

بیشینه‌سازی ظرفیت میزبانی منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع مجهز به بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز از طریق رهیافت کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴

کد مقاله: ۴۹۶۸۴

سجاد امانی^{۱*}، سید سعید محتوی پور^۲

چکیده

در این مقاله یک مدل‌سازی جدید مبتنی بر کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو با هدف اصلی بیشینه‌سازی ظرفیت میزبانی منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع با استفاده از ظرفیت خالی اینورترهای واسط منابع فتوولتاییک و توربین بادی، سیستم تحریک دیزل ژنراتورهای سنکرون و ادوات جبران‌ساز توان راکتیو D-STATCOM ارائه می‌شود. هدف فرعی این پژوهش کمینه‌سازی تلفات انتظاری به هنگام رخداد سناریوهای مختلف بهره‌برداری منابع توربین بادی و فتوولتاییک می‌باشد که با مدل‌سازی عدم قطعیت متناظر با وزش باد و شدت تابش خورشید در منطقه با روش درخت-احتمال محاسبه می‌شود. قیود فنی مسئله شامل اضافه ولتاژ و ضریب قدرت باسهای شبکه توزیع می‌باشد. برای حل مدل پیشنهادی از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌گردد. بمنظور اعتبارسنجی و تایید کارایی مدل پیشنهادی، مطالعات عددی بر روی یک فیدر شعاعی ۲۵-باسه اصلاح شده IEEE فشار متوسط با حضور و عدم حضور بارهای پاسخگو و تجهیز جبران‌ساز D-STATCOM انجام می‌شود. در نهایت، نتایج مفهومی حاصله از مطالعات موردی بیان می‌شود.

واژگان کلیدی: میزبانی منابع تولید پراکنده، کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو، الگوریتم ژنتیک، بارهای پاسخگو و تجهیز جبران‌ساز راکتیو D-STATCOM.

۱- سجاد امانی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت دانشگاه گیلان

ajadamani1377@gmail.com

۲- سید سعید محتوی پور، هیئت علمی دانشگاه گیلان، گروه مهندسی برق و قدرت

رشد و توسعه جوامع انسانی همواره موازی با تولید و مصرف انرژی بوده است. امروزه، با افزایش روزافزون مصرف انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای بواسطه مصرف سوخت‌های فسیلی در نتیجه حفظ سلامت اتمسفر از مهمترین پیش شرط‌های توسعه اقتصادی پایدار جهانی محسوب می‌شود. بنابراین، استفاده از منابع انرژی فاقد کربن نظیر انرژی خورشیدی، بادی، زمین گرمایی و غیره در آینده نزدیک اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. بواسطه تلاش بسیار مهندسان این حوزه و پیشرفت چشمگیر در تکنولوژی منابع تولید پراکنده امروزه منابع فتوولتاییک و بادی بیش از گذشته در شبکه‌های توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرند. نفوذ بیش از حد این منابع ممکن است تاثیر منفی بر عملکرد سیستم داشته باشد بنابراین، ارزیابی ظرفیت سیستم برای میزبانی این منابع بدون فراتر رفتن از محدودیت‌های عملکردی و عملیاتی سیستم بسیار مهم است. ظرفیت میزبانی ۱ به حداکثر ظرفیتی که می‌توان بدون نیاز به تقویت هر بخش از سیستم توزیع، برای نصب منابع تولید پراکنده جدید در مکان‌های مختلف شبکه احداث کرد، گفته می‌شود. مشکلات اضافه ولتاژ در باسهای انتهایی فیدرهای شعاعی و ضریب قدرت باسبارها به عنوان مهم‌ترین عوامل محدود کننده نفوذ بالای منابع تولید پراکنده در نظر گرفته می‌شوند. ایده ظرفیت میزبانی منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع اولین بار در سال ۲۰۰۴ مطرح شد. اولین رهیافت برای حل این مسئله در سال ۲۰۰۵ ارائه شد و اساس این رویکرد ارضای محدودیت‌های فنی تحمیل شده توسط اپراتورهای سیستم و مشتریان به ازای بیشینه ظرفیت نصب منابع تولید پراکنده بود. با توجه به اهمیت بحث، تا کنون مطالعات زیادی در این زمینه انجام شده است. برای نمونه در مرجع [۱]، چالش‌های مربوط به نفوذ بالای فتوولتاییک در شبکه‌های توزیع سوئد توسط مفهوم ظرفیت میزبانی بحث می‌شود. مراجع [۲]-[۳]، تاثیر مدیریت توان اکتیو و راکتیو در کاهش مشکلات اضافه ولتاژ ناشی از نفوذ بالای فتوولتاییک را از دیدگاه اپراتور سیستم توزیع بررسی کرده‌اند. در مرجع [۴]، توضیحات مقدماتی برای تعیین ارتباط بین هارمونیک و اثرات آن بر ظرفیت میزبانی منابع تولید پراکنده در سیستم توزیع ارائه می‌شود. در مراجع [۵]-[۶]، نقش پیکربندی مجدد شبکه در افزایش ظرفیت میزبانی سیستم از منابع تولید پراکنده بررسی می‌شود. در مرجع [۷]، یک ابزار بهینه‌سازی چندین هدفه مبتنی بر هزینه برای ارزیابی ظرفیت بهینه سیستم ذخیره‌ساز انرژی باتری در شبکه توزیع انرژی الکتریکی پیشنهاد می‌شود. بعلاوه، کنترل موثر ذخیره‌ساز انرژی باتری و کاربرد آن برای افزایش ظرفیت میزبانی در منابع [۸] و [۹] تحلیل شده است. در مرجع [۱۰]، تاثیر واحدهای تولید پراکنده غیرقابل کنترل بر روی مشخصات ولتاژی سیستم توزیع بحث می‌شود. مراجع [۱۱]-[۱۲]، روش‌هایی برای کنترل ولتاژ منابع تولید پراکنده ارائه کرده‌اند که هدف آن افزایش ظرفیت میزبانی سیستم توزیع بوده است. در مراجع [۱۳] و [۱۴] بترتیب استفاده بهینه از تجهیزات تپ‌چنجر و پاسخ تقاضا را برای افزایش ظرفیت میزبانی منابع توربین بادی در سیستم توزیع پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۵]، بهینه‌سازی ضریب توان و کنترل ولتاژ به همراه مدیریت توان راکتیو را بعنوان راهی برای حل مشکلات اضافه ولتاژی سیستم توزیع تحت نفوذ بالای منابع فتوولتاییک پیشنهاد می‌شود. در مراجع [۱۶]-[۱۷]، پیکربندی مجدد دینامیکی و استاتیکی شبکه توزیع هایبرید ac-dc برای افزایش ظرفیت میزبانی منابع تولید پراکنده شبکه توزیع پیشنهاد می‌شود. مراجع [۱۸]-[۱۹] روش‌هایی برای اندازه‌گیری ظرفیت بهینه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی توسط مطالعات شبیه‌سازی تحلیلی در سیستم‌های توزیع هایبرید ارائه می‌کنند. مرجع [۲۰] با در نظر گرفتن قیود اضافه ولتاژ و بار به عنوان شاخص‌های عملکردی برای ارزیابی ظرفیت میزبانی، تکنیک‌های محدودیت توان اکتیو و نقش آن در افزایش ظرفیت میزبانی را مورد تحقیق قرار داده است. مرجع [۲۱] کنترل پیشرفته تکنولوژی تپ‌چنجر قابل تغییر زیر بار ترانسفورماتورها و نقش آن در افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع اکتیو را بررسی کرده است. در مرجع [۲۲] ارزیابی عملکرد تکنیک‌های فیلترینگ اکتیو هایبرید برای بهبود ظرفیت میزبانی شبکه آغشته به هارمونیک در اثر نصب و بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر مورد مطالعه قرار گرفته است. تا کنون تعداد مقالاتی که مدل احتمالاتی برای ارزیابی ظرفیت میزبانی شبکه توزیع توسعه داده‌اند انگشت شمار بوده است. برای نمونه، در سال ۲۰۲۰ ارزیابی احتمالاتی ظرفیت میزبانی منابع فتوولتاییک و توربین بادی هایبرید برای سیستم‌های توزیع در مرجع [۲۳] انجام شده است. در مرجع [۲۴] نیز بیشینه‌سازی ظرفیت منابع فتوولتاییک با تولید غیرقطعی توسط مدیریت هماهنگ تپ‌چنجر ترانسفورماتور پست فوق توزیع، منابع راکتیو و خودروهای برقی در سال ۲۰۲۱ مورد تحقیق واقع شده است. مرجع [۲۵] یکی از بروزترین تحقیقاتی است که در سال ۲۰۲۲ با هدف افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع انجام شده است و ما با توجه به مرجع مذکور در این مقاله بیشینه‌سازی ظرفیت میزبانی منابع توربین بادی، سیستم فتوولتاییک و همچنین دیزل ژنراتورهای سنکرون را در سیستم‌های توزیع AC بر اساس کمینه تلفات شبکه توزیع هدف‌گذاری کرده‌ایم. برای تحقق دو هدف از ابزارهای کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو واسط اینورتری منابع فتوولتاییک و توربین بادی، سیستم تحریک دیزل ژنراتورهای سنکرون، بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز راکتیو D-STATCOM استفاده می‌شود. بنابراین، مابقی بخش‌های این مقاله بترتیب ذیل سازماندهی می‌شود. در بخش دوم، مدل پیشنهادی شامل تابع هدف و قیود فنی برای مسئله میزبانی منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع ارائه می‌گردد. در بخش سوم، روند کدسازی و حل مدل پیشنهادی توسط الگوریتم ژنتیک تشریح می‌شود.

در بخش چهارم، به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی مطالعات عددی بر روی یک شبکه توزیع ۲۵-باسه اصلاح شده IEEE انجام می‌شود. در بخش پنجم نیز نتایج مفهومی حاصله بیان می‌گردد.

۲- مدل‌سازی مسئله

مسئله بهینه‌سازی ظرفیت میزبانی از منابع تولید پراکنده شامل توربین بادی، فتوولتائیک و دیزل ژنراتور سنکرون در شبکه توزیع اکتیو با حضور بارهای پاسخگو DRS و تجهیزات جبران‌ساز D-STATCOM یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده با ماهیت غیرخطی است که شامل یک تابع هدف و تعدادی قیود فنی می‌شود.

۱-۲- تابع هدف

تابع هدف در مدل پیشنهادی طبق رابطه (۱) به فرم تفاضل مجموع ظرفیت نصب شده انواع منابع تولید پراکنده از مقدار انتظاری تلفات اهمی شبکه توزیع اکتیو به ازای کلیه سناریوهای تابش و وزش باد در سطوح تقاضای بار مختلف تعریف می‌گردد.

$$OF_i = w_1 \times \sum_{Bi=1}^{N_{Bus}} \left\{ \sum_{WTj=1}^{N_{WTj}} P_{Bi,WTj}^{Cap} + \sum_{PVi=1}^{N_{PVi}} P_{Bi,PVi}^{Cap} + \sum_{DGi=1}^{N_{DGi}} P_{Bi,DGi}^{Cap} \right\} - w_2 \times \sum_{LLi=1}^{Nl} P_{LLi}^{loss} \quad (1)$$

در رابطه فوق، ترم اول مجموع ظرفیت نصب شده منابع توربین بادی WTj ، فتوولتائیک PVi و دیزل ژنراتور سنکرون DGi را بر روی باسهای Bi شبکه توزیع را بترتیب با اندیس‌های $P_{Bi,PVi}^{Cap}$ ، $P_{Bi,WTj}^{Cap}$ و $P_{Bi,DGi}^{Cap}$ تعریف می‌کند. ترم دوم، مجموع انتظاری تلفات توان اکتیو در کلیه شاخه‌های شبکه توزیع به ازای رخداد سناریوهای مختلف تولید منابع توربین بادی و فتوولتائیک بترتیب متناظر با وزش باد و شدت تابش خورشید در آن منطقه جغرافیایی با اندیس $P_{Linei,LLi}^{loss}$ نشان می‌دهد و طبق رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$P_{Linei,LLi}^{loss} = \sum_{SC_{PVi}=1}^{N_{SC_{PVi}}} \sum_{SC_{WTj}=1}^{N_{SC_{WTj}}} \left\{ Pr_{OS}^{(SC_{jWTj}, SC_{iPVi})} \times \sum_{Linei=1}^{N_{Line}} R_{Linei} \times \left| I_{Linei,LLi}^{(SC_{jWTj}, SC_{iPVi})} \right|^2 \right\} \quad (2)$$

در رابطه فوق، جریان عبوری از شاخه $Line$ به ازای یک سناریو معین تابش خورشید SC_{PVi} و وزش باد SC_{WTj} در سطح تقاضای بار LLi با اندیس $I_{Linei,LLi}^{(SC_{jWTj}, SC_{iPVi})}$ تعریف می‌شود. اندیس‌های SC_{iPVi} و SC_{jWTj} بترتیب سناریوهای محتمل و معتبر تابش و سرعت وزش باد در منطقه جغرافیایی مورد مطالعه برای شبکه توزیع می‌باشند و احتمال حضور در یک سناریو بهره-برداری OS با اندیس $Pr_{OS}^{(SC_{WTj}, SC_{PVi})}$ طبق رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$Pr_{OS}^{(SC_{jWTj}, SC_{iPVi})} = Pr_{WTj}^{SC_{jWTj}} \times Pr_{PVi}^{SC_{iPVi}} \quad (3)$$

در رابطه فوق، اندیس‌های $Pr^{SC_{jWTj}}$ و $Pr^{SC_{iPVi}}$ بترتیب احتمال یک سناریو معین برای وزش باد SC_{jWTj} و شدت تابش خورشید SC_{iPVi} در منطقه جغرافیایی مورد مطالعه می‌باشد. برای مدل‌سازی عدم قطعیت موجود در میزان خروجی توان توربین بادی و فتوولتائیک طبق روابط (۴) و (۵) خواهیم داشت.

$$Pr^{SC1WTj} + Pr^{SC2WTj} + Pr^{SC3WTj} + \dots + Pr^{SCNWTj} = 1 \quad (4)$$

$$Pr^{SC1PVi} + Pr^{SC2PVi} + Pr^{SC3PVi} + \dots + Pr^{SCMPVi} = 1 \quad (5)$$

با توجه به تابع چگالی احتمالی برای وزش باد و شدت تابش خورشید بترتیب N و M سناریو به صورت گسسته تولید می‌گردد تا به طور تقریبی کلیه رخداد پوشش داده شود.

۲-۲-۲- قیود فنی

در این بخش فرمولاسیون قیود فنی شامل معادلات تساوی و نامساوی برای مسئله بهینه‌سازی پیشینه‌سازی ظرفیت میزبانی شبکه توزیع اکتیو با حضور بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز ارائه می‌گردد.

۲-۲-۱- محدودیت ظرفیت نصب انواع منابع تولید پراکنده

قیود فنی برای مدلسازی محدودیت ظرفیت نصب انواع منابع توربین بادی، فتوولتاییک و دیزل ژنراتور سنکرون طبق روابط (۶) تا (۸) انجام می‌شود.

$$P_{Bi,WTj}^{Cap} \leq P_{WTj}^{Max} \quad (6)$$

$$P_{Bi,PVi}^{Cap} \leq P_{PVi}^{Max} \quad (7)$$

$$P_{Bi,DGi}^{Cap} \leq P_{DGi}^{Max} \quad (8)$$

در روابط فوق، اندیس‌های P_{WTj}^{Max} ، P_{PVi}^{Max} و P_{DGi}^{Max} بترتیب ماکزیمم ظرفیت قابل نصب و اندیس‌های $P_{Bi,WTj}^{Cap}$ ، $P_{Bi,DGi}^{Cap}$ و $P_{Bi,PVi}^{Cap}$ مقادیر بهینه نصب شده منابع توربین بادی، فتوولتاییک و دیزل ژنراتور سنکرون در هر یک از باسهای کاندید شبکه توزیع می‌باشد.

۲-۲-۲- مدلسازی عملکرد منابع توربین بادی

عملکرد یک توربین بادی از نظر ماهیت مکانیکی تا حدودی پیچیده است زیرا سرعت و جهت وزش باد بسیار متغیر است. معمولاً از توزیع ویبال برای مدل‌سازی و تولید داده‌های باد در محل نصب استفاده می‌شود. خروجی توربین بادی یک تابع از سرعت، جهت و انرژی جنبشی باد و ویژگی‌های مکانیکی آن است. مدلسازی میزان تولید توان اکتیو این منابع پس از نصب ظرفیت بهینه $P_{Bi,WTj}^{Cap}$ بر روی باس کاندید Bi با توجه به یک سناریو معین سرعت وزش باد v_w^{Scj} طبق رابطه (۹) انجام می‌شود [۲۶].

$$P_{Bi,WTj}^{SCj} = \begin{cases} 0; & v_w^{Scj} \leq v_{cutin} \text{ and } v_w^{Scj} \geq v_{cutout} \\ P_{Bi,WTj}^{Cap} \times \left(\frac{v_w^{Scj} - v_{cutin}}{v_{rated} - v_{cutin}} \right)^m; & v_{cutin} \leq v_w^{Scj} \leq v_{rated} \\ P_{Bi,WTj}^{Cap}; & v_{rated} \leq v_w^{Scj} \leq v_{cutout} \end{cases} \quad (9)$$

در این مدل از توربین بادی معمولاً مقدار m برابر با ۳ در نظر گرفته می‌شود. توان اکتیو خروجی حداکثر توربین بادی منصوب بر روی باس کاندید Bi معادل $P_{Bi,WTj}^{Cap}$ متناظر با سرعت وزش باد v_{rated} است. علاوه بر این فرض شده است که سرعت باد حداقل و حداکثر برای عملکرد توربین بادی در منطقه جغرافیایی مورد مطالعه بترتیب معادل v_{cutin} و v_{cutout} است. بنابراین، مقدار توان اکتیو قابل تزریق یا جذب توربین بادی $Q_{Bi,WTj}^{SCj}$ منصوب بر روی باس Bi توسط ظرفیت نامی واسط اینورتری $S_{Bi,WTj}^{Invj}$ و مقدار توان اکتیو تولیدی به ازای سناریو معین سرعت وزش باد $P_{Bi,WTj}^{SCj}$ طبق رابطه (۱۰) تعیین می‌گردد.

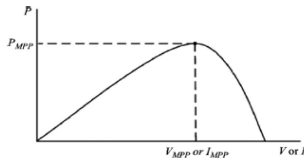
$$Q_{Bi,WTj}^{SCj} = \sqrt{S_{Bi,WTj}^{Invj}^2 - P_{Bi,WTj}^{SCj}^2} \quad (10)$$

در اینجا با توجه به احتمال رخداد اضافه ولتاژ در انتهای فیدر شعاعی بواسطه تزریق توان اکتیو انواع منابع تولید پراکنده بیشتر ظرفیت جذب اکتیو واسط‌های اینورتری منابع توربین بادی بعنوان یکی از ابزارهای حذف اضافه ولتاژ برای بهره‌بردار شبکه توزیع مورد توجه است.

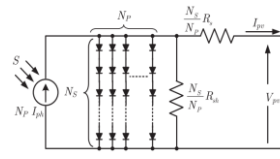
۲-۲-۳- مدلسازی عملکرد سیستم‌های فتوولتاییک

برای مدلسازی عملکرد منبع فتوولتاییک معمولاً از کوچکترین المان سازنده آن یعنی سلول خورشیدی آغاز می‌شود. یک سلول خورشیدی از پیوند نیمه‌هادی نوع n و نوع p تشکیل شده است و مدار معادل آن را در حالت ایده‌آل می‌توان با منبع جریان و یک دیود موازی نشان داد. البته در حالت غیر ایده‌آل، دو مقاومت به صورت سری و موازی اضافه می‌گردد که در نهایت مدار معادل آن مطابق شکل (۱) می‌باشد. اگر تعدادی سلول خورشیدی به صورت موازی یا سری به یکدیگر متصل شوند آنگاه مدار معادل پنل

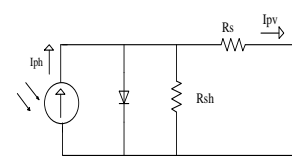
فتوولتاییک به صورت شکل (۲) خواهد شد. منابع فتوولتاییک با قابلیت اتصال به شبکه توزیع معمولاً از اتصال موازی آرایه‌های خورشیدی در تعداد بالا ساخته می‌شود. منحنی مشخصه توان بر حسب جریان یک منبع فتوولتاییک به صورت شکل (۳) است.



شکل ۳- منحنی مشخصه توان بر حسب جریان یک منبع فتوولتاییک

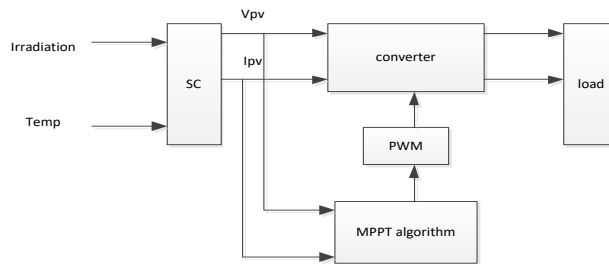


شکل ۲- مدار معادل یک پنل خورشیدی



شکل ۱- مدار معادل یک سلول خورشیدی

باید متذکر شد که هر چه شدت تابش افزایش یابد توان خروجی منبع فتوولتاییک نیز افزایش می‌یابد و هر چه دما پهنای منبع فتوولتاییک افزایش داشته باشد، توان خروجی آن کاهش می‌یابد. همانطور که اشاره شد منبع فتوولتاییک یک منبع غیرخطی است که خروجی ماکزیم آن به تغییرات دما و تابش و همچنین تقاضای بار وابسته است اگر نقطه کار منبع در نقطه ماکزیم توان MP تنظیم نباشد، توان زیادی به هدر خواهد رفت. بنابراین، ضروری است که تحت هر شرایط تابش خورشید و دما و تقاضای بار نقطه کار بهینه تعقیب شود تا ماکزیم توان قابل استخراج گردد. وظیفه ردیابی توان ماکزیم در منبع فتوولتاییک به عهده کنترلر MPPT می‌باشد که شماتیک آن در شکل (۴) نمایش شده است.



شکل ۴- بلوک دیاگرام منبع فتوولتاییک به همراه کنترلر ردیاب توان ماکزیم MPPT

در میان روش‌های مختلف ردیابی بیشینه توان، می‌توان به الگوریتم‌های اختلال و مشاهده^۱، هدایت افزایشی^۲، ولتاژ ثابت^۳، کسری از جریان اتصال کوتاه^۴، کسری از ولتاژ مدار باز^۵ و منطق فازی^۶ اشاره نمود. بنابراین با فرض مجهز بودن منابع فتوولتاییک به سیستم ردیاب ماکزیم و استخراج ماکزیم توان، می‌توان خروجی توان اکتیو $P_{Bi,PVi}^{SCi}$ و راکتیو $Q_{Bi,PVi}^{SCi}$ منبع فتوولتاییک منصوب در باس Bi تحت یک سناریو معین شدت تابش خورشید SCi_{PVi} در شبکه توزیع را به صورت تقریبی طبق روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه نمود.

$$P_{Bi,PVi}^{Cap} = A_{PVi} \times H_{ave}^{CapPVi} \quad (11)$$

$$P_{Bi,PVi}^{SCi} = \eta_{PVi} \times \frac{H_{SCi}^{PVi}}{H_{ave}^{PVi}} \times P_{Bi,PVi}^{Cap} \quad (12)$$

$$Q_{Bi,PVi}^{SCi} = \sqrt{S_{Bi,PVi}^{Invi}^2 - P_{Bi,PVi}^{SCi}^2} \quad (13)$$

در رابطه فوق، اندیس‌های A_{PVi} و η_{PVi} بترتیب برای سطح مقطع تحت پوشش منبع فتوولتاییک و راندمان آن برای تبدیل انرژی تابشی به الکتریکی تعریف می‌شوند و اندیس H_{SCi}^{PVi} شدت تابش خورشید در سناریو معین بهره‌برداری SC_{PVi} و اندیس H_{ave}^{PVi} شدت تابش میانگین در نظر گرفته شده هنگام نصب در منطقه می‌باشد.

- 1- Perturb and Observe algorithm (P&O)
- 2- Incremental Conductance (IC)
- 3- Constant Voltage (CV)
- 4- Fractional Short Circuit Current
- 5- Fractional Open Circuit Voltage
- 6- Fuzzy Logic

۲-۲-۴- مدلسازی عملکرد دیزل ژنراتور سنکرون

منابع تولید پراکنده دیزل ژنراتور سنکرون بعنوان منابع قابل دیسیچ در شبکه توزیع نصب می‌شوند زیرا بهره‌بردار سیستم توزیع امکان کنترل توان اکتیو تولیدی و راکتیو تولیدی/جذبی آنها را از طریق سیستم گاورنر و سیستم تحریک دارد. بنابراین، با توجه به ظرفیت نصب شده دیزل ژنراتور سنکرون برای تولید توان اکتیو معادل $P_{Bi,DGi}^{Cap}$ آنگاه طبق رابطه (۱۵) امکان حداکثر جذب و تزریق توان راکتیو برای این منابع فراهم می‌گردد.

$$P_{Bi,DGi} \leq P_{Bi,DGi}^{Cap} \quad (14)$$

$$Q_{Bi,DGi} = P_{Bi,DGi} \times \tan(\phi) \quad (15)$$

در رابطه فوق، اندیس ϕ و $\cos(\phi)$ بترتیب اختلاف زاویه ولتاژ از جریان خروجی و ضریب قدرت برای منابع تولید پراکنده دیزل ژنراتور سنکرون تعریف می‌شوند.

۲-۲-۵- مدلسازی مشارکت بار پاسخگو

در حالت کلی، مشارکت بارهای پاسخگو در برنامه مدیریت سمت تقاضا با افزایش و کاهش و یا شیفت مصرف انرژی به ساعات غیرپیک موجب هموارسازی پروفیل تقاضای بار مشترکین شبکه و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. در اینجا، مشارکت بارهای پاسخگو در شبکه توزیع برای سطح بار معین LLi بوسیله روابط (۱۶) تا (۲۰) مدلسازی می‌شود. رابطه (۱۶) میزان مشارکت بارهای پاسخگوی شبکه توزیع را برای یک سناریو معین وزش باد و شدت تابش خورشید در منطقه (حالت بهره‌برداری) تعیین می‌کند که البته این میزان مشارکت چه به صورت کاهش و چه به صورت افزایش مصرف از یک مقدار تعیین شده حداکثری توسط مالکان بترتیب طبق روابط (۱۷) و (۱۸) تجاوز نمی‌کند. رابطه (۱۹) نشان می‌دهد که میزان افزایش و کاهش در مصرف بارهای پاسخگو طی سطوح مختلف تقاضا باید یکسان باشد و رابطه (۲۰) تضمین می‌کند که در یک سطح بار LLi مشارکتی افزایشی و کاهشی مصرف بارهای پاسخگو همزمان رخ نمی‌دهد.

$$P_{Bi,OS,LLi}^{DR} = P_{Bi,OS,LLi}^{DR(Positive)} + P_{Bi,OS,LLi}^{DR(Negative)} \quad (16)$$

$$P_{Bi,OS,LLi}^{DR(Negative)} \leq I_{Bi,OS,LLi}^{DR(Negative)} \times P_{Max}^{DR(Negative)} \quad (17)$$

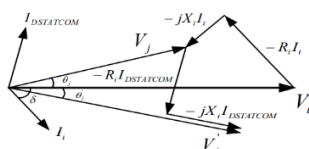
$$P_{Bi,OS,LLi}^{DR(Positive)} \leq I_{Bi,OS,LLi}^{DR(Positive)} \times P_{Max}^{DR(Positive)} \quad (18)$$

$$\sum_{Bi=1}^{N_{Bus}} \sum_{LLi=1}^{NL} P_{Bi,OS,LLi}^{DR(Positive)} = \sum_{Bi=1}^{N_{Bus}} \sum_{LLi=1}^{NL} P_{Bi,OS,LLi}^{DR(Negative)} \quad (19)$$

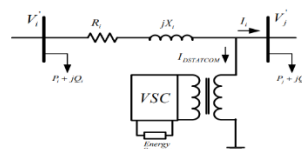
$$I_{Bi,OS,LLi}^{DR(Positive)} + I_{Bi,OS,LLi}^{DR(Negative)} \leq 1 \quad (20)$$

۲-۲-۶- مدلسازی تجهیز جبران‌ساز D-STATCOM

تجهیز جبران‌ساز راکتیو D-STATCOM می‌تواند بعنوان یک منبع ولتاژ سنکرون با دامنه و زاویه فاز ولتاژ متغیر کار کند. بنابراین، این تجهیز توانایی کنترل ولتاژ و ضریب قدرت باس خود را دارد. در بهره‌برداری حالت دائمی تحت بارگذاری سنگین شبکه، تجهیز جبران‌ساز D-STATCOM جریان متناسب به محل اتصال به شبکه تزریق می‌کند و ولتاژ باس خود را در مقدار مجاز تنظیم می‌کند. این تجهیز علاوه بر انتقال توان راکتیو قابلیت تبادل توان اکتیو را نیز به طور همزمان دارا می‌باشد [۲۷]. همان طور که در شکل (۵) دیده می‌شود این تجهیز به باس زام شبکه توزیع شعاعی متصل می‌باشد. در اینجا ما تنها به قابلیت تزریق/جذب توان راکتیو توسط این تجهیز می‌پردازیم که به شبکه توزیع متعادل متصل می‌باشد. این تجهیز برای جبران‌سازی ولتاژ در باس زام و بازگرداندن آن به مقدار مطلوب استفاده می‌شود. دیاگرام فازوری متناظر در شکل (۶) نمایش شده است.



شکل ۶- دیاگرام فازوری ولتاژ و جریان سیستم شکل (۵) بعد نصب جبران‌ساز



شکل ۵- تجهیز جبران‌ساز D-STATCOM به باس زام شبکه توزیع شعاعی

با توجه به ولتاژ، متعاقبا باید جریان در ناحیه ربع مثلثاتی مورد نظر حفظ شود. مطابق شکل (۵) بعد نصب جبران ساز در باس ژام، جریان I_i و $I_{D-STATCOM}$ به طور همزمان در شاخه جریان می یابد و بر اساس دیاگرام فازوری شکل (۶) روابط (۲۱) و (۲۲) را خواهیم داشت. با مجزاسازی قسمت های موهومی و حقیقی رابطه (۲۲) و برخی ساده سازی به روابط (۲۳) و (۲۴) می رسیم.

$$\angle I_{D-STATCOM} = \frac{\pi}{2} + \theta_j' \quad (21)$$

$$V_j' \angle \theta_j' = V_i' \angle \theta_i' - (R + jX) \cdot I_i \angle \delta - (R + jX) \cdot I_{D-STATCOM} \angle \left(\frac{\pi}{2} + \theta_j' \right) \quad (22)$$

$$x = \frac{-B \pm \sqrt{\Delta}}{2A} \quad (23)$$

$$x = \sin \theta_j'$$

$$A = (a1a3 - a2a4)^2 + (a1a4 + a2a3)^2, B = 2(a1a3 - a2a4) \cdot V_j' \cdot (-Rij(n))$$

$$C = (V_j' \cdot Rij(n))^2 - (a1a4 + a2a3)^2 \quad (24)$$

$$a1 = \text{Re al}(V_i' \angle \theta_i') - \text{Re al}((Rij(n) + jxij(n)) \cdot (I_i \angle \delta))$$

$$a2 = \text{Im ag}(V_i' \angle \theta_i') - \text{Im ag}((Rij(n) + jxij(n)) \cdot (I_i \angle \delta))$$

$$a3 = -xij(n), a4 = -Rij(n)$$

همان طور که از بلوک معادلات فوق می توان دریافت، دو ریشه برای x وجود دارد و دو مقدار برای $\angle I_{D-STATCOM}$ و $|I_{D-STATCOM}|$ محاسبه می شود. برای یافتن پاسخ صحیح شرایط مرزی طبق رابطه (۲۵) باید تست گردد. نتایج نشان می دهد پاسخ درست برای رابطه (۲۲) یعنی مقادیر $\angle I_{D-STATCOM}$ و $|I_{D-STATCOM}|$ توسط روابط (۲۶) و (۲۷) تعیین می شوند.

$$V_j' = V_j \rightarrow \begin{cases} I_{D-STATCOM} = 0 \\ \theta_j' = \theta_j \end{cases} \quad (25)$$

$$\angle I_{D-STATCOM} = \frac{\pi}{2} + \theta_j' = \frac{\pi}{2} + \sin^{-1}(x_{ij}(n)) \quad (26)$$

$$|I_{D-STATCOM}| = \frac{V_j' \cos \theta_j' - a1}{-a4 \sin \theta_j' - a3 \cos \theta_j'} \quad (27)$$

بنابراین، فازورهای ولتاژ و جریان تجهیز جبران ساز توسط روابط فوق قابل محاسبه می شود. مقدار توان راکتیو تزریقی به باس محل اتصال برای بازگرداندن ولتاژ به مقدار مطلوب از رابطه (۲۸) محاسبه می شود.

$$jQ_{D-STATCOM} = (V_j' \angle \theta_j') \cdot (I_{D-STATCOM} \angle \left(\frac{\pi}{2} + \theta_j' \right))^* \quad (28)$$

بنابراین، با حضور تجهیز جبران ساز D-STATCOM می توان ولتاژ باس آن را برای محاسبات پخش بار در مقدار معینی ثابت فرض کرد و اندازه ظرفیت بهینه مورد نیاز برای نصب را از روابط فوق الذکر محاسبه کرد.

۲-۷-۲- مدلسازی تعادل توان اکتیو و راکتیو در شبکه توزیع اکتیو

در بحث پیشینه سازی ظرفیت میزبانی از منابع تولید پراکنده فرض بر این است که کلیه منابع معادل سقف ظرفیت خود در باس منصوبه شبکه توزیع توان اکتیو تزریق می کنند و در صورتی که این توان اکتیو تولیدی مازاد به نیاز مشترکین بود بارهای پاسخگو این امکان را دارند تا تقاضای خود را برای مصرف افزایش دهند و اگر باز هم توان مازاد تولیدی وجود داشت به سمت پست و شبکه بالادست ارسال می گردد. بنابراین، برای کنترل فرکانس باید تعادل کلی توان اکتیو در یک شبکه توزیع اکتیو حفظ گردد که این تعادل برای هر سطح تقاضای بار مشترکین طبق رابطه (۲۹) مدلسازی می شود. بمنظور کنترل ولتاژ نیز تعادل کلی تولید و مصرف توان راکتیو در شبکه توزیع باید حفظ گردد. از آنجایی که تزریق توان اکتیو توسط منابع تولید پراکنده به طور محلی سطح ولتاژ را خصوصا در انتهای فیدر از حد مجاز افزایش می دهد در نتیجه تحت این شرایط انتظار می رود که ایجاد تعادل با جذب راکتیو توسط واسطه های اینورتری منابع توربین بادی و فتوولتائیک، دیزل ژنراتور سنکرون و جبران ساز D-STATCOM فراهم شود. بنابراین، تعادل توان راکتیو در هر سطح تقاضای بار مشترکین شبکه توزیع اکتیو طبق رابطه (۳۰) مدلسازی می شود.

$$\sum_{Bi=1}^{N_{Bus}} (P_{Bi,LLi}^D + P_{Bi,OS,LLi}^{DR}) + \sum_{Linei=1}^{N_{LINE}} P_{Linei,OS,LLi}^{loss} = \sum_{Bi=1}^{N_{Bus}} \left\{ \sum_{WTj=1}^{N_{WTj}} P_{Bi,WTj}^{SCj} + \sum_{PVi=1}^{N_{PVi}} P_{Bi,PVi}^{SCi} + \sum_{DGi=1}^{N_{DGi}} P_{Bi,DGi} \right\} + P_{Bus(Slack),OS,LLi}^{Sub} \quad (29)$$

$$\sum_{Bi=1}^{N_{Bus}} (Q_{Bi,LLi}^D + Q_{Bi,OS,LLi}^{DR} + Q_{Bi,LLi}^{DSi}) + \sum_{Linei=1}^{N_{LINE}} Q_{Linei,OS,LLi}^{loss} = \sum_{Bi=1}^{N_{Bus}} \left\{ \sum_{WTj=1}^{N_{WTj}} Q_{Bi,WTj}^{SCj} + \sum_{PVi=1}^{N_{PVi}} Q_{Bi,PVi}^{SCi} + \sum_{DGi=1}^{N_{DGi}} Q_{Bi,DGi} \right\} + Q_{Bus(Slack),OS,LLi}^{Sub} \quad (30)$$

برای آنکه تعادل توان اکتیو و راکتیو در کل شبکه توزیع ایجاد گردد با تزریق توان اکتیو و راکتیو خالص به باس‌ها برابر با مجموع شارش توان اکتیو و راکتیو در شاخه‌های متصل به آن باس‌ها گردد. بنابراین، تعادل توان اکتیو و راکتیو در هر یک از باس-ها طبق رابطه (۳۱) و (۳۲) مدلسازی می‌شود.

$$P_{Bi,OS,LLi}^{net} = V_{Bi,OS,LLi} \sum_{Bj=1, Bi \neq Bj}^{N_{Bus}} V_{Bj,OS,LLi} (G_{ij} \cdot \cos \delta_{ij} + B_{ij} \cdot \sin \delta_{ij}) \quad (31)$$

$$Q_{Bi,OS,LLi}^{net} = V_{Bi,OS,LLi} \sum_{Bj=1, Bi \neq Bj}^{N_{Bus}} V_{Bj,OS,LLi} (G_{ij} \cdot \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cdot \cos \delta_{ij}) \quad (32)$$

در روابط فوق، توان اکتیو خالص $P_{Bi,OS,LLi}^{net}$ و توان راکتیو خالص $Q_{Bi,OS,LLi}^{net}$ در باس Bi برای یک وضعیت بهره‌برداری معین از تابش و وزش باد در منطقه $(OS(SCi_{PVi}, SCj_{WTj}))$ طبق روابط (۳۳) و (۳۴) محاسبه می‌شود. مطالعه پخش بار شبکه توزیع اکتیو در مدل پیشنهادی طبق روابط (۲۹) تا (۳۴) برای یک وضعیت معین بهره‌برداری شبکه توزیع طی سطح بار مشخص مدلسازی می‌شود که البته قید محدوده مجاز جریان شاخه‌ها باید طبق روابط (۳۵) در مدل پیشنهادی لحاظ گردند.

$$P_{Bi,OS,LLi}^{net} = \left\{ \sum_{WTj=1}^{N_{WTj}} P_{Bi,WTj}^{SCj} + \sum_{PVi=1}^{N_{PVi}} P_{Bi,PVi}^{SCi} + \sum_{DGi=1}^{N_{DGi}} P_{Bi,DGi} \right\} - \{P_{Bi,LLi}^D + P_{Bi,OS,LLi}^{DR}\} \quad (33)$$

$$Q_{Bi,OS,LLi}^{net} = 0 - \left\{ \sum_{WTj=1}^{N_{WTj}} Q_{Bi,WTj}^{SCj} + \sum_{PVi=1}^{N_{PVi}} Q_{Bi,PVi}^{SCi} + \sum_{DGi=1}^{N_{DGi}} Q_{Bi,DGi} \right\} - \{Q_{Bi,LLi}^D + Q_{Bi,OS,LLi}^{DR}\} - \{Q_{Bi,LLi}^{DSi}\} \quad (34)$$

$$I_{Line}^{Min} \leq I_{Linei,OS,LLi} \leq I_{Line}^{Max} \quad (35)$$

۳- تشریح کدسازی و حل مدل توسط الگوریتم ژنتیک

در این بخش، فلوچارت پیشنهادی برای بیسینه‌سازی ظرفیت میزبانی منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع اکتیو با حضور تجهیز جبران‌ساز D-STATCOM و بارهای پاسخگو DRs توسط الگوریتم ژنتیک ارائه می‌شود. در مرحله اول ساختار شبکه توزیع، تقاضای باسبارها و امپدانس شاخه‌ها، ظرفیت حداکثر تولید توان اکتیو و مکان‌های کاندید نصب منابع توربین بادی و فتوولتاییک، ظرفیت حداکثر تولید توان اکتیو و مکان‌های کاندید نصب دیزل ژنراتورهای سنکرون، ظرفیت حداکثر تزریق/جذب توان اکتیو و مکان‌های کاندید نصب تجهیزات جبران‌ساز D-STATCOM، ظرفیت اینورترهای واسط منابع توربین بادی و فتوولتاییک و همچنین میزان حداکثر مشارکت بارهای پاسخگو برای افزایش/کاهش تقاضای بار وارد می‌شود. برای محاسبه متغیرهای مستقل مسئله مذکور شامل ظرفیت نصب حداکثر انواع منابع تولید پراکنده توربین بادی، فتوولتاییک و دیزل ژنراتورهای سنکرون، میزان

مشارکت بارهای پاسخگو و همچنین میزان جبرانسازی D-STATCOM از طریق بکارگیری الگوریتم ژنتیک ابتدا جمعیت اولیه کروموزومها با ساختاری طبق جدول (۴) ایجاد می‌گردد.

جدول ۴- ساختار یک کروموزوم نمونه برای حل مسئله میزبانی منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع شامل

تجهیزات جبران‌ساز D-FACTS و بارهای پاسخگو DR

$P_{B1,WT1}^{Cap}$...	$P_{Bn,WTn}^{Cap}$	$P_{B1,PV1}^{Cap}$.	$P_{Bn,PVn}^{Cap}$	$P_{B1,DG1}^{Cap}$.	$P_{Bn,DGn}^{Cap}$	$P_{B1..Bn,OS1..OSk}^{DR1...DRn,LL1..LLm}$	$Q_{B1..Bn}^{DS1...DSn}$
--------------------	-----	--------------------	--------------------	---	--------------------	--------------------	---	--------------------	--	--------------------------

پس از مشخص شدن ظرفیت نصب انواع منابع تولید پراکنده در باسهای کاندید از پیش تعیین شده و میزان مشارکت بارهای پاسخگو در افزایش/کاهش و انتقال مصرف خود طی سطوح مختلف تقاضای بار شبکه و همچنین ظرفیت جبرانسازی راکتیو توسط جبران‌ساز D-FACTS می‌توان پخش بار بهینه شبکه توزیع را از طریق روابط (۲۷) تا (۳۲) محاسبه نمود. با تعیین دامنه و زاویه فاز ولتاژ باسها بعنوان متغیرهای اصلی مسئله پخش بار در نتیجه می‌توان متغیرهای وابسته نظیر تلفات توان اکتیو و راکتیو در شاخه‌ها را به ازای کلیه وضعیت‌های بهره‌برداری و سطح بار محاسبه و مقدار انتظاری تلفات در تابع هدف را تعیین نمود. حال برای تعیین برازندگی هر کروموزوم باید تابع برازش طبق رابطه (۳۶) محاسبه شود. برای هر یک از سناریوهای بهره‌برداری (تابش و وزش باد) پنالتی‌های به موجب تخطی دامنه ولتاژ و ضریب قدرت باسها از مقادیر مجاز طبق روابط (۳۷) و (۳۸) محاسبه می‌شوند.

$$Fitness_{chrom}^{GA} = \frac{OFi}{1 + \left\{ \sum_{OSi=1}^{N_{OS}} Pen_{OSi}^{VV} + \sum_{OSi=1}^{N_{OS}} Pen_{OSi}^{PFV} \right\}} \quad (36)$$

$$Pen_{OSi}^{VV} = (V_{Bi,OS,LLi} - V_{Bi}^{Max}) \times 10^{15} \quad (37)$$

$$Pen_{OSi}^{PFV} = (PF_{Target} - PF_{Bi,OS}) \times 10^{15} \quad (38)$$

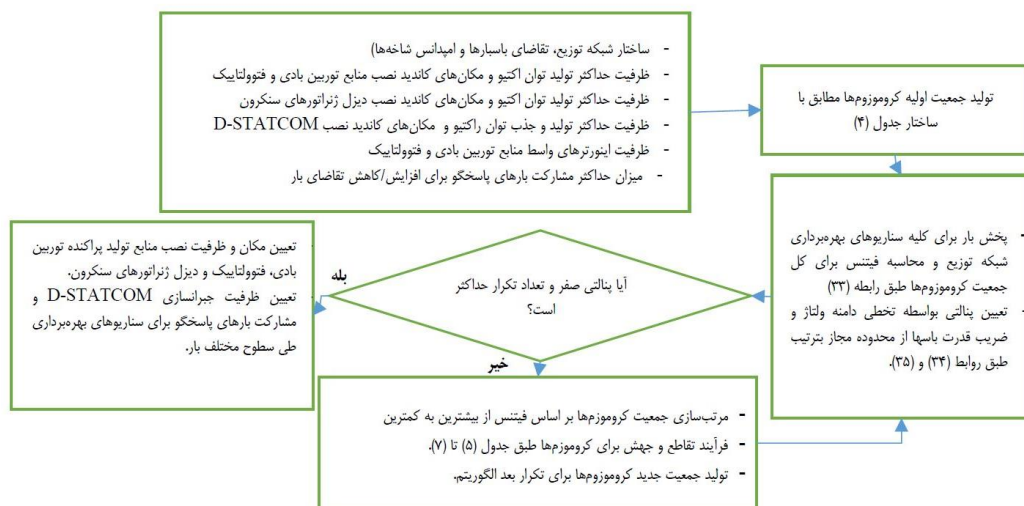
برای حذف پنالتی تخطی از ولتاژ مجاز باسها با توجه به سطح جبران‌سازي تجهيز D-STATCOM ابتدا سطح جذب راکتیو توسط منابع اینورتری منابع توربین بادی و فتوولتاییک را در سطح حداکثر تنظیم می‌کنیم و اگر بعد پخش بار مقدار دامنه ولتاژ در محدوده قرار نگیرد آنگاه طبق رابطه (۳۴) پنالتی برای کلیه باسها تحت آن سناریو بهره‌برداری محاسبه و در رابطه فیتنس وارد می‌شود که البته برای مابقیه سناریوهای بهره‌برداری نیز این محاسبات تکرار می‌شود. اما، اگر با تنظیم سطح جذب حداکثری راکتیو توسط واسط‌های اینورتری منابع توربین بادی و فتوولتاییک تخطی از ولتاژ باسها پس از پخش بار حذف گردد آنگاه چک می‌کنیم که آیا با افزایش جذب راکتیو تخطی از ضریب قدرت در باسها ایجاد شده است یا که خیر. اگر تخطی باشد با کاهش سطح جذب سعی در حذف تخطی ضریب قدرت در باسها می‌شود تا جایی که تخطی ولتاژ باسها رخ ندهد اگر با کاهش جذب راکتیو با تخطی ولتاژ باس مواجه شویم و همچنان تخطی ضریب توان در برخی باسها برقرار بود آنگاه طبق رابطه (۳۵) این تخطی برای آن سناریو بهره‌برداری معین در تابع فیتنس وارد می‌شود البته محاسبات مشابه برای مابقی سناریوهای بهره‌برداری انجام می‌شود تا برازش نهایی برای هر کروموزوم تعیین گردد. در اینجا شرطی چک می‌شود که آیا پنالتی برای این آرایش نصب منابع تولید پراکنده صفر است و آیا تعداد حداکثر تکرار الگوریتم بعنوان شرط همگرایی به حل بهینه مسئله رسیده است؟ در صورت پاسخ بله اجرای الگوریتم متوقف شده و نتایج نمایش داده می‌شوند ولی در غیر این صورت مرتب‌سازی جمعیت کروموزومها بر اساس فیتنس از بیشترین به کمترین انجام می‌شود و سپس فرآیند تقاطع و جهش برای جمعیتی از کروموزومها با احتمال pm و pc طبق جدول (۵) و (۶) انجام می‌شود. در نهایت، جمعیت جدید کروموزومها برای تکرار بعد الگوریتم بکار گرفته می‌شود تا شرط همگرایی به جواب بهینه مسئله میزبانی منابع تولید پراکنده در حضور جبران‌ساز D-STATCOM و بارهای پاسخگو DRS فراهم شود. فلوچارت مبتنی بر الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در شکل (۷) با جزئیات نمایش شده است.

جدول ۵- فرآیند تقاطع برای جفت کروموزوم‌های والد در الگوریتم ژنتیک برای تولید فرزندان

$P_{B1,WT1}^{Cap}$	...	$P_{Bn,WTn}^{Cap}$	$P_{B1,PV1}^{Cap}$	.	$P_{Bn,PVn}^{Cap}$	$P_{B1,DG1}^{Cap}$	.	$P_{Bn,DGn}^{Cap}$	$P_{B1..Bn,OS1..OSk}^{DR1...DRn,LL1..LLm}$	$Q_{B1..Bn}^{DS1...DSn}$
$P_{B1,WT1}^{Cap}$	"	$P_{Bn,WTn}^{Cap}$	"	"	$P_{Bn,PVn}^{Cap}$	"	"	$P_{Bn,DGn}^{Cap}$	$P_{B1..Bn,OS1..OSk}^{DR1...DRn,LL1..LLm}$	"
$P_{B1,WT1}^{Cap}$	...	$P_{Bn,WTn}^{Cap}$	$P_{B1,PV1}^{Cap}$	.	$P_{Bn,PVn}^{Cap}$	$P_{B1,DG1}^{Cap}$	.	$P_{Bn,DGn}^{Cap}$	$P_{B1..Bn,OS1..OSk}^{DR1...DRn,LL1..LLm}$	$Q_{B1..Bn}^{DS1...DSn}$
$P_{B1,WT1}^{Cap}$	"	$P_{Bn,WTn}^{Cap}$	"	"	$P_{Bn,PVn}^{Cap}$	"	"	$P_{Bn,DGn}^{Cap}$	$P_{B1..Bn,OS1..OSk}^{DR1...DRn,LL1..LLm}$	"

جدول ۶- فرآیند جهش برای فرزند ۱ در الگوریتم ژنتیک برای تولید فرزندان

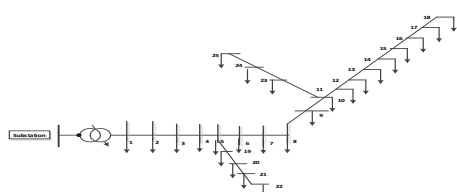
$P_{B1,WT1}^{Cap}$...	$P_{Bn,WTn}^{Cap}$	$P_{B1,PV1}^{Cap}$..	$P_{Bn,PVn}^{Cap}$	$P_{B1,DG1}^{Cap}$.	$P_{Bn,DGn}^{Cap}$	$P_{B1...DRn,LL1...LLm}^{DR1}$	$Q_{B1...Bn}^{DS1...DSn}$
--------------------	-----	--------------------	--------------------	----	--------------------	--------------------	---	--------------------	--------------------------------	---------------------------



شکل ۷- فلوجارت مبتنی بر الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای حل مسئله بهینه‌سازی میزبانی منابع تولید پراکنده شبکه توزیع اکتیو با حضور بارهای پاسخگو DR و تجهیزات جبران‌ساز D-STATCOM

۴- مطالعات عددی و نتایج

بمنظور اعتبارسنجی و تایید کارایی مدل پیشنهادی، مطالعات عددی بر روی یک شبکه توزیع تست ۲۵-بسه اصلاح شده IEEE مطابق شکل (۸) انجام می‌شود. پست فوق توزیع دارای یک ترانسفورماتور ۲۰kV/۶۳kV با ظرفیت ۵ مگاوات آمپر متصل می‌باشد و باس 1 متصل به ثانویه ترانسفورماتور به عنوان باس اسلک در محاسبات پخش بار قرارداد می‌گردد. تقاضای جذب توان



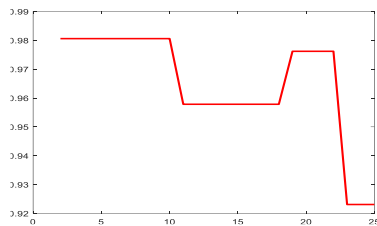
شکل ۸- شبکه توزیع ۲۵-بسه تست استاندارد IEEE مورد مطالعه

اکتیو و راکتیو در باسبارهای ۲ تا ۱۰ بترتیب معادل ۲۵ کیلووات و ۵ کیلووار، در باسبارهای ۱۱ تا ۱۸ بترتیب معادل ۵۰ کیلووات و ۱۵ کیلووار، در باسبارهای ۱۹ تا ۲۲ بترتیب معادل ۴۵ کیلووات و ۱۰ کیلووار و در باسبارهای ۲۳ تا ۲۵ بترتیب معادل ۶۰ کیلووات و ۲۵ کیلووار می‌باشند. اطلاعات امپدانس ترانسفورماتور معادل $0.0012 + j0.0015$ پریونیت و خطوط طبق جدول (۸) می‌باشد.

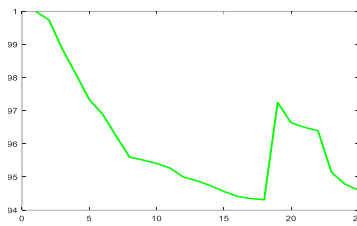
در اینجا محدوده استاتیکی مجاز برای دامنه ولتاژ باس‌ها بترتیب ۰.۹۸ و ۱ پریونیت است و محدوده مجاز ضریب قدرت باسها نیز بین ۰.۹ و ۱ تعریف می‌گردد. نتایج پخش بار شبکه برای دامنه ولتاژ و ضریب قدرت باسها با توجه به تقاضای بار و ساختار شبکه توزیع پسیو بترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نمایش شده است.

جدول ۸- اطلاعات امپدانس خطوط فیدر شعاعی ۲۵-بسه تست استاندارد IEEE

Line1-2	Line2-3	Line3-4	Line4-5	Line5-6	Line6-7
0.0922+0.0470j	0.293 + 0.2511j	0.266+0.1864j	0.2811+0.1941j	0.219+0.1070j	0.1872+0.618j
Line7-8	Line8-9	Line9-10	Line10-11	Line11-12	Line12-13
0.3117 + 0.2351j	0.0300+0.0740j	0.0440+0.074j	0.1166+0.0650j	0.2744+0.123j	0.1280+0.055j
Line13-14	Line14-15	Line15-16	Line16-17	Line17-18	Line5-19
0.2016 + 0.1129j	0.2810 +0.226j	0.3163+0.245j	0.2290+0.121j	0.2320+0.174j	0.164+0.1565j
Line19-20	Line20-21	Line21-22	Line10-23	Line23-24	Line24-25
1.5042 + 1.3554j	0.495 +0.4784j	0.7089+ 0.937j	0.4512+ 0.3083j	0.898+0.7091j	0.896+0.7011j



شکل ۱۰- ضریب قدرت باسهای شبکه توزیع ۲۵-باسه



شکل ۹- دامنه ولتاژ برای شبکه توزیع ۲۵-باسه

مطابق انتظار ضریب قدرت کلیه باسها قبل اتصال منابع تولید پراکنده PVs، WT، DGs و ادوات جبران‌ساز D-STATCOM بین ۰٫۹۲ تا ۰٫۹۸ می‌باشد. برای میزبانی از منابع تولید پراکنده فتوولتائیک باسهای ۲ تا ۲۵ کاندید شده‌اند با این فرض که ماکزیمم ظرفیت نصب بر روی هر باس ۳۰۰ کیلووات می‌باشد و ظرفیت اینورترتر واسط این نوع منابع معادل ۳۲۰ کیلووات آمپر است. سناریوهای دقت پیش‌بینی تابش خورشید و احتمال رخداد متناظر آنها در جدول (۹) نمایش شده است. در شبکه توزیع مورد مطالعه باسهای ۲ تا ۱۸ برای نصب منابع توربین بادی با ظرفیت ماکزیمم ۵۰۰ کیلووات کاندید شده‌اند، البته ظرفیت واسط اینورتری این منابع تجدیدپذیر ۵۵۰ کیلووات آمپر است. سرعت قطع پایین Vci، قطع بالا Vco و سرعت عملکرد نرمال Vcn برای تیپ منابع توربین بادی بکار گرفته شده در این مطالعه بترتیب معادل ۵ متر بر ثانیه، ۳۵ متر بر ثانیه و ۱۵ متر بر ثانیه می‌باشد. پیش‌بینی سرعت متوسط وزش باد در منطقه معادل ۱۶ متر بر ثانیه فرض شده است. سناریوهای دقت پیش‌بینی سرعت وزش باد و احتمال رخداد متناظر آنها در جدول (۱۰) نمایش شده است.

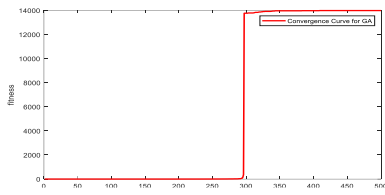
جدول ۹- سناریوهای دقت پیش‌بینی تابش خورشید و احتمال رخداد متناظر آنها

Scenarios	Sc1	Sc2	Sc3	Sc4	Sc5	Sc6	Sc7
AF(PVs)	0.85	0.92	0.90	0.98	0.96	0.97	0.99
Pr(PVs)	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1

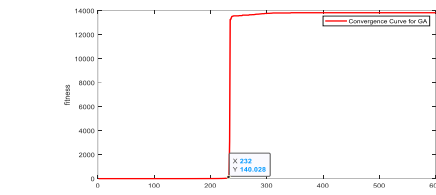
جدول ۱۰- سناریوهای دقت پیش‌بینی سرعت وزش باد و احتمال رخداد متناظر آنها

Scenarios	Sc1	Sc2	Sc3	Sc4	Sc5
AF(WTs)	0.95	1.22	1.35	0.65	1.25
Pr(WTs)	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1

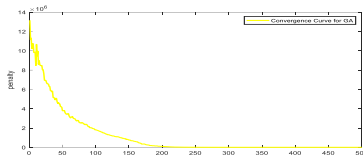
برای منابع تجدیدپذیر فتوولتائیک و توربین بادی ظرفیت خالی اینورتر واسط صرف جذب راکتیو بمنظور حذف اضافه ولتاژ به ویژه در باسهای انتهایی فیدر بعد نصب این منابع و تزریق توان اکتیو توسط آنها می‌شود. برای میزبانی منابع تولید پراکنده دیزل ژنراتور سنکرون نصب بر روی باسهای ۲، ۳، ۴، ۶ تا ۱۸ امکان‌پذیر خواهند بود. ظرفیت ماکزیمم برای نصب دیزل ژنراتور سنکرون ۵۰۰ کیلووات با ضریب قدرت ۰٫۹ است. مطالعات موردی برای پیشینه‌سازی ظرفیت میزبانی منابع تولید پراکنده شامل PVs، WT و DGs در شبکه توزیع ۲۵-باسه تست استاندارد IEEE در عدم حضور و حضور بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز راکتیو D-STATCOM توسط الگوریتم ژنتیک حل می‌شود. احتمال تقاطع و جهش در الگوریتم ژنتیک بترتیب معادل ۰٫۸ و ۰٫۲ در نظر گرفته شده است و تعداد جمعیت اولیه کروموزوم‌های تولید شده معادل ۶۰۰ می‌باشد و تعداد تکرار معادل ۵۰۰ به عنوان معیار همگرایی لحاظ شده است. کدهای مدل پیشنهادی در قالب ام-فایل در محیط نرم افزار متلب نوشته می‌شوند. این نرم افزار بر روی لپ تاپ ASUS با پردازشگر ۴ هسته‌ای و حافظه جانبی ۸ گیگابایت نصب می‌باشد. بارهای پاسخگو بر روی باسهای ۱۰، ۲۲ و ۲۵ بترتیب ۱۵، ۲۰ و ۳۰ درصد تقاضای خود را برای مشارکت در برنامه مدیریت مصرف سمت تقاضا به بهره‌بردار شبکه توزیع پیشنهاد می‌دهند و باسهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ بعنوان کاندیدهای نصب و بهره‌برداری از ادوات جبران‌ساز D-STATCOM با ماکزیمم ظرفیت ۱۵۰ کیلووات در نظر گرفته شده‌اند. مسئله پیشینه‌سازی ظرفیت میزبانی منابع تولید پراکنده شامل PVs، WT و DGs در شبکه توزیع ۲۵-باسه اصلاح شده IEEE با حضور و عدم حضور بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز راکتیو D-STATCOM توسط الگوریتم ژنتیک حل می‌شود. شکل (A۱۱) تا (D11) منحنی‌های همگرایی فیتنس و پنالتی را برای مسئله پیشینه‌سازی میزبانی منابع تولید پراکنده شامل PVs، WT و DGs را با کمترین تلفات شبکه توزیع اکتیو در عدم حضور و حضور بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز D-STATCOM به نمایش می‌گذارد.



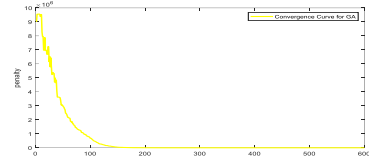
C11- منحنی فیتنس در عدم حضور DRs و D-STATCOM



A11- منحنی فیتنس در حضور DRs و D-STATCOM

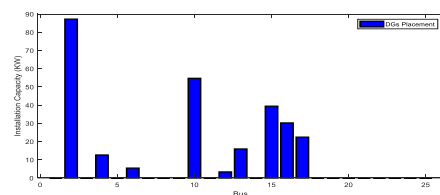
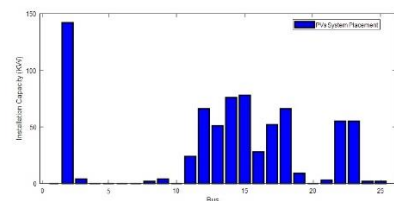
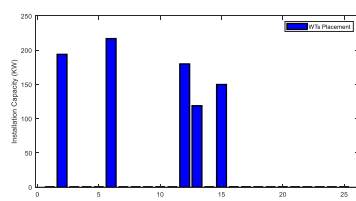


D11- منحنی پناستی در عدم حضور DRs و D-STATCOM

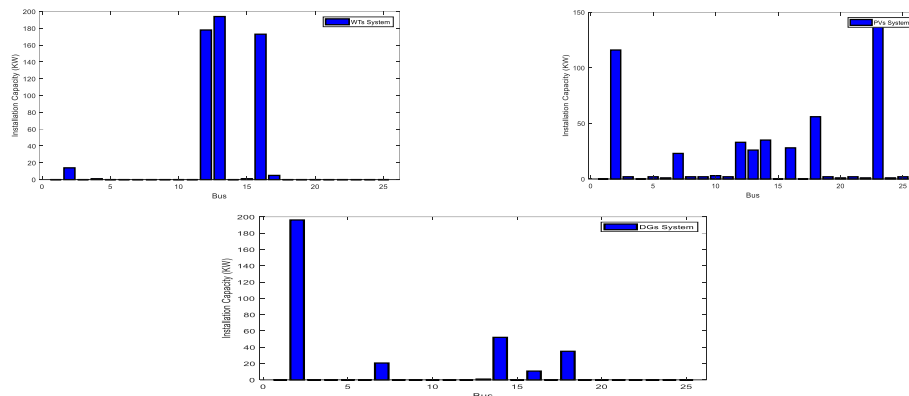


B11- منحنی پناستی در حضور DRs و D-STATCOM

اجرای برنامه در عدم حضور بارهای پاسخگو DRs و جبران‌ساز راکتیو D-STATCOM نشان می‌دهد که بعد ۳۵۲ تکرار الگوریتم ژنتیک به جواب بهینه مسئله همگرا می‌شود، البته پناستی ناشی از تخطی ولتاژ و ضریب توان باسها بعد ۲۲۸ تکرار به مقدار صفر می‌رسد. در حضور بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز D-STATCOM نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روند حل مدل توسط الگوریتم ژنتیک طی ۳۴۲ تکرار به نتیجه بهینه مسئله میزبانی منابع تولید پراکنده همگرا می‌شود و از تکرار ۲۳۵ به بعد نتایج فاقد تخطی ولتاژ و ضریب قدرت است. بعد اجرای برنامه در عدم حضور بارهای پاسخگو DRs و ادوات جبران‌ساز D-STATCOM، بیشینه ظرفیت منصوب منابع تولید پراکنده شامل سیستم فتوولتائیک، توربین بادی و دیزل ژنراتور در سیستم توزیع به ترتیب 482 کیلووات، ۵۶۶ کیلووات و ۳۱۵٫۹ کیلووات در مجموع معادل ۱۳۶۳٫۹ کیلووات تعیین می‌گردد. در این وضعیت شبکه توزیع به طور بهینه ۳۵٫۳۴ درصد از ظرفیت کل قابل نصب را میزبان سیستم فتوولتائیک، ۴۱٫۴۹ درصد از ظرفیت کل قابل نصب میزبان منابع توربین بادی و ۲۳٫۱۶ درصد از ظرفیت کل قابل نصب را میزبان دیزل ژنراتورهای سنکرون است به عبارت دیگر بیشترین ظرفیت نصب به منابع توربین بادی و کمترین ظرفیت به منابع دیزل ژنراتور سنکرون تخصیص یافته است. اما، در حضور بارهای پاسخگو DRs و ادوات جبران‌ساز D-STATCOM ظرفیت میزبانی منابع تولید پراکنده شامل سیستم فتوولتائیک، توربین بادی و دیزل ژنراتور در سیستم توزیع شعاعی ۲۵-باسه مورد مطالعه به ترتیب 719 کیلووات، ۸۶۰ کیلووات و 271.1 کیلووات در مجموع معادل ۱۸۵۰٫۱ کیلووات تعیین می‌گردد. از مقایسه مطالعه موردی دوم با اول استنباط می‌شود که حضور بارهای پاسخگو با افزایش تقاضا و ادوات جبران‌ساز D-STATCOM با جذب توان راکتیو سبب افزایش ظرفیت نصب منابع تولید پراکنده به مقدار ۴۸۶٫۱ کیلووات می‌شود. تحت شرایط جدید، شبکه توزیع بعنوان میزبان ظرفیت کل قابل نصب مقدار ۳۸٫۸۶ درصد را به منابع فتوولتائیک، ۴۶٫۴۸ درصد را به منابع توربین بادی و ۱۴٫۶۵ درصد را به منابع دیزل ژنراتورهای سنکرون اختصاص می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی برای بیشینه ظرفیت نصب شده منابع تولید پراکنده فتوولتائیک، توربین بادی و دیزل ژنراتور سنکرون بر روی باسهای مختلف شبکه توزیع با عدم حضور و حضور بارهای پاسخگو DRs و تجهیز جبران‌ساز راکتیو D-STATCOM در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نمایش داده شده است.

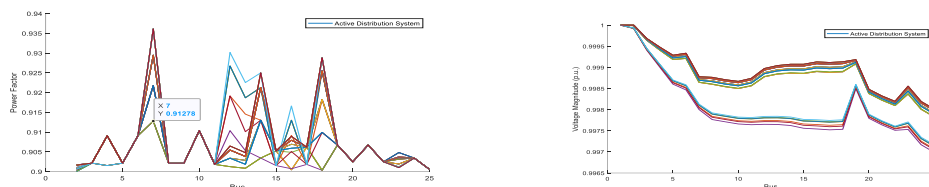


شکل ۱۲- نتایج شبیه‌سازی برای بیشینه ظرفیت نصب شده منابع تولید پراکنده در حضور بارهای پاسخگو DRs و تجهیز جبران‌ساز راکتیو D-STATCOM

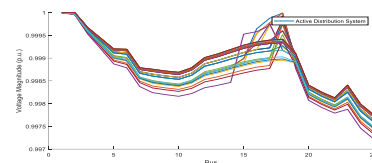
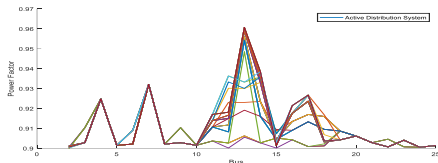


شکل ۱۳- نتایج شبیه‌سازی برای بیشینه ظرفیت نصب شده منابع تولید پراکنده در عدم حضور بارهای پاسخگو DRs و تجهیز جبران‌ساز راکتیو D-STATCOM

نتایج شبیه‌سازی برای بیشینه ظرفیت نصب شده منابع تولید پراکنده در حضور بارهای پاسخگو DRs و تجهیز جبران‌ساز راکتیو D-STATCOM بدین ترتیب است که منابع فتوولتاییک بر روی باسهای ۲، ۳، ۸، ۹ و ۱۱ تا ۱۹ و ۲۱ تا ۲۵ به طور بهینه نصب می‌شوند. در این وضعیت کمترین و بیشترین مقدار ظرفیت نصب شده به ترتیب ۲ کیلووات و ۱۴۲ کیلووات می‌باشد. در حالیکه منابع توربین بادی در حالت بهینه بر روی باسهای ۲، ۶، ۱۲، ۱۳ و ۱۵ نصب می‌شوند که کمترین ظرفیت منصوب آنها معادل ۱۱۹ کیلووات در باس ۱۳ و بیشترین ظرفیت منصوب آنها معادل ۲۱۷ کیلووات در باس ۶ می‌باشد. منابع دیزل ژنراتور سنکرون بر روی باسهای ۲، ۴، ۶، ۱۱، ۱۳، ۱۴، ۱۶ تا ۱۸ نصب می‌شوند که کمترین ظرفیت منصوب معادل ۳،۳ کیلووات در باس ۱۳ و بیشترین ظرفیت منصوب ۸۷،۲ کیلووات در باس ۲ شبکه توزیع مورد مطالعه می‌باشد. در وضعیت عدم حضور بارهای پاسخگو DRs و تجهیز جبران‌ساز راکتیو D-STATCOM بیشینه مقدار ظرفیت نصب منابع فتوولتاییک بر روی باسهای ۲، ۷، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۳ به ترتیب معادل ۱۱۶ کیلووات، ۲۳ کیلووات، ۳۳ کیلووات، ۲۶ کیلووات، ۳۵ کیلووات، ۲۸ کیلووات، ۵۶ کیلووات و ۱۴۲ کیلووات انتخاب می‌شود. در حالیکه بیشینه ظرفیت نصب منابع توربین بادی بر روی باسهای ۱۲، ۱۳ و ۱۶ به ترتیب معادل ۱۷۸ کیلووات، ۱۹۴ کیلووات، ۱۷۳ کیلووات و همچنین دیزل ژنراتور سنکرون بر روی باسهای ۲، ۷، ۱۴، ۱۶ و ۱۸ به ترتیب معادل ۱۹۶،۲ کیلووات، ۲۰،۷ کیلووات، ۵۲،۲ کیلووات، ۱۰،۸ کیلووات و ۳۵،۱ کیلووات نصب می‌گردند. با توجه به اینکه ۷ سناریو مختلف برای تابش خورشید و ۵ سناریو مختلف برای وزش باد داریم کلاً ۳۵ سناریو بهره‌برداری خواهیم داشت باید بتوان قیود فنی شبکه را از طریق ابزارهای موجود در وضعیت عدم حضور بارهای پاسخگو DRs و تجهیز جبران‌ساز راکتیو D-STATCOM ارضاء نمود که شکل (۱۴) به ترتیب دامنه ولتاژ و ضریب توان کلیه باسهای شبکه توزیع را طی سناریوهای مختلف بهره‌برداری به نمایش می‌گذارد. نتایج شبیه‌سازی تحت شرایط عدم حضور بارهای پاسخگو DRs و تجهیز جبران‌ساز D-STATCOM نشان می‌دهد که با توجه به ظرفیت نصب شده از منابع تولید پراکنده این امکان فراهم است تا با واسطه‌های اینورتری منابع توربین بادی و فتوولتاییک و سیستم تحریک دیزل ژنراتور سنکرون جذب توان راکتیو به گونه‌ای تنظیم شود که دامنه ولتاژ باسها طی کلیه سناریوها در محدوده مجاز ۰،۹۸ تا ۱ پریونیت قرار گیرد و در ضمن ضریب قدرت باسها نیز بیشتر از حداقل مقدار مجاز ۰،۹ گردد. نتایج شبیه‌سازی تحت شرایط حضور بارهای پاسخگو DRs و تجهیز جبران‌ساز D-STATCOM در شکل (۱۵) به ترتیب برای دامنه ولتاژ و ضریب توان باسها طی سناریوهای مختلف بهره‌برداری نمایش داده می‌شود.

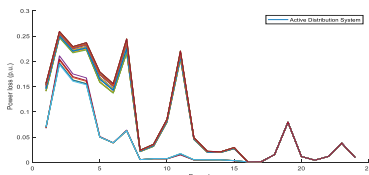


شکل ۱۴- نتایج شبیه‌سازی برای دامنه ولتاژ و ضریب توان کلیه باسهای شبکه توزیع را طی سناریوهای مختلف بهره‌برداری سیستم فتوولتاییک و توربین بادی تحت شرایط عدم حضور بارهای پاسخگو DRs و تجهیز جبران‌ساز D-STATCOM

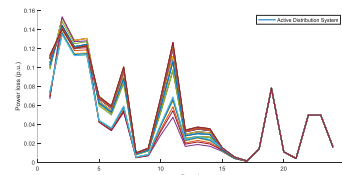


شکل ۱۵- نتایج شبیه‌سازی برای دامنه ولتاژ و ضریب توان کلیه باسهای شبکه توزیع را طی سناریوهای مختلف بهره- برداری سیستم فتوولتائیک و توربین بادی تحت شرایط حضور بارهای پاسخگو DRs و تجهیز جبران‌ساز D-STATCOM

مطابق انتظار در برخی سناریوهای بهره‌برداری از منابع توربین بادی و فتوولتائیک علاوه بر حضور بارهای پاسخگو و جبران‌سازهای توان راکتیو D-STATCOM باز هم دامنه ولتاژ باسهای ۱۷ و ۱۸ شبکه توزیع در مقدار حد بالایی قرار می‌گیرد. البته جذب راکتیو توسط ادوات جبران‌ساز راکتیو و واسط‌های اینورتری منابع توربین بادی و فتوولتائیک سبب شده است تا ضریب قدرت باسبارهای ۱۲ و ۱۵ دقیقاً در حد پایین مجاز محدود گردند و ضریب توان باسبارهای ۱۷ و ۱۸ با مقدار ۰٫۹، مجاز اختلاف بسیار ناچیزی داشته باشند. نتایج پخش بار شبکه طی سناریوهای مختلف بهره‌برداری برای تلفات شاخه‌ها تحت شرایط منابع تولید پراکنده نصب شده توربین بادی، فتوولتائیک و دیزل ژنراتور سنکرون در حضور و عدم حضور بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز D-STATCOM برترتیب در شکل (۱۶) و (۱۷) نمایش شده است. نتایج شبیه‌سازی برای توان راکتیو جذب شده توسط واسط‌های اینورتری منابع توربین بادی و فتوولتائیک طی سناریوهای مختلف بهره‌برداری در عدم حضور و حضور بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز در جدول‌های (۱۱) و (۱۲) نمایش داده شده است.



شکل ۱۷- تلفات شبکه در عدم حضور بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز



شکل ۱۶- تلفات شبکه در حضور بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز

با توجه به حضور منابع تولید پراکنده و تامین محلی بارها، توان اکتیو کشیده شده از پست کاهش می‌یابد و از طرف دیگر توان راکتیو از پست جذب می‌شود اما نمی‌توانیم بگوییم که مقدار افزایش جذب راکتیو از پست متناسب با کاهش جذب اکتیو از آن می‌باشد. بنابراین نمی‌توان پیشبینی دقیقی برای تلفات داشت اما در نتایج می‌بینیم تقریباً میزان تلفات کلیه شاخه‌ها به ویژه شاخه های ابتدایی شبکه توزیع کاهش یافته. برای نمونه بیشترین تلفات در شاخه ۲ شبکه توزیع مورد مطالعه معادل ۰٫۱۵۵ پریونیت بدست می‌آید که در مقایسه با مطالعه موردی اول ۰٫۱۱ پریونیت کاهش نشان می‌دهد. جدول (۱۳) توان راکتیو جذب شده بهینه توسط تجهیزات جبران‌ساز D-STATCOM طی سناریوهای مختلف بهره‌برداری مربوطه را نمایش می‌دهد.

جدول ۱۱- توان راکتیو جذب شده در باسها به طور بهینه توسط واسط‌های اینورتری منابع توربین بادی طی سناریوهای مختلف بهره‌برداری مربوطه در عدم حضور و حضور بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز

عدم حضور بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز					
Buses	Sc1	Sc2	Sc3	Sc4	Sc5
Bus2	6	5	6	2.5	6
Bus4	6	7.5	6	7	6
Bus12	60	60	55	0	45
Bus13	65	65	65	0	65
Bus15	8	6.5	8	9	8
Bus16	56	55	50	0	56
Bus17	6	5.5	6	8	6
حضور بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز					
Buses	Sc1	Sc2	Sc3	Sc4	Sc5
Bus2	۴۵	۲۵	۴۵	۴۵	۴۵
Bus6	6	10	15	10	6
Bus12	26	26	26	20	26
Bus13	16	۵۶	۵۶	30	36
Bus15	35	35	30	30	35

جدول (۱۲): توان راکتیبو جذب شده در باسها به طور بهینه توسط واسطه‌های اینورتری منابع فتوولتائیک طی سناریوهای مختلف بهره‌برداری مربوطه در عدم حضور و حضور بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز

عدم حضور بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز							
Buses	Sc1	Sc2	Sc3	Sc4	Sc5	Sc6	Sc7
Bus2	30	34	33	38	36	37	38
Bus3	6	5	6	6	6	5	6
Bus5	6	6	6	6	6	6	6
Bus6	6	6	6	6	6	6	6
Bus8	6	6	6	6	6	6	6
Bus9	6	6	6	6	6	6	6
Bus10	5	5	5	5	5	5	5
Bus11	8	8	8	8	8	8	8
Bus19	10	10	10	10	10	10	10
Bus20	11	11	15	15	12	11	11
Bus21	10	10	10	10	10	10	10
Bus22	11	11	12	12	11	11	12
Bus23	4	9	7	13	11	12	14
Bus24	3	3	3	3	3	3	3
Bus25	3	3	5	5	5	3	3

حضور بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز							
Buses	Sc1	Sc2	Sc3	Sc4	Sc5	Sc6	Sc7
Bus2	120	130	128	139	135	138	140
Bus3	5	5	5	5	5	3	3
Bus8	20	20	25	25	25	20	20
Bus9	30	30	5	5	5	5	5
Bus11	20	22	22	25	25	25	28
Bus12	55	60	60	65	65	65	65
Bus13	43	47	46	50	49	49	50
Bus14	65	70	68	74	73	74	75
Bus15	66	72	70	76	75	76	77
Bus16	25	25	25	27	27	27	28
Bus17	44	48	48	51	50	50	51
Bus18	56	61	59	65	63	64	65
Bus19	8	8	8	10	10	10	10
Bus21	3	3	3	3	3	3	3
Bus22	4	5	5	5	5	5	5
Bus23	4	5	5	5	5	5	5
Bus24	2	2	2	2	2	2	2
Bus25	3	3	3	3	3	3	3

جدول ۱۳- توان راکتیبو جذب شده بهینه تجهیزات جبران‌ساز D-STATCOM طی سناریوهای مختلف بهره‌برداری

Compensators	D-STATCOM1	D-STATCOM2	D-STATCOM3	D-STATCOM4
Sc1	15	0	17	7
Sc2	15	0	17	7
Sc3	15	0	17	7
Sc4	15	0	17	7
Sc5	20	0	17	7
Sc6	25	35	17	7
Sc7	25	35	17	7
Sc8	25	35	7	7
Sc9	15	2	10	10
Sc10	15	2	10	10
Sc11	15	2	10	10
Sc12	15	2	10	10
Sc13	15	2	10	10
Sc14	15	5	15	15
Sc15	15	5	15	15
Sc16	15	5	15	15
Sc17	15	5	15	15
Sc18	15	5	15	15
Sc19	15	5	15	15
Sc20	15	5	15	15
Sc21	15	5	15	15
Sc22	15	5	15	15
Sc23	15	5	15	15
Sc24	15	5	15	15
Sc25	15	5	15	15
Sc26	15	5	15	15
Sc27	15	5	15	15
Sc28	15	10	6	20
Sc29	15	10	6	20

Compensators	D-STATCOM1	D-STATCOM2	D-STATCOM3	D-STATCOM4
Sc30	15	10	6	20
Sc31	15	10	6	20
Sc32	15	10	6	20
Sc33	15	10	6	20
Sc34	15	10	6	20
Sc35	15	10	6	20

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ایده اصلی استفاده از ظرفیت خالی واسط‌های اینورتری پاسخ سریع سیستم‌های فتوولتاییک و توربین بادی، سیستم تحریک دیزل ژنراتورهای سنکرون به طور هماهنگ با ادوات جبران‌ساز انعطاف‌پذیر توان راکتیو D-STATCOM برای جذب توان راکتیو بمنظور حذف مشکل اضافه ولتاژ باسها تا قبل رسیدن به محدودیت حداقل مقدار مجاز ضریب قدرت در شبکه توزیع است. بعلاوه، در فرآیند کنترل ولتاژ و مدیریت توان راکتیو مشارکت بارهای پاسخگو در سیستم توزیع اکتیو مورد توجه قرار گرفته است. بمنظور اعتبارسنجی مدل، مطالعات عددی بر روی یک شبکه توزیع ۲۵-باسه اصلاح شده IEEE بکار گرفته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که رهیافت کنترل ولتاژ و مدیریت راکتیو منجر به افزایش ظرفیت میزبانی انواع منابع تولید پراکنده می‌شود. مقایسه دامنه ولتاژ شبکه توزیع پسیو و اکتیو مورد مطالعه نشان می‌دهد که افت ولتاژ باسها از ابتدا به انتهای فیدر در زمان بهره‌برداری از شبکه توزیع پسیو تقریباً به صورت خطی کاهش می‌یابد و میزان تلفات شاخه‌ها از انتها به ابتدای فیدر تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. با نصب منابع تولید پراکنده فتوولتاییک، توربین بادی و دیزل ژنراتور سنکرون این نظم به هم خورده و دیگر تغییرات دامنه ولتاژ و تلفات در امتداد فیدر اصلاً قابل پیش‌بینی نبوده و کاملاً به محل و میزان ظرفیت نصب منابع تولید پراکنده وابسته می‌شود. به طور کلی، با افزایش سطح نفوذ منابع تولید پراکنده میزان اضافه ولتاژ تحمیلی در امتداد فیدر از ابتدا به انتها افزایش می‌یابد که با جذب توان راکتیو توسط ظرفیت خالی واسط‌های اینورتری منابع فتوولتاییک و توربین بادی، بکارگیری سیستم تحریک دیزل ژنراتورهای سنکرون و ادوات جبران‌ساز D-STATCOM منصوب با توجه به محدودیت ضریب توان حداقل ۰٫۹ مشکل اضافه ولتاژ در باسبارها حل می‌گردد. فعالیت بارهای پاسخگو و ادوات جبران‌ساز راکتیو علاوه بر دیگر ابزارها به حذف تخطی از قیود فنی اضافه ولتاژ و ضریب قدرت باسها کمک کرده و سبب افزایش ظرفیت میزبانی منابع تولید پراکنده به ویژه انواع تجدیدپذیر آنها نظیر توربین بادی و فتوولتاییک خواهد شد.

منابع

- [1] Walla, T., (2012). "Hosting Capacity for Photovoltaic in Swedish Distribution Grids", Uppsala University, Uppsala, Sweden. M.Sc. thesis.
- [2] Collins, Ward, L. J.K., (2015). "Real and reactive power control of distributed PV inverters for overvoltage prevention and increased renewable generation hosting capacity", *Renew. Energy*, 81, pp. 464-471.
- [3] Seguin, R., Woyak, J. Costyk, D., Hambrick, J., Mather, B., (2016). "High-penetration PV Integration Handbook for Distribution Engineers", National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO,.
- [4] Bollen, M.H.J., Sollerkvist, F., Larsson, A., Lundmark, M. (2006). "Limits to the hosting capacity of the grid for equipment emitting high-frequency distortion", *Proc. Nord. Distrib. Asset. Manag. Conf. Nord*.
- [5] Capitanescu, F., Ochoa, L.F., Margossian, H., Hatzargyriou, N.D., (2015). "Assessing the potential of network reconfiguration to improve distributed generation hosting capacity in active distribution systems", *IEEE Trans. Power System*, 30, pp. 346-356.
- [6] Takenobu, Y., Kawano, Hayashi, SY., Yasuda, N., Minato, S.I., (2016). "Maximizing hosting capacity of distributed generation by network reconfiguration in distribution system", in: *19th Power Syst. Comput. Conf. PSCC*.
- [7] N. Jayasekara, M.A.S. Masoum, P.J. Wolfs, (2016). "Optimal operation of distributed energy storage systems to improve distribution network load and generation hosting capability", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 7, pp. 250-261.
- [8] Rascon, O.C., Schachler, B., Buhler, J., Resch, M., Sumper, A., (2016). "Increasing the hosting capacity of distribution grids by implementing residential PV storage systems and reactive power control", in: *Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM*.
- [9] Hashemi, S., Ostergaard, J., (2017). "Methods and strategies for overvoltage prevention in low voltage distribution systems with PV", *IET Renew. Power Generation*, 11, , pp. 205-214.

- [10] C. Schwaegerl, M.H.J. Bollen, K. Karoui, A. Yagmur, (2005). "Voltage control in distribution systems as a limitation of the hosting capacity for distributed energy resources", in: 18th Int. Conf. Exhib. Electr. Distribution.
- [11] Berizzi, A., Bovo, C., Ilea, V., Merlo, M., Monfredini, G., Subasic, M., Arrigoni, C., Zanellini, F., Corti, F., Rochira, I., (2013). "Advanced functions for DSOs control center", in: 2013 IEEE Grenoble Conf., PowerTech.
- [12] Saiz-Marín, E., Lobato, E., Egido, I., (2014), "Local hosting capacity increase by means of wind farm voltage control provision", IEEE Trans. Power Syst. 29, pp. 1731-1738.
- [13] B. Bletterie, J. Le Baut, S. Kadam, R. Bolgaryn, A. Abart, 2015. "Hosting capacity of LV networks with extended voltage band", in: Proc. - 2015 Int. Symp. Smart Electr. Distrib. Syst. Technol., EDST, pp. 531-536.
- [14] Sakar, S. M.E., Aleem, S.H.E.A., Zobaa, A.F., (2016). "Hosting capacity assessment and improvement for photovoltaic-based distributed generation in distorted distribution networks", in: IEEEIC 2016 - Int. Conf. Environ. Electr. Eng.
- [15] Capitanescu, F., Ochoa, L.F., Margossian, H., Hatziaargyriou N.D., (2015). "Assessing the potential of network reconfiguration to improve distributed generation hosting capacity in active distribution systems", IEEE Trans. Power Syst. 30, pp. 346-356.
- [16] Takenobu, Y., Kawano, S., Hayashi, Y., Yasuda, N., Minato, S.I., (2016). "Maximizing hosting capacity of distributed generation by network reconfiguration in distribution system", in: 19th Power Syst. Comput. Conf.
- [17] Ahmed, H.M., Salama, M.M., (2019). "Energy management of AC-DC hybrid distribution systems considering network reconfiguration", IEEE Trans. Power Syst, 34, pp. 4583-4594.
- [18] Etherden, N. and Bollen, M.H.J., (2013). "Dimensioning of energy storage for increased integration of wind power", IEEE Trans. Sustain. Energy, 4, pp. 546-553.
- [19] Panda, A., Aviso, K.B., Mishra, U., Nanda, I., (2021). "Impact of optimal power generation scheduling for operating cleaner hybrid power systems with energy storage", Int. J. Energy Res. 45, pp. 14493-14517.
- [20] Etherden, N., and Bollen, M.H.J., (2011). "Increasing the hosting capacity of distribution networks by curtailment of renewable energy resources", in: 2011 IEEE PES Trondheim PowerTech Power Technol. A Sustain. Soc., POWERTECH.
- [21] Rauma, K., Cadoux, F., Hadj-Saïd, N., Dufournet, A., Baudot, C., Roupioz, G., (2016). "Assessment of the MV/LV on-load tap changer technology as a way to increase LV hosting capacity for photovoltaic power generators", IET Conf. Proc.
- [22] Bajaj, M., and Singh, A.K., (2022). "Performance assessment of hybrid active filtering technique to enhance the hosting capacity of distorted grids for renewable energy systems", Int. J. Energy Res, 46, 2783-2809.
- [23] Liu, D., Wang, C., Tang, F., Zhou, Y., (2020). "Probabilistic assessment of hybrid wind-PV hosting capacity in distribution systems", Sustainability, 12, 2183.
- [24] Ali, A., Mahmoud, K., Lehtonen, M., (2021). "Maximizing hosting capacity of uncertain photovoltaics by coordinated management of OLTC, VAr sources and stochastic EVs", Int. J. Electr. Power Energy Syst, 127, 106627.
- [25] Taghavi, M., Delkhosh, H., Parsa Moghaddam, M. and A., Fini, S., (2022). "Combined PV-Wind Hosting Capacity Enhancement of a Hybrid AC/DC Distribution Network Using Reactive Control of Convertors and Demand Flexibility", Sustainability, 14, 7558.
- [26] Samadi Gazijahani, F., Salehi, J., (2017). "Optimal Bi-level Model for Stochastic Risk-based Planning of Microgrids under Uncertainty", IEEE Transaction on Smart Grid, PP. 1-10.
- [27] Safari-Chabok, B., Ashouri, A., (2016). "Optimal Placement of D-STATCOMs into the Radial Distribution Networks in the Presence of Distributed Generations", American Journal of Electrical and Electronic Engineering, 4, 2, pp. 40-

