Journal of **N**ovel **R**esearches on **S**mart **P**ower **S**ystems - Vol. 15 - No. 2 – Summer 2026
P-ISSN: 2322-2468, E-ISSN: 2981-0272, https://jeps.dezful.iau.ir/

Research Article

Robust Power Flow Regulation and Nonlinear Control of Fuel Cell–Ultracapacitor Hybrid Electric Vehicles Based on Continuous Power Balance

Gholam Reza Shahabadi*[1], *Ph.D.*, Fatemeh Rashedi[2], *Assistant Professor*

[1]Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran
ghr.shahabadi@gmail.com
[2]Department of Basic Sciences, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran
frashedi@tvu.ac.ir

Abstract:
Fuel cell–ultracapacitor hybrid electric vehicles (FC–UC HEVs) have emerged as an efficient solution for clean transportation by simultaneously benefiting from high energy density and fast dynamic response. In previous studies, nonlinear control approaches, including passivity-based control methods with damping and interconnection assignment, have been developed to ensure asymptotic stability of such systems. However, a major challenge remains at the energy management strategy (EMS) level. Conventional rule-based EMSs, which rely on hard switching between operating modes, often suffer from chattering phenomena, excessive current stress on the fuel cell, and even numerical instability under standard DC-bus voltage regulation and abrupt load variations. To address these limitations, this paper proposes a continuous power balance–based energy management strategy (CPB-EMS) that replaces discrete conditional logics with a physically motivated continuous power balance formulation. In the proposed framework, if–then switching structures are eliminated, and power conservation principles are directly exploited to regulate power flow. The fuel cell reference current is generated through a smooth regulation loop, while the ultracapacitor inherently compensates high-frequency power fluctuations without any switching-induced delay. Simulation results obtained in the MATLAB/Simulink environment demonstrate that the proposed strategy accurately regulates the DC-bus voltage at 400 V, completely eliminates chattering, and significantly reduces voltage tracking error compared with conventional approaches.

Keyword: Fuel cell–ultracapacitor hybrid electric vehicles; Continuous power balance energy management (CPB-EMS); IDA-PBC nonlinear control; Chattering elimination; DC-bus voltage stability

Received: 3 July 2026
Revised: 23 July 2026
Accepted: 27 July 2026

*** Corresponding Author:** Dr. Gholam Reza Shahabadi

Citation: Gh.R. Shahabadi, F. Rashedi, "Robust Power Flow Regulation and Nonlinear Control of Fuel Cell–Ultracapacitor Hybrid Electric Vehicles Based on Continuous Power Balance", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 15, no. 2, pp. 63-77, August 2026 (in Persian).

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-23]

مقاله پژوهشی

تنظیم مقاوم شارش توان و کنترل غیرخطی خودروهای الکتریکی هیبریدی پیل‌سوختی- ابرخازن مبتنی بر توازن توان پیوسته

غلامرضا شهابادی*[۱]، دکترا، فاطمه راشدی[۲]، استادیار

۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی برق، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران، ghr.shahabady@gmail.com
۲- استادیار، گروه علوم پایه، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران، frashedi@tvu.ac.ir

چکیده:

خودروهای الکتریکی هیبریدی با ساختار ترکیبی پیل‌سوختی و ابرخازن، به دلیل بهره‌گیری همزمان از چگالی انرژی بالا و پاسخ دینامیکی سریع، روشی کارآمد برای چالش‌های حمل‌ونقل پاک محسوب می‌شوند. در مطالعات پیشین، روش‌های کنترل غیرخطی از جمله روش مبتنی بر انفعال با اختصاص ضرایب میرایی و اتصال، برای پایداری مجانبی این سیستم‌ها توسعه یافته است. با این حال، چالش اصلی در لایه استراتژی مدیریت انرژی قرار دارد. رویکردهای مرسوم مبتنی بر قوانین گسسته (Rule-Based)، که بر پایه سوئیچینگ سخت بین مدهای کاری عمل می‌کنند، در مواجهه با ولتاژهای باس استاندارد و تغییرات ناگهانی بار، منجر به بروز پدیده مخرب چترینگ، تنش‌های جریانی بر روی پیل سوختی و حتی ناپایداری‌های عددی در کنترلر می‌شوند. در این پژوهش، یک تغییر از منطق‌های شرطی گسسته به استراتژی مدیریت انرژی مبتنی بر توازن توان پیوسته (CPB-EMS) پیشنهاد شده است. در این مقاله ساختارهای اگر- آن‌گاه حذف شده و از قوانین فیزیکی بقای توان استفاده شده است. در این ساختار، جریان مرجع پیل سوختی از طریق یک حلقه کنترل تنظیم‌گر هموار استخراج می‌شود، در حالی که ابرخازن به صورت ذاتی و بدون تأخیر ناشی از سوئیچینگ، تمامی نوسانات توان فرکانس بالا را جبران می‌نماید. نتایج شبیه‌سازی در محیط MATLAB/Simulink نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، ضمن تثبیت دقیق ولتاژ باس DC روی ۴۰۰ ولت، پدیده چترینگ را به طور کامل حذف کرده و خطای ردیابی ولتاژ را تا حد قابل توجهی کاهش داده است.

کلمات کلیدی: خودروی هیبریدی پیل‌سوختی- ابرخازن، مدیریت انرژی پیوسته (**CPB-EMS**)، کنترل غیرخطی با اختصاص ضرایب میرایی و اتصال دلخواه، حذف چترینگ، پایداری ولتاژ باس **DC**

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۴/۱۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۵/۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۵

* **نام نویسنده مسئول:** دکتر غلامرضا شهابادی
نشانی نویسنده مسئول: بیرجند، خیابان غفاری، میدان ولیعصر، بلوار دانشگاه، دانشگاه ملی مهارت، آموزشکده پسران بیرجند (ابن حسام)، گروه برق

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

۱- مقدمه

امروزه انتشار بی‌رویه گازهای گلخانه‌ای و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی، یکی از دلایل بنیادین توجه محققان و صنعتگران به استفاده از خودروهای الکتریکی هیبریدی جهت کاهش مصرف سوخت و آلودگی محسوب می‌شود. خودروهای سنتی مجهز به موتورهای احتراق داخلی، به عنوان یکی از عوامل اصلی انتشار آلاینده‌های مخرب نظیر دی‌اکسیدکربن و اکسیدهای نیتروژن شناخته می‌شوند که تأثیرات مخربی بر سلامت عمومی و محیط‌زیست دارند. به منظور کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و مقابله با این بحران زیست‌محیطی، توسعه خودروهای الکتریکی هیبریدی به عنوان یک راهکار کلیدی و اجتناب‌ناپذیر مطرح شده است[۱]. سامانه‌هایی به منظور بهره‌برداری از انرژی‌های هیبریدی طراحی و توسعه داده شده است [۲]. در این میان، ترکیب پیل سوختی به عنوان منبع اصلی انرژی پاک و ابرخازن به عنوان منبع توان کمکی، به دلیل چگالی انرژی و توان مکمل، ساختاری ایده‌آل برای جایگزینی خودروهای آلاینده ایجاد نموده است. امروزه پیل‌های سوختی به دلیل پایداری عملیاتی بالا و بازدهی قابل‌قبول، به صورت فزاینده‌ای مورد توجه پژوهش‌ها و کاربردهای صنعتی است[۳]. از این فناوری در حوزه‌های گوناگونی از جمله صنایع خودروسازی و وسایل نقلیه هیبریدی، نیروگاه‌های ترکیبی، زیردریایی‌ها و نیز فرایندهای صنعتی مورد استفاده و بررسی قرار گرفته است[۴]. پیل سوختی یک مبدل الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی جریان مستقیم تبدیل می‌کند. سوخت مربوط به این مبدل‌ها عمدتا هیدروژن است. از بین انواع مختلف پیل‌های سوختی، پیل سوختی غشای تبادل پروتون (PEMFC) به‌دلیل ویژگی‌هایی مثل عملکرد مطلوب در دماهای پایین، راه‌اندازی سریع، بازده مناسب، چگالی توان بالا و طول عمر قابل‌قبول، کاربرد گسترده‌تری در سامانه‌های خودرویی و وسایل نقلیه هیبریدی دارد[۵]. از دیگر مزایای پیل‌های سوختی می‌توان به عدم انتشار آلاینده‌های زیست محیطی در حین عملکرد و سادگی ساختار مکانیکی اشاره کرد که این امر موجب افزایش قابلیت اطمینان عملیاتی و کاهش هزینه‌های نگهداری شده است[۶]. پیل‌های سوختی عموماً از بازده بالاتری نسبت به موتورهای احتراق داخلی برخوردارند و توانایی تأمین توان در بازه وسیعی از شرایط کاری را دارند. با این حال به‌دلیل محدودیت‌های عملیاتی و دینامیکی پیل‌های سوختی، امکان استفاده از یک پیل سوختی غشای تبادل پروتون به‌صورت مستقل درتمامی شرایط بهره‌برداری خودرو وجود ندارد. تغییرات سریع توان بار می‌تواند موجب برهم‌خوردن تعادل فشار در پشته پیل سوختی، بروز کمبود سوخت و در نهایت کاهش طول عمر پیل سوختی گردد. لذا، به‌کارگیری یک سامانه ذخیره‌ساز انرژی مناسب در کنار پیل سوختی، نقشی کلیدی در بهبود عملکرد و افزایش دوام سیستم ایفا می‌نماید. در چنین پیکربندی‌هایی، باتری‌ها به‌طور متداول به‌عنوان گزینه ذخیره‌ساز انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، اگرچه باتری‌ها از نظر سازگاری عملکردی با پیل سوختی رفتار قابل‌قبولی دارند، ولی ابرخازن‌ها به‌عنوان گزینه‌ای نوظهور به‌دلیل پاسخ دینامیکی بسیار سریع، طول عمر بالا و چگالی توان زیاد، همراه مناسب‌تر و کارآمدتری برای پیل سوختی محسوب می‌شوند [۷]. در بین پیکربندی‌های مختلف سامانه‌های هیبریدی، ساختار موازی به‌دلیل محدودیت کمتر در اجزای سیستم، بازده بالاتر و سهولت در پیاده‌سازی راهبردهای مدیریت انرژی، به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد و پرکاربرد مورد توجه قرار گرفته است[۸]. افزون بر این، در صورت بروز خرابی در یکی از منابع انرژی، سامانه همچنان قادر به ادامه عملکرد پایدار بوده که این امر منجر به افزایش قابلیت اطمینان کلی سیستم می‌شود. در این ساختار، پیل سوختی از طریق مبدل افزاینده به باس DC متصل شده و ابرخازن به‌واسطه مبدل دوسویه کاهنده–افزاینده وظیفه تأمین پیوسته توان بار را بر عهده دارد. به‌گونه‌ای که سهم مشارکت هر یک از منابع در تأمین توان موردنیاز تعیین شده و در نهایت ولتاژ باس DC در محدوده مطلوب حفظ شده است. در سال‌های اخیر، راهبردهای کنترلی متنوعی به‌منظور بهره‌برداری بهینه و هماهنگ از سامانه‌های هیبریدی مبتنی بر پیل سوختی و ابرخازن در وسایل نقلیه هیبریدی توسعه و به‌کار گرفته شده‌اند. بهره‌برداری کارآمد از این منابع پاک نیازمند یک معماری کنترلی دقیق است که بتواند به طور همزمان توزیع توان بین منابع و تنظیم کننده‌های ولتاژ مبدل‌های قدرت را تضمین کند[۹].

مدیریت توان در این ساختار ترکیبی نیازمند یک استراتژی کنترلی مقاوم است که بتواند ضمن تنظیم دقیق ولتاژ باس، تقسیم توان بهینه بین منابع را تضمین کند. از آنجا که مبدل‌های الکترونیک قدرت دارای رفتار شدیداً غیرخطی می‌باشند، کنترلرهای خطی سنتی در تغییرات وسیع نقطه کار عملکرد مطلوبی ندارند[۱۰]. به همین دلیل، روش‌های کنترل غیرخطی نظیر کنترل

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

مد لغزشی و کنترل مبتنی بر انفعال با اختصاص ضرایب میرایی و اتصال در مبدل‌های الکترونیک قدرت استفاده شده است[۱۱]. در سال‌های اخیر، روش کنترل مبتنی بر انفعال با تخصیص ضرایب اتصال و میرایی به دلیل ماهیت فیزیکی و تضمین پایداری مجانبی فراگیر سیستم، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در [۱۲] روش کنترل مبتنی بر انفعال با انتخاب ضرایب میرایی و اتصال دلخواه برای کنترل مبدل‌های متصل به پیل سوختی و ابرخازن استفاده شده است. در این پژوهش یک استراتژی مدیریت انرژی طراحی شده است که جریان‌های مرجع را بر اساس قوانین منطقی و شرطی تعیین نموده است. اگرچه این روش در شرایط شبیه‌سازی خاص مقاله و ولتاژهای پایین عملکرد قابل قبولی دارد، اما رویکردهای مبتنی بر قانون گسسته دارای محدودیت‌های ذاتی عملیاتی است. در [۱۳] تمرکز بر استراتژی مدیریت انرژی با در نظر گرفتن مقدار ایده‌آل حالت شارژ ابرخازن است. در [۱۴] یک استراتژی مدیریت انرژی برای وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی مبتنی بر پیل سوختی/ باتری/ ابرخازن معرفی شده است که از روش ضرب‌کننده‌های متناوب مبتنی بر روش نقطه داخلی توزیع‌شده بهره می‌برد. در این چارچوب، با به‌کارگیری فیلتر فازی تطبیقی و نظریه بهینه‌سازی محدب بهبودیافته، بازده سوخت افزایش یافته، مصرف هیدروژن کاهش پیدا کرده و طول عمر منابع انرژی بهبود می‌یابد. در [۸] یک راهبرد کنترل غیرخطی بهینه برای سامانه ذخیره‌ساز انرژی هیبریدی در وسایل نقلیه هیبریدی ارائه شده است که با استفاده از کنترل مد لغزشی خاص تنظیم شده توسط الگوریتم ژنتیک، تنظیم ولتاژ باس را محقق نموده است. با این حال، اعتبارسنجی آن به شبیه‌سازی و آزمون C-HILمحدود بوده و فاقد پیاده‌سازی و مقایسه جامع در شرایط واقعی است. در [۱۵] یک راهبرد مدیریت انرژی کارا برای وسایل نقلیه هیبریدی ارائه شده است که بهبود عملکرد سیستم را نشان می‌دهد. با این حال، پیچیدگی مدل و بار محاسباتی بالا از چالش‌های اصلی روش پیشنهادی است. علاوه بر این، وابستگی عملکرد راهبرد به داده‌های پیش‌بینی‌شده می‌تواند کاربردپذیری آن را در شرایط عملی محدود نماید. در [۱۶] یک کنترل‌کننده غیرخطی بهینه برای سامانه ذخیره‌ساز انرژی هیبریدی در وسایل نقلیه هیبریدی معرفی شده است که با بهره‌گیری از روش لیاپانوف و الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری، تنظیم دقیق ولتاژ باس DC، رهگیری مؤثر جریان و پایداری مجانبی سراسری را تضمین می‌نماید. همچنین، ردیابی نقطه حداکثر توان منابع از طریق شبکه عصبی مصنوعی انجام شده و عملکرد سیستم با استفاده از داده‌های سیکل رانندگی برون‌شهری اعتبارسنجی شده است. به منظور تقویت ولتاژ تولیدی در پیل سوختی مبدل‌های فراوانی با قابلیت‌های مناسب معرفی شده است [۱۷].

به منظور غلبه بر محدودیت‌های روش‌های پیشین، به‌ویژه پدیده چترینگ و عدم پایداری در سطوح ولتاژ بالا، این مقاله یک رویکرد نوین تحت عنوان " استراتژی مدیریت انرژی مبتنی بر توازن توان پیوسته را پیشنهاد داده است. برخلاف الگوریتم‌های مرسوم مبتنی بر قانون (Rule-Based) که بر منطق کلیدزنی گسسته استوار هستند، استراتژی پیشنهادی با بهره‌گیری از یک ساختار محاسباتی پیوسته و یکپارچه‌سازی آن با کنترل‌کننده غیرخطی مبتنی بر انفعال با اختصاص ضرایب میرایی و اتصال، توزیع توان میان پیل سوختی و ابرخازن را به صورت کاملاً هموار و بدون شوک‌های ناگهانی مدیریت می‌نماید. این نوآوری با حذف تغییر وضعیت‌های گسسته، نه تنها امکان تثبیت دقیق و پایدار ولتاژ باس DC در سطح عملیاتی ۴۰۰ ولت را فراهم آورده، بلکه تنش‌های دینامیکی وارده به منابع انرژی را نیز به حداقل رسانده است. این مقاله به این صورت طرح‌ریزی شده است که در بخش ۲ به ساختار سیستم تحت بررسی پرداخته شده است. در بخش ۳ ساختار مداری و مدل دینامیکی سامانه پیشنهادی استخراج شده است. در بخش ۴ به بررسی کنترل‌کننده برای ساختار پیشنهادی پرداخته شده است. در بخش ۵ استراتژی مدیریت انرژی توزیع توان پیوسته پیشنهادی ارائه شده است. در بخش ۶ نتایج شبیه‌سازی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت در بخش ۷ به نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

۲- ساختار سیستم

شکل (۱) سامانه متداول خودروهای هیبریدی که شامل پیل سوختی، ابرخازن و بار است را نشان می‌دهد. در این سامانه بار تعیین کننده توان مورد نیاز برای حرکت خودرو هیبریدی است. پیل سوختی نقش منبع اصلی تأمین انرژی را در شرایط کاری مختلف ایفا می‌نماید، در حالی که ابرخازن با ذخیره انرژی مازاد نظیر انرژی بازیافتی در فرآیند ترمز امکان تأمین توان در شرایط گذرا را فراهم می‌سازد .در این ساختار، پیل سوختی از طریق مبدل افزاینده یک‌طرفه و ابرخازن به‌وسیله مبدل دوسویه

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

کاهنده–افزاینده به باس DC متصل شده است. این ساختار یک پیکربندی موازی را برای سامانه خودرو هیبریدی ایجاد نموده است.

۲-۱ پیل سوختی

پیل سوختی یک سامانه الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی (هیدروژن و یا سایر گازهای سوختی نظیر متانول) را به انرژی الکتریکی مستقیم یا DC تبدیل می‌نماید. با توجه به تفاوت در ویژگی‌های عملکردی، هر نوع پیل سوختی کاربرد مشخصی دارد. پیل سوختی غشای تبادل پروتون به دلیل دمای کاری پایین، ساختار ساده، بازده قابل‌قبول، پاسخ دینامیکی سریع و چگالی توان مناسب، کاربرد گسترده‌ای در سامانه‌های خودرو هیبریدی داشته است. مشخصات فنی پیل سوختی در جدول (۱) ارائه شده و در این پژوهش، رفتار الکتریکی آن با استفاده از رابطه ولتاژ– جریان ارائه‌شده در [۱۸] مدل‌سازی شده است. در معادله (۱) رابطه بین ولتاژ- جریان پیل سوختی غشای تبادل پروتون ارائه شده است:

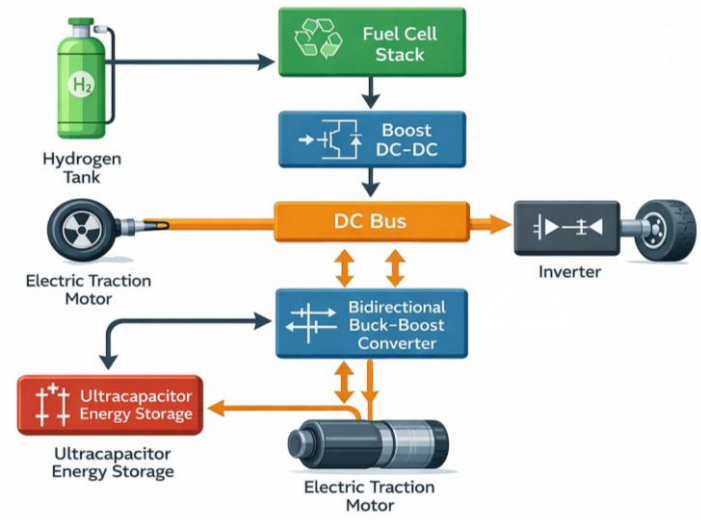
$$v_{fc} = \alpha_5 i_{fc}^5 + \alpha_4 i_{fc}^4 + \alpha_3 i_{fc}^3 + \alpha_2 i_{fc}^2 + \alpha_1 i_{fc} + \alpha_0 \quad (۱)$$

ضرایب α_i در جدول دو به صورت نمونه مشخص شده است.

Table (1): Specifications of the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC)

جدول (۱): مشخصات مربوط به سلول سوختی غشای تبادل پروتون

نوع سلول سوختی	سوخت	بازده (درصد)	دمای عملکرد (سانتی گراد)
غشای تبادل پروتون	هیدروژن	۳۵-۶۰	۳۰-۱۰۰



شکل (۱): ساختار ترکیبی سلول سوختی و ابرخازن در خودروهای هیبریدی

Figure (1): Hybrid structure of fuel cell and supercapacitor in hybrid electric vehicles

۲-۲ ابرخازن

ابرخازن‌ها به‌دلیل استحکام عملکردی مناسب، عدم نیاز به نگه‌داری و قابلیت اطمینان بالا، به‌عنوان یک گزینه نوین و کارآمد در سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی مقبولیت قابل‌توجهی نسبت به ذخیره‌سازهای متداولی مانند باتری‌ها دارند. ویژگی‌های عملکردی ابرخازن‌ها در بازه‌ای میان باتری‌ها و خازن‌های متعارف قرار گرفته و این عناصر قادرند در بازه‌های زمانی بسیار کوتاه، توان و انرژی قابل‌توجهی را تأمین یا جذب نمایند. چگالی توان بالا، پاسخ دینامیکی سریع در شرایط گذرا و زمان شارژ کوتاه‌تر نسبت به باتری‌ها، ابرخازن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای جبران نوسانات توان و مدیریت شرایط گذرای سیستم تبدیل کرده

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

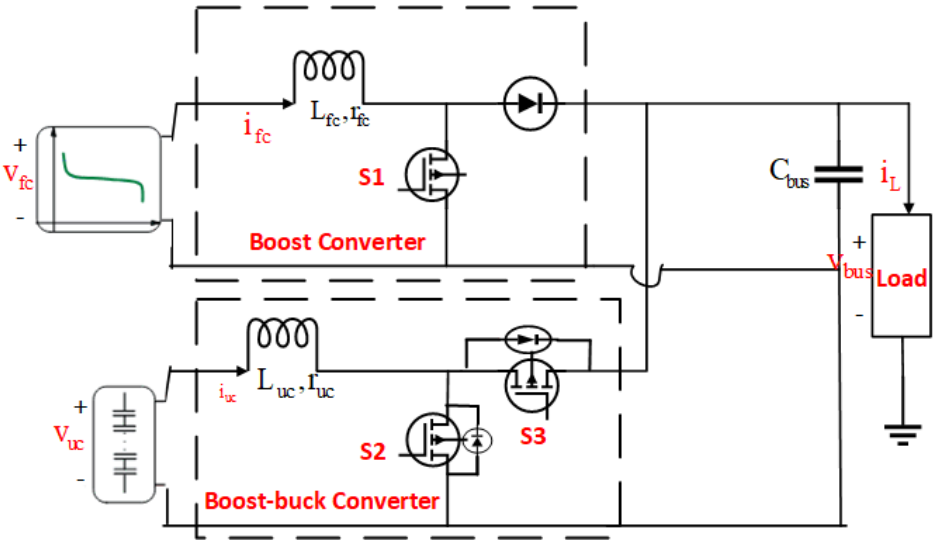
است. از این جهت، حالت شارژ (SOC) به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در مدل‌سازی و کنترل ابرخازن‌ها تعریف و در رابطه (۲) ارائه شده است.

$$SOC_{uc} = \frac{v_{uc}}{v_{uc_max}} \quad (۲)$$

v_{ucs} ولتاژ مربوط به ابرخازن و v_{ucs_max} حداکثر ولتاژ شارژ ابرخازن در حالت مدار باز است. در ساختار نشان داده شده در شکل (۱) ابرخازن با استفاده از یک مبدل افزاینده-کاهنده به باس ولتاژ به صورت دوطرفه متصل شده است. همچنین در هنگام ترمز انرژی بازیافتی در ابرخازن ذخیره می‌شود که این موضوع نیز در شکل (۱) نشان داده شده است.

۳- ساختار مداری و اقتباس مدل دینامیکی سامانه الکتریکی خودروی هیبریدی

ساختار مداری مربوط به خودروی هیبریدی مورد مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است که در آن، پیل سوختی غشای تبادل پروتون و ابرخازن به‌عنوان منابع تأمین انرژی، از طریق مبدل‌های افزاینده و دوطرفه کاهنده–افزاینده به باس DC متصل شده‌اند. در این پیکربندی، پیل سوختی به‌عنوان منبع اصلی توان، انرژی پیوسته بار را فراهم می‌نماید، در حالی‌که ابرخازن در شرایط گذرای سریع و تقاضای لحظه‌ای توان، نقش پشتیبان را ایفا نموده است.



شکل (۲): ساختار مداری سامانه هیبریدی سلول سوختی و ابرخازن

Figure (2): Circuit structure of the fuel cell and supercapacitor hybrid system

در ساختار نشان داده شده در شکل (۲) سوئیچ S1 با چرخه اتصال کوتاه D_1 و سوئیچ S2 و S3 با چرخه اتصال کوتاه D2 عمل می‌نماید. قابل توجه است که سوئیچ S2 و S3 به صورت مکمل یکدیگر عمل می‌نمایند. این به این معنی است که سوئیچ S2 در بازه زمانی D_2 اتصال کوتاه و سوئیچ S3 در این بازه اتصال باز است و بالعکس. با اعمال قوانین کیرشهف به ساختار مداری که در شکل (۲) نشان داده شده است می‌توان معادلات حالت مربوط به سامانه هیبریدی را به صورت رابطه (۳) ارائه داد. با جایگزین نمودن

$$\begin{aligned}
\frac{di_{fc}}{dt} &= \frac{1}{L_{fc}}(v_{fc} - (1-D_1)v_{bus} - r_{fc}i_{fc}) \\
\frac{dv_{bus}}{dt} &= \frac{1}{C_{bus}}((1-D_1)i_{fc} + (1-D_2)i_{uc} - i_L) \\
\frac{di_{uc}}{dt} &= \frac{1}{L_{uc}}(v_{uc} - (1-D_2)v_{bus} - r_{uc}i_{uc})
\end{aligned} \quad (۳)$$

با انتخاب $x_1 = L_{fc}i_{fc}$ و $x_2 = C_{bus}v_{bus}$ و همچنین $x_3 = L_{uc}i_{uc}$ مدل دینامیکی ارائه شده در رابطه (۳) به صورت رابطه (۴) تبدیل می‌گردد:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

$$\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= -r_{fc}\frac{x_1}{L_{fc}} - (1-D_1)\frac{x_2}{C_{bus}} + v_{fc}\\ \frac{dx_2}{dt} &= (1-D_1)\frac{x_1}{L_{fc}} + (1-D_2)\frac{x_3}{L_{uc}} - i_L\\ \frac{dx_3}{dt} &= v_{uc} - (1-D_2)\frac{x_2}{C_{bus}} - r_{uc}\frac{x_3}{L_{uc}}\end{aligned} \quad (۴)$$

معادلات دینامیکی ارائه‌شده بر پایه میانگین‌گیری فضای- حالت در یک دوره کلیدزنی (State-Space Averaging) استخراج شده‌اند و ریپل فرکانس بالای ناشی از کلیدزنی PWM را بازنمایی نمی‌کنند. این مدل برای سنتز کنترل‌کننده و تحلیل پایداری بر پایه معادلات هامیلتونی مورد استفاده قرار گرفته است.

۴- طراحی و تحلیل کنترل غیرخطی سامانه هیبریدی پیل سوختی- ابرخازن

در این پژوهش، راهبرد کنترل مبتنی برانفعال با اختصاص ضرایب میرایی و اتصال دلخواه به منظور تنظیم رفتار غیرخطی سیستم هیبریدی به‌کار گرفته شده است. به‌طوری‌که با انتساب ساختار انرژی مطلوب به سیستم حلقه بسته، متغیرهای حالت به مقادیر مرجع از پیش تعیین‌شده همگرا شده و پایداری سیستم تضمین می‌گردد. این رویکرد کنترلی با ایجاد ساختار انرژی مطلوب در سیستم حلقه بسته، علاوه بر تضمین پایداری، از پایداری مناسبی در برابر عدم قطعیت‌ها و اغتشاشات برخوردار است. در این روش کنترل هدف اصلی انتقال متغیرهای حالت از وضعیت اولیه $x=[x_1\ x_2\ x_3]^T$ به سمت مقدار مرجع $x_d=[x_{1ref}\ x_{2ref}\ x_{3ref}]^T$ است. x_{1ref}، x_{2ref} و x_{3ref} به ترتیب نقاط مطلوب سامانه بوده که هدف از روش کنترل انتقال حالت اولیه به سمت نقاط مطلوب است. هدف روش کنترل مبتنی بر انفعال با اختصاص ضرایب داخلی و میرایی، پیدا کردن ورودی کنترلی $u(x)$ به صورتی است که فرم نمایش همیلتونی را به صورت رابطه (۵) تبدیل نماید:

$$\dot{x}=[J_d(x)-R_d(x)]\nabla H_d \quad (۵)$$

در رابطه (۵) J_d و R_d به ترتیب ماتریس‌های اتصال و میرایی دلخواه هستند. تابع انرژی مطلوب نیز با H_d نشان داده شده است. تابع انرژی دلخواه سیستم را می‌توان به صورت رابطه (۶) بیان نمود:

$$H_d(x)=\frac{1}{2}(x_1-x_{1ref})^2+\frac{1}{2}(x_2-x_{2ref})^2+\frac{1}{2}(x_3-x_{3ref})^2 \quad (۶)$$

با توجه به روش کنترل مبتنی بر انفعال مبنی بر انتخاب ماتریس‌های J_d و R_d به صورت شبه متقارن و متقارن معین مثبت این ماتریس‌ها به صورت رابطه (۷) انتخاب شده است.

$$\begin{aligned}J_d &= \begin{pmatrix}0 & D_1-1 & 0\\ 1-D_1 & 0 & 1-D_2\\ 0 & D_2-1 & 0\end{pmatrix},\ R_d=\begin{pmatrix}r_{11} & 0 & 0\\ 0 & r_{22} & 0\\ 0 & 0 & r_{33}\end{pmatrix}\\ \nabla H_d &= \begin{pmatrix}\frac{x_1-x_{1ref}}{L_{fc}} & \frac{x_2-x_{2ref}}{C_{bus}} & \frac{x_3-x_{3ref}}{L_{uc}}\end{pmatrix}^T\end{aligned} \quad (۷)$$

با برابر قرار دادن معادلات حالت سامانه و فرم مربوط به حلقه بسته ارائه شده در رابطه (۵) داریم:

$$\begin{cases}-\frac{1}{C_{bus}}x_{2ref}D_1+\frac{r_{11}}{L_{fc}}x_{1ref}+\frac{1}{C_{bus}}x_{2ref}-\frac{r_{11}-r_{fc}}{L_{fc}}x_1-v_{fc}=0\\ \frac{1}{L_{fc}}x_{1ref}D_1+\frac{1}{L_{uc}}x_{3ref}D_2-\frac{1}{L_{fc}}x_{1ref}+\frac{r_{22}}{C_{bus}}x_{2ref}-\frac{1}{L_{uc}}x_{3ref}-\frac{r_{22}}{C_{bus}}x_2-i_L=0\\ \frac{-1}{C_{bus}}x_{2ref}D_2+\frac{1}{C_{bus}}x_{2ref}+\frac{r_{33}}{L_{uc}}x_{3ref}-\frac{r_{33}-r_{uc}}{L_{uc}}x_3-v_{uc}=0\end{cases} \quad (۸)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

یک راه‌حل برای معادله (۸) انتخاب r_{22} برابر صفر ، $r_{11}=r_{fc}$ و $r_{33}=r_{uc}$ است. با این انتخاب ورودی‌های کنترلی D_1 و D_2 به صورت رابطه (۹) استخراج شده است.

$$D_1=1-\frac{C_{bus}}{x_{2ref}}\left[v_{fc}+\frac{(r_{11}-r_{fc})x_1-r_{11}x_{1ref}}{L_{fc}}\right]$$
$$D_2=1-\frac{C_{bus}}{x_{2ref}}\left[v_{uc}+\frac{(r_{33}-r_{uc})x_3-r_{33}x_{3ref}}{L_{uc}}\right] \quad (۹)$$

۴-۱ اثبات پایداری روش کنترل مبتنی بر انفعال با تخصیص ماتریس داخلی و میرایی

به منظور اثبات روش کنترلی ارائه شده لازم است ابتدا تابع لیاپانوف انتخاب گردد. برای اثبات پایداری در روش کنترل مبتنی بر انفعال با اختصاص ضرایب داخلی و میرایی دلخواه، تابع انرژی مطلوب سیستم که در رابطه (۵) با H_d مشخص شده است به عنوان تابع لیاپانوف انتخابی در نظر گرفته می‌شود ($V=H_d$). برای اثبات پایداری باید مشتق زمانی تابع لیاپانوف انتخابی منفی باشد. به این منظور مشتق اول این تابع محاسبه خواهد گردید. در رابطه (۱۰) مشتق زمانی تابع محاسبه شده است:

$$\dot{V}=\dot{H}_d=(\nabla H_d(x))^T\dot{x}=\{\nabla H_d(x)\}^T\{J_d(x)-R_d(x)\}\{\nabla H_d(x)\} \quad (۱۰)$$

چون ماتریس $J_d(x)$ یک ماتریس شبه متقارن است لذا داریم:

$$\{\nabla H_d(x)\}^T J_d(x)\{\nabla H_d(x)\}=0 \quad (۱۱)$$

همچنین ماتریس $R_d(x)$ یک ماتریس مثبت معین است. با توجه به روابط فوق می‌توان نشان داد که:

$$\dot{V}=\dot{H}_d(x)=-\{\nabla H_d(x)\}^T R_d(x)\{\nabla H_d(x)\}<0 \quad (۱۲)$$

با توجه به این‌که ($V>0,\dot{V}<0$) است لذا پایداری مجانبی فراگیر سامانه مورد بررسی قابل اثبات می‌باشد. تحلیل پایداری ارائه‌شده برای حلقه کنترل بدون اعمال محدودکننده جریان صادق است و فرض بر پیوستگی و مشتق‌پذیری سیگنال‌های مرجع دارد. در حلقه بیرونی، محدودسازی جریان مرجع ابرخازن با استفاده از محدودکننده نرخ تغییر انجام می‌شود تا پرش‌های ناگهانی در مشتق مرجع ایجاد نگردد و شرط پیوسته بودن مشتقات جزئی تابع هامیلتونی حفظ شود. این محدودکننده بخشی از قانون کنترلی IDA-PBC نیست و بر سنتز بازخوردی تأثیری ندارد. دامنه اعتبار اثبات پایداری و اثر محدودکننده در رفتار حلقه بسته در بخش نتایج مورد بحث قرار گرفته است.

۵- استراتژی مدیریت انرژی پیوسته پیشنهادی: توازن توان پیوسته (CPB-EMS)

۵-۱ محدودیت‌های روش‌های مرسوم و ضرورت رویکرد جدید

در اکثر تحقیقات پیشین، از استراتژی‌های مبتنی بر قوانین قطعی (Rule-Based) یا فلوچارت‌های منطقی برای توزیع توان بین پیل سوختی و ابرخازن استفاده شده است. اگرچه پیاده‌سازی این روش‌ها ساده است، اما ماهیت گسسته آن‌ها (تغییر وضعیت ناگهانی بین حالت‌های شارژ/دشارژ) منجر به بروز پدیده مخرب چترینگ (Chattering) در جریان‌های مرجع و نوسانات شدید در ولتاژ باس DC می‌شود. این نوسانات، به‌ویژه در ولتاژهای بالا می‌تواند باعث ناپایداری سیستم کنترل غیرخطی و کاهش عمر مفید پیل سوختی گردد. برای رفع این چالش، این مقاله استراتژی مدیریت انرژی مبتنی بر توازن توان پیوسته (CPB) را پیشنهاد می‌دهد. در این رویکرد، به جای استفاده از کلیدزنی‌های منطقی سخت، توان درخواستی بار به صورت یک تابع پیوسته و هموار بین منابع تقسیم می‌شود.

۵-۲ فرمول‌بندی ریاضی استراتژی توزیع توان پیوسته

هدف اصلی CPB-EMS تامین توان لحظه‌ای بار (P_{load})با حفظ ولتاژ باس در مقدار مرجع (v_{bus}^*) و کنترل وضعیت شارژ ابرخازن (SOC_{uc}) در محدوده ایمن است. معادله توازن توان در باس DC به صورت رابطه (۱۳) تعریف می‌شود:

$$P_{load}(t)=P_{fc}(t)+P_{uc}(t)-P_{loss}(t) \quad (۱۳)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

در استراتژی پیشنهادی، تخصیص توان بر اساس دینامیک پاسخ‌دهی منابع انجام می‌شود:
پیل سوختی: به عنوان منبع انرژی اولیه، وظیفه تأمین بخش فرکانس پایین و میانگین توان درخواستی را بر عهده دارد تا از استرس‌های دینامیکی بر غشای پلیمری جلوگیری شود.
ابرخازن: به عنوان منبع توان کمکی، وظیفه تأمین فرکانس‌های بالا (تغییرات ناگهانی بار) و جذب انرژی ترمز احیاکننده را بر عهده دارد.
الگوریتم تولید جریان مرجع پیل سوختی(I_{fc}^{*}) در روش CPB به صورت رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$I_{fc}^{*}(t)=\frac{P_{load,avg}(t)}{v_{fc}(t)}\times K_{SOC}(t) \quad (۱۴)$$

که در آن $P_{load,avg}(t)$ میانگین توان بار (گذر کرده از فیلتر پایین‌گذر) است و $K_{SOC}(t)$ یک ضریب تصحیح پیوسته است که تضمین می‌کند ابرخازن تخلیه نگردد. این ضریب به صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود:

$$K_{SOC}(t)=1+\alpha(SOC_{ref}-SOC_{uc}(t)) \quad (۱۵)$$

در رابطه (۱۵)، α ضریب تنظیم‌کننده است. این ساختار تضمین می‌نماید که اگر SOC ابرخازن افت نمود، پیل سوختی به صورت نرم و پیوسته (بدون پرش) توان بیشتری تولید کرده تا هم بار را تغذیه کند و هم ابرخازن را شارژ نماید .

۵-۳ یکپارچه‌سازی با کنترل‌کننده مبتنی بر انفعال با اختصاص ضرایب میرایی و اتصال دلخواه

خروجی استراتژی CPB یعنی جریان مرجع پیل سوختی و ابرخازن (I_{fc}^{*}, I_{uc}^{*}) به عنوان ورودی‌های مرجع به کنترل‌کننده غیرخطی مبتنی بر انفعال اعمال می‌گردند. برخلاف روش‌های گسسته که در آن‌ها تغییر مرجع به صورت پله‌ای رخ می‌دهد، در روش CPB تغییرات مراجع جریان به صورت مشتق‌پذیر و هموار است. این ویژگی سبب شده است که مشتقات جزئی تابع انرژی همیلتونی همواره کران‌دار باقی بماند و پایداری مجانبی سراسری سیستم حتی در تغییرات شدید بار تضمین شود.

۵-۴ الگوریتم اجرایی پیشنهادی

حالت شتاب‌گیری: به محض افزایش ناگهانی P_{load}، جزء فرکانس بالا توسط ابرخازن تأمین می‌گردد. پیل سوختی با یک شیب ملایم جریان خود را افزایش می‌دهد تا به سطح توان جدید برسد. این فرآیند بدون هیچ‌گونه کلیدزنی انجام می‌شود .
حالت ترمزگیری: توان منفی بازگشتی ($P_{load}<0$) تماماً به سمت ابرخازن هدایت می‌شود. در این حالت، الگوریتم CPB جریان مرجع پیل سوختی را به آرامی به سمت مقدار حداقل کاهش می‌دهد. قابل توجه است که در این حالت جریان حداقل عددی بزرگتر از صفر است. در سناریوهای ترمزگیری شدید و متوالی، ابرخازن ممکن است به سرعت شارژ شده و به سقف مجاز ظرفیت خود برسد. در روش پیشنهادی، دو سطح مکانیزم برای مدیریت این شرایط در نظر گرفته شده است:

۱. سطح مدیریت انرژی (EMS): با افزایش سطح شارژ ابرخازن، متغیرهای کنترلی به‌طور خودکار سهم پیل سوختی را کاهش می‌دهند تا از تزریق توان اضافی به سیستم جلوگیری شود.
۲. حد جریان شارژ (Current Limiting): در شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی، یک بلوک اشباع (Saturation) بر روی جریان مرجع ابرخازن اعمال شده است. این بلوک اجازه نمی‌دهد جریان شارژ ابرخازن از حد مجاز سخت‌افزاری عبور کند. حتی اگر بازیافت انرژی ترمز جریان بالایی تولید کند، جریان مازاد از طریق مدارهای حفاظتی (مانند مقاومت ترمزگیر یا Braking Chopper) یا با کاهش موقت توان ترمزی هدر می‌رود تا از آسیب به ابرخازن جلوگیری شود.

حالت کروز: در سرعت ثابت P_{fc} دقیقاً برابر با P_{load} تنظیم شده و جریان ابرخازن به صفر میل می‌کند تا برای شتاب‌گیری بعدی آماده باشد.
با توجه به سه‌حالت تعریف شده در بالا، استراتژی مربوط به مدیریت انرژی پیوسته در سامانه سلول سوختی و ابرخازن تعریف شده است. در استراتژی تعریف شده که بر مبنای سه حالت ذکر شده است جریان مرجع سلول سوختی و ابرخازن با توجه به

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-23]

وضعیت خودرو در هنگام رانندگی (شتاب‌گیری، ترمزگیری و حالت کروز) تعیین می‌شود. این الگوریتم در قالب یک بلوک MFile در محیط سیمولینک متلب تعریف شده است.

۶- ارزیابی عملکرد پیشنهادی سامانه خودرو هیبریدی سلول سوختی- ابرخازن

به منظور راستی‌آزمایی الگوریتم کنترلی پیشنهادی و اطمینان از صحت عملکرد استراتژی مدیریت انرژی در شرایط دینامیکی مختلف، مدل جامع خودروی هیبریدی در محیط نرم‌افزار MATLAB/Simulink پیاده‌سازی و تحلیل شده است. پارامترهای فیزیکی و عملیاتی دقیق مربوط به پشته پیل سوختی، بسته ابرخازن و مسیر حرکت خودرو که در این مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است در جدول شماره (۲) به تفکیک ارائه شده است.

برای شبیه‌سازی رفتار خودرو در سناریوهای واقعی و به چالش کشیدن سیستم کنترلی در برابر تغییرات ناگهانی بار، از سیکل رانندگی استاندارد ژاپنی به عنوان الگوی حرکتی مبنا استفاده شده است [۱۹]. انتخاب این چرخه رانندگی به دلیل پوشش دادن طیف وسیعی از وضعیت‌های عملیاتی شامل توقف کامل، شتاب‌گیری سریع، حرکت با سرعت ثابت و ترمزگیری‌های شدید (بازیابی انرژی) صورت گرفته است تا پایداری سیستم در تمامی این شرایط تضمین گردد. شایان ذکر است که توان درخواستی لحظه‌ای از سمت بار، با استفاده از معادلات دینامیک طولی خودرو و بر اساس تغییرات سرعت در این سیکل استاندارد محاسبه و به سیستم اعمال می‌شود. این توان درخواستی بر مبنای رابطه (۱۶) محاسبه می‌گردد:

$$P_{load} = 0.5\rho_{air} v^3 s c_x + mv(\frac{dv}{dt} + g\sin\alpha + g c_r \cos\alpha) \quad (۱۶)$$

در معادلات دینامیکی فوق، متغیر v بیانگر سرعت لحظه‌ای خودرو است. همچنین به منظور افزایش دقت شبیه‌سازی، سایر پارامترهای فیزیکی و ضرایب آیرودینامیکی بدنه خودرو مطابق با مقادیر کمیِ تفکیک شده در جدول (۲) لحاظ گردیده است.

Table (2): Parameters of the hybrid electric vehicle system

جدول (۲): پارامترهای مربوط به سامانه خودروی هیبریدی

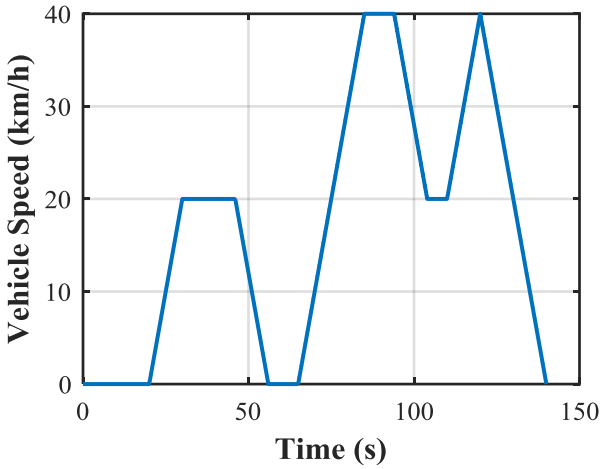
مشخصات دینامیکی بدنه	پارامترهای مربوط به سلول ساختی	پارامترهای مربوط به ابرخازن
$\rho_{air} = 1.225$	$r_{fc} = 20m\Omega$	$C_{uc} = 12F$
$c_x = 0.3$	$L_{fc} = 300\mu H$	$r_{uc} = 10m\Omega$
$c_r = 0.01$	$I_{fcmax} = 30A$	$L_{uc} = 100\mu H$
$m = 400kg$	$I_{fcmin} = 2A$	$I_{uc_max} = 70A$
$\alpha = 0$	$\alpha_0 = 60$	$I_{uc_min} = 0A$
$s = 1.4m^2$	$\alpha_1 = -1.17$	
$g = 9.8m.s^{-2}$	$\alpha_2 = 0.0617$	
	$\alpha_3 = -0.0016$	
	$\alpha_4 = 1.98\times10^{-5}$	
	$\alpha_5 = -9.01\times10^{-8}$	

به منظور همگام‌سازی محیط شبیه‌سازی با واقعیت‌های عملیاتی، از الگوی سرعت مرجع استاندارد ژاپنی بهره گرفته شده است. این چرخه، ترکیبی جامع از سناریوهای حرکت یکنواخت، شتاب‌گیری لحظه‌ای و ترمزگیری‌های شدید را شامل می‌شود. این چرخه رانندگی در شکل (۳) نشان داده شده است. مطابق با این نمودار حرکتی و سرعت لحظه‌ای توان مصرفی خودرو هیبریدی در شکل (۴) نشان داده شده است. در نمودار (۴) نواحی با توان منفی (ناشی از ترمزگیری در سرعت‌های بالا) وجود دارد که قابلیت سیستم هیبریدی در جذب انرژی برگشتی را نشان داده می‌دهد. در شکل (۵) نیز منحنی تغییرات ولتاژ پیل سوختی براساس جریان آن نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که نتایج شبیه‌سازی ارائه‌شده بر پایه معادلات فضای- حالت میانگین‌گیری‌شده در یک دوره کلیدزنی استخراج شده‌اند و ریپل فرکانس بالای ناشی از کلیدزنی PWM در آن‌ها منعکس نشده است. بر این اساس، منظور از

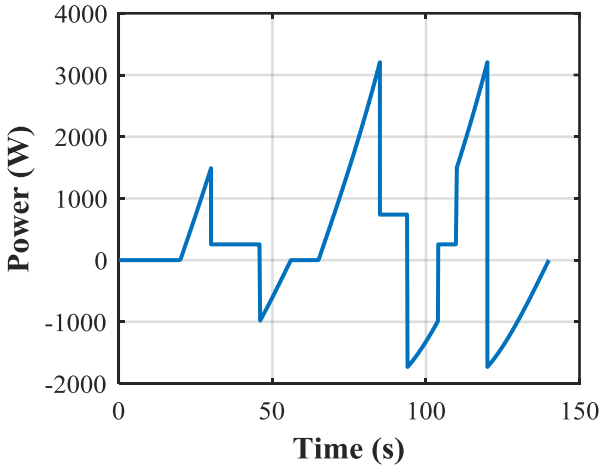
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

چترینگ یا نوسانات در این پژوهش، نوسانات با فرکانس پایین ناشی از تغییرات دینامیکی بار، تابش و دما یا واکنش پویای مدهای کنترلی است، نه ریپل کلیدزنی فرکانس بالا.



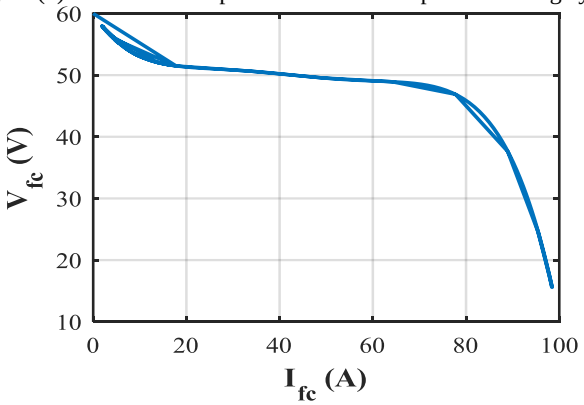
شکل (۳): چرخه رانندگی استاندارد ژاپنی در بررسی عملکرد سامانه مورد بررسی

Figure (3): Standard Japanese driving cycle used for evaluating the performance of the studied system



شکل (۴): توان مصرفی براساس چرخه رانندگی ژاپنی

Figure (4): Power consumption based on the Japanese driving cycle

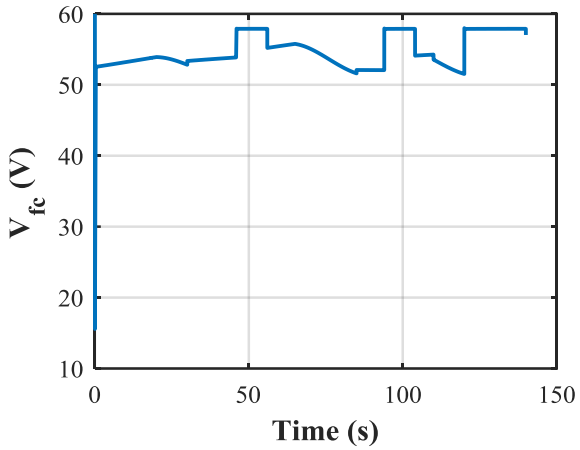


شکل (۵): نمودار ولتاژ-جریان مربوط به پیل سوختی

Figure (5): Polarization curve of the fuel cell

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

شکل (۶) رفتار ولتاژ پیل سوختی را تحت تغییرات دینامیکی بار نشان می‌دهد. در این شکل نوسانات ولتاژ به‌طور مؤثری محدود شده است. راهبرد کنترلی پیشنهادی با توزیع مناسب توان میان منابع، از افت‌های ناگهانی ولتاژ جلوگیری نموده که این باعث شده تنش‌های الکتریکی وارد بر پیل سوختی کاهش یابد. این بهبود می‌تواند نقش مهمی در افزایش قابلیت اطمینان و طول عمر پیل سوختی ایفا نماید.

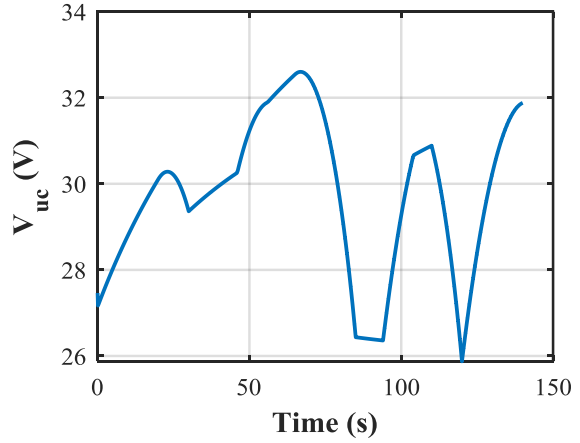


شکل (۶): تغییرات ولتاژ پیل سوختی بر حسب زمان در سامانه پیشنهادی

Figure (6): Fuel cell voltage variation versus time in the proposed system

شکل (۷) تغییرات ولتاژ ابرخازن را در شرایط گذرای سیستم هیبریدی نشان می‌دهد. ابرخازن با جذب و تزریق سریع انرژی، نوسانات توان لحظه‌ای را جبران می‌نماید. تغییرات ولتاژ آن به‌صورت کنترل‌شده و بدون نوسانات شدید مشاهده می‌شود. ابرخازن در این مطالعه نقش فعال‌تری در جبران توان‌های گذرا ایفا می‌نماید که منجر به افزایش دامنه نوسانات ولتاژ آن شده است. با این حال، این امر باعث کاهش تنش الکتریکی و بهبود پایداری ولتاژ پیل سوختی می‌شود. این موضوع بیانگر بهبود عملکرد مدیریت انرژی و هماهنگی بهتر میان منابع انرژی سیستم است. این موضوع بیانگر بهبود عملکرد مدیریت انرژی و هماهنگی بهتر میان منابع انرژی سیستم است.

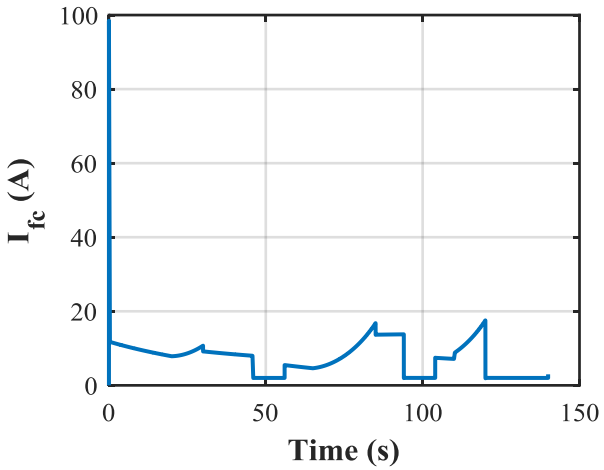
شکل (۸) موج جریان پیل سوختی را نشان می‌دهد که جریان این منبع با توجه به تغییرات بار، تغییرات ملایم و کنترل‌شده‌ای است و از نوسانات سریع و ناگهانی مصون مانده است. این رفتار بیانگر آن است که راهبرد کنترلی پیشنهادی، بارهای گذرا را تا حد امکان از پیل سوختی دور نگه می‌دارد. در مقایسه با [۱۲] دامنه تغییرات جریان پیل سوختی محدودتر شده است. این امر منجر به کاهش تنش الکتروشیمیایی و جلوگیری از پدیده‌هایی نظیر fuel starvation می‌گردد. این موضوع سبب افزایش طول عمر پیل سوختی می‌گردد.



شکل (۷): تغییرات ولتاژ پیل سوختی بر حسب زمان در سامانه پیشنهادی

Figure(7): Fuel cell voltage variation over time under the proposed system

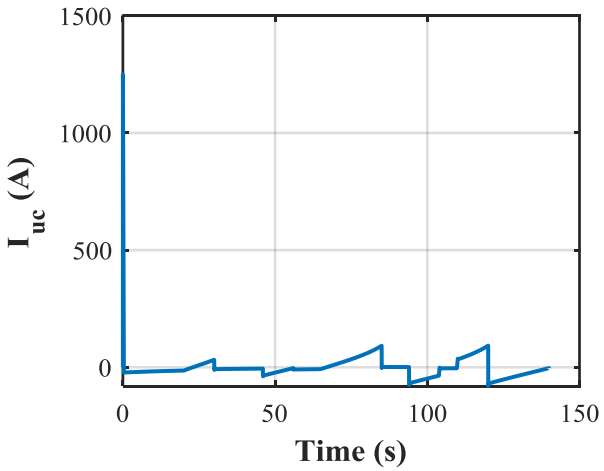
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026



شکل (۸): تغییرات جریان سلول سوختی بر حسب زمان در سامانه پیشنهادی

Figure (8): Fuel cell current variation versus time in the proposed system

شکل موج (۹) تغییرات جریان ابرخازن را نشان می‌دهد. جریان ابرخازن دارای ریپل بیشتری نسبت به سلول سوختی بوده که نشان‌دهنده پاسخ دینامیکی بالای آن در مقایسه با پیل سوختی است. در مقایسه با نتایج ارائه‌شده در [۱۲]، سهم ابرخازن در تأمین جریان‌های لحظه‌ای افزایش یافته است. این موضوع باعث کاهش نیاز به تغییرات سریع جریان در پیل سوختی می‌شود. در مجموع، این توزیع جریان به بهبود عملکرد کلی سامانه هیبریدی منجر شده است.

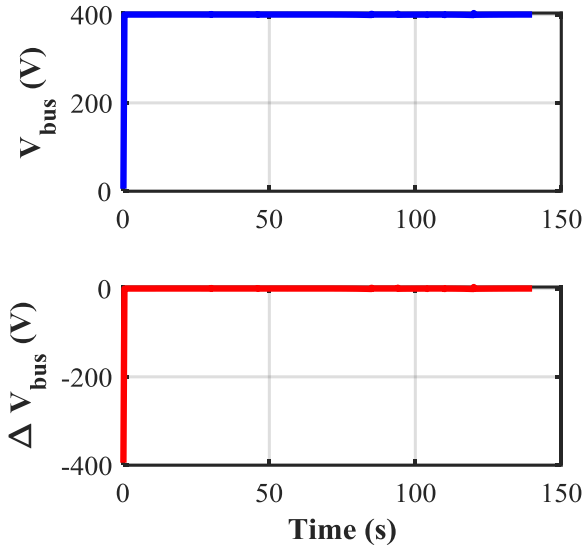


شکل (۹): تغییرات جریان ابرخازن بر حسب زمان در سامانه پیشنهادی

Figure (9): Supercapacitor current variation versus time in the proposed system

شکل (۱۰) موج ولتاژ باس DC و اختلاف آن با مقدار مرجع ۴۰۰ ولت را نشان می‌دهد. در سامانه پیشنهادی ولتاژ باس در تمامی شرایط کاری، اعم از حالت ماندگار و گذرا، به‌صورت دقیق و پایدار تنظیم شده است. استراتژی مدیریت انرژی پیشنهادی با توزیع هوشمند توان میان پیل سوختی و ابرخازن، از انتقال اغتشاشات بار به باس DC جلوگیری نموده است. همچنین، راهبرد کنترلی به‌کاررفته با تضمین رهگیری دقیق ولتاژ مرجع، خطای ولتاژ را در محدوده بسیار کوچکی نگه می‌دارد. در مقایسه با [۱۲] و سایر کارهای پیشین، نوسانات ولتاژ باس به‌طور محسوسی کاهش یافته است. این عملکرد پایدار، بیانگر برتری اساسی روش پیشنهادی در تضمین کیفیت توان و قابلیت اطمینان سامانه هیبریدی است. نتایج شبیه‌سازی تحلیل حساسیت نشان داد که تغییر ثابت زمانی فیلتر پایین‌گذر در بازه ۰٫۱ تا ۵ تأثیر محسوسی بر پاسخ سیستم ندارد و روش پیشنهادی از استحکام مناسبی نسبت به این پارامتر برخوردار است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026



شکل (۱۰): ولتاژ باس **DC** سامانه پیشنهادی و اختلاف آن با ولتاژ مرجع دلخواه ۴۰۰ ولت

Figure (10): DC bus voltage of the proposed system and its deviation from the desired 400-V reference

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک راهبرد نوین مدیریت انرژی مبتنی بر کنترل غیرخطی برای سامانه هیبریدی مبتنی بر پیل سوختی-ابرخازن ارائه گردیده است که این موضوع منجر به توزیع توان مؤثر میان منابع انرژی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که ولتاژ باس DC در مقدار مرجع ۴۰۰ ولت، در تمامی شرایط کاری و گذرا، با دقت بالا تثبیت شده است. این ویژگی، برتری اساسی روش پیشنهادی را نسبت به کارهای پیشین، در تضمین کیفیت توان و پایداری سیستم نشان می‌دهد. همچنین، با واگذاری دینامیک‌های سریع به ابرخازن، تنش‌های جریان و ولتاژ وارد بر پیل سوختی کاهش یافته و شرایط کاری مطلوب‌تری برای آن فراهم شده است. مشارکت فعال ابرخازن موجب بهبود پاسخ گذرا و افزایش قابلیت اطمینان سیستم شده است. در مجموع، نتایج به‌دست‌آمده کارایی بالای ساختار کنترلی و مدیریت انرژی پیشنهادی را تأیید می‌کنند. به‌عنوان کارهای آینده، استفاده از مبدل‌های منبع امپدانسی و شبه‌منبع امپدانسی به‌منظور افزایش انعطاف‌پذیری، بهبود بهره‌وری و کاهش حساسیت به تغییرات ولتاژ ورودی پیشنهاد می‌شود. همچنین مقایسه دو روش کنترل مدلغزشی مرتبه بالا و کنترل مبتنی بر پیش بین با روش کنترل پیشنهادی می‌تواند مسیر جدیدی برای کارهای پژوهشی در آینده باشد. در عین حال، در پیاده‌سازی عملی، عواملی مانند نویز اندازه‌گیری، تاخیرهای محاسباتی، نامعینی پارامترها، تلفات غیرایده‌آل و محدودیت‌های سخت‌افزاری می‌توانند بر عملکرد کنترلر اثرگذار باشند؛ ازاین‌رو، ارزیابی تجربی یا آزمون HIL به عنوان گام ضروری در ادامه این پژوهش پیشنهاد می‌شود.

References

مراجع

[1] Y. Wang, Z. Sun, X. Li, X. Yang, and Z. Chen, "A comparative study of power allocation strategies used in fuel cell and ultracapacitor hybrid systems," *Energy*, vol. 189, p. 116142, 2019.

[2] M. Kebriaei, A. H. Niasar, and B. Asaei, "Hybrid electric vehicles: An overview," in 2015 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2015, pp. 299-305: IEEE.

[3] J.-S. Lai and M. W. Ellis, "Fuel cell power systems and applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no ,۱۱ .pp. 2166-2190, 2017.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026

[4] S. J. Peighambardoust, S. Rowshanzamir, and M. Amjadi, "Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications," *International journal of hydrogen energy*, vol. 35, no. 17, pp. 9349-9384, 2010.

[5] S. J. Hamrock and M. A. Yandrasits, "Proton exchange membranes for fuel cell applications," *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, vol. 46, no. 3, pp. 219-244, 2006.

[6] M. H. Nehrir and C. Wang, "Fuel cells," *Electric Renewable Energy Systems*, pp. ۹ ,۲-۱۱۳ .۲۰۱۶

[7] T. Li, H. Liu, D. Zhao, and L. Wang, "Design and analysis of a fuel cell supercapacitor hybrid construction vehicle," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 28, pp. 12307-12319, 2016.

[8] R. Ghias, A. Rehman, I. Ahmad, S .Saleem, and S. H. A. Shah, "Optimized nonlinear control strategies for hybrid electric vehicles integrating photoelectrochemical and photovoltaic cells with fuel cells, batteries, and supercapacitors," in *2024 3rd International Conference on Emerging Trends in Electrical, Control, and Telecommunication Engineering (ETECTE)*, 2024, pp. 1-7: IEEE.

[9] F. Tao, B. Chen, Z. Fu, J. Liu, M. Li, and H. Sun, "Optimization of energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid electric vehicle using distributed interior point," *Electric Power Systems Research*, vol. 230, p. 110287, 2024.

[10] H. S. Das, C. W. Tan, A. Yatim, and S. Li, "Fuel cell and ultracapacitor energy system control using linear quadratic regulator proportional integral controller," *Electrical Engineering*, vol. 101, no. 2, pp. 559-573, 2019.

[11] H. Armghan, I. Ahmad, N. Ali, M. F. Munir, S. Khan, and A. Armghan, "Nonlinear controller analysis of fuel cell–battery–ultracapacitor-based hybrid energy storage systems in electric vehicles," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 43, no. 6, pp. 3123-3133, 2018.

[12] M. R. Naseh and A. Behdani, "Non-linear control of fuel cell/ultra-capacitor hybrid electric vehicle using comprehensive function algorithm based on IDA-PBC "*,Advanced Energy Conversion Materials*, pp. 1-17, 2023.

[13] Y. Xin, J. Hu, and Z. Wang, "An energy management strategy with considering ultracapacitor ideal state of charge for fuel cell/battery/ultracapacitor vehicle," *Energy*, vol. 304, p. 132024, 2024.

[14] V. K. Kasimalla, N. S. G, and V. Velisala, "A review on energy allocation of fuel cell/battery/ultracapacitor for hybrid electric vehicles," *International Journal of Energy Research*, vol. 42, no. 14, pp. 4263-4283, 2018.

[15] S. Hou, H. Chen, H. Yin ,J. Zhao, F. Xu, and J. Gao, "Energy management based on mixed-integer nonlinear model predictive control for hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 25, no. 11, pp. 17432-17451, 2024.

[16] S. H. Mian, M. S .Nazir, I. Ahmad, and S. A. Khan, "Optimized nonlinear controller for fuel cell, supercapacitor, battery, hybrid photoelectrochemical and photovoltaic cells based hybrid electric vehicles," *Energy*, vol. 283, p. 129121, 2023.

[17] S. Chakraborty, H.-N. Vu, M. M. Hasan, D.-D. Tran, M. E. Baghdadi, and O. Hegazy, "DC-DC converter topologies for electric vehicles, plug-in hybrid electric vehicles and fast charging stations: State of the art and future trends," *Energies*, vol. 12, no. 8, p. 1569, 2019.

[18] I. E. Aiteur, C. Vlad, and E. Godoy, "Energy management and control of a fuel cell/supercapacitor multi-source system for electric vehicles," in *2015 19th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, 2015, pp. 797-802: IEEE.

[19] T. J. Barlow, S. Latham, I. McCrae, and P. Boulter, "A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions," *TRL Published Project Report*, 2009.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-23]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 15 - No. 2- Summer 2026