

برنامه‌ریزی بهینه‌ی باتری‌ها در شبکه توزیع فعال با در نظر گرفتن تکنولوژی‌های مختلف در شرایط فنی و اقتصادی غیرقطعی

مجید داغی¹، دانشجوی کارشناسی ارشد، مهدی صدقی²، دانشجوی دکتری، مسعود علی‌اکبر گلکار³، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران

daghi_majid@yahoo.com

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران

meh.sedghi@gmail.com

۳- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی- تهران- ایران

golkar@eetd.kntu.ac.ir

چکیده: با توجه به اهمیت ذخیره انرژی در شبکه‌های توزیع فعال و همچنین وجود تکنولوژی‌های مختلف برای باتری‌ها، در این مقاله، برنامه‌ریزی بهینه انواع باتری‌ها، با هدف مقایسه‌ی انواع تکنولوژی‌ها ارائه شده است. در یک برنامه‌ریزی بلندمدت، نوع، مکان نصب، ظرفیت و توان نامی باتری‌ها باید به طور بهینه تعیین شود. تابع هدف شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیرات و نگهداری، بهره‌برداری شبکه و شاخص‌های قابلیت اطمینان است. قیود سطح ولتاژ، ظرفیت تجهیزات و تعادل توان در شبکه باید در کل دوره‌ی برنامه‌ریزی رعایت شوند. از طرف دیگر، هر تکنولوژی دارای پارامترهای فنی و اقتصادی غیرقطعی مخصوص به خود است که در زمان‌ها و موقعیت‌های مختلف تغییر می‌کند. بنابراین در یک مطالعه‌ی جامع، عدم قطعیت پارامترهای باتری، در کنار سایر مشخصات غیرقطعی سیستم مد نظر قرار گرفته است. مسأله‌ی عدم قطعیت، با استفاده از تحلیل‌های فازی مدلسازی می‌شود و برای بهینه‌سازی از الگوریتم تبرید تدریجی استفاده شده است. نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد که تکنولوژی Zn-Br در شرایط میانگین، از سایر انواع مناسب‌تر است. با اینحال در شرایط غیر قطعی، تکنولوژی Na-S می‌تواند با Zn-Br رقابت کرده و گزینه‌ای بهینه باشد. در نهایت با اجرای تحلیل حساسیت، نتایج به دست آمده به شبکه‌های مختلف تعمیم داده می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: شبکه توزیع فعال، ذخیره انرژی، بهینه‌سازی، قابلیت اطمینان، عدم قطعیت

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۴/۰۶/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۴/۱۲/۲۲

نام نویسنده‌ی مسئول : مسعود علی‌اکبر گلکار

نشانی نویسنده‌ی مسئول : تهران- خیابان دکتر علی شریعتی- پل سید خندان- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده مهندسی برق - آزمایشگاه تحقیقاتی مدیریت انرژی و سیستم‌های توزیع

۱- مقدمه

شبکه‌های توزیع منفعل و مرسوم در حال تبدیل به شبکه‌های فعال می‌باشند. در شبکه‌های توزیع فعال، بر خلاف شبکه‌های شعاعی معمول، شارش توان در هر دو جهت امکان‌پذیر بوده و شبکه دارای انعطاف‌پذیری بیشتری هست. بنابراین شبکه فعال دارای هزینه کمتر و قابلیت اطمینان بیشتری است. شبکه‌های فعال می‌توانند دارای عناصری مثل واحدهای تولید پراکنده تجدیدپذیر یا مرسوم، ذخیره‌سازهای انرژی و خودروهای برقی بوده و در آن بارها دارای قابلیت پاسخگویی و کنترل‌پذیری نیز باشند. در میان موارد فوق، ذخیره انرژی نقش مهمی را در شبکه‌های فعال و همچنین شبکه‌های هوشمند آینده بر عهده خواهد داشت. مهمترین ادواتی که برای ذخیره انرژی الکتریکی مناسب‌اند، عبارتند از: هیدروپمپ‌ها، کمپرسور هوا، چرخ طیار، باتری‌ها، پیل‌های سوختی، سلف‌های ابررسانا و ابرخازن‌ها [۱].

ذخیره‌سازهای انرژی با اهداف مختلفی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. برخی از این اهداف عبارتند از: جلوگیری از نوسانات شبکه، افزایش کیفیت توان، تنظیم ولتاژ، تعقیب بار، پیک‌سایی، رزرو چرخی، کاهش بار شبکه انتقال و پشتیبانی از منابع تجدیدپذیر [۲]. با وجود مزایای فوق، تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی دارای تکنولوژی گران قیمتی می‌باشند [۳]. بنابراین، این ادوات باید به گونه‌ای به کار گرفته شوند که از هر دو نقطه نظر فنی و اقتصادی بهینه باشند. این امر مستلزم یک برنامه‌ریزی بهینه برای ذخیره‌سازهاست.

در میان انواع مختلف ذخیره‌سازها، باتری‌ها به خاطر ویژگی‌های خاص خود، به صورت گسترده‌تری در سطح شبکه‌ی توزیع مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۱-۴]. برنامه‌ریزی باتری‌ها در شبکه توزیع شامل بهینه‌سازی مکان، ظرفیت و توان نامی آنها با توجه به استراتژی شارژ و دشارژ باتری‌هاست، به طوریکه مجموع کل هزینه‌ها تحت قیود فنی کمینه گردد. در [۴] و [۵] تعیین مکان بهینه باتری‌ها در شبکه توزیع در مرکز توجه قرار گرفته و تعیین ظرفیت بهینه آنها در مراجعی مانند [۶] و [۷] بررسی شده است. برخی از تحقیقات نیز به تعیین همزمان مکان، ظرفیت و توان نامی باتری‌ها پرداخته‌اند [۱۱-۸]. در [۸] یک روش دولاپه برای برنامه‌ریزی باتری‌ها پیشنهاد شده است. پخش بار بهینه پویا و الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات به ترتیب در لایه‌های اول و دوم مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ترکیبی از برنامه‌ریزی پویا و الگوریتم ژنتیک نیز برای بهینه‌سازی باتری‌ها در مرجع [۹] ارائه شده است. در این مرجع هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری، تلفات توان و بروزرسانی فیدرها و پست‌ها کمینه‌سازی شده، ولی از شاخص‌های قابلیت اطمینان در شبکه و محدودیت‌های فنی باتری‌ها صرف‌نظر شده است. در [۱۰] برنامه‌ریزی بهینه باتری‌ها تنها با هدف افزایش قابلیت اطمینان شبکه انجام شده و قابلیت تکنولوژی Na-S برای این کار ارزیابی گردیده است. برنامه‌ریزی

بهینه باتری‌ها به طور همزمان برای پیک‌سایی و کاهش خاموشی‌ها در [۱۱] مطرح شده است. در این مرجع، تأثیر توسعه دینامیکی شبکه توزیع بر برنامه‌ریزی باتری‌ها نشان داده شده و از یک الگوریتم اجتماع ذرات بهبود یافته برای بهینه‌سازی سود برده شده است. با اینحال در مطالعات انجام شده در [۱۱]، از عدم قطعیت بار و قیمت‌ها غفلت شده است. در بسیاری از مراجع نظیر [۱۴-۱۲] از باتری‌ها برای مهار اثرات سوء ناشی از منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی استفاده می‌شود. نتایج این مراجع نشان می‌دهد که می‌توان از باتری‌ها به طور موفقیت‌آمیزی برای حل مشکلات شبکه استفاده نمود و منابع غیرقابل دیسپچ را برنامه‌ریزی کرد.

با اینحال در مطالعات فوق، تنها نوع خاصی از باتری‌ها مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج به دست آمده مشخص نمی‌کند که کدام تکنولوژی از میان انواع باتری‌ها برای شبکه‌های توزیع مناسب‌تر است. از طرف دیگر، مقایسه‌ی تکنولوژی‌های مختلف مستلزم لحاظ عدم قطعیت در هزینه باتری‌ها و مشخصات فنی مانند بازدهی آنهاست. این عوامل در هیچیک از کارهای گذشته مد نظر قرار نگرفته است.

در این مقاله، تکنولوژی‌های مختلفی از باتری‌ها برای به کارگیری بهینه در شبکه‌های توزیع فعال مورد توجه و مقایسه قرار گرفته است. این مقایسه با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مشخصات مهم فنی و اقتصادی باتری‌ها انجام می‌گیرد تا با لحاظ این شرایط، نتایج به دست آمده عمومیت داشته باشند. در تحلیل‌های پیش رو در این مقاله، عواملی نظیر عدم قطعیت بار و بهره‌برداری‌های چند منظوره از باتری‌ها نیز مورد توجه قرار می‌گیرد و برای عدم قطعیت بار و باتری‌ها، از مدل فازی استفاده می‌شود. هنگامی که مدل احتمالاتی^۱ همه‌ی متغیرهای تصادفی و گشتاورهای آنها مشخص نباشد، استفاده از مدل فازی (مکانی^۲) مفید خواهد بود.

به طور مرسوم، باتری‌ها در شبکه‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که دارای منابع تولید تجدیدپذیر هستند. با اینحال، نیاز است مشخص شود که آیا در شبکه‌های توزیع فاقد منابع تجدیدپذیر، استفاده از باتری‌ها همچنان صرفه‌ی اقتصادی خواهد داشت؟ تحلیل‌های حساسیت در این مقاله نشان خواهند داد که پاسخ به این سؤال در شرایط مختلف سیستم توزیع و برای تکنولوژی‌های مختلف باتری، به چه صورت خواهد بود. این تحلیل‌ها بر روی هفت نوع تکنولوژی انجام می‌شود و پارامترهایی مانند هزینه نصب (مربوط به انرژی و توان باتری‌ها)، هزینه جایگزینی، طول عمر، بازدهی و هزینه‌های ثابت و متغیر تعمیرات و نگهداری برای باتری‌ها مد نظر قرار می‌گیرند.

نوع، مکان، ظرفیت و توان باتری‌ها در شبکه توزیع طوری مشخص می‌شوند که تابع هدف هزینه تحت قیود فنی کمینه گردد. در این مقاله، تابع هدف مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و قابلیت اطمینان شبکه است و از الگوریتم تبرید تدریجی برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود.

ادامه‌ی مطالب به این صورت تنظیم شده است: بخش دوم به معرفی و مرور انواع تکنولوژی‌ها و خواص آنها می‌پردازد. تعریف مسأله و روش پیشنهادی برای حل آن، به ترتیب در بخش‌های سوم و چهارم ارائه خواهند شد. مطالعات عددی در بخش پنجم نشان داده شده و نهایتاً بخش ششم به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

۲- تکنولوژی باتری‌ها

باتری‌های قابل شارژ در برگرفته‌ی بازه‌ی گسترده‌ای از تکنولوژی‌های مبتنی بر مواد استفاده شده در الکترودها و الکترولیت‌ها و مکانیزم ذخیره‌سازی می‌باشند. پارامترهای مهم باتری‌ها که در مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارتند از: هزینه‌ی سرمایه‌گذاری ظرفیت (بر حسب $\$/kWh$)، هزینه‌ی سرمایه‌گذاری نرخ توان (بر حسب $\$/kW$)، هزینه‌ی جایگزینی (بر حسب $\$/kW$)، هزینه‌ی بهره‌برداری و نگهداری (بر حسب $\$/kW-year$)، بازدهی (بر حسب درصد)، عمق دشارژ یا DOD (بر حسب درصد) و طول عمر (بر حسب تعداد چرخه‌ی شارژ و دشارژ). در این مقاله، باتری‌های زیر برای برنامه‌ریزی بهینه مورد ارزیابی قرار می‌گیرند [۳]:

۱- تکنولوژی سدیم-سولفور ($Na-S$): این باتری در سال ۱۹۸۷ و در شرکت برق و مقره NGK توکیو توسعه داده شده است. این نوع باتری، یکی از پیشرفته‌ترین تکنولوژی‌های ذخیره‌ساز الکتروشیمیایی در حد مگاوات ساعت می‌باشد. کل توانی که این باتری در سطح جهان در سال ۲۰۱۲ تأمین می‌کرده، حدود ۶۰۶ مگاوات بوده است. این باتری دارای توانایی به کارگیری به منظور کاربردهای کیفیت توان و جابه‌جایی زمان مصرف توان می‌باشد. برخی خصوصیات مهم این باتری عبارتند از: بازدهی (۷۵-۸۵ درصد)، طول عمر ۴۵۰۰-۲۵۰۰ چرخه‌ی شارژ و دشارژ و مدت زمان تخلیه‌شدن بیش از ۷ ساعت. یک مزیت $Na-S$ اینست که پس از اتمام عمر آن، هزینه‌ی جایگزینی کمی دارد. بزرگترین پروژه‌ای که در جهان با استفاده از این باتری عملی شده دارای توان ۷۰ مگاوات می‌باشد که در کشور ایتالیا و در سال ۲۰۱۴ عملی شده است.

۲- تکنولوژی نیکل-کادمیوم ($Ni-Cd$): در بین انواع مختلف تکنولوژی‌های باتری، باتری نیکل-کادمیوم قدیمی‌ترین نوع می‌باشد. این باتری در سال ۱۹۹۰ توسعه یافت و دارای خصوصیتی از قبیل: چگالی انرژی در حد ۷۵-۵۵ (Wh/kg)، هزینه‌ی توان نامی کمتر و طول عمر ۲۵۰۰-۲۰۰۰ چرخه می‌باشد. چرخه‌ی عمر آن به شدت به DOD بستگی دارد. باتری‌های نیکل-کادمیوم دارای کاربردهای مختلفی از قبیل کیفیت توان و رزرو اضطراری به منظور تأمین توان سرویس‌های ارتباطی و قابل حمل می‌باشد. بزرگترین باتری نیکل-کادمیوم جهان در آلاسکای آمریکا و در سال ۲۰۰۳ راه‌اندازی شده است. این باتری دارای نرخ توان ۲۷ مگاوات با زمان تخلیه ۱۵ دقیقه و نرخ توان ۴۰ مگاوات با زمان تخلیه‌ی ۷ دقیقه می‌باشد.

۳- تکنولوژی لیتیم-یون ($Li-ion$): اولین باتری لیتیم-یون تجاری در سال ۱۹۹۰ تولید شد. هدف اولیه برای این نوع باتری، استفاده به صورت قابل حمل بود، اما امروزه در ظرفیت‌های زیاد و در حد شبکه توزیع و به صورت مکان ثابت به کار برده می‌شود. خصوصیات این نوع باتری عبارتند از: چگالی انرژی (Wh/kg) ۲۰۰ و بازدهی ۸۵-۹۰ (درصد). این خصوصیات موجب توسعه و گسترش به کارگیری از این نوع باتری‌ها در شبکه‌ی توزیع شد. علیرغم اینکه تکنولوژی $Li-ion$ هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و نصب بالایی دارد، ولی بازدهی آن از سایر تکنولوژی‌ها بیشتر است. بنابراین کمترین تلفات انرژی را به دنبال خواهد داشت.

۴- تکنولوژی وانادیوم-ریدوکس^۴ ($VRFB$): باتری‌های گردشی، برخلاف باتری‌های معمولی که در آنها وظیفه‌ی ذخیره‌ی انرژی را الکترودها بر عهده دارند، انرژی را در محلول الکترولیت خود ذخیره می‌کنند. از این رو، توان نامی و انرژی باتری می‌تواند به صورت مجزا طراحی شود، به طوری که ظرفیت انرژی به وسیله‌ی مقدار الکترولیت ذخیره شده در تانک خارجی و نرخ توان بر اساس ناحیه‌ی فعال سلول طراحی می‌شود. این ویژگی باتری‌های گردشی، موجب می‌شود که برای هر دو کاربرد مربوط به توان و انرژی مربوط به ذخیره‌ساز مورد استفاده قرار گیرند. برخی از خصوصیات این باتری عبارتند از: بیشترین مدت زمان دشارژ ۱۰ ساعت، چگالی انرژی (Wh/kg) ۷۵-۱۰ و محدودیت دمای بهره‌برداری ($^{\circ}C$) ۳۵-۱۰. تکنولوژی $VRFB$ هزینه‌ی جایگزینی کمی دارد ولی نیازمند تعمیرات و نگهداری بیشتری است. این باتری در حال حاضر به صورت تجاری شده و در مقیاس شبکه به کار برده می‌شود. عوامل مهمی چون انعطاف پذیری زمان دشارژ، نرخ توان و ظرفیت انرژی، موجب تشویق محققان به منظور گسترش و توسعه‌ی این نوع باتری شده است. بزرگترین باتری $VRFB$ به کار برده شده، دارای توان ۳ مگاوات با مدت دشارژ ۱۶ دقیقه می‌باشد که در اوزاکای کشور ژاپن به منظور پیک‌سایی مورد استفاده قرار گرفته است.

۵- تکنولوژی زینک-برومین ($Zn-Br$): این باتری نیز همانند باتری $VRFB$ یکی از انواع باتری‌های گردشی می‌باشد. با وجود بازدهی پایین (۶۵-۶۰ درصد)، این نوع باتری‌ها دارای عمق دشارژ زیادی هستند، به طوریکه، تقریباً به صورت کامل می‌توانند تخلیه شوند. ویژگی برتر تکنولوژی $Zn-Br$ ، هزینه‌ی کم سرمایه‌گذاری ظرفیت (بر حسب $\$/kWh$) و طول عمر بالای آن است، ولی کمترین بازدهی را دارد. بنابراین در هنگام استفاده از $Zn-Br$ تلفات توان افزایش خواهد یافت. این باتری قادر است طی ۱۵ سال، ۵۰۰-۳۶۵ بار در سال شارژ و دشارژ شود.

۶- باتری‌های اسیدی ($Lead-Acid$): باتری اسیدی یکی از باتری‌های قدیمی می‌باشد که به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این باتری، یک انتخاب مشترک طراحان ریز شبکه، به منظور عملکرد در

جدول (۱): مشخصات فنی تکنولوژی‌های مختلف باتری [۳]

نوع باتری	توان نامی (MW)	بازدهی (%)	چگالی انرژی (Wh/kg)	تخلیه خودی روزانه (%)	طول عمر (سال)
Na-S	۰/۰۵-۸	۷۵-۹۰	۱۵۰-۲۵۰	۲۰	۱۰-۱۵
Ni-Cd	< ۴۰	۶۰-۷۳	۱۵-۳۰۰	۰/۲-۰/۶	۱۰-۲۰
Li-ion	< ۰/۰۱	۸۵-۹۵	۱۵۰-۳۵۰	۰/۱-۰/۳	۵-۱۵
VRFB	۰/۰۳-۳	۶۵-۸۵	۱۰-۳۵	ناچیز	۵-۱۰
Zn-Br	۰/۰۵-۲	۶۰-۷۰	۳۰-۸۵	ناچیز	۵-۱۰
ZEBRA	۵۰	۸۶-۸۸	۱۰۰-۱۴۰	۱۵	۱۵
Lead-acid	< ۲۰	۷۰-۹۰	۳۰-۵۰	۰/۱-۰/۳	۵-۱۵

۲- کمینه کردن هزینه بهره‌برداری از شبکه و تعمیرات و نگهداری باتری.

۳- کمینه کردن هزینه قابلیت اطمینان (خاموشی‌ها) در شبکه. با توجه به اهداف مورد نظر، تابع هدف شامل سه قسمت اصلی می‌شود که عبارتند از هزینه نصب (IC)، هزینه بهره‌برداری (OC) و هزینه قابلیت اطمینان (RC). همچنین برای تضمین برقراری قیود فنی، از یک ضریب جریمه (PF) نیز در تابع هدف استفاده می‌شود، به طوریکه راه‌حل‌های ارزان ولی غیر عملی در اولویت قرار نگیرند. بنابراین تابع هدف نهایی (F) را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$Min.F = (IC + OC + RC) \times (1 + PF) \quad (1)$$

جمله‌ی IC شامل هزینه سرمایه‌گذاری مربوط به هزینه نصب و جایگزینی واحدهای باتری می‌باشد. این هزینه، تابعی از ظرفیت و توان نامی باتری به صورت زیر است:

$$IC = \sum_{k=1}^{n_{ST}} [C_{ST}^{INSC} (CAP_k^{ST}) + C_{ST}^{INSP} (PR_k^{ST}) + C_{ST}^{REPC} (CAP_k^{ST}) + C_{ST}^{REPP} (PR_k^{ST})] \quad (2)$$

که در آن، CAP_k^{ST} ظرفیت باتری k ام، PR_k^{ST} توان نامی باتری k ام، C_{ST}^{INSC} تابع هزینه نصب با توجه به ظرفیت باتری، C_{ST}^{INSP} تابع هزینه نصب با توجه به توان نامی باتری، C_{ST}^{REPC} تابع هزینه جایگزینی با توجه به ظرفیت، C_{ST}^{REPP} تابع هزینه جایگزینی با توجه به توان نامی و n_{ST} تعداد کل باتری‌های نصب شده در شبکه است.

در این مقاله، طول عمر باتری‌ها با توجه به تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ آنها مدلسازی می‌شود. اگر تعداد سیکل‌های باتری از حد بیشینه‌ی آن فراتر رود، باتری تعویض شده و هزینه جایگزینی به تابع هدف اضافه خواهد شد.

هزینه بهره‌برداری (OC) شامل دو قسمت است: هزینه خرید برق از شبکه‌ی بالادست در پست‌های HV/MV و هزینه تعمیرات و نگهداری باتری‌ها. هزینه خرید توان از شبکه‌ی بالادست به مقدار توان شارژ و دشارژ شده‌ی باتری وابسته است. به دلیل اهمیت

حالت مستقل از شبکه سراسری می‌باشد. از جمله کاربردهای این نوع باتری عبارتند از: افزایش کیفیت توان، کاربرد در UPS و رزرو چرخان. به خاطر محدودیت چرخه‌ی عمر (۲۵۰۰ چرخه)، مدت زمان کوتاه دشارژ و چگالی انرژی پایین (۵۰ Wh/kg)، از این باتری به منظور جابه‌جایی بار استفاده نمی‌شود. باتری‌های بزرگ اسیدی با مدت زمان دشارژ در حد چند ساعت در سطح جهان در حال بهره‌برداری می‌باشند. به عنوان مثال در کالیفرنیا از این نوع باتری با توان ۱۰ مگاوات و ۴ ساعت زمان دشارژ بهره‌برداری می‌شود.

۷- تکنولوژی سدیم-نیکل کلراید ($Na-Ni-Cl_2$) معروف به ZEBRA^۵: باتری سدیم-نیکل کلراید برای اولین بار در سال ۱۹۹۵ به صورت تجاری و در مقیاس کوچک و قابل حمل به کار برده شد. این باتری، مشابه باتری Na-S، دارای دمای عملکردی بالایی (۲۷۰-۳۵۰°C) می‌باشد. در این باتری به جای سولفور، نیکل-کلراید به عنوان کاتد استفاده می‌شود. تمرکز تحقیقات حال حاضر، بر روی توسعه‌ی باتری‌های ZEBRA پیشرفته می‌باشد. این باتری دارای چگالی انرژی بالا بوده و می‌تواند به منظور پیک‌سایی و کنترل منابع انرژی تولید پراکنده مورد استفاده قرار گیرد. طول عمر این باتری حدود ۲۶۰۰ چرخه می‌باشد.

مقادیر پارامترهای بیان شده در بالا، بر حسب میانگین بوده و ثابت و قطعی نیستند. بنابراین لازمست که در مطالعات قیاسی، مسأله‌ی عدم قطعیت به نحوی لحاظ گردد.

بازه‌ی تغییرات مشخصات فنی باتری‌ها، برای مقایسه، در جدول (۱) خلاصه شده است.

۳- تعریف مسأله

مسأله برنامه‌ریزی بلندمدت باتری‌ها در شبکه‌ی توزیع، شامل تعیین بهینه‌ی مکان، ظرفیت، توان نامی و نوع تکنولوژی باتری در شبکه می‌باشد، به طوریکه تابع هدف هزینه تحت قیود فنی و عملی کمینه گردد. در این مقاله، کمینه کردن همه‌ی موارد زیر (به طور همزمان) در تابع هدف دیده می‌شود:

۱- کمینه کردن هزینه سرمایه‌گذاری و نصب باتری و مبدل آن.

است [۱۱]. برای محاسبه‌ی هزینه‌ی خاموشی RC در رابطه‌ی (۱)، از معادله‌ی (۶) استفاده می‌گردد:

$$RC = \sum_{t=1}^T \sum_{e=1}^{n_{EV}} \lambda_e \times CO_L(ENS_e, r_e), \quad L=1,2,\dots,n_{COS} \quad (6)$$

که در آن، λ_e نرخ خرابی برای حادثه‌ی e ام، CO_L هزینه‌ی خاموشی برای مشترک نوع L ام، ENS_e انرژی تأمین نشده بر اثر حادثه‌ی e ام، r_e مدت خاموشی، T طول دوره‌ی پروژه، تعداد کل حوادث احتمالی در شبکه و n_{COS} تعداد انواع مشترک‌هاست.

کمیته کردن همزمان همه‌ی هزینه‌های فوق، باید با توجه به قیود فنی شبکه انجام شود. سه قید اصلی در مسأله‌ی پیش رو، قید رعایت ظرفیت تجهیزات، قید اندازه‌ی ولتاژ و قید تعادل تولید و مصرف است. معادلات زیر این سه قید را نشان می‌دهند:

$$S_t^u \leq S_{\max}^u, \quad u=1,2,\dots,n_{EQ}, \quad t=1,2,\dots,24 \quad (7)$$

$$V_{\min} \leq V_{l,t} \leq V_{\max}, \quad l=1,2,\dots,n_{LD}, \quad t=1,2,\dots,24 \quad (8)$$

$$\sum_{s=1}^{n_{SS}} S_{s,t}^{SS} = \sum_{k=1}^{n_{ST}} S_{k,t}^{ST} + \sum_{l=1}^{n_{LD}} S_{l,t}^{LD} + S_t^{LOSS}, \quad t=1,2,\dots,24 \quad (9)$$

که در آنها، S_t^u توان یا انرژی تجهیز u ، $S_{\max}^u$ بیشینه‌ی مجاز توان یا انرژی تجهیز u ، ولتاژ شین l ام شبکه در ساعت t ، $V_{\min}$ مقدار کمینه‌ی مجاز ولتاژ، $V_{\max}$ مقدار بیشینه‌ی مجاز ولتاژ، $S_{s,t}^{SS}$ توان دریافت شده از شبکه‌ی بالادست در ساعت t از طریق پست s ام، $S_{k,t}^{ST}$ توان شارژ باتری k ام در زمان t ، $S_{l,t}^{LD}$ توان درخواستی بار l ام در زمان t ، تلفات توان در کل شبکه در زمان t ، n_{EQ} تعداد کل تجهیزات و n_{LD} تعداد کل نقاط بار است.

محاسبه‌ی تلفات توان و برقراری قید معادله‌ی (۹) از طریق اجرای برنامه‌ی پخش بار جاروب پسر-پیشرو انجام می‌گیرد. برای آنکه قیود روابط (۷) و (۸) نیز برقرار باشند، از ضریب جریمه‌ی PF در تابع هدف استفاده شده است. در این مقاله، ضریب جریمه از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$PF = \sum_{j=1}^2 \sum_{t=1}^{24} (n_{N,j,t}^{VIO} + n_{F,j,t}^{VIO}) \quad (10)$$

که در آن، $n_{N,j,t}^{VIO}$ تعداد نقاطی از شبکه است که در آنها قید ولتاژ در ساعت t از نیمه‌ی j ام سال برقرار نیست. $n_{F,j,t}^{VIO}$ تعداد تجهیزاتی است که در آنها قید ظرفیت یا توان مجاز در ساعت t از نیمه‌ی j ام سال نقض شده است.

علاوه بر قیود فوق، محدودیت‌های زیر به صورت ویژه برای باتری‌ها لحاظ می‌شود:

۱- توان دشارژ باتری، تابعی از انرژی ذخیره‌شده در ساعت قبل و بازدهی روبه‌رفته‌ی باتری و مبدل می‌باشد [۱۴].

۲- باتری‌ها نباید به طور کامل دشارژ شوند [۳].

هزینه‌ی انرژی نسبت به تلفات توان در شبکه‌ی توزیع از نقطه نظر اقتصادی، به جای تلفات توان از هزینه‌ی انرژی استفاده شده است. در این حالت، جمله‌ی OC حاوی هزینه‌ی توان تلف شده (و نه تلفات توان) در شبکه نیز می‌باشد. از آنجا که منحنی‌های بار و قیمت برق در دو نیمه از یکسال، به طور قابل توجهی با یکدیگر متفاوت است، در این مقاله مقدار OC برای دو قسمت از هر سال به طور جداگانه محاسبه شده و نهایتاً با یکدیگر جمع می‌شود. همچنین مقدار OC در هر نیمه، با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار لحاظ می‌گردد. علاوه بر این موارد، محاسبه‌ی OC باید با توجه به نرخ تورم ($Infr$) و نرخ بهره ($Intr$) در طول دوره‌ی پروژه انجام گیرد [۱۱]. در نتیجه، هزینه‌ی کل بهره‌برداری OC را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$OC = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^2 OC_j \times T_j \times \left(\frac{1+Infr}{1+Intr} \right)^{i-1} \quad (3)$$

که در این رابطه، OC_j هزینه‌ی بهره‌برداری در نیمه‌ی j ام سال بوده و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$OC_j = \sum_{k=1}^{n_{ST}} C_{ST}^{OM} (CAP_k^{ST}, PR_k^{ST}) + \sum_{t=1}^{24} \sum_{s=1}^{n_{SS}} C_{s,j}^{SS}(t) \quad (4)$$

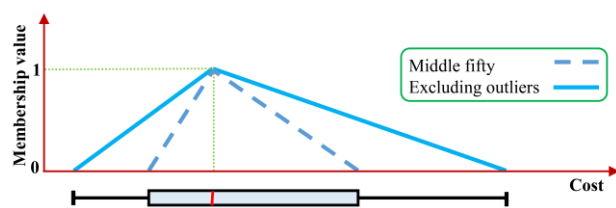
که در آنها، T_j طول مقطع j ام سال (بر حسب روز)، T طول دوره‌ی پروژه (بر حسب سال)، C_{ST}^{OM} تابع هزینه‌ی تعمیرات و نگهداری باتری‌ها، $C_{s,j}^{SS}(t)$ هزینه‌ی خرید برق از پست فوق توزیع s ام در ساعت t از نیمه‌ی j ام سال و n_{SS} تعداد کل پست‌های HV/MV در شبکه است.

$C_{s,j}^{SS}(t)$ تابعی از جذب یا تزریق توان اکتیو و راکتیو و قیمت آنها در پست‌های فوق توزیع بوده و با استفاده از رابطه‌ی (۵) به دست می‌آید:

$$C_{s,j}^{SS}(t) = C_{p,j}^{pr}(t) \times P_{s,j}^{SS}(t) + C_{q,j}^{pr}(t) \times |Q_{s,j}^{SS}(t)| \quad (5)$$

که در آن، $C_{p,j}^{pr}(t)$ قیمت توان اکتیو در ساعت t از نیمه‌ی j ام، $C_{q,j}^{pr}(t)$ قیمت توان راکتیو در ساعت t از نیمه‌ی j ام، $P_{s,j}^{SS}(t)$ توان اکتیو جذب شده در ساعت t از نیمه‌ی j ام سال در پست s ام و $Q_{s,j}^{SS}(t)$ توان راکتیو جذب شده در ساعت t از نیمه‌ی j ام سال در پست s ام است. $P_{s,j}^{SS}(t)$ و $Q_{s,j}^{SS}(t)$ می‌توانند مقادیری مثبت (برای جذب) یا منفی (برای تزریق) باشند. در این مقاله، جذب توان راکتیو $Q_{s,j}^{SS}(t)$ از سوی بارهای مصرفی بوده و باتری‌ها فقط توان اکتیو جذب یا تزریق می‌کنند.

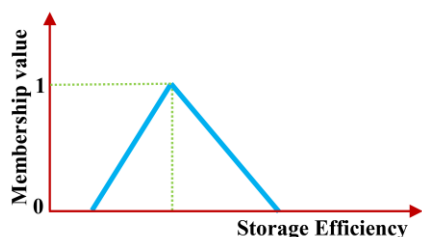
در این مطالعه، برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان در شبکه توزیع، از معیار هزینه‌ی انرژی تأمین نشده^۶ (ENS) استفاده شده است. این هزینه زمانی پدیدار می‌شود که یک خاموشی در اثر خرابی در فیدرهای شبکه یا پست HV/MV ایجاد گردد. هزینه‌ی خاموشی تابعی از مقدار انرژی تأمین نشده، مدت خاموشی و نوع بار مشترک



شکل (۳): مدل‌سازی عدم قطعیت با اعداد فازی

در شکل (۳) دو عدد فازی معرفی شده است. در یکی از آنها (یعنی Middle fifty) داده‌های کم احتمال حذف شده‌اند، در حالیکه در دیگری (یعنی Excluding outliers) تمامی داده‌ها لحاظ گردیده‌اند. داده‌های حذف شده معرف حالت‌هایی هستند که امکان وقوع آنها کم است. بنابراین بازه‌ی بزرگتری از تغییرات را در بر می‌گیرد. با حذف این داده‌ها، مدل فازی تغییرات کمتری را در نظر می‌گیرد. به عبارت دیگر، شدت مدل‌سازی عدم قطعیت در اعداد فازی معرفی شده در شکل (۳) متفاوت است. با اینحال، در هر دو مدل، مقدار امید ریاضی هزینه (یا میانگین) به عنوان مرکز عدد فازی مثلثی (با مقدار عضویت برابر ۱)، در نظر گرفته می‌شود.

از طرف دیگر، بازدهی باتری‌ها نیز یک پارامتر ثابت و قطعی نیست و بر حسب شرایط مختلف، ممکن است تغییر کند. بنابراین بازدهی باتری‌ها نیز بر اساس اطلاعات [۳] متغیر و غیرقطعی بوده و با اعداد فازی نشان داده می‌شوند. شکل (۴) این موضوع را نشان می‌دهد.



شکل (۴): مدل عدم قطعیت در بازدهی باتری‌ها

هر عدد فازی مثلثی را می‌توان به صورت $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ نشان داد. این مدل‌سازی موجب می‌شود که محاسبه‌ی تابع هدف با توجه به عملگرهای فازی به دست آید. به عنوان مثال، جمع دو عدد فازی $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ و $\tilde{B} = (b_1, b_2, b_3)$ به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۵]:

$$\tilde{A} + \tilde{B} = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3) \quad (11)$$

به این ترتیب، نیازمند اجرای پخش بار فازی در شبکه توزیع خواهیم بود که در آن از عملگرهای جمع، تفریق، ضرب و تقسیم فازی استفاده می‌گردد [۱۵]. محاسبات و قوانین فازی و جزئیات آن در مراجعی مانند [۱۶] ارائه شده است. در این مقاله، از روش پخش بار جاروب پسر-پیشروی فازی، مشابه مرجع [۱۷] استفاده می‌شود.

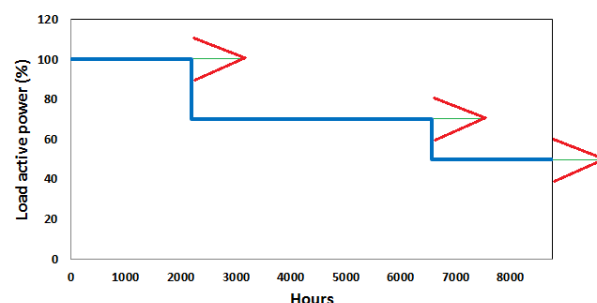
در انتهای محاسبات، مقدار تابع هدف یک عدد فازی خواهد بود که با استفاده از رابطه‌ی زیر غیرفازی می‌شود [۱۷]:

۳- باتری‌ها فقط یک‌بار در طول شبانه‌روز شارژ و دشارژ می‌شوند و بر اساس توصیه‌ی [۳] و [۱۴] از دشارژ جزئی باتری‌ها جلوگیری می‌گردد تا عمر باتری افزایش یابد. این قید در سیستم‌های قابل اتصال به شبکه سراسری (و نه سیستم‌های مستقل) به کار می‌رود تا هزینه‌ی جایگزینی باتری در تابع هدف کاهش یابد.

۴- روش حل مسأله

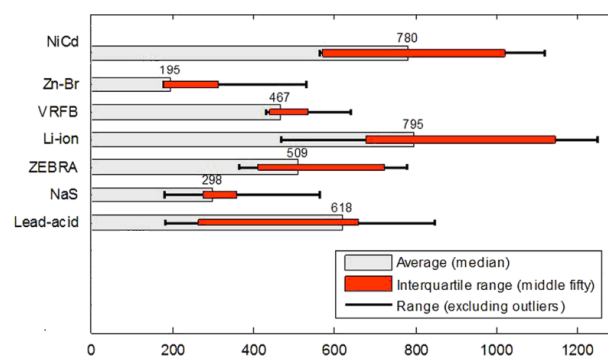
۴-۱- مدل‌سازی عدم قطعیت بار و هزینه‌ی باتری

با توجه به اینکه، منحنی بار مصرفی در عمل دارای عدم قطعیت است، در این مقاله از مدل فازی مثلثی برای مدل‌سازی عدم قطعیت بار استفاده می‌شود. این مدل با منحنی سه سطحی تغییرات بار ترکیب شده و مطابق شکل (۱) در برنامه‌ریزی بلندمدت به کار می‌رود.



شکل (۱): منحنی تداوم بار به همراه عدم قطعیت

بر اساس اطلاعات مرجع [۳]، توابع هزینه انواع باتری‌ها (بر حسب $\$/kWh$ و $\$/kW$) مقادیری ثابت و قطعی نیستند. به عنوان مثال، عدم قطعیت هزینه تکنولوژی‌های مختلف (بر حسب $\$/kWh$) در شکل (۲) به صورت نمودارهای جعبه‌ای نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، توابع هزینه در یک بازه (با چگالی‌های متفاوت) تغییر می‌کنند. بنابراین برای تعمیم و جامع‌سازی نتایج برنامه‌ریزی بهینه، این عدم قطعیت‌ها باید مورد توجه قرار گیرند. در این مقاله، از مدل فازی برای لحاظ عدم قطعیت در هزینه تکنولوژی‌های مختلف استفاده می‌شود. بنابراین نتایج به دست آمده عمومی خواهند بود. نحوه‌ی فازی سازی هزینه‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۲): هزینه‌ی ظرفیت باتری‌های مختلف (بر حسب €/kWh) با لحاظ عدم قطعیت [۳]

$$A = \frac{a_1 + 2 \times a_2 + a_3}{4} \quad (12)$$

که در آن، A مقدار غیرفازی شده‌ی $\tilde{A}$ است.

۴-۲- استراتژی‌های بهینه شارژ و دشارژ

نحوه‌ی شارژ و دشارژ باتری‌ها، تابعی از اهداف بکارگیری باتری‌ها در شبکه است. در این مقاله، استفاده از باتری‌ها با اهداف زیر صورت می‌گیرد:

۱- پیک سایه

۲- تنظیم ولتاژ

۳- کاهش خاموشی

این اهداف به طور همزمان پیگیری می‌شوند و به ترتیب موجب کاهش OC ، PF و RC در تابع هدف معادله‌ی (۱) می‌گردند.

بر اساس استراتژی‌هایی که در [۱۱] ارائه شده است، باتری‌ها در کم‌باری که قیمت برق پایین است شارژ می‌شوند. در میان‌باری به صورت آماده‌باش قرار می‌گیرند و در پرباری دشارژ خواهند شد. در ضمن، از انرژی ذخیره‌شده در آنها می‌توان برای کاهش خاموشی و بازیابی بارهای قطع شده در زمان خرابی شبکه نیز استفاده کرد. این بازیابی در حالت جزیره‌ای صورت می‌گیرد و ENS را کاهش می‌دهد. اگر باتری‌ها صرفاً برای کاهش خاموشی بکار روند، در کم‌باری و پرباری مکرراً شارژ و دشارژ نمی‌شوند، بلکه همیشه با حداکثر انرژی در حالت آماده‌باش قرار می‌گیرند. به این ترتیب می‌توان بار بیشتری را بازیابی نمود و ENS به مقدار کمینه‌ی خود می‌رسد. ولی از مزایای پیک‌سایه بهره‌ای برده نمی‌شود.

اگر امکان بهره‌برداری جزیره‌ای در شبکه موجود نباشد، تنها استراتژی پیک‌سایه خواهیم داشت که به طور ذاتی موجب بهبود ولتاژ نیز خواهد شد ولی ENS کاهش نمی‌یابد.

با توجه به مطالب فوق، سه سناریو برای برنامه‌ریزی باتری‌ها وجود دارد:

۱- تنها پیک سایه

۲- تنها کاهش خاموشی

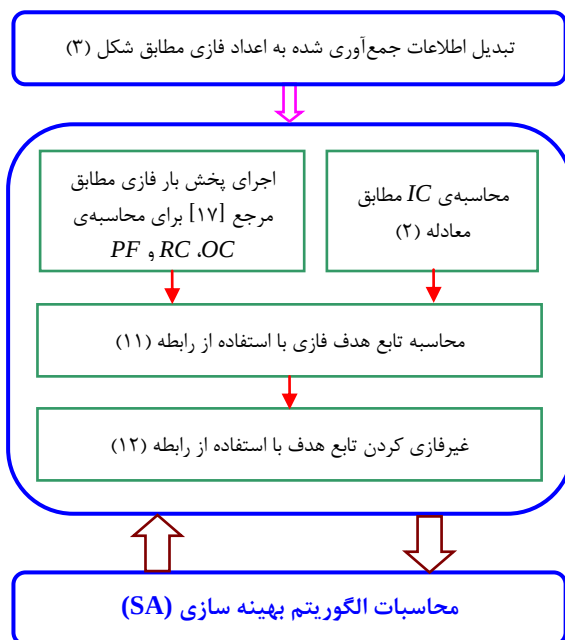
۳- پیک سایه و کاهش خاموشی به طور همزمان

۴-۳- الگوریتم تدریجی (SA)

در این مقاله، به منظور کمینه کردن تابع هدف رابطه (۱) از الگوریتم تدریجی (SA) استفاده می‌شود. SA یک الگوریتم ابتکاری تپه نورد مبتنی بر تکرار است. با شروع از یک راه‌حل اولیه، در هر تکرار، یک راه‌حل همسایه برای راه‌حل جاری تولید می‌شود. سپس تابع هدف برای راه‌حل همسایه محاسبه شده و با تابع هدف راه‌حل جاری مقایسه می‌شود. با توجه به پارامتر دما، راه‌حل همسایه می‌تواند با یک احتمال جایگزین راه‌حل جاری شود (حتی اگر تابع هدف بدتری داشته باشد) و این روند تا یک مقدار مشخص تکرار می‌شود. دما یک پارامتر کنترل

کننده است که در طول تکرارها کاهش می‌یابد. بنابراین میل الگوریتم SA به تپه نوردی در طول تکرارها کاهش یافته و به تدریج به یک الگوریتم محافظه‌کار تبدیل می‌شود. جزئیات اجرا و استفاده از الگوریتم SA در [۱۹] نشان داده شده است. در این مقاله از SA برای بهینه‌سازی استفاده شده است زیرا یکی از مزایای SA اینست که به راه‌حل اولیه وابسته نیست. همچنین در مرجع [۱۹] به صورت ریاضی اثبات شده است که الگوریتم SA می‌تواند با احتمالی برابر ۱ به پاسخ بهینه‌ی سراسری برسد. هنگام اجرای الگوریتم SA، مکان، ظرفیت، توان نامی و نوع باتری به عنوان متغیرهای تصمیم مطرح‌اند.

روند کلی تحلیل فازی استفاده شده در برنامه‌ریزی باتری‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که اطلاعات جمع‌آوری شده به مدل فازی تبدیل شده و برای محاسبه تابع هدف استفاده می‌گردند. در هر تکرار از الگوریتم بهینه‌سازی، محاسبه تابع هدف فراخوانی شده و سپس نتیجه آن در اختیار الگوریتم بهینه‌سازی قرار می‌گیرد.



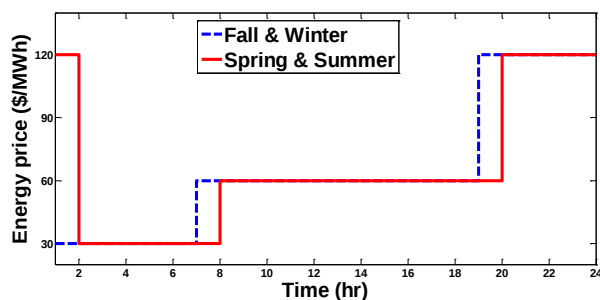
شکل (۵): روند کلی اجرای برنامه و جایگاه تحلیل فازی

۵- مطالعات عددی

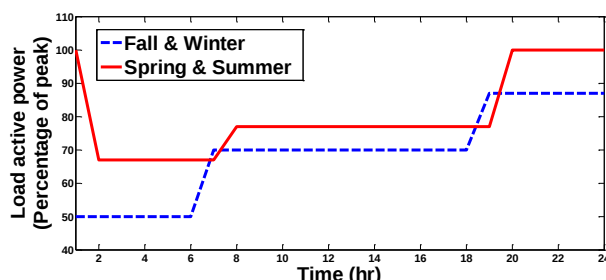
۵-۱- اطلاعات شبکه و بار

برای اجرای مطالعات عددی، یک شبکه توزیع نمونه مطابق شکل (۶) در نظر گرفته شده است. این شبکه که برگرفته از مرجع [۱۴] است دارای ولتاژ نامی $13/8$ (kV) و ۲۱ شینه است. همه‌ی بارهای شبکه از نوع مسکونی بوده و سایر اطلاعات شبکه در جدول (۲) نشان داده شده است.

اطلاعات قیمت برق و بار مصرفی در شکل (۷) و (۸) نشان داده شده



شکل (۷): منحنی تغییر قیمت برق در دو نیمسال



شکل (۸): منحنی تغییر میانگین بار مصرفی در دو نیمسال

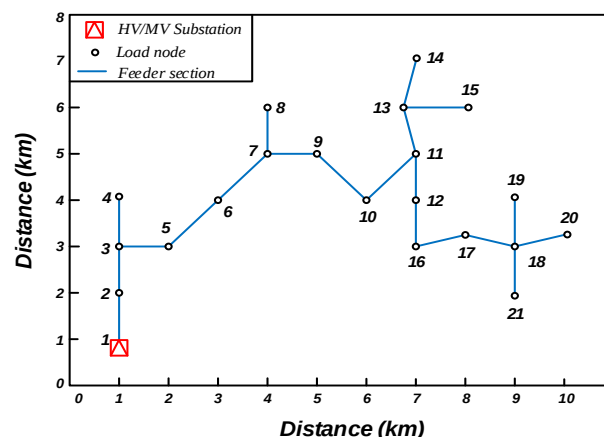
جدول (۳): هزینه‌های ارزیابی قابلیت اطمینان

نوع مصرف کننده	طول دوره‌ی وقفه (دقیقه)	هزینه (\$/kW)
مسکونی	۶۰ دقیقه	۰/۴۸۲
	۲۴۰ دقیقه	۴/۹۱۴
	۴۸۰ دقیقه	۱۵/۶۹۰

طور جداگانه در نظر گرفته شده است. جدول (۳) نیز هزینه‌های مربوط به خاموشی را نشان می‌دهد.

۲-۵- مشخصات باتری‌ها

به منظور مقایسه‌ی انواع تکنولوژی‌های باتری برای استفاده در شبکه توزیع، ۷ نوع از آنها که توسعه‌ی بیشتری یافته‌اند، در نظر گرفته می‌شوند. برای اینکه این مقایسه به واقعیت نزدیکتر باشد، پارامترهای مربوط به تکنولوژی‌های مختلف به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند. این عدم قطعیت با توجه به تعداد و کثرت تکرار اطلاعات در تحقیقات منتشر شده تاکنون، به صورت فازی مدلسازی شده است.



شکل (۶): آرایش شبکه توزیع تحت مطالعه

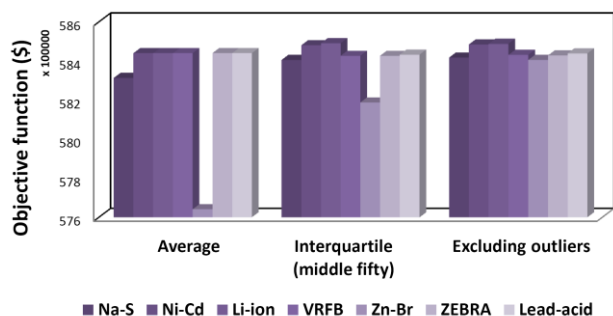
است. قیمت توان اکتیو بر اساس قیمت سه سطحی برق در ایران بوده و تغییرات سطح بار به صورت تقریبی از منحنی‌های بار مسکونی در شمال غرب ایران است. در این مطالعه مشابه مرجع [۱۴]، از قیمت توان راکتیو صرف‌نظر شده است. در شکل (۷)، منحنی قیمت برق در نیمه اول سال (بهار و تابستان) و نیمه دوم سال (پاییز و زمستان) به

جدول (۲): پارامترهای سیستم تحت مطالعه

پارامتر	مقدار
ضریب توان بار	۰/۹۸۷۲ (پس‌فاز)
ضریب توان باتری	۱
بیشینه ولتاژ مجاز (p.u.)	۱/۰۵
کمینه ولتاژ مجاز (p.u.)	۰/۹۵
طول عمر پروژه (سال)	۲۵
مقاومت اهمی فیدرها (Ω/km)	۰/۲۰۰۶
راکتانس فیدرها (Ω/km)	۰/۴۰۲۶
حداکثر ظرفیت مجاز فیدرها (A)	۳۱۴
نرخ خطای فیدر (f/km-year)	۰/۲۱۷۴
نرخ خطای ترانسفورماتور HV/MV (f/year)	۰/۰۶۵۰
مدت زمان تعمیر یا جایگزینی فیدر (hr)	۴
مدت زمان تعمیر یا جایگزینی ترانسفورماتور (hr)	۸
پیک بار شبکه (kW)	۳۱۰
نرخ بهره (%)	۱۰
نرخ تورم (%)	۷

جدول (۴): مقدار میانگین پارامترهای باتری‌های مختلف [۳]

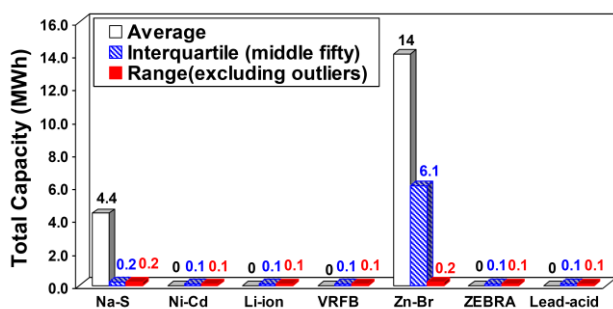
نوع تکنولوژی	هزینه‌ی ظرفیت (\$/kWh)	هزینه‌ی توان نامی و مبدل (\$/kW)	هزینه‌ی جایگزینی (\$/kW)	هزینه‌ی تعمیرات و نگهداری (\$/kW-year)	بازدهی (%)	طول عمر (تعداد سیکل‌ها)
Na-S	۳۶۳	۴۴۶	۲۱۹	۴/۴	۸۳	۲۹۲۰
Ni-Cd	۹۵۱	۲۹۱	۶۴۰	۱۳/۴	۶۷	۳۶۵۰
Li-ion	۹۷۰	۵۶۴	۴۵۰	۸/۴	۹۰	۲۱۶۲
VRFB	۵۶۹	۵۹۷	۱۵۸	۱۰/۳	۷۵	۲۹۲۰
Zn-Br	۲۳۸	۵۴۱	۲۳۸	۵/۲	۶۵	۵۴۷۵
ZEBRA	۶۲۰	۵۷۵	۲۲۲	۶/۷	۸۷	۲۹۲۰
Lead-acid	۷۵۳	۴۶۱	۲۱۰	۴/۱	۸۰	۲۹۲۰



شکل (۹): نمودار هزینه بر حسب نوع باتری در سه حالت

شکل (۹) مشخص می‌کند که در هر سه حالت، تکنولوژی Zn-Br بهترین پاسخ (کمترین هزینه) را دارد و پس از آن تکنولوژی Na-S در رده‌ی دوم قرار می‌گیرد. استفاده از تکنولوژی Li-ion در مجموع بالاترین هزینه را تحمیل می‌کند، اگرچه دارای بالاترین بازدهی در مقایسه با سایر باتری‌هاست. این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط قطعی، تابع هدف مربوط به حالت Zn-Br بسیار بهتر از تابع هدف سایر باتری‌هاست، ولی با در نظر گرفتن عدم قطعیت و افزایش بازه‌ی آن، این برتری کم‌رنگ‌تر می‌شود. به طوریکه در حالت سوم (یعنی Excluding outliers) تقریباً تفاوتی میان تکنولوژی Zn-Br و Na-S وجود ندارد.

شکل (۱۰) مجموع ظرفیت کل باتری‌های نصب شده را در این سه حالت نشان می‌دهد. در این شکل، Zn-Br و Na-S بیشترین ظرفیت نصب را دارند. با افزایش بازه‌ی عدم قطعیت، ظرفیت این دو نوع باتری کاهش می‌یابد ولی ظرفیت سایر باتری‌ها افزایش یافته است. زمانیکه داده‌های کم احتمال حذف می‌شوند، تنها استفاده از تکنولوژی Zn-Br و Na-S صرفه‌ی اقتصادی خواهد داشت و ظرفیت بهینه‌ی سایر انواع به صفر می‌رسد.



شکل (۱۰): نمودار ظرفیت باتری بر حسب نوع باتری در سه حالت

۵-۳-۲- تحلیل حساسیت

در این بخش، حساسیت ضریب نفوذ باتری‌ها به پارامترهایی نظیر نرخ خرابی، ضریب قیمت و دوره‌ی پروژه تحلیل می‌شود. این تحلیل‌ها نشان خواهند داد که استفاده از باتری‌ها در شبکه توزیع بدون منابع تجدیدپذیر، در چه شرایطی صرفه‌ی اقتصادی خواهد داشت.

پارامترهایی که به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده‌اند، عبارتند از:

- ۱- هزینه‌ی ظرفیت باتری‌ها
- ۲- هزینه‌ی توان نامی باتری و مبدل آن
- ۳- هزینه‌ی تعمیرات و نگهداری باتری‌ها
- ۴- هزینه‌ی جایگزینی
- ۵- بازدهی باتری و مبدل

اطلاعات مربوط به عدم قطعیت موارد فوق به صورت نمودارهای جعبه‌ای در مرجع [۳] نشان داده شده است. به عنوان نمونه، شکل (۲) این عدم قطعیت را برای هزینه ظرفیت باتری نشان می‌دهد. قابل ذکر است که در این مقاله علاوه بر موارد فوق، بار مصرفی شبکه توزیع نیز به صورت غیرقطعی مدلسازی می‌شود.

برای انجام تحلیل‌های عادی و بدون عدم قطعیت، از مقادیر میانگین پارامترها استفاده می‌شود. جدول (۴) مقادیر میانگین پارامترهای باتری‌ها را نشان می‌دهد.

۵-۳-۳- نتایج عددی و تحلیل آنها

روش پیشنهادی برای ۷ نوع باتری به طور جداگانه اجرا می‌شود و با استفاده از الگوریتم تبرید تدریجی، مکان، ظرفیت و توان نامی بهینه برای هر نوع باتری در شبکه به دست می‌آید. مطالعات عددی نشان می‌دهد که مکان بهینه‌ی باتری‌ها عمدتاً دور از پست HV/MV قرار دارد (یعنی نقاط شماره‌ی ۲۱-۱۱). به عنوان نمونه جدول (۵) مکان، ظرفیت و توان نامی بهینه‌ی باتری‌های نوع Na-S را در شبکه توزیع نشان می‌دهد. نقاط شماره‌ی ۲۱-۱۱ نه تنها از نظر افت ولتاژ وضعیت حادثه‌ی دارند، بلکه به علت فاصله‌ی زیاد آنها از پست HV/MV و تغذیه از طریق فیدر طولانی، از لحاظ نرخ خاموشی نیز موقعیت نامناسبی دارند. بنابراین بیشتر از سایر نقاط نیازمند نصب باتری هستند.

جدول (۵): مکان، ظرفیت و توان نامی بهینه‌ی باتری‌های Na-S

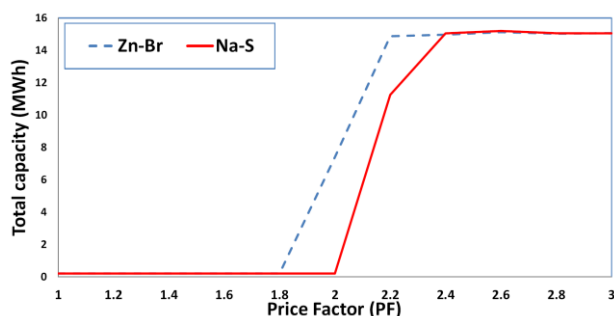
مکان (شماره‌ی شین)	ظرفیت (kWh)	توان نامی (kW)
۱۸	۸۴۸/۸	۱۴۱/۳۳
۱۹	۴۸۵/۸	۷۶/۴۶
۲۱	۴۵۲/۴	۷۵/۴

۵-۳-۴- مقایسه‌ی تکنولوژی‌ها

شکل (۹) تابع هدف به دست آمده از برنامه‌ریزی بهینه را برای ۷ نوع تکنولوژی نشان می‌دهد. در این شکل، سه حالت مختلف نشان داده شده است:

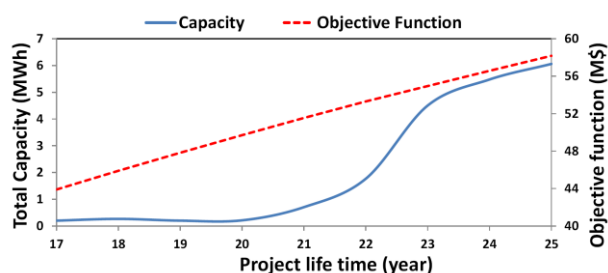
- ۱- نتایج برنامه‌ریزی بهینه بدون عدم قطعیت (یعنی تحلیل قطعی)
- ۲- نتایج برنامه‌ریزی بهینه با لحاظ بازه‌ی Middle fifty برای عدم قطعیت (یعنی بدون لحاظ داده‌های کم احتمال)
- ۳- نتایج برنامه‌ریزی بهینه با لحاظ بازه‌ی Excluding outliers برای عدم قطعیت (یعنی با لحاظ همه‌ی داده‌ها)

به ضریب قیمت در شکل (۱۳) نشان داده شده است. بر اساس این شکل، اگر ضریب قیمت از ۲/۵ فراتر رود، ظرفیت بهینه به اشباع رسیده و دیگر افزایش نخواهد یافت.



شکل (۱۳): نمودار ظرفیت بهینه بر حسب ضریب قیمت برای تکنولوژی‌های Na-S و Zn-Br

شکل (۱۴) میزان حساسیت تابع هدف و ظرفیت بهینه‌ی باتری Zn-Br را به دوره‌ی پروژه نشان می‌دهد. با افزایش تعداد سال‌های پروژه، تابع هدف تقریباً به صورت خطی بیشتر می‌شود، در حالیکه افزایش ظرفیت بهینه‌ی Zn-Br به صورت غیر خطی خواهد بود.



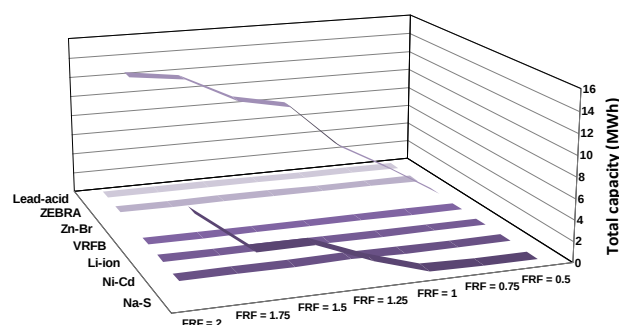
شکل (۱۴): نمودار ظرفیت و هزینه بر حسب طول عمر پروژه برای تکنولوژی Zn-Br

در انتها قابل ذکر است که به طور متداول، تکنولوژی‌های قدیمی‌تر مانند باتری‌های اسید سربی به طور گسترده در صنایع و شبکه‌های توزیع مرسوم مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با اینحال، نتایج این مقاله نشان می‌دهد که تکنولوژی‌های جدیدی نظیر Zn-Br به مرور در شبکه‌های توزیع فعال آینده حضور بیشتری خواهند داشت. در صورتیکه منابع تولید پراکنده‌ی تجدیدپذیر نیز در شبکه توزیع وجود داشته باشند، باتری‌ها برای برنامه‌ریزی بهینه‌ی انرژی می‌توانند به کار روند. به طور خاص، انرژی مازاد سلول‌های خورشیدی در اواسط روز در باتری‌ها ذخیره شده و برای مصارف روشنایی در شب مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین، با افزایش ضریب نفوذ منابع تجدیدپذیر، ظرفیت بهینه‌ی باتری‌ها افزایش می‌یابد. در این صورت، با توجه به نتایج به دست آمده، باتری‌هایی نظیر Zn-Br که هزینه‌ی نصب (بر حسب \$/kWh) کمتری دارند، اقتصادی‌تر خواهند بود.

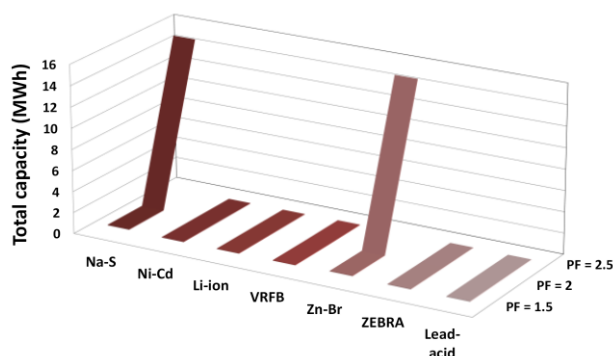
شکل (۱۱) ظرفیت بهینه‌ی باتری‌ها را بر حسب تغییرات نرخ خرابی نشان می‌دهد. در این شکل، FRF بیانگر فاکتور ضرب شده در نرخ خرابی عادی سیستم است. به عنوان مثال، $FRF = 1$ بیانگر همان نرخ خرابی اصلی سیستم در جدول (۲) است. میزان نرخ خرابی برای شبکه‌های توزیع مختلف، متفاوت است و تابعی از شرایط جغرافیایی، محیطی یا عمر شبکه توزیع می‌باشد.

مطابق شکل (۱۱) تنها ظرفیت بهینه‌ی باتری‌های Na-S و Zn-Br به افزایش یا کاهش نرخ خرابی حساس است. به طوریکه استفاده از سایر تکنولوژی‌ها صرفه‌ی چندانی نخواهد داشت، حتی اگر نرخ خرابی تجهیزات شبکه دو برابر شود.

در بسیاری از شبکه‌های توزیع مرسوم، امکان یا اجازه‌ی بهره‌برداری جزیره‌ای وجود ندارد. بنابراین، استفاده از باتری‌ها تنها با هدف پیک سایی ممکن خواهد بود. شکل (۱۲) تحلیل حساسیت در این حالت را نشان می‌دهد. در این شکل، پارامتر ضریب قیمت (PF) معرف نسبت قیمت برق در بار پیک به قیمت آن در میان‌باری (یا نسبت قیمت برق در میان‌باری به قیمت آن در کم‌باری) است. در این شرایط، استفاده از تکنولوژی Zn-Br و Na-S تنها زمانی به صرفه است که ضریب قیمت بیشتر از ۲ باشد. استفاده از سایر باتری‌ها حتی در $PF = 2.5$ نیز صرفه‌ی اقتصادی ندارد.



شکل (۱۱): نمودار ظرفیت کلی باتری‌ها بر حسب ضریب نرخ خرابی



شکل (۱۲): نمودار ظرفیت کلی باتری‌های مختلف بر حسب ضریب قیمت انرژی (تنها با هدف پیک‌سایی و کاهش هزینه‌ی تلفات)

برای مطالعه‌ی دقیق‌تر، حساسیت ظرفیت باتری‌های Na-S و Zn-Br

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، معروف‌ترین تکنولوژی‌های باتری برای استفاده بهینه در شبکه توزیع فعال با یکدیگر مقایسه شدند. در یک برنامه‌ریزی بهینه، مکان، ظرفیت و توان نامی باتری‌ها تعیین می‌شوند. از آنجا که پارامترهای فنی و اقتصادی مربوط به برنامه‌ریزی باتری‌ها دارای عدم قطعیت هستند، مقایسه‌ی تکنولوژی‌های مختلف بدون لحاظ عدم قطعیت معتبر نخواهد بود. در این مقاله، از مدل فازی مثلثی برای لحاظ عدم قطعیت و از الگوریتم تبرید تدریجی برای بهینه‌سازی در برنامه‌ریزی بلندمدت باتری‌ها استفاده شد. بهره‌برداری از باتری‌ها با اهداف پیک‌سایی، افزایش قابلیت اطمینان و تنظیم ولتاژ شبکه صورت گرفت. مطالعات عددی بر روی یک شبکه توزیع نمونه نشان داد که تکنولوژی‌های Zn-Br و Na-S بر سایر تکنولوژی‌ها برتری اقتصادی دارند، اگرچه ممکن است پارامترهای فنی آنها (مثل بازدهی) ضعیف‌تر از سایرین باشد. در یک محیط بدون عدم قطعیت، تکنولوژی Zn-Br از نظر اقتصادی بی‌رقیب است ولی در شرایط واقعی‌تر که عدم قطعیت در آن لحاظ شود، ظرفیت بهینه‌ی Zn-Br کاهش یافته و از نظر تابع هزینه با Na-S برابری خواهد کرد.

در نهایت، حساسیت تکنولوژی‌های مختلف به پارامترهایی مانند نرخ خرابی، ضریب قیمت و دوره‌ی پروژه، ارزیابی و تحلیل شد. این تحلیل‌ها دو دستاورد به همراه دارند. اولاً ارزیابی می‌کنند که استفاده از تکنولوژی‌های گران‌قیمتی مثل باتری‌ها در شبکه‌های توزیع فاقد منابع تجدیدپذیر، در چه شرایطی و تا چه حد صرفه‌ی اقتصادی دارد. ثانیاً با تغییر شرایط شبکه توزیع (مثل شرایط محیطی و جغرافیایی که بر نرخ خطا مؤثرند) ضریب نفوذ تکنولوژی‌های مختلف در شبکه چه وضعیت بهینه‌ای پیدا می‌کند.

مراجع

- [8] A. Saif, V.R. Pandi, H.H. Zeineldin, S. Kennedy, "Optimal allocation of distributed energy resources through simulation-based optimization", *Electric Power Systems Research*, Vol. 104, pp. 1–8, 2013.
- [9] G. Celli, S. Mocci, F. Pilo, M. Loddo, "Optimal integration of energy storage in distribution networks", *IEEE Power Technical Conference*, Bucharest, pp. 1–7, 2009.
- [10] E. Naderi, I. Kiaei, M.R. Haghifam, "NaS technology allocation for improving reliability of DG-enhanced distribution networks", *IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Singapore, pp. 148–153, 2010.
- [11] M. Sedghi, M. Aliakbar-Golkar, M.R. Haghifam, "Distribution network expansion considering distributed generation and storage units using modified PSO algorithm", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 52, pp. 221–230, 2013.
- [12] F. Marra, G. Yang, C. Traeholt, J. Ostergaard, "A decentralized storage strategy for residential feeders with photovoltaics", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, No. 2, pp. 974–981, 2014.
- [13] J. Tant, F. Geth, D. Six, P. Tant, "Multiobjective battery storage to improve PV integration in residential distribution grids", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 4, No. 1, pp. 182–191, 2013.
- [14] M. Sedghi, A. Ahmadian, M. Aliakbar-Golkar, "Optimal storage planning in active distribution network considering uncertainty of wind power distributed generation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 31, No. 1, pp. 304–316, 2016.
- [15] C. Kahraman, S. Cevik Onar, "Intelligent techniques in engineering management: theory and applications", Switzerland: Springer, 2015.
- [16] A.T. Saric, R.M. Ciric, "Integrated fuzzy state estimation and load flow analysis in distribution networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No. 2, pp. 571–578, 2003.
- [17] M.R. Haghifam, O.P. Malik, "Genetic algorithm-based approach for fixed and switchable capacitors placement in distribution systems with uncertainty and time varying loads", *IET Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 1, Issue 2, pp. 244–252, 2007.
- [18] S. Ganguly, N.C. Sahoo, D. Das, "Multi-objective particle swarm optimization based on fuzzy-pareto-dominance for possibilistic planning of electrical distribution systems incorporating distributed generation", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 213, pp. 47–73, 2013.
- [19] E.K. Burke, G. Kendall, "Search methodologies: introductory tutorials in optimization and decision support techniques", New York: Springer, 2005.

زیر نویس‌ها

- ¹ Probabilistic
- ² Possibilistic
- ³ Depth of discharge
- ⁴ Vanadium redox flow battery
- ⁵ Zero emission battery
- ⁶ Energy not supplied

- [1] H. Zhao, Q. Wu, S. Hu, H. Xu, C.N. Rasmussen, "Review of energy storage system for wind power integration support", *Applied Energy*, Vol. 137, pp. 545–553, 2015.
- [2] F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, R. Villafafila-Robles, "A review of energy storage technologies for wind power applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 2154–2171, 2012.
- [3] B. Zakeri, S. Sanna, "Electrical energy storage systems: a comparative life cycle cost analysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42, pp. 569–596, 2015.
- [4] Y.M. Atwa, E.F. El-Saadany, "Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, No. 4, pp. 1815–1822, 2010.
- [5] G. Carpinelli, F. Mottola, D. Proto, A. Russo, "Optimal allocation of dispersed generators, capacitors and distributed energy storage systems in distribution networks", *Modern Electric Power System Conference*, Wroclaw, Poland, pp. 1–6, 2010.
- [6] R. Anindita, S.B. Kedare, S. Bandyopadhyay, "Optimum sizing of wind-battery systems incorporating resource uncertainty", *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 2712–2727, 2010.
- [7] O. Ekren, B.Y. Ekren, "Size optimization of a PV/Wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing", *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 592–598, 2010.