برنامه‌ریزی بهره‌برداری چندهدفه از ریز شبکه‌ها در حضور بارهای حرارتی و شارژ و دشارژ ذخیره‌سازهای حرارتی با استفاده الگوریتم تکاملی آموزش و یادگیری (TLBO)

روح اله همایون[۱]، بهمن بهمنی فیروزی*[۲]، طاهر نیکنام[۳]
۱- دانشجوی دکتری، گروه برق، دانشکده مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی ، مرودشت، ایران،
ro.homayoun@miau.ac.ir
*۲- استادیار، گروه برق، دانشکده مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی ، مرودشت، ایران،
bahmani_b@alum.sharif.edu
۳- استاد، گروه برق، دانشکده مهندسی برق، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی ، مرودشت، ایران،
niknam@sutech.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۲۵

چکیده: استفاده از تولیدات پراکنده بر پایه تولید همزمان الکتریسیته و گرما ازجمله گام‌های مهم درراه تقسیم شبکه‌های توزیع به ریز شبکه‌ها به‌عنوان بلوک‌های سازنده سیستم‌های هوشمند می‌باشد. ازاین‌رو بررسی و ارزیابی عملکرد تولیدات پراکنده در حضور واحدهای تولید همزمان الکتریسیته و گرما در ریز شبکه‌ها و بهره‌برداری از ریز شبکه‌ها با در نظر گرفتن ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی و ذخیره‌سازهای گرمایی امری ضروری می‌باشد. در این مقاله، مدل‌سازی رفتار واحدهای CHP و ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی و فرمول‌بندی مسئله بهره‌برداری بهینه چندهدفه از ریز شبکه با در نظر گرفتن واحدهای تولید همزمان گرما و انرژی به همراه ذخیره‌سازهای گرمایی با به‌کارگیری الگوریتم تکاملی آموزش و یادگیری (TLBO) ارائه می‌شود. توابع هدف موردنظر شامل هزینه‌های بهره‌برداری از ریز شبکه، میزان تلفات شبکه و میزان انحراف ولتاژ باس ها از مقدار نامی می‌باشند. برای حل مسئله بهینه‌سازی، از الگوریتم تکاملی TLBO که در این زمینه یک الگوریتم قوی و مؤثر می‌باشد استفاده می‌شود. شبکه موردمطالعه، یک شبکه ۶۹ شینه بوده که شامل تعدادی واحدهای تولید پراکنده و تعدادی منابع تولید همزمان برق و حرارت می‌باشد.نتایج شبیه‌سازی، کارایی مؤثر برنامه‌ریزی بهره‌برداری چندهدفه از ریز شبکه‌ها در حضور بارهای حرارتی را با استفاده از نرم افزار متلب نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تولید همزمان برق و حرارت (CHP)، ذخیره‌سازهای گرمایی، تولیدات پراکنده (DG)، برنامه‌ریزی بهره‌برداری چندهدفه، الگوریتم آموزش و یادگیری (TLBO)

۱- مقدمه

انرژی گرمایشی، سهم زیادی از مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهد. از انرژی حرارتی تلف‌شده سیستم‌های تولید پراکنده نیز می‌توان برای این منظور استفاده نمود. درنتیجه، علاوه بر کاهش تقاضای انرژی الکتریکی از شبکه، بازده سیستم‌های تولید پراکنده به‌واسطهٔ تولید همزمان برق و حرارت افزایش می‌یابد[۱]. به دلیل افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف کنترل نشده سوخت فسیلی، استفاده از تولیدات پراکنده در سطح شبکه توزیع افزایش‌یافته است ولی ازآنجاکه شبکه توزیع فعلی قادر به کنترل تعداد بالای تولیدات پراکنده نیست [۲]. ازاین‌رو براساس تئوری شبکه توزیع هوشمند، این شبکه به شبکه‌های کوچکتر تحت عنوان ریزشبکه تقسیم‌بندی می‌شود [۳].از طرفی، بهره‌برداری بهینه از این سیستم‌ها، به میزان انعطاف آن‌ها در شرایط گوناگون بار الکتریکی، گرمایشی و سرمایشی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.1 Spring 2021

شبکه بستگی دارد. با اضافه کردن ذخیره کننده‌های انرژی الکتریکی و گرمایی می‌توان انعطاف این سیستم‌ها را افزایش داد به‌طوری‌که با به‌کارگیری از این ذخیره‌سازها می‌توان انرژی را در زمان‌هایی که نیاز به انرژی الکتریکی یا گرمایی کم بوده، ذخیره نمود و در زمان‌های اوج بار که قیمت انرژی افزایش می‌یابد، از این انرژی ذخیره‌شده استفاده کرد. با توجه به موارد ذکرشده، استفاده از تولیدات پراکنده[×] بر پایه تولید همزمان الکتریسیته و گرما ازجمله گام‌های مهم در راه تقسیم شبکه‌های توزیع به ریز شبکه‌ها به‌عنوان بلوک‌های سازنده سیستم‌های هوشمند است. بهره‌برداری از ریز شبکه‌ها در حضور واحدهای تولید همزمان گرما و الکتریسیته و همچنین رفتار واحدهای CHP و همچنین ذخیره‌سازهای گرمایی در فعالیت‌های تحقیقاتی مختلفی موردبررسی قرارگرفته‌اند. در [۴]، استفاده از بویلر و ذخیره‌سازهای گرمایی به‌منظور افزایش انعطاف‌پذیری سیستم CHP در حضور توربین‌های بادی مورد ارزیابی قرارگرفته است. در [۵]، حضور واحدهای CHP به‌عنوان یکی از عوامل محدودکننده حضور توربین‌های بادی در شبکه معرفی‌شده است. در [۶]، دو مدل خطی به‌منظور برنامه‌ریزی تعیین تولید واحدهای CHP در حضور ذخیره‌سازهای انرژی باهدف هماهنگی با توربین‌های بادی ارائه‌شده است. در [۷]، مدلی برای بهره‌برداری بهینه از واحدهای CHP در محیط سیستم تجدید ساختار شده ارائه‌شده است. در این مدل تغییرات نسبت بار حرارتی به بار الکتریکی به‌صورت پویا تنظیم می‌شود. در [۸]، مدل واحدهای CHP در ریز شبکه‌ها ارائه‌شده است. استفاده از گرمای سیستم‌های تولید انرژی به‌منظور فراهم آوردن انرژی گرمایی در ریز شبکه علاوه بر بالا بردن راندمان تولید انرژی در شبکه می‌تواند نقش مهمی در تأمین نیاز مشترکین و تنظیم فرکانس در ریز شبکه داشته باشد. ازاین‌رو در [۸]، با مدل‌سازی دینامیکی رفتار CHP تا تنظیم فرکانس در ریز شبکه‌ها بر مبنای تنظیم خطای حالت پایدار فرکانس[†] شبکه مورد ارزیابی قرار داده‌شده است. در [۹]، به ارائه مدل تخصیص بهینه تولید در سیستم انرژی یکپارچه در حضور واحدهای سرمایش، گرمایش و توان پرداخته‌شده است. در این مدل، سیستم گاز طبیعی مدل‌سازی شده و قیود امنیتی این شبکه در مدل تخصیصی بهینه لحاظ شده است. در [۱۰]، به بررسی مسئله چندهدفه جایابی و تعیین ظرفیت بهینه واحدهای (CHP)[1] در شبکه‌های الکتریکی شامل بارهای حرارتی و گاز طبیعی پرداخته‌شده است. در [۱۱]، مسئله حضور واحدهای CHP در حضور ذخیره‌سازهای انرژی گرمایی طی یک مورد مطالعاتی در ایتالیا موردبررسی قرارگرفته است و اثر محرک‌های اولیه برای سیستم CHP نیز بررسی‌شده است. در [۱۲]، حضور بارهای الکتریکی در حضور بارهای حرارتی به‌عنوان یک نیاز برای مطالعه ریز شبکه‌ها مطرح‌شده و بارهای حرارتی را از دیدگاه میزان آب داغ و دمای مناسب ساختمان‌ها موردبررسی قرار داده است. در [۱۳]، برنامه‌ریزی پاسخگویی بار را برای واحدهای CHP با پیش‌بینی بارهای حرارتی کنترل‌پذیر موردبررسی قرار داده است. در [۱۴]، مسئله بهره‌برداری بهینه از ریز شبکه در حضور واحدهای CHP و برنامه‌ریزی پاسخگویی بار در حضور عدم قطعیت‌های موجود موردبررسی قرارگرفته است. در [۱۵]، مدل‌سازی ریاضی برای بهره‌برداری از ریز شبکه در حضور بارهای حرارتی و واحدهای CHP ارائه‌شده است. در [۱۶]، مدیریت انرژی در ریز شبکه در حضور واحدهای CHP و فتوولتائیک بررسی‌شده است. در [۱۷]، استفاده بهینه واحدهای تولید پراکنده در ریز شبکه‌ها شامل جایابی، تعیین ظرفیت و تعیین نوع این واحدها ارائه‌شده است. در [۱۸]، برنامه‌ریزی بهره‌برداری از ریز شبکه‌ها بر مبنای برنامه‌ریزی ورود و خروج نیروگاه‌ها در حضور واحدهای CHP انجام‌شده است. در [۱۹]، جایابی بهینه واحدهای CHP بر اساس ظرفیت سیستم‌های الکتریکی، آب و گاز طبیعی مورد ارزیابی قرارگرفته است و در [۲۰] و [۲۱]، با معرفی یک هاب انرژی مسئله پخش بار ترکیبی از سیستم‌های الکتریکی، گاز و حرارت ارائه‌شده است.

همان‌طور که از مطالب بالا برمی‌آید هر یک از مراجع ذکرشده بهره‌برداری از ریز شبکه در حضور بارهای حرارتی را از دیدگاهی موردبررسی قرار داده‌اند. اما در این میان مسئله بهره‌برداری از ریز شبکه به‌عنوان یک مسئله چندهدفه با اهداف فنی و اقتصادی در حضور واحدهای CHP و همچنین مدل ذخیره‌سازهای انرژی گرمایی کمتر موردبررسی قرارگرفته است. ازاین‌رو در این مقاله، بهره‌برداری چندهدفه از ریز شبکه متشکل از بلوک‌های حرارتی و تولیدات پراکنده بیان می‌شود. در این مسئله کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری تابع تلفات و تابع انحراف ولتاژ به‌عنوان توابع چندهدفه اقتصادی و فنی در مسئله بهره‌برداری ریز شبکه استفاده می‌شود. این مسئله مقید به معادلات پخش توان بهینه ریز شبکه در حضور تولیدات پراکنده مختلف، و قیود بلوک‌های حرارتی متشکل از منابع و ذخیره‌سازهای حرارتی می‌باشد. همچنین ساختار ذاتی این مسئله غیرخطی است که از الگوریتم بهینه‌سازی آموزش و

× Distributed Generation (DG)

† Steady-State-Error Frequency Regulation

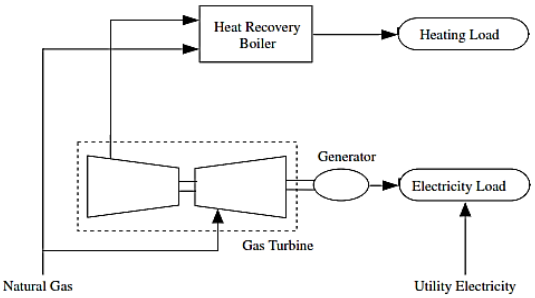
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.1 Spring 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

یادگیری (TLBO) برای حل آن استفاده می‌شود.

۲- تعاریف و مفاهیم اولیه

۲-۱- تولید همزمان برق و حرارت (CHP)

تولید همزمان برق و حرارت، یک روش صرفه‌جویی انرژی است که در آن برق و حرارت به‌طور همزمان تولید می‌شوند. حرارت حاصل از تولید همزمان می‌تواند به‌منظور گرمایش ناحیه‌ای‡ یا در صنایع فرآیندی مورداستفاده قرار گیرد. فرآیند تولید همزمان می‌تواند بر اساس استفاده از توربین‌های گاز، توربین‌های بخار یا موتورهای احتراقی بنانهاده شود و منبع تولید انرژی اولیه نیز شامل دامنه وسیعی است که می‌تواند سوخت‌های فسیلی، زیست‌توده، زمین‌گرمایی یا انرژی خورشیدی باشد. یک محرک اولیه (موتور یا توربین) انرژی شیمیایی سوخت را آزاد نموده و به توان مکانیکی در محور خروجی تبدیل می‌کند. در این موارد، محور محرک با یک ژنراتور کوپل شده و توان الکتریکی تولید می‌شود، از طرف دیگر، حداکثر راندمان موجود برای محرک اولیه دستگاه و مولد کمتر از ۵۰٪ است و این به معنی اتلاف بیش از نیمی از انرژی سوخت به‌صورت حرارت می‌باشد. مجموعه واحدهای تولید همزمان برق و حرارت متشکل از یک توربین گازی و یک بازیافت کننده حرارت می‌باشد. در شکل (۱)، مجموعه واحد CHP به همراه سایر متعلقات نشان داده‌شده است[۲۵].



شکل (۱): مجموعه واحد CHP به همراه سایر متعلقات[۲۵].

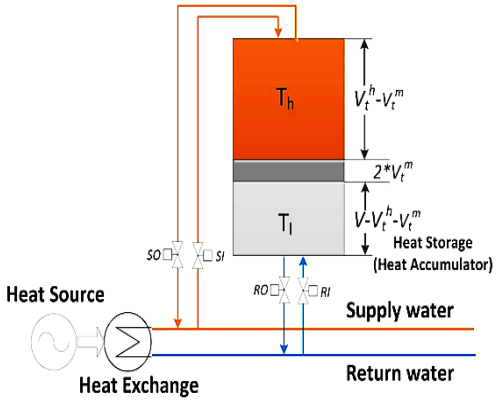
گاز طبیعی به‌عنوان محرک سیستم ژنراتور گازی در نظر گرفته می‌شود و از این طریق بخشی از نیاز به انرژی الکتریکی شبکه تأمین می‌گردد. گاز خروجی از مجموعه ژنراتور که در دمای بالایی قرار دارد توسط بازیافت کننده حرارت دریافت شده و از طریق آن بارهای حرارتی شبکه تأمین می‌گردد. چنانچه میزان حرارت مربوط به بار و ذخیره کننده‌های انرژی حرارتی که با توجه به وضعیت خود می‌توانند نقش تولیدکننده و یا مصرف‌کننده انرژی گرمایی را داشته باشند برای جبران میزان بارهای حرارتی شبکه کافی نباشد، از سوزاندن گاز طبیعی برای تولید انرژی گرمایی استفاده می‌شود. به‌طور مشابه، میزان بار الکتریکی مازاد از ظرفیت تولید انرژی الکتریکی واحد CHP توسط سایر واحدهای موجود در ریز شبکه و یا از شبکه بالادست تأمین می‌شود.

‡ District Heating

۲-۲- سیستم ذخیره‌ساز انرژی گرمایی

ذخیره ساز انرژی گرمایی از یک نوع فولاد ضدزنگ و به شکل استوانه‌ای ساخته می‌شود. این سیلندر ذخیره‌ساز به‌صورت لایه‌ای ساخته شده و این لایه‌ها از داخل به خارج به ترتیب عبارت‌اند از: فولاد، بتن و یک لایه از عایق گرمایی. این ذخیره‌ساز انرژی گرمایی به نحوی عایق‌بندی می شود که تلفات حرارتی آن بسیار پائین باشد به‌طوری‌که بتوان از این تلفات صرفه نظر کرد.

ارتباط بین ذخیره‌ساز انرژی گرمایی و سیستم گرماساز مطابق شکل (۲) می‌باشد[۴].



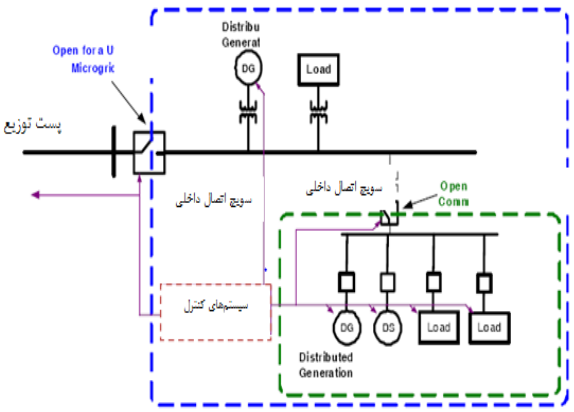
شکل (۲): سیستم ذخیره‌ساز انرژی گرمایی [۴]

شیر ورودی SI و شیر خروجی SO در بالای تانک هر دو به منبع تغذیه آب گرم متصل هستند درحالی‌که شیر ورودی RI و شیر خروجی RO در پائین تانک به لوله‌های برگشت آب در دمای پائین اتصال دارند. دمای آب موجود در تانک ذخیره‌ساز در سه لایه مختلف تقسیم‌بندی می‌شود. دمای آب در لایه بالایی با دمای آب در لوله‌های تغذیه‌کننده از منبع گرم ورودی برابری می‌کند که با T_h نشان داده می‌شود دمای آب در پائین ترین لایه با دمای آب در لوله‌های برگشت آب برابر است که با T_l نشان داده می‌شود. دمای آب در لایه میانی به‌تدریج از دمای بالا به دمای پائین تغییر می‌کند.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.1 Spring 2021

۲-۳- ساختار ریز شبکه

میکروگریدها یا ریز شبکه‌ها، شبکه‌های فشار ضعیفی هستند که شامل منابع انرژی توزیع‌شده یا DER § (نظیر میکرو توربین، سلول‌های خورشیدی و توربین‌های بادی)، ادوات الکترونیک قدرت، کلیدهای اتصال به شبکه و ذخیره کننده‌های توان (نظیر باتری) در حضور بارهای قابل‌کنترل به همراه یک سیستم کنترل مناسب می‌باشند. در شکل (۳)، شمای کلی از یک شبکه ریز شبکه نشان داده‌شده است[۲۲].



شکل (۳): شمای کلی از یک شبکه میکرو گرید[۲۲].

این شبکه‌ها در بالادست به شبکه فشار متوسط سراسری متصل شده و توانایی کار در حالت جدا از شبکه را نیز دارا می‌باشند. ریز شبکه دارای یک عملکرد هماهنگ بین پاسخگویی بار و تولید توسط منابع تولید پراکنده، در حضور بیشینه کردن سود رسیده به مشترکین و شبکه بالادست می‌باشد[۲۲]. با توجه به این‌که ریز شبکه می‌تواند در زمان بروز خطا با رفتن به حالت جزیره‌ای، توان مصرفی مشترکین خود را تأمین کند لذا قابلیت اطمینان در این شبکه‌ها نسبت به شبکه عادی به‌مراتب بیشتر خواهد بود[۲۳]. یکی از انگیزه‌های مهم برای تمایل به ریز شبکه‌ها، کاهش CO2 تولیدی با توجه به استفاده همزمان الکتریسیته و گرما توسط منابع CHP و استفاده از منابع انرژی نو می‌باشد[۲۴].

۳- مدل‌سازی واحدهای CHP و ذخیره کننده‌های انرژی حرارتی

مدلی که در این مقاله بر اســـاس آن فرمول‌بندی مربوط به رفتار واحدهای CHP انجام شده شامل دو فرض ا سا سی به شرح ذیل است:

- دمای گاز خروجی از توربین و بازیافت کننده حرارت ثابت فرض می‌شود.
- میزان بازده سیستم در طول بازه عملکرد آن ثابت فرض می‌شود.

اولین تابع هدف مسئله موردبررسی، مربوط به هزینه‌های بهره‌برداری از ریز شبکه است که شامل هزینه‌های مربوط به تأمین بار الکتریکی، بار حرارتی و میزان توان های الکتریکی و حرارتی مبادله شده با ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی و حرارتی و شبکه فشار متوسط است.

۳-۱- هزینه‌های مربوط به بهره‌برداری از واحدهای CHP

هزینه‌های مربوط به بهره‌برداری از واحدهای CHP شامل هزینه‌های خرید گاز برای تولید انرژی الکتریکی و حرارتی است. میزان توان تولیدشده توسط توربین‌های گازی تابعی میزان از بارگذاری توربین و بیشینه حد بارگذاری آن است و به‌صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود[۲۵]:

$$E_{turbine} = LF \times W_{turbine} \qquad (۱)$$

LF نســـبت میزان خروجی واقعی توربین به پیک ظرفیت و $W_{turbine}$ بیشینه حد بارگذاری آن است.

با تقسیم این مقدار بر بازده تبدیل گاز به الکتریسیته و میزان ظرفیت حرارتی گاز طبیعی، میزان گاز موردنیاز جهت دستیابی به میزان الکتریسیته موردنظر محاسبه می‌شود[۲۵].

$$G_{turbine} = \frac{E_{turbine}}{\eta_{turbine} \times HV_{gas}} \qquad (۲)$$

$\eta_{turbine}$ بازده گاز به الکتریســـیته در توربین و HV_{gas} میزان ظرفیت حرارتی گاز طبیعی (kWh/m^3) ا ست. همچنین $G_{turbine}$ میزان گاز طبیعی مورداستفاده در توربین است.

میزان حرارت در د سترس در خروجی واحدهای تولید همزمان الکتریسیته و حرارت از ضرب توان الکتریکی تولیدی توسط واحد و نســـبت میزان انرژی گاز که به انرژی الکتریکی تبدیل نشـــده محا سبه می شود. میزان حرارتی که به انرژی تبدیل نمی شود نیز از کم کردن بازده گاز به الکتریســـیته توربین و بازده حرارتی سیستم از یک به دست می‌آید[۲۵].

$$Q_{Texh} = \frac{E_{turbine} \times (1 - \eta_{turbine} - \eta_{loss})}{\eta_{turbine}} \qquad (۳)$$

η_{loss} بازده تلفات حرارتی توربین و Q_{Texh} میزان حرارت ایجادشده ناشی از گازهای خروجی توربین است.

میزان حرارت تأمین‌شـده توسـط حرارت خروجی از توربین، از

§ Distributed Energy Resources

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.1 Spring 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

ضرب مقدار حرارت خروجی توربین در بازده بازیابی حرارتی بویلر می‌شود.

$$Q_{EGheat} = Q_{Texh} \times \eta_{HRboiler} \quad (۴)$$

$\eta_{HRboiler}$ بازده قسمت بازیافت حرارتی را نشان می‌دهد.

میزان گاز موردنیاز برای ورود به بویلر بازیابی حرارت به‌منظور تأمین بار که توسط حرارت خروجی توربین برآورده نشده است از تقسیم میزان حرارت تأمین نشده بر حاصل‌ضرب بازده بویلر در ظرفیت حرارتی گاز محاسبه می‌شود.

$$G_{RHheat} = \frac{Q_{heat} - Q_{EGheat}}{\eta_{bioler} \times HV_{gas}} \quad (۵)$$

Q_{heat} میزان بار حرارتی کل شبکه و G_{RHheat} میزان گاز مورداستفاده در قسمت بازیافت حرارتی بویلر به‌منظور تأمین مازاد انرژی حرارتی موردنیاز جهت تأمین بار حرارتی شبکه است. بنابراین میزان کل گاز مورداستفاده جهت تأمین بارهای حرارتی شبکه به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Gastotal = G_{turbine} + G_{RHheat} \quad (۶)$$

این مقدار برای محاسبه تابع هدف هزینه‌های بهره‌برداری از ریز شبکه مورداستفاده قرار می‌گیرد.

نکته مهم دیگر در بررسی رفتار واحدهای CHP، نحوه تعامل با ذخیره‌سازهای انرژی گرمایی است که در ادامه، این مسئله ارائه می‌شود.

۲-۳- فرمول‌بندی نحوه تعامل CHP با ذخیره کننده‌های انرژی گرمایی

ذخیره‌کننده‌های انرژی گرمایی تجهیزاتی هستند که انرژی گرمایی را به فرم آب گرم ذخیره‌سازی می‌کنند. شارژ و دشارژ این ذخیره‌سازها با زیاد و یا کم شدن آب موجود در منابع ذخیره‌ساز تعریف می‌شود. لازم به ذکر است که هر دو مرحله شارژ و دشارژ با تلفات همراه خواهد بود. همچنین، مقداری از حرارت آب ذخیره‌شده از طریق تابش خارج می‌شود که می‌بایست در مدل‌سازی ذخیره‌ساز در ابتدای هر مرحله لحاظ شود. چنانچه در بازه زمانی t هیچ‌گونه شارژ و دشارژی در ذخیره‌ساز اتفاق نیفتد، ارتباط بین رابطه بین میزان حرارت ذخیره‌شده در ساعات t و t-1 با استفاده از رابطه زیر به هم مربوط می‌شود[۲۶].

$$h_t = (1-\alpha) h_{t-1} \quad (۷)$$

h_t میزان حرارت موجود در زمان t، h_{t-1} میزان حرارت موجود در ذخیره‌ساز در زمان t-1، α میزان حرارت ازدست‌رفته در طول بازه زمانی t است که این بازه زمانی می‌تواند بین ۱ تا ۲۴ باشد[۲۶].

متغیر t هم به بازه زمانی و هم به طول بازه زمانی اشاره دارد. از طرفی، بازه زمانی t همواره بین زمان t-1 تا زمان t قرار دارد. با توجه به این نکات می‌توان بیان کرد که تعداد ۲۴ عدد معادله در رابطه با توازن حرارتی وجود دارد.

اکنون فرض می‌شود که در بازه زمانی t میزان بار حرارتی به مقدار q_t^{load} از طرف سیستم تأمین‌کننده حرارت دریافت شده باشد و به‌منظور شارژ کردن ذخیره‌ساز حرارتی مورداستفاده قرار گیرد. چنانچه فرض شود β^{laod} سهم تلفات در پروسه شارژ کردن باشد بنابراین $(1-\beta^{laod})q_t^{load}$ به میزان انرژی گرمایی ذخیره‌شده در سیستم افزوده می‌شود[۲۶].

مقداری از انرژی گرمایی حتی در حالت عدم شارژ و دشارژ سیستم نیز تلف می‌شود؛ بنابراین برای تکمیل کردن میزان انرژی ذخیره‌شده در سیستم ذخیره‌ساز می‌بایست هر دو مورد ذکرشده را به‌صورت همزمان در نظر بگیریم که نتیجه آن به‌صورت زیر بیان می‌شود[۲۶].

$$h_t = (1-\alpha) h_{t-1} + (1-\beta^{laod}) q_t^{load} - 0.5\alpha(1-\beta^{laod}) q_t^{load} \Rightarrow \quad (۸)$$
$$h_t = (1-\alpha) h_{t-1} + (1-0.5\alpha)(1-\beta^{laod}) q_t^{load}$$

پارامتر γ^{load} جهت تسهیل در نوشتن به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma^{load} = (1-0.5\alpha)(1-\beta^{laod}) \quad (۹)$$

اما در مورد پروسه دشارژ، چنانچه در بازه زمانی t سیستم به‌اندازه q_t^{unld} حرارت به سیستم تحویل دهد و یا به عبارتی دشارژ شود، میزان تخلیه حرارت از مجموعه ذخیره‌ساز سیستم برابر است با $(1+\beta^{unld})\,q_t^{unld}$. چنانچه میزان تلفات سیستم در حین دشارژ شدن ذخیره‌ساز انرژی قابل‌توجه باشد این مقدار نیز باید از خروجی سیستم کم شود، $0.5\alpha(1+\beta^{unld})\,q_t^{unld}$؛ بنابراین در حالت دشارژ معادله توازن انرژی حرارتی برای ذخیره‌ساز به‌صورت زیر نوشته می‌شود[۲۶].

به‌طور مشابه می‌توان تعریف کرد:

$$h_t = (1-\alpha) h_{t-1} - (1+\beta^{unld}) q_t^{unld} + 0.5\alpha(1+\beta^{unld}) q_t^{unld} \Rightarrow \quad (۱۰)$$
$$h_t = (1-\alpha) h_{t-1} - (1-0.5\alpha)(1+\beta^{unld}) q_t^{unld}$$

$$\gamma^{unld} = (1-0.5\alpha)(1+\beta^{unld}) \quad (۱۱)$$

با ترکیب معادلات مربوط به شارژ و د شارژ سیستم رابطه زیر حاصل می‌شود:

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.1 Spring 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

$$h_t = (1-\alpha)h_{t-1} + \gamma^{load} q_t^{load} - \gamma^{unld} q_t^{unld} \quad (۱۲)$$

بنابراین با مشخص بودن میزان شارژ و دشارژ در ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی می‌توان علاوه بر مشخص کردن میزان انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز برای ساعات بعد میزان بار حرارتی مجموع شبکه جهت تأمین توسط واحدهای CHP و یا تأمین به‌وسیله گاز طبیعی را نیز مشخص کرد.

به‌طورکلی میزان بار حرارتی کل شبکه در هر ساعت از طول روز را می‌توان به‌صورت زیر مشخص کرد:

$$q_t^{total} = q_t^{net} + q_t^{load} - q_t^{unld} \quad (۱۳)$$

علامت‌ها در این رابطه با توجه به وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز انرژی حرارتی تعیین‌شده است. q_t^{total} مجموع بار حرارتی شبکه در زمان t و q_t^{net} میزان بار حرارتی مربوط به مصرف‌کننده‌های حرارتی در سطح شبکه است.

۴- فرمول‌بندی مسئله

۴-۱- الگوریتم تکاملی TLBO

الگوریتم TLBO[۵] یک الگوریتم بهینه‌سازی مدرن بر پایه جمعیت است که این جمعیت همان اعضای کلاس هستند و بر اساس فرآیند آموزش یادگیری در یک کلاس شکل‌گرفته است. الگوریتم TLBO از توانایی یادگیری در کلاس درس و آموزش معلم کلاس به دانش‌آموزان برای ارتقای سطح تحصیلی کلاس بهره می‌برد. معلم و دانش‌آموزان دو عنصر اصلی الگوریتم TLBO هستند. بر همین اساس، فاز معلم و فاز دانش‌آموز دو قسمت مهم و اصولی این الگوریتم را تشکیل می‌دهند. رویه بهینه‌سازی انجام‌شده بر روی جمعیت کلاس را می‌توان به دو قسمت فاز معلم و فاز دانش‌آموز تقسیم کرد[۲۷].

۴-۱-۱- فاز معلم

این فاز قسمت اول الگوریتم را تشکیل می‌دهد. دانش‌آموزان سعی می‌کنند سطح دانش و نمرات خود را بر اساس سطح اطلاعات و دانش معلم بهبود دهند. در طی این فرآیند معلم تلاش می‌کند تا از تمام قابلیت‌های خود استفاده کند تا نتیجه میانگین کلاس یعنی $Mean^k$ را به سمت سطح دانش خود یعنی $Teacher^k$ افزایش دهد. درنتیجه این اختلاف سطح دانش بین میانگین کلاس و معلم به شکل زیر فرمول‌بندی می‌شود.

$$Diference_Mean^k = Teacher^k - TF^k \times Mean^k \quad (۱۴)$$

در این فرمول، TF^k ضریب یادگیری است که میزان حرکت میانگین به سمت معلم را کنترل می‌کند و مقدار آن به‌صورت احتمالی ۱ یا ۲ انتخاب می‌شود و از رابطه round(1+rand(0)) تبعیت می‌کند.

با توجه به رابطه (۱۴)، هر یک از دانش‌آموزان بر اساس رابطه زیر موقعیت جدید خود را به‌روز می‌کنند.

$$X_{new1}^k = X_{old1}^k + rand(0) \times Diference_Mean^k \quad (۱۵)$$

در این رابطه X_{new1}^k و X_{old1}^k به ترتیب موقعیت جدید و قدیم دانش‌آموز k ام هستند. اگر جواب جدید تولیدشده دارای تابع هدف بهتری ازنقطه‌نظر بهینه‌سازی مسئله باشد جایگزین جواب قبلی می‌شود در غیر این صورت همان جواب قبلی در جمعیت حفظ می‌شود[۲۷].

۴-۱-۲فاز دانش‌آموز

این فاز، قسمت دوم فرآیند بهینه‌سازی TLBO را تشکیل می‌دهد که در آن دانش‌آموزان سطح دانش و اطلاعاتشان را برای فعل‌وانفعالات و مصالحه بین خودشان افزایش می‌دهند. هر دانش‌آموز به صورت تصادفی یکی دیگر از دانش‌آموزان را انتخاب کرده و بر اساس رابطه زیر سطح دانش خود را تغییر می‌دهد:

$$X_{new2} = \begin{cases} X_i + rand(.)(X_i - X_j) & if\ f(X_i) < f(X_j) \\ X_i + rand(.)(X_j - X_i) & else \end{cases} \quad i \neq j$$

(۱۶)

اگر این تغییر سطح دانش باعث شود تا نمره دانش‌آموز بهتر شود این موقعیت جایگزین موقعیت قبلی می شود، در غیر این صورت همان موقعیت قبلی در فضای جستجو می‌ماند[۲۷].

۴-۱-۳- بهینه‌سازی چندهدفه TLBO[××]

یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه شامل مجموعه‌ای از n پارامتر یا متغیر تصمیم‌گیری، مجموعه‌ای k تایی از توابع هدف و مجموعه‌ای از m قید است. هدف از بهینه‌سازی عبارت است از:

$$\begin{aligned} &\min imize \quad f(x) = (f_1(x), f_2(x), ..., f_k(x)) \\ &subject\ to \quad e(x) = (e_1(x), e_2(x), ..., e_m(x)) \le 0 \\ &where \quad x = (x_1, x_2, ..., x_n) \in X \\ &y = (y_1, y_2, ..., y_n) \in Y \end{aligned}$$

(۱۷)

در این رابطه، x بردار تصمیم‌گیری، y بردار هدف، X فضای تصمیم‌گیری و Y فضای هدف هستند. همچنین قیود e(x) مجموعه جواب‌های عملی را مشخص می‌کنند.

در مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، مفهوم غلبگی پرتو[††] برای هر

[۵] Multi-Objective Optimization Problem

[††] Pareto dominance

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.1 Spring 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

یک از دو بردار تصمیم‌گیری a و b به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

- a>b (a بر b غلبه کرده) اگر و تنها اگر f(a)>f(b)
- a>=b (a به‌طور ضعیفی بر b غلبه کرده) اگر و تنها اگر f(a)>=f(b)
- a~b (a نسبت به b بی‌تفاوت است) اگر و تنها اگر:

$$f(a) \not\geq f(b) \wedge f(b) \not\geq f(a)$$

اجرای چندهدفه TLBO (MTLBO) به روش پرتو به‌صورت زیر است:

الف) تعریف توابع هدف، قیود و متغیرهای مسئله بهینه‌سازی و محدوده مجاز متغیرها

ب) مقداردهی اولیه و تولید جمعیت اولیه

- ابتدا جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی ساخته می‌شود.
- جمعیت بر اساس توابع هدف تعریف‌شده ارزیابی می‌گردد.
- جمعیت بر اساس مفهوم بهینه پرتو رتبه‌بندی و اعضای مغلوب نشده آن به حافظه جمعیت منتقل می‌شود.

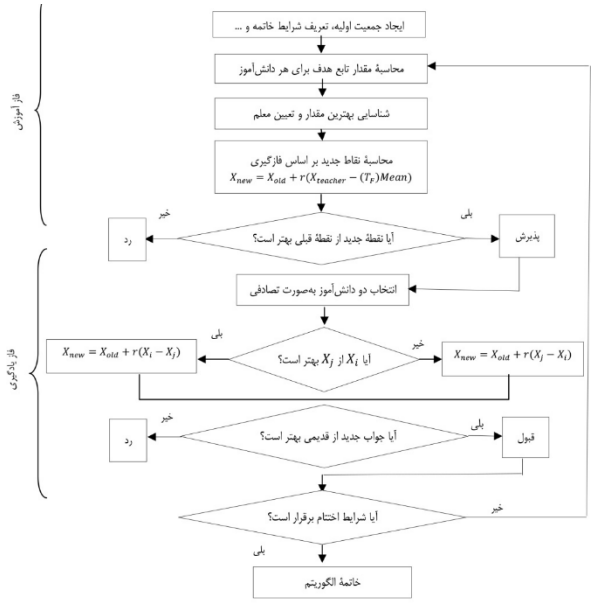
ج) تولید جمعیت جدید با استفاده از الگوریتم TLBO

- در این مرحله ابتدا تعداد معینی از جمعیت برتر مغلوب نشده انتخاب و به حافظه جمعیت منتقل می‌شود.
- با استفاده از اولین عضو جمعیت برتر مغلوب نشده از مرحله قبل، تعداد معینی پاسخ به دست می‌آید.
- مرحله بالا تکرار می‌شود تا از کل حافظه جدید پاسخ‌های جدیدی به دست آید.
- جمعیت جدید به‌دست‌آمده ارزیابی‌شده و مقادیر توابع هدف محاسبه می‌شوند.

د) به‌روزرسانی حافظه جمعیت

- ابتدا جمعیت جدید و حافظه جمعیت با یکدیگر مخلوط شده و اعضای تکراری آن حذف می‌شود.
- حافظه ترکیبی رتبه‌بندی پرتو و با استفاده از اعضای مغلوب نشده حافظه جمعیت به‌روزرسانی می‌گردد.
- اگر درمرحله قبل، تعداد پاسخ‌های هم‌رتبه برای به‌روزرسانی حافظه جمعیت بیش از ظرفیت حافظه باشد پاسخ‌های بافاصله ازدحامی بیشتر انتخاب و بقیه حذف می‌شوند.
- چنانچه شرط اتمام الگوریتم ارضا نشده باشد مراحل ج و د دوباره تکرار می‌شود، در غیر این صورت، حافظه جمعیت به‌عنوان مجموعه جواب بهینه معرفی می‌شود.

فلوچارت الگوریتم TLBO در شکل(۴) نشان داده‌شده است[۳۷].



شکل(۴) :فلوچارت الگوریتم TLBO [۳۷].

۴-۲- متغیرهای کنترلی مسئله بهینه‌سازی

متغیرهای کنترلی در یک مسئله بهینه‌سازی آن دسته از کمیت‌ها هستند که در اختیار بهره‌بردار قرار دارند و با تغییر در مقدار آن‌ها البته در محدوده مجاز می‌توان مقادیر توابع هدف را تغییر داد.

در رابطه با مسئله موردبررسی در این مقاله این متغیرها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$POP = [\bar{P}_{MT}, \bar{P}_{CHP}, \bar{H}_{load}, \bar{H}_{unld}, \bar{S}, \bar{P}_{Bat}]_{N_{pop} \times n}$$

$$\bar{P}_{MT} = [\bar{P}_{MT,1}, \bar{P}_{MT,2}, ..., \bar{P}_{MT,N_{MT}}]_{N_{pop} \times (N_{MT} \times 24)}$$

$$\bar{P}_{MT,i} = [P^1_{MT,i}, P^2_{MT,i}, ..., P^T_{MT,i}]_{1 \times T} \quad T = 24, i = 1, 2, ..., N_{MT}$$

$$\bar{P}_{CHP} = [\bar{P}_{CHP,1}, \bar{P}_{CHP,2}, ..., \bar{P}_{CHP,N_{CHP}}]_{N_{pop} \times (N_{CHP} \times 24)}$$

$$\bar{P}_{CHP,i} = [P^1_{CHP,i}, P^2_{CHP,i}, ..., P^T_{CHP,i}]_{1 \times T} \quad T = 24, i = 1, 2, ..., N_{CHP}$$

$$\bar{H}_{load} = [\bar{H}_{load,1}, \bar{H}_{load,2}, ..., \bar{H}_{load,N_{ST}}]_{N_{pop} \times (N_{ST} \times 24)}$$

$$\bar{H}_{load,i} = [H^1_{load,i}, H^2_{load,i}, ..., H^T_{load,i}]_{1 \times T} \quad T = 24, i = 1, 2, ..., N_{ST}$$

$$\bar{H}_{unld} = [\bar{H}_{unld,1}, \bar{H}_{unld,2}, ..., \bar{H}_{unld,N_{ST}}]_{N_{pop} \times (N_{ST} \times 24)}$$

$$\bar{H}_{unld,i} = [H^1_{unld,i}, H^2_{unld,i}, ..., H^T_{unld,i}]_{1 \times T} \quad T = 24, i = 1, 2, ..., N_{ST}$$

$$\bar{S} = [\bar{S}_{1_2,1}, \bar{S}_{1_2,2}, ..., \bar{S}_{1_2,N_{ST}}]_{N_{pop} \times (2N_{ST} \times 24)}$$

$$\bar{S}_{1_2,i} = [S^1_{1,i}, S^1_{2,i}, S^2_{1,i}, S^2_{2,i}, ..., S^T_{1,i}, S^T_{2,i}] \quad T = 24, i = 1, 2, ..., N_{ST}$$

$$\bar{P}_{BAT} = [\bar{P}_{Bat,1}, \bar{P}_{Bat,2}, ..., \bar{P}_{Bat,N_{BAT}}]_{N_{pop} \times (N_{BAT} \times 24)}$$

$$\bar{P}_{BAT,i} = [P^1_{BAT,i}, P^2_{BAT,i}, ..., P^T_{BAT,i}]_{1 \times T} \quad T = 24, i = 1, 2, ..., N_{BAT}$$

(۱۸)

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.1 Spring 2021

POP بردار جمعیت اولیه ا ست. $\overline{P}_{MT}$ بردار میزان توان تولیدی برای تمام میکرو توربین‌ها در تمامی ساعات روز است. علامت بردار در بالای متغیرها نشان‌دهنده وضعیت متغیر کنترلی مربوطه برای تمام طول روز به تعداد ادواتی ا ست که از آن متغیر در شبکه وجود دارد. به‌عنوان‌مثال اگر تعداد سه واحد میکرو توربین در شبکه وجود داشته باشد بردار یادشده وضعیت هر سه واحد میکرو توربین در طول ۲۴ ساعت روز را در خود جای‌داده است. با توجه به این توضیح می‌توان گفت $\overline{P}_{CHP}$، $\overline{H}_{load}$، $\overline{H}_{unld}$، $\overline{S}$ به ترتیب بردارهای مربوط به میزان توان الکتریکی تولیدی توسط واحدهای CHP، میزان شارژ ذخیره‌سازهای گرمایی، میزان دشارژ ذخیره‌سازهای انرژی و بردار مشخص‌کننده وضعیت شارژ و دشارژ واحدهای ذخیره کننده انرژی است. $\overline{P}_{MT,1}$ برداری است برای تعیین وضعیت اولین واحد میکرو توربین در طول ۲۴ ساعت روز. به همین ترتیب این بردارها به تعداد واحدهای میکرو توربین (N_{MT}) تعریف می‌شوند. با این تعریف می‌توان گفت که $\overline{P}_{CHP,1}$، $\overline{H}_{load,1}$، $\overline{H}_{unld,1}$، $\overline{S}_{1_2,1}$ بردارهایی در بردارنده وضعیت توان تولیدی اولین واحد CHP، میزان شارژ اولین ذخیره کننده حرارتی، میزان دشارژ اولین ذخیره کننده انرژی حرارتی و وضعیت شارژ و دشارژ اولین ذخیره کننده انرژی حرارتی در طول ۲۴ ساعت روز است. این بردارها به ترتیب به تعداد واحدها CHP (N_{CHP}) و تعداد ذخیره کننده‌های انرژی حرارتی (N_{ST}) تکرار می‌شوند. $P^1_{MT,i}$ میزان توان تولیدی توسط i امین واحد میکرو توربین در اولین ساعت روز است و این مقدار برای تمامی ساعت روز یا به عبارتی به تعداد ۲۴ مقدار تعیین می‌شود. به همین ترتیب می‌توان گفت که $P^1_{CHP,i}$، $H^1_{load,i}$، $H^1_{unld,i}$، $S^1_{1,i}, S^1_{2,i}$ میزان توان تولیدی اولین واحد CHP در اولین ساعت، میزان شارژ اولین ذخیره کننده انرژی، میزان دشارژ اولین ذخیره کننده انرژی و متغیرهایی که تعیین می‌کنند که در اولین ساعت برای اولین ذخیره کننده انرژی عملیات شارژ و یا دشارژ اتفاق بیفتد. $\overline{P}_{Bat,1}$ میزان توان مبادله شده با اولین باتری در طی روز است. $P^1_{BAT,i}$ میزان توان مبادله شده با باتری i در اولین ساعت از روز است.

۴-۳- توابع هدف مسئله بهینه‌سازی

توابع هدفی که در این مقاله فرمول‌بندی می‌شوند عبارت‌اند از هزینه‌های بهره‌برداری از ریز شبکه در حضور واحدهای CHP و ذخیره‌سازهای حرارتی، میزان تلفات شبکه و میزان انحرافات ولتاژ شبکه که در ادامه به‌اختصار معرفی می‌شوند[۲۵].

۴-۳-۱- تابع هدف هزینه‌های بهره‌برداری از ریز شبکه

با توجه به مطالب بیان‌شده در بالا می‌توان تابع هدف هزینه‌های بهره‌برداری از ریز شبکه را به‌صورت زیر فرمول‌بندی کرد:

$$Cost1 = P_{sub} \times C_{sub} + Gastotal \times C_{gas} \times \eta_{bioler} \times HV_{gas} - C_{heat} \times Heat_{total} + \sum_{i=1}^{N_{MT}} P_{MT} \times C_{MT} + \sum_{i=1}^{N_{PV}} P_{PV} \times C_{PV} + \sum_{i=1}^{N_{WT}} P_{WT} \times C_{WT} \quad (۱۹)$$

باید توجه کرد که P_{sub} میزان توان الکتریکی دریافتی از شبکه، C_{sub} هزینه خرید انرژی از شبکه و یا همان قیمت بازار است، C_{gas} هزینه خرید گاز طبیعی، C_{heat} قیمت فروش انرژی گرمایی به مصرف‌کنندگان، P_{MT} میزان توان دریافتی از واحدهای میکرو توربین، N_{MT} تعداد واحدهای میکرو توربین نصب‌شده در شبکه، C_{MT} قیمت خرید انرژی از واحدهای میکرو توربین، P_{PV} میزان توان دریافتی از واحدهای فتوولتائیک، N_{PV} تعداد واحدهای فتوولتائیک نصب‌شده در شبکه، C_{PV} قیمت خرید انرژی از واحدهای فتوولتائیک است. همچنین، P_{WT} میزان توان دریافتی از واحدهای توربین بادی، N_{WT} تعداد واحدهای توربین بادی نصب‌شده در شبکه، C_{WT} قیمت خرید انرژی از واحدهای توربین بادی است.

در فرمول (۲۰) میزان حرارتی که به شبکه فروخته می‌شود در حقیقت مازاد میزان بارهای حرارتی موجود در ریز شبکه و میزان جابجا شده با ذخیره سازهای انرژی ا ست و می‌توان آن را به‌صورت زیر فرمول‌بندی کرد.

$$Heat_{total} = H_{gen} - (H_{rq} + S_1 H_{load} - S_2 H_{unld}) \quad (۲۰)$$

H_{gen} میزان حرارت تولید شده توسط واحدهای CHP و یا حرارتی است که به‌صورت مستقیم توسط بویلرها تولید می‌شود. H_{rq} میزان بار حرارتی موردنیاز ریز شبکه است. از طرفی باید توجه داشته باشیم که ذخیره‌ساز انرژی حرارتی می‌تواند به‌عنوان یک بار و یا یک تولیدکننده انرژی گرمایی در برنامه‌ریزی حضور داشته باشد در زمان شارژ میزان این انرژی حرارتی به بار افزوده می‌شود و در زمان دشارژ میزان انرژی حرارتی از بار کاسته می‌شود. متغیرهای کنترل‌کننده شارژ ذخیره‌ساز (H_{load}) و دشارژ ذخیره‌ساز (H_{unld})، S_1 و S_2 هستند که نمی‌توانند به‌صورت همزمان یک شوند.

البته باید توجه داشت که هزینه انرژی الکتریکی تولیدشده توسط واحدهای تولیدکننده همزمان الکتریسیته و حرارت در روابط بالا دیده‌شده است و نیازی به محاسبه مجدد نیست.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.1 Spring 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

۴-۳-۲- تابع هدف میزان تلفات شبکه

ازجمله توابع هدف دیگر که در مسئله بهره‌برداری از ریز شبکه در نظر گرفته می‌شود می‌توان به توابع هدف تلفات و انحرافات-ولتاژ ریز شبکه اشاره کرد که به‌صورت زیر فرمول‌بندی می‌شوند:

$$Cost2 = \sum_{br=1}^{N_{br}} \sum_{t=1}^{24} R_{br} I_{br}^2 \quad (۲۱)$$

R_{br} میزان مقاومت اهمی شاخه‌های ریز شبکه، N_{br} تعداد شاخه‌های ریز شبکه و I_{br} میزان جریان الکتریکی شاخه‌های شبکه است.

۴-۳-۳- تابع هدف میزان انحراف ولتاژ باس ها از مقدار نامی

چنانچه مقدار ولتاژ نامی باس ها را برابر با یک پریونیت در نظر بگیریم مقدار انحراف ولتاژ باس ها از مقدار نامی به‌عنوان یک تابع هدف می‌تواند به‌صورت زیر فرمول‌بندی شود.

$$Cost3 = \sum_{bus=1}^{N_{bus}} \sum_{t=1}^{24} \left| \frac{vol_{bus}^{nom} - vol_{bus}^{t}}{vol_{bus}^{nom}} \right| \quad (۲۲)$$

مسئله چندهدفه زمانی معنا و مفهوم پیدا می‌کند که چندین تابع هدف برای یک مسئله به‌صورتی تعریف شوند که بهینه کردن یکی از توابع هدف وضعیت سایر توابع هدف را خراب نکند. در چنین حالتی نمی‌توان یک پاسخ را برای مسئله پیدا کرد که به‌طور همزمان تمامی توابع هدف را بهینه کند. در چنین مواقعی مفهوم نسبیت پیدا می‌شود. به عبارتی باید به دنبال جوابی برای مسئله باشیم که بتواند تا حدی شرایط بهینه بودن برای هر یک از توابع هدف را برآورده کند. یکی از انواع روش‌های حل مسئله چندهدفه استفاده از روش تعامل فازی است که فرمول‌بندی این روش به‌صورت زیر ارائه می‌شود.

$$\mu_z(X) = \max_{i=1,\ldots,m} (\mu_{ref_i} - \mu_{of_i}(X))$$

$$best_sol = \min(\mu_z(X)) = \min < \max_{i=1,\ldots,m} (\mu_{ref_i} - \mu_{of_i}(X)) > \quad (۲۳)$$

μ_{ref_i} و μ_{of_i} به ترتیب مقدار مرجع برای مقدار فازی شده هر تابع هدف و مقدار فازی شده برای تابع هدف i ام‌است و m تعداد کل توابع هدف است.

۴-۴- قیود مسئله بهینه‌سازی

مسئله بهینه سازی تعریف شده چندین قید را به همراه خود دارد که در ادامه به بررسی آن‌ها می‌پردازیم.

- محدودیت توان اکتیو واحدهای CHP

$$E_{turbine}^{\min} \le E_{turbine}^{t} \le E_{turbine}^{\max} \quad (۲۴)$$

بالانویس‌های max و min به ترتیب نشان‌دهنده بیشترین و کمترین میزان توان تولیدی واحد است.

محدودیت میزان توان حرارتی واحدهای CHP

$$Q_{Texh}^{\min} \le Q_{Texh}^{t} \le Q_{Texh}^{\max} \quad (۲۵)$$

محدودیت توان حرارتی بازیافت شده توسط بویلر

$$Q_{EGheat}^{\min} \le Q_{EGheat}^{t} \le Q_{EGheat}^{\max} \quad (۲۶)$$

محدودیت میزان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز انرژی

$$H_{load}^{\min} \le H_{load}^{t} \le H_{load}^{\max} \quad (۲۷)$$

$$H_{unld}^{\min} \le H_{unld}^{t} \le H_{unld}^{\max} \quad (۲۸)$$

محدودیت میزان حرارت ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز انرژی

$$H_{rmn}^{t} \le H^{\max} \quad (۲۹)$$

H_{rmn}^{t} میزان انرژی حرارتی ذخیره در ذخیره‌ساز انرژی حرارتی در زمان t است.

عدم شارژ و دشارژ همزمان ذخیره‌ساز انرژی

همان‌طور که در رابطه (۲۶) نوشته شد، دو متغیر S1 و S2 به ترتیب نشان‌دهنده وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز هستند که می‌بایست در رابطه زیر صدق کنند.

$$S_1 + S_2 = 1 \quad (۳۰)$$
$$S_1 = 0 or 1$$
$$S_2 = 0 or 1$$

محدودیت توان تولیدی توسط واحدهای فتوولتائیک و توربین‌های بادی

$$P_{PV(\mathrm{WT})}^{t,\min} \le P_{PV(\mathrm{WT})}^{t} \le P_{PV(\mathrm{WT})}^{t,\max} \quad (۳۱)$$

محدودیت توان تولیدی توسط واحدهای میکرو توربین

$$P_{MT}^{t,\min} \le P_{MT}^{t} \le P_{MT}^{t,\max} \quad (۳۲)$$

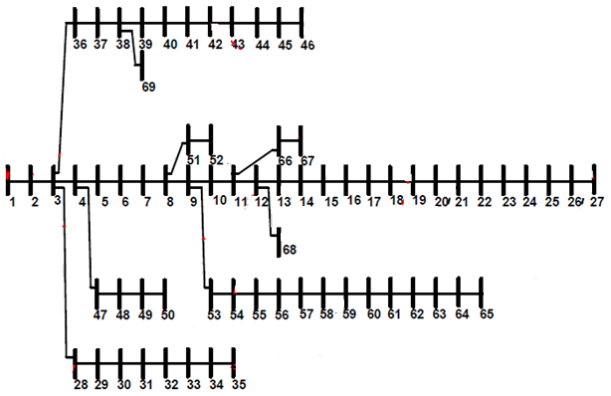
سطوح بودن توان واحدهای تولید پراکنده و همچنین میزان توان تولیدی توسط واحدهای تولید همزمان الکتریسیته می‌توان از روش نیوتن رافسون پخش بار گرفت و میزان جریان عبوری از خطوط و درنتیجه میزان تلفات شبکه را به دست آورد؛ و از این طریق می‌توان میزان تلفات انرژی را در شبکه به دست آورد. همچنین پس از پخش بار بر روی شبکه میزان ولتاژ باس های مختلف نیز تعیین می‌شود و می‌توان میزان فاصله ولتاژ باس ها از ولتاژ یک پریونیت را محاسبه کرد و به‌عنوان تابع هدف انحرافات ولتاژ شبکه در نظر گرفت.

۵- نتایج شبیه‌سازی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.1 Spring 2021

۵-۱- شبکه موردمطالعه

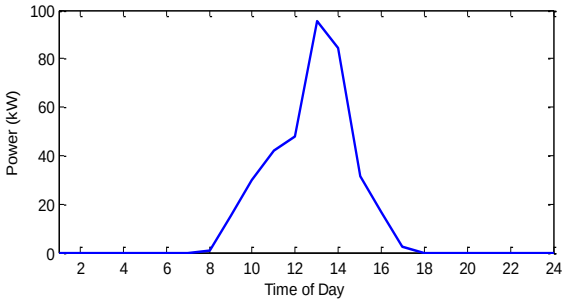
شبکه موردمطالعه یک شبکه با ۶۹ شین می‌باشد که نمودار تک‌خطی آن در شکل (۵) و مکان تولیدات پراکنده و بلوک‌های حرارتی در ریز شبکه در جدول(۱) نمایش داده‌شده است [۳۶]. این شبکه در حالت پایه باری معادل ۳۸۰۲ کیلووات و ۲۶۹۴کیلووار است که این بارها در منحنی ضریب بار ضرب شده تا مقدار نهایی بار به دست آید[۳۵]. به‌منظور بررسی مدل پیشنهادشده در این مقاله با شبکه یادشده تعدادی از واحدهای تولید پراکنده و واحدهای تولید همزمان گرما و الکتریسیته بر روی شبکه نصب‌شده است. این واحدها شامل سه واحد توربین بادی، سه واحد CHP، سه واحد فتوولتائیک، سه واحد میکرو توربین و دو واحد ذخیره کننده انرژی است که مکان آن‌ها در جدول (۱) نشان شده است. بیشترین توان تولیدی واحدهای میکرو توربین و تولیدکننده‌های همزمان گرما و الکتریسیته برابر ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلووات است. بیشترین ظرفیت واحدهای ذخیره‌ساز انرژی نیز ۱۰۰ کیلووات است که با نرخ ۳۰ کیلووات ساعت می‌تواند شارژ و یا دشارژ شود. میزان توان تولیدی واحدهای فتوولتائیک و توربین‌های بادی نیز در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده‌شده است[۳۵].



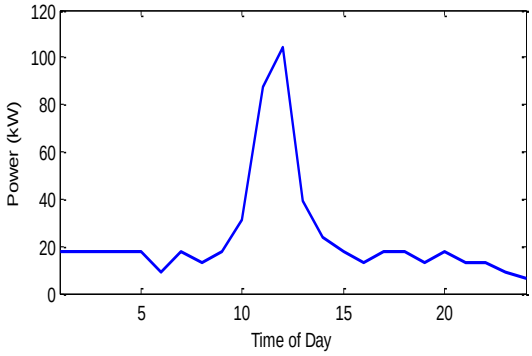
شکل(۵): ریز شبکه ۶۹ باسه [۳۶]

جدول (۱): مکان تولیدات پراکنده و بلوک‌های حرارتی در ریز شبکه ۶۹ باسه

DG and Block	Bus		
PV	۳۲	۴۲	۴۸
WT	۱۱	۲۱	۲۳
MT	۵۸	۶۰	۶۴
Thermal block	۱۸	۲۴	۵۲



شکل (۶): تغییرات روزانه توان فتوولتائیک[۳۵].



شکل (۷): تغییرات روزانه توان توربین بادی[۳۵].

سایر اطلاعات موردنیاز نیز به‌صورت زیر است:

- بازده گاز به الکتریسیته: ۰,۲۴
- ضریب تلفات حرارتی: ۰,۰۸
- میزان ظرفیت حرارتی یک مترمکعب از گاز (کیلووات ساعت/مترمکعب)۷۸۵۶,۷۴
- بازده چیلر جذبی: ۰,۸۵
- ضریب عملکرد چیلر جذبی: ۱,۲
- بازده بویلر بازیابی گرما: ۰,۷۷۶
- بازده بویلر: ۰,۸۵

به‌منظور بررسی رفتار مسئله پیشنهادی، حالت‌های مختلفی در نظر گرفته می‌شود که در ادامه هر یک به همراه نتایج هر بخش توضیح داده می‌شود.

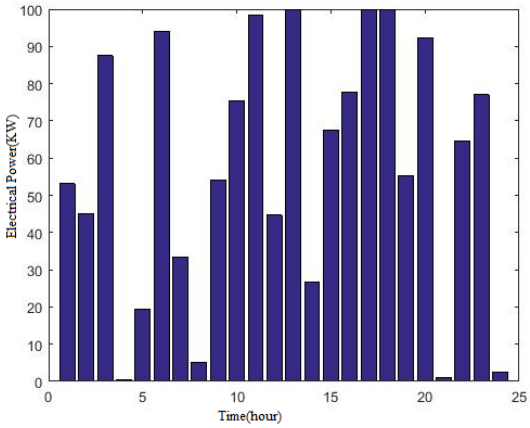
۵-۲- حالت‌های موردمطالعه

منابع تجدید پذیر مانند توربین بادی و فتوولتائیک در تمامی ساعات شبیه‌سازی به‌اندازه حداکثر ظرفیت خود توان اکتیو تولید می‌کنند؛ زیرا که هزینه بهره‌برداری آن‌ها برابر صفر است، ازاین‌رو برای کاهش هزینه بهره‌برداری سیستم بهترین گزینه این است که توان بارهای از منابع تجدید پذیر تأمین شود.

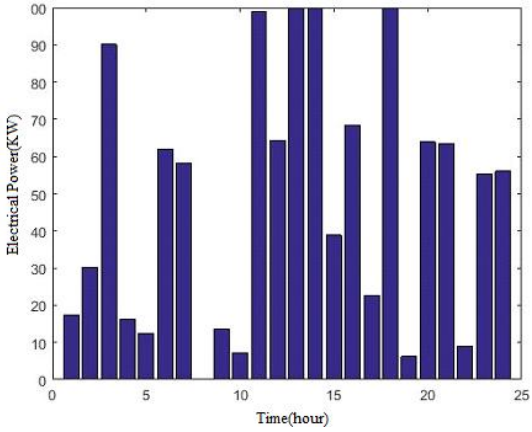
۵-۲-۱- حالت اول: مسئله تک هدفه باهدف کاهش هزینه بهره داری

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.1 Spring 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

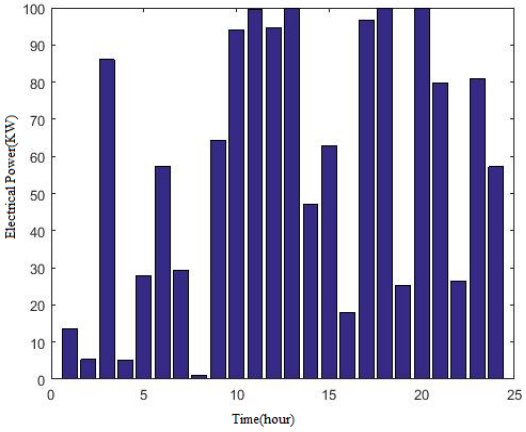
در این حالت مسئله بهره‌برداری از شبکه باهدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری حل‌شده است. توقع داریم در این حالت نتایج به‌گونه‌ای به دست آید که واحدهای باقیمت بیشتر کمتر مورداستفاده قرار گیرند و واحدهای باقیمت انرژی بالاتر کمتر استفاده شوند. نتایج به‌دست‌آمده در این حالت مطابق شکل‌های زیر است.



شکل (۸): توان تولیدی واحد میکرو توربین اول

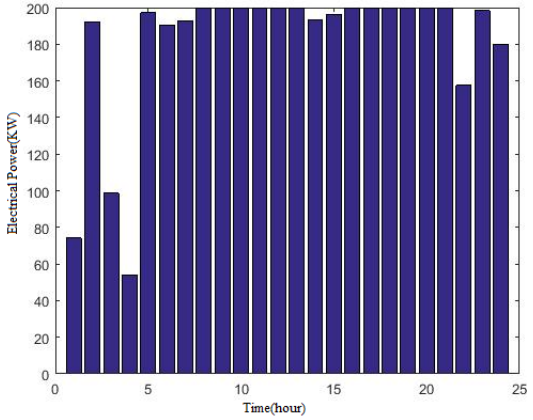


شکل (۹): توان تولیدی واحد میکرو توربین دوم

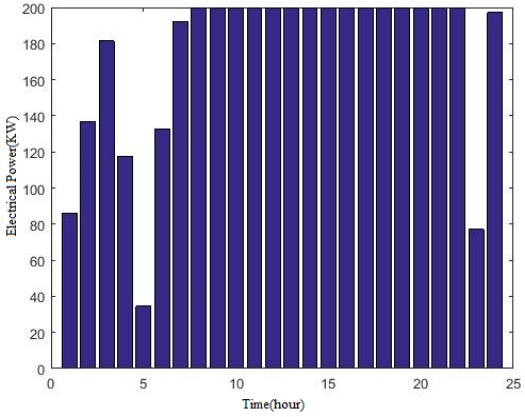


شکل (۱۰): توان تولیدی واحد میکرو توربین سوم

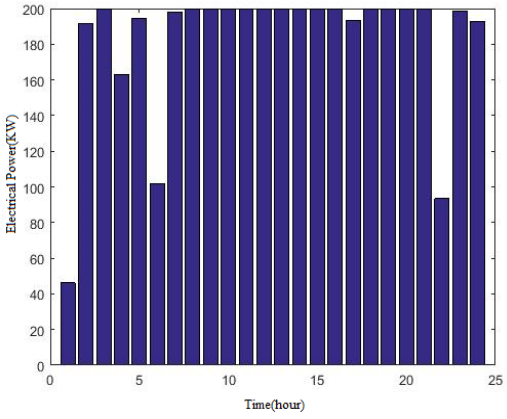
میزان توان واحدهای CHP نیز در شکل‌های زیر نشان داده می‌شود.



شکل (۱۱): توان تولیدی واحد CHP اول



شکل (۱۲): توان تولیدی واحد CHP دوم



شکل(۱۳): توان تولیدی واحد CHP سوم

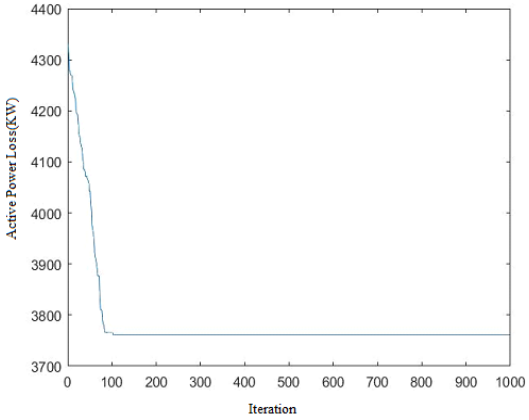
از نتایج مشخص است که به دلیل پائین بودن قیمت توان تولیدی توسط واحدهای CHP این واحدها اغلب نزدیک به مقدار بیشینه خود تولید می‌کنند. پس‌ازآن ها نیز میزان توان تولیدی واحدهای میکرو توربین قرار دارد که در مقایسه باقیمت بازار مقدار پائین تری دارند. در این شرایط می‌توان اطمینان داشت که توان بارهای حرارتی شبکه به‌طور کامل توسط واحدهای CHP تأمین می‌شود. با توجه به بالا بودن میزان توان تولیدی واحدهای CHP می‌توان رفتار ذخیره‌سازهای انرژی گرمایی را نیز پیش‌بینی کرد که در

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.1 Spring 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

ساعات اولیه دشارژ می‌شوند و جز در مواقع لزوم به‌منظور جلوگیری از هدر رفت انرژی گرمایی شارژ نمی‌شوند.

۵-۲-۲- حالت دوم: مسئله تک هدفه باهدف کاهش تلفات شبکه

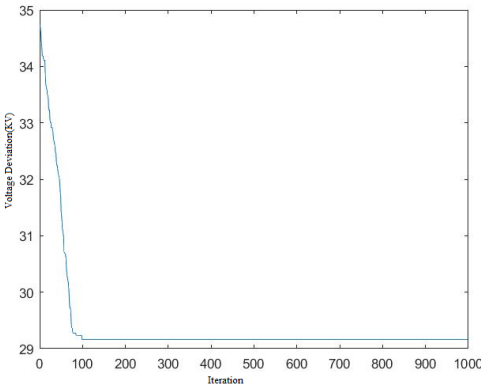
انتظار می‌رود در این حالت پروفیل تولید توان با میزان بار شبکه منطبق باشد. بررسی نتایج نیز نشان می‌دهد که بیشتر واحدهای تولیدی در حد بالای تولید توان خود قرار دارند تا بتوانند با تأمین توان به‌صورت محلی به کاهش تلفات شبکه کمک کنند. توان بالای تولیدی واحدهای CHP نیاز به ذخیره‌سازهای انرژی گرمایی را از بین می‌برد و این واحدها می‌توانند پس از یک مرحله دشارژ اولیه تا ساعات نهایی بدون استفاده باشند. میزان تلفات ۳۷۷۴,۲ کیلووات می‌باشد. روند همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی برای این تابع هدف در شکل (۱۴) نشان داده‌شده است.



شکل (۱۴): منحنی همگرایی الگوریتم تکاملی برای هدف تلفات

۵-۲-۳- حالت سوم: مسئله تک هدفه باهدف کاهش انحرافات ولتاژ

با توجه به زیاد بودن میزان بار شبکه نقطه بهینه‌ای که توسط الگوریتم تکاملی برای این حالت انتخاب‌شده است همانند تابع هدف تلفات است. به عبارتی زیاد بودن بار شبکه تولیدات پراکنده را ملزم به تولید توان با مقدار زیاد می‌کند به‌طوری‌که بتواند با این روش کاهش ولتاژ در طول فیدرهای شبکه را جبران کند. رفتار ذخیره‌سازهای انرژی گرمایی در این حالت نیز مطابق با تابع هدف تلفات است. تزریق توان اکتیو تولیدات پراکنده به ریز شبکه موجب شده است که پروفیل صاف‌تری به دست آید. روند همگرایی الگوریتم در این حالت مطابق با شکل (۱۵) است.



شکل (۱۵): منحنی همگرایی الگوریتم

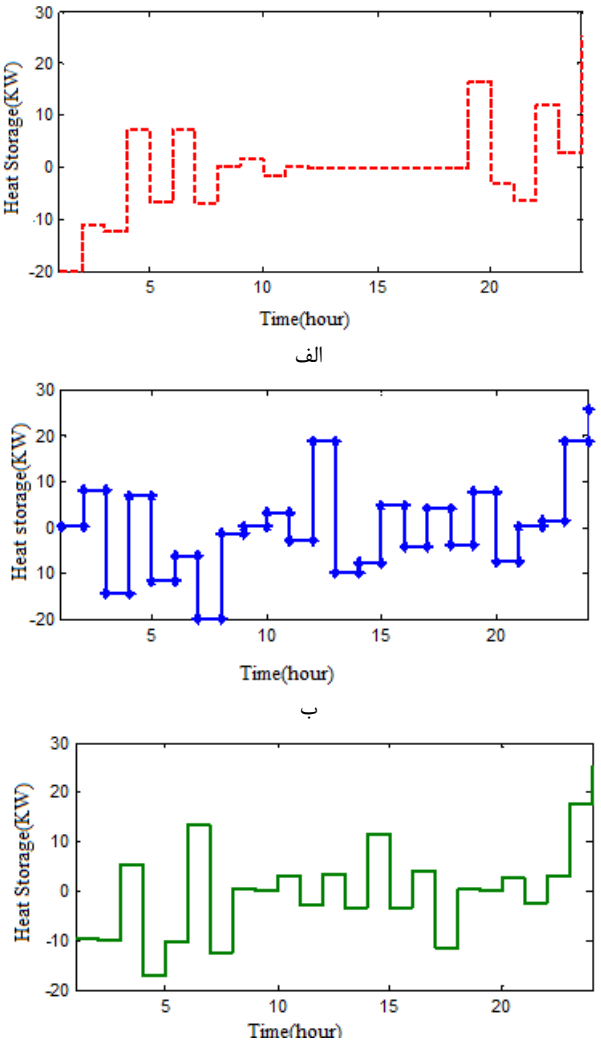
۵-۲-۴- حالت چهارم: مسئله چندهدفه با اهداف هزینه‌های بهره‌برداری، تلفات و انحرافات ولتاژ

متغیرهای کنترلی این مسئله مطابق با جدول (۲) و میزان شارژ و دشارژ ذخیره‌سازهای انرژی حرارتی مطابق با شکل(۱۶ الف، ب و ج) است.

جدول (۲): متغیرهای کنترلی مسئله چندهدفه(KW)

Time	CHP1	CHP2	CHP3	MT1	MT2	MT3
۱	۱۹۸,۸۹	۱۹۱,۷۹	۱۹۹,۷۶	۹۹,۲۳	۶۷,۴۸	۱۷,۷۷
۲	۱۷۶,۷۱	۲۰۰,۰۰	۱۷۸,۷۹	۹۹,۱۱	۹۹,۶۹	۹۸,۹۰
۳	۱۵۸,۲۵	۸۹,۳۲	۱۵۵,۳۵	۶۱,۰۱	۹۵,۹۴	۴۴,۵۳
۴	۱۷۶,۳۶	۱۵۸,۲۲	۱۹۹,۴۲	۶۸,۶۸	۱۰۰,۰۰	۸,۹۰
۵	۱۹۸,۲۴	۱۷۵,۶۳	۱۱۵,۹۳	۷۴,۸۶	۱۰۰,۰۰	۷۶,۳۵
۶	۱۲۷,۷۵	۱۹۹,۹۸	۱۵۲,۵۸	۹۹,۷۸	۵۱,۹۷	۸۱,۱۴
۷	۱۹۹,۹۵	۱۶۶,۹۲	۱۹۹,۶۵	۱۰۰,۰۰	۶۶,۰۶	۹۹,۰۲
۸	۲۰۰,۰۰	۲۰۰,۰۰	۱۹۹,۹۷	۶۶,۳۶	۴۰,۲۵	۳۲,۱۱
۹	۱۹۹,۹۸	۲۰۰,۰۰	۱۹۹,۹۸	۵۶,۲۵	۷۴,۷۷	۹۹,۹۶
۱۰	۲۰۰,۰۰	۱۹۹,۰۰	۱۹۹,۹۵	۸۳,۰۳	۵۵,۰۶	۹۳,۵۸
۱۱	۱۹۹,۵۲	۱۹۹,۹۵	۱۹۹,۳۴	۸۵,۳۵	۶۷,۷۰	۷۶,۶۳
۱۲	۱۹۸,۰۰	۱۹۹,۱۲	۱۹۹,۹۶	۱۰۰,۰۰	۸۲,۹۹	۸۴,۴۸
۱۳	۱۹۹,۹۸	۱۹۳,۲۱	۲۰۰,۰۰	۹۹,۹۴	۱۰۰,۰۰	۹۹,۸۸
۱۴	۱۹۹,۶۹	۱۹۹,۹۶	۲۰۰,۰۰	۹۸,۷۸	۸۲,۲۹	۵۷,۳۱
۱۵	۲۰۰,۰۰	۲۰۰,۰۰	۲۰۰,۰۰	۹۹,۶۸	۷۷,۷۳	۸۴,۳۰
۱۶	۱۹۹,۹۵	۲۰۰,۰۰	۱۹۹,۹۵	۹۶,۶۷	۶۲,۶۳	۸۳,۳۸
۱۷	۱۹۹,۹۲	۱۹۹,۷۵	۲۰۰,۰۰	۹۹,۸۶	۷۴,۴۵	۹۹,۳۳
۱۸	۱۹۹,۴۶	۱۹۹,۹۶	۱۹۸,۹۱	۹۸,۹۶	۱۰۰,۰۰	۱۰۰,۰۰
۱۹	۱۹۹,۹۵	۱۹۹,۵۰	۱۹۹,۹۸	۶۳,۷۲	۹۹,۹۸	۱۰۰,۰۰
۲۰	۱۹۹,۲۰	۱۹۹,۹۶	۲۰۰,۰۰	۶۶,۸۸	۹۹,۱۶	۲۲,۴۹
۲۱	۲۰۰,۰۰	۱۹۹,۷۷	۱۹۸,۱۱	۸۲,۲۶	۸۳,۸۳	۹۹,۹۸
۲۲	۱۹۹,۹۸	۱۹۹,۹۵	۱۹۸,۳۳	۶۷,۰۷	۹۱,۷۰	۹۷,۴۹
۲۳	۱۹۹,۹۸	۱۲۲,۰۸	۱۹۹,۲۴	۷۳۰۸۹	۸۴,۳۰	۹۹,۷۲
۲۴	۱۹۱,۲۸	۱۹۹,۸۲	۱۱۶,۸۵	۸۸,۵۱	۵۸,۵۳	۴۶,۵۲

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.1 Spring 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

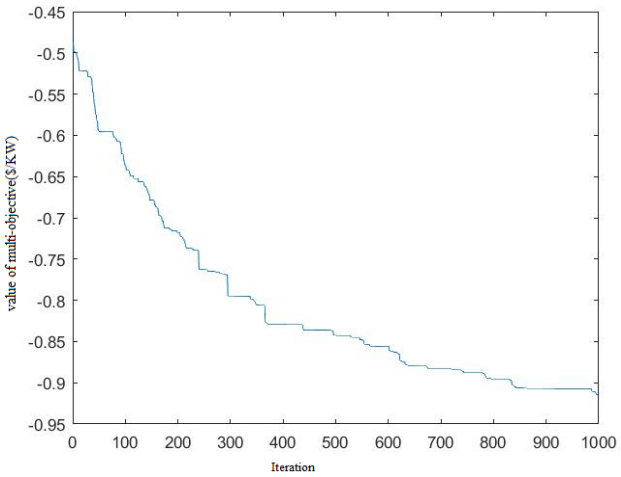


شکل (۱۶): میزان شارژ و دشارژ هر سه ذخیره کننده انرژی حرارتی

مقادیر مثبت شارژ و مقادیر منفی دشارژ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود دشارژ در زمان‌های کاهش توان سایر واحدها اتفاق می‌افتد.

روند همگرایی الگوریتم برای این تابع هدف نیز در شکل (۱۷) نشان داده‌شده است. همچنین در مقایسه عملکرد CHP ها و میکروتوربین‌ها می‌توان دید که CHP ها همواره سطح توان بالاتری را نسبت به میکروتوبین‌ها به شبکه تزریق می‌کنند. این امر به دو دلیل است که عبارت‌اند از:

- در این سیستم، ظرفیت CHP ها بیشتر از میکرو توربین‌ها است.
- CHP ها علاوه بر تولید انرژی الکتریکی می‌توانند توان حرارتی نیز تولید کنند.CHP توان حرارتی بیشتری را نسبت به ذخیره-ساز حرارتی تولید می‌کند؛ زیرا که میزان توان حرارتی تولیدی CHP وابسته به توان الکتریکی آن است.



شکل (۱۷): منحنی همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ذخیره کننده‌های انرژی گرمایی همراه با ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی مدل‌سازی شده و روابط آن در زمان شارژ و دشارژ مورداستفاده قرار گرفت. همچنین، بهره‌برداری از ریز شبکه در حضور بارهای حرارتی در قالب یک مسئله با اهداف هزینه‌های بهره‌برداری، تلفات و انحرافات ولتاژ موردبررسی و ارزیابی قرار گرفت. در این شرایط، مسئله بهره‌برداری با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی TLBO موردبررسی قرار گرفت. توابع هدف به‌صورت مجزا و همچنین به‌صورت ترکیبی بررسی‌شده و نتایج حاصله ارائه گردید. تعیین ظرفیت بهینه برای هر یک از واحدهای تولیدکننده توان، CHP و یا ذخیره کننده‌های انرژی حرارتی و انرژی الکتریکی از اهمیت فراوانی برخوردار است. استفاده از ظرفیت تولیدات پراکنده هم به الگوریتم بهینه‌سازی و هم به نوع تابع هدف وابسته می‌باشد. تابع هدف هزینه‌های بهره‌برداری منابع تولید توان را برحسب قیمت ارائه انرژی قرار می‌دهد و از پائین تریم قیمت شروع به خرید می‌کند. در این میان دو مسئله دیگر نیز وجود دارد: اول اینکه استفاده از تولیدات پراکنده برحسب قیمت انرژی آن‌ها مشکلات ولتاژی در شبکه ایجاد کند و دوم اینکه تأمین بارهای حرارتی دچار چالش شود. در این تابع هدف استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی گرمایی چندان چشمگیر نبوده و علت آن، استفاده از ظرفیت انرژی الکتریکی CHP ها بوده که منجر به تولید انرژی حرارتی و تأمین بارهای حرارتی می‌شود. در رابطه با این تابع، هدف ظرفیت بهینه تجهیزات نصب‌شده بر روی شبکه از اهمیت بالایی برخوردار است. در مورد دو تابع هدف دیگر یعنی تلفات و انحرافات ولتاژ، تنها بعد فنی بهره‌برداری از ریز شبکه موردبررسی قرار گرفت. در این دو تابع هدف، محل قرارگیری واحدهای تولیدکننده توان از اهمیت بالایی برخوردار

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.1 Spring 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

است. به‌طوری‌که نصب این واحدها در محل‌هایی که مشکلات ولتاژی برای شبکه ایجاد کند می‌تواند میزان تلفات شبکه را افزایش دهد. در این دو تابع هدف ذخیره کننده‌های انرژی گرمایی و الکتریکی نقش چشم‌گیرتری را ایفا می‌کنند.

مراجع

[1] Moradi, H. Moghaddam, I.G., Moghaddam, M.P., Haghifam, M.-R., "Opportunities to Improve Energy Efficiency and Reduce Greenhouse Gas Emissions For a Cogeneration Plant", IEEE International Energy Conference and Exhibition (Energy Con), pp.785-790, 18-22 Dec. 2010.

[2] J.R. Aguero, A. Khodaei, R. Masiello, "The utility and grid of the future: challenges, needs, and trends," IEEE Power and Energy Magazine, vol. 14, no. 5, pp. 29-37, Sept.-Oct. 2016.

[3] J.R. Aguero, and **A. Khodaei**, "Industry trends and utility of the future roadmaps," Electricity Journal, Special Issue on Energy Industry of the Future; Applications to Illinois, vol. 28, pp. 7-17, 2015.

[4] Chen X, Kang C, O'Malley M, Xia Q, Bai J, Liu C, Sun R, Wang W, Li H. Increasing the flexibility of combined heat and power for wind power integration in China: Modeling and implications. IEEE Transactions on Power Systems.;30(4):1848-57, Jul 2015

[5] Li Z, Wu W, Shahidehpour M, Wang J, Zhang B. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network. IEEE Transactions on Sustainable Energy;7(1):12-22, Jan 2016

[6] Chen H, Yu Y, Jiang X. Optimal scheduling of combined heat and power units with heat storage for the improvement of wind power integration. InPower and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2016 IEEE PES Asia-Pacific (pp. 1508-1512). IEEE. 2016 Oct 25

[7] Xie D, Lu Y, Sun J, Gu C, Li G. Optimal Operation of a Combined Heat and Power System Considering Real-time Energy Prices. IEEE Access.;4:3005-15. 2016

[8] Sun T, Lu J, Li Z, Lubkeman D, Lu N. Modeling Combined Heat and Power Systems for Microgrid Applications. IEEE Transactions on Smart Grid. 2017 May 20.

[9] Li G, Zhang R, Jiang T, Chen H, Bai L, Cui H, Li X. Optimal dispatch strategy for integrated energy systems with CCHP and wind power. Applied Energy. 15;192:408-19. 2017 Apr

[10] Pazouki S, Mohsenzadeh A, Ardalan S, Haghifam MR. Optimal place, size, and operation of combined heat and power in multi carrier energy networks considering network reliability, power loss, and voltage profile. IET Generation, Transmission & Distribution.;10(7):1615-21. 2016 May 5

[11] Mongibello L, Graditi G, Bianco N, Musto M, Caliano M. Optimal operation of residential micro-CHP systems with thermal storage losses modelling. InPower Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2014 International Symposium on (pp. 1027-1033). IEEE. 2014 Jun 18

[12] Tasdighi M, Ghasemi H, Rahimi-Kian A. Residential microgrid scheduling based on smart meters data and temperature dependent thermal load modeling. IEEE Transactions on Smart Grid.;5(1):349-57. 2014 Jan

[13] M. Houwing, R. Negenborn, andB. De Schutter, "Demand response with micro-CHP systems,"Proc. IEEE, vol. 99, no. 1, pp. 200–213, 2011.

[14] Alipour M, Mohammadi-Ivatloo B, Zare K. Stochastic scheduling of renewable and CHP-based microgrids. IEEE Transactions on Industrial Informatics;11(5):1049-58. . 2015 Oct

[15] G. M. Kopanos, M. C. Georgiadis, and E. N. Pistikopoulos,"Energy production planning of a network of micro combined heat and power generators," Applied Energy, 2012.

[16] Ma L, Liu N, Zhang J, Tushar W, Yuen C. Energy management for joint operation of CHP and PV prosumers inside a grid-connected microgrid: A game theoretic approach. IEEE Transactions on Industrial Informatics.;12(5):1930-42. 2016 Oct

[17] Basu AK, Chowdhury S, Chowdhury SP. Impact of strategic deployment of CHP-based DERs on microgrid reliability. IEEE Transactions on Power Delivery.;25(3):1697-7052010 Jul.

[18] Thammasorn C. Generation unit commitment in microgrid with renewable generators and CHP. InElectrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2013 10th International Conference on (pp. 1-6). IEEE. 2013 May 15

[19] Zhang X, Karady GG, Ariaratnam ST. Optimal allocation of CHP-based distributed generation on urban energy distribution networks. IEEE Transactions on Sustainable Energy.;5(1):246-53. 2014 Jan

[20] M. Geidl and G. Andersson, "Optimal power flow of multiple energy carriers, "IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, no. 1, pp. 145–155, Feb. 2007.

[21] M. Arnold, R. Negenborn, G. Andersson, and B. De Schutter,"Model-based predictive control applied to multi-carrier energy systems,"in Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, Calgary, AB, Canada, pp. 1–8, 2009.

[22] F. Katiraei, R. Iravani, T. Ise, S. Morozumi, A. Dimeas, and N. Hatziargyriou," Microgrids Managment," IEEE Power and Energy Magazine, May 2008.

[23] E. Rokrok and M. E. H. Golshan, "Adaptive voltage droop scheme for voltage source converters in an islanded multibus microgrid," Inst. Eng. Technol. Gen., Transm. Distrib., vol. 4, no. 5, pp. 562–578, Oct. 2010.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.1 Spring 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[24] N. Reddy and V. Agarwal, "Utility Interactive Hybrid Distribution Generation Scheme with Compensation Features," IEEE Transactions on Energy Convers., Vol. 22, No. 3, pp. 666–673, Sep. 2007.

[25] X.Q. Kong, R.Z. Wang, X.H. Huang, Energy optimization model for a CCHP system with available gas turbines, Applied Thermal Engineering 25, 377–391.,2005

[26] M. F. J. Bos and R. J. L. Beune, R. A. M. Van Amerongen, On the incorporation of a heat storage device in lagrangian relaxation based algorithms for unit commitment, electrical power & energy systems, vol. 18, No.4, pp. 207-214. 1999

[27] R.V. Rao, V.J. Savsani, D.P. Vakharia, "Teaching–learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems", ComputerAided Design, Vol. 43, No. 3, pp. 303-315, 2011.

[28] B. Bahmani-Firouzi, E. Farjah, R. Azizipanah-Abarghooee, An efficient scenario-based and fuzzy self-adaptive learning particle swarm optimization approach for dynamic economic emission dispatch considering load and wind power uncertainties, Energy 50 232e244. 2013

[29] B. Bahmani-Firouzi, E. Farjah, A. Seifi, A new algorithm for combined heat and power dynamic economic dispatch considering valve-point effects, Energy 52 320e332. 2013

[30] T. Niknam, H. Doagou Mojarrad, H. Zeinoddini Meymand, Bahman Bahmani Firouzi, A new honey bee mating optimization algorithm for non-smooth economic dispatch, Energy 36 896-908.2011

[31] Y.A.-R.I. Mohamed, A.A. Rawan, "Hierarchical Control System for Robust Microgrid Operation and Seamless Mode Transfer in Active Distribution Systems," IEEE Trans. Power Electron., vol. 2, no. 2, pp. 352-362, June 2011.

[32] G. Josep, C. Vasquez Juan, M. José, G. de V. Luis, and C. Miguel, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization," IEEE Trans. Power Electron., vol. 58, no. 1, pp. 158.172, Janury 2011.

[33] Dai Y, Chen L, Min Y, Chen Q, Hu K, Hao J, Zhang Y, Xu F. Dispatch model of combined heat and power plant considering heat transfer process. IEEE Transactions on Sustainable Energy, Feb 20, 2017.

[34] Davoodi E, Zare K, Babaei E. A GSO-based algorithm for combined heat and power dispatch problem with modified scrounger and ranger operators. Applied Thermal Engineering,. Jun 25;120:36-48, 2017.

[35]A. Dini, S. Pirouzi, M.A. Norouzi, and M. Lehtonen, "Grid-connected energy hubs in the coordinated multi-energy management based on day-ahead market framework," Energy, vol. PP, pp. 1-12, 2019.

[36]A. Kavousi-Fard, T. Niknam, "Optimal distribution feeder reconfiguration forreliability improvement considering uncertainty," IEEE Trans. Power Deliv. Vol. 29, pp. 1344–1354, 2014.

[37] R.V. Rao∗, V.J. Savsani, D.P. Vakharia,'' Teaching–learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems,'' Computer-Aided Design, 43, 303–315,2011

رزومه



روح الله همایون در مرودشت متولد شده است (۱۳۵۴). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- کنترل از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات فارس (۱۳۸۹)، کار شنا سی‌ار شد مهند سی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات فارس (۱۳۹۴) و در حال حاضر دانشجوی دکتری مهندسی برق-قدرت دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت می باشد. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه ادوات FACTS، بازار برق، و بهره برداری از سیستم‌های قدرت است.



بهمن بهمنی فیروزی متولد سال ۱۳۵۴می باشد، مدارک کارشناسی ، کارشناسی ارشد و دکتری خود در رشته مهندسی برق- قدرت را به ترتیب از دانشگاه شیراز(۱۳۷۸) ، دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۸۱) و دانشگاه شیراز (۱۳۹۳) اخذ کرده است. تخصص ایشان برنامه ریزی سیستم قدرت، برنامه های کاربردی هوش محاسباتی و حفاظت از سیستم قدرت است. ایشان در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت می باشد.



طاهر نیکنام در نورآباد ممسنی متولد شده است (۱۳۵۳). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- مخابرات از دانشگاه شیراز(۱۳۷۶)، کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه صنعتی شریف(۱۳۷۸) و دکتری مهندسی برق-قدرت از دانشگاه صنعتی شریف(۱۳۸۴) سپری کرده است.فعالیت های پژوهشی و علاقه مندی ایشان در زمینه بهره برداری از سیستم های قدرت ، بازار برق و بهینه سازی از سیستمهای قدرت است و در حال حاضر استاد گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت می باشد.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.1 Spring 2021
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Planning the multi-objective operation of micro-grids in the presence of thermal loads and the charging and discharging of thermal storage devices using the evolutionary training and learning algorithm (TLBO)

Rohollah Homayoun[1], Bahman Bahmani Firouzi[2*], Taher Niknam[3]

1- Ph.D Student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran, ro.homayoun@miau.ac.ir

*2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran, bahmani_b@alum.sharif.edu

3- Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran niknam@sutech.ac.ir

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1400.10.1.6.1]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 10 -No.1 Spring 2021

Abstract: The use of distributed generation based on the simultaneous production of electricity and heat is one of the important steps in the division of distribution networks into micro-grids as building blocks of intelligent systems. Therefore, it is necessary to study and evaluate the performance of distributed generation along with the units of simultaneous production of electricity and heat in micro-grids and operation of micro-grids with regard to electrical energy storage and heat storage. In this paper, modeling the behavior of CHP units and thermal energy storage and formulating the problem of optimal multi-objective utilization of micro-grids by considering heat and energy simultaneous production units with heat storage using an evolutionary training and learning algorithm (TLBO) is provided. The object functions include the costs of operating the micro-grid, the amount of network losses and the amount of deviation of the bus voltage from the nominal value. To solve the optimization problem, the evolutionary algorithm TLBO is used, which is a powerful and effective algorithm in this field. The study network is a 69-bus network that includes a number of distributed generation units and a number of simultaneous sources of electricity and heat. The results show the effective planning of multi-purpose operation of micro-grids in the presence of thermal loads by using MATLAB.

Keywords: Combined Heat and Power (CHP), Heat Storage, Distributed Generation (DG), Multi-objective operation planning, Training and Learning Algorithm (TLBO).