NEW RESEARCHES IN THE SMART CITY
Vol 4 (Issue 3), 61-75
nrsc.apadana.ac.ir

Apadana Institute of Higher Education

Study and Comparison of Different State-of-Charge Estimation Methods for Lithium-Ion Batteries

Alireza Agandeh — School of E-Learning, Shiraz University, Shiraz, Iran

Ehsan Moshksar* — School of Advanced Technologies, Shiraz University, Shiraz, Iran

Received: 18/December/2026 Accepted: 19/February/2026 eISSN: 3060-6144 ISSN: 2980-8936

Abstract

Due to the depletion of various fossil energy resources, the provision of sustainable energy has become an important and critical issue for all countries. In addition to the development of various strategies for optimizing energy consumption, energy storage technologies play a vital role in ensuring a reliable energy supply. Among these technologies, lithium-ion batteries are considered one of the most efficient energy storage systems owing to their high energy efficiency, long cycle life, and high energy density. Despite their numerous advantages and wide range of applications, lithium-ion batteries face the challenge of accurate State of Charge (SOC) estimation. Achieving a precise estimation of battery SOC can enhance battery lifespan, improve performance, reduce operational costs, increase safety, and enable the charging process to be terminated under critical conditions when necessary. Various methods have been proposed for estimating the SOC of lithium-ion batteries, including lookup table methods, coulomb counting, model-based methods, data-driven approaches, and hybrid techniques. This study introduces the different SOC estimation methods, discusses the advantages and challenges associated with each approach, and finally provides a comparative analysis of these methods.

Keywords: Lithium-Ion battery, state of charge, energy storage, battery management system

* Corresponding Author: emoshksar@shirazu.ac.ir

فصلنامه پژوهش‌های نوین در شهر هوشمند
دوره ۴، شماره ۳، بهار ۱۴۰۵، ۶۱-۷۵
nrsc.apadana.ac.ir

مؤسسه آموزش عالی آپادانا
غیر دولتی - غیر انتفاعی

مطالعه و مقایسه روش‌های مختلف تخمین وضعیت شارژ در باتری‌های لیتیوم-یون

علیرضا آگنده دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ابزار دقیق و اتوماسیون در صنعت نفت، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

احسان مشکسار* استادیار دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰ eISSN: 3060-6144 ISSN: 2980-8936

چکیده

با توجه به کاهش ذخایر منابع مختلف انرژی فسیلی، تأمین انرژی پایدار به موضوعی مهم و حیاتی برای تمامی کشورها تبدیل شده است. در کنار ارائه‌ی راهکارهای مختلف جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی، فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی نیز نقشی حیاتی در تأمین انرژی دارند. به همین سبب، باتری‌های لیتیوم-یون با داشتن بازده انرژی بالا، عمر چرخه‌ی طولانی و چگالی انرژی بالا، یکی از کارآمدترین تجهیزات ذخیره‌ی انرژی به شمار می‌آیند. در کنار مزایا و کاربردهای متنوع باتری‌های لیتیوم-یون، این باتری‌ها با چالش تخمین وضعیت شارژ مواجه هستند. دستیابی به تخمینی دقیق از وضعیت شارژ باتری موجب افزایش طول عمر، بهبود عملکرد، کاهش هزینه‌ها، افزایش ایمنی و امکان قطع فرایند شارژ باتری در شرایط حساس می‌گردد. روش‌های متعدد و مختلفی برای تخمین وضعیت شارژ باتری‌های لیتیوم-یون وجود دارد، از جمله: روش‌های جدول جستجو، شمارش کولن، روش‌های مبتنی بر مدل، روش‌های داده‌محور و روش‌های ترکیبی. پژوهش حاضر ضمن معرفی روش‌های مختلف تخمین وضعیت شارژ، به مزایا و چالش‌های هرکدام از این روش‌ها و در نهایت به مقایسه‌ی روش‌ها با یکدیگر می‌پردازد.

کلیدواژه‌ها: باتری لیتیوم-یون، وضعیت شارژ، ذخیره انرژی، سیستم مدیریت باتری

* نویسندهٔ مسئول: emoshksar@shirazu.ac.ir

مقدمه

طی سالیان اخیر به سبب کاهش قابل توجه ذخایر سوخت‌های فسیلی، نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف این نوع سوخت‌ها، افزایش چشمگیر انتشار گازهای گلخانه‌ای، نقش غیر قابل انکار خودروهای بنزینی و گازوئیلی در افزایش دمای متوسط جهانی و ...، شاهد رشد روز افزون تقاضا و توجه به خودروهای الکتریکی و هیبریدی در سراسر جهان هستیم (Ge et al., 2022). توسعه‌ی تکنولوژی و صنعت ساخت خودروهای الکتریکی و هیبریدی با چالش‌های متفاوتی همراه است. یکی از اصلی‌ترین چالش‌های پیش روی پیشرفت این تکنولوژی، ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی و بهره‌گیری از آن به هنگام حرکت خودرو می‌باشد. لزوم ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی تنها به خودروهای الکتریکی و هیبریدی محدود نبوده و بسیاری از تجهیزات الکترونیکی، از جمله گوشی‌های تلفن همراه، رایانه‌ها، دوربین‌های فیلم‌برداری و ...، نیازمند ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی هستند (Li et al., 2021). همچنین، ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های تولید برق خورشیدی و مزارع توربین‌های بادی جهت ذخیره‌سازی و خطی‌سازی توان خروجی انرژی الکتریکی تولیدی، تأمین برق پشتیبان در شرکت‌های بزرگ و کوچک صنعتی، سازمان‌ها، ادارات، بانک‌ها، بیمارستان‌ها، ساختمان‌های تجاری، مسکونی و مراکز بزرگ خرید نیز الزامی است (Horiba, 2014; Faisal et al., 2018).

باتری‌های لیتیوم-یون به سبب چگالی انرژی بالا، سرعت بالای شارژ، بازدهی بالا و چرخه‌ی عمر طولانی، جزو بهترین و کارآمدترین راهکارها جهت ذخیره‌ی انرژی الکتریکی به شمار می‌آیند (Shi et al., 2022). همچنین، استفاده از باتری‌های لیتیوم-یون در شبکه‌ی تولید، انتقال و توزیع برق موجب کاهش هزینه‌ی نهایی مصرف‌کنندگان، افزایش پایداری و قابلیت اطمینان شبکه و تنظیم فرکانس می‌شوند (Chen et al., 2020).

بهره‌گیری هرچه مفیدتر از این نوع باتری‌ها به کارایی و عملکرد سیستم مدیریت باتری وابسته است. سیستم مدیریت باتری جهت حفظ سلامت باتری، جلوگیری از تخریب آن، شارژ و دشارژ به موقع باتری، بهبود عملکرد، افزایش طول عمر، قطع به موقع فرایند شارژ و حفظ ایمنی باتری، نیازمند تخمین دقیقی از وضعیت شارژ باتری در هر لحظه می‌باشد (Pai et al., 2023). در همین راستا، به سبب اهمیت باتری‌های لیتیوم-یون و تخمین وضعیت شارژ آن‌ها، روش‌های مختلفی نظیر روش جدول جستجو ، روش شمارش کولن ، روش‌های مبتنی بر مدل، روش‌های داده‌محور و روش‌های ترکیبی جهت تخمین وضعیت شارژ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. هرکدام از روش‌ها دارای مزایا، معایب، چالش‌ها و محدودیت‌هایی هستند که با توجه به شرایط و کابردهای مختلف می‌توان مناسب‌ترین روش را از بین آن‌ها انتخاب کرد (Yang et al. 2021).

باتری لیتیوم-یون

عموماً هر باتری که از واکنش‌های درج (فرایند الکتروشیمیایی برگشت‌پذیری است که در آن اتم‌ها، یون‌ها و یا مولکول‌ها، وارد حفره‌های شبکه بلوری ماده‌ی میزبان می‌شوند، بدون آن‌که ساختار بلوری اصلی میزبان دچار شکست یا تخریب گردد) برای الکترودهای مثبت و منفی با یون‌های لیتیوم به‌عنوان حامل بار استفاده کند را می‌توان باتری لیتیوم-یون نامید.

یک سلول باتری منفرد از دو الکترود، یک آند و یک کاتد، یک جداکننده بین الکترودها، محلول الکترولیتی (یا الکترولیت) جذب‌شده در جداکننده و یک محفظه سلولی تشکیل شده است. الکترودها معمولاً روی یک بستر الکترود از فویل فلزی، مس برای آندها و آلومینیوم برای کاتدها، با پوشش دادن دوغابی متشکل از یک ماده‌ی فعال، یک ماده‌ی رسانا، یک بایندر و یک حلال مانند N-متیل پیرولیدون (NMP) یا آب تشکیل می‌شوند. جداکننده معمولاً

یک صفحه‌ی ریز متخلخل از یک ماده‌ی پلیمری آلی مانند پلی اتیلن، پلی پروپیلن یا ترکیبی از هر دو است (Horiba, 2014). یون‌های لیتیوم از طریق محیط الکترولیت قرار گرفته بین کاتد و آند، بین این دو الکترود مبادله می‌شوند. در طی فرایند تخلیه، یون‌های لیتیوم از آند آزاد شده و به سمت کاتد انتقال می‌یابند. با ادامه‌ی این مبادله، باتری به‌صورت کامل تخلیه می‌گردد. در طی فرایند شارژ، یون‌ها از سوی کاتد به سمت آند منتقل می‌شوند (Chen et al., 2020).

باتری‌های لیتیوم-یون دارای مزایای متعددی هستند، از جمله: بازده انرژی بالا (بیشتر از ۹۵٪)، چرخه‌ی عمر طولانی (حدود ۳۰۰۰ سیکل تخلیه عمیق از ۱۱ تا ۸۰ درصد) و چگالی انرژی نسبتاً بالا. با توجه به چگالی انرژی بالا، باتری‌های لیتیوم-یون، انتخابی ایده‌آل جهت ادغام با منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم‌های ذخیره انرژی در سطح شبکه هستند؛ چراکه این نوع باتری‌ها، انرژی الکتریکی تولید شده را با حداقل هزینه برای مصرف‌کنندگان نهایی، در صورت نیاز ذخیره می‌کنند و همچنین ضمن کمک به پایداری و قابلیت اطمینان شبکه، به نوبه‌ی خود استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را ترویج می‌دهند. همچنین، باتری‌های لیتیوم-یون قادر به تنظیم فرکانس و مدیریت انرژی در شبکه‌ی تولید، انتقال و توزیع برق هستند (Chen et al., 2020). از دیگر مزایای باتری‌های لیتیوم-یون می‌توان ولتاژ تک سلولی بالا و انرژی ویژه بالا را نام برد. سایر مزایای باتری‌های لیتیوم-یون، عبارت هستند از: نرخ خود تخلیه کم ، ولتاژ بالا، قابلیت اطمینان بالا و امکان شارژ مجدد سریع (How et al., 2019).

در کنار مزایایی که برای باتری‌های لیتیوم-یون، ذکر شد، این نوع باتری‌ها پر هزینه بوده و برای جلوگیری از انفجار به مکانیسم ایمنی مناسبی نیاز دارند. باتری‌های لیتیوم-یون می‌توانند خطرناک باشند، زیرا حاوی الکترولیت مایع تحت فشار و قابل اشتعال هستند که ممکن است باعث انفجار و آتش‌سوزی شوند (Sun et al., 2018). به‌عنوان مثال، شارژ بیش از حد یک باتری لیتیوم-یون، ممکن است سبب فرارهای حرارتی گشته که می‌تواند منجر به نشت و انفجار گردد (Lipu et al., 2018). از سوی دیگر، تخلیه‌ی بیش از حد این نوع باتری‌ها ممکن است به باتری پیش از بازیابی آسیب برساند و باعث پیری زودرس باتری شود (Barré et al., 2013). به منظور اطمینان از عملکرد ایمن شارژ و تخلیه باتری‌های لیتیوم-یون، ضروری است که وضعیت شارژ باتری همیشه شناخته شده باشد. تخمین دقیقی از وضعیت شارژ باتری، مدار قطع را قادر می‌سازد تا باتری را زمانی‌که خارج از وضعیت کار ایمن است، قطع کند و همچنین باعث شارژ باتری در شرایط بهینه شود (Fotouhi et al., 2016).

تخمین وضعیت شارژ

در لغت وضعیت شارژ باتری لیتیوم-یون به‌صورت نسبت مقدار شارژ موجود فعلی به حداکثر میزان شارژ ممکن برای باتری به فرم زیر تعریف می‌شود:

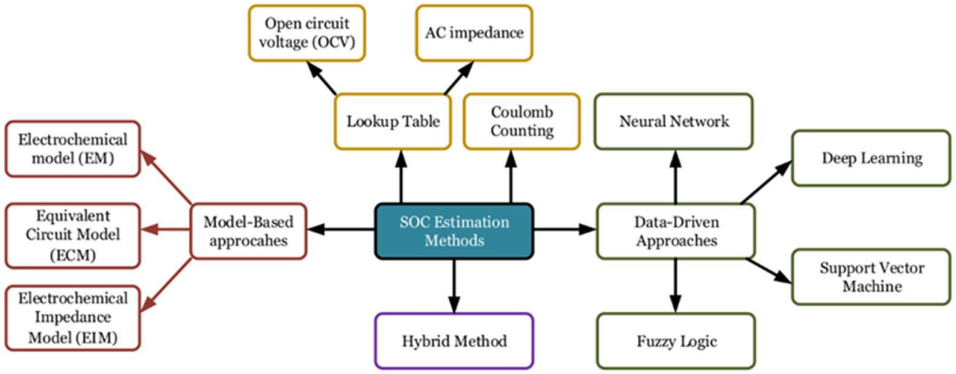
$$SOC = \frac{Q_{available}}{Q_{rated}} \quad (۱)$$

اما، در عمل وضعیت شارژ باتری کمیتی فیزیکی نیست که بتوان آن را بی واسطه و به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری نمود، بلکه به کمک اندازه‌گیری کمیت‌هایی نظیر جریان، ولتاژ و دما می‌توان تخمینی از میزان شارژ باتری بر حسب درصد نسبت به ظرفیت نامی آن، بیان کرد (Wu et al., 2018).

سیستم مدیریت باتری، سیستمی الکترونیکی است که یک بسته باتری قابل شارژ را با نظارت بر وضعیت آن و پارامترهای بسته باتری، نظیر ولتاژ سلول، جریان، دما، وضعیت شارژ، وضعیت سلامت، وضعیت قدرت و ...، مدیریت می‌کند. نظارت بر این پارامترها سیستم مدیریت باتری را قادر می‌سازد تا زمان مورد نیاز جهت شارژ باتری و یا زمان قطع باتری جهت جلوگیری از ایجاد شرایط عملیاتی خطرناک را تعیین کند. به این ترتیب، سیستم مدیریت باتری

تضمین می‌کند که باتری و کاربر نهایی به خوبی از هرگونه آسیب محافظت شوند. برآورد وضعیت شارژ، جزئی اساسی در سیستم مدیریت باتری است که بر تعداد زیادی از عملکردهای دیگر نیز تأثیر می‌گذارد. مقدار وضعیت شارژ به‌عنوان شاخصی برای محاسبات پارامترهای دیگر، مانند وضعیت سلامت، تعادل سلول و محاسبات توان، استفاده می‌شود (Zheng et al., 2019).

در دسته‌بندی‌های متداول، روش‌های تخمین وضعیت باتری به پنج گروه و دسته کلی تقسیم می‌شوند؛ روش جدول جستجو، روش شمارش کولن، روش‌های تخمین بر اساس مدل، روش‌های مبتنی بر داده و روش‌های ترکیبی. در شکل ۱ نمایی کلی از روش‌های تخمین وضعیت شارژ باتری‌های لیتیوم-یون نشان داده شده است.



شکل ۱. نمایش کلی از روش‌های تخمین وضعیت شارژ باتری‌های لیتیوم-یون (How et al., 2019)

تخمین وضعیت شارژ با روش جدول جستجوی ولتاژ مدار باز

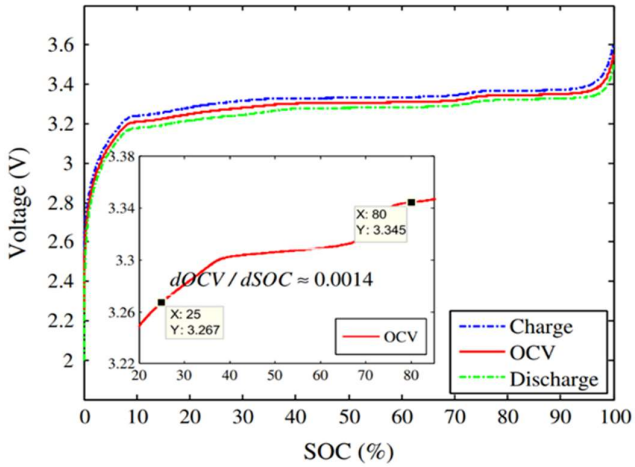
روش جدول جستجو از نگاشت مستقیم بین وضعیت شارژ و پارامترهای خارجی باتری، مانند ولتاژ مدار باز، امپدانس جریان متناوب و ...، استفاده می‌کند. این روش شامل جدول‌بندی رابطه با اجرای آزمایش‌های فشرده در آزمایشگاه برای توصیف رفتارهای باتری می‌باشد (Kim et al., 2012).

روش جدول جستجوی ولتاژ مدار باز، از نظر مفهومی، ساده و بسیار دقیق است. اساس این روش ارتباط مستقیم بین ولتاژ مدار باز باتری، یعنی زمانی‌که جریانی از باتری عبور نمی‌کند، با وضعیت شارژ باتری است (Shen et al., 2017). در این روش، ابتدا باتری لیتیوم-یون در مدت زمان ثابت و مشخص برای رسیدن به فاز دپلاریزاسیون، کاملاً شارژ می‌شود. پس از آن باتری لیتیوم-یون با استفاده از پالس‌های جریان به‌طور کامل تخلیه می‌گردد. سپس باتری برای مدت زمان ثابتی در حالت استراحت قرار گرفته و ولتاژ مدار باز مربوط به باتری اندازه‌گیری می‌شود. به‌دنبال آن، رابطه‌ی بین ولتاژ مدار باز و وضعیت شارژ باتری ترسیم می‌گردد. فرایند مشابهی نیز برای ولتاژ مدار باز در مرحله‌ی شارژ، دنبال می‌شود. هنگامی‌که جدول جستجو ایجاد شد، اندازه‌گیری ولتاژ مدار باز در هر لحظه، وضعیت شارژ باتری لیتیوم-یون را در آن لحظه نشان می‌دهد (Ali et al., 2019).

در روش جدول جستجو، از یک سلول باتری لیتیوم-یون، محفظه تست دما، کابل نمونه‌گیری جریان و ولتاژ، سیستم تست باتری، نرم‌افزارهای رایانه‌ای جهت کنترل شارژ و یا دشارژ باتری، نرم‌افزاری مثل متلب جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها، بهره گرفته می‌شود. در ابتدا سلول باتری با جریانی ثابت به‌طور کامل شارژ می‌گردد تا باتری در وضعیت شارژ ۱۰۰٪ قرار بگیرد. سپس با نرخ ثابت C/N (که C ظرفیت باتری و N عدد بزرگی مانند ۱۰ یا ۲۰ است) باتری کاملاً تخلیه می‌شود تا در وضعیت شارژ ۰٪ قرار بگیرد. در حین این روند، در درصدهای مختلف از شارژ باتری، با

بازکردن مدار، به باتری استراحت داده می‌شود تا اثرات پلاریزاسیون و دینامیک‌های داخلی باتری از بین برود، سپس به کمک ولت‌متر ولتاژ مدار باز آن اندازه‌گیری می‌گردد (Xing et al., 2014).

با تکرار روندی مشابه جهت اندازه‌گیری ولتاژ مدار باز به هنگام شارژ، در نهایت منحنی تغییرات ولتاژ مدار باز برحسب وضعیت شارژ رسم شده است که با کمک آن در هر لحظه می‌توان بر اساس ولتاژ مدار باز، تخمینی از وضعیت شارژ باتری ارائه داد (Xing et al., 2014). شکل ۲ ، نمودار تغییرات وضعیت شارژ باتری بر حسب ولتاژ مدار باز را نمایش می‌دهد. در این شکل، منحنی آبی رنگ مربوط به مقادیر وضعیت شارژ به هنگام شارژ باتری، منحنی قرمز رنگ مربوط به مقادیر تخمین‌زده شده به روش ولتاژ مدار باز و منحنی سبز رنگ مربوط به مقادیر وضعیت شارژ به هنگام تخلیه‌ی باتری می‌باشد.



شکل ۲. نمودار تغییرات وضعیت شارژ باتری بر حسب ولتاژ مدار باز (Xing et al., 2014)

تخمین وضعیت شارژ با روش شمارش کولن

در این روش، وضعیت شارژ باتری با اندازه‌گیری جریان تخلیه باتری و یکپارچه‌سازی آن‌ها در طول زمان، تخمین زده می‌شود. در این روش وضعیت شارژ باتری از طریق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد:

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{\eta}{C_n}\int_{t_0}^{t} I(t)\,dt \qquad (۲)$$

که در آن $SOC(t_0)$ وضعیت شارژ اولیه باتری، η بازده کولمبی، C_n ظرفیت نامی و $I(t)$ جریان تخلیه آنی باتری می‌باشد (How et al., 2019). در این سیستم، باتری توسط منبع تغذیه DC، شارژ شده و به کمک یک بار الکتریکی قابل برنامه‌ریزی، تخلیه می‌گردد. به کمک ماژول‌های جمع‌آوری داده، جریان و ولتاژ عملیاتی، جمع‌آوری و ثبت می‌شود و در نهایت، داده‌ها توسط رایانه، پردازش می‌گردند (Ng et al., 2009).

مزیت روش شمارش کولن سادگی و پایداری آن است. این روش تحت شرایط محدودی، مانند مشخص بودن وضعیت شارژ اولیه باتری، کالیبره بودن سنسورهای جریان و کالیبره بودن حداکثر ظرفیت باتری تحت شرایط مختلف عملیاتی، نسبتاً دقیق است (Waag et al., 2014; Xiong et al., 2017). از آنجایی که روش شمارش کولن، روشی حلقه باز است، بروز خطا در تخمین وضعیت شارژ در این روش اجتناب‌ناپذیر است. علاوه بر این، میزان دشارژ، قدیمی شدن باتری و دقت سنسور عوامل دیگری هستند که بر دقت آن تأثیر منفی می‌گذارند (Sepasi et al., 2014). هرچند روش شمارش کولن، برای تخمین آنلاین وضعیت شارژ مناسب نیست، اما معمولاً در ترکیب با روش‌های

دیگر، مانند روش‌های مبتنی بر مدل یا داده، به جهت افزایش قابلیت اطمینان استفاده می‌شود. عملکرد این روش وابستگی زیادی به دقت سنسورهای جریان و برآورد دقیق وضعیت شارژ اولیه دارد (Xing et al., 2014)؛ به‌نحوی که عدم دقت در برآورد وضعیت شارژ اولیه، منجر به بروز انحراف زیادی در تخمین وضعیت شارژ می‌گردد (Saji et al., 2019).

تخمین وضعیت شارژ با روش‌های مبتنی بر داده

تکنیک‌های تخمین وضعیت شارژ داده‌محور شامل روش شبکه عصبی، روش یادگیری عمیق و روش منطق فازی می‌باشد که می‌توانند وضعیت شارژ باتری‌ها را با اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر جریان، ولتاژ و دما به‌طور دقیق تخمین بزنند (How et al., 2019). رویکردهای داده‌محور اغلب به استفاده از ساختار یادگیری ماشین به‌منظور به دست آوردن رابطه و قوانین از داده‌ها نیاز دارند (Hu et al., 2015).

شبکه‌های عصبی، تطبیقی و خودآموز هستند و می‌توانند با هر سیستم غیرخطی سازگار شوند. علاوه بر این، شبکه‌های عصبی به هیچ دانش فیزیکی از سیستم مدل‌سازی شده نیاز ندارند که همین امر آن‌ها را به انتخاب خوبی برای سیستم‌های پیچیده تبدیل می‌کند. با این حال، به‌عنوان یک ابزار خودآموز، شبکه‌های عصبی برای یادگیری به داده‌های سیستم نیاز دارند. معمولاً مقدار داده‌های یادگیری مورد نیاز نیز به پیچیدگی سیستم مدل‌سازی شده بستگی دارد (Ismail et al., 2017).

در تخمین وضعیت شارژ با روش شبکه عصبی، ساختار اصلی شبکه عصبی از سه لایه تشکیل شده است. لایه‌ی ورودی، مقادیر جریان لحظه‌ای، ولتاژ و دما را می‌گیرد. لایه خروجی، مقدار وضعیت شارژ آنی باتری را بیان می‌کند. به واسطه آموزش شبکه عصبی با جفت‌های ورودی-خروجی، شبکه می‌تواند یک نگاشت غیرخطی را تشکیل دهد که رابطه ورودی-خروجی را بدون هیچ‌گونه دانش قبلی از ساختار داخلی باتری مدل‌سازی کند. ارتباط بین لایه ورودی و لایه خروجی با استفاده از تعداد مناسب لایه‌های پنهان، نورون‌های پنهان و تابع فعال‌سازی توسعه می‌یابد. وضعیت شارژ باتری در لایه‌ی خروجی را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$SOC_i = f_i\left\{\sum_k W_{j,k}O_j + \theta_{j,k}\right\} \quad (۳)$$

که در آن $W_{j,k}$ و $\theta_{j,k}$ به ترتیب وزن و بایاس از لایه پنهان به لایه خروجی را نشان می‌دهند. O_j خروجی لایه پنهان است و f_i نشان‌دهنده‌ی تابع فعال‌سازی است.

روش شبکه عصبی در تخمین دقیق وضعیت شارژ، دما و اثرات پیری مؤثر است و می‌تواند ویژگی‌های غیرخطی باتری را بدون مدل باتری و فیلتر اضافه شده ثبت کند. با این وجود، مدت زمان لازم برای آموزش شبکه و مقدار دقیق فراپارامترها، عملکرد روش شبکه عصبی را محدود می‌کنند (Hannan et al., 2018). در یک طبقه‌بندی کلی، شبکه‌های مصنوعی به دو دسته شبکه‌های عصبی سنتی و شبکه‌های عصبی مصنوعی تقسیم می‌شوند. شبکه‌های عصبی سنتی از یک لایه‌ی ورودی، تنها یک لایه‌ی پنهان و یک لایه‌ی خروجی، تشکیل می‌شوند، در حالی‌که شبکه‌های عصبی عمیق از بیش از دو لایه‌ی پنهان برخوردار هستند (Zhang et al., 2022).

به جهت آموزش شبکه عصبی، طی چندین چرخه، باتری مورد نظر توسط یک پروفایل جریان-ولتاژ ثابت، شارژ گردید تا باتری به ولتاژ اسمی خود رسیده و سپس تا تخلیه کامل، تخلیه می‌گردد. در طی تکرار مداوم این چرخه‌های شارژ و دشارژ، مقادیر ولتاژ، جریان، دما و وضعیت شارژ لحظه‌ای باتری ثبت می‌گردند تا به‌عنوان داده‌های آموزش

مورد استفاده قرار گیرند. پس از جمع‌آوری داده‌ها، به کمک نرم‌افزاری مثل متلب، فرایند آموزش شبکه عصبی انجام می‌پذیرد و در نهایت تخمین وضعیت شارژ باتری را می‌توان شبیه‌سازی کرد (El Fallah et al., 2024).

در مدل‌سازی داده‌محور با منطق فازی یک سیستم رابط با استفاده از فازی سازی، پایگاه قواعد فازی، موتور استنتاج و غیر فازی‌سازی تشکیل می‌گردد. روش منطق فازی به قواعد مشخصه باتری نیاز دارد که به دست آوردن آن‌ها به دلیل تغییرات پارامترهای باتری تحت بارهای مختلف، کاری پیچیده و دشوار می‌باشد (Sheng and Xiao, 2015).

تخمین وضعیت شارژ با روش‌های مبتنی بر مدل

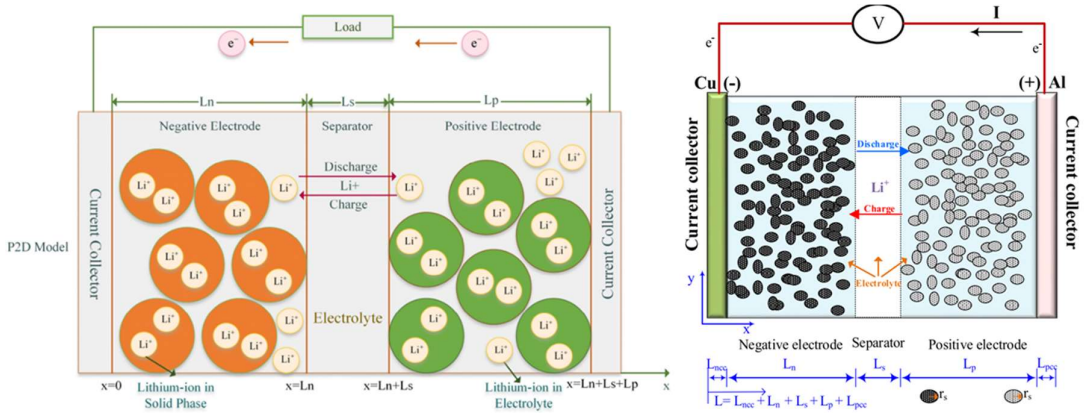
روش‌های مبتنی بر مدل تلاش می‌کنند تا رفتار باتری را با ترکیب عوامل مختلف در معادلات پیچیده‌ی ریاضی به منظور تخمین دقیق وضعیت شارژ، مدل کنند. رویکردهای برآورد وضعیت شارژ مبتنی بر مدل با استفاده از دانش فرایندهای فیزیکی مربوط به سیستم طراحی شده‌اند. این رویکردها برای آن‌که بتوانند رفتار سیستم را با دقت مدل‌سازی کنند، عموماً به درک عمیقی از سیستم یا فرایند نیاز داشته تا روابط و قوانین دقیقی ایجاد کنند.

رویکردهای تخمین وضعیت شارژ مبتنی بر مدل، به دلیل تکیه بر درک عمیق سیستم می‌توانند بسیار قدرتمند و دقیق باشند. از جنبه عملی، توسعه یک مدل برآورد وضعیت شارژ قوی که بتواند به بهترین شکل یک سیستم را توصیف کند، به‌طور کلی نیازمند زمان طولانی، آزمایش‌های پر زحمت و تحقیقات گسترده در مورد سیستم توسط متخصصان این حوزه است. بنابراین، دانش قبلی محدود در مورد سیستم، منجر به طراحی مدلی ضعیف و ناکارآمد می‌شود (How et al., 2019).

روش‌های برآورد وضعیت شارژ مبتنی بر مدل، شامل مدل‌سازی خواص الکتریکی، شیمیایی یا ترکیبی از هر دو ویژگی مربوط به یک باتری خاص هستند. مزیت تخمین مبتنی بر مدل، تخمین دقیق وضعیت شارژ می‌باشد، به شرط این‌که باتری به‌طور دقیق مدل‌سازی شود. اما، از سوی دیگر اشکال عمده در برآورد وضعیت شارژ مبتنی بر مدل و پیچیدگی مدل‌سازی است. به‌منظور مدل‌سازی دقیق باتری، محققان اغلب نیاز به درکی عمیق و ویژه از خواص الکتروشیمیایی باتری دارند. ثانیاً، روش مبتنی بر مدل ممکن است بسیار زمان‌بر باشد. در نهایت، شناسایی تمام پارامترهای مهمی که یک مدل خوب را تشکیل می‌دهند، بسیار چالش برانگیز است. بنابراین، رویکرد مبتنی بر مدل همیشه برای اجرا بر روی همه انواع باتری عملی نیست (Lin et al., 2017).

تخمین وضعیت شارژ مبتنی بر مدل الکتروشیمیایی بر اساس اصول پیشنهادی در نظریه الکترود متخلخل صورت می‌پذیرد. مدل الکتروشیمیایی مکانیسم‌های داخلی باتری را شبیه‌سازی می‌کند و انتقال بار در الکترودها را برای پیش‌بینی ظرفیت باتری توصیف می‌کند. اگرچه این مدل بینش‌هایی در مورد عملکرد باتری ارائه می‌دهد، اما مدل به‌طور قابل توجهی پیچیده بوده و به معادلات دیفرانسیل جزئی برای توصیف دینامیک باتری مانند انتشار لیتیوم و گرادیان‌های پتانسیل وابسته است (Zhao et al., 2024; Zhang et al., 2022).

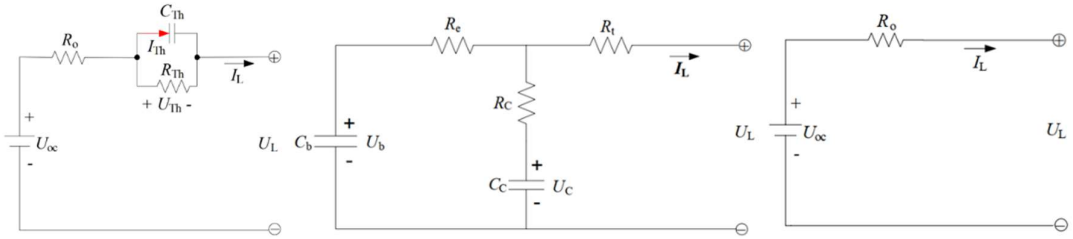
شکل ۳ شماتیک کلی یک مدل الکتروشیمیایی برای باتری لیتیوم-یون را نشان می‌دهد. مدل الکتروشیمیایی می‌تواند بسیار دقیق باشد، با این وجود محاسبات معادلات دیفرانسیل جزئی برای برآورد آنی وضعیت شارژ پر هزینه است. به همین جهت، محققان معادلات دیفرانسیل جزئی را به معادلات دیفرانسیل مرتبه‌ی پایین کاهش داده‌اند تا پیچیدگی محاسبات تا حدودی کمتر گردد. به سبب پیچیدگی و حجم بالای محاسبات و همچنین نیاز به حافظه‌ی زیاد، این روش برای تخمین آنلاین وضعیت شارژ دچار محدودیت‌های عملیاتی است (Xing et al., 2014; Bartlett et al., 2015).



شکل ۳. نمایش کلی از مدل الکتروشیمیایی باتری لیتیوم-یون (Wang et al., 2023; Chen et al., 2018)

ارزیابی وضعیت شارژ مبتنی بر مدل مدار معادل، مستلزم استخراج مداری متشکل از عناصر الکتریکی مختلف است که در ترکیب سری یا موازی مرتب شده‌اند، به‌طوری که دینامیک باتری را مدل می‌کنند (How et al., 2019). این مدل از نظر فیزیکی معنادار است و پارامترهای آن به‌راحتی قابل شناسایی بوده و برای نظارت بر رفتار باتری‌های لیتیوم-یون در زمان‌های مختلف استفاده می‌گردد (Zhao et al., 2024). همچنین، این مدل‌ها از دانش و داده‌های تجربی استفاده نموده و به دلیل ظرفیت آن برای تخمین وضعیت شارژ در زمان واقعی، راندمان محاسباتی بالا و هزینه‌ی محاسباتی پایین داشته و به‌طور گسترده در سیستم‌های مدیریت باتری جهت تخمین آنلاین وضعیت شارژ استفاده می‌شوند (Zhang et al., 2022).

در مدل‌های مدار معادل با استفاده از اجزای الکترونیکی رایج، مانند مقاومت‌ها، خازن‌ها، سلف‌ها، منابع ولتاژ و ...، به شبیه‌سازی عملکرد باتری‌های لیتیوم-یونی پرداخته می‌شود. مدل‌های مدار معادل رایج شامل مدل Rint، مدل RC، مدل PNGV و مدل مدار معادل تونن[1] هستند که تعدادی از آن‌ها در شکل ۴ نشان داده شده‌اند (Zheng et al., 2019).



شکل ۴. نمایش کلی مدار معادل Rint، مدار معادل RC و مدار معادل Thevenin (He et al., 2011)

جمع‌بندی و مقایسه روش‌ها

در جدول ۱، پارامترهای عملکردی سه روش سنتی جدول جستجوی ولتاژ مدار باز، جدول جستجوی امپدانس جریان متناوب و شمارش کولن با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که روش جدول جستجوی ولتاژ مدار باز، تنها برای سیستم‌های با جریان ثابت، کم‌هزینه و با حساسیت پایین مناسب بوده و در مقایسه با روش‌های مبتنی بر داده و مدل، جهت کاربردهای آنلاین و دقیق، توان رقابت عملیاتی ندارد. در کاربردهای عملیاتی و صنعتی، از این روش در کنار سایر روش‌های تخمین وضعیت شارژ به جهت افزایش دقت و اطمینان در تخمین وضعیت شارژ، بهره گرفته می‌شود. از سوی دیگر، با وجود این‌که روش امپدانس جریان متناوب نسبت به روش ولتاژ مدار باز، دارای پیچیدگی

1. Thevenin

و نیازمند توان محاسباتی و هزینه اجرای بالاتری است، اما به سبب دقت بالاتر و عدم نیاز به استراحت، برای کاربردهای آنلاین و در زمان واقعی، مناسب‌تر و کاربردی‌تر می‌باشد. به همین جهت، استفاده از آن برای تخمین وضعیت شارژ باتری‌ها در حالت آنلاین، امکان‌پذیر است. همچنین، این روش در کنار تخمین وضعیت شارژ، قابلیت تشخیص وضعیت سلامت باتری و شناسایی پارامترهای داخلی باتری نظیر مقاومت داخلی را دارد. روش شمارش کولن، روشی مناسب و کارآمد جهت تخمین پیوسته و آنلاین وضعیت شارژ باتری‌های لیتیوم-یونی به شمار می‌آید، اما به سبب ایجاد خطای تجمعی، برای کاربردهای بلند مدت به تنهایی قابل اعتماد نیست. به همین جهت، معمولاً با سایر روش‌ها نظیر روش ولتاژ مدار باز و یا فیلتر کالمن، ترکیب می‌شود تا ضمن اصلاح خطای تجمعی، در کنار روش دوم، دقت تخمین وضعیت شارژ باتری را بهبود بخشد.

در جدول ۲، پارامترهای عملکردی سه روش داده‌محور شامل شبکه عصبی سنتی، شبکه عصبی عمیق و منطق فازی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. روشن است که روش شبکه عصبی سنتی و شبکه عصبی عمیق دارای توان و دقت تخمین بسیار بالا، توان مدل‌سازی غیرخطی بالا، درک وابستگی زمانی خوب و عملکرد خیلی خوبی در حالت کار آنلاین جهت تخمین وضعیت شارژ باتری‌های لیتیوم-یونی بوده و برای استفاده در سیستم‌های مدیریت باتری مناسب هستند. اما، به سبب نیاز شدید به داده‌های زیاد و باکیفیت، سرعت اجرای پایین، نیاز به حافظه‌ی زیاد، پیچیدگی محاسباتی بالا، ضعف تفسیرپذیری و ریسک تعمیم آن در شرایط کاری مختلف، استفاده عملی از آن‌ها به تنهایی کافی نیست و بهتر است که با سایر روش‌های تخمین وضعیت شارژ، ترکیب گردند. از طرفی اجرای روش منطق فازی در تخمین وضعیت شارژ با دقت بالا، پایداری در تخمین، نرخ همگرایی بالا همراه است. همچنین، این روش در برابر نویزهای ولتاژی و جریانی و اختلال در پارامترها مقاومت خوبی نشان می‌دهد که آن را برای کاربردهای عملی مناسب می‌سازد. امکان ترکیب با سایر روش‌های تخمین وضعیت، امکان تخمین وضعیت آنلاین و یادگیری سریع از دیگر نقاط قوت این روش می‌باشند. با وجود تمام این مزایا، به سبب حساسیت بالای این روش به انتخاب پارامترها و همچنین به جهت نیاز به داده‌های زیاد آموزشی و مهارت و دانش بالا برای تعیین قواعد و تعیین پارامترها، استفاده از آن به تنهایی توصیه نمی‌شود و بهتر است که به‌صورت ترکیبی با سایر روش‌های تخمین وضعیت شارژ، مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۱. مقایسه‌ی پارامترهای عملکردی جهت تخمین وضعیت شارژ باتری‌های لیتیوم-یون در روش‌های شمارش کولن، ولتاژ مدار باز و امپدانس جریان متناوب

معیار مقایسه	روش شمارش کولن	روش ولتاژ مدار باز	روش امپدانس جریان متناوب
اساس تخمین وضعیت شارژ	انتگرال‌گیری از جریان شارژ و دشارژ در طول زمان	جدول جستجوی ولتاژ مدار باز بر حسب وضعیت شارژ	تطبیق امپدانس جریان متناوب در فرکانس‌های مختلف با وضعیت شارژ
پارامتر اندازه‌گیری اصلی	جریان	ولتاژ	ولتاژ و جریان متناوب
قابلیت تخمین آنلاین	بسیار خوب	ضعیف	محدود
نیاز به استراحت باتری	ندارد	زیاد	ندارد
دقت تخمین در حالت استراحت باتری	پایین	بالا	متوسط
دقت تخمین در حالت کار باتری	بالا (در کوتاه مدت)	پایین	متوسط
وابستگی به تخمین وضعیت شارژ اولیه	زیاد	ندارد	ندارد
تجمع خطا در طی زمان	زیاد	ندارد	ناچیز
حساسیت به دما	متوسط	متوسط	بسیار زیاد

معیار مقایسه	روش شمارش کولن	روش ولتاژ مدار باز	روش امپدانس جریان متناوب
حساسیت به پیری باتری	کم (در صورت تصحیح ظرفیت باتری)	متوسط	زیاد
نیاز به کالیبراسیون مجدد	کم	متوسط	بسیار زیاد
پیچیدگی محاسباتی	کم	بسیار کم	زیاد
پیچیدگی تجهیزات سخت‌افزاری	متوسط (نیاز به سنسور جریان دقیق)	بسیار کم	زیاد
هزینه پیاده سازی	متوسط	کم	زیاد
تفکیک‌پذیری در گستره ٪۸۰–۲۰ شارژ باتری	خوب	ضعیف	متوسط
قابلیت تخمین سلامت باتری	ندارد	ندارد	دارد
کاربرد رایج	سیستم‌های مدیریت باتری آنلاین	کالیبراسیون، تخمین وضعیت شارژ اولیه	سیستم‌های پیشرفته آزمایشگاهی
امکان استفاده در سیستم مدیریت باتری صنعتی	بسیار مناسب	محدود	فقط سیستم‌های خاص

جدول ۲. مقایسه‌ی پارامترهای عملکردی روش‌های داده‌محور شبکه عصبی سنتی، شبکه عصبی عمیق و منطق فازی در تخمین وضعیت شارژ

معیار مقایسه	منطق فازی	شبکه عصبی سنتی	شبکه عصبی عمیق
نیاز به مدل فیزیکی باتری	ندارد	ندارد	ندارد
قابلیت یادگیری خودکار	ندارد	محدود	بسیار بالا
درک وابستگی زمانی	محدود	ندارد	بالا
دقت تخمین وضعیت شارژ	متوسط	خوب	بسیار خوب
عملکرد در شرایط دینامیکی	متوسط	متوسط	عالی
تفکیک‌پذیری در گستره ٪۸۰–۲۰ شارژ باتری	متوسط	خوب	بسیار خوب
حساسیت به نویز	کم	متوسط	متوسط
وابستگی به دما و پیری	متوسط	متوسط	متوسط
نیاز به داده آموزشی	کم	متوسط	بسیار زیاد
ریسک بیش برازش	کم	متوسط	زیاد
قابلیت تعمیم به شرایط جدید	محدود	متوسط	وابسته به داده‌ها
پیچیدگی محاسباتی	کم	متوسط	زیاد
مناسب برای اجرای آنلاین	بله	بله	محدود
مناسب برای سیستم مدیریت باتری صنعتی	بله	بله	معمولا خیر

در بین روش‌های مبتی بر مدل، روش مدل الکتروشیمیایی به سبب شبیه‌سازی مکانیسم‌های داخلی باتری، از معادلات دیفرانسیل جزئی متعدد و پیچیده‌ای بهره می‌گیرد که به یکدیگر کوپل شده‌اند. این امر موجب افزایش دقت این روش می‌شود اما به تبع آن، حجم و هزینه‌ی محاسبات بالا می‌رود که برآورد آنی وضعیت شارژ را دشوار و پیچیده می‌کند. با این وجود، مدل الکتروشیمیایی از دقت و توانایی بسیار خوبی جهت توصیف رفتارهای داخلی باتری برخوردار بوده، می‌تواند اثرات جریان‌های متغیر، قطبش، نفوذ و انتقال بار را مدل‌سازی کند و در کنار تخمین دقیق وضعیت شارژ، امکان تشخیص وضعیت سلامت باتری را نیز دارد.

با این حال، شناسایی دقیق پارامترهای این مدل سخت و دشوار بوده و نیازمند دانش تخصصی بالایی می‌باشد. از سوی دیگر، مدل‌های مختلف مدار معادل با استفاده از عناصر الکتریکی سری و موازی‌شده، رفتار باتری را مدل‌سازی

می‌کنند. پارامترهای مورد نیاز این مدل‌ها، تقریباً به راحتی قابل شناسایی بوده و به سبب ظرفیت آن‌ها در تخمین وضعیت شارژ باتری در زمان واقعی، راندمان بالا، هزینه‌ی محاسباتی پایین، از مدل‌های مختلف مدار معادل به‌صورت گسترده در سیستم‌های مدیریت باتری جهت تخمین وضعیت شارژ باتری استفاده می‌گردد. در جدول ۳ روش‌های مختلف تخمین وضعیت شارژ باتری لیتیوم-یون از نظر دقت، پیچیدگی، هزینه و ... با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول ۳. مقایسه‌ی پارامترهای عملکردی روش‌های مختلف تخمین وضعیت شارژ باتری‌های لیتیوم-یون از نظر دقت، پیچیدگی، هزینه و ...

معیار مقایسه	ولتاژ مدار باز	امپدانس جریان متناوب	شمارش کولن	شبکه عصبی عمیق	منطق فازی	مدل الکتروشیمیایی	مدل مدار معادل
نیاز به مدل دقیق باتری	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	دارد	مدل ساده شده
قابلیت تخمین آنلاین	ضعیف	محدود	بسیار خوب	خوب	خوب	محدود	بسیار خوب
نیاز به استراحت باتری	زیاد	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد
دقت در شرایط دینامیکی	پایین	متوسط	خوب	بسیار بالا	متوسط	بسیار بالا	بالا
تجمع خطا در طی زمان	ندارد	ناچیز	زیاد	وابسته به داده‌ها	کم	ندارد	ندارد
وابستگی به تخمین وضعیت اولیه شارژ	ندارد	ندارد	زیاد	ندارد	ندارد	ندارد	کم
حساسیت به دما	متوسط	زیاد	متوسط	وابسته به داده‌ها	متوسط	متوسط	متوسط
حساسیت به پیری	متوسط	زیاد	متوسط	وابسته به داده‌ها	متوسط	بسیار زیاد	متوسط
تفکیک‌پذیری در گستره ۲۰-۸۰٪ شارژ باتری	ضعیف	متوسط	خوب	بسیار خوب	متوسط	بسیار خوب	خوب
نیاز به داده آموزشی	ندارد	کم	ندارد	بسیار زیاد	کم	ندارد	کم
پیچیدگی محاسباتی	بسیار کم	زیاد	کم	بسیار زیاد	کم	بسیار زیاد	متوسط
پیچیدگی پیاده سازی	ساده	پیچیده	متوسط	بسیار پیچیده	متوسط	بسیار پیچیده	متوسط
قابلیت تفسیرپذیری	بالا	متوسط	بالا	پایین	بالا	بسیار بالا	متوسط
مناسب برای سیستم‌های مدیریت باتری صنعتی	محدود	سیستم‌های خاص	بسیار رایج	معمولا خیر	محدود	معمولا خیر	بسیار رایج
کاربردهای شاخص	کالیبراسیون، تجهیزات آزمایشگاهی	تحلیل پیشرفته وضعیت شارژ، تشخیص پیری	سیستم‌های مدیریت باتری تجاری، سیستم‌های ذخیره انرژی، وسایل الکترونیکی قابل حمل	خودروهای برقی، مدیریت انرژی پیشرفته، پیش‌بینی دقیق وضعیت شارژ	سیستم‌های مدیریت باتری ساده، سیستم‌های ارزان قیمت، کاربردهای با داده‌های محدود	تحقیقات دانشگاهی، شبیه‌سازی‌های دقیق	خودروی برقی، UPS، سیستم‌های مدیریت باتری صنعتی
هزینه اجرا	بسیار کم	زیاد	کم	بسیار زیاد	متوسط	بسیار زیاد	متوسط
میزان فضای لازم جهت ذخیره‌سازی داده‌ها	بسیار کم	متوسط	بسیار کم	بسیار زیاد	کم	کم	کم

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روش‌های مختلف تخمین وضعیت شارژ باتری‌های لیتیوم-یون نظیر روش ولتاژ مدار باز، امپدانس جریان متناوب، شمارش کولن، روش‌های داده‌محور شامل شبکه عصبی سنتی و عمیق و منطق فازی و روش‌های مدل‌محور شامل مدل الکتروشیمیایی و مدار معادل، معرفی و تشریح شدند. هر روش نقاط قوت و محدودیت‌های

خاص خود را دارد و هیچ روش واحدی را نمی‌توان به‌عنوان راه‌حلی ایده‌آل برای تمام کاربردها معرفی کرد. روش‌های کلاسیک مانند ولتاژ مدار باز و شمارش کولن، از نظر سادگی و قابلیت پیاده‌سازی بسیار مناسب بوده، اما در شرایط دینامیکی و بلندمدت با محدودیت دقت مواجه هستند. در مقابل، مدل‌های مدار معادل تعادل مناسبی بین دقت، پیچیدگی و قابلیت اجرای بلادرنگ ایجاد می‌کنند و به همین دلیل به‌طور گسترده در سیستم‌های مدیریت باتری صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مدل‌های الکتروشیمیایی با ارائه‌ی دید فیزیکی عمیق، بالاترین دقت نظری را فراهم می‌کنند، اما به دلیل پیچیدگی محاسباتی، بیشتر در کاربردهای تحقیقاتی استفاده می‌شوند. در نهایت، روش‌های داده‌محور مانند منطق فازی و شبکه‌های عصبی عمیق، به‌ویژه در شرایط دینامیکی پیچیده، عملکرد بسیار خوبی دارند، اما وابستگی آن‌ها به داده آموزشی و منابع محاسباتی قابل توجه است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب روش تخمین وضعیت شارژ، کاملاً وابسته به کاربرد، منابع سخت‌افزاری و سطح دقت موردنیاز بوده و در عمل، بهره‌گیری از ترکیب دو یا سه روش به‌صورت هم‌زمان، بهترین عملکرد را ارائه می‌دهد. البته، باید توجه داشت که بهره‌گیری از دو یا سه روش تخمین وضعیت شارژ به‌صورت هم‌زمان، موجب افزایش پیچیدگی محاسبات شده و مدل تخمین وضعیت شارژ را نیازمند به تنظیم پارامترهای متعدد کرده و هزینه‌ی اجرا را افزایش می‌دهد. اما، به سبب ارائه‌ی مدلی با بیشترین دقت، کاهش خطای انباشته و مناسب شرایط کاری پیچیده و آنلاین، موجب می‌شود که استفاده از آن‌ها در عمل محبوب و کاربردی گردد.

منابع

Ali, M. U., Zafar, A., Nengroo, S. H., Hussain, S., Junaid Alvi, M., & Kim, H. J. (2019). Towards a smarter battery management system for electric vehicle applications: A critical review of lithium-ion battery state of charge estimation. *Energies*, *12*(3), 446.

Barré, A., Deguilhem, B., Grolleau, S., Gérard, M., Suard, F., & Riu, D. (2013). A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. *Journal of Power Sources*, *241*, 680-689.

Bartlett, A., Marcicki, J., Onori, S., Rizzoni, G., Yang, X. G., & Miller, T. (2015). Electrochemical model-based state of charge and capacity estimation for a composite electrode lithium-ion battery. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, *24*(2), 384-399.

Chen, T., Jin, Y., Lv, H., Yang, A., Liu, M., Chen, B., ... & Chen, Q. (2020). Applications of lithium-ion batteries in grid-scale energy storage systems. *Transactions of Tianjin University*, *26*(3), 208-217.

Chen, Y., Huo, W., Lin, M., & Zhao, L. (2018). Simulation of electrochemical behavior in Lithium ion battery during discharge process. *PLoS One*, 13(1), e0189757.

El Fallah, S., Kharbach, J., Vanagas, J., Vilkelytė, Ž., Tolvaišienė, S., Gudžius, S., ... & Ouazzani Jamil, M. (2024). Advanced state of charge estimation using deep neural network, gated recurrent unit, and long short-term memory models for lithium-Ion batteries under aging and temperature conditions. *Applied Sciences*, *14*(15), 6648.

Faisal, M., Hannan, M. A., Ker, P. J., Hussain, A., Mansor, M. B., & Blaabjerg, F. (2018). Review of energy storage system technologies in microgrid applications: Issues and challenges. *IEEE Access*, 6, 35143-35164.

Fotouhi, A., Auger, D. J., Propp, K., Longo, S., & Wild, M. (2016). A review on electric vehicle battery modelling: From Lithium-ion toward Lithium–Sulphur. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *56*, 1008-1021.

Ge, C., Zheng, Y., & Yu, Y. (2022). State of charge estimation of lithium-ion battery based on improved forgetting factor recursive least squares-extended Kalman filter joint algorithm. *Journal of Energy Storage*, *55*, 105474.

Hannan, M. A., Lipu, M. S. H., Hussain, A., Saad, M. H., & Ayob, A. (2018). Neural network approach for estimating state of charge of lithium-ion battery using backtracking search algorithm. *IEEE Access*, *6*, 10069-10079.

He, H., Xiong, R., & Fan, J. (2011). Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *Energies*, *4*(4), 582-598.

Horiba, T. (2014). Lithium-ion battery systems. Proceedings of the IEEE, 102(6), 939-950.

How, D. N., Hannan, M. A., Lipu, M. H., & Ker, P. J. (2019). State of charge estimation for lithium-ion batteries using model-based and data-driven methods: A review. *IEEE Access*, 7, 136116-136136.

Hu, X., Li, S. E., & Yang, Y. (2015). Advanced machine learning approach for lithium-ion battery state estimation in electric vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, *2*(2), 140-149.

Ismail, M., Dlyma, R., Elrakaybi, A., Ahmed, R., & Habibi, S. (2017, June). Battery state of charge estimation using an Artificial Neural Network. In 2017 IEEE transportation electrification conference and expo (ITEC) (pp. 342-349).

Kim, J., Seo, G. S., Chun, C., Cho, B. H., & Lee, S. (2012, March). OCV hysteresis effect-based SOC estimation in extended Kalman filter algorithm for a LiFePO 4/C cell. In 2012 IEEE international electric vehicle conference (pp. 1-5).

Li, N., Zhang, Y., He, F., Zhu, L., Zhang, X., Ma, Y., & Wang, S. (2021). Review of lithium-ion battery state of charge estimation. *Global Energy Interconnection*, *4*(6), 619-630.

Lin, C., Tang, A., & Xing, J. (2017). Evaluation of electrochemical models based battery state-of-charge estimation approaches for electric vehicles. *Applied Energy*, *207*, 394-404.

Lipu, M. H., Hannan, M. A., Ayob, A., Saad, M. H. M., & Hussain, A. (2018). Review of lithium-ion battery state of charge estimation methodologies for electric vehicle application. *International Journal of Engineering and Technology*, *7*(3.17), 219-224.

Ng, K. S., Moo, C. S., Chen, Y. P., & Hsieh, Y. C. (2009). Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. *Applied Energy*, *86*(9), 1506-1511.

Pai, H. Y., Liu, Y. H., & Ye, S. P. (2023). Online estimation of lithium-ion battery equivalent circuit model parameters and state of charge using time-domain assisted decoupled recursive least squares technique. *Journal of Energy Storage*, *62*, 106901.

Saji, D., Babu, P. S., & Ilango, K. (2019, May). SoC estimation of lithium ion battery using combined coulomb counting and fuzzy logic method. In 2019 4th International conference on recent trends on electronics, information, communication & technology (RTEICT) (pp. 948-952).

Sepasi, S., Ghorbani, R., & Liaw, B. Y. (2014). A novel on-board state-of-charge estimation method for aged Li-ion batteries based on model adaptive extended Kalman filter. *Journal of Power Sources*, *245*, 337-344.

Shen, P., Ouyang, M., Lu, L., Li, J., & Feng, X. (2017). The co-estimation of state of charge, state of health, and state of function for lithium-ion batteries in electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *67*(1), 92-103.

Sheng, H., & Xiao, J. (2015). Electric vehicle state of charge estimation: Nonlinear correlation and fuzzy support vector machine. *Journal of Power Sources*, *281*, 131-137.

Shi, N., Chen, Z., Niu, M., He, Z., Wang, Y., & Cui, J. (2022). State-of-charge estimation for the lithium-ion battery based on adaptive extended Kalman filter using improved parameter identification. *Journal of Energy Storage*, *45*, 103518.

Sun, Y., Saxena, S., & Pecht, M. (2018). Derating guidelines for lithium-ion batteries. *Energies*, *11*(12), 3295.

Waag, W., Fleischer, C., & Sauer, D. U. (2014). Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles. *Journal of Power Sources*, *258*, 321-339.

Wang, J., Meng, J., Peng, Q., Liu, T., Zeng, X., Chen, G., & Li, Y. (2023). Lithium-ion battery state-of-charge estimation using electrochemical model with sensitive parameters adjustment. *Batteries*, *9*(3), 180.

Wu, X., Li, X., & Du, J. (2018). State of charge estimation of lithium-ion batteries over wide temperature range using unscented Kalman filter. *IEEE Access*, *6*, 41993-42003.

Xing, Y., Wei, H., Pecht, M., & Tsui, K. L. (2014). State of charge estimation of lithium-ion batteries using the open-circuit voltage at various ambient temperatures. *Applied Energy*, *113*, 106-115.

Xiong, R., Cao, J., Yu, Q., He, H., & Sun, F. (2017). Critical review on the battery state of charge estimation methods for electric vehicles. *IEEE Access*, *6*, 1832-1843.

Yang, B., Wang, J., Cao, P., Zhu, T., Shu, H., Chen, J., ... & Zhu, J. (2021). Classification, summarization and perspectives on state-of-charge estimation of lithium-ion batteries used in electric vehicles: A critical comprehensive survey. *Journal of Energy Storage*, *39*, 102572.

Zhang, D., Zhong, C., Xu, P., & Tian, Y. (2022). Deep learning in the state of charge estimation for li-ion batteries of electric vehicles: A review. *Machines*, *10*(10), 912.

Zhao, J., Ge, M., Huang, Q., & Zhong, X. (2024). Lithium Battery SOC Estimation Based on Type-2 Fuzzy Cerebellar Model Neural Network. *Electronics*, *13*(24), 4999.

Zheng, W., Xia, B., Wang, W., Lai, Y., Wang, M., & Wang, H. (2019). State of charge estimation for power lithium-ion battery using a fuzzy logic sliding mode observer. *Energies*, *12*(13), 2491.

استناد به این مقاله: آگنده، علیرضا، و مشکسار، احسان. (۱۴۰۵). مطالعه و مقایسه روش‌های مختلف تخمین وضعیت شارژ در باتری‌های لیتیوم-یون. *فصلنامه پژوهش‌های نوین در شهر هوشمند*، ۴(۳)، ۶۱-۷۵.

New Researches in The Smart City is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.