Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 17-27

Vol. 12/ No. 4/ Winter 2024
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

A New Energy Management Strategy Based on Fuzzy Logic and Law for Hybrid Energy Storage System in DC Microgrid

Pouria Safari[1], Student, Hoda Ghoreishy[2], Assistant professor, Mahdi Shahparasti[3], Assistant Professor

[1] Department of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
Puria.safari@stu.nit.ac.ir
[2] Department of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
ghoreishy@nit.ac.ir
[3] School of Technology and Innovations, Electrical Engineering, University of Vaasa, Finland
Mahdi.shahparasti@uwasa.fi

Abstract:

Energy management between renewable energy sources and energy storage systems is challenging especially in different operating modes in stand-alone DC microgrid. In this paper, a new energy management system strategy based on law and fuzzy logic is proposed for a stand-alone DC microgrid with hybrid energy storage system (HESS) consisting of battery and supercapacitor (SC). The design of the proposed system is simple and does not require the mathematical model of the system. The main advantages of the proposed strategy are: high DC link voltage reference tracking in the presence of source and load power disturbances, keeping the battery and supercapacitor charge level within the permissible range, preventing battery and supercapacitor from overcharge/discharge and controlling the battery charging/discharging rate. Moreover, the proposed strategy increases battery life span while decreasing its current stress by using high charge/discharge cycles in SC and providing the majority of the output current through it. The proposed technique has been simulated in MATLAB and results show the priority of this method from the abovementioned points of view.

Keywords: Battery, Ultra capacitor, Hybrid energy storage system, Energy Management Strategy Based on Fuzzy Logic and Law, Photovoltaic

Submit date: 2023/05/27
Accepted date:2023/12/02

Corresponding author name: Hoda Ghoreishy
Corresponding author's Address: Babol Noshirvani University of Technology, Shariati Ave., Babol, Iran.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۲۷-۱۷

Vol. 12 / No. 4/ Winter 2024
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

راهبرد جدید مدیریت انرژی مبتنی بر قانون و منطق فازی برای سیستم ذخیره‌ساز ترکیبی در ریزشبکه DC

نوع مطالعه: پژوهشی

پوریا صفری[۱] ، دانشجو، هدی قریشی[۲]، استادیار، مهدی شاه‌پرستی[۳]، استادیار
۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی- بابل- ایران
Puria.safari@stu.nit.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی نوشیروانی- بابل- ایران
ghoreishy@nit.ac.ir
۳- دانشکده فناوری و نوآوری، مهندسی برق- دانشگاه واسا فنلاند -واسا- فنلاند
Mahdi.shahparasti@uwasa.fi

چکیده: مدیریت انرژی میان منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها تحت حالت‌های عملیاتی مختلف در ریزشبکه DC مستقل از شبکه، یک کار چالش برانگیز است. دراین مقاله یک روش جدید سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر قانون و منطق فازی برای یک ریزشبکه DC مستقل از شبکه با سیستم ذخیره‌ساز انرژی ترکیبی (HESS) متشکل از باتری و ابرخازن (SC) پیشنهاد شده است. طراحی سیستم پیشنهادی ساده بوده و نیازی به دانش مدل ریاضی سیستم ندارد. مزایای اصلی سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر قانون و منطق فازی عبارتند از: سرعت بالا در بازیابی ولتاژ لینکDC در حضور اختلالات توان تولیدی و توان بار مصرفی، حفظ سطح شارژ باتری و ابرخازن در محدوده مجاز، جلوگیری از شارژ و تخلیه بیش ازحد باتری و ابرخازن و کنترل نرخ شارژ وتخلیه باتری. همچنین راهبرد مذکور، با استفاده از ویژگی تعداد بالای چرخه‌های شارژ و تخلیه ابرخازن و تامین قسمت عمده جریان خروجی از طریق ابرخازن، باعث افزایش طول عمر باتری و کاهش تنش جریان در باتری نیز می‌شود. درنهایت، راهبرد پیشنهادی درنرم افزار متلب شبیه سازی شده و نتایج بیانگر برتری راهبرد پیشنهادی نسبت به روشهای متعارف از نقطه نظر مزایای ذکرشده می‌باشد.

واژگان کلیدی: باتری، ابرخازن، سیستم ذخیره انرژی ترکیبی، سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر قانون و منطق فازی، فوتوولتائیک

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۲/۰۳/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۲/۰۹/۱۱

نام نویسنده‌ی مسئول : هدی قریشی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : بابل، خیابان شریعتی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، نگرانی‌های فزاینده درمورد اثرات زیست محیطی ناشی از اتمام سوخت‌های فسیلی، منجر به گرایش به سمت منابع انرژی تجدیدپذیر (RES[1]) برای برآوردن تقاضای جهانی انرژی شده‌است. سازگاری با محیط زیست، مقیاس پذیری و سایر ویژگی‌های گسترده منابع انرژی تجدیدپذیر باعث استقرار آن در بخش‌های تجاری، صنعتی و مسکونی شده‌است. این امر با پیشرفت سریع در تجهیزات الکترونیک قدرت (E. Nivolianiti., et al., 2023)، به کنترل کامل منابع انرژی تجدیدپذیر در شرایط طبیعی کمک می‌کند (M. Zolfaghari a., et al., 2024). ازطرفی منابع انرژی تجدیدپذیر پایدار نیستند و دارای محدودیت‌هایی نظیر ناپایداری ولتاژ، نوسانات فرکانس و کیفیت پایین توان هستند. ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر با سیستم ذخیره انرژی (ESS[2]) یک راه حل امیدوارکننده برای غلبه براین محدودیت‌ها و تسهیل عملکرد پایدار ریزشبکه است (Hartani Mohamed Amine., et al., 2023). این ترکیب در ریزشبکه‌ها می‌تواند از نوسانات توان جلوگیری کرده، ناپایداری ولتاژ را برطرف کند و فرکانس شبکه را نیز تنظیم نماید (Q. Wu., et al., 2022 & Y. Qiao., et al. 2023). ازطرفی، هر سیستم ذخیره انرژی محدودیت‌های خاص خود را دارا می‌باشد که دامنه کاربرد آن را محدود می‌کند. زیرا یک سیستم ذخیره انرژی ایده‌آل دارای چگالی انرژی بالا و چگالی توان بالا می‌باشد. با این حال، سیستم‌های ذخیره انرژی از نظر ظرفیت توان یا ظرفیت انرژی محدود هستند. بنابراین، ایجاد یک سیستم با ترکیبی از دو یا چند سیستم ذخیره انرژی برای تشکیل در سیستم ذخیره انرژی ترکیبی (HESS[3]) ضروری است (Tobajas J; et al., 2022). به عنوان مثال، باتری‌ها دارای ویژگی‌هایی نظیر؛ چگالی توان پایین، چگالی انرژی بالا، چرخه عمر کمتر و هزینه کمتر هستند. از سوی دیگر، ابرخازن‌ها دارای ویژگی‌هایی نظیر؛ چگالی انرژی کمتر، چگالی توان بالاتر، شارژ/تخلیه سریع و عمر طولانی‌تر هستند (D. Vijay M., et al., 2020 & Xu, Q., et al., 2021 & Wang, Y., et al., 2020). بنابراین، ابرخازن و باتری می‌توانند از خواص مکمل یکدیگر استفاده کنند. این ترکیب به دلیل دردسترس بودن و هزینه اولیه پایین محبوبیت زیادی پیدا کرده‌است. کنترل و مدیریت انرژی بین منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز انرژی تحت حالت‌های عملیاتی مختلف در ریزشبکه DC مستقل از شبکه یک کار چالش برانگیز است. انتخاب یک روش کنترلی مناسب برای سیستم ذخیره انرژی ترکیبی به مجموعه ای از پارامترها نظیر افزایش طول عمر ذخیره‌سازها (باتری و ابرخازن)، کاهش نوسانات توان، کیفیت توان، زمان پاسخگویی کنترل‌کننده و هزینه کنترل‌کننده و ... بستگی دارد. لذا پیاده‌سازی یک تکنیک کنترلی مناسب برای انجام عملکرد ثابت، موثر و ایمن سیستم ذخیره انرژی ترکیبی ضروری است (Arunkumar,C. R.,et al., 2022). در (Manandhar, U., et al., 2018) یک راهبرد کنترلی تناسبی-انتگرالی (PI) مبتنی برفیلتر پایین‌گذر برای سیستم ذخیره انرژی ترکیبی در یک ریزشبکه DC پیشنهاد شده‌است. برای کاهش تنش جریان در باتری، توان جبران نشده سیستم توسط باتری برای افزایش عملکرد کلی سیستم ذخیره انرژی ترکیبی به ابرخازن منتقل می‌شود. در مراجع (Kollimalla, S., et al., 2014 & Kollimalla, S., et al., 2017) یک راهبرد کنترلی PI مبتنی برفیلتر پایین‌گذر و کنترل‌کننده محدودیت نرخ (rate-limiter) برای سیستم ذخیره انرژی ترکیبی ارائه شده‌است. در این روش نرخ سرعت شارژ و تخلیه باتری توسط کنترل‌کننده محدودیت نرخ کنترل می‌شود. همچنین در بسیاری از روش‌های کنترلی PI ذکر شده برای سیستم ذخیره انرژی ترکیبی مانند مراجع فوق و همچنین مراجع (Tummuru, N. R., et al., 2015 & Korada, N., et al., 2017) سطح شارژ (SoC[4]) باتری و ابرخازن در محدوده قابل قبولی در نظر گرفته شده‌است. درمقابل، شارژ و تخلیه بیش از حد باتری و ابرخازن در نظر گرفته نشده‌است که باعث کاهش طول عمر باتری و ابرخازن، افزایش تنش جریان در باتری و در نتیجه افزایش هزینه‌های نگهداری می‌شود. ازطرفی زمان پایداری ولتاژ لینک DC و پاسخ دینامیکی حالت گذرا نیز رضایت بخش نمی‌باشند. در مراجع (Arunkumar,C. R., et al., 2023 & Wang, B., et al., 2019) یک روش کنترلی مبتنی بر deadbeat پیشنهاد شده‌است. این روش کنترلی، نسبت چرخه وظیفه را برای به حداقل رساندن تنظیم خطا در یک چرخه کنترل ایجاد می‌کند. این روش اگرچه دارای سرعت بازیابی ولتاژ لینک DC خوبی نسبت به کنترل‌کننده PI برخوردار است اما همچنان حالت‌های مختلف سیستم در آن در نظر گرفته نشده‌است.

راهبرد مدیریت انرژی بهینه برای مدیریت شارش توان بین باتری و ابرخازن ضروری است. سیستم ذخیره انرژی ترکیبی برای عملکردی ایمن در برابر شارژ و تخلیه بیش از حد باید محافظت شود. در مراجع (Chia, Y.Y., et al., 2015 & Tummuru, N. R., et al., 2015)، یک کنترل‌کننده مبتنی بر قانون (RBC[5]) و یک کنترل‌کننده مبتنی بر فیلتر به ترتیب برای کنترل توان تولیدی تجدیدپذیر با سیستم ذخیره انرژی ترکیبی پیاده سازی شده‌است. علیرغم اینکه کنترل‌کننده مبتنی بر قانون و کنترل‌کننده مبتنی بر فیلتر برای بهره برداری ساده هستند، اما برای اهدافی همچون تنظیم ولتاژ لینک DC و بهبود طول عمر باتری به خوبی سازگار نیستند.

یکی دیگر از راهبردهای کنترلی که در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب نموده راهبرد کنترلی مدل پیش بین(MPC[6]) می‌باشد که ایده اصلی آن استفاده از مدل دینامیکی سیستم برای پیش‌بینی

[1] Renewable Energy Resource
[2] Energy Storage System
[3] Hybrid Energy Storage System
[4] State of Charge
[5] Rule base control
[6] Model Predictive Control

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

خروجی‌های سیستم و عملکرد آن است (Hu, J., et al., 2021 & Karamanakos, P., et al., 2020). با این حال، این روش‌ها پیچیدگی محاسباتی قابل توجهی در مقایسه با رویکردهای مبتنی بر قانون و منطق فازی دارند. در (Chen, S., et al., 2021) یک روش کنترلی مبتنی بر مدل پیش‌بین برای کنترل مبدل‌های DC-DC دو طرفه سه‌سطحی برای اتصال شبکه به سیستم ذخیره انرژی ترکیبی در یک ریزشبکه DC پیشنهاد شده‌است. این روش کنترلی برای تخصیص توان فرکانس بالا و پایین نیازی به فیلتر ندارد زیرا کنترل ولتاژ با یک محدود کننده شیب می‌تواند از نرخ شارژ و تخلیه بالای باتری جلوگیری کند. با این حال، اشکالات روش پیشنهادی وابستگی به مدل گسسته است. همچنین پیچیدگی محاسباتی و زمان اجرای طولانی دارد. در (Ni, F., et al., 2021) یک کنترل مدل پیش‌بین برای بهبود پاسخ حالت گذرای ولتاژ و روش بهینه‌سازی تخصیص توان برای سیستم ذخیره انرژی ترکیبی پیشنهاد شده‌است. با این حال، راهبرد پیشنهادی ممکن است به دلیل پیچیدگی محاسباتی بالا، به طور ذاتی منجر به مشکلات بهینه‌سازی غیرقابل حل شود.

در (Jafarian Abianeh, Ali., et al., 2019) یک الگوریتم تقسیم جریان مبتنی بر کنترل مد لغزشی (SMC[1]) برای سیستم ذخیره انرژی ترکیبی پیشنهاد شده‌است. طرح پیشنهادی امکان شارژ بدون وقفه با حداکثر دینامیک موجود را بدون بدتر شدن تنظیم ولتاژ لینک DC فراهم می‌کند. با این حال، اثر لغزش در سیستم‌های واقعی با نقص‌هایی مانند تاخیر ارتباطی، هیسترزیس و پاسخ دینامیکی کند مشاهده می‌شود.

در (Yin, H., et al., 2016) سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر منطق فازی تطبیقی برای سیستم ذخیره انرژی ترکیبی در کاربرد ماشین‌های الکتریکی مورد بحث قرار گرفته‌است. طرح کنترل پیشنهادی از رویکرد مبتنی بر چند عامل همانند راندمان سیستم، تغییرات جریان باتری و اختلاف سطح شارژ ابرخازن به عنوان معیار ارزیابی سیستم مدیریت انرژی استفاده می‌نماید. طرح کنترلی دارای طراحی پیچیده و به منابع محاسباتی زیادی نیاز دارد و خطای قابل‌توجهی بین نتایج شبیه‌سازی شده و نتایج تجربی وجود دارد، زیرا به تغییر پارامترهای سیستم حساس است.

باتوجه به مراجع بررسی شده چالش هایی نظیر: سرعت بازیابی ولتاژ لینک DC، کنترل نرخ شارژ و تخلیه ذخیره‌سازها و قرار نگرفتن سطح شارژ باتری و ابرخازن در محدوده مجاز وجود دارد. در این مقاله یک راهبرد مدیریت انرژی ساده و کم هزینه مبتنی بر قانون و منطق فازی برای سیستم ذخیره انرژی ترکیبی برای رفع این چالش‌ها پیشنهاد شده‌است. از مزایای این روش نسبت به روش‌های معمول می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- معرفی ضریب اشتراک جدید برای تقسیم توان موثر بین ابرخازن و باتری که نرخ شارژ و تخلیه ذخیره‌سازها را کنترل می‌کند.
- با استفاده از ویژگی تعداد سیکل بالای شارژ/تخلیه ابرخازن سهم بیشتری از توان، توسط ابرخازن برآورده شده‌است که منجر به سرعت بالا در بازیابی ولتاژ لینک DC و کاهش فراجهش ولتاژ لینک DC شده‌است.
- سطح بالای استفاده از ابرخازن باعث کاهش سطح تنش جریان در باتری و بهبود طول عمر باتری شده‌است.
- قرار گرفتن سطح شارژ باتری و ابرخازن درمحدوده ایمن از پیش تعیین شده و کاهش آسیب ذخیره‌سازها در شارژ و تخلیه بیش از حد.

در ادامه این مقاله ساختار ریزشبکه DC در بخش دوم توضیح داده شده‌است. در بخش ۳ ساختار کنترلی و سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر قانون و منطق فازی پیشنهادی مورد بحث قرار گرفته‌است. نتایج شبیه سازی و مقایسه بین روش‌های موجود در بخش۴ ارائه شده و پس از آن به نتیجه‌گیری در بخش ۵ پرداخته شده‌است.

۲- ساختار ریزشبکه DC مورد مطالعه

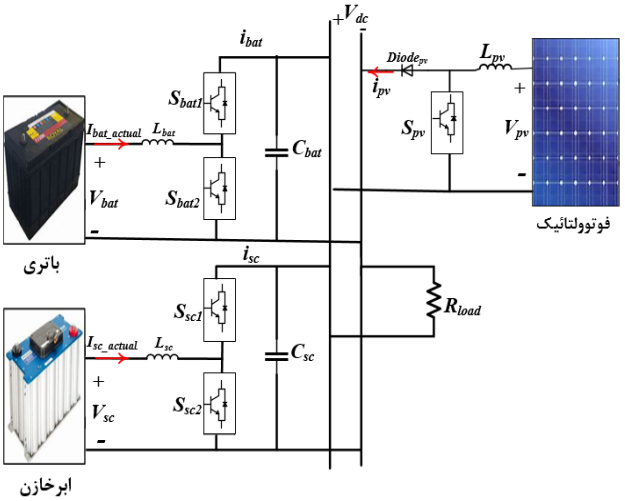
ساختار ریزشبکه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده‌است. منبع اصلی تولید انرژی الکتریکی در این شبکه یک سیستم فتوولتائیک می‌باشد. توان تولید شده توسط سیستم فتوولتائیک با استفاده از یک مبدل افزاینده یک جهته به لینک DC منتقل می‌شود. سیستم ذخیره انرژی ترکیبی متشکل از باتری و ابرخازن با استفاده از دو مبدل-DC DC دو جهته به لینک DC متصل شده‌اند. سیستم ذخیره انرژی ترکیبی برای حفظ ولتاژ لینک DC(V_{dc}) در مقدار مرجع در صورت عدم تطابق بین تولید و تقاضا استفاده می‌شود. همچنین در تامین توان متوسط برای طولانی مدت و نوسانات توان گذرا برای کوتاه مدت موثر است. در شکل(۱)، V_{pv}، V_{bat} وV_{sc} به ترتیب ولتاژهای پایانه فتوولتائیک، باتری و ابرخازن می‌باشند. L_{bat}، L_{pv}، L_{sc} پارامترهای فیلتر سلفی مبدل DC-DC برای باتری، فتوولتائیک و ابرخازن هستند. C_{pv}، C_{bat}، C_{sc} به ترتیب فیلتر خازنی مبدل فتوولتائیک، باتری و ابرخازن هستند. بار DC با مقاومت R_{load} نشان داده شده‌است. S_{sc1}، S_{sc2}، S_{bat1}، S_{bat2}، S_{pv} نمایشی از کلیدهای کنترلی هستند که برای مبدل‌های DC-DC استفاده می‌شوند. i_{bat}، i_{load}، i_{pv}، i_{sc} به ترتیب نشان دهنده جریان باتری، جریان بار، جریان فتوولتائیک و جریان ابرخازن می‌باشند.

۳- طرح کنترلی پیشنهادی

بلوک دیاگرام راهبرد کنترلی پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده‌است. مطابق شکل، ساختار کنترلی شامل سیستم مدیریت انرژی و کنترل‌کننده PI است که سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی، ترکیبی از کنترل‌کننده مبتنی بر قانون و منطق فازی می‌باشد.

[1] Sliding Mode Control

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]



شکل (۱): ساختار ریزشبکه DC

۳-۱ ساختار کنترلی

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده‌است، V_{dc} با ولتاژ مرجع (V_{ref}) مقایسه می‌شود، سپس مقدار خطا به کنترل‌کننده PI برای تولید جریان مرجع (I_{total}) که باید توسط ذخیره‌سازها تامین شود، اختصاص می‌یابد. جریان مرجع از معادله (۱) بدست می‌آید.

$$i_{total}(t) = K_{pDC}\,(V_{ref} - V_{DC}) + K_{iDC}\int(V_{ref} - V_{DC})\,dt \quad (۱)$$

K_{pDC} و K_{iDC} به ترتیب ضرایب تناسبی و انتگرالی برای کنترل‌کننده PI جهت تولید جریان مرجعی هستند که باید توسط ذخیره‌سازها تامین شوند. باتوجه به سطح شارژ ابرخازن و باتری، سیستم مدیریت انرژی، جریان مرجع مربوط به هر عنصر از سیستم ذخیره‌ساز را برای بازیابی ولتاژ لینک DC تولید می‌کند.

نحوه تولید جریان مرجع توسط سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر قانون و منطق فازی در شکل (۳) نشان داده شده‌است. هدف اصلی استفاده از سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر قانون و منطق فازی به منظور مدیریت انرژی سیستم، حفظ سطح شارژ باتری و ابرخازن در محدوده مجاز و جلوگیری از شارژ و تخلیه بیش از حد عناصر ذخیره‌ساز است.

۳-۲ کنترل‌کننده منطق فازی

همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده‌است، باتوجه به سطح شارژ ابرخازن و جریان مورد نیاز برای بازیابی ولتاژ لینکDC، سهم هرکدام از ذخیره‌سازها توسط کنترل‌کننده منطق فازی (FLC) تعیین می‌شود تا هرکدام از ذخیره‌سازها چه مقدار جریان مرجع را تولید یا ذخیره کنند. این جریان‌ها ازمعادلات (۲) و (۳) بدست می‌آیند.

$$I_{sc1} = K_{sc}\,I_{total} \quad (۲)$$

$$I_{bat1} = I_{total} - K_{sc}\,I_{total} = (1 - K_{sc})\,I_{total} \quad (۳)$$

در معادلات بالا K_{sc} ضریب اشتراک ابرخازن برای اشتراک جریان مرجع بین باتری و ابرخازن است. با توجه به دینامیک کند، باتری نمی‌تواند به سرعت جریان مرجع خود را دنبال کند، بنابراین زمان بازیابی ولتاژ لینک DC و در نتیجه تنش روی باتری افزایش می‌یابد.

برای حل این مشکل، جریان جبران نشده باتری به ابرخازن منتقل می‌شود. توان جبران نشده باتری از معادله (۴) به دست می‌آید. این اختلاف توان توسط ابرخازن جبران می‌شود، بنابراین مقدار جریانی که باید به جریان مرجع ابرخازن اضافه شود تا دینامیک کند باتری را جبران کند از معادله (۵) به دست می‌آید.

$$P_{bat_uncomp} = (I_{bat_ref} - I_{bat_actual}) \times V_{bat} \quad (۴)$$

$$I_{bat_uncomp} = (I_{bat_ref} - I_{bat_actual}) \times V_{bat}/V_{sc} \quad (۵)$$

همچنین جریان مرجع ابرخازن و باتری به ترتیب از معادلات (۶) و (۷) بدست می‌آیند.

$$I_{sc_ref1} = K_{sc}\,I_{total} - I_{bat_ref1} + I_{bat_uncomp} \quad (۶)$$

$$I_{bat_ref1} = f_{LPF}\,(I_{bat1}) \quad (۷)$$

باتری به تقاضای توان ثابت پاسخ می‌دهد و در برابر تغییرات مکرر توان محافظت می‌شود. علاوه بر این، ابرخازن باید از اشباع انرژی یا تخلیه کامل محافظت شود.

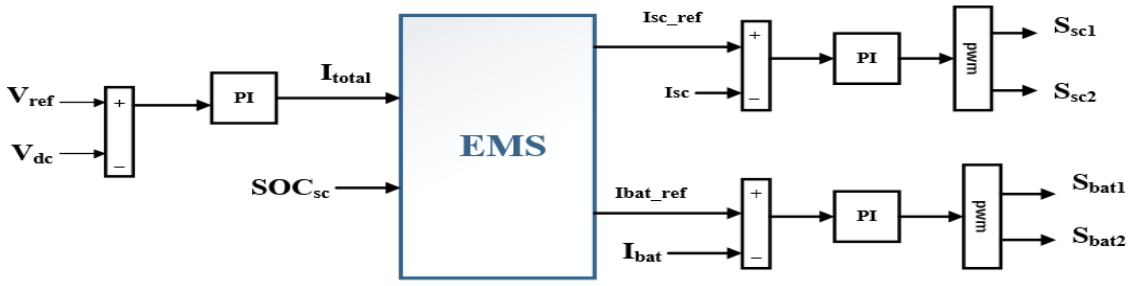
۳-۲-۱ طراحی کنترل‌کننده منطق فازی

تعیین توابع عضویت برای فازی‌سازی متغیر ورودی و خروجی مرحله مهم الگوریتم فازی است. توابع عضویت برای منطق فازی شامل دو متغیر ورودی "I_{total} , SoC_{sc}" و یک متغیر خروجی K_{sc} تعریف شده‌است. توابع عضویت منطق فازی در شکل (۴) نشان داده شده‌است. توابع عضویت ورودی به عنوان انتقال بین حالت های عملیاتی مختلف استفاده می‌شوند.

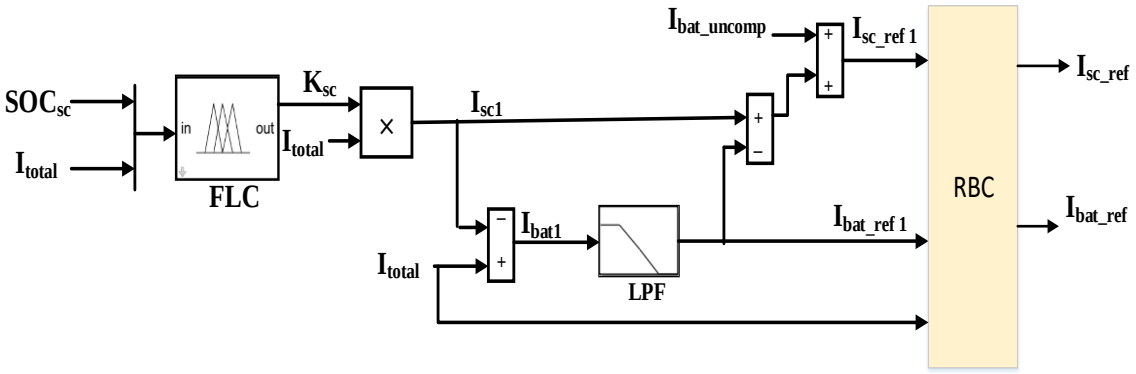
توابع عضویت SoC_{sc} ارائه شده در شکل(۴-الف) پنج برای مجموعه فازی در نظر گرفته شده‌است: کم (L[1])، متوسط‌کم (LM[2])، متوسط (M[3])، متوسط‌زیاد (MH[4])، زیاد (H[5]). محدوده‌های "L" و "H" در دسترس بودن فضای ذخیره‌سازی را تضمین می‌کنند و از اشباع کم و زیاد ذخیره‌سازها اجتناب می‌شود. محدوده‌های "LM,M,MH" برای تامین یا جذب تفاوت بین توان فتوولتائیک تولید شده و توان بار مصرفی در نظر گرفته شده‌است.

[1] LOW
[2] LOW MEDIOM
[3] MEDIOM
[4] MEDIOM HIGH
[5] HIGH

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]



شکل(۲): راهبرد کنترلی پیشنهادی



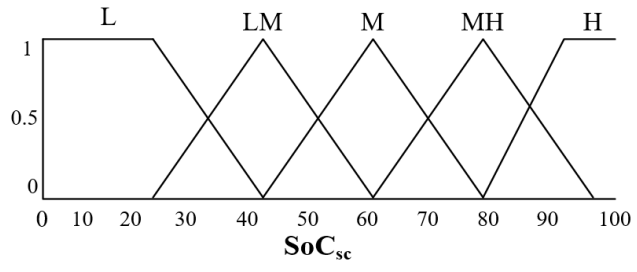
شکل(۳): سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر منطق فازی و مبتنی برقانون

برای تابع عضویت جریان مرجع(I_{total}) در شکل(۴-ب) پنج مجموعه فازی در نظر گرفته شده‌است: منفی بزرگ(NH^1) منفی(N^2)، صفر(Z^3)، مثبت(P^4)، مثبت بزرگ (PH^5). محدوده "N"و "NH" برای هنگامیکه تولید بیشتر از بار مصرفی است و ذخیره‌سازها در حالت شارژ قرار دارند در نظر گرفته شده‌است. محدوده"P"و "PH" برای زمانی که توان تولیدی کمتر از توان بار مصرفی است و ذخیره‌سازها در حالت تخلیه قرار دارند در نظر گرفته شده‌است. و در محدوده Z، سیستم در حال تعادل است. برای تابع عضویت ضریب اشتراک ابرخازن "K_{sc}" که در شکل(۴-پ) ارائه شده‌است، پنج مجموعه فازی در نظر گرفته شده‌است: کم(L)، متوسط کم(LM)، متوسط(M)، متوسط زیاد(MH)، زیاد(H).

قوانین منطق فازی در جدول(۱) نشان داده شده‌است. منطق فازی باید جریان مرجع را بین عناصر سیستم ذخیره‌ساز با توجه به سطح شارژ آنها به اشتراک بگذارد. بطور مثال، هنگامیکه بار مصرفی افزایش می‌یابد، و سطح شارژ ابرخازن به سمت تخلیه بیش از حد قرار دارد به دلیل چگالی انرژی پایین ابرخازن و برای جلوگیری از تخلیه سریع آن، منطق فازی سهم کمتری از I_{total} را به ابرخازن برای بازیابی ولتاژ لینک DC اختصاص می‌دهد. همانطور که در جدول (۱) نشان داده شده‌است، اگر SoC_{sc} =L و I_{total}=PH باشد آنگاه K_{sc}= L.

جدول (۱) قوانین منطق فازی

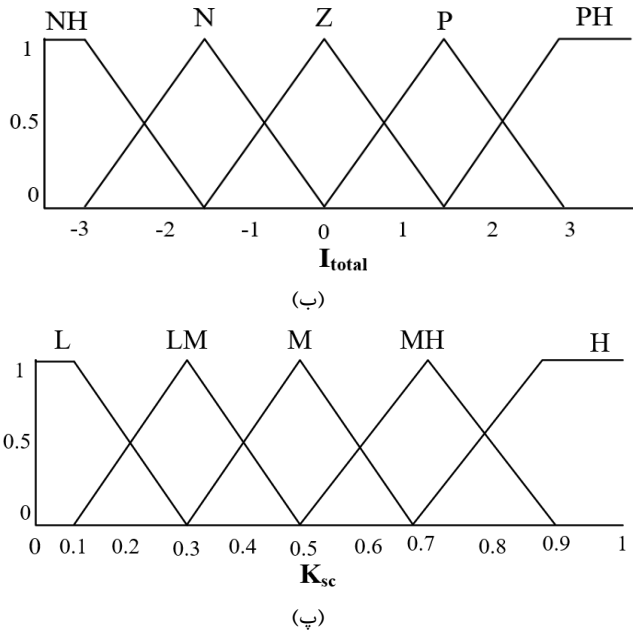
		Itotal				
		NH	N	Z	P	PH
SOCsc	L	H	H	M	L	L
	LM	MH	H	M	LM	L
	M	LM	MH	M	MH	LM
	MH	LM	Lm	M	H	MH
	H	L	L	M	H	H
outputs		Ksc				



(الف)

[1] NEGETIVE HIGH
[2] HIGH
[3] ZERO
[4] HIGH
[5] POSITIVE HIGH

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]



شکل(۴): توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی منطق فازی الف) تابع عضویت ورودی SoC_{sc} (ب) تابع عضویت ورودی I_{total} (پ) تابع عضویت خروجی K_{sc}

۳-۳ کنترل‌کننده مبتنی برقانون

همانطور که در فلوچارت شکل (۵) نشان داده شده‌است. سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر قانون براساس سطح شارژ ابرخازن دارای سه حالت کاری متفاوت است، حالت کاری ۱: سطح شارژ ابرخازن در محدوده مجاز(٪۹۵>SoCsc>٪۲۵) باشد. حالت کاری ۲: سطح شارژ
ابرخازن کمتر از حد مجاز (٪۲۵>SoCsc) باشد. حالت کاری۳: سطح شارژ ابرخازن بیش از حد مجاز (٪۹۵<SoCsc) باشد.

۳-۳-۱ حالت کاری ۱

هنگامیکه(٪۹۵>SoCsc>٪۲۵) قرار داشته باشد این حالت کاری به عنوان حالت اصلی سیستم در نظر گرفته می‌شود وتا زمانی که سطح شارژ ابرخازن در محدوده ایمن از پیش تعریف شده باشد، باتوجه به سطح شارژ ابرخازن و جریان مورد نیاز برای بازیابی ولتاژ لینک DC، سهم هرکدام از ذخیره‌سازها ازجریان مرجع از معادلات (۸) و (۹) بدست می‌آید.

$$I_{sc_ref} = I_{sc_ref1} \quad (۸)$$

$$I_{bat_ref} = I_{bat_ref1} \quad (۹)$$

۳-۳-۲ حالت کاری۲

هنگامیکه سطح شارژ ابرخازن کمتر از ٪۲۵ باشد برای جلوگیری از تخلیه بیش از حد ابرخازن حالت کاری ۲ فعال می‌شود. در این حالت ابرخازن به توان مورد نیاز سیستم پاسخ نمی‌دهد و تا هنگامی‌که سطح شارژ ابرخازن در محدوده کاری ایمن (٪۹۵>SoCsc>٪۲۵) قرار بگیرد برای تبادل انرژی با باتری کنترل می‌شود. در این حالت باتری ابرخازن را تا زمانی شارژ می‌کند که سطح شارژ ابرخازن به ۳۰ درصد بازگردد و حالت کاری ۱ دوباره فعال شود و جریان‌های مرجع باتری و ابرخازن نیز از معادلات زیر بدست می‌آید.

$$I_{sc_charge} = I_{bat_nom} - I_{total} \quad (۱۰)$$

$$I_{bat_ref} = I_{bat_nom} \quad (۱۱)$$

$$I_{sc_ref} = I_{sc_charge} \quad (۱۲)$$

همچنین در معادله (۱۲) I_{bat_nom} جریان نامی نرخ شارژ باتری است.

۳-۳-۳ حالت کاری۳

هنگامیکه سطح شارژ ابرخازن بیش از ٪۹۵ باشد باید از شارژ بیش از حد ابرخازن اجتناب شود. در این حالت ابرخازن تخلیه می‌شود و باتری را شارژ می‌کند تا زمانیکه سطح شارژ ابرخازن به ۹۰ درصد بازگردد، و حالت کاری۱دوباره فعال شود. جریان های مرجع باتری و ابرخازن از معادلات زیر به دست می‌آیند.

$$I_{sc_discharge} = I_{bat_nom} - I_{total} \quad (۱۳)$$

$$I_{bat_ref} = I_{sc_discharge} - I_{total} \quad (۱۴)$$

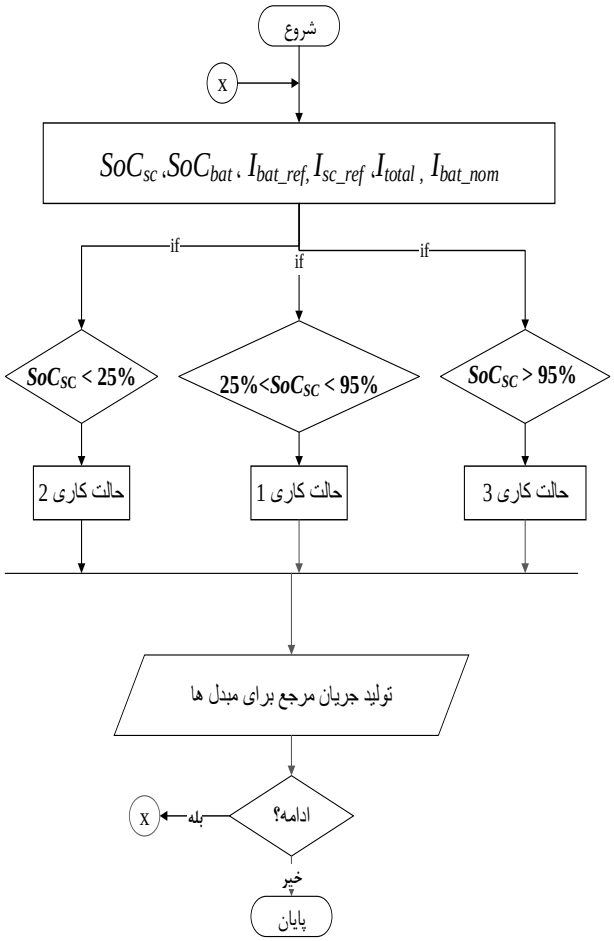
$$I_{sc_ref} = I_{sc_discharge} \quad (۱۵)$$

سپس جریان مرجع باتری و ابرخازن تولید شده توسط سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر قانون به ترتیب با جریان واقعی باتری(I_{bat_actual}) و جریان واقعی ابرخازن (I_{sc_actual}) مقایسه می‌شود ,ومقدار خطا به کنترل‌کننده PI برای تولید سیکل وظیفه جهت تنظیم جریان داده می‌شود.

۴- نتایج شبیه سازی

به منظور ارزیابی سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر قانون و منطق فازی پیشنهادی، ریزشبکه مورد مطالعه با سیستم ذخیره انرژی ترکیبی در دو سناریوی کوتاه مدت و بلند مدت در محیط متلب شبیه سازی شده‌است. در سناریوی کوتاه مدت ۴ مرحله آزمایش شامل کاهش و افزایش بار در توان تولیدی ثابت و کاهش و افزایش توان تولیدی در بار ثابت انجام شده‌است. در سناریوی بلند مدت منحنی تولید روزانه فتوولتائیک و منحنی بار روزانه در طول ۱۲ ثانیه در نظر گرفته شده‌است. همچنین برای اعتبارسنجی عملکرد مدیریت انرژی مبتنی بر قانون و منطق فازی پیشنهادی، مقایسه‌ای با سایر روش‌های کنترلی انجام گردیده است. در طول شبیه‌سازی مقدار اولیه سطح شارژ باتری و ابرخازن به ترتیب ۳۰ و ۷۰ در نظر گرفته شده‌است. مقادیر نامی پارامترهای سیستم در جدول (۲) ارائه شده‌است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]



شکل(۵): فلوچارت سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر قانون

۴-۱- سناریوی ۱: افزایش بار مصرفی در توان ثابت تولیدی توسط فتوولتائیک

یکی از ویژگی‌های مهم راهبردهای کنترلی، بازیابی سریع ولتاژ لینک DC در تغییرات ناگهانی بار است. نتایج افزایش تغییرات بار در روش پیشنهادی برای سیستم ذخیره انرژی ترکیبی در ریزشبکهDC با توان تولیدی فتوولتائیک ثابت در شکل (۶) نشان داده شده‌است.در شکل(۶) مقادیراولیه جریان‌های خروجی مبدل، باتری، ابرخازن و فتوولتائیک و همچنین جریان بار و ولتاژ لینک DC به ترتیب عبارتند از: i_{pv}=1.3A، i_{bat}=-0.5A، i_{sc}=0A، i_{load}=0.8A و V_{dc}=48V. سیستم در حالت بیشبود توان است که این بیشبود توان توسط باتری جذب می‌شود. در لحظه t =1s با کاهش سنگین مقاومت از ۶۰ اهم به ۱۹/۲ اهم، جریان بار از ۰/۸ آمپر به ۲/۵ آمپر افزایش یافته‌است. ولتاژ لینک DC به دلیل افزایش بار کاهش می‌یابد. برای حفظ تعادل توان در لینک DC، با توجه به ویژگی‌های ذخیره‌سازها توان گذرا توسط ابرخازن و توان متوسط توسط باتری تامین می‌شود. بنابراین، درشکل (۶) می‌توان مشاهده کرد که ابرخازن به تقاضای توان گذرا با جریان پیک ۲/۷ آمپر پاسخ می‌دهد. جریان باتری به تدریج از ۰/۵- آمپر به ۱/۲ آمپر افزایش می‌یابد، یعنی از حالت شارژ برای جذب بیشبود توان فتوولتائیک به حالت تخلیه برای تامین کمبود توان متوسط تغییر می‌کند. با اجرای راهبرد کنترلی پیشنهادی می‌توان مشاهده کرد که یک فروجهش ۱/۲ ولت (۲/۵ درصدی ولتاژ مرجع) در لینک DC وجود دارد. سپس ولتاژ لینک DC در مدت زمان ۴ میلی‌ثانیه به ۴۸ ولت باز می‌گردد.

جدول(۲): مقدار نامی پارامترهای سیستم

مشخصات آرایه فتوولتائیک	مقدار
ولتاژ مداربار	۳۰.۲ولت
جریان اتصال کوتاه	۵ آمپر
ولتاژ نقطه حداکثرتوان	۲۹ولت
جریان نقطه حداکثر توان	۴.۸ آمپر
حداکثر توان	۱۴۰وات
مشخصات ابرخازن	**مقدار**
نوع ابرخازن	Maxwell BM0D0058 E015 B01
ولتاژ پایانه ابرخازن	۱۶ولت
ظرفیت ابرخازن برحسب فاراد (F)	۵۸ فاراد
تعداد سری - موازی	۲عدد سری
مشخصات باتری	**مقدار**
نوع باتری	Lead–Acid
ظرفیت برحسب آمپرساعت	۱۴آمپرساعت
ولتاژ پایانه باتری	۱۲ولت
تعداد سری - موازی	۲عدد سری
پارامترهای مبدل های DC-DC	Lpv = 10 mH, Cpv = 440 µF Lbat = 1.6 mH, Cbat = 440 µF Lsc = 2 mH, Csc = 440 µF
ولتاژ لینک DC (V_{dc})	۴۸ولت
مقاومت نامی بار(R_{load})	۶۰ اهم
توان نامی بار(P_{load})	۳۸.۴وات

۴-۲- سناریوی ۲: کاهش بار مصرفی در توان ثابت تولیدی توسط فتوولتائیک

شکل(۷) نتایج تغییرات کاهش بار را درتوان تولیدی فتوولتائیک ثابت نشان می‌دهد. در شکل(۷) مقادیراولیه جریان های خروجی مبدل‌های باتری، ابرخازن، فتوولتائیک و همچنین جریان بار و ولتاژ لینک DC برابر است با: V_{dc}=48V، i_{pv}=1.3A، i_{bat}=0.3A، i_{sc}=0A و i_{load}=1.6A. سیستم در حالت کمبود توان است که این کمبود توان توسط باتری در حال جبران است. در لحظه t =1s با افزایش ناگهانی مقاومت بار از ۱۹/۲ اهم به ۶۰ اهم، جریان بار از ۲/۵ آمپر به ۰/۸ آمپر کاهش می‌یابد. کنترل‌کننده سیستم ذخیره انرژی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

ترکیبی باید تعادل کلی توان را حفظ کند و ولتاژ لینک DC را به مقدار مرجع خود بازگرداند. از شکل(۷) می‌توان مشاهده کرد که ابرخازن به تقاضای توان گذرا با جریان پیک ۲- آمپر پاسخ می‌دهد. جریان باتری به تدریج از ۱/۲ آمپر به ۰/۵- آمپر کاهش می‌یابد، یعنی از حالت تخلیه برای تامین کمبود توان فتوولتائیک به حالت شارژ برای جذب بیشبود توان متوسط تغییر می‌کند. همچنین ولتاژ لینک DC با افزایش ۰/۸ ولت (۱/۶ درصد ولتاژ مرجع) در برابر اختلال حفظ می‌شود و زمان پاسخ حالت پایدار برای تنظیم V_{dc} در روش پیشنهادی۴ میلی ثانیه است.

۴-۳- سناریوی ۳: کاهش توان تولیدی فتوولتائیک در بار ثابت

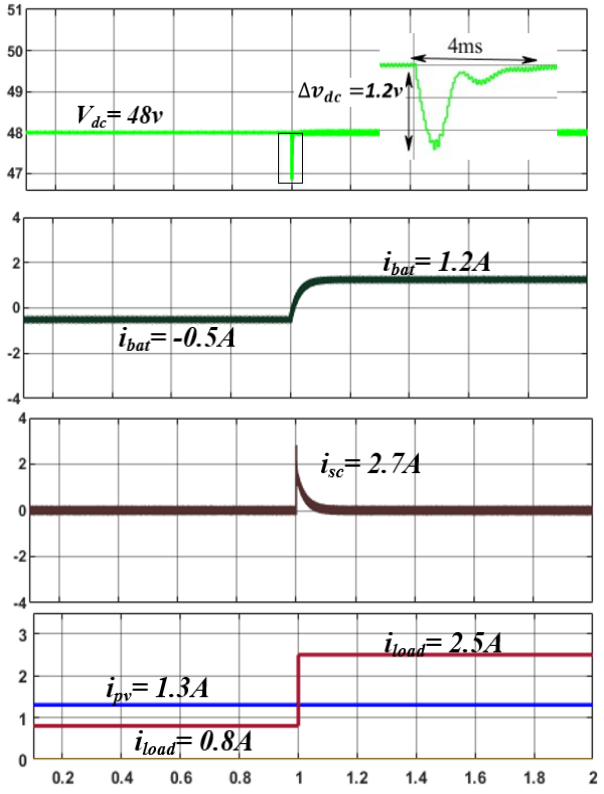
شکل (۸) نتایج تغییرات کاهش توان تولیدی فتوولتائیک را در بار ثابت نشان می‌دهد. در لحظه $t = 1s$ توان تولید فتوولتائیک به طور ناگهانی از ۱.۸ آمپر به ۰.۲ آمپر کاهش می‌یابد. به دلیل کاهش ناگهانی در توان تولیدی فتوولتائیک، ولتاژ لینکDC تمایل به کاهش دارد. نوسانات ناگهانی توان در سیستم توسط سیستم ذخیره انرژی ترکیبی کنترل می‌شود. ابرخازن به تقاضای توان گذرا با جریان پیک ۲.۶ آمپر پاسخ می‌دهد. جریان باتری به تدریج از ۱- آمپر به ۰.۶ آمپر افزایش می‌یابد، یعنی از حالت شارژ برای جذب بیشبود توان فتوولتائیک به حالت تخلیه برای جبران کمبود توان می‌رسد. راهبرد کنترل پیشنهادی زمان پایداری ۴ میلی ثانیه و زمان فروجهش ۰.۵۵ولت (۱.۱درصد ولتاژ مرجع) را برای ولتاژ لینک DC در ۴۸ ولت نشان می‌دهد.

۴-۴- سناریو ۴: افزایش توان تولیدی فتوولتائیک در بار ثابت

شکل (۹) نتایج تغییرات افزایش توان تولیدی فتوولتائیک را در بار ثابت نشان می‌دهد. در لحظه t =1s توان تولیدی فتوولتائیک به طور ناگهانی از ۰/۲ آمپر به ۱/۸ آمپر افزایش می‌یابد. به دلیل افزایش ناگهانی در توان تولیدی فتوولتائیک، ولتاژ لینک DC تمایل به افزایش دارد. کنترل‌کننده سیستم ذخیره انرژی ترکیبی باید تعادل کلی توان را حفظ کند. ابرخازن به تقاضای توان گذرا با جریان پیک ۱/۹- آمپر پاسخ می‌دهد. جریان باتری به تدریج ۰/۶ آمپر به ۱- آمپر کاهش می‌یابد، یعنی از حالت تخلیه به حالت شارژ برای جذب بیشبود توان متوسط تغییر می‌کند. راهبرد کنترلی پیشنهادی زمان پایداری۴ میلی‌ثانیه و فراجهش ۰/۳ ولت (۰/۶ درصد ولتاژ مرجع) را برای ولتاژ لینک DC در ۴۸ ولت نشان می‌دهد.

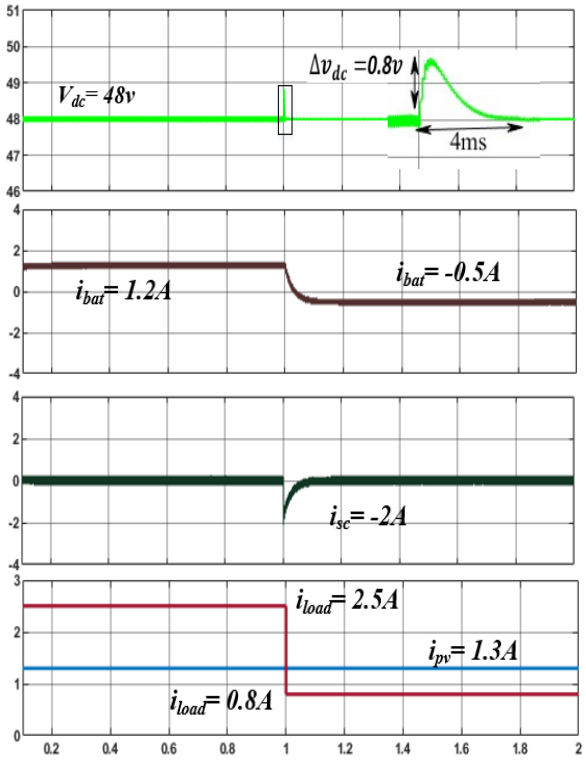
۴-۵- حالت‌های کاری مختلف سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر قانون و منطق فازی

شکل (۱۰) حالت‌های کاری سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر منطق فازی و مبتنی بر قانون را نمایش می‌دهد. دربازه زمانی t=0 تا t<1s سطح شارژ ابرخازن ۲۰ درصد است که پایین‌تر از حد مجاز می‌باشد، سیستم درحالت کمبود توان است و ذخیره‌سازها در حالت تخلیه قرار دارند بدین ترتیب حالت کاری۲ در سیستم مدیریت انرژی فعال می‌شود تا از تخلیه بیش از حد ابرخازن جلوگیری کند. در این حالت ابرخازن توسط باتری شارژ می‌شود تا زمانیکه سطح شارژ ابرخازن به ۳۰درصد بازگردد. در لحظه t =1s سطح شارژ ابرخازن به ۳۰ درصد باز می‌گردد و حالت کاری۱ در سیستم مدیریت انرژی فعال می‌شود. از آنجاییکه سیستم درحالت تعادل توان قراردارد باتری و ابرخازن پاسخی به توان سیستم نمی‌دهند. در لحظه t =2s سطح شارژ ابرخازن به ۹۷درصد می‌رسد که بالاتر از حد مجاز می‌باشد باتوجه به اینکه سیستم درحالت بیشبود توان است و ذخیره‌سازها در حالت شارژ قرار دارند. بدین ترتیب حالت کاری۳ در سیستم مدیریت انرژی فعال می‌شود تا از شارژ بیش از حد ابرخازن جلوگیری کند. در این حالت باتری توسط ابرخازن شارژ می‌شود تا زمانیکه سطح شارژ ابرخازن به ۹۰ درصد بازگردد. سپس در لحظه t =3s سطح شارژ ابرخازن به ۹۰ درصد باز می‌گردد و سیستم مدیریت انرژی در حالت کاری۱ قرار می‌گیرد.



شکل (۶): نتایج تغییرات افزایش بار در توان تولیدی ثابت

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]



شکل (۷): نتایج تغییرات کاهش بار در توان تولیدی ثابت

۴-۶- سناریوی بلند مدت

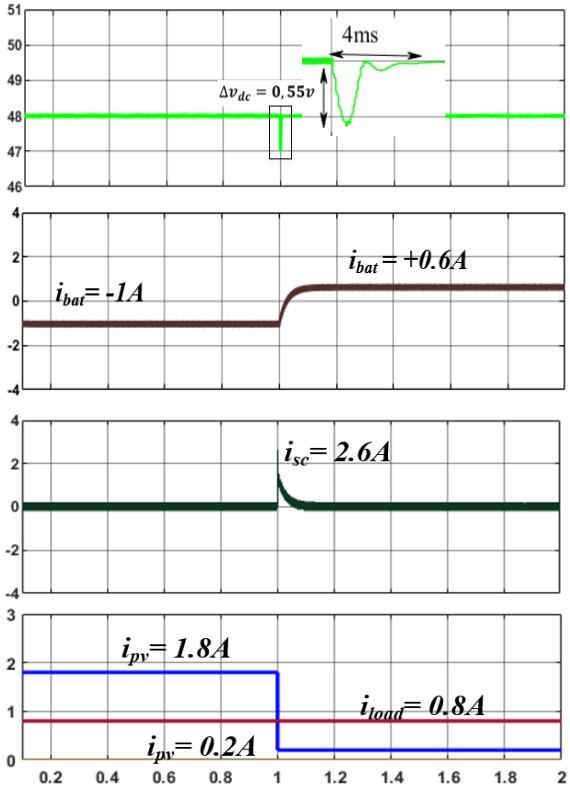
در (Yang, Fan., et al., 2018) با توجه به داده‌های تابش فوتوولتائیک و بار، منحنی تولید روزانه فوتوولتائیک و منحنی روزانه بار در این مقاله مشخص شده است. منحنی تولید روزانه فوتوولتائیک و منحنی روزانه بار در این مقاله بصورت پله‌ای در طول ۱۲ ثانیه درنظر گرفته شده‌است. عملکرد راهبرد کنترلی با تغییرات طولانی مدت در شکل (۱۱) نشان داده شده‌است.

۴-۷- مقایسه با سایر روش های کنترلی

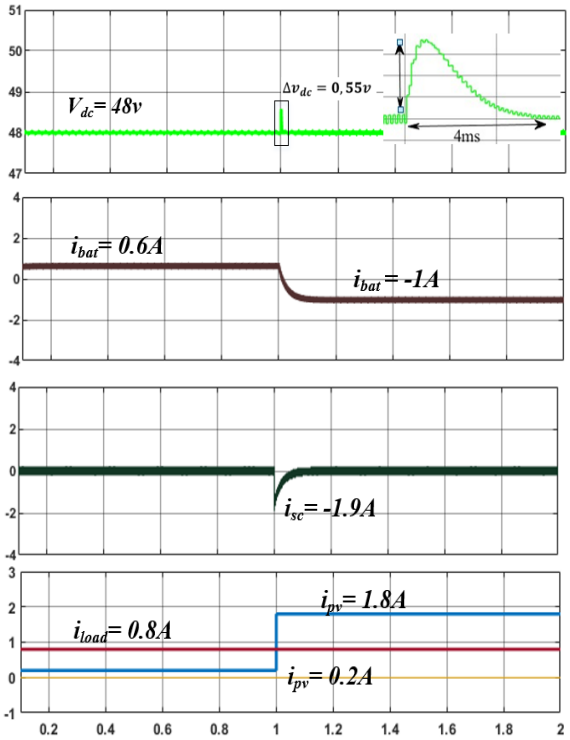
برای اعتبارسنجی بیشتر عملکرد روش سیستم مدیریت انرژی مبتنی بر قانون و منطق فازی، مقایسه‌ای با کارهای قبلی انجام شده و در جدول (۳) ارائه شده است. درصد فراجهش MP طبق مراجع [۱۲] و [۱۳] از معادله ۱۶ بدست می‌آید.

$$MP = (V_{ref} - V_{DC})/(V_{ref}) \times 100 \quad (۱۶)$$

از جدول (۳) می‌توان دریافت که روش پیشنهادی مقادیر کوچک فراجهش را در مقایسه با سایر روش‌ها تولید می‌کند. این بدان معنی است که ولتاژ لینک DC در برابر اختلالات بار و منبع فتوولتائیک بهتر تنظیم می‌شود. علاوه بر این، زمان پایداری در روش پیشنهادی ۴ میلی‌ثانیه است که نسبت به سایر روش‌های کنترلی کمتر است.

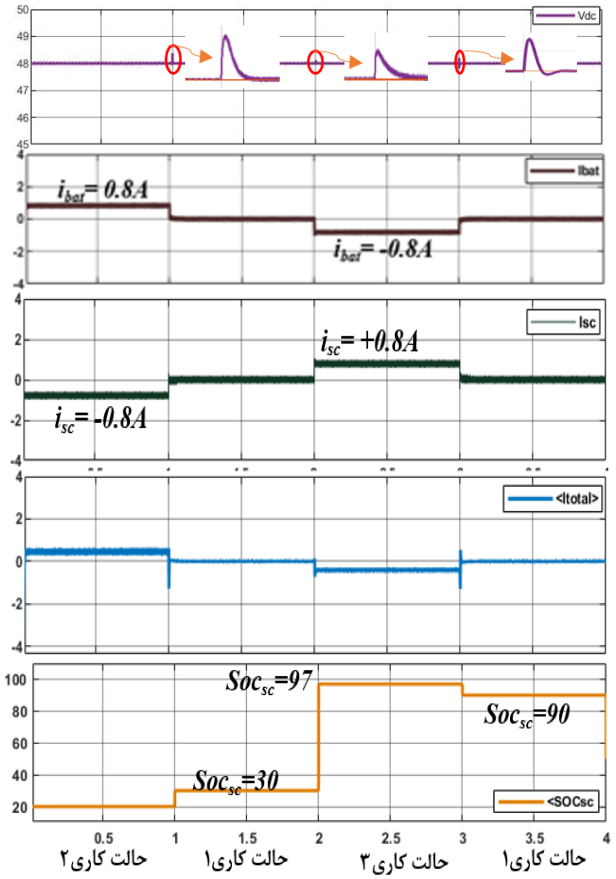


شکل (۸):کاهش توان تولیدی فتوولتائیک در بار ثابت

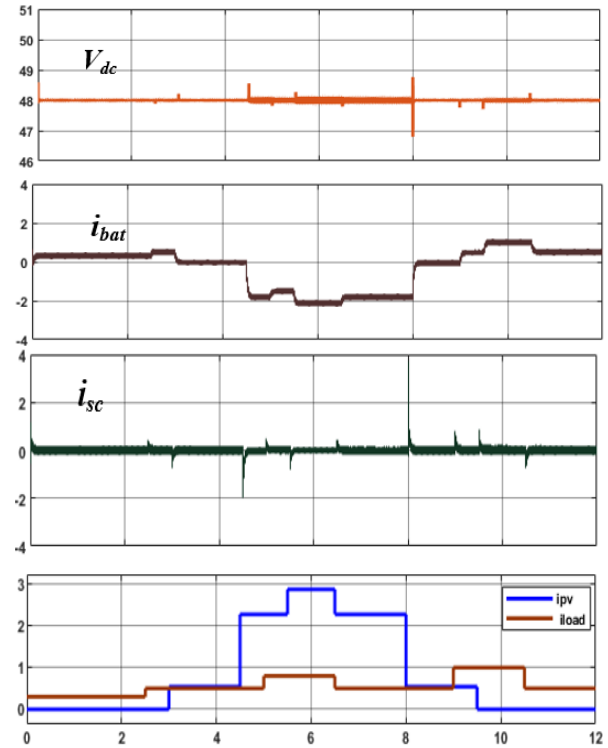


شکل (۹): نتایج افزایش توان تولیدی فتوولتائیک در بار ثابت

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]



شکل (۱۰): نحوه عملکرد سیستم مدیریت انرژی منطق فازی و قانون در حالت کاری متفاوت



شکل (۱۱) : نتایج سناریو طولانی مدت

باتوجه به جدول (۳) دلایل برتری روش پیشنهادی نسبت به سایر راهبردهای کنترلی را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- استفاده از ویژگی تعداد بالای سیکل شارژ/تخلیه ابرخازن
- سطح بالای استفاده از ابرخازن
- کنترل نرخ شارژ و تخلیه باتری

روش پیشنهادی قادر است تا زمانی که باتری متوسط تقاضای توان را جبران می‌کند، ابرخازن را به نحوی تنظیم کند که تقاضای توان گذرا را به سرعت تامین نماید. به عبارت دیگر، تنش جریان باتری برای طول عمر بیشتر کاهش می‌یابد و می‌توان به طور همزمان به تنظیم مطلوب ولتاژ لینک DC دست یافت.

جدول(۳): مقایسه با سایر روش های کنترلی

مراجع	(Wang. B., et al., 2019) deadbeat	(Manandhar, U., et al., 2018) PI+LPF	(Kollimalla, S., et al., 2017) PI+rate_limit	(Arunkumar.C. R., et al., 2023) PI+deadbeat	راهبرد پیشنهادی
درصد فراجهش تغییرات بار	٪۴	٪۱۰.۴	٪۶.۸	٪۳.۶	٪۱.۶
درصد فراجهش تغییرات توان تولیدی	٪۳.۴	٪۱۰.۴	٪۶.۱	٪۱.۵	٪۱.۱
زمان پایداری ولتاژ لینک DC	۴۸ ms	۴۰ ms	۲۱۰ ms	۲۰ ms	۴ms

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک راهبرد جدید مدیریت انرژی مبتنی بر قانون و منطق فازی برای سیستم ذخیره‌ساز ترکیبی در ریزشبکه DC پیشنهاد گردیده‌است. در این راهبرد، با معرفی ضریب اشتراک جدیدی که از خروجی کنترل‌کننده فازی به دست می‌آید، تقسیم توان موثر میان ابرخازن و باتری به دست می‌آید و بدین طریق نرخ شارژ و تخلیه ذخیره‌سازها کنترل می‌شود. از طرفی، این ساختار کنترلی علاوه بر سرعت بالا در بازیابی ولتاژ لینک DC هنگامی که عدم تعادل عرضه و تقاضا وجود دارد، با حفظ سطح شارژ باتری و ابرخازن در محدوده مجاز، از شارژ و تخلیه بیش از حد عناصر ذخیره‌ساز جلوگیری می‌کند. همچنین، با استفاده از ویژگی بالای تعداد سیکل‌های شارژ/تخلیه ابرخازن و تامین قسمت عمده جریان خروجی از طریق ابرخازن، باعث افزایش طول عمر باتری و همچنین کاهش تنش جریان باتری می‌شود.

مراجع

Nivolianiti, E; Yannis L; Charpentier, J, (2024). Energy Management of Shipboard Microgrids Integrating Energy Storage Systems: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 189, 114012.

Zolfaghari, M; Gharehpetian, G; Blaabjerg, F; Anvari-Moghaddam, A, (2024). A New Robust Nonlinear Control Strategy for UIPC In Isolated Hybrid Microgrids, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 155, 109569.

Amine, HM; Aissa, B; Rezk, H; Messaoud, H; Othmane, A; Saad, M; Abdelkareem, MA, (2023). Enhancing Hybrid Energy Storage Systems With Advanced Low-Pass Filtration And Frequency Decoupling For Optimal Power Allocation And Reliability Of Cluster Of DC-Microgrids, Energy, 282, 128310.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]

Wu, Q; Xie, ZH; Ren, H; Li, Q; Yang, Y, (2022). Optimal Trading Strategies for Multi-Energy Microgrid Cluster Considering Demand Response Under Different Trading Modes: A Comparison Study. Energy, 254, 124448.
Qiao, Y; Hu, F; Xiong, W; Guo, Z; Zhou, X; Li, Y, (2023). Multi-Objective Optimization of Integrated Energy System Considering Installation Configuration. Energy, 263, 125785.
Tobajas, J; Garcia-Torres, F; Roncero-Sánchez, P; Vázquez, J; Bellatreche, L; Nieto, E, (2022). Resilience-Oriented Schedule of Microgrids with Hybrid Energy Storage System Using Model Predictive Control. Applied Energy. 306, 118092.
Vijay M, D; Singh, B; Bhuvaneswari, G, (2020). Grid-Tied Battery Integrated Wind Energy Generation System with an Ability to Operate Under Adverse Grid Conditions, IEEE Transactions on Industry Applications, 56 (6), pp 6891-6882.
Xu, Q; Vafamand, N; Chen, L; Dragičević, T; Xie, L; Blaabjerg, F, (2021). Review On Advanced Control Technologies for Bidirectional DC/DC Converters in DC Microgrids, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 9 (2), pp 1221-1205.
Wang, Y; Wang, L; Li, M; Chen, Z, (2020). A Review of Key Issues for Control and Management in Battery and Ultra-Capacitor Hybrid Energy Storage Systems, eTransportation, (4), 100064.
Arunkumar, C. R.; Manthati UB; Punna, S, (2022). Supercapacitor Voltage Based Power Sharing and Energy Management Strategy for Hybrid Energy Storage System. Journal of Energy Storage, 50, 104232.
Manandhar, U; Tummuru, NR; Kumar Kollimalla, S; Abhisek, U; Beng, GH; Chaudhari, K, (2018). Validation of Faster Joint Control Strategy for Battery-and Supercapacitor-Based Energy Storage System, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65 (4), pp 3286-3295.
Kollimalla, SK; Mishra, MK; Lakshmi Narasamma, N, (2014). Design and Analysis of Novel Control Strategy for Battery and Super-Capacitor Storage System, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 5 (4), pp 1144-1137.
Kollimalla, SK; Ukil, A; Gooi, HB; Manandhar, U; Tummuru, NR, (2017). Optimization of Charge/Discharge Rates of a Battery Using a Two-Stage Rate-Limit Control, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 8 (2), pp 529-516.
Tummuru, NR; Mishra, MK; Srinivas, S, (2015). Dynamic Energy Management of Renewable Grid Integrated Hybrid Energy Storage System, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62 (12), pp 7737-7728.
Korada, N; Mishra, MK, (2017). Grid Adaptive Power Management Strategy for An Integrated Microgrid with Hybrid Energy Storage, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64 (4), pp 2892-2884.
Wang, B; Manandhar, U; Zhang, X; Gooi, HB; Ukil, A, (2019). Deadbeat Control for Hybrid Energy Storage Systems in DC Microgrids, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 10 (4), pp 1877-1867.
Arunkumar, CR; Manthati, UB, (2023). A Hybrid Controller Assisted Voltage Regulation and Power Splitting Strategy for Battery/Supercapacitor System in Isolated DC Microgrid, IEEE Transactions on Energy Conversion, 38 (3), pp 1553-1544.
Chia, Y.Y; Lee, L. H; Shafiabadi, N; Isa, D, (2015). A Load Predictive Energy Management System for Supercapacitor-Battery Hybrid Energy Storage System in Solar Application Using the Support Vector Machine, Applied Energy, 137, pp 602-588.
Tummuru, N. R; Mishra, M. K; Srinivas, S, (2015). Dynamic Energy Management of Hybrid Energy Storage System with High-Gain PV Converter, IEEE Transactions on Energy Conversion, 30 (1), pp 160-150.
Hu, J; Shan, Y; Guerrero, J. M; Ioinovici, A; Chan, K. W; Rodriguez, J, (2021). Model Predictive Control of Microgrids—An Overview, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 136, 110422.
Karamanakos, P; Liegmann, E; Geyer, T; Kennel, R, (2020). Model Predictive Control of Power Electronic Systems: Methods, Results, And Challenges, IEEE Open Journal in Industry Applications, 1, pp 114-95.
Chen, S; Yang, Q; Zhou, J; Chen, X, (2021). A Model Predictive Control Method for Hybrid Energy Storage Systems, CSEE Journal of Power and Energy Systems, 7(2), pp 338-329.
Ni, F; Zheng, Z; Xie, Q; Xiao, X; Zong, Y; Huang, C, (2021). Enhancing Resilience of DC Microgrids with Model Predictive Control Based Hybrid Energy Storage System, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 128, 106738.
Jafarian Abianeh, A; Ferdowsi, F, (2019). Sliding Mode Control Enabled Hybrid Energy Storage System for Islanded DC Microgrids with Pulsing Loads, IEEE Transactions on Sustainable Energy, 10 (4), pp 1877-1867.
Yin, H; Zhou, W; Li, M; Ma, C; Zhao, C, (2016). An Adaptive Fuzzy Logic-Based Energy Management Strategy on Battery/Ultracapacitor Hybrid Electric Vehicles, IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2(3), pp 311-300.
Yang, F; Pei, G; Yingying, L; Zhang, Zh; Xiao, W, (January 2018). Impacts On Operation and Benefit After New Energy Generation Access to Power Grid, Earth and Environmental Science, the 4th International Conference on Renewable Energy Technologies (ICRET 2018), Kuala Lumpur, Malaysia.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-11-04]