

Vol. 13/ No. 52/Summer 2024

Research Article

Demand Side Management Based on Model Predictive Control in Microgrid in Grid Connected Mode

Masoud Bonyani, Ph.D Student¹ | Mohammad Mehdi Ghanbarian, Assistant Professor^{2*} | Mohsen Simab, Assistant Professor³

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Marvdasht, Iran, masoudbonyani@miau.ac.ir

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Kazerun Branch, Kazerun, Iran, mm.ghanbarian@iau.ac.ir

³Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Marvdasht Branch, Marvdasht, Iran, mo.simab@iau.ac.ir

Correspondence

Mohammad Mehdi Ghanbarian, Assistant Professor of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Marvdasht Branch, Marvdasht, Iran, mm.ghanbarian@iau.ac.ir

Received: 21 August 2022

Revised: 15 January 2023

Accepted: 21 February 2023

Abstract

In this article, the control method of the economic predictive model for the use of the efficiency tariff of the photovoltaic backup system, diesel generator and microgrid, connected to the grid using the closed loop control system, the optimal open loop control, and also through the control and strengthening of the primary open loop has been. The main goal of this study is to minimize the power grid energy and fuel costs by evaluating the limits related to the level of fuel level in diesel fuel tanks. In addition to complying with the restrictions among the controllable variables, this control method also meets the load requirements. In order to obtain the benefits of feedback and predict the optimal power timing as a back-up energy system control problem, as well as the diesel generator connected to the microgrid, it is modeled based on the linear programming structure. Specifically, analysis is divided into two groups. The first case in the alternative model is when: outage occurs between 7 AM and 6 PM and the other in the grid energy state occurs when the grid is available for more than 24 hours. Energy performance shows, cost savings and income, in the control of daily economic forecasting model has improved. As long as, daily energy saving is up to 52%, while diesel energy is up to 85%. Optimum operation control can be well associated with uncertainty and disturbance in the result.

Keywords: Demand side management, Microgrid, Renewable energy resources, Model predictive control.

Highlights

- Using a photovoltaic backup system and a diesel generator connected to the microgrid.
- Assessment of limits to fuel level in diesel tanks.
- Predictive model control algorithm to determine optimal values of future control inputs in a closed loop system.
- Gray Wolf Optimization Algorithm by Investigating Smart Grid Complexity with Uncertainties Related to PHEV Charging Behavior.

Citation: M. Bonyani, MM. Ghanbarian, and M. Simab, "Demand Side Management Based on Model Predictive Control in Microgrid in Grid Connected Mode," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 13, no. 52, pp. 81–103, 2024, doi:10.30495/jce.2023.1996352.1280, [in Persian].

مدیریت تقاضا در یک ریز شبکه متصل به شبکه با استفاده از کنترل مدل پیش‌بین

مسعود بنیانی^۱ | محمد مهدی قنبریان^{۲*} | محسن سیماب^۳ ID

چکیده:

در این مقاله، از روش کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی برای کنترل و بهره‌برداری بهینه از تعرفه سیستم‌های فتوولتائیک، دیزل ژنراتور و ریز شبکه‌ها با دو شرایط جزیره‌ای و متصل به شبکه، استفاده شده است. به منظور داشتن عملکرد بهینه، از روش‌های کنترلی شامل سیستم کنترل حلقه بسته، کنترل بهینه حلقه باز و تقویت حلقه‌ی باز اولیه استفاده شده است. هدف اصلی این مقاله به حداقل رساندن انرژی شبکه‌ی برق و هزینه‌های سوخت از طریق ارزیابی محدودیت‌های مربوط به سطح تراز سوخت در مخازن سوخت دیزلی می‌باشد. در روش‌های کنترلی استفاده شده علاوه بر انطباق با محدودیت‌ها در بین متغیرهای قابل کنترل، الزامات بار نیز برآورده می‌شود. به منظور به دست آوردن مزایای بازخورد و پیش‌بینی، زمان‌بندی توان بهینه به عنوان یک مسئله کنترل سیستم انرژی پشتیبان و نیز دیزل ژنراتور متصل به ریز شبکه بر اساس ساختار برنامه‌ریزی خطی مدل‌سازی شده است. به طور خاص، تجزیه و تحلیل به دو گروه تقسیم می‌شود. اولین مورد در مدل جایگزین زمانی است که خاموشی بین ساعت ۷ صبح الی ۶ بعدازظهر اتفاق می‌افتد و دیگری در حالتی است که کل شبکه در ۲۴ ساعت در دسترس می‌باشد. بررسی وضعیت مصرف انرژی نشان می‌دهد، صرفه‌جویی در هزینه و بالا رفتن درآمد، با استفاده از روش پیشنهادی بهبود یافته است. به طوری که، صرفه‌جویی در مصرف انرژی روزانه می‌تواند تا ۵۲ درصد باشد. در حالی که مصرف انرژی دیزل تا ۸۵ درصد کاهش می‌یابد. کنترل عملیات بهینه می‌تواند به خوبی با عدم قطعیت و اختلال در نتیجه استفاده از روش‌های کنترلی ارائه شده، همراه باشد.

کلید واژه‌ها: ریز شبکه، کنترل مدل پیش‌بینی، مدیریت تقاضا، منابع انرژی تجدیدپذیر

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مرودشت، ایران،
masoubonyani@miau.ac.ir

^۲ استادیار گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون، کازرون، ایران،
mm.ghanbarian@iau.ac.ir

^۳ استادیار گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت، مرودشت، ایران،
mo.simab@iau.ac.ir

نویسنده مسئول

* محمد مهدی قنبریان، استادیار گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون، کازرون، ایران،
mm.ghanbarian@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۳۰ مرداد ۱۴۰۱

تاریخ بازنگری: ۲۵ دی ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش: ۲ اسفند ۱۴۰۱

<https://doi.org/10.30495/jce.2023.1996352.1280>

۱-مقدمه

توسعه شبکه انتقال یکی از مهم‌ترین بخش‌های سیستم قدرت محسوب می‌شود که وظیفه آن تعیین پیکربندی بهینه برای شبکه بر اساس تقاضای بار در افق برنامه‌ریزی است [۲۶]. هدف از مسئله توزیع بار اقتصادی یافتن یک طرح مطلوب، برای خروجی نیروگاهها به منظور تامین بار مصرفی در یک افق زمانی مشخص می‌باشد، به طوری که تضمین می‌کند طرح پیشنهاد شده تقاضای بار را در سطح قابل قبولی از قابلیت اطمینان برآورده خواهد کرد [۲۷]. نوسازی، صنعتی شدن و رشد جمعیت منجر به افزایش تقاضای استفاده از برق، در سراسر جهان شده است، لیکن افزایش انرژی به واسطه تولیدات فتوولتائیک، ظرفیت ذخیره‌سازی موجود و انعطاف‌پذیری بارها به‌عنوان منابعی برای یافتن برنامه‌ریزی بهینه حداقل و هزینه‌های عملیاتی استفاده می‌شود [۱]. شبکه‌های هوشمند به روشی پرکاربرد برای افزایش انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت به منظور رسیدگی به تقاضای رو به رشد برای برق به شیوه‌ای پایدار تبدیل شده‌اند، لذا در این مطالعه روش جدیدی برای

مدیریت جریان‌های برق یک سیستم قدرت در دو حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه توسعه داده، پیشنهاد شده است. از ویژگی‌های روش مذکور اصلاح ضریب بار و مدیریت اوج مصرف شبکه برق می‌باشد به طوری که مدیریت بهینه‌ای در منابع انرژی‌های تجدیدپذیر و منابع ذخیره‌ساز انرژی نموده و از موتورهای دیزلی فقط در شرایط الزام استفاده می‌نماید. ریزش‌بکه‌ها جزء اصلی‌ترین زیرساخت‌های شبکه هوشمند در نظر گرفته می‌شوند [۲]. ریزش‌بکه‌ها که عموماً مربوط به سطح ولتاژهای توزیع می‌باشد از بارهای انعطاف‌پذیر، ژنراتورهای دیزلی، سیستم‌های ذخیره‌ساز و منابع انرژی تجدیدپذیر تشکیل شده است. به‌طور کلی، این سیستم‌ها می‌توانند به شبکه متصل شوند یا در حالت جزیره‌ای برای تأمین برق در خاموشی‌ها کار کنند. سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه به دلیل کاهش چشمگیر هزینه‌ها و مزایای پایداری و قابلیت اطمینان مرتبط، در ریزش‌بکه‌ها به‌طور چشم‌گیری محبوب شده‌اند [۳]. فتوولتائیک‌ها اغلب با ذخایر باتری همراه می‌شوند تا با طبیعت پویای انرژی فتوولتائیک، تقاضای بار و خاموشی‌های برنامه‌ریزی نشده شبکه اصلی کنار بیایند [۴]. علاوه بر این، واحدهای ذخیره‌سازی (باتری) دارای معایب متعددی از جمله سرمایه اولیه زیاد و هزینه‌های تعویض بالا برای کاربردهای بزرگ مانند تأسیسات صنعتی و تجاری هستند.

در این راستا، فتوولتائیک-دیزل ژنراتورهای بدون باتری به‌طور چشم‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا یک روش مقرون به‌صرفه و کافی برای تأمین برق مداوم برای بارها هستند [۵]. در چارچوب‌های کنترل سلسله‌مراتبی، روش‌های کنترلی را می‌توان در ریزش‌بکه‌ها برای بهبود قابلیت اطمینان، عملکرد و انعطاف‌پذیری استفاده کرد. روش‌های کنترل اولیه، ثانویه و سوم در اینجا گنجانده شده است تا یک مفهوم جدید برای ایجاد یکپارچه‌سازی در ریزش‌بکه‌ها با شبکه صورت پذیرد [۶]. کنترل اولیه به پایداری فرکانس و ولتاژ می‌پردازد، در حالی که روش کنترل ثانویه انحرافات فرکانس و ولتاژ را کاهش می‌دهد و مقدار را در محدوده عملیاتی ریزش‌بکه تنظیم می‌کند [۷]. در ریزش‌بکه‌ها، طرح کنترل ثالث وظیفه رسیدگی به چالش‌های عملکرد و زمان‌بندی نیرو را دارد. در سطح سوم کنترل، زمان نمونه برداری می‌تواند تقریباً یک ساعت طول بکشد. بهینه‌سازی عملکرد ریزش‌بکه گامی حیاتی در جهت اطمینان از منبع تغذیه قابل اعتماد و عملکرد مقرون به‌صرفه است. با وجود این، بهینه‌سازی ریزش‌بکه‌ها هنوز یک مساله قابل بررسی است زیرا چندین عامل فنی و اقتصادی باید در نظر گرفته شوند [۸،۵]. موضوع بهینه‌سازی کنترل‌های عملیاتی ریزش‌بکه‌ها توسط مطالعات متعدد از طریق روش‌های حلقه بسته و حلقه باز مورد توجه قرار گرفته است. طرح‌های حلقه باز هزینه کمتر، عملکرد پایدار و پیاده‌سازی آسان را ارائه می‌دهند و تنها قادر به مقابله با عدم قطعیت‌ها و اختلالاتی هستند که قبلاً شناخته شده و یا قابل پیش‌بینی باشند [۹]. برعکس، الگوریتم‌های حلقه بسته به دلیل مکانیسم بازخوردشان^۱ در برابر عدم قطعیت و اختلالات قوی‌تر هستند [۹،۴]. روش‌های کنترلی متعددی برای توسعه طرح‌های کنترلی بهینه برای ریزش‌بکه‌ها مبتنی بر تکنیک حلقه بسته ارائه شده است. به عنوان مثال، مرجع [۱۰] در این چارچوب، ریزش‌بکه‌ها را به‌عنوان سیستم‌های قدرت کارآمد برای بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر با برنامه مدیریت تقاضا در نظر گرفته است. ریزش‌بکه‌هایی که می‌توانند انرژی خورشیدی را با هزینه کم مهار کنند، به گزینه‌ای جذاب برای کاهش هزینه برق تبدیل شده‌اند. بعضاً کنترل عملیات بهینه وسایل نقلیه بادی-فتوولتائی-باتری-الکتریکی متصل به ریزش‌بکه را با استفاده از یک شبکه عصبی برای افزایش استفاده از انرژی تجدیدپذیر و کاهش توان حاصل از شبکه برق مورد بحث قرار می‌دهد. با وجود این، استراتژی کنترل نتوانست برنامه مدیریت سمت تقاضا را به‌عنوان ابزاری برای بهبود کارایی انرژی در نظر بگیرد [۱۱]. بنابراین از روش کنترل مدل پیش‌بین به‌منظور کاهش هزینه‌های عملیاتی برای ریزش‌بکه‌های مسکونی متصل به شبکه در راستای مقررات‌زدایی از بازار برق و پیش‌بینی‌های نامشخص می‌توان استفاده کرد. در [۱۲] استراتژی‌های مدیریت عملیات بهینه برای کاهش تلفات و هزینه‌های عملیاتی در سیستم‌های فتوولتائیک-باتری و واحدهای حرارتی متصل به ریزش‌بکه با استفاده از منطق فازی و بهینه‌سازی تطبیقی ازدحام ذرات ارائه شده است. در [۲۵] کنترلر مد لغزشی مبتنی بر الگوریتم توده ذرات برای بهبود عملکرد مبدل‌های کنترل کننده یکپارچه کیفیت توان (UPQC) برای کنترل و بهبود کیفیت توان در ریزش‌بکه‌ها از طریق کنترل توان خروجی منبع تولید پراکنده ارائه شده است. یکی از ویژگی‌های متمایز این مطالعه به حداقل رساندن هم‌زمان هزینه‌های انرژی شبکه و هزینه‌های استفاده از سوخت دیزل ژنراتورها با توجه به رابطه بین پارامترهای

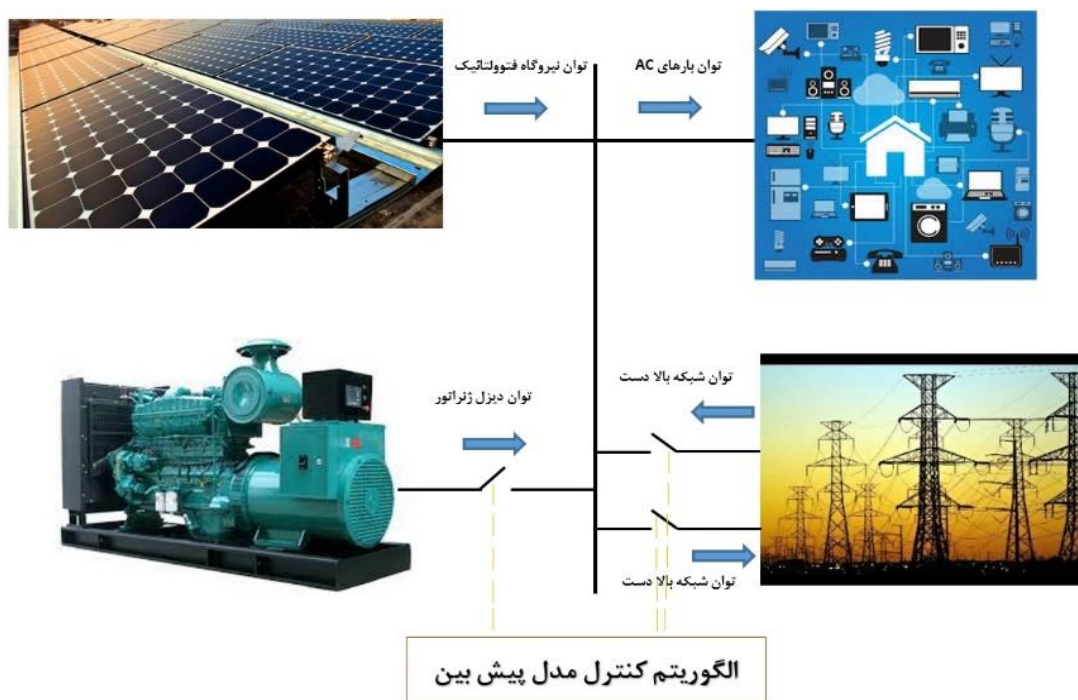
¹ Feedback

قابل کنترل و مقدار سوخت در مخزن دیزل ژنراتور در مدیریت سمت تقاضا است. با توجه به روش حلقه باز که در [۱۳] مورد بحث قرار گرفته است، استفاده از روش حلقه بسته آنلاین، منجر به بهبود در طرح کنترل بهینه است. از آنجا که در روش کنترل عملیات حلقه بسته، مقدار سوخت در مخزن دیزل ژنراتور برای ارائه بازخورد استفاده می‌شود نتیجه حاصل شده با عملیات حلقه باز متفاوت خواهد بود. در بررسی‌های انجام شده استدلال می‌شود که استراتژی‌های مدیریت بهینه‌سازی برای سیستم‌های فتوولتائیک و دیزل ژنراتور متصل به ریز شبکه به عنوان مشکلات کنترلی مدل‌سازی می‌شوند که از طریق روش کنترل مدل پیش‌بینی برای به دست آوردن مزایای بازخورد و پیش‌بینی در سطح سوم مورد بررسی قرار می‌گیرند. بسیاری از روش‌های کنترل مدل پیش‌بین به‌طور گسترده در سیستم‌های قدرت استفاده شده‌اند، زیرا دارای مزایای زیادی از جمله پیش‌بینی رفتار آینده سیستم‌ها، استحکام، پاسخ سریع و مدیریت ورودی‌ها و خروجی‌ها می‌باشند. [۱۴، ۱۵].

۲- الگوی ریاضی سیستم پشتیبان فتوولتائیک-دیزل ژنراتور متصل به ریز شبکه

۲-۱- طرح بندی شماتیک

شکل زیر سیستم ریز شبکه پیشنهادی متشکل از یک نیروگاه فتوولتائیک، یک دیزل ژنراتور معمولی و بارهای متناوب AC را نشان می‌دهد. زمانی که کمبود توان در شبکه به وجود می‌آید و توان تولیدی فتوولتائیک قادر به پاسخگویی تقاضای بار نباشد، یا قطعی برق رخ دهد، می‌توان از برق پشتیبان که توسط دیزل ژنراتورها تولید می‌شود استفاده کرد.



شکل ۱: ریز شبکه با دیزل و فتوولتائیک [۳]

Figure 1. Microgrid with diesel and photovoltaic [3]

۲-۲- انرژی شبکه

در مواردی که تولید فتوولتائیک کمتر از تقاضای برق باشد، شبکه اصلی، برق را تأمین می‌کند و در مواردی که تولید فتوولتائیک بیش از تقاضای برق باشد، شبکه اصلی برق را مصرف می‌کند. طبق مرجع [۱۳] می‌توان شبکه را به یک محدوده خاص محدود کرد.

$$-\infty \leq P_g(t) \leq +\infty \quad (1)$$

در اینجا توان شبکه در زمان t با $P_g(t)$ نشان داده می‌شود. هنگام در نظر گرفتن قطعی شبکه اصلی، توان واقعی موجود به صورت زیر بیان می‌شود،

$$P_g(t) = a_g(t)P_g(t) \quad (2)$$

در اینجا پارامتر در دسترس بودن شبکه در زمان t با $\alpha_g(t)$ نشان داده می‌شود. در مواردی که $\alpha_g(t)$ برابر ۱ باشد، شبکه برق در دسترس است، در حالی که اگر $\alpha_g(t)$ برابر با صفر باشد شبکه برق قطع است.

۲-۳- سیستم انرژی فتوولتائیک

یک آرایه منظم فتوولتائیک می‌تواند توان خروجی زیر را تولید کند،

$$P_{pv}(t) = \eta_{pv} A_{pv} I(t) \quad (3)$$

در اینجا عملکرد آرایه فتوولتائیک با η_{pv} ، فضای آرایه فتوولتائیک با A_{pv} و برخورد تابش خورشیدی روی آرایه فتوولتائیک (کیلووات ساعت بر متر مربع) نشان داده می‌شود. تغییرات در تابش خورشید با ساعات روز رخ می‌دهد، به طوری که در [۱۴] داریم،

$$I(t) = R_B(I_B(t) + I_D(t)) + I_D(t) \quad (4)$$

در اینجا R_B ضریب هندسی می‌باشد که بیان‌گر نسبت برخورد تابش پرتو در صفحه، به تابش استاندارد در صفحه افقی است. تابش جهانی و پراکندگی ساعتی (کیلووات ساعت بر متر مربع) با $I_B(t)$ و $I_D(t)$ نشان داده می‌شود [۱۴]. بر اساس تابش ساعتی و دمای محیط، عملکرد فتوولتائیک را می‌توان به شرح زیر توصیف کرد [۱۵]،

$$\eta_{pv} = \eta_r \eta_{pc} (1 - \beta(T_c - NOCT)) \quad (5)$$

در رابطه فوق η_r عملکرد رتبه‌بندی سازنده ماژول شامل آرایه فتوولتائیک، η_{pc} عملکرد شرط توان، دمای سلول با T_c و ضریب دمای عملکرد ژنراتور با β نشان داده شده است. دمای طبیعی سلول که دارای مقدار معمولی ۴۵ درجه سانتی‌گراد است در محدوده ۰/۰۰۶ تا ۰/۰۰۴ درجه سانتی‌گراد است.

$$T_c = 30 + 0.0175(I(t) - 300) + 1.14(T_a - 25) \quad (6)$$

در رابطه ۶ تابش ساعتی خورشید با $I(t)$ و دمای محیط با T_a نشان داده شده است.

۲-۴- ژنراتور دیزلی

بر اساس مرجع [۱۵]، دیزل ژنراتورها همراه با پارامترهایشان مدل‌سازی می‌شوند، توان تولید شده توسط ژنراتورهای دیزلی به صورت زیر بیان می‌شود،

$$F_{dg}(l) = \begin{cases} F_c(aP_{dg}(l) + b_d P_{ndg}) & \text{if } P_{dg}(l) > 0 \\ 0 & \text{if } P_{dg}(l) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

در اینجا قدرت اسمی دیزل ژنراتور با P_{ndg} ، قیمت سوخت ($\$/L$) با F_c و ضرایب تابع هزینه سوخت دیزل ژنراتور با a و b_d نشان داده می‌شوند [۱۶]. موارد ذکر شده توسط اطلاعات سازنده دیزل ژنراتور جمع‌آوری شده است. در این مقاله، از ضرایب ذکر شده استفاده می‌شود: $a = 0.246 \text{ L.kwh}$ و $b_d = 0.8145 \text{ L.kwh}$ [۱۶].

بر اساس [۱۷]، توان اسمی تولید شده از طریق دیزل ژنراتور را می‌توان برای تخمین توان تولیدی P_{dg} به صورت زیر محاسبه کرد.

$$P_{dg} = P_{ndg} \times N_{dg} \times \eta_{dg} \quad (8)$$

در اینجا تعداد دیزل ژنراتورها با N_{dg} و عملکرد دیزل ژنراتور با η_{dg} نشان داده شده است. در نتیجه، از رابطه ۷ می‌توان به صورت زیر نوشت،

$$F_{dg}(l) = F_c(aP_{dg}(l) + \frac{b_d P_{dg}(l)}{N_{dg} \eta_{dg}}) \quad (9)$$

با فرض τ_{dg} برابر،

$$\tau_{dg} = \frac{b_d}{N_{dg} \eta_{dg}} \quad (10)$$

هزینه مصرف سوخت را می‌توان با توجه به رابطه ۱۱ محاسبه کرد،

$$F_{dg}(l) = F_c(a + \tau_{dg})P_{dg}(l) \quad (11)$$

۲-۴-۱- ظرفیت مخزن سوخت

در حوزه زمان گسسته، دینامیک حجم سوخت را می‌توان به این صورت محاسبه کرد،

$$V(l+1) = V(l) - t_s(aP_{dg}(l) + \tau_{dg}P_{dg}(l))10^{-3} \quad (12)$$

در اینجا، زمان نمونه‌برداری با t_s و حجم سوخت داخل مخزن دیزل ژنراتور در زمان l با $V(l)$ نشان داده می‌شود. اگر مخزن سوخت به طور کامل خالی شود، هوا وارد پمپ تزریق سوخت می‌شود و منجر به آسیب پمپ و انژکتور می‌شود. در این شرایط، ابعاد مخزن میزان سوخت را به صورت زیر تعیین می‌کند،

$$V_{\min} \leq V(l) \leq V_{\max} \quad (13)$$

جایی که حداکثر و حداقل حجم مجاز سوخت در مخزن به ترتیب با V_{\min} و V_{\max} نشان داده شده است. شکل مخزن مکعبی در نظر گرفته شده و حداکثر حجم آن به صورت زیر نمایش داده شده است،

$$V_{\max} = L \times k \times h \quad (14)$$

دانشگاه کشاورزی و فناوری جومو کنیاتا^۱ که متعهد به تولید متخصصان ماهر است که می‌توانند به توسعه کنیا و فراتر از آن کمک کنند. این دانشگاه با هدف تجهیز دانش‌آموزان به مهارت‌های لازم برای مقابله با چالش‌های دنیای واقعی، تأکید زیادی بر آموزش عملی و کارآفرینی دارد.

در اینجا به ترتیب طول، عرض و ارتفاع مخزن سوخت دیزل با k, L و h نشان داده می‌شود که سطح مقطع A_t را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد،

$$A_t = L \times k \quad (15)$$

با در نظر گرفتن جنبه بازخورد، رابطه ۱۶ به عنوان ارتفاع سوخت در مخزن سوخت دیزل مدل شده است،

$$h(l+1) = h(l) - \frac{1}{A_t} t_s (aP_{dg}(l) + \tau_{dg}P_{dg}(l))10^{-3} \quad (16)$$

در اینجا، ارتفاع سوخت در مخزن سوخت دیزل در زمان نمونه‌برداری l با $h(l)$ نشان داده می‌شود و τ_{dg} یک متغیر ثابت از دیزل ژنراتور را نشان می‌دهد که مربوط به بخش دوم رابطه ۷ نسبت به توان خروجی دیزل ژنراتور است. سنسور سطح، یک راه مقرون به صرفه و آسان برای اندازه‌گیری حجم مخزن است. رابطه ۱۷ به صورت زیر بیان شده است،

$$h(l+1) = h(0) - \frac{1}{A_t} t_s (a + \tau_{dg})10^{-3} \sum_{j=1}^l P_{dg}(j) \quad (17)$$

سطح سوخت در باک باید به صورت زیر محدود شود،

$$h_{\min} \leq h(l) \leq h_{\max} \quad (18)$$

۲-۵- روش مدیریت سمت تقاضا

در ساختار مدیریت سمت تقاضا، کنترل بهینه روی خط حلقه بسته سیستم فتوولتائیک-دیزل ژنراتور سعی می‌کند هزینه‌های عملیات را به حداقل برساند [۱۸]. با توجه به مرجع [۱۹]، قیمت برق روزانه که در سالیان انتخابی برای کاربران تجاری و صنعتی استفاده می‌شود به صورت زیر محاسبه می‌شود،

$$\rho(t) = \begin{cases} \rho_{off} = 0.06\$, & t \in 00:00hrs - 06:00hrs \text{ and } 22:00hrs - 00:00hrs \\ \rho_{peak} = 0.12\$, & t \in 06:00hrs - 22:00hrs \end{cases} \quad (19)$$

در اینجا، دوره اوج قیمت با P_{peak} و دوره قیمت خارج از اوج با P_{off} نشان داده شده است.

۳- مشکل بهینه‌سازی

۳-۱- تابع هدف

این مقاله مسئله بهینه‌سازی محدود را بر اساس مفاهیم کنترل مدرن پیشنهاد می‌کند. کنترل عملیات بهینه به طور هم‌زمان توان خریداری شده از شبکه اصلی برق و همچنین هزینه‌های مصرف سوخت دیزل ژنراتور را به حداقل می‌رساند. بنابراین، تابع هدف در هر زمان نمونه‌گیری k خواهد بود،

$$\min F = \min(\omega t_s \sum_{j=1}^{l+N_c-1} \rho(j) P_g(j/l) + (1-\omega) F_c T_s (a + \tau_{dg}) \sum_{j=1}^{l+N_c-1} P_{dg}(j/l)) \quad (20)$$

هزینه انرژی با $\rho(t)$ ، هزینه سوخت با F_c ، توان شبکه و توان دیزل ژنراتور با $P_{dg}(j/l)$ و $P_g(j/l)$ نشان داده می‌شود، در بازه نمونه‌برداری λ بر اساس اندازه‌گیری در لحظه k . علاوه بر این، افق کنترل با N_c ، ضریب وزنی با ω و t_s زمان نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. مجموع کل فاکتورهای وزنی باید یک در نظر گرفته شود. تابع هدف نشان داده شده در رابطه ۲۰، در قسمت اول، توان خریداری شده از شبکه و سپس در قسمت دوم مصرف سوخت دیزل ژنراتور را کاهش می‌دهد.

۳-۲- محدودیت‌ها

سیستم انرژی پشتیبان فتوولتائیک - دیزل ژنراتور متصل به ریزشبهک پیشنهادهی به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی چند معیاره برنامه‌ریزی خطی محدود نشان داده شده است. محدودیت‌های عملیاتی و فنی از نظر ریاضی بر کل سیستم تأثیر می‌گذارد. در نتیجه افق زمانی پیش‌بینی، تقاضای بار و تعادل عرضه برق ریزشبهک به شرح زیر خواهد بود،

$$P_L(j) = P_g(j/l) + P_{pv}(j) + P_{dg}(j/l), j = l, \dots, l + N_c - 1 \quad (21)$$

در اینجا، توان پیش‌بینی شده شبکه و توان دیزل ژنراتور با $P_g(j/l)$ ، در بازه نمونه‌برداری λ بر اساس داده‌های محاسبه شده در لحظه l نشان داده می‌شوند، در حالی که $P_{pv}(j)$ نشان‌دهنده برق فتوولتائیک است. محدودیت‌های توان خروجی دیزل ژنراتورها محدود می‌باشد به طوری که،

$$0 \leq P_{dg}(j/l) \leq P_{ndg} \quad (22)$$

بار شبکه به روش‌های زیر محدود می‌شود،

$$-\infty \leq P_g(j/l) \leq +\infty \quad (23)$$

۳-۳- الگوریتم کنترل مدل پیش‌بین

در یک سیستم کنترل مدل پیش‌بین حلقه بسته، بهینه بودن و محدودیت‌های سیستم به صراحت در یک افق کنترل محدود مدیریت می‌شوند. یک روش کنترل مؤثر برای مسائل بهینه‌سازی آنلاین، روش کنترل مدل پیش‌بین است [۲۰]. که می‌تواند رویدادهای آینده را پیش‌بینی کند، اقدامات کنترلی مناسب را انجام دهد و پیش‌بینی کند که چگونه متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته تأثیر می‌گذارند. علاوه بر این، رویدادهای آینده بر اساس اندازه‌گیری‌های فعلی کارخانه، وضعیت پویا و متغیر هدف فرآیند محاسبه می‌شوند. یک تابع هزینه از پیش تعیین شده برای تعیین مقادیر بهینه ورودی‌های کنترل آتی استفاده می‌شود. طبق قسمت ۲، محدودیت‌های سیستم بر اساس محدودیت‌های عملی آن تعریف شده و به صورت فشرده شرح داده شده است. تقاضای توان روزانه و خروجی فتوولتائیک به منظور طراحی کنترل بهینه با توجه به کنترل مدل پیش‌بین، پیش‌بینی شده است. با این حال، توان فتوولتائیک ساعتی و توان تقاضا گاهی اوقات از مقادیر پیش‌بینی شده در ریزشبهک فاصله می‌گیرد. برای هر دو توان فتوولتائیک و تقاضا، این انحرافات به عنوان اختلال در نظر گرفته می‌شود.

به عنوان یک نتیجه از پرداختن به کنترل عملیات بهینه، یک کنترل فضای حالت خطی توسط سیستم پشتیبان فتوولتائیک- دیزل ژنراتور متصل به ریزشبهک ارائه شده و مانند طرح حلقه باز، بردار کنترل X شامل یک متغیر کنترلی می‌باشد که به صورت زیر نمایش داده می‌شود،

$$X(l) = [P_g(l/l) \dots P_g(l + N_c - 1/l), P_{dg}(l/l) \dots P_{dg}(l + N_c - 1/l)] \quad (24)$$

زمان l توسط کنترل کننده تعیین و افق کنترل N_c توسط آن محاسبه می شود. سپس، مسئله بهینه سازی حلقه باز با افق عملیاتی N_c به منظور دستیابی به یک راه حل بهینه حل می شود، که در آن فقط بخش t ام از پارامترهای کنترلی P_{dg} و P_g در ریز شبکه گنجانده شده اند. سیستم های فتوولتائیک - دیزل ژنراتور متصل به ریز شبکه به عنوان سیستم های چند ورودی چند خروجی مدل سازی می شوند. کنترل N_c و پیش بینی افق N_p در موضوع بهینه سازی کنترل مدل پیش بین گنجانده شده است. بنابراین، افق کنترل به صورت زیر تعریف می شود،

$$N_c = N - l + 1 \quad (25)$$

در اینجا تعداد کل نمونه ها در افق عملیاتی ۲۴ ساعته توسط N نشان داده شده است. مسئله بهینه سازی با روش کنترل مدل پیش بین به صورت زیر حل می شود [۲۱]:

ا- از رابطه ۲۵ برای محاسبه افق کنترل $N_c(l)$ برای هر زمان نمونه برداری l استفاده کنید.

ب- جواب بهینه را برای افق کنترل محاسبه کنید.

a. تابع هزینه را کاهش دهید (به رابطه ۲۰ مراجعه کنید)؛

b. مطابق با محدودیت؛

ج- t ام کنترل سوئیچینگ برای سیستم انرژی ریز شبکه $[p_g=(1/l), p_{dg}(1/l)]$ را از راه حل بهینه اجرا کنید.

د- پارامتر حالتی را که میزان سوخت را در مخزن سوخت دیزل نشان می دهد محاسبه کنید.

ه- حالت های سیستم، ورودی ها و خروجی ها را با تنظیم $l=l+1$ به روز کنید.

و- به تکرار مراحل ۱ تا ۵ ادامه دهید تا l به یک مقدار از پیش تعیین شده دست یابد.

۳-۴- فرمول بندی ریاضی

بر اساس شکل متعارف شرح داده شده در [۲۲]، تابع هدف و محدودیت ها به صورت زیر به دست می آیند،

$$\begin{cases} f^T X \\ A_{eq} X = b_{eq} \\ AX \leq b \\ L_b \leq X \leq U_b \end{cases} \quad (26)$$

در رابطه ۲۶ عبارت $f^T X$ تابع هدف خطی است که باید به حداقل برسد و بردار X شامل پارامترهای کنترل کل در موضوع بهینه سازی است. ضرایب A_{eq} و b_{eq} مربوط به محدودیت های برابری هستند، در حالی که L_b و U_b مرزهای بالایی و پایینی پارامترها را نشان می دهند. با توجه به رابطه ۲۰، $f^T X$ را می توان به صورت زیر نوشت،

$$f^T = [\omega t_s \rho(j) \dots \omega t_s \rho(N), (1-\omega)t_s(a + \tau_{dg})F_C(j) \dots (1-\omega)t_s(a + \tau_{dg})F_C(N)]_{1 \times 2N_c} \quad (27)$$

بردار X شامل کل متغیرهای قابل کنترل و ارائه شده توسط،

$$X = [P_g(j) \dots P_g(N), P_{dg}(j) \dots P_{dg}(N)]_{1 \times 2N_c} \quad (28)$$

با توجه به محدودیت برابری موازنه توان در رابطه ۲۱، ماتریس A_{eq} به صورت زیر بازیابی می شود،

$$A_{eq} = \left[\begin{array}{cccc|cccc} 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{array} \right]_{N_c \times 2N_c} \quad (29)$$

بردار b_{eq} را می توان به صورت زیر نوشت،

$$b_{eq} = [P_L(j) \dots P_L(N_c)]_{1+N_c}^T - [P_{pv}(j) \dots P_{pv}(N_c)]_{1+N_c}^T \quad (30)$$

از رابطه ۱۸ می توان برای استخراج محدودیت های نابرابری نیز استفاده کرد،

$$\begin{cases} h_{\min} \leq h(l) \Rightarrow -h(l) \leq -h_{\min} \\ h(l) \leq h_{\max} \end{cases} \quad (31)$$

با توجه به رابطه ۳۱، محدودیت های نابرابری به صورت زیر تبدیل می شود،

$$\begin{cases} A_1 X \leq b_1 \\ A_2 X \leq b_2 \end{cases} \quad (32)$$

$$A_1 = \frac{t_s(a + \tau_{dg})10^{-3}}{A_l} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & | & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & | & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & | & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{N_c \times 2N_c} \quad (33)$$

$$A_2 = -\frac{t_s(a + \tau_{dg})10^{-3}}{A_l} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & | & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & | & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & | & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}_{N_c \times 2N_c} \quad (34)$$

$$b_1 = [h(o) - h_{\min} \dots h(o) - h_{\min}]_{1 \times N_c}^T \quad (35)$$

$$b_2 = [h(o) - h_{\min} \dots h(o) - h_{\min}]_{1 \times N_c}^T \quad (36)$$

نابرابری خطی در شکل متعارف در رابطه ۲۶ به صورت زیر توضیح داده شده است،

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} X \leq \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (37)$$

متغیرهای کنترل به محدوده‌ای از حد پایین L_b و بالا U_b محدود می‌شوند. در غیاب نیروگاه‌های خورشیدی، حد پایینی شبکه برق صفر است تا از فروش برق دیزل ژنراتور به شرکت برق جلوگیری شود.

با این وجود، در مورد یک نیروگاه فتوولتائیک، حد پایینی $-\infty$ است تا توان مازاد فتوولتائیک را بتوان به سیستم اصلی فروخت. این وضعیت در طرح کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی از طریق حلقه if-else قابل انجام است. حدهای بالایی U_b و پایینی L_b به صورت زیر توصیف می‌شوند،

$$L_b = [0 \dots 0_{N_c}, 0 \dots 0_{N_c}]_{1 \times 2N_c}^T \quad (38)$$

$$L_b = [-\infty \dots -\infty_{N_c}, 0 \dots 0_{N_c}]_{1 \times 2N_c}^T \quad (39)$$

$$U_b = [+ \infty \dots + \infty_{N_c}, P_{ndg} \dots P_{ndg, N_c}]_{1 \times 2N_c}^T \quad (40)$$

۳-۵- الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO)

پیچیدگی شبکه با عدم قطعیت‌های مربوط به رفتار شارژ خودروی برقی هیبریدی^۲ (PHEV)، تقاضای شبکه و قیمت انرژی در نظر گرفته می‌شود، در اینجا پیکربندی مجدد فیدر توزیع به اختصار^۳ (DFR) پیشنهادی طیف وسیعی با موضوع برنامه‌نویسی اعداد صحیح غیرخطی، تصادفی و غیر محدب را گزارش می‌کند که به روش‌های بهینه‌سازی تخصصی برای کشف بهترین راه حل جهانی نیاز دارد. پس از آن، GWO برای حل DFR تصادفی تعریف شده انجام شد.

یک الگوریتم فرا ابتکاری که GWO^۴ نامیده می‌شود در سال ۲۰۱۴ توسط میرجلیلی و همکاران در [۲۳] ارائه شده است که رفتارهای اجتماعی گرگ‌های خاکستری را تقلید می‌کند. گرگ‌ها در گله‌ای شامل ۵ تا ۱۲ عضو زندگی می‌کنند. گله دارای یک سلسله مراتب منظم است که گروه شامل یک رهبر و دسته دوم است که به ترتیب آلفا و بتا نامیده می‌شوند. α و β در تصمیم‌گیری کمک می‌کند و گرگ‌های باقی مانده در گله همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، δ و ω نامیده می‌شوند. روند شکار طعمه از طریق گروه گرگ خاکستری به شرح زیر است:

(۱) جستجوی طعمه،

(۲) محاصره طعمه،

(۳) شکار طعمه یا غذا،

^۱ Grey Wolf Optimization Algorithm

^۲ Plug-in Hybrid Electric Vehicle

^۳ Distribution Feeder Reconfiguration

^۴ Grey Wolf Optimization

(۴) حمله به طعمه،

الگوی حسابی طعمه اطراف به صورت زیر تعریف می‌شود،

$$\bar{D} = |\bar{C} \cdot \bar{X}_{pi} - \bar{X}_i| \quad (41)$$

$$X_{i+1} = \bar{X}_{pi} - \bar{A} \cdot \bar{D} \quad (42)$$

که X_{pi} و X_i به ترتیب محل گرگ خاکستری و محل شکار هستند. D فضا را تعریف می‌کند، A و C بردارهایی را تعریف می‌کنند که به صورت زیر محاسبه می‌شوند،

$$\bar{a} = 2(1 - t / \text{Max_iteration}) \quad (43)$$

$$\bar{A} = 2\bar{a} \cdot \bar{b}_1 - \bar{a} \quad (44)$$

$$\bar{C} = 2\bar{b}_2 \quad (45)$$

جایی که b_1 و b_2 به طور تصادفی بازیابی می‌شوند و مقادیر بین ۰ و ۱ هستند، پارامتر α یک متغیر است. در حالی که تکرارها اضافه می‌شوند، α از ۲ به ۰، به صورت خطی کاهش می‌یابد.

روند جستجو برای کشف طعمه را می‌توان از طریق واگرایی اعضای کاوشگر به دست آورد، زمانی که $|A| > 1$ باشد. روند به دست آوردن طعمه را می‌توان از طریق همگرایی اعضای کاوشگر به دست آورد، زمانی که $|A| < 1$ تعقیب و گریز از طریق گرگ α با پشتیبان گیری از اعضای β و δ مانند رابطه ۴۶-۴۸ مدیریت و هدایت می‌شوند. مشابه یک الگوریتم فرا ابتکاری دیگر، روش GWO ممکن است در یک حداقل محلی، با توجه به پارامترهای A و C تمایل داشته باشد که به روش GWO برای عبور از رکود کمک کند.

$$\bar{D}_\alpha = |\bar{C}_1 \cdot \bar{X}_{\mu i} - \bar{X}_i|, \bar{D}_\beta = |\bar{C}_2 \cdot \bar{X}_{\beta i} - \bar{X}_i|, \bar{D}_\delta = |\bar{C}_3 \cdot \bar{X}_{\delta i} - \bar{X}_i| \quad (46)$$

$$\bar{X}_1 = \bar{X}_{\mu i} - \bar{A}_1 \cdot \bar{D}_\mu, \bar{X}_2 = \bar{X}_{\beta i} - \bar{A}_2 \cdot \bar{D}_\beta, \bar{X}_3 = \bar{X}_{\delta i} - \bar{A}_3 \cdot \bar{D}_\delta \quad (47)$$

$$\bar{X}_{i+1} = (\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3) / 3 \quad (48)$$

۳-۵-۱- بیان دستگاه ابر- مه برای مدیریت انرژی

مدیریت انرژی بهینه شبکه‌های هوشمند با توجه به نفوذ بالای PHEV ها نیاز به مبادله داده ها بین چند عامل دارد. در این شرایط، یک دیزل ژنراتور باید به عنوان عامل اصلی بررسی شود تا روش همگرایی و مناسبی داشته باشد. برای این منظور، راه مجازی سازی همسایگی پیشنهاد شده است که با توجه به ساخت روش ابر-مه مرجع [۲۴] مناسب است. به این ترتیب، عامل یا واحد تنها قادر به تبادل (ارسال و دریافت) اطلاعات خود با محله‌های مجازی خود به جای واحد واقعی است که در همسایگی خود می‌باشد.

واحد مجازی سازی یک توپولوژی مجازی برای عاملی می‌باشد که یک سرویس در لایه مه است. این واحد اطلاعات مورد نیاز را از کل واحدها دریافت می‌کند و اطلاعات و داده‌های هر واحد را در هر بازه زمانی به محله‌های مجازی خود ارسال می‌کند. از این رو، واحدها بدون شناسایی فرستنده و تامین کننده اصلی، داده یا اطلاعاتی دریافت می‌کنند. ساختار پیشنهادی باید دارای شرایط زیر باشد:

(۱) نظارت بلادرنگ سیستم برای به دست آوردن دیزل ژنراتورها، PHEVs و وضعیت تخمین بار

(۲) مناسب با مساحت بزرگ شبکه‌های هوشمند

(۳) فراهم کردن فضایی برای تبادل داده‌های بلادرنگ بدون همبستگی مستقیم

(۴) تعیین توپولوژی شبکه و اصلی برای همگرایی به یک راه حل بهینه. برای این منظور، ساختار ابر-مه چند لایه سابقاً توسعه یافته ادامه دارد.

الف) لایه دستگاه: بخش‌های فیزیکی شبکه‌های هوشمند، به عنوان مثال، حسگرها، تجهیزات اندازه‌گیری، PHEV و سیستم‌های ذخیره انرژی در لایه دستگاه کار می‌کنند. این قطعات بر اساس داده‌ها و اطلاعات به دست آمده در لایه مه عملیاتی می‌شوند و همچنین اطلاعات با محله‌های مجازی مبادله می‌شوند. در این لایه، توان خروجی به روز شده با توجه به

ضرایب به دست آمده از لایه مه، که به داده‌های همسایگی مجازی و ضریب همگرایی برای مدل اصلی تعلق دارند، به دست می‌آید. فرآیند به روز می‌شود و سپس واحدها داده‌های مورد نیاز را به لایه مه منتقل می‌کنند.



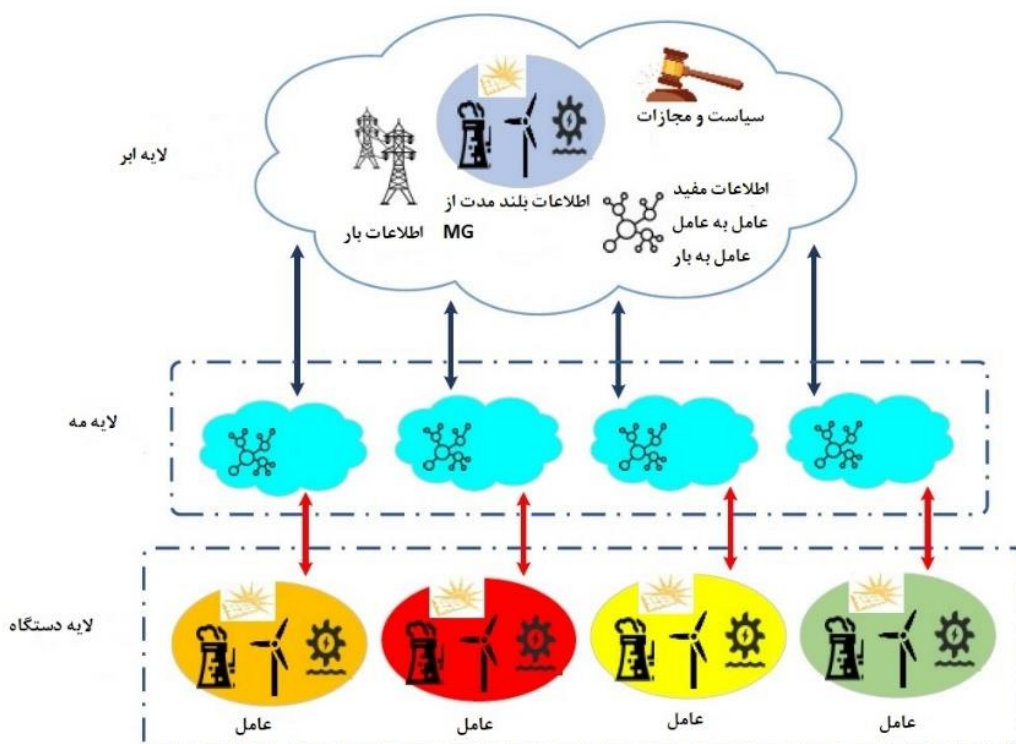
شکل ۲: نمودار گردش الگوریتم گرگ خاکستری
Figure2. Flow diagram of the gray wolf algorithm

ب) لایه مه: این بخش شامل دستگاه‌های شبکه با قابلیت اندازه‌گیری داده‌های توزیع شده است و سرورهای محلی این داده‌ها را دریافت می‌کنند. مسئولیت اصلی این لایه، گسترش محاسبات ابری در نزدیکی تجهیزات است تا تجزیه به موقع و همچنین ثبت داده‌های کوتاه‌مدت را انجام دهد. هر حالت آبی عامل و شرایط حضور عوامل شبکه هوشمند در هر مرحله بررسی می‌شود. اطلاعات شبکه هوشمند در لایه مه جمع‌آوری و سپس در هر مرحله یک مدل اصلی تصادفی انتخاب می‌شود. در پردازش فشرده، جمع‌آوری کل داده در یک ایستگاه برای تجزیه کل شبکه ضروری است. با این وجود، در محاسبات ابری مه، مدت

زمان محاسبه حذف می‌شود زیرا نیازی به تجزیه اطلاعات و داده‌ها در یک گره اصلی وجود ندارد. در واقع، لایه مه مانند یک لایه توزیع شده در محاسبات ابری-مه‌آلود عمل می‌کند که قادر است کل ارسال داده‌ها را به روشی توزیع شده انجام دهد. شکل شماره ۳ سیستمی با نمای ابر-مه نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مه تا ابرها از زمین دورتر است، ضمن اینکه نمای ابر-مه برگرفته از طبیعت نیز است. با این استدلال ابر-مه، لایه مه یک لایه پایین لایه ابر است و وظیفه دارد مجموعه اطلاعات توزیع شده را از طریق منطقه وسیع شبکه هوشمند اجرا کند. از این رو، نقص اصلی محاسبات ابری که ناشی از ساخت و ساز فشرده آن بوده، از بین می‌رود.

پ) لایه ابری: این لایه شامل فضای ذخیره‌سازی گسترده با محاسبات کافی است. لایه مه خلاصه‌ای از داده‌ها را به ابر ارسال می‌کند و این داده‌های کوتاه برای مدت طولانی توسط ابر ذخیره می‌شوند. ارتباطات بین لایه‌های مه، اجرای مجازات برای عوامل مخرب، تنظیم سیاست‌ها و ارتباط بین لایه‌های مه و سیستم توسط لایه ابری تنظیم می‌شود. ارتباطات بین لایه‌های مه، اجرای مجازات برای عوامل مخرب، تنظیم سیاست‌ها و ارتباط بین لایه‌های مه و سیستم توسط لایه ابری تنظیم می‌شود. توضیحات اضافی با جزئیات در مورد لایه مه در مرجع [۲۵] تعریف و معرفی شده است. الگوریتم ۱ شکل ۴ راه حل مسئله پیشنهادی را نشان می‌دهد.

با نگاه کردن به پشت سر، مدیریت بهینه انرژی می‌تواند بازار را به دوره‌ای با هزینه مورد انتظار بررسی و عدم قطعیت‌های مربوط به PHEV، قیمت انرژی، بارها و عدم قطعیت‌های تقاضای شبکه سوق دهد. بنابراین، مکانیسم پیشنهادی به حل مشکل تحت استراتژی‌های مختلف شارژ برای PHEV در شبکه هوشمند بستگی دارد. این کمک می‌کند تا شارژ ناهماهنگ PHEV با دوره اوج شبکه همزمان شده و منجر به هزینه‌های بیشتر در هر دوره زمانی شود. شارژ مدیریت بهینه انرژی به واحدهای مه تعلق می‌گیرد که هر واحد وظیفه تضمین شارژ هوشمند را به عهده خواهد داشت. برای به دست آوردن بهترین مدیریت بهینه انرژی، فرض بر این است که عوامل همه با هم همکاری کنند. شکل ۴ روند حل مسئله پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۳: ساختار چند لایه از دستگاه ابر-مه برای شبکه‌های هوشمند
Figure3. Multi-layer structure of cloud-fog device for smart grids

Algorithm 1: Solution Process

Data Definition: Define networked smart grid data like branch data, bus Data, etc.

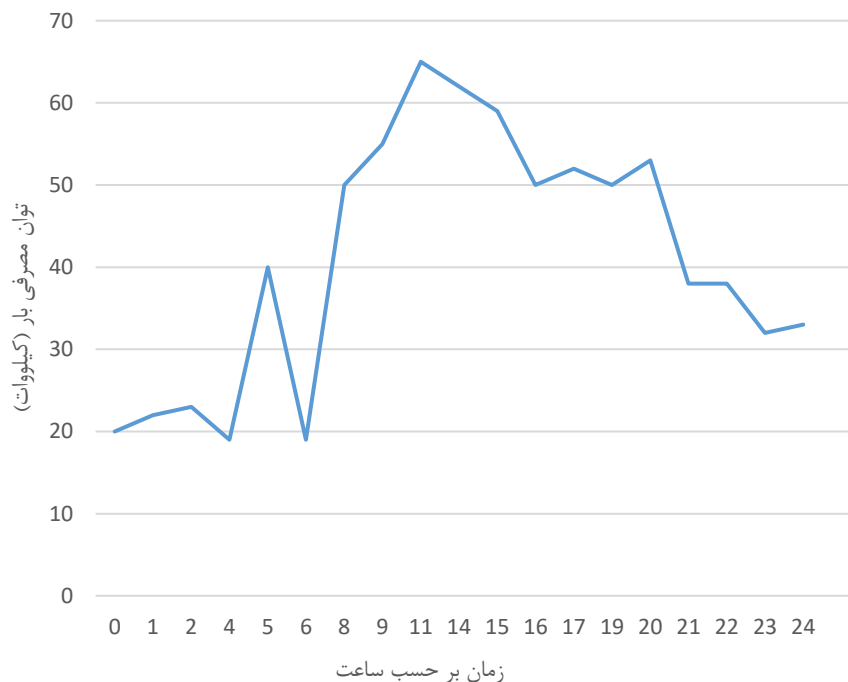
for $\tau = 1$:Horizon **do**
 receive and store the data of each individual agent on its corresponding fog
 run the optimal scheduling problem in the cloud layer based on the information provided by fogs
 check all network constraints.
 Update the the information of each agent on the fog layer.
if objective function is nonzero **then**
 1. get the information from the corresponding fog
 2. charging state of PHEVs in the fog layer and send it out to the Cloud layer
 3. run the objective function in the cloud layer.
 4. check all network constraints
if constraints are met **then**
 Determine topology charging of PHEVs and total operation cost.
 else
 go to step 1.
 end
 end
 Print the topology charging of PHEVs and total operation cost.
 Update the fogs.
End

شکل ۴: فرآیند حل

Figure4. Solution Process

۴- مطالعه موردی

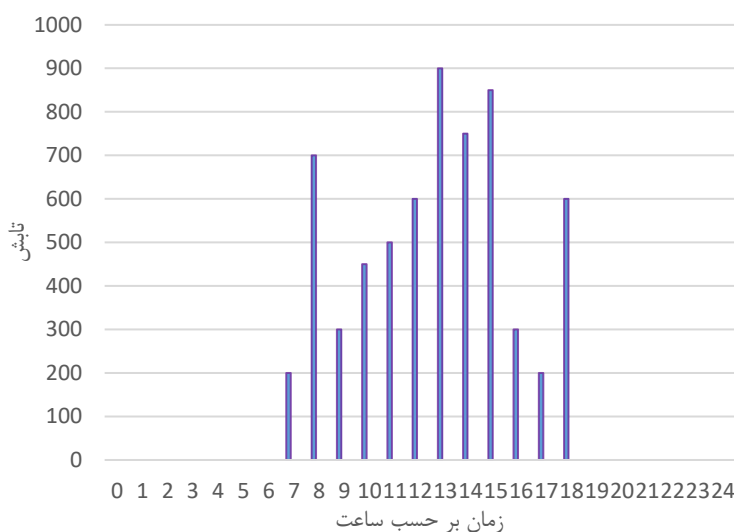
این مقاله یک مطالعه موردی واقعی را برای اثبات کارایی روش کنترل مدل پیش‌بینی اقتصادی پیشنهادی سیستم پشتیبان فتوولتائیک - دیزل ژنراتور متصل ریزشبکه مورد بررسی قرار می‌دهد. مصرف انرژی روزانه در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: تقاضای برق روزانه

Figure5. Daily electricity demand

شکل ۵ نشان می‌دهد که مصرف برق در طول روز بیشتر از شب است. این مرکز در دانشگاهی قرار دارد که اکثر فعالیت‌های آن بین ساعت ۷:۰۰ تا ۱۸:۰۰ برگزار می‌شود. به ویژه، صبح زمانی است که مصرف برق شروع به افزایش می‌کند، اوج قدرت از ساعت ۱۰:۰۰ تا ۱۱:۰۰ رخ می‌دهد. کارگاه‌های مهندسی ۱۰۹۰/۵ کیلووات ساعت در روز مصرف می‌کنند، شبکه و خط پایه شامل سیستم اصلی در ارتباط با یک دیزل ژنراتور مانند یک سیستم پشتیبان است. دیزل ژنراتورهای فعلی توان الکتریکی را به تاسیسات با ظرفیت ۲۵۰ کیلو ولت آمپر و ضریب توان ($\cos\theta = 0.8$) تأمین می‌کنند. نمایه تابش خورشیدی روز انتخاب شده در شکل ۶ نشان داده شده است. علاوه بر این، تعدادی از پارامترهای ثابت به کار رفته در مطالعه حاضر برای شبیه‌سازی و ارزیابی کارایی روش کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۶: تابش خورشیدی روز انتخاب شده [۲۳،۱۹]
Figure 6. Solar radiation of the selected day [19,23]

۵- نتایج و بحث

این مقاله دو سناریو را با توجه به روش کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی سیستم فتوولتائیک-دیزل ژنراتور متصل به ریز شبکه بررسی می‌کند. حالت اول، قطعی برق از ساعت ۷:۰۰ تا ۱۸:۰۰ وجود دارد که در طی آن اکثر فعالیت‌های دانشگاه انجام می‌شود. حالت دوم، در دسترس بودن برق شبکه در یک دوره ۲۴ ساعته در حالت اتصال متناوب در نظر گرفته می‌شود.

۵-۱- بررسی کنترل مدل پیش‌بین در حالت خاموشی شبکه برق

یک مدل اقتصادی پیش‌بینی‌کننده پیشنهاد شده است تا ریز شبکه را در شرایط جایگزین با در نظر گرفتن بدترین حالت خاموشی شبکه برق که از ساعت ۷ صبح تا ۶ بعد از ظهر رخ می‌دهد، عمل کند. تحلیل آن از طریق طراحی کنترل مدل پیش‌بینی اقتصادی بدون در نظر گرفتن اثرات نیروگاه فتوولتائیک امکان‌پذیر است. با توجه به [۱۷]، عملکرد کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی از طریق در نظر گرفتن اندازه بهینه سازی نیروگاه‌های فتوولتائیک ارزیابی می‌شود. شبکه اصلی برق و دیزل ژنراتور خطوط پایه از این مورد هستند. دیزل ژنراتور نقش منبع انرژی پشتیبان را ایفا می‌کند. جریان‌های مختلف در سیستم نیروگاه فتوولتائیک در شکل ۷ نشان داده شده است.

شکل ۷ نشان می‌دهد که شبکه برق بین ساعت ۰۰:۰۰ و ۷:۰۰ و بین ساعت ۱۸:۰۰ تا ۰۰:۰۰ برق را تأمین می‌کند، در حالی که دیزل ژنراتور سنتی در هنگام خاموشی بین ساعت ۷ صبح تا ۶ بعد از ظهر بارگیری می‌کند. نتایج مختلف به دست آمده در شرایط جایگزین با در نظر نگرفتن سیستم نیروگاه فتوولتائیک در جدول ۲ نشان داده شده است. شکل ۸ دینامیک سوخت را نشان می‌دهد.

جدول ۱: متغیرهای متنوع شبیه سازی
Table1. Various simulation variables

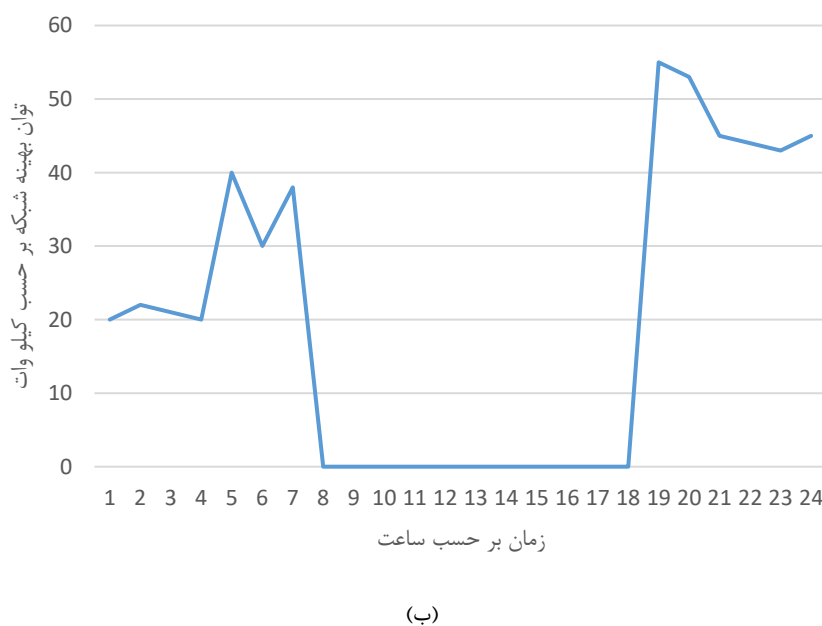
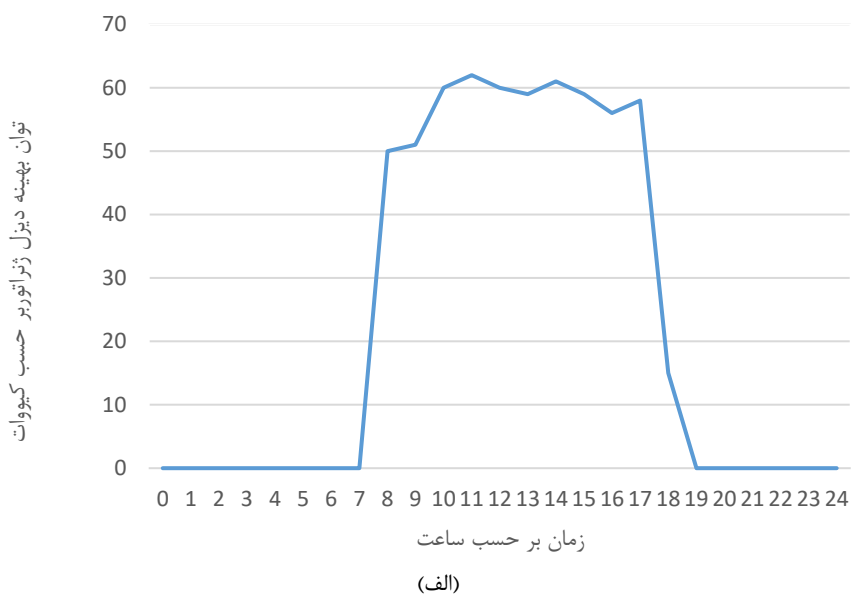
مقدار	شرح	متغیرها
۰/۰۶\$ kWh	هزینه انرژی	$\rho(t)$
۰/۹۷۳\$/L	هزینه سوخت	F_c
۰/۱۲\$/kWh	خوراک در تعرفه	F_d
۱	شماره دیزل ژنراتور	N_{dg}
۲۵۰kVA	قدرت نامی دیزل ژنراتور	P_{dg}
۲۰۰kW	توان فعال اسمی دیزل ژنراتور	P_{ndg}
۰/۸	ضریب توان دیزل ژنراتور	$Cost\phi$
۳۵ %	موثر دیزل ژنراتور	n_{dg}
۰/۳۴۶	A	پارامتر دیزل ژنراتور
۰/۰۸۱۴۵	b_d	
۱/۴۸ m	L	طول تانک دیزل ژنراتور
۱/۰۲ m	L	عرض تانک دیزل ژنراتور
۰/۲۳ m	h_{max}	ارتفاع تانک دیزل ژنراتور
۰/۲۲۸ m	h_o	مقدار سوخت اولیه در تانک دیزل ژنراتور
۰/۰۰۵m	h_{min}	حداقل مقدار سوخت در تانک دیزل ژنراتور
۱ h	t_s	زمان نمونه برداری (بر حسب ساعت)
۲۴	N	افق زمانی

جدول ۲: کنترل پایه و بهینه به روشی جایگزین بدون شبکه نیروگاه فتوولتائیک
Table2. Basic and optimal control in an alternative way without grid of photovoltaic power plant

متغیرها	شبکه پایه + دیزل ژنراتور	هزینه پایه	انرژی شبکه	انرژی دیزل ژنراتور
مقدارها	۱۰۹۰/۵ کیلو وات ساعت	۳۶۸/۴ \$	۴۴۶/۴ کیلو وات ساعت	۶۴۴/۱ کیلو وات ساعت

با در نظر نگرفتن سیستم فتوولتائیک، سطح سوخت در AS's مخزن سوخت دیزل به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. وقتی ضریب وزنی بر اساس شبکه اصلی برق و محدودیت‌های دیزل ژنراتور ω بین ۰ و ۱ در نظر گرفته شود، کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی بازده متفاوتی را نشان می‌دهد. بازده‌های مختلف مربوط به کل انرژی شبکه الکتریکی و دیزل، در این مورد، در جدول ۳ نشان داده شده است.

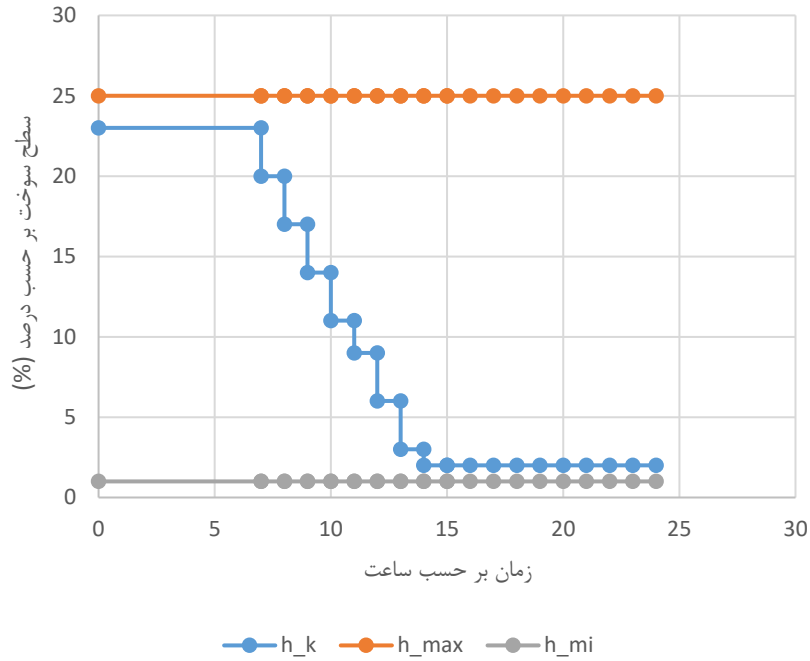
در حالی که شبکه در آن دوره خاص که ضریب وزنی ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹ در دسترس است، انرژی دیزل ژنراتور برای پاسخگویی به تقاضای بار در ساعات عصر بین ساعت ۱۸:۰۰ تا ۲۲:۰۰ افزایش یافته است. سیستم برق اصلی تقاضای بار را برای ۲۴ ساعت در روز تأمین می‌کند. خروجی جریان‌های توان در ریزش‌شبکه با ضریب وزنی ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹ در شکل ۹ نشان داده شده است. با توجه به استفاده از دیزل ژنراتور، هزینه‌های عملیاتی بالایی وجود دارد، حتی اگر شبکه برق از ساعت ۲۱:۰۰ تا ۲۴:۰۰ در دسترس باشد. مطابق شکل ۱۰، با در نظر گرفتن سیستم فتوولتائیک با ضریب وزنی ω بین ۰ تا ۰/۶۱۸ کنترل مدل پیش‌بین، دیزل ژنراتور را بهینه می‌کند. جدول ۴ خط پایه و کنترل بهینه را به روش جایگزین برای بررسی شبکه نیروگاه فتوولتائیک توضیح می‌دهد.



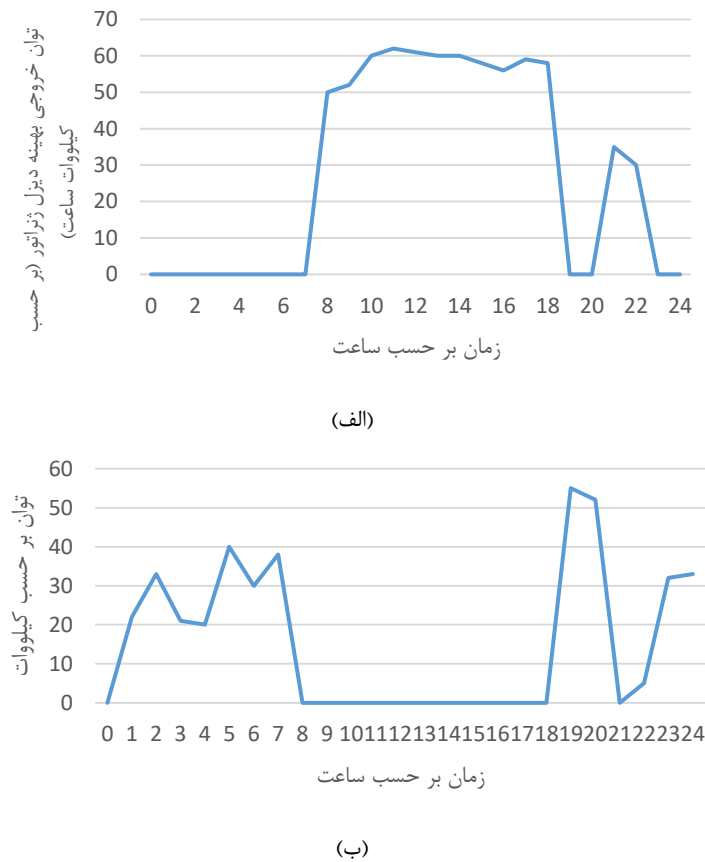
شکل ۷: کنترل مدل پیش‌بینی به روشی جایگزین بدون شبکه نیروگاه فتوولتائیک. (الف) توان بهینه دیزل ژنراتور؛ (ب) توان بهینه شبکه Figure7. So Predictive model control in an alternative method without grid of photovoltaic power plant lar radiation of the selected day. (a) Optimum power of diesel generator. (b) Optimum power of the grid

جدول ۳: کنترل مدل پیش‌بینی به روشی جایگزین بدون شبکه نیروگاه فتوولتائیک Table3. Predictive model control in an alternative method without grid of photovoltaic power plant

نسبت وزنی (w)	۰-۰/۶۱۸	۰/۶۱۹-۱
انرژی شبکه کیلو وات ساعت	۴۴۶/۳۶	۳۸۰/۹۶
دیزل ژنراتور کیلو وات ساعت	۶۴۴/۱	۷۰۹/۵۳

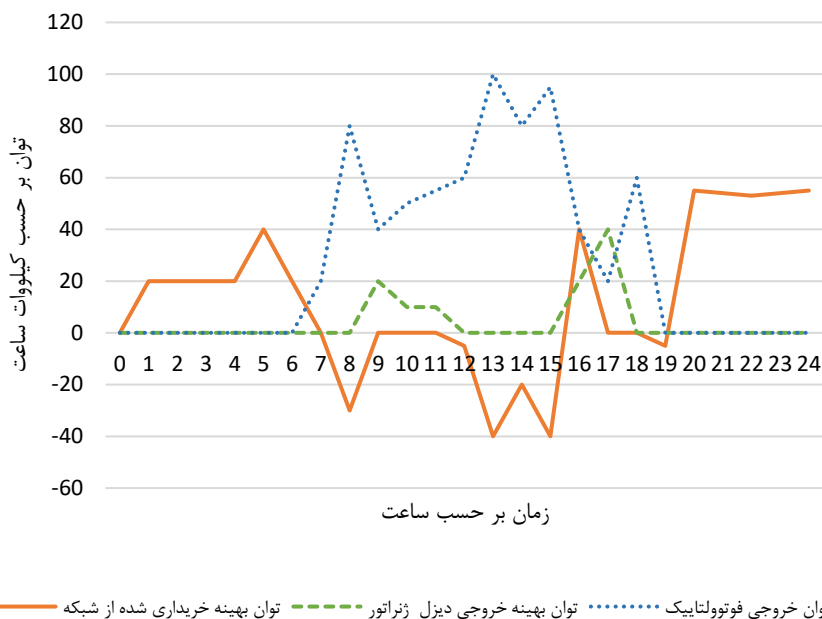


شکل ۸: دینامیک استفاده از سوخت به روشی جایگزین بدون شبکه نیروگاه فتوولتائیک
 Figure8. Dynamics of fuel use in an alternative off-grid way of photovoltaic power plant



شکل ۹: کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی در AS بدون نسبت وزنی $0.619 < \omega \leq 1$ شبکه فتوولتائیک؛ (الف) خروجی بهینه توان دیزل ژنراتور؛ (ب) توان بهینه شبکه

Figure9. Economic forecasting model control in AS without weight ratio $0.619 < \omega \leq 1$ Photovoltaic grid. (a) Optimum power output of diesel generato. (b) Optimum power of the grid

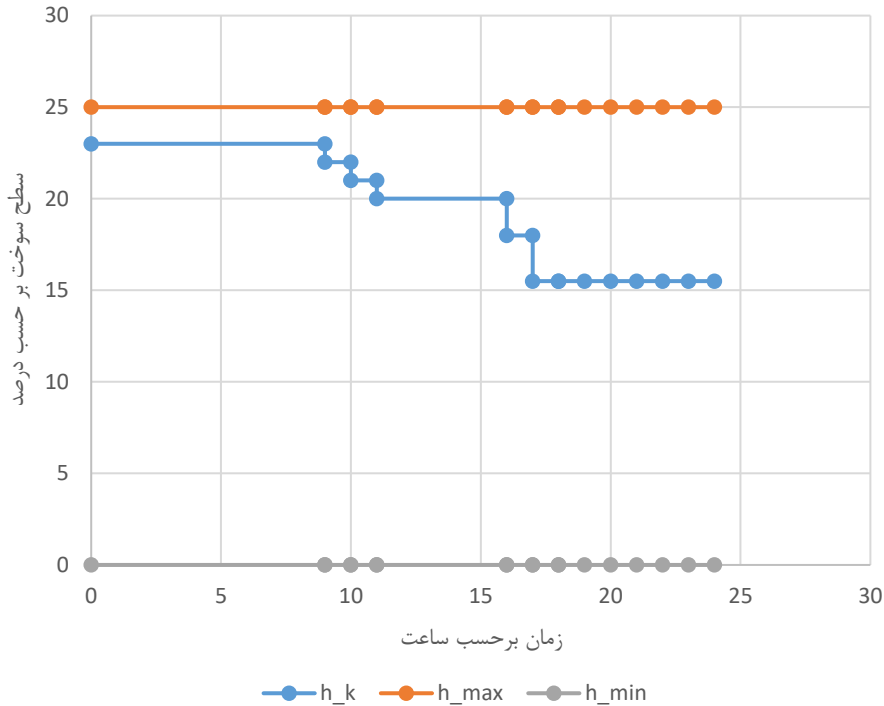


شکل ۱۰: کنترل مدل پیش‌بین در حال بررسی شبکه نیروگاه فتوولتائیک به روشی جایگزین
Figure10. Predictive model control investigating the photovoltaic power plant grid in an alternative way

جدول ۴: کنترل پایه و بهینه به روشی جایگزین در بررسی شبکه نیروگاه فتوولتائیک
Table4. Basic and optimal control in an alternative method in the evaluation of the photovoltaic power plant grid

مقادیر	متغیرها
کیلووات ساعت ۱۰۹۰/۵	شبکه اصلی + دیزل ژنراتور
کیلووات ساعت ۹۸/۲	انرژی دیزل ژنراتور
کیلو وات ساعت ۴۲۴/۱	انرژی برق شبکه
کیلووات ساعت ۵۴۶	انرژی دیزل تحویل داده نشده
٪ ۸۴/۸	صرفه‌جویی در انرژی دیزل
کیلووات ساعت ۱۴۲/۴	انرژی فروخته شده
۱۷ \$	درآمد روزانه
۴۰ \$	کل هزینه شبکه + دیزل ژنراتور
٪ ۶۶/۶	کل هزینه صرفه‌جویی

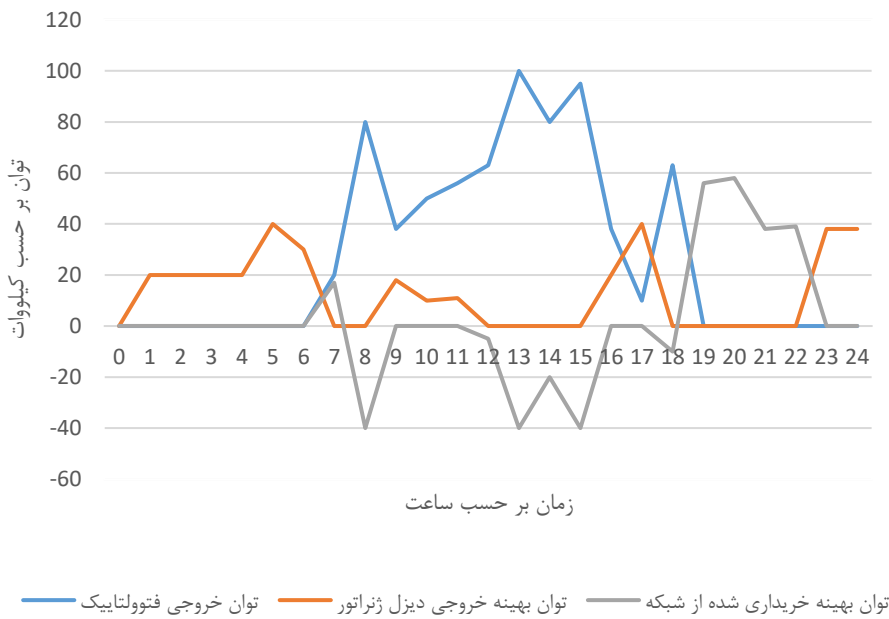
با توجه به نتایج بدست آمده، انرژی شبکه و عملکرد دیزل ژنراتور در مقایسه با خط پایه به طور قابل توجهی کاهش یافته است. صرفه‌جویی کلی در هزینه‌های حاصل از شبکه و دیزل ژنراتور با در نظر گرفتن ادغام سیستم فتوولتائیک و همچنین سود و درآمد روزانه در مقایسه با هزینه‌های اصلی است. کل صرفه‌جویی در هزینه را می‌توان با مقایسه هزینه سیستم برق شبکه و هزینه سیستم دیزل ژنراتور با در نظر گرفتن سیستم فتوولتائیک با خط اصلی برای وضعیت متناوب با در نظر نگرفتن سیستم فتوولتائیک محاسبه کرد. بنابراین، کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی با در نظر گرفتن سیستم فتوولتائیک مقرون به صرفه تر است. با عدم تحویل انرژی دیزل ژنراتور، نیروگاه‌های فتوولتائیک در ارتباط با استراتژی‌های کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی نسبت به دیزل ژنراتورهای مورد استفاده در خط اصلی عملکرد بهتری خواهند داشت.



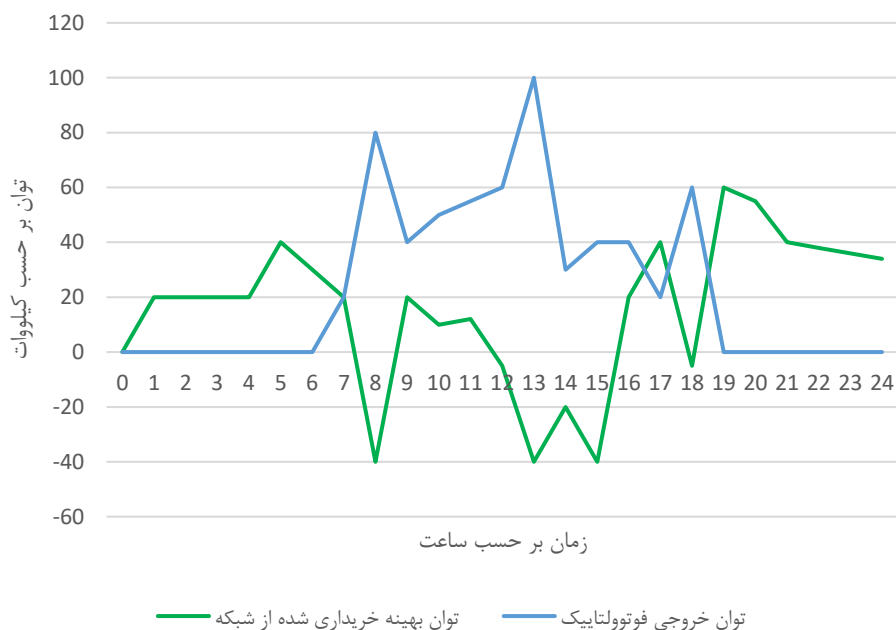
شکل ۱۱: دینامیک سوخت در مخزن سوخت دیزل به روشی جایگزین در بررسی سیستم فتوولتائیک
 Figure11. Fuel dynamics in diesel fuel tank as an alternative method in photovoltaic system investigation

جدول ۵: کنترل مدل پیش‌بین به روشی جایگزین بدون شبکه نیروگاه فتوولتائیک
 Table5. Predictive model control in an alternative method without grid of photovoltaic power plant

۰/۶۱۹-۱	۰-۰/۶۱۸	نسبت وزنی ω
۱۵۹/۹	۴۲۴/۱	انرژی شبکه کیلو وات ساعت
۳۲۶۱۵۹/۴	۹۸/۲	دیزل ژنراتور کیلو وات ساعت



شکل ۱۲: کنترل مدل پیش‌بین در حال بررسی نیروگاه فتوولتائیک به روش جایگزین ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹
 Figure12. Predictive model control under investigation of photovoltaic power plant by alternative method $0.619 < \omega \leq 1$



شکل ۱۳: کنترل مدل پیش‌بین در حالت اتصال متناوب
Figure13. Predictive model control in alternating connection mode

جدول ۶: کنترل پایه و بهینه در حالت اتصال متناوب
Table6. Basic and optimal control in alternating connection mode

متغیرها	مقادیر
خط اصلی	۱۰۹۰/۵ کیلووات ساعت
انرژی برق شبکه	۵۲۲/۳۰ کیلووات ساعت
ذخیره انرژی	۲۰/۵۶۸ کیلووات ساعت
انرژی فروخته شده	۴۰/۱۴۲ کیلووات ساعت
هزینه اصلی	\$۲۰/۱۱۷
هزینه انرژی شبکه	\$۰/۴۹
درآمد روزانه	\$۰/۱۷
ذخیره انرژی	%۲۰/۵۸
صرفه‌جویی در هزینه	% ۲۰/۵۸

جدول ۷: کنترل مدل پیش‌بینی به روشی جایگزین بدون نیروگاه فتوولتائیک
Table7. Predictive model control in an alternative way without photovoltaic power plant system

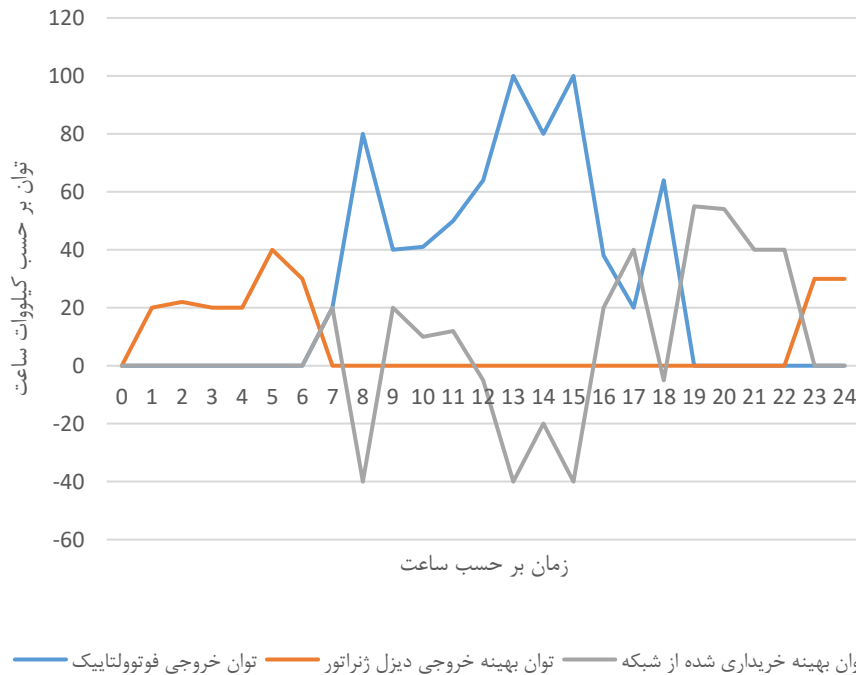
نسبت وزنی (w)	۰-۰/۶۱۸	۰/۶۱۹-۱
انرژی شبکه کیلو وات ساعت	۳/۵۲۲	۰
دیزل ژنراتور کیلو وات ساعت	۱/۲۹۴	۲/۲۲۸

با کاهش انرژی تحویلی دیزل ژنراتور در موارد بار و بدون نیروگاه‌های فتوولتائیک محاسبه می‌شود. مقایسه انرژی ارائه شده در مطالعه موردی با انرژی اصلی ارائه شده توسط دیزل ژنراتور، صرفه‌جویی دیزل ژنراتور را تعیین می‌کند. این نشان می‌دهد که عملیات تعرفه زمان استفاده دیزل ژنراتور و انتشار گازهای گلخانه‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. با بررسی یک سیستم فتوولتائیک در وضعیت متناوب استراتژی کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی، ریز شبکه بسیار مقرون به صرفه و انرژی کارآمد است. شکل ۱۱ دینامیک سوخت را در مخزن سوخت دیزل نشان می‌دهد.

با تغییر ضریب وزنی ω بین ۰ تا ۱ نتایج متفاوتی از سیستم‌های انرژی ریزشبهه به دست می‌آید. در جدول ۵، عملکرد سیستم نیروگاه فتوولتائیک در حالت متناوب در نظر گرفته شده با تغییر ضریب وزنی نمایش داده شده است. اگر ضریب وزنی ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹ باشد، یک دیزل ژنراتور بر یک شبکه اولویت‌بندی می‌شود. جریان‌های قدرت در ریزشبهه در صورتی که ضریب وزنی ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹ باشد در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

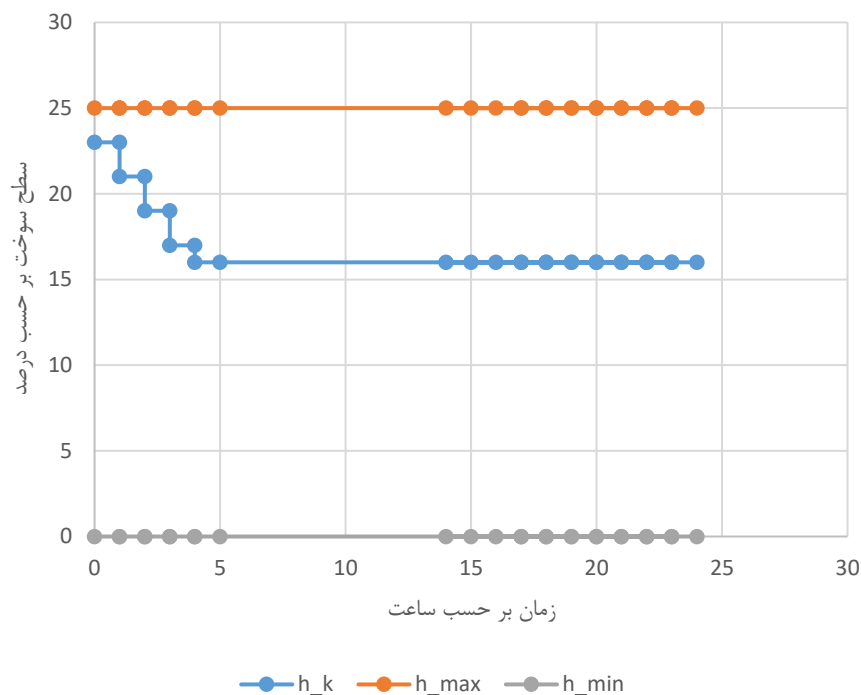
۵-۲- بررسی کنترل مدل پیش‌بین در حالت در دسترس بودن شبکه برق

روش کنترل مدل پیش‌بین در این سناریو با حفظ در دسترس بودن شبکه، در یک دوره ۲۴ ساعته با استفاده از حالت اتصال متناوب استفاده می‌شود. در حالت اتصال متناوب، خط مبنا مستلزم وضعیتی است که در آن شبکه برق تنها منبع توان برای بارها است که دلیل آن هزینه هم‌سطح بالای انرژی مرتبط با دیزل ژنراتورهای سنتی است. در شکل ۱۳، پارامترهای کنترل بهینه در حالت اتصال متناوب پس از اعمال رویکرد کنترل مدل پیش‌بینی با ضریب وزنی ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، دیزل ژنراتور در یک دوره ۲۴ ساعته کار نمی‌کند. هزینه مصرف سوخت آن صفر است و گازهای گلخانه‌ای تولید نمی‌کند. توان فتوولتائیک که بالاتر از تقاضا است، با توان‌های خروجی متعدد به شبکه تغذیه می‌شود. نتایج ریزشبهه با استفاده از روش کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی در حالت اتصال متناوب در جدول ۶ ارائه شده است. جریان‌های مختلف توان بهینه با اعمال ضریب وزنی ω بین ۰ تا ۱ به دست می‌آیند. کل انرژی‌های بهینه دیزل ژنراتور و شبکه در جدول ۷ نشان داده شده است. در حالت اتصال متناوب، اگر ضریب وزنی ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹ تنظیم شده باشد، دیزل ژنراتور از طریق شبکه اصلی الکتریکی جدا شده است. در نتیجه، انرژی شبکه کاهش می‌یابد در حالی که انرژی از دیزل ژنراتور افزایش می‌یابد. جریان‌های توان بهینه در صورتی که ضریب وزنی ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹ باشد در شکل ۱۴ نشان داده شده است. به دلیل جدا شدن دیزل ژنراتور، کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی شبکه اصلی الکتریکی را برای یک سیکل از پیش تعیین شده حالت اتصال متناوب جدا می‌کند. حتی اگر برق شهری در دسترس است، سوئیچ‌ها نمی‌توانند به طور هم‌زمان بسته شوند. بنابراین، مصرف سوخت دیزل ژنراتور و انتشار گازهای گلخانه‌ای احتمالاً افزایش می‌یابد. اگر مسائل مربوط به کیفیت توان برای ایمنی تجهیزات الکتریکی وجود داشته باشد، ممکن است چنین مواردی رخ دهد. شکل ۱۵ نشان می‌دهد که چگونه مقدار سوخت در مخزن سوخت دیزل در طول زمان تغییر می‌کند، همانطور که در این مورد توضیح داده شده است.



شکل ۱۴: کنترل مدل پیش‌بین در حالت اتصال متناوب ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹

Figure14. Predictive model control in alternating connection mode $0.619 \leq \omega \leq 1$



شکل ۱۵: سطح سوخت در مخزن سوخت دیزل در حالت اتصال متناوب ω بین ۱ تا ۰/۶۱۹
 Figure 15. Fuel level in the diesel fuel tank in intermittent connection mode $0.619 \leq \omega \leq 1$

در مقایسه با کنترل عمل بهینه حلقه باز شرح داده شده در [۲۳]، کنترل مدل پیش‌بین اقتصاد با تغییر فاکتور وزن در هر دو حالت AS و اتصال متناوب بهتر عمل کرد. فتوولتائیک و دیزل ژنراتور در شرایط غیر جزیره‌ای گزینه‌ای مقرون به صرفه با ضریب وزنی زیر ۰/۶۱۹ ارائه می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک کنترل عملکرد بهینه حلقه بسته با توجه به کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی شبکه انرژی جفت شده ریز شبکه وجود دارد. ریز شبکه شامل یک سیستم پشتیبان فتوولتائیک-دیزل ژنراتور بر اساس محدودیت در بین پارامترهای قابل کنترل در تعرفه زمان استفاده شده است. متغیرهای کنترلی توان تولید شده از طریق شبکه و توان از دیزل ژنراتور در این موضوع بهینه‌سازی هستند. خروجی فتوولتائیک در هر دو مورد جزء پارامترهای تصمیم‌گیری نیست. کاهش هزینه‌های انرژی شبکه و کاهش هزینه مصرف سوخت باعث بهبود عملکرد انرژی و ایجاد درآمد از طریق فروش انرژی فتوولتائیک مازاد به شبکه اصلی برق می‌شود. برق فتوولتائیک در زمان اوج قیمت‌ها برای پاسخگویی به تقاضای بار اولویت بندی شده است. در شبیه‌سازی‌ها، نشان داده می‌شود که این روش پیشنهادی کنترلی مدل پیش‌بین اقتصادی با در نظر گرفتن رابطه بین شبکه اصلی الکتریکی و هزینه‌های دیزل ژنراتور، راندمان عالی را هم از نظر عملیاتی و هم از نظر انرژی کارآمد ارائه می‌دهد. علاوه بر این، کنترل مدل پیش‌بین اقتصادی محدودیت‌های مربوط به سطوح سوخت در مخزن سوخت دیزل را در نظر می‌گیرد و استحکام را در مواجهه با عدم قطعیت و اختلال نشان می‌دهد که قبل از دوره کنترل بعدی، به آنها پرداخته می‌شود و می‌توان از افق عقب‌نشینی برای اصلاح متغیرهای کنترلی استفاده کرد. علاوه بر این، محدوده فاکتور وزنی مناسب برای کاهش قبل ملاحظه هزینه‌های عملیاتی سیستم‌های متصل به شبکه فتوولتائیک-دیزل ژنراتور ایجاد شده است.

مراجع

- [1] R. Faia, P. Faria and Z. Vale, "Demand response optimization using particle swarm algorithm considering optimum battery energy storage schedule in a residential house," *Energies*, vol. 12, no. 2, p. 1645, 2019, doi: 10.3390/en12091645.

- [2] S. Chapaloglou *et al.*, "Smart energy management algorithm for load smoothing and peak shaving based on load forecasting of an island's power system," *Applied energy*, vol. 238, pp. 627-642, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.102.
- [3] F. S. Mahmoud *et al.*, "Optimal sizing of smart hybrid renewable energy system using different optimization algorithms," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 4935-4956, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.03.197.
- [4] S. Mouassa *et al.*, "Ant lion optimizer for solving optimal reactive power dispatch problem in power systems," *Engineering science and technology, an international journal*, vol.20, no.3, pp. 885-895, 2017, doi: 10.1016/j.egy.2022.03.197.
- [5] F. Ahmed and Y. A. Almoataz, "Single and multi-objective operation management of micro-grid using krill herd optimization and ant lion optimizer algorithms," *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol.9, no.3, pp. 257-271, 2018, doi: 10.1007/s40095-018-0266-8.
- [6] P. Arbolea *et al.*, "Efficient Energy Management in Smart Micro-Grids: ZERO Grid Impact Buildings," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 1055-1063, March 2015, doi: 10.1109/TSG.2015.2392071.
- [7] H. Vaikund and S. G. Srivani, "Trends in energy management system for smart microgrid—an overview," *Advances in Signal and Data Processing . Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 703, 2021, doi: 10.1007/978-981-15-8391-9_2.
- [8] S. Samal, P. K. Hota and P. K. Barik, "Power quality assessment of a solar PV and fuel cell-based distributed generation system using unified power quality conditioner," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 3294-3304, 2022, doi: 10.1080/01430750.2020.1824940.
- [9] T. Adefarati and R. C. Bansal, "Reliability, economic and environmental analysis of a microgrid system in the presence of renewable energy resources," *Applied energy*, vol. 236, pp. 1089-1114, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.12.050.
- [10] K. Ndwali, J. G. Njiri and E. M. Wanjiru, "Optimal operation control of microgrid connected photovoltaic-diesel generator backup system under time of use tariff," *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 1001-1014, 2020, doi: 10.1007/s40313-020-00585-w.
- [11] M. A. Velasquez, J. Barreiro-Gomez, N. Quijano, A. I. Cadena and M. Shahidehpour, "Intra-Hour Microgrid Economic Dispatch Based on Model Predictive Control," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 3, pp. 1968-1979, May 2020, doi: 10.1109/TSG.2019.2945692.
- [12] W. Dong *et al.*, "Adaptive optimal fuzzy logic based energy management in multi-energy microgrid considering operational uncertainties," *Applied Soft Computing*, vol. 98, p. 106882, 2021, doi: 10.1016/j.asoc.2020.106882
- [13] S.R. Salkuti, P. Sravanthi and S.C. Kim, "Social welfare maximization based optimal energy and reactive power dispatch using ant lion optimization algorithm," *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 19, no. 4, p. 1379, Aug. 2021, doi: 10.12928/telkomnika.v19i4.18351.
- [14] H. K. Pujari and M. Rudramoorthy, "Optimal design, techno-economic and sensitivity analysis of a grid-connected hybrid renewable energy system: a case study," *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2022.
- [15] L. Jianlin and T. Yuliang, "Model Predictive Control Method of hybrid Battery energy storage system for Smoothing Wind Power Fluctuation," *E3S Web of Conferences*, vol. 194, no. 2, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202019402003.
- [16] Z. Movahedian and A. Askarzadeh, "Multi-objective optimization framework of a photovoltaic-diesel generator hybrid energy system considering operating reserve," *Sustainable Cities and Society*, vol. 41, pp. 1-12, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.05.002.

- [17] M. Lamnadi *et al.*, "Optimal design of stand-alone hybrid power system using wind and solar energy sources," *International Journal of Energy Technology and Policy*, vol. 15, no. 2/3, pp. 280-300, 2019, doi: 10.1504/IJETP.2019.10019646.
- [18] S. Mandelli, J. Barbieri, R. Mereu and E. Colombo, "Off-grid systems for rural electrification in developing countries: definitions, classification and a comprehensive literature review," *Renew Sustain Energy Rev*, vol. 58, pp. 1621-1646, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.338.
- [19] F. Garcia-Torres, A. Zafra-Cabeza, C. Silva, S. Grieu, T. Darure and A. Estanqueiro, "Model Predictive Control for Microgrid Functionalities: Review and Future Challenges," *Energies*, vol. 14, no. 5, p. 1296, 2021, doi: 10.3390/en14051296.
- [20] R. Huang *et al.*, "Accelerated Derivative-Free Deep Reinforcement Learning for Large-Scale Grid Emergency Voltage Control," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 1, pp. 14-25, Jan. 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3095179.
- [21] O. Kaya, E. van der Roest, D. Vries and T. Keviczky, "Hierarchical Model Predictive Control for Energy Management of Power-to-X Systems," *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, The Hague, Netherlands, 2020, pp. 1094-1098, doi: 10.1109/ISGT-Europe47291.2020.9248892.
- [22] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," *Advances in engineering software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
- [23] A. Kasaeian, P. Rahdan, M.A. Vaziri-Rad and W.M. Yan, "Optimal design and technical analysis of a grid-connected hybrid photovoltaic/diesel/biogas under different economic conditions: A case study," *Energy Conversion and Management*, vol. 198, p. 111810, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.111810.
- [24] S. Z. Tajalli, S. A. Mohammad Tajalli, A. Kavousi-Fard, T. Niknam, M. Dabbaghjamesh and S. Mehraeen, "A Secure Distributed Cloud-Fog Based Framework for Economic Operation of Microgrids," *IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, College Station, TX, USA, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/TPEC.2019.8662201.
- [25] M. A. Heidari, M. Nafar and T. Niknam, "Particle Swarm Optimization Based Sliding Mode Controller for Performance Improvement of Unified Power Quality Controllers Inverters," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 12, no. 46, pp. 59-76, 2022, doi: 10.30495/jce.2022.1961181.1162 [in persian].
- [26] M. Khadem and M. Najafi, "Demand Planning and Transmission Network Development in the Capacity Market Using Microgrids," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 11, no. 41, pp. 43-57, 2021 [in persian].
- [27] S. Naseri, M. Najafi and M. Esmaeilbeig, "Economic Dispatch Problem for Minimizing Cost and mproving Reliability Consifering Uncertainty," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 11, no. 41, pp. 77-91, 2021 [in persian].

COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by the Islamic Azad University Bushehr Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

