تخمین حالت شارژ و سلامت باطری توسط روش توسعه یافته EKF برای مدل RC در سیستم مدیریت باطری خودروهای الکتریکی

سید سعید عبدالهی خو[۱]، جواد علمائی[۲،*]، سید محمد حسن حسینی[۳]

۱- دانشجوی دکتری تخصصی،گروه مهندسی برق، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

St_s_abdollahikhou@azad.ac.ir

*۲- استاد،گروه مهندسی برق، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

J_olamaei@azad.ac.ir

۳- استاد،گروه مهندسی برق، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

smh_hosseini@azad.ac.ir

تاریخ دریافت:۱۴۰۲/۱۰/۱۲ تاریخ پذیرش:۱۴۰۲/۱۲/۹

چکیده: تخمین دقیق حالت شارژ یک باطری نه‌تنها برای مدیریت بهینه انرژی (*OEM*)[۱] در خودروهای الکتریکی (*EV*)[۲] و شبکه‌های هوشمند قدرت، بلکه برای حفاظت باطری از رفتن به شرایط تخلیه عمیق یا شارژ بیش از اندازه و در نتیجه کاهش عمر باطری ضروری است. این شرایط حتی ممکن است شرایط بالقوه خطرناکی به لحاظ انفجار باطری ایجاد کند. با وجود اهمیت بسیار زیاد پارامتر حالت شارژ، این پارامتر بطور مستقیم از پایانه‌های باطری قابل اندازه‌گیری نیست. سیستم مدیریت باطری (*BMS*)[۳] در میان عملکردهای بسیار، نیاز به یک روش برای تخمین حالت شارژ و تعیین حالت سلامت باطری خودروی الکتریکی دارد. در این پژوهش ابتدا مدل مدار معادل الکتریکی در محیط متلب با شبکه *RC* شبیه‌سازی شده است. این مدل دارای این مزیت است که یک آزمون سریع برای استخراج پارامترها و مشخصات دینامیکی مدل باطری را ارائه می‌کند.وسپس با استفاده از فیلتر کالمن توسعه‌یافته (*EKF*)[۴] برای تخمین حالت شارژ و چندین روش برای تخمین حالت سلامتِ باطری خودروی الکتریکی مدنظر، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج شبیه سازی نشان داده شده است.

کلید واژه : باطری لیتیوم یونی، حالت شارژ باطری، حالت سلامت باطری، سیستم مدیریت باطری، خودروی الکتریکی.

۱- مقدمه

آژانس بین‌المللی انرژی در سال ۲۰۱۰ با ارائه نقشه راه تا سال ۲۰۵۰، محدودیت‌هایی را برای بخش‌های تولیدکننده دی‌اکسیدکربن، بخصوص بخش‌های ساختمان، حمل‌ونقل، صنعت و تولید برق تعریف کرد [۱]. درضمن جهان در حال حرکت به سوی عواقب خطرناکی مانند گرم‌شدن کره زمین و انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی مختلف از جمله گازوئیل و بنزین در وسایل نقلیه است که سالانه مقدار زیادی دی‌اکسیدکربن تولید می‌کنند [۲]. بنابراین باطری با فناوری پیشرفته، یک عنصر کلیدی در بسیاری از کاربردها مانند وسایل الکتریکی، وسایل نقلیه برقی، اجزای سیستم‌های ماهواره و سیستم‌های قدرت است. باطری لیتیوم یونی بدلیل چگالی انرژی بالا، میزان تخلیه خود به خودی بسیار کم و طول عمر زیاد نسبت به انواع دیگر باطری‌ها، یک فناوری جدید و امیدبخش در خودروهای برقی و ترکیبی برقی و سوخت‌های فسیلی محسوب می‌شود [۳]. با این حال، شارژ و تخلیه بیش از اندازه باطری‌های لیتیوم یونی نیز می‌تواند صدمات بازگشت ناپذیری به سلول‌های باطری وارد نماید و کارآیی و طول عمر آن را بطور چشم گیری کاهش دهد. علاوه بر این در بسیاری از برنامه‌های کاربردی، تخمین دقیق انرژی موجود در باطری در زمان

1- Optimal energy management
2- Electric vehicle
3- Battery management system
4- Extended Kalman Filter

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 4- Winter 2024

استفاده و کارکرد، برای عملکرد مناسب کل سیستم مانند مدیریت باطری لازم و ضروری است. بنابراین یک الگوریتم تخمینی قابل اعتماد و دقیق حالت شارژ باطری‌های لیتیوم یونی در سیستم مدیریت باطری خودروی الکتریکی، لازم است تا کاربر بتواند مدت زمان و چگونگی استفاده از باطری را قبل از توقف تشخیص دهد[۴] .

لی و همکاران [۵]، تشخیص ظرفیت باطری لیتیوم یونی خودروی برقی را براساس شبکه عصبی فازی توسعه دادند. در این پژوهش، معادله‌ای برای توصیف رفتار دینامیک باطری با توجه به تغییرات جریان و حالت شارژ باطری ارائه شده است. روش شمارش جریان کولمب متکی بر جمع جریان باطری نسبت به زمان است و این روش در تخمین حالت شارژ باطری توسط اکثر تولیدکنندگان سیستم مدیریت باطری بدلیل سادگی و سهولت اجرای آن ترجیح داده شده است. با این حال، این روش به دلایل متعددی دقیق نیست و فرضیه روش بدین صورت است که تمام سلول‌ها در حال تعادل هستند و در این روش بالانس بودن از تأثیر بسیار بالایی برخوردار است. در واقع سلول‌های باطری معمولاً دارای سطوح مختلف ولتاژ و دما در تمام حالت‌های کارکرد هستند که باعث می‌شود حالت شارژ هر یک از سلول‌ها متفاوت باشند.

گوآ و همکاران [۶]، تخمین حالت شارژ باطری لیتیوم یونی را براساس شبکه عصبی پایه شعاعی ارائه نمودند. نتایج نشان دادکه اندازه‌گیری ولتاژ، جریان و درجه حرارت و مقاومت داخلی بعنوان ورودی شبکه عصبی برای تخمین باقی‌مانده توان باطری دارای سرعت بالاتر و محدوده کار وسیع‌تیر است. داده‌های تجربی استخراج شده از تست تخلیه برای اعتبارسنجی و آموزش شبکه عصبی استفاده شده است. چائویی و همکاران [۷] شبکه عصبی را بمنظور تخمین برخط حالت شارژ باطری لیتیوم یون به کار برده‌اند، زیرا روش خارج از خط در مورد باطری لیتیوم یونی که رابطه ولتاژ مدار باز و حالت شارژ دارای پروفیل تخت بوده، دقت لازم را نداشته یا پاسخگو نیست. این پژوهشگران نشان داده‌اند که این روش تخمین مانند سایر استراتژی‌های تخمین نیاز به شناسایی پارامترهای پیچیده و مدل ریاضی ندارد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تخمین با درنظرگرفتن دمای باطری و فرسودگی، دقیق‌تر و برجسته‌تر خواهد بود. ولتاژ مدار باز باطری را می‌توان در طول زمان استراحت باطری حین شارژ و تخلیه، اندازه‌گیری کرد و ارتباط بین ولتاژ مدار باز و وضعیت شارژ را برای تخمین حالت شارژ بکار برد.

با توجه به اینکه استفاده گسترده از باطری در وسایل مختلف مثل خودروهای الکتریکی گسترش یافته، لذا وجود یک سیستم قابل اعتماد و مؤثر برای مدیریت باطری بسیار ضروری و حائز اهمیت است [۲۰]. سیستم مدیریت باطری در میان عملکردهای بسیار دو وظیفه مهم یعنی تخمین حالت شارژ، و تعیین وضعیت سلامت را برعهده دارد [۲۱و۲۲]. حالت شارژ معمولاً به صورت درصدی از بیشترین شارژ ممکن می باشد که داخل یک باطری قابل شارژ فراهم می‌شود و تخمین حالت شارژ بعنوان درجه سوخت باطری عمل می‌کند. همچنین، حالت سلامت مقیاسی است که منعکس کننده شرایط کلی باطری و قابلیت آن برای ارائه عملکرد ویژه در مقایسه با یک باطری تازه است.

به طور ویژه، تعریف کمی حالت سلامت، یا بر اساس ظرفیت باطری یا مقاومت داخلی آن است که بستگی به کاربردهای خاص آن دارد [۲۰]. بخاطر نیاز به تخمین کامپیوتری حالت شارژ و حالت سلامت در طول عملکرد سیستم، طراحی یک مدل باطری ساده اما دقیق برای یک سیستم مدیریت باطری مؤثر و منسجم، امری ضروری محسوب می‌شود. مطالعات بسیاری در زمینه‌ی تخمین حالت شارژ انجام شده است. اغلب این روش‌ها روش‌های مدل محور هستند و همراه یک مدل ولتاژ مدار باز در سیستم مدیریت باطری بصورت یک جدول ارجاع یا یک عبارت تحلیلی انجام شده است، و این در حالی است که رویه دوم دارای چندین مزایا مانند: کارآیی محاسباتی و همچنین متناسب برای تحلیل می‌باشد. بخاطر محدوده مسطح بسیار در منحنی [SOC-OCV] برای باطری‌های لیتیم یونی، یک ناهماهنگی کوچک در متناسب سازی ولتاژ مدار باز می‌تواند موجب انحراف زیادی در تخمین وضعیت شارژ شود.

بنابراین تخمین دقیق حالت شارژ فقط برای محافظت از باطری می باشد و همچنین از تخلیه بیش از حد آن جلوگیری می‌کند و نفس باطری را هم بهبود می‌بخشد لذا کاربرد آن این اجازه را به ما می‌دهد که استراتژی‌های کنترل معقولی را برای ذخیره‌سازی باطری بکار برده شود. اگرچه یک باطری منبع ذخیره‌سازی انرژی شیمیایی است و این انرژی شیمیایی نمی‌تواند مستقیماً در دسترس باشد. در این‌صورت، تخمین از طریق وضعیت شارژ برای باطری‌های مختلف مدنظر می‌باشد. تحقیقات و مطالعات زیادی در زمینه‌ی تخمین حالت شارژ باتری‌ها صورت گرفته است.

استفاده از نرم افزارهای پیشرفته جهت شبیه سازی ریاضی و مدلسازیهای دقیق خود گویای اهمیت باطری و ویژگیهای ان در شبکه است. لذا به بررسی دو پارامتر مهم شامل وضعیت شارژ اولیه و سلامت باطری پرداخته شده است که برای تعیین درصد سلامت باطری از شاخص پیری استفاده شده که هردو توسط سیستم مدیریت باطری اندازه گیری می شود. در بخش سوم، نحوه شبیه سازی و مطالعات موردی و نتایج عددی حاصله ارائه و تحلیل شده است،که با یک روش یکپارچه از مدل ESC[1] که شامل پارامترهای عملی برای تخمین حالت شارژ و مشاهده حالت سلامت باطری است، استفاده می‌شود. مطالعات برپایه تست عمر باطری خودروی الکتریکی انجام شده است. تخمین حالت شارژ یک باطری،برای توصیف باقی‌مانده‌ی ظرفیت باطری استفاده می‌شود و این یک پارامتر مهم برای استراتژی کنترل می‌باشد که منعکس کننده عملکرد باطری است. و نهایتا در بخش چهارم مقاله، به جمع بندی ونتیجه گیری درموردکارهای انجام شده درهربخش حول تعیین پارامترهای کلیدی یک سلول بطورمختصر بحث شده است.

1- Enhanced Self-correcting

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 4- Winter 2024

۲- فرمول بندی ومدلسازی روش پیشنهادی

۲-۱- مدلسازی ریاضی باطری خودروهای الکتریکی

خودروهای الکتریکی(EVs) در شبکه توسط باطری آن مدل می‌شوند. پس مدل‌سازی باطری خودروهای الکتریکی حائز اهمیت است.که درآنها از انواع مختلف باطری استفاده می‌کنند. بنابراین در مدل‌سازی باید به عوامل مختلفی مانند مشخصات باطری، عمر باطری و میزان شارژ باطری توجه نمود.

رفتار باطری نتیجه‌ی واکنش‌های پیچیده بین فرآیندهای فیزیکی و الکتروشیمیایی است. به همین دلیل روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی باطری ارائه شده است. مدل‌ها عموماً به دو گروه تقسیم می‌شوند: مدل‌های مبتنی بر رفتار الکتروشیمیایی و بر مبنای مدار معادل. مدل‌های الکتروشیمیایی جنبه‌های فیزیکی و شیمیایی باطری را مورد توجه قرار می‌دهند. این مدل‌ها بیشتر برای طراحی باطری مناسب هستند و مدل‌های مدار معادل، برای مطالعات شبیه‌سازی مناسب هستند و بیشتر از این روش برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. با انجام آزمایشاتی بر روی باطری، مدار معادل آن را می‌توان بدست آورد. در [۱۷]، یک مدل ارائه شده که می‌توان با استفاده از اطلاعات سازنده، باطری را مدل کرد. با استفاده از این مدل می‌توان باتری‌های لیتیوم یونی و باتری‌های نیکل متال هایبرید را شبیه‌سازی کرد [۱۷]. در [۱۷] ، ولتاژ باتری لیتیوم یونی در هنگام شارژ طبق رابطه ۱ و ولتاژ باتری در هنگام دشارژ توسط رابطه ۲ بیان شده است.

$$V_{battC} = E_0 - Ri - \frac{Q}{Q - i_t}K \times (i_t + i^*) + Ae^{-Bi_t} \quad (۱)$$

$$V_{battD} = E_0 - Ri - \frac{Q}{-Q/10 - i_t}Ki^* + Ae^{-Bi_t} \quad (۲)$$

i جریان باطری برحسب آمپر، i_t انتگرال جریان برحسب آمپرساعت، i^* جریان فیلتر شده بر حسب آمپر، R مقاومت داخلی باطری برحسب اهم، K ثابت پلاریزاسیون برحسب اهم، Q ظرفیت نامی باطری برحسب آمپر ساعت، A اندازه ناحیه نمایی برحسب برحسب ولت، B ثابت زمانی ناحیه نمایی برحسب عکس آمپرساعت و V_{batt} ولتاژ باطری است. نرم افزار متلب برای مدل‌سازی باطری از این مدل استفاده کرده است.

۲-۲- وضعیت شارژ باطری[1] و وضعیت سلامت باطری[2]

برخلاف خودروهای ICE[3] (شامل هایبرید و پلاگین‌ها با موتورهای احتراق داخلی) میزان سوخت باقی‌مانده در باطری را نمی‌توان با نگاه مستقیم به آن اندازه‌گیری کرد. حتی به غلط تصور می‌شود که اندازه‌گیری ولتاژ در پایانه‌های باطری می‌تواند ظرفیت باطری را نما دهد، این صحیح نیست و به این سادگی هم نیست. به طور مشابه پارامتر SOH طول عمر باطری را نشان می‌دهد. پارامترهای SOC و SOH هردو جزء اطلاعات حیاتی برای مصرف‌کننده هستند، زیرا پارامتر SOC توصیف می‌کند که قبل از شارژ مجدد چقدر می‌توان رانندگی کرد و مقدار پارامتر SOH زمان تعویض باطری‌ها را مشخص می کند. ظرفیت باطری با افزایش عمر کاهش می‌یابد. این باعث کاهش دامنه‌ای می‌شود که خودروهای الکتریکی می‌توانند پوشش دهند. اگر عمری که از باطری سپری شده دنبال شود، می‌توان زمان تعویض باطری را مشخص کرد. سرعت پیری یک خودرو الکتریکی به دمای کارکرد، ضریب تخلیه باطری که باطری تحت آن کار می‌کند، چرخه‌های شارژ و غیره نیز بستگی دارد. بنابراین وضعیت سلامت با در نظر گرفتن فاکتور پیری آن، سلامت باطری را به درصد اندازه‌گیری می‌کند. هر چه بیشتر کهنه شود، سلامت باطری کمتر خواهد بود. این وظیفه تجهیزات BMS است که هر دوی این پارامترها را اندازه‌گیری کند.

فرض برآنکه یک باطری با مقدار انرژی اولیه $Q(t_0)$ در اختیار است و با جریان شارژ $I_b(t)$ شارژ شده است. در این حالت مقدار بار تحویل داده شده به باطری برابر است با $\int_{t_0}^{t} \eta I_b(\tau)d\tau$ و از طرفی اگر باطری کاملاً خالی از انرژی الکتریکی باشد در نتیجه مقدار تابع $Q_0 = \int_0^{\infty} \eta I_b(\tau)d\tau$ برابر کل باری است که می‌توان در باطری ذخیره نمود. در روابط فوق، η راندمان باطری را نشان می‌دهد که وابسته به جریان باطری است، زیرا در هنگام شارژ مقداری از توان الکتریکی در باطری تلف می‌شود. برای جریان شارژ $\eta \leq 1$ و باری جریان دشارژ $\eta = 1$ است. با استفاده از تعریف بالا، مقدار پارامترSOC با رابطه ۳ تعریف می‌شود [۲۶] :

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{\int_{t_0}^{t} \eta I_b(\tau)d\tau}{Q_0} \times 100 \quad (۳)$$

که در آن $SOC(t_0) = \frac{Q(t_0)}{Q_0}$ حالت شارژ اولیه باطری، $Q(t_0)$ بار الکتریکی در لحظه t_0 و Q_0 کل بار الکتریکی است که می‌توان در باطری ذخیره نمود.

به عنوان مثال اگر جریان ۲ آمپر به مدت ۳ ساعت به باطری وارد شود، مقدار ۶ آمپرساعت به شارژ باطری افزوده خواهد شد. اگر ظرفیت اسمی باطری ۲۴ آمپر ساعت باشد، به پارامترSOC باطری، ۲۵ درصد افزوده خواهد شد. اما نکته قابل توجه، در دسترس نبودن حالت شارژ اولیه باطری در اغلب کاربردهایی است که به طور پیوسته از آن بهره می‌گیرند مانند خودروهای هایبرید. لازم به ذکر است که رابطه ۱ یکی از روش‌های مستقیم اندازه‌گیری حالت شارژ باطری در آزمایشگاه است. میزان سلامت باطری(SOH) به صورت فرمولی به فرم رابطه‌ی ۴ تعریف می‌شود :

$$SOH(t) = \frac{Q(t)}{Q_{max}} \quad (۴)$$

که به ترتیب Q_{max} و $Q(t)$ بیشترین مقدار ممکن شارژ و بار الکتریکی باطری را در لحظه t نشان می‌دهد

1- State of Charge
2- State of Health
3- Internal Combustion Engines

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

بنابراین از آنجاییکه پارامترهای SOC و SOH به شدت به هم مرتبط هستند، به منظور تخمین حالت‌های حیاتی وپارامترهای مهم باطری، سیستم مدیریت باطری(BMS) از سه اندازه‌گیری حیاتی ولتاژ، جریان و دمای باطری استفاده می‌کند. تخمین حالت شارژ یک باطری که برای توصیف باقیمانده‌ی ظرفیت باطری استفاده می‌شود برای استراتژی کنترل، یک پارامتر مهم است. تخمین حالت شارژ یک پارامتر مهمی است که منعکس‌کننده عملکرد باطری می‌باشد، بنابراین تخمین دقیق پارامترSOC برای محافظت از باطری است و از تخلیه‌ی بیش از حد آن جلوگیری می‌کند و همچنین نفس باطری را بهبود می‌بخشد، لذا کاربرد آن این اجازه را به می‌دهد که استراتژی‌های کنترل معقولی را برای ذخیره‌ی انرژی بکار ببریم. گرچه یک باطری منبع ذخیره‌سازی انرژی شیمیایی است، و مستقیماً این انرژی شیمیایی نمی‌تواند در دسترس باشد. این موضوع، تخمین از طریق پارامترSOC برای باتری های مختلف را می‌طلبد. تخمین دقیق حالت شارژ خیلی پیچیده است و به ابزارهای مختلفی نیاز دارد چون که مدل‌های باطری محدود هستند و خطای تخمین پارامتری وجود دارد. چندین مثال از دقت ناچیز و قابلیت اطمینان تخمین حالت شارژ وجود دارد که اکثرا برمبنای پارامتر SOC تعریف شده اند.

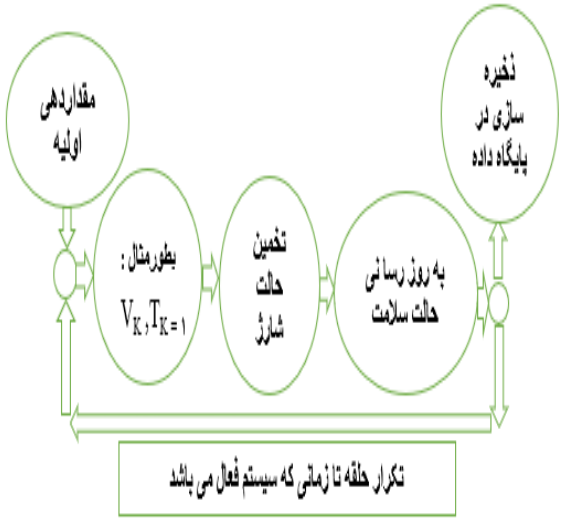
۳- شبیه‌سازی و بررسی نتایج

تعیین وضعیت شارژ یک موضوع مهم در مبحث باطری‌ها می‌باشد. این امر باعث کنترل مناسب پروسه شارژ باطری و کاهش خطراتی همچون گازدهی و اضافه ولتاژ می‌گردد. اضافه ولتاژ باطری سبب کاهش ظرفیت و کم شدن عمر باتری خواهد شد. راه‌های متفاوتی برای تعیین پارامترSOC وجود دارد که مطرح گردید. مشخصه‌های شارژ و دشارژ باطری‌های سربی اسیدی، رابطه بین پارامتر SOC و ولتاژ مدار باز باطری را مشخص می‌کند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که ولتاژ مدار باز باطری سربی اسیدی تابعی ازپارامتر SOC است. دانستن پارامتر SOC به کاربر این اجازه را می‌دهد که یک استفاده کارآمد با قابلیت اطمینان مناسب جهت مدیریت بهینه برای استفاده از باطری‌ها را داشته باشد.

همچنین با دانستن پارامتر SOC می‌توان از اضافه شارژ و یا اضافه دشارژ کردن باطری‌ها جلوگیری کرد و سبب افزایش عمر باطری‌ها شد. برای محاسبه یا تخمین پارامتر SOC تکنیک‌های مختلفی بیان شده است. به هر حال بسیاری از این روش‌ها نیاز به اندازه‌گیری‌های خیلی دقیق از عوامل شیمیایی و با شرایط عملکرد باطری دارند و تنها مناسب برای آزمایشگاه می‌باشد. در میان آن‌ها، ساده‌ترین روش، روش شمارش آمپر ساعت باطری است. دقت این روش، متکی بر دقت در کالیبراسیون قبل از شمارش است.

بدون کالیبراسیون مجدد، خطای انباشته شده اندازه‌گیری رفته، رفته زیاد شده و پس از مدتی شارژ و دشارژ نتیجه غیر قابل قبولی می‌دهد. یکی دیگر از روش‌های تعیین پارامتر SOC بر اساس مقدار ولتاژ ترمینال باطری می‌باشد.دراین روش نیز مشکلاتی مثل وابستگی ولتاژ ترمینال به نرخ جریان شارژ یا دشارژ وجود دارد. در شکل ۱ بلوک دیاگرام ساده‌ای برای الگوریتم سیستم مدیریت باطری(BMS)خودروی برقی ترسیم شده است، زمانیکه یک خودروی الکتریکی(EV) شروع به مصرف باطری می‌کند، الگوریتم نیز باید شروع به کارکندودینامیک قالب بریک سلول را مشخص کند.

اگر سطح دشارژ خود به خودی خیلی بالا باشد، سیستم مدیریت با کم کردن شرایط نقص و مشکل موجود و برطرف کردن آن، حالت سلامت باتری را مشخص می‌کند. به روز رسانی حالت شارژ با اندازه گیری زمان، ولتاژ، دما و جریان مشخص می‌شود، تخمین حالت شارژ باطری سلول باید بر اساس به روز رسانی این متغیرها انجام شود. و همچنین این الگوریتم موظف است که ظرفیت باطری و همه‌ی پارامترهای دیگری که در طول عمر باطری تأثیر دارند را مشخص کند و در تعیین حالت سلامت باتری عملکرد مناسب و موثری داشته باشد.



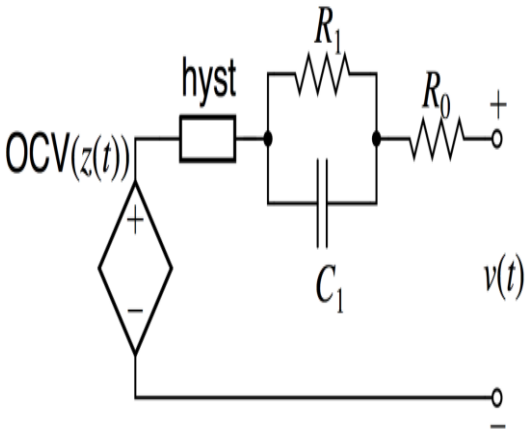
شکل(۱)
بلوک دیاگرام الگوریتم سیستم مدیریت باطری خودروی الکتریکی.

مدل‌سازی عملکردتابعSOC-OCV هنگام کنترل پارامتر SOH باطری نیز ضروری است، زیرا غالباً اطلاعات OCV طول عمر باطری و تجزیه وتحلیل عملکرد آن را منعکس می‌کند همچنین از مدلESC برای مدل‌سازی باطری یا سلول استفاده می‌شودکه مدل شامل پارامترهای عملی مانند دما و اثر هیسترزیس است. برای تشکیل چنین داده‌هایی به آزمایش‌های عملی نیاز است که از گروه مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کلرادو تحت یک دوره آموزشی پیشرفته از سایت[1] گرفته شده است.

باطری مدل شده متعلق به یک خودروی الکتریکی[2] و با تعداد ۱۰ عدد باطری $LiFePO_4$ هرکدام با ظرفیت ۱۰ آمپرساعت می‌باشد. فرض برآن است که تمامی این باطری‌ها شرایط یکسانی دارند بنابراین با مدل

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

سازی هر کدام سطح شارژ و وضعیت سلامت مجموعه باطری‌ها تخمین زده خواهد شد. مدل معادل سلول شامل چهار عنصر است: ولتاژ مدار باز به عنوان تابعی از پارامترSOC، مقاومت هیسترزیس شامل مقاومت‌های اتلافی، ولتاژهای پسماند (شامل یک یا چند مدار موازی RC برای ایجاد یک مدل باطری دقیق)



شکل(۲)

مدل باطری OCV به عنوان تابعی از پارامترSOC که به مدلESC یاد می‌شود.

معادله حالت طبق رابطه ۵ برابر است با:

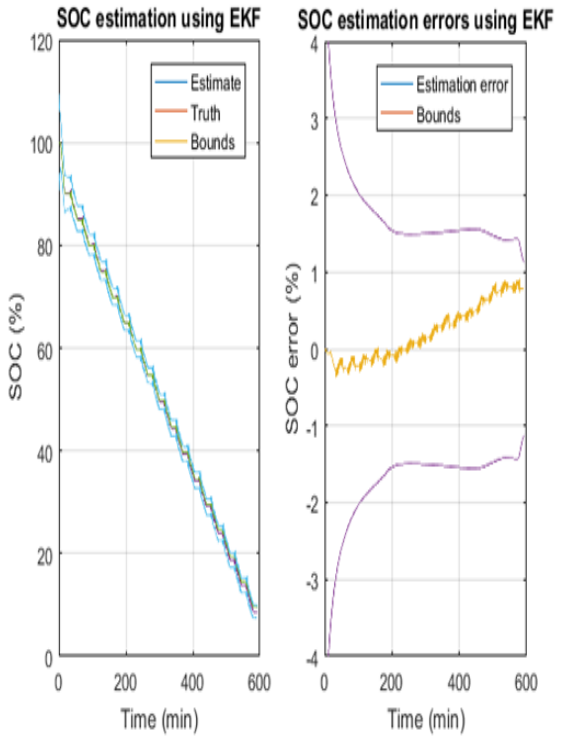
$$\begin{bmatrix} i_{R_1.k+1} \\ h_{k+1} \\ z_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{RC'} & 0 & 0 \\ 0 & A_{H.k} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{R_1.k} \\ h_k \\ z_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{RC'} & 0 \\ 0 & (A_{H.k}-1) \\ -\frac{\Delta t}{Q} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_k + w_k \\ sgn(i_k + w_k) \end{bmatrix} \quad (۵)$$

که در آن i_{R1} جریان عبوری از مقاومت $R1$ است، h ولتاژ پسماند یا هیسترزیس، z معادل وضعیت شارژ، A_{RC} و B_{RC} معادل زمانی مدار موازی RC، $A_{H.k}$ یک ثابت نمایی و Q به ظرفیت سلول اشاره دارد. Δt یک ثابت زمانی است و i به جریان ولتاژ پایانه (یعنی جریانی که به داخل یا خارج از سلول باطری می‌گذرد) اشاره دارد. معادله خروجی $v(t)$ را می‌توان به صورت رابطه ۶ ساده کرد:

$$y_k = OCV(z_k.T_k) + M_0 s_k + M h_k - R_1 i_{R1.k} - R_0 i_k \quad (۶)$$

اینجا $OCV(z_k.T_k)$ ولتاژ مدار باز را به SOC و دما مرتبط می کند، دو عنصر بعدی به پارامترهای هیسترزیس درلحظه و متغیر SOC و دو عنصر آخر عبارت‌اند از ولتاژ پسماند و ولتاژ قطبش خطی. در مرحله بعد، دو نوع تست باطری انجام می‌شود. آزمایش اول رابطه بین پارامترهای OCV و SOC را پیدا می‌کند و مرحله دوم پارامترهای زمانی که سیستم‌های خطی درنظر گرفته می‌شوند، می‌توان از فیلتر کالمن برای تخمین استفاده کرد،امابرای سیستم‌های غیرخطی غیرعملی است، بنابراین ازفیلترکالمن توسعه یافته (EKF) استفاده گردید.

روشEKF درحالیکه معادلات استنتاجی را با یک سیستم غیر خطی تطبیق می‌دهد، هنگام محاسبه برآوردهای کوواریانس، از بسط تیلورجهت خطی خطی کردن معادلات سیستم حول نقطه کار استفاده می‌کند. باتوجه به شکل ۳، این روش توانست پارامتر SOC را با حداکثر میانگین خطای ۰/۸۷ درصد و انحراف استاندارد ۰/۶۴ درصد بطور دقیق پیش‌بینی کند. در اینجا فرض برآن است که خودروی الکتریکی در حال کار ۱۰ ساعت کاملاً بصورت برقی و با باطری کار می‌کند.



شکل(۳)

نتایج شبیه سازی پارامترSOC و محدوده خطا.

در شکل ۳، نتایج شبیه‌سازی پارامتر SOC اندازه‌گیری‌شده به رنگ قرمز، خروجی پارامترSOC تخمینی ازروش EKF به رنگ آبی و محدوده‌های کمینه و بیشینه حالت شارژ به رنگ بنفش نشان داده شده است. با این اوصاف با ۱۰ ساعت کارکرد خودروی الکتریکی باطری کاملاً خالی خواهد شد و با افزایش یافتن عمق دشارژ باطری (DOD)[1] خطای تخمین به دلیل افزایش تلفات در خودرو و کاهش توان باطری، افزایش می‌یابد. عبور از باند تعریف شده به معنای آسیب به باطری و کاهش عمر آن در آینده می‌باشد.

مرزهای خطای تخمین در شکل ۳ با توجه به رابطه ۷ بدست می‌آید.

$$\hat{x}^+_{k.Error\ Bounds} = \hat{x}^+_k \pm 3\sqrt{diag(\Sigma^+_{\hat{x}.k})} \quad (۷)$$

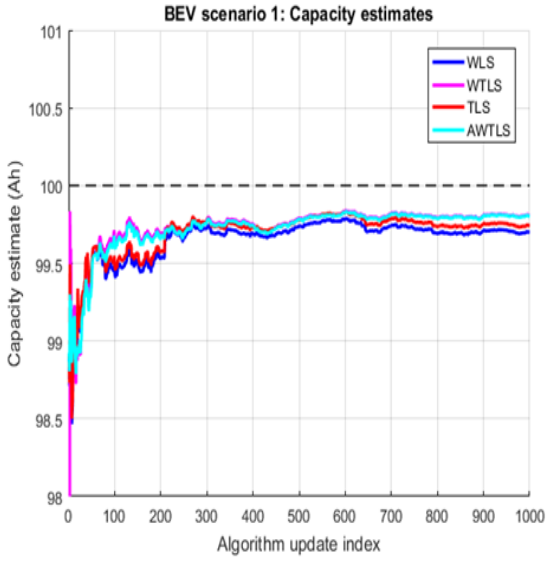
با توجه به بلوک دیاگرام شکل۱، هم اکنون پس از تخمین وضعیت شارژ سیستم مدیریت باطری(BMS) باید وضعیت سلامت باطری خودرو را

1- Depth Of Discharge

Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 4- Winter 2024
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

تخمین بزند. درواقع پس از تخمین حالت شارژ باطری، ظرفیت کل به عنوان پارامتری که وضعیت سلامت باطری را نشان می دهد استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی را می‌توان برای تخمین ظرفیت کل استفاده کرد زیرا نمی‌توانیم مستقیماً آن را اندازه‌گیری کرد. در هر بار تخمین پارامترهای الگوریتم بروز می‌شوند.

روش حداقل مربع وزنی WLS[1] تعمیم حداقل مربعات معمولی و رگرسیون خطی است که در آن دانش واریانس رگرسیون گنجانده شده است، روش WLS فقط یک خطای اندازه‌گیری را درنظر می‌گیرد، منتها دو خطا وجود دارد یکی خطای فرآیند و دیگری خطای اندازه‌گیری. روش حداقل مربعات کامل TLS[2] هر دو خطا رادر نظر می گیرد (فرایند + خطاهای اندازه گیری) ونیز تمام پارامترهای اندازه‌گیری را در محاسبات درنظر می‌گیرد که سبب افزایش بسیار زیاد حافظه می‌شود. باید درنظرداشت که روش حداقل مربعات کامل وزنی WTLS[3]تمام معایب TLS در محاسبات را ازنظر ازدیاد برطرف می‌کند، اما به توان محاسباتی بیش از حد نیاز دارد.



شکل(۴)

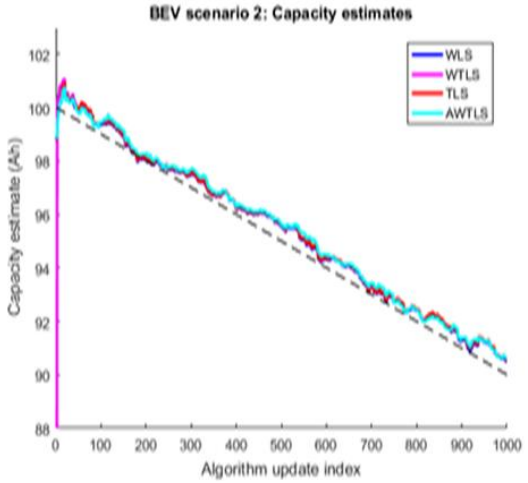
نتایج تخمین حالت سلامت باطری خودروی برقی(EV) در حالت شارژ.

خطا	WLS	WTLS	TLS	AWTLS
RMS%	0.3775	0.6633	0.3396	0.3199

جدول (۱)

نتایج حاصل شده ازمنحنی شکل ۴

در نهایت، روش میانگین حداقل مربعات کامل وزنی AWLS[4]را می‌توان دارای مزایای همه این روش‌ها می باشد و با کمترین خطا در سیستم مدیریت باطری می توان استفاده کرد. نتیجه مطلوب زمانی حاصل می‌شود که ظرفیت کل در طول زمان ثابت باشد.



شکل(۵)

نتایج خطای تخمین حالت سلامت باطری خودروی برقی(EV) درحالت دشارژ.

خطا	WLS	WTLS	TLS	AWTLS
RMS%	0.4599	0.9993	0.5010	0.5273

جدول (۲)

نتایج حاصل ازمنحنی شکل ۵

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی و اهمیت خودروهای الکتریکی و دلیل روی آوردن کشورها به آن پرداخته شد. سپس ساختار و ویژگی های باطری‌های مورد استفاده در آن مطرح گردید و مقایسه جامعی از انواع باطری‌های مورد استفاده در خودروهای الکتریکی و روش‌های شارژ آن‌ها در سیستم مدیریت باطری(BMS)مطرح گردید.

باطری لیتیوم یون به دلیل ظرفیت تولید توان بالا، چرخه عمر طولانی و چگالی انرژی بالا برای عملکرد بهتر در خودروهای الکتریکی توصیه گردید. این پژوهش همچنین مکانیزم و پیکربندی باطری لیتیوم یونی را توصیف کرد و اهمیت استفاده از سیستم مدیریت باطری برای دستیابی به عملکرد مطمئن و ایمن را متذکرشد.

توابع و ماژول‌های مربوط به سخت افزار و نرم افزار سیستم مدیریت باطری بطور مختصر عنوان گردید. در انتها وضعیت شارژ و سلامت باطری در سیستم موردنظر تحت بررسی قرارگرفت که انواع متدها و روش‌های مختلف مطرح گردید.لذا بمنظور تخمین پارامترSOC یک مدل فضای- حالت از دینامیک سلول مورد نیاز بود. بنابراین، تخمین‌گر قدرتمند EKF قادر به تخمین پارامتر SOC می‌باشد، و آنچه که باقی می‌ماند یافتن یک تابع مدل سلولی خوب و شناسایی پارامترهای این مدل بود، پارامترهای مدل با استفاده از روش شناسایی سیستم که معادلات آن آورده شده تعیین می‌شوند. همچنین تخمین پارامترSOH یک نیاز ضروری است،که شامل تحلیل ظرفیت، افت انرژی و تخلیه انرژی باطری است و این امکان را به ما می دهد که قادر به تنظیم پارامترهای اساسی درجهت تعیین طول عمر سلول باشیم.

1- Weighted least square
2- Total least square
3- Weighted Total Least Square
4- Averaged weighted least square

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 4- Winter 2024

مراجع

[1] EA. Energy Technology Perspectives--scenarios and strategies to 2050. International Energy Agency. 2006;25-33.

[2] Hannan MA, Azidin FA, Mohamed A. Hybrid electric vehicles and their challenges: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews.2014 ;29:135-150.

[3] Wang Y, Chen Z, Zhang C. On-line remaining energy prediction: A case study in embedded battery management system. Applied Energy. 2017; 194:688- 695.

[4] Cheng KWE, Divakar BP, Wu H, Ding K, Ho HF. Battery Management System (BMS) and SOC development for electrical vehicles. IEEE Transactions on Vehicular Technology.2011;60(1):76-88.

[5] Li J, Tan F, Zhang C, Sun F. Capacity fade diagnosis of Lithiumion battery pack in electric vehicle base on fuzzy neural network. Energy Procedia. 2014; 61:2066-2070.

[6] Gua Y, Zhao Z, Huang L. SoC estimation of Lithium battery based on improved BP neural network. Energy Procedia. 2017; 105:4153-4158.

[7] Chaoui H, Ibe-Ekeocha CC. State of charge and state of health estimation for lithium batteries using recurrent neural networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology.2017.66(10):8773-8783.

[8] Ismail M, Dlyma R, Elrakaybi A, Ahmed R, Habibi S. Battery state of charge estimation using an Artificial Neural Network. 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Piscataway: IEEE; 2017.

[9] Liu F, Liu T, Fu Y. An improved SoC estimation algorithm based on artificial neural network. 2015 8th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). Piscataway: IEEE; 2015.

[10] Sarvi M, Safari M. Fuzzy, ANFIS and ICA trained neural network modeling of Ni-Cd batteries using experimental data. World Applied Programming. 2013;3(3):93-100.

[11] Jiani D, Zhitao L, Youyi W, Changyun W. A fuzzy logicbased model for Li-ion battery with SOC and temperature effect. 11th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA). Piscataway: IEEE; 2014.

[12] Shahriari M, Farrokhi M. State-of-charge estimation of VRLA batteries using neural networks and extended kalman filter. IFAC
Proceedings Volumes. 2010;43(22):52-56.

[13] Tong S, Lacap JH, Park JW. Battery state of charge estimation using a load-classifying neural net work. 243.

[14] Hussein AA. Capacity fade estimation in electric vehicle Li-ion batteries using artificial neural networks. IEEE Transactions on Industry Applications. 2015;51(3):2321-2330.

[15] Li IH, Wang WY, Su SF, Lee YS. A merged fuzzy neural network and its applications in battery state-of-charge estimation. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2007;22(3):697-708.

[16] Gholizade-Narm H, Charkhgard M. Lithium-ion battery state of charge estimation based on square-root unscented Kalman filter. IET Power Electronics. 2013;6(9):1833-1841.

[17] Charkhgard M, Farroukhi M. State-of-charge estimation for Lithium-ion batteries using neural networks and EKF. IEEE Transactions on Industrial Electronics.2010;57(12):4178-4187.

[18] He Z, Chen D, Pan C, Chen L, Wang S. State of charge estimation of power Li-ion batteries using a hybrid estimation algorithm based on UKF. Electrochimica Acta.2016; 211:101-109.

[19] Anand I, Mathur BL. State of charge estimation of lead acid batteries using neural network. 2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT). Piscataway: IEEE; 2013.

[20] B. Dunn, H. Kamath, J. M. Tarascon, Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices, Science, Vol. 6058, pp. 928-935, 2011.

[21] M. Bruning and E. Di Nardo, "The State of ChargeEstimating Methods for BatteryA Review" Department of Electrical Engineering St. John University pp. 2-3

[22] C. Weng, Y.C u i. J. Sun, H. Peng On-board state of health monitoring of lithiumion batteries using incremental capacity analysis with support vector regression, J. Power Sources, Vol. 235, pp. 36-44, 2013.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

رزومه

۱- سید سعید عبدالهی خو



درتهران متولد شده است (۱۳۵۵). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت در دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب(۱۳۸۲)، کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت در دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب (۱۳۹۷) سپری کرده است و اکنون دانشجوی مقطع دکتری مهندسی برق– قدرت دردانشگاه آزاد واحد تهران جنوب (۱۳۹۹) می باشد. فعالیتهای پژوهشی و علاقه مندی ایشان در زمینه بهره برداری از سیستمهای قدرت با حضور خودروهای الکتریکی است.

۲- جواد علمائی



تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت دردانشگاه تبریز،کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت در دانشگاه امیرکبیرو دکتری برق- قدرت را در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات سپری کرده است و عضو هیات علمی دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب می باشند. فعالیتهای پژوهشی ایشان در زمینه بهره برداری از سیستمهای قدرت و موارد متعدد دیگر می باشد.

۳- سید محمد حسن حسینی



ایشان دارای مدرک دکتری برق -قدرت می باشند و درحال حاضر استاد تمام وعضو هیات علمی دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب هستند. بخشی اززمینه فعالیتهای پژوهشی ایشان پیرامون فن آوری عایق ها و فشار قوی و حالتهای گذرا در سیستم قدرت و دیگر موضوعات مرتبط با آنها می باشد.

Journal of Novel Researches on Smart Power Systems - Vol. 12 - No. 4- Winter 2024

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

State of charge and battery health estimation by the developed EKF method for RC model in electric vehicle battery management system

S. Saeed Abdollahi khou[1], Javad Olamaee [*2], S. Mohammad Hassan Hosseini[3]

1-PhD student, Department of Power Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic AzadUniversity, Tehran, Iran. (St_s_abdollahikhou@azad.ac.ir)
2-Professor, Department of Power Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. (J_olamaei@azad.ac.ir)
3-Professor, Department of Power Electrical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. (smh_hosseini@azad.ac.ir)

Abstract--accurate estimation of the state of charge of a battery not only for optimal energy management (OEM) in electric vehicles (EVs) and smart power grids, but also necessary to protect the battery from going into deep discharge or overcharge conditions and thus reducing battery life. These conditions may even create potentially dangerous conditions in terms of battery explosion. Despite the great importance of the state of charge parameter, this parameter cannot be measured directly from the battery terminals. Among many functions, the battery management system (BMS) needs a method to estimate the state of charge and determine the health status of the electric vehicle battery. In this research, first, the electric equivalent circuit model is simulated in MATLAB environment with RC network. This model has the advantage of providing a quick test to extract the parameters and dynamic characteristics of the battery model. Using the extended Kalman filter (EKF) to estimate the state of charge and several methods to estimate the state of health of the battery of the considered electric vehicle, it has been investigated and the simulation results have been shown.

Keywords: lithiumion battery, battery charging mode, battery health mode, battery management system, electric vehicle

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]