

به نام خدا

منابع انرژی، قسمت اول: بهبود، بهره‌برداری، تأثیرات محیطی

عملکرد بهینه ریزشبهه با استفاده از مکمل انرژی چندگانه مبتنی بر الگوریتم بهینه‌ساز شعله- پروانه

چکیده: اخیراً سیستم تولید پراکنده ترکیبی، تبدیل به روش محبوبی برای تأمین انرژی شده است. مشخص است که سیستم مجتمع می‌تواند بهره‌وری انرژی را اثبات نماید و از هزینه‌ها بکاهد. با این حال، زمان‌بندی این سیستم مشکلی است که هزینه عملیات را تعیین می‌کند. در این مقاله، یک سیستم ترکیبی انرژی که شامل انرژی بادی، فتوولتائیک (قدرت‌زای نوری)، توربین‌های گازی، و ذخیره انرژی بود، معرفی شده است. به‌منظور دستیابی به حداقل هزینه عملیاتی، مدل بهینه‌سازی عملیات ساخته شد. برنامه زمان‌بندی هر واحد با استفاده از الگوریتم شعله- پروانه بهینه‌سازی شد. در آخر، با استفاده از تحقیقات تجربی در مورد یک پروژه ریزشبهه‌ای، نتایج بهینه‌سازی در سه مورد پیکربندی انرژی بادی، فتوولتائیک و ذخیره، نشان دادند که مدل بهینه‌سازی عملیاتی این مقاله می‌تواند به‌صورت موثری هزینه عملیاتی سیستم را کاهش دهد و برنامه خروجی بهینه هر واحد، به دست آمد. و ثابت شد که مدل ارائه‌شده در این مقاله، نقش راهنمایی‌کننده خاصی در توزیع اقتصادی سیستم ترکیبی انرژی دارد.

کلمات کلیدی: سیستم چندگانه انرژی، ریزشبهه، بهینه‌سازی عملکرد، انرژی تجدیدپذیر، الگوریتم بهینه‌سازی شعله- پروانه

مقدمه

با ارتقای سریع جامعه و بهبود تدریجی اقتصادی، مدل سنتی تأمین انرژی، با چالش‌های عظیمی روبرو شده است. از طرفی، تأمین انرژی بزرگ- مقیاس و متمرکز نمی‌تواند به مطالبه انرژی متفاوت و ناهمسان پاسخ دهد (Wang 2010). از طرف دیگر، بحران‌های عظیم انرژی و مشکلات آلودگی محیط زیست، مدل تأمین انرژی را پاک‌تر و پایدارتر می‌کند (Ibrahim Yüksel, 2010). به همین خاطر، ریزشبهه که راه دستیابی انعطاف‌پذیری برای بسیاری از منابع تغذیه توزیع شده است، توجه و تحقیقات گسترده‌ای را به خود جلب کرده است (Abd-elMotalieb and Hamilton 2015; Akhtar 2016; Fan et al. 2016; Hossam et al., 2015; Zhao and Florian 2015; Hong et al. 2017). سیستم ریزشبهه ترکیبی (HMS¹)، مصداقی از کاربرد انرژی توزیع شده است که مفهوم فیزیکی سیستم انرژی ترکیبی می‌باشد. با استفاده از ادغام تولید انرژی بادی، فتوولتائیک، فناوری‌های ذخیره (انرژی) و دیگر فناوری‌های توزیع شده، عملیات تعاملی منابع مختلف انرژی، محقق شده است.

با این حال، نوسان‌پذیری و تناوب ذاتی انرژی تجدیدپذیر (RE^۲)، هنگام تأمین بارهای چندگانه، چالش‌های زیادی را بر سر راه عملکرد اقتصادی HMS قرار می‌دهد. در زمان حال، تعداد زیادی از مطالعات، تأثیر نوسان‌پذیری بر روی سیستم RE را کشف کرده‌اند (González-Aparicio and Zucker 2015; Ketterer 2016; Shaker, Zareipour, and Wood 2016; Rhodes et al. 2017; 2014). این مباحث اساساً در مورد این است که تولید RE، دشواری عملیات و زمان‌بندی را افزایش می‌دهد و قابلیت اطمینان را کاهش می‌دهد. برای اطمینان از عملکرد قابل اطمینان سیستم، ظرفیت اضافی زیادی باید در نظر گرفته شود. منابع ذخیره‌سازی و توربین‌های گازی به دلیل عملکرد تطبیق با تولید و نیز قابلیت پاسخ سریع، به صورت گسترده‌ای برای غلبه بر ماهیت تناوبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Atherton, Sharma, and Salgado 2017; Dujardin et al. 2017; Xiandong, Wang, and Qin 2013; Zamora and Srivastava 2010). از این رو، مقرون به صرفه بودن این سیستم ضعیف است که برای ارتقای سیستم، مطلوب نیست. اصل مکمل بودن RE به صورتی امکان‌پذیر برای حل مشکل اقتصادی در نظر گرفته شده است و این امر در کاهش ظرفیت اضافی، بارز است در حالی که بار زمان‌بندی را کاهش می‌دهد که این امر منجر به نوآوری اساسی این مقاله و عملکرد بهینه استراتژیهای مکمل HMS می‌شود.

مطالعاتی که بر روی بهینه‌سازی HMS متمرکز هستند، جنبه‌های متفاوتی دارد که اساساً بر روی توسعه بهره‌وری چندمنظوره انرژی و توزیع بار اقتصادی و بهینه‌سازی استوار متمرکز هستند (Gupta and Gupta 2015; Kuznetsova et al. 2015; Nan et al. 2016; Emily Craparo, Karatas, and Singham 2017; 2017). پراستفاده‌ترین هدف بهینه‌سازی، به حداقل رساندن هزینه عملیاتی است. داشتن قابلیت اطمینان و استقلال، به تدریج در مقالات اخیر تبدیل به اهداف بهینه‌سازی شده‌اند (Subhashree Choudhury, Bhowmik, and Rout 2018; Hadis Moradi et al. 2018). اما در مورد بهینه‌سازی عملیاتی، فقدان تحقیقات، و همچنان نیاز به تحقیق در مورد نحوه اختصاص خروجی مولفه‌های HMS وجود دارد. در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی عملیاتی از HMS، با هدف توزیع واحدهای قابل کنترل سیستم اقتصادی وجود دارد.

به علاوه، بهینه‌سازی عملیاتی سیستم انرژی ترکیبی، امری پیچیده است و معمولاً مشکلی محدود غیرخطی به نظر می‌رسد. بررسی جامعی از رویکردهای متفاوت مربوط به خصوصیات، ارزیابی و بهینه‌سازی این سیستم‌ها، ارائه شده است (Eduardo et al. 2018). و ارزیابی و مقایسه بین الگوریتم‌های مناسب بهینه‌سازی استفاده شده در سیستم‌های ترکیبی، ارائه شده است (Chicco and Mancarella 2009). یک مدل بهینه‌سازی اقتصادی ریزشکه‌ها که شامل واحد تولید نیرو، پمپ حرارتی، فتوولتائیک، و ذخیره‌سازی است و می‌تواند مطالبات چندگانه کاربران را برآورده سازد، ساخته شده است (Lorestani and Ardehali 2018). و یک سیستم پیشرفته مدیریت انرژی بلادرنگ، به منظور بهینه‌سازی ریزشکه با عملکرد بلادرنگ RE ارائه شده است. تابع هدف، به حداقل رساندن هزینه‌های عملیاتی سیستم و انتشار آلاینده‌های سیستم و حل آن -ها با استفاده از الگوریتم دودویی بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO^۳) است.

^۲ renewable energy: انرژی تجدیدپذیر

^۳ binary particle swarm optimization algorithm

در عملیات بهینه ریزشبهکه مکمل انرژی چندگانه، این مقاله برای روشن‌سازی مزایا و فایده‌های مدل پیشنهادی، چندین نتایج تحقیقاتی مهم را از جنبه‌های اهداف بهینه‌سازی، محدودیت‌ها، حل کردن الگوریتم (پاسخگویی به الگوریتم)، اتصال یا عدم اتصال شبکه و غیره، مقایسه می‌کند تا تعیین نماید که آیا عوامل پاسخ به تقاضا در نظر گرفته شده‌اند یا خیر. نتایج مقایسه در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند. با توجه به اهداف بهینه‌سازی، اکثر مقالات متناظر بر روی هزینه‌های سرمایه‌گذاری بر روی این سیستم‌ها متمرکز هستند؛ در حالی که این مقاله مدل بهینه هدفی برای به حداکثر رساندن هزینه‌های سیستم و به حداکثر رساندن استفاده از RE ارائه می‌دهد. به دلیل اینکه داده‌ها و سناریوهای اولیه این مقاله متفاوت هستند، محدودیت‌های شبیه‌سازی و حل الگوریتم آن‌ها با یکدیگر قابل مقایسه نیستند.

انگیزه تحقیقات فوق، ویژگی‌های جفت‌شدگی بار و عدم کنترل پذیری RE، عملیات HMS را غیرقابل اطمینان و پرهزینه می‌کند؛ بنابراین، این تحقیق بهینه‌سازی اساساً در رابطه با مشخصات فنی و پیکربندی است. این مقاله، مدل عملیاتی مقرون به صرفه HMS را ایجاد می‌کند و عملیات هماهنگ را در نظر می‌گیرد و استفاده از RE را به حداکثر می‌رساند. هدف این مطالعه، ارتقای مقرون به صرفه بودن عملیات HMS در استراتژی‌های مکمل است که تقریباً در کارهای قبلی به‌ندرت یافت می‌شود. به منظور بهینه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی شعله- پروانه (MFO) برای جلوگیری از به‌دست آوردن راه حل محلی، معرفی و اعتبارسنجی شده است. به‌علاوه، این مطالعه موردی HMS ای را با نیروی باد، فتوولتیک، تولید ترکیبی (همزمان) حرارت و برق (CHP^۴) و ذخیره‌سازی الکتریکی در استراتژی‌های مکمل متفاوت انتخاب نموده است و تحلیل آن متمرکز بر تأثیر هزینه عملیاتی تحت این استراتژی‌های مکمل است. این مقاله به‌صورت زیر ساختار بندی شده است: HMS در بخش ((مدل‌سازی و استراتژی سیستم)) ارائه شده است. بخش ((تدوین و حل (فرمول‌بندی) مسئله))، تدوین مسئله را توصیف می‌کند. روش‌شناسی بهینه‌سازی در بخش ((روش‌شناسی الگوریتم MFO)) ارائه شده است. و مطالعه موردی و نتیجه‌گیری در بخش ((مطالعه موردی)) و بخش ((نتیجه‌گیری)) ارائه شده‌اند

جدول ۱. مقایسه با چند مقاله مرتبط

ویژگی‌ها	González- Aparicio و Zucker Shaker, Zareipour و Wood, ۲۰۱۶	Atherton, Sharma و Salgado 2017, Dujardin و دیگران, ۲۰۱۷; Xiandong, Wang و 2013	Nemati, Braun Tenbohlen, 2018; Lorestani Ardehali 2018	Eduardo و دیگران ۲۰۱۸ و Craparo, Karatas و Wang, Singham 2017 و دیگران ۲۰۱۷	مقاله حاضر
هدف تحقیق	ریزشبکه	ریزشبکه	سیستم ترکیبی تولید گرما و برق	سیستم ترکیبی تولید گرما و برق	سیستم ریزشبهکه ترکیبی
توصیف مسئله	طرز کار ریزشبهکه (متصل به شبکه)	طرز کار ریزشبهکه (غیرمتصل به شبکه)	روش زمان‌بندی سیستم CHP	روش زمان‌بندی سیستم CHP	سیستم زمان‌بندی سیستم HMS

^۴ combined heat and power، به معنای تولید دو انرژی به صورت همزمان

شبکه انرژی	شبکه برق	شبکه برق	شبکه برق	شبکه برق	شبکه برق، شبکه حرارتی، شبکه NG
اهداف	به حداقل رساندن هزینه کل سالانه	حداقل هزینه سالانه سیستم	حداقل هزینه عملیاتی	حداقل هزینه عملیاتی و حداکثر مصرف RE	حداقل هزینه عملیاتی و حداکثر مصرف RE
محدودیت‌ها	محدودیت تأمین نیرو	محدودیت تأمین نیرو	محدودیت تأمین نیرو	محدودیت تأمین نیرو، محدودیت تأمین گرما	محدودیت تأمین نیرو، محدودیت تأمین گرما
متصل به شبکه	بله	خیر	بله	بله	بله
انرژی تجدیدپذیر	نیروی باد	نیروی باد	فوتوولتیک	نیروی باد و فوتوولتیک	نیروی باد و فوتوولتیک
پاسخ به تقاضا	خیر	خیر	بله	خیر	بله

مدل سازی و استراتژی سیستم

ساختار سیستم

HMS این مقاله، شامل چندین ورودی انرژی، خروجی‌های چندگانه بار، و اجزای تشکیل‌دهنده سیستم است. ساختار HMS مورد مطالعه، در شکل ۱ نمایش داده شده است.

مدل خروجی سیستم

کلید دستیابی به عملیات بهینه تأمین توان پراکنده، هماهنگ‌سازی است. اساس و منطق هماهنگ‌سازی، درک خصوصیات خروجی تأمین نیروی پراکنده و درک مزایای مکمل منابع انرژی متفاوت براساس قانون تولید انرژی و خروجی است.

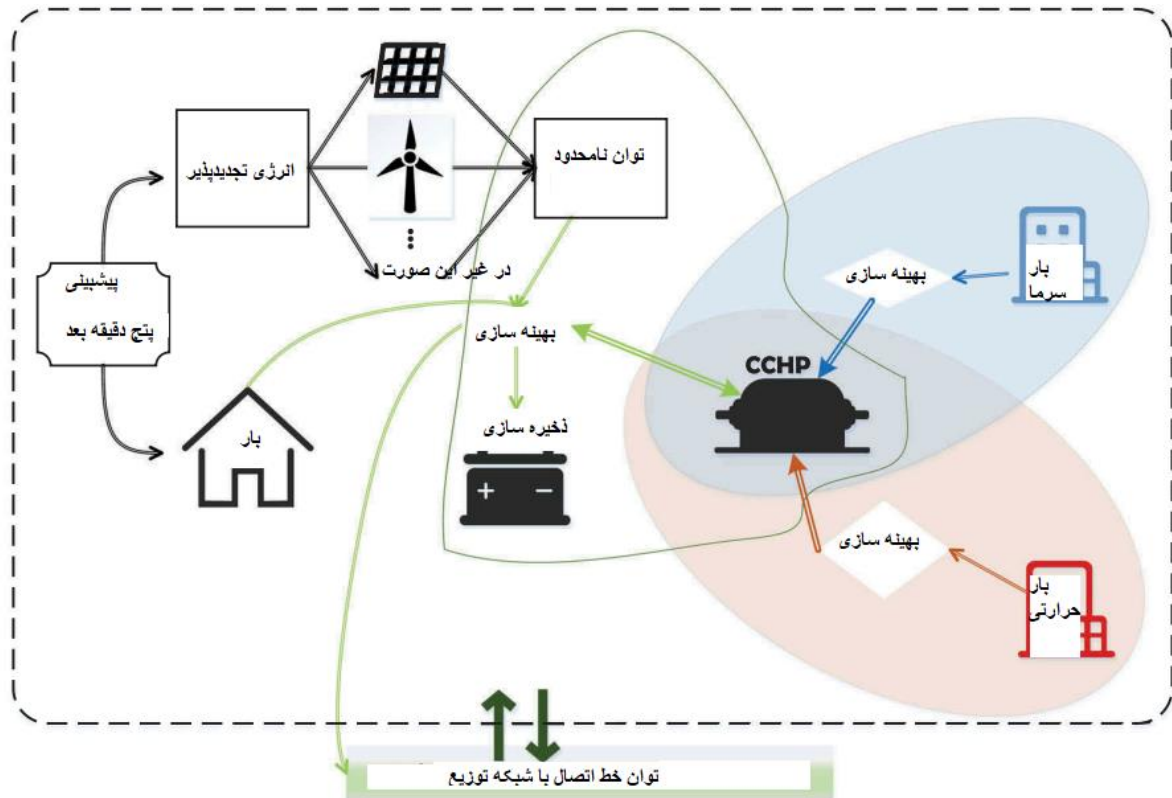
(۱) مدل خروجی انرژی بادی

نیروی پروانه با استفاده از سرعت باد تعیین شده است. در این مقاله، مدل سرعت باد ویبول^۵ به کار برده شده است. چگالی احتمالی پروانه به صورت زیر بیان شده است:

(۱)

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]$$

که k ، پارامتر شکل در توزیع ویبول است و c پارامتر مقیاس در توزیع ویبول است.



شکل ۱. ساختار HMS

هنگامی که سرعت باد کمتر از سرعت باد راه انداز^۶ (v_{ci}) یا بیشتر از سرعت باد قطع شده^۷ (v_{co}) باشد، توان ژنراتور پروانه ۰ است. هنگامی که سرعت باد بیشتر از سرعت باد راه انداز و کمتر از سرعت اسمی باد^۸ (v_r) باشد، توان خروجی می تواند به عنوان تابعی از سرعت باد بیان شود. هنگامی که سرعت باد به سرعت اسمی باد برسد و مقدار آن کمتر از باد قطع شده باشد، پروانه با توان اسمی حرکت می کند. توان خروجی به شکل زیر نشان داده شده است:

(۲)

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & v \leq v_{ci} \text{ or } v \geq v_{co} \\ p_r \frac{v - v_{ci}}{v_{co} - v_{ci}}, & v_{ci} < v < v_r \\ p_r, & v_r < v < v_{co} \end{cases}$$

(۲) مدل خروجی فتوولتائیک

خروجی سیستم PV به شدت تابش فتوولتائیک و مازول دمای PV بستگی دارد.

$$P_{pv} = f_{pv} P_{r,pv} \frac{A}{A_s} [1 + \partial_p (T_{pv} - T_r)] \quad (۳)$$

^۶ cut-in wind speed

^۷ cut-out wind

^۸ rated wind speed

که f_{pv} بازده توان انرژی خروجی فتوولتائیک است که مقدار آن ۰,۹ است. $P_{r,pv}$ توان اسمی PV است. A شدت واقعی تابش فتوولتائیک است. A_s شدت اسمی تابش نور است. θ_p ضریب توان حرارتی است و مقدار $0.0047 \square^{-1}$ را دارد (Chenshan et al. 2013). T_r ماژول دمای اسمی PV است. T_{pv} دمای واقعی ماژول PV است.

(۳) مدل خروجی ذخیره انرژی

وسیله ذخیره‌سازی انرژی به کار برده شده در این مقاله، باتری لیتیوم-یونی با مدل اطمینان ریاضی دو حالت است. مقدار توالی زمانی شارژ و تخلیه باتری نه تنها به توان تبدالی سیستم خارجی بستگی دارد؛ بلکه به نرخ شارژ و تخلیه باتری و محدودیت ظرفیت آن نیز بستگی دارد. ΔP_t توان باتری شارژ شده، خارج از زمان t است. زمانی که $\Delta P_t < 0$ است، سیستم خارجی فاقد توان است و باتری در حالت تخلیه قرار دارد. توان تخلیه باتری به شکل زیر است:

$$P_{edt} = \min\{P_{ed\ max}, P_{edsoc}, \Delta P_t\} \quad (۴)$$

$$P_{edsoc} = \frac{(S_{oct-1} - S_{ocmin})\eta_d E_m}{\Delta_t} \quad (۵)$$

که $P_{ed\ max}$ حداکثر محدودیت توان تخلیه باتری، P_{edsoc} حداقل محدودیت حالت شارژ باتری، S_{oct-1} نرخ شارژ باتری در زمان $t-1$ است. S_{ocmin} حداقل نرخ شارژ باتری، η_d بهره‌وری (راندمان) تخلیه باتری، E_m ظرفیت کل باتری، Δ_t بازه زمانی شبیه‌سازی است. هنگامی که $\Delta P_t > 0$ باشد، سیستم خارجی توان کافی برای شارژ مجدد باتری را دارد. توان شارژ به شکل زیر محاسبه شده است:

$$P_{ect} = \min\{P_{ec\ max}, P_{ecsoc}, \Delta P_t\} \quad (۶)$$

$$P_{ecsoc} = \frac{(S_{oc\ max} - S_{oct-1})E_m}{\eta_c T} \quad (۷)$$

که $P_{ec\ max}$ حداکثر محدودیت شارژ باتری، P_{ecsoc} حداکثر محدودیت حالت شارژ باتری، $S_{oc\ max}$ حداقل نرخ شارژ باتری و η_c راندمان تخلیه باتری است.

(۴) مدل خروجی CHP

توربین گازی یک نوع ماشین توان با پروانه دوار است که انرژی حرارتی تولیدی شده توسط گاز احتراق را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. این ماشین اساساً دارای یک کمپرسور هوا، یک محفظه گاز احتراق، یک توربین، یک سیستم کنترل، و تجهیزات جانبی مربوطه است. به طور کلی، توربین گازی نوع و ظرفیت را تعیین می‌کند و بسیاری از پارامترهای آن شناخته شده‌اند. به همین خاطر، هنگامی که سوخت ثابت می‌شود، گرما و تأمین توان (منبع تغذیه) نیز مقادیر مشخصی هستند. نسبت اسمی حرارتی به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{Q_h}{Q_e} \quad (۸)$$

که η نسبت اسمی حرارت و Q_h و Q_e منبع تولید گرما و توان هستند. راندمان تولید توان توربین میکروگازی، به توان خروجی وابسته است. میزان گاز طبیعی و گرمای تولید شده به شکل زیر محاسبه شده‌اند:

$$\begin{cases} Q_{MT}(t) = \frac{P_e(t)(1-\eta_e(t)-\eta_1)}{\eta_e(t)} \\ V_{MT}(t) = \frac{\sum P_e(t)\Delta t}{\eta_e(t) \times LHV_{NG}} \end{cases} \quad (۹)$$

که $Q_{MT}(t)$ ، گرمای باقی مانده خروجی در زمان t $\eta_e(t)$ خروجی توربین گازی در زمان t ، $P_e(t)$ راندمان ژنراتور، η_1 ضریب اتلاف حرارت توربین گازی، $V_{MT}(t)$ مصرف بر واحد زمان (PU) گاز طبیعی و LHV_{NG} مقدار پایین ارزش حرارتی گاز طبیعی است.

هزینه‌های سیستم CHP شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های عملیاتی است. عموماً، هزینه اولیه سرمایه‌گذاری اولیه بسیار زیاد و هزینه عملیاتی کم است. هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های کارگران در بخش عملیات، در نظر گرفته نشده‌اند. این مقاله، هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های کارگران عملیاتی را در نظر نگرفته است، بلکه تنها تحلیلی اقتصادی برای هزینه‌های سوخت سیستم دارد. هزینه‌های عملیاتی می‌توانند به صورت زیر بیان شوند:

$$C_{gs} = \frac{P_{fuel} Q_{cp}}{q_1} \quad (۱۰)$$

که P_{fuel} ، قیمت گاز، Q_{cp} مصرف کل گرما، و q_1 توان خالص گرمایی گاز طبیعی است.

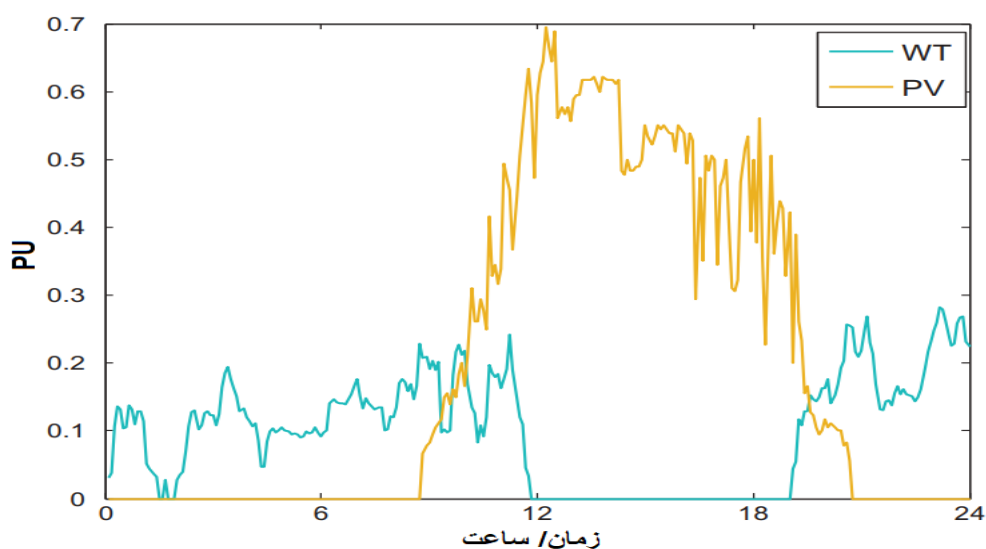
استراتژی مکمل

به کارگیری انرژی چندگانه، راهی مهم برای نوسان انرژی و حل مشکل اتلاف انرژی است. تأمین متعادل

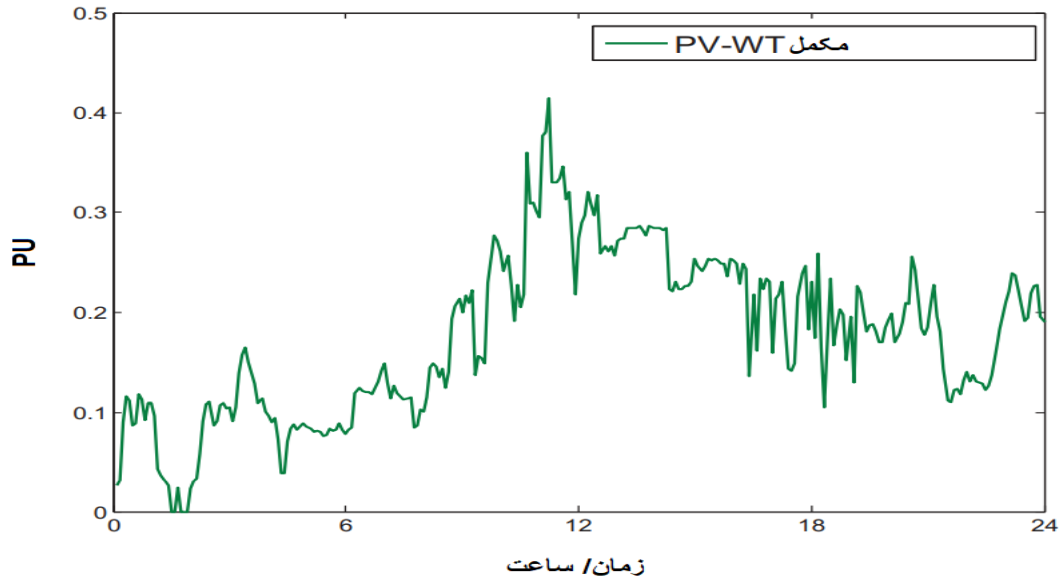
انرژی می‌تواند با استفاده از هماهنگ‌سازی و استفاده زنجیره‌ای از منابع متفاوت انرژی، ذخیره‌سازی انرژی و ترکیب با تجهیزات ذخیره‌سازی CHP تحقق یابد.

به‌عنوان مثال، با استفاده از حالت مکمل نیروی باد و فتوولتائیک، توان خروجی، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، ویژگی‌های مشخصی دارد. مقدار PU میزان توان خروجی فعلی را نشان می‌دهد. در طول روز، انرژی فتوولتائیک بیشتر است و مقدار واحد خروجی نزدیک به ۰,۷ است و این توان در طول شب، تولید نمی‌شود. انرژی بادی در شب بیشتر است اما نرخ بهره‌وری آن پایین است. حداقل خروجی نزدیک به ۰,۳ است و در طول روز، میزان خروجی کم‌تر است. به‌وضوح می‌توان مشاهده کرد که هم انرژی بادی و هم انرژی فتوولتائیک ۰,۰۹ و ۰,۲۰ هستند و انحراف معیارهای آن‌ها ۰,۰۸ و ۰,۲۴ است که هر دو در محدوده زمانی، دارای ویژگی‌های متمایز مکملی هستند. آن‌ها به‌عنوان یک منبع تغذیه تکی، به‌تنهایی نمی‌توانند نیازهای قابلیت اطمینان منبع تغذیه را برآورده سازند.

در سیستم مکمل باد و فتوولتائیک با نسبت نصب ۱:۵، انرژی معمولی روزانه مقدار PU در شکل ۳ نمایش داده شده است. پس از مکمل‌سازی، مقدار خروجی واحد میانگین سیستم به ۰,۲۱ افزایش یافت و انحراف معیار به ۰,۰۸ کاهش یافت. به‌وضوح می‌توان دید که سیستم مکمل، بر کمبودهای تناوب (وقفه) و میزان قابلیت اطمینان کم هر دو نوع خروجی انرژی غلبه می‌کند، نوسانات خروجی سیستم را برطرف می‌سازد و سرمایه‌گذاری بر روی ظرفیت اضافی سیستم را تقلیل می‌بخشد. اگر این سیستم با ذخیره‌ساز انرژی، توربین گازی و دیگر تجهیزات ترکیب شود، بهتر می‌تواند نیازهای متفاوت کاربران به انرژی را برآورده سازد.



شکل ۲. نمودار خروجی انرژی بادی و انرژی فتوولتائیک



شکل ۳. نمودار خروجی انرژی باد و انرژی فتوولتائیک

فرمول‌بندی (تدوین) مسئله

تابع هدف

هدف بهینه‌سازی عملیاتی HMS، مرتب‌سازی طرح خروجی هر واحد قابل کنترل، به صورت منطقی و با استفاده از استراتژی مکمل، به منظور به حداقل رساندن کل هزینه عملیاتی در حالی است که محدودیت‌های عملیاتی توان توزیع شده و محدودیت‌های شبکه را برآورده می‌سازد است. این مقاله انرژی بادی و انرژی فتوولتائیک را به برق تبدیل می‌کند و هزینه‌های استهلاک را نادیده می‌گیرد. در این بخش، نویسندگان با استفاده از انرژی بادی توزیع شده، انرژی فتوولتائیک و ذخیره‌سازی انرژی، خروجی بلادرنگ هر ریزمنبع میکروشبکه متصل به شبکه را بهینه‌سازی می‌نمایند. چرخه T (T-cycle)، بار سرما/ بار حرارتی/ بار الکتریکی در هر چرخه T-1 پیش‌بینی شده‌اند. از آنجایی که توربین گازی نسبت به توربین بخار، زمان پاسخ بسیار سریعی دارد، دوره زمانی T، ۵ دقیقه تنظیم شده است و در ۵ دقیقه بعدی، میکرومنبع دستوری صادر کرده و خروجی را در دوره زمانی T-1 تنظیم می‌کند. با در نظر گرفتن کم‌ترین هزینه عملیاتی به عنوان تابع هدف، خروجی هر واحد تولید توان در زمان T بهینه‌سازی شده است. تابع هدف به شکل زیر است:

$$\min C = \int_{t=0}^{t=5} (k_t P_{grid} + P_{fuel} V_t + C_{bat.dep}) dt \quad (11)$$

که P_{grid} توان تبادلی خط اتصال، k_t زمان خرید/ مازاد تعرفه‌های تشویقی است. P_{fuel} قیمت گاز است. V ، P_{fuel} مصرف گاز در زمان است. و $C_{bat.dep}$ ، P_{fuel} هزینه‌های استهلاک ذخیره‌سازی انرژی در زمان است.

محدودیت‌ها

(۱) محدودیت‌های تعادل توان

$$P_{L,t} = \sum_{i=1}^d P_{i,t} + P_{pv,t} + P_{wt,t} + P_{grid,t} \quad (12)$$

که d تعداد واحدهای تولید است که می‌تواند با استفاده از ریزش‌بکه‌ها ارسال شود. $P_{i,t}$ خروجی توان تولید برق در زمان t است. $P_{pv,t}$ خروجی توان فتوولتائیک در زمان t است. $P_{wt,t}$ خروجی انرژی بادی توزیع شده در زمان t است. $P_{grid,t}$ خروجی توان خط اتصال در زمان t است. و $P_{L,t}$ کل بار فعال در سیستم در زمان t است.

(۲) محدودیت‌های ظرفیت تجهیزات و محدودیت‌های نرخ افزایش توان عملیات

$$P_{i,t.min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t.max} \quad (۱۳)$$

$$P_{i,t.min} \leq P_{f,t} \leq P_{f,t.max} \quad (۱۴)$$

که $P_{i,t.min}$ و $P_{i,t.max}$ بیشترین و کم‌ترین محدوده‌های خروجی فعال واحد تولید توان قابل تنظیم هستند. $P_{f,t.min}$ و $P_{f,t.max}$ کم‌ترین و بیشترین محدوده‌های خروجی فعال واحد زمان‌بندی نشده تولید توان هستند.

واحدهای زمان‌بندی شده، در زمان افزایش و کاهش بار، به ترتیب دارای Eqs (۱۵) و (۱۶) هستند.

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq R_i^{up} \quad (۱۵)$$

$$P_{i,t} - P_{i,t} \leq R_i^{down} \quad (۱۶)$$

واحدهای غیرزمان‌بندی شده تولید توان، در زمان افزایش و کاهش بار به ترتیب دارای Eqs (۱۷) و (۱۸) هستند.

$$P_{f,t} - P_{f,t} \leq R_f^{up} \quad (۱۷)$$

$$(۱۸)$$

$$P_{f,t-1} - P_{f,t} \leq R_f^{down}$$

(۳) محدودیت‌های استراتژی ذخیره‌سازی انرژی

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (۱۹)$$

$$P_{ch_rate} \leq P_{ess,t} \leq P_{dis_rate} \quad (۲۰)$$

که SOC_t حالت شارژ در زمان t است.

(۴) محدودیت‌های تعادل گذرگاه CHP

$$P_{grid} + P_{GT} + P_{PV} + P_{WT} + P_{ES,D} = L_E + L_{ER} + P_{EB} + P_{ES,C} \quad (۲۱)$$

که P_{grid} توان مبادله‌ای HMS و شبکه است. P_{GT} تولید توان توربین گازی است. P_{PV} توان خروجی فتوولتائیک است. P_{WT} توان خروجی توربین بادی است. $P_{ES,D}$ توان تخلیه وسیله ذخیره‌سازی است. L_E بار الکتریکی است. L_{ER} توان مبرد (یخچال) الکتریکی است. P_{EB} توان دیگ بخار الکتریکی است. $P_{ES,C}$ توان

شارژ وسیله‌های ذخیره‌سازی است.

محدودیت تعادل گذرگاه گاز پسماند

$$\eta_{GT}P_{GT} = Q_{WHB} \quad (22)$$

که η_{GT} بهره‌وری حرارتی توربین گازی و Q_{WHB} توان خروجی ویست هیت بویلر (دیگ بخار) است.

محدودیت‌های تعادل گذرگاه بخار

$$\eta_{WHB}Q_{WHB} + Q_{GB} + Q_{HS.D} = Q_{HX} + Q_{HS.C} \quad (23)$$

که η_{WHB} بهره‌وری حرارتی ویست هیت بویلر است. Q_{GB} شار حرارتی دیگ بخار گازی است. $Q_{HS.D}$ توان وسیله ذخیره‌سازی حرارتی است. $Q_{HS.C}$ خروجی مبدل گرمایی است. $Q_{HS.C}$ ، توان گرمایی وسیله ذخیره‌سازی حرارتی است.

محدودیت‌های تعادل گذرگاه آب گرم

$$\eta_{HX}Q_{HX} = L_H \quad (24)$$

که η_{HX} بهره‌وری مبدل گرمایی و L_H بار حرارتی است.

محدودیت‌های تعادل گذرگاه هوا

$$\eta_{ER}Q_{ER} = L_C \quad (25)$$

که η_{ER} بهره‌وری سرمایه‌ی مبرد الکتریکی، Q_{ER} توان سرمایه‌ی مبرد الکتریکی و L_C بار سرمایه‌ی است.

روش‌شناسی الگوریتم MFO

الگوریتم MFO، گروهی جدید از الگوریتم‌های هوشمند زیست‌تقلیدی است که در سال ۲۰۱۵ توسط میرجلیلی و دیگران ارائه شده است. در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی، این الگوریتم سرعت جستجوی بالاتری دارد، پارامترهای تعدیلی کم‌تری دارد، دقت همگرایی بیشتر و اجرای قوی و بهتری دارد. مزیت اصلی آن، این ویژگی آن است که به راحتی در حالت بهینه محلی قرار نمی‌گیرد (میرجلیلی، ۲۰۱۵).

مدل ریاضی الگوریتم MFO به شکل زیر توصیف شده است:

$$(26)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{1.1} & m_{1.2} & \dots & m_{1.d} \\ m_{2.1} & m_{2.2} & \dots & m_{2.d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n.1} & m_{n.2} & \dots & m_{n.d} \end{bmatrix}$$

$$OM = [OM_1 \quad OM_2 \quad \dots \quad OM_n] \quad (27)$$

در ماتریس (۲۶)، n اندازه جمعیت پروانه، d موقعیت مکانی پروانه است که بعد مسئله در آن بهینه‌سازی شده است. ماتریس (۲۷) مقدار تناسب به کار رفته برای ذخیره‌سازی پروانه‌هاست.

بخش کلیدی دیگری از الگوریتم MFO، شعله است که به شکل زیر بیان شده است:

$$(28)$$

$$F = \begin{bmatrix} mF_{1.1} & m_{1.2} & \dots & F_{1.d} \\ F_{2.1} & F_{2.2} & \dots & F_{2.d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{n.1} & F_{n.2} & \dots & F_{n.d} \end{bmatrix}$$

$$OF = [OF_1 \quad OF_2 \quad \dots \quad OF_n] \quad (29)$$

با استفاده از ماتریس (۲۹) مقدار تناسب شعله را ذخیره می‌نماییم.

هم پروانه‌ها و هم شعله‌ها، راه‌حل‌های کاندید هستند و تفاوت اصلیشان آن است که موقعیتشان به صورت متفاوتی در حین تکامل به روزرسانی می‌شود. پروانه یک موتور جستجو است که در فضای جستجو حرکت می‌کند، و شعله بهترین موقعیت برای تکرار فعلی است. آن را باید به صورت مداوم بر اساس موقعیت شعله به روزرسانی کرد تا بهترین موقعیت حاصل شود. بنابراین، الگوریتم MFO به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MFO = (I, P, K) \quad (30)$$

که در آن I ابعاد جمعیت پروانه با تولید تصادفی و مقدار تابع برازش متناظر آنهاست؛ P تابعی از پروانه متحرک در فضای جستجو با ماتریس M و مقدار بازگشتی به روزرسانی موقعیت است؛ و K تابع تفکیک است که نشان می‌دهد شرایط پایان ارضا می‌شوند یا خیر.

از مدل ریاضی برای توصیف موقعیت به روزرسانی شعله پروانه به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$M_i = S(M_i, F_j) \quad (31)$$

و بیان الگوریتم MFO برای شبیه‌سازی مسیر پرواز مارپیچی پروانه به صورت زیر است:

$$S(M_i, F_j) = D_i e^{bt} \cos(2\pi t) + F_j \quad (32)$$

که در آن M_i پروانه نام است؛ F_j شعله نام است؛ S تابع مارپیچی را نشان می‌دهد؛ D_i فاصله از شعله نام به پروانه نام است، که به صورت زیر بیان می‌شود

$$D_i = |F_j - M_i|$$

b ثابت شکل مارپیچی است، و t یک شماره تصادفی بین $[-1, 1]$ است.

برای تضمین سرعت همگرایی بالاتر الگوریتم MFO، یک ساز و کار به روزرسانی کمیت شعله انطباقی پیشنهاد می‌شود، که به صورت انطباقی تعداد شعله‌ها را در یک فرآیند تکراری کاهش می‌دهد، و توصیف ریاضی آن به صورت زیر است:

$$F_N = \text{round}\left(N - l \frac{N - 1}{M}\right) \quad (33)$$

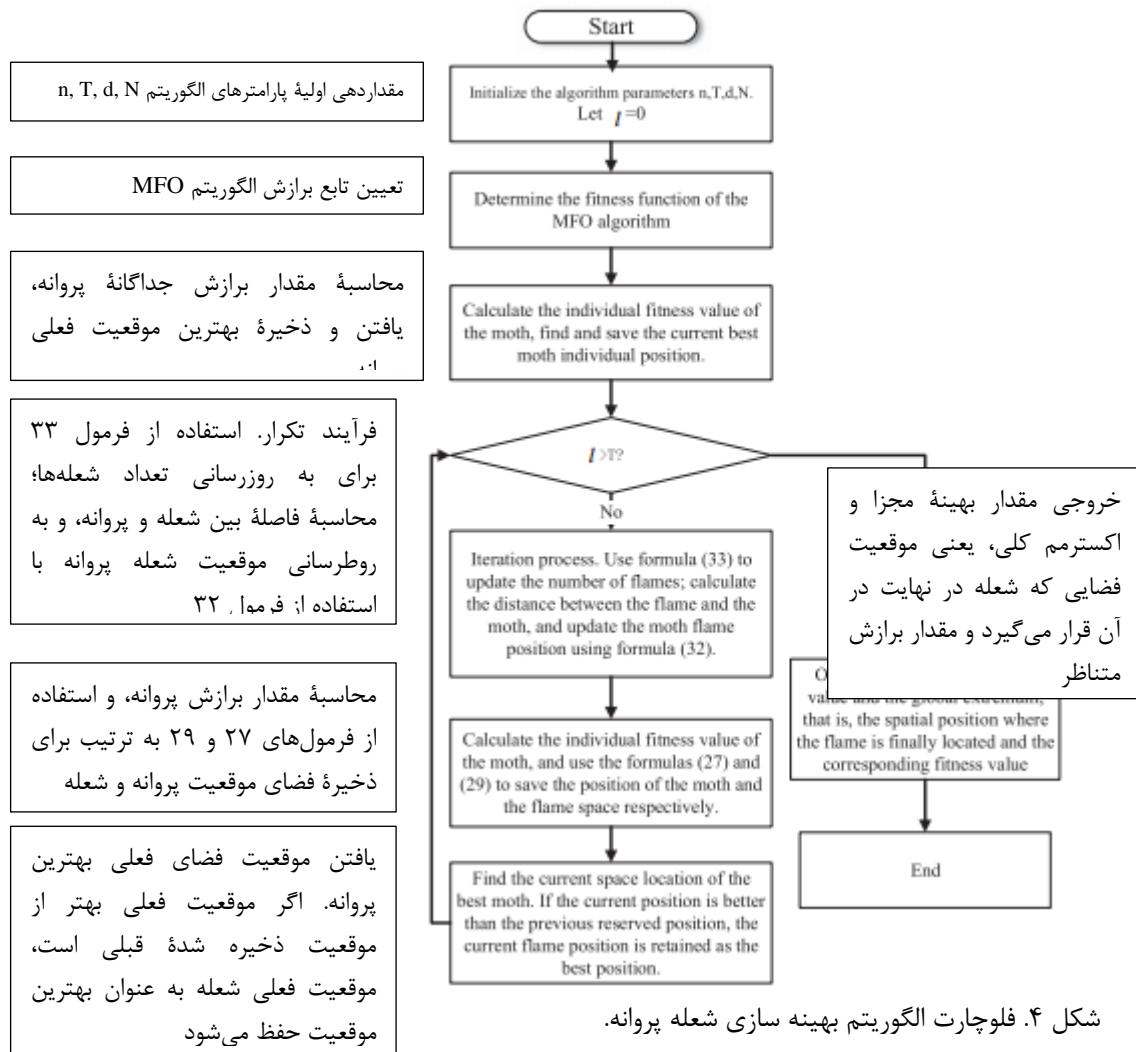
که در آن F_N تعداد کاهش‌های شعله انطباقی است؛ l تعداد فعلی تکرارها را نشان می‌دهد؛ N تعداد بیشینه شعله‌ها است؛ و T بیشترین تعداد تکرارها را نشان می‌دهد.

تنظیمات خاص پارامتری الگوریتم MFO در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

در ترکیب با تحلیل فوق، فرآیند بهینه سازی عملیات میکروشبکه بر اساس الگوریتم MFO در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۲- پارامترهای الگوریتم بهینه سازی شعله پروانه.

پارامتر	مقدار پارامتر
ابعاد جمعیت پروانه (n)	۱۰۰
تعداد بیشینه شعله‌ها (N)	۱۰۰
تعداد بیشینه تکرارها (T)	۱۰۰
ثابت شکلدهی مارپیچی (b)	۱/۵



مطالعه موردی

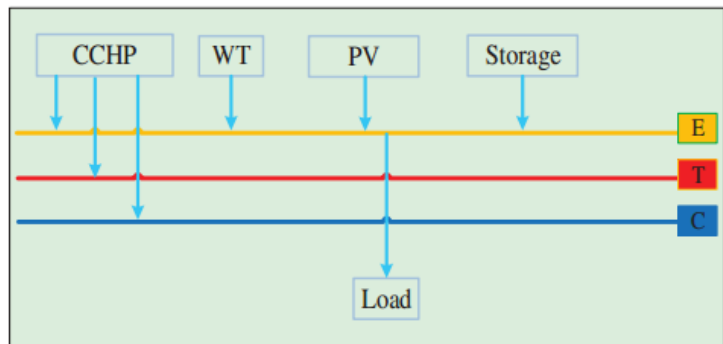
تنظیمات پارامترها و داده‌ها

مرور مورد

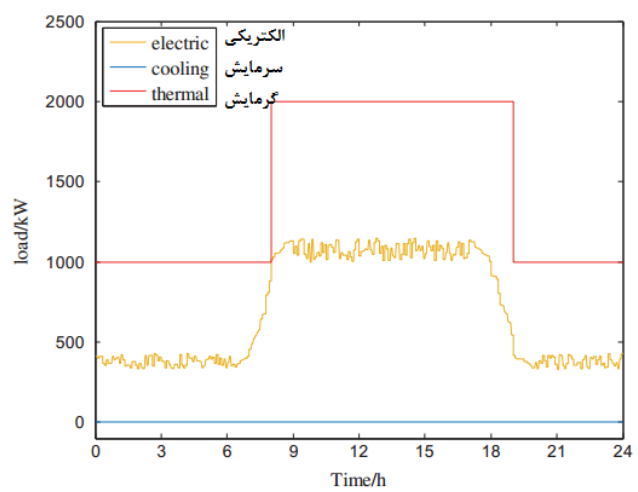
این مقاله یک پروژه میکروشبکه را برای ارزیابی اثربخشی مدل بهینه سازی عملیات مکمل مولتی انرژی میکروشبکه پیشنهادی انتخاب می‌کند. این پروژه شامل توربین گاز $1.5 MW$ ، فتوولتایک $0.4 MWp$ ، توربین باد $0.99 MW$ ، ذخیره $300 kWh$ است. ساختار HMS در شکل ۵ نشان داده شده است. این HMS به صورت کلی توان گرمایشی و سرمایشی را برای پارک فراهم کرده و در عین حال در یک ساختار میکروشبکه انعطاف پذیر مطابق با شرایط زیست محیطی و تقاضای انرژی کار می‌کند.

داده‌های بار

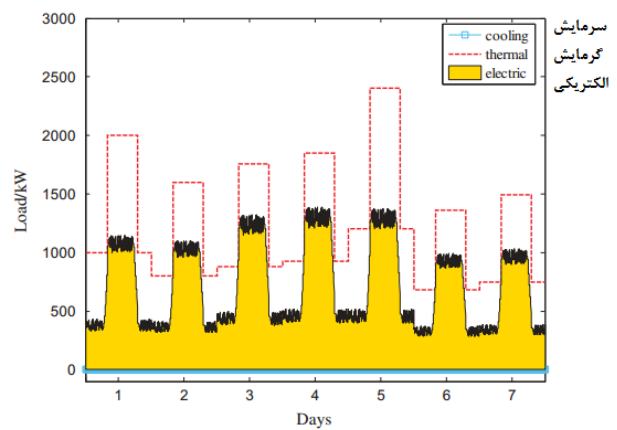
توان بار نصب شده طبق طراحی منطقه تامین توان HMS برابر $667 kW$ است. داده‌های روزانه و هفتگی بار سیستم در زمستان به صورت زیر هستند. فاصله زمانی دریافت داده $5 min$ است، و بنابراین داده‌های تاریخی عملیاتی 1440 نقطه در هر روز و 10080 داده در هر هفته دارد. داده‌های بار در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند.



شکل ۵. نمودار ساختاری سیستم میکروشبکه با ولتاژ کم و متوسط.



شکل ۶- منحنی بارگذاری در یک روز متداول.



شکل ۷- نمودار چند باری هفتگی.

جدول ۳- آمار بارگذاری سرمایشی و گرمایشی برای پروژه‌های نمایشی.

شماره	مساحت (متر مربع)	بار سرمایشی (kW)	بار گرمایشی (kW)
ساختمان ۱	۲۵۹۸۱	۱۳۵۹	۹۴۳

۱۰۰۳	۱۴۴۵	۲۶۹۹۶	ساختمان ۲
۱۱۷۱	۱۶۸۷	۲۹۸۵۰	ساختمان ۳
۱۷۵۵	۲۵۲۸	۳۵۷۳۵	ساختمان ۴
۴۸۷۲	۷۰۱۹	۱۱۸۵۶۲	جمع

بار حرارتی و بار الکتریکی در ساعت ۹ صبح به مقدار اوج رسیدند، و این اوج در ساعت ۸ شب ناپدید شد. و این بار تنظیم خاصی را در یک هفته ارائه می‌کند، در طول یک هفته رشد می‌کند، و در روز جمعه به مقدار ماکزیمم می‌رسد. افت ناگهانی در پایان هفته نمایان می‌شود، و جهش در روز دوشنبه به وجود می‌آید. مطابق با داده‌های طراحی واقعی پروژه، شاخص بار ساختمان سرد 85 W/m^2 است، و شاخص گرمایشی برابر 59 W/m^2 است. بار سرد/گرم در جدول ۳ نشان داده شده است.

داده‌های قیمت انرژی

قیمت انرژی تاثیر زیادی بر اقتصاد کلی سیستم دارد. مطابق با موقعیت واقعی، قیمت فروش الکتریسیته و قیمت خریداری گاز در مقدار ثابتی تعیین می‌شوند، در حالی که قیمت خرید الکتریسیته در سه دوره نوسان دارد، که این در جدول ۴ نشان داده شده است.

داده‌های ذخیره

ظرفیت باتری لیتیومی 180 Ah است. ساختار سری و موازی باتری لیتیومی مطابق با محدوده کاری ترانسفورماتور کاهنده و ظرفیت تقاضای ذخیره انرژی محاسبه می‌شود. تعداد باتری‌های سری ۲۲۲ است، به طوری که محدوده ولتاژ ترانسفورماتور ارضا شود، و تعداد اتصالات موازی برابر سه است. پارامترهای باتری در جدول ۵ نشان داده شده‌اند.

با افزایش عمق دشارژ، چرخه عمر کم می‌شود. در عین حال، رابطه بین ظرفیت دشارژ واقعی و کمیت الکتریکی معادل با برآش u_0 و u_1 مطابق با فرمول (۳۴) به دست می‌آید، و داده‌ها در جدول ۶ نشان داده شده‌اند.

$$L = L_R \left(\frac{D_R}{D_A} \right)^{u_0} e^{u_1 \left(1 - \frac{D_T}{D_R} \right)} \quad (34)$$

جدول ۴- قیمت انرژی (TOU).

قیمت (Y/kWh, W/m ³)			نوع
دوره اوج 10:00 – 15:00	ثابت 6:00 – 10:00 15:00 – 18:00	دوره افت 0:00 – 6:00 18:00 – 24:00	
۱,۲۰۳۵	۰,۸۱۸۵	۰,۵۵۲۲	خرید الکتریسیته
۰,۶۵	۰,۶۵	۰,۶۵	فروش الکتریسیته
	۳,۱۶		خرید گاز

جدول ۵- مقدار پارامتر اصلی باتری لیتیومی.

تصویر	پارامتر
۶۵	توان دشارژ بار ماکزیمم (kW)
۳۰۰	ظرفیت اسمی (kW.h)
۰,۹۵-۰,۲۵	محدوده عملیاتی SOC
۰,۹	آستانه تولید شارژ بیش از حد SOC
۰,۳	آستانه حفاظت دشارژ بیش از حد SOC
٪۹۰	اثربخشی تبدیل شارژ - دشارژ (%)
۰,۰۰۱	نرخ دشارژ خود به خودی (%)
۱۵-۵	طول عمر
۲۰۰۰ (90% DOD)	شاخص چرخه‌ای

جدول ۶- منحنی تاثیر عمق دشارژ باتری لیتیومی بر چرخه عمر واقعی.

شاخص چرخه	DOD	شاخص چرخه	DOD
۲۴۰۰	۰,۶	۸۰۰۰	۰,۱
۲۲۰۰	۰,۷	۴۷۵۰	۰,۲
۲۱۰۰	۰,۸	۳۶۰۰	۰,۳
۲۰۰۰	۰,۹	۳۰۰۰	۰,۴
۱۹۰۰	۱,۰	۲۶۵۰	۰,۵

جدول ۷- پارامترهای عملیاتی توربین گاز تحت شرایط عملیاتی مختلف.

تصویر تحت شرایط عملیاتی مختلف			پارامتر
۵۰	۷۵	۱۰۰	ضریب بار (%)
۷۴۲	۱۱۱۸	۱۴۹۰	توان الکتریکی (Kw)
۷۶۵	۱۱۴۶	۱۵۲۸	توان خروجی (kW)
۱	۱	۱	ضریب توان
۴۰۳	۳۹۹	۴۰۰	ولتاژ (V)
۱۰۶۴	۱۶۱۳	۲۴۱۶	جریان (A)
۵۰	۵۰	۵۰	فرکانس (Hz)

داده‌های توربین گاز

تحت شرایط عملیاتی مختلف، پارامترهای توربین گاز در جدول ۷ نشان داده شده‌اند.

نتایج و بحث

مطابق با داده‌های پارامتری و بار چند متغیری یک روز متداول در این مثال، اثربخشی مدل بهینه سازی عملیاتی مکمل مولتی انرژی اجرا شده در مقاله حاضر با الگوریتم‌های بهینه سازی MFO ارزیابی می‌شوند. با محاسبه هزینه‌های عملیاتی هر منبع میکرو و هزینه عملیاتی کل سیستم تحت سناریوهای مختلف،

استراتژی برنامه ریزی سیستم تحت سناریوهای متناظر به دست می‌آید. چند سناریوی مکمل برای انواع منبع میکرو در مثال‌ها به صورت زیر وجود دارد:

سناریوی ۱: میکروشبکه اتصال یافته به شبکه، شامل تولید توان باد، فتوولتاییک، ذخیره الکتریکی، و CHP، که دارای چهار نوع میکرومنبع برای فراهم کردن چند بار است.

سناریوی ۲: میکروشبکه متصل به شبکه شامل تولید توان بار، ذخیره الکتریکی، و CHP، که دارای سه نوع میکرو منبع برای مطابقت با بارهای چندگانه کاربر است.

سناریوی ۳: میکروشبکه اتصال یافته به شبکه شامل سه نوع منبع میکرو، فتوولتاییک، ذخیره الکتریکی و CHP است، که مطابق با چند بار مصرف کننده است.

می‌توان نتیجه گرفت که هر سه سناریو دارای RE، ذخیره الکتریکی و CHP هستند. سناریوی ۱ با دو نوع RE پیچیده تر است، در حالی که سناریوهای ۲ و ۳ دارای یک نوع هستند، و همگی می‌توانند الکتریسیته را به شبکه بفروشند یا خریداری کنند.

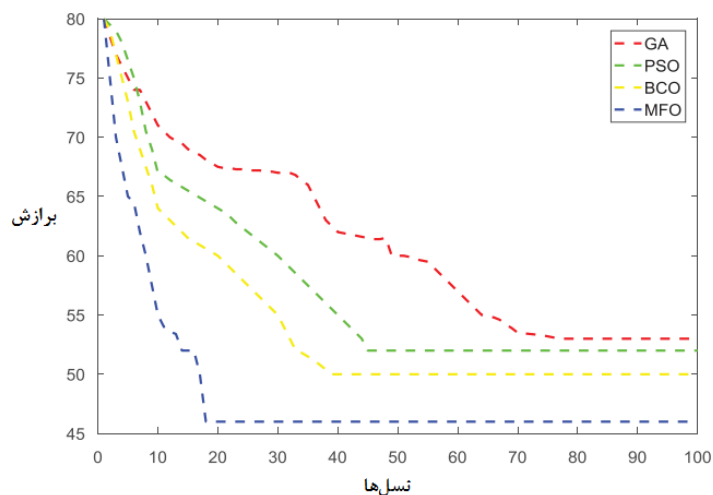
نتیجه بهینه سازی الگوریتم

با داده‌های اولیه و پارامترهای تنظیم شده طبق بخش ۵-۱، از الگوریتم MFO پیشنهادی برای حل مسئله بهینه سازی عملیاتی با در نظر گرفتن انواعی از قیدها استفاده می‌شود. برای بهبود اعتبار الگوریتم MFO، منحنی برازش با الگوریتم ژنتیکی (GA)، PSO، و الگوریتم بهینه سازی کلونی زنبور (BCO) مقایسه می‌شود. مقدار مینیمم تولید شده با هر نوع جمعیت ثبت می‌شود، و منحنی برازش به صورت تکراری تولید می‌شود، که در جدول ۸ و شکل ۸ نشان داده شده است.

می‌توان از شکل ۸ مشاهده کرد که پس از بهینه سازی با الگوریتم MFO، وقتی دوره تناوب T ۱۰۰ بار تکرار شد، جواب بهینه در زمان هجدهم به دست می‌آید. زمان کلی در حدود ۱۲,۰۰۶۱۵۵ ثانیه است، و زمان محاسبه پاسخ بهینه برابر ۲,۲۳۸۶۵۲ ثانیه است. الگوریتم GA پس از ۱۰۰ تکرار در جواب بهینه محلی در تکرار ۷۸ قرار می‌گیرد، و زمان محاسبه کلی در حدود ۱۶,۰۸۹۷۱۲ ثانیه است. الگوریتم PSO پس از ۱۰۰ تکرار در جواب بهینه محلی در تکرار ۴۵ قرار می‌گیرد، و زمان محاسبه کلی در حدود ۱۵,۷۸۰۳۴۶ ثانیه است. و الگوریتم GA پس از ۱۰۰ تکرار در تکرار ۳۹ به جواب بهینه محلی می‌رسد، و زمان محاسبه کلی در حدود ۱۴,۳۲۰۸۹۲ ثانیه است. بنابراین، استفاده از الگوریتم MFO برای حل مقدار بهینه امکان پذیر و کارآمد خواهد بود.

جدول ۸- زمان محاسبه بر اساس الگوریتم MFO.

الگوریتم	نسل بهینه	زمان محاسبه	CPU کلی
GA	۷۸	۱۱,۳۴۹۸۱۱ ثانیه	۱۶,۰۸۹۷۱۲ ثانیه
PSO	۴۵	۸,۷۶۴۳۳۱ ثانیه	۱۵,۷۸۰۳۴۶ ثانیه
BCO	۳۹	۵,۴۳۵۴۲۲ ثانیه	۱۴,۳۲۰۸۹۲ ثانیه
MFO	۱۸	۲,۲۳۸۶۵۲ ثانیه	۱۲,۰۰۶۱۵۵ ثانیه



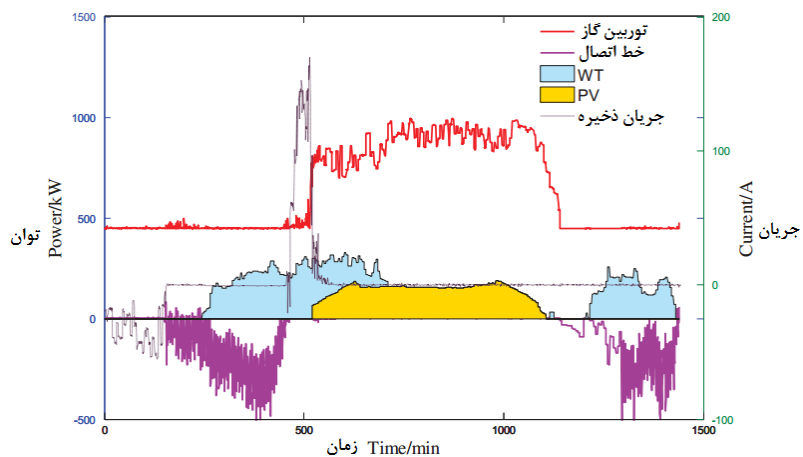
شکل ۸- منحنی برازش الگوریتم‌های مختلف.

نتایج بهینه سازی

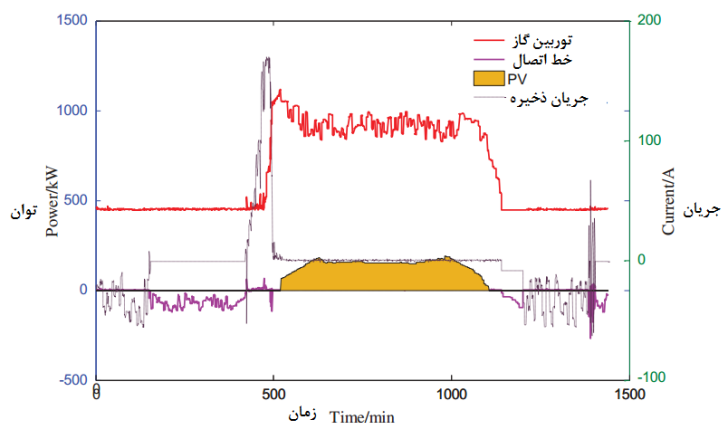
استراتژی ۱ شامل دو منبع انرژی تجدیدپذیر، توان باد و فتوولتاییک است. نتایج عملیات بهینه بر اساس الگوریتم MFO در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. توان توربین گاز با حرارت تعیین شده، در زمان ظهر به مقدار ماکزیمم می‌رسد، و عملیات توان پایین را در زمان شب حفظ می‌کند. عملکرد اصلی ذخیره انرژی متعادل کردن نوسانات باد و فتوولتاییک است. وقتی توان باد به مقدار اوج خود می‌رسد، شروع به کار کرده و شارژ می‌شود. جریان شارژ ماکزیمم برابر $169,73 A$ است. این خط اتصال تضمین کننده تعادل توان فعال سیستم خواهد بود، و مقادیر ماکزیمم و مینیمم آن به ترتیب برابر $82,16$ و $-565,37$ کیلووات هستند. توان باد و فتوولتاییک‌ها همگی به شبکه منتقل می‌شوند. می‌توان با استراتژی مکمل ۱ مشاهده کرد که این مزیت محاسبات مولتی انرژی بوده و مطابق با تقاضای کاربر برای بار حرارتی و بار الکتریکی است. نتایج بهینه سازی به شرایط بهینه و قیدهای مدل می‌رسند، و مولفه‌های HMS به صورت اقتصادی کار می‌کنند، و این تایید می‌کند که مدل بهینه سازی مکمل امکان سنجی خاصی در استراتژی ۱ دارد.

استراتژی ۲ شامل یک منبع انرژی پاک ساده از فتوولتاییک‌ها است، که با توربین گاز، ذخیره انرژی، و توان خط اتصال تنظیم می‌شود، و استراتژی‌های عملیاتی هر پارامتر و منبع میکرو با استراتژی ۱ مشابه هستند. خروجی هر منبع میکرو پس از عملیات الگوریتم MFO در شکل ۱۰ نشان داده شده است. از نتیجه بهینه سازی، توان فتوولتاییک خروجی کلی است. از آنجایی که توربین گاز از استراتژی عملیات توان تعیین شده با حرارت استفاده می‌کند، منحنی خروجی تفاوت کمی با استراتژی ۱ دارد، و توان بیشینه $1163,77 kW$ است. تجهیزات ذخیره انرژی باید چندین بار به دلیل نوسان خروجی فتوولتاییک شارژ و دشارژ شوند. و زمانی که توربین گاز به اوج خود رسید و فتوولتاییک متصل شد، شارژ و دشارژ می‌شود، و جریان دشارژ ماکزیمم برابر $169,497$ است. خط اتصال تضمین کننده تعادل توان فعال سیستم است. وقتی خروجی بار منبع میکرو مطابق با شرایط نبود، می‌تواند الکتریسیته را از شبکه خریداری کند. بنابراین، هزینه خرید الکتریسیته بیشتر می‌شود، و از آنجایی که ظرفیت نصب شده فتوولتاییک نسبت به توان باد کوچک بود، درآمد الکتریسیته متصل به شبکه در سیستم تقریباً کم خواهد بود. توان ماکزیمم و توان مینیمم خط اتصال

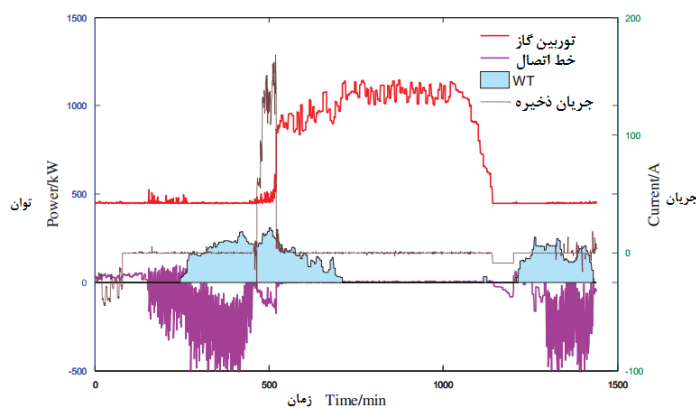
به ترتیب برابر ۶۷,۸۴ و ۲۶۶,۸۷- کیلووات است. می‌توان مشاهده کرد که منابع میکرو پس از بهینه سازی الگوریتم MFO سازگار با محدودیت‌ها و اهداف بهینه سازی مدل بهینه سازی عملیات مکمل مولتی انرژی هستند.



شکل ۹- نمودار بهینه سازی خروجی مکمل ذخیره توربین گاز WT-PV.



شکل ۱۰- نمودار بهینه سازی خروجی مکمل ذخیره - توربین گاز PV.



شکل ۱۱- نمودار بهینه سازی خروجی مکمل ذخیره - توربین گاز WT.

استراتژی ۳ شامل انرژی باد، یک منبع انرژی پاک ساده با نوسانات قدرتمند است. نتایج عملیات بهینه از الگوریتم MFO در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج بهینه سازی نشان می‌دهند که منحنی توان خروجی توربین گاز مشابه با استراتژی ۲ هستند، و توان بیشینه توربین گاز برابر ۱۱۴۶،۱۳ کیلووات است. از دستگاه ذخیره انرژی برای تعادل نوسان قدرتمند باد استفاده می‌شود. وقتی باد شدید باشد، باتری شارژ می‌شود. وقتی باد ضعیف باشد، باتری دشارژ می‌شود. جریان شارژ ماکزیمم برابر ۱۶۷،۹۳ A است. به دلیل ظرفیت نصب بالای توان باد، این توان بخش بزرگی از توان خط اتصال را شامل شده و درآمد فروش توان خوبی دارد. بنابراین، هزینه عملیاتی خط اتصال تقریباً کم است، و اتصالات توان ماکزیمم و مینیمم به ترتیب برابر ۵۱،۶۷ kW و ۴۹۹،۳۷ kW- هستند. نتایج بهینه سازی بر اساس الگوریتم MFO در استراتژی ۳ مطابق با اهداف بهینه سازی و قیدها هستند.

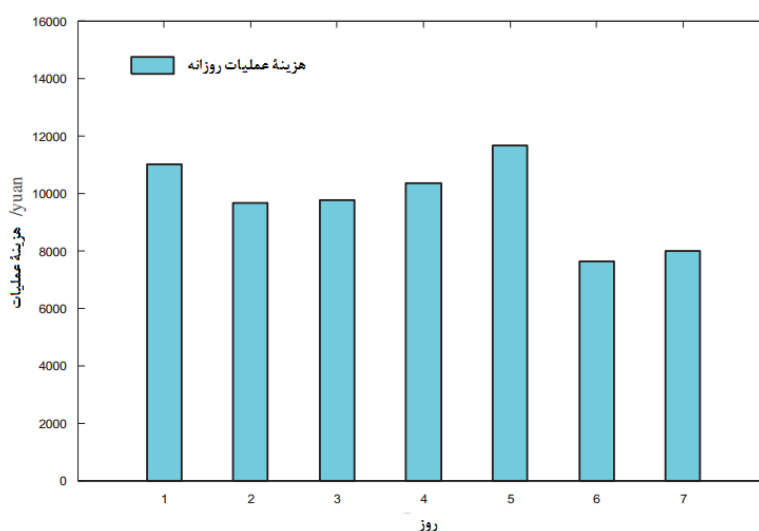
تحلیل نتایج بهینه سازی

مولفه‌های هزینه عملیاتی بر اساس الگوریتم MFO در استراتژی‌های تکمیلی متفاوت در جدول ۹ نشان داده شده‌اند. از چشم انداز استراتژی، هزینه عملیاتی استراتژی ۱ بر اساس الگوریتم MFO کمترین مقدار را دارد، زیرا از منابع RE بیشتری استفاده می‌کند. هزینه عملیات بهینه هفتگی HMS در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

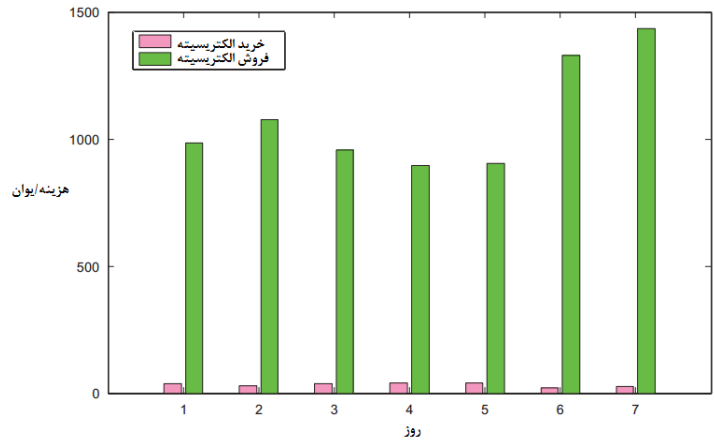
هزینه عملیاتی میانگین HMS با الگوریتم MFO برابر ۹۷۲۱،۱۹ و مقدار ماکزیمم آن برابر ۱۱۶۶۸ است.

جدول ۹- آمار هزینه نتایج بهینه سازی استراتژی مکمل مختلف.

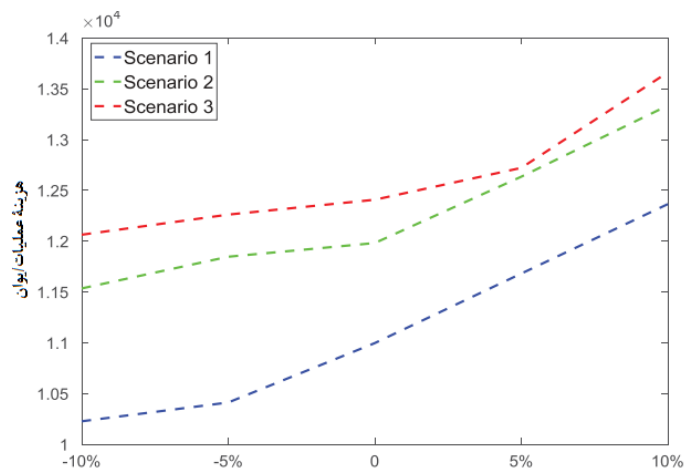
الگوریتم	استراتژی‌ها	هزینه خط اتصال	هزینه توربین گاز	هزینه ذخیره	مجموع
MFO	سناریوی ۱	-۱۰۴۰،۶۵	۱۱۸۷۸،۹۶	۱۵۹،۰۴	۱۰۹۹۷،۳۵
	سناریوی ۲	-۱۰۲۰،۱۲	۱۲۸۳۱،۸۷	۱۷۰،۵۹	۱۱۹۸۲،۳۴
	سناریوی ۳	-۲۵۴،۰۱	۱۲۴۰۱،۲۷	۲۶۱،۴۵	۱۲۴۰۸،۷۱



شکل ۱۲- هزینه عملیات هفتگی در مورد ۱.



شکل ۱۳- خرید و فروش هفتگی خط اتصال.



شکل ۱۴- تاثیر قیمت‌های الکتروسیته بر هزینه‌های عملیات سیستم در سه سناریو.

هزینه خط اتصال شامل هزینه خریداری الکتروسیته و هزینه فروش الکتروسیته است. این قیمت یک عامل کلیدی برای بهینه سازی است. هزینه خرید الکتروسیته و فروش الکتروسیته در استراتژی ۳ بر اساس الگوریتم MFO طبق شکل ۱۳ هستند.

هزینه هفتگی میانگین خرید الکتروسیته بر اساس الگوریتم MFO برابر $Y = 33,34$ است. میانگین درآمد فروش الکتروسیته هفتگی برابر $Y = 1083,03$ بر اساس الگوریتم MFO است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که هزینه عملیاتی پایین تر الگوریتم MFO به دلیل کاهش خرید الکتروسیته است، و الگوریتم MFO تقریباً نیازی به خرید الکتروسیته از شبکه نداشته و به شرایط استقلال سیستم می‌رسد.

تحلیل حساسیت قیمت‌های انرژی

برای تجزیه و تحلیل بیشتر تاثیر تغییرات پارامتری بر سناریوهای پیشنهادی در این مقاله، تحلیل حساسیت نسبت تغییر قیمت انرژی در این بخش انجام می‌شود. این بخش به طور مناسبی نسبت تغییر قیمت الکتروسیته را تغییر می‌دهد تا تاثیر قیمت انرژی بر هزینه عملیاتی را در سناریوهای مختلف بررسی کند. HMS می‌تواند خروجی ژنراتور را مطابق با قیمت الکتروسیته تنظیم کند، خرید و فروش الکتروسیته را تنظیم کند، و عملیات اقتصادی سیستم را تحقق بخشد. حساسیت هزینه به قیمت الکتروسیته در شکل ۱۴

نشان داده شده است.

شکل ۱۴ تاثیر قیمت‌های الکتريسيته بر هزینه‌های عملیاتی سیستم در سه سناریو را نشان می‌دهد. وقتی قیمت الکتريسيته تغییر می‌کند، هزینه‌های عملیاتی سناریوهای ۲ و ۳ آهسته تر از سناریوی ۱ تغییر می‌کنند. تغییر قیمت الکتريسيته منجر به تغییر تبادل الکتريسيته بین سیستم و شبکه توان می‌شود. در حین کاهش مقدار الکتريسيته خریداری شده، سود فروش الکتريسيته سیستم با افزایش اثربخشی عملیاتی CHP در حد امکان در دوره با قیمت بالا بیشتر می‌شود. این منجر به تغییرات کوچکتر در هزینه عملیاتی خواهد شد.

نتیجه گیری

در این مقاله، الگوریتم MFO برای بهینه سازی عملیات HMS در سه سناریوی مکمل، با هدف کمینه سازی هزینه عملیاتی کلی، ارائه شده و برای مطالعه پژوهش توان و تقاضای حرارتی در پروژه نمایشی HMS اعمال می‌شود. دو واحد تولید مختلف بهینه سازی می‌شوند: از توربین گاز و ذخیره و دو نوع RE استفاده می‌شود: توان باد و فتوولتائیک. ابتکارات نتیجه گیری‌های کار فوق به صورت زیر هستند:

(۱) برای حل مسئله برنامه ریزی بهینه سازی سیستم، یک سیستم انرژی هیبرید شامل توان باد، فتوولتائیک، توربین گاز، و ذخیره انرژی معرفی شد. برای به دست آوردن هزینه عملیاتی مینیمم، یک مدل بهینه سازی عملیات ایجاد شد، و نشان داده شد که مدل پیشنهادی این مقاله نقش راهنمای خاصی در شرایط اقتصادی سیستم انرژی هیبریدی دارد.

(۲) در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، الگوریتم MFO در این مقاله دارای مشخصات سرعت حل سریع و دقت بالا است. این الگوریتم می‌تواند به نتایج بهتری برای کاربرد و حل مسئله بهینه سازی عملیات میکروشبکه برسد. جواب بهینه برای هجدهمین بار پس از ۱۰۰ تکرار به دست می‌آید. و سرعت حل سریع تر است، که این سبب تحقق توزیع اقتصادی هر خروجی منبع میکرو خواهد شد.

(۳) برای تحلیل نتایج، هزینه عملیاتی توربین گاز سبب ایجاد نسبت بالاتر در هزینه عملیاتی کل سیستم می‌شود، و این نقش مهمی در حل مدل بهینه سازی عملیات مکمل مولتی انرژی دارد. نتیجه بهینه بر اساس الگوریتم MFO هزینه کمتری در خرید الکتريسيته داشته است، که این به دلیل کاهش خرید الکتريسيته و وابستگی بالا بود.

به دلیل محدودیت ابعاد مدل و کاربرد الگوریتم، مدل عملیات مکمل مولتی انرژی پیشنهاد شده در این مقاله هنوز مسائلی مثل کوپلینگ در بین گازهای حرارتی، بار پاسخ تقاضا، و نوسان تامین گاز طبیعی را در نظر نگرفته است. سناریوها و قیدهای فوق در مطالعات بعدی مد نظر قرار خواهند گرفت.

پارامترها

P_{WT} : خروجی توان توربین باد، kW

$f(v)$: چگالی احتمال توان باد، -

k : پارامتر شکل در توزیع ویبول، -

c : پارامتر مقیاس در توزیع ویبول، -

V_{ci} : سرعت قطع ورود باد توربین باد، m/s
 V_{co} : سرعت قطع خروج توربین باد، m/s
 V_f : سرعت اسمی باد در توربین باد، m/s
 $P(pv)$: توان خروجی سیستم PV، kW
 f_{pv} : اثربخشی تبدیل انرژی خروجی فتوولتاییک، ۰,۹
 $P_{r,pv}$: توان اسمی PV
 a_p : ضریب دمای توان PV، $0,0047\ C^{-1}$
 T_r : دمای مدول اسمی PC، درجه سانتیگراد
 T_{pv} : دمای واقعی PV، درجه سانتیگراد
 $P_{ed, max}$: قید توان دشارژ ماکزیمم باتری، kW
 P_{edsoc} : قید حالت شارژ مینیمم باتری، kW
 S_{oc} : نرخ شارژ باتری، %
 η_d : اثربخشی دشارژ باتری، -
 E_m : ظرفیت کلی باتری، kW.h
 Δt : فاصله زمانی شبیه سازی، Δmin
 $P_{ec max}$: قید توان شارژ ماکزیمم باتری، -
 P_{ecsoc} : قید حالت شارژ ماکزیمم باتری، -
 Γ_R : بازدهی موثر کلی باتری، Ah
 L_R : تعداد چرخه‌های باتری، دفعه
 D_R : عمق دشارژ اسمی، %
 C_R : ظرفیت جریان دشارژ اسمی، Ah
 D_A : عمق واقعی دشارژ، %
 $d_{oct,t}$: آمپرساعت در جریان دشارژ معادل بر واحد زمان، Ah
 C_A : ظرفیت واقعی: Ah
 $C_{bat, dep}$: هزینه‌های استهلاک بر واحد شارژ و دشارژ، Y/kWh
 C_{bat} : هزینه سرمایه گذاری ذخیره انرژی، Y
 alt : شارژ کلی، min
 $Q_{MT}(t)$: حرارت باقیمانده اگزوز در t، kJ
 $P_e(t)$: خروجی توربین گاز، kJ
 $\eta_e(t)$: اثربخشی ژنراتور در t، kW
 η_l : ضریب اتلاف حرارت، -
 V_{MT} : مصرف بر واحد زمان، -
 LHV_{NG} : مقدار کالری پایین، Nm^3/h

- C_{gs} : هزینه‌های عملیاتی سیستم CCHP.
- Q_{cp} : مصرف حرارت کلی، Y
- q_1 : توان کالری خالص گاز طبیعی، kJ
- P_{grid} : توان تبادل خط اتصال باس، kJ/Nm^2
- K_f : تعرف، ورود خرید/مازاد، kW
- p_{fuel} : قیمت گاز، Y
- V_t : مصرف گاز در t ، Y/m^2
- $C_{bat, dep}$: هزینه‌های استهلاک ذخیره انرژی، Nm^3/h
- d : تعداد واحدهای تولید توان، Y/kWh
- $P_{l,t}$: خروجی توان در واحد تولید توان قابل برنامه ریزی، زمان
- $P_{pv,t}$: خروجی توان فتوولتاییک در t ، kW
- $P_{wt,t}$: خروجی توان باد توزیع شده در t ، kW
- $P_{grid, t}$: خروجی خط اتصال در t ، kW
- $P_{l, t}$: بار فعال کلی، kW
- SOC_t : حالت بار، kW
- L_H : بار حرارتی، %
- L_C : بار سرد، kW
- F : ضریب مقیاس، kW
- δ^2 : واریانس انطباقی جمعیت، -
- NP : تعداد جمعیت، -
- v_i^G : عملگر جهش، -
- $Rank(G)$: محدوده بردارهای پایه، -
- $F(i)$: ضریب مقیاس تغییرات جمعیت، -
- G_{max} : نسل‌های تغییرات ماکزیمم، -
- η : نسبت ترموالکتریکی اسمی توربین گاز، %