

تاریخ دریافت: ۱۶ دی ۱۴۰۲ تاریخ پذیرش: ۲۱ اسفند ۱۴۰۲ صفحات ۳۵ الی ۶۸

برنامه ریزی احتمالاتی سیستم‌های ذخیره ساز انرژی در یک ریزشبکه با نفوذ بالای واحدهای تجدیدپذیر با در نظر گرفتن قیود قابلیت اطمینان

احسان رحمانی

دانشجوی دکتری دانشکده فنی و مهندسی، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

rahmani.ch@gmail.com

محمدجواد کیانی*

استادیار دانشکده فنی و مهندسی، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

kianiph@gmail.com

سیروس محمدی

استادیار دانشکده فنی و مهندسی، واحد گچساران، دانشگاه آزاد اسلامی، گچساران، ایران

sirosnik@gmail.com

محمود زاده باقری

استادیار دانشکده فنی و مهندسی، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران

ma.zadehbagheri@iaau.ac.ir

چکیده: با افزایش نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر در ریزشبکه‌های الکتریکی، استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی به منظور بهبود قابلیت اطمینان ریزشبکه بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه، یک الگوریتم جدید برای برنامه‌ریزی ذخیره‌سازی انرژی به منظور مدیریت ریزشبکه با روشی مطمئن پیشنهاد شده است. با توجه به تاثیر استراتژی‌های بهره‌برداری مختلف ریزشبکه بر برنامه‌ریزی سیستم‌های ذخیره ساز انرژی، عملکرد ریز شبکه با در نظر گرفتن استراتژی‌های قابلیت اطمینان محور و هزینه محور بررسی شده است. برنامه‌ریزی سیستم‌های ذخیره ساز انرژی در هر دو افق برنامه‌ریزی هفتگی و روزانه انجام می‌شود. به منظور در نظر گرفتن صحیح عدم قطعیت‌های مرتبط با مسئله برنامه‌ریزی چندهدفه، مدل‌های احتمالاتی مختلفی برای پارامترهای موجود در شبکه ارائه شده است و به صورت مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) بیان شده اند. با اجرای روش پیشنهادی بر سیستم تست ۳۳ شینه IEEE اصلاح شده، اثربخشی این روش برای ارزیابی قابلیت اطمینان ریز شبکه‌ها و مدیریت ذخیره سازهای انرژی بررسی شده است و نتایج به دست آمده بهره‌وری این روشها را تایید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: قابلیت اطمینان، برنامه ریزی ریز شبکه، بهینه سازی، سیستم های ذخیره ساز انرژی، الگوریتم جابا

* نویسنده مسئول

مقاله مستخرج از تز دکتری آقای احسان رحمانی دانشجوی دکتری دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج

پارامترها و متغیرهای مدل‌سازی

$P_{ch,t}$	توان ورودی به ESS	SOC	وضعیت شارژ
$P_{disc,t}$	توان ورودی به ESS	WTG	توربین بادی
$P_{WF,t}$	توان باد	DER	منابع تجدید پذیر
V_{ci}	سرعت قطع پایین	DG	تولید پراکنده
V_r	سرعت نامی	MT	میکرو توربین
V_{co}	سرعت قطع بالا	ESS	سیستم ذخیره ساز انرژی
G_t	تابش خورشیدی پیش بینی شده	PV	سلول خورشیدی
G_{std}	تابش خورشیدی استاندارد	RES	منبع انرژی تجدید پذیر
η_{ch}	بازده شارژ	P_{Smax}	توان ورودی
η_{dch}	بازده دشارژ	P_{Smin}	حداکثر توان مجاز خروجی
$F(.)$	تابع هزینه واحدهای قابل دیسپچ	E_n	ظرفیت نامی ESS
δ_{ch}	مشخص کننده وضعیت شارژ ESS	WS	سرعت باد
δ_{dch}	مشخص کننده وضعیت دشارژ ESS	DU	واحد دیزلی
X	بردار متغیرهای بهینه سازی	MTTR	زمان متوسط تا تعمیر
T	کل بازه زمانی	MTTF	زمان متوسط تا خرابی
N_r	تعداد واحدهای تجدید پذیر	LOLP	احتمال بار از دست رفته
N_g	تعداد واحدهای تولید پراکنده	LOLE	بار از دست رفته مورد انتظار
N_s	تعداد واحدهای ذخیره ساز انرژی	EENS	انرژی تامین نشده مورد انتظار
N_{iter}	تعداد تکرارها	MCS	شبیه سازی مونت کارلو
S^{Avg}	میانگین وضعیت شارژ	DoD	عمق تخلیه
L_i	بار مصرف کننده I ام	PDF	تابع چگالی احتمال
$SOC_{.}$	وضعیت شارژ اولیه	MG	ریز شبکه
SOC^{max}	وضعیت شارژ حداکثر	AC	هزینه پیری
SOC^{min}	وضعیت شارژ حداقل	OC	هزینه بهره برداری

۱. مقدمه

با ظهور فناوری‌های جدید و پیشرفت وسایل ارتباطی، سیستم های قدرت در حال تبدیل شدن به شبکه های هوشمند هستند. یکی از مهمترین اجزای این شبکه‌های جدید، ریز شبکه‌ها هستند. ریز شبکه‌ها، شبکه‌های قدرت در مقیاس کوچک اند که می‌توانند هم به طور مستقل و هم به صورت

متصل با شبکه اصلی کار کنند. ریز شبکه‌ها برای تامین برق پایدار و قابل اعتماد از منابع مختلف مانند واحدهای با انرژی تجدید پذیر و واحدهای تولیدی متداول استفاده می‌کنند. به دلیل عدم قطعیت و پیش‌بینی ناپذیر بودن توان ورودی واحدهای تجدید پذیر، پیش‌بینی توان خروجی آنها مشکل است و در بسیاری از موارد ممکن است توان خروجی مورد انتظار محقق نگردد. این امر ممکن است سبب عدم توانایی کافی برای پاسخگویی به تقاضای مشترکان و خطر خاموشی آنها در ریز شبکه به ویژه در هنگام عملکرد جزیره ای آن گردد. این عدم قطعیت ها می‌توانند مشکلات بسیاری در مدیریت انرژی و برنامه‌ریزی ریز شبکه ایجاد کنند. سیستم های ذخیره ساز انرژی الکتریکی (ESS) با توجه به توانایی که در ذخیره‌سازی و تامین برق قسمتی از بار شبکه در ساعات مورد نیاز دارند می‌توانند به ریز شبکه‌ها در جهت غلبه بر این مشکلات کمک نمایند و قابلیت اطمینان آن را بهبود بخشند (P. Shah et al., ۲۰۲۰). واحدهای ذخیره ساز انرژی کاربردها و وظایف متعددی در ریز شبکه‌ها دارد، مقالات مختلف وظایف و کاربردهای گوناگون ذخیره‌ساز انرژی مانند جابجایی بار، آربیتراژ انرژی (Aljafari et al., ۲۰۲۲)، بهبود کیفیت توان (Parra et al., ۲۰۱۶)، افزایش قابلیت اطمینان (Krishnamurthy et al., ۲۰۱۷)، به حداقل رساندن هزینه (Gholami et al., ۲۰۲۴)، کاهش تلفات (ALAhmad et al., ۲۰۲۴) و پیک سایبی (Yang et al., ۲۰۲۴) را مورد بررسی قرار داده‌اند. برنامه ریزی بهینه ESS برای مدیریت انرژی ریز شبکه‌ها در سالیان اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در مقاله (Das et al., ۲۰۱۸)، نویسندگان برنامه ریزی ریز شبکه را به صورت هفتگی و روزانه انجام داده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که بهره برداری از ریز شبکه با توجه به نوع افق برنامه ریزی می‌تواند عملکرد ریز شبکه را بهبود بخشد. در مرجع (Rajamand et al., ۲۰۲۲)، نویسندگان چهارچوبی پیشنهاد کرده‌اند که اندازه بهینه ESS را زمانی که برنامه‌ریزی بهینه بهره برداری اجزای قابل کنترل ریز شبکه را اداره میکند، محاسبه و بهینه می‌کند. نویسندگان در (Yuan et al., ۲۰۲۰)، روشی را پیشنهاد کردند که به طور بهینه ESS را برای به حداقل رساندن هزینه بهره‌برداری ریز شبکه برنامه ریزی می‌کند. در این روش بار مورد نیاز برای سرمایش، حرارت و تولید برق در ریز شبکه‌ها برآورده می‌شود. در (Ebrahimi et al., ۲۰۲۲)، یک مدل اساسی توسط نویسندگان برای برنامه

ریزی ESS در بازار برق روز آینده پیشنهاد شده است. نویسندگان در (Mitra et al., ۲۰۱۰)، مدلسازی واحدهای ذخیره ساز انرژی را با در نظر گرفتن دیدگاه‌های اقتصادی و زیست محیطی انجام داده‌اند. در این مدل، دو تابع هدف جداگانه برای تعیین عملکرد بهینه ESS از جنبه اقتصادی و زیست محیطی در نظر گرفته شده است. در (Takano et al., ۲۰۲۱)، نحوه مشارکت واحد ESS در مدیریت تقاضا و کاربرد آن در ارزیابی قابلیت اطمینان بررسی شده است. نویسندگان در (Honarmand et al., ۲۰۱۴)، یک تابع مشارکت قابلیت اطمینان جدید از BESS را در مزارع بادی پیشنهاد داده‌اند. افزایش چرخه‌های کاری و عمق تخلیه باتری می‌تواند باعث تخریب و کاهش طول عمر آن شود (Abbasi et al., ۲۰۱۵). در نتیجه، باتری‌هایی که ظرفیتشان کمتر از مقدار مشخصی میشود باید تعویض شوند و این امر هزینه‌های سرمایه‌گذاری هنگفتی را بر ریز شبکه تحمیل می‌کند. در نتیجه، در نظر گرفتن هزینه‌های پیری و فرسودگی در برنامه‌ریزی ESS ها بسیار مهم است. در تحقیقات مطالعه شده پیشین تاثیر طول عمر و چرخه باتری‌ها به صراحت در برنامه ریزی بهینه برای ESS ها فرموله نشده و مورد بررسی قرار نگرفته است. در برنامه ریزی بهینه باتریها برای ریز شبکه برای حل مساله به مدار آوردن واحدها به صورت تصادفی و با در نظر گرفتن هزینه پیری واحدهای ESS و عدم قطعیت‌ها در انرژی‌های تجدیدپذیر و بار پیشنهاد شده است. از سوی دیگر، بیشتر مطالعات یک برنامه زمان‌بندی روزانه برای برنامه ریزی ESS در ریز شبکه‌ها انجام داده‌اند. در این افق زمان‌بندی واحدهای ESS باید در ابتدا و انتهای روز وضعیت شارژ یکسانی (SOC) داشته باشند، حتی وقتی که سطح SOC آنها بالاست. این فرآیند می‌تواند اثرات منفی مانند افزایش سرعت پیری باتری‌ها، کاهش طول عمر باتری داشته باشد و هزینه‌هایی را به ریز شبکه تحمیل نماید. نادیده گرفتن هزینه پیری ESS و همچنین محدود کردن افق زمان‌بندی به حالت روزانه مشکلات و چالش‌های بزرگی را در ریز شبکه ایجاد می‌کند. برای غلبه بر این چالش‌ها و مشکلات، یک روش برنامه‌ریزی بهینه تصادفی پیشنهاد شده است که میزان تخریب ESS و عمق تخلیه آن در هر دو حالت روزانه و هفتگی برای مدیریت بهینه ریز شبکه در نظر گرفته می‌شود. این روش با استفاده از الگوریتم جایا استراتژی بهینه‌ای برای بهره‌برداری از ریز شبکه پیشنهاد می‌نماید که با در نظر گرفتن کاهش هزینه

شاخص قابلیت اطمینان را در حد مطلوب نگه می‌دارد. بنابراین، نوآوری‌های موجود در این مقاله را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- در این مقاله روشی جامع برای مدل‌سازی ذخیره ساز انرژی در مساله برنامه‌ریزی بهینه ریز شبکه ارایه شده است که علاوه بر در نظر گرفتن افق‌های زمانی مختلف، استراتژیهای بهره‌برداری ریز شبکه را نیز در برنامه‌ریزی تعیین می‌کند.

- مدل‌سازی کامل هزینه پیری و فرسودگی واحدهای ESS با توجه به تعداد سیکلها و تاثیر آن بر طول عمر این واحدها در مساله برنامه ریزی و مدیریت این واحدها. تعداد سیکلهای ESS با توجه به مقدار عمق تخلیه آن در مقدار معینی محدود می‌شود تا هم توان تحویلی باتری به ریز شبکه را به حداکثر برساند و هم هزینه های بهره برداری ریز شبکه را کاهش دهد.

- در نظر گرفتن عدم قطعیت همه متغیرهای ریز شبکه از جمله تمام عدم قطعیت های مربوط به بارها، قیمت برق، خروجی های انرژی تجدید پذیر (بادی و خورشیدی) و همچنین احتمال و مدت زمان وقوع جزیره ای شدن برنامه‌ریزی نشده ریز شبکه.

- مطالعه استراتژیهای بهره برداری مختلف (حالت جزیره ای و متصل به شبکه) در ریز شبکه برای تامین یک مصالحه مناسب بین توابع هدف هزینه و قابلیت اطمینان با برنامه‌ریزی واحدهای ESS با در نظر گرفتن هزینه فرسودگی و پیری واحدهای ذخیره ساز انرژی. در ادامه مقاله، در بخش دوم به تشریح مدل اجزای ریز شبکه به ویژه واحدهای ذخیره ساز انرژی به کار رفته در این مقاله پرداخته می‌شود. در بخش سوم، در ابتدا مروری بر الگوریتم بهینه‌سازی بکار گرفته شده در این مقاله صورت گرفته و سپس معادلات ریاضی مربوط به هر قسمت ارائه می‌گردند. نتایج حاصل از شبیه سازی در بخش چهارم این مقاله مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت و جمع‌بندی روش پیشنهادی و تحلیل نتایج بدست آمده پایان بخش این مقاله خواهد بود.

۲. مدل‌سازی مساله برنامه ریزی ذخیره ساز انرژی در ریز شبکه

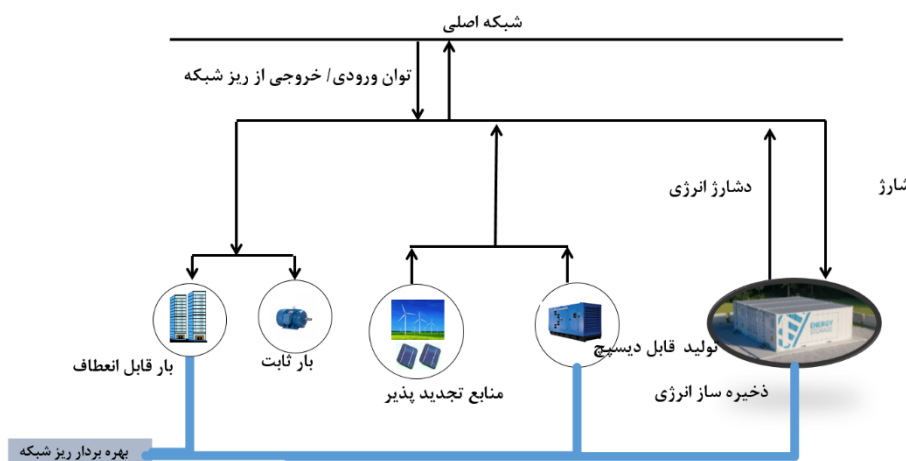
۲-۱. بیان مسئله و مدل‌سازی

در این بخش از مقاله، برنامه ریزی بهینه ذخیره سازهای انرژی در ریز شبکه‌ها با توجه به نیازهای قابلیت اطمینان ریز شبکه ارائه می‌شود. برای برنامه ریزی درست ریز شبکه ابتدا باید مدل دقیقی از ریز شبکه و اجزای آن ارائه داد. دو تابع هدف در این مطالعه استفاده می‌شود که یکی از آنها به حداقل رساندن هزینه‌های ریز شبکه و دیگری انرژی تامین نشده مصرف کنندگان ریز شبکه است که جهت برآوردن نیازهای اقتصادی و قابلیت اطمینان ریز شبکه‌ها می‌باشد. بسیاری از متغیرها و پارامترهای اجزای ریز شبکه مانند توان تولیدی منابع تجدیدپذیر و بارها دارای عدم قطعیت هستند و این عدم قطعیت سبب احتمالاتی شدن ماهیت برنامه‌ریزی ریز شبکه می‌گردد. برای مدل‌سازی این عدم قطعیتها از مفهومی به نام سناریو استفاده میشود. در روش شبیه سازی مونت کارلو (MCS) ابتدا با توجه به اطلاعات موجود سناریوهایی تولید می‌شود (Pimm et al., ۲۰۱۸). در روش پیشنهادی ارائه شده در این مقاله، عدم قطعیت پارامترهای اصلی ریز شبکه مانند بار، توان خروجی واحدهای خورشیدی و بادی، قیمت انرژی و میزان خرابی تجهیزات ریز شبکه مانند خطوط و پست‌ها در نظر گرفته شده است. در هر سناریو، مقادیر این پارامترها به طور تصادفی بر اساس مقادیر میانگین و انحراف معیار مربوطه تعیین می‌شوند. پس از تولید سناریوهای مورد نیاز با این اطلاعات، با استفاده از یک تکنیک کاهش سناریوی مناسب تعداد سناریوها به مقادیر قابل قبول کاهش می‌یابد. در نهایت از این سناریوهای کاهش یافته برای تحلیل وضعیت ریز شبکه و تست روش برنامه‌ریزی پیشنهادی استفاده می‌شود.

۲-۲. مدل سازی ریز شبکه

به طور کلی ریز شبکه‌ها در دو حالت مختلف کار می‌کنند: حالت جزیره ای و حالت متصل به شبکه. در حالت متصل به شبکه، ESS ها انرژی را زمانی که قیمت انرژی پایین است ذخیره می‌کنند و آن انرژی را در زمان اوج مصرف که قیمت انرژی بالاست به ریز شبکه برمی‌گردانند. در این حالت، ریز شبکه می‌تواند انرژی مصرف کنندگان خود را که از شبکه اصلی وارد می‌کند تامین کند.

عملکرد ریز شبکه‌ها بر این فرض استوار است که بار خود را با حداقل هزینه و حداکثر قابلیت اطمینان در هر زمان برآورده کنند. در زمان وقوع اغتشاشات، یک ریز شبکه باید بتواند خود را از شبکه اصلی جدا کرده و نیاز بارهای خود را با کمک منابع موجود در خود ریز شبکه تامین کند. در حالت جزیره‌ای که دسترسی به شبکه بالادست وجود ندارد، ESS ها نقش مهمی در برآوردن نیاز بار بیشتر و افزایش قابلیت اطمینان ریز شبکه‌ها ایفا می‌کنند. از این رو، برنامه ریزی مناسب ESS ها می‌تواند تاثیر مستقیمی بر بهره برداری ریز شبکه و رضایت مصرف کنندگان آن داشته باشد. ریز شبکه نمونه ای که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته از تجهیزات مختلفی شامل بارها، منابع تولید محلی و سیستم های ذخیره انرژی تشکیل شده است. شماتیک این ریز شبکه در شکل ۱ نشان داده شده است. بارهای ریز شبکه به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: بارهای قابل تنظیم و بارهای ثابت. امکان کنترل بارهای قابل تنظیم برای بهره برداران ریز شبکه فراهم است و بهره بردار میتواند در صورت لزوم، همه یا بخشی از این بارها را جابجا یا قطع کند. در مقابل، بارهای ثابت توسط بهره بردار قابل کنترل یا جابجایی نیستند و کنترلی بر این بارها ندارد و این بارها باید تحت هر شرایطی تامین شوند. منابع تولید برق در ریز شبکه‌ها نیز به دو گروه اصلی طبقه بندی می‌شوند. گروه اول شامل منابع قابل دیسپچ است که توان خروجی این واحدها توسط بهره برداران ریز شبکه قابل کنترل است. بهره برداران ریز شبکه می‌توانند خروجی منابع قابل دیسپچ و میزان توان تولیدی آنها را کنترل کنند. از طرف دیگر توان تولیدی منابع غیر قابل دیسپچ قابل کنترل نبوده و به عوامل خارج از کنترل بهره بردار بستگی داشت (Parvini et al., ۲۰۱۸). در این مقاله سلول‌های خورشیدی و توربین‌های بادی منابع توان غیر قابل دیسپچ و میکرو توربین‌ها به عنوان منابع قابل دیسپچ در نظر گرفته می‌شوند. در ادامه نحوه مدلسازی اجزای ریز شبکه آمده است.



شکل ۱. ساختار ریز شبکه پیشنهادی

۲-۳. مدلسازی ESS

واحدهای ذخیره ساز انرژی، با توجه به ویژگی‌های مشخصه‌شان مانند توان و ظرفیت، مکان، چرخه‌های شارژ و دشارژ، و الزامات به کارگیری آنها مدل‌سازی می‌شوند. محدودیت‌های اصلی آنها در مساله بهینه‌سازی حداکثر و حداقل وضعیت شارژ^۱ (SOC) بازده شارژ و دشارژ و همچنین محدودیت توان شارژ/دشارژ آنها است. دو پارامتر اصلی تعیین‌کننده و مهم در برنامه‌ریزی ESS ها ظرفیت نامی و توان نامی آنها هستند. توان نامی نشانگر میزان توانی است که سیستم‌های ذخیره ساز انرژی میتوانند در یک زمان مشخص (معمولاً یک ساعت) شارژ/دشارژ کنند. از طرف دیگر، ظرفیت نامی مقدار انرژی است که یک سیستم ذخیره سازی می‌تواند ذخیره کند. برخی ESS های با ظرفیت بالا توانایی ذخیره انرژی بالایی دارند اما ممکن است توان شارژ و دشارژ کارآمدی نداشته باشند. از طرف دیگر، برخی ESS های کم ظرفیت، ممکن است توان شارژ/دشارژ مناسبی داشته باشند. این موارد باید در برنامه‌ریزی این منابع در نظر گرفته شود. وضعیت شارژ ESS^۲ (SOC) به صورت درصدی از انرژی موجود ESS در زمان t بیان می‌شود: (Kong et al., ۲۰۱۶).

^۱ State of Charge

^۲ State of Charge

$$SOC(t) = \frac{E(t)}{E_n} \quad (1)$$

وضعیت شارژ (SOC) ESS در طول فرآیند شارژ/دشارژ در گذر زمان دچار تغییر می‌شود. در زمان شارژ، مقدار SOC باتری افزایش و در زمان دشارژ کاهش می‌یابد. میزان شارژ باتری گاهی اوقات به جای SOC توسط عمق تخلیه (DOD) نیز توصیف می‌شود. عمق تخلیه به صورت مقداری از انرژی تعریف می‌شود که در یک زمان معین تخلیه می‌شود. عمق تخلیه مقدار انرژی که یک باتری می‌تواند در یک حالت خاص در خودش ذخیره کند را معین می‌کند. رابطه بین عمق تخلیه و وضعیت شارژ در معادله ۰ بیان شده است:

$$DoD(t) = 1 - SOC(t) \quad (2)$$

واحدهای ESS به طور کلی در سه حالت مختلف بهره‌برداری شوند: شارژ، دشارژ و بیکار. معادلات ۰ و ۰ چگونگی تغییرات وضعیت شارژ را به ترتیب در حالت شارژ و دشارژ نشان می‌دهند. در حالت شارژ، SOC باتری به راندمان شارژ باتری (η_{ch})، قدرت شارژ باتری (P_{ch}) و نرخ خود تخلیه باتری (ζ) بستگی دارد.

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t)(1 - \zeta) + k \cdot P_{ESS}^{disc} \cdot \frac{\Delta t}{\eta_{disc} \cdot C_{ESS}} \quad (3)$$

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t)(1 - \zeta) + k \cdot (\eta_{ch} \cdot P_{ESS}^{ch}) \cdot \frac{\Delta t}{C_{ESS}} \quad (4)$$

۴-۲. مدل سازی احتمالاتی ژنراتور بادی

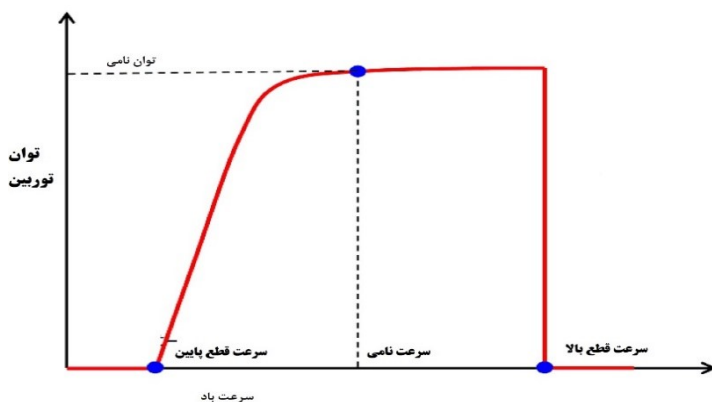
توان تولیدی توربین‌های بادی به سرعت باد در هر ساعت بستگی دارد. با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در پیش‌بینی سرعت باد، توان تولیدی توربین‌های بادی نیز دارای عدم قطعیت می‌باشد. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که سرعت باد را می‌توان با تقریب خوبی با استفاده از توزیع ویبال مدل‌سازی کرد معادله (۵):

$$f(v) = \left(\frac{k}{\gamma}\right) \left(\frac{v}{\gamma}\right)^{k-1} e^{\left(\frac{v}{\gamma}\right)^k} \quad (5)$$

در این رابطه هنگامی که سرعت باد به سرعت cut in می‌رسد، توربین بادی شروع به تولید توان می‌کند. با افزایش سرعت باد، توان خروجی توربین نیز افزایش می‌یابد. اگر سرعت باد خیلی زیاد شود و از حداکثر سرعت مجاز بالاتر رود، برای محافظت از توربین، توان تولیدی توربین به طور خودکار قطع می‌شوند. بنابراین، توان خروجی توربین را می‌توان به طور کلی با یک تابع چند قسمتی بیان کرد، همانطور که در معادله (۶) نشان داده شده است. توان خروجی توربین‌های بادی از نظر سرعت باد به منحنی مشخصه توربین بادی بستگی دارد و با معادله زیر به دست می‌آید: (Khatami et al., ۲۰۱۶).

$$p = \begin{cases} 0 & 0 \leq SW_t \leq V_{ci} \\ (A + B * SW_t + C * SW_t^2) * P_r & V_{ci} \leq SW_t \leq V_r \\ P_r & V_r \leq SW_t \leq V_{co} \\ 0 & V_{co} \leq SW_t \end{cases} \quad (6)$$

در این معادله P توان تولیدی توربین بادی است و A، B و C پارامترهای شکل توربین بادی هستند. منحنی توان معمولی ژنراتور توربین بادی را نشان می‌دهد (Jung et al., ۲۰۲۱).



شکل ۲. توان خروجی ژنراتور توربین بادی

برای مدل‌سازی توربین‌های بادی در مطالعات قابلیت اطمینان از یک مدل مارکوف دو حالت بالا و پایین استفاده می‌شود. در این مدل، در دسترس بودن توربین بادی با احتمال برابر با q_{WTS-1} و ظرفیت نامی $p_{WTS.rated}$ یا غیرقابل دسترس بودن با احتمال برابر با q_{WTS} است. در دسترس نبودن q_{WTS} به صورت معادله زیر تعیین می‌شود:

$$q_{WTS} = \frac{MTTR_{WTS}}{MTTF_{WTS} + MTTR_{WTS}} \quad (7)$$

هزینه ESS شامل هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه بهره‌برداری از ESS می‌باشد. از آنجا که باتری‌های مورد استفاده برای ذخیره‌سازی انرژی از هیچگونه سوختی استفاده نمی‌کنند، بنابراین هزینه بهره‌برداری آنها بیشتر به دلیل تخریب و هزینه پیری و افزایش طول عمر آنها است. هزینه پیری ESS ارتباط مستقیمی با تخریب^۱ آن دارد. تخریب و فرسودگی ESS به دو عامل تعداد چرخه‌های کاری و بالا رفتن عمر باتری بستگی دارد. پیری ناشی از چرخه‌ها به عواملی نرخ C، دما، مقدار DOD در هر چرخه و تعداد چرخه‌ها بستگی دارد، در حالی که پیری ناشی از طول عمر به مقدار SOC، دما و زمان استفاده بستگی دارد. هزینه پیری ESS به نسبت تخریب باتری (η_t) و هزینه نصب (IC) بستگی دارد و این رابطه در معادله (۸) نشان داده شده است (Yang et al., ۲۰۱۹).

$$C_t = \eta_t * IC^{ESS} \quad (8)$$

نسبت پیری باتری در هر چرخه را می‌توان با معادله زیر به دست آورد و از آن برای محاسبه هزینه فرسودگی باتری استفاده کرد. هزینه بالا رفتن عمر باتری در تابع هدف به حداقل رساندن هزینه‌ها در مساله بهینه‌سازی اعمال خواهد شد. (معادله (۹)) (Chen et al., ۲۰۱۵).

$$\eta_t = \frac{0.5}{NC_t^{ESS} (S_t^{SW}, S_t^{Avg})} \quad (9)$$

۵-۲. مدل سازی احتمالاتی انرژی خورشیدی

میزان تابش خورشید، ویژگی‌های سلول‌های خورشیدی مورد استفاده و دمای محیط مجموعه عواملی هستند که بر میزان توان تولیدی واحدهای خورشیدی تاثیر گذار هستند. (مرجع (Takano et al., ۲۰۲۱)) ، توزیع‌های چگالی احتمال مختلف را برای رفتار تصادفی تابش خورشیدی بررسی نموده و در نهایت

^۱ Degradation

به این نتیجه رسیده است که تابع توزیع بتا می‌تواند گزینه مناسبی برای مدل‌سازی عدم قطعیت تابش خورشید باشد. بنابراین، در این مقاله از توزیع بتا برای نشان دادن عدم قطعیت تابش خورشیدی به صورت معادله زیر استفاده شده است:

$$f(v) = \left(\frac{v}{c}\right) \exp \left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2 \right] \quad (10)$$

هنگامی که میزان تابش خورشیدی به دست آمده باشد، توان تولیدی سلول PV توسط معادله (۱۱) محاسبه می‌شود. در این معادله، توان تولیدی سلول فتوولتائیک (P_{pv}) با تابش خورشیدی پیش‌بینی شده (G_t) و نقطه تابش معین (R_c) مرتبط است (Ghasemi et al., ۲۰۲۳).

$$P_{pv} = \begin{cases} \frac{\eta_c}{K_c} (G_t)^2 & 0 < G_t < R_c \\ \eta_c G_t & G_t > R_c \end{cases} \quad (11)$$

مانند آنچه که در رابطه با انرژی باد داشتیم، قابلیت اطمینان انرژی خورشیدی نیز با استفاده از مدل مارکوف دو حالت به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود (Sepehrzad et al., ۲۰۲۲).

$$Q_{PVS} = \frac{MTTR_{PVS}}{MTTF_{PVS} + MTTR_{PVS}} \quad (12)$$

۶-۲. مدل سازی باربر ماشین

مصرف بار ریزشبه تحت تأثیر نوع مصرف کننده آن است و به روز هفته، هفته ماه و ماه سال بستگی دارد. مدل بار زمانهای مختلف را می‌توان با استفاده از داده‌های تاریخی به دست آورد. در این بررسی برای ساخت یک مدل بار اطلاعات به صورت عامل وزن ماهانه و ساعتی مدل شده‌اند. رفتار احتمالاتی بار در ریزشبه با استفاده از تابع توزیع نرمال به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود (Fan et al., ۲۰۲۲).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{\pi}} e^{-\frac{1}{\sigma^2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (13)$$

۳. روش پیشنهادی

استفاده از منابع تولیدی و سیستم‌های ذخیره ساز انرژی در ریز شبکه‌ها و مدیریت انرژی آنها می‌تواند با اهداف متفاوت و در شرایط گوناگونی انجام پذیرد. با توجه به اهداف مختلف موجود شرایط برآورده کردن برخی از این اهداف از نظر برنامه ریزی ESS متناقض است و لازم است در هنگام در اعمال این اهداف به ریز شبکه مصالحه‌هایی جفت دست یابی به راه حل بهینه برقرار شود. الگوریتم‌های چندهدفه می‌توانند در رابطه با مسائلی که دارای توابع هدف متناقض یا نامرتبط از نظر ریاضی هستند به طور مناسبی عمل کنند. یکی از ویژگی‌های مهم منابع تجدید پذیر عدم قطعیت توان تولیدی آنهاست. وجود عدم قطعیت این پارامترها در مسئله برنامه ریزی به پیچیدگی آن و همچنین درستی بیشتر نتایج به دست آمده منجر می‌شود. در روش پیشنهادی ابتدا سناریوهایی بر مبنای انحراف معیار و مقدار میانگین هر یک از تجهیزات دارای عدم قطعیت و همچنین ضریب توزیع احتمال آنها همانطور که در بخش قبل توضیح داده شد، تولید می‌شوند. سپس سناریوها با استفاده از روش‌های کاهش سناریو کمتر خواهند شد تا سرعت روش افزایش یابد. در نهایت مساله برای این سناریوهای انتخاب شده حل می‌شود.

۳-۱. توابع هدف

۳-۱-۱. تابع هدف هزینه

اولین تابع هدف الگوریتم پیشنهادی به حداقل رساندن هزینه ریز شبکه است. هزینه‌های ریز شبکه شامل هزینه عملیات (OC) و همچنین هزینه پیری (AC) است و می‌تواند به صورت زیر فرموله شود (Rao et al., ۲۰۱۶).

$$\min \text{Cost}_t = \text{OC} + \text{AC} \quad (14)$$

$$\text{OC}_{s,t} = \sum_{i=1}^{N_S} (P_{\text{ESS},i} * \cos t_{\text{ESS},i}) + \sum_{i=1}^{N_{\text{RES}}} (P_{\text{RES},i} * \cos t_{\text{RES},i}) + \sum_{i=1}^{N_{\text{dg}}} F_{\text{dg},i} (P_{\text{dg},i}) + P_{\text{grid}} * \cos t_{\text{grid}} \quad (15)$$

هزینه بهره برداری همه هزینه های بار و خروجی های انرژی های تجدیدپذیر را در بر میگیرد. در معادله (۱۵) عبارت اول در تابع هزینه بهره برداری مربوط به هزینه واحدهای ESS است و عبارت دوم هزینه استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را نشان می دهد. هزینه بهره برداری واحدهای قابل دیسپچ در عبارت سوم نشان داده شده است. و بالاخره، آخرین عبارت توان وارد شده از (صادر شده به) شبکه اصلی به (از) ریزشبهه را مدل می کند. بنابراین تابع هدف نهایی برای هزینه ریزشبهه شامل هزینه بهره برداری و هزینه پیری به صورت معادله (۱۶) خواهد بود: (Sahoo et al., ۲۰۲۲).

$$\min \text{Cost}_t = \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^{N_S} (P_{Si} * \cos t_{ESS,i}) + \sum_{i=1}^{N_{RES}} (P_{RES,i} * \cos t_{RES,i}) + \sum_{i=1}^{N_{dg}} F_{dg,i} (P_{dg,i}) + P_{grid} * \cos t_{grid} + AC_t$$

۳-۱-۲. تابع هدف قابلیت اطمینان

یکی از اهداف اصلی استفاده از ذخیره سازهای انرژی در ریزشبهه، افزایش قابلیت اطمینان است، که می-تواند به افزایش رضایت مصرف کنندگان برق منجر شود. اما بالا بردن قابلیت اطمینان MG باید همراه با به حداقل رساندن هزینه باشد تا از نظر اقتصادی نیز کارآیی خود را از دست ندهد. شاخص قابلیت اطمینانی که برای تابع هدف در این مساله انتخاب شده است شاخص انرژی تامین نشده (ENS) که مقدار آن را با استفاده از معادله (۱۷) می توان به دست آورد.

$$ENS = \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{inter}} L_i Pr_i$$

۳.۲. محدودیت ها و قیود مساله

برای برنامه ریزی واقعی و امکان پذیر ریز شبکه همه متغیرها باید در محدوده خود باشند. از این رو محدودیت ها و قیود مسئله بهینه سازی پیشنهادی به شرح زیر است: (Tani et al., ۲۰۱۴)

۳-۲-۱. محدودیت های ESS

واحدهای ذخیره ساز انرژی به کار رفته محدودیت‌هایی در میزان شارژ و دشارژ دستگاه‌های ذخیره‌سازی در هر بازه زمانی وجود دارند که بر عملکردشان در برنامه ریزی بهره برداری از آنها و مدیریت انرژی ریز شبکه تاثیرگذار است. معادله و محدودیت‌های این واحدها را با توجه به روابط (۱۸) تا (۲۰) می‌توان بیان نمود. معادله (۱۸) محدودیت شارژ و معادله (۱۹) محدودیت دشارژ یا تخلیه این واحدها را نشان می‌دهد. معادله (۲۰) در واقع برای بهبود عملکرد و بازدهی ESS و افزایش طول عمر آن است که اجازه نمی‌دهد وضعیت شارژ آن از محدوده از پیش تعیین شده‌ای خارج شود. یعنی در طول دوره تخلیه، میزان SOC نباید کمتر از SoC_{min} باشد و در حالت شارژ نیز نباید از SoC_{max} بالاتر برود (Rahmani et al., ۲۰۲۳).

$$P_{ESS}^{sch} < P_{ESS,max}^{sch} \quad (۱۸)$$

$$P_{ESS}^{disc} < P_{ESS,max}^{disc} \quad (۱۹)$$

$$SOC^{min,max} \quad (۲۰)$$

۳-۲-۲. محدودیت های منابع انرژی تجدیدپذیر

توان خروجی واحدهای با انرژی تجدیدپذیر (واحدهای خورشیدی (PV) و توربین های بادی) دارای حداکثر مقداری هستند که می‌توانند تولید کنند. معادلات (۲۱) و (۲۲) به ترتیب محدودیت تولید سلولهای خورشیدی PV و توربین بادی را نشان می‌دهند. محدودیت در معادله ۰ تضمین می‌کند که توان تولیدی PV همواره کمتر از حداکثر توان PV باشد و معادله ۰ و تأکید می‌کند که توان باد از توان نامی خود تجاوز نمی‌کند (Rahmani et al., ۲۰۲۳).

$$0 < P_{PV}^i < P_{PV,max}^i \quad (۲۱)$$

$$0 < P_{wind}^i < P_{wind,max}^i \quad (۲۲)$$

۳-۲-۳. تعادل بین بار و تولید

وجود تعادل بین بار و تولید در ریزشبه ضروری است و توان تولید شده توسط منابع ریزشبه باید تواند پاسخگوی تقاضای مصرف کنندگان ریزشبه باشد. اگر منابع نتوانند بار را در یک ریزشبه برآورده کنند، شبکه اصلی می تواند بار برای یک ریزشبه فراهم کند. در حالت متصل به شبکه، ریزشبه می تواند انرژی الکتریکی را از شبکه اصلی و سایر ریزشبه ها ارسال یا دریافت کند. اگر منابع موجود در ریزشبه نتوانند توان کافی برای برآوردن نیازهای ریزشبه تولید کنند، برای حفظ پایداری ریزشبه باید کاهش بار اعمال شود. محدودیت تعادل بار و تولید در معادله (۲۳) بیان می شود (Thakkar et al., ۲۰۲۴).

$$SOC(t) = \frac{E(t)}{E_n} \quad (23)$$

۳-۲-۴. محدودیت های واحدهای قابل دیسپچ

واحدهای DG قابل دیسپچ دارای زمان راه اندازی و زمان خاموش شدن هستند که باید در محاسبات در نظر گرفته شوند. این واحدها همچنین دارای محدودیت‌هایی نظیر حداقل ظرفیت حداکثر و نرخ بارگیری هستند. همه محدودیتهای این واحدها در معادلات (۲۴) تا (۲۸) نشان داده شده است:

$$P_{DG}^{\min} \leq P_{DG}^{\max} \quad (24)$$

$$P_{DG,t}^i - P_{DG,t-1}^i < UR_{DG} \quad (25)$$

$$P_{DG,t-1}^i - P_{DG,t}^i < DR_{DG} \quad (26)$$

$$SU_{DG,t} > CU(I_{DG,t} - I_{DG,t}) \quad (27)$$

$$SD_{DG,t} > CD(I_{DG,t} - I_{DG,t}) \quad (28)$$

معادله (۲۴) تضمین می کند که توان تولیدی DG بین حداکثر و حداقل مقدار مجاز آن باشد. نرخ رمپ بالا و پایین DG محدودیت هایی را بر عملکرد آن اعمال می کند که در معادلات (۲۵) و (۲۶)

بیان شده است. هزینه های راه اندازی و پایان کار بر اساس ثابت های هزینه و زمان بهره برداری آنها محاسبه می شود. معادلات (۲۷) و (۲۸) این محاسبات را نشان می دهد (Thakkar et al., ۲۰۲۴).

۳-۳. روش بهینه سازی مورد استفاده

مساله بهینه سازی که در بخش های قبلی توضیح داده شد در قالب برنامه ریزی خطی اعداد صحیح (MINLP) است. در این مقاله، از روش الگوریتم بهینه سازی جایا (JAYA) برای به دست آوردن راه حل های بهینه استفاده شده است. الگوریتم جایا عنوان الگوریتمی ساده و جدید ارائه شده و بر این اصل مهم استوار است که برای رسیدن به بهترین جواب باید راه حل های موجود در هر تکرار به سمت بهترین راه حل ارائه شده حرکت کند و از بدترین راه حل در همان تکرار نیز دور شوند. این الگوریتم همانند روشهای بهینه سازی دیگر مثل ازدحام تجمعی ذرات (PSO)، از بهترین جواب خود در هر تکرار برای تغییر جوابهای موجود در جمعیت بهره میبرد. این ویژگی باعث می گردد تا سریعتر به بهینه ی سراسری همگرا شود. همچنین همانند الگوریتم ژنتیک و تکامل تفاضلی که از تقاطع، جهش، مقایسه و انتخاب برای رویه ی بهینه سازی خود استفاده میکنند از بدترین جواب نیز استفاده کرده و در جهت عکس آن سایر اعضای جمعیت را حرکت میدهد. در این الگوریتم، هر یک از اعضای جمعیت بر اساس رابطه (۲۹) موقعیت خود را به روز میکنند: (Rao et al., ۲۰۱۶)

$$X_{s,t,k} = X_{s,t,k} + r_{1,s,t}(X_{s,t,best} - |X_{s,t,k}|) + r_{2,s,t} * (X_{s,t,worst} - |X_{s,t,k}|) \quad (29)$$

۳-۴. استراتژی های بهره برداری

بهره برداری از ریزشبهه بر اساس افق های مختلف و استراتژی های مختلف برنامه ریزی انجام می شود. در این مقاله، روشی برای برنامه ریزی ESS و ریزشبهه با در نظر گرفتن برنامه ریزی با افق های زمانی روزانه و هفتگی ایجاد می شود.

الف. حالت برنامه ریزی با افق روزانه:

در حالت روزانه، ESS به صورت روزانه برنامه ریزی می شود به طوری که وضعیت شارژ ESS در ابتدا و انتهای روز باید یکسان باشد. (معمولاً مقدار SOC در ابتدا و انتهای روز صفر درصد در نظر گرفته می شود.) به عبارت دیگر، تغییرات انرژی ESS در یک روز باید برابر با صفر باشد. در این حالت واحد ESS در بازار برق روز آینده فعالیت خواهد کرد و همه متغیرها باید برای روز بعد پیش‌بینی شوند (Ghasemi et al., ۲۰۲۳).

ب. حالت برنامه ریزی با افق هفتگی:

در حالت برنامه‌ریزی با افق هفتگی، خروجی انرژی ESS باید در ابتدا و انتهای هر هفته یکسان باشد. در این استراتژی، یکسان بودن SOC در پایان و ابتدای هر روز الزامی نمی باشد و تداوم حالت شارژ بین روزهای کاری قابل قبول است. بنابراین، در این حالت می توان از روش های بهره‌برداری که به چرخه‌های شارژ/دشارژ کمتری نیاز دارند، استفاده نمود. روش بهره‌برداری که به این علاوه بر افق زمانی نحوه استراتژی به کار گرفته شده جهت بهره‌برداری از شبکه نیز در برنامه‌ریزی و مدیریت انرژی شبکه تاثیر گذار است. در واقع استراتژی بهره‌برداری اولیتهای بهره‌برداران سیستم را برای برنامه‌ریزی ریز شبکه معین می کند و تصمیمات اتخاذ شده برای بهره‌برداری به شدت به این استراتژیها وابسته است. روشهای بهره‌برداری از ریز شبکه، به دو صورت استراتژی بهره‌برداری قابلیت اطمینان محور^۱ و استراتژی بهره‌برداری هزینه محور^۲ در نظر گرفته شده اند. در استراتژی بهره‌برداری مبتنی بر هزینه، هزینه‌های بهره‌برداری کلی سیستم از طریق آربیتراژ انرژی بهبود داده می‌شوند. در این استراتژی ESS انرژی تولیدی مازاد ریز شبکه را در خارج از ساعات اوج مصرف که معمولاً قیمت برق کمتر است ذخیره می کند تا بتواند تقاضای بار را در ساعات اوج مصرف که قیمت برق در بازار بالاتر است برآورده کند. در حالت مبتنی بر قابلیت اطمینان، حفظ کفایت سیستم در سطح خاصی حتی در هنگام بهره‌برداری جزیره‌ای اولویت بهره‌بردار ریز شبکه است. بنابراین، هدف اصلی این استراتژی برآوردن تقاضای بار سیستم است. اگر ESS برای افزایش قابلیت اطمینان استفاده می شود، SoC آن باید در سطوح بالاتری باشد. از سوی دیگر، در حالت مبتنی بر هزینه، ESS مجاز است که تا سطوح

^۱ Reliability-driven operation strategy

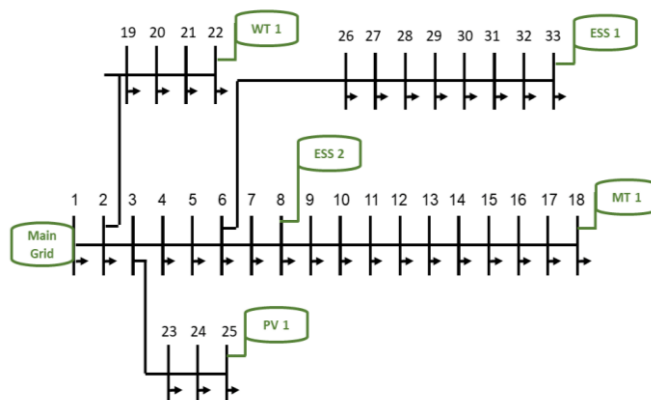
^۲ Cost-driven operation strategy

پایین‌تر انرژی تخلیه شود تا بارهای بیشتری را در ساعات اوج مصرف (زمانی که قیمت بالاتر است) تامین کند. اگر هزینه پیری ESS در برنامه‌ریزی دخیل نباشد، این استراتژی منجر به عمق تخلیه و در برخی موارد به تعداد سیکل بیشتری می‌شود. فرض بر این است که در حالت متصل به شبکه محدودیتی در توان ورودی از ریز شبکه وجود ندارد و توان مصرفی ریز شبکه می‌تواند به طور کامل توسط شبکه اصلی تامین شود و بنابراین هیچ گونه خاموشی ناشی از عدم کفایت تولید در این حالت وجود نخواهد داشت و محاسبات ارزیابی کفایت واحدهای تولیدی انجام نمی‌شود. در مقابل، در حالت جزیره‌ای، مشکلات ناشی از قابلیت اطمینان (کفایت و امنیت) از اهمیت بالاتری برخوردار است. در این هنگام، فعالیت ذخیره‌ساز انرژی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند زیرا شبکه اصلی نقشی در تامین انرژی الکتریکی ریز شبکه ندارد و کل بار ریز شبکه باید توسط واحدهای تولیدی موجود در آن و ذخیره‌ساز انرژی موجود در ریز شبکه تامین شود. از این رو، ذخیره‌ساز انرژی در این وضعیت در حالت مبتنی بر قابلیت اطمینان کار خواهد کرد و از انرژی ذخیره شده موجود جهت تامین تقاضای مصرف کنندگان ریز شبکه استفاده می‌کند. در نتیجه هرچه توان ESS بیشتر باشد بار بیشتری تامین می‌شود و هر چقدر ظرفیت ESS بیشتر شود مدت زمان تامین بار بیشتر و زمان خاموشی مصرف کنندگان کمتر می‌شود. بنابراین همواره باید مقداری از ظرفیت ESS برای بهره‌برداری در حالت جزیره‌ای جهت جلوگیری از کاهش قابلیت اطمینان در نظر گرفته شود.

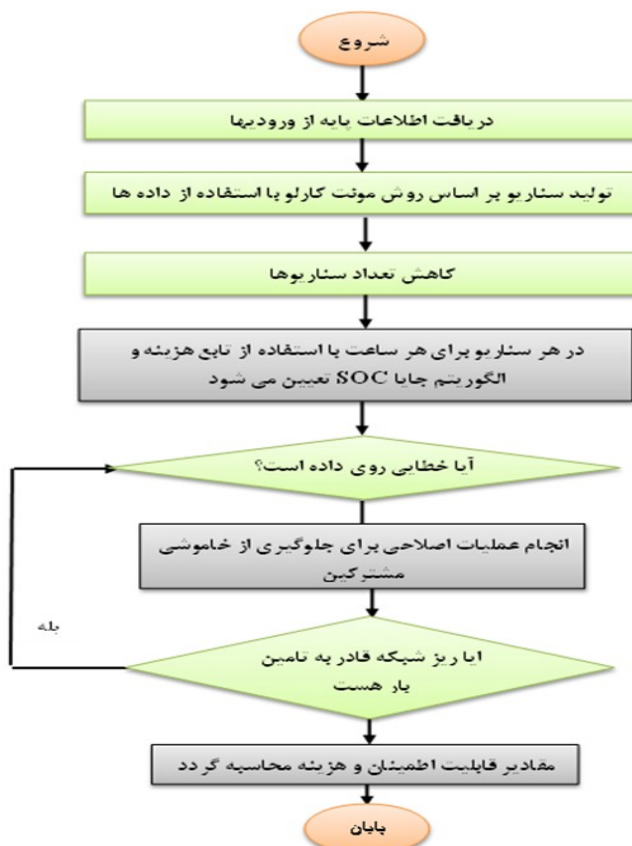
۳-۵. الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی یک رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی جایا است. الگوریتم جایا (Rao et al., ۲۰۱۶)، در سال ۲۰۱۶ توسط Rao و همکاران ارایه گردید. الگوریتم حل مسئله بهینه‌سازی فرمول بندی شده که قبلاً توضیح داده شد به صورت زیر نمایش داده می‌شود: در روش پیشنهادی، وضعیت شارژ یا دشارژ ESS به عنوان متغیر تصمیم‌گیری انتخاب شده است. برای حل مساله ابتدا بر اساس داده‌های ورودی و با استفاده از روش شیبه‌سازی مونت کارلو سناریوهای مختلفی تولید می‌شوند. در این بخش برای هر ساعت مقدار پیش‌بینی شده هر پارامتر با استفاده از انحراف معیار و میانگین آن پارامتر و تابع توزیع احتمال آن محاسبه می‌شود. برای کاهش پیچیدگی سیستم و کاهش زمان محاسبه برنامه سناریوهای تولید شده به تعداد مطلوب کاهش داده می‌شوند. بر اساس سناریوهای

انتخاب شده برنامه ریزی شارژ/دشارژ واحدهای ذخیره ساز انرژی، به صورت یک مسئله بهینه سازی احتمالی حل شده و هزینه بهره برداری ریز شبکه محاسبه خواهد شد.



شکل ۳. سیستم ۳۳ شینه اصلاح شده (Takano et al., ۲۰۲۱).



شکل ۴. فلوچارت روش پیشنهادی

در هر ساعت، الگوریتم بهینه‌سازی توسعه داده شده مبتنی بر جایا مقدار احتمالی برای تعیین رفتار شارژ و همچنین SOC در ریز شبکه را تعیین می‌کند. این بهینه‌سازی در حالت عادی فقط با استفاده از تابع هزینه انجام می‌شود. در مرحله بعد در صورت بروز حادثه در ریز شبکه، توانایی سیستم برای پاسخگویی بار با این مقدار ESS مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. زمانی که برنامه‌ریزی بهینه واحدهای تجدید پذیر و در سناریوهای مختلف به دست آمد، شاخص قابلیت اطمینان (در اینجا ENS) را می‌توان محاسبه کرد. برای محاسبه ENS در هر سناریوی جزیره‌ای، مقدار انرژی تامین نشده محاسبه می‌شود. شکل (۴) فلوچارت روش پیشنهادی را نشان می‌دهد (Takano et al., ۲۰۲۱).

۴. مطالعه موردی

روش پیشنهادی ارایه شده در این مقاله بر روی شبکه تست استاندارد ۳۳ شینه IEEE پیاده سازی شده است (شکل ۳). سیستم تست اصلی تنها از طریق شبکه اصلی بالادست تامین می شود و هیچ منبعی در داخل خود شبکه تولید برق انجام نمیدهد. منابع تجدید پذیر و واحدهای تولید پراکنده به همراه ذخیره سازهای انرژی به شبکه تست اصلی اضافه شده است تا شبکه برای مطالعه مسئله برنامه ریزی ریز شبکه ها مناسب شود. از این رو دو واحد ESS در شینهای ۸ و ۳۳ قرار گرفته و یک واحد بادی و خورشیدی به ترتیب در شینهای ۲۲ و ۲۵ ریز شبکه قرار میگیرد. یک میکروتوربین نیز به عنوان یک منبع قابل دیسپاچ در شین ۱۸ به ریز شبکه اضافه شده است. شکل (۳) نموداری شماتیک از این ریز شبکه اصلاح شده را نشان می دهد. همچنین افق زمانی روزانه متشکل از دوره های ۲۴ ساعته برای حالت روزانه DM و ۱۶۸ ساعته برای برنامه ریزی حالت هفتگی (WM) در نظر گرفته شده است. روش جدیدی مبتنی بر الگوریتم جایا برای به حداقل رساندن هزینه ریز شبکه ها همراه با بالا بردن قابلیت اطمینان آنها استفاده شده است. به منظور نشان دادن کارآیی روش پیشنهادی، یک سیستم تست استاندارد انتخاب شده است و عملکرد روش پیشنهادی بر روی آن بررسی شده است. الگوریتم پیشنهادی میزان SOC واحد ذخیره ساز انرژی را در هر ساعت بر اساس سطح بار، توان در دسترس منابع درون ریز شبکه، توان در دسترس از شبکه بالادست و همچنین بار مورد نیاز مصرف کنندگان تعیین می کند. همچنین فرض شده است که بهره بردار ریز شبکه مسئولیت برنامه ریزی ریز شبکه را بر عهده دارد و به اطلاعات بار، توان تولیدی واحدها، آب و هوا، وضعیت شارژ واحدهای ESS و پارامترهای شبکه مانند قیمت دسترسی دارد. انتخاب استراتژی بهره برداری می تواند از عوامل تاثیرگذار بر برنامه ریزی رفتار شارژ/تخلیه سیستم ذخیره ساز انرژی باشد. مشخصه منابع تجدیدپذیر مورد استفاده در شبیه سازی در جدول (۱) ارائه شده است. قابل ذکر است که توان خروجی واحدهای بادی و خورشیدی در هر ساعت برابر است با حاصلضرب ظرفیت آنها در منحنی توان روزانه آن که در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات واحد قابل دیسپاچ موجود در ریز شبکه

Ramp Up/down	ظرفیت حداقل حداکثر	هزینه بهره برداری	نوع
۰/۰۶	۰-۰/۱۲	۵۱/۸۶	میکروتوربین (MT)

نرخ خروج (FOR) تجهیزات شبکه برابر ۰.۱ (occ/yr) و میزان خرابی تجهیزات ۱۰ روز در سال در نظر گرفته شده است (Yang et al., ۲۰۲۴). برای مدت زمان جزیره‌ای شدن، یک تابع توزیع نرمال با میانگین ۵ ساعت و انحراف معیار یک ساعت در نظر گرفته شده است. احتمال خروج شبکه بالادست و جزیره‌ای شدن ریز شبکه مطابق ۰ در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است که هزینه سرمایه‌گذاری برای واحد ESS ۲۰۰ هزار دلار است. در نهایت، انحراف معیار پارامترهای دارای عدم قطعیت ۱۰٪ قرار داده شده و شبیه‌سازی مونت کارلو ابتدا ۱۰۰۰ سناریو را تولید می‌کند و سپس تعداد سناریوها را با روش کاهش سناریوی بکوارد به ۱۰۰ سناریو کاهش می‌دهد.

جدول ۲. توزیع احتمال مدت زمان جزیره‌ای شدن

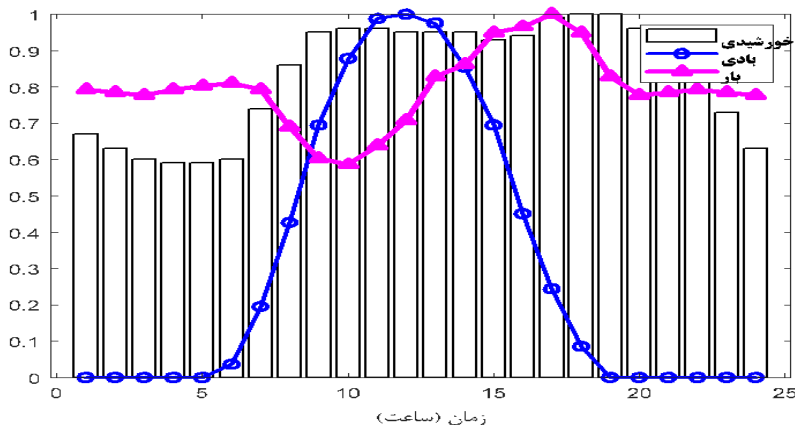
زمان جزیره‌ای شدن	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
احتمال	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶۱	۰/۲۴۲	۰/۳۸۲	۰/۲۴۲	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۶۱

قیمت برق در بازار آزاد با توجه به تقاضای مصرف کنندگان تعیین می‌گردد. مقادیر استفاده شده در این مقاله به صورت ۰ جدول (۳) در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. قیمت ساعتی برق در بازار آزاد (Sahoo et al., ۲۰۲۲).

Hours	Cost	Hours	Cost	Hours	Cost	Hours	Cost
۱	۰/۰۳۳	۷	۰/۰۳۳	۱۳	۰/۲۱۵	۱۹	۰/۰۵
۲	۰/۰۲۷	۸	۰/۰۵۴	۱۴	۰/۵۷۲	۲۰	۰/۰۶۱
۳	۰/۰۲	۹	۰/۲۱۵	۱۵	۰/۲۸۶	۲۱	۰/۰۱۸۱
۴	۰/۰۱۷	۱۰	۰/۵۷۲	۱۶	۰/۲۷۹	۲۲	۰/۰۷۷
۵	۰/۰۱۷	۱۱	۰/۵۷۲	۱۷	۰/۰۸۶	۲۳	۰/۰۴۳
۶	۰/۰۱۷	۱۲	۰/۵۷۲	۱۸	۰/۰۵۹	۲۴	۰/۰۳۷

بار پیش‌بینی شده و خروجی واحدهای انرژی تجدیدپذیر برای یک روز مشخص در شکل (۵) نشان داده شده است. با استفاده از داده‌های بالا روش پیشنهادی در نرم افزار MATLAB ۲۰۱۸a بر روی شبکه تست اعمال شده و نتایج به دست آمده در قسمتهای بعدی مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۵. مقدار پیش‌بینی شده بار و انرژی تجدیدپذیر

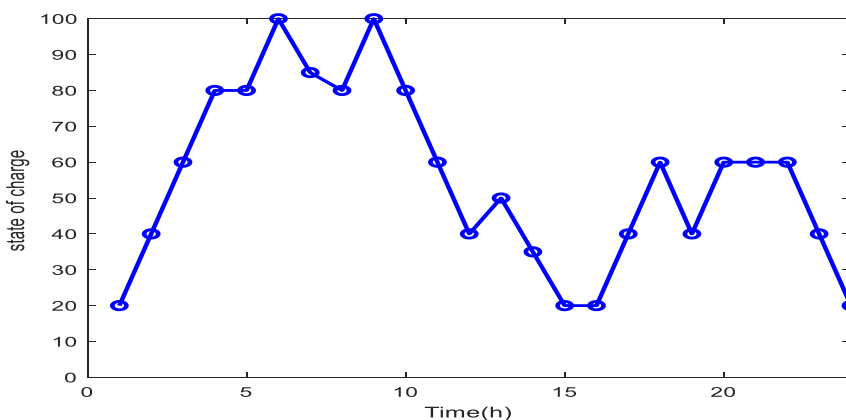
۴-۱. نتایج برنامه ریزی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در ریز شبکه

برنامه ریزی ذخیره‌سازی انرژی در ریز شبکه پیشنهادی بر اساس روش ارائه شده انجام شده و نتایج به دست آمده در جدول (۴) نشان داده شده است.

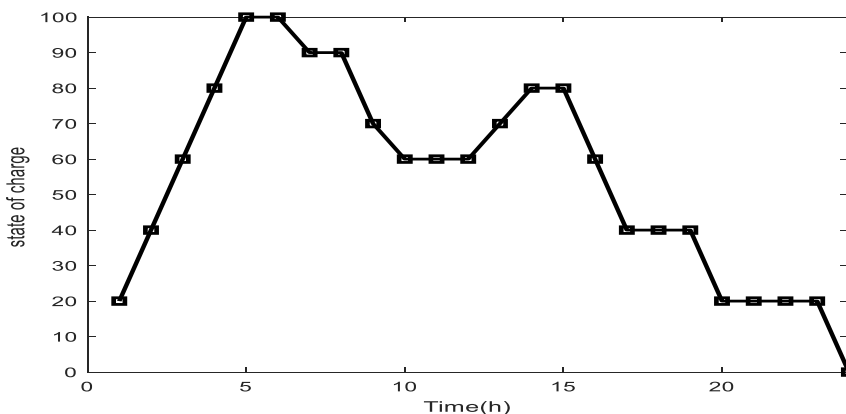
جدول ۴. برنامه ریزی ESS در استراژی برنامه ریزی

Hours	SoC	Hours	SoC	Hours	SoC	Hours	SoC
۱	۰/۲	۷	۰/۶	۱۳	۰/۵	۱۹	۰/۶
۲	۰/۴	۸	۰/۵	۱۴	۰/۶	۲۰	۰/۶
۳	۰/۶	۹	۰/۵	۱۵	۰/۷	۲۱	۰/۴
۴	۰/۶	۱۰	۰/۵	۱۶	۰/۷	۲۲	۰/۳
۵	۰/۶	۱۱	۰/۵	۱۷	۰/۷۵	۲۳	۰/۲
۶	۰/۷	۱۲	۰/۶	۱۸	۰/۶۸	۲۴	۰

فرآیند شارژ/دشارژ ESS برای حداقل کردن تابع هزینه با برنامه‌ریزی حالت روزانه در شکل (۶) و شکل (۷) نشان داده شده است. برنامه ریزی ESS بر اساس استراتژی مبتنی بر هزینه و قابلیت اطمینان انجام شده است. در این نوع برنامه‌ریزی فرض شده است که افق زمانی برنامه ریزی روزانه است و قیمت برق در بازار روز گذشته تعیین شده است.



شکل ۶. برنامه ریزی ذخیره ساز انرژی با استراتژی مبتنی بر هزینه



شکل ۷. برنامه ریزی ذخیره ساز انرژی با استراتژی مبتنی بر قابلیت اطمینان

مقایسه دو شکل نشان می‌دهد که در مطالعات مبتنی بر قابلیت اطمینان تمایل بیشتر به بالا نگه داشتن سطح وضعیت شارژ ذخیره ساز انرژی است در حالی که در برنامه ریزی مبتنی بر هزینه استفاده بیشتری از انرژی ذخیره شده در ESS شده و در مواقع پیک بار سطح آن کاهش می‌یابد.

۲-۴. ارزیابی توانایی روش پیشنهادی

برای ارزیابی توانایی روش پیشنهادی در حل مساله برنامه ریزی ریز شبکه ابتدا مساله برای حالت برنامه‌ریزی روزانه و استراتژی مبتنی بر هزینه علاوه بر الگوریتم جایا با دیگر الگوریتمهای متداول فرا ابتکاری حل شده و نتایج در جدول (۵) و مقایسه الگوریتم پیشنهادی با دیگر الگوریتم ها در جدول (۶) آمده است. نتایج این جدول کارآیی بهتر روش پیشنهادی نسبت به سایر روشها را نشان می‌دهد و بر توانایی حل مساله الگوریتم جایا تاکید می‌کند.

جدول ۵. مقایسه بین روشهای بهینه سازی GA, PSO و TLBO و JAYA

عملکرد	GA (Jung et al., ۲۰۲۱)	PSO (Fan et al., ۲۰۲۲)	TLBO (Yuan et al., ۲۰۲۰)	DE (ALAhmad et al., ۲۰۲۴)	JAYA (This paper)
نیاز به رتبه بندی راه حل بهینه	بله	خیر	بله	خیر	خیر
تأثیر اندازه جمعیت بر زمان حل	نمایی	خطی	نمایی	خطی	خطی
تأثیر بهترین جواب بهینه بر عملکرد سیستم	متوسط	زیاد	زیاد	متوسط	زیاد
میانگین تابع برازندگی نمی تواند بدتر شود	غلط	غلط	غلط	درست	درست
تمایل به همگرایی زودرس	متوسط	زیاد	متوسط	متوسط	کم
تداوم (تراکم) فضای جستجو	کمتر	بیشتر	--	بیشتر	بیشتر
امکان دستیابی به راه حل خوب بدون جستجوی محلی	کمتر	بیشتر	بیشتر	بیشتر	بیشتر
زیر گروه های همگن روند همگرایی را بهبود می بخشد	بله	بله	--	خیر	خیر
مدت زمان اجرای بهینه سازی (سیکل بر ثانیه)	زمان اجرا	۴/۳۰	۳/۷۸	۴۰/۹۴	۵/۶۵
	زمان اتمام	۳۷۰/۱۰	۳۹۹/۲۰	۳۸۸/۷۵	۴۵۶/۷۰
		۳۳۳/۳۰			

جدول ۶. مقایسه الگوریتم پیشنهادی با دیگر الگوریتم‌ها

الگوریتم حل مساله	هزینه بهره‌برداری (OC)	انرژی تامین نشده مورد انتظار (EENS)
الگوریتم ازدحام ذرات	۶۳۹/۵	۷/۱۷
الگوریتم ژنتیک (GA)	۶۵۱/۵	۶/۹
الگوریتم آموزش و یادگیری (TLBO)	۶۰۲	۶/۸۴
الگوریتم جایا (JAYA)	۶۰۳	۶/۷۹

۳-۴. ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان ریز شبکه‌ها

برای تحلیل بیشتر و بهتر روش پیشنهادی و مقایسه حالات مختلف برنامه ریزی ESS در ریز شبکه‌ها سه سناریو پیشنهاد شده است. این سناریوها برای بررسی مساله برنامه ریزی ESS بر پارامترهای ریز شبکه و روشهای بهبود عملکرد آن ارائه شده است. سناریوهای به کار رفته عبارتند از:

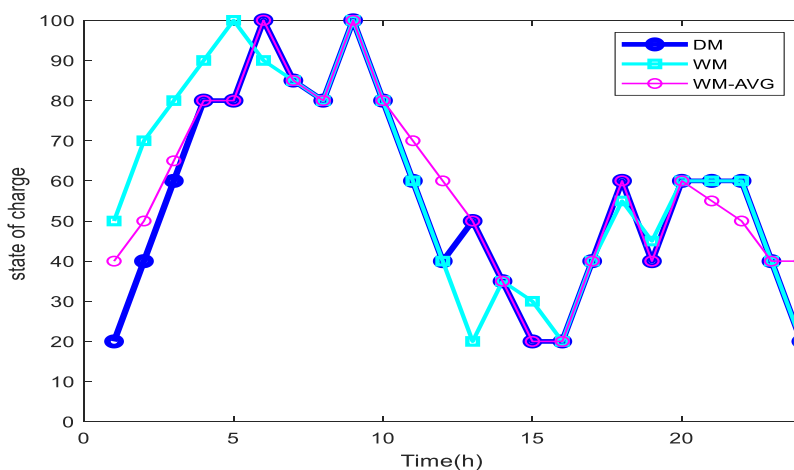
نمونه موردی ۱: برنامه ریزی ریز شبکه بر اساس بار شبکه تنها با در نظر گرفتن تابع هزینه

نمونه موردی ۲: برنامه ریزی ریز شبکه بر اساس قابلیت اطمینان

نمونه موردی ۳: برنامه ریزی ریز شبکه با استفاده از روش پیشنهادی

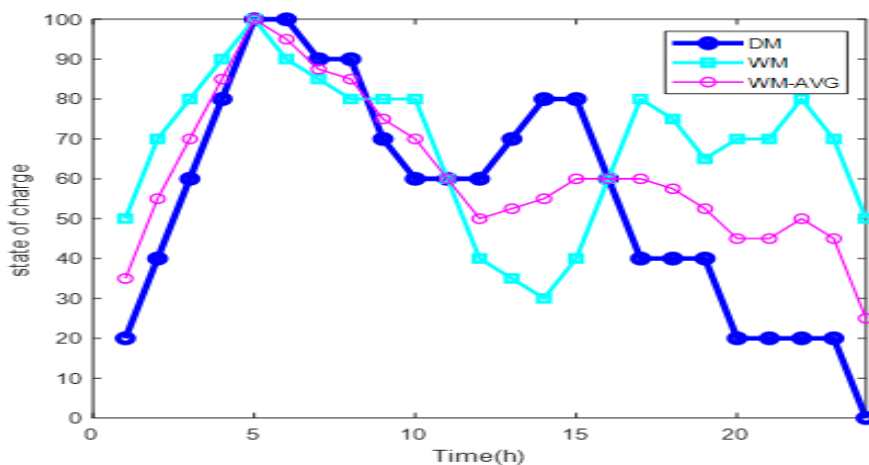
در نمونه اول که مبتنی بر هزینه است تنها هزینه بهره‌برداری در نظر گرفته شده است و از هزینه پیری صرف نظر شده است. در نمونه دوم تابع هدف اصلی همان قابلیت اطمینان ریز شبکه در نظر گرفته می‌شود و برنامه ریزی به گونه‌ای انجام می‌پذیرد که خاموشی بار خصوصاً هنگام جزیره ای شدن ریز شبکه کمتر گردد. برنامه ریزی برای هر سه سناریو در هر دو حالت روزانه و هفتگی انجام می‌شود.

نمونه موردی اول: در این سناریو بهینه سازی ریز شبکه تنها بر اساس هزینه انجام میشود و ملاحظات قابلیت اطمینان در نظر گرفته نمی‌شود. مطالعات در دو حالت روزانه و هفتگی انجام می‌شود. برای هر کدام از این حالات جداگانه برنامه ریزی صورت گرفته و نتایج در شکل (۸) به نمایش درآمده است. در حالت هفتگی برای اینکه امکان مقایسه وجود داشته باشد از روز سه شنبه که یک روز وسط هفته است به عنوان نمونه استفاده شده است. همچنین میانگین وضعیت شارژ در هفته نیز ارایه گشته تا دید بهتری برای برنامه ریزی هفتگی ارائه دهد. از این شکل چنان بر می‌آید که در برنامه ریزی مبتنی بر تعداد سیکلهای شارژ دشارژ زیاد است تا بتواند با کمترین هزینه بار را تامین کند.

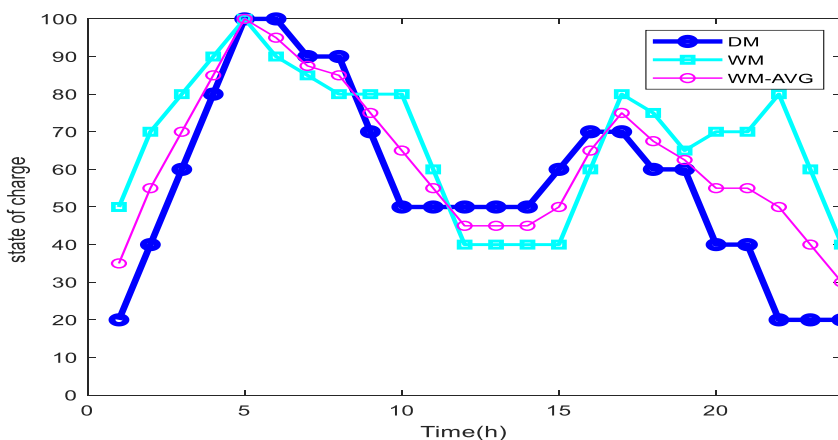


شکل ۸. نحوه تغییرات وضعیت شارژ در نمونه موردی ۱

نمونه موردی دوم: در این سناریو برنامه‌ریزی ریزش‌بکه با استفاده از استراتژی مبتنی بر قابلیت اطمینان به صورت هفتگی و روزانه انجام شده است. مانند سناریوی یک نتایج به صورت نمودار در شکل (۹) آمده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در حالت هفتگی به دلیل برداشته شرط یکسان بودن وضعیت شارژ در ابتدا و انتهای هر روز امکان بالا نگه داشتن سطح وضعیت شارژ برای بالا نگه داشتن قابلیت اطمینان بیشتر وجود دارد.



شکل ۹: نحوه تغییرات وضعیت شارژ در نمونه موردی ۲

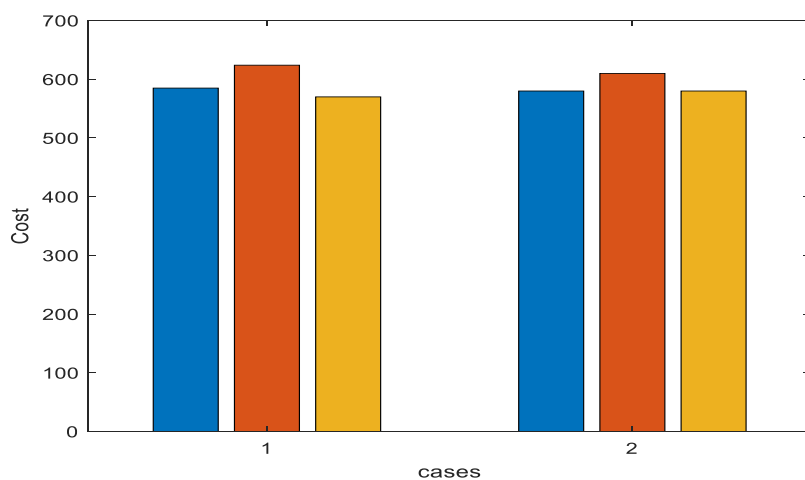


شکل ۱۰. نحوه تغییرات وضعیت شارژ در نمونه موردی ۳

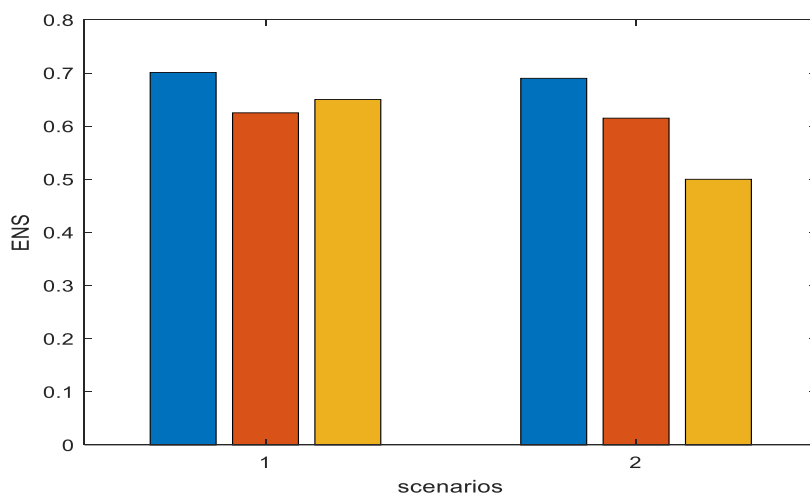
نمونه موردی ۳: در سناریوی سوم ابتدا برنامه ریزی برای حالت مبتنی بر هزینه انجام می شود و سپس در ادامه ملاحظات قابلیت اطمینان در نظر گرفته می شود. با توجه به اینکه هزینه های پیری عایق نیز در این مطالعات در نظر گرفته شده است، تعداد دفعات شارژ دشارژ نسبت به دو حالت قبلی کمتر شده است شکل (۱۰).

۵. مقایسه عملکرد سناریوها

برای ایجاد درک بهتر از عملکرد هر سه سناریو و مقایسه آنها با یکدیگر مطالعات برای هر سه سناریو انجام شده و پارامترهای مختلف محاسبه شده است. هزینه و شاخص قابلیت اطمینان مواردی هستند که در این مقاله به عنوان هدف در نظر گرفته شده اند. شکل‌های نشان می دهند که در سناریوهای هفتگی معمولاً هزینه از سناریوی روزانه کمتر است که مقایسه این سناریوها در شکل (۱۱) و شکل (۱۲) نشان دهنده بهبود عملکرد در روش پیشنهادی در هر دو حالت روزانه و هفتگی است.



شکل ۱۱. تابع هدف هزینه برای سناریوهای مختلف



شکل ۱۲. قابلیت اطمینان ریز شبکه در دو حالت برنامه ریزی هفتگی و روزانه

۶. نتیجه‌گیری

این مطالعه به ارائه یک مدل احتمالاتی برای برنامه ریزی بهینه سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در یک ریزشبکه بر اساس شبیه‌سازی MCS در هر دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای و همچنین مدل‌سازی هزینه قدیمی واحدهای ESS در مورد عوامل چرخه ای و تقویمی می‌پردازد. ابتدا مسئله‌های برنامه-ریزی و قابلیت اطمینان ریزشبکه‌ها و محدودیت‌های مرتبط به هر کدام بررسی شده است. سپس یک روش جدید برای برنامه‌ریزی ESS‌ها در ریزشبکه در هر دو حالت روزانه و هفتگی پیشنهاد شده است. این روش یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه است که توسط الگوریتم جایا حل می‌شود و هزینه‌ها را به حداقل می‌رساند و قابلیت اطمینان ریزشبکه را بهبود می‌دهد. با استفاده از شبیه‌سازی انجام‌شده بر روی سیستم تست ۳۳ شینه اصلاح‌شده، می‌توان مشاهده کرد که برنامه‌ریزی قابلیت اطمینان بهره‌برداری از ESS در ریزشبکه به برآورده ساختن نیازمندی‌های ریزشبکه به طور کارآمدتر کمک می‌کند. نتایج حاصل این نکته را به وضوح نشان می‌دهد که شارژ-تخلیه ESS می‌تواند به طور موثر هزینه ریزشبکه‌ها را کاهش دهد و به طور همزمان عملکرد قابلیت اطمینان سیستم را بهبود بخشد. نتایج حاصل از حالت روزانه و هفتگی مقایسه شده و مزایا و معایب هر حالت مورد بحث قرار گرفته است. مشاهده می‌شود که هزینه پیری و قابلیت اطمینان می‌تواند با برنامه ریزی حالت هفتگی افزایش یابد، در حالی که هزینه کل در برنامه ریزی حالت روزانه بهتر مدیریت می‌شود. مطالعات آینده می‌توانند تاثیر انتخاب انواع دیگر ESS را برای تعیین تفاوت بین استراتژی‌های عملیاتی حالت هفتگی و روزانه ارزیابی کند. همچنین، برای تعیین تأثیر برنامه-ریزی ESS بر شاخص‌های قابلیت اطمینان بیشتر در ریزشبکه، نیاز به مطالعات بیشتری است.

۷. منابع

P. Shah and B. Mehta, (۲۰۲۰) "Microgrid Optimal Scheduling with Renewable Energy Sources Considering Islanding Constraints," *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Electr. Eng.*, vol. ۴۴, no. ۲, pp. ۸۰۵-۸۱۹, doi: ۱۰.۱۰۰۷/s۴۰۹۹۸-۰۱۹-۰۰۲۵۴-y.

D. Parra, S. A. Norman, G. S. Walker, and M. Gillott, (۲۰۱۶). "Optimum community energy storage system for demand load shifting," *Appl. Energy*, vol. ۱۷۴, pp. ۱۳۰–۱۴۳, doi: ۱۰.۱۰۱۶/J.APENERGY.۲۰۱۶.۰۴.۰۸۲.

Aljafari, Belqasem, et al, (۲۰۲۲). "Optimization of DC, AC, and Hybrid AC/DC Microgrid-Based IoT Systems: A Review." *Energies* ۱۵, ۱۸: ۶۸۱۳.

D. Krishnamurthy, C. Uckun, Z. Zhou, P. R. Thimmapuram, and A. Botterud, (۲۰۱۷). "Energy Storage Arbitrage Under Day-Ahead and Real-Time Price Uncertainty," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. ۳۳, no. ۱, pp. ۸۴–۹۳, doi: ۱۰.۱۱۰۹/TPWRS.۲۰۱۷.۲۶۸۵۳۴۷.

Gholami, M., Muyeen, S. M., & Mousavi, S. A. (۲۰۲۴). Optimal sizing of battery energy storage systems and reliability analysis under diverse regulatory frameworks in microgrids. *Energy Strategy Reviews*, ۵۱, ۱۰۱۲۵۵.

ALahmad, A. K., Verayiah, R., Ramasamy, A., Marsadek, M., & Shareef, H. (۲۰۲۴). Optimal planning of energy storage system for hybrid power system considering multi correlated input stochastic variables. *Journal of Energy Storage*, ۸۲, ۱۱۰۶۱۵.

Yang, Q., Wang, J., Liang, J., & Wang, X. (۲۰۲۴). Chance-constrained coordinated generation and transmission expansion planning considering demand response and high penetration of renewable energy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, ۱۵۵, ۱۰۹۵۷۱.

C. K. Das, O. Bass, G. Kothapalli, T. S. Mahmoud, and D. Habibi, (۲۰۱۸). "Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. ۹۱, no. March, pp. ۱۲۰۵–۱۲۳۰, doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.rser.۲۰۱۸.۰۳.۰۶۸.

S. Rajamand, M. Shafie-khah, and J. P. S. Catalão, (۲۰۲۲). "Energy storage systems implementation and photovoltaic output prediction for cost minimization of a Microgrid," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. ۲۰۲, p. ۱۰۷۵۹۶, doi: ۱۰.۱۰۱۶/J.EPSR.۲۰۲۱.۱۰۷۵۹۶.

Z. Yuan, W. Wang, H. Wang, and A. Yildizbasi, (۲۰۲۰). "A new methodology for optimal location and sizing of battery energy storage system in distribution networks for loss reduction," *J. Energy Storage*, vol. ۲۹, p. ۱۰۱۳۶۸, doi: ۱۰.۱۰۱۶/J.EST.۲۰۲۰.۱۰۱۳۶۸.

A. Ebrahimi and M. Ziabasharhagh, (۲۰۲۲). "Introducing a novel control algorithm and scheduling procedure for optimal operation of energy storage systems," *Energy*, vol. ۲۵۲, p. ۱۲۳۹۹۱, doi: ۱۰.۱۰۱۶/J.ENERGY.۱۲۳۹۹۱.

J. Mitra, (۲۰۱۰). "Reliability-based sizing of backup storage," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. ۲۵, no. ۲, pp. ۱۱۹۸–۱۱۹۹, doi: ۱۰.۱۱۰۹/TPWRS.۲۰۰۹.۲۰۳۷۵۱۶.

H. Takano, R. Hayashi, H. Asano, and T. Goda, (۲۰۲۱). “Optimal sizing of battery energy storage systems considering cooperative operation with microgrid components,” *Energies*, vol. ۱۴, no. ۲۱, pp. ۱–۱۲, doi: ۱۰.۳۳۹۰/en۱۴۲۱۷۴۴۲.

M. Honarmand, A. Zakariazadeh, and S. Jadid, (۲۰۱۴). “Integrated scheduling of renewable generation and electric vehicles parking lot in a smart microgrid,” *Energy Convers. Manag.*, vol. ۸۶, pp. ۷۴۵–۷۵۵, doi: ۱۰.۱۰۱۶/J.ENCONMAN.۲۰۱۴.۰۶.۰۴۴.

A. Abbasi, S. Abbasi, J. Ansari, and E. Rahmani, (۲۰۱۵). “Effect of plug-in electric vehicles demand on the renewable micro-grids,” *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. ۲۹, no. ۵, doi: ۱۰.۳۲۳۳/IFS-۱۵۰۱۶۷۴.

A. J. Pimm, T. T. Cockerill, and P. G. Taylor, (۲۰۱۸). “The potential for peak shaving on low voltage distribution networks using electricity storage,” *J. Energy Storage*, vol. ۱۶, pp. ۲۳۱–۲۴۲, doi: ۱۰.۱۰۱۶/J.EST.۲۰۱۸.۰۲.۰۰۲.

Z. Parvini, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Moeini-Aghtaie, (۲۰۱۸). “Operational Reliability Studies of Power Systems in the Presence of Energy Storage Systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. ۳۳, no. ۴, pp. ۳۶۹۱–۳۷۰۰, doi: ۱۰.۱۱۰۹/TPWRS.۲۰۱۷.۲۷۷۱۵۲۱.

X. Kong, L. Bai, Q. Hu, F. Li, and C. Wang, (۲۰۱۶). “Day-ahead optimal scheduling method for grid-connected microgrid based on energy storage control strategy,” *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. ۴, no. ۴, pp. ۶۴۸–۶۵۸, doi: ۱۰.۱۰۰۷/s۴۰۵۶۵۰۰۱۶۰۲۴۵۰.

R. Khatami, M. Parvania, and P. P. Khargonekar, (۲۰۱۸). “Scheduling and Pricing of Energy Generation and Storage in Power Systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. ۳۳, no. ۴, pp. ۴۳۰۸–۴۳۲۲, doi: ۱۰.۱۱۰۹/TPWRS.۲۰۱۷.۲۷۸۶۱۷۶.

Jung, S., Jeoung, J., Kang, H., & Hong, T. (۲۰۲۱). Optimal planning of a rooftop PV system using GIS-based reinforcement learning. *Applied Energy*, ۲۹۸, ۱۱۷۲۳۹.

Yang, H., Zhang, Y., Ma, Y., Zhou, M., & Yang, X. (۲۰۱۹). Reliability evaluation of power systems in the presence of energy storage system as demand management resource. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, ۱۱۰, ۱–۱۰.

He, G., Chen, Q., Kang, C., Pinson, P., & Xia, Q. (۲۰۱۵). Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance-based regulation and battery cycle life. *IEEE Transactions on Smart Grid*, ۷(۵), ۲۳۵۹–۲۳۶۷.

Rao, R. (۲۰۱۶). Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, ۷(۱), ۱۹–۳۴.

Ghasemi, N., Ghanbari, M., & Ebrahimi, R. (۲۰۲۳). Intelligent and optimal energy management strategy to control the Micro-Grid voltage and frequency by considering the load dynamics and transient stability. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, ۱۴۵, ۱۰۸۶۱۸.

Sepehrzad, R., Nakhaeisharif, S., Al-Durra, A., Allahbakhshi, M., & Moridi, A. (۲۰۲۲). Islanded micro-grid frequency control based on the optimal-intelligent lyapunov algorithm considering power dynamic and communication uncertainties. *Electric Power Systems Research*, ۲۰۸, ۱۰۷۹۱۷.

Fan, P., Hu, J., Ke, S., Wen, Y., Yang, S., & Yang, J. (۲۰۲۲). A Frequency-Pressure Cooperative Control Strategy of Multi-Microgrid with an Electric-Gas System Based on MADDPG. *Sustainability*, ۱۴(۱۴), ۸۸۸۶.

Sahoo, S. C., Barik, A. K., & Das, D. C. (۲۰۲۲). Synchronized voltage-frequency regulation in sustainable microgrid using novel Green Leaf-hopper Flame optimization. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, ۵۲, ۱۰۲۳۴۹.

Tani, A., Camara, M. B., & Dakyo, B. (۲۰۱۴). Energy management in the decentralized generation systems based on renewable energy—Ultracapacitors and battery to compensate the wind/load power fluctuations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, ۵۱(۲), ۱۸۱۷-۱۸۲۷.

Rahmani, E., Mohammadi, S., Zadehbagheri, M., & Kiani, M. (۲۰۲۳). Probabilistic reliability management of energy storage systems in connected/islanding microgrids with renewable energy. *Electric Power Systems Research*, ۲۱۴, ۱۰۸۸۹۱.

Thakkar, N., & Paliwal, P. (۲۰۲۴). Data driven MCDM models for reliability-economic-environmental analysis of energy storage based autonomous micro-grid. *Journal of Energy Storage*, ۸۱, ۱۱۰۴۰۸.