

طراحی و صحه‌گذاری روشی نامبتنی بر مدل برای حفظ عملکرد ایمن باتری در خودروی برقی به وسیله شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه

این مقاله به ارائه روشی برای حفظ محدوده ولتاژ ایمن باتری در خودروی برقی می‌پردازد. در روش پیشنهادی با استفاده از مقدار لحظه‌ای ولتاژ باتری، محدودسازی حداکثر گشتاور موتور کششی بر اساس یک ارتباط سیگنالینگ بین سیستم مدیریت باتری (BMS) و واحد کنترل خودرو انجام می‌شود. عملکرد روش پیشنهادی مبتنی بر دقت مدل‌سازی باتری نیست و برای شرایط مختلف عمر باتری قابل استفاده است. عملکرد روش پیشنهادی به وسیله بستر تست سخت‌افزار-در-حلقه برای یک اتوبوس هیبرید الکتریکی سری مورد ارزیابی قرار گرفته است و نتایج شبیه‌سازی حاکی از بهبود عملکرد نسبت به روش‌های متداول موجود برای شرایط مختلف عمر باتری است.

محمدجواد اسفندیاری^۱

دانشجوی دکترا

وحید اصفهانیان^۲

استاد

محمدرضا حائری یزدی^۳

استاد

مسعود مسیح‌طهرانی^۴

استادیار

حسن نهضتی^۵

کارشناسی ارشد

واژه‌های راهنما: سیستم مدیریت باتری، عملکرد ایمن باتری، خودروی هیبرید الکتریکی، شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه

۱- مقدمه

امروزه استفاده از باتری‌های لیتیومی در خودروهای الکتریکی و هیبرید الکتریکی بدلیل ظرفیت انرژی و ظرفیت توان بالای آن‌ها رشد چشمگیری پیدا کرده است [۱]. قابلیت اطمینان و عمر باتری‌های لیتیومی وابستگی شدیدی به شرایط محیطی و عملکردی آن‌ها دارد [۲]. کارکرد باتری لیتیومی در شرایط خارج از محدوده مجاز (اعم از جریان، ولتاژ، دما و ...) منجر به کاهش شدید عمر باتری و در برخی موارد از بین رفتن باتری می‌شود. از این‌رو، در خودروی الکتریکی یا هیبرید الکتریکی یک یا چند سیستم مدیریت باتری^۶ (BMS) وجود دارد که وظیفه تخمین، مانیتورینگ و مدیریت وضعیت باتری را بر عهده دارد [۳].

^۱ دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران m.j.esfandyari@ut.ac.ir

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران evahid@ut.ac.ir

^۳ نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران myazdi@ut.ac.ir

^۴ استادیار، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران masih@iust.ac.ir

^۵ کارشناسی ارشد، پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران hassan.nehzati@gmail.com

^۶ Battery Management System

در مواقعی که درخواست توان از باتری نسبتاً زیاد است (مانند شتاب‌گیری، ترمز بازیاب و ...)، تغییرات لحظه‌ای در ولتاژ باتری باعث می‌شود باتری از مرز ناحیه ایمن عملکردی فراتر رود [۴]. انتظار می‌رود این رفتار با افزایش عمر باتری تشدید یابد چرا که در این شرایط مقاومت داخلی باتری افزایش می‌یابد [۵]. به‌طور معمول حفاظت از مجموعه باتری در برابر ولتاژ خارج از محدوده مجاز بوسیله یک رله در BMS انجام می‌شود که در شرایط بحرانی فرمان قطع جریان را به یک کنتاکتور قدرت که در مسیر جریان قرار دارد صادر می‌کند. حذف ناگهانی مجموعه باتری از مسیر قدرت در حین رانندگی، بخصوص زمانی که تغییرات لحظه‌ای در ولتاژ اتفاق می‌افتد منجر به شرایط خطرناک در رانندگی شده و مقدار انرژی الکتریکی در دسترس خودرو برای پیمایش مسیر را کاهش داده و در شرایطی می‌تواند منجر به آسیب به اجزا مرتبط با مجموعه باتری در خودرو شود [۴]، [۶]. از این‌رو، حفاظت با استفاده از رله باید آخرین سطح از حفاظت در BMS باشد. بنابراین، نرخ شارژ و تخلیه باتری را در این شرایط باید به نحوی کنترل کرد که ضمن حفظ محدوده عملکرد ایمن، حداکثر استفاده از توان و انرژی در دسترس باتری انجام شود.

راهکار اصلی موجود برای کنترل شارژ و تخلیه باتری استفاده از سطح توان باتری^۱ (SOP) است. سطح توان باتری عبارت است از حداکثر توانی که باتری می‌تواند بدهد یا دریافت کند به نحوی که آستانه مجاز ولتاژ، جریان، دما و سطح شارژ باتری حفظ شود [۷]. واحد کنترل خودرو با استفاده از این پارامتر قادر است درخواست توان از مجموعه باتری را به نحوی تغییر دهد که محدوده ایمن عملکردی باتری تامین شود. به‌طور معمول تخمین سطح توان باتری با استفاده از مدل مدار معادل باتری انجام می‌شود. در مرجع [۷]، از فیلتر کالمن برای تخمین پارامترهای مدار معادل استفاده شده است و سطح توان حداکثر باتری با استفاده از پارامترهای تخمینی بدست آمده است. لی و همکاران اثر مقاومت نفوذ را در مدل مدار معادل لحاظ کرده و تخمین پارامترها و سطح توان باتری را با استفاده از فیلتر کالمن انجام داده‌اند [۸]. پی و همکاران [۹] از یک مدل R-RC و روش^۲ DEKF برای تخمین پارامترها و سطح توان باتری استفاده کرده‌اند که هر دو عامل محدودساز جریان و ولتاژ باتری برای محاسبه سطح توان در نظر گرفته شده‌اند. جریان عبوری از مقاومت در مدار RC به عنوان بردار حالت و مقادیر امپدانس‌های مدار معادل به عنوان بردار پارامترها در نظر گرفته شده‌اند. فنگ و همکاران [۱۰] از روش^۳ RELS برای تخمین پارامترهای مدار معادل و سطح توان باتری استفاده کرده‌اند.

در این پژوهش از یک نویز میانگین متحرک به شکل سری با مقاومت اهمی و مدار RC در مدار معادل در نظر گرفته شده است که جبران‌کننده اختلاف ولتاژ با اطلاعات سنسور است. فلیشرو همکاران [۱۱]، [۱۲] از الگوریتمی مبتنی بر روش^۴ WRLS برای تخمین پارامترهای مدار معادل استفاده کرده‌اند که اثر پدیده نفوذ (به وسیله امپدانس واربرگ) و مقاومت انتقال شارژ به صورت تابعی از جریان (با استفاده از معادله تافل) در مدل لحاظ شده و بر اساس آن سطح توان و سطح سلامت باتری محاسبه شده است.

^۱ State of Power

^۲ Dual Extended Kalman Filter

^۳ Recursive Extended Least Square

^۴ Weighted Recursive Least Square

ملادو و همکاران [۱۳] از روش فیلتر ذره‌ای برای تخمین SoP استفاده کرده‌اند که سطح شارژ (SoC) به‌عنوان ورودی الگوریتم تخمین است. مزیت عمده این فیلتر قابلیت تقریب تابع چگالی احتمال علی‌رغم وجود عدم قطعیت غیرگوسی در اندازه‌گیری است. در این پژوهش وابستگی مقاومت نفوذ به جریان و SoC در تخمین لحاظ شده است. آنچه از مقایسه تکنیک‌های مختلف تخمین سطح توان باتری با استفاده از مدل‌های مدار معادل استنباط می‌شود حاکی از تأثیر قابل توجه دقت مدل مدار معادل در دقت تخمین SoP در باتری است به نحوی که عمده تفاوت پژوهش‌های موجود در نوع مدل مورد استفاده برای باتری است. با عنایت به اینکه پارامترهای مدار معادل تابعی از دما، سطح شارژ، جریان و عمر باتری هستند، استخراج یک چنین مدلی هزینه محاسباتی بالایی دارد و هیچ تضمینی برای صحت تخمین پارامترهای این مدل در طول زمان و با گذشت عمر باتری وجود ندارد. علاوه بر آن استفاده از مدل مدار معادل برای توصیف رفتار باتری نمی‌تواند تمامی فرآیندهای الکتروشیمی موجود در باتری را شبیه‌سازی کند. با توجه به موارد مطرح شده هیچ تخمین دقیقی از سطح توان در دسترس باتری در پرلود زمانی پیش‌رو قابل ارایه نیست و از این‌رو، تضمینی برای استفاده ایمن از توان موجود در باتری، به‌خصوص در شرایطی که سطح سلامت^۱ (SoH) باتری کاهش پیدا کرده است، وجود ندارد. همچنین، با توجه به وجود ارتباط سیگنالینگ بین BMS و واحد کنترل خودرو لازم است عملکرد سیستم کنترل شارژ و تخلیه باتری در مدل خودرو مورد ارزیابی قرار گیرد که این مهم تقریباً در هیچ یک از مراجع ذکر شده انجام نشده است.

در این مقاله یک راهکار نامبتنی-بر-مدل^۲ برای حفظ محدوده ولتاژ ایمن باتری در خودروی هیبرید الکتریکی ارایه شده است که کارایی آن تابعی از دقت مدل‌سازی باتری نیست و از این‌رو در شرایط مختلف عملکردی باتری قابل استفاده است. در روش پیشنهادی با استفاده از مقدار لحظه‌ای ولتاژ باتری، محدودسازی حداکثر گشتاور موتور کششی براساس یک ارتباط سیگنالینگ بین BMS و واحد کنترل خودرو انجام می‌شود. همچنین به دلیل هزینه محاسباتی پایین، الگوریتم پیشنهادی به راحتی در BMS قابل پیاده‌سازی است. شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه^۳ (HiL) استفاده‌های بسیاری در طراحی، کالیبراسیون و صحه‌گذاری عملکرد نمونه‌های اولیه ساخته شده از کنترلرها داشته است که با در ارتباط قرار دادن آن‌ها با مدلی از سایر قسمت‌های سیستم کنترلی صورت می‌پذیرد.

با توجه به پیچیدگی‌هایی که در سیستم‌های کنترلی خودروی هیبرید وجود دارد، استفاده از شبیه‌سازی سخت‌افزار-در-حلقه در توسعه سیستم‌های کنترلی مورد استفاده در این خودروها بسیار مورد توجه بوده است [۱۴]، [۱۵]. عملکرد روش پیشنهادی در این مقاله بوسیله شبیه‌سازی سخت‌افزار-در-حلقه برای یک اتوبوس هیبرید الکتریکی سری مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته و با نتایج حاصل از روش^۴ HPPC به‌عنوان یک روش استاندارد برای تخمین SoP در شرایط مختلف عمر باتری مقایسه شده است. بستر تست سخت‌افزار-در-حلقه در این مقاله متشکل از یک شبیه‌ساز بلادرنگ از خودروی هیبرید الکتریکی است که از طریق

^۱State of Health

^۲Model-less

^۳Hardware-in-the-Loop

^۴Hybrid Pulse Power Characterization

پروتکل^۱ CAN در ارتباط با نمونه واقعی از واحد کنترل خودرو قرار می‌گیرد و نتایج حاکی از بهبود عملکرد در حفظ محدوده ایمن ولتاژ مجموعه باتری برای شرایط مختلف عمر باتری است. ساختار مقاله حاضر بدین صورت است: در قسمت ۲، روش HPPC به‌عنوان یک روش استاندارد برای تخمین SOP آمده است که به‌عنوان یک معیار مقایسه در این مقاله استفاده شده است.

در قسمت ۳، الگوریتم محدودسازی پیشنهادی، در قسمت ۴ بستر تست سخت‌افزار-در-حلقه و اجزا آن و در قسمت ۵ نتایج حاصل از تست‌ها ارائه شده است.

۲- روش HPPC

روش HPPC که توسط مرکز^۲ INEEL ارائه شده است، به‌عنوان یک روش متداول برای تخمین سطح توان باتری استفاده می‌شود [۱۶]. در این روش، از یک مدار معادل متشکل از ولتاژ مدار باز و یک مقاومت سری برای تخمین سطح توان باتری استفاده می‌شود [۱۷]. بر این اساس، حداکثر جریان تخلیه و شارژ باتری برای حفظ آستانه مجاز ولتاژ باتری ($V_{min} \leq V \leq V_{max}$) به ترتیب در روابط (۱) و (۲) آمده است.

$$I_{max}^{dis} = \frac{V_{oc}(SoC) - V_{min}}{R_{dis}} \quad (1)$$

$$I_{min}^{chg} = \frac{V_{oc}(SoC) - V_{max}}{R_{chg}} \quad (2)$$

در روابط (۱) و (۲)، $V_{oc}(SoC)$ ولتاژ مدار باز باتری که تابعی از سطح شارژ باتری است، V_{min} حداقل ولتاژ مجاز، V_{max} حداکثر ولتاژ مجاز، R_{dis} مقاومت داخلی در حالت تخلیه و R_{chg} مقاومت داخلی در حالت شارژ هستند. سطح توان باتری در حالت‌های تخلیه و شارژ به ترتیب در روابط (۳) و (۴) آمده است.

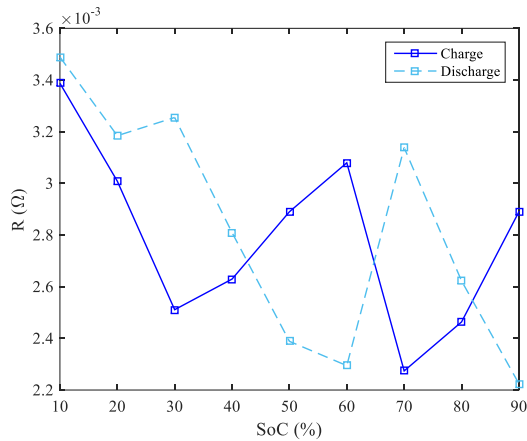
$$P_{max}^{dis} = N \cdot V_{min} \cdot I_{max}^{dis} \quad (3)$$

$$P_{min}^{chg} = N \cdot V_{max} \cdot I_{min}^{chg} \quad (4)$$

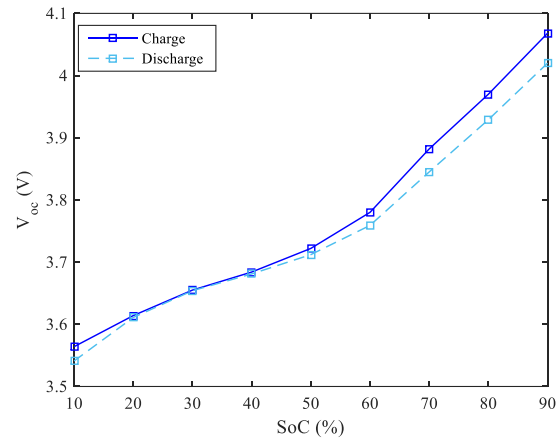
در روابط (۳) و (۴)، N بیانگر تعداد سلول‌های سری در مجموعه باتری است. سطح توان باتری در شارژ و تخلیه در واحد کنترل مرکزی خودرو برای محدودسازی حداکثر گشتاور موتور الکتریکی اعمال می‌شود. پارامترهای مدار معادل باتری بر حسب سطح شارژ در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند که با استفاده از پالس‌های شارژ و تخلیه در سطح شارژ‌های مختلف بدست آمده‌اند [۱۱]. لازم به ذکر است که سلول مورد استفاده از نوع لیتیوم-پلیمر و با ظرفیت ۴۰ آمپر ساعت است.

¹ Controller Area Network

² Idaho National Engineering and Environmental Laboratory



شکل ۲- مقاومت داخلی بر حسب سطح شارژ برای سلول مورد استفاده



شکل ۱- ولتاژ مدار باز بر حسب سطح شارژ برای سلول مورد استفاده

۳- الگوریتم محدودسازی ولتاژ نامبتنی-بر-مدل

در روش HPPC، حفظ آستانه مجاز ولتاژ باتری از طریق محاسبه حداکثر توان در دسترس باتری انجام می‌شود. همانطور که در قسمت قبل تشریح شد، برای محاسبه سطح توان باتری از یک مدل مدار معادل باتری استفاده می‌شود. کارایی روش HPPC به عنوان یک روش استاندارد برای حفظ محدوده ایمن ولتاژ باتری وابسته به دقت تخمین سطح توان باتری است که خود متأثر از دقت مدل‌سازی باتری است. بنابراین، خطا در مدل‌سازی باتری به معنای عدم دستیابی به عملکرد ایمن برای باتری در این روش است.

در این مقاله، به منظور حفظ محدوده ایمن ولتاژ باتری از الگوریتمی نامبتنی-بر-مدل برای محدودسازی حداکثر گشتاور موتور کششی استفاده شده است. برای هر کدام از حالات شارژ یا تخلیه دو آستانه ولتاژ در نظر گرفته شده است که زمان عبور از آستانه اول، لحظه شروع محدودسازی گشتاور موتور کششی است و با تغییر ولتاژ تا آستانه دوم (که همان حد مجاز ارایه شده توسط سازنده باتری است)، گشتاور موتور کششی بتدریج کاهش می‌یابد. بدین ترتیب، قبل از رسیدن به محدوده بحرانی ولتاژ عمل محدودسازی شروع می‌شود تا ضمن مدیریت مناسب استفاده از انرژی در دسترس باتری، از حذف ناگهانی توان باتری حین رانندگی ممانعت به عمل آید.

در روش پیشنهادی، انجام محدودسازی ولتاژ باتری در شرایط بحرانی به وسیله ارتباط بین BMS و واحد کنترل مرکزی خودرو صورت می‌پذیرد که این ارتباط بوسیله شبکه CAN صورت می‌پذیرد. سامانه مدیریت باتری با تشخیص ورود به محدوده بحرانی ولتاژ در مجموعه باتری، یک «ضریب تصحیح شارژ/تخلیه» محاسبه می‌کند و این ضریب را از طریق شبکه CAN به واحد کنترل مرکزی ارسال می‌کند. با اعمال ضریب تصحیح شارژ/تخلیه روی فرمان گشتاور موتور کششی عمل محدودسازی گشتاور موتور کششی انجام می‌شود که در نتیجه آن، جریان موتور کششی محدود می‌شود. از این‌رو، جریان شارژ/تخلیه باتری و به تبع آن ولتاژ مجموعه باتری در محدوده مجاز حفظ می‌شود.

روند نمای محاسبه ضرایب تصحیح شارژ و تخلیه در شکل‌های (۳) و (۴) و روابط مربوطه در جدول (۱) آمده است. در این روابط V_{2c} و V_{1c} ، V_{2d} ، V_{1d} ، V ولتاژ در تخلیه، آستانه اول ولتاژ در شارژ و آستانه اول ولتاژ در تخلیه، آستانه دوم ولتاژ در شارژ و آستانه دوم ولتاژ در شارژ می‌باشند. پارامترهای DCC و CCC هم به ترتیب ضرایب تصحیح تخلیه و شارژ هستند که اعدادی در محدوده صفر تا صد هستند و بیانگر درصد مجاز حداکثر گشتاور موتور کششی هستند که به منظور حفاظت ولتاژ مجموعه باتری اعمال می‌شوند. در حالتی که ولتاژ سلول از آستانه اول تجاوز نکرده باشد، ضرایب تصحیح برابر ۱۰۰ هستند و با رسیدن به آستانه دوم این ضرایب به صفر نزدیک می‌شوند. به منظور جلوگیری از تغییرات ناگهانی در ضرایب تصحیح از یک تابع شیب استفاده شده است که میزان تغییرات ضرایب تصحیح در هر تکرار را محدود می‌کند. مقدار شیب تغییرات با توجه به رفتار مورد انتظار کالیبره می‌شود و می‌توان شیب تغییرات متفاوتی برای کاهش و افزایش ضریب تصحیح در نظر گرفت.

توانایی باتری در ذخیره انرژی و تامین توان با گذشت عمر باتری کاهش می‌یابد. پارامتر سطح سلامت باتری (SoH^1) بیانگر تخمینی از عمر باتری است بطوریکه برای باتری نو سطح سلامت برابر ۱۰۰ درصد است. به طور کلی دو تعریف برای سطح سلامت باتری وجود دارد [۱۸]. تعریف اول بر مبنای توانایی باتری در ذخیره انرژی است که با $SoHE$ بیان می‌شود و تعریف دوم بر مبنای توانایی در تامین توان است که با $SoHP$ نشان داده می‌شود. در این مقاله، با توجه به اینکه توانایی باتری در جذب یا تامین توان مطرح است، تعریف دوم مدنظر است و اگر سخن از سطح سلامت و عمر باتری به میان می‌آید مقصود تعریف دوم است. بنا به تعریف، سطح سلامت صفر معرف حالتی است که مقاومت داخلی باتری نسبت به مقدار اولیه خود دو برابر شود. بنابراین سطح سلامت باتری به صورت رابطه (۹) بیان می‌شود که در آن، R_{now} و R_{BOL} به ترتیب مقاومت داخلی کنونی برای باتری کار کرده و مقاومت داخلی اولیه برای باتری نو هستند.

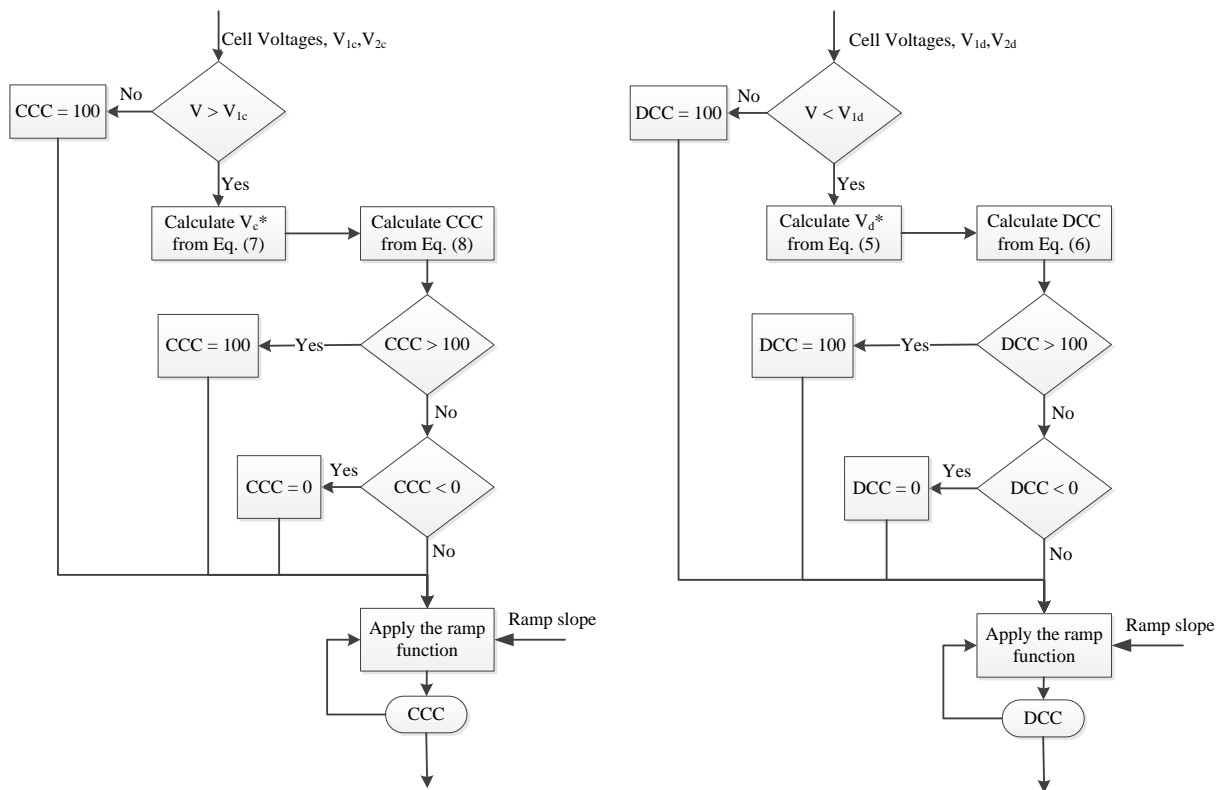
$$SoHP = 2 - \frac{R_{now}}{R_{BOL}} \quad (9)$$

در این مقاله، به منظور انجام مقایسه بین روش پیشنهادی و روش HPPC از تعریف ارائه شده در بالا برای عمر باتری استفاده شده است.

جدول ۱- روابط محاسبه ضرایب تصحیح شارژ و تخلیه

روابط محاسبه ضریب تصحیح تخلیه	
$V_d^* = V_{1d} + \frac{2V_{2d} - V_{1d}}{V_{2d} - V_{1d}}(V - V_{1d})$	(۵)
$DCC = 100 \left(2 - \frac{V_d^*}{V} \right)$	(۶)
روابط محاسبه ضریب تصحیح شارژ	
$V_c^* = V_{1c} + \frac{V_{1c} - \frac{V_{2c}}{2}}{V_{1c} - V_{2c}}(V - V_{1c})$	(۷)
$CCC = 100 \left(2 - \frac{V}{V_c^*} \right)$	(۸)

¹ State of Health



شکل ۳- روندنمای محاسبه ضریب تصحیح تخلیه

شکل ۴- روندنمای محاسبه ضریب تصحیح شارژ

۴- بستر تست سخت‌افزار-در-حلقه

به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی از یک بستر تست سخت‌افزار-در-حلقه استفاده شده است. این بستر تست از یک شبیه‌ساز بلادرنگ از اتوبوس هیبرید به همراه نمونه واقعی واحد کنترل مرکزی تشکیل شده است که بوسیله شبکه ارتباطی CAN با یکدیگر ارتباط دارند. واحد کنترل مرکزی در اتوبوس هیبرید وظیفه کنترل عملکرد تمامی قسمت‌های خودرو را بر عهده دارد و این کار را از طریق ارسال پیام‌های مختلف به واحد کنترل مربوط به هر قسمت انجام می‌دهد. به عبارت دیگر، واحد کنترل مرکزی با دریافت پیام‌های مربوط به هر قسمت، که بیانگر وضعیت کارکرد آن قسمت است، کنترل‌های لازم را با ارسال فرامین مختلف انجام می‌دهد [۱۹]. شبیه‌ساز اتوبوس هیبرید در نرم‌افزار لب‌ویو^۱ طراحی شده است و شامل هفت قسمت است: سیستم تولید قدرت، سیستم توزیع توان، سیستم کششی، سیستم کمکی، سیستم ذخیره انرژی، خودرو و نرم‌افزار ارتباط CAN [۲۰]، [۲۱]. سیستم تولید قدرت در اتوبوس هیبرید شامل موتور احتراق داخلی به همراه کنترلر موتور، ژنراتور به همراه اینورتر مربوطه و یک گیربکس تک‌سرعت می‌باشد. سیستم توزیع توان شامل مجموعه جعبه کنتاکتور است که یک عملگر و حد واسط بین واحد کنترل مرکزی و اجزای الکتریکی می‌باشد که وظیفه آن تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز اجزای مختلف است.

^۱ LabVIEW

سیستم کششی شامل موتورهای کششی و اینورتر آن‌ها است که رانش خودرو بوسیله آن انجام می‌شود. سیستم کمکی شامل موتور کمکی و اینورتر مربوط به آن است که به‌عنوان محرک برای تجهیزات جانبی خودرو مانند پمپ آب، دینام، کمپرسور و غیره عمل می‌کند. سیستم ذخیره انرژی شامل مجموعه باتری و BMS است و در قسمت خودرو، فرامین راننده و دینامیک خودرو شبیه‌سازی شده است. فرامین راننده عبارت‌اند از: موقعیت سویچ، پدال گاز و ترمز، جهت حرکت، فرمان امکان بازیاب انرژی ترمزی، فرمان امکان حرکت در حالت تمام برقی، ترمزدستی و ریتاردر. در قسمت دینامیک خودرو، معادله دینامیک حاکم بر خودرو پیاده‌سازی شده است. نرم‌افزار ارتباط CAN وظیفه ترجمه ورودی/خروجی‌های سایر قسمت‌های شبیه‌ساز به پیام CAN را بر عهده دارد.

انجام تنظیمات اولیه شبکه CAN و فرامین ارسال و دریافت در این قسمت پیاده‌سازی شده است. پیام تولید شده در شبیه‌ساز (یا دریافت شده از باس داده) به وسیله واسط^۱ PCMCIA به CAN محصول شرکت سافتینگ^۲ روی باس داده قرار می‌گیرد (یا به وسیله نرم‌افزار به ورودی/خروجی موردنظر تبدیل می‌گردد). اجزا میز تست سخت‌افزار-در-حلقه در شکل (۵) نشان داده شده است. با استفاده از این میز تست، کاربر قادر است به شکل راننده واقعی عمل کرده و رژیم‌های مختلف رانندگی و عملکرد اجزا مختلف خودرو را مورد ارزیابی و صحت‌گذاری قرار دهد. به دلیل استفاده از اجزا واقعی در شبیه‌سازی سخت‌افزار-در-حلقه، نتایج شبیه‌سازی به واقعیت نزدیک است و فرآیند توسعه الگوریتم‌های کنترلی با سرعت بیشتری انجام می‌شود.

۵- نتایج

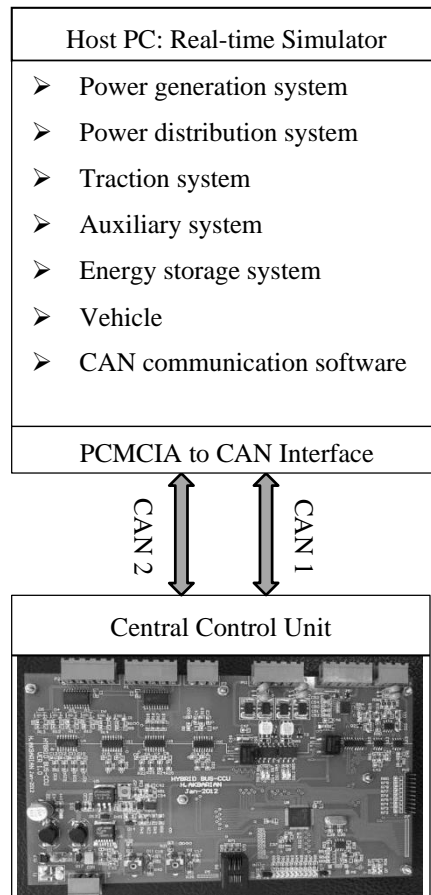
در این قسمت با استفاده از یک ارتباط حلقه-بسته بین شبیه‌ساز و واحد کنترل مرکزی در تست سخت‌افزار-در-حلقه به بررسی عملکرد الگوریتم محدودسازی ولتاژ می‌پردازیم. آستانه‌های در نظر گرفته شده برای ولتاژ سلول‌ها در جدول (۲) آمده است. با اعمال دو توالی از سیکل رانندگی تهران، عملکرد روش پیشنهادی با روش HPPC مقایسه شده است. در شکل (۶) ولتاژ سلول باتری در طول سیکل برای باتری نو با سطح سلامت صددرصد ارایه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، هر دو روش نامبنتی بر مدل (روش پیشنهادی) و مدل مبنا (HPPC) قادرند محدوده مجاز ولتاژ باتری را در تمام گستره سطح شارژ باتری و در طول سیکل حفظ کنند.

جدول ۲- آستانه‌های ولتاژ در نظر گرفته شده برای سلول مورد استفاده

پارامتر	مقدار (ولت)
آستانه اول ولتاژ در شارژ	۴
آستانه دوم ولتاژ در شارژ	۴/۲
آستانه اول ولتاژ در تخلیه	۳/۱
آستانه دوم ولتاژ در تخلیه	۲/۷

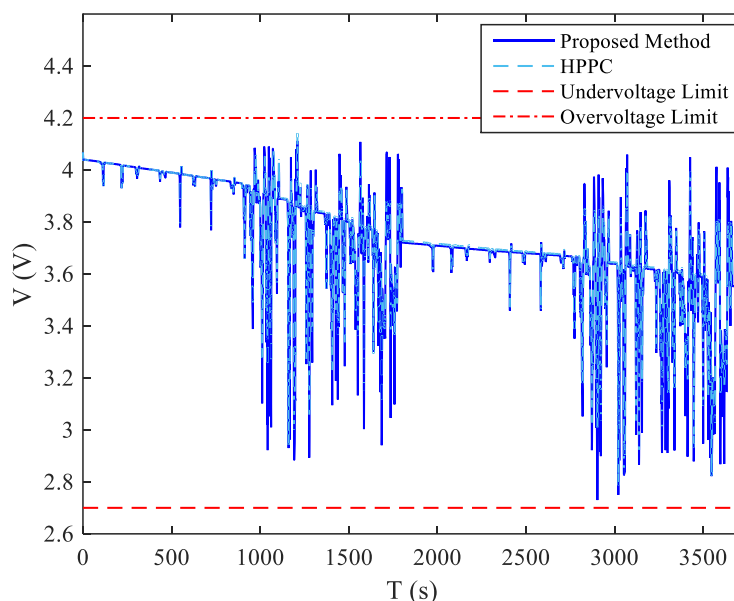
^۱ Personal Computer Memory Card International Association

^۲ Softing



شکل ۵- اجزا میز تست سخت‌افزار-در-حلقه

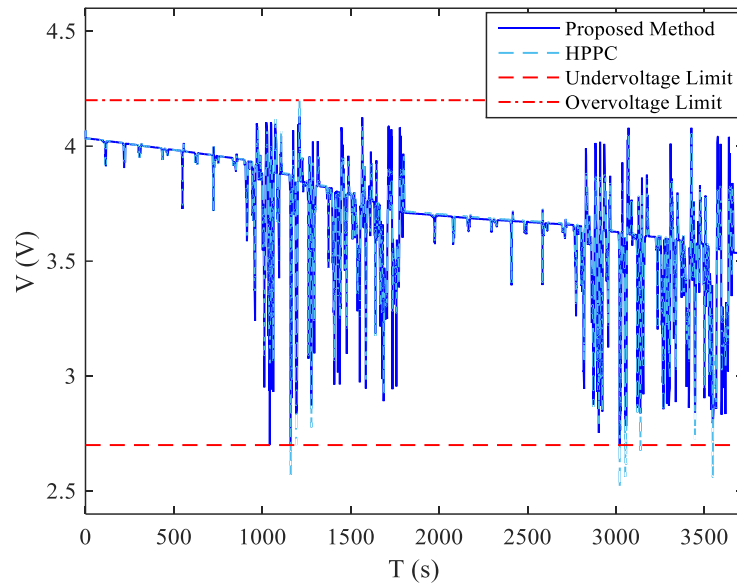
در شکل (۷) نتایج حاصل از پیمایش سیکل برای سلول کارکرده با سطح سلامت ۹۰ درصد آرایه شده است. محدوده مجاز ولتاژ سلول بین دو خط افقی است. همانطور که دیده می‌شود، در استفاده از روش پیشنهادی، علی‌رغم تغییرات بیشتر در ولتاژ سلول باتری که آن هم بدلیل افزایش مقاومت داخلی باتری است، همواره در طول سیکل عملکرد در محدوده مجاز حفظ شده است (خطوط پررنگ). این در حالی است که در استفاده از روش HPPC، در لحظاتی از سیکل رانندگی، ولتاژ باتری از محدوده مجاز فراتر رفته است. لحاظ نمودن اثر عمر باتری در تخمین SoP، نیازمند به‌روز کردن مداوم پارامترهای مدار معادل باتری است که نیازمند هزینه محاسباتی بالا است و مهم‌تر از آن، تضمینی بر همگرایی تخمین پارامترها در زمان‌های طولانی وجود ندارد. به منظور بررسی دقیق‌تر، عملکرد روش پیشنهادی در یک رژیم ساده رانندگی شامل شتاب‌گیری اولیه و سپس ترمزگیری بررسی شده است. این رژیم شامل دو حالت تخلیه (فشاردگی پدال گاز) و شارژ (ترمز بازپا) است که در حالت اول حفاظت در برابر ولتاژ کمتر از حد مجاز و در حالت دوم حفاظت در برابر ولتاژ بیش از حد مجاز صورت می‌پذیرد. با اعمال فشاردگی پدال گاز در شکل (۸)، فرآیند تخلیه مجموعه باتری آغاز می‌شود که در نتیجه ولتاژ مجموعه باتری کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، با رسیدن ولتاژ سلول باتری به آستانه اول تخلیه که برابر $3/1$ ولت است، عمل محدودسازی گشتاور موتور کششی (شکل (۹)) شروع شده است.



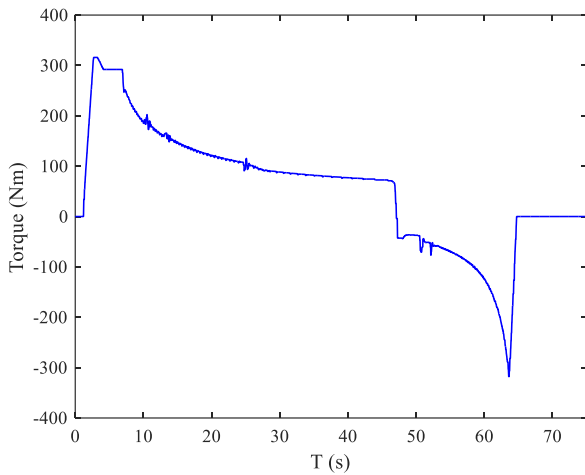
شکل ۶- ولتاژ سلول در طول سیکل رانندگی برای باتری نو (SoH=100%)

در این حالت ضریب تصحیح تخلیه، که بیانگر درصد مجاز حداکثر گشتاور موتور کششی به منظور حفاظت از مجموعه باتری است، از مقدار ۱۰۰ درصد مطابق شکل (۱۱) شروع به کاهش کرده است. با افزایش فشردگی پدال گاز در این حالت، ضریب تصحیح تخلیه نیز کاهش یافته است چرا که ولتاژ سلول باتری از آستانه اول دور و به آستانه دوم (که برابر ۲/۷ ولت است) نزدیک شده است. با شروع کاهش فشردگی پدال گاز در ثانیه تقریباً ۲۲، ولتاژ باتری شروع به افزایش کرده و در نتیجه ضریب تصحیح تخلیه افزایش یافته است. در ثانیه ۴۲، ولتاژ باتری وارد ناحیه امن شده است و در نتیجه عمل محدودسازی گشتاور موتور کششی متوقف شده و ضریب تصحیح تخلیه برابر ۱۰۰ درصد شده است. در ثانیه تقریباً ۴۴، فشردگی پدال ترمز مطابق شکل (۸) اعمال شده است. در این لحظه علی‌رغم اینکه پدال گاز هم فشرده شده است، چون اولویت با پدال ترمز است موتور کششی به حالت ژنراتوری تغییر وضعیت داده و فرآیند شارژ باتری آغاز می‌شود. تغییر ناگهانی گشتاور موتور کششی منجر به تغییرات شدید ولتاژ مجموعه باتری شده و با عبور از آستانه اول شارژ (۴ ولت)، ضریب تصحیح شارژ از ۱۰۰ درصد شروع به کاهش کرده و فرآیند محدودسازی گشتاور موتور کششی شروع می‌شود (شکل (۱۱)).

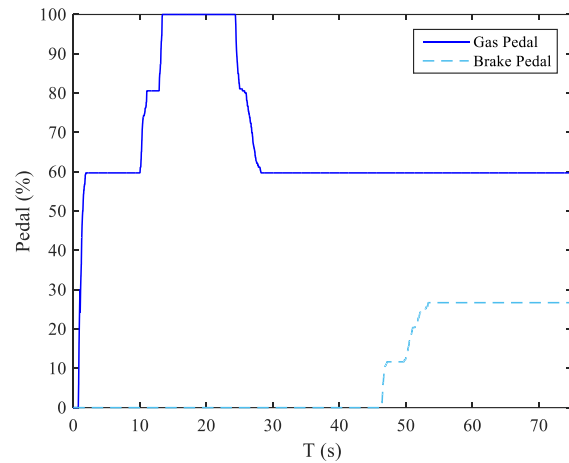
با افزایش فشردگی پدال ترمز، ولتاژ مجموعه باتری افزایش پیدا کرده و به تبع آن ضریب تصحیح شارژ نیز کاهش می‌یابد. با کاهش سرعت خودرو بواسطه فرآیند ترمزگیری و رسیدن به سرعت‌های پایین، اندازه گشتاور ترمزی بتدریج کاهش می‌یابد. از این‌رو، ولتاژ مجموعه باتری کاهش یافته و با نزول به آستانه اول ولتاژ بتدریج ضریب تصحیح شارژ کاهش یافته است. با ورود به ناحیه امن ولتاژ، عمل محدودسازی گشتاور موتور کششی متوقف می‌شود.



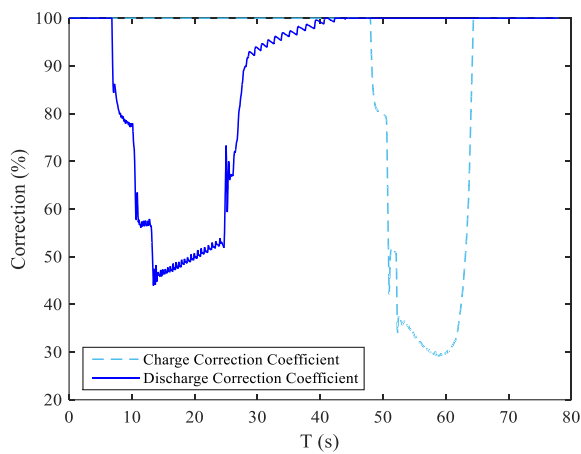
شکل ۷-ولتاژ سلول در طول سیکل رانندگی برای باتری کارکرده (SoH=90%)



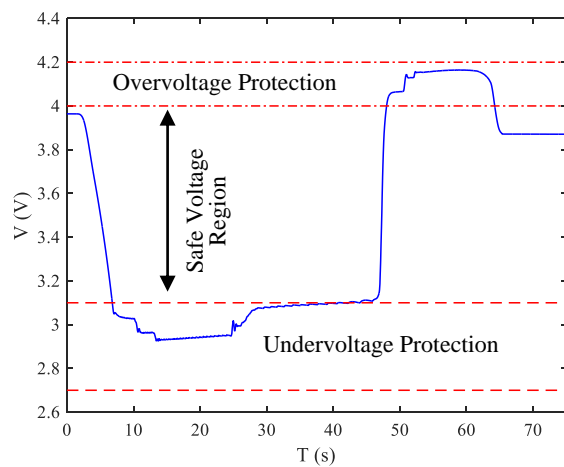
شکل ۹- گشتاور موتور کششی در یک رژیم ساده رانندگی



شکل ۸- فشردگی پدال گاز و ترمز در یک رژیم ساده رانندگی



شکل ۱۱- ضرایب تصحیح شارژ و تخلیه در یک رژیم ساده رانندگی



شکل ۱۰-ولتاژ سلول باتری در یک رژیم ساده رانندگی

نتایج تست‌های سخت‌افزار-در-حلقه حاکی از عملکرد مناسب روش پیشنهادی در محدودسازی گشتاور موتورهای کششی و حفظ محدوده ایمن ولتاژ مجموعه باتری است. روش پیشنهادی از قطع ناگهانی مسیر جریان بواسطه ورود به ناحیه غیر امن ولتاژ جلوگیری می‌کند و امکان پیمایش مسیر بیشتری را برای راننده در خودروهای الکتریکی و هیبرید الکتریکی فراهم می‌آورد.

۶- جمع‌بندی

در خودروهای الکتریکی و هیبرید الکتریکی در کنار مجموعه باتری از BMS به منظور حفاظت و مدیریت عملکرد مجموعه باتری استفاده می‌شود. در این مقاله یک راهکار نامبتنی-بر-مدل برای حفظ محدوده ولتاژ ایمن باتری در خودروی هیبرید الکتریکی ارائه شده است که در آن با استفاده از مقدار لحظه‌ای ولتاژ باتری، محدودسازی حداکثر گشتاور/موتور کششی بر اساس یک ارتباط سیگنالینگ بین BMS و واحد کنترل خودرو انجام می‌شود. در روش پیشنهادی، بدون نیاز به قطع زودهنگام مسیر جریان، گشتاور موتور کششی در شرایط گذرا مانند شتاب‌گیری لحظه‌ای یا ترمز بازیاب به گونه‌ای محدود می‌شود که ضمن حفاظت از مجموعه باتری در برابر ولتاژ خارج از محدوده مجاز، از انرژی الکتریکی موجود در باتری حداکثر استفاده به عمل آید. کارایی روش پیشنهادی در شرایط مختلف عمر باتری در یک بستر تست سخت‌افزار-در-حلقه مورد ارزیابی و صحت‌گذاری قرار گرفته و با نتایج حاصل از روش HPPC به‌عنوان یک روش استاندارد مقایسه شده است و نتایج شبیه‌سازی بیانگر بهبود عملکرد در حفاظت از مجموعه باتری است.

تقدیر و تشکر

نگارندگان این مقاله، از مجموعه پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط‌زیست دانشگاه تهران که بستر مناسبی جهت انجام این پژوهش فراهم آورده‌اند کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایند.

مراجع

- [1] Abada, S., Marlair, G., Lecocq, A., Petit, M., Sauvant-Moynot, V., and Huet, F., "Safety Focused Modeling of Lithium-ion Batteries : A Review", J. Power Sources, Vol. 306, pp. 178-192, (2016).
- [2] Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., and Ouyang, "A Review on the Key Issues for Lithium-Ion Battery Management in Electric Vehicles", J. Power Sources, Vol. 226, pp. 272-288, (2013).
- [3] Xing, Y., Ma, E. W. M., Tsui, K. L., and Pecht, "Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles", Energies, Vol. 4, No. 11, pp. 1840-1857, (2011).
- [4] Waag, W., Fleischer, C., and Sauer, D. U., "Critical Review of the Methods for Monitoring of Lithium-ion Batteries in Electric and Hybrid Vehicles", J. Power Sources, Vol. 258, pp. 321-339, (2014).

- [5] Fleischer, C., Waag, W., Bai, Z., and Sauer, D. U., “On-line Self-learning Time Forward Voltage Prognosis for Lithium-ion Batteries using Adaptive Neuro-fuzzy Inference System”, *J. Power Sources*, Vol. 243, pp. 728–749, (2013).
- [6] Waag, W., Fleischer, C., and Sauer, D. U., “Adaptive On-line Prediction of the Available Power of Lithium-ion Batteries”, *J. Power Sources*, Vol. 242, pp. 548–559, (2013).
- [7] Juang, L.W., Kollmeyer, P.J., Jahns, T.M., and Lorenz, R.D., “Implementation of Online Battery State-of-power and State-of-function Estimation in Electric Vehicle Applications”, 2012 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2012, pp. 1819–1826, Raleigh, USA, (2012).
- [8] Li, X., Sun, J., Hu, Z., Lu, R., Zhu, C., and Wu, G., “A New Method of State of Peak Power Capability Prediction for Li-ion Battery”, In 2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), pp. 1–5, Montreal, Canada, (2015).
- [9] Pei, L., Zhu, C., Wang, T., Lu, R., and Chan, C.C., “Online Peak Power Prediction Based on a Parameter and State Estimator for Lithium-ion Batteries in Electric Vehicles”, *Energy*, Vol. 66, pp. 766–778, (2014).
- [10] Feng, T., Yang, L., Zhao, X., Zhang, H., and Qiang, J., “Online Identification of Lithium-ion Battery Parameters Based on an Improved Equivalent-circuit Model and Its Implementation on Battery State-of-power Prediction”, *J. Power Sources*, Vol. 281, pp. 192–203, (2015).
- [11] Fleischer, C., Waag, W., Heyn, H. M., and Sauer, D. U., “On-line Adaptive Battery Impedance Parameter and State Estimation Considering Physical Principles in Reduced Order Equivalent Circuit Battery Models”, *J. Power Sources*, Vol. 260, pp. 276–291, Aug (2014).
- [12] Fleischer, C., Waag, W., Heyn, H.M., and Sauer, D.U., “On-Line Adaptive Battery Impedance Parameter and State Estimation Considering Physical Principles in Reduced Order Equivalent Circuit Battery Models Part 2, Parameter and State Estimation”, *J. Power Sources*, Vol. 262, pp. 457–482, Sep (2014).
- [13] Burgos-Mellado, C., Orchard, M. E., Kazerani, M., Cárdenas, R., and Sáez, D., “Particle-filtering-based Estimation of Maximum Available Power State in Lithium-ion Batteries”, *Appl. Energy*, Vol. 161, pp. 349–363, (2016).
- [14] Kim, Y., Salvi, A., Siegel, JB., Filipi, ZS., Stefanopoulou, AG., and Ersal, T., “Hardware-in-the-loop Validation of a Power Management Strategy for Hybrid Powertrains”, *Control Eng. Pract.*, Vol. 29, pp. 1–9, Jun (2014).
- [15] Wang, L., Zhang, Y., Yin, C., Zhang, H., and Wang, C., “Hardware-in-the-loop Simulation for the Design and Verification of the Control System of a Series–parallel Hybrid Electric City-bus”, *Simul. Model. Pract. Theory*, Vol. 25, pp. 148–162, Jun (2012).
- [16] Zheng, F., Jiang, J., Sun, B., Zhang, W., and Pecht, M., “Temperature Dependent Power Capability Estimation of Lithium-ion Batteries for Hybrid Electric Vehicles”, *Energy*, Vol. 113, pp. 64–75, (2016).

- [17] Xiong, R., He, H., Sun, F., and Zhao, K., “Online Estimation of Peak Power Capability of Li-ion Batteries in Electric Vehicles by a Hardware-in-loop Approach”, *Energies*, Vol. 5, No. 5, pp. 1455–1469, (2012).
- [18] Waag, W., Fleischer, C., and Sauer, D. U., “Critical Review of the Methods for Monitoring of Lithium-ion Batteries in Electric and Hybrid Vehicles”, *J. Power Sources*, Vol. 258, pp. 321–339, (2014).
- [19] Esfandyari, M.J., Esfahanian, V., Hairi Yazdi, M.R., and Nehzati, H., “Design and Implementation of a Model-in-the-loop Simulator for Verification of the Vehicle Control Software in a Series Hybrid Electric Bus”, *Modares Mech. Eng.*, Vol. 14, No. 12, pp. 13–22, (2015).
- [20] Esfahanian, V., Esfandyari, M.J., Hairi Yazdi, M.R., and Nehzati, H., “Design and Implementation of a Real-time Simulator for Hardware-in-the-loop Testing of a Hybrid Electric Bus Central Control Unit”, in *FISITA World Automotive Congress*, Maastricht, Netherlands, (2014).
- [21] Esfandyari, M.J., Hairi Yazdi, M.R., Esfahanian, V., and Nehzati, H., “Design of a Real-time Simulator of the Engine-generator for a Series Hybrid Electric Bus”, *Modares Mech. Eng.*, Vol. 14, No. 4, pp. 200–206, (2014).

فهرست نمادهای انگلیسی

ولتاژ	V
ولتاژ مدار باز	V_{oc}
گشتاور موتور کششی	T
سطح شارژ باتری	SoC
مقاومت داخلی	R

Abstract

This paper presents a method for maintaining the battery safe operating voltage region in a electric vehicle. Using the instantaneous value for the battery voltage in the proposed method, the traction motor maximum torque is limited through an interaction between the BMS and vehicle control unit. Unlike the methods based on battery State of Power (SoP) estimation in which the battery safe operation cannot be guaranteed because of the model-based nature, performance of the proposed method does not rely on the precision of battery modelling and can be used in different life conditions for the battery.

In addition, due to low computational costs, the proposed algorithm can be easily implemented on the BMS. Performance of the designed algorithm has been evaluated in a Hardware-in-the-Loop (HiL) test bench for a series hybrid electric bus and compared with the results of SoP estimation based methods. Results indicate the improvement towards maintaining the safe operating voltage region in various life conditions for the battery.