

تخصیص بهینه تولیدات پراکنده و سیستم ذخیره انرژی باتری به منظور بهبود مشکلات کیفیت ولتاژ در یک شبکه توزیع با قابلیت بازآرایی

عرفان خرازیان^۱ علیرضا جلیلیان^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران
erfan_kharazian@elec.iust.ac.ir

۲- استاد- دانشکده مهندسی برق- قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری از سامانه‌های قدرت
دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران
jalilian@iust.ac.ir

چکیده: امروزه کیفیت برق‌رسانی و مشکلات مربوط به تغییرات ولتاژ اهمیت مضاعفی هم نزد مشترکین و هم نزد شرکت‌های توزیع پیدا کرده است. بنابراین جبران‌سازی مسائلی نظیر فروافتادگی ولتاژ و انحرافات ولتاژ شایان توجه است. در این مقاله، ابتدا یک الگوریتم برنامه‌ریزی ترکیبی پیشنهادی به منظور تخصیص بهینه تولیدات پراکنده و ذخیره‌سازهای باتری برای حل مشکلات فنی و اقتصادی مرتبط با رخداد فروافتادگی ولتاژ در شبکه معرفی می‌گردد. این الگوریتم متشکل از دو مسئله اصلی و فرعی با حلی تو در تو با در نظر گرفتن عدم قطعیت واحدهای پراکنده و تقاضای بار می‌باشد. سپس از ظرفیت و مکان بهینه باتری‌ها و تولیدات پراکنده حاصل از اجرای الگوریتم برنامه‌ریزی ترکیبی در الگوریتمی تحت عنوان بازآرایی شبکه پس از خطا به منظور بهره‌برداری اقتصادی از شبکه و بهبود انحرافات ولتاژ به صورت زمان حقیقی استفاده می‌گردد. در گام بعدی به تاثیر تخصیص بهینه تولیدات پراکنده و باتری‌ها در کاهش تلفات شبکه پرداخته می‌شود. دو الگوریتم پیشنهادی در شبکه توزیع اصلاح شده ۳۳ شینه IEEE تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج بدست آمده کاهش ۵۳ درصدی تابع هزینه الگوریتم برنامه‌ریزی به همراه عدم تحمیل هزینه اضافه به شبکه بر اثر وقوع فروافتادگی ولتاژ، بهره‌برداری اقتصادی از شبکه بدون نیاز به انقطاع بار پس از وقوع خطا و کاهش ۵۰ درصدی تلفات کل شبکه را با استفاده از تخصیص بهینه تولیدات پراکنده و باتری‌ها نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم برنامه‌ریزی، بازآرایی شبکه، تلفات شبکه، تولیدات پراکنده، ذخیره‌ساز باتری، فروافتادگی ولتاژ

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.2.29

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۲/۱۷

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۴/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۵/۲۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر علیرضا جلیلیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - نارمک - خیابان دانشگاه - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر به دلیل کاربرد روزافزون تولیدات پراکنده و پیدایش بارهای غیرخطی، کیفیت برق‌رسانی در سیستم‌های توزیع مدرن تحت تاثیر قرار گرفته است. شرکت‌های توزیع هم‌اکنون با مشکلات متعدد کیفیت توانی مواجه هستند و متخصصان این حوزه سعی در حل مشکلات دارند [۱]. از مهم‌ترین این مشکلات می‌توان به فروافتادگی ولتاژ اشاره کرد. همچنین از دلایل وقوع فروافتادگی ولتاژ می‌توان اتصال بارهای سنگین به شبکه، راه‌اندازی موتورهای بزرگ و رخداد خطا در تاسیسات مصرف‌کنندگان را نام برد. از تاثیرات این فروافتادگی در شبکه نیز می‌توان تریپ دادن تجهیزات حساس نظیر درایوهای سرعت متغیر یا قابل تنظیم، اختلال در عملکرد رله‌های الکترومکانیکی و کاهش بهره‌وری ماشین‌های الکتریکی چرخان را ذکر کرد [۲].

استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی به منظور حل مشکلات مختلف بهره‌برداری و برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت در مطالعات اخیر از اهمیت مضاعفی برخوردار بوده است. به‌طور مثال از این سیستم‌های ذخیره‌ساز طبق [۳] می‌توان به منظور کاهش تاثیر عملکرد متناوب تولیدات پراکنده ادغام‌شده در سیستم توزیع، بهبود مشکلات کیفیت توانی و قابلیت اطمینان به همراه ایجاد تاخیر در ارتقا سیستم استفاده کرد. از انواع پرکاربرد ذخیره‌سازهای انرژی، سیستم ذخیره انرژی باتری می‌باشد که قابلیت حل مشکلات مختلف شبکه نظیر بهبود پروفیل ولتاژ شین‌ها و تامین انرژی مصرف‌کنندگان در ساعات اوج را دارد [۴]. همچنین این سیستم‌های ذخیره باتری قابلیت حل طیفی از مشکلات کیفیت ولتاژ (نظیر فروافتادگی ولتاژ) در سطح شبکه را دارند. در حقیقت این نوع از ذخیره‌سازها در کنار منابع تولید پراکنده از پیش تخصیص‌شده در شبکه توانایی حل مشکلات مرتبط با کیفیت توان بدون نیاز به تخصیص ادوات پیشرفته و سفارشی (نظیر فیلترهای قدرت فعال و بازیاب دینامیکی ولتاژ) را در سطح شبکه به‌طرز مطلوبی خواهند داشت [۳].

انواع مختلفی از سیستم‌های ذخیره انرژی در مطالعات گوناگون مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. که می‌توان به ذخیره انرژی با هوای فشرده، ذخیره پمپاژ و سیستم ذخیره باتری به عنوان بخشی از انواع سیستم‌های ذخیره‌ساز اشاره کرد [۵]. شایان ذکر است برخی از این فناوری‌ها (نظیر ذخیره هوای فشرده و ذخیره پمپاژ) معمولاً در اندازه‌هایی بزرگ برای تامین بار پایه شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند. لذا از لحاظ جایگذاری محدودیت‌هایی را دربر خواهند داشت. بنابراین در مقایسه با ذخیره‌سازهای پمپاژ و هوای فشرده، سیستم‌های ذخیره انرژی باتری طبق [۴] عموماً در اندازه‌هایی متنوع موجود بوده و راه-حل‌هایی انعطاف‌پذیر برای بهبود قابلیت اطمینان و مشکلات کیفیت توانی ارائه می‌دهند. به‌علاوه، سیستم‌های ذخیره باتری از طریق مبدل-های منبع ولتاژ کنترل می‌گردند. لذا می‌توانند نسبت به دستگاه‌های سوئیچ‌شده مکانیکی (نظیر بانک‌های خازنی) پاسخ سریع‌تری برای بهبود مشکلات افت ولتاژ ارائه دهند [۵].

از دیگر کاربردهای سیستم‌های ذخیره انرژی می‌توان به بهره‌برداری از آن‌ها به همراه تولیدات پراکنده در شبکه‌های توزیع اشاره کرد. در حقیقت در حال حاضر مسائل مربوط به جابجایی و ظرفیت-سنجی تولیدات پراکنده و همچنین میزان تاثیر آن‌ها در شبکه‌های توزیع از جذابیت‌های تحقیقاتی می‌باشد چراکه با توجه به مزایایی نظیر کاهش تلفات توان شبکه، بهبود قابلیت اطمینان و امنیت شبکه در کنار حفظ ولتاژ شین‌ها در محدوده استاندارد بهره‌برداری، نمی‌توان از نقش مهم تولیدات پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر غافل شد [۶].

در ارتباط با کاربردهای سیستم ذخیره‌ساز باتری، می‌توان به ترکیب این سیستم با سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر AC در مطالعات مختلف اشاره کرد. نویسندگان در [۷-۹] روش‌های مختلفی را با استفاده از بازیاب دینامیکی ولتاژ مبتنی بر ذخیره‌ساز باتری به منظور حل مشکلات فروافتادگی ولتاژ معرفی کرده‌اند. اساس این روش‌ها بر جبران فروافتادگی ولتاژ با استفاده از تزریق سری ولتاژ در محل نصب استوار است. این نوع تزریق ولتاژ باعث بهبود ولتاژ نهایی می‌شود. البته شایان ذکر است که مطالعات مراجع [۷-۹] متمرکز بر حل مشکلات توانی در سمت مکان مصرف‌کننده (یعنی جبران‌سازی محلی) می‌باشد. در [۱۰] از بازیاب دینامیکی ولتاژ ترکیب‌شده با سیستم ذخیره انرژی به منظور بهبود مشکلات فروافتادگی ولتاژ با تکیه بر روش‌هایی هوشمند استفاده شده است. در [۱۱] نیز جبران‌سازی فروافتادگی ولتاژ با استفاده از انواع سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر AC انجام گرفته و نتایج عملکرد آن‌ها با یکدیگر تحت مقایسه قرار گرفته است. همچنین از سیستم ذخیره انرژی باتری می‌توان در قالب روش‌های مدیریتی سیستم به منظور حل مشکلات کیفیت برق‌رسانی مرتبط با ولتاژ (نظیر انحرافات ولتاژ)، تقویت ساز و کار بهره‌برداری از شبکه در کنار حداقل‌سازی تلفات کل شبکه استفاده کرد [۴]. علاوه بر این، مطالعات [۱۲-۱۳] به ارائه روش‌هایی به منظور بهبود شاخص‌های کیفیت توان با استفاده از یک سیستم انتقال انعطاف‌پذیر AC به نام بهساز یکپارچه کیفیت توان پرداخته است. این بهساز به‌طور مرسوم شامل یک اینورتر سری و یک اینورتر موازی است. اگرچه روش ارائه-شده در [۱۲] به منظور بهینه‌سازی جبران توان راکتیو برای یک نقطه بار تکی در شبکه فرمول‌بندی شده است. همچنین روش ذکرشده در [۱۳] از یک جبران‌ساز خازنی صرف‌نظر از تغییرات تقاضای بار استفاده کرده است. در مطالعات بیشتر در [۱۴-۱۵] روش‌های مدیریت انرژی که از ذخیره‌سازهای باتری استفاده کرده‌اند، به منظور بهبود کیفیت توان در سیستم‌های مقیاس کوچک (یعنی ریزشبکه‌ها) پیشنهاد شده-اند. همچنین نویسندگان در [۱۶] یک چهارچوب پویا، تطبیقی و تصادفی برای کنترل بهینه سیستم‌های ذخیره انرژی باتری در یک شبکه توزیع ولتاژ متوسط که شامل تولیدات پراکنده است ارائه داده‌اند. گرچه مسئله تخصیص بهینه ذخیره‌ساز باتری در سطح شبکه مورد

بررسی قرارنگرفته است. به عنوان جمع‌بندی شایان ذکر است که در مراجع [۷-۱۶] بهبود مشکلات کیفیت توان در قالب جبران‌سازی محلی در شبکه انجام گرفته است. در حقیقت به صورت سراسری و در کل شبکه، تخصیص بهینه ترکیب تولیدات پراکنده و ذخیره‌ساز باتری مورد بررسی قرارنگرفته است.

به منظور تخصیص و ظرفیت‌سنجی بهینه تولیدات پراکنده در شبکه، روش‌های متنوعی در مقالات ارائه شده است. به‌طورمثال مرجع [۱۷] از ترکیب تحلیل حساسیت بر مبنای شاخص پایداری ولتاژ و الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک به منظور جابجایی و ظرفیت‌سنجی بهینه تولیدات پراکنده برای بهبود مشکلات تلفات کل شبکه و جریان‌کشی از شبکه بالادستی در سطح شبکه استفاده کرده است. البته این مرجع به بررسی کاربرد انواع ذخیره‌ساز انرژی به همراه تولیدات پراکنده در حل دیگر مشکلات بهره‌برداری (نظیر رخداد فروافتادگی ولتاژ) در سراسر شبکه نپرداخته است. در ارتباط با دیگر الگوریتم‌های استفاده شده در ادغام تولیدات پراکنده در شبکه، می‌توان به مطالعه [۱۸] اشاره کرد که نویسندگان روشی مبتنی بر جستجوی تابو به منظور مکان‌یابی بهینه تولیدات پراکنده برای حداقل‌سازی تلفات توان در سیستم توزیع ارائه داده‌اند. در [۱۹] نیز یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ترکیبی با استفاده از پخش بار توزیع مبتنی بر تزریق جریان به منظور جایگذاری و ظرفیت‌سنجی بهینه تولیدات پراکنده جهت بهبود پروفیل ولتاژ و حداقل‌سازی تلفات توان ارائه گردیده است. در بخشی دیگر نیز مرجع [۲۰] مکان‌یابی و ظرفیت‌سنجی تولیدات پراکنده در شبکه‌های توزیع شعاعی را با استفاده از یک الگوریتم جستجوی هماهنگی بهبودیافته پیشنهاد داده است. روشی که در [۲۰] ارائه شده است با الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی‌شده غیرغالب به منظور امکان‌پذیری روش پیشنهادی مقایسه گردیده است. به‌طورکلی، مطالعات فوق‌الذکر پتانسیل قابل توجه استفاده از ترکیب تولیدات پراکنده با دیگر منابع موجود در شبکه‌های توزیع را به منظور برآورد اهدافی نظیر بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات توان کل شبکه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی گوناگون مورد بررسی قرار داده‌اند.

بازآرایی در شبکه توزیع نیز به منظور برآورد اهداف مختلف بهره‌برداری (نظیر بهبود تلفات کل شبکه و پروفیل ولتاژ) به‌خصوص در شرایط رخداد خطا در مطالعات مختلف مورد بررسی قرارگرفته است. در [۲۱] یک مدل ریاضی برای بازآرایی شبکه توزیع به منظور برآورد اهدافی نظیر بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات کل شبکه در حضور تولیدات پراکنده ارائه شده است. البته این مرجع صرفاً تخصیص تولیدات پراکنده را در نظر گرفته است و اثر جابجایی بهینه ذخیره‌سازهای انرژی به همراه واحد بادی در سطح شبکه توزیع مورد ارزیابی قرارنگرفته است. همچنین در [۲۲] بازآرایی شبکه توزیع به عنوان روشی که می‌تواند منجر به بهبود فروافتادگی ولتاژ شود، با استفاده از تعریف الگوریتم ازدحام ذرات گسسته مورد بررسی قرارگرفته است. هرچند در این الگوریتم از تخصیص تولیدات پراکنده، ذخیره‌ساز انرژی

و یا ترکیب آن‌ها به منظور بررسی بهتر اثر جبران‌سازی سراسری در فرآیند بازآرایی شبکه برای بهبود موثرتر فروافتادگی ولتاژ استفاده نشده است.

با توجه به مطالعات فوق‌الذکر، جای خالی تعریف مسأله بهینه‌سازی از ترکیب تولیدات پراکنده و سیستم ذخیره انرژی باتری در سطح شبکه توزیع و به صورت جبران‌سازی سراسری به منظور بهبود مشکلات فروافتادگی ولتاژ مشهود است. در واقع برخلاف سایر مطالعات که از انواع سیستم‌های ذخیره انرژی در قالب جبران‌سازی محلی (مانند جبران‌سازی محدود در سمت مصرف‌کننده و یا در سطح ریزشبکه) به منظور بهبود مشکلات مرتبط با ولتاژ شبکه استفاده شده است، در این پژوهش از تخصیص بهینه تولیدات پراکنده و سیستم ذخیره باتری در سطح شبکه توزیع و در مقیاسی گسترده برای حل مشکلات مرتبط با رخداد فروافتادگی ولتاژ و تغییرات ولتاژ در شرایط مختلف بهره‌برداری از شبکه استفاده شده است. نوآوری‌ها و مشارکت‌های این مقاله را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- ۱- استفاده از ترکیب بهینه تولیدات پراکنده و سیستم ذخیره‌ساز باتری تحت عنوان الگوریتم برنامه‌ریزی پیشنهادی به منظور حل مشکلات فنی و اقتصادی وقوع فروافتادگی ولتاژ
- ۲- مدل‌سازی فروافتادگی ولتاژ با اتصال بارهای سنگین مناطق صنعتی به شبکه با تعریف مناطق صنعتی مختلف در فیدرهای اصلی و فرعی شبکه تحت مطالعه (در اغلب مطالعات: مدل‌سازی فروافتادگی ولتاژ با در نظر گرفتن وقوع خطا در تاسیسات شبکه)
- ۳- استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک بهبودیافته (اعمال تقاطع و جهش پیشرفته بر جمعیت اولیه) به همراه سناریوسازی بر مبنای روش شبیه‌سازی مونت - کارلو به منظور نمایش عدم قطعیت واحدهای تولیدپراکنده و تقاضای بار برای جابجایی و ظرفیت‌سنجی بهینه باتری‌ها
- ۴- استفاده از نتایج حاصل از اجرای الگوریتم برنامه‌ریزی در الگوریتمی زمان حقیقی تحت عنوان بازآرایی شبکه پس از خطا به منظور نمایش کارایی و مقرون به‌صرفگی سیستم ذخیره‌ساز باتری در حل دیگر مشکلات شبکه (نظیر انحرافات ولتاژ و تلفات شبکه)
- ۵- کاهش مطلوب تلفات کل شبکه با استفاده از ظرفیت نامی تولیدات پراکنده و ظرفیت بهینه بدست‌آمده ذخیره‌سازهای باتری حاصل از اجرای الگوریتم برنامه‌ریزی ترکیبی

۲- تعریف مسأله بهینه‌سازی

۲-۱- مدل‌سازی فروافتادگی ولتاژ

فروافتادگی ولتاژ به صورت کاهش لحظه‌ای ولتاژ موثر بین ۰/۱ تا ۰/۹ پریونیت در بازه زمانی نیم سیکل تا یک دقیقه در فرکانس نامی سیستم تعریف می‌شود. از عوامل ایجاد آن می‌توان به خطاهای اتصال کوتاه و سوئیچینگ بارهای اصلی اشاره کرد. در این پژوهش برای

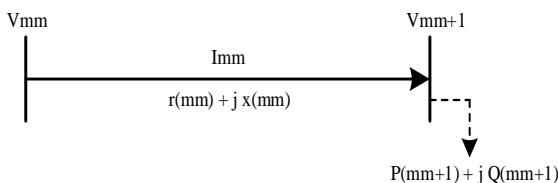
پس از محاسبه جریان تمامی شاخه‌ها در بخش جاروب پسر، حال از شین مرجع به بعد می‌توان ولتاژ هر شین را در قالب جاروب پیشرو بخش بار محاسبه کرد. به قسمی که رابطه (۴) بیانگر وابستگی ولتاژ هر شین به اندازه ولتاژ شین قبلی و جریان شاخه متصل شده به همراه امیدانس آن را نشان می‌دهد. همچنین با محاسبه تمامی جریان شاخه‌ها و ولتاژ شین‌های (در آخرین تکرار) شبکه می‌توان تلفات کل را به شرح زیر محاسبه کرد:

$$P_{loss} = \text{Re}(VI^*) \quad (5)$$

$$Q_{loss} = \text{Im}(VI^*) \quad (6)$$

۲-۲-۲- معرفی شاخص پایداری مبتنی بر ولتاژ

انواع مختلفی از تحلیل حساسیت به منظور جایگذاری منابع انرژی در شبکه در مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است؛ در این مقاله به معرفی یک شاخص پایداری مبتنی بر ولتاژ به صورت ترکیب شده با پخش بار پسر - پیشرو به منظور جایگذاری بهینه تولیدات پراکنده به شرح زیر استفاده می‌گردد.



شکل (۱): مدار معادل ۲ شین شبکه حاوی شاخه mm

طبق مدار معادل فوق، می‌توان شاخص پایداری ولتاژ را با توجه به جریان عبوری شاخه mm و توان کل شین بعدی شبکه به شرح زیر محاسبه کرد:

$$I(mm) = \frac{V(mm) - V(mm+1)}{r(mm) + jx(mm)} \quad (7)$$

$$P(mm+1) - jQ(mm+1) = V(mm+1)^* I(mm) \quad (8)$$

با ترکیب روابط (۷) و (۸) می‌توان به معادله درجه دوم ولتاژ شین بعدی رسید:

$$|V(mm+1)|^4 - b|V(mm+1)|^2 + c = 0 \quad (9)$$

رابطه (۹) بیانگر فرم درجه دوم از $|V(mm+1)|^2$ می‌باشد؛ با تعیین ضرایب آن به شرح دو رابطه زیر:

$$b = |V(mm)|^2 - 2P(mm+1)r(mm) - 2Q(mm+1)x(mm) \quad (10)$$

$$c = (P^2(mm+1) + Q^2(mm+1))(r^2(mm) + x^2(mm)) \quad (11)$$

در نهایت می‌توان با حل حقیقی معادله (۹) به شاخص پایداری مبتنی بر ولتاژ هر شین رسید:

مدل‌سازی رخداد فروافتادگی ولتاژ از اتصال بارهای سنگین مناطق صنعتی به صورت لحظه‌ای و در حالت سوئیچینگ استفاده می‌گردد. با تخصیص مناطق صنعتی مختلف در فیدرهای اصلی و فرعی شبکه تحت مطالعه، وقوع این فروافتادگی برای ولتاژ در سطح شبکه مدل‌سازی می‌گردد.

۲-۲- تخصیص بهینه تولیدات پراکنده

به منظور جابجایی بهینه تولیدات پراکنده در شبکه توزیع، از ترکیب پخش بار پسر - پیشرو با یک تحلیل حساسیت مبتنی بر شاخص پایداری ولتاژ به شرح زیر استفاده می‌گردد.

۲-۲-۱- استفاده از پخش بار پسر - پیشرو

به منظور دستیابی به دامنه ولتاژ هر شین در یک شبکه توزیع با ساختار شعاعی، از مبنای پخش بار پسر و پیشرو که در [۲۴] توسط دکتر شیرمحمدی و همکارانش معرفی شده است استفاده می‌گردد. این پخش بار از دو قسمت اساسی جاروب پسر و جاروب پیشرو تشکیل شده است. به قسمی که ابتدا جاروب پسر به منظور محاسبه جریان شاخه‌های شبکه توزیع به سمت شین مرجع شبکه انجام می‌گردد. سپس جاروب پیشرو برای محاسبه ولتاژ گره‌های شبکه از روی جریان شاخه‌های بدست آمده از قسمت پسر اعمال می‌گردد. همچنین علاوه بر نمایش پروفیل ولتاژ شین‌های شبکه، محاسبه تلفات توان اکتیو و راکتیو کل نیز به عنوان خروجی این پخش بار قابل حصول است. معادلات اساسی پخش بار با شروع از قسمت پسر و در نهایت بروزرسانی مقادیر ولتاژ در هر تکرار به شرح زیر است:

$$I_{Li} = \frac{P_{Li} - jQ_{Li}}{V_i^*} \quad (1)$$

رابطه فوق بیانگر جریان بارهای توانی شبکه است؛ پس از بدست آوردن جریان‌های بار تمامی شین‌ها، جریان هریک از شاخه‌های شبکه مطابق روند زیر قابل حصول است:

$$I_{final_br} = I_{load} \quad (2)$$

$$I_{br} = I_{next_br} + I_{load} \quad (3)$$

رابطه (۲) بیانگر اینست که اگر شاخه انتخابی، آخرین شاخه از فیدر شبکه باشد آنگاه جریان این شاخه با جریان بار انتهایی فیدر برابر است. همچنین رابطه (۳) حالت دیگری را بیان می‌کند بدین صورت که اگر شاخه انتخابی، آخرین شاخه از فیدر شبکه نباشد آنگاه جریان این شاخه از مجموع جریان شاخه بعدی و بار متصل به آن قابل محاسبه است.

$$V_2 = V_1 - Z_2 I_{1-2} \quad (4)$$

- هزینه‌های کلی مربوط به ذخیره‌ساز باتری
- هزینه تلفات ذخیره‌ساز باتری
- هزینه ناشی از رخدادهای فروافتادگی ولتاژ

مسئله بهینه‌سازی تحت تابع هدف فوق در حالت‌های پایه شبکه و با جایگذاری باتری حل می‌گردد. بدین صورت که در حالت پایه شبکه، هزینه‌های وقوع فروافتادگی ولتاژ به تابع هدف اعمال می‌گردد و هزینه‌ای برای تخصیص باتری‌ها لحاظ نمی‌گردد؛ در حالت تخصیص باتری، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تلفات ذخیره‌ساز باتری لحاظ شده و در صورت وقوع فروافتادگی ولتاژ با وجود تخصیص سیستم باتری، هزینه ناشی از این فروافتادگی نیز در تابع هدف لحاظ می‌گردد. در این راستا، در رابطه (۱۳) بیانگر تعداد شین‌های شبکه، K_{BES} بیانگر بردار دودویی توصیف‌کننده مکان ذخیره‌سازهای باتری و K_{BESn} بیانگر اینست که اگر ذخیره‌ساز در شین n نصب شده باشد بردار مقدار یک و اگر در آن شین ذخیره‌سازی نباشد بردار مقدار صفر را نشانگر می‌شود. C_p و C_e به ترتیب بیانگر هزینه‌های سرمایه‌گذاری سالانه انرژی و توان برای ذخیره‌سازهای باتری شبکه توزیع بوده و همچنین E_{BES}^{rat} و S_{BES}^{rat} به ترتیب بیانگر انرژی نامی ذخیره‌ساز برحسب kWh و توان ظاهری نامی ذخیره‌ساز برحسب kVA می‌باشد. β_m نشان‌دهنده ضریب هزینه نگهداری از ذخیره‌ساز و برحسب درصدی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری می‌باشد. در ادامه نیز C_{BES}^{loss} بیانگر هزینه تلفات انرژی رفت و برگشتی برای ذخیره‌ساز باتری تعریف می‌گردد؛ همچنین ϵ بیانگر مقادیر مورد انتظار از متغیرهای تصادفی (نظیر $P_{Ln,s}$) براساس سناریوسازی می‌باشد که به مقدار مربوطه از فرمول-بندی زیرمسئله این الگوریتم نسبت داده می‌شود. شایان ذکر است که

برای هر سناریو از هر کروموزوم الگوریتم برنامه‌ریزی، مقادیر متغیرهای تصادفی (نظیر $A_{ev,n,s}$ و $C_{ev,n,s}^{loss}$) از حل زیرمسئله به شرح زیر حاصل می‌گردند. در نهایت نیز N_{ev} و C_{ev} به ترتیب به تعداد وقوع فروافتادگی ولتاژ در طول سال و هزینه مربوط به رخدادهای افت ولتاژ برحسب \$/kW بر تعداد رخداد تعریف شده و همچنین A_{ev} نیز بیانگر متغیر دودویی توصیف‌کننده رخداد یک فروافتادگی ولتاژ در شین n و با در نظر گرفتن مجموعه سناریو S می‌باشد. قید تابع هدف مسئله اصلی برای حداکثر تعداد تخصیص باتری‌ها در شبکه نیز تعریف می‌گردد؛ که به شرح رابطه (۱۷) می‌باشد.

$$\sum_{n=1}^{N_B} K_{BES_n} \leq N_{BES}^{Max} \quad (17)$$

همچنین لازم به ذکر است که در تعریف E_{BES}^{rat*} و S_{BES}^{rat*} برای هر باتری، این مقدار استار شده به ترتیب مقادیر نامی انرژی و توان ذخیره‌ساز باتری هستند؛ که از منحنی تابع توزیع احتمالاتی به ترتیب E_{BES}^{rat} و S_{BES}^{rat} با احتمال ۹۵ درصدی از زیر مسئله حاصل می‌گردند. در نهایت شایان ذکر است که تابع هدف مسئله اصلی به همراه قیود آن در نرم-افزار متلب برنامه نویسی گردیده است.

$$N_{mm} = \frac{4 \{P_1(mm+1) - Q_1(mm+1)\}^2 + 4 \{P_2(mm+1) + Q_2(mm+1)\}^2 |V(mm+1)|^2}{|V(mm+1)|^4} \quad (12)$$

رابطه (۱۲) بیانگر وابستگی شاخص پایداری هر شین شبکه بر مقادیر توانی شین بعدی به همراه ولتاژ آن شین است. همچنین در این رابطه توان اکتیو و راکتیو شین بعدی شبکه به شرح زیر قابل محاسبه است:

$$P(mm+1) = \text{Re}\{V^*(mm+1).I(mm)\} \quad (13)$$

$$Q(mm+1) = -\text{Im}\{V^*(mm+1).I(mm)\} \quad (14)$$

مقادیر ولتاژ به کاررفته در روابط فوق از آخرین تکرار پخش بار پسرو-پیشرو انجام‌شده از زیربخش (۲-۲-۱) حاصل می‌گردد؛ که پس از بدست آمدن ولتاژ هر شین، در نهایت شاخص پایداری مبتنی بر ولتاژ (N_{mm}) به شرح رابطه (۱۲) قابل محاسبه است.

با تعریف رابطه شاخص پایداری ولتاژ در هر شین، گره‌ای که در آن N_{mm} حداکثر است به کاهش ولتاژ حساسیت بیشتری دارد. لذا گره‌هایی با بالاترین میزان شاخص، مناسب جایگذاری منابع تولید پراکنده در سطح فیدرهای اصلی و فرعی شبکه (شامل این گره‌ها) می‌باشند. بنابراین در این گره‌ها زمینه برای بهبود پایداری ولتاژ در سطح شبکه توزیع وجود دارد. انتخاب گره‌های مناسب با مقدار شاخص بالاتر به شرح زیر است:

$$N_{node} = \max(N_{mm}), mm = 2, 3, N_b \quad (15)$$

۲-۳- جایابی و ظرفیت‌سنجی بهینه ذخیره‌ساز باتری

با جایگذاری بهینه تولیدات پراکنده مبتنی بر انرژی بادی و اصلاح شبکه توزیع، به طرح مسئله تخصیص و ظرفیت‌سنجی بهینه سیستم ذخیره انرژی باتری به منظور جبران فروافتادگی ولتاژ (از منظر فنی و اقتصادی) با اتصال بارهای صنعتی با جریان‌کشی بالا در شبکه توزیع پرداخته می‌شود. این مسئله از طریق معرفی یک الگوریتم برنامه‌ریزی ترکیبی پیشنهادی به صورت حلی تو در تو (شامل یک مسئله اصلی و یک زیرمسئله) با در نظر گرفتن قیود بهره‌برداری شبکه مطرح می‌گردد.

۲-۳-۱- فرمول‌بندی مسئله اصلی

تابع هدف مسئله اصلی به شرح زیر است:

$$\min Z = \sum_{n=1}^{N_B} \left[K_{BES_n} \left(\left(C_e E_{BES_n}^{rat*} + C_p S_{BES_n}^{rat*} \right) (1 + \beta_m) + \epsilon (C_{BES,n,s}^{loss}) \right) + N_{ev} C_{ev} \in (A_{ev,n,s} P_{L_{n,s}}) \right] \quad (16)$$

تابع هدف فوق از سه بخش اصلی و با هدف کمینه‌سازی تمامی آنها تشکیل شده است:

۲-۳-۲- فرمول بندی زیرمسئله

به طور کلی زیرمسئله الگوریتم برنامه ریزی به منظور حل یک مسئله کمینه سازی هزینه طراحی شده است و در نرم افزار مدل سازی و بهینه سازی گمز پیاده سازی گردیده است. در ادامه به تعریف تابع هدف این زیرمسئله به ازای هر سناریو و قیود همراه با آن پرداخته می شود:

$$\min Z_s = \sum_{n=1}^{N_B} \left[K_{BES_n} \left((C_e E_{BES_n}^{rat} + C_p S_{BES_n}^{rat}) (1 + \beta_m) + (C_{BES_n}^{loss}) \right) + A_{ev,n} N_{ev} C_{ev} P_{L_n} \right] \quad (18)$$

در رابطه فوق متغیرهای تصادفی S_{BES}^{rat} ، E_{BES}^{rat} و A_{ev} از حل زیر مسئله الگوریتم برنامه ریزی به ازای هر سناریو در هریک از شین های شبکه و در نهایت به ازای هر کروموزوم الگوریتم ژنتیک حاصل می گردند. از قیود زیر مسئله می توان به نحوه بدست آوردن انرژی نامی و توان ظاهری نامی باتری به ترتیب با تقسیم باتری بر اسپیلون تعریف شده برای باتری و حداقل ضریب توان باتری طبق روابط (۱۹) و (۲۰) به شرح زیر اشاره کرد.

$$E_{BES_{b,s}}^{rat} = P_{BES_{b,s}}^{rat} / \varepsilon_{BES_b}^{rat}, \forall b, s \quad (19)$$

$$S_{BES_{b,s}}^{rat} = P_{BES_{b,s}}^{rat} / PF_{BES_b}^{\min}, \forall b, s \quad (20)$$

همچنین هزینه تلفات باتری از ضرب توانی باتری در پراوترز مربوط به تفاضل راندمان های شارژ و دشارژ باتری و پس از آن در مدت زمان وقوع فروافتادگی ولتاژ و تعداد فروافتادگی ولتاژ در هر سال نهایتاً با ضرب در هزینه تلفات به شرح زیر بدست می آید:

$$C_{BES_{b,s}}^{loss} = P_{BES_{b,s}}^{rat} \left(1 - \eta_{BES_b}^{ch} \eta_{BES_b}^{dis} \right) \tau_{sag} N_{ev} C_{loss}, \forall b, s \quad (21)$$

در قید بعدی نیز توان نامی باتری از حداکثر مقدار نرخ شارژ یا دشارژ باتری حاصل می گردد:

$$P_{BES_b}^{rat} = \max \{ P_{BES_b}^{ch, \max}, P_{BES_b}^{dis, \max} \}, \forall b, s \quad (22)$$

رابطه (۲۳) نیز برای متغیر رخداد فروافتادگی ولتاژ در هر شین به شرح زیر است:

$$A_{ev,n,s} = 1, \text{ if } V_{n,s} < V_n^{PQ, \min}, \text{ otherwise } = 0 \quad \forall n, s \quad (23)$$

رابطه فوق قید فوق کاهش ولتاژ و در واقع رخداد آن را در هر شین شبکه و در هر سناریو مورد ارزیابی قرار می دهد؛ اگر ولتاژ هر شین کوچکتر از حداقل ولتاژ تعریف شده مربوط به کیفیت توان باشد آن گاه رخداد فروافتادگی ولتاژ حاصل می گردد. بدین صورت که حداقل ولتاژ کیفیت توانی برابر $V_n^{PQ, \min} = 0.9 \text{ p.u.}$ تعریف می گردد.

در ادامه توجه گردد که به طور کلی باتری ها براساس ظرفیتی که دارند خریداری می شوند. اما توجه گردد که به طور مثال مورد نظر می باشد که از باتری نصب شده در شبکه برای ده سال استفاده گردد. لذا

به تعریف هزینه سالیانه برای باتری با توجه به ضریب بازایی اقتصادی (IR') یا همان نرخ بهره نیاز می باشد. رابطه هزینه سالیانه باتری به شرح زیر است:

$$C_{annual} = C_{capital} \times \frac{IR' (1 + IR')^T}{(1 + IR')^T - 1} \quad (24)$$

در رابطه فوق، ضریب کل که در هزینه کلی باتری ضرب گردیده است تابعی از نرخ بهره می باشد که خود نرخ بهره به شرح زیر حاصل می گردد:

$$IR' = \frac{IR - FR}{1 + FR} \quad (25)$$

در ادامه به تعریف قیود توازن توان های اکتیو و راکتیو پرداخته می شود؛ قید (۲۶) بیانگر توازن توان اکتیو در هر شین شبکه به صورت توازنی از منابع انرژی موجود در شبکه (نظیر باتری ها و تولیدات پراکنده) با تقاضای بار می باشد. قید (۲۷) نیز توازن توان راکتیو هر شین شبکه در وضعیت دشارژی متفاوتی برای باتری نسبت به حالت توازن توان اکتیو را نشان می دهد. تعریف این قیود به منظور تامین بار کل شبکه ضروری می باشد.

$$P_{Gn,s} - P_{Ln,s} + K_{BES_n} (P_{BESn,s}^{dis} - P_{BESn,s}^{ch}) = \sum_{m=1, m \neq n}^{N_B} U_{nm} \left(\frac{V_{n,s}^2 G_{nm} - V_{n,s} V_{m,s} (G_{nm} \cos \theta_{nm,s} + B_{nm} \sin \theta_{nm,s})}{V_{n,s} V_{m,s} (G_{nm} \cos \theta_{nm,s} + B_{nm} \sin \theta_{nm,s})} \right) \quad \forall n, s \quad (26)$$

$$Q_{Gn,s} - Q_{Ln,s} + K_{BES_n} Q_{BESn,s}^{dis} = \sum_{m=1, m \neq n}^{N_B} U_{nm} \left(\frac{-V_{n,s}^2 B_{nm} - V_{n,s} V_{m,s} (G_{nm} \sin \theta_{nm,s} - B_{nm} \cos \theta_{nm,s})}{V_{n,s} V_{m,s} (G_{nm} \cos \theta_{nm,s} + B_{nm} \sin \theta_{nm,s})} \right) \quad \forall n, s \quad (27)$$

در ادامه نیز به معرفی قیود اصلی ذخیره ساز باتری پرداخته می شود:

$$Q_{BESb,s}^{dis} \leq P_{BESb,s}^{dis} \tan(\cos^{-1}(PF_{BES_b}^{\min})) \quad \forall b, s \quad (28)$$

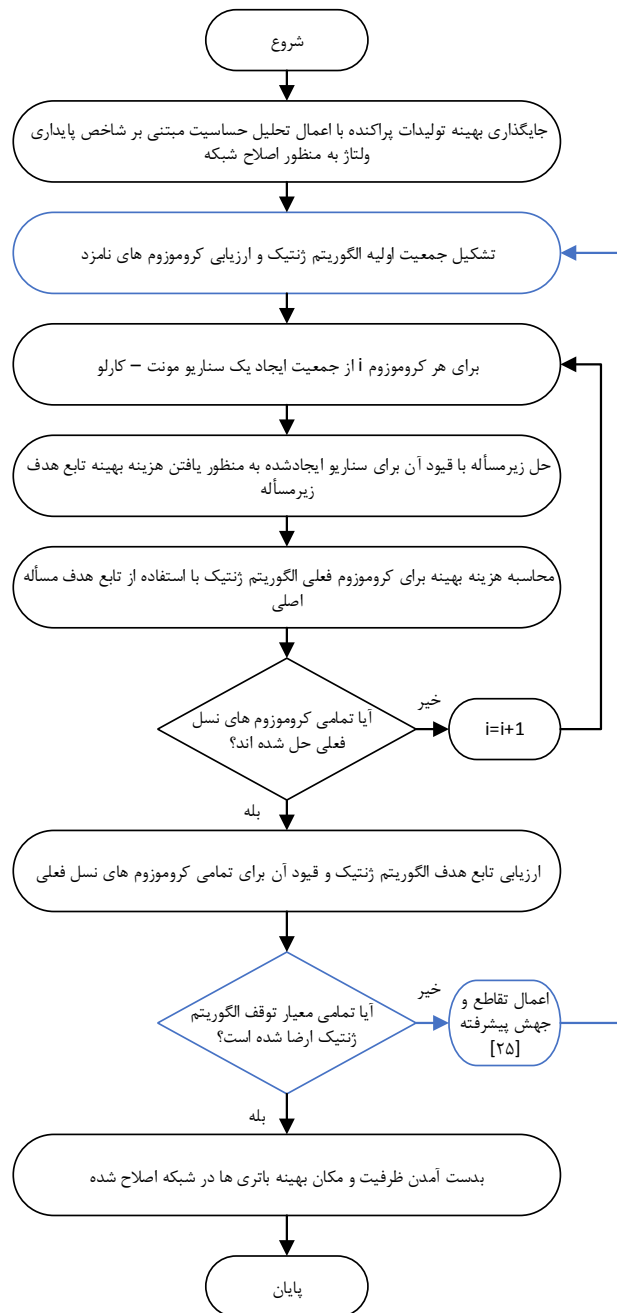
$$P_{BESb,s}^{ch} \leq P_{BESb,s}^{ch, \max} U_{BESb,s}^{ch} \quad \forall b, s \quad (29)$$

$$P_{BESb,s}^{dis} \leq P_{BESb,s}^{dis, \max} U_{BESb,s}^{dis} \quad \forall b, s \quad (30)$$

قیود (۲۸) تا (۳۰) مربوط به تولید توان راکتیو باتری و همچنین توان های شارژ و دشارژ این ذخیره ساز می باشند. توجه گردد که در روابط فوق U_{BESb}^{ch} و U_{BESb}^{dis} به ترتیب وضعیت شارژ و دشارژ باتری می باشند که به صورت متغیرهای باینری تعریف می گردند. محدوده مقادیری این متغیرهای باینری نیز به شرح روابط زیر است:

$$U_{BESb,s}^{ch} + U_{BESb,s}^{dis} \leq 1 \quad \forall b, s \quad (31)$$

استخراج استفاده گردیده است. روندنما الگوریتم برنامه‌ریزی ترکیبی این طرح به شرح زیر است.



شکل (۲): روندنما الگوریتم برنامه‌ریزی پیشنهادی

۴-۲- مدل سازی تغییرات تصادفی تقاضای بار و تولید پراکنده

برای الگوریتم برنامه‌ریزی پیشنهادی تخصیص بهینه باتری از مدل سازی تغییرات تصادفی مرتبط با تقاضای بار و واحدهای بادی شبکه به منظور نمایش عدم قطعیت استفاده می‌گردد. توابع توزیع احتمالاتی بار و واحد بادی در این مدل سازی به شرح زیر می‌باشند. توزیع تقاضای بار:

$$U_{BESb,s}^{ch} \in \{0,1\} \quad \forall b,s \quad (32)$$

$$U_{BESb,s}^{dis} \in \{0,1\} \quad \forall b,s \quad (33)$$

قید بعدی به محدودسازی انرژی باتری در یک مقدار حداقلی و حداکثری در بازه زمانی مشخص اشاره می‌کند:

$$E_{BESb}^{\min} \leq E_{BESb,s,t} \leq E_{BESb}^{\max} \quad \forall b,s,t \quad (34)$$

همچنین رابطه (۳۵) بیان می‌کند که انرژی باتری در هر ساعت برابر با انرژی باتری در پله زمانی قبلی به علاوه تغییرات انرژی باتری می‌باشد.

$$E_{BESb,s,t} = E_{BESb,s,t-\Delta t} + \Delta E_{BESb,s,t} \quad \forall b,s,t \quad (35)$$

تغییرات انرژی باتری در زمان مربوطه به شرح زیر بدست می‌آید:

$$\Delta E_{BESb,s,t} = \left[\eta_{BESb}^{ch} P_{BESb,s,t}^{ch} - \frac{P_{BESb,s,t}^{dis}}{\eta_{BESb}^{dis}} \right] \Delta t \quad (36)$$

در نهایت محدودیت‌های شبکه (شامل قیود ولتاژی و حداکثر توان عبوری از خطوط شبکه) و منابع انرژی نیز به شرح زیر تعریف می‌گردند:

$$V_n^{\min} \leq V_{n,s} \leq V_n^{\max} \quad \forall n,s \quad (37)$$

$$\theta_n^{\min} \leq \theta_{n,s} \leq \theta_n^{\max} \quad \forall n,s \quad (38)$$

$$\sqrt{P_{nm,s}^2 + Q_{nm,s}^2} \leq S_{nm}^{\max} \quad \forall n,m,s \quad (39)$$

$$P_{G_j}^{\min} \leq P_{G_j,s} \leq P_{G_j}^{\max} \quad \forall j,s \quad (40)$$

$$Q_{G_j}^{\min} \leq Q_{G_j,s} \leq Q_{G_j}^{\max} \quad \forall j,s \quad (41)$$

۳-۳-۲- راهبرد استفاده از الگوریتم تخصیص بهینه باتری

به منظور حل الگوریتم برنامه‌ریزی تو در تو، از ترکیب بهینه‌سازی ژنتیک و سناریوسازی براساس روش مونت - کارلو استفاده می‌گردد. همچنین در این پژوهش، به منظور بهبود عملکرد الگوریتم ژنتیک از اعمال تقاطع و جهش پیشرفته بر جمعیت اولیه استفاده می‌گردد. به طورمثال برای اعمال تقاطع بر والدین، طبق مرجع [۲۵] از انتخاب یک والد براساس الگوی چرخ رولت و والد دیگر براساس الگوهایی از انتخاب‌های تصادفی به منظور بهبود همزمان بازه‌های مکاشفه و

محدوده انقطاع بار، سایر قیود بهره‌برداری این الگوریتم یکسان با الگوریتم برنامه‌ریزی (بخش ۳-۲) است.

محدوده انقطاع بار اکتیو و راکتیو به شرح روابط زیر است:

$$0 \leq \Delta P_{Li} \leq \alpha_{Li} P_{Li}, \forall i \quad (45)$$

$$\Delta Q_{Li} = \Delta P_{Li} \tan(\cos^{-1}(PF_{Li})), \forall i \quad (46)$$

رابطه (۴۵) بیانگر تعریف ضریب تجربی تعریف‌شده‌ای برحسب درصد به نام α می‌باشد که در واقع تعیین‌کننده حداکثر امکان انقطاع بار در هر یک از شین‌های شبکه است. رابطه (۴۶) نیز با فرض ثابت بودن ضریب توان برای هر بار قطع‌شده، بیانگر ارتباط توان اکتیو قطع‌شده با نوع راکتیو آن از همان بار می‌باشد. در نهایت شایان ذکر است که الگوریتم بازآرایی پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی و مدل‌سازی گمز حل گردیده است.

۲-۵-۱- روند پیاده‌سازی الگوریتم بازآرایی زمان حقیقی

در این الگوریتم از ساختار شعاعی شبکه به دلیل سادگی بهره‌برداری و هماهنگی حفاظتی استفاده می‌شود. لذا در این راستا، در پیکربندی یک شبکه توزیع شعاعی، تعداد شاخه‌های حالت عادی بسته و باز شبکه به شرح روابط زیر قابل حصول است:

$$Closed_Branches = N_B - 1 \quad (47)$$

$$Open_Branches = N_{Br} - N_B + 1 \quad (48)$$

در رابطه (۴۷)، N_B نشانگر تعداد شین‌های شبکه و در رابطه (۴۸) N_{Br} بیانگر تعداد کل شاخه‌های شبکه است. همچنین در رابطه (۴۸)، تعداد شاخه‌های حالت عادی باز برابر تعداد حلقه‌های اصلی شبکه تعریف می‌گردد. شایان ذکر است که به منظور تضمین بهره‌برداری شعاعی از شبکه و پرهیز از تشکیل ساختارهای حلقوی، حداقل یک شاخه از هر حلقه اصلی باید باز باشد که این نکته در سناریوسازی الگوریتم بازآرایی این پژوهش لحاظ گردیده است. همچنین به منظور مدل‌سازی خطا، خطا در خطوط به عنوان عامل اصلی در نظر گرفته شده است. به طوریکه با توجه به متعادل بودن شبکه مورد مطالعه، خطا به صورت خطای سه فاز به زمین در خطوط مدل شده است. همچنین فرض شده است که خطای سه فاز به زمین در وسط خطوط رخ می‌دهد. هر شاخه از شبکه نیز به منظور اعمال فرآیند بازآرایی به ۲ سوئیچ کنترل‌کننده مجهز شده است.

۳- نتایج شبیه‌سازی

شبکه مورد مطالعه در این مقاله شبکه توزیع ۳۳ شینه اصلاح‌شده IEEE می‌باشد؛ در این شبکه نسبت به شبکه ۳۳ شینه استاندارد سایر مطالعات یک تحلیل حساسیت مبتنی بر شاخص پایداری ولتاژ (بخش

$$F_1(x) = \frac{1}{\sigma} \left(1 + k \frac{(x - \mu)}{\sigma} \right)^{\left(\frac{-1}{k} - 1 \right)} \quad (42)$$

توزیع واحد بادی:

$$F_2(x) = \frac{\delta}{\lambda \sqrt{2\pi} z(1-z)} e^{\frac{-1}{2}(\gamma + \delta \ln(\frac{z}{1-z}))^2} \quad (43)$$

توابع فوق در تولید سناریو براساس روش مونت - کارلو به کارگرفته می‌شوند. همچنین اطلاعات پروفیل‌های تقاضای بار، تولیدات پراکنده و پارامترهای ورودی توابع توزیع از مرجع [۲۶] گرفته شده است.

۲-۵- استفاده از ظرفیت و مکان بهینه ذخیره‌ساز باتری در الگوریتم بازآرایی زمان حقیقی

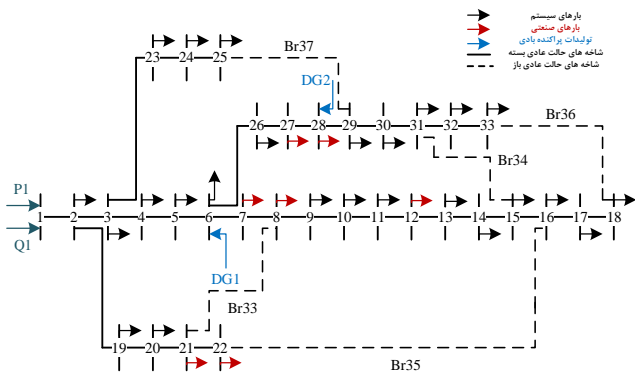
مکان و ظرفیت بهینه باتری‌ها حاصل از اجرای الگوریتم برنامه‌ریزی پیشنهادی در بخش (۳-۲) در طول وقوع فروافتادگی ولتاژ به منظور جبران‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ این جبران‌سازی وضعیت باتری‌ها را در یک حالت حداقلی شارژ و در واقع آماده به کار بودن قرار می‌دهد. لذا از انرژی الکتریکی در دسترس برای هر واحد باتری می‌توان به منظور حل دیگر مشکلات مرتبط با ولتاژ (نظیر انحرافات ولتاژ شین‌ها) استفاده کرد. به همین جهت سناریوهایی از پیش تعیین‌شده به منظور سنجش الگوریتم بازآرایی زمان حقیقی مورد استفاده در این مقاله تعریف می‌گردند. این تعریف سناریو در راستای حفظ ساختار شعاعی شبکه توزیع نمونه پس از رخداد خطا به منظور بازآرایی می‌باشد؛ چراکه با تشکیل حتی یک حلقه در پیکربندی مجدد شبکه پس از وقوع خطا، تلفات کل شبکه به طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد و مشکلات مضاعفی بعد از رخداد خطا به شبکه توزیع از منظر بهره‌برداری تحمیل می‌گردد.

تابع هدف الگوریتم بازآرایی پس از خطا به منظور سنجش بهره‌برداری اقتصادی و قابل اطمینان از شبکه به همراه کمینه‌سازی انحرافات ولتاژ در جهت ارضا محدودیت بهره‌برداری ولتاژ شبکه به شرح زیر می‌باشد:

$$\min C_{OPFNR} = \left[\sum_{j=1}^{N_G} C_{G_j} P_{G_j} + \sum_{i=1}^{N_{LC}} C_{LC} \Delta P_{Li} + \sum_{b=1}^{N_{BES}} C_{BES} (P_{BES_b}^{dis} - P_{BES_b}^{ch}) \right] \quad (44)$$

تابع هدف فوق از سه بخش اصلی هزینه‌های مربوط به منابع انرژی شبکه (پست فوق توزیع بالادستی و تولیدات پراکنده)، ذخیره‌سازهای باتری و انقطاع بار تشکیل شده است؛ در رابطه (۴۴)، **روش انقطاع بار** براساس استانداردهای قابلیت اطمینان موسسه آمریکای شمالی [۲۷] به عنوان آخرین گزینه در جهت ارضای کامل محدودیت‌های بهره‌برداری (خصوصاً محدودیت ولتاژ) معرفی و استفاده می‌گردد. به جز

می‌شود. بخش اصلی اطلاعات پارامترهای شبکه و بارهای توانی آن از مرجع [۳] و همچنین اطلاعات ابعاد و ادمیتانس خطوط نیز از مرجع [۳۱] گرفته شده‌اند. ساختار شبکه توزیع ۳۳ شینه اصلاح یافته به شرح شکل (۳) می‌باشد:

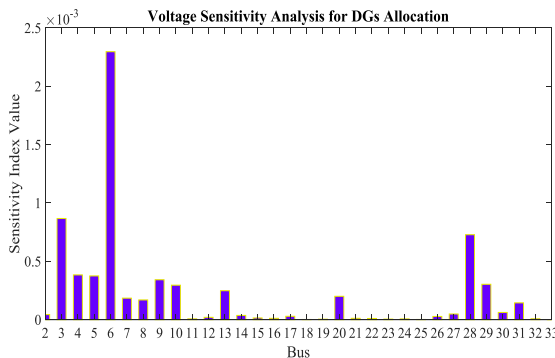


شکل (۳): شبکه توزیع ۳۳ شینه اصلاح شده IEEE

شبکه فوق شامل ۵ حلقه اصلی است. همچنین اتصال بارهای اصلی مناطق صنعتی هنگام سوئیچینگ به شبکه با افزایش ۵ برابری تقاضای توان به صورت لحظه‌ای همراه است.

۳-۱- تخصیص بهینه تولید پراکنده و باتری به منظور جبران فروافتادگی ولتاژ

با اجرای تحلیل حساسیت (بخش ۲-۲) به منظور جایابی بهینه واحدهای بادی، نمودار زیر حاصل می‌گردد. شین‌هایی که مقدار بالاتری از شاخص را به خود اختصاص می‌دهند، حساسیت بیشتری در برابر تغییرات ولتاژ خواهند داشت. لذا از بین ترکیب شین‌های ۲۸، ۶، ۳ با حداکثر مقدار شاخص، با توجه به مسأله فروافتادگی ولتاژ و تخصیص مناطق صنعتی از شین‌های ۶ و ۲۸ به منظور جایگذاری تولیدات پراکنده هم در فیدر اصلی و هم در فیدر فرعی شبکه استفاده می‌گردد.



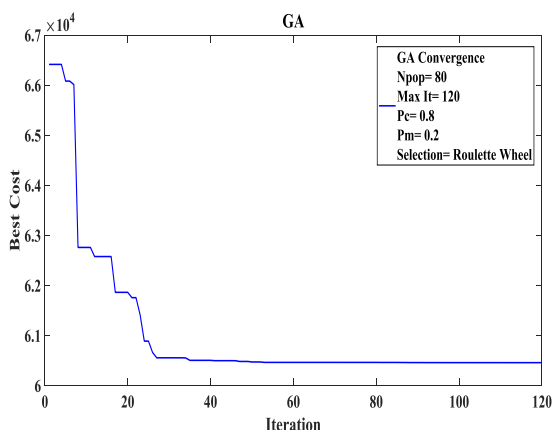
شکل (۴): تخصیص بهینه تولیدات پراکنده با تحلیل حساسیت

پس از تخصیص ۲ واحد بادی و اصلاح شبکه توزیع، به اجرای الگوریتم برنامه‌ریزی ترکیبی پیشنهادی به منظور دستیابی به مکان و ظرفیت بهینه باتری‌های شبکه پرداخته می‌شود. ابتدا در حالت پایه شبکه، هزینه‌های ناشی از وقوع فروافتادگی ولتاژ در سطح سیستم لحاظ می‌گردد؛ این اعمال هزینه در شرایط بدون جبران‌سازی در نظر گرفته شده است. سپس در حالت دیگر از ظرفیت و مکان بهینه باتری‌ها حاصل از

۲-۲) به منظور جایابی بهینه تولیدات پراکنده از منظر مسأله تلفات و انحرافات ولتاژ انجام گرفته است. خروجی این شاخص پایداری تخصیص ۲ واحد انرژی بادی در شین‌های ۶ و ۲۸ فیدرهای اصلی و فرعی شبکه با حداکثر ظرفیت توانی ۵۰۰ کیلووات است. همچنین به منظور شبیه‌سازی فرآیند وقوع فروافتادگی ولتاژ، ۷ منطقه صنعتی شامل بارهای با جریان‌کشی بالا نصب‌شده در شین‌های ۲۸، ۲۷، ۲۶، ۲۵، ۲۴، ۲۳، ۲۲، ۲۱، ۲۰، ۱۹، ۱۸، ۱۷، ۱۶، ۱۵، ۱۴، ۱۳، ۱۲، ۱۱، ۱۰، ۹، ۸، ۷، ۶، ۵، ۴، ۳، ۲، ۱ در نظر گرفته شده است؛ این بارهای صنعتی به منظور شبیه‌سازی سوئیچینگ بارهای اصلی و در نتیجه فروافتادگی ولتاژ مدل گردیده‌اند. به علاوه، شبکه اصلاح یافته دارای سطح ولتاژ ۱۲/۶۶ کیلوولت و توان ظاهری پایه ۱۰ مگاوات می‌باشد. این شبکه دارای ۳۷ شاخه بوده که ۳۲ شاخه آن در شرایط عادی بسته و ۵ شاخه آن نیز در شرایط عادی به صورت باز می‌باشد؛ به طور کلی با توجه به ۳۲ شاخه حالت عادی بسته شبکه، در صورت رخداد خطا در هر شاخه در کل می‌توان ۳۲ سناریو بهره‌برداری پس از خطا تعریف کرد که در این مقاله ۵ سناریو نامزد از شاخه‌های خطادار متفاوت بررسی می‌گردد. در ارتباط با داده‌های استفاده‌شده در بهره‌برداری از این شبکه، می‌توان ذکر کرد که هزینه تامین انرژی از پست اصلی توزیع برابر $\$2/MWh$ بوده و طبق مرجع [۳] براساس برنامه تعرفه‌بندی، تعرفه پرداختی به مالکان خصوصی تولیدات پراکنده به منظور ترغیب مالکان به سرمایه‌گذاری بیشتر باید بالاتر از تعرفه پست اصلی باشد که برابر با $\$128/MWh$ لحاظ می‌گردد. همچنین به این دلیل که کارکرد اصلی باتری‌های تخصیص داده‌شده در شبکه، جبران‌سازی فروافتادگی ولتاژ می‌باشد لذا به منظور جبران سایر مشکلات شبکه باید هزینه بهره‌برداری بیشتری به طور مثال در فرآیند بازآرایی برای آن‌ها لحاظ گردد. بنابراین هزینه استفاده از باتری‌ها در بازآرایی برابر $\$150/MWh$ در نظر گرفته می‌شود. به علاوه، با توجه به اینکه روش انقطاع بار تنها در زمانی استفاده می‌گردد که قیود بهره‌برداری و ولتاژی شبکه آشکارا نقض گردد لذا بالاترین هزینه نیز برای انقطاع بار تحت عنوان جریمه به منظور توجه به حقوق مشترکین در نظر گرفته می‌شود؛ این هزینه برابر $\$750/MWh$ لحاظ می‌گردد تا صرفاً در صورت نیاز ضروری قطعی بار انجام گیرد. در ارتباط با سایر داده‌های ورودی شبکه و الگوریتم‌های تعریف‌شده، طبق [۲۸] هزینه مرکزی مرتبط با هزینه سالیانه انرژی و توان باتری‌ها به ترتیب $\$305/kWh$ و $\$175/kVA$ لحاظ می‌گردد. حداکثر تعداد مجاز باتری‌های تخصیص داده شده در شبکه ۳ واحد، طول عمر باتری‌ها براساس [۲۹] ۱۰ سال بوده و بهره‌وری شارژ/دشارژ آن‌ها ۹۵ درصد لحاظ می‌گردد. تعداد وقوع فروافتادگی ولتاژ در هر سال برابر ۱۰ واحد و هزینه سالیانه رخدادهای فروافتادگی ولتاژ برابر $\$5/kWh/event$ طبق مرجع [۳۰] در نظر گرفته می‌شود. نرخ دشارژ باتری (ϵ_{BES}^{rat}) و ضریب هزینه نگهداری (β_m) آن به ترتیب برابر ۱ ساعت و ۵ درصد می‌باشد. نرخ‌های بهره و تورم ($IR&FR$) نیز به ترتیب ۵ درصد و ۱ درصد لحاظ می‌گردند. در نهایت حداقل ضریب توان باتری‌ها (PF_{BES}^{min}) برابر ۹۵ درصد لحاظ

جدول (۱): نتایج الگوریتم برنامه‌ریزی به منظور تخصیص بهینه باتری

بدون جایگذاری باتری	با جایگذاری باتری			خروجی ذخیره‌ساز باتری و تابع هدف
	شماره شین	شماره شین	شماره شین	
باتری (حالت پایه شبکه)	باتری ۳	باتری ۲	باتری ۱	
۰	۳۱	۱۷	۱۴	مکان باتری
۰	۲۰۰	۳۷۵/۲۵	۳۷۹/۲۲	انرژی نامی باتری (kWh)
۰	۲۱۰/۵۳	۳۹۵	۳۹۹/۱۸	توان نامی باتری (kVA)
۰	۱۲/۰۳۹	۲۲/۵۸۹	۲۲/۸۲۸	هزینه‌های سرمایه‌گذاری باتری (k\$/yr)
۱۲۸/۵	۰			هزینه وقوع فروافتادگی ولتاژ (k\$/yr)
۱۲۸/۵	۶۰/۴۷۰۸			تابع هدف Z (k\$/yr)



شکل (۶): روند همگرایی الگوریتم ژنتیک بهبود یافته

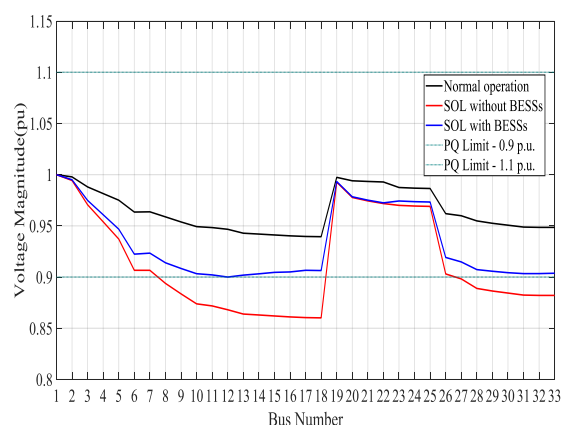
۳-۲- استفاده از ظرفیت بهینه بدست‌آمده باتری در بازآرایی اقتصادی شبکه

با توجه به مقادیر بدست‌آمده از جدول (۲) برای ذخیره‌سازهای باتری و همچنین جایگذاری واحدهای بادی در شین‌های ۶ و ۲۸ با حداکثر ظرفیت توانی ۵۰۰ کیلووات، حال می‌توان از این مقادیر بهینه در فرآیند بازآرایی شبکه پس از وقوع خطا تحت سناریوهای مختلف استفاده کرد. در این بخش با ۵ سناریو نامزد به مقایسه جایگذاری بهینه تولیدات پراکنده و باتری‌ها با روش انقطاع بار تحت عنوان الگوریتم زمان حقیقی پیکربندی مجدد به شرح جدول زیر پرداخته می‌شود.

اجرای الگوریتم برنامه‌ریزی استفاده می‌شود تا مشکلات مربوط به رخداد فروافتادگی ولتاژ به حداقل برسد.

جدول (۱) بیان می‌دارد تابع هدف الگوریتم برنامه‌ریزی (شامل تمامی هزینه‌های باتری و هزینه رخداد فروافتادگی ولتاژ) هنگامیکه شبکه در حالت پایه بهره‌برداری می‌گردد برابر با $128/5 \text{ k\$/yr}$ می‌باشد؛ کل این هزینه ناشی از وقوع فروافتادگی ولتاژ در سطح شبکه است چراکه هنوز در حالت پایه هیچ باتری‌ای به‌طور بهینه تخصیص داده نشده است. بنابراین دامنه ولتاژ شین‌ها در حالت بدون جبران‌سازی خصوصاً برای بارهای حساس شبکه به شدت در معرض اثرات فروافتادگی ولتاژ قرار می‌گیرند. در حالت جایگذاری بهینه باتری هیچ هزینه‌ای از منظر وقوع فروافتادگی ولتاژ به دلیل قرارگیری ولتاژ تمامی شین‌ها در بالای حد کیفیت توانی $0/9$ پریونیت به سیستم تحمیل نمی‌گردد. لذا تابع هدف در حالت جبران‌سازی صرفاً شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری باتری است و هزینه وقوع فروافتادگی ولتاژ به دلیل عدم نقض قیود ولتاژی صفر می‌گردد. همچنین تابع هدف با جبران‌سازی باتری کاهش ۵۳ درصدی هزینه سالیانه را نسبت به حالت پایه شبکه نتیجه می‌دهد.

نتایج پروفیل ولتاژ شین‌ها در حالت سوئیچینگ بارهای اصلی مناطق صنعتی در حالت‌های با و بدون جایگذاری باتری به شرح زیر است:



شکل (۵): تاثیر تخصیص بهینه باتری بر پروفیل ولتاژ شین‌های شبکه

شکل (۵) جبران موثر رخداد فروافتادگی ولتاژ با استفاده از مکان و ظرفیت بهینه باتری‌ها را نشان می‌دهد؛ به‌طوریکه دامنه ولتاژ تمامی شین‌ها در محدوده استاندارد کیفیت توانی $0/9$ پریونیت تا $1/1$ پریونیت با تخصیص بهینه باتری‌ها قرار می‌گیرد. شکل (۶) نیز نحوه همگرایی الگوریتم ژنتیک ترکیب‌شده با اعمال تقاطع و جهش پیشرفته بر جمعیت اولیه را نشان می‌دهد.

جدول (۲): نتایج پیاده‌سازی الگوریتم زمان حقیقی بازآرایی

سنار یو	شاخه خطا دار	شاخه نامزد	بدون ذخیره‌ساز باتری		با ذخیره‌ساز باتری	
			C _{OPF} (\$)	بار قطعی (kW)	C _{OPF} (\$)	بار قطعی (kW)
۱	۲۹	۳۴	۳۹۳/۲۶	۱۵۴/۷۷	۳۷۵/۴۲	۰/۰۰
		۳۶	۴۰۷/۲۱	۰۰/۱۷۴	۳۷۶/۷۰	۰/۰۰
۲	۳۱	۳۶	۴۵۲/۹۲	۱۸۰/۳۸	۴۲۴/۶۸	۰/۰۰
۳	۱۳	۳۴	۳۹۶/۰۸	۰/۴۶	۳۹۴/۲۲	۰/۰۰
		۳۵	۳۸۵/۸۹	۰/۰۰	۳۸۵/۸۹	۰/۰۰
		۳۶	۳۹۷/۷۴	۰/۰۰	۳۹۷/۷۴	۰/۰۰
۴	۲۲	۳۷	۴۵۰/۲۹	۱۳۹/۲۸	۴۳۴/۸۸	۰/۰۰
۵	۳	۳۳	۳۰۰/۳۷	۰/۰۰	۳۰۰/۳۷	۰/۰۰
		۳۵	۴۱۸/۲۵	۳۴۷/۳۳	۴۱۷/۸۲	۳۱۵/۴۳
		۳۷	۳۵۶/۶۵	۱۴۴	۳۴۲/۱۷	۲۸/۳۰

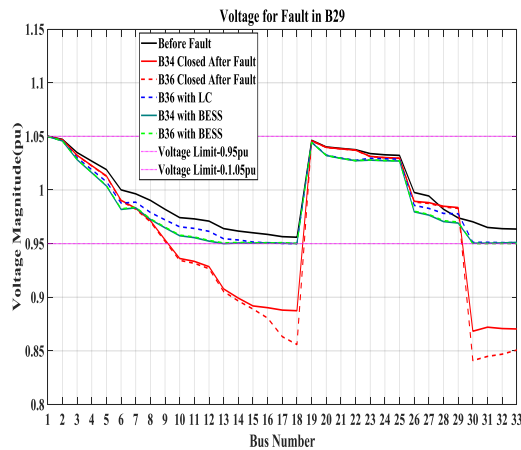
در ارتباط با نتایج جدول (۲) می‌توان بیان کرد که تخصیص بهینه مجموعه تولیدات پراکنده و ذخیره‌سازهای باتری منجر به بهره‌برداری از شبکه پس از رخداد خطا در شرایطی اقتصادی و همراه با عملکردی مطلوب در زمینه عدم قطع بار گردیده است. در واقع طبق سناریوهای (۳) و (۵) که رخداد خطا در شاخه‌های فیدر اصلی شبکه را نشان می‌دهند، انقطاع بار بدون استفاده از ذخیره‌ساز و تنها با ظرفیت توانی واحد بادی نصب‌شده در شین ۶ حاصل می‌گردد. البته در سناریوهایی نظیر (۱)، (۲) و (۴) علاوه بر حداکثر ظرفیت توانی تولیدات پراکنده به ظرفیت توانی بهینه باتری‌های شبکه نیز به منظور جلوگیری از انقطاع بار و بهره‌برداری بهینه نیاز می‌باشد؛ در تمامی سناریوها تابع هدف الگوریتم بازآرایی مجموعه تولیدات پراکنده و ذخیره‌سازهای باتری از منظر هزینه اقتصادی‌تر و بهینه‌تر از تشکیل تابع هدف براساس انقطاع بار و در واقع بدون استفاده از ظرفیت باتری‌ها و تولیدات پراکنده است. همچنین جدول (۳) نیز تولید سناریو براساس روش مونت - کارلو به منظور تشکیل تقاضای بار و توان‌های بادی متنوع را برای ادغام در فرآیند بازآرایی به شرح زیر نشان می‌دهد.

جدول (۳): درصد تقاضای بار و انرژی بادی مورد استفاده در تولید

سناریوها

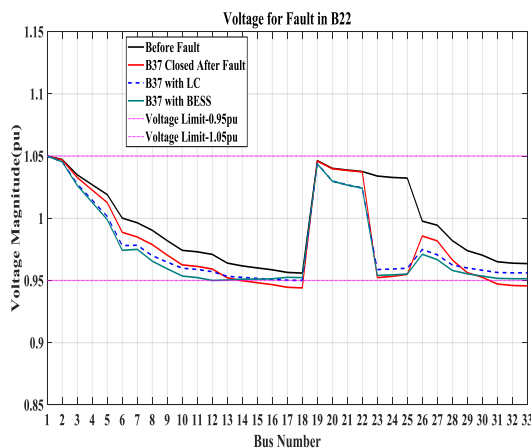
شماره سناریو	درصد تقاضای بار	درصد توان بادی
۱	۸۷	۷۵/۱۳
۲	۹۷	۷۶/۱۴
۳	۹۵	۶۷/۰۱
۴	۹۹	۷۵/۰۴
۵	۷۲	۸۲/۲۳

پروفیل ولتاژ بازآرایی پس از خطا در سناریوهای (۱) و (۴) به شرح زیر است:



شکل (۷): پروفیل ولتاژ شبکه برای سناریو اول خطا

برای سناریو اول در شکل فوق، جبران‌سازی انحرافات ولتاژ و قرارگیری دامنه ولتاژ تمامی شین‌های شبکه در محدوده استاندارد بالای ۰/۹۵ پریونیت به همراه بهره‌برداری اقتصادی از شبکه در فرآیند بازآرایی پس از خطا توسط ظرفیت بهینه باتری‌ها حاصل گردیده است.

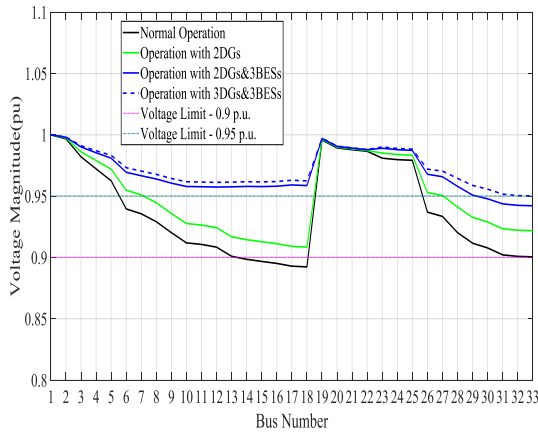


شکل (۸): پروفیل ولتاژ شبکه برای سناریو چهارم خطا

در سناریو چهارم خطا نیز انحرافات ولتاژ توسط باتری‌ها به طور مطلوبی جبران‌سازی شده است.

۳-۳- محاسبه تلفات کل شبکه

با تخصیص بهینه مجموعه تولیدات پراکنده و ذخیره‌سازهای باتری، حال می‌توان به صورت جبران‌سازی محلی تاثیر تخصیص این ادوات را در مسئله تلفات شبکه مورد بررسی قرار داد؛ چراکه به دلیل در حالت آماده به کار بودن باتری‌ها و بهره‌مندی از وضعیت حداقل شارژ، می‌توان به منظور حل دیگر مشکلات مرتبط با شبکه توزیع نیز از این ظرفیت باتری‌ها استفاده کرد. لذا ابتدا تلفات اکتیو و راکتیو شبکه توزیع ۳۳ شینه اصلاح‌شده در حالت بدون تولید پراکنده و باتری محاسبه می‌گردد؛ سپس با جایگذاری به ترتیب ۲ واحد بادی و ۳ باتری بهینه‌شده در شبکه (حاصل از تحلیل شکل (۴) و جدول (۱)) به تاثیر این جایگذاری در کاهش تلفات کل شبکه به شرح جدول زیر پرداخته می‌شود.



شکل (۱۰): پروفیل ولتاژ با جبران سازی موثرتر در انتهای فیدر شبکه

۴- مقایسه فنی و اقتصادی مطالعه

با توجه به تمرکز اغلب مطالعات بر جبران سازی مشکلات مرتبط با کیفیت ولتاژ در سمت مصرف کننده و به صورت محلی و یا در سطح ریزشبکه با استفاده از انواع ذخیره ساز انرژی، مطالعات زیادی در ارتباط با جبران سازی مشکلات فروافتادگی ولتاژ در سطح شبکه انجام نگرفته است. البته در مرجع [۳] به حل مشکلات مرتبط با فروافتادگی ولتاژ با استفاده از تخصیص بهینه سیستم ذخیره انرژی باتری در سطح شبکه توزیع پرداخته شده است؛ نسبت به مطالعه انجام گرفته در این مرجع، تخصیص بهینه تولیدات پراکنده و سیستم ذخیره باتری به صورت توام برای حل مشکلات فروافتادگی ولتاژ و همچنین به منظور حل دیگر مشکلات مرتبط با شبکه توزیع (نظیر انحرافات ولتاژ و تلفات کل شبکه) در این پژوهش در نظر گرفته شده است. الگوریتم برنامه ریزی مورد استفاده در این پژوهش با مرجع زیر قابل مقایسه است:

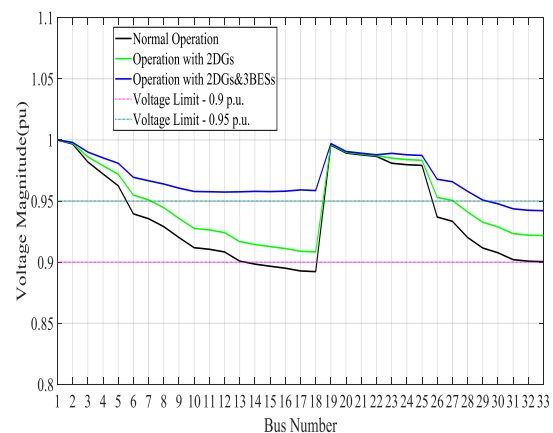
جدول (۵): ارزیابی روش پیشنهادی در بخش الگوریتم برنامه ریزی

مرجع	الگوریتم	تولیدات پراکنده	مجموع توان نامی باتری ها (kVA)	مقدار تابع هزینه (\$/year)
[۳]	بهینه سازی ژنتیک مرسوم ترکیب با سناریوسازی براساس توابع تجمعی	از پیش تعیین شده	۱۰۹۶/۷	۶۵۸۶۰
روش پیشنهادی	بهینه سازی ژنتیک بهبود یافته ترکیب با سناریوسازی براساس توابع احتمالاتی	اعمال تحلیل حساسیت	۱۰۰۴/۷	۶۰۴۷۰

جدول (۴): محاسبه تلفات کل در حالت های مختلف بهره برداری شبکه در ارتباط با جدول فوق، حالت تخصیص ۲ واحد بادی در شین های ۶،۲۸ به همراه استفاده از ظرفیت ۳ باتری در شین های ۱۴،۱۷،۳۱

تلفات راکتیو کل (kVar)	تلفات اکتیو کل (kW)	شبکه تحت آزمایش
۱۹۰	۲۸۲	شبکه اصلاح یافته ۳۳ شینه
۱۲۰	۱۷۹	شبکه اصلاح یافته با ۲ واحد بادی ۶،۲۸
۶۰	۸۸	شبکه اصلاح یافته با ۲ واحد بادی ۶،۲۸ به همراه تخصیص ۳ باتری در شین های ۱۴،۱۷،۳۱
۵۰	۷۴	شبکه اصلاح یافته با ۲ واحد بادی ۶،۲۸ و ۱ واحد بادی با ۲۶۰ کیلووات در شین ۲۹ به همراه تخصیص ۳ باتری در شین های ۱۴،۱۷،۳۱

تلفات کل اکتیو و راکتیو شبکه توزیع را به طرز مطلوبی با جبران سازی محلی کاهش می دهد. به طوریکه درصد تلفات اکتیو و راکتیو کل نسبت به صرفا استفاده از دو واحد بادی شین های ۶،۲۸ به ترتیب با کاهش ۵۰/۸۴ درصدی و ۵۰ درصدی با استفاده از ظرفیت توانی بهینه باتری همراه بوده است. همچنین در صورتیکه حد ولتاژ بهره برداری شبکه ۰/۹۵ پریونیت باشد هر دو شکل (۹) و (۱۰) به شرح زیر کاملا جبران سازی را انجام داده اند. اما اگر هدف بهره برداری در سطح ولتاژ ۰/۹۵ پریونیت باشد آن گاه در شکل (۱۰) با اضافه کردن تقریبا نصف حداکثر ظرفیت تولیدات پراکنده شبکه (۲۶۰ کیلووات) در شین ۲۹ ام که از شین های حساس به ولتاژ تحلیل حساسیت شکل (۴) نیز می باشد می توان جبران سازی ولتاژ را نیز به طور کامل در شین های انتهایی فیدر فرعی شبکه انجام داد.



شکل (۹): پروفیل ولتاژ در حالت های مختلف بهره برداری شبکه

- [2] A. Alkahtani, M. B. Mansor, V. G. Agelidis, "Power Quality in Microgrids Including Supraharmonics: Issues, Standards, and Mitigations," IEEE Access, Vol. 8, pp. 127104-127122, 2020.
- [3] H. M. A. Ahmed, A. S. A. Awad, M. H. Ahmed, M. M. A. Salma, "Mitigating Voltage-sag and Voltage-deviation Problems in Distribution Networks using Battery Energy Storage Systems," Elsevier Electric Power Systems Research, Vol. 184, 2020.
- [4] H. M. A. Ahmad, M. H. Ahmad, M. M. A. Salma, "A Linearized Multi-objective Energy Management Framework for Reconfigurable Smart Distribution Systems Considering BESSs," IEEE Systems Journal, 2021.
- [5] A. Safavizadeh, Gh. R. Yousefi, "Voltage Variation Mitigation Using Reactive Power Management of Distributed Energy Resources in a Smart Distribution System," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 10, pp. 1907-1915, 2017.
- [6] G. T. Heydt, "The Next Generation of Power Distribution Systems," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, 2010.
- [7] D. Vilathgamuwa, H. M. Wijekoon, S. S. Choi, "A novel Technique to Compensate Voltage Sags in Multiline Distribution System-the Interline Dynamic Voltage Restorer," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, pp. 1603-1611, 2006.
- [8] S. Jothibasu, M. K. Mishra, "A control scheme for storageless DVR based on characterization of voltage sags," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, pp. 2261-2269, 2014.
- [9] R. Gupta, A. Ghosh, A. Joshi, "Performance comparison of VSC-based shunt and series compensators used for load voltage control in distribution systems," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, pp. 268-278, 2011.
- [10] A. M. Rauf and V. Khadkikar, "An enhanced voltage sag compensation scheme for dynamic voltage restorer," IEEE transactions on industrial electronics, vol. 62, pp. 2683-2692, 2014.
- [11] Y. Zhang, J. Milanovic, "Global voltage sag mitigation with FACTS-based devices," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, pp. 2842-2850, 2010.
- [12] V. Khadkikar, A. Chandra, "A new control philosophy for a unified power quality conditioner (UPQC) to coordinate load-reactive power demand between shunt and series inverters," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, pp. 2522-2534, 2008.
- [13] M. Hosseini, H. Shayanfar, M. Fotuhi-Firuzabad, "Modeling of unified power quality conditioner (UPQC) in distribution systems load flow," Energy Conversion and Management, Vol. 50, pp. 1578-1585, 2009.
- [14] M. Hong, X. Yu, N.P. Yu, K.A. Loparo, "An energy scheduling algorithm supporting power quality management in commercial building microgrids," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, pp. 1044-1056, 2016.
- [15] I. S. Bayram, M. Abdallah, A. Tajer, K.A. Qaraqe, "A stochastic sizing approach for sharing-based energy storage applications," IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 8, pp. 1075-1084, 2017.
- [16] M. Rahmani-Andebili, "Stochastic, adaptive, and dynamic control of energy storage systems integrated with renewable energy sources for power loss minimization," Renewable Energy, pp. 1462-1471, 2017.
- [17] S. Das, D. Das, A. Patra, "Operation of distribution network with optimal placement and sizing of

مطابق با جدول (۵)، در روش پیشنهادی در بخش الگوریتم برنامه‌ریزی با اعمال تحلیل حساسیت مبتنی بر شاخص پایداری ولتاژ و اصلاح شبکه می‌توان از مجموع ظرفیت نامی کمتری برای باتری نسبت به مرجع ذکر شده به منظور بهبود مشکلات فروافتادگی ولتاژ استفاده کرد. همچنین جایگذاری مناسب تولیدات پراکنده در شبکه و سنجش هر شین نسبت به تغییرات ولتاژ باعث کاهش ۸ درصدی تابع هزینه کل خواهد شد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا به تخصیص بهینه تولیدات پراکنده و ذخیره‌سازی باتری در شبکه توزیع اصلاح‌یافته ۳۳ شینه IEEE با معرفی الگوریتم برنامه‌ریزی پیشنهادی به منظور جبران‌سازی فروافتادگی ولتاژ پرداخته شد. نتایج این الگوریتم برنامه‌ریزی حاکی از اینست که جبران‌سازی کامل فروافتادگی ولتاژ هم از منظر اقتصادی و هم از منظر پروفیل ولتاژ شین‌های شبکه در حالت اتصال بارهای اصلی مناطق صنعتی شبکه توزیع نمونه حاصل گردیده است. در بخش دیگر نیز الگوریتم بازآرایی پس از خطا به منظور بهره‌مندی از ظرفیت بهینه باتری‌های حاصل‌شده از الگوریتم برنامه‌ریزی در فرآیند پیکربندی مجدد شبکه مورد بررسی قرار گرفت؛ که نتایج حاکی از جبران‌سازی مطلوب انحرافات ولتاژ پس از وقوع خطا در شبکه توزیع به همراه عدم نیاز به استفاده از انقطاع بار می‌باشد. همچنین در نهایت در قالب جبران‌سازی محلی، از ظرفیت توانی نامی تولیدات پراکنده و ذخیره‌سازهای باتری به منظور کاهش تلفات کل شبکه استفاده گردید؛ که نتایج حاکی از کاهش مطلوب تلفات کل اکتیو و راکتیو شبکه با تخصیص بهینه منابع انرژی شبکه می‌باشد.

پیوست

در این بخش، مجموعه‌ها و سایر پارامترهای استفاده شده در قسمت-های مختلف مقاله معرفی گردیده‌اند.

b	مجموعه ذخیره‌سازهای باتری سیستم
i	مجموعه بارهای قطع شده
j	مجموعه منابع انرژی سیستم
n, m	مجموعه شین‌های شبکه
s	مجموعه سناریوهای شبیه‌سازی مونت - کارلو
t	مجموعه زمان بهره‌برداری
B_{nm}	سوسپتانس خطوط شبکه
G_{nm}	کندوکتانس خطوط شبکه
V_n	دامنه ولتاژ در شین n
θ_n	زاویه ولتاژ در شین n

مراجع

- [1] R. C. Dugan, M. F. Mc-Granaghan, S. Santoso, H. Wayne Beaty, "Electrical Power Systems Quality," McGraw-Hill, Second Edition, 2002.

- dispatchable DGs and shunt capacitors,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 113, 2019.
- [18] K. Nara, Y. Hayashi, K. Ikeda, T. Ashizawa, “Application of tabu search to optimal placement of distributed generators,” IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, pp. 918-923, 2001.
- [19] C. Yammani, M. Syudulu, S. K. Matam, “Optimal placement and sizing of DGs at various load condition using shuffled bat algorithm,” IEEE Power Energy Conference, 2015.
- [20] K. Nekooei, M. M. Farsangi, H. Nezamabadi-Pour, K. Y. Lee, “An improved multi-objective harmony search for optimal placement of DGs in distribution systems,” IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, pp. 557-567, 2013.
- [۲۱] ر. اسلامی، س. ا. حسینی، “ارائه یک روش جدید بهینه‌سازی آرایش خطوط شبکه توزیع توسط یک الگوریتم بهینه‌سازی بهبودیافته در حضور منابع تولید پراکنده”، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره نوزدهم، شماره اول، صفحه ۲۲۷-۲۳۶، بهار ۱۴۰۱.
- [۲۲] م. رحیمی پور بهبهانی، م. ع. امینی، ع. جلیلیان، “بازآرایی شبکه توزیع به منظور بهبود فروافتدگی ولتاژ با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات گسسته”، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره نوزدهم، شماره اول، صفحه ۲۰۱-۲۱۱، بهار ۱۴۰۱.
- [23] N. Mohandas, R. Balamurugan, “Optimal location and sizing of real power DG units to improve the voltage stability in the distribution system using ABC algorithm united with chaos,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 66, pp. 41-52, 2015.
- [24] C. S. Cheng, D. Shirmohammadi, “A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, pp. 671-679, 1995.
- [25] V. S. Bisht, N. Joshi, G. S. Jethi, A. S. Bhakuni, “A Review on Genetic Algorithm and Its Application in Power System Engineering,” Journal of Metaheuristic and Evolutionary Computation: Algorithms and Applications, Springer, Vol. 916, pp. 107-130, 2021.
- [26] H. M. A. Ahmed, A. B. Eltantawy, M. M. A. Salama, “A planning approach for the network configuration of AC-DC hybrid distribution systems,” IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, pp. 2203-2213, 2018.
- [27] North American Electric Reliability Corporation, (NERC) Reliability Standards for the Bulk Electric Systems of North America, 2017.
- [28] A.S.A. Awad, T.H.M. EL-Fouly, M.M.A. Salma, “Optimal ESS allocation and load shedding for improving distribution system reliability,” IEEE Transactions Smart Grid, Vol. 5, 2339-2349, 2014.
- [29] SANDIA National Laboratories, S. Schoenung, Energy storage systems cost update, 2011.
- [30] SANDIA National Laboratories, J. Eyer, G. Corey, Energy storage for the electricity grid: Benefits and market potential assessment guide, 2010. Available: <http://sandia.gov/ess/publications/SAND2010-0815.pdf>.
- [31] M. E. Baran, F. F. Wu, “Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, 1989.