**J**ournal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 14 - No. 1 – Spring 2025
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

**Research Article**

# Simultaneous Optimization of Energy Storage Performance and Load Unbalance Reduction in Renewable-Based Microgrids Using Single-Phase Electric Vehicles

**Mehran Alitabar[1], *PhD Student*, Mohsen Sedighi[2,*], *Assistant Professor*, Seyed Mehdi Abedi Pahnehkolaei[3], *Assistant Professor*, Alireza Ghafouri[4], *Assistant Professor***

[1] Department of Electrical Engineering, Sar.C., Islamic Azad University, Sari, Iran, mehran.alitabar@iau.ac.ir
[2] Department of Electrical Engineering, Sar.C., Islamic Azad University, Sari, Iran, m.sedighi@iausari.ac.ir
[3] Department of Electrical Engineering, Sar.C., Islamic Azad University, Sari, Iran, m.abedi.p@iausari.ac.ir
[4] Department of Electrical Engineering, Sar.C., Islamic Azad University, Sari, Iran, ghafouri@iausari.ac.ir

**Abstract:**
This paper presents an innovative approach for enhancing the performance of renewable-based microgrids (MGs) by focusing on two key aspects: optimal operation of energy storage systems and reduction of load unbalance. First, a detailed model of the energy storage system is developed, and its optimal sizing is performed using a stepwise optimization algorithm considering stability indicators, state of charge (SoC), and battery lifetime, and battery lifetime. Several scenarios with different SoC ranges are defined to evaluate their effect on power fluctuation. A novel quantitative index, referred to as the Smoothness Index (SI), is proposed and used to assess the performance of the system in each scenario. In the second step, an adaptive decision-making algorithm is proposed to utilize single-phase electric vehicles (EVs) for load balancing and neutral current reduction. The proposed algorithm adaptively assigns EVs to the underloaded phases in the MG. Simulation results show that operating the battery within the SoC range of 20% to 80% provides a suitable trade-off between power smoothing and battery durability. Moreover, the intelligent deployment of single-phase EVs leads to a 48% reduction in neutral current and a 12% increase in the SI index. The findings indicate that combining optimized storage utilization with smart EV allocation can significantly improve power quality and operational stability in MGs.

**Keywords:** Microgrid, Energy Storage System, State of Charge (SoC), Single-Phase Electric Vehicle, Power Fluctuation, Load Unbalance

**Received:** 5 March 2025
**Revised:** 19 May 2025
**Accepted:** 25 May 2025

*** Corresponding Author:** Dr. Mohsen Sedighi

Citation: Mehran Alitabar, Mohsen, Seyed Mehdi Abedi Pahnehkolaei, Alireza Ghafouri, “Simultaneous Optimization of Energy Storage Performance and Load Unbalance Reduction in Renewable-Based Microgrids Using Single-Phase Electric Vehicles”, Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 14, no. 1, 61-81, June2025 (in Persian).

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]

**مقاله پژوهشی**

# بهینه‌سازی هم‌زمان عملکرد سیستم ذخیره‌سازی و کاهش عدم تعادل بار در ریزشبکه‌های تجدیدپذیر با استفاده از خودروهای الکتریکی تک‌فاز

**مهران علی‌تبار[۱]، محسن صدیقی[۲،*]، سید مهدی عابدی پهنه کلایی[۳]، علیرضا غفوری[۴]**

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی برق، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران، mehran.alitabar@iau.ac.ir

*۲- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران، m.sedighi@iausari.ac.ir

۳- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران، m.abedi.p@iausari.ac.ir

۴- استادیار, گروه مهندسی برق، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران، ghafouri@iausari.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، رویکردی نوین برای بهبود عملکرد ریزشبکه‌های مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر با تمرکز بر دو جنبه اصلی، یعنی بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌سازی انرژی و کاهش عدم تعادل بار ارائه شده است. در گام نخست، یک مدل دقیق برای سیستم ذخیره‌سازی انرژی طراحی و سایزبندی بهینه آن با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی مرحله‌ای و با درنظر گرفتن شاخص‌های پایداری، سطح شارژ (SoC)، و طول عمر مؤثر باتری انجام شده است. رویکردهای مختلفی در خصوص دامنه مجاز SoC تعریف گردید تا اثر آن بر نوسانات توان خروجی بررسی شود. سپس یک شاخص کمی به‌نام شاخص همواری توان (SI) توسعه یافته و برای تحلیل کیفی سناریوها به‌کار گرفته شده است. در گام دوم، یک الگوریتم تصمیم‌گیری تطبیقی برای تخصیص هوشمند خودروهای الکتریکی تک‌فاز جهت متعادل‌سازی بار و کاهش جریان نول ارائه شده است. الگوریتم پیشنهادی، اتصال خودروها به فازهای کم‌بار را به‌صورت پویا و تطبیقی مدیریت می‌کند. نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از آن است که بهره‌برداری از ذخیره‌ساز در بازه SoC بین ۲۰ تا ۸۰ درصد، هم پایداری مناسبی فراهم می‌کند و هم طول عمر باتری را افزایش می‌دهد. هم‌چنین، استفاده از خودروهای الکتریکی موجب کاهش ۴۸ درصد جریان نول و افزایش ۱۲ درصد شاخص SI شده است. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب راهبردهای هوشمند بهره‌برداری از ذخیره‌ساز و تخصیص خودروها، موجب بهبود چشم‌گیر کیفیت توان در ریزشبکه می‌شود.

**کلمات کلیدی:** ریزشبکه، سامانه ذخیره‌سازی انرژی، سطح شارژ، خودرو الکتریکی تک‌فاز، نوسانات توان، نامتعادلی بار

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۳/۱۲/۵

**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۲/۳۰

**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۳/۴

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر محسن صدیقی

**نشانی نویسنده مسئول:** گروه مهندسی برق- واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

**۱- مقدمه**

در سال‌های اخیر، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در قالب ریزشبکه‌ها به‌عنوان یکی از راه‌کارهای مؤثر برای تأمین پایدار انرژی الکتریکی مورد توجه قرار گرفته است. با این‌حال، نوسانات ذاتی تولید این منابع، به‌ویژه توربین‌های بادی، موجب بروز مشکلاتی در پایداری توان و کیفیت ولتاژ شبکه می‌گردد. برای مقابله با این چالش، بهره‌گیری از سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی و طراحی راهبردهای کنترلی نوین امری ضروری است. از سوی دیگر، حضور بارهای نامتعادل و تک‌فاز در ساختار ریزشبکه‌های توزیعی، موجب افزایش جریان نول، تلفات انرژی، و کاهش بهره‌وری سیستم می‌شود. در چنین شرایطی، استفاده هدفمند از ظرفیت دینامیکی خودروهای الکتریکی می‌تواند به‌عنوان یک راه‌کار مکمل و اقتصادی برای متعادل‌سازی بار و بهبود کیفیت توان مطرح گردد.

در مطالعه [۱]، رویکردی مؤثر جهت ترکیب توان تولیدی توربین‌های بادی با سیستم ذخیره‌سازی ترکیبی (HESS[1]) مورد بررسی قرار گرفته است. این سیستم شامل یک فلایویل و یک باتری ذخیره‌ساز انرژی (BESS[2]) می‌باشد. آزمایش‌ها بر مبنای یک توربین بادی ۲ مگاواتی انجام شده که مستقیماً به سامانه ذخیره‌سازی متصل است. روش ارائه‌شده بر پایه اصل تخمین اختلالات هم‌زمان تصادفی عمل کرده و هدف آن کاهش نوسانات توان خروجی توربین و بار اعمال‌شده بر باتری است.

مطابق [۲]، برای هموارسازی توان بادی از یک HESS متشکل از باتری و ابرخازن بهره گرفته شده که بر مبنای تبدیل موجک دینامیکی عمل می‌کند. این روش محدودیت‌های عملکردی باتری و عدم قطعیت موجود در توان باد را نیز لحاظ کرده است. مدل پیش‌بینی باد در این تحقیق با استفاده از مجموعه عدم‌قطعیت نوع جعبه‌ای طراحی شده است. سامانه کنترلی با استفاده از یک مبدل چندپورت (MPC[3]) تنظیم شده که با بهره‌گیری از اینورترهای DC-AC به شبکه متصل می‌شود و با توجه به وضعیت شارژ (SoC[4]) تجهیزات ذخیره‌سازی و پیش‌بینی کوتاه‌مدت تولید باد، عملیات شارژ و دشارژ به‌صورت پیوسته مدیریت می‌شود.

در مرجع [۳]، یک رویکرد فرکانسی برای تعیین ظرفیت بهینه HESS به‌منظور کاهش نوسانات توان باد ارائه شده است. تمرکز اصلی بر انتخاب توان و ظرفیت مناسب اجزای ذخیره‌سازی است به‌گونه‌ای که کل هزینه در بازه بهره‌برداری به حداقل برسد. در این استراتژی، دو سطح مدیریتی تعریف شده: سطح اول برای تنظیم خروجی توان HESS و سطح دوم جهت کنترل تبادل انرژی بین باتری و ابرخازن. جهت بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی، الگوریتم ترکیبی PSO[5]-GA[6] به‌کار گرفته شده است.

مطالعه [۴] به ارزیابی و تحلیل استراتژی‌های کنترل نوسانات توان بادی و تقسیم انرژی بین اجزای HESS پرداخته است. در این راستا، عملکرد چند فیلتر شامل CLF[7]، VLF[8]، WPD[9] و EMD[10] با یکدیگر مقایسه شده و نهایتاً الگوریتمی تحت عنوان فیلتر پایین‌گذر برای تخصیص انرژی بین باتری و ابرخازن پیشنهاد شده است که می‌تواند مشکل شارژ یا دشارژ بیش‌ازحد را در مقایسه با فیلترهای مرسوم کاهش دهد.

بر اساس مرجع [۵]، یک روش کنترلی با هدف بهبود پایداری توان بادی و ارتقاء عملکرد اقتصادی سیستم ذخیره‌سازی ترکیبی شامل FESS[11] و BESS توسعه یافته است. این مدل با در نظر گرفتن نرخ‌های بهینه شارژ/دشارژ برای هر یک از اجزا، از الگوریتمی با عنوان کنترل توالی بهره می‌برد که با توجه به ویژگی‌های اجزای HESS، زمان‌بندی دقیق عملیات را انجام می‌دهد. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که روش کنترل توالی ارائه‌شده نسبت به شیوه‌های سنتی برتری دارد.

در مرجع [۶]، کیفیت هموارسازی توان خروجی توربین بادی با شاخص MVP[12] مورد ارزیابی قرار گرفته است. این شاخص حداکثر تغییر توان را در محدوده توان نامی و در یک بازه زمانی مشخص نشان می‌دهد و کاهش آن نمایانگر بهبود پایداری توان تولیدی است.

مطابق با [۷]، اثر حضور و عدم حضور سیستم‌های ذخیره‌سازی در کاهش نوسانات خروجی توربین‌های بادی تحلیل شده و اندازه بهینه تجهیزات ذخیره‌ساز نیز بررسی شده است. مرجع [۸] نیز با تمرکز بر بهبود عملکرد ژنراتور بادی و باتری ذخیره در شبکه‌های توزیع شعاعی نامتعادل، کارایی آن‌ها را در چنین ساختارهایی افزایش داده است؛ هرچند نتایج آن به شرایط خاص شبکه وابسته است.



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

در مطالعه [۹]، از ترکیب واحدهای تولیدی مانند توربین بادی، فتوولتائیک و پیل سوختی همراه با سیستم‌های ذخیره‌سازی و مدل‌های پیش‌بینی تولید برای مدیریت فروش برق استفاده شده است. هم‌چنین در [۱۰]، با بهره‌گیری از یک مدل کامل شامل ابرخازن و طراحی مبدل کنترلی مبتنی بر منطق فازی، نوسانات توان خروجی توربین بادی کاهش یافته است. این مقالات با ترکیب چند منبع انرژی نسبت به تحقیقات پیشین عملکرد بهتری داشته‌اند، گرچه وضعیت انرژی برداشت‌شده به‌طور کامل در مدل‌سازی لحاظ نشده است.

مرجع [۱۱] کاربرد الگوریتم فازی را برای کاهش نوسانات خروجی توربین بادی معرفی کرده و [۱۲] استفاده از باتری‌های لیتیومی را برای بهبود پایداری توان خروجی پیشنهاد داده است.

تحقیق [۱۳] بر تحلیل وضعیت عدم تعادل بارهای AC و DC در یک ریزشبکه متکی بر منابع ترکیبی تمرکز دارد. این تحقیق به بررسی نحوه عملکرد سیستم در حالت‌های متصل و منفصل از شبکه می‌پردازد و برای کاهش هزینه‌ها، از تکنیک کاهش بار در زمان اتصال به شبکه بی‌نهایت استفاده کرده است.

در [۱۴]، الگوریتم ارشمیدس به‌روزرسانی شده برای مدیریت انرژی خودروهای برقی در شبکه‌های توزیع معرفی شده که به تحلیل شاخص‌هایی همچون پایداری ولتاژ و تلفات توان می‌پردازد. بر اساس [۱۵]، ارزیابی عملکرد خودروهای برقی در ریزشبکه‌هایی با منابع تجدیدپذیر و با لحاظ تغییرات تصادفی در تولید انجام شده است.

مطابق با مرجع [۱۶]، با هدف بهره‌برداری بهتر از منابع تجدیدپذیر، یک سیستم شارژ برخط برای خودروهای برقی با استفاده از توربین بادی و سلول خورشیدی طراحی شده است. در [۱۷] نیز، روش کنترل پیش‌بین در ریزشبکه‌های متقارن و نامتقارن برای استفاده از توان راکتیو ذخیره‌شده در زیرساخت‌های شارژ خودروها ارائه شده است.

در تحقیق [۱۸]، یک مدل زمان‌بندی چندهدفه برای شارژ خودروهای برقی در شبکه توزیع معرفی شده که هم کاهش هزینه و هم افزایش بهره‌وری انرژی خورشیدی را در بر دارد. هم‌چنین مرجع [۱۹]، با ترکیب اطلاعات اندازه‌گیری شده واقعی، راه‌کاری برای افزایش سودآوری خودروهای برقی در چنین شبکه‌هایی ارائه داده است. در نهایت، در [۲۰] نیز راه‌کار مؤثری برای کاهش نوسانات توان خروجی منابع بادی مطرح شده است. هم‌چنین سیستم کنترل توربین بادی نیز به روش کنترل ردیابی نقطه ماکزیمم توان (MPPT[13]) انجام شده است.

در مطالعه [۲۱]، یک مدل جامع برای توسعه هم‌زمان تولید و انتقال انرژی با در نظرگرفتن آلایندگی زیست‌محیطی، منابع بادی و ادوات FACTS پیشنهاد شده است. این مدل با استفاده از روش خطی‌سازی، به‌صورت MILP فرمول‌بندی شده و در محیط GAMS پیاده‌سازی گردیده است. این مقاله به‌خوبی نشان می‌دهد که ترکیب برنامه‌ریزی تولید با ابزارهای کنترلی پیشرفته می‌تواند نقش مهمی در افزایش سودآوری و کاهش آلودگی ایفا کند. مقاله [۲۲] یک چارچوب انعطاف‌پذیر و هوشمند برای مدیریت انرژی در شبکه‌های توزیع آینده‌محور پیشنهاد می‌دهد که در آن با ترکیب منطق فازی و الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی چندهدفه انجام شده است. این مدل توانایی پاسخ‌گویی به رفتار دینامیکی بار، عدم قطعیت تولید و تعامل بین منابع مختلف مانند ذخیره‌سازها و خودروهای برقی را داراست و نتایج قابل‌توجهی در بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات انرژی ارائه می‌کند. مرجع [۲۳] نیز به بهبود عملکرد توربین بادی و کاهش نوسانات توان خروجی توربین بادی و افزایش انرژی خروجی آن پرداخته است.

در مقاله [۲۴]، به‌منظور رفع محدودیت‌های رایج در سیستم‌های حفاظتی توربین‌های بادی DFIG، یک محدودکننده جریان خطای مقاومتی با قابلیت سوئیچینگ معرفی شده است. این سیستم از نوسانات شدید گشتاور و شتاب ناگهانی روتور نیز جلوگیری می‌نماید، بدون آن‌که عملکرد شبکه در شرایط عادی مختل شود. مقاله [۲۵] با هدف افزایش بهره‌وری و انعطاف‌پذیری در سیستم‌های انرژی چندبخشی، به بررسی مشارکت بهینه هاب‌های انرژی در بازارهای روز-بعد و زمان واقعی پرداخته است.

مرجع [۲۶] نیز به پایداری سیستم توربین بادی در مقابل نفوذ اطلاعات اشتباه به داده‌های سیستم کنترلی این منبع تجدیدپذیر پرداخته است. هم‌چنین در [۲۷] نیز خرابی‌های به‌دست آمده روی پره‌های توربین‌های بادی مقیاس کوچک سنجیده شده است.



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

جدول (۱) به‌صورت خلاصه به مرور مطالعات پیشین در زمینه هموارسازی توان تولیدی و بهینه‌سازی بهره‌برداری از توربین‌های بادی پرداخته است. با تحلیل محتوای این جدول، می‌توان چند نکته کلیدی و شکاف اساسی در ادبیات پژوهش‌های گذشته را شناسایی کرد:

۱) اگرچه تمرکز عمده پژوهش‌ها بر کاهش نوسانات توان تولیدی توربین‌های بادی بوده، اما غالباً تأثیر بارهای نامتعادل در مدل‌سازی نادیده گرفته شده است. این در حالی است که در محیط‌های واقعی، به‌ویژه شبکه‌های توزیع، وجود بارهای نامتقارن امری متداول است و می‌تواند موجب افت کیفیت توان و عملکرد نامطلوب سیستم شود.

۲) تحلیل دقیق و ساختاریافته از خودروهای برقی به‌عنوان منابع ذخیره‌سازی سیار و ابزار جبران نامتعادلی، در اکثر تحقیقات مغفول مانده است. در بیشتر مطالعات، این خودروها تنها به‌عنوان مصرف‌کننده یا ذخیره‌ساز انرژی دیده شده و به‌عنوان بازیگران فعال در بهبود شرایط توان در حضور نامتعادلی بار دیده نشده‌اند.

۳) فرآیند سایزبندی بهینه ذخیره‌سازها در بسیاری از منابع، تنها با هدف کاهش نوسانات توان خروجی دنبال شده و اغلب تأثیر دینامیکی عمق شارژ (SoC) بر سلامت و طول عمر باتری نادیده گرفته شده است. این در حالی است که پژوهش حاضر با مدنظر قرار دادن سناریوهای مختلف مربوط به بازه‌های SoC، درصدد ایجاد تعادل میان پایداری توان و حفظ دوام ذخیره‌ساز انرژی است.

۴) اگرچه برخی مطالعات به بررسی سناریوهای مختلف بهره‌برداری پرداخته‌اند، اما مقایسه‌ای دقیق و کمی از عملکرد سیستم در بازه‌های متفاوت SoC ارائه نداده‌اند. در این تحقیق، این مسئله به‌طور عددی و با استفاده از شاخص‌های دقیق ارزیابی هموارسازی توان، بررسی و تحلیل شده است.

Table (1): Comparison between the references studied and the present article

**جدول (۱): مقایسه میان مراجع مطالعه شده با مقاله حاضر**

| مرجع | مدل ذخیره‌ساز | نحوه اتصال | روش موردنظر | کاربرد کلیدی |
|---|---|---|---|---|
| [۱] | BESS<br>Flywheel | موازی به‌همراه اینورتر | برنامه‌ریزی احتمالاتی | هموارسازی |
| [۲] | BESS<br>ابرخازن | موازی به‌همراه اینورتر | پیش‌بینی باد توسط تبدیل موجک | هموارسازی |
| [۳] | BESS<br>ابرخازن | موازی به‌همراه اینورتر | تعیین اندازه بهینه باتری | هموارسازی |
| [۴] | BESS<br>ابرخازن | موازی به‌همراه اینورتر | کنترل پیش‌بین، فیلتر گذاری – روش فازی | هموارسازی |
| [۵] | BESS<br>Flywheel | موازی به‌همراه اینورتر | پیش‌بینی باد توسط استراتژی کنترل توالی | هموارسازی |
| [۶] | BESS | موازی به‌همراه اینورتر | کنترل توان راکتیو | هموارسازی و اصلاح ضریب قدرت |
| [۷] | سلول سوختی و اکسید فلزی | چندکاربره | تعیین اندازه بهینه | هموارسازی و تعیین اندازه بهینه |
| [۸] | باتری اسیدی | همراه با بار نامتعادل | بهینه‌سازی اندازه باتری | هموارسازی و تعیین اندازه بهینه |
| [۱۰] | ابرخازن | مبدل کامل | فازی | بهبود توان خروجی |
| [۱۱] | باتری اسیدی | موازی | فازی | بهبود توان خروجی |
| [۱۲] | باتری لیتیوم یون | متصل به شبکه سراسری | تعیین اندازه بهینه باتری | هموارسازی |
| [۲۰] | ابرخازن | موازی | بهبود بهره‌برداری | هموارسازی |
| مقاله حاضر | ابرخازن | موازی با شبکه | تعیین اندازه بهینه باتری و بهره‌برداری مناسب از آن | بهره‌برداری مناسب از باتری و بهبود عملکرد آن |



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

نوآوری‌های پژوهش حاضر را می‌توان در سه محور اصلی زیر خلاصه کرد:

۱) توسعه یک شاخص نوین برای ارزیابی همواری توان تولیدی با هدف کمی‌سازی پایداری سیستم ذخیره‌سازی؛
۲) طراحی و تحلیل سناریوهای بهره‌برداری مختلف از ذخیره‌ساز انرژی با درنظر گرفتن دامنه‌های متفاوت سطح شارژ (SoC) و بررسی تأثیر آن بر شاخص‌های عملکردی؛
۳) ارائه یک الگوریتم هدفمند و هوشمند برای تخصیص خودروهای الکتریکی تک‌فاز به فازهای شبکه با هدف کاهش جریان نول و متعادل‌سازی بار

اهداف اصلی این تحقیق عبارت‌اند از:

- کاهش نوسانات توان خروجی توربین‌های بادی با بهره‌گیری از سامانه ذخیره‌سازی بهینه‌شده؛
- تحلیل اثر محدوده‌های مختلف سطح شارژ بر عملکرد سیستم و یافتن بازه بهینه SoC؛
- بهبود تعادل بار و کاهش جریان نول با استفاده از خودروهای الکتریکی تک‌فاز؛
- افزایش کیفیت توان و کاهش تلفات انرژی در ریزشبکه‌های توزیعی

بر این اساس، ساختار مقاله به شرح زیر تنظیم شده است: در بخش دوم، مدل‌سازی اجزای اصلی شامل توربین بادی، سیستم ذخیره‌سازی و بارهای نامتعادل ارائه می‌گردد. بخش سوم به معرفی رویه پیشنهادی شامل شاخص‌های ارزیابی، سناریوهای بهره‌برداری و مکانیزم کنترل خودروهای الکتریکی اختصاص دارد. در بخش چهارم، نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و تحلیل‌های مقایسه‌ای ارائه می‌شود. نهایتاً در بخش پنجم، بحث تفصیلی نتایج و در بخش ششم، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری بیان شده است.

## ۲- مدل‌سازی

در این بخش از مقاله، به مدل‌سازی سیستم توربین بادی، ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی، بارهای نامتعادل ریزشبکه و هم‌چنین ساختار ریزشبکه و اتصال ادوات مختلف به آن پرداخته خواهد شد.

### ۲-۱- مدل‌سازی توربین بادی

توان خروجی حاصل از توربین بادی ($P_t$) با توجه به رابطه (۱) به‌دست می‌آید [۲۸] و [۲۹]:

$$P_t = \frac{1}{2}\rho A C_p(\lambda,\theta) v^3 \tag{۱}$$

در رابطه (۱)، ρ برابر چگالی هوا بر حسب $kg/m^3$، A برابر سطح جاروب شده توسط پره‌های روتور برحسب $m^2$، v برابر سرعت باد بر حسب m/s و $C_P$ ضریب توان توربین می‌باشد. توجه شود این ضریب توان تابعی از نسبت سرعت نوک پره (TSR[14] یا λ) و زاویه پره (θ) می‌باشد. مقدار TSR با توجه به (۲) بیان می‌گردد:

$$\lambda = \frac{R\omega_t}{V} \tag{۲}$$

به‌طوری‌که $\omega_t$ سرعت رتور توربین می‌باشد. مقدار ضریب توان $C_P$ نیز تابعی غیرخطی از مؤلفه‌های توربین بادی و مقادیر تلفات در فرآیند تبدیل انرژی می‌باشد. این مقدار با استفاده از (۳) تقریب زده می‌شود.

$$C_p(\lambda,\theta) = 0.5176\left(\frac{116}{k} - 0.4\theta - 5\right)e^{\frac{-21}{k}} + 0.0068\lambda \tag{۳}$$

به‌طوری‌که:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1} \tag{۴}$$

به ازای زاویه پره صفر درجه، بیش‌ترین مقدار ضریب توان قابل حصول است که در نسبت سرعت نوک پره (TSR) برابر با ۷/۹۶ این ضریب توان برابر با ۰/۴۱۱ می‌باشد. با افزایش مقدار زاویه پره، بازه نسبت سرعت نوک پره وسیع‌تر می‌شود و حداکثر مقدار $C_P$ کاهش می‌یابد.



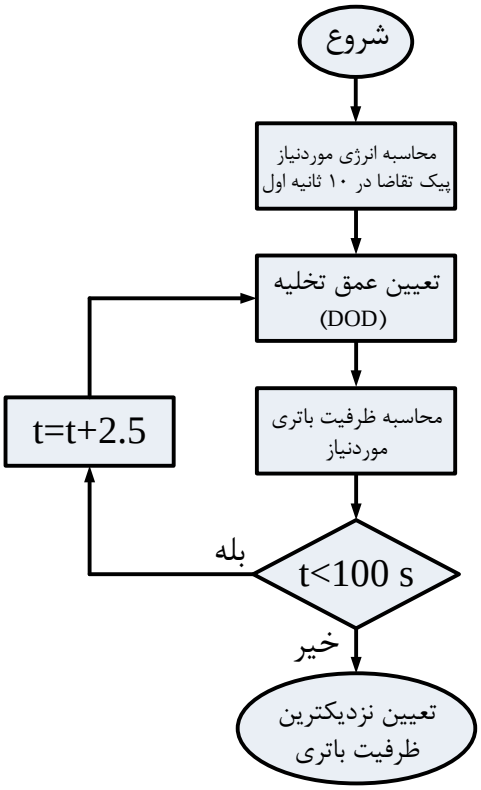
[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

### ۲-۲- مدل‌سازی ظرفیت باتری

در ریزشبکه‌هایی که از منابع تجدیدپذیر به‌ویژه توربین‌های بادی بهره می‌برند، ناپایداری‌ها و نوسانات لحظه‌ای توان خروجی به یکی از چالش‌های اساسی در حفظ کیفیت توان و پایداری سیستم تبدیل شده است. این نوسانات که اغلب ماهیتی غیرخطی و غیرقابل پیش‌بینی دارند، ضرورت به‌کارگیری سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی را بیش‌ازپیش آشکار می‌سازند. ذخیره‌سازهایی مانند باتری‌ها و ابرخازن‌ها، به‌عنوان اجزای مکمل در ریزشبکه‌ها، نقش مهمی در کاهش نوسانات، بهبود پایداری توان و جلوگیری از اعمال شوک ناگهانی به شبکه اصلی ایفا می‌کنند.

در راستای تحلیل و شبیه‌سازی عملکرد این تجهیزات، در این پژوهش یک مدل دینامیکی ساده‌شده و درعین‌حال دقیق برای باتری و ابرخازن توسعه یافته است که قابلیت ارزیابی دقیق پاسخ این عناصر در مواجهه با تغییرات توان تولیدی و بار را فراهم می‌سازد.

به‌منظور تعیین ظرفیت بهینه باتری، از یک الگوریتم مرحله‌ای استفاده شده که روند آن در شکل (۱) نمایش داده شده است.




**شکل (۱): شماتیک تعیین اندازه ذخیره‌ساز انرژی**

Figure (1): Schematic of energy storage sizing

مراحل اجرایی این رویه به شرح زیر است:

- در گام نخست، انرژی مورد نیاز برای تأمین توان پیک در بازه ابتدایی ۱۰ ثانیه‌ای عملکرد ریزشبکه محاسبه می‌شود. این مقدار انرژی بر اساس رابطه‌ی ارائه‌شده در معادله (۵) به دست خواهد آمد.
-

$$\text{Required Energy} = P_{peak} \times \text{time} \quad (۵)$$

- در مرحله بعد، با توجه به داده‌های فنی ارائه‌شده توسط شرکت سازنده، میزان عمق تخلیه مجاز (DoD[15]) برای باتری یا ابرخازن مشخص می‌شود. این پارامتر نشان‌دهنده درصدی از ظرفیت کل ذخیره‌ساز است که می‌تواند بدون



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

آسیب به تجهیزات، در اختیار بار قرار گیرد. برای مثال، باتری‌های سرب-اسیدی معمولاً دارای DOD در حدود ۵۰ درصد هستند، در حالی‌که باتری‌های لیتیوم-یون امکان بهره‌برداری تا DOD حدود ۸۰ درصد را نیز فراهم می‌کنند.

- نهایتاً، با استفاده از مقدار انرژی محاسبه‌شده در مرحله اول و در نظر گرفتن DOD انتخاب‌شده، ظرفیت موردنیاز باتری مطابق رابطه (۶) محاسبه خواهد شد. این رابطه، ظرفیت ذخیره‌ساز را به‌گونه‌ای تعیین می‌کند که بتواند نیاز انرژی تعیین‌شده را در بازه زمانی هدف، با رعایت محدودیت‌های عملکردی باتری تأمین کند.

$$\text{Battety Capacity} = \frac{Required\ Energy}{DOD \times \eta} \qquad (۶)$$

در رابطه‌ی مذکور، پارامتر بازدهی باتری (Efficiency) در نظر گرفته شده است که بیانگر نسبت انرژی خروجی قابل استفاده به انرژی ورودی باتری می‌باشد. این بازدهی معمولاً بسته به نوع فناوری باتری، در محدوده‌ای بین ۸۵ درصد تا ۹۵ درصد متغیر است.

- فرآیند مذکور برای کل دوره شبیه‌سازی تکرار می‌شود و در هر گام، با توجه به انرژی موردنیاز برای پاسخ‌گویی به بار ریزشبکه در آن لحظه، ظرفیت موردنیاز مجدداً محاسبه می‌گردد. به این ترتیب، ظرفیت دینامیکی باتری متناسب با نوسانات تقاضا و تولید مشخص خواهد شد.
- در مرحله پایانی، بر اساس نتایج حاصل از تحلیل و با لحاظ محدودیت‌های عملی، یک ظرفیت استاندارد و موجود در بازار برای باتری انتخاب می‌شود. شایان ذکر است که انتخاب نهایی باید به‌گونه‌ای باشد که ظرفیت پیشنهادی از مقدار محاسبه‌شده بیشتر بوده و امکان ذخیره‌سازی کافی در شرایط اوج بار را فراهم سازد؛ این امر برای تضمین پایداری و جلوگیری از افت توان در بازه‌های بحرانی سیستم الزامی است.

### ۳-۲- مدل‌سازی بار نامتعادل

در اغلب ریزشبکه‌های توزیعی، به‌ویژه در مناطق مسکونی و نیمه‌صنعتی، بارهای الکتریکی معمولاً به‌صورت نامتوازن بین فازهای سیستم سه‌فاز توزیع می‌شوند. این نامتعادلی می‌تواند ناشی از توزیع غیریکسان بارهای تک‌فاز، وجود اتصالات نامتقارن، یا تغییرات تصادفی و ناپایدار در الگوی مصرف باشد. در شرایطی که منابع تولید پراکنده با رفتار نوسانی مانند توربین‌های بادی در سیستم حضور دارند، این عدم تعادل می‌تواند اثرات مخرب‌تری بر کیفیت توان گذاشته، موجب افزایش جریان نول، افت راندمان، و اعوجاج ولتاژ در نقاط مختلف شبکه شود.

به‌طورکلی، بار نامتعادل زمانی شکل می‌گیرد که توان، ولتاژ یا جریان در سه فاز شبکه سه‌فاز دارای اختلاف باشند. این اختلاف ممکن است به‌صورت‌های زیر ظاهر شود:

- تفاوت در توان مصرفی بین فازها
- اختلاف در مقادیر امپدانس بار متصل‌شده به هر فاز
- اختلاف فاز در سیگنال‌های ولتاژ یا جریان
- وجود مصرف‌کننده‌های تک‌فاز که تنها به یک یا دو فاز متصل‌اند

برای نمایش دقیق رفتار بارهای نامتقارن در تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌ها، از تکنیک مؤلفه‌های متقارن استفاده می‌شود. در این روش، جریان یا ولتاژهای سه‌فاز نامتعادل به سه مؤلفه مجزا تجزیه می‌گردند:

$$\bar{I}_{abc}=\bar{I}_0+\bar{I}_1+\bar{I}_2 \qquad (۷)$$

که در آن، $\bar{I}_0$ مؤلفه صفر، $\bar{I}_1$ مؤلفه مثبت و $\bar{I}_2$ مؤلفه منفی می‌باشد. مؤلفه‌های منفی و صفر معمولاً مسئول ایجاد اعوجاج، نوسانات و تلفات اضافی در سیستم هستند. مؤلفه‌های صفر و منفی معمولاً منشأ اصلی اعوجاج، افت کیفیت توان، و افزایش تلفات در سیستم‌های قدرت به‌شمار می‌روند.

در محیط‌هایی نظیر MATLAB/Simulink، مدل‌سازی بارهای نامتعادل معمولاً با تعریف ترکیبی از بارهای تک‌فاز بر روی فازهای مختلف شبکه صورت می‌گیرد. به‌عنوان مثال:

- ممکن است در یک سناریو، فاز A نسبت به B و C بار بیش‌تری داشته باشد.



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

- نوع بارهای متصل می‌تواند مقاومتی، سلفی، یا ترکیبی (RL) باشد.
- مقادیر بارها می‌توانند به‌صورت ثابت یا وابسته به زمان تعریف شوند تا رفتار دینامیکی سیستم به‌خوبی شبیه‌سازی شود.

برای سنجش شدت عدم تعادل در شبکه، از شاخص‌هایی نظیر (THD[16]) و شاخص NEMA استفاده می‌شود. یکی از شاخص‌های رایج به شکل زیر تعریف می‌گردد:

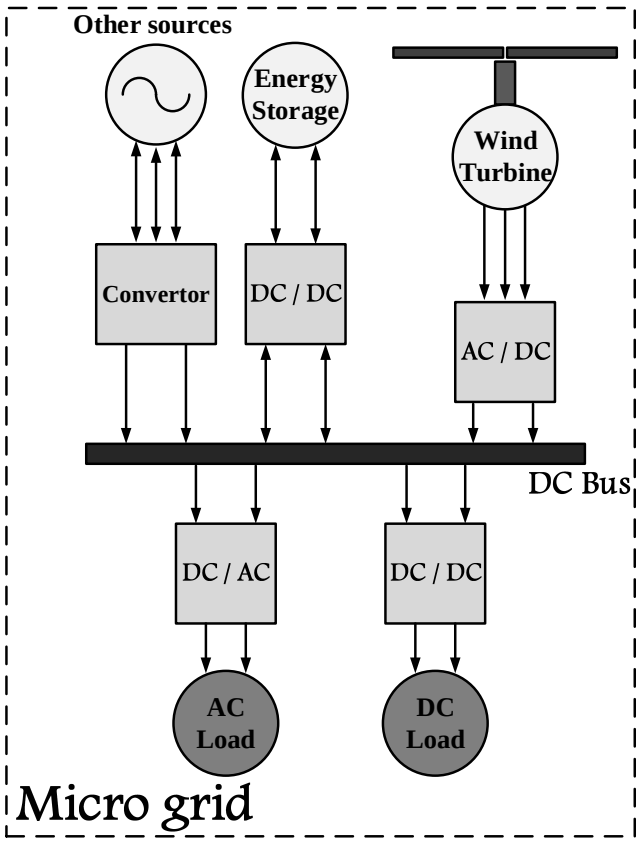
$$Unbalance(\%) = \frac{\max\left(\left|V_{Ph} - V_{avg}\right|\right)}{V_{avg}} \times 100 \quad (۸)$$

که در آن، $V_{Ph}$ ولتاژ هر فاز و $V_{avg}$ متوسط ولتاژ سه‌فاز است. مقدار بالای این شاخص‌ها بیانگر افزایش عدم تعادل و تهدیدی جدی برای کیفیت توان شبکه است. در بهره‌برداری از ریزشبکه‌هایی با بارهای نامتعادل، باید به نکات زیر توجه ویژه داشت:

- منابع تولید پراکنده باید قابلیت جبران جریان‌های نامتقارن را داشته باشند تا از بروز آسیب یا افت راندمان جلوگیری شود.
- استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی یا خودروهای الکتریکی سه‌فاز می‌تواند در تعدیل اثرات عدم تعادل بسیار مؤثر باشد.
- شبیه‌سازی دقیق رفتار بارهای نامتعادل در طراحی الگوریتم‌های کنترل توان و پایداری سیستم نقش کلیدی ایفا می‌کند.

### ۴-۲- مدل‌سازی ریزشبکه

برای اتصال توربین بادی و سیستم ذخیره‌ساز و بارهای نامتعادل، طراحی‌های مختلفی درنظر گرفته شده‌اند. در این مقاله، سیستم ذخیره‌ساز انرژی به‌صورت موازی با سیستم توربین بادی مورد نظر قرار می‌گیرد. این توربین بادی و ذخیره‌ساز، به یک شبکه ضعیف ارتباط دارند. این نوع طراحی در مرجع [۳۰] مورد استفاده قرار گرفته شده است. طراحی شماتیک این نوع اتصال در شکل (۲) نشان داده شده است. بارهای موردنظر نیز می‌توانند از هر دو نوع بار AC و بار DC باشند.




**شکل (۲): نحوه اتصال توربین بادی و ذخیره‌ساز به ریزشبکه**

Figure (2): connection of wind turbine and storage to MG



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

## ۳- رویه پیشنهادی

در این بخش، چارچوب پیشنهادی پژوهش برای بهبود پایداری توان و کاهش عدم تعادل بار در ریزشبکه ارائه می‌گردد. این چارچوب شامل طراحی شاخص‌های ارزیابی، تدوین سناریوهای بهره‌برداری از ذخیره‌ساز، و الگوریتم تخصیص هوشمند خودروهای الکتریکی است.

### ۳-۱- شاخص هموارسازی

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، شاخصی که در این تحقیق به‌عنوان نوآوری اصلی معرفی می‌شود، به‌صورت رابطه زیر تعریف شده و مبنای ارزیابی عملکرد سیستم در مواجهه با نوسانات توان و بهره‌برداری از ذخیره‌ساز انرژی قرار می‌گیرد:

$$RI = \sum_{n=1}^{n_{spikes}} \left|P_n - P_{ave}\right| + \sum_{n=1}^{n_{valleys}} \left|P_n - P_{ave}\right| \qquad (۹)$$

که در آن $P_n$ توان قله‌ها و دره‌های منحنی توان خروجی بوده و Pave نیز نشان‌دهنده توان متوسط خروجی می‌باشد. هم‌چنین پارامترهای $n_{spikes}$ و $n_{valleys}$ نیز تعداد قله‌ها و دره‌های توان خروجی را نشان می‌دهند که در واقع ماکزیمم‌ها و مینیمم‌های محلی سیگنال توان تولیدی خروجی می‌باشند.

شاخص RI که در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌عنوان شاخص ناهمواری توان تولیدی خروجی تعریف می‌شود. این شاخص میزان نوسانات لحظه‌ای توان خروجی را در بازه زمانی مشخص اندازه‌گیری کرده و معیاری کمی برای ارزیابی پایداری توان فراهم می‌سازد.

مطابق رابطه تعریف‌شده برای RI، هرچه مقدار این شاخص بالاتر باشد، نشان‌دهنده ناپایداری بیشتر و تغییرات سریع‌تر توان خروجی در طول زمان است؛ به‌عبارت دیگر، توان خروجی در چنین شرایطی نوسانات بیشتری دارد و هموارسازی آن دشوارتر خواهد بود.

نکته قابل توجه آن است که واحد شاخص RI برحسب وات بوده و می‌توان از آن به‌عنوان معیار مستقلی برای مقایسه عملکرد سناریوهای مختلف بهره‌برداری از ذخیره‌ساز انرژی بهره برد. این شاخص در کنار سایر پارامترهای تحلیلی، نقش مهمی در ارزیابی کیفیت توان و انتخاب بازه بهینه عملکرد باتری ایفا می‌کند.

این شاخص با هدف ایجاد تعادل میان هموارسازی توان، افزایش عمر مؤثر ذخیره‌ساز و بهبود کیفیت توان طراحی شده و در ادامه، مبنای تحلیل نتایج شبیه‌سازی‌ها و مقایسه رویکردهای مختلف قرار خواهد گرفت. در ادامه کار می‌توان شاخص هموواری را به‌صورت رابطه زیر پیشنهاد داد:

$$SI = \left(1 - \frac{RI_i}{\max(\mathrm{RI}_i)}\right) \times 100\% \ , \ \ i = number\ of\ scenario \qquad (۱۰)$$

در رابطه ارائه‌شده، SI به‌عنوان شاخص همواری یا یکنواختی توان خروجی تعریف شده و نقش مکمل شاخص RI را ایفا می‌کند. در این چارچوب، برای هر سناریوی بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی، مقدار RI محاسبه می‌شود و از بزرگ‌ترین مقدار آن (یعنی $\max(\mathrm{RI}_i)$) برای پریونیت‌سازی شاخص RI و در نهایت محاسبه مقدار SI استفاده می‌گردد.

هدف از این نرمال‌سازی، ایجاد یک معیار نسبی و بدون واحد برای مقایسه عملکرد سناریوهای مختلف است. به‌همین دلیل، SI به‌صورت درصد بیان می‌شود و مقدار آن در بازه‌ی ۰ تا ۱۰۰ درصد قرار می‌گیرد.

تفسیر مقادیر شاخص SI به‌صورت زیر است:

- هرچه مقدار SI به صفر درصد نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده ناهمواری شدیدتر و نوسانات بیش‌تر در توان تولیدی است و وضعیت عملکرد سیستم نامطلوب‌تر خواهد بود.
- در مقابل، هرچه مقدار SI به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر باشد، بیانگر همواری بیش‌تر و پایداری بهتر توان خروجی سیستم است که از منظر کیفیت توان، وضعیت مطلوب‌تری را نشان می‌دهد.

بنابراین، شاخص SI به‌عنوان یک معیار کلیدی برای ارزیابی اثرگذاری سناریوهای طراحی‌شده در کاهش نوسانات توان و بهبود پایداری سیستم ریزشبکه در این پایان‌نامه به‌کار گرفته می‌شود.



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

### ۲-۳- رویکردهای بهبود عملکرد باتری

در این پژوهش، یکی از مراحل اساسی برای ارزیابی عملکرد سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در ریزشبکه، طراحی و تحلیل سناریوهای مختلف بهره‌برداری در حضور تولید بادی در نظر گرفته شده است. با توجه به نوسانات شدید توان خروجی توربین‌های بادی، تعیین محدوده بهینه برای سطح شارژ باتری یا ابرخازن نقشی کلیدی در کاهش استهلاک تجهیزات، بهبود کیفیت توان و افزایش طول عمر مؤثر ذخیره‌ساز دارد.

به‌منظور بررسی جامع اثر تغییرات بازه SoC بر نوسانات توان و نرخ تبادل انرژی، مجموعه‌ای از سناریوها طراحی شده‌اند که هر یک بازه مشخصی از سطح شارژ را برای باتری در نظر می‌گیرد. اهداف اصلی از طراحی این سناریوها شامل موارد زیر است:

- تحلیل اثر محدودسازی یا گسترش بازه SoC بر نوسانات توان خروجی،
- بررسی میزان انرژی تبادلی در هر رویکرد،
- یافتن بازه بهینه بهره‌برداری با هدف کاهش دفعات و شدت سیکل‌های شارژ/دشارژ،
- و برقراری تعادل بین دو هدف کلیدی: کاهش نوسانات توان (بر مبنای شاخص‌های RI/SI) و افزایش طول عمر ذخیره‌ساز انرژی

در همین راستا، هفت سناریو بهره‌برداری مطابق جدول (۲) تدوین و شبیه‌سازی شده‌اند. این سناریوها از وضعیت پایه‌ای بدون ذخیره‌ساز (سناریوی صفر) تا حالات بهره‌برداری با محدودیت‌های مختلف در بازه‌های مختلف (سناریوی ۱ تا سناریوی ۶) را شامل می‌شوند.

Table (2): Different simulation scenarios

**جدول (۲): سناریوهای مختلف شبیه‌سازی**

| مرجع | مدل بهره‌برداری از ذخیره‌ساز انرژی |
|---|---|
| رویکرد صفر | تنها توربین بادی، بدون استفاده از ذخیره‌ساز انرژی |
| رویکرد ۱ | باتری با بازه SoC بین ۰ تا ۱۰۰ درصد |
| رویکرد ۲ | باتری با بازه SoC بین ۱۰ تا ۹۰ درصد |
| رویکرد ۳ | باتری با بازه SoC بین ۲۰ تا ۸۰ درصد |
| رویکرد ۴ | باتری با بازه SoC بین ۳۰ تا ۷۰ درصد |
| رویکرد ۵ | باتری با بازه SoC بین ۰ تا ۵۰ درصد |
| رویکرد ۶ | باتری با بازه SoC بین ۵۰ تا ۱۰۰ درصد |

هدف از این طراحی جامع، پوشش‌دهی کامل طیف بهره‌برداری از حالت بدون ذخیره‌سازی تا شرایط کاملاً محدودشده بوده و امکان ارزیابی دقیق تأثیر محدوده عملکرد SoC بر شاخص‌های فنی و اقتصادی سیستم را فراهم می‌سازد.

### ۳-۳- رویه بهبود نامتعادلی توسط خودروهای تک‌فاز

در ریزشبکه‌هایی که بارهای سه‌فاز به‌صورت نامتعادل توزیع شده‌اند، اختلاف میان ولتاژها و جریان‌های فازهای مختلف منجر به ایجاد مؤلفه‌های منفی و صفر می‌شود. این مؤلفه‌ها باعث کاهش کیفیت توان، افزایش تلفات انرژی، و افت راندمان تجهیزات الکتریکی می‌گردند. این مسئله در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر ناپایدار مانند توربین‌های بادی که ذاتاً دارای نوسانات توان هستند، تشدید شده و می‌تواند پایداری سیستم را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار دهد. یکی از راه‌کارهای نوین و مؤثر برای مقابله با این چالش، بهره‌گیری از خودروهای الکتریکی تک‌فاز به‌عنوان بارهای هوشمند و کنترل‌پذیر برای متعادل‌سازی بار در ریزشبکه است.



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

در این تحقیق، یک رویه کنترلی پویا جهت بهبود وضعیت نامتعادلی بار در ریزشبکه ارائه شده است که از خودروهای الکتریکی تک‌فاز به‌صورت هدفمند استفاده می‌کند. ایده اصلی این روش، اتصال منعطف و قابل تنظیم خودروها به فازهای مختلف شبکه است، به‌طوری‌که در هر لحظه بسته به شرایط بار و تولید، پیکربندی سیستم به‌گونه‌ای تغییر کند که عدم تعادل بین فازها کاهش یابد. این فرایند از طریق چند مرحله کلیدی اجرا می‌شود:

۱) تشخیص فاز دارای بار کم‌تر یا بیش‌تر با اندازه‌گیری توان لحظه‌ای فازها و محاسبه میزان نامتعادلی،
۲) تخصیص هوشمند خودروهای الکتریکی به فازهای خاص با هدف افزایش یا کاهش جریان آن‌ها برای ایجاد توازن،
۳) به‌کارگیری قابلیت شارژ و دشارژ کنترل‌شده با استفاده از الگوهای V2G (خودرو به شبکه) و G2V (شبکه به خودرو)، تا خودروها به‌عنوان منابع یا مصارف انعطاف‌پذیر عمل کرده و جریان فازها را تعدیل کنند،
۴) به‌روزرسانی تصمیم‌گیری به‌صورت دوره‌ای بر اساس شرایط جدید سیستم، و اعمال تغییرات لازم در نحوه اتصال خودروها

مزایای کلیدی این رویکرد شامل مواردی مانند کاهش جریان نول، بهبود کیفیت توان و ضریب توان، افزایش بهره‌وری انرژی به‌ویژه در حضور منابع تجدیدپذیر، و حذف نیاز به تجهیزات اصلاح نامتعادلی گران‌قیمت است. هم‌چنین این روش در مقایسه با راه‌کارهای متداول، به‌دلیل استفاده از زیرساخت موجود خودروهای الکتریکی، از نظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه‌تر است.

برای پیاده‌سازی دقیق این مدل در محیط شبیه‌سازی، پیش‌فرض‌هایی مانند در دسترس بودن چند خودروی برقی با قابلیت کنترل، امکان تنظیم شارژ/دشارژ در بازه مجاز سطح شارژ (SoC)، و وجود قابلیت تغییر فاز اتصال از طریق سوئیچ‌های مجازی در نظر گرفته شده است. این ساختار به‌گونه‌ای طراحی شده که علاوه بر امکان شبیه‌سازی دقیق، قابلیت توسعه برای پیاده‌سازی در سیستم‌های کنترلی واقعی را نیز داراست. نتایج عملکرد این روش و مقایسه آن با سایر رویکردها، در بخش نتایج مورد تحلیل و ارزیابی قرار است.

## ۴- نتایج شبیه‌سازی

به‌منظور ارزیابی عملکرد راه‌کارهای پیشنهادی، شبیه‌سازی‌های عددی در محیط MATLAB/Simulink انجام شده است. سناریوهای مختلفی در خصوص بهره‌برداری از ذخیره‌ساز و نحوه اتصال خودروهای الکتریکی تحلیل و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

### ۴-۱- تعیین ظرفیت باتری

برای تعیین ظرفیت مناسب باتری در این پروژه، که با هدف پشتیبانی از نوسانات توان توربین بادی و پاسخ‌گویی به پیک لحظه‌ای بار طراحی شده است، یک فرآیند محاسباتی مرحله‌به‌مرحله در نظر گرفته شده است. فرض بر این است که یک توربین بادی با توان نامی ۵۰ کیلووات در حال تغذیه ریزشبکه‌ای است که در برخی زمان‌ها با پیک تقاضای ۲۰ کیلووات به مدت ۱۰ ثانیه مواجه می‌شود. روند تعیین ظرفیت باتری به شرح زیر است:

- ابتدا انرژی لازم برای پاسخ‌گویی به این پیک ۱۰ ثانیه‌ای محاسبه می‌شود:

$$\text{Required Energy} = 20(kw)\times 10(s) = 200(kws)$$

- برای باتری در نظر گرفته‌شده، عمق تخلیه (DOD) برابر با ۵۰ درصد فرض می‌شود. این مقدار معمولی برای باتری‌های سرب-اسیدی است، هرچند در باتری‌های لیتیوم-یونی DOD بیش‌تر نیز ممکن است.
- بازدهی باتری (Efficiency) نیز در این تحلیل ۹۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. بنابراین برای محاسبه ظرفیت اسمی موردنیاز از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\text{Required Energy} = 20(kw)\times 10(s) = 200(kws)$$

- با توجه به بازار موجود، فرض شده است که باتری‌هایی با ظرفیت‌های ۴۰۰ وات‌ساعت و ۵۰۰ وات‌ساعت در دسترس هستند. از آن‌جایی‌که مقدار محاسبه‌شده حدود ۱۱۷ وات‌ساعت است، باتری ۵۰۰ وات‌ساعت به‌عنوان گزینه مناسب انتخاب می‌شود تا حاشیه ایمنی مناسبی برای تأمین انرژی در شرایط پیک وجود داشته باشد.



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

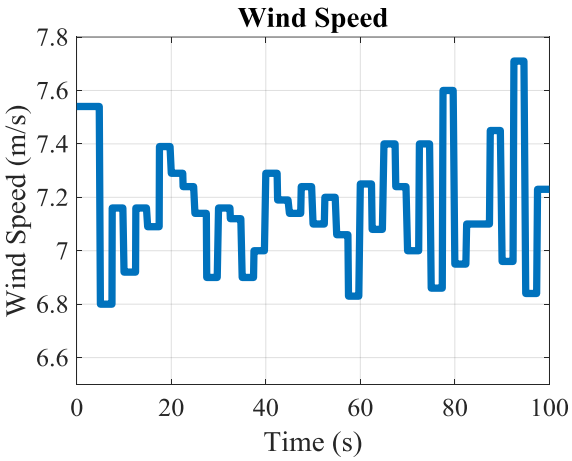
در نتیجه، برای پوشش حداکثر تقاضای ۲۰ کیلووات به مدت ۱۰ ثانیه در ریزشبکه‌ای که از توربین بادی ۵۰ کیلـوواتی تغذیـه می‌شود، به باتری با حداقل ظرفیت ۰/۱۱۷ کیلووات‌ساعت نیاز است. با توجه به محصولات موجود در بازار، انتخاب باتری ۵۰۰ وات‌ساعت به‌عنوان گزینه نهایی توصیه می‌شود تا از عملکرد مطمئن سیستم در شرایط بحرانی اطمینان حاصل گردد.

### ۴-۲- بیان شبیه‌سازی‌ها و آنالیز سناریوها

در این بخش از مقاله، به بیان شبیه‌سازی‌ها و هم‌چنین آنالیز سناریوهای شبیه‌سازی پرداخته خواهد شد.

#### ۴-۲-۱- بیان شبیه‌سازی‌ها

مقدار سرعت باد مورد استفاده در این مطالعه طی بازه زمانی ۱۰۰ ثانیه مطابق شکل (۳) ارائه شده است. این داده‌ها با اسـتفاده از اطلاعات واقعی و ثبت‌شده در یکی از مناطق کشور استرالیا استخراج گردیده‌اند. هر مقدار ثبت‌شده نمایانگر سرعت میـانگین باد در یک بازه زمانی ۲٫۵ ثانیه‌ای است؛ بنابراین، در مجموع ۴۰ نمونه از داده‌های سرعت باد برای بازه ۱۰۰ ثانیـه در دسـترس است.




**شکل (۳): مقادیر سرعت باد اعمال شده به توربین بادی**

Figure (3): Wind speed values applied to the wind turbine

طی این بازه زمانی، سرعت باد در محدوده‌ای نسبتاً محدود و پایدار بین ۶/۸ متر بر ثانیه تا ۷/۸ متر بر ثانیه نوسان داشته است. این تغییرات کم‌دامنه، شرایط نسبتاً آرامی از منظر دینامیکی برای توربین بادی فراهم می‌آورد و می‌تواند مبنای مناسـبی بـرای ارزیابی عملکرد سیستم ذخیره‌سازی و پاسخ آن به نوسانات توان تولیدی باشد.

بر اساس داده‌های سرعت باد ارائه‌شده، خروجی توان توربین بادی در بازه ۱۰۰ ثانیه‌ای به‌صورت شـکل (۴) نمـایش داده شـده است. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است، افزایش یا کاهش لحظه‌ای سرعت باد، مستقیماً بـر تـوان تولیـدی تـوربین تأثیرگذار است؛ به‌طوری‌که با افزایش سرعت باد، توان خروجی نیز افزایش یافته و با کاهش آن، توان تولیدی کـاهش مـی‌یابـد. این وابستگی نشان می‌دهد که نوسانات توان تولیدی توربین، مستقیماً با نوسانات سرعت باد هم‌راستا و متناسب است.

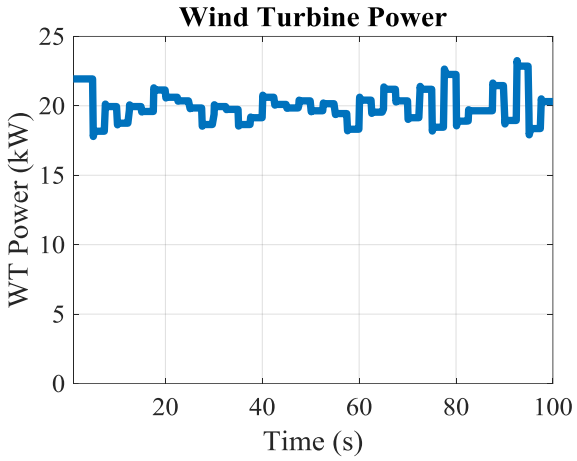
براساس شکل مذکور:

- حداکثر توان خروجی توربین برابر با ۲۳/۲۵۴ کیلووات است.
- حداقل توان تولیدی معادل ۱۷/۷۸۹ کیلووات به دست آمده است.
- بنابراین، دامنه نوسان توان خروجی طی بازه مورد مطالعه، ۵/۵۴۵۶ کیلووات بوده است.

این مقدار نوسان قابل توجه در توان خروجی، اهمیت بهره‌گیری از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و استراتژی‌های هموارسـازی توان را در کنار توربین‌های بادی به‌خوبی نشان می‌دهد.



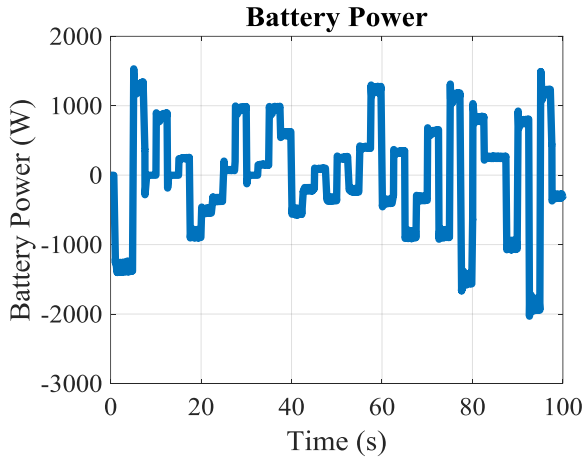
[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025




**شکل (۴): مقادیر توان تولیدی توربین بادی**

Figure (4): Wind turbine power generation values

با بهره‌گیری از یک سیستم ذخیره‌ساز باتری که به‌صورت موازی با توربین بادی در ریزشبکه قرار گرفته است، توان لحظه‌ای باتری مطابق شکل (۵) به دست آمده است. رفتار این سیستم به‌گونه‌ای است که در مواقع افزایش توان تولیدی نسبت به بار مصرفی (۲۰ کیلووات)، باتری وارد وضعیت شارژ شده و توان مازاد را جذب می‌کند. در مقابل، در زمان‌هایی که توان تولیدی توربین کم‌تر از توان بار باشد، باتری با دشارژ شدن وارد عمل شده و کسری توان را جبران می‌نماید.




**شکل (۵): مقادیر توان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز باتری**

Figure (5): Battery storage charge and discharge power values

در شکل (۵)، این رفتار به‌وضوح دیده می‌شود:

- مقادیر مثبت توان باتری نشان‌دهنده‌ی دشارژ (تحویل توان به شبکه) هستند.
- مقادیر منفی توان باتری نشان‌دهنده‌ی شارژ (دریافت توان از شبکه) می‌باشند.

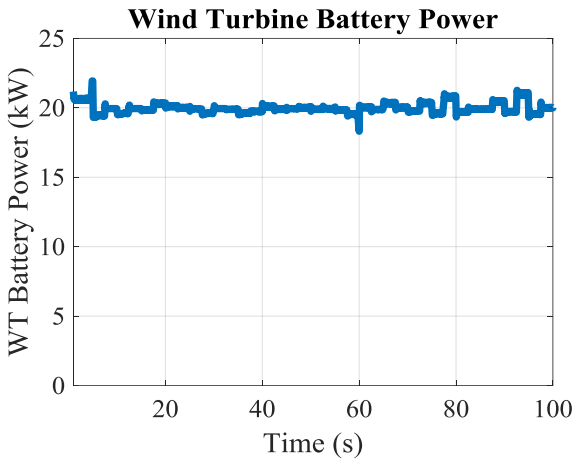
بررسی نمودار نشان می‌دهد که بازه نوسانات توان باتری در حدود ۲± کیلووات است. این بدین معناست که سیستم باتری باید توانایی مدیریت تا ۲ کیلووات توان مازاد یا کسری در هر لحظه را داشته باشد. این مقدار نوسان نسبتاً محدود نشان‌دهنده‌ی عملکرد مؤثر باتری در هموارسازی توان و کاهش تنش ناشی از نوسانات لحظه‌ای توربین بادی بر شبکه می‌باشد.

به‌طور خلاصه، اعمال سیستم ذخیره‌ساز باتری در کنار توربین بادی باعث می‌شود نوسانات لحظه‌ای توان با توزیع بار بین توربین و باتری به‌شکلی مؤثر مدیریت شده و پایداری شبکه بهبود یابد.

ترکیب توربین بادی با سیستم ذخیره‌ساز باتری موجب بهبود چشم‌گیر در هموارسازی توان خروجی شده است. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، توان خروجی حاصل از مجموعه‌ی تجدیدپذیر شامل توربین بادی و باتری، نوسانات بسیار کم‌تری نسبت به حالتی دارد که تنها توربین بادی در مدار قرار دارد.



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025




**شکل (۶): مقادیر مجموع توان توربین بادی و ذخیره‌ساز باتری**

Figure (6): Total power values of wind turbine and battery storage

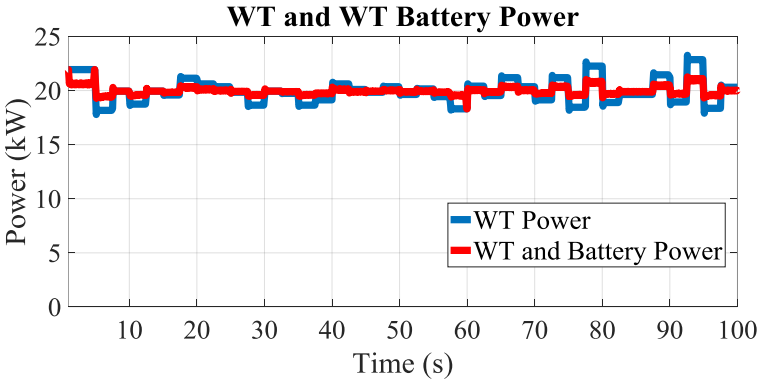
بر اساس داده‌های حاصل از این ترکیب:

- بیشینه توان خروجی سیستم ترکیبی برابر با ۲۱/۹۳۵ کیلووات است.
- کمینه توان خروجی نیز برابر با ۱۸/۳۱۰ کیلووات به‌دست آمده است.
- در نتیجه، دامنه نوسانات توان خروجی در این حالت برابر با ۳/۶۲۵ کیلووات می‌باشد.

این در حالی است که در حالت بدون ذخیره‌ساز، دامنه نوسانات توان خروجی ۵/۴۶۵ کیلووات بود. بنابراین، با اعمال باتری در کنار توربین بادی، میزان نوسانات توان به میزان قابل توجهی کاهش یافته است.

استفاده از ذخیره‌ساز باتری موجب کاهش ۳۳/۶۷ درصدی در نوسانات توان شده است. این کاهش به معنای بهبود پایداری توان تحویلی به بار و کاهش تنش‌های شبکه ناشی از نوسانات لحظه‌ای تولید می‌باشد و نشان‌دهنده نقش کلیدی باتری در تسکین نوسانات توان منابع تجدیدپذیر است.

در صورتی‌که نمودار توان تولیدی توربین بادی به‌تنهایی و هم‌چنین توان خروجی مجموعه توربین بادی به همراه ذخیره‌ساز باتری به‌صورت هم‌زمان در یک نمودار ترسیم شوند، نتیجه به‌صورت شکل (۷) نمایش داده خواهد شد.




**شکل (۷): مقادیر توان‌های تولیدی توربین بادی و شارژ و دشارژ باتری**

Figure (7): Wind turbine output power values and battery charging and discharging

این شکل، مقایسه‌ای بصری و دقیق از تأثیر به‌کارگیری باتری در کاهش نوسانات توان ارائه می‌دهد. همان‌گونه که در نمودار قابل مشاهده است:

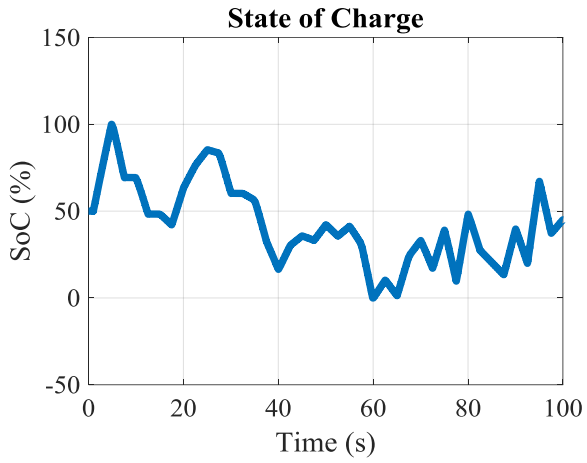
- منحنی مربوط به توربین بادی تنها دارای نوسانات بیش‌تری بوده و به‌صورت پیوسته بالا و پایین می‌رود؛
- در مقابل، منحنی توان سیستم ترکیبی (توربین بادی+باتری) با نوسانات نرم‌تر و دامنه کم‌تر ظاهر می‌شود، که نشان‌دهنده عملکرد هموارسازی مؤثر باتری است.



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

این مقایسه به‌وضوح نشان می‌دهد که بهره‌گیری از سیستم ذخیره‌ساز، منجر به تعدیل نوسانات تولید توان و تأمین توان با پایداری بیش‌تر برای بار مصرفی شده است.

وضعیت شارژ و دشارژ باتری در طول بازه زمانی شبیه‌سازی‌شده در شکل (۸) نمایش داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، رفتار دینامیکی SoC (سطح شارژ باتری) با توان تبادلی باتری و نوسانات توان خروجی سیستم ارتباط مستقیمی دارد.




**شکل (۸): مقادیر وضعیت شارژ (SoC) باتری**

Figure (8): Battery State of Charge (SoC) values

به‌ویژه در لحظاتی مانند زمان ۶۰ ثانیه، که سطح شارژ باتری به حد پایین دشارژ خود رسیده است، مشاهده می‌شود که نوسانات توان خروجی سیستم ترکیبی (توربین بادی+باتری) به اوج خود می‌رسد. این موضوع نشان می‌دهد که:

- هنگامی‌که باتری به محدودیت‌های SoC (اعم از حد پایین یا بالای ظرفیت) نزدیک می‌شود، توانایی آن برای جذب یا تزریق توان محدود شده،
- و در نتیجه، نوسانات موجود در توان تولیدی توربین بادی مستقیماً به بار منتقل می‌شوند.

نوسانات باقی‌مانده در توان خروجی سیستم ترکیبی عمدتاً ناشی از محدودیت‌های عملکردی ذخیره‌ساز باتری (به‌ویژه محدودیت‌های SoC) هستند. بنابراین، در صورت افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی، بازطراحی محدوده‌های مجاز SoC، یا استفاده از ذخیره‌سازهای مکمل (مانند ابرخازن)، می‌توان نوسانات باقی‌مانده را نیز تا حد زیادی کاهش داد و کیفیت توان سیستم را بیش‌تر بهبود بخشید.

### ۲-۲-۴- آنالیز سناریوها

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوهای مختلف بهره‌برداری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی به‌منظور هموارسازی توان خروجی توربین بادی مورد بررسی قرار گرفته است. سناریوی صفر، که بدون استفاده از ذخیره‌ساز انجام شده، بیش‌ترین نوسانات توان را با مقدار RI برابر با ۳۴/۷۹ کیلووات و کم‌ترین مقدار شاخص هموواری (SI=0) نشان می‌دهد؛ به‌عبارتی هیچ‌گونه هموارسازی در توان تولیدی رخ نداده است.

در سناریوهای بعدی، که در آن‌ها باتری در شبکه لحاظ شده، شاخص SI نسبت به سناریوی صفر مقدار قابل‌توجهی افزایش داشته و به‌تبع آن، نوسانات RI کاهش یافته‌اند. هرچه دامنه مجاز تغییرات سطح شارژ (SoC) بزرگ‌تر باشد، توانایی ذخیره‌ساز در جذب نوسانات بیش‌تر شده و در نتیجه شاخص SI نیز افزایش می‌یابد. در مقایسه بین سناریوهای ۵ و ۶ که به‌ترتیب مربوط به بهره‌برداری از نیمه پایین و نیمه بالای ظرفیت باتری هستند، مشاهده می‌شود که استفاده از محدوده بالاتر (SoC > 50%) عملکرد بهتری دارد و مقدار SI در آن بالاتر بوده است. این امر به این دلیل است که باتری در سطوح بالاتر SoC، پاسخ‌دهی سریع‌تر و پایدارتری دارد.



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

مقایسه دقیق بین سناریوهای ۱ تا ۴ نیز نکات مهمی را روشن می‌سازد. به‌عنوان مثال، کاهش دامنه SoC از ۱۰۰–۰ درصد در سناریوی ۱ به ۹۰–۱۰ درصد در سناریوی ۲، تنها حدود ۴ درصد کاهش در SI ایجاد کرده است. هم‌چنین این مقدار برای انتقال از سناریوی ۲ به ۳ (بازه ۸۰–۲۰) حدود ۳ درصد کاهش داشته که هم‌چنان قابل صرف‌نظر است. اما کاهش بیش‌تر دامنه از بازه ۸۰–۲۰ به بازه ۷۰–۳۰ درصد (سناریوی ۴)، باعث افت حدود ۱۳ درصدی در SI شده که افت چشم‌گیری به شمار می‌آید و از لحاظ اقتصادی نیز غیرقابل توجیه است. بنابراین سناریوی ۳، با بازه SoC در محدوده ۲۰ تا ۸۰ درصد، به‌عنوان یک انتخاب بهینه شناخته می‌شود؛ چراکه با محدودسازی مناسب SoC، طول عمر باتری حفظ می‌شود و در عین‌حال شاخص همواری توان نیز در سطح مناسبی باقی می‌ماند.

در سناریوهای ۵ و ۶ نیز شاخص SI نسبت به سناریوهای ۱ تا ۳ به‌مراتب کم‌تر است. بنابراین این دو سناریو، به‌رغم دارا بودن دامنه متوسط SoC، گزینه‌های مناسبی جهت استفاده در سیستم ذخیره‌سازی نخواهند بود. نکته مهم دیگر، مقدار حاصل‌ضرب شاخص SI در نرمال‌شده دامنه SoC (SIi×SSoC,i) است که در سناریوی ۳ بیش‌ترین مقدار را به خود اختصاص داده و اثبات می‌کند که این سناریو بهترین عملکرد را از نظر موازنه بین هموارسازی توان و طول عمر باتری ارائه می‌دهد.

در جدول (۳)، خلاصه نتایج همه سناریوها و مقایسه فنی و عددی آن‌ها آورده شده است. بر اساس مقادیر این جدول، سناریوی شماره ۳ با دامنه SoC برابر با ۲۰ تا ۸۰ درصد، به‌عنوان مناسب‌ترین و بهینه‌ترین گزینه پیشنهادی در این مطالعه انتخاب می‌شود. این سناریو ضمن حفظ طول عمر باتری، نوسانات توان خروجی را نیز در سطح قابل‌قبول کنترل می‌کند.

Table (3): Results from different simulation scenarios

**جدول (۳): نتایج حاصل از رویکردهای مختلف شبیه‌سازی**

| پارامتر | رویکرد صفر | رویکرد ۱ | رویکرد ۲ | رویکرد ۳ | رویکرد ۴ | رویکرد ۵ | رویکرد ۶ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| بازه SoC (٪) | --- | ۱۰۰–۰ | ۹۰–۱۰ | ۸۰–۲۰ | ۷۰–۳۰ | ۵۰–۰ | ۱۰۰–۵۰ |
| نسبت دامنه SoC (SSoC,i) | --- | ۰/۵۷۹ | ۰/۶۶۳ | ۰/۷۴۷ | ۰/۸۳۲ | ۰/۷۸۹ | ۰/۷۸۹ |
| نوسان توان خروجی RI (kW) | ۳۴/۷۹ | ۹/۷۰ | ۱۰/۹۶ | ۱۲/۱۲ | ۱۶/۷۰ | ۱۶/۱۱ | ۱۵/۳۴ |
| شاخص همواری توان SI (٪) | ۰ | ۷۲/۱۲ | ۶۸/۵۰ | ۶۵/۱۶ | ۵۲/۰۰ | ۵۳/۶۹ | ۵۵/۹۱ |
| معیار تصمیم‌گیری SI×SSoC | ۰ | ۴۱/۷۵ | ۴۵/۴۳ | ۴۸/۷۰ | ۴۳/۲۴ | ۴۲/۳۹ | ۴۴/۱۴ |
| رتبه رویکرد | ۷ | ۶ | ۲ | ۱ | ۴ | ۵ | ۳ |
| نتیجه نهایی (انتخاب نهایی) | × | × | ✓ | بهترین | × | × | × |

## ۳-۴- بهبود نامتعادلی توسط خودروهای تک‌فاز

یکی از اهداف اصلی این پژوهش، بررسی نقش خودروهای الکتریکی تک‌فاز در کاهش عدم تعادل بار و بهبود کیفیت توان در ریزشبکه‌های توزیعی بود. به‌منظور دست‌یابی به این هدف، دو سناریو مجزا شامل حالت بدون خودرو الکتریکی و حالت با حضور هدفمند خودروهای الکتریکی در ریزشبکه طراحی و مورد ارزیابی قرار گرفت. در این **رویکردها**، شاخص‌هایی نظیر جریان نول، شاخص یکنواختی (SI)، و توزیع توان بین فازها تحلیل شدند.

نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی به شرح جدول (۴) است:

Table (4): Results of the impact of single-phase electric vehicles on unbalance

**جدول (۴): نتایج تاثیر خودروهای الکتریکی تک‌فاز بر نامتعادلی**

| وضعیت سیستم | جریان نول فاز (A) | شاخص یکنواختی(%) SI | توضیح |
|---|---|---|---|
| بدون خودرو الکتریکی | ۱۶,۲۵ | ۵۵/۹۱ | ریزشبکه شامل توربین بادی و ذخیره‌ساز، بدون خودروی برقی |
| با خودروهای الکتریکی تک‌فاز | 8.42 | 68.34 | اتصال هدفمند خودروهای الکتریکی به فاز با بار کم‌تر |



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

تحلیل نتایج شامل موارد زیر می‌باشد:

- کاهش جریان نول :حضور خودروهای الکتریکی موجب کاهش جریان نول از ۱۶/۲۵ آمپر به ۸/۴۲ آمپر شده است که بیانگر کاهش حدود ۴۸/۲ درصدی در عدم تعادل جریان بین فازها می‌باشد. این کاهش به‌طور مستقیم نشان‌دهنده بهبود توزیع بار و کاهش اثر مؤلفه‌های منفی و صفر در شبکه است.
- افزایش شاخص یکنواختی توان (SI): در حالت بدون خودروی الکتریکی، مقدار SI برابر ۵۵/۹۱ درصد بوده که در حضور خودروهای الکتریکی به ۶۸/۳۴ درصد افزایش یافته است؛ یعنی افزایش حدود ۱۲/۴ واحد درصدی در شاخص همواری توان خروجی، که نشان‌دهنده بهبود قابل‌توجه در کیفیت توان شبکه می‌باشد.
- بهبود توزیع توان فازی : در حالت بدون خودروهای الکتریکی، توان عبوری از فازها به‌ترتیب برابر با:
  - ✓ فاز A: ۲۲/۱ کیلووات
  - ✓ فاز B: ۱۷/۸ کیلووات
  - ✓ فاز C: ۲۰/۳ کیلووات

بوده است. اختلاف بیشینه و کمینه بین فازها ۴/۳ کیلووات برآورد می‌شود. اما در حضور خودروهای الکتریکی، این اختلاف به کم‌تر از ۱/۵ کیلووات کاهش یافته است، که نشان از تعادل بهتر بارگذاری بین فازها دارد.

بر این اساس، سازوکار عملکرد خودروهای الکتریکی به صورت زیر می‌باشد:

- خودروهای الکتریکی مورد استفاده در این مطالعه، به‌صورت تک‌فاز و قابل‌برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده‌اند.
- با بهره‌گیری از یک الگوریتم تصمیم‌گیری تطبیقی، این خودروها به‌گونه‌ای در شبکه توزیع شده‌اند که عمدتاً به فازهایی با بار کم‌تر متصل شوند.
- در صورت نیاز، خودروها می‌توانند به‌صورت شارژ یا دشارژ کنترل‌شده عمل کرده و نقش فعال در تعادل بار ایفا کنند.

استفاده از خودروهای الکتریکی تک‌فاز به‌صورت هدفمند و هوشمند در ریزشبکه، تأثیر چشم‌گیری در کاهش عدم تعادل بار، کاهش جریان نول، بهبود یکنواختی توان خروجی و بهبود کلی کیفیت توان دارد. این رویکرد نه‌تنها نسبت به راه‌کارهای مبتنی بر تجهیزات فیزیکی اصلاح نامتعادلی (نظیر STATCOM یا مبدل‌های سه‌فاز) کم‌هزینه‌تر است، بلکه انعطاف‌پذیری بیش‌تری نیز در بهره‌برداری از منابع موجود فراهم می‌آورد. بنابراین، بهره‌گیری از ظرفیت دینامیکی خودروهای الکتریکی در آینده شبکه‌های توزیعی می‌تواند به‌عنوان یک راه‌کار مؤثر و قابل‌اجرا در نظر گرفته شود.

## ۵- بحث و تحلیل نتایج

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های عددی، موارد زیر قابل بحث و بررسی هستند:

- **کاهش نوسانات توان خروجی:** استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی منجر به کاهش ۳۳/۷ درصدی در دامنه نوسانات توان خروجی توربین بادی شد. این موضوع اهمیت بهره‌برداری ترکیبی از باتری و منابع تجدیدپذیر را در بهبود کیفیت توان نشان می‌دهد.
- بهینه‌بودن دامنه ۲۰–۸۰ درصد برای SoC: مقایسه سناریوها نشان داد که بازه عملکردی ۲۰ تا ۸۰ درصد برای سطح شارژ باتری (سناریوی ۳) بهترین تعادل را بین هموارسازی توان و حفظ سلامت باتری ایجاد کرده است.
- **کاهش جریان نول توسط خودروهای الکتریکی:** حضور هدفمند خودروهای الکتریکی تک‌فاز موجب کاهش جریان نول از ۱۶/۲۵ آمپر به ۸/۴۲ آمپر شد که بیانگر بهبود ۴۸/۲ درصدی در تعادل فازی سیستم است.
- **افزایش یکنواختی توان (SI):** شاخص SI در حضور خودروهای برقی از ۵۵/۹۱ درصد به ۶۸/۳۴ درصد افزایش یافت که نشان‌دهنده بهبود ۱۲/۴ درصدی در همواری توان خروجی ریزشبکه می‌باشد.
- **پیشی گرفتن روش پیشنهادی از روش‌های کلاسیک:** راه‌کار پیشنهادی برای کاهش عدم تعادل بار با استفاده از خودروهای الکتریکی، عملکردی هم‌تراز با تجهیزات اصلاح توان سنتی نظیر STATCOM داشته و از نظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه‌تر است.



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

- معیار ترکیبی SSoC × SI: تحلیل این معیار نشان داد که رویکرد ۳ بالاترین مقدار را دارد، که مهر تأییدی بر بهینه‌بودن بازه عملکرد ۲۰–۸۰ درصد برای باتری است.
- **کاربردپذیری در شرایط واقعی:** الگوریتم کنترل پیشنهادی مبتنی بر تخصیص تطبیقی خودروها به فازهای مختلف، نه‌تنها در محیط شبیه‌سازی عملکرد مؤثری داشت، بلکه قابلیت پیاده‌سازی در سیستم‌های کنترل عملی را نیز داراست.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک چارچوب بهینه‌سازی ترکیبی با هدف بهبود عملکرد ریزشبکه‌های تجدیدپذیر ارائه شد که از دو رویکرد مکمل استفاده می‌کند: بهره‌برداری هوشمند از سیستم ذخیره‌سازی انرژی و تخصیص هدفمند خودروهای الکتریکی برای بهبود تعادل بار. در گام نخست، مدل‌سازی دقیق سیستم ذخیره‌سازی انجام و رویکردهای متنوعی از نظر دامنه سطح شارژ (SoC) تعریف و ارزیابی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که بازه SoC برابر با ۲۰ تا ۸۰ درصد، بهینه‌ترین عملکرد را از نظر کاهش نوسانات توان، افزایش شاخص همواری (SI) و حفظ سلامت باتری فراهم می‌نماید. هم‌چنین شاخص ترکیبی SI×SSoC به‌عنوان معیاری برای سنجش کارایی نسبی سناریوها معرفی و تحلیل شد. در گام دوم، سازوکاری هوشمند برای استفاده از خودروهای الکتریکی تک‌فاز به‌عنوان منابع کنترلی پویا طراحی گردید. این الگوریتم با تخصیص خودروها به فازهای دارای بار کم‌تر، توانست جریان نول را تا ۴۸ درصد کاهش داده و شاخص SI را بیش از ۱۲ درصد افزایش دهد. این رویکرد نه‌تنها موجب بهبود کیفیت توان شد، بلکه امکان متعادل‌سازی بار را بدون نیاز به تجهیزات فیزیکی پرهزینه مانند STATCOM فراهم آورد. از منظر کاربرد عملی، نتایج این تحقیق می‌تواند در طراحی سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند در ریزشبکه‌ها مورد استفاده قرار گیرد. به‌ویژه در محیط های شهری و مسکونی که ترکیب منابع بادی، خودروهای برقی و بارهای نامتعادل رایج است، الگوریتم‌های پیشنهادی می‌توانند به‌صورت آنلاین پیاده‌سازی شده و موجب افزایش پایداری، کاهش تلفات و بهره‌برداری اقتصادی‌تر از تجهیزات ذخیره‌سازی شوند. در آینده، می‌توان توسعه این مدل را در جهت درنظر گرفتن عدم قطعیت تولید باد، پاسخ‌گویی تقاضا، و هماهنگی بین چندین ریزشبکه دنبال کرد.

## References


[1] L. Barelli, D.-A. Ciupageanu, A. Ottaviano, D. Pelosi, and G. Lazaroiu, "Stochastic Power Management Strategy for Hybrid Energy Storage Systems to Enhance Large Scale Wind Energy Integration," Journal of energy storage, vol. 31, pp. 101650-101662, 2020.

[2] T. Guo, Y. Liu, J. Zhao, Y. Zhu, and J. Liu, "A Dynamic Wavelet-Based Robust Wind Power Smoothing Approach Using Hybrid Energy Storage System," International journal of electrical power & energy systems, vol. 116, pp. 105579-105589, 2020.

[3] M. Pang, Y. Shi, W. Wang, and S. Pang, "Optimal Sizing and Control of Hybrid Energy Storage System for Wind Power Using Hybrid Parallel PSO-GA Algorithm," Energy Exploration & Exploitation, vol. 37, no. 1, pp. 558-578, 2019.

[4] Y. Sun, X. Tang, X. Sun, D. Jia, Z. Cao, J. Pan, and B. Xu, "Model Predictive Control and Improved Low-Pass Filtering Strategies Based on Wind Power Fluctuation Mitigation," Journal of modern power systems and clean energy, vol. 7, no. 3, pp. 512-524, 2019.

[5] F. Zhang, Z. Hu, K. Meng, L. Ding, and Z. Y. Dong, "Sequence Control Strategy for Hybrid Energy Storage System for Wind Smoothing," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 13, no. 19, pp. 4482-4490, 2019.

[6] N. K. Dantas, A. C. Souza, A. S. Vasconcelos, W. d. A. Junior, G. Rissi, C. Dall'Orto, A. M. Maciel, J. F. Castro, Y. Liu, and P. Rosas, "Impact Analysis of a Battery Energy Storage System Connected in Parallel to a Wind Farm," Energies, vol. 15, no. 13, pp. 4586, 2022.

[7] Y. Guo, and A. Yousefi, "Determining the Appropriate Size of the Electrical Energy Storage System of an Energy Process Based on a Solid Oxide Fuel Cell and Wind Turbine," Journal of Energy Storage, vol. 44, pp. 103430-103444, 2021.




[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025

[8] P. Rajesh, C. Naveen, A. K. Venkatesan, and F. H. Shajin, "An Optimization Technique for Battery Energy Storage With Wind Turbine Generator Integration in Unbalanced Radial Distribution Network," Journal of Energy Storage, vol. 43, pp. 103160-103172, 2021.
[9] C. Sun, S. Leto, "A Novel Joint Bidding Technique for Fuel Cell Wind Turbine Photovoltaic Storage Unit and Demand Response Considering Prediction Models Analysis Effect's," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 45, no. 11, pp. 6823-6837, 2020.
[10] W. C. de Carvalho, R. P. Bataglioli, R. A. Fernandes, and D. V. Coury, "Fuzzy-Based Approach for Power Smoothing of a Full-Converter Wind Turbine Generator Using a Supercapacitor Energy Storage," Electric Power Systems Research, vol. 184, pp. 106287-106296, 2020.
[11] P. L. Tabosa da Silva, P. A. C. Rosas, J. F. Castro, D. d. C. Marques, R. R. Aquino, G. F. Rissi, R. C. Neto, and D. C. Barbosa, "Power Smoothing Strategy for Wind Generation Based on Fuzzy Control Strategy With Battery Energy Storage System," Energies, vol. 16, no. 16, pp. 6017-6033, 2023.
[12] H. A. Behabtu, M. Vafaeipour, A. A. Kebede, M. Berecibar, J. Van Mierlo, K. A. Fante, M. Messagie, and T. Coosemans, "Smoothing Intermittent Output Power in Grid-Connected Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines With Li-Ion Batteries," Energies, vol. 16, no. 22, pp. 7637-7674, 2023.
[13] H. Faraji, S. M. Nosratabadi, and R. Hemmati, "AC Unbalanced and DC Load Management in Multi-Bus Residential Microgrid Integrated With Hybrid Capacity Resources," Energy, vol. 252, pp. 124070-124083, 2022.
[14] M. Nurmuhammed, O. Akdağ, and T. Karadağ, "A Novel Modified Archimedes Optimization Algorithm for Optimal Placement of Electric Vehicle Charging Stations in Distribution Networks," Alexandria Engineering Journal, vol. 84, pp. 81-92, 2023.
[15] Y. Ji, J. Zhang, S. Li, Y. Deng, and Y. Mu, "Electric Vehicles Acceptance Capacity Evaluation in Distribution Network Considering Photovoltaics Access," Energy Reports, vol. 9, pp. 602-608, 2023.
[16] M. S. Mathew, M. L. Kolhe, S. T. Kandukuri, and C. W. Omlin, "Data Driven Approach for the Management of Wind and Solar Energy Integrated Electrical Distribution Network With High Penetration of Electric Vehicles," Journal of Cleaner Production, vol. 421, pp. 138467-138478, 2023.
[17] J. Hu, C. Ye, Y. Ding, J. Tang, and S. Liu, "A Distributed MPC to Exploit Reactive Power V2G for Real-Time Voltage Regulation in Distribution Networks," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 13, no. 1, pp. 576-588, 2021.
[18] J. Chen, L. Mao, Y. Liu, J. Wang, and X. Sun, "Multi-Objective Optimization Scheduling of Active Distribution Network Considering Large-Scale Electric Vehicles Based on NSGAII-NDAX Algorithm," IEEE Access, Vol. 11, pp. 97259-97273, 2023.
[19] W. Abdelfattah, A. S. Abdelhamid, H. M. Hasanien, and B. A.-E. Rashad, "Smart Vehicle-to-Grid Integration Strategy for Enhancing Distribution System Performance and Electric Vehicle Profitability," Energy, pp. 131807-131823, 2024.
[20] M. Ozbak, M. Ghazizadeh-Ahsaee, M. Ahrari, M. Jahantigh, S. Mirshekar, M. Mirmozaffari, and A. Aranizadeh, "Improving Power Output Wind Turbine in Micro-Grids Assisted Virtual Wind Speed Prediction," Sustainable Operations and Computers, vol. 5, pp. 119-130, 2024.
[21] E. Akbari, "Integrated generation and transmission line expansion planning considering reactive power in the presence of uncertainty of wind farms and FACTS devices", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, Vol. 13, No. 4, pp. 23-36, 2025.
[22] H. Tavalaei, M. Samiei Moghaddam, M. Vahedi, N. Salehi, M. Hoseini Abardeh, "Energy Management, Smart Grid, Fuzzy Algorithm, Renewable Energy, Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, Vol. 13, No. 4, pp. 37-50, 2025.
[23] A. Aranizadeh, M. Mirmozaffari, B. Khalatabadi Farahani, "Maximizing Wind Turbine Power Generation Through Adaptive Fuzzy Logic Control for Optimal Efficiency and Performance", Wind, Vol. 5, No. 1, 2025.

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]

[24] S. Nadari, A. R. Tavakoli, “improving the dynamic response and passing the low voltage of wind turbines by using a combined system to improve the quality of power”, Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, Vol. 13, No. 3, pp. 31-52, 2024.
[25] M. J. Nafehfeshan, B. Bahmani-Firouzi, M. Nafar, “Improved Gray Wolf Optimizer Based Optimized Scheduling of Energy Hub with Renewable Energy Resources and Metro”, Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, Vol. 13, No. 1, pp. 45-61, 2024.
[26] M. H. Tanha, Z. Tanha, A. Aranizadeh, M. Mirmozaffari, “Sustainable Wind Energy Security: Assessing the Impact of False Data Injection on Wind Turbine Performance”, Sustainability, Vol. 17, No. 10, 2025.
[27] A. Aranizadeh, H. Shad, B. Vahidi, A. Khorsandi, “A novel small-scale wind-turbine blade failure detection according to monitored-data”, Results in Engineering, Vol. 25, 2025.
[28] F. D. Bianchi, H. D. Battista, and R. J. Mantz, “Wind Turbine Control Systems”, Berlin, Germany: Springer- Verlag, 2007.
[29] B. Singh and S. Sharmay, “Stand-alone wind energy conversion system with an asynchronous generator”, Journal Power Electron., Vol. 10, No. 5, pp. 538-547, Sep., 2010.
[30] X. Zhang, “Control Strategy of Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter with PV System as Separate DC Source”, Degree Project in Electrical Engineering, Master of Science, Stockholm, Sweden, 2011.

**زیرنویس‌ها:**

1. Hybrid Energy Storage System
2. Battery Energy Storage System
3. Multi-Port Convertor
4. State of Charge
5. Particle Swarm Optimization
6. Genetic Algorithm
7. Constant Low-Pass Filter
8. Variable Low-Pass Filter
9. Wavelet Packet Decomposition
10. Empirical Mode Decomposition
11. Flywheel Energy Storage System
12. Maximum Power Variation
13. Maximum Power Point Tracking
14. Tip Speed Ratio
15. Depth of Discharge
16. Total Harmonic Distortion

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2025-10-29 ]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 14 - No. 1- Spring 2025