

Reactive Power Planning Using Optimal Placement & Control of DSTATCOM in a DG Integrated Industrial System

Shahriyar Midavoodi¹, Eskandar Gholipour², Seyed Mohammad Madani³

¹ Dept. of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Dept. of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

³ Dept. of Electrical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract :

The presence of DG units in existing networks compared with conventional generators has created challenges. Hence, network standards make limitations. For this purpose, network standards do not allow the small DG, function properly in Low-Voltage Ride Through (LVRT). and in the presence of a fault, they will be disconnected from the network. Due to the fact that, lack of sufficient reactive power in the network will lead to slow voltage recovery, fault fixation and consequently disconnection of DGs from the network happens. This paper represents a method for optimal placement of capacitors and DSTATCOM in industrial distributing networks in the presence of DGs to provide reactive power required by the network in the steady state and providing dynamic reactive power (transient), and eventually helps combining DGs with network by considering authorized network restrictions. While, considering the high price of Custom Power such as DSTATCOM, it is required to implement efficient methods to use them in the network. As a result, the present paper proposes a method in order to determine DSTATCOM control parameters with the aim of fast voltage recovering, in order to obtain thorough economic benefits.

Keywords: Reactive Power Planning, STATCOM, Distributed Generation, Low Voltage Ride Through, Recovery Voltage, optimal Placement.

برنامه‌ریزی توان رآکتیو به همراه جایابی بهینه و کنترل DSTATCOM در

شبکه‌های توزیع صنعتی در حضور تولیدات پراکنده

شهریار میداودی^۱، اسکندر قلی‌پور^{۲*}، سیدمحمد مدنی^۳

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

sh.midavoodi@gmail.com

۲- دانشیار، گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

e.gholipour@eng.ui.ac.ir

۳- دانشیار، گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران

m.madani@eng.ui.ac.ir

چکیده: نفوذ واحدهای DG در مقایسه با ژنراتورهای متداول، چالش‌هایی را در شبکه‌های موجود به وجود آورده است؛ بنابراین استانداردهای شبکه برای ترکیب بدون عیب DGها با شبکه، محدودیت‌هایی را اعمال می‌کنند. بر همین اساس، استانداردهای شبکه اجازه عملکرد به DGهای کوچک در شرایط افت ولتاژ (LVRT) را نمی‌دهند و در هنگام وقوع خطا، آنها را از شبکه قطع (خارج) می‌کنند؛ بنابراین با توجه به اینکه تأمین‌نشدن توان رآکتیو کافی در شبکه به بازیابی آهسته ولتاژ پس از رفع خطا و در نتیجه، خروج DGها از شبکه منجر می‌شود، در این مقاله روشی برای جایابی بهینه خازن‌ها و DSTATCOM در شبکه‌های توزیع صنعتی در حضور DGها ارائه شده است تا بتوان با تأمین توان رآکتیو مورد نیاز شبکه در حالت دائمی و تأمین دینامیکی توان رآکتیو (گذرا) و در نهایت، رعایت محدودیت‌های مجاز شبکه، به ترکیب DGها با شبکه کمک کرد. از طرف دیگر، با توجه به اینکه ادوات Custom Power همچون DSTATCOM معمولاً گزینه‌ای گران قیمت به شمار می‌آیند، لزوم به‌کارگیری روش‌هایی برای استفاده بهینه از آنها در شبکه احساس می‌شود. در این مقاله به منظور بهره‌وری کامل (اقتصادی)، روشی جدید برای تعیین پارامترهای کنترل‌کننده DSTATCOM، با هدف بازیابی سریع‌تر ولتاژ ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی توان رآکتیو، جبران‌کننده استاتیک سنکرون، تولید پراکنده، شرایط افت ولتاژ، بازیابی ولتاژ، جایابی

بهینه

زیست محیطی، به استفاده گسترده از تولیدات پراکنده (DG) در شبکه‌های توزیع منجر شده است. با توجه به اینکه این تولیدات معمولاً نزدیک به مراکز مصرف نصب می‌شوند، به انتقال انرژی الکتریکی خروجی آنها در مسافت‌های طولانی نیاز نیست. همچنین، هزینه تولید انرژی الکتریکی از این واحدها در برخی از ساعات روز نسبت به انرژی الکتریکی تحویلی از شبکه بالادست کمتر است. این مسائل باعث شده است تا تولیدات پراکنده انتخاب مناسبی برای تولید و پاسخ‌گویی به افزایش تقاضای مصرف‌کنندگان شود. همچنین به‌کارگیری واحدهای DG فواید دیگری

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر افزایش روزافزون بارهای شبکه (خصوصاً بارهای صنعتی) و نگرانی‌های تجاری و

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۰۴

نام نویسنده مسئول: اسکندر قلی‌پور

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - دانشگاه اصفهان - دانشکده فنی و مهندسی - گروه برق

احساس می‌شود؛ بنابراین با توجه به امکان حضور چندین واحد DG در شبکه، بحث جایابی بهینه مطرح می‌شود [۹]. در چند دهه گذشته روش‌های تحلیلی به‌عنوان شیوه حل مسئله جایابی بهینه استفاده می‌شوند. در روش‌های مذکور متخصصان با توجه به پیچیدگی موجود در حل مسئله، ناچار به در نظر گرفتن فرضیاتی برای ساده‌سازی مسئله بودند که این امر باعث پاسخ مناسب و دقیق نمی‌شد. با گذشت زمان و پیشرفت سرعت و کارایی کامپیوترهای دیجیتال، حل مسئله فوق با روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی شایان توجه قرار گرفت؛ به‌طور مثال در [۱۰] برای جایابی بهینه DSTATCOM، STATCOM که در شبکه‌های توزیع و با هدف کاهش تلفات در شبکه توزیع شعاعی از الگوریتم‌های ژنتیک و سیستم ایمنی استفاده شده است، نتایج شبیه‌سازی توانایی الگوریتم سیستم ایمنی را در ارائه پاسخ بهتر نشان می‌دهند. همچنین در [۱۱] جایابی بهینه DSTATCOM و DGها به‌طور همزمان و به‌منظور کاهش تلفات شبکه، با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات انجام شده است. مطابق با تحقیقات انجام‌شده عمدتاً جایابی بهینه DSTATCOM با هدف بهبود شاخص‌های حالت دائمی شبکه بوده و تأثیر آن بر بهبود شاخص‌های گذرای شبکه همچون بازیابی ولتاژ پس از رفع خطا مدنظر نبوده است. از طرف دیگر، با توجه به زمان‌بر بودن و پیچیدگی موجود در حل مسئله جایابی و در نتیجه، ناتوانایی روش‌های تحلیلی در ارائه پاسخ بهینه، امروزه معمولاً از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند برای حل مسئله جایابی بهینه DSTATCOM در شبکه‌های توزیع استفاده می‌شود [۱۲، ۱۳].

در این مقاله روشی برای جایابی بهینه خازن‌ها و DSTATCOM در شبکه‌های توزیع صنعتی در حضور DGها ارائه شده است. هدف از این جایابی، تأمین توان رآکتیو در حالت دائمی و تأمین دینامیکی توان رآکتیو برای بهبود بازیابی ولتاژ گذرا پس از رفع خطا و کمک به در مدار ماندن DGها در شرایط افت ولتاژ است. همچنین برای بهره‌وری کامل (اقتصادی)، روشی جدید به‌منظور تعیین پارامترهای کنترل‌کننده DSTATCOM و با هدف بازیابی سریع‌تر ولتاژ محل اتصال DG با شبکه ارائه شده است.

همچون کاهش تلفات شبکه، افزایش سطح قابلیت اطمینان و امنیت شبکه را به همراه داشته است؛ البته هرچند روزبه‌روز استفاده از منابع تولید پراکنده (به‌ویژه انرژی‌های تجدیدپذیر از نوع توربین‌های بادی) در سیستم‌های توزیع رو به افزایش است، این بهره‌گیری‌ها، قیود و محدودیت‌های خاص خود را نیز به همراه دارد. در همین زمینه نفوذ واحدهای DG در شبکه‌های موجود در مقایسه با ژنراتورهای متداول چالش‌هایی همچون پیچیدگی شبکه و در نتیجه، توسعه سیستم حفاظت شبکه، مشکل کردن کنترل و بهره‌برداری از شبکه را به وجود آورده است؛ بنابراین، استانداردهای شبکه مجموعه‌ای از محدودیت‌ها را ارائه می‌دهند تا به DGهای تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر اجازه ترکیب بی‌نقص با شبکه را بدهند [۱، ۲]. بیشتر این استانداردها به‌ازای کارکرد DGها در دو حالت دائمی و گذرای شبکه تعریف می‌شوند. با توجه به اینکه برخی از DGها همچون توربین‌های بادی به ولتاژ محل اتصال خود با شبکه (PCC) حساس‌اند [۲، ۳]، بیشتر اپراتورهای شبکه به واحدهای کوچک DG (کمتر از ۳۰ MW) اجازه عملکرد در شرایط افت ولتاژ (LVRT) را نمی‌دهند؛ بنابراین در هنگام خطا این واحدها از شبکه خارج (قطع) می‌شوند و اصطلاحاً به آنها اجازه فعالیت در حالت کنترل ولتاژ داده نمی‌شود. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهند ادوات FACTS همچون SVC^۵ و STATCOM^۶ با تأمین دینامیکی توان رآکتیو در زمان خطا و در نتیجه، بازیابی سریع‌تر ولتاژ محل اتصال DG با شبکه، به بهبود عملکرد DGها در شبکه و در نهایت، ترکیب بی‌نقص آنها با شبکه توزیع کمک می‌کنند [۴، ۵]. در میان گزینه‌های مذکور، STATCOM با توجه به توانایی تزریق توان رآکتیو در ولتاژهای پایین (هنگام وقوع خطا) گزینه مناسب‌تری نسبت به SVC محسوب می‌شود [۶، ۷].

مطابق با آنچه گفته شد با قراردادن STATCOM در محل اتصال DG ولتاژ نقطه اتصال به‌طور پیوسته بهبود می‌یابد و به DGها اجازه داده می‌شود تا با بازیابی سریع‌تر ولتاژ پس از رفع خطا، همچنان متصل به شبکه باقی بمانند [۸]. از طرف دیگر، با توجه به اینکه ادوات FACTS معمولاً گزینه‌ای گران‌قیمت به‌شمار می‌آیند، لزوم به‌کارگیری روش‌هایی برای استفاده بهینه از آنها در شبکه

۲-۲- استانداردهای ارائه شده به منظور محدودیت عملکرد تولیدات پراکنده

همان گونه که گفته شد به کارگیری منابع تولید پراکنده در شبکه های توزیع با محدودیت هایی همراه است. به طور معمول این محدودیت ها با استانداردهای شبکه و به ازای کارکرد DG ها در دو حالت دائمی و گذرای شبکه تعریف می شوند؛ برای نمونه در بیشتر منابع تولید پراکنده به خصوص توربین های بادی عملکرد آنها به ازای فعالیت در شرایط دائمی شبکه، به شدت از ولتاژ و فرکانس محل اتصال DG با شبکه تأثیر می گیرند. به همین منظور در [۲] استانداردهایی برای محدوده مجاز تغییرات ولتاژ و فرکانس در حالت دائمی کار شبکه ارائه شده اند. همچنین استانداردهای شبکه، محدودیت هایی را در زمینه تولید و جذب توان رآکتیو توسط منابع تولید پراکنده ارائه می کنند. در همین زمینه، استانداردهای شبکه تنها به واحدهای DG (توربین های بادی) بزرگتر از ۲۰ MW اجازه عملکرد با ضریب قدرت بین ۰/۹۵ تا ۰/۹۵ پیش فاز را می دهند [۳] و یا مطابق با استاندارد ارائه شده در [۱۵] واحدهای کوچک DG (کمتر از ۳۰ MW) می باید با ضریب قدرت یک و ۰/۹۵ پیش فاز عمل کنند. مطابق با جدول (۱)، استانداردهای شبکه، محدودیت هایی نیز به منظور کارکرد DG ها در شرایط ولتاژهای غیرطبیعی گذرای شبکه ارائه می کنند؛ به این معنا که در صورت وقوع افت ولتاژ در نقطه اتصال DG با شبکه (ناشی از خطا)، متناسب با دامنه حداکثر ولتاژ، زمانی برای بازیابی ولتاژ تعیین شده است که در صورت رعایت نکردن زمان مجاز می باید DG از مدار خارج شود و اصطلاحاً اجازه عملکرد در شرایط افت ولتاژ به آن داده نمی شود.

جدول (۱): پاسخ DG به ولتاژهای غیرطبیعی [۲]

محدوده ولتاژ (بر حسب درصد)	زمان رفع خطا (بر حسب ثانیه)
$V < 0.95$	۰/۱۶
$0.95 \leq V < 0.98$	۲/۰
$0.98 \leq V < 1.02$	۱/۰
$V \geq 1.02$	۰/۱۶

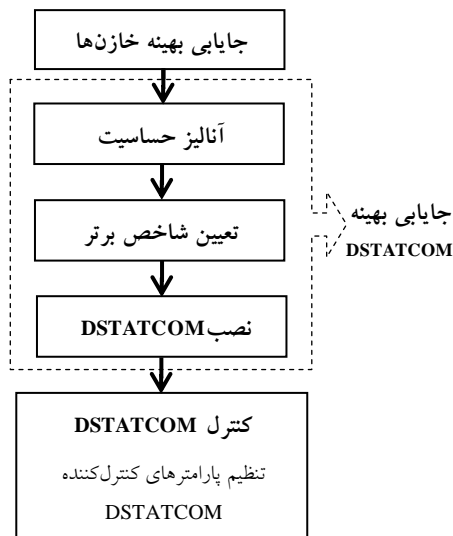
با توجه به شکل (۱)، با تأمین توان رآکتیو مورد نیاز شبکه در حالت دائمی (استاتیکی) و گذرا (تأمین دینامیکی

ساختار این مقاله به شرح زیر است. بخش دوم به شرح مسئله، محدودیت های مجاز شبکه و استانداردهای موجود به منظور عملکرد بی نقص DG ها در شبکه می پردازد. همچنین در این بخش راه حل های ارائه شده برای کمک به فعالیت DG ها در شبکه نیز بررسی شده است. در بخش سوم، روش پیشنهادی به منظور جابجایی بهینه خازن ها و DSTATCOM در نهایت، تنظیم پارامترهای کنترل کننده DSTATCOM بیان شده است. برای ارزیابی ایده پیشنهادی در بخش چهارم، شبیه سازی ها روی شبکه توزیع صنعتی ۴۳ باس IEEE انجام شده است. در نهایت، نتیجه گیری و پیشنهادات برای ادامه کار در بخش پنجم ارائه شده اند.

۲- اتصال تولیدات پراکنده به شبکه

۲-۱- مشکلات حضور تولیدات پراکنده در شبکه

یکی از پرکاربردترین منابع تولید پراکنده در میان سایر منابع، توربین های بادی اند [۱۴]. به همین علت از چندین سال قبل، بررسی رفتار مولدهای بادی در سیستم قدرت به خصوص در سطح توزیع یکی از مباحث مهم متخصصان بوده است. از طرفی، بیشتر مولدهای بادی که تا به امروز در سطح جهان استفاده شده اند، از نوع ژنراتورهای القایی اند^۷ که در آنها میزان توان تبدیل یافته، کاملاً به ولتاژ محل اتصال توربین به شبکه وابسته است؛ در نتیجه، هنگامی که به هر دلیل خطایی در شبکه رخ دهد و سبب افت ولتاژ در محل اتصال شود، تعادل بین گشتاور مکانیکی شافت و گشتاور الکترومغناطیسی ماشین مختل می شود و سرعت ژنراتور روندی صعودی می گیرد. در طول این مدت، ژنراتور القایی توان رآکتیو بیشتری را از شبکه جذب می کند و سبب می شود ولتاژ در محل اتصال، بیشتر افت کند و چنانچه این روند ادامه پیدا کند، باعث فروپاشی ولتاژ و تخریب مبدل توربین می شود؛ بنابراین برای جلوگیری از فروپاشی ولتاژ و آسیب توربین بادی یا به طور کلی DG ها محدودیت هایی در قالب استانداردهای شبکه ارائه می شوند تا آنها را در شرایط افت ولتاژ (خطا) در شبکه باقی نگه دارند.



شکل (۲): فلوچارت کلی برنامه‌ریزی توان رآکتیو

۳-۱- تعریف مسئله جایابی بهینه خازن

همان‌گونه که در بخش دوم بیان شد معمولاً منابع تولید پراکنده در ضریب قدرت نزدیک به واحد کار می‌کنند؛ در نتیجه، توان رآکتیو مورد نیاز بارها از شبکه بالادست تأمین می‌شود و این امر موجب افزایش تلفات توان و اشغال ظرفیت خطوط و ترانسفورماتورها می‌شود؛ بنابراین برای تأمین توان رآکتیو مورد نیاز شبکه، یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها استفاده از خازن‌های موازی در شبکه‌های توزیع است.

جایابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع عمدتاً با اهداف کاهش تلفات و در نتیجه، آزادسازی ظرفیت خطوط و با حفظ تعدادی قیود انجام می‌گیرد. همان‌گونه که در (۱) مشاهده می‌شود در این مقاله هزینه تلفات شبکه و هزینه خازن‌های به‌کاررفته (با فرض ضرایب وزنی برابر)، تابع هدف در نظر گرفته شده است. همچنین طبق معادله‌های (۲) و (۳) در حل این مسئله، ولتاژ باس‌ها و قدرت خازن‌های نصب‌شده در شبکه، قیود مطرح‌شده‌اند.

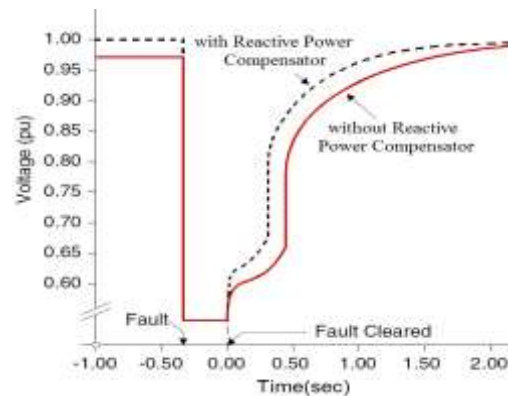
$$\text{Min} F = \sum_{i=1}^I C_i(q_i) + K \times \sum_{j=1}^L \text{Ploss}_j \times T_j \quad (1)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (2)$$

$$q_i^{\min} \leq q_i \leq q_i^{\max} \quad (3)$$

که در آن:

توان رآکتیو) به بهبود پروفیل ولتاژ در حالت ماندگار و بازیابی هرچه سریع‌تر ولتاژ در باس DG پس از رفع خطا کمک می‌شود و در نتیجه با رعایت استانداردهای ارائه‌شده، از قطع DGها از شبکه، جلوگیری و در نهایت به ترکیب بدون عیب آنها با شبکه منجر می‌شود.



شکل (۱): ولتاژ باس DG در شرایط وقوع خطا

۳- روش پیشنهادی

در این مقاله برای تأمین توان رآکتیو استاتیکی و با توجه به مسائل اقتصادی (به‌ازای کارکرد دائمی شبکه) از ترکیب خازن و DSTATCOM استفاده شده است. همچنین نصب مناسب DSTATCOM علاوه بر تأمین استاتیکی توان رآکتیو در حالت دائمی با تأمین دینامیکی توان رآکتیو (گذرا) به بهبود بازیابی ولتاژ در باس DGها پس از رفع خطا کمک می‌کند. همان‌گونه که گفته شد به‌کارگیری DSTATCOM در شبکه، مزایای زیاد دیگری نیز به همراه دارد؛ با این حال در به‌کارگیری خازن و DSTATCOM در شبکه می‌باید اصول بهینه‌سازی رعایت شوند؛ در غیر این صورت استفاده از این ادوات مشمول هزینه‌های زیادی خواهد شد. به همین منظور بحث جایابی بهینه خازن‌ها و DSTATCOM و کنترل (تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده) آن مطرح می‌شوند که هر یک به‌طور مفصل در بخش‌های بعد شرح داده شده‌اند. شکل (۲) فلوچارت کلی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

قدرت خازن‌ها در شبکه توزیع صنعتی در حضور DGها استفاده شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) که به نام الگوریتم پرندگان نیز مشهور است، یک خانواده از روش‌های هوش جمعی و یکی از الگوریتم‌های موفق در زمینه بهینه‌سازی پیوسته و گسسته است. این روش بهینه‌سازی اولین بار در سال ۱۹۹۵ و با الهام از رفتار جمعی پرندگان و ماهی‌ها و به‌کارگیری مفاهیم الگوریتم‌های تکاملی معرفی شد [۱۷]. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات مشابه با الگوریتم‌های تکاملی یک الگوریتم جمعیتی بوده است که در آن تعدادی ذره که راه‌حل‌های کاندید یک تابع یا یک مسئله هستند، یک جمعیت (ازدحام) را تشکیل می‌دهند. این ذرات در فضای مسئله حرکت می‌کنند و براساس تجربیات فردی خود و تجربیات جمعی سعی می‌کنند پاسخ بهینه را در فضای جستجو بیابند. عمدتاً این روش از ابعاد و غیرخطی بودن مسئله تأثیر نمی‌گیرد؛ بنابراین معمولاً به ارائه پاسخ‌های مناسب در محیط‌های استاتیک، نویزی و پیوسته قادر نیستند. این ویژگی‌ها علاوه بر سادگی پیاده‌سازی و عدم الزام بر پیوستگی تابع هدف، به استفاده از این الگوریتم در حوزه‌های مختلفی همچون صنعت برق منجر شده است [۱۸].

الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی

بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO) یکی از الگوریتم‌های نسبتاً جدید در حوزه بهینه‌سازی هوشمند است که سیمون در سال ۲۰۰۸ معرفی کرد [۱۹]. در این الگوریتم از چگونگی انتشار گونه‌های جانداران در زیستگاه‌های متعدد الهام گرفته شده است. همچنین الگوی ریاضی ارائه‌شده در این روش، چگونگی مهاجرت گونه‌ها از جزیره‌ای به جزیره دیگر، چگونگی ظهور گونه‌ای جدید و نحوه انقراض یک گونه را تشریح می‌کند. مناطق جغرافیایی مکان مناسب‌تری برای سکونت گونه‌های زیستی اند و شاخص شایستگی زیستی بالاتری (HSI) نیز

qi : قدرت رآکتیو خازن در باس i ام (بر حسب کیلو وار)؛
 Ci : هزینه خازن در باس i ام (بر حسب دلار بر کیلو وار)؛
 K : هزینه تلفات انرژی توان (بر حسب دلار بر کیلو وات ساعت)؛

$Ploss$: تلفات توان (بر حسب کیلو وات)؛

Tj : دوره زمانی j ام (بر حسب ساعت)؛

I : تعداد باس‌هایی که امکان نصب خازن بر آنها وجود دارد؛

L : مجموع دوره‌های زمانی؛

t : تعداد کل باس‌ها.

در نتیجه، تابع فوق بر حسب هزینه (دلار) در سال است.

مسئله مهمی که در ارتباط با هزینه خازن‌ها باید در نظر گرفته شود میزان رشد هزینه سرمایه‌گذاری است؛ زیرا از نظر اقتصادی طرحی پذیرفتنی است که سودآوری آن از هزینه اولیه به اضافه میزان رشد هزینه اولیه بیشتر باشد؛ بنابراین مطابق با معادله (۴) می‌باید هزینه اولیه (که همان هزینه خرید، نصب و تجهیزات جانبی است) در ضریب برگشت سرمایه ضرب شود [۱۶].

$$AC = C \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (4)$$

که در این رابطه:

C : هزینه سرمایه‌گذاری اولیه خازن و تجهیزات جانبی آن؛

AC : هزینه سالیانه خازن‌ها؛

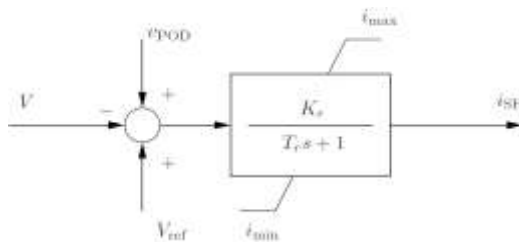
i : میزان سالیانه رشد پول؛

n : عمر طرح (به سال).

۳-۲- الگوریتم‌های بهینه‌سازی

امروزه با توجه به زمان بر بودن و پیچیدگی روش‌های تحلیلی و همچنین وجود پردازنده‌های قدرتمند، معمولاً از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند برای حل مسائل پیچیده علمی استفاده می‌شود. در این مقاله نیز به منظور حل مسئله جایابی بهینه خازن، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)^۸ و بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO)^۹ به عنوان روش‌هایی برای تعیین مکان، تعداد و

نظر گرفتن روش‌هایی برای بهره‌وری کامل از آن، از نظر اقتصادی به صرفه نیست؛ در نتیجه، باید تمهیداتی برای استفاده بهینه از DSTATCOM در نظر گرفته شود. یکی از روش‌های بهینه‌سازی در استفاده از DSTATCOM، کنترل آن برای بهبود عملکرد و بهره‌وری کامل از آن است. با توجه به شکل (۳)، معمولاً DSTATCOM شامل چندین بلوک کنترلی است که برای تنظیم و کنترل پارامترهای خروجی و متناسب با اهداف به‌کارگیری DSTATCOM در شبکه استفاده می‌شود. در این پژوهش، هدف از به‌کارگیری DSTATCOM در شبکه علاوه بر بهبود شاخص‌های حالت دائمی، بهبود بازیابی ولتاژ شبکه پس از رفع خطا است. از طرفی، تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده ولتاژ AC در میان سایر کنترل‌کننده‌ها، بیشترین تأثیر را در بهبود بازیابی ولتاژ دارد؛ بنابراین در این مقاله تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده ولتاژ AC با هدف بازیابی سریع‌تر ولتاژ و با روش‌های هوشمند انجام شده است.



شکل (۳): بلوک دیاگرام کنترلی DSTATCOM [۲۰]

در این بررسی نیز مشابه با سایر مسائل بهینه‌سازی می‌باید ابتدا الگوی ریاضی تابع هدف و قیود مسئله مطرح شوند. به همین منظور و با توجه به هدف به‌کارگیری DSTATCOM در شبکه، انحراف ولتاژ باس DG تابع هدفی است که مطابق با معادله (۵) برای کمینه‌سازی در نظر گرفته شده است؛ در نتیجه، کمینه‌سازی تابع هدف به تعیین بهینه پارامترهای DSTATCOM با هدف بازیابی سریع‌تر ولتاژ منجر می‌شود. به عبارت دیگر، مطابق با شکل (۴)، با کاهش سطح هاشورخورده، پارامترهای DSTATCOM به گونه‌ای تعیین می‌شوند که ولتاژ سریع‌ترین زمان بازیابی را داشته باشد؛ اگرچه در صورتی که انتگرال از قدر مطلق سطح زیر منحنی گرفته نشود، در صورت بروز Overshot

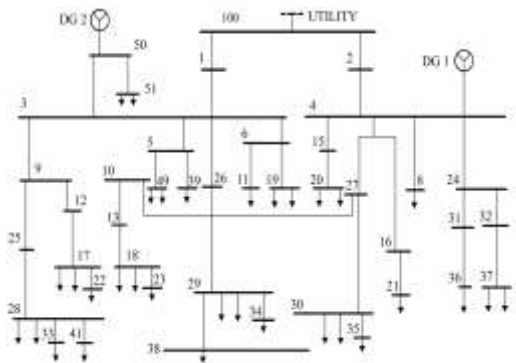
دارند. خصوصیات همچون میزان بارندگی، تراکم پوشش گیاهی، مناطق خشک و دما که با HSI ارتباط دارند، متغیرهای شاخص شایستگی (SIV)^{۱۱} نامیده می‌شوند. به‌طور معمول در پیاده‌سازی این الگوریتم SIVها، متغیرهای مستقل از زیستگاه و HSI متغیر وابسته در نظر گرفته می‌شود. در این روش جزایری با HSI بالا راه‌حل خوب و جزایری با HSI پایین راه‌حل ضعیف منظور می‌شوند. همچنین به اشتراک گذاشتن اطلاعات در الگوریتم مذکور با عمل مهاجرت در میان جانداران توجه می‌شود. در این مقاله از دو الگوریتم اشاره‌شده برای حل مسئله جایابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع صنعتی با حضور DGها استفاده شده است.

۳-۳- آنالیز حساسیت و جایابی DSTATCOM

در این مقاله به منظور جایابی بهینه DSTATCOM از روش آنالیز حساسیت پس از تعیین باس‌های کاندید برای خازن‌گذاری استفاده شده است. به همین منظور پس از جایابی بهینه خازن‌ها و تعیین باس‌های کاندید، آنالیز حساسیت روی باس‌هایی انجام می‌شود که خازن بر آنها نصب شده است. در این بررسی از دو شاخص حساسیت $\Delta V / \Delta I_q$ و $\Delta V / \Delta Q$ استفاده شده است که در آن I_q و Q به ترتیب جریان و توان رآکتیو تزریق‌شده به باس و V دامنه ولتاژ باس مذکورند؛ بنابراین با سباری که بیشترین مقدار حساسیت را داشته باشد، مکان بهینه برای نصب DSTATCOM است. پس از تعیین باس‌هایی با بیش‌ترین مقدار شاخص حساسیت، با قرارداد دادن DSTATCOM در هر دو باس کاندید و بررسی شرایط بازیابی ولتاژ پس از رفع خطا در باس DGها، مکان بهینه و در نتیجه شاخص بهتر تعیین می‌شود.

۳-۴- تنظیم پارامتر کنترل‌کننده DSTATCOM

قابلیت زیاد DSTATCOM در تأمین دینامیکی توان رآکتیو در شرایط افت ولتاژ، به به‌کارگیری آن برای جبران‌سازی توان رآکتیو گذرا پس از رفع خطای شبکه و در نتیجه، بهبود بازیابی ولتاژ منجر شده است؛ اما همان‌گونه که گفته شد به‌کارگیری DSTATCOM در شبکه بدون در



شکل (۵): دیاگرام تک خطی شبکه صنعتی ۴۳ باس IEEE

جدول (۲): مشخصات منابع تولید پراکنده

تولید پراکنده		تولید پراکنده
DG2	DG1	
ژنراتور القایی دوسو تغذیه (DFIG)	ژنراتور سنکرون	نوع
باس ۵۰	باس ۴	مکان (شماره باس)
۱ MVA × ۱ Generators	۱۰ MVA × ۱ Generator	توان (MVA)
۱	۱	ضریب قدرت (P.F)

در این بررسی، واحدهای DG شامل مزرعه بادی با ۱۵ ژنراتور القایی دوسو تغذیه و ژنراتور سنکرون اند. مطابق با استاندارد ارائه شده در [۱۵] واحدهای کوچک DG (کمتر از ۳۰ MW) می باید با ضریب قدرت بین ۰/۹۵ پیش فاز و یک عمل کنند. به همین منظور در این بررسی DGها در ضریب قدرت واحد کار می کنند.

شبیه سازی ها برای جایابی بهینه خازن و تعیین پارامترهای کنترل کننده DSTATCOM (پساده سازی الگوریتم های بهینه سازی) با نرم افزار MATLAB و جعبه ابزار PSAT انجام شده است. همچنین از نرم افزار DigSILENT PowerFactory 14.1 برای ارزیابی دینامیکی استفاده شده است.

در ولتاژ، پاسخ صحیح و بهینه ای حاصل نمی شود. همچنین در این روش، انحراف ولتاژ به صورت نقطه به نقطه کمینه سازی می شود؛ بنابراین، امکان نوسانی شدن ولتاژ نیز وجود ندارد. در این مقاله به منظور حل مسئله مذکور (تعیین پارامترهای DSTATCOM) از الگوریتم های هوشمند PSO و BBO استفاده شده است. همچنین در صورتی که بیش از یک منبع تولید پراکنده در شبکه وجود داشته باشد، باید منبعی که بدترین وضعیت از نظر بازیابی ولتاژ دارد، تابع هدف مسئله در نظر گرفته شود و متناسب با آن ضرایب کنترل کننده DSTATCOM تعیین شوند.

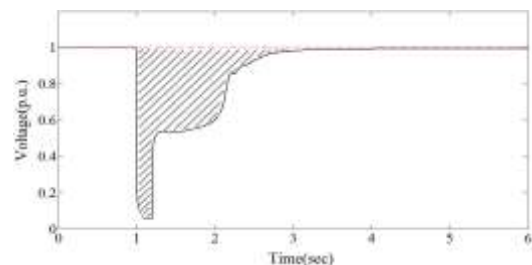
$$MinF = \int_{t_0}^{t_1} |1 - V_{DG}(t)| dt \quad (5)$$

که در آن:

t0: زمان شروع شبیه سازی (برحسب ثانیه)؛

t1: زمان اتمام شبیه سازی (برحسب ثانیه)؛

V_{DG}(t): ولتاژ باس DG (برحسب پریونیت و نسبت به زمان).



شکل (۴): ولتاژ باس DG در شرایط وقوع خطا

۴- نتایج شبیه سازی

۴-۱- شبکه مطالعه شده

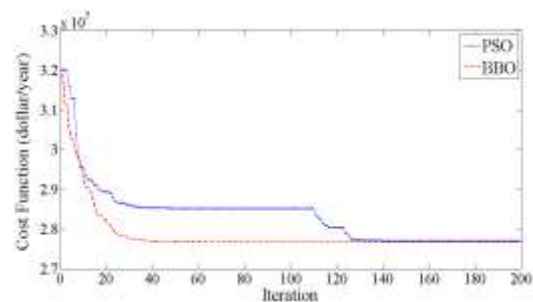
در این بخش به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، شبکه ۴۳ باس توزیع صنعتی IEEE آزموده شد [۲۱]. در این شبکه میزان تقاضا ۲۳/۳ MW و ۱۴/۶۵ MVAR است. با توجه به شکل (۵)، شبکه مطالعه شده شامل ۳۲ بار و دو منبع تولید پراکنده است که در جدول (۲) مشخصات آنها به طور کامل شرح داده شده اند. سیستم مذکور شامل پنج سطح مختلف ولتاژ ۶۹ kV، ۱۳/۸ kV، ۴/۱۶ kV، ۲/۴ kV و ۰/۴۸ kV است.

۴-۲- جایابی بهینه خازن

جدول (۳): مکان، تعداد و ظرفیت خازن‌ها

جایابی بهینه با الگوریتم PSO	جایابی بهینه با الگوریتم BBO	ظرفیت خازن (MVAR)	شماره باس	ظرفیت خازن (MVAR)	شماره باس
		۳	۳	۱/۶	۵
		۰/۳	۶	۰/۶	۱۰
		۰/۳	۹	۱	۱۷
		۰/۸	۱۰	۰/۹	۱۸
		۰/۳	۱۶	۲/۳	۱۹
		۰/۹	۱۷	۲/۲	۲۰
		۲/۲	۱۹	۱/۲	۲۴
		۲/۲	۲۰	۰/۸	۲۶
		۰/۵	۲۱	۰/۸	۲۸
		۰/۶	۲۳	۰/۷	۲۹
		۰/۵	۳۱	۱/۴	۳۶
		۱/۴	۳۶	۰/۶	۳۷
		۰/۶	۳۷	۰/۸	۳۸
		۱/۶	۳۸	۱	۳۹
		۱	۳۹	۱/۳	۴۹
		۱/۳	۴۹	-	-

در شبکه مطالعه شده، حل مسئله جایابی بهینه خازن با الگوریتم‌های PSO و BBO و به منظور تعیین مکان، تعداد و قدرت خازن‌ها انجام شده است. شکل (۶) همگرایی الگوریتم‌های استفاده شده را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی میزان رشد سرمایه ۱۰٪ و عمر طرح ۳۰ سال در نظر گرفته شده است. همچنین هزینه هر کیلووات ساعت تلفات توان ۰/۱ دلار و هزینه هر کیلووات خازن نصب شده ۰/۵ دلار در نظر گرفته شده است. همچنین در پیاده‌سازی هر دو الگوریتم شرایط کاملاً یکسان بوده است. با توجه به شکل (۶)، الگوریتم BBO به ازای ۲۵ تکرار (NFE=۵۸۵۰) به ۹۵٪ مقدار نهایی (پاسخ بهینه) می‌رسد؛ در صورتی که در شرایط مشابه الگوریتم PSO به ازای ۱۲۴ تکرار (NFE=۲۹۰۱۶) به مقدار نهایی بهینه می‌رسد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، الگوریتم PSO نسبت به پاسخ نهایی الگوریتم BBO ۰/۶۲٪ خطا دارد؛ این بدان معناست که حل مسئله خازن‌گذاری با الگوریتم BBO هزینه سرمایه‌گذاری سالانه کمتری (در حدود ۲۶۸ دلار در سال) را نسبت به الگوریتم PSO در پی خواهد داشت.



شکل (۶): نمودار همگرایی الگوریتم‌های PSO و BBO

همان‌گونه که بیان شد جایابی بهینه خازن در این مقاله با هدف کاهش تلفات و با به‌کارگیری حداقل تعداد و قدرت خازن‌ها انجام شده است. به همین منظور، تلفات توان و مجموع قدرت خازن‌های نصب شده در شبکه به ازای حالات مختلف در جدول (۴) نشان داده شده‌اند. خازن‌گذاری در شبکه برای کاهش تلفات طبیعتاً بهبود پروفیل ولتاژ شبکه را نیز به همراه دارد. به همین منظور در شکل (۷) پروفیل ولتاژ شبکه به ازای حالات مختلف رسم شده است. با توجه به شکل (۷)، ولتاژ باس‌های شبکه در حالتی که خازن‌گذاری در شبکه انجام شده است، به صورت چشمگیری بهبود یافته‌اند. مطابق با شکل (۸)، پروفیل ولتاژ باس‌ها به ازای خازن‌گذاری با هر دو الگوریتم، در محدوده مجاز تعریف شده است؛ اما با توجه به مقادیر گزارش شده در جدول (۴)، الگوریتم BBO پاسخ مناسب‌تری برای تعیین تعداد، مکان و قدرت خازن‌های مدنظر ارائه می‌کند.

جدول (۳) نتایج جایابی بهینه خازن در شبکه توزیع ۴۳ باس با دو الگوریتم PSO و BBO را نشان می‌دهد. در این جدول مکان، تعداد و ظرفیت خازن‌ها برحسب MVAR تعیین شده‌اند.

جدول (۴): تلفات توان اکتیو و راکتیو و مجموع خازن‌های نصب‌شده در شبکه

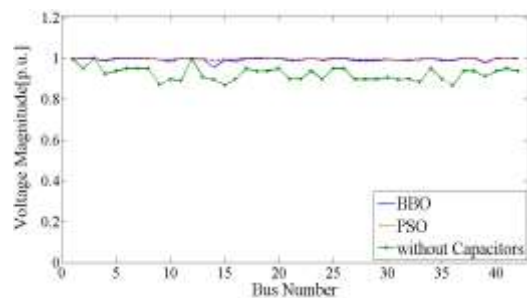
ظرفیت خازن‌های جبران‌ساز (MVAR)	تلفات توان راکتیو (Qloss) (MVAR)	تلفات توان اکتیو (Ploss) (MW)	وضعیت خازن‌گذاری
۰	۴/۷۹۵	۰/۵۳۲۰	بدون حضور خازن‌ها
۱۷/۵	۲/۸۱۳	۰/۳۱۵۲	با حضور خازن‌ها (جایابی توسط PSO)
۱۷/۲	۲/۸۰۷	۰/۳۱۴۹	با حضور خازن‌ها (جایابی توسط BBO)

۴-۳- آنالیز حساسیت و جایابی بهینه DSTATCOM

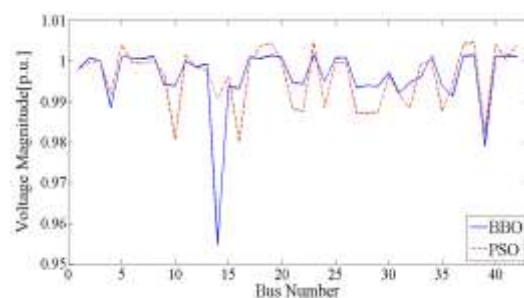
با توجه به ارائه پاسخ مناسب‌تر با الگوریتم BBO در حل مسئله جایابی بهینه خازن‌ها در شبکه، آنالیز حساسیت روی باس‌های کاندیدشده از این الگوریتم برای خازن‌گذاری انجام می‌شود. به همین منظور، مطابق با جدول (۵)، آنالیز حساسیت با دو شاخص $\Delta V/\Delta I_q$ و $\Delta V/\Delta Q$ در باس‌هایی انجام شده که خازن بر روی آنها نصب شده است. پس از انجام بررسی‌ها، باس‌هایی با بیشترین مقدار شاخص حساسیت به‌عنوان مکان مناسب برای نصب DSTATCOM انتخاب می‌شوند؛ برای نمونه در این بررسی، باس‌های ۳۹ و ۳۷ به ترتیب به علت داشتن بیشترین مقدار شاخص حساسیت $\Delta V/\Delta I_q$ و $\Delta V/\Delta Q$ به‌عنوان باس‌های کاندید به‌منظور نصب DSTATCOM انتخاب شده‌اند. در بخش بعد برای تعیین باس بهینه و در نتیجه، شاخص برتر برای بازیابی سریع‌تر ولتاژ در باس DGها، شبیه‌سازی‌های دینامیکی در حوزه زمان انجام شده‌اند.

جدول (۵): آنالیز حساسیت

شماره باس	ظرفیت خازن (MVAR)	شاخص حساسیت	
		$\Delta V/\Delta Q$ (Vpu/MVAR)	$\Delta V/\Delta I_q$ (Vpu/Ipu)
۵	۱/۶	۰/۹۹۶	۰/۰۰۶
۱۰	۰/۶	۱/۰۰۲	۰/۰۰۶
۱۷	۱	۱/۰۰۱	۰/۰۴۸
۱۸	۰/۹	۱/۰۰۷	۰/۰۴۳
۱۹	۲/۳	۱/۰۰۰	۰/۰۲۱
۲۰	۲/۲	۱/۰۰۳	۰/۰۲۰
۲۴	۱/۲	۱/۰۰۱	۰/۰۰۶
۲۶	۰/۸	۰/۹۹۷	۰/۰۰۶
۲۸	۰/۸	۱/۰۰۱	۰/۰۴۴
۲۹	۰/۷	۱/۰۰۰	۰/۰۴۲
۳۶	۱/۴	۱/۰۰۵	۰/۰۲۷
۳۷	۰/۶	۱/۰۱۰	۰/۰۵۸
۳۸	۰/۸	۱/۰۰۱	۰/۰۵۰
۳۹	۱	۱/۱۲۳	۰/۰۱۰
۴۹	۱/۳	۱/۰۰۵	۰/۰۳۹



شکل (۷): پروفیل ولتاژ شبکه در حالات مختلف



شکل (۸): پروفیل ولتاژ شبکه به‌ازای خازن‌گذاری با دو الگوریتم

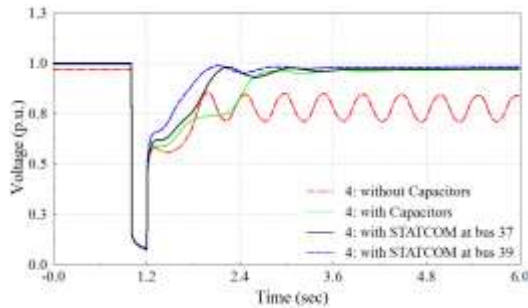
در یک بررسی اقتصادی، سود سالیانه کاهش تلفات توان به‌وسیله خازن‌گذاری در شبکه با الگوریتم PSO، ۱۸۸۹۸۸/۶ دلار در سال و به‌ازای الگوریتم BBO سالیانه ۱۸۹۲۵۶/۸ دلار است؛ بنابراین مطابق با نتایج حاصله،

۴-۴- تأثیر جایابی بهینه بر بازیابی ولتاژ

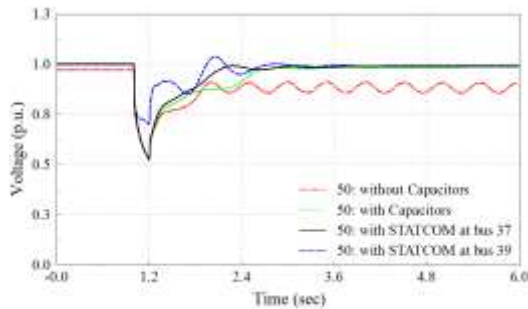
در این بخش برای تعیین شاخص حساسیت برتر و یافتن مکان بهینه به منظور نصب DSTATCOM دو خطا در مکان‌های مختلف اعمال شده است که مشخصات آنها به‌طور کامل در جدول (۶) مشاهده می‌شوند. هدف از اعمال خطا، تعیین تأثیر جایابی بهینه DSTATCOM (شاخص حساسیت بهتر) بر بازیابی سریع‌تر ولتاژ در باس DGها و جلوگیری از قطع آنها در هنگام خطا است.

جدول (۶): مشخصات خطا

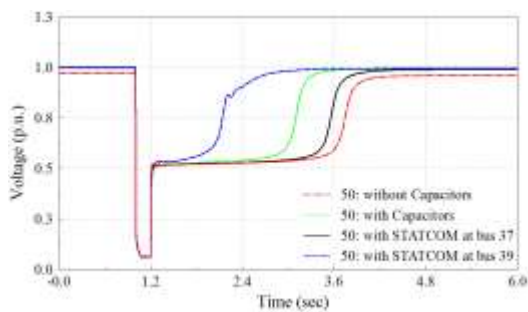
نام خطا	خطای ۱ (F1)	خطای ۲ (F2)
نوع خطا	خطای سه‌فاز	خطای سه‌فاز
مکان (شماره باس)	باس ۳۱	باس ۹
نزدیک‌ترین امپدانس (Ω)	DG1 (در باس ۴)	DG2 (در باس ۵۰)
زمان رفع خطا	۰+ج۰/۱	۰+ج۰/۱
	۱۰ سیکل	۱۰ سیکل



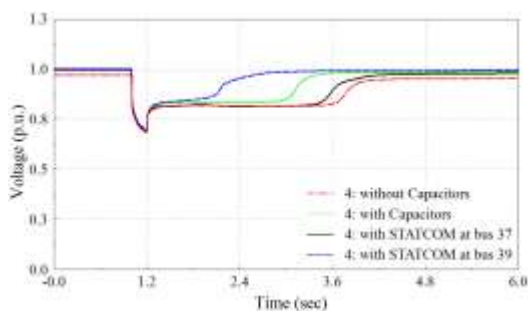
شکل (۹): ولتاژ باس ۴ (DG1) به‌ازای خطای F1



شکل (۱۰): ولتاژ باس ۵۰ (DG2) به‌ازای خطای F1



شکل (۱۱): ولتاژ باس ۵۰ (DG2) به‌ازای خطای F2



شکل (۱۲): ولتاژ باس ۴ (DG1) به‌ازای خطای F2

شبیه‌سازی‌ها به‌ازای اعمال خطای سه‌فاز در باس ۳۱ (نزدیک به DG1) و خطای سه‌فاز دیگر در باس ۹ (نزدیک به DG2) انجام شده‌اند. با اعمال خطا، تأثیر جایابی بهینه DSTATCOM به‌ازای هر دو شاخص حساسیت بر بازیابی ولتاژ باس DGها را به‌ازای خطای سه‌فاز در باس ۳۱ نشان می‌دهند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود خازن‌گذاری در شبکه به بهبود ولتاژ در حالت دائمی و بهبود زمان بازیابی ولتاژ پس از رفع خطا منجر شده است. استفاده از DSTATCOM در شبکه مذکور به‌ازای جایابی با هر دو شاخص حساسیت، باعث بهبود زمان بازیابی ولتاژ شده است؛ اگرچه شاخص حساسیت $\Delta V/\Delta I_q$ مکان بهتری برای جایابی بهینه DSTATCOM در شبکه ارائه می‌دهد و به بازیابی سریع‌تر ولتاژ منجر می‌شود.

شکل‌های (۱۱) و (۱۲) ولتاژ باس DGها را به‌ازای خطای سه‌فاز دیگری در باس ۹ نشان می‌دهند. در این حالت نیز حضور خازن‌ها در شبکه به بهبود ولتاژ در حالت دائمی و بازیابی سریع‌تر ولتاژ منجر شده است؛ در صورتی که به‌کارگیری DSTATCOM با جایابی بهینه با شاخص

۴-۵- تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده

DSTATCOM

پس از تعیین مکان بهینه و نصب DSTATCOM، یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها برای بهبود عملکرد و در نتیجه، بهره‌وری کامل و بهینه از DSTATCOM تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده متناسب با هدف به‌کارگیری آن در شبکه است. به همین منظور و با توجه به به‌کارگیری DSTATCOM برای بهبود بازیابی ولتاژ پس از رفع خطا، تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده ولتاژ AC تأثیر به‌سزایی در بهبود عملکرد DSTATCOM دارد؛ بنابراین تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده DSTATCOM، با دو الگوریتم بهینه‌سازی PSO و BBO انجام شده است که در بخش قبل به‌طور کامل شرح داده شد.

همان‌گونه که در بخش سوم بیان شد، در صورت وجود چندین واحد DG در شبکه می‌باید منبعی که وضعیت بدتری از نظر بازیابی ولتاژ (بدترین شرایط) دارد تابع هدف مسئله در نظر گرفته شود و ضرایب کنترل‌کننده متناسب با آن تعیین شوند. به همین منظور و با توجه به مقایسه شکل‌های (۹) و (۱۱)، در این مسئله بدترین زمان بازیابی ولتاژ پس از نصب خازن و DSTATCOM، متعلق به DG2 (و به‌ازای خطای F2) است؛ در نتیجه، مطابق با شکل (۳) در این بهینه‌سازی تعیین بهینه ضرایب کنترل‌کننده (K_r و T_r) با هدف بازیابی سریع‌تر ولتاژ در باس DG2 (به علت داشتن شرایط بدتر از نظر زمان بازیابی ولتاژ) انجام شده است. همچنین با توجه به ناتوانی همگرایی شبیه‌سازی حوزه زمان^{۱۲} و ناپایداری ولتاژ شبکه در صورت تعیین نشدن محدوده برای ضرایب کنترلی، در این بررسی بازه تغییرات ضرایب K_r و T_r به‌ترتیب $0.1 < K_r < 0.99$ و $0.1 < T_r < 0.9$ انتخاب شده‌اند.

با توجه به شکل (۱۳)، اگرچه الگوریتم BBO در مدت زمان (NFE) کمتری به ارائه پاسخ (۹۵٪ مقدار بهینه) قادر است، در یافتن پاسخ بهینه نهایی نسبت به الگوریتم PSO، ۲/۱۲٪ خطا دارد؛ در نتیجه، الگوریتم PSO نسبت به الگوریتم BBO، به ارائه پاسخ بهتری به‌منظور تعیین پارامترهای کنترل‌کننده DSTATCOM قادر است.

با توجه به این مطلب که عمدتاً خازن‌ها برای بهبود شاخص‌های حالت دائمی در شبکه به کار می‌روند، با توجه به نتایج شبیه‌سازی، جایابی بهینه خازن‌ها در شبکه‌های توزیع صنعتی در حضور DGها بر بهبود بازیابی ولتاژ گذرا و در نتیجه، اتصال DGها در زمان خطا (شرایط افت ولتاژ) نیز مؤثرند.

جدول (۷) وضعیت اتصال DGها را در حین خطا نشان می‌دهد. مطابق با نتایج شبیه‌سازی، خازن‌گذاری در شبکه به‌ازای خطای F1 باعث بازیابی سریع‌تر ولتاژ و پایداری شبکه و در نهایت، ترکیب بی‌نقص DGها با شبکه می‌شود. در حالتی که خطای F2 در شبکه رخ می‌دهد، اگرچه خازن‌گذاری زمان بازیابی ولتاژ را پس از خطا بهبود می‌بخشد، مطابق با استانداردهای ارائه‌شده در جدول (۱) به بازیابی ولتاژ در محدوده مجاز و متصل باقی ماندن DG به شبکه منجر می‌شود؛ در حالی که حضور DSTATCOM و جایابی بهینه آن با شاخص حساسیت برتر ($\Delta V / \Delta I_q$) به کاهش چشمگیر زمان بازیابی در هر دو حالت و اتصال بی‌نقص DGها با شبکه منجر می‌شود.

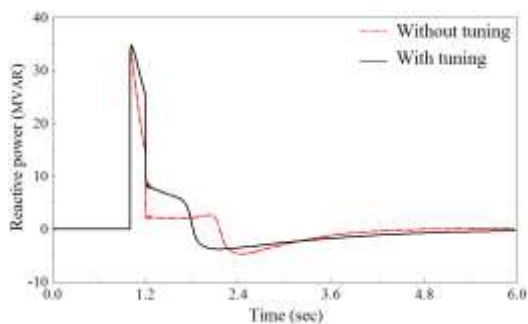
جدول (۷): وضعیت بازیابی ولتاژ و اتصال DGها در حالات

مختلف

وضعیت	بازیابی ولتاژ در باس ۴		بازیابی ولتاژ در باس ۵۰	
	زمان	وضعیت	زمان	وضعیت
بدون حضور خازن و DSTATCOM	∞ (نوسانی)	قطع	۲/۸۳۲	قطع
با حضور خازن و با حضور خازن و DSTATCOM	۱/۴۷۲	وصل	۲/۱۵۰	قطع
باس ۳۷	۰/۹۶۷	وصل	۲/۶۳۲	قطع
باس ۳۹	۰/۷۶۲	وصل	۱/۲۹۷	وصل

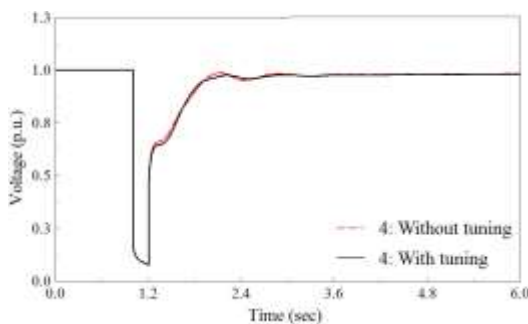
برنامه‌ریزی توان رآکتیو به همراه جایابی بهینه و کنترل DSTATCOM در شبکه‌های ...

شکل (۱۶) توان رآکتیو خروجی DSTATCOM را به‌ازای وقوع خطای F2 و در دو حالت، با تنظیم و بدون تنظیم نشان می‌دهد. در این حالت، تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده بر میزان توان رآکتیو خروجی DSTATCOM تأثیر چندانی ندارد.

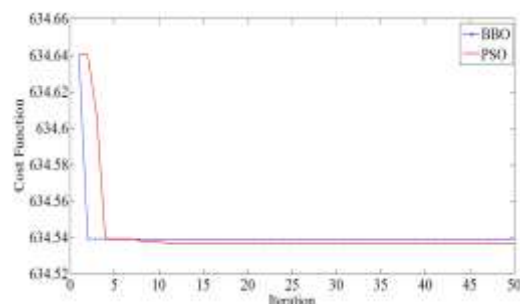


شکل (۱۶): توان رآکتیو خروجی DSTATCOM به‌ازای خطای F2

مطابق با شکل‌های (۱۷) و (۱۸)، در ادامه برای تعیین تأثیر تنظیم بهینه پارامترهای کنترل‌کننده DSTATCOM بر بازیابی ولتاژ به‌ازای حالات (خطاهای) مختلف، وقوع خطای سه‌فاز دیگری در باس ۳۱ (F1) نیز بررسی شده است. در همین زمینه، اگرچه تنظیم پارامتر (بهینه‌سازی) برای بهبود بازیابی ولتاژ باس DG2 و به‌ازای وقوع خطای F2 انجام شده است، با توجه به شکل‌های (۱۷) و (۱۸)، تنظیم پارامتر تا حدودی به بهبود زمان بازیابی ولتاژ پس از رفع خطای F1 نیز منجر می‌شود. از طرفی، مطابق با شکل (۱۸) تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده DSTATCOM در کاهش نوسانات ولتاژ نیز مؤثر است.



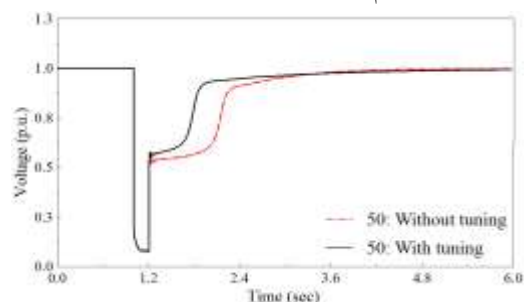
شکل (۱۷): ولتاژ باس ۴ (DG1) به‌ازای خطای F1



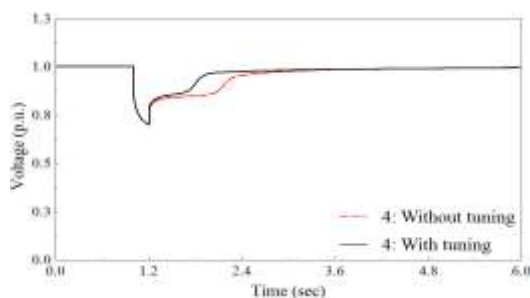
شکل (۱۳): نمودار همگرایی الگوریتم‌های PSO و BBO

۴-۶- تأثیر تنظیم پارامتر بر بهبود زمان بازیابی ولتاژ

با توجه به ارائه پاسخ بهتر الگوریتم PSO در تعیین پارامترهای کنترل‌کننده DSTATCOM، در ادامه برای تعیین میزان تأثیر تنظیم پارامتر بر بازیابی ولتاژ باس DGها پس از رفع خطا از ضرایب تعیین‌شده این الگوریتم (PSO) استفاده شده است. مطابق با شکل‌های (۱۴) و (۱۵)، شبیه‌سازی‌ها به‌ازای دو حالت، با تنظیم پارامتر و بدون تنظیم (تنظیم تجربی) پارامترهای کنترل‌کننده DSTATCOM انجام شده است. همان‌گونه که نتایج شبیه‌سازی به‌ازای وقوع خطای F2 نشان می‌دهد، تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده ولتاژ AC تأثیر چشمگیری در بهبود بازیابی ولتاژ باس هر دو DG پس از رفع خطا نسبت به حالت بدون تنظیم داشته است.



شکل (۱۴): ولتاژ باس ۵۰ (DG2) به‌ازای خطای F2



شکل (۱۵): ولتاژ باس ۴ (DG1) به‌ازای خطای F2

جدول (۸): تأثیر تنظیم پارامترهای DSTATCOM بر بهبود

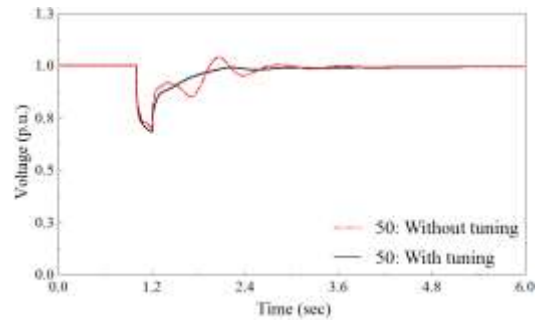
زمان بازیابی ولتاژ

خطای F2		خطای F1		مورد
زمان بازیابی ولتاژ به ازای	زمان بازیابی ولتاژ در	زمان بازیابی ولتاژ در	زمان بازیابی ولتاژ در	
۱/۲۹	۱/۱۱	۰/۷۹	۰/۷۶	بدون تنظیم پارامترهای DSTATCOM
۰/۸۴	۰/۷۲	۰/۳۶	۰/۷۳	با تنظیم پارامترهای DSTATCOM

۵- نتیجه گیری

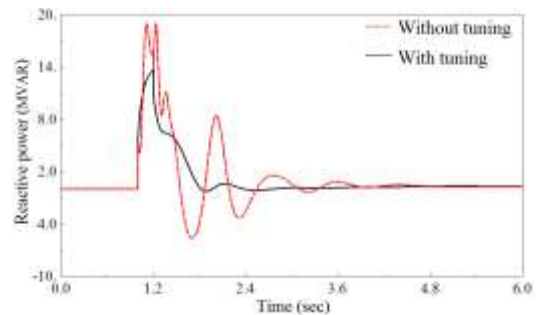
در این مقاله روشی به منظور جایابی بهینه خازن‌ها و DSTATCOM و همچنین تنظیم بهینه پارامترهای کنترل‌کننده آن در شبکه‌های توزیع صنعتی در حضور DGها ارائه شده است. هدف از این بهینه‌سازی، تأمین توان رآکتیو در حالت دائمی و تأمین دینامیکی توان رآکتیو برای بهبود بازیابی ولتاژ گذرا پس از رفع خطا و کمک به اتصال DGها در شرایط افت ولتاژ است. به همین منظور در این بررسی، حل مسئله جایابی بهینه خازن‌ها با الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO) انجام شده است. در ادامه کار و برای جایابی بهینه DSTATCOM از روش آنالیز حساسیت روی باس‌های کاندید با الگوریتم BBO به منظور خازن‌گذاری و با در نظر گرفتن دو شاخص حساسیت $\Delta V/\Delta I_q$ و $\Delta V/\Delta Q$ استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی برتری شاخص $\Delta V/\Delta I_q$ را برای جایابی بهینه DSTATCOM و با هدف کاهش زمان بازیابی نشان می‌دهد.

پس از نصب DSTATCOM در مکان بهینه (مکان تعیین‌شده شاخص $\Delta V/\Delta I_q$) برای بهبود عملکرد DSTATCOM و بهره‌وری کامل و اقتصادی از آن، تنظیم



شکل (۱۸): ولتاژ باس ۵۰ (DG2) به‌ازای خطای F1

توان رآکتیو خروجی DSTATCOM به ازای وقوع خطای F1 در شکل (۱۹) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۱۹) مشاهده می‌شود، تنظیم پارامتر منجر به کاهش میزان توان رآکتیو خروجی DSTATCOM و به عبارتی کاهش اندازه آن می‌شود.



شکل (۱۹): توان رآکتیو خروجی DSTATCOM به‌ازای خطای F1

جدول (۸) به‌طورکلی تأثیر تنظیم پارامتر را بر بهبود زمان بازیابی ولتاژ باس DGها پس از رفع خطای شبکه و در نتیجه، امکان بهره‌وری کامل و بهینه از DSTATCOM نشان می‌دهد. همچنین با توجه به نتایج شبیه‌سازی، عمده‌تاً تنظیم بهینه پارامترهای کنترل‌کننده DSTATCOM به شیوه پیشنهادی علاوه بر بهبود زمان بازیابی ولتاژ پس از رفع خطا به کاهش نوسانات ولتاژ و کاهش توان رآکتیو خروجی DSTATCOM و در نتیجه، کاهش اندازه آن نیز منجر می‌شود.

- applications for grid integration of wind and PV solar power systems: 1995–2010 IEEE working group report", 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, 2011.
- [6] M. Noroozian, N. A. Petersson, B. Thorvaldson, B. A. Nilsson and C. W. Taylor, "Benefits of SVC and STATCOM for electric utility application", Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES, Vol. 3, pp. 1192-1199, 7-12 Sept 2003.
- [7] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, Understanding FACTS: concepts and technology of flexible ac transmission systems, Wiley-IEEE press 1999.
- [8] M. Molinas, S. Jon Are and T. Undeland, "Low voltage ride through of wind farms with cage generators: STATCOM versus SVC", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 3, pp. 1104-1117, May 2008.
- [9] T. Aziz, U. P. Mhaskar, T. K. Saha and N. Mithulananthan, "A grid compatible methodology for reactive power compensation in renewable based distribution system", 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, 2011.
- [10] S. A. Taher and S. A. Afsari, "Optimal location and sizing of DSTATCOM in distribution systems by immune algorithm", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 60, pp. 34-44, September 2014.
- [11] S. Devi and M. Geethanjali, "Optimal location and sizing determination of Distributed Generation and DSTATCOM using Particle Swarm Optimization algorithm", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 62, pp. 562-570, 2014.
- [12] M. Farhoodnea, A. Mohamed, H. Shareef and H. Zayandehroodi, "Optimum D-STATCOM placement using firefly algorithm for power quality enhancement", IEEE 7th International, Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), Langkawi, pp. 98-102, 3-4 June 2013.
- [13] M. Bornapour, E. Gholipour, and M. R. esmaeili, "Optimal placement of STATCOM for voltage control using partitioning methods and fuzzy adaptive modified particle swarm optimization algorithm", Computational intelligence in electrical engineering, Vol. 6, No. 4, pp. 49-62, Winter 2016.
- [14] The European Wind Energy Association (EWEA), Feb 2015, Available online: <http://www.ewea.org>.
- [15] Australian Energy Market Commission (A.E.M.C), National Electricity Amendment (Technical Standards for Wind and Other Generators Connections) Rule 2007, Mar 2007. [Online] Available: www.aemc.gov.au.
- بهینه پارامترهای کنترل‌کننده DSTATCOM با هدف بهبود (کاهش) زمان بازیابی ولتاژ پس از رفع خطا با دو الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی (BBO) انجام شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، الگوریتم PSO در ارائه پاسخ بهینه نهایی گزینه مناسب‌تری است؛ در نتیجه، در ادامه کار و به منظور تعیین تأثیر تنظیم پارامتر بر بهبود بازیابی ولتاژ از ضرایب تعیین‌شده این الگوریتم (PSO) استفاده شده است. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهند تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده DSTATCOM تأثیر به‌سزایی در بهبود بازیابی ولتاژ و تا حدودی کاهش نوسانات ولتاژ و کاهش اندازه DSTATCOM دارد.
- در نهایت، با خازن‌گذاری، نصب و تنظیم بهینه DSTATCOM و تأمین توان رآکتیو مورد نیاز شبکه در حالت دائمی و دینامیکی، شرایط لازم برای فعالیت DGها در شرایط کار دائمی و گذرا، مهیا و ترکیب بدون عیب DGها با شبکه انجام می‌شود.

سیاسگزاری

بدین‌وسیله از شرکت برق منطقه‌ای اصفهان که از این پایان‌نامه حمایت مالی کردند، صمیمانه تشکر می‌نمایم.

مراجع

- [1] R. C. Dugan, T. S. Key and G. J. Ball, "Distributed resources standards", IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 12, No. 1, pp. 27-34, 2006.
- [2] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE Standard 1547-2003, 2003.
- [3] Federal Energy Regulatory Commission (FERC), Interconnection for Wind Energy, Issued June 2, 2005. [Online] Available: www.ferc.gov.
- [4] L. Wen-Tsan, W. Yuan-Kang, L. Ching-Yin, and C. Chao-Rong, "Effect of low-voltage-ride-through technologies on the first Taiwan offshore wind farm planning", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 2, No. 1, pp. 78-86, Jan 2011.
- [5] S. A. Rahman, R. K. Varma, and W. H. Litzemberger, "Bibliography of FACTS

- [18] A. A. A. Esmine, G. L. Torres, "Application of particle swarm optimization to optimal power systems", *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, Vol. 8, No. 3, pp. 1705-1716, 2012.
- [19] D. Simon, "Biogeography-Based Optimization", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 12, No. 6, pp. 702-713, Dec 2008.
- [20] F. Milano, *Power Systems: Power System Modelling and Scripting*, Springer, 2010.
- [21] IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis, IEEE Standard 399-1997, 1998.
- [16] R. Hooshmand, H. Mohkami, "New Optimal Placement of Capacitors and Dispersed Generators using Bacterial Foraging Oriented by Particle Swarm Optimization Algorithm in Distribution Systems", *Electrical Engineering (Archiv fur Elektrotechnik)*, Vol. 93, No. 1, pp. 43-53, March 2011.
- [17] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization", *Proceedings IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. 4, pp. 1942-1948, Perth, Australia, 1995.

-
- ¹ Distributed Generation
² Point of Common Coupling
³ Low Voltage Ride Through
⁴ Flexible AC Transmission Systems
⁵ Static VAR Compensator
⁶ Static Synchronous Compensator
⁷ Induction Generator
⁸ Particle Swarm Optimization
⁹ Biogeography-Based Optimization
¹⁰ Habitat Suitability Index
¹¹ Suitability Index Variability
¹² Time Domain

