



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

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

ISSN: 2783-2538



Research Article

Lithium-ion Battery Charge Management Based on Reducing Charging Process Losses

Moaiad Mohseni ^{a,*} , Alireza Niknam Kumle ^b

^a Khuzestan Regional Electric Company, Ahvaz, Iran

^b Faculty of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2022-05-18

Revised: 2025-05-05

Accepted: 2025-05-17

Keywords:

Charging algorithm;
Adaptive charging;
Lithium-ion battery;
Reduce charging losses.

ABSTRACT

Lithium-ion batteries, owing to their high power density, long lifespan, and reliable performance, are widely utilized in electric vehicle applications. The conventional charging method for these batteries is based on the constant current–constant voltage (CC-CV) protocol, in which the battery is initially charged with a constant current until a predefined voltage threshold is reached, followed by constant voltage charging with gradually decreasing current. Considering the variation in the internal resistance of the battery during the charging process, applying a variable charging current can reduce energy losses and enhance overall system efficiency without compromising battery lifespan. In this study, an optimized charging method for lithium-ion batteries is proposed, taking into account real-time battery parameters and their relationship with the state of charge (SOC). The charging process is modeled accurately and analyzed using the YALMIP toolbox and algorithms based on the branch and bound method. In this model, indicators such as the final state of charge, final cell temperature, and energy losses are considered as optimization criteria. Simulation results demonstrate that adaptive current charging, compared to constant current charging, leads to reduced energy losses and increased battery lifespan, as it provides sufficient time for voltage polarization in each charging cycle. These findings highlight the importance of developing intelligent charging strategies to enhance the performance of lithium-ion batteries in advanced applications

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.27214.2278>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: moaiadmohsenii@gmail.com

How to cite this article:

M. Mohseni and A. Niknam Kumle, "Lithium-ion battery charge management based on reducing charging process losses," Journal of Modeling in Engineering, 23 82 (2025): 127-142, doi: 10.22075/jme.2025.27214.2278

مدیریت شارژ باتری لیتیوم-یونی بر مبنای کاهش تلفات روند شارژ

موید محسنی^{۱*}، علیرضا نیکنام کومله^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۲۸ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۱۵ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷	باتری‌های لیتیوم-یون به دلیل چگالی توان بالا، عمر طولانی و قابلیت اطمینان مناسب، به طور گسترده در خودروهای الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش رایج شارژ این باتری‌ها مبتنی بر الگوی جریان ثابت-ولتاژ ثابت ^۳ است که طی آن ابتدا باتری با جریان ثابت شارژ شده و سپس با رسیدن به ولتاژ معین، با ولتاژ ثابت و جریان کاهشی به شارژ ادامه می‌دهد. با توجه به تغییر مقاومت داخلی باتری در طول فرآیند شارژ، اعمال جریان شارژ متغیر می‌تواند تلفات انرژی را کاهش داده و کارایی کلی سیستم را افزایش دهد بدون آنکه عمر باتری کاهش یابد. در این مقاله، یک روش بهینه برای شارژ باتری‌های لیتیوم-یون ارائه شده که در آن پارامترهای لحظه‌ای باتری و ارتباط آن‌ها با وضعیت شارژ ^۴ در نظر گرفته شده است. فرآیند شارژ بر اساس مدل‌سازی دقیق و به کمک ابزار YALMIP و الگوریتم‌های مبتنی بر روش ریشه و ساقه تحلیل شده است. در این مدل، شاخص‌هایی همچون وضعیت نهایی شارژ، دمای نهایی سلول‌ها و میزان تلفات انرژی به عنوان معیارهای بهینه‌سازی لحاظ گردیده‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که استفاده از جریان تطبیقی در مقایسه با جریان ثابت، منجر به کاهش تلفات شارژ و افزایش طول عمر باتری می‌شود، چراکه زمان کافی برای فرایند پلاریزاسیون ولتاژی در هر چرخه‌ی شارژ فراهم می‌آورد. این یافته‌ها بر اهمیت توسعه‌ی استراتژی‌های هوشمند شارژ در بهبود عملکرد باتری‌های لیتیوم-یون در کاربردهای پیشرفته تأکید دارد.

واژگان کلیدی:

الگوریتم شارژ،

شارژ تطبیقی،

باتری لیتیوم-یون،

کاهش تلفات شارژ.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.27214.2278>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

خودروهای برقی امروزه در بازار گسترش فراوانی یافته‌اند و عمده‌ترین پیشرفت آنها مدیون تحولات چشمگیر مدیریت شارژ خودروهای برقی [۱]، مدیریت پیک بار شبکه ناشی از توان مصرفی شارژ [۲]، و تولید ذخیره‌سازهای لیتیوم یونی می‌باشد [۳]. مدل‌سازی و تخمین سطح شارژ باتری لیتیومی یکی از چالش‌های مدیریت شارژ به شمار می‌آید.

به دلیل اثرپذیری بالای وضعیت کاری باتری به پارامترهای محیطی مانند دما، جریان، تعداد سیکل کاری، عمق دشارژ و ... مدل‌سازی این باتری‌ها به امری پیچیده مبدل شده است [۴]. در [۵] مدل‌سازی یک باتری لیتیوم فسفات آهن با در نظرگیری فرسودگی به صورت مدار معادل تونن دارای ولتاژ مدار باز، مقاومت و خازن انجام شده است. در [۶] از مدار معادل مرتبه دوم برای تعیین آنالین وضعیت سلامت

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: moaiadmohsenii@gmail.com

۱. شرکت برق منطقه ای خوزستان، اهواز، ایران

۲. دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، دانشکده برق، تهران، ایران

³ (CC-CV)⁴ (SOC)

استناد به این مقاله:

موید محسنی و علیرضا نیکنام کومله، "مدیریت شارژ باتری لیتیوم-یونی بر مبنای کاهش تلفات روند شارژ"، مدل سازی در مهندسی، ۸۲ (۱۴۰۴): ۲۳-۱۴۲، ۱۴۲۷-۱۴۲۸، doi: 10.22075/jme.2025.27214.2278

باتری استفاده شده است که نشان دهنده ارتباط مستقیم میان مقاومت درونی باتری و شدت پلاریزاسیون با میزان ظرفیت محو شده باتری است. استفاده از روابط انتشار حلال و سینتیک تشکیل الکترولیت حالت جامد برای تشخیص ظرفیت باتری توسط [۷] پیشنهاد شده است نشانگر رابطه غیرخطی تجربی محوشدگی باتری با میزان نفوذ حلال است. مدل سازی مکانیکی محوشدگی ظرفیت باتری لیتیوم سولفور (از رقبای اصلی لیتیوم-یون برای کاربری در خودروی برقی) در [۸] ارائه شده است که نشان دهنده تاثیر منفی کار در توان‌های زیرنامی بر روی محوشدگی باتری دارد. تحلیل‌های میکروسکوپی بیشتری برای درک رفتار این باتری‌ها در جریان‌های کم و افت ولتاژهای بالا نیاز است. تحلیل جامعی از چرخه عمر باتری‌های لیتیوم-یون در [۹] صورت گرفته است که نشان می‌دهد ظرفیت باتری تابع دو قانون اهم و آرنیوس (آرنیوس معتقد بود که اسیدها و بازها هنگام حل شدن در آب، به‌طور جزئی یا کامل تفکیک می‌شوند و ذره‌های بارداری به نام یون، پدیدمی‌آورند. این ایده آرنیوس، در زمان خود، یک ایده انقلابی بود. به‌طوری که اغلب شیمییدان‌ها بر این باور بودند که مولکولها نمی‌توانند به یون‌های مثبت و منفی، شکسته شوند.) می باشد. بررسی تاثیر نرخ شارژ، تاثیر حداقل سطح شارژ، دما، و عمق دشارژ در رفتار دینامیکی باتری در [۱۰] مدل شده است. در این مدل سازی کاهش ظرفیت و عمر مفید باتری بر اساس توابعی از مقاومت و شرایط کاری مانند دما، نرخ شارژ و دشارژ و طبیعت تصادفی باتری بیان شده است. در [۱۱] یک روش بهینه‌سازی شارژ باتری لیتیوم-یون با هدف کمینه‌سازی افزایش دما و تلفات انرژی و زمان شارژ ارائه شده است که در آن از مدار معادل مرتبه دو باتری، مدل تلفات، و مدل گرمایی برای تعیین پارامترهای موثر در شارژ استفاده شده است. در نظرگیری اهداف اقتصادی شارژ در [۱۲] با استفاده از مدل الکتروگرمایی طوری انجام شده است به طوری که هزینه کل شارژ شامل هزینه مصرف برق و هزینه فرسودگی باتری کمینه شود و تاثیر نرخ شارژ، زمان شارژ، دما و شرایط محیطی دیگر بر مدل اقتصادی مشخص گردد. بهبود نرخ شارژ باتری‌های لیتیوم یون نیز یکی از عوامل تاثیر گذار در شارژ اقتصادی باتری‌ها محسوب می‌شود. نرخ شارژ بالای باتری لیتیوم منجر به تلفات بالا و اثرات مکانیکی میشود. در [۱۳] مروری به روش‌های شارژ سریع و محدودیت‌های شیمیایی و گرمایی آن شده است و

سازکارهای موثر بر محدودیت نرخ شارژ باتری شده‌اند. در [۱۴] یک روش شارژ زمان واقعی برای افزایش طول عمر باتری لیتیوم یون ارائه شده است که در آن باتری با روش جریان ثابت، ولتاژ ثابت طوری شارژ می‌شود که کمترین زوال را داشته باشد. روش‌های شارژ پالسی، علی‌رغم مزایای متعدد، دو محدودیت اساسی دارند: الف) افزایش تلفات اهمی ناشی از مولفه AC جریان و ب) تضعیف پلاریزاسیون ناشی از زمان شارژ طولانی. به منظور رفع این محدودیت‌ها، یک راه حل تکمیلی در [۱۵] معرفی شده است که با استفاده از تحلیل طیف امپدانس الکترومکانیکی باتری، اقدام به کاهش امپدانس AC و تغییر دامنه‌ی پالس جریان به صورت عکس مقاومت درونی کرده است. روش ولتاژ-ثابت، جریان-ثابت ساده‌ترین و صنعتی‌ترین روش شارژ باتری لیتیومی است که با کمترین امکانات قابل پیاده سازی است. محدودیت این روش، تلفات بالا و کاهش عمر مفید باتری در گذر زمان است که ناشی از عدم در نظرگیری مقاومت درونی باتری در فرآیند شارژ است. برای رفع این محدودیت در [۱۶، ۱۷]، جریان‌هایی با دامنه معکوس نسبت به مقاومت درونی باتری (که تابعی از نرخ شارژ و وضعیت سطح شارژ باتری است) تزریق شده است. روش‌های تطبیقی نیازمند تخمین سطح شارژ باتری هستند که در گذشته با استفاده از روابط تجربی و امروزه با استفاده از شبکه‌های عصبی و منطق فازی و این تخمین انجام می‌شود. یافتن ارتباطی میان پارامترهای قابل اندازه‌گیری باتری و پارامترهای غیرقابل اندازه‌گیری از اهداف این روش‌های تخمینی هستند. مرجع [۱۸] نشان داده‌است که تخمین سطح شارژ باتری بر اساس معیار فرسودگی باتری و مقاومت درونی نسبت به سایر روش‌های موجود دارای بیشترین دقت است. روش‌های پیشرفته‌تری نیز در زمینه‌ی شارژ تطبیقی در سال‌های اخیر گزارش شده است که نمونه‌ای از آنها روش شارژ تطبیقی چندمرحله‌ای ولتاژ ثابت و جریان ثابت بر اساس مدل پیوند فرسودگی ترموالکتریک [۱۹] و روش زمان واقعی بر اساس آگاهی از وضعیت سلامت باتری [۲۰] است. مقایسه میان سه روش جریان ثابت، جریان تطبیقی و پالسی در [۲۱] نشان می‌دهد که روش جریان ثابت با نرخ C۱ نسبت روش پالسی با دامنه C۲ و فرکانس ۵ هرتز، در حدود ۱۴ درصد زمان کمتری نیاز دارد اما ظرفیت شارژ مجدد باتری را در حدود ۱۲ درصد کاهش می‌دهد. این امر می‌تواند منجر به افزایش دمای ۵ درجه سلسیوسی شده و

منجر به کهنولت باتری گردد. بنابراین روش پالسی نتایج به مراتب بهتری را به همراه آورده است. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در زمینه بهینه‌سازی شارژ باتری‌های لیتیوم-یون با هدف افزایش عمر مفید، کاهش تلفات انرژی و سازگاری با شرایط متغیر عملیاتی انجام شده است. در سال‌های اخیر، توجه فزاینده‌ای به بهینه‌سازی استراتژی‌های شارژ باتری‌های لیتیوم-یون با هدف افزایش عمر مفید، کاهش تلفات انرژی و انطباق‌پذیری با شرایط دینامیکی و متغیر عملکردی شده است. در [۲۲] استراتژی‌های گوناگون شارژ، شامل جریان ثابت، ولتاژ ثابت، شارژ تطبیقی و جریان پالسی، مرور شده و تأکید شده است که طراحی شارژرهایی که قادر به سازگاری با دمای باتری و مقاومت داخلی آن باشند، نقش کلیدی در کاهش فرسودگی باتری ایفا می‌کنند. در [۲۳] با استفاده از مدل‌های دقیق الکتروشیمیایی، پروفایل شارژ متناسب با وضعیت فرسودگی باتری در طول عمر آن بازطراحی شده است. روش ارائه‌شده با شناسایی مدل در ابتدای عمر باتری و به‌روزرسانی تدریجی آن بر اساس مشاهدات دوره‌ای، نشان داده است که بهره‌گیری از استراتژی تطبیقی می‌تواند از کاهش ظرفیت در طول زمان جلوگیری کرده و عملکرد باتری را پایدار نگه دارد. همچنین در [۲۴] با ترکیب اطلاعات آزمایشگاهی مربوط به مکانیسم‌های تخریب، نشان داده شده است که نادیده گرفتن تأثیر کهنگی بر پارامترهای داخلی باتری، به کاهش دقت مدل شارژ و کاهش توانایی بهره‌برداری از ظرفیت واقعی باتری می‌انجامد. در [۲۵] یک الگوریتم شارژ تطبیقی در مقیاس کاربردی برای باتری‌های کوچک وسایل نقلیه سبک (مانند ریکشاهای برقی) توسعه داده شده که جریان شارژ را به‌صورت بلادرنگ و متناسب با پارامترهایی چون دما، سطح سلامت و ولتاژ باتری تنظیم می‌کند. ارزیابی میدانی این روش در مدت بیش از دو سال عملکرد، نشان داده است که نسبت به شارژ استاندارد CC-CV، فرسایش باتری به شکل محسوسی کاهش یافته و طول عمر آن افزایش یافته است. در [۲۶] یک چارچوب بهینه‌سازی جامع برای طراحی پروفایل شارژ ارائه شده که به‌صورت هم‌زمان مدل‌های الکتریکی، حرارتی و مکانیزم‌های فرسایش را در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ می‌کند. این روش با ایجاد موازنه میان زمان شارژ و تخریب شیمیایی، قادر است استراتژی‌های شارژی پیشنهاد کند که باتری را کمتر در معرض تنش‌های الکتریکی و حرارتی قرار

دهد. در [۲۷] مدل‌سازی ساده‌شده‌ای برای تخمین تخریب تدریجی باتری در تعامل با شبکه برق در چارچوب V2G ارائه شده است که با بهره‌گیری از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح، امکان زمان‌بندی شارژ/دشارژ اقتصادی باتری را فراهم می‌سازد. نتایج نشان می‌دهد که حتی با لحاظ هزینه فرسودگی، استفاده از V2G می‌تواند از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر باشد. در [۲۸] نیز یک مدل MILP برای بهینه‌سازی سیستم مدیریت انرژی خانگی ارائه شده که علاوه بر مصرف لحظه‌ای، تأثیر سیکل‌های عمیق شارژ/دشارژ باتری را نیز در نظر می‌گیرد. این مدل نشان داده است که با کاهش تعداد چرخه‌های فرسایشی، می‌توان عمر باتری را افزایش و هزینه برق خانوار را کاهش داد.

در تمامی پژوهش‌های قبلی، تمرکز صرفاً بر مدل‌سازی باتری و روش شارژی است که منجر به حفظ عمر باتری و کاهش تلفات شود. تأثیر پارامترهای گوناگون مانند نرخ شارژ، دوره کاری جریان و تعداد پالس‌های جریان بررسی شده و نتیجه آن با روش جریان ثابت مقایسه می‌گردد. تمامی مدل‌های بهینه‌سازی در وهله اول به صورت مدل برنامه‌ریزی مخروطی به نظر می‌رسند که با اعمال برخی از عملیات ریاضی و تغییر متغیر، به مدل خطی آمیخته عدد صحیح تبدیل می‌شوند. این مدل‌های بدست آمده قابل حل با نرم افزارهای تجاری از قبیل Mosek و Yalmip هستند که اخیراً کارایی آنها از نظر همگرایی اثبات شده است. در این مقاله، تمرکز بر روش شارژ چندمرحله‌ای تطبیقی است که در آن دامنه جریان بر حسب مقاومت درونی باتری باید تغییر کند. وجه تمایز این روش با سایر روش‌های موجود، جامع‌تر بودن مدل بهینه‌سازی تلفات باتری لیتیوم-یون، خطی‌سازی مدل، استخراج قیود مرزی جدید، بررسی پارامترهای مختلف پالس کنترلی بر فرایند شارژ و نتایج بهینه است.

سایر بخش‌های مقاله به شرح ذیل خواهد بود. در بخش ۲ توصیف مدل پیشنهادی ارائه شده و در بخش ۳ الگوریتم اجرای برنامه بیان می‌گردد. در بخش ۴ شبیه‌سازی‌ها انجام شده و در بخش ۵ خلاصه نتایج ارائه می‌گردد.

۲- توصیف و مدل‌سازی

۲-۱- شارژ جریان تطبیقی باتری لیتیوم-یون

فرض کنید هر یک از گام‌های زمانی شارژ هماهنگ خودرو با Δt_i نمایش داده شود (که معمولاً در مطالعات خودروی برقی بازه‌های زمانی نیم یا یک ساعته هستند) و مقدار

$$D_{i,j}, \Delta t_{i,j}, I_{i,j} = \frac{C_i^{Ah}}{N} \cdot \forall j.i \quad (3)$$

$$C_i^{Ah} = SoC_{i+1} - SoC_i \cdot \forall i \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^N \Delta t_{i,j} \leq \Delta t_i \cdot \forall i \quad (5)$$

$$I_{i,j} \leq I_i^{max} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N C_i^{Ah} = \begin{cases} k_{aging}^{SOC} C_{Ah}^{Nominal} & \text{if } SoC_{ini} \geq 0. \\ & SoC_{final} \geq k_{aging}^{SOC} C_{Ah}^{Nominal} \\ & SoC_{ini} \geq 0. \\ SoC_{final} - SoC_{ini} & SoC_{final} < k_{aging}^{SOC} C_{Ah}^{Nominal} \end{cases} \quad (7)$$

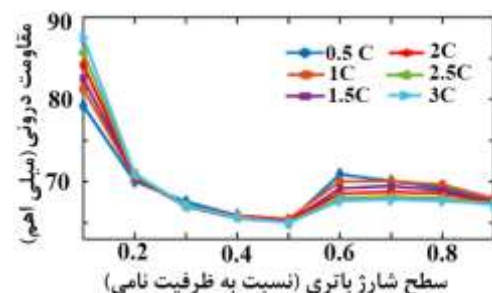
$$D_{i,j} \quad \max_{min} \quad (8)$$

رابطه (۲) شرط تغییرات جریان شارژ را در جهت معکوس مقاومت درونی بازه نشان می‌دهد. در رابطه (۳) C_i^{Ah} مقدار انرژی معین شده برای شارژ خودرو در بازه i ام است که مقدار آن طبق رابطه (۴) از تفاضل مقدار شارژ انتهای بازه نسبت به ابتدای آن بازه بدست می‌آید. رابطه (۵) زمان کل شارژ هر بازه را به مقدار Δt_i محدود می‌کند. رابطه (۶) محدوده مجاز جریان شارژ را نشان می‌دهد. رابطه (۷) بیانگر تاثیر کاهش ظرفیت آن نسبت به مقدار نامی است. ضریب کاهش k_{aging}^{SOC} معمولاً به صورت تجربی بدست می‌آید و گاهی منحنی در دیتاشیت^۶ (شکل ۱) ذکر می‌شود. این رابطه نشان می‌دهد اگر خودرویی از حالت کاملاً خالی به حالت تمام شارژ بخواهد برسد به مقدار $k_{aging}^{SOC} \times C_{Ah}^{Nominal}$ می‌تواند شارژ بگیرد. اما در صورتی که دارای شارژ اولیه باشد و یا شارژ نهایی آن کمتر از مقدار نامی باشد، باید به مقدار $SoC_{final} - SoC_{ini}$ شارژ شود. مقدار مورد نیاز هر بازه بر اساس بهینه‌سازی شارژ هماهنگ خودرو که در ادامه مدل می‌شود بدست می‌آید. بنابراین روش مورد نظر باید طوری شارژ باتری را مدیریت کند که مقدار سطح شارژ آن از مقدار ظرفیت پس از فرسایش آن بیشتر نشود تا به باتری آسیب بیشتری وارد نشود و از رخ دادن مساله‌های اضافه شارژ کردن و سایر موارد مشابه که منجر به گرمایش درونی بیشتر

انرژی که در این بازه باید به خودرو تزریق شود را C_i^{Ah} بنامیم. در این صورت در روش جریان ثابت، جریانی به نام I_i در مدت زمان Δt_i باید به خودرو تزریق می‌شد به طوری که $C_i^{Ah} = \Delta t_i I_i$ شود. اما در روش جریان تطبیقی، بازه Δt_i به N زیربازه تقسیم می‌شود که مقدار انرژی تزریق شده به خودرو در هر یک از این زیربازه‌ها $\Delta t_{i,j}$ برابر با $C_{i,j}^{Ah} = C_i^{Ah} / N$ است. مقاومت باتری در هر یک از این زیربازه‌ها برابر $R_{i,j}$ بوده و پالس جریان عبوری از باتری در این زیربازه را با دامنه $I_{i,j}$ و دوره کاری $D_{i,j}$ می‌باشد. کمترین تلفات اهمی کل شارژ یک باتری لیتیومی در هر بازه زمانی E_{liBat}^{Loss} برابر خواهد شد با:

$$\min E_{liBat}^{Loss} = \sum_{j=1}^N R_{i,j} \cdot D_{i,j} \cdot \Delta t_{i,j} \cdot I_{i,j}^2 \quad (1)$$

در صورتی که جریان شارژ به نسبت عکس مقدار مقاومت درونی باتری تغییر کند، روش جریان تطبیقی خواهد بود.



شکل ۱- تغییر مقاومت درونی باتری لیتیوم - یون ۳۴ آمپر ساعتی بر حسب سطح و نرخ شارژ [۱۹]

نمونه‌ای از منحنی تغییرات مقاومت نسبت به سطح شارژ برای یک باتری لیتیوم-یون ۳۴ آمپرساعتی در شکل (۱) نمایش داده شده است. منظور از C در اینجا همان ظرفیت^۵ است. بنابراین منظور از $1C, 2C$ یعنی معادل با یک برابر نرخ شارژ و ۲ برابر نرخ شارژ می‌باشد.

هدف اصلی بهینه‌سازی شارژ باتری، دسترسی به مجموعه جریان‌هایی است به طوری که کمترین تلفات حاصل شود و شرایط مرزی مساله تامین شود. شرایط مرزی که در این بهینه‌سازی باید برآورده شود عبارتند از:

$$\forall i, \forall j, k \in \{1, 2, \dots, N\}: R_{i,j} < R_{i,k} \Rightarrow i_{i,j} > i_{i,k} \quad (2)$$

^۶ Data sheet

^۵ capacity

$$\min E_{liBat}^{Loss} = \sum_{j=1}^N R_{i,j}, \frac{C_i^{Ah}}{D_{i,j} \Delta t_{i,j} I_{i,j}} I_{i,j} \quad (9)$$

$$s, t$$

$$\forall i, \forall j, k \in \{1, 2, \dots, N\}:$$

$$R_{i,j} < R_{i,k} \Rightarrow I_{i,j} > I_{i,k}$$

$$z_i = \frac{C_i^{Ah}}{(N, \Delta t_{i,j})} \cdot \forall i$$

$$I_{i,j} \leq I_{i,j}^{max}$$

$$D_{i,j} \cdot I_{i,j} \cdot \Delta t_{i,j} \leq \max_{min}$$

بدین ترتیب فرم برنامه‌ریزی خطی این مساله به صورت رابطه (۹) بدست آمد. پس از محاسبه مقادیر $I_{i,j}$ و $z_{i,j}$ میتوان مقدار دوره کاری هر بازه را از تقسیم بدست آورد.

۲-۲-۲- کنترل تطبیقی دوره کاری ثابت

قبل از هر چیز باید گفت که با فرض ثابت بودن دوره کاری در روابط (۱) الی (۸) دو متغیر مستقل $\Delta t_{i,j}$ و $I_{i,j}$ را داریم و سایر متغیرها همگی داده معلوم مساله هستند. به منظور خطی‌سازی این مساله نیز متغیری به نام $Y_{i,j} = I_{i,j} \Delta t_{i,j}$ را تعریف می‌کنیم. بنابراین روابط به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\min E_{liBat}^{Loss} = \sum_{j=1}^N R_{i,j}, I_{i,j}, \frac{C_i^{Ah}}{D_{i,j} \Delta t_{i,j} I_{i,j}} \quad (10)$$

$$s, t$$

$$\forall i, \forall j, k \in \{1, 2, \dots, N\}:$$

$$R_{i,j} < R_{i,k} \Rightarrow I_{i,j} > I_{i,k}$$

$$Y_{i,j} = \frac{C_i^{Ah}}{N, D} \cdot \forall i$$

$$I_{i,j} \leq I_{i,j}^{max}$$

$$\sum_j \frac{Y_{i,j}}{I_{i,j} \Delta t_{i,j}} \leq \sum_j I_{i,j}^{max}$$

بنابراین مدل خطی از بهینه‌سازی کنترل تطبیقی با دوره کاری ثابت نیز به دست آمد. قبل از پرداختن به روش شارژ هماهنگ، ابتدا روابط مربوط به مدار معادل باتری لیتیوم-یون در ادامه بررسی خواهد شد تا ارتباط میان ولتاژ دو سرباتری و جریان عبوری از آن نیز مشخص شود و مفاهیم عمیق‌تری نسبت به رفتار باتری لیتیوم-یون حاصل شود.

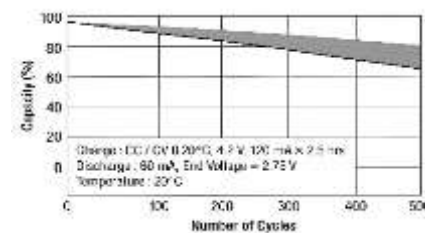
۲-۳- مدار معادل باتری لیتیوم-یون

در شکل (۳) مدار معادل یک باتری لیتیوم-یون نشان داده شده است که شامل یک ولتاژ مدار باز و چندین خازن و

باتری و کاهش عمر بیشتر آن می‌شود، جلوگیری به عمل آید. لازم به ذکر است که فرسایش باتری‌های لیتیوم با یکدیگر تفاوت دارد که این تفاوت ناشی از نوع موارد بکاررفته در باتری، فناوری ساخت، شرایط محیطی و غیره ناشی می‌شود. بنابراین نمی‌توان یک فرمول جامع برای آن ارائه داد. بنابراین بهتر است به برگه اطلاعات هر باتری برای مشخص سازی ضریب فرسودگی مراجعه شود. رابطه (۸) نیز محدودیت مربوط به دوره کاری را نشان می‌دهد.

۲-۲- خطی‌سازی مدل شارژ تطبیقی

به رابطه (۳) دقت کنید. اساس کار خطی‌سازی به عبارت $D_{i,j} \Delta t_{i,j} I_{i,j}$ بستگی بالایی دارد. به دلیل حضور عبارت ضرب متغیرها در رابطه (۳) و تابع هدف (۱)، مساله بهینه‌سازی شارژ تطبیقی به مدلی غیرخطی تبدیل شده است. به همین دلیل در بسیاری از پژوهش‌ها از روش‌های فراابتکاری برای حل مساله غیرخطی کمک گرفته شده است.

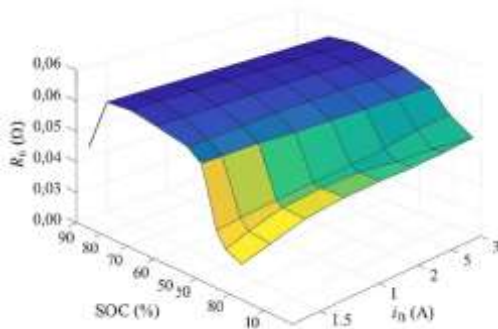


شکل ۲- منحنی فرسودگی یک باتری لیتیوم-یون بر حسب طول عمر [۹]

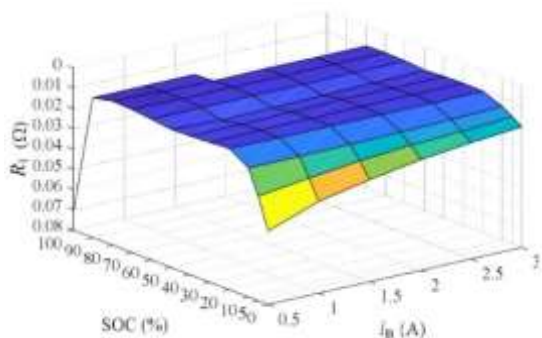
در این مطالعه، هدف ارائه یک مدل خطی از مساله است که جواب‌های آن معادل با جواب مساله‌ی بهینه‌سازی غیرخطی است. دو نگرش نسبت به روش شارژ تطبیقی می‌تواند وجود داشته باشد: الف) نگرش پریود ثابت ب) نگرش دوره کاری ثابت.

۲-۲-۱- کنترل تطبیقی پریود ثابت

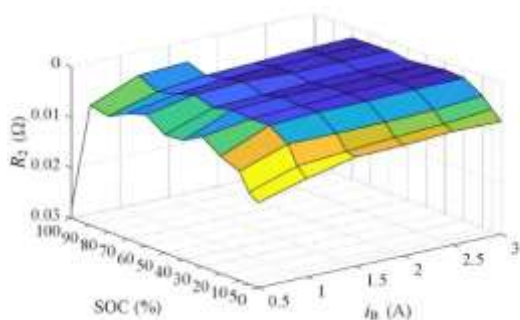
در نگرش پریود ثابت مقدار $\Delta t_{i,j}$ ثابت است و مقدار آن از تبعیت کرده و برابر با $\Delta t_i / N$ می‌تواند در نظر گرفته شود. در این شرایط دو متغیر مستقل تصمیم‌گیری جریان و دوره کاری هر بازه هستند. به منظور خطی‌سازی این مساله می‌توان متغیری حقیقی و مثبت به نام $z_{i,j} = D_{i,j} I_{i,j}$ تعریف نمود. در این صورت دو متغیر $I_{i,j}$ و $z_{i,j}$ را اگر به عنوان متغیرهای مستقل تصمیم‌گیری در نظر بگیریم خواهیم داشت:



شکل ۴- نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقاومت اهمی باتری در سطوح مختلف شارژ (دمای ثابت)

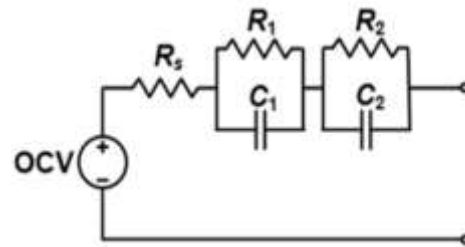


شکل ۵- نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقاومت قطبیدگی باتری در سطوح مختلف شارژ (دمای ثابت)



شکل ۶- نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقاومت پلاریزاسیون باتری در سطوح مختلف شارژ (دمای ثابت) نتایج مربوط به اندازه‌گیری پارامترهای مدار معادل در شکل‌های (۴) تا (۶) نشان داده شده است. تقریباً در نمودارها مشاهده می‌شود که تغییرات مقاومت‌ها نسبت به سطح شارژ باتری به صورت منحنی‌های U شکل هستند. به عبارت دیگر در ابتدای شارژ شدن باتری و در انتهای آن معمولاً مقاومت‌ها بیشتر از زمانی است که سطح شارژ در نیمه خود قرار گرفته است. همچنین در این شکل‌ها مشخص است که در نواحی میانی سطح شارژ، معمولاً منحنی تخت است و مقدار مقاومت در این نواحی تقریباً ثابت و بدون تغییر است. همچنین در این شکل‌ها می‌توان متوجه شد که در سطوح شارژ کمتر از ۲۰ درصد شاهد تغییرات مقاومت در اثر تغییرات جریان شارژ هستیم اما هرچه سطح شارژ افزایش یابد مقدار اثرگذاری جریان شارژ بر مقدار مقاومت نیز کاسته خواهد شد.

مقاومت است. با اجرای قانون ولتاژ کیرشهف در مدار خواهیم داشت:



شکل ۳- مدار معادل مرتبه دوم یک باتری لیتیوم یون [۶].

$$V_o^{Bat} = V_{OCV} + R_s i_{Bat} + V_{RC1} + V_{RC2} \quad (11)$$

بر اساس روابط حاکم میان ولتاژ و جریان یک مدار RC موازی داریم:

$$V_{RC1} = R_1 \left(e^{\left(\frac{-t}{R_1 C_1} \right)} i_{Bat}(0) + \dots + \frac{1}{R_1 C_1} \int_0^t i_{Bat}(\tau) e^{\left(\frac{\tau-t}{R_1 C_1} \right)} d\tau \right) \quad (12)$$

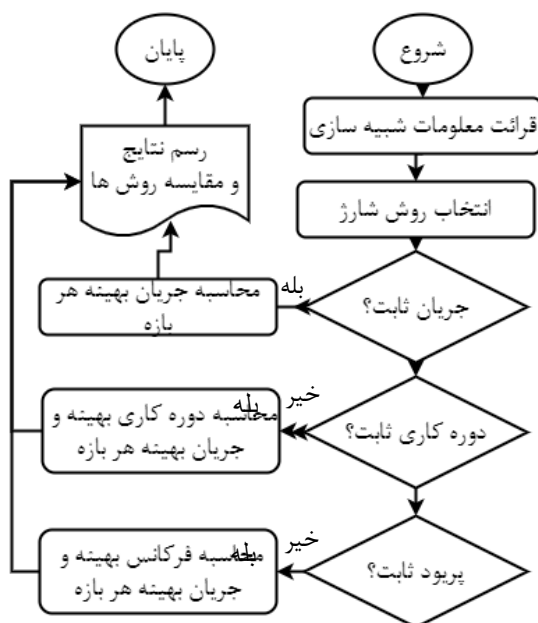
$$V_{RC2} = R_2 \left(e^{\left(\frac{-t}{R_2 C_2} \right)} i_{Bat}(0) + \dots + \frac{1}{R_2 C_2} \int_0^t i_{Bat}(\tau) e^{\left(\frac{\tau-t}{R_2 C_2} \right)} d\tau \right) \quad (13)$$

نقش اصلی روابط (۱۱) تا (۱۳) نمایش ارتباط میان ولتاژ دو سرباتری و جریان تزریقی به آن است. تحلیل این مدار بسیار ساده است ولی مساله اصلی شناسایی پارامترهای این مدار معادل است. در اینجا دو مساله مطرح است: الف) پارامترها چگونه بدست می‌آیند ب) این پارامترها بر حسب نرخ شارژ، دما و سطح شارژ باتری چگونه تغییر می‌کنند. در جواب مورد الف باید گفت این پارامترها را یا در دیتاشیت باتری باید یافت و یا توسط اجرای برخی از آزمون‌ها بدان رسید. انواع آزمون‌های مدار باز، اتصال کوتاه و اعمال پالس منجر به شناسایی این پارامترها خواهند شد. از طرفی روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای تخمین این مقادیر وجود دارد. در جواب مورد ب) باید گفت دمای محیط و نرخ شارژ بر مقدار تمامی خازن‌ها، مقاومت‌ها و ولتاژ مدار باز اثرگذار است. در مورد نحوه تغییر این پارامترها با شرایط گوناگون هم می‌توان به دیتاشیت باتری‌ها رجوع کرده و هم با استفاده از داده‌های تجربی و آموزش شبکه‌های عصبی فازی به این روابط رسید هرچند فرم بسته‌ای برای روابط وجود ندارد. اطلاعات مربوط به پارامترهای مدار معادل باتری لیتیوم-یون این مقاله از [۱۷] اقتباس شده است به بر اساس اندازه‌گیری واقعی از یک باتری بدست آمده است.

۲-۴- پارامترهای مدار معادل باتری لیتیوم - یون

۳- روش اجرای بهینه‌سازی

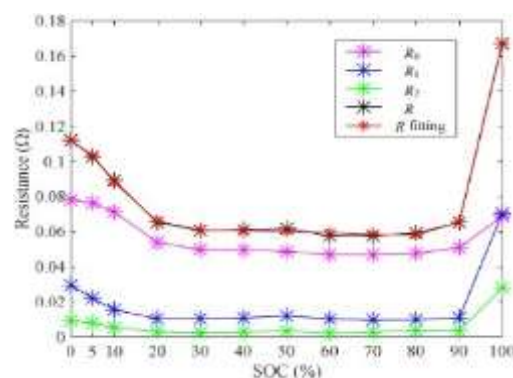
روش مدیریت شارژ باتری لیتیوم یونی در شکل (۹) به طور مختصر نشان داده شده است. در ابتدای برنامه اقدام به جمع آوری داده های ضروری برای بهینه سازی می شود که شامل اطلاعات مربوط به مقاومت درونی باتری، سطح شارژ باتری، دما، نرخ شارژ، پارامترهای مدارمعادل باتری و غیره است. سپس در مورد نحوه شارژ سوال می شود که کاربر می تواند از بین سه مورد روش جریان ثابت، جریان تطبیقی پریود ثابت و جریان تطبیقی دوره کاری ثابت انتخابی داشته باشد. پس از انتخاب هر یک از این روش ها، محدودیت های مربوط به بهینه سازی آن روش در مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح شارژ باتری اعمال می شود. این محدودیت ها می تواند شامل ثابت بودن دامنه جریان تمامی بازه ها برای روش جریان ثابت، ثابت بودن طول هر بازه زمانی شارژ، تغییر جریان هر بازه به صورت معکوس مقاومت درونی آن بازه برای روش جریان تطبیقی پریود ثابت و ثابت ماندن دوره کاری و تغییر جریان شارژ در جهت عکس مقاومت درونی باتری در روش جریان تطبیقی دوره کاری ثابت باشد. پس از اجرای مدل بهینه سازی هر یک از انتخاب های کاربر توسط دو جعبه ابزار قدرتمند Mosek و Yalmip جریان ها بهینه هر یک از بازه های زمانی بدست می آید و بر اساس مدار معادل باتری لیتیوم یون، رفتار دینامیکی ولتاژ دو سرباتری نیز مشخص می گردد. در نهایت نتایج با یکدیگر مقایسه شده و ترسیم نمودارها و جداول صورت می گیرد و بدین صورت الگوریتم به کار خود خاتمه می دهد.



شکل ۹- فلوچارت مدیریت شارژ باتری لیتیوم

به طور کلی مقاومت درونی باتری مجموع سه مقاومت R_0 ، R_1 و R_2 می باشد. در شکل زیر هر یک از مقاومت ها و نمودار مجموع آنها (که با نماد R مشخص شده است) در هر یک از سطوح شارژ نشان داده شده است. همان طور که مشخص است سهم عمده ای از مقدار مقاومت کل مربوط به R_0 است. می توان برای بهره گیری از داده های این نمودار، یا این منحنی را برازش داد و یا در قالب یک جدول گسسته سازی شده از آن داده ها بهره گرفت. در واقع این منحنی را به تعداد بازه های دلخواه تقسیم کرد و در هر بازه مقدار مقاومت را ثابت در نظر گرفت. انتخاب این تصمیم بر عهده مهندس طراح است. نمونه ای از برازش مقاومت باتری با استفاده از توابع نمایی در قالب رابطه زیر ارائه شده است.

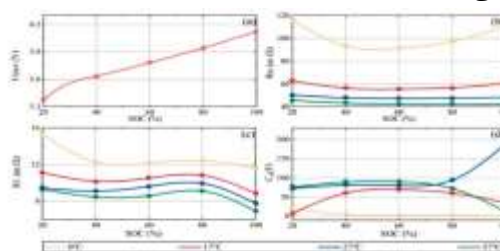
$$R(soc) = 1.796 \times 10^6 \times e^{-\left(\frac{(soc-2.378)}{0.3406}\right)^2} + 0.05268 \times e^{-\left(\frac{(soc+0.0108)}{0.1397}\right)^2} + 0.06058 \times e^{-\left(\frac{(soc-0.290)}{2.177}\right)^2} + \dots \quad (14)$$



شکل ۷- مقاومت کل باتری در هر یک از سطوح شارژ در دمای ثابت

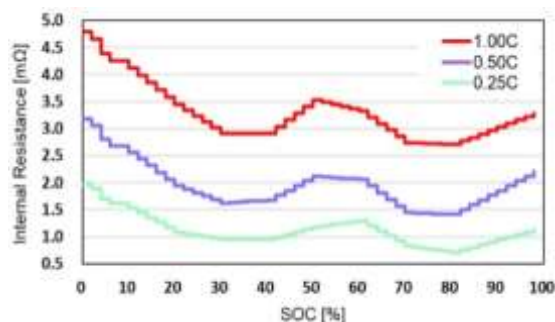
۲-۴-۱- تأثیر دما بر پارامترهای مدار معادل باتری لیتیوم یون

دما یکی از مهم ترین شرایط محیطی تأثیرگذار بر باتری است. تقریباً تمامی پارامترهای مؤثر در باتری تحت نفوذ شرایط محیطی قرار دارند. بسیاری از این نمودارها به صورت تجربی و با اندازه گیری بدست آمده است.



شکل ۸- تأثیر دما بر پارامترهای باتری

نشان داده شده است. همچنین در جدول ۱ پارامترهای مدار معادل باتری لیتیوم یون نشان داده شده اند.



شکل ۱۰- تغییرات مقاومت درونی باتری لیتیوم-یون بر حسب سطح شارژ و نرخ شارژ [۱۷]

بر اساس داده های شکل (۱۰) و جدول ۱ و با استفاده از مقادیر $C_{i,k}^{Ah}$ می توان بهینه سازی جریان تطبیقی را اجرا نمود.

۴-۳- موردهای مطالعاتی

در این بخش دو مورد مطالعاتی بررسی شده است:

روش کنترل جریان ثابت

روش کنترل تطبیقی

نتایج این دو روش مطالعاتی با یکدیگر مقایسه خواهد شد تا مزایای روش کنترل تطبیقی نسبت به روش کنترل جریان ثابت بیشتر مشخص شود. همچنین تحلیل حساسیت های متنوعی نیز برای روش کنترل تطبیقی صورت خواهد گرفت. برخی از این تحلیل حساسیت ها عبارتند از: بررسی نرخ شارژ، تعداد بازه های شارژ و بررسی دوره کاری شارژ.

۴-۴- پیاده سازی روش جریان ثابت

در روش جریان ثابت، مقاومت درونی باتری تأثیری بر جریان عبوری از باتری نخواهد داشت. به عبارت دیگر عکس-العملی در مقابل تغییر مقاومت درونی ایجاد نخواهد شد. مزیت روش جریان ثابت، سادگی آن بوده و محدودیت آن مربوط به افزایش تلفات آن نسبت به سایر روش ها است.

۴-۴-۱- تأثیر نرخ شارژ در روش جریان ثابت

در شکل های (۱۱) تا (۱۳) تأثیر نرخ شارژ باتری بر میزان ولتاژ و جریان های باتری نشان داده شده است. سه نرخ شارژ 1C، 0.5C و 0.25 مورد بررسی قرار داده شده است. همان طور که مشخص است با افزایش نرخ شارژ، جریان عبوری از باتری افزایش پیدا کرده است و باتری در مدت زمان کوتاه تری شارژ شده است. مدت زمان شکل (۱۱)

۴- شبیه سازی و تحلیل نتایج

در این بخش، چندین مورد مطالعاتی تعریف شده است. هدف بررسی مساله شارژ از ابعاد مختلف است. تأثیر تعداد تقسیم بندی بازه های سطح شارژ در نتایج مورد بررسی قرار داده می شود. مساله در دماهای مختلف مورد بررسی قرار می گیرد و نتایج آن با یکدیگر مقایسه می شود.

۴-۱- داده های فنی مساله

اطلاعات مربوط به مدار معادل باتری لیتیوم - یون مورد بررسی در سطوح مختلف شارژ در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول ۱- اطلاعات فنی مدار معادل باتری مورد بررسی

سطح شارژ (درصد)	ولتاژ مدار باز (ولت)	R0 (اهم)	R1 (اهم)	R2 (اهم)	C1 (فاراد)	C2 (فاراد)
صفر	۳/۳۱	۰/۰۷۷۲	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۷۳	۳۴۱۴	۴۰۷
۱۰	۳/۵۱	۰/۰۶۰۴	۰/۰۱۵۴	۰/۰۰۴۳	۳۰۲۲	۱۲۴۷۲۴
۲۵	۳/۵۹	۰/۰۶۰۸	۰/۰۱۳۶	۰/۰۰۱۵	۲۶۶۶	۳۴۹۵۳۹
۵۰	۳/۶۷	۰/۰۵۸۴	۰/۰۱۴۷	۰/۰۰۷۲	۳۱۸۹	۲۶۸۲۴۱
۷۵	۳/۸۶	۰/۰۶۰۰	۰/۰۲۷۷	۰/۰۰۴۰	۱۶۹۸	۲۵۷۰۶۵
۹۰	۴/۰۲	۰/۰۶۱۵	۰/۰۳۸۶	۰/۰۱۳۸	۱۸۵۴	۷۰۱۳۷
۱۰۰	۴/۱۵	۰/۰۷۳۱	۰/۰۳۳۷	۰/۰۰۶۸۶	۳۰۱۰	۱۵۵۱۹

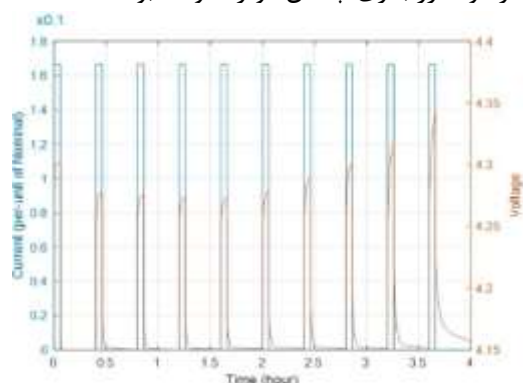
اطلاعات جدول ۱ با استفاده از آزمونهای مدار باز، مدار بسته و اعمال تغییر ناگهانی بدست آمده است. در آزمونهای مدار باز و مدار بسته از برازش منحنی های جریان و ولتاژ مدارهای RC با منحنیهای نهایی، مقدار هر یک از المانهای مدار بدست آمده است. همان طور که مشاهده می شود، مقادیر گردآوری شده در جدول اعدادی گسسته هستند و در صورتی که نیاز باشد بررسی در میان بازه های آنها صورت گیرد معمولاً از روش درون یابی برای دستیابی به داده های میانی استفاده خواهد شد.

۴-۲- تنظیم جریان شارژ برای کاهش تلفات درونی

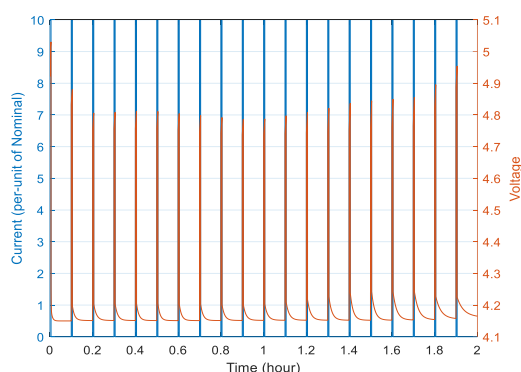
باتری

بر اساس مقدار انرژی تزریقی مورد نیاز هر بازه $C_{i,k}^{Ah}$ در مرحله شارژ هماهنگ، نوبت به مرحله شارژ جریان تطبیقی می رسد که در آن مقدار جریان تزریقی و دوره کاری طوری تنظیم شود که در هر دوره زمانی Δt_i مقدار تلفات درونی باتری کاهش پیدا کند. به منظور نمایش کارایی روش پیشنهادی، مقایسه ای میان روش جریان تطبیقی و جریان ثابت ارائه شده است. منحنی تغییرات مقدار مقاومت درونی باتری بر حسب سطح شارژ باتری و نرخ شارژ در شکل (۱۰)

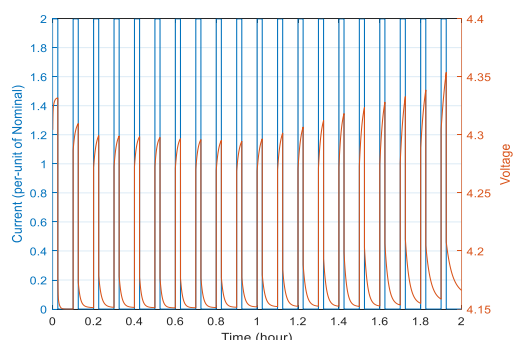
مجاز روش است. شکل‌های (۱۴) الی (۱۶) به ترتیب وضعیت شارژ را برای دوره کاری‌های ۱۰ درصد، ۵۰ درصد و ۹۰ درصد را نشان می‌دهند. تعداد بازه‌ها با یکدیگر یکسان و نرخ شارژ نیز مساوی است. با کاهش دوره کاری شاهد افزایش چشمگیر دامنه جریان تزریقی هستیم. با کاهش دوره کاری، چون مدت زمان تزریق جریان کوتاه شده است، برای تأمین انرژی موردنیاز باید روش جریان بالاتری را به باتری تزریق نماید در غیر این صورت ولتاژ رشد پیدا نخواهد کرد و شارژ باتری چندان مؤثر نخواهد بود.



شکل ۱۱- روش جریان ثابت، تعداد بازه ۱۰ عدد، دوره کاری ۳۰ درصد، شارژ C-rate ۰.۲۵

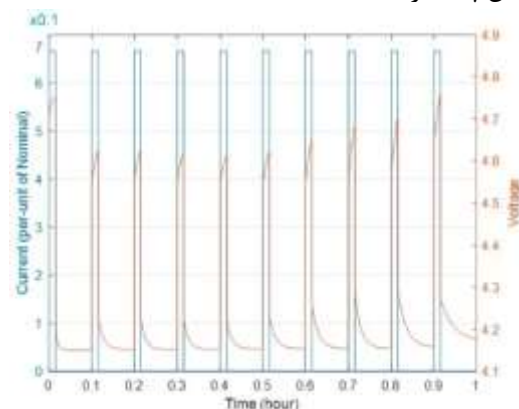


شکل ۱۳- روش جریان ثابت، تعداد بازه ۲۰ عدد، دوره کاری ۱۰ درصد، شارژ 0.5C-rate



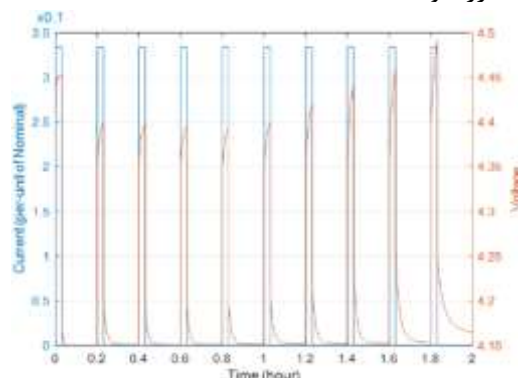
شکل ۱۵- روش جریان ثابت، تعداد بازه ۲۰ عدد، دوره کاری ۵۰ درصد، شارژ 0.5 C-rate

برابر ۱ ساعت، شکل (۱۲) برابر ۲ و شکل (۱۳) برابر ۴ ساعت بوده است. همان‌طور که مشخص است با افزایش نرخ شارژ و جریان عبوری، مدت زمان شارژ به صورت معکوس کاهش پیدا کرده است.



شکل ۱۲- روش جریان ثابت، تعداد بازه ۱۰ عدد، دوره کاری ۳۰ درصد، شارژ C-rate

در مورد ولتاژ شارژ باتری نیز در این سه شکل به خوبی می‌توان مشاهده نمود که ولتاژ نهایی در شکل (۱۱) (بالاترین نرخ شارژ)، بزرگ‌تر از ولتاژ نهایی در شکل (۱۲) می‌باشد. این امر نشان می‌دهد در دوره کاری و تعداد بازه‌های برابر، هر روشی که نرخ شارژ بالاتری داشته باشد، منجر به دستیابی به ولتاژهای بالاتری می‌شود چون خازن‌های مدار معادل فرصت پیدا نمی‌کنند به طور کامل دشارژ شوند.

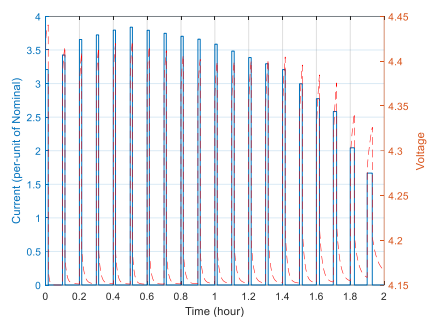


شکل ۱۴- روش جریان ثابت، تعداد بازه ۱۰ عدد، دوره کاری ۳۰ درصد، شارژ 0.5C-rate

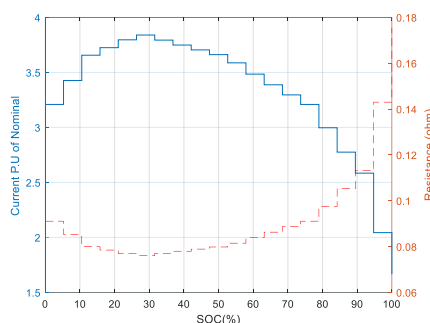
در تمام شکل‌های (۱۱) الی (۱۳) نمودار آبی رنگ مربوط به جریان شارژ و نمودار قرمز رنگ مربوط به ولتاژ باتری می‌باشد. همچنین جریان‌ها به صورت پریودیتی از جریان نامی نشان داده شده‌اند.

۴-۴-۲- تأثیر دوره کاری در روش جریان ثابت

یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر روند شارژ میزان دوره کاری

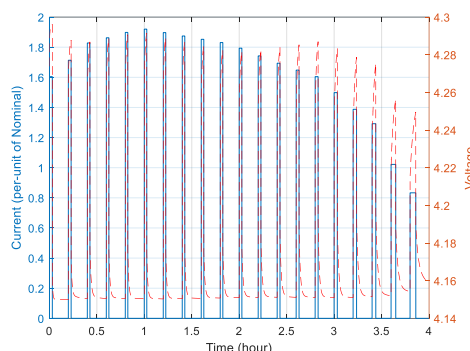


(a)

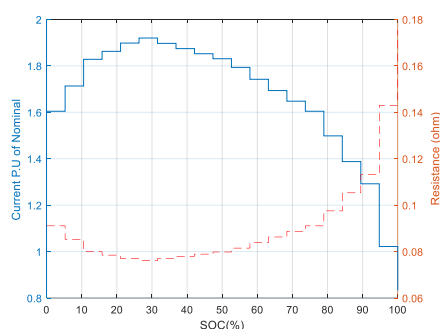


(b)

شکل ۱۶- روش جریان ثابت، تعدد بازه ۲۰ عدد، دوره کاری ۹۰ درصد، شارژ ۰.۵ C-rate



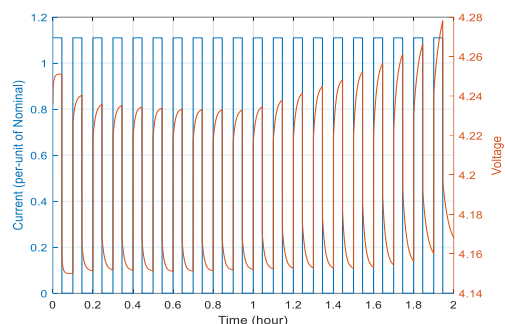
(a)



(b)

شکل ۱۸- روش جریان تطبیقی، تعدد بازه ۲۰ عدد، دوره کاری ۳۰ درصد، شارژ ۰.۵ C-rate

همان طور که در شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) نشان داده شده است، رفتار جریان عبوری از باتری (منحنی آبی‌رنگ سمت



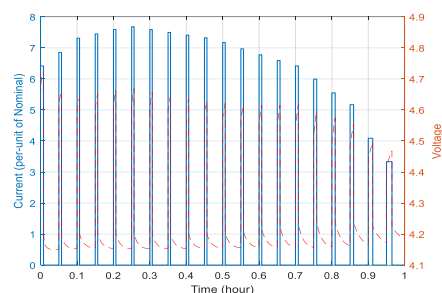
شکل ۱۶- روش جریان ثابت، تعدد بازه ۲۰ عدد، دوره کاری ۹۰ درصد، شارژ ۰.۵ C-rate

کاهش دوره کاری منجر به آسیب فیزیکی به کلیدهای قدرت به‌کاررفته در شارژرها خواهد شد. معمولاً مقدار di/dt بیش از حد یکی از عوامل خرابی کلیدها به شمار می‌آید. از طرف دیگر، افزایش بیش از حد دوره کاری مانند شکل ۱۶ زمانی را برای استراحت باتری و شارژ مؤثر آن فراهم نمی‌آورد. زمان بازیابی در باتری یکی از راهکارهای افزایش طول عمر باتری‌ها می‌باشد که باید رعایت شود؛ بنابراین دوره کاری از عوامل اثرگذار در روش شارژ به شمار می‌آید.

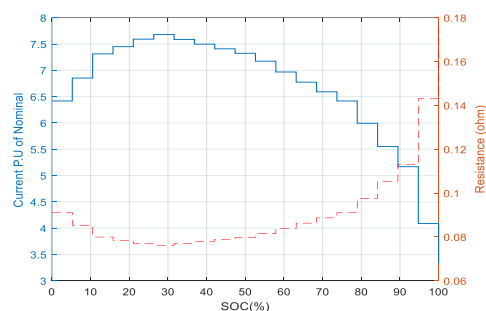
۴-۵- پیاده‌سازی روش جریان تطبیقی

۴-۵-۱- بررسی تأثیر نرخ شارژ بر روش تطبیقی

روش تطبیقی بر اساس مقاومت‌های هر یک از بازه‌های سطح انرژی اقدام به شارژ می‌نماید.



(a)



(b)

شکل ۱۷- روش جریان تطبیقی، تعدد بازه ۲۰ عدد، دوره کاری ۳۰ درصد، شارژ C-rate

می دهد. با توجه به جدول ۳ می توان نتیجه گرفت که روش ارائه شده در این مقاله از جنبه های متعددی نسبت به کارهای وابسته برتری دارد. نخست آنکه افت ظرفیت باتری پس از ۵۰۰ چرخه کمتر از ۱۰٪ گزارش شده است که نسبت به اغلب مطالعات پیشین بهبود قابل توجهی محسوب می شود؛ تنها در مرجع [۷] افتی نزدیک به این مقدار گزارش شده، اما آن مدل از پیچیدگی بالایی برخوردار است و به داده های تجربی وابسته است. دوم، مدت زمان شارژ کامل در محدوده ۶۵ تا ۷۰ دقیقه قرار دارد که از تمامی مطالعات مقایسه شده سریع تر است و این ویژگی در کاربردهای عملی مانند خودروهای الکتریکی بسیار حائز اهمیت است. سوم، ظرفیت ویژه باتری در این مقاله در بازه ۱۷۸ تا ۱۸۵ میلی آمپر ساعت بر گرم ارزیابی شده که عددی رقابتی و نزدیک به مقادیر حداکثری عملیاتی برای باتری های لیتیوم-یونی است. در نهایت، رویکرد مدل سازی پیشنهادی با تکیه بر کاهش تلفات، به جای استفاده از چارچوب های پیچیده سینتیکی یا میکروسکوپی، موجب ساده سازی کاربردی و افزایش قابلیت پیاده سازی در سامانه های مدیریت انرژی و الگوریتم های کنترلی شده است. این ویژگی ها در مجموع نشان می دهند که روش پیشنهادی از منظر بهره وری، سادگی و کارایی، نسبت به کارهای مشابه مزیت دارد.

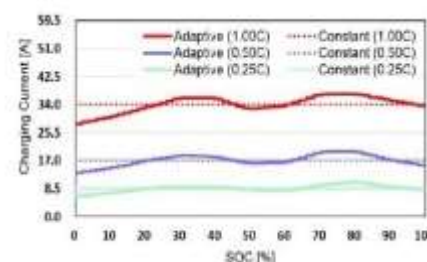
جدول ۲- نتایج مربوط به تلفات روش شارژ تطبیقی و ثابت

میانگین نرخ شارژ (c)	زمان شارژ (h)	روش شارژ	تلفات (wh)	صرفه جویی در انرژی (%)
۰.۲۵	۴	جریان تطبیقی	۳.۹۹۱	۱۲.۶
		جریان ثابت	۴.۵۶۷	
۰.۵۰	۲	جریان تطبیقی	۳.۹۹۸	۲۵.۵
		جریان ثابت	۵.۳۶۸	
۱	۱	جریان تطبیقی	۳.۹۸۷	۴۰.۱
		جریان ثابت	۶.۶۵۳	

چپ شکل ها) معکوس رفتار مقاومت درونی باتری (منحنی قرمز رنگ سمت چپ) بوده است که این امر نشان از پیاده سازی درست این روش دارد. همان طور که در این شکل ها مشاهده می شود، دامنه ی جریان ها دیگر ثابت نیست. در اوایل شارژ باتری و اواخر آن معمولاً مقاومت درونی بیشتر می شود و جریان در همان طور که در شکل های (۱۷) تا (۱۹) نشان داده شده است، رفتار جریان عبوری از باتری (منحنی آبی رنگ سمت چپ شکل ها) معکوس رفتار مقاومت درونی باتری (منحنی قرمز رنگ سمت چپ) بوده است که این امر نشان از پیاده سازی درست این روش دارد. همان طور که در این شکل ها مشاهده می شود، دامنه ی جریان ها دیگر ثابت نیست. در اوایل شارژ باتری و اواخر آن معمولاً مقاومت درونی بیشتر می شود و جریان در این بازه ها کمتر تزریق شده است اما در بازه های میانی که مقاومت درونی باتری کم است، جریان به پیک خود رسیده است.

۴-۵-۲- مقایسه روش جریان تطبیقی و جریان ثابت

شکل (۲۰) نشان دهنده تغییرات جریان شارژ برحسب میزان سطح شارژ و نرخ شارژ می باشد.



شکل ۲۰- پروفایل های شارژ برای استراتژی شارژ جریان تطبیقی و جریان ثابت برای نرخ های مختلف شارژ

همانطوری که مشاهده می شود روش جریان تطبیقی جریان کمتری نسبت به روش جریان ثابت دارد که این باعث کاهش تلفات باتری و افزایش طول عمر آن خواهد گردید. با توجه به جدول ۲ می توان نتیجه گرفت که با توجه به نرخ های شارژ مختلف در زمان های شارژ متفاوت تلفات روش تطبیقی نسبت به روش ثابت کمتر می باشد و این مزیت استفاده از روش تطبیقی نسبت به روش ثابت را نشان

جدول ۳- مقایسه با کارهای وابسته

روش	زمان شارژ	افت ظرفیت (۵۰۰ چرخه)	ظرفیت اولیه	نوع باتری	مرجع
مدار تونن با فرسودگی	90 min	18%	160 mAh/g	LiFePO ₄	[5]
مدار معادل مرتبه دوم	75 min	12%	180 mAh/g	لیتیوم-یون	[6]
سینتیکی + نفوذ حلال	80 min	10%	175 mAh/g	لیتیوم-یون	[7]
مدل مکانیکی	120 min	30%	450 mAh/g	لیتیوم-سولفور	[8]
تحلیل تجربی (آرنیوس، اهم)	85 min	15%	170 mAh/g	لیتیوم-یون	[9]
مدل سازی تلفاتی شارژ (SOC مبتنی بر کاهش تلفات و بهینه سازی)	65-70 min	در 10% < شبیه سازی	178-185 mAh/g	لیتیوم-یون	این مقاله

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، مسأله شارژ بهینه باتری های لیتیوم-یون با در نظر گیری مدل دقیق مدار معادل، تأثیر سطح شارژ، دما و فرسودگی بر مقاومت داخلی باتری مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه دو استراتژی جریان ثابت و جریان تطبیقی، نشان داده شد که استفاده از جریان تطبیقی نه تنها منجر به کاهش تلفات اهمی می شود، بلکه با فراهم سازی زمان کافی برای پلاریزاسیون ولتاژی، موجب افزایش عمر باتری نیز خواهد شد. مسأله بهینه سازی اولیه که به صورت غیر خطی فرموله شده بود، با تعریف متغیرهای جدید به فرم خطی تبدیل شد و با استفاده از ابزار YALMIP و الگوریتم شاخه و کران (Branch & Bound)، با سرعت و دقت مناسب حل شد. در مدل پیشنهادی، قیود مختلفی از جمله محدودیت جریان، دوره کاری، و تعداد بازه های زمانی لحاظ گردید. نتایج شبیه سازی نشان داد که افزایش تعداد بازه ها به کاهش تلفات منجر می شود، اما مدت زمان شارژ را نیز افزایش می دهد؛ بنابراین باید مصالحه ای میان دقت مدل و زمان شارژ صورت گیرد. همچنین مشخص شد که کاهش دوره کاری باعث افزایش دامنه جریان پالس ها و تأثیر مستقیم بر دمای باتری می شود.

کارهای آینده

پیشنهاد می شود در پژوهش های آتی: عملکرد روش پیشنهادی در نرخ های شارژ بالاتر بررسی شود تا تأثیر آن بر رفتار دینامیکی و حرارتی باتری دقیق تر ارزیابی گردد.

از پرو فایل های شارژ واقعی در شرایط بارگذاری متغیر (مثلاً در وسایل نقلیه برقی شهری) برای اعتبار سنجی مدل استفاده شود.

توسعه مدل به سمت در نظر گیری چند هدفه (مانند کاهش تلفات و حداقل زمان شارژ هم زمان) مد نظر قرار گیرد. بررسی تجربی روی باتری های واقعی انجام گیرد تا نتایج شبیه سازی با داده های واقعی مقایسه شوند.

جدید به فرم خطی تبدیل شد و با استفاده از ابزار YALMIP و الگوریتم شاخه و کران (Branch & Bound)، با سرعت و دقت مناسب حل شد. در مدل پیشنهادی، قیود مختلفی از جمله محدودیت جریان، دوره کاری، و تعداد بازه های زمانی لحاظ گردید. نتایج شبیه سازی نشان داد که افزایش تعداد بازه ها به کاهش تلفات منجر می شود، اما مدت زمان شارژ را نیز افزایش می دهد؛ بنابراین باید مصالحه ای میان دقت مدل و زمان شارژ صورت گیرد. همچنین مشخص شد که کاهش دوره کاری باعث افزایش دامنه جریان پالس ها و تأثیر مستقیم بر دمای باتری می شود.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از حمایت ها و همکاری های کلیه اساتید و همکارانی که در فرایند انجام این پژوهش ما را یاری نمودند، صمیمانه تقدیر و تشکر می شود.

تعارض منافع

نویسندگان/نویسندگان اعلام می کنند که در رابطه با انتشار این مقاله هیچ گونه تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

$D_{\min}, D_{\max}$	محدوده مجاز دوره کاری	—	بدین وسیله نویسندگان متعهد می‌شوند که این مقاله صرفاً حاصل پژوهش حاضر بوده و قبلاً در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسیده است.
η	ضریب فرسایش باتری	—	
Q_{nominal}	ظرفیت نامی باتری	Ah	مشارکت‌های نویسندگان
$Q_{\text{effective}}$	ظرفیت مؤثر باتری	Ah	تمام نویسندگان در طراحی پژوهش، جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل نتایج و نگارش مقاله مشارکت داشته‌اند.
$SOC_{\{ini\}}, SOC_{\{final\}}$	سطح شارژ اولیه و نهایی خودرو	—	
$SOC_{\{avg\}}$	سطح شارژ میانگین	—	منابع مالی
$k_{\{deg\}}$	ضریب کپولت باتری	—	این پژوهش بدون دریافت هرگونه حمایت مالی مستقیم از نهادها یا سازمان‌های خاص انجام شده است.
z_i	متغیر توان خطی‌شده	A	واحد
$Y_{\{i,j\}}$	متغیر شارژ بازنویسی‌شده در مدل خطی	Ah	نماد
$\Delta t_{i\{max\}}$	حداکثر زمان کل شارژ در بازه i	h	E_{liBat}^{Loss} انرژی تلف‌شده در باتری لیتیوم-یون
$V_{o\{Bat\}}$	ولتاژ ترمینال باتری	V	$R_{\{i,j\}}$ مقاومت داخلی باتری در زیربازه j از بازه i
V_{OCV}	ولتاژ مدار باز باتری	V	$D_{\{i,j\}}$ دوره کاری جریان پالس در زیربازه j از بازه i
R_s	مقاومت سری لحظه‌ای	Ω	$\Delta t_{\{i,j\}}$ مدت‌زمان زیربازه j در بازه i
$i_{\{Bat\}}$	جریان شارژ لحظه‌ای	A	$I_{\{i,j\}}$ جریان پالس در زیربازه j از بازه i
$V_{\{RC1\}}, V_{\{RC2\}}$	ولتاژ گذرا در شاخه‌های RC	V	i اندیس بازه زمانی شارژ
R_1, R_2	مقاومت دینامیکی RC1 و RC2	Ω	j, k اندیس زیربازه
C_1, C_2	خازن دینامیکی RC1 و RC2	F	N تعداد زیربازه‌ها
τ	متغیر انتگرال‌گیری	s	C_i^{Ah} ظرفیت مورد نیاز برای شارژ در بازه i
t	زمان لحظه‌ای	s	$SOC_i, SOC_{\{i+1\}}$ سطح شارژ باتری در ابتدا و انتهای بازه i
$R(SOC)$	مقاومت تابعی از سطح شارژ	Ω	I_i^{max} حداکثر جریان شارژ در بازه i

مراجع

- [1] Sadati, S. Muhammad Bagher, Jamal Moshtagh, Miadreza Shafie-khah. "The Impact of Electric Vehicles and Demand Response Programs on the Optimal Operation of the Distribution Network within a New Bi-Level Model." *Journal of Modeling in Engineering* 16, no. 54 (2018): 53-68. (in Persian)
- [2] Alizadeh, Mohammad, Meisam Jaafari, Majid Shahabi. "A Two-Stage Linear Model for Evaluating the Impact of Electric Vehicle Charging Demand at Fast Charging Stations on the Resilience of Active Distribution Networks." *Journal of Modeling in Engineering* 18, no. 62 (2019): 57-69. (in Persian)
- [3] Ansari, Mohammad Reza, Iman Hemmat. "Optimization and Control of Hybrid Vehicles Considering Emission Penalties Based on the Particle Swarm Optimization Algorithm." *Journal of Modeling in Engineering* 17, no. 57 (2019): 227-239. (in Persian)
- [4] Zarei Jaliani, Mohammad, Mohammad Sarshar, Mohsen Babaei, Abdolmajid Ghasemi. "Experimental Study and Development of an Empirical Model for Capacity Fade of Space Lithium-Ion Batteries." *Journal of Modeling in Engineering* 16, no. 55 (2018): 35-40. (in Persian)

- [5] Li, Junhui, Fengjie Gao, Gangui Yan, Tianyang Zhang, and Jianlin Li. "Modeling and SOC estimation of lithium iron phosphate battery considering capacity loss." *Protection and Control of Modern Power Systems* 3, no. 1 (2018): 5.
- [6] Li, Xiaokang, Qianqian Wang, Yifu Yang, and Jianqiang Kang. "Correlation between capacity loss and measurable parameters of lithium-ion batteries." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 110 (2019): 819-826.
- [7] Sankarasubramanian, Shrihari, and Balaji Krishnamurthy. "A capacity fade model for lithium-ion batteries including diffusion and kinetics." *Electrochimica Acta* 70 (2012): 248-254.
- [8] Hofmann, Andreas F., David N. Fronczek, and Wolfgang G. Bessler. "Mechanistic modeling of polysulfide shuttle and capacity loss in lithium-sulfur batteries." *Journal of Power Sources* 259 (2014): 300-310.
- [9] Han, Xuebing, Minggao Ouyang, Languang Lu, and Jianqiu Li. "A comparative study of commercial lithium ion battery cycle life in electric vehicle: Capacity loss estimation." *Journal of Power Sources* 268 (2014): 658-669.
- [10] Chu, Andrew, Anirudh Allam, Andrea Cordoba Arenas, Giorgio Rizzoni, and Simona Onori. "Stochastic capacity loss and remaining useful life models for lithium-ion batteries in plug-in hybrid electric vehicles." *Journal of Power Sources* 478 (2020): 228991.
- [11] Chen, Zheng, Xing Shu, Renxin Xiao, Wensheng Yan, Yonggang Liu, and Jiangwei Shen. "Optimal charging strategy design for lithium-ion batteries considering minimization of temperature rise and energy loss." *International Journal of Energy Research* 43, no. 9 (2019): 4344-4358.
- [12] Liu, Kailong, Xiaosong Hu, Zhile Yang, Yi Xie, and Shengzhong Feng. "Lithium-ion battery charging management considering economic costs of electrical energy loss and battery degradation." *Energy conversion and management* 195 (2019): 167-179.
- [13] Xie, Wenlong, Xinhua Liu, Rong He, Yalun Li, Xinlei Gao, Xinghu Li, Zhaoxia Peng, Suwei Feng, Xuning Feng, and Shichun Yang. "Challenges and opportunities toward fast-charging of lithium-ion batteries." *Journal of Energy Storage* 32 (2020): 101837.
- [14] Swernath, Subramanian, Krishnan S. Hariharan, Jason Battle, Anshul Kaushik, Aravinda R. Mandli, Samarth Agarwal, Rajkumar Subhash Patil et al. "A real time adaptive charging approach for cycle life extension of Li ion cells." *Journal of The Electrochemical Society* 168, no. 5 (2021): 050528.
- [15] Jiang, Li, Yijia Cao, Yong Li, Yinglong Zhao, Ping Liu, Chun Huang, Yong Xu, Hui Wang, and Yao Sun. "Optimal charging strategy with complementary pulse current control of lithium-ion battery for electric vehicles." *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 8, no. 1 (2021): 62-71.
- [16] Ahn, Jung-Hoon, and Byoung Kuk Lee. "High-efficiency adaptive-current charging strategy for electric vehicles considering variation of internal resistance of lithium-ion battery." *IEEE transactions on Power electronics* 34, no. 4 (2018): 3041-3052.
- [17] Nouri Khajavi, M., and Gh R. Bayat. "Comparison of Li-Ion Battery State of Charge Prediction by Artificial Neural Network and Adaptive Neuro Fuzzy Inference System." *Modares Mechanical Engineering* 19, no. 1 (2019): 43-52.
- [18] Li, Yunjian, Kuining Li, Yi Xie, Jiangyan Liu, Chunyun Fu, and Bin Liu. "Optimized charging of lithium-ion battery for electric vehicles: Adaptive multistage constant current-constant voltage charging strategy." *Renewable energy* 146 (2020): 2688-2699.
- [19] Jiang, Li, Yuduo Huang, Yong Li, Jiaqi Yu, Xuebo Qiao, Chun Huang, and Yijia Cao. "Optimization of variable-current charging strategy based on SOC segmentation for Li-ion battery." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 22, no. 1 (2020): 622-629.
- [20] Nambisan, Praveen, Pankaj Saha, and Munmun Khanra. "Real-time optimal fast charging of Li-ion batteries with varying temperature and charging behaviour constraints." *Journal of Energy Storage* 41 (2021): 102918.
- [21] Du, Jiuyu, and Yizhao Sun. "The influence of high power charging on the lithium battery based on constant and pulse current charging strategies." In *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 1-7. IEEE, 2020.
- [22] Leijon, Jennifer. "Charging strategies and battery ageing for electric vehicles: A review." *Energy Strategy Reviews* 57 (2025): 101641.

- [23] Andersson, Malin, Moritz Streb, Venu Gopal Prathimala, Aamer Siddiqui, Andrew Lodge, Verena Löfqvist Klass, Matilda Klett, Mikael Johansson, and Göran Lindbergh. "Electrochemical model-based aging-adaptive fast charging of automotive lithium-ion cells." *Applied Energy* 372 (2024): 123644.
- [24] Abo Gamra, Kareem, Philip Bilfinger, Markus Schreiber, Thomas Kröger, Christian Allgäuer, and Markus Lienkamp "Unlocking the full potential of electric vehicle fast-charging over lifetime through model-based aging adaptation," *Journal of Energy Storage*, vol. 99B, 2024, Art. no. 107168.
- [25] Mutagekar, Sushant, and Ashok Jhunjhunwala. "Designing small batteries and adaptive charging strategies for operation on rough terrain." *Journal of Energy Storage* 84 (2024): 111003.
- [26] Tian, Jiaqiang, Siqi Li, Xinghua Liu, Duo Yang, Peng Wang, and Guoyi Chang. "Lithium-ion battery charging optimization based on electrical, thermal and aging mechanism models." *Energy Reports* 8 (2022): 13723-13734.
- [27] Lee, Chih Feng, Kalle Bjurek, Victor Hagman, Yang Li, and Changfu Zou. "Vehicle-to-grid optimization considering battery aging." *IFAC-PapersOnLine* 56, no. 2 (2023): 6624-6629.
- [28] de Lima, Tayenne Dias, Pedro Faria, and Zita Vale. "Optimizing home energy management systems: A mixed integer linear programming model considering battery cycle degradation." *Energy and Buildings* 329 (2025): 115251.