۰۵
۳	۱۰ ۱۸ ۲۳	۰,۶ ۰,۵۵ ۱	۳۳,۹۸
۴	۱۱ ۱۹ ۲۵ ۷	۰,۵ ۰,۶ ۰,۵ ۰,۶	۳۱,۱۳
۵	۲۱ ۲۷ ۳۱ ۵ ۱۰	۰,۵ ۰,۶ ۰,۶ ۰,۵ ۰,۵۵	۲۹,۲۱

مشابه حالتی که برای واحدهای تولید پراکنده مورد بررسی قرار گرفت، پس از تعیین تابع هدف نیاز است با به کارگیری یک الگوریتم بهینه سازی تعداد، محل و اندازه‌ی بهینه ادوات FACTS، تعیین شده و بدین ترتیب تلاش گردد تابع هدف مورد نظر حداقل گردد. در این حالت نیز الگوریتم بهینه سازی مورد استفاده، الگوریتم بهینه سازی ژنتیک می‌باشد. در اینجا نیز مشابه بهینه سازی واحدهای تولید پراکنده در هر کروموزوم تعداد و اندازه‌ی بهینه‌ی ادوات FACTS تعیین می‌گردد.

به منظور انجام بهینه سازی فرض شده است تعداد ادوات FACTS حداکثر ۵ واحد باشد و اندازه‌ی این واحدها از ۰,۲۵ تا ۱ مگاوات آمپر راکتیو تغییر نماید. با انجام تحلیل اتصال کوتاه و محاسبه میزان کاهش تلفات از یک سو و هزینه‌ی ادوات FACTS از سوی دیگر، تمامی مولفه‌های تشکیل دهنده‌ی تابع هدف معین گردیده شده است و هزینه‌ی نهایی در دست می‌باشد. این هزینه به ازای قرار گیری D-STATCOM و SVC به ترتیب در جدول ۳ و ۴، نشان داده شده است.

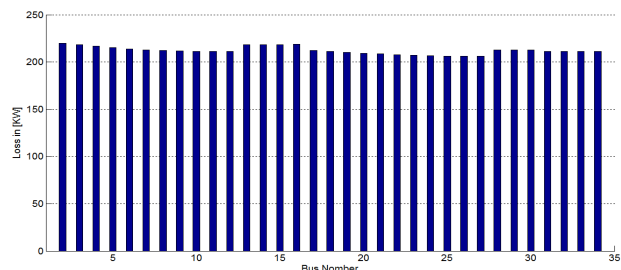
جدول ۳: نتایج بهینه سازی به منظور جایابی بهینه ی D-STATCOM

تعداد	محل (شماره‌ی باس)	اندازه‌ی D-STATCOM (مگاوات آمپر راکتیو)	صرفه جویی اقتصادی بر حسب درصد
۱	۶	۰,۹۷	۲۲,۸۴
۲	۶ ۱۸	۰,۰۵ ۰,۹۵	۲۳,۷۹
۳	۸ ۱۶ ۲۲	۰,۲۶ ۰,۴۷ ۰,۱۶	۲۴,۷۵
۴	۶ ۸ ۱۹ ۳۰	۰,۱۲ ۰,۷۵ ۰,۴۷ ۰,۹۲	۲۳,۰۴
۵	۲۱ ۲۷ ۳۲ ۷ ۱۰	۰,۴۱ ۰,۱۶ ۰,۸۷ ۰,۱۴ ۰,۵۵	۲۰,۹۲

جدول ۴: نتایج بهینه سازی به منظور جایابی بهینه ی SVC

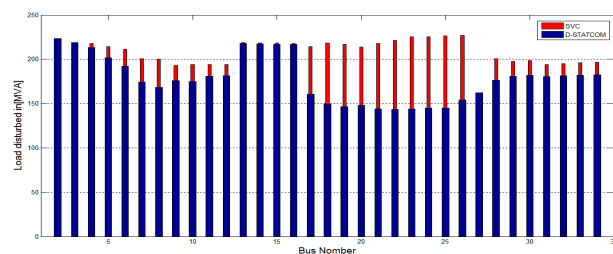
تعداد	محل (شماره‌ی باس)	اندازه‌ی SVC (مگاوات آمپر راکتیو)	صرفه جویی اقتصادی بر حسب درصد
۱	۱۷	۰,۴۶	۱۲,۴۴
۲	۶ ۱۸	۰,۳۶ ۰,۴۷	۱۴,۷۵
۳	۷ ۱۳ ۱۸	۰,۲۰ ۰,۴۷ ۰,۱۶	۱۷,۸۷
۴	۷ ۱۵ ۱۷ ۳۰	۰,۴۰ ۰,۳۱ ۰,۰۴ ۰,۳۲	۱۶,۷۴
۵	۱۶ ۲۰ ۲۸ ۶ ۱۰	۰,۱ ۰,۱۶ ۰,۲۸ ۰,۴۵ ۰,۵۰	۱۵,۹۲

در ادامه هدف این است که در شبکه‌ی توزیع نمونه ذکر شده، به بررسی تاثیر ادوات FACTS، بر کاهش تلفات سیستم و بار مختل شده پرداخته شود. بدین منظور یک واحد D-STATCOM با ظرفیت ۰,۲۵ مگاوات آمپر راکتیو در تمامی باس های شبکه، به جز باس مینا، قرار داده می‌شود. همانطور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌گردد واحد تولید پراکنده در باس ۲ تا ۳۴ جایابی شده است و کمترین میزان تلفات مربوط به باس ۲۶ می‌باشد که در این باس تلفات ۲۰۶,۱۲۴ کیلووات می‌باشد.



شکل ۱۲: تغییرات تلفات بر حسب تغییر محل عنصر FACTS

به منظور بررسی تاثیر ادوات FACTS بر میزان بار مختل شده فرض بر این است که تعداد ۵۷ خطا با تعداد و نوع مشابه حالت استفاده از واحدهای تولید پراکنده، در شبکه مورد مطالعه رخ دهد. حال یک واحد D-STATCOM با ظرفیت ۰,۲۵ مگاوات آمپر راکتیو در نقاط مختلف سیستم توزیع ذکر شده، به جز باس مینا، جایابی شده است. این فرآیند برای یک واحد SVC با ظرفیت مشابه صورت گرفته و نتایج حاصله در دو حالت در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود خروج بار برای جایابی D-STATCOM در محل باس ۲۲ حداقل (۱۴۳,۳ مگاوات آمپر) شده است و برای SVC، بار مختل شده با قرار گیری این واحد در محل باس ۲۷ (۱۶۲,۰۵ مگاوات آمپر) حداقل شده است. چنانچه از این شکل مشاهده می‌گردد، در کاهش میزان بار مختل شده D-STATCOM نقش موثرتری داشته و میزان بار مختل شده را بیشتر کاهش می‌دهد.



شکل ۱۳: مقایسه تغییرات بار مختل شده در حضور SVC و D-STATCOM

[2] O. Alsayegh, and S. Alhajraf, "Grid Connected Renewable Energy Source Systems: Challenges and Proposed Management Schemes," Energy Conversion and Management (Elsevier), Vol. 53, No.8, pp. 1690-1693, 2010.

[3] S. Ramadan, and S. Magdy, "Optimum Siting and Sizing of a Large Distributed Generator in a Mesh Connected System," Electric Power System Research (Elsevier), Vol.80, No. 8, pp. 690-697, 2010.

[4] B. Wang, and V. Giri, "Evaluation of Shunt and Series Power Conditioning Strategies for Feeding Sensitive Loads," in Proc. 19th Annual IEEE Conf. on Applied Power Elec. and Expo (APEC), Anaheim, Feb. 2004.

[5] H. Masdi, And S. Yusuf, "Design of a Prototype D-Statcom for Voltage Sag Mitigation," in Proc. Nat. Power and Energy Conf., pp. 61-66, 2004.

[6] F. Oyj, and F. Oyj :N Kaytohairioutilasto Vuodelta 1998 (Interruption Statistics Of Fingrid Oyj 1998), (In Finnish), Helsinki, 1999.

[7] IEEE Recommended Practice For Evaluating Electric Power System Compatibility With Electronic Process Equipment. IEEE Std. 1346; 1998.

[8] F. Oyj, and F. Oyj :N Kaytohairioutilasto Vuodelta 1998 (Interruption Statistics of Fingrid Oyj 1998), (In Finnish), Helsinki, 1999.

[9] P. Heine, P. Pohjanherimo, and M. Lehtonen, "A Method for Estimating the Frequency And Cost of Voltage Sags," IEEE Trans. Power Sys., pp. 6-290.2002.

[10] E. Goldberg: Genetic Algorithms In Search, Optimization & Machine Learning David. Pearson Education.

[11] M. Chis, M. Salama, S. Jayaram, "Capacitor Placement in Distribution Systems Using Heuristic Search Strategies," in IEE Proc. Generation Transmission Distribution, Vol. 144, No. 3, 1997.

[12] M. Pipattanasomporn, W. Michael, and R. Saifur. "Implications of on-Site Distributed Generation for Commercial/Industrial Facilities," IEEE Trans. Power Syst., pp. 200-206, 2005.

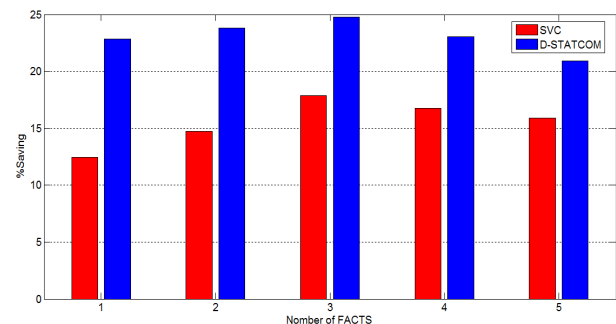
[13] S. Rahimzadeh, and M. T. Bina, "Looking for Optimal Number and Placement of Facts Devices to Manage the Transmission Congestion," Energy Conversion and Management (Elsevier), pp. 426-437, 2011.

[14] A.K. Goswami, and C.P. Gupta, "Minimization Of Voltage Sag Induced financial Losses In Distribution Systems Using FACTS Devices" Electric Power Systems Research, pp 767-774, 2011.

[15] J. V. Milanovic, Y. Zhang, "Modeling of Facts Devices for Voltage Sag Mitigation Studies in Large Power Systems," IEEE Trans. on Power Del., Vol. 25, No. 4, Oct. 2010.

[16] J. V. Milanovic, and Y. Zhang, "Global Minimization of Financial Losses Due to Voltage Sags with Facts Based Devices," IEEE Trans. on Power Del., Vol. 25, No. 1, Jan. 2010.

از آنجا که تشکیل جمعیت اولیه با یک فرآیند تصادفی آغاز می گردد، لذا در صورت اجرای دوباره شبیه سازی نتایج تا حد اندکی تغییر می کند اما چنانچه از این دو جدول می توان مشاهده نمود در هر دو حالت به ازای استفاده از سه واحد FACTS سود حداکثر شده و همچنین D-STATCOM نسبت به SVC به میزان بیشتری صرفه جویی اقتصادی حاصل می نماید. تغییرات صرفه جویی اقتصادی بر حسب تغییر تعداد واحدهای FACTS در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴: تغییرات درصد صرفه جویی اقتصادی

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک فرمولاسیون به منظور جایابی بهینه واحدهای تولید پراکنده و ادوات FACTS بیان شد. در این راستا یک تابع هدف که در بردارندهی ملاحظات فنی و اقتصادی و همچنین قیود بهره برداری می باشد، پیشنهاد شد و با به کارگیری الگوریتم ژنتیک به منظور تعیین محل و اندازهی بهینه هر عنصر، راه حل مناسب در هر بخش معین گردید. شبیه سازی های صورت گرفته بر روی یک شبکهی توزیع نمونه نشان می دهد که به دلیل بالا بودن هزینهی نصب عناصر FACTS و تاثیر کم تر آنها بر روی تلفات شبکه و بار مختل شده، این عناصر دارای کارایی اقتصادی و فنی پایین تری نسبت به تولیدات پراکنده می باشند. در نهایت بهبود حاصل شده در این شبکه نمونه، موید این حقیقت است که سیستم توزیع با ولتاژ پایین سیستمی مناسب برای قرار گرفتن واحدهای تولید پراکنده می باشد.

مراجع

[1] S. Biswas, and S. K. Goswami, "Optimum Distributed Generation Placement with Voltage Sag Effect Minimization", Energy Conversion and Management (Elsevier), Vol. 53, pp. 163-174, 2012.