



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>



## Research Article

### A New Real-Time Optimization-Based Energy Management Strategy for Battery/Supercapacitor Hybrid Storage System in DC Microgrid

Ehsan Farrokhi Lahrami<sup>1</sup>, Hoda Ghoreishy<sup>2,\*</sup>, Roya Ahmadihangar<sup>3</sup>

1. Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology
2. Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology
3. Mazandaran University of Science and Technology

\*Corresponding Author: Hoda Ghoreishy

#### PAPER INFO

##### *Paper history:*

Received: 05 July 2022

Revised: 12 November 2022

Accepted: 24 December 2022

##### *Keywords:*

Supercapacitor,  
Battery,  
Optimization,  
DC microgrid,  
Hybrid energy storage,  
Energy Management.

#### ABSTRACT

This article presents a new energy management strategy (EMS) for optimal power allocation in the battery/supercapacitor hybrid energy storage (HESS) in DC microgrid applications. The proposed system is composed of a semiactive structure where the supercapacitor is directly connected to DC bus. In this structure, since the main purpose of the HESS is to maintain the DC bus voltage at the desired value, controlling the supercapacitor becomes more important. While, in the semi-active structure, there is no control on the supercapacitor. In this paper, by considering the supercapacitor current as a cost function in the optimization problem, this challenge has been solved. Also, in the case of microgrid excess power mode, a new cost function has been considered to charge the battery with a constant current to reduce the charging time and improve its lifespan. Another objective is to increase battery life by responding the supercapacitor to the sudden power changes and drawing a smooth current from the battery. In order to online determination of the optimal global solution, this multi-objective problem has been converted into a single-objective problem by use of the weighted method and then solved using KKT conditions. Therefore, real-time implementation is the main advantage of the proposed method. Finally, using simulation, the performance of the proposed method is compared with an adaptive cutoff frequency filter-based method and fuzzy logic method, in three 24 seconds different scenarios, in terms of the DC bus voltage regulation, the battery peak current, and the battery state of charge (SoC).

© 2023 Published by Semnan University Press.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2022.27705.2300>

#### How to cite this article:

Farrokhi Lahromi, E., Ghoreishy, H., & Ahmadihangar, R. (2023). A New Real-Time Optimization-Based Energy Management Strategy for Battery/Supercapacitor Hybrid Storage System in DC Microgrid. *Journal of Modeling in Engineering*, 21(73),17-30. doi: 10.22075/jme.2022.27705.2300

# ارائه روش جدید مدیریت انرژی مبتنی بر بهینه‌سازی بلادرنگ برای سیستم ذخیره‌ساز ترکیبی باتری/ابرخازن در ریز شبکه DC

احسان فرخی لهرمی<sup>۱</sup>، هدی قریشی<sup>۲\*</sup> و رویا احمدی آهنگر<sup>۳</sup>

چکیده	اطلاعات مقاله
در این مقاله یک روش جدید مدیریت انرژی مبتنی بر بهینه‌سازی برای ذخیره‌ساز ترکیبی باتری/ابرخازن، در کاربرد ریزشبکه DC ارائه می‌گردد. در سیستم پیشنهادی باتری توسط یک مبدل دو جهته و ابرخازن به صورت مستقیم به باس DC متصل شده‌اند (ساختار نیمه فعال). باتوجه به اتصال مستقیم ابرخازن به باس DC و این موضوع که هدف اصلی ذخیره‌ساز در ریزشبکه حفظ ولتاژ باس DC در مقدار مطلوب است، مسئله کنترل ابرخازن اهمیت بیشتری می‌یابد. اما در ساختار نیمه فعال کنترلی روی ابرخازن وجود ندارد. در این مقاله، با در نظر گرفتن جریان ابرخازن به عنوان یک هدف کنترلی در تعیین جریان مرجع باتری، این چالش برطرف شده است. همچنین در حالت مازاد توان در شبکه که باتری شارژ خواهد شد نیز تابع هدف کنترلی جدیدی در نظر گرفته شده تا باتری به صورت جریان ثابت شارژ شود تا زمان شارژ کاهش و طول عمر آن افزایش یابد. هدف کنترلی دیگر، افزایش طول عمر باتری با کشیدن جریان نرم از باتری و پاسخگویی ابرخازن به تغییرات لحظه‌ای می‌باشد. جهت تعیین نقطه کار بهینه بصورت برخط، این مسئله چند هدفی به مسئله تک هدف تبدیل و با استفاده از شرایط KKT حل شده است. در نتیجه مزیت اصلی روش پیشنهادی، قابلیت به کارگیری آن در سیستم بلادرنگ می‌باشد. با استفاده از شبیه‌سازی در سه سناریوی مختلف در بازه زمانی ۲۴ ثانیه، عملکرد روش پیشنهادی با روش‌های مبتنی بر فیلتر با فرکانس قطع تطبیقی و روش منطق فازی از جهت تنظیم ولتاژ باس DC، پیک جریان و سطح شارژ باتری مقایسه شده است.	<p>نوع مقاله: پژوهشی</p> <p>دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۱۴</p> <p>بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۲۱</p> <p>پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳</p> <p><b>واژگان کلیدی:</b></p> <p>ابرخازن، باتری، بهینه‌سازی، ریز شبکه DC، ذخیره‌ساز ترکیبی، مدیریت انرژی.</p>

## ۱- مقدمه<sup>۱</sup>

در سال‌های اخیر باتوجه به مشکلات زیست محیطی سوخت‌های فسیلی و رو به اتمام بودن منابع آن، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر جهت تولید انرژی الکتریکی گسترش یافته است [۱]. قرار گرفتن این منابع تولید پراکنده در نزدیکی بارها، مفهوم ریزشبکه را پدیدار ساخته است [۲]. باتوجه به AC بودن شبکه‌های فعلی و این نکته که ماهیت اکثر منابع تولید تجدیدپذیر و همچنین بارها از نوع DC است یا حداقل نیاز به یک لینک DC وجود دارد،

ریزشبکه‌ها را می‌توان به سه دسته‌ی DC، AC و ترکیبی

AC/DC تقسیم نمود [۳].

در این میان توجه به شبکه DC با توجه به وجود نداشتن چالش‌های کیفیت توان نظیر کنترل توان راکتیو، پایداری و کنترل فرکانس، رو به افزایش است.

ریزشبکه‌ها را بر اساس اتصال به شبکه سراسری به سه دسته تقسیم می‌شوند؛ متصل به شبکه، مجزا از شبکه در حالت جزیره‌ای و مستقل از شبکه [۴]. باتوجه به ماهیت تصادفی توان تولید شده توسط منابع انرژی تجدیدپذیر به

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ghoreishy@nit.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳. استادیار، دانشگاه علوم و فنون مازندران

منطق فازی [۱۳] اشاره نمود. مزیت اصلی این روش‌ها سادگی طراحی و بکارگیری آنها به شمار می‌رود. در مقابل، وابستگی به دانش و تجربه طراح و غیر بهینه بودن آنها از معایب این دسته از روش‌های مدیریت انرژی می‌باشد.

روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی خود به دو دسته برون خط و برخط تقسیم می‌شوند. روش الگوریتم ژنتیک [۱۴]، ازدحام ذرات [۱۵]، برنامه‌ریزی پویا [۱۶] به دلیل بار محاسباتی بالا از جمله روش‌های برون خط هستند. عیب دیگر این روش‌ها نیاز به دانستن شرایط عملکردی سیستم از پیش می‌باشد که سبب می‌شود مناسب بکارگیری در سیستم‌های عملی بلادرنگ نباشند. به منظور رفع چالش‌های ذکر شده در مورد روش‌های غیر بهینه و بهینه برون خط، روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی برخط همچون روش مبتنی بر شبکه عصبی [۱۷]، کنترل پیش بین [۱۸] و روش‌های بهینه‌سازی چندهدفی برخط [۱۹-۲۱] ارائه شده است. در روش شبکه عصبی [۱۷]، ابتدا مسئله بهینه‌سازی به صورت برون خط حل گردید و سپس با استفاده از داده‌های بدست آمده، شبکه عصبی آموزش داده شده است. بنابراین اگرچه این روش را می‌توان برای سیستم واقعی به کار گرفت اما عملکرد آن وابسته به سیکل‌های آموزشی است، در حالی که در سیستم واقعی چالش عدم قطعیت وجود دارد. در روش کنترل پیش بین [۱۸]، نقطه کار بهینه تعیین می‌شود و همچنین مناسب سیستم واقعی نیز می‌باشد. اما نیاز به مدل دقیق سیستم و پیچیدگی طراحی از معایب این روش به شمار می‌رود.

در مقالات [۱۹-۲۱] روش مبتنی بر بهینه‌سازی چندهدفی برخط برای کاربرد خودروی الکتريکی ارائه شده است که موازنه‌ای میان تخصیص بهینه توان، میزان حجم و پیچیدگی محاسباتی و مقدار داده‌های مورد نیاز می‌باشد. در این مقالات از ساختار نیمه فعال با یک مبدل افزایشنده یک جهته استفاده شده است. این بدان معنی است که یکی از ذخیره‌سازها که توسط مبدل به بار متصل شده است صرفاً دشارژ می‌شود و قابلیت شارژ ندارد. همچنین عیب دیگر این کنترل‌کننده، تغییرات ولتاژ باس DC در یک محدوده مشخص می‌باشد. در حالی که در کاربرد ریزشبه DC، ثابت بودن ولتاژ باس ضرورت دارد. این موضوع در ریزشبه DC مستقل و مجزای از شبکه سراسری اهمیت بیشتری می‌یابد.

در این مقاله روش مدیریت انرژی مبتنی بر بهینه‌سازی

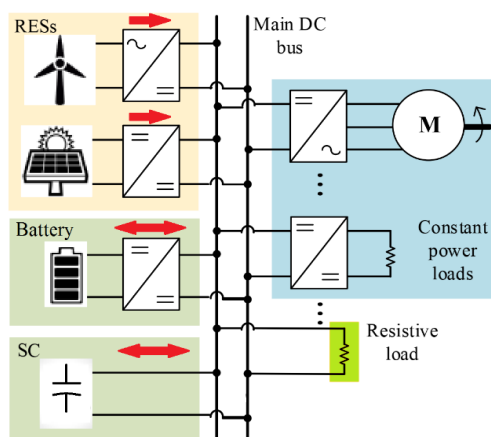
دلیل وابستگی آنها به شرایط محیطی، عدم قطعیت یک چالش مهم به خصوص در ریزشبه‌ها به شمار می‌رود. بنابراین وجود سیستم‌های ذخیره‌سازی جهت پایداری و افزایش قابلیت اطمینان ریزشبه از اهمیت بالایی برخوردار است. این موضوع در ریزشبه‌های مستقل و مجزای از شبکه ضرورت بیشتری می‌یابد. به این منظور، در مرجع [۵] نویسندگان یک مدل بهینه‌سازی استوار دو مرحله‌ای با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار و توان تولیدی نیروگاه‌های بادی و در نظرگیری دستگاه‌های ذخیره‌ساز انرژی، ارائه نموده اند.

روش‌های مختلفی به منظور ذخیره‌سازی انرژی الکتريکی وجود دارد که هیچ یک همزمان دارای چگالی انرژی و چگالی توان بالا نیستند. به همین دلیل می‌توان از سیستم ذخیره‌ساز ترکیبی باتری با چگالی انرژی بالا و ابرخازن با چگالی توان بالا استفاده نمود [۶].

سه ساختار متداول برای سیستم‌های ذخیره‌ساز ترکیبی وجود دارد [۷]. ساختار غیرفعال که در آن باتری و ابرخازن به طور مستقیم به شبکه متصل می‌شوند. این ساختار ساده‌ترین ساختار، با قابلیت اطمینان و بازدهی بالا بوده اما در مقابل کنترلی روی تخصیص توان به باتری و ابرخازن وجود ندارد. ساختار بعدی ساختار نیمه فعال است که باتری و یا ابرخازن بوسیله مبدل به شبکه وصل می‌شود و ذخیره‌ساز دیگر به طور مستقیم به شبکه متصل خواهد شد. این ساختار موازنه‌ای میان کنترل‌پذیری و بازدهی است. ساختار سوم نیز فعال نام دارد که هر دو ذخیره ساز (باتری و ابرخازن) توسط یک مبدل به شبکه وصل خواهند شد. این ساختار علیرغم اینکه از بالاترین کنترل‌پذیری برخوردار است، اندازه، حجم، قیمت و تلفات آن نیز بالاتر از دیگر ساختارها می‌باشد.

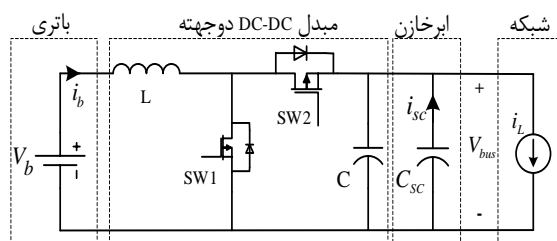
افزایش طول عمر باتری، کنترل سطح شارژ باتری و ابرخازن، در کنار حفظ تعادل میان توان تولیدی و تقاضا از اهداف اصلی کنترلی در سیستم ذخیره‌ساز ترکیبی می‌باشند. بنابراین انتخاب روش مدیریت انرژی مناسب جهت دستیابی به این اهداف از اهمیت بالایی برخوردار است. به این منظور روش‌های مختلفی در مقالات ارائه و به کار گرفته شده است. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته‌ی بهینه و غیر بهینه تقسیم نمود. از جمله روش‌های غیر بهینه می‌توان به روش مبتنی بر فیلتر [۸ و ۹]، کنترل دروپ [۱۰]، کنترل مبتنی بر قانون [۱۱]، کنترل مد لغزشی [۱۲] و

لازم به ذکر است که منابع تجدیدپذیر در نقطه حداکثر توان کار می‌کنند و قابلیت کنترل ولتاژ باس DC را ندارند.



شکل ۱- ساختار کلی یک ریز شبکه DC

باتوجه به اینکه هدف اصلی در کنترل ذخیره‌ساز ترکیبی، تنظیم ولتاژ باس DC با حفظ تعادل میان تولید و تقاضا بدون اندازه‌گیری توان و ارتباط با آنها می‌باشد، کل شبکه (واحدهای تولید و بارها) را می‌توان بصورت یک منبع جریان مدل کرد. مقدار این منبع جریان در حالت‌های کمبود توان، تعادل میان تولید و تقاضا یا مازاد توان، می‌تواند به ترتیب مثبت، صفر یا منفی باشد. مدل ساده ذخیره‌ساز ترکیبی نیمه فعال در شکل (۲) نشان شده است.



شکل ۲- ساختار ذخیره‌ساز نیمه فعال متصل به شبکه مورد مطالعه

## ۲-۱- مدل باتری و ابرخازن

مطابق شکل (۳)، به منظور کاهش محاسبات و پیچیدگی سیستم، مدل ساده باتری و ابرخازن در نظر گرفته شده است. مطابق شکل، مدل باتری از یک منبع ولتاژ وابسته  $(V_{SOC})$  و مقاومت سری داخلی  $(R_b)$  که مدل کننده تلفات داخلی باتری می‌باشد، تشکیل شده است. لازم به ذکر است که مقدار منبع ولتاژ، وابسته به سطح شارژ باتری است [۲۲].

برخط برای ساختار نیمه فعال در کاربرد ریز شبکه مستقل از شبکه سراسری ارائه شده است. تثبیت ولتاژ باس DC، افزایش طول عمر باتری با کاهش عمق دشارژ و ریپل جریان آن و کنترل سطح شارژ<sup>۲</sup> باتری و ابرخازن در محدوده معین از اهداف کنترلی در حل مسئله بهینه‌سازی می‌باشند. بنابراین مسئله بهینه‌سازی از نوع چند هدفی خواهد بود. این در حالی است که در این نوع مسائل، دست‌یابی به نقطه بهینه سراسری دشوار و زمان‌بر است. در نتیجه مناسب استفاده برای سیستم بلادرنگ نمی‌باشد. در این مقاله ابتدا مسئله چند هدفی با استفاده از روش وزنی به مسئله تک هدفی تبدیل شده است. سپس با به کارگیری شرایط  $KKT^3$  مسئله بهینه‌سازی حل شده است. استفاده از این روش به دلیل بار محاسباتی کم، سبب می‌شود که نقطه بهینه سراسری به صورت برخط تعیین شود. در نتیجه طرح کنترلی پیشنهادی مناسب سیستم بلادرنگ خواهد بود. مزایای اصلی کنترل‌کننده پیشنهادی نسبت به کارهای پیشین عبارتند از: (۱) تغییر ساختار نیمه فعال یک جهت به دوجتته برای آن به طوری که هم باتری و هم ابرخازن از قابلیت شارژ شدن برخوردارند (۲) تعیین برخط نقطه کار بهینه در هر دو حالت مازاد توان و کمبود توان در شبکه (۳) تثبیت ولتاژ باس DC در مقدار مرجع با کنترل مناسب جریان ابرخازن، در حالی که ابرخازن به طور مستقیم به شبکه متصل است.

در ادامه این مقاله در بخش دوم به تشریح ساختار سیستم و مدل‌سازی آن پرداخته می‌شود. در بخش سوم، مسئله بهینه‌سازی حل می‌گردد و روش مدیریت انرژی پیشنهادی ارائه خواهد شد. در بخش چهارم نیز با استفاده از شبیه‌سازی عملکرد روش پیشنهادی بررسی و با روش منطق فازی و روش مبتنی بر فیلتر با فرکانس قطع تطبیقی مقایسه می‌شود. سرانجام در بخش پنجم نتایج حاصل شده به طور خلاصه بیان خواهد شد.

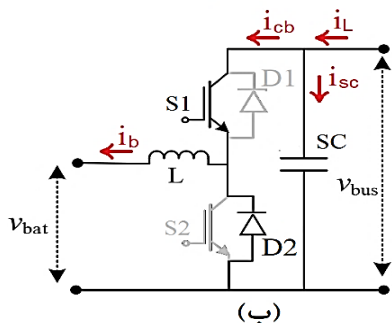
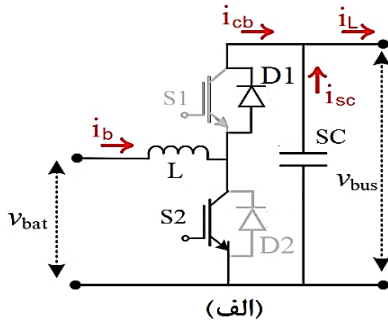
## ۲- ساختار سیستم و مدل‌سازی

یک ساختار رایج ریز شبکه DC مستقل شامل منابع تولید تجدیدپذیر، ذخیره‌ساز باتری و ابرخازن و بارهای مختلف در شکل (۱) ارائه شده است. مطابق شکل ذخیره‌ساز ترکیبی دارای ساختار نیمه فعال است که باتری با یک مبدل دو جهت و ابرخازن بطور مستقیم به باس DC متصل شده‌اند.

<sup>2</sup> State of charge (SoC)

<sup>3</sup> Karush-Kuhn-Tucker (KKT) conditions

این حالت توسط خازن تغذیه می‌شود. زمانی که کلید  $S_2$  قطع است، دیود  $D_1$  روشن می‌شود و مجموعه باتری و القاگر خازن را شارژ و بار را تغذیه می‌کنند. لازم به ذکر است که با توجه به اتصال ابرخازن به خروجی مبدل دوجبهته، از خازن مجزا برای مبدل استفاده نشده است.

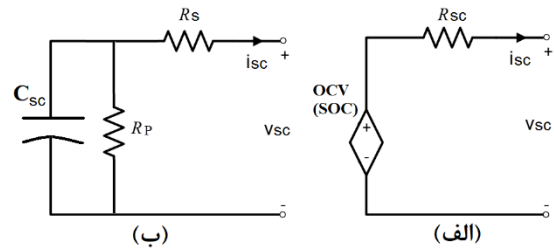


شکل ۴- مبدل دو جهته در حالت: (الف) افزایشدهنده و (ب) کاهنده

در حالت بیشبود توان نیز مبدل دو جهته در حالت کاهنده (شکل ۴-ب) عمل می‌کند. در این حالت توان مازاد شبکه ابتدا توسط ابرخازن جذب و به تدریج در باتری ذخیره می‌شود. در این حالت کلید  $S_1$  کنترل می‌گردد. زمانی که کلید وصل است؛ انرژی از شبکه به باتری منتقل می‌شود و القاگر  $L$  نقش فیلتر جهت کاهش ریپل جریان را ایفا می‌کند. همچنین زمانی که کلید  $S_1$  قطع است، دیود  $D_2$  روشن می‌گردد و باتری از طریق القاگر شارژ می‌شود تا جریان آن پیوسته بماند. مدل میانگین مبدل در هر دو حالت افزایشدهنده و کاهنده، رابطه جریان بصورت زیر خواهد بود:

$$i_{sc} + i_{cb} = i_L \quad (3)$$

در این رابطه  $i_{sc}$  جریان ابرخازن،  $i_{cb}$  جریان خروجی مبدل باتری و  $i_L$  نیز جریان بار می‌باشند. رابطه‌ی میان جریان خروجی مبدل و جریان باتری در دو حالت افزایشدهنده و کاهنده به ترتیب در روابط (۴) و (۵) ارائه شده است [۲۵].



شکل ۳- (الف) مدل باتری و (ب) مدل ابرخازن

سطح شارژ باتری از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۹]

$$SoC_b(k) = SoC_b(k-1) - \frac{\eta \Delta t i_b(k-1)}{3600 Q_b} \quad (1)$$

که  $SoC_b$  نشان دهنده سطح شارژ باتری،  $Q_b$  ظرفیت باتری،  $\eta$  بازدهی باتری و  $\Delta t$  نیز زمان نمونه‌برداری می‌باشند. به منظور افزایش طول عمر باتری، در این مقاله سطح شارژ باتری بین ۲۰ تا ۸۰ درصد کنترل خواهد شد [۲۳]

مطابق شکل (۳-ب) مدل ابرخازن نیز از یک خازن ایده آل  $C_{sc}$ ، یک مقاومت سری ( $R_s$ ) که نشان دهنده مقاومت داخلی الکترولیت است و مقاومت موازی  $R_p$  که برای نشان دادن اثر جریان نشتی است تشکیل شده است [۲۴]

سطح شارژ ابرخازن برابر است با نسبت انرژی باقی مانده ( $E_{remain}$ ) به بیشینه انرژی قابل ذخیره‌سازی ( $E_{max}$ ) باتوجه به اینکه است، بنابراین:

$$SoC_{sc} = \frac{E_{remain}}{E_{max}} = \frac{V_{sc}^2}{V_{sc,max}^2} \quad (2)$$

که در آن  $V_{sc}$  ولتاژ ترمینال ابرخازن،  $V_{sc,max}$  نیز حداکثر ولتاژ ترمینال ابرخازن می‌باشد.

## ۲-۲- مدل‌سازی مبدل دو جهته

همانطور که بیان شد، در این مقاله از مبدل DC-DC دوجبهته استفاده شده است که مطابق شکل (۴) در دو حالت افزایشدهنده و کاهنده عمل خواهد کرد. در حالت کمبود توان در شبکه، مبدل در حالت افزایشدهنده کار میکند و توان را از باتری دریافت و به شبکه تزریق می‌نماید. در حالت مازاد توان نیز بصورت کاهنده عمل می‌کند و با استفاده از مازاد توان شبکه، باتری شارژ خواهد شد. در حالت کمبود توان در شبکه، مطابق شکل (۴-الف)، مبدل در حالت افزایشدهنده عمل می‌کند و توان از باتری به شبکه تزریق می‌شود. در این حالت کلید  $S_2$  کنترل می‌گردد. زمانی که کلید وصل است؛ انرژی از باتری در القاگر  $L$  ذخیره می‌شود و بار در

می‌باشند.

$$i_{cb} = (1 - D_1) i_b \quad (۴)$$

$$i_{cb} = D_2 i_b \quad (۵)$$

همانطور که در مقدمه بیان گردید؛ در کارهای پیشین، ولتاژ باس DC در یک محدوده مشخص تغییر می‌کرد و در مقدار مرجع ثابت نبوده است. اما در کاربرد ریز شبکه، ولتاژ باید در حالت ماندگار در مقدار مطوب ثابت باقی بماند که این موضوع در این مقاله با کنترل مناسب جریان ابرخازن برطرف شده است. این امر در حالی رخ می‌دهد که ابرخازن به‌طور مستقیم به شبکه متصل است و کنترل جریان آن با چالش مواجه است.

$$i_{sc} + (1 - D_1) i_b = i_L \quad (۶)$$

$$i_{sc} + D_2 i_b = i_L \quad (۷)$$

همان‌طور که بیان شد، افزایش طول عمر باتری به دو عامل وابسته است؛ دامنه جریان کشیده شده از باتری و نرخ تغییرات جریان باتری [۲۰]. بنابراین، تابع هدف جریان باتری از دو بخش تشکیل می‌شود که باید کمینه شوند.

$$f_{b,ave} = 1 - a(i_b - i_{b,ave})^2 \quad (۸)$$

$$f_{b,dif} = 1 - b(i_b - i_{b,last})^2 \quad (۹)$$

که  $f_{b,ave}$  و  $f_{b,dif}$  به ترتیب توابع هدف کمینه سازی دامنه و تغییرات جریان باتری می‌باشند.  $i_{b,ave}$  میانگین جریان باتری از اولین بازه کنترلی و  $i_{b,last}$  نیز مقدار جریان باتری در بازه کنترلی قبلی می‌باشد. همچنین، ضرایب  $a$  و  $b$  برای تنظیم توابع هدف در بازه  $[0, 1]$  می‌باشند [۲۰].

$$a = \frac{1}{(I_{b,max} - i_{b,ave})^2} \quad (۱۰)$$

$$b = \frac{1}{[\max(|i_b - i_{b,last}|)]^2} \quad (۱۱)$$

در این روابط،  $I_{b,max}$  حداکثر دامنه جریان باتری و  $[\max(|i_b - i_{b,last}|)]^2$  نیز حداکثر تغییرات جریان باتری در هر بازه کنترلی می‌باشند.

پارامتر بعدی که باید بهینه شود ولتاژ باس DC است که باتوجه به اتصال مستقیم ابرخازن به باس DC، با کنترل سطح شارژ ابرخازن می‌توان به این هدف دست یافت. بنابراین، جریان مطلوب ابرخازن ( $i_{sc,ref}$ ) را می‌توان از رابطه زیر تعیین کرد [۲۰]:

$$i_{sc,ref} = \left( \frac{SoC_{sc}}{SoC_{sc,ref}} - 1 \right) I_{c,max} \quad (۱۲)$$

در این رابطه،  $I_{c,max}$  جریان نامی قابل دریافت از ابرخازن می‌باشد. باتوجه به رابطه (۲) می‌توان رابطه (۱۲) را بصورت

### ۳- روش مدیریت انرژی پیشنهادی

باتوجه به اینکه شبکه دارای کمبود یا مازاد توان می‌تواند باشد، دو حالت کنترلی وجود خواهد داشت. این در حالی است که در کارهای پیشین بهینه‌سازی تنها برای حالت کمبود توان انجام شده است و در حالت مازاد توان، مقدار توان اضافی تنها توسط ذخیره‌سازی که به‌طور مستقیم به باس DC متصل باشد جذب می‌شود. اما در روش پیشنهادی، برای این حالت نیز مسئله بهینه‌سازی حل خواهد شد و نقطه کار بهینه تعیین می‌گردد.

متفاوت بودن روابط و قیود در هر کدام از این حالات سبب وجود دو مد کنترلی مجزا شده است. حفظ هماهنگی هنگام تغییر از حالت کمبود به حالت مازاد توان یا بالعکس چالش دیگر کنترلی می‌باشد که با به کارگیری کنترلی کننده شکل (۵) برطرف شده است.

مطابق شکل (۵)، روش مدیریت انرژی پیشنهادی به صورت برخط، جریان مرجع بهینه باتری را باتوجه به کمبود یا بیشبود توان در شبکه تعیین می‌نماید؛ سپس جریان مرجع با مقدار واقعی جریان باتری مقایسه می‌گردد و سیگنال خطا ایجاد می‌شود. در نهایت از کنترل کننده PI استفاده شده است تا با کنترل زمان وظیفه مبدل (D) این خطا را به صفر برساند. بهینه‌سازی و نحوه مدیریت انرژی برای هر کدام از این حالات نیز در ادامه بررسی خواهد شد.

#### ۳-۱- حالت کمبود توان

در این حالت، مقدار کمبود توان باید توسط ذخیره‌ساز ترکیبی جبران شود. بنابراین، مبدل DC/DC دو جهته باید در مد افزایش کار کند. افزایش طول عمر باتری به وسیله کاهش دامنه و تغییرات جریان باتری و تنظیم ولتاژ باس DC در مقدار مرجع، دو هدف بهینه‌سازی در این حالت

زیر بازنویسی کرد:

$$i_{sc,ref} = \left( \frac{V_{sc}^2}{V_{ref}^2} - 1 \right) I_{c,max} \quad (13)$$

که  $V_{sc}$  ولتاژ ابرخازن است که برابر است با ولتاژ باس DC یعنی  $V_{bus}$  و  $V_{ref}$  نیز مقدار مرجع ولتاژ باس DC می باشد. ملاحظه می شود که جریان ابرخازن طوری تعیین می گردد تا ولتاژ باس در مقدار مرجع تثبیت شود. اکنون تابع هدف ابرخازن به صورت زیر تعیین می شود:

$$f_c = 1 - c(i_c - i_{sc,ref})^2 \quad (14)$$

ضریب  $c$  جهت یکسازگی به کار برده شده است که برابر است با:

$$c = \frac{1}{(I_{sc,max} - i_{sc,ref})^2} \quad (15)$$

همان طور که ملاحظه می شود، سه تابع هدف ذکر شده، به یکدیگر مرتبط اند. بنابراین، مسئله بهینه سازی از نوع چند هدفی خواهد بود. به همین دلیل از روش وزنی برای حل این مسئله استفاده خواهد شد تا نقطه بهینه سراسری تعیین گردد. بنابراین تابع هدف نهایی بصورت زیر حاصل می شود:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } f_1(i_b, i_{sc}) \\ = -w_{b,ave} f_{b,ave} - w_{b,dif} f_{b,dif} - w_c f_c \end{aligned} \quad (16)$$

که قیود این تابع عبارتند از:

$$0 \leq (w_{b,ave}, w_{b,dif}, w_c) \leq 1 \quad (17)$$

$$w_{b,ave} + w_{b,dif} + w_c = 1 \quad (18)$$

در این روابط  $w_{b,ave}$ ،  $w_{b,dif}$  و  $w_c$  به ترتیب ضرایب وزنی دامنه جریان باتری، تغییرات جریان باتری و سطح شارژ ابرخازن می باشند. نحوه تعیین ضرایب وزنی در مرجع [۲۰] به تفصیل بیان شده است. لازم به ذکر است؛ علاوه بر قیود (۱۷) و (۱۸)، رابطه (۶) نیز قید دیگر برای مسئله بهینه سازی (۱۶) می باشد. به منظور حل این مسئله از شرایط KKT استفاده شده است [۲۶] تا بتوان بصورت برخط نقطه کار بهینه را تعیین نمود. با استفاده از این روش، مسئله بهینه سازی یک بار به صورت برون خط حل می شود. سرانجام رابطه ساده ای که بتوان با استفاده از آن بصورت بلادرنگ نقطه کار بهینه سراسری را تعیین کرد، حاصل می شود. گام اول در بکارگیری از این روش، تعیین تابع لاگرانژ ( $L$ ) باتوجه به تابع هدف و قیود می باشد:

$$\begin{aligned} L = -w_{b,ave} f_{b,ave} - w_{b,dif} f_{b,dif} \\ - w_c f_c + v[i_b(1-D_1) + i_{sc} - i_L] \end{aligned} \quad (19)$$

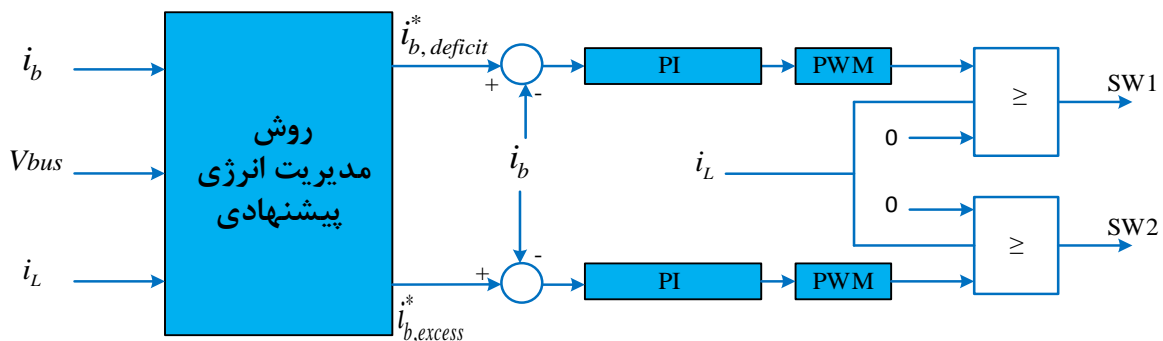
در این رابطه  $v$  ضریب لاگرانژ می باشد. در گام بعدی باید گرادیان تابع لاگرانژ برابر صفر قرار داده شود ( $\nabla L = 0$ ).

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial i_b} = 2aw_{b,ave}(i_b - i_{b,ave}) \\ + 2bw_{b,dif}(i_b - i_{b,last}) + v(1-D_1) = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\frac{\partial L}{\partial i_{sc}} = 2cw_c(i_{sc} - i_{sc,ref}) + v = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial L}{\partial v} = i_b(1-D_1) + i_{sc} - i_L = 0 \quad (22)$$

در نهایت با حل این روابط، نقطه بهینه سراسری به صورت زیر بدست می آید:



شکل ۵- ساختار کنترلی پیشنهادی

باتوجه به مطالب بیان شده؛ در این حالت، دو تابع هدف برای باتری وجود دارد. اولین مورد به حداقل رساندن تغییرات جریان شارژ باتری است که مشابه حالت کمبود توان از رابطه (۹) استفاده می‌شود. دومین تابع هدف نیز رعایت استاندارد جریان شارژ باتری ( $i_{ch, std}$ ) است که توسط سازنده توصیه می‌شود.

$$f_{b, std} = 1 - r(i_b - i_{ch, std})^2 \quad (26)$$

$$r = \frac{1}{(I_{ch, max} - I_{ch, std})^2} \quad (27)$$

که  $I_{ch, max}$  بیشینه جریان شارژ باتری و  $r$  نیز ضریب یک‌سازی می‌باشند.

تابع هدف سوم در این حالت، تثبیت ولتاژ باس DC می‌باشد که همانند حالت کمبود توان از رابطه (۱۴) استفاده می‌شود. بنابراین، مسئله بهینه‌سازی در این حالت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Minimize } f_2(i_b, i_{sc}) = -w_{ch, dif} f_{b, dif} - w_{ch, std} f_{b, std} - w_{ch, c} f_c \quad (28)$$

قیود این حالت علاوه بر (۷) عبارتند از:

$$0 \leq (w_{ch, dif} + w_{ch, std} + w_{ch, c}) \leq 1 \quad (29)$$

$$w_{ch, dif} + w_{ch, std} + w_{ch, c} = 1 \quad (30)$$

مشابه حالت کمبود توان در این حالت نیز از شرایط KKT استفاده می‌گردد. تابع لاگرانژ برای این حالت به صورت زیر بدست می‌آید:

$$L = -w_{b, dif} f_{b, dif} - w_{b, std} f_{b, std} - w_c f_c + v[i_b D_2 + i_{sc} - i_L] \quad (31)$$

سپس با برابر صفر قرار دادن گرادیان تابع لاگرانژ، نقطه کار بهینه بصورت از رابطه زیر تعیین خواهد شد:

$$i_b^* = \frac{aw_{ch, dif} i_{b, last} + rw_{b, std} i_{b, std} + cw_c D_2 (i_L - i_{sc, ref})}{aw_{ch, dif} + rw_{b, std} + cw_c D_2^2} \quad (32)$$

$$i_{sc}^* = i_L - i_b^* D_2 \quad (33)$$

$$i_b^* = \frac{aw_{b, ave} i_{b, ave} + bw_{b, dif} i_{b, last} + cw_c (1 - D_1) (i_L - i_{sc, ref})}{aw_{b, ave} + bw_{b, dif} + cw_c (1 - D_1)^2} \quad (23)$$

$$i_{sc}^* = i_L - i_b^* (1 - D_1) \quad (24)$$

همچنین جهت اطمینان از نتیجه بدست آمده، ماتریس هسین<sup>۴</sup> تابع لاگرانژ باید محاسبه شود:

$$\nabla^2 L = \begin{bmatrix} \frac{\partial L^2}{\partial i_b^2} & \frac{\partial L^2}{\partial i_b \partial i_{sc}} \\ \frac{\partial L^2}{\partial i_b \partial i_{sc}} & \frac{\partial L^2}{\partial i_{sc}^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2aw_{b, ave} + 2bw_{b, dif} & 0 \\ 0 & 2cw_c \end{bmatrix} \quad (25)$$

همانطور که ملاحظه می‌شود این ماتریس همواره مقدار مثبتی دارد. این موضوع نشان می‌دهد که نقطه کار تعیین شده توسط روابط (۲۳) و (۲۴) بصورت بهینه جریان شبکه را میان باتری و برخازن تقسیم می‌کند.

### ۳-۲- حالت مازاد توان

در مقالات پیشین که از این روش جهت مدیریت انرژی برخط استفاده شده است، از مبدل یک جهته افزایشده استفاده شده و بهینه‌سازی تنها در حالت کمبود توان صورت گرفته است. بنابراین، تنها ذخیره‌سازی که به طور مستقیم به باس DC متصل باشد قابلیت ذخیره‌سازی مازاد را دارد. این موضوع به معنی مشارکت یکی از ذخیره‌سازها در حالت بیشبود توان می‌باشد که به دلیل اتصال مستقیم به باس DC سبب تغییرات ولتاژ باس DC می‌شود. اما در این مقاله، مسئله بهینه‌سازی برای این حالت نیز انجام شده است.

در این حالت، مبدل در حالت کاهنده کار می‌کند و باتری را شارژ می‌نماید. فرآیند شارژ باتری باتوجه به سطح شارژ آن به دو قسمت جریان ثابت و ولتاژ ثابت تقسیم می‌شود [۲۷]. در باتری‌های لیتیوم-یون از سطح شارژ صفر تا ۸۰٪ حالت جریان ثابت و از ۸۰٪ تا ۱۰۰٪ حالت ولتاژ ثابت می‌باشد. در این مقاله به منظور افزایش طول عمر باتری، سطح شارژ باتری بین ۲۰٪ تا ۸۰٪ محدود می‌شود. بنابراین می‌توان باتری را بصورت جریان ثابت شارژ نمود.

<sup>4</sup> The Hessian matrix



#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

به منظور بررسی عملکرد روش مدیریت انرژی مبتنی بر بهینه‌سازی برخط پیشنهادی، شبیه‌سازی رایانه‌ای در نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK انجام شده است. روش پیشنهادی با روش‌های مبتنی بر فیلتر با فرکانس قطع تطبیقی [۸ و ۹] و کنترل‌کننده منطق فازی [۱۳] مقایسه خواهد شد. در روش مبتنی بر فیلتر مرجع [۸] فرکانس قطع فیلتر با استفاده از روش فازی [۹] تنظیم می‌شود. همچنین، بررسی و مقایسه عملکرد روش پیشنهادی در سه سناریو مختلف بررسی خواهد شد.

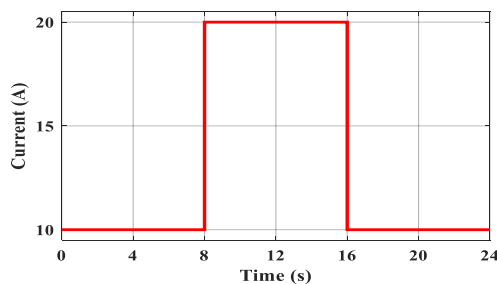
بلوک دیاگرام کنترلی مورد مطالعه در شبیه‌سازی مطابق شکل (۵) می‌باشد. مشخصات سیستم مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین سطح شارژ اولیه باتری برابر ۷۰٪ و سطح ولتاژ اولیه ابرخازن برابر ۴۸ ولت در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مشخصات سیستم مورد مطالعه

باتری لیتیوم-یوم LIR18650	3.78 V/cell, 3 Ah/cell ۱۴ باتری سری در ۳ ردیف موازی
ماژول ابرخازن (BMOD0058 E016 C02 Maxwell)	58 F, 16 V ۴ ماژول سری
مبدل DC/DC	$L=1.5\text{ mH}$ , $C=1.2\text{ mF}$ $f_{sw}=20\text{ KHz}$
ولتاژ ریزش‌بکه	$V_{bus}=250\text{ V}$
زمان نمونه برداری	0.1 s

#### ۴-۱- حالت کمبود توان

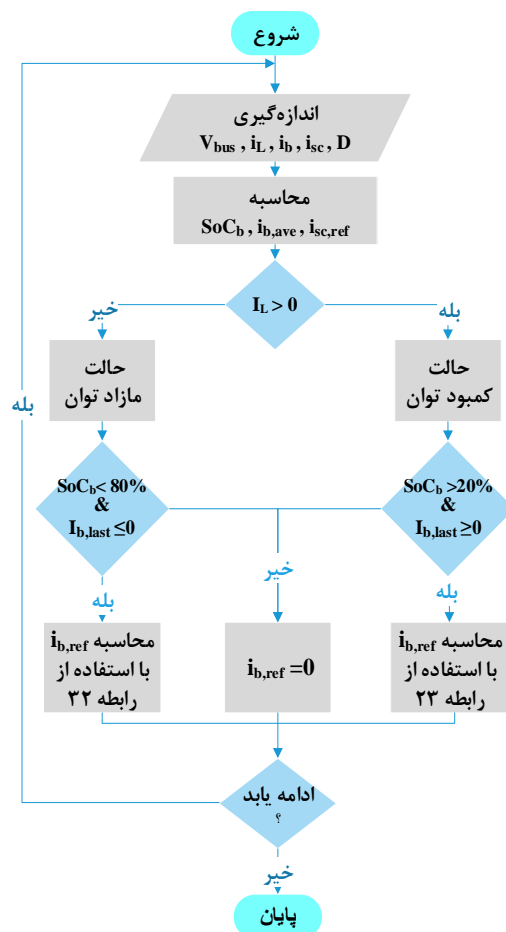
در این حالت، تقاضای کل بالاتر از میزان توان تولیدی است. مقدار کمبود توان باید توسط ذخیره‌ساز ترکیبی جبران شود تا ولتاژ باس افت نکند. به منظور بررسی عملکرد روش مدیریت انرژی پیشنهادی در این حالت، یک مشخصه بار پالسی مطابق شکل (۷) در نظر گرفته شده است.



شکل ۷- پروفیل جریان بار در حالت کمبود توان

لازم به ذکر است که تمام این محاسبات یک بار به صورت تئوری برای حالت‌های بیش‌بود و کمبود توان انجام می‌شود. در کنترل‌کننده تنها از روابط (۲۳) و (۳۲) به ترتیب برای حالت کمبود توان و مازاد توان استفاده خواهد شد و نقطه بهینه سراسری به صورت برخط تعیین می‌گردد.

در نهایت، فلوجارت روش مدیریت انرژی مبتنی بر بهینه‌سازی برخط پیشنهادی در شکل (۶) ارائه شده است. همان‌طور که بیان شد، تنها با استفاده از روابط (۲۳) و (۳۲) می‌توان نقطه کار بهینه سراسری را در هر تکرار کنترلی بدست آورد. این موضوع نشان دهنده قابلیت به کارگیری روش مدیریت انرژی پیشنهادی به صورت بلادرنگ می‌باشد. علاوه بر موارد ذکر شده، در روش پیشنهادی، در صورت تغییر حالت مستقیم از حالت شارژ به دشارژ یا برعکس، به منظور افزایش طول عمر باتری، با صفر قرار دادن جریان مرجع باتری، یک دوره کنترلی به عنوان زمان استراحت برای باتری در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۶- فلوجارت روش مدیریت انرژی مبتنی بر بهینه‌سازی برخط پیشنهادی

سرانجام در شکل (۸-ت) سطح شارژ باتری با استفاده از روش‌های کنترلی مختلف نشان داده شده است. باتوجه به اینکه در ۲۴ ثانیه شبیه‌سازی اجرا شده است؛ عملکرد بهتر روش پیشنهادی از نظر سطح شارژ از روی این شکل چندان مشهود نمی‌باشد. اما در جدول ۲ سطح شارژ نهایی باتری با استفاده از این سه روش کنترلی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همچنین عملکرد این سه روش از جهت پیک جریان باتری هنگام افزایش جریان بار در جدول ۲ مقایسه شده‌اند. همانطور که انتظار می‌رفت؛ روش مدیریت انرژی پیشنهادی سبب کاهش پیک جریان باتری می‌شود.

جدول ۲- مقایسه عملکرد روش‌های کنترلی از جهت پیک جریان دشارژ باتری و سطح شارژ نهایی، در حالت کمبود توان

روش کنترلی	پیک جریان باتری (A)		سطح شارژ نهایی باتری
	$0 < I < 8$	$8 < I < 16$	
روش پیشنهادی	18.4	36.8	69.63%
روش مبتنی بر فیلتر	22.6	41.6	69.628%
روش منطق فازی	24.1	42	69.621%

همچنین باتوجه به سطح شارژ نهایی، واضح است که با استفاده از روش پیشنهادی به ازای سطح شارژ یکسان، ذخیره‌ساز ترکیبی مدت زمان طولانی‌تری قادر به پاسخگویی کمبود توان خواهد بود. این موارد بیانگر این موضوع هستند که با استفاده از روش پیشنهادی طول عمر باتری افزایش خواهد یافت و اهداف ذکر شده در مسئله بهینه‌سازی برآورده شده‌اند.

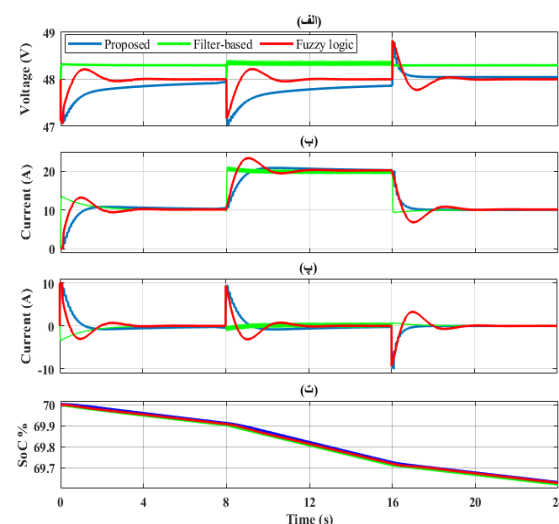
#### ۴-۲- حالت مازاد توان

همانطور که بیان شد؛ در این مقاله از مبدل دو جهته استفاده گردید و بهینه‌سازی برای حالت بیشبود توان نیز انجام گرفت. به منظور بررسی عملکرد روش مدیریت انرژی مبتنی بر بهینه‌سازی برخط پیشنهادی، در این حالت نیز یک پروفیل جریان پالسی مطابق شکل (۹) برای شبکه در نظر گرفته شده است. در زمان صفر ثانیه جریان مازاد شبکه به ۵ آمپر می‌رسد. سپس در ثانیه هشتم این مقدار به ۱۰ آمپر افزایش می‌یابد. مجدداً در ۱۶ ثانیه جریان مازاد برابر ۵ آمپر خواهد شد.

مطابق شکل در ۸ ثانیه ابتدایی، ۱۰ آمپر معادل ۴۸۰ وات کمبود توان وجود دارد که این مقدار در ۸ ثانیه دوم به ۲۰ آمپر افزایش می‌یابد و مجدداً در ۱۶ تا ۲۴ ثانیه به ۱۰ آمپر باز می‌گردد.

عملکرد روش مدیریت انرژی پیشنهادی در شرایط پروفیل بار شکل (۷)، در مقایسه با روش مبتنی بر فیلتر و روش فازی در شکل (۸) ارائه شده است. در این شکل ولتاژ باس DC، جریان خروجی مبدل باتری، جریان ابرخازن و سطح شارژ باتری ارائه شده است. همانطور که در شکل (۸-الف) ملاحظه می‌شود هر سه روش قادر به حفظ ولتاژ باس DC در مقدار مطلوب می‌باشند. البته در روش فازی مقدار انحراف حتی در حالت ماندگار وجود دارد که این مقدار خطا در محدود مقدار مجاز (حداکثر انحراف ولتاژ ۰.۵٪) می‌باشد. همچنین باتوجه به اینکه تنها این محدوده مجاز ولتاژ یک درجه آزادی برای روش مدیریت انرژی می‌باشد؛ روش پیشنهادی کندتر از روش مبتنی بر فیلتر به مقدار مرجع ولتاژ باس می‌رسد. توجه به پروفیل جریان باتری (شکل ۸-ب) این موضوع را تایید می‌کند. مطابق پروفیل جریان خروجی مبدل باتری، با استفاده از روش پیشنهادی جریان نرم‌تر و با پیک کمتری از باتری کشیده می‌شود.

شکل (۸-پ) نیز پروفیل جریان ابرخازن را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، ابرخازن در روش کنترلی پیشنهادی مشارکت بیشتری در زمان تغییرات بار دارد که به معنی کاهش تنش بر روی باتری است.



شکل ۸- نتایج شبیه‌سازی در حالت کمبود توان (الف) ولتاژ باس، (ب) جریان خروجی مبدل باتری، (پ) جریان ابرخازن و (ت) سطح شارژ باتری

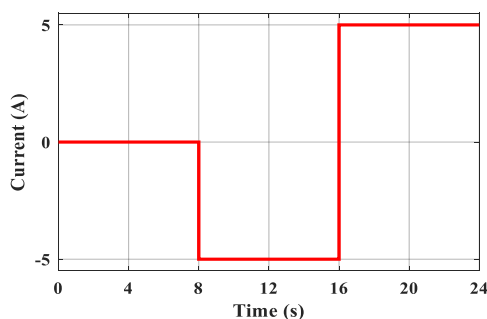
در جدول ۳ مقایسه شده‌اند. در این حالت نیز ملاحظه می‌گردد که سطح شارژ نهایی با استفاده از روش پیشنهادی بالاتر است.

جدول ۳- سطح شارژ نهایی باتری در حالت بیشبود توان

روش:	پیشنهادی	مبتنی بر فیلتر	منطق فازی
سطح شارژ نهایی باتری	70.175%	70.174%	70.170%

#### ۴-۳- تغییر وضعیت از حالت مازاد توان به کمبود توان

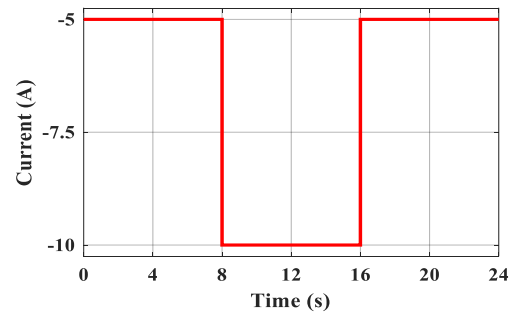
باتوجه به وجود دو مد کنترلی با روابط مجزا، این حالت به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی در تغییر وضعیت صحیح از حالت بیشبود به کمبود و یا بالعکس در نظر گرفته شده است. برای این منظور پروفیل جریان شبکه به صورت شکل (۱۱) در نظر گرفته شده است. مطابق شکل در ۸ ثانیه ثانیه ابتدایی شبکه در حالت تعادل است، سپس در ۸ ثانیه دوم به میزان ۵ آمپر جریان مازاد شبکه وجود دارد که می‌بایست توسط سیستم ذخیره گردد. در نهایت در ثانیه شانزدهم تغییر وضعیت از حالت مازاد توان به کمبود توان رخ می‌دهد.



شکل ۱۱- جریان شبکه با تغییر از حالت مازاد به کمبود توان

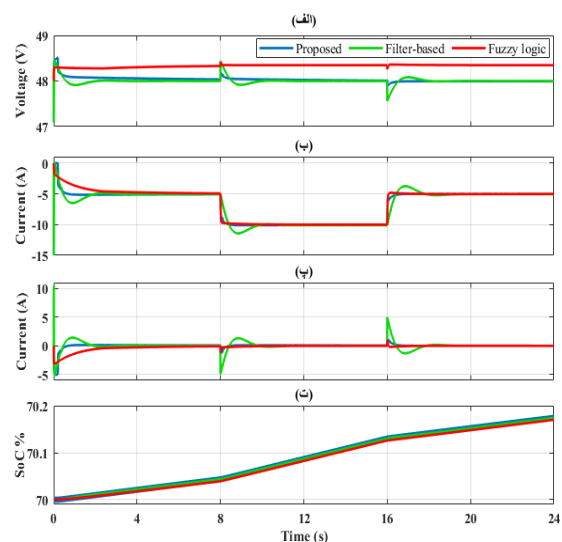
نتایج شبیه‌سازی برای این حالت در شکل (۱۲) ارائه شده است. در شکل (۱۲-الف) نشان داده شده است هر سه روش عملکرد مناسبی در تثبیت ولتاژ باس DC دارند و حداکثر انحراف ولتاژ در این حالت نیز کمتر از ۱٪ است. اما مجدداً مقدار ناچیزی خطای حالت ماندگار در روش فازی وجود دارد.

طبق شکل (۱۲-ب) و (۱۲-پ)، مطابق انتظار در هشت ثانیه اول مقدار جریان باتری و ابرخازن در روش پیشنهادی



شکل ۹- پروفیل جریان شبکه در حالت مازاد توان

نتایج شبیه‌سازی در حالت بیشبود توان در شکل ۱۰ ارائه شده است. شکل (۱۰-الف) نشان می‌دهد هر سه روش عملکرد مناسبی در تثبیت ولتاژ باس DC دارند و حداکثر انحراف ولتاژ نیز کمتر از ۱٪ است. البته در این حالت نیز روش فازی در حالت ماندگار نیز مقدار خطا در حفظ ولتاژ باس در مقدار مرجع دارد که قابل چشم پوشی است. شکل (۱۰-ب) و (۱۰-پ) به ترتیب جریان باتری و ابرخازن را نشان می‌دهند. ملاحظه می‌شود که در این حالت با استفاده از روش مدیریت انرژی پیشنهادی، باتری بدون نوسان و به صورت جریان ثابت شارژ می‌شود و حداکثر توان مازاد را جذب می‌نماید. این به معنی نقش کم ابرخازن در این حالت است.



شکل ۱۰- نتایج شبیه‌سازی در حالت بیشبود توان (الف) ولتاژ باس، (ب) جریان خروجی مبدل باتری، (پ) جریان ابرخازن و (ت) سطح شارژ باتری

شکل (۱۰-ت) نیز سطح شارژ ابرخازن را با استفاده از سه روش کنترلی مختلف نشان می‌دهد. در این حالت سطح شارژ نهایی باتری توسط روش پیشنهادی و دو روش دیگر

بالتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با استفاده از روش پیشنهادی علاوه بر تثبیت ولتاژ باس DC در مقدار مرجع، طول عمر باتری افزایش خواهد یافت.

جدول ۴- مقایسه عملکرد روش‌های کنترلی از جهت پیک جریان دشارژ باتری و سطح شارژ نهایی، در سناریو سوم

روش کنترلی	پیک جریان دشارژ باتری در $16 < t < 24$	سطح شارژ نهایی باتری
روش پیشنهادی	8.78 A	70%
مبتنی بر فیلتر	13.7 A	69.999%
منطق فازی	8.84 A	69.993%

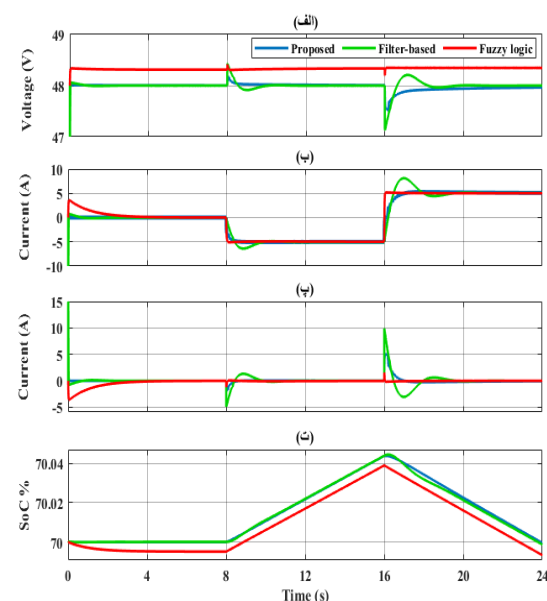
### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش جدید مدیریت انرژی مبتنی بر بهینه‌سازی برخط برای ذخیره‌ساز ترکیبی باتری/ابرخازن با ساختار نیمه فعال دو جهته در کاربرد ریز شبکه DC مستقل ارائه گردید. مسئله بهینه‌سازی برای حالت‌های کمبود توان شبکه (دشارژ ذخیره‌ساز ترکیبی) و بیشبود توان شبکه (شارژ ذخیره‌ساز) بررسی و حل گردید. اهدافی که با حل مسئله بهینه‌سازی حاصل شد عبارتند از: تثبیت ولتاژ باس DC در مقدار مرجع، کاهش دامنه جریان دشارژ باتری و همچنین نرخ تغییرات آن و شارژ باتری با جریان ثابت. این مسئله چند هدفی با استفاده از روش وزنی به مسئله تک هدفی تبدیل و با استفاده از شرایط KKT حل شد تا نقطه کار بهینه سراسری به صورت برخط تعیین شود تا روش کنترلی از نوع بلادرنگ باشد. همچنین ساختار کنترلی مناسب جهت حل چالش عملکرد صحیح در حالت تعادل، کمبود توان و بیشبود توان طراحی گردید.

در پایان نیز با استفاده از شبیه‌سازی، عملکرد روش پیشنهادی در سه سناریوی مختلف کمبود توان شبکه، بیشبود توان شبکه و تغییر وضعیت بین این دو حالت در بازه‌های زمانی ۲۴ ثانیه بررسی و با روش‌های مبتنی بر فیلتر با فرکانس قطع تطبیقی و روش فازی مقایسه گردید. نتایج بیانگر این مسئله هستند که با استفاده از روش پیشنهادی دامنه جریان دریافتی از باتری کاهش یافته و همچنین عمق دشارژ باتری نیز کمینه خواهد شد. بنابراین، طول عمر باتری با استفاده از روش پیشنهادی افزایش می‌یابد.

و روش مبتنی بر فیلتر برابر صفر است. اما روش فازی بعد از مدتی به صفر می‌رسد. در هشت ثانیه دوم باتری در جریان ثابت و بدون نوسان شارژ می‌شود. در ثانیه ۱۶ نیز با روش پیشنهادی یک دوره کنترلی به عنوان زمان استراحت برای باتری در نظر گرفته شده است و جریان مرجع باتری برابر صفر قرار داده شده است. در این زمان ۵ آمپر جریان مورد نیاز شبکه توسط ابرخازن تأمین می‌شود. سپس باتری به تدریج بار را تأمین می‌کند.

در شکل (۱۲-ت) نیز سطح شارژ باتری با استفاده از روش پیشنهادی در مقایسه با دو روش دیگر نشان داده شده است. مطابق شکل در ۱۶ ثانیه ابتدایی تفاوتی میان روش پیشنهادی و روش مبتنی بر فیلتر مشاهده نمی‌شود. اما از ثانیه ۱۶ که حالت کمبود توان رخ می‌دهد حتی با وجود استراحت باتری در یک دوره کنترلی با استفاده از روش پیشنهادی، مشخص است که باتری شارژ کمتری از دست می‌دهد. در جدول ۴ عملکرد سه روش از نظر پیک جریان باتری در حالت کمبود توان از ۱۶ تا ۲۴ ثانیه و همچنین سطح شارژ نهایی باتری مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۲- نتایج شبیه‌سازی با تغییر از بیشبود به کمبود توان (الف) ولتاژ باس، (ب) جریان خروجی مبدل باتری، (پ) جریان ابرخازن و (ت) سطح شارژ باتری

در این حالت نیز ملاحظه می‌شود که با استفاده از روش مدیریت انرژی پیشنهادی دامنه جریان کشیده شده از باتری کاهش یافته و همچنین سطح شارژ نهایی باتری نیز

## مراجع

- [۱] علیرضا ابراهیمی، عباس دیدبان و رضا کی پور، "استراتژی کنترلی نوین در سیستمهای انرژی ترکیبی بادی-خورشیدی بر مبنای تعیین محدوده های بهینه شارژ و دشارژ باتریها در بازه های زمانی مختلف". نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۵، دی ۱۳۹۷، صفحه ۱۶۳-۱۷۳.
- [2] O.A. Ahmed, and J.A.M. Bleijs, "Power flow control Methods for an ultracapacitor bidirectional converter in DC microgrids—A comparative study" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 26, Oct. 2013, pp. 727-738.
- [۳] پرویز نجفی، عباس هوشمند و مهدی شاهپرستی. "مبدل واسط ادغام شده با قابلیت متعادل سازی ولتاژهای لینک DC در ریزشبکه هیبریدی دوقطبی". نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۸، شماره ۶۰، خرداد ۱۳۹۹، صفحه ۲۰۱-۲۱۶.
- [4] C. Yin, H. Wu, F. Locment, and M. Sechilariu, "Energy management of DC microgrid based on photovoltaic combined with diesel generator and supercapacitor", *Energy Conversion and Management*, Vol. 132, Jan. 2017, Pages 14-27.
- [۵] جمشید آقائی، امین رحیمی رضایی و محمدرضا کریمی، "هماهنگی نیروگاههای بادی و دستگاههای ذخیره ساز سیستم قدرت در مسئله برنامه ریزی امنیت-مقید مشارکت واحدها با استفاده از بهینه سازی استوار". نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تیر ۱۳۹۷، صفحه ۲۰۷-۲۲۰.
- [6] H. GUENTRI, T. ALLAOUI, M. MEKKI, and M. DENAI, "Power management and control of a photovoltaic system with hybrid battery-supercapacitor energy storage based on heuristics methods", *Journal of Energy Storage*, Vol. 39, July 2021.
- [7] G. Oriti, N. Anglani, and A. L. Julian, "Hybrid Energy Storage Control in a Remote Military Microgrid with Improved Supercapacitor Utilization and Sensitivity Analysis", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Sept.-Oct. 2019, pp. 6372-6378.
- [8] S. K. Kollimalla, M. K. Mishra, and N. L. Narasamma, "Design and Analysis of Novel Control Strategy for Battery and Supercapacitor Storage System", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 5, No. 4, Oct. 2014, pp. 1137-1144.
- [9] F. Tao, L. Zhu, Z. Fu, P. Si, and L. Sun, "Frequency Decoupling-Based Energy Management Strategy for Fuel Cell/Battery/Ultracapacitor Hybrid Vehicle Using Fuzzy Control Method", *IEEE Access*, Vol. 8, Sept. 2020, pp. 166491-166502.
- [10] P. Lin, P. Wang, J. Xiao, J. Wang, C. Jin, and Y. Tang, "An Integral Droop for Transient Power Allocation and Output Impedance Shaping of Hybrid Energy Storage System in DC Microgrid", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33, No. 7, July 2018, pp. 6262-6277.
- [11] Y. Wang, Z. Sun, and Z. Chen, "Development of energy management system based on a rule-based power distribution strategy for hybrid power sources", *Energy*, Vol. 175, May 2019, pp. 1055-1066.
- [12] A. J. Abianeh, and F. Ferdowsi, "Sliding Mode Control Enabled Hybrid Energy Storage System for Islanded DC Microgrids with Pulsing Loads", *Sustainable Cities and Society*, Oct. 2021, Vol. 73.
- [13] K. M. Kotb, M. F. Elmorshedy, H. S. Salama, and A. Dán, "Enriching the stability of solar/wind DC microgrids using battery and superconducting magnetic energy storage based fuzzy logic control", *Journal of Energy Storage*, vol. 45, Jan. 2022.
- [14] M. Wiczorek, and M. Lewandowski, "A mathematical representation of an energy management strategy for hybrid energy storage system in electric vehicle and real time optimization using a genetic algorithm", *Applied Energy*, Vol. 192, April 2017, pp. 222-233.
- [15] A. Elgammal, "An Efficient Energy Management Scheme for a Hybrid FC-SC-Battery Electric Vehicle using Model Predictive Control and Multi-Objective Particle Swarm Optimization", *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, Vol.8, Issue-4, Nov. 2019, pp. 4368-4380.
- [16] C. Liu, Y. Wang, L. Wang, and Z. Chen, "Load-adaptive real-time energy management strategy for battery/ultracapacitor hybrid energy storage system using dynamic programming optimization", *Journal of Power Sources*, Vol. 438, Oct. 2019.

- [17] J. Shen, and A. Khaligh, "A Supervisory Energy Management Control Strategy in a Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System", IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 1, No. 3, Oct. 2015, pp. 223-231.
- [18] L. Wang, Y. Wang, C. Liu, D. Yang, and Z. Chen, "A Power Distribution Strategy for Hybrid Energy Storage System Using Adaptive Model Predictive Control", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 35, No. 6, June 2020, pp. 5897-5906.
- [19] X. Lu, Y. Chen, M. Fu, and H. Wang, "Multi-Objective Optimization-Based Real-Time Control Strategy for Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Management Systems", IEEE Access, Vol. 7, 2019, pp. 11640-11650.
- [20] H. Yin, C. Zhao, M. Li, and C. Ma, "Utility Function-Based Real-Time Control of a Battery Ultracapacitor Hybrid Energy System", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 11, No. 1, Feb. 2015, pp. 220-231.
- [21] J. Shen, and A. Khaligh, "Design and Real-Time Controller Implementation for a Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 12, No. 5, Oct. 2016, pp. 1910-1918.
- [22] H. Miniguano, A. Barrado, A. Lázaro, P. Zumel, and C. Fernández, "General Parameter Identification Procedure and Comparative Study of Li-Ion Battery Models", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 69, No. 1, Jan. 2020, pp. 235-245.
- [23] E. D. Kostopoulos, G. C. Spyropoulos, and J. K. Kaldellis, "Real-world study for the optimal charging of electric vehicles", Energy Reports, Vol. 6, Nov. 2020, pp. 418-426.
- [24] L. Zhang, Z. Wang, X. Hu, F. Sun, and D.G. Dorrell, "A comparative study of equivalent circuit models of ultracapacitors for electric vehicles", Journal of Power Sources, Vol. 274, Jan. 2015, pp. 899-906.
- [25] N. Mohan, T.M. Undeland, and W.P. Robbins, "Power Electronics: Converters, Applications, and Design", John Wiley and Sons, 3rd Edition, 2002.
- [26] S. Boyd, and L. Vandenberghe, Convex Optimization, first edition, Cambridge university press, NY, USA 2004.
- [27] A. Abdollahi, X. Han, N. Raghunathan, B. Pattipati, B. Balasingam, K.R. Pattipati, Y. Bar-Shalom, and B. Card, "Optimal charging for general equivalent electrical battery model, and battery life management", Journal of Energy Storage, Vol. 9, Feb. 2017, pp. 47-58.