

Real-time Control and Management of a Microgrid, with Dispersed Generation Resources, Utilizing a Comprehensive Proton Exchange Membrane Fuel Cell Model

Sina Roudnil, Saeid Ghassem Zadeh*

Electrical and Computer Engineering Faculty - Power Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

E-mails: sinaroudnil@tabrizu.ac.ir ; g_zadeh@tabrizu.ac.ir

*corresponding author

Short Abstract

In this paper, a real-time control method is proposed for the energy management of a grid-connected microgrid including fuel cell, photovoltaic panels (PV) as distributed energy resources (DERs), and battery as energy storage system (ESS). The control method is based on model predictive control (MPC) and optimized using the particle swarm optimization (PSO) algorithm. By modeling the control method, predictive data obtained from simulating microgrid performance at each instance are utilized. Real-time microgrid control is then performed by combining these predicted data with real-time measurements. The purpose of this control method is to achieve integrated management of the microgrid and reduce changes in the battery's state of charge (SoC) and fuel cell's level of hydrogen (LoH). This reduction helps minimize excessive usage of the battery and fuel cell, thus reducing their depreciation. Moreover, the proposed control method enables PV and fuel cell to supply most of the required demand, with excess electric power being sold to the main grid. Additionally, the battery functions to absorb power fluctuations, as demonstrated in the simulation results investigating these objectives.

Keywords

Fuel cell, comprehensive fuel cell model, real-time microgrid management, fuel cell with distributed generation resources, model predictive control and fuel cell.

1- Short Introduction

The rising cost of fossil fuels, coupled with their detrimental impact on the environment, underscores the imperative to embrace renewable energy sources and decentralized systems that cause less pollution, such as FC. Traditionally, PV systems have served as primary generators, while battery and FC units have been utilized solely for energy storage purposes. Various control strategies, including hysteresis band control, consumption strategy and equivalent minimization, have been used in the energy management system to optimize hydrogen storage. In general, MPC has generally been employed to regulate FCs, aiming to minimize operational costs while accounting for the operational limitations of microgrid equipment and resources.

2- Proposed Work and Methodology

In this paper, the proposed control method is utilized for real-time control and management of a microgrid based on Model Predictive Control (MPC). The microgrid comprises four main components: photovoltaic panels, the main electrical energy grid, a fuel cell, and a lithium battery. MPC is employed to incorporate predicted data and define the objective function, which aims to minimize excessive utilization of the fuel cell and lithium battery while maximizing their lifespan and considering operational constraints. Furthermore, effective management of fluctuations in energy supply and demand is addressed, along with reducing reliance on the main grid for energy procurement. The objective function is optimized using the Particle Swarm Optimization algorithm, and the resulting control signals are applied to the microgrid to enable real-time control and management.

For the simulation stage of the microgrid, two scenarios have been considered, with differences observed in the electric power generated by the PV panels. In the first scenario, PV production exhibits fewer fluctuations and has a broader range compared to the second scenario. This variation is explored to investigate the impact of renewable energy production and its fluctuations on the microgrid's performance with the proposed control method. Consequently, the State of Charge (SoC) of the battery and the Lifetime Operating Hours (LoH) of the fuel cell are compared and analyzed. Additionally, to evaluate the optimal utilization of power generated by the fuel cell, the microgrid's power curve, including power exchanged with the main grid, lithium battery, and fuel cell, is presented.

Based on the simulation results, for both scenarios, the reference SoC is set at 60%, and the reference LoH value is set at 70%. With the proposed method, the maximum deviation from these reference values is approximately 10% in both cases. This minimal deviation helps reduce depreciation and damage to the battery and fuel cell. The electricity generated by the fuel cell and battery is utilized to meet the demand, with excess energy being sold back to the main grid. The battery primarily serves to absorb demand fluctuations and generate electrical energy, hence exhibiting greater variations.

3- Conclusion

The simulation results illustrate that the suggested control method effectively controls the microgrid in real-time, aligning with the specified objectives. The difference in SoC of the battery and the LoH-related to the fuel cell is about 10% at most, which reduces the excessive use of these resources and their depreciation. Analyzing the microgrid power curve reveals that the majority of the required energy demand is met by the fuel cell and photovoltaic panels. The battery, on the other hand, bridges the gap by supplying additional power during fluctuations, thereby reducing the need to purchase energy from the grid. Moreover, surplus energy is effortlessly sold back to the main grid, further optimizing resource utilization.

4- References

- [1] E. Crespi, G. Guandalini, G. N. Cantero, and S. Campanari, 'Dynamic Modeling of a PEM Fuel Cell Power Plant for Flexibility Optimization and Grid Support', *Energies*, vol. 15, no. 13, pp. 1–23, 2022, doi: 10.3390/en15134801.
- [2] K. Kumar, M. Alam, and V. Dutta, 'Energy management strategy for integration of fuel cell-electrolyzer technologies in microgrid', *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 68, pp. 33738–33755, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.203.
- [3] X. Chen, W. Cao, Q. Zhang, S. Hu, and J. Zhang, 'Artificial Intelligence-Aided Model Predictive Control for a Grid-Tied Wind-Hydrogen-Fuel Cell System', *IEEE Access*, vol. 8, pp. 92418–92430, 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2994577.

کنترل و مدیریت زمان واقعی ریزشبهه با منابع تولید پراکنده و با استفاده از مدل جامع پیل سوختی غشای تبادل پروتون

سینا رودنیل

دانشجوی دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

سعید قاسم زاده

استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

در این مقاله، یک روش کنترلی زمان واقعی برای کنترل و مدیریت ریزشبهه‌ی متصل به شبکه دارای پیل سوختی، پنل‌های فتوولتائیک به عنوان منابع پراکنده و باتری (سیستم ذخیره‌سازی انرژی) پیشنهاد شده است. این روش کنترلی بر اساس کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، مدلسازی شده و از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی استفاده شده است. کنترل پیش‌بین امکان استفاده از داده‌های بدست آمده بر اساس شبیه‌سازی عملکرد ریزشبهه به عنوان داده‌های پیش‌بینی شده در هر نمونه را فراهم می‌کند. با استفاده از این داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های دریافتی از اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای، کنترل ریزشبهه به صورت زمان واقعی انجام می‌شود. هدف از این روش، کنترل و مدیریت یکپارچه ریزشبهه، کاهش تغییرات در وضعیت شارژ باتری و سطح هیدروژن پیل سوختی است که باعث کاهش استفاده بی‌رویه از باتری و پیل سوختی و استهلاک باتری و پیل سوختی می‌شود. همچنین، استفاده از توان الکتریکی تولیدی توسط منابع تولید پراکنده و پیل سوختی با هدف کاهش خرید انرژی الکتریکی از شبکه اصلی و استفاده از باتری برای کاهش نوسانات در توان پیل سوختی می‌باشد که در نتایج شبیه‌سازی این اهداف بررسی شده است.

کلمات کلیدی

پیل سوختی، مدل جامع پیل سوختی، مدیریت زمان واقعی ریزشبهه، پیل سوختی با منابع تولید پراکنده، کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و پیل سوختی.

نام نویسنده مسئول: سعید قاسم‌زاده

ایمیل نویسنده مسئول: g_zadeh@tabrizu.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۰۱

تاریخ (های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹

۱- مقدمه

راهکارهای مختلفی برای کنترل ریزشبهه‌های دارای پیل سوختی به همراه منابع تولید پراکنده وجود دارد که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است. به طور کلی، در این ریزشبهه‌ها ژنراتورهای فتوولتائیک به عنوان ژنراتورهای اولیه و واحدهای باتری و پیل سوختی، فقط به عنوان ذخیره‌سازهای انرژی در نظر گرفته شده‌اند [۶، ۷]. استراتژی‌های کنترلی مختلفی مانند استراتژی کنترل باند هیستریزس، استراتژی مصرف و حداقل‌سازی معادل در سیستم مدیریت انرژی الکتریکی با هدف ذخیره‌سازی بهینه هیدروژن به کار رفته است. در ریزشبهه‌های جریان مستقیم متشکل از پنل‌های فتوولتائیک و پیل‌های سوختی، از استراتژی کنترل تناسبی - انتگرال‌گیر کلاسیک برای کنترل پارامترهای اصلی سیستم مانند جریان پیل سوختی و وضعیت شارژ باتری به همراه ردیابی نقطه حداکثر توان برای انرژی الکتریکی تولیدی انرژی‌های تجدیدپذیر پیشنهاد شده است [۸، ۹].

راه‌کار دیگر، استفاده از مشخصات الکتریکی باتری‌ها، ژنراتورهای فتوولتائیک، واحد تولید هیدروژن و پیل سوختی برای مدلسازی ریزشبهه‌ها است که بر اساس آن یک سیستم مدیریت انرژی در بین این عناصر پیشنهاد می‌شود. از این مدل‌سازی به‌همراه کنترل‌کننده‌هایی مانند کنترل‌کننده منطق فازی برای عملکرد عناصر در نقطه حداکثر توان استفاده شده است. بنابراین، هدف از این مدلسازی‌ها انتقال نقطه‌ی کار پیل‌های سوختی از حالت نقطه حداکثر کارایی به حالت حداکثر نقطه توان مجاز برای جذب توان خروجی

افزایش هزینه سوخت‌های فسیلی به همراه تأثیرات مخرب زیست محیطی تولیدی آن‌ها، نیاز به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده و منابع با آلودگی کمتر از جمله پیل‌های سوختی را برجسته‌تر می‌کند [۱]. با این حال، به‌منظور تولید انرژی الکتریکی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر با توجه به خاصیت متغیر آن‌ها، به ویژه بر اساس تغییرات آب و هوایی، نیاز به ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی وجود دارد. برای کمک به حل این مشکل، ادغام ذخیره‌سازهای انرژی با منابع تولید انرژی الکتریکی ممکن است میزان استفاده و پایداری سیستم‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر را تا حد زیادی بهبود بخشد. ریزشبهه‌ها، می‌توانند توسعه شبکه‌های انرژی الکتریکی در مقیاس کوچک‌تر و انعطاف‌پذیری بیشتر را امکان‌پذیر سازند و منابع انرژی و ذخیره‌سازها را ادغام نمایند [۲، ۳]. علاوه بر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و منابع تولید پراکنده، پیل‌های سوختی به عنوان منابع انرژی پاک و کارآمد، دارای پتانسیل بالاتر برای ذخیره‌سازی انرژی به شکل هیدروژن و قابلیت تأمین انرژی برای مدت زمان نسبتاً طولانی‌تری شناخته می‌شوند. بنابراین، ریزشبهه‌های هیبریدی دارای پیل سوختی هیدروژنی و پنل‌های فتوولتائیک می‌توانند نقش بسزایی در افزایش سهم انرژی تجدیدپذیر در قالب فناوری پنل‌های فتوولتائیک خورشیدی در تولید، ذخیره‌سازی و استفاده از هیدروژن را ایفا کنند [۴، ۵]. در نتیجه، استفاده از پیل سوختی و پنل‌های فتوولتائیک و ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی، لاجرم مطالعه سیستم‌های هیبریدی متشکل از آن‌ها را ملزم می‌سازد.

شناسایی سوخت بر اساس الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی ایجاد و در چارچوب مورد نظر، تعبیه شده است و تأثیر پارامترهای متغیر الگوریتم بر پیش‌بینی کننده‌ی کنترل پیش‌بین ارزبایی می‌شود. در نهایت، اثرات تغییر سوخت بر عملکرد پیل سوختی بررسی می‌شود.

در مرجع [۲۶]، از روش کنترل پیش‌بینی مدل بر اساس پیش‌بینی‌های آب و هوا برای مدیریت توان ریزشکبه مسکونی در حالت جزیره‌ای متشکل از پنل‌های فتوولتائیک، پیل سوختی همراه با سیستم ذخیره‌سازی استفاده شده است. هدف این استراتژی به حداقل رساندن هزینه‌های خرید انرژی از شبکه اصلی و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و سیستم ذخیره‌سازی بدون آسیب به آسایش مصرف‌کنندگان، در نتیجه بهینه‌سازی استفاده از منابع مختلف است. علاوه بر آن در مرجع [۲۷]، تأثیر عدم قطعیت‌های بر سیستم انرژی الکتریکی با فرض پیش‌بینی‌های آب و هوایی به عنوان داده‌های ورودی بر اساس کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل تصادفی در نظر گرفته شده است. در این دو مرجع، از یک مدل از پیش‌تعیین شده با تعریف پارامترهای ثابت برای سیستم تهویه ریزشکبه براساس دمای پیش‌بینی شده استفاده شده است که با تغییر سیستم مورد مطالعه نمی‌توان این روش را به کار برد و یک مدل جامع ارائه نمی‌دهد. همچنین، محدودیت‌های مربوط به وضعیت شارژ باتری در نظر گرفته نشده که باعث تغییرات زیاد در این پارامتر شده و استهلاک باتری را افزایش می‌دهد. مدیریت انرژی یک ریزشکبه شامل پارکینگ هوشمند خودروهای برقی که شامل منابع تجدیدپذیر از قبیل توربین بادی و سیستم فتوولتائیک و میکروتوربین و پیل سوختی می‌باشند، در مرجع [۲۸] ارائه شده است. بهره‌برداری بهینه از یک پارکینگ هوشمند که در دو حالت نقش بار مصرفی و منبع تولید انرژی الکتریکی با هدف کاهش هزینه‌های مربوط به پارکینگ، در نظر گرفته شده است. برای این منظور، از برنامه پاسخگویی بار با شیفت درصدی از بار پیک به بازه زمانی غیرپیک و در نتیجه هموار کردن منحنی بار استفاده می‌شود. تابع هدف شامل کمینه کردن هزینه‌های بهره‌برداری از شبکه بالادستی، منابع تولید محلی و پارکینگ است. علاوه بر آن در مرجع [۲۹]، از کنترل کننده PID برای کنترل فرکانس این نوع ریزشکبه استفاده شده است. هدف اصلی آن، ترکیب منطق فازی با الگوریتم بهبود یافته تکاملی تفاضلی است. این روش بر اساس تعریف ضرایب ثابت برای ریزشکبه است که تغییرات در ریزشکبه باعث تغییرات زیادی در خروجی کنترل کننده و نتایج نامطلوب آن می‌شود. علاوه بر آن، عدم در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوط به وضعیت شارژ باتری و سطح هیدروژن منجر به افزایش استهلاک این تجهیزات خواهد شد [۲۹].

اگرچه، استفاده از کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل در کنترل خودروهای پیل سوختی رایج است، اما می‌توان از این روش برای کنترل ریزشکبه‌ی دارای پیل سوختی استفاده کرد. در این مقاله، این روش کنترلی برای کنترل و مدیریت ریزشکبه در زمان واقعی به کار رفته که این ریزشکبه از چهار جز اصلی پنل‌های فتوولتائیک، شبکه اصلی انرژی الکتریکی، پیل سوختی و باتری لیتیومی تشکیل شده است. از مدل کنترل پیش‌بینی برای استفاده از داده‌های پیش‌بینی شده و تعریف تابع هدف استفاده می‌شود که هدف کاهش استفاده بی‌رویه از پیل سوختی و باتری لیتیومی در نتیجه کاهش استهلاک و افزایش طول عمر آن‌ها در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی آن‌ها است. علاوه بر آن، مدیریت مناسب تغییرات و نوسانات در عرضه و تقاضای انرژی الکتریکی و کاهش خرید انرژی از شبکه اصلی می‌باشد. این تابع هدف با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهینه‌سازی می‌شود و با ترکیب این بهینه‌سازی با استفاده سیگنال‌های کنترلی در ریزشکبه که در ادامه توضیح داده شده است، کنترل و مدیریت ریزشکبه در زمان واقعی انجام می‌شود. در استراتژی پیشنهادی بر خلاف تعریف داده‌ها از پیش تعیین شده به‌عنوان داده‌های پیش‌بینی همانند مراجع دیگر، برای به دست آوردن داده‌های پیش‌بینی در هر

ژنراتورهای فتوولتائیک و استفاده بهینه از باتری‌ها می‌باشد [۱۰، ۱۱]. برنامه‌ریزی کوتاه‌مدتی برای پیل‌های سوختی ریزشکبه‌های هیبریدی بر اساس کمینه‌سازی هزینه عملیاتی و انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین برنامه‌های مختلف پاسخ به تقاضا برای کاهش بار، به عنوان یک تابع هزینه‌ی چند هدفه ارائه شده است که بر اساس روش‌های منطق فازی بهینه‌سازی می‌شود. اما، در این توابع چند هدفه مسئله‌ی استهلاک پیل‌های سوختی و استفاده بی‌رویه از آن‌ها در نظر گرفته نشده است که یکی از جنبه‌های مهم این فناوری، طول عمر مفید آن‌ها است و تحت شرایط عملیاتی مانند بارهای گذرا، روشن / خاموش شدن سوئیچ‌ها و شرایط بی‌باری قرار دارد [۱۲، ۱۳]. چنین شرایط عملیاتی ممکن است منجر به خرابی الکترولایزرها و پیل‌های سوختی شوند. بنابراین، توسعه استراتژی‌های کنترلی برای تضمین عملکرد نرم پیل سوختی و سیستم الکترولایزر، ضروری است که با در نظر گرفتن سایر اهداف مدیریت انرژی از جمله تعادل در تقاضا و عرضه، بهره‌وری انرژی بالاتر و ... انجام می‌شود و نیاز به قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری بیشتری دارند تا منابع ریزشکبه را به‌صورت یکپارچه کنترل نمایند [۱۴].

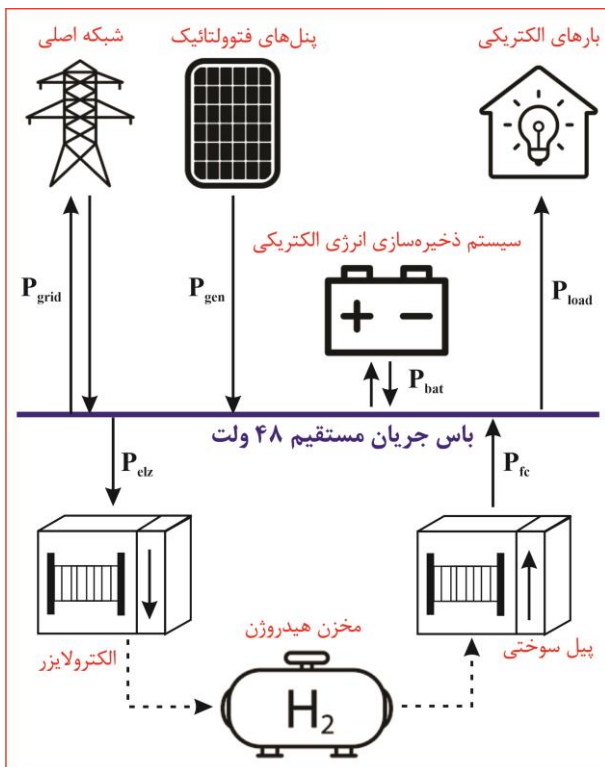
بهره‌برداری نرم پیل‌های سوختی را می‌توان با کنترل پارامترهای مختلفی از جمله، نرخ تغییرات توان در شرایط عملیاتی گذرا [۱۵]، تغییرات در وضعیت شارژ باتری‌های سیستم ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی [۱۶] و تغییرات در سطح هیدروژن مصرفی توسط پیل سوختی [۱۷] انجام داد. این پارامترها بر اساس تابع هدف تعریف شده برای سیستم مدیریت انرژی ریزشکبه مبتنی بر ذخیره‌سازی هیدروژن می‌باشند. در این ریزشکبه‌ها از ژنراتورهای فتوولتائیک، سیستم ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی و هیدروژن استفاده می‌شوند که با استراتژی‌های کنترلی مختلف مانند کنترل پیش‌بینی مبتنی مدل، کنترل می‌شوند [۱۸].

کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل طیف وسیعی از روش‌های کنترل را در بر می‌گیرد که به طور صریح از مدل یک فرآیند برای پیش‌بینی رفتار سیستم و به دست آوردن سیگنال‌های کنترلی بهینه با کمینه‌سازی یک تابع هدف برای مدیریت و کنترل ریزشکبه استفاده می‌کند [۱۹]. از این نوع کنترل، برای کنترل پیل سوختی نیز استفاده شده است. خودروهای دارای پیل سوختی در یک ریزشکبه در حالت جزیره‌ای به عنوان یک سیستم تولید انرژی الکتریکی توزیع شده در نظر گرفته می‌شوند. هدف از سیستم کنترلی، به حداقل رساندن هزینه عملیاتی ریزشکبه و استفاده بهینه از سوخت خودروها برای افزایش طول عمر آن‌ها، با توجه به محدودیت‌های فیزیکی و عملیاتی تجهیزات و منابع ریزشکبه است. این سیستم، به منظور مقابله با عدم قطعیت در پیش‌بینی بار و تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، با استفاده از سیگنال بازخورد و پیش‌بینی کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل، پیشنهاد شده است [۲۰، ۲۱]. همچنین، از سیستم مدیریت انرژی برای کنترل ریزشکبه‌های هیبریدی دارای پیل سوختی بر اساس کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل غیرخطی استفاده شده است. در این سیستم، از یک شبکه عصبی برای مدل‌سازی پیل سوختی غشای تبادل پروتون استفاده می‌شود [۲۲]. کنترل بهینه پیل سوختی با هدف کاهش مصرف هیدروژن و حفظ وضعیت شارژ باتری‌ها در محدوده‌ی قابل قبول برای کاهش استهلاک آن‌ها، تحت محدودیت‌های عملیاتی و نوسانات تولید و تقاضای انرژی الکتریکی به کار رفته است. در این رویکرد از مدل‌سازی فازی و کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل مقاوم برای بهبود عملکرد سیستم مدیریت انرژی الکتریکی و در نظر گرفتن شرایط ترافیک برای بهبود عملکرد خودروهای پیل سوختی در طراحی کنترل کننده استفاده شده است [۲۳، ۲۴].

در مرجع [۲۵]، چارچوبی برای مدیریت انرژی مبتنی بر کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل ارائه شده که در آن سوخت (هیدروژن) پیل سوختی ابتدا به عنوان یک پارامتر متغیر برای کنترل کننده تعریف می‌شود. سپس، یک مدل

جدول ۱. مشخصات اجزای ریزشبكة

مقادیر نامی	اجزا ریزشبكة
۶ (کیلو وات)	حداکثر توان شبکه اصلی
۲/۵ (کیلو وات)	حداکثر توان بارهای الکتریکی
۰/۲۳ نیوتون متر مکعب بر ساعت در توان ۱ کیلو وات	الکترولاایزر
۷ نیوتون متر مکعب در فشار ۵ بار	مخزن هیدروژن
۲/۵ کیلو وات	پیل سوختی
۴۸ ولت، ۱۰۰ آمپر ساعت	باتری لیتومی



شکل ۱. ساختار ریزشبكة جریان مستقیم مورد مطالعه

نمونه، ریزشبكة به صورت ۲۴ ساعته شبیه‌سازی می‌شود و داده‌های به دست آمده در زمان واقعی بر اساس وضعیت ریزشبكة به عنوان داده‌های آینده استفاده می‌شود. این راه‌حل برای در نظر گرفتن تغییرات عملیاتی ریزشبكة و عملکرد زمان واقعی کنترلر است. در نهایت بر اساس این مقادیر بهینه، عملکرد باتری و پیل سوختی (شارژ / دشارژ آن‌ها) و با در نظر گرفتن قیمت انرژی الکتریکی (بر اساس تعرفه‌های مختلف) در تابع هدف، میزان توان مبادله شده بین ریزشبكة و شبکه اصلی خواهد بود. برای دستیابی به اهداف اشاره شده از مدل جامع پیل سوختی و سیستم ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی استفاده شده است. در کنار این مدلسازی، استفاده از داده‌های زمان واقعی حاصل از اندازه‌گیری منجر به کنترل و مدیریت زمان واقعی این ریزشبكة می‌شود. در نظر گرفتن مدل‌های پیل سوختی، پنل‌های فتوولتائیک، باتری، شبکه توزیع انرژی الکتریکی باعث نزدیکی نتایج به عملکرد واقعی ریزشبكة می‌شود که همه‌ی این موارد در یک مرجع در نظر گرفته نشده است.

منظور از کنترل زمان واقعی توانایی یک سیستم حلقه بسته برای جمع آوری داده‌ها، پردازش آن‌ها و به روز رسانی سیستم در یک افق زمانی است. بلوک‌های عملکردی اولیه در کنترل زمان واقعی عبارتند از: سنجش (جمع آوری داده‌ها)، کنترل (تفسیر و استفاده از داده‌ها) و فعال‌سازی (به روز رسانی سیستم) [۳۰]. بنابراین، داده‌های به دست آمده در زمان واقعی بر اساس شبیه‌سازی وضعیت ریزشبكة در طول یک روز، یعنی اندازه‌گیری‌های انجام شده، متناسب با نمونه‌ی انتخابی برای محاسبات به عنوان داده‌های آینده و لحظه‌ای (به صورت فیدبک از وضعیت ریزشبكة) استفاده می‌شود که مرحله‌ی اول (سنجش) هستند. مرحله دوم (کنترل و بهینه‌سازی) مربوط به جایگذاری مقادیر مرحله‌ی اول در تابع هدف و بهینه‌سازی این تابع با در نظر گرفتن محدودیت‌های تعریف شده برای تغییرات عملیاتی ریزشبكة و اجزای آن و همچنین ظرفیت آن‌ها، است. در نهایت، بر اساس این مقادیر بهینه، عملکرد باتری و پیل سوختی (شارژ / دشارژ آن‌ها) و با در نظر گرفتن قیمت انرژی الکتریکی (بر اساس تعرفه‌های مختلف) در تابع هدف، میزان توان مبادله شده بین ریزشبكة و شبکه اصلی خواهد بود که مربوط به مرحله‌ی سوم (به روز رسانی سیستم مورد مطالعه با اعمال سیگنال‌های کنترلی) است.

در بخش دوم قسمت‌های مختلف ریزشبكة مدلسازی و فرموله شده و محدودیت‌های مربوط به آن‌ها تعریف شده است. الگوریتم ارائه شده برای پیاده‌سازی در ریزشبكة در قسمت سوم بیان شده است. قسمت چهارم مربوط به بیان نتایج شبیه‌سازی است و در قسمت پنجم نتیجه‌گیری‌های مقاله بیان شده است.

۲- مدل‌سازی سیستم کنترلی پیشنهادی

۲-۱- ریزشبكة مورد مطالعه

از یک مدل کنترلی برای طراحی کنترل‌کننده ریزشبكة بر اساس کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل استفاده می‌شود. کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل برای انجام پیش‌بینی‌ها به مدلی از ریزشبكة نیاز دارد که این مدل می‌تواند در روند بهینه‌سازی ادغام شود. در سیستم مدیریت انرژی، دینامیک بارها و ژنراتورها در مقایسه با زمان نمونه برداری (۳۰ ثانیه) بسیار سریع است و می‌توان از آن‌ها صرف نظر کرد. بنابراین، دینامیک اصلی در نظر گرفته شده، مربوط به پنل‌های فتوولتائیک به عنوان منابع تولید پراکنده و تجدیدپذیر، باتری لیتومی واحدهای ذخیره‌سازی، پیل سوختی غشای تبادل پروتون و شبکه اصلی انرژی الکتریکی است که همراه با معادله تعادل توان در باس مشترک ریزشبكة‌ی جریان مستقیم مورد مطالعه، مدل مورد استفاده را تشکیل می‌دهند [۳۱]. شکل ۱، ساختار ریزشبكة مورد مطالعه به همراه نحوه پخش توان در آن و جدول ۱ مشخصات این اجزا را نشان می‌دهد.

۲-۲- مدل جامع پیل سوختی و باتری (سیستم ذخیره‌سازی)

پیل سوختی غشای تبادل پروتون [۲۷، ۲۸] ترکیبی از آند، کاتد و غشای الکترولیتی است که با عبور هیدروژن از آند و اکسیژن از کاتد، کار می‌کند. در آند، مولکول‌های هیدروژن الکترون‌ها و پروتون‌ها را ساطع می‌کنند. نیم واکنش‌های انجام شده در هر دو الکترود، به شرح واکنش ۱ و ۲ است. هنگامی که پروتون‌ها وارد غشای الکترولیت می‌شوند، الکترون‌ها با فشار از مدار عبور می‌کنند و جریان الکتریکی و گرما ایجاد می‌کنند. در کاتد، الکترون‌ها، پروتون‌ها و اکسیژن با هم ترکیب می‌شوند و مولکول‌های آب را تولید می‌کنند و در نهایت، پیل سوختی تبادل غشای پروتون از طریق واکنش ۳، انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی و حرارتی تبدیل می‌کنند.



$$\eta_{bat} = \left\{ \begin{array}{l} \eta_{ch} \\ \frac{1}{\eta_{dis}} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} P_{bat} < 0 \text{ (شارژ)} \\ \text{در غیر اینصورت} \end{array} \right\} \quad (۱۳)$$

راندمان شارژ و دشارژ، مقادیر متفاوتی دارند. وضعیت شارژ باتری‌ها در هر لحظه به عنوان نسبت ظرفیت فعلی که برابر است با حاصل ضرب راندمان در زمان نمونه‌برداری بر حداکثر ظرفیت باتری بدست می‌آید که به صورت رابطه ۱۴ خواهد بود. در نتیجه، مقدار سطح هیدروژن مصرفی پیل سوختی نیز به همین ترتیب، به صورت رابطه ۱۵ بدست می‌آید.

$$SoC(t+1) = SoC(t) - \frac{\eta_{bat} T_s}{C_{max}} P_{bat}(t) \quad (۱۴)$$

$$LoH(t+1) = LoH(t) + \frac{\eta_{elz} T_s}{V_{max}} P_{elz}(t) - \frac{T_s}{\eta_{elz} V_{max}} P_{fc}(t) \quad (۱۵)$$

۳-۲- تابع هدف ریزش‌بکه

مطابق با ساختار ریزش‌بکه (شکل ۱)، باتری لیتومی با مبدل دوطرفه به باس مشترک جریان مستقیم متصل است و عدم تعادل توان را جذب و توان باتری، اختلاف توان منابع متصل به باس مشترک را جبران می‌کند؛ بنابراین رابطه تعادل توان به صورت رابطه ۱۶ خواهد بود.

$$P_{bat}(t) = P_{load}(t) + P_{elz}(t) - P_{fc}(t) - P_{grid}(t) - P_{gen}(t) \quad (۱۶)$$

در نتیجه، معادلات ذخیره سازی (روابط ۱۴ و ۱۵) با تعریف اختلاف توان الکتریکی تولید شده توسط انرژی‌های تجدیدپذیر و بار الکتریکی به‌عنوان اختلالات سیستم (رابطه ۱۷)، به صورت روابط ۱۸ و ۱۹ تکمیل می‌شوند.

$$d(t) = P_{gen}(t) - P_{load}(t) \quad (۱۷)$$

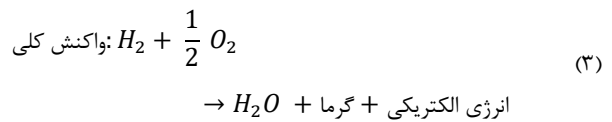
$$SoC(t+1) = SoC(t) - \frac{\eta_{bat} T_s}{C_{max}} \left(P_{elz}(t) - P_{fc}(t) - P_{grid}(t) - d(t) \right) \quad (۱۸)$$

$$K_{bat} = \frac{\eta_{bat}}{C_{max}} = ۱/۵۶ \times ۱۰^{-۳}$$

$$LoH(t+1) = LoH(t) + \frac{\eta_{elz} T_s}{V_{max}} P_{elz}(t) - \frac{T_s}{\eta_{elz} V_{max}} P_{fc}(t), \quad K_{elz} = \frac{\eta_{elz}}{V_{max}} = ۳/۲۱۶ \times ۱۰^{-۳} \quad (۱۹)$$

$$\text{و } K_{fc} = \frac{1}{\eta_{fc} \cdot V_{max}} = ۸/۱۶۶ \times ۱۰^{-۳}$$

استراتژی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل با استفاده از ساختار اصلی نشان داده شده در شکل ۲ پیاده‌سازی می‌شود. مدل دینامیکی برای پیش‌بینی خروجی سیستم آینده، بر اساس مقادیر گذشته و فعلی و بر اساس اقدامات کنترلی بهینه پیشنهادی آتی استفاده می‌شود. این اقدامات توسط بهینه‌سازی با در نظر گرفتن تابع هزینه و همچنین محدودیت‌ها محاسبه می‌شوند که رابطه ۲۰ مدل تعریف شده برای کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل است [۳۴].



استفاده از مدل جامع پیل سوختی با هدف در نظر گرفتن تلفات مختلف اتفاق افتاده در عملکرد آن و محاسبه‌ی پارامترهای فیزیکی مانند سطح هیدروژن مصرفی با استفاده از داده‌های بدست آمده از شبیه‌سازی و روابط آن‌ها به جای استفاده از ضرایب تجربی متداول، است. این مدل‌سازی باعث نزدیکی عملکرد پیل سوختی شبیه‌سازی شده به عملکرد واقعی آن می‌شود و در ادامه این مدل‌سازی توضیح داده شده است. ولتاژ خروجی یک سلول از پیل سوختی با رابطه ۴ محاسبه می‌شود که ولتاژ ترمودینامیکی (ولتاژ مدار باز نظری)، تلفات فعال‌سازی، اهمی و متراکم‌سازی (تغییرات غلظت واکنش‌دهنده‌ها) به ترتیب با روابط ۵ الی ۸ محاسبه می‌شوند. بنابراین، ولتاژ و توان پیل سوختی مطابق با روابط ۹ و ۱۰ محاسبه خواهند شد.

$$V_{cell} = V_{nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (۴)$$

$$V_{nernst} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S}{2F} (T - T_{ref}) + \frac{RT}{2F} (\ln P_{H_2} + \frac{1}{2} \ln P_{O_2}) \quad (۵)$$

$$V_{act} = \frac{RT}{2 \alpha F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (i_0 > i) \quad (۶)$$

$$V_{con} = -b \ln \left(1 - \frac{i}{i_{max}} \right) \quad (۷)$$

$$V_{ohm} = i R_r \quad (۸)$$

$$V_{fc} = V_{cell} \times N_{cell} \quad (۹)$$

$$P_{fc} = V_{fc} \times i \times A_{cell} \quad (۱۰)$$

با توجه به مدل دینامیکی سیالات و معادلات بقای جرم در پیل سوختی برای عبور عناصر از کانال‌های آندی و کاتدی، جریان و ترکیب جریان‌های آندی و کاتدی تعیین می‌شوند. در نتیجه، مصرف هیدروژن به عنوان تابعی از چگالی جریان با واکنش‌های انجام گرفته به صورت رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود؛ به دلیل استفاده از مخزن ذخیره‌سازی هیدروژن در ریزش‌بکه و کنترل آن فقط سطح مصرف هیدروژن در نظر گرفته شده است.

$$LoH = q_{H_2} = \frac{P_{H_2} V_{an}}{RT} = \frac{N_{cell} I_{fc}}{2F} \quad (۱۱)$$

واحدهای ذخیره‌سازی و پیل سوختی را می‌توان با معادله تعادل انرژی الکتریکی در آن‌ها که نشان‌دهنده‌ی افزایش سطح انرژی آن‌ها، یعنی وضعیت شارژ باتری و سطح هیدروژن مصرفی است، مدل‌سازی کرد. رابطه ۱۲ مربوط تغییرات در وضعیت شارژ باتری است.

$$x(t+1) = x(t) - \eta_{bat} T_s P_{bat}(t) \quad (۱۲)$$

در این رابطه زمان نمونه‌برداری ۳۰ ثانیه است و متغیرهای ورودی مسئله وضعیت شارژ باتری و سطح هیدروژن مصرفی پیل سوختی، در نظر گرفته می‌شود. به‌طور کلی، تأثیر شارژ / دشارژ واحدهای ذخیره‌سازی بر سطوح انرژی ذخیره‌شده یکسان نیست، بنابراین بازده‌های متفاوتی برای شارژ / دشارژ طبق رابطه ۱۳ استفاده می‌شود.

$$\sum_{k=1}^{N_c} \alpha_1 P_{H_2}^2(t+k) + \alpha_2 P_{grid}^2(t+k) + \beta_1 \Delta P_{H_2}^2(t+k) + \beta_2 \Delta P_{grid}^2(t+k)$$

در تابع هدف در نظر گرفته شده (رابطه ۲۳)، مقادیر بسیار کوچک γ_1 و γ_2 مطابق با رابطه ۱۸ و ۱۹ بر اساس ضرایب مربوط به محاسبه تغییرات در وضعیت شارژ باتری و سطح هیدروژن پیل سوختی محاسبه شده‌اند و چون بازه‌ی تغییرات آن‌ها بر حسب درصد می‌باشد، هر دو ضریب برابر خواهند بود. ضرایب α_1 و β_1 که مربوط به مقدار توان پیل سوختی می‌باشد، با استفاده از مقدار ظرفیت پیل سوختی (V_{max}) و راندمان آن (η_{fc}) محاسبه می‌شود که در رابطه‌ی ۱۹ مشخص است. در نهایت ضرایب α_2 و β_2 که برای تعیین انرژی مبادله شده بین شبکه اصلی و ریزشبهه است، مقدار بالاتری نسبت به α_1 را در یک مقیاس به خود اختصاص می‌دهد تا مقدار تعیین شده برای این توان مبادله شده کمترین مقدار باشد. انتخاب این وزن‌ها بر اساس اولویت استفاده از منابع است، یعنی استفاده از هیدروژن در پیل سوختی را در مقابل خرید انرژی از شبکه اصلی در اولویت قرار می‌دهد. این ضرایب به همراه زمان نمونه‌برداری، افق‌های پیش‌بینی و کنترلی انتخاب شده به صورت رابطه ۲۴ هستند [۳۱].

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \frac{T_s}{\eta_{elz} V_{max}} = \frac{30 \cdot 60 \cdot 60}{0.7 \times 1/5 \times 10^3} \cong 10^{-8}$$

$$\alpha_1 = \beta_1 = K_{fc} = \frac{1}{\eta_{fc} \cdot V_{max}} \cong 8 \times 10^{-3} \quad (24)$$

$$\alpha_2 = \beta_2 = 10 \times 10^{-3}$$

$N_p = 6$ (نمونه)، $N_c = 2$ (نمونه)، $T_s = 30$ (ثانیه)

۴-۲- محدودیت‌های عملیاتی

برای بهینه‌سازی تابع هدف (رابطه ۲۳) لازم است که محدودیت‌های عملیاتی تجهیزات ریزشبهه نیز، تعریف شوند. اساساً دو نوع محدودیت وجود دارد: نوع اول، مربوط به محدودیت‌های فیزیکی واحدها، شامل حداقل و حداکثر بهره‌برداری از منابع، یعنی توان تأمین شده باتری، پیل سوختی و شبکه اصلی است. این محدودیت‌ها آستانه‌های فیزیکی هستند که به دلایل ساختاری نمی‌توان از آن‌ها عبور کرد. یک حد بالایی برای همه واحدها وجود دارد، اما همچنین معمول است که یک حد پایینی ظاهر می‌شود، به این معنی که وقتی واحدها در مدار قرار گیرند، باید حداقل توان را ارائه دهند [۲۶، ۲۹]. بنابراین، این محدودیت‌ها در توان و ظرفیت واحدها در نظر گرفته می‌شوند و به شکل روابط ۲۵ الی ۲۹ هستند:

$$P_{bat}^{min} = 2/5 = P_{bat}(t) \leq P_{bat}^{max} \quad (25)$$

+۲/۵ (کیلو وات)

$$P_{grid}^{min} = -6 = P_{grid}(t) \leq P_{grid}^{max} \quad (26)$$

+۶ (کیلو وات)

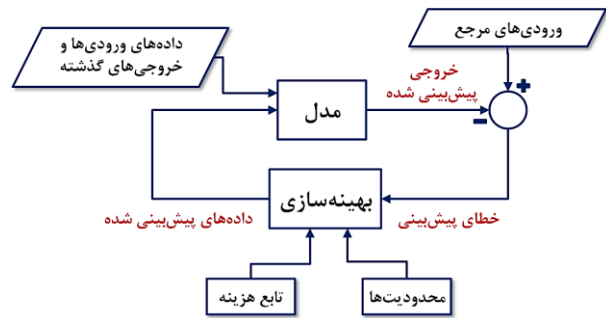
$$P_{H_2}^{min} = 2/5 = P_{H_2}(t) \leq P_{H_2}^{max} \quad (27)$$

+۲/۵ (کیلو وات)

$$SoC^{min} = 40\% \leq SoC(t) \leq SoC^{max} = 75\% \quad (28)$$

$$LoH^{min} = 30\% \leq LoH(t) \leq LoH^{max} = 80\% \quad (29)$$

علاوه بر این محدودیت‌های فیزیکی، حاشیه‌ی ایمنی به‌عنوان محدودیت‌های نوع دوم برای منابع مختلف ریزشبهه، در نظر گرفته می‌شوند. این محدودیت‌ها برای جلوگیری از تغییرات ناگهانی در انرژی الکتریکی عرضه



شکل ۲. ساختار اصلی روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل

به‌طور معمول، هدف اصلی این است که خروجی آینده سیستم (\hat{y})، یک سیگنال مرجع (w) حاصل از اندازه‌گیری‌های لحظه‌ای از سیستم یا تعیین شده به‌صورت ثابت (وضعیت شارژ مرجع باتری) را در امتداد افق پیش‌بین (N_p) مطابق با قسمت اول رابطه ۲۰ دنبال کند. این هدف با بهینه‌سازی تابع هزینه سیگنال‌های کنترلی (u) بدست می‌آید و کم‌ترین میزان ممکن بر اساس محدودیت‌ها و کم‌ترین تغییرات در این سیگنال‌ها برای پیاده‌سازی در سیستم به‌ترتیب با در نظر گرفتن قسمت دوم و سوم رابطه ۲۰ در امتداد افق کنترلی (N_c) محقق می‌شود. بر اساس این رابطه و تبادل توان (رابطه ۱۶) در نظر گرفته شده تابع هدف مسئله به صورت رابطه ۲۱ خواهد بود.

$$Obj_{MPC} = \sum_{k=1}^{N_p} \left\| (\hat{y}(t+k|t) - w(t+k)) \right\|_p$$

$$+ \sum_{k=1}^{N_c} \left\| (u(t+k-1)) \right\|_c \quad (20)$$

$$+ \sum_{k=1}^{N_c} \left\| (\Delta u(t+k-1)) \right\|_c$$

$$Obj_{MG} = \sum_{k=1}^{N_p} \gamma_1 (SoC(t+k) - SoC_{ref})^2 + \gamma_2 (LoH(t+k) - LoH_{ref})^2 + \sum_{k=1}^{N_c} \alpha_1 P_{fc}^2(t+k) + \alpha_2 P_{elz}^2(t+k) + \alpha_3 P_{grid}^2(t+k) + \alpha_4 P_{bat}^2(t+k) + \beta_1 \Delta P_{fc}^2(t+k) + \beta_2 \Delta P_{elz}^2(t+k) + \beta_3 \Delta P_{grid}^2(t+k) + \beta_4 \Delta P_{bat}^2(t+k) \quad (21)$$

در ریزشبهه در نظر گرفته شده با ذخیره هیدروژن در پیل سوختی، توان مبادله شده با پیل سوختی و الکترولیزر همیشه مقادیر مثبت دارند و هر دو متغیر نمی‌توانند همزمان صفر شوند؛ زیرا این متغیرها مکمل هم هستند. به‌منظور اجتناب از در نظر گرفتن این محدودیت در مدل، متغیر توان هیدروژن ذخیره شده به صورت رابطه ۲۲ تعریف می‌شود.

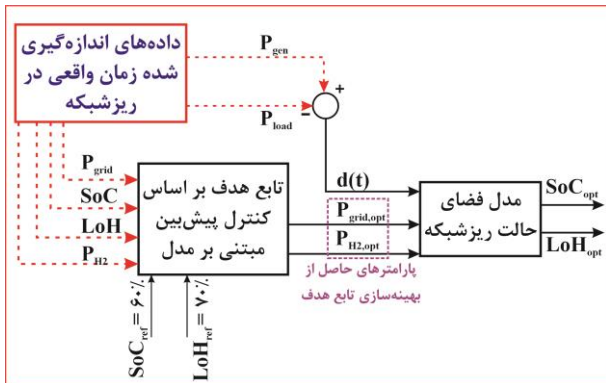
$$P_{H_2} = P_{fc} - P_{elz} \quad (22)$$

تابع هزینه با یک تغییر جزئی بر اساس رابطه ۲۲ و در نظر گرفتن توان هیدروژن ذخیره شده و چشم پوشی از توان باتری لیتیومی به‌صورت رابطه ۲۳ بیان می‌شود؛ چون وضعیت شارژ باتری تعیین کننده توان باتری است، بنابراین به‌دلیل وجود وضعیت شارژ باتری در رابطه ۲۱ می‌توان از توان باتری چشم پوشی کرد.

$$Obj_{MG} = \sum_{k=1}^{N_p} \gamma_1 (SoC(t+k) - SoC_{ref})^2 + \gamma_2 (LoH(t+k) - LoH_{ref})^2 + \quad (23)$$

$$, Bd = \begin{bmatrix} 1.56 \times 10^{-3} \\ 0 \end{bmatrix}, C = I$$

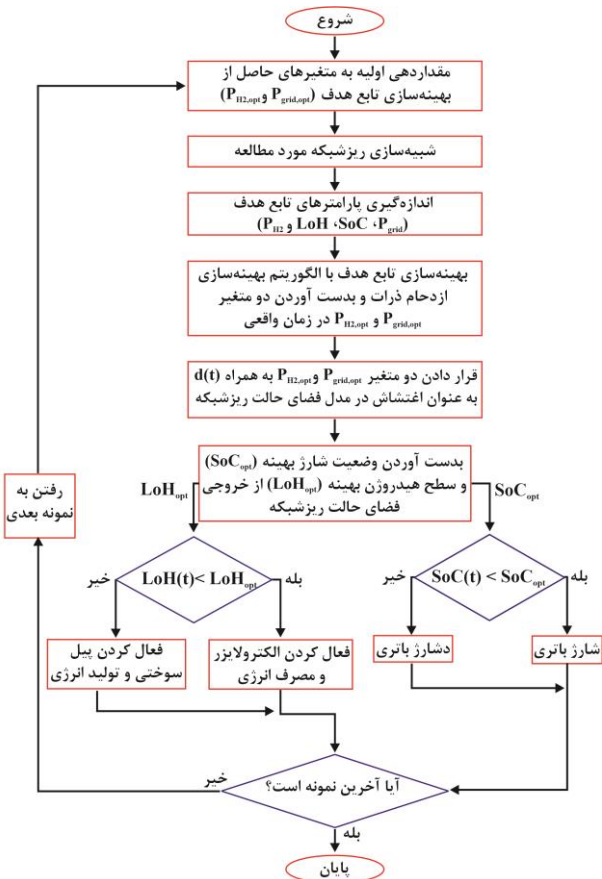
شکل ۳ معماری کنترلی پیشنهادی بر اساس کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل را نشان می‌دهد که مقادیر وضعیت شارژ و سطح هیدروژن بهینه برای کنترل ریزشبه بر اساس آن بدست می‌آیند.



شکل ۳. معماری کنترلی پیشنهادی بر اساس کنترل پیش‌بین

۳- الگوریتم استفاده شده برای مدیریت و کنترل ریزشبه

هدف از این مقاله، کنترل و مدیریت ریزشبه مطالعه شده است که الگوریتم پیشنهادی آن در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. فلوچارت الگوریتم مورد استفاده برای کنترل و مدیریت ریزشبه

مطابق با این شکل، ابتدا به دو پارامتر بهینه‌سازی شده (توان مبادله شده با شبکه اصلی و توان هیدروژن) که هدف محاسبه آن‌ها است، مقداردهی اولیه می‌شود. سپس، ریزشبه به‌طور کامل در طول یک روز شبیه‌سازی می‌شود تا پارامترهای موردنیاز در تابع هدف (رابطه ۲۵) بدست آورده شود که این

شده توسط واحدها می‌باشند که بر استهلاک و طول عمر مفید واحدها، تأثیر می‌گذارند و در تجهیزات گران قیمت مانند پیل‌های سوختی و باتری‌ها مهم خواهند بود و به‌صورت روابط ۳۰ تا ۳۴ هستند.

$$\Delta P_{bat}^{min} \leq \Delta P_{bat}(t) \leq \Delta P_{bat}^{max} \quad (30)$$

= +۱ (کیلو وات)

$$\Delta P_{grid}^{min} \leq \Delta P_{grid}(t) \leq \Delta P_{grid}^{max} \quad (31)$$

= +۱ (کیلو وات)

$$\Delta P_{H_2}^{min} \leq \Delta P_{H_2}(t) \leq \Delta P_{H_2}^{max} \quad (32)$$

= +۱ (کیلو وات)

$$\Delta SoC^{min} \leq \Delta SoC(t) \leq \Delta SoC^{max} = \pm 10\% \quad (33)$$

$$\Delta LoH^{min} \leq \Delta LoH(t) \leq \Delta LoH^{max} = \pm 10\% \quad (34)$$

۵-۲ مدل ریزشبه

در اکثر سیستم‌ها، نه تنها متغیرهای پیوسته، بلکه متغیرهایی با ماهیت گسسته نیز وجود دارند. بسیاری از عملیات مرتبط با مدیریت ریزشبه‌ها باید با در نظر گرفتن دینامیک سیستم مورد مطالعه و سوئیچینگ بین شرایط عملیاتی مختلف مدل شوند. مقادیر باینری برای توصیف متغیرهای منطقی گسسته که می‌توانند متغیرهای تصمیم‌گیری شامل شارژ/تخلیه باتری و پیل سوختی خرید/فروش انرژی الکتریکی باشند. بنابراین، برای تعیین این متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله باید با استفاده از یکی از روش‌های بهینه‌سازی حل شود [۳۱]. در نتیجه، در استراتژی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل، در هر نمونه باید تابع هدف (رابطه ۲۳) بهینه‌سازی شود که در این مقاله برای این منظور از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده می‌شود. دو سیگنال کنترلی که شامل توان مبادله شده با شبکه اصلی و توان هیدروژن ذخیره شده است، با به حداقل رساندن تابع هدف در هر نمونه و با در نظر گرفتن تمام محدودیت‌های عملیاتی اشاره شده، به عنوان ورودی‌های مسئله بدست می‌آیند. بنابراین:

$$\text{Minimize } Obj_{MG} \quad (35)$$

$$P_{grid}, P_{H_2}$$

محدودیت‌ها: روابط ۲۵ تا ۳۴

ماتریس ورودی‌ها شامل توان مبادله شده با شبکه اصلی و توان هیدروژن ذخیره شده می‌باشند که از رابطه ۳۵ بدست می‌آیند. به منظور به دست آوردن ماتریس‌های فضای حالت برای این ریزشبه بر اساس روابط ۱۲ الی ۱۵ و ۱۸ و ۱۹، مدل ریزشبه به‌صورت رابطه ۳۶ تعریف می‌شود.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + B_d d$$

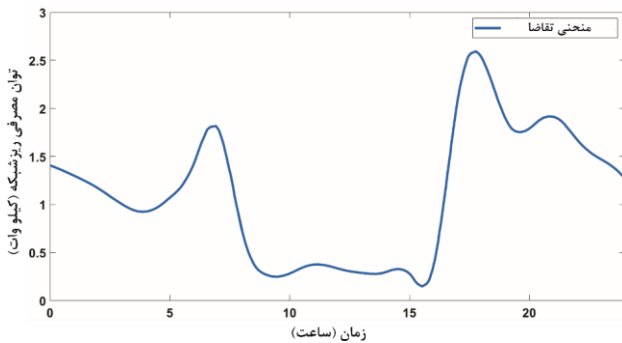
$$, y(k) = Cx(k)$$

$$x(k) = \begin{bmatrix} SoC(k) \\ LoH(k) \end{bmatrix}, u(k) = \begin{bmatrix} P_{H_2}(k) \\ P_{grid}(k) \end{bmatrix}, \quad (36)$$

$$d(k) = P_{gen}(k) - P_{load}(t)$$

$$A = I, B = \begin{bmatrix} 1.56 \times 10^{-3} & 1.56 \times 10^{-3} \\ -5.66 \times 10^{-3} & 0 \end{bmatrix}$$

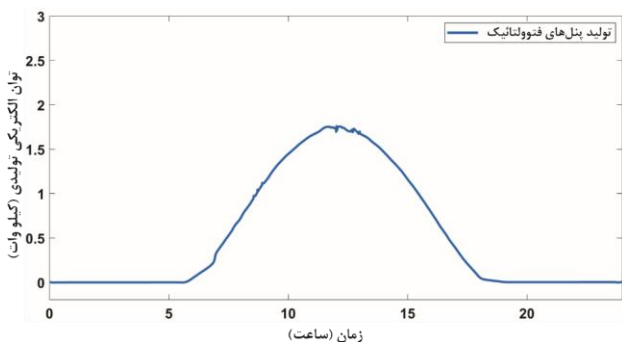
مصرفی در ریزشبهه.



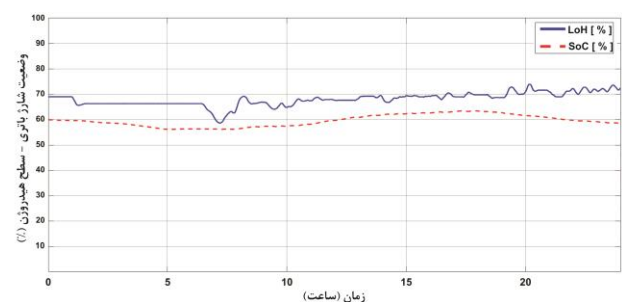
شکل ۵. منحنی تقاضای توان الکتریکی ریزشبهه

۴-۱- سناریو اول

در این سناریو، شکل ۶ منحنی توان تولیدی پنل‌های فتوولتائیک در نظر گرفته شده که دارای نوسان کم می‌باشد. این منحنی مربوط به یک روز آفتابی است؛ زیرا در طول شب (ساعت ۶ عصر تا نیمه شب) و ساعات اولیه روز (از نیمه شب تا ۶ صبح) به دلیل عدم وجود آفتاب، پنل‌ها تولیدی ندارند. از طرف دیگر، در اواسط روز که شدت تابش نور آفتاب بیشتر است، بیشترین میزان توان تولیدی را دارند.



شکل ۶. منحنی توان الکتریکی تولیدی پنل‌های فتوولتائیک



شکل ۷. وضعیت شارژ باتری و سطح هیدروژن پیل سوختی

سیستم پیشنهادی برای مدیریت زمان واقعی ریزشبهه، واحد ذخیره‌سازی و پیل سوختی را به منظور تأمین تقاضا با استفاده از توان تولیدی پنل‌ها، توان مبادله شده با پیل سوختی و باتری و شبکه اصلی انرژی الکتریکی کنترل می‌کند. شکل ۷، وضعیت شارژ باتری و سطح هیدروژن پیل سوختی را در طول یک روز نشان می‌دهد. وضعیت شارژ مرجع باتری ۶۰٪ و مقدار سطح هیدروژن مرجع ۷۰٪ در نظر گرفته شده است که با روش پیشنهادی حداکثر اختلاف با مقدار مرجع آن‌ها در هر دو حدود ده درصد می‌باشد. این اختلاف کم باعث کاهش استهلاک و افزایش طول عمر باتری و پیل سوختی خواهد شد. بیشترین

پارامترها شامل مقادیر لحظه‌ای برای کنترل ریزشبهه در زمان واقعی و داده‌های پیش‌بینی شده از وضعیت ریزشبهه در هر نمونه است.

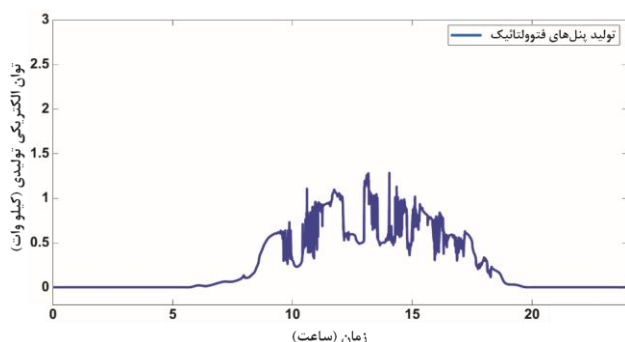
این پارامترها در تابع هدف قرار داده می‌شوند و تابع هدف بر اساس این پارامترها که شامل پارامترهای زمان واقعی و پیش‌بینی شده است و در نظر گرفتن تمام محدودیت‌های تعریف شده (روابط ۲۵ الی ۳۴)، بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهینه‌سازی شده و دو پارامتر بهینه‌ی توان مبادله شده با شبکه اصلی و توان هیدروژن ذخیره شده، بدست می‌آیند. این دو پارامتر به همراه اختلاف توان تولیدی توسط انرژی‌های تجدیدپذیر و تقاضای موردنیاز ریزشبهه که به عنوان اغتشاش در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۱۷) در مدل فضای حالت ریزشبهه (رابطه ۳۶) قرار داده می‌شوند و دو پارامتر کنترلی، وضعیت شارژ بهینه باتری و سطح هیدروژن بهینه بدست می‌آید. در نتیجه، بر اساس این دو متغیر محاسبه شده، نحوه عملکرد باتری و پیل سوختی تعیین می‌شود: در پیل سوختی، در هر لحظه، اگر سطح هیدروژن اندازه‌گیری شده از مقدار بهینه‌ی آن کمتر باشد، یعنی باید سطح هیدروژن افزایش یابد تا به مقدار بهینه برسد، پس فرمان فعال شدن به الکترولیزر ارسال شده و وارد مدار می‌شود تا میزان هیدروژن ذخیره شده افزایش یابد. در طرف مقابل، اگر سطح هیدروژن از مقدار بهینه بیشتر یا مساوی باشد، پیل سوختی وارد مدار می‌شود و هیدروژن مصرف شده تا به سطح آن به مقدار بهینه برسد. این روند در کنترل باتری نیز وجود دارد، اگر وضعیت شارژ لحظه‌ای باتری از مقدار بهینه‌ی محاسبه شده‌ی آن کمتر باشد، یعنی درصد شارژ باتری باید افزایش یابد تا به مقدار بهینه برسد، پس باتری در وضعیت شارژ قرار می‌گیرد و در غیر این صورت، باتری دشارژ خواهد شد.

این الگوریتم در هر نمونه اجرا شده و تا آخرین نمونه ادامه می‌یابد، فقط به جز نمونه‌ی اول که لازم است به متغیرهای بهینه‌سازی شده در تابع هدف مقداردهی اولیه شود، در بقیه نمونه‌ها از مقادیر محاسبه شده در زمان واقعی برای این دو متغیر استفاده خواهند شد.

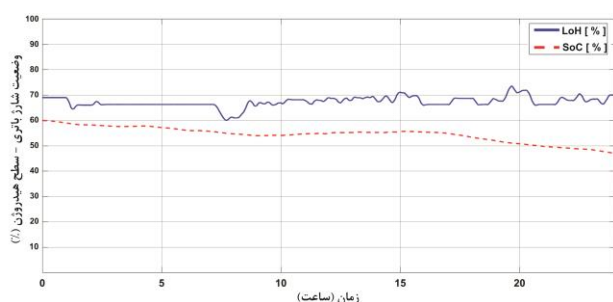
۴- شبیه‌سازی‌ها و نتایج

برای شبیه‌سازی ریزشبهه مورد مطالعه، دو سناریو مختلف در نظر گرفته شده است که تفاوت آن‌ها در توان الکتریکی تولیدی توسط منابع تولید پراکنده (پنل‌های فتوولتائیک) است. در سناریو اول، تولید پنل‌ها با نوسانات کمتر و دامنه‌ی بیشتر نسبت به سناریو دوم است که برای بررسی تأثیر منابع پراکنده بر عملکرد ریزشبهه با کنترل پیشنهادی می‌باشد. اما در هر دو حالت، مقدار تقاضای مورد نیاز ریزشبهه مورد مطالعه یکسان در نظر گرفته شده که مطابق با شکل ۵ است که در آن منحنی تقاضای ریزشبهه در طول یک روز (۲۴ ساعت) نشان داده شده است [۳۶]. این منحنی تقاضا را می‌توان به سه بخش تقسیم کرد: ساعات اولیه روز تا حدود ساعت ۸ صبح، ساعت ۸ تا ساعت ۶ عصر (غروب آفتاب) و ساعت ۶ عصر تا نیمه شب که به ترتیب ریزشبهه دارای تقاضای متوسط، کم و پیک است. این روند برای مشاهده‌ی عملکرد روش کنترلی پیشنهادی و مقایسه‌ی آن در مورد عملکرد آن‌ها در وضعیت عادی با زمانی است که به دلیل شرایط آب و هوایی (هوای ابری)، هنگام مواجهه‌ی سیستم انرژی الکتریکی با کمبود تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، است که باعث افزایش تکیه به سیستم‌هایی با قابلیت ذخیره‌سازی (پیل سوختی و باتری) می‌شود. در نتیجه اهداف کلی راه‌حل پیشنهادی شامل موارد زیر است:

- به حداکثر رساندن صرفه جویی و منافع اقتصادی از طریق مدیریت منابع انرژی ریزشبهه و کاهش خرید انرژی الکتریکی از شبکه اصلی،
- به حداقل رساندن استفاده بیش از حد از پیل سوختی و باتری برای افزایش عمر مفید آنها با کاهش تغییرات در سطح هیدروژن وضعیت شارژ،
- رعایت محدودیت‌های عملیاتی برای کل سیستم در مورد منابع تولیدی و



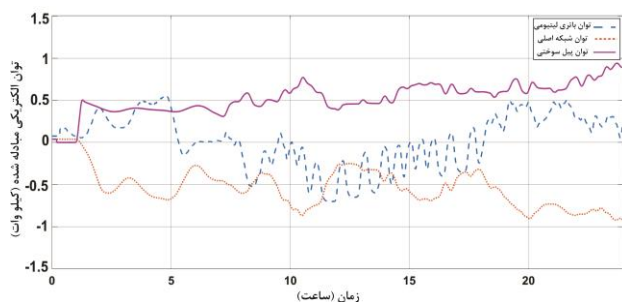
شکل ۹. منحنی توان الکتریکی تولیدی پنل‌های فتوولتائیک در سناریو دوم



شکل ۱۰. وضعیت شارژ باتری و سطح هیدروژن پیل سوختی در سناریو دوم

در شکل ۱۱، تغییرات توان ریزشکبه در این حالت نشان داده شده است که مطابق با تغییرات در وضعیت شارژ و سطح هیدروژن است که نوسانات تولید پیل‌ها در توان مبادله شده با باتری، تأثیر می‌گذارد و کنترل‌کننده عملکردی همانند حالت قبلی دارد.

در هر دو سناریو وضعیت شارژ باتری و سطح هیدروژن تا حد ممکن تغییرات کمتری از مقدار مرجع خود دارند؛ زیرا وزن‌های مورد استفاده در تابع هدف برای ردیابی مرجع و اختلاف با آن، کوچک هستند که باعث تغییرات کمتر آن‌ها می‌شوند. از طرف دیگر، چون ضرایب مربوط به توان مبادله با شبکه اصلی بزرگ‌تر است، بنابراین انرژی کمی از شبکه اصلی خریداری می‌شود.



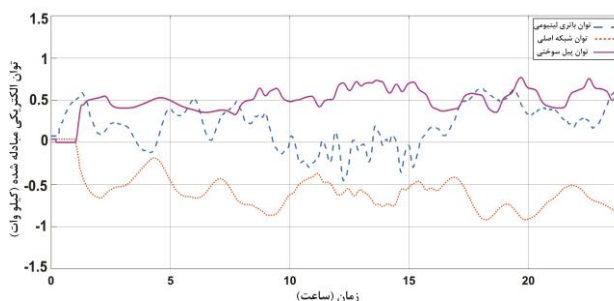
شکل ۱۱. منحنی توان مبادله شده در ریزشکبه در سناریو دوم

۵- نتیجه‌گیری

یک روش کنترل زمان واقعی برای کنترل و مدیریت ریزشکبه پیشنهاد شده است. اجزا اصلی ریزشکبه مورد مطالعه شامل شبکه اصلی، باتری (سیستم ذخیره‌سازی)، پیل سوختی و پنل‌های فتوولتائیک به عنوان منابع تولید پراکنده است. اهداف این روش عبارتند از: مدیریت یکپارچه این منابع ریزشکبه، کاهش استفاده بی‌رویه از باتری و پیل سوختی و در نتیجه کاهش استهلاک و افزایش طول عمر آن‌ها، رعایت محدودیت‌های عملیاتی در نظر گرفته برای ریزشکبه و

تغییرات در وضعیت شارژ و سطح هیدروژن در بازه زمانی با تقاضای متوسط رخ می‌دهد؛ زیرا در این ساعات، پنل‌های فتوولتائیک تولیدی برای کمک به تأمین تقاضا ندارند. اما، در طول روز (ساعت ۸ الی ۱۸) با افزایش تولید پنل‌ها و کاهش تقاضا، باتری و پیل سوختی نوسانات کمتری دارند و با شارژ باتری افزایش یافته و پیل سوختی تغییرات کمتری دارد. همچنین، در ساعات پایانی شب (پیک تقاضا)، پنل‌ها تولیدی ندارد، اما در طول روز، کنترل پیشنهادی این تغییرات را با شبیه‌سازی صورت گرفته پیش‌بینی کرده است و در نتیجه، با بهینه‌سازی و استفاده از داده‌های پیش‌بینی شده تأثیر عدم تولید پنل‌ها و پیک تقاضا در این ساعات کم است.

شکل ۸، منحنی توان ریزشکبه در این سناریو را نشان می‌دهد که از سه پارامتر توان مبادله شده با شبکه اصلی، پیل سوختی و باتری تشکیل شده است. می‌توان مشاهده کرد که توان الکتریکی پیل سوختی و پنل‌های فتوولتائیک قسمت عمده تقاضای مورد نیاز ریزشکبه (شکل ۵) را تأمین می‌کند و انرژی مازاد به شبکه اصلی فروخته می‌شود. وظیفه اصلی باتری جذب نوسانات تقاضای مورد نیاز و تولید انرژی الکتریکی است، به همین دلیل، تغییرات بیشتری دارد.



شکل ۸. منحنی توان الکتریکی ریزشکبه در سناریو اول

منحنی توان ریزشکبه (شکل ۸) با تغییرات در وضعیت شارژ باتری و سطح هیدروژن مطابقت دارد. در ساعات اولیه روز (تقاضای متوسط)، باتری به دلیل عدم تولید پنل‌ها دچار شارژ شده و توان الکتریکی بیشتری از دیگر ساعات، برای تأمین تقاضای ریزشکبه به ریزشکبه تزریق می‌کند. در طول روز (ساعت ۸ الی ۱۸)، با اضافه شدن تولید پنل‌ها، باتری وظیفه جذب نوسانات را دارد که باعث کاهش نوسانات پیل سوختی می‌شود و در ساعات پیک تقاضا، به دلیل عدم تولید پنل‌ها، توان مبادله شده با شبکه اصلی، باتری و پیل سوختی، نوسانات کمتری دارند و با وضعیت قبلی و استفاده از پیش‌بینی این وضعیت به کار خود ادامه می‌دهد.

۴-۲- سناریو دوم

در این سناریو، توان الکتریکی تولیدی پنل‌های فتوولتائیک به عنوان منابع تولید پراکنده به صورت شکل ۹ در نظر گرفته می‌شود. توان تولیدی، دارای نوسانات بیشتر و دامنه کمتری نسبت به سناریو اول است که این حالت می‌تواند به دلیل تغییرات آب و هوایی رخ دهد. هدف از تعریف این سناریو، بررسی تأثیر افزایش نوسانات و کاهش دامنه توان تولیدی منابع پراکنده بر عملکرد کنترل پیشنهادی در ریزشکبه است.

در شکل ۱۰، وضعیت شارژ باتری و سطح هیدروژن پیل سوختی با استفاده از کنترل پیشنهادی، در نظر گرفتن منحنی تقاضا و منحنی تولید پنل‌ها به ترتیب به صورت شکل ۵ و ۹ نشان داده شده است. در این حالت، همانند شبیه‌سازی قبلی، حداکثر تفاوت از مقدار مرجع حدود ده درصد می‌باشد، با این تفاوت که به دلیل دامنه کمتر تولید پیل‌ها، باتری سطح شارژ کمتری نسبت به حالت قبلی دارد، اما نوسانات توسط باتری جذب می‌شوند.

ظرفیت لحظه‌ای باتری (kWh)	$C_{bat}(t)$	کاهش خرید انرژی الکتریکی از شبکه اصلی.
حداکثر ظرفیت باتری (kWh)	C_{max}	نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که روش کنترلی پیشنهادی مدیریت و کنترل ریزش‌بکه را با اهداف بیان شده، حتی با تغییرات در توان تولیدی منابع تولید پراکنده، انجام می‌دهد. تفاوت در وضعیت شارژ باتری و سطح هیدروژن پیل سوختی (شکل‌های ۷ و ۱۰)، حداکثر حدود ۱۰٪ می‌باشد که باعث کاهش استفاده بی‌رویه از این منابع و کاهش استهلاک آن‌ها می‌شود. از طرف دیگر، مطابق با منحنی توان مبادله شده با منابع ریزش‌بکه (شکل‌های ۸ و ۱۱)، اکثر تقاضای مورد نیاز توسط پیل سوختی و پنل‌های فتوولتائیک تأمین می‌شود و انرژی خریداری شده از شبکه کاهش یافته و انرژی مازاد به شبکه اصلی فروخته می‌شود. همچنین، باتری نوسانات توان تولیدی انرژی‌های تجدیدپذیر و نوسانات تقاضای مورد نیاز ریزش‌بکه را جذب می‌کند و توان مبادله شده با شبکه اصلی و توان پیل سوختی نوسانات کمتری دارند.
حداکثر حجم هیدروژن (سوخت) ذخیره شده در مخزن (m^3)	V_{max}	نمادها
توان تأمین شده توسط باتری (kW)	P_{bat}	V_{cell} ولتاژ هر سلول (v)
جریان پیل سوختی (A)	I_{fc}	V_{nernst} ولتاژ ترمودینامیکی (مدار باز) هر سلول (v)
ولتاژ پیل سوختی (v)	V_{fc}	V_{act} افت ولتاژ ناشی از تلفات فعالسازی در سطح الکترودها (v)
توان مبادله شده با پیل سوختی (kW)	P_{fc}	V_{ohm} افت ولتاژ ناشی از تلفات اهمی (v)
توان مبادله شده با الکترولایزر (kW)	P_{elz}	V_{con} افت ولتاژ ناشی از تلفات متراکم سازی (تغییر غلظت) (v)
توان مبادله شده با شبکه اصلی (kW)	P_{grid}	ΔG تغییرات انرژی آزاد گیبس ($\frac{J}{mol}$)
توان بارهای الکتریکی (تقاضا) (kW)	P_{load}	ΔS تغییرات آنتروپی ($\frac{J}{K}$)
توان تولید شده توسط منابع تولید پراکنده (kW)	P_{gen}	F ثابت فارادی ($\frac{C}{mol}$)
توان تولیدی توسط هیدروژن ذخیره شده (kW)	P_{H_2}	R ثابت جهانی گازها (ثابت بولتزمن) ($\frac{kg \cdot cm^2}{K \cdot s^2}$)
مقدار بهینه توان هیدروژن ذخیره شده در هر نمونه (kW)	$P_{H_2,opt}$	P_{H_2} فشار جزئی گاز هیدروژن (Pa)
مقدار بهینه توان مبادله شده با شبکه اصلی در هر نمونه (kW)	$P_{grid,opt}$	P_{O_2} فشار جزئی گاز اکسیژن (Pa)
مقدار بهینه سطح هیدروژن مصرف‌در هر نمونه (/.)	LOH_{opt}	T دمای عملکرد پیل سوختی (K)
مقدار بهینه وضعیت شارژ باتری در هر نمونه (/.)	SoC_{opt}	T_{ref} دمای مرجع پیل سوختی (K)
افق کنترلی (بدون بُعد)	N_c	T_s زمان نمونه‌برداری (s)
افق پیش‌بینی (بدون بُعد)	N_p	i چگالی جریان کاری پیل سوختی ($\frac{A}{cm^2}$)
تابع هدف تعریف شده برای کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل	Obj_{MPC}	i_0 چگالی جریان در لحظه عبور از ولتاژ صفر ($\frac{A}{cm^2}$)
تابع هدف ریزش‌بکه مورد مطالعه	Obj_{MG}	α ضریب انتقال بار (بدون بُعد)
ماتریس متغیرها (بدون بُعد)	$x(t)$	b ضریب پارامتریک وابسته به پیل سوختی و عملکرد آن (v)
ماتریس ورودی (بدون بُعد)	$u(t)$	R_r مقاومت در برابر انتقال پروتون‌ها از طریق غشا (Ω)
ماتریس خروجی (بدون بُعد)	$y(t)$	N_{cell} تعداد سلول‌های تشکیل دهنده پیل سوختی (بدون بُعد)
ماتریس اختلالات سیستم (بدون بُعد)	$d(t)$	A_{cell} سطح مقطع فعال هر سلول پیل سوختی (cm^2)
مقادیر مرجع در کنترل پیش‌بین (بدون بُعد)	$w(t)$	V_{an} حجم الکتروند آند (cm^3)
ضریب وزنی متغیرهای خروجی (بدون بُعد)	α	LoH سطح هیدروژن مصرفی (/.)
ضریب وزنی خطا (بدون بُعد)	γ	SoC وضعیت شارژ باتری (/.)
ضریب وزنی حفاظت در برابر استهلاک تجهیزات (بدون بُعد)	β	η_{ch} راندمان شارژ (/.)
		η_{bat} بازده باتری (/.)
		η_{ais} راندمان دشارژ (/.)

مراجع

[1] I. E. Agency, 'International Energy Agency (IEA) World Energy Outlook 2022', <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/executive-summary>, 2022.

[2] F. Benavente, A. Lundblad, P. E. Campana, Y. Zhang, S. Cabrera, and G. Lindbergh, 'Photovoltaic/battery system sizing for rural electrification in Bolivia: Considering the suppressed demand effect', *Appl. Energy*, vol. 235, no. February 2018, pp. 519–528, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.10.084.

[3] Y. Sahri *et al.*, 'Energy management system for hybrid PV/wind/battery/fuel cell in microgrid-based hydrogen and economical hybrid battery/super capacitor energy storage', *Energies*, vol. 14, no. 18, 2021, doi: 10.3390/en14185722.

[4] D. Akinyele, E. Olabode, and A. Amole, 'Review of fuel cell technologies and applications for sustainable microgrid systems', *Inventions*, vol. 5, no. 3, pp. 1–35, 2020, doi: 10.3390/inventions5030042.

- [21] A. Ferrara, M. Okoli, S. Jakubek, and C. Hametner, 'Energy management of heavy-duty fuel cell electric vehicles: Model predictive control for fuel consumption and lifetime optimization', *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 2, pp. 14205–14210, 2020, doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1053.
- [22] D. F. Pereira, F. D. C. Lopes, and E. H. Watanabe, 'Nonlinear Model Predictive Control for the Energy Management of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles in Real Time', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 4, pp. 3213–3223, 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.2979528.
- [23] D. Shen, C. C. Lim, and P. Shi, 'Robust fuzzy model predictive control for energy management systems in fuel cell vehicles', *Control Eng. Pract.*, vol. 98, no. January, p. 104364, 2020, doi: 10.1016/j.conengprac.2020.104364.
- [24] Q. Guo, Z. Zhao, P. Shen, and P. Zhou, 'Optimization management of hybrid energy source of fuel cell truck based on model predictive control using traffic light information', *Control Theory Technol.*, vol. 17, no. 4, pp. 309–324, 2019, doi: 10.1007/s11768-019-9118-1.
- [25] W. Xin, E. Xu, W. Zheng, H. Feng, and J. Qin, 'Optimal energy management of fuel cell hybrid electric vehicle based on model predictive control and on-line mass estimation', *Energy Reports*, vol. 8, pp. 4964–4974, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.03.194.
- [26] G. Bruni, S. Cordiner, V. Mulone, V. Rocco, and F. Spagnolo, 'A study on the energy management in domestic micro-grids based on model predictive control strategies q', *Energy Convers. Manag.*, vol. 102, pp. 50–58, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.01.067.
- [27] G. Bruni, S. Cordiner, V. Mulone, V. Sinisi, and F. Spagnolo, 'Energy management in a domestic microgrid by means of model predictive controllers', *Energy*, vol. 108, pp. 119–131, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.08.004.
- [۲۸] حسین شایقی، و حمزه آریانپور، "طراحی مقاوم کنترل کننده فازی PID بلادرنگ مبتنی بر الگوریتم بهبودیافته تکامل تفاضلی برای کنترل فرکانس ریزشکه جزیره ای با در نظر گرفتن عوامل غیرخطی و عدم قطعیت ها،" *مهندسی برق (دانشکده فنی دانشگاه تبریز)*، vol. ۴۶، no. ۳ (پیاپی ۷۷)، ۱۳۹۵، [Online]. Available: pp. ۲۴۱–۲۵۶. <https://sid.ir/paper/۲۵۶۴۶۶/fa>
- [۲۹] ج. جنتی and د. نظریور، "مدیریت انرژی پارکینگ هوشمند خودروهای برقی در یک ریزشکه با در نظر گرفتن اثرات برنامه پاسخ گویی بار،" *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، vol. ۴۷، no. ۲، ۲۰۱۷، [Online]. Available: pp. ۴۵۵–۴۶۷، https://tjee.tabrizu.ac.ir/article_۵۵۸۰.html
- [30] A. A. Memon and K. Kauhaniemi, 'Real-Time Hardware-in-the-Loop Testing of IEC 61850 GOOSE-Based Logically Selective Adaptive Protection of AC Microgrid', *IEEE Access*, vol. 9, pp. 154612–154639, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3128370.
- [31] C. Bordons, F. Garcia-Torres, and M. A. Ridao, *Model Predictive Control of Microgrids*. 2020. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-24570-2>
- [32] S. Jahan, M. T. Islam, and S. Chowdhury, 'Investigation of Power Performance of a PEM Fuel Cell Using MATLAB Simulation', *Malaysian J. Appl. Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 83–94, 2020, doi: 10.37231/myjas.2020.5.1.230.
- [33] E. Crespi, G. Guandalini, G. N. Cantero, and S. Campanari, 'Dynamic Modeling of a PEM Fuel Cell Power Plant for Flexibility Optimization and Grid Support', *Energies*, vol. 15, no. 13, pp. 1–23, 2022, doi: 10.3390/en15134801.
- [34] M. Schwenzer, M. Ay, T. Bergs, and D. Abel, 'Review on model predictive control: an engineering perspective', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 117, no. 5–6, pp. 1327–1349, 2021, doi: 10.1007/s00170-021-07682-3.
- [35] X. Chen, W. Cao, Q. Zhang, S. Hu, and J. Zhang, 'Artificial Intelligence-Aided Model Predictive Control for a Grid-Tied Wind-Hydrogen-Fuel Cell System', *IEEE Access*, vol. 8, pp. 92418–92430, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2994577.
- [36] V. A. Freire, L. V. R. de Arruda, C. Bordons, and J. J. Marquez, 'Optimal Demand Response Management of a Residential
- [5] A. Arsalis, G. E. Georghiou, and P. Papanastasiou, 'Recent Research Progress in Hybrid Photovoltaic-Regenerative Hydrogen Fuel Cell Microgrid Systems', *Energies*, vol. 15, no. 10, 2022, doi: 10.3390/en15103512.
- [6] K. Kumar, M. Alam, and V. Dutta, 'Energy management strategy for integration of fuel cell-electrolyzer technologies in microgrid', *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 68, pp. 33738–33755, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.203.
- [7] V. Suresh, N. Pachauri, and T. Vigneysh, 'Decentralized control strategy for fuel cell/PV/BESS based microgrid using modified fractional order PI controller', *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 5, pp. 4417–4436, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.050.
- [8] A. A. Kamel, H. Rezk, N. Shehata, and J. Thomas, 'Energy management of a dc microgrid composed of photovoltaic/fuel cell/battery/supercapacitor systems', *Batteries*, vol. 5, no. 3, 2019, doi: 10.3390/BATTERIES5030063.
- [9] S. Vasantharaj, V. Indragandhi, V. Subramaniaswamy, Y. Teekaraman, R. Kuppusamy, and S. Nikolovski, 'Efficient control of dc microgrid with hybrid pv—fuel cell and energy storage systems', *Energies*, vol. 14, no. 11, 2021, doi: 10.3390/en14113234.
- [10] Y. Zhang and W. Wei, 'Model construction and energy management system of lithium battery, PV generator, hydrogen production unit and fuel cell in islanded AC microgrid', *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 33, pp. 16381–16397, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.155.
- [11] B. Benlahbib *et al.*, 'Experimental investigation of power management and control of a PV/wind/fuel cell/battery hybrid energy system microgrid', *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 53, pp. 29110–29122, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.07.251.
- [12] Q. Meng, C. Su, H. Niu, Z. Hou, and M. Ashourian, 'Optimal impacts of combined fuel-cell/CHP/battery and power microgrid with real-time energy management', *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 45, no. 3, pp. 6596–6619, 2023, doi: 10.1080/15567036.2019.1675812.
- [13] M. M. Samy and K. A. Alkhuzaii, 'Optimization and Sizing of an Island Microgrid Based on Photovoltaic/Fuel Cell (Pv/Fc) in Ksa', *Yanbu J. Eng. Sci.*, vol. 17, no. 1, 2019, doi: 10.53370/001c.23728.
- [14] S. N. Mtollo and A. K. Saha, 'A Review of the Optimization and Control Strategies for Fuel Cell Power Plants in a Microgrid Environment', *IEEE Access*, vol. 9, pp. 146900–146920, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3123181.
- [15] T. Zeng *et al.*, 'Fast identification of power change rate of PEM fuel cell based on data dimensionality reduction approach', *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 38, pp. 21101–21109, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.034.
- [16] T. A. Fagundes, G. H. F. Fuzato, P. G. B. Ferreira, M. Biczkowski, and R. Q. Machado, 'Fuzzy Controller for Energy Management and SoC Equalization in DC Microgrids Powered by Fuel Cell and Energy Storage Units', *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Ind. Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 90–100, 2021, doi: 10.1109/jestie.2021.3088419.
- [17] A. Aguilera Gonzalez, M. Bottarini, I. Vecchiu, L. Gautier, L. Ollivier, and L. Larre, 'Model Predictive Control for the Energy Management of A Hybrid PV/Battery/Fuel Cell Power Plant', *SEST 2019 - 2nd Int. Conf. Smart Energy Syst. Technol.*, 2019, doi: 10.1109/SEST.2019.8849051.
- [18] C. Ziogou, S. Voutetakis, M. C. Georgiadis, and S. Papadopoulou, 'Model predictive control (MPC) strategies for PEM fuel cell systems – A comparative experimental demonstration', *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 131, pp. 656–670, 2018, doi: 10.1016/j.cherd.2018.01.024.
- [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, pp. 1–26, 2021, doi: 10.3390/en14051296.
- [20] F. Alavi, N. Van De Wouw, and B. De Schutter, 'Power Scheduling of Fuel Cell Cars in an Islanded Mode Microgrid with Private Driving Patterns', *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 28, no. 4, pp. 1393–1403, 2020, doi: 10.1109/TCST.2019.2911491.

