



معرفی روشی نوین برای مدیریت باتری های لیتیومی در فرآیندهای شارژ-دشارژ سریع به کمک کنترل پیش بین

میلاذ عدل، امیرتقوی پور*، فرشاد ترابی

دانشکده مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰
بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۸
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۵/۱۷

کلمات کلیدی:

باتری های لیتیومی، سیستم مدیریت حرارتی
سیستم مدیریت الکتریکی
کنترل پیش بین
فیلتر های کالمن

خلاصه: باتری های لیتیومی باید پیوسته توسط سیستم مدیریت باتری نظارت شوند تا از مشکلات ایمنی همچون گریز حرارتی جلوگیری شود. اکثر روش های مدیریت حرارتی بر اساس طراحی سیستم خنک کاری مطلوب هستند. از سوی دیگر، به دلیل اینکه دمای سطح باتری با سنسور قابل اندازه گیری است، معیار مدیریت حرارتی دمای سطح سلول است. این در حالی است که دمای داخل باتری می تواند در شارژ و دشارژ سریع، بالاتر بوده و سیستم خنک کاری به تنهایی قادر به کنترل دما نباشد. در این مقاله تلاش شده است که مدیریت حرارتی باتری را با سیستم مدیریت الکتریکی باتری ادغام کرد و معیار مدیریت حرارتی، دمای داخل سلول قرار گیرد. برای دستیابی به این هدف، از کنترل پیش بین برای کنترل جریان اعمالی یا کشیده شده از باتری و از فیلتر کالمن غیرخطی برای تخمین متغیرهای مدل الکتریکی-حرارتی تجربی استفاده شده است. نتایج تجربی و شبیه سازی نشان می دهد که استفاده از کنترل پیش بین و تخمینگرهای غیر خطی کالمن می تواند روشی هوشمند و نوین برای مدیریت همزمان متغیرهای الکتریکی و حرارتی سلول های لیتیومی در فرآیندهای شارژ-دشارژ سریع باشد. همچنین انتظار می رود که در روش معرفی شده، با مدیریت متغیرهای سلول در فرآیندهای شارژ و دشارژ سریع، ایمنی و طول عمر سلول افزایش یابد.

۱- مقدمه

قابل توجه در سلول خواهد شد که ممکن است ایمنی آن را به مخاطره بیندازد. در صورتی که دمای باتری از دمای آستانه (معمولاً ۱۱۰-۱۲۰) فراتر رود حرارت تولیدی در سلول غیرقابل کنترل خواهد شد که می تواند نقطه ای برای شروع گریز حرارتی سلول باشد [۳]. مسئله مدیریت حرارتی در فرآیندهای شارژ-دشارژ سریع برای سلول های استوانه ای می تواند دشوارتر باشد به طوری که در برخی از پژوهش ها اختلاف دمای داخل و دمای سطح سلول فراتر از ۱۰ درجه سانتی گراد گزارش شده است [۴، ۵]. دمای بالاتر از ۵۰ درجه سانتی گراد می تواند سبب کاهش زود هنگام توان و ظرفیت سلول با تسریع سازوکار پیر شدن سلول شود. بنابراین علاوه بر مشکلات ایمنی، برای استفاده طولانی مدت باتری و کاهش سازوکارهای پیر شدن آن، سلول باید در یک بازه دمایی محدود مدیریت شود [۶]. این بازه معمولاً برای باتری های لیتیومی کنونی برای شارژ بین ۰ تا ۵۰ درجه سانتی گراد می باشد [۷]. در سال های اخیر تلاش شده است که سیستم مدیریت حرارتی مطلوب برای سلول و بسته باتری طراحی شود. برخی از محققین تمرکز خود را بر طراحی بهتر سیستم مدیریت حرارتی و بهبود دفع حرارت از سلول ها قرار دادند. به همین

امروزه با مقررات سخت گیرانه تر بر کاهش آلاینده گی، خودرو های الکتریکی و هیبریدی سریع تر از هر زمان دیگری در حال افزایش می باشند [۱]. یکی از قسمت های کلیدی این خودرو ها بسته باتری است که انرژی الکتریکی را ذخیره و در هنگام مورد نیاز به موتور های الکتریکی انتقال می دهد. در میان انواع باتری ها، باتری های لیتیومی به دلیل چگالی انرژی و توان بالا، قابلیت شارژ و طول عمر مناسب مورد توجه بسیاری از محققین و صنایع گوناگون قرار گرفته اند. جهت جایگزینی خودرو های موتور احتراق داخلی با خودرو های الکتریکی، باید مشکلات و کاستی های موجود از جمله در باتری های لیتیومی کاهش یابد. یکی از دلایل اصلی در عدم استقبال از خودرو های الکتریکی زمان شارژ سلول ها می باشد. در نتیجه، لازم است که باتری ها با جریان بالا و در مدت زمان کم شارژ شوند. اما شارژ سریع می تواند سبب افزایش سازوکار پیر شدن سلول شود و ظرفیت و توان سلول ها را کاهش دهد. علاوه بر این جریان بالا در شارژ یا دشارژ منجر به تولید حرارت

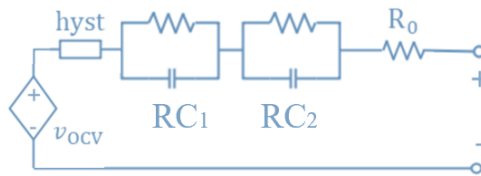
* نویسنده عهده دار مکاتبات: moaven@um.ac.ir

این نوسانات از افق پیش بینی بزرگی باید استفاده کرد که حجم محاسبات بالایی را در پی خواهد داشت. علاوه بر این، در کنترلر ارائه شده مدیریت حرارتی تنها در فرآیند شارژ میسر است. درحالی که برای اطمینان از وضعیت مطلوب حرارتی سلول لازم است که در فرآیند دشارژ نیز سلول مدیریت شود. فلورنتینو برای مدیریت الکتریکی سلول‌ها و مبدل‌های DC-DC از کنترلر پیش بین استفاده کرد [۱۲]. نتایج او نشان داد که علاوه بر مدیریت متغیرهای سلول‌هایی که به صورت سری به یک دیگر متصل شده‌اند می‌توان محدودیت‌های فیزیکی مبدل‌های الکتریکی به کار گرفته شده برای بالانس سلول‌ها را نیز در طراحی کنترلر پیش بین در نظر گرفت. با توجه به توانایی کنترلر پیش بین در کنترل متغیرهای سلول در فرآیند شارژ سریع در برخی از تحقیقات اخیر از مدل‌های الکتروشیمیایی پیچیده و بهینه‌سازی‌های غیرخطی نیز استفاده شده است [۱۳]. هر چند که به دلیل پیچیدگی و حجم محاسباتی بالا، استفاده از روش‌های توصیه شده در این پژوهش‌ها برای بکارگیری در یک سیستم مدیریتی کاربردی دشوار می‌باشد. به همین دلیل اخیراً برای استفاده از مدل‌های الکتروشیمیایی در ساختار کنترلر از مدل‌های مرتبه کاهش یافته نیز جهت شارژ سلول استفاده شده است [۱۴]. در سال‌های اخیر علاوه بر مدیریت در فرآیند شارژ، از کنترلر برای تخمین توان لحظه‌ای سلول نیز استفاده شده است. استفاده از این روش برای تخمین توان سلول در کنار محدودیت‌های فیزیکی آن می‌تواند سیستم مدیریتی باتری را از حداکثر توان شارژ و دشارژ سلول در هر گام زمانی مطلع کند [۱۵]. بنابراین کنترلر پیش بین می‌تواند گزینه مناسبی برای مدیریت متغیرهای درونی سلول باشد. اما در کنار طراحی کنترلر لازم است که تخمین‌گر مناسبی نیز برای تخمین متغیرهای سلول طراحی شود. چرا که تنها ولتاژ، جریان و دمای سطح سلول قابل اندازه‌گیری هستند و متغیرهای دیگر مانند حالت شارژ و دمای داخل سلول به طور مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شوند. یکی از تخمین‌گرهای پرکاربرد برای تخمین حالت شارژ سلول، فیلترهای کالمن هستند که با تخمین قبلی و اندازه‌گیری کنونی ولتاژ می‌توانند حالت شارژ سلول را در گام کنونی تخمین بزنند [۱۶، ۱۷]. نتایج پلت نشان داد که فیلترهای کالمن غیرخطی به خوبی می‌توانند متغیرهای الکتریکی سلول را تخمین بزنند [۱۷]. علاوه بر متغیرهای الکتریکی به دلیل اهمیت دمای داخل در مدیریت حرارتی سلول‌های استوانه‌ای در برخی از پژوهش‌ها از فیلترهای کالمن برای تخمین دمای داخل سلول استفاده شده است. به طور مثال ما و همکاران با استفاده از یک مدل حرارتی ساده و اندازه‌گیری دمای سطح سلول، دمای داخل یک سلول دلخواه در یک رشته را

خاطر استراتژی‌های مختلفی برای خنک کاری سلول مانند هوا خنک [۸]، آب خنک، مواد تغییر فاز دهنده [۹] و... توسعه داده شده است. اما گروهی دیگر از محققین مسئله سیستم مدیریت حرارتی را از دیدگاه کنترلی بررسی کرده‌اند و آن را بخشی از سیستم مدیریت باتری^۱ در نظر گرفته‌اند. چرا که دمای سطح و داخل سلول نیز مانند ولتاژ، جریان و حالت شارژ نیاز به مدیریت دارند. به طور مثال در این دیدگاه سیستم مدیریت باتری باید در شارژ متغیرهای الکتریکی-حرارتی سلول را نظارت کند و در صورت لزوم جریان اعمالی به باتری را مدیریت کند تا ولتاژ، حالت شارژ و دمای آن بیش از حد مجاز افزایش یا کاهش نیابد و در صورت نیاز کاربر را از شرایط سلول مطلع سازد. تا به امروز پروتکل‌های مختلفی برای شارژ سلول‌های لیتیومی توسعه داده شده است. یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها پروتکل جریان ثابت-ولتاژ ثابت^۲ است. علی‌رغم موفقیت آن در شارژ، پروتکل محدودیت‌های دمایی سلول را در نظر نمی‌گیرد در حالی که در شارژ یا دشارژ سریع دمای سطح و داخل سلول افزایش می‌یابد. همان‌طور که اشاره شد برای سلول‌های استوانه‌ای، دمای داخل سلول می‌تواند بالاتر از دمای سطح سلول باشد. به همین خاطر برای شارژ سریع و مدیریت در فرآیند دشارژ می‌توان دمای داخل سلول را نیز در کنار سایر متغیرها با استفاده از استراتژی‌های کنترلی مدیریت کرد تا از پیر شدن زود هنگام سلول در حد امکان جلوگیری کرد. در ادامه به برخی از استراتژی‌های کنترلی که می‌توانند در دستیابی به هدف مدیریت همزمان متغیرهای الکتریکی و حرارتی کمک کنند پرداخته می‌شود.

یکی از روش‌های نوین برای مدیریت مدل محور سلول‌ها استفاده از کنترلرهای پیش‌بین^۳ می‌باشد که می‌توانند سلول را با محدودیت‌های فیزیکی شارژ کنند. خاویر برای اولین بار از کنترلر پیش بین خطی برای شارژ سریع سلول با محدودیت‌های الکتریکی استفاده کرد. نتایج او نشان داد که در حضور قیود الکتریکی ولتاژ سلول و جریان اعمالی به آن رفتاری مشابه با پروتکل جریان ثابت-ولتاژ ثابت خواهد داشت [۱۰]. لیو و همکاران برای شارژ سریع در حضور محدودیت‌های دمایی از کنترلر پیش‌بین عمومی^۴ استفاده کردند [۱۱]. نتایج نشان داد که در ابعاد تک سلولی می‌توان سلول را با محدودیت دمایی سریع شارژ کرد. اما ولتاژ و جریان سلول در این روش در پنجره‌های پیش‌بینی کوچک نوسانی است و برای کاهش

- 1 Battery Management system
- 2 Constant Current Constant Voltage
- 3 Model Predictive Control
- 4 Generalized predictive control



شکل ۱. مدار معادل پیشنهاد شده برای مدل سازی سلول

Fig. 1. The proposed equivalent circuit model of the cell

۲-۱- مدل الکتریکی

در مجموع می‌توان مدل الکتریکی باتری را به دو دسته مدل های مبتنی بر فیزیک^۱ و مدل های مدار معادلی^۲ تقسیم نمود [۱۹]. مدل های مدار معادلی با استفاده از عناصر الکتریکی مانند خازن، مقاومت رفتار الکتریکی باتری را توصیف می‌کنند. از مدل های مدار معادل معمولاً به عنوان مدل سازی تجربی یاد می‌شود چرا که برای یافتن پارامتر های عناصر الکتریکی نیاز به شناسایی سیستم و یافتن این پارامتر ها وجود دارد. به دلیل سادگی و حجم محاسباتی کم، این مدلسازی می‌تواند برای ابعاد ماژولار و بسته باتری مناسب باشد. هر چند که برخلاف مدل های فیزیکی مدل های مدار معادل توصیف دقیقی از آنچه در داخل باتری رخ می‌دهد ارائه نمی‌کنند و برای درک بهتر سازوکار پیر شدن باتری مدل های الکتروشیمیایی مناسب تر هستند [۲۰]. اما به دلیل وجود پارامتر های متعدد نامعلوم شناسایی آن‌ها دشوارتر خواهد بود. در این مقاله از مدل مدار معادل برای توصیف رفتار الکتریکی سلول به دلیل حجم محاسباتی کمتر استفاده می‌شود. ذکر این نکته لازم است که معادلات الکتریکی که در این پژوهش از آن استفاده شده است برگرفته از مرجع [۱۹] می‌باشد. شکل (۱) مدار معادل در نظر گرفته شده برای مدلسازی الکتریکی سلول را نمایش می‌دهد که در ادامه این بخش به معرفی معادلات مربوط به هر کدام از عناصر موجود در شکل ۱ پرداخته می‌شود.

به طور کلی در مدلسازی مدار معادلی دو خروجی مهم حالت شارژ و ولتاژ مدل می‌شوند. یکی از روش های ساده برای محاسبه شارژ سلول استفاده از معادله کولمبیک است. رابطه (۱) معادله زمان گسسته حالت شارژ

به کمک فیلتر کالمن تخمین زده اند [۱۸]. هر چند در این پژوهش تخمین همزمان متغیر های الکتریکی و حرارتی صورت نگرفته است.

بنابراین اهداف این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- دستیابی به مدل کنترل محور الکتریکی و حرارتی تجربی برای یک سلول لیتیوم آهن فسفات استوانه‌ای ۳۸۱۲۰ که در کنار دقت مطلوب، حجم محاسباتی پایینی داشته باشد.

۲- طراحی تخمین‌گر که توانایی تخمین همزمان متغیر های الکتریکی و حرارتی را داشته باشد.

۳- طراحی کنترلر مدل محور برای مدیریت همزمان متغیر های الکتریکی-حرارتی سلول در هنگام شارژ سریع

۴- تعمیم کنترلر به فرآیند های دشارژ و شارژ-دشارژ سریع

در ادامه این مقاله، ابتدا در بخش ۲ معادلات مدل الکتریکی-حرارتی سلول شرح داده شده است. در بخش ۳ نتایج شناسایی پارامتر های الکتریکی-حرارتی سلول برای مدل تجربی سلول بررسی شده است. در بخش ۴ تخمین‌گر مناسب برای تخمین متغیر های سلول طراحی شده است. در بخش ۵ و ۶ به ترتیب کنترل پیش بین برای مدیریت سلول طراحی و شبیه سازی شده است. بخش ۷ نیز با نتیجه گیری نهایی از مدیریت الکتریکی-حرارتی در ابعاد تک سلولی، مقاله خاتمه می‌یابد.

۲- مدلسازی سلول

در این بخش به مدلسازی الکتریکی و حرارتی سلول و معادلات آن‌ها پرداخته می‌شود. همچنین در بخش (۲-۴) معادله فضای حالت سلول معرفی می‌شود که در کاربرد های کنترلی و تخمینی از آن استفاده می‌شود.

1 Physics based models

2 Equivalent circuit models

سلول را نشان می‌دهد.

طبق شکل ۱ برای توصیف این پدیده در سلول از مقاومت ها و خازن هایی که به صورت موازی به یک دیگر متصل شده اند استفاده می‌شود. شایان ذکر است که تعداد RC های استفاده شده وابسته به دقت مدل سازی و حجم محاسباتی انتخاب می‌شود. در این پژوهش برای توصیف بهتر این پدیده از دو RC استفاده شده است. α_e و β_e تنها جهت نمایش فشرده تر ضرایب متغیر جریان دیفیوژن در هنگام استخراج معادله فضای حالت سلول در بخش (۳-۲) استفاده شده است.

معادلات (۴) و (۵) پلاریزیشن هیستریزس باتری را توصیف می‌کنند. هیستریزس باتری به دو قسمت آنی و دینامیک تقسیم شده است. M_0 و M به ترتیب ماکسیمم هیستریزس دینامیک و آنی هستند، γ هم ضریب میرایی هیستریزس را نشان می‌دهد [۱۹].

$$A_h = e^{-\left(\frac{\eta i_k \gamma \Delta t}{Q_c}\right)} \quad (4)$$

$$h_{k+1} = A_h h_k - (1 - A_h) \text{sign}(i_k) \quad (5)$$

۲-۲- مدل حرارتی

برای توصیف رفتار حرارتی از مدل دو متغیره مرجع [۴] استفاده شده است که با استفاده از قانون بقای انرژی، می‌توان معادلات زمان گسسته برای دمای سطح و داخل سلول را استخراج کرد. شکل ۲ شماتیکی از نحوه مدل حرارتی دو متغیره سلول را نشان می‌دهد. باتوجه به شکل مانند مدل الکتریکی توصیف شده در بخش (۱-۲) در مدل حرارتی دو متغیره نیز از مقاومت و خازن برای توصیف رفتار حرارتی سلول استفاده شده است.

در مجموع مدل حرارتی سلول شامل دو معادله دمای سطح و داخل سلول می‌باشد. این معادلات از طریق حرارت تولیدی در سلول به معادلات الکتریکی سلول کوپل می‌شوند. معادله (۶) دمای سطح سلول را پیش بینی می‌کند که در آن T_c ، T_s و T_f به ترتیب دمای داخل، دمای سطح و دمای سیال خنک کاری هستند. در معادله (۷) دمای داخل سلول محاسبه می‌شود که Q_{gen} حرارت تولیدی در باتری را نمایش می‌دهد که خود توسط معادله (۸) محاسبه می‌شود. همچنین طبق شکل ۲ در این مدل سازی ظرفیت گرمایی سلول به دو قسمت ظرفیت گرمایی داخلی و پوسته سلول تقسیم می‌شود که به ترتیب با CC و CS در معادلات (۶) و (۷) نمایش داده

$$z_{k+1} = z_k - \frac{\eta \Delta t i_k}{Q_c} \quad (1)$$

η و Q_c به ترتیب بازده کولمبیک و ظرفیت باتری بر حسب آمپر ساعت می‌باشد. برای محاسبه بازده کولمبیک سلول از رابطه آمپر ساعت دشارژ شده در طول تست / آمپر ساعت شارژ شده در طول تست استفاده می‌شود که مقادیر ظرفیت شارژ و دشارژ سلول را می‌توان در تست های تجربی و به کمک تستر باتری استخراج کرد. i_k جریان اعمالی یا کشیده شده از سلول در گام زمانی کنونی و Δt نیز زمان نمونه برداری هستند. بنابراین با در اختیار داشتن حالت شارژ سلول در گام زمانی کنونی z_k و جریان الکتریکی می‌توان حالت شارژ سلول را در یک گام زمانی آینده پیش بینی کرد. عبارت col تنها جهت فشرده تر نوشتن روابط در هنگام استخراج معادلات فضای حالت تعریف شده است.

$$V_k = ocv - R_0 i_k - R_r i_{r,k} + M h_k + M_0 \text{sign}(i_k) \quad (2)$$

خروجی مهم دیگر در مدل، ولتاژ سلول می‌باشد. باتوجه به شکل ۱ برای مدلسازی ولتاژ سلول لازم است از عناصر الکتریکی و اتصالات سری و موازی این عناصر استفاده شود تا بتوان ولتاژ سلول را در حالت شارژ-دشارژ و استراحت به خوبی مدل کرد. معادله (۲) ولتاژ سلول را نمایش می‌دهد. جمله اول این معادله ولتاژ مدار باز سلول OCV می‌باشد. OCV ، اختلاف ولتاژ الکتروود های منفی و مثبت سلول را در هنگامی که سلول در مدار خارجی قرار نگرفته است نشان می‌دهد.

جمله دوم معادله (۲) ولتاژ اهمیک سلول می‌باشد که رابطه خطی با جریان دارد. ولتاژ اهمیک افت ولتاژ به دلیل مقاومت داخلی سلول را نشان می‌دهد. جمله سوم ولتاژ دیفیوژن سلول را نشان می‌دهد. پدیده دیفیوژن که به دلیل وجود گرادینان غلظت یون های لیتیوم در الکتروود های سلول است از معادله (۳) مدل می‌شود که در آن R ، RC و i_r به ترتیب مقاومت، ثابت زمانی و جریان دیفیوژن می‌باشند.

$$i_{r,k+1} = i_{r,k} e^{-\frac{\Delta t}{RC}} + \underbrace{(1 - e^{-\frac{\Delta t}{RC}})}_{\beta_e} \alpha_e \quad (3)$$

$$x_{cell} = [z_k, i_{r1,k}, i_{r2,k}, h_k | T_c, T_s]^T \quad (9)$$

$$x_{cell,k+1} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{e1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{e2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_h & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{1,k} & \lambda_{2,k} & \lambda_{3,k} & \kappa_4 & \kappa_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \kappa_1 & \kappa_2 \end{bmatrix}}_{A_{cell}} x_{cell,k} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & -col \\ 0 & 0 & \beta_{e1} \\ 0 & 0 & \beta_{e2} \\ 1-Ah & 0 & 0 \\ \lambda_{4,k} & 0 & \lambda_{5,k} \\ 0 & \kappa_3 & 0 \end{bmatrix}}_{B_{cell}} \underbrace{\begin{bmatrix} sign(i_k) \\ T_f \\ i_k \end{bmatrix}}_{u_{cell}} \quad (10)$$

$$\lambda_{1,k} = -\frac{\Delta t R_1 i_k}{C_c}, \lambda_{2,k} = -\frac{\Delta t R_2 i_k}{C_c},$$

$$\lambda_{3,k} = -\frac{\Delta t M i_k}{C_c}, \lambda_{4,k} = \frac{-\Delta t M_0 i_k}{C_c}, \lambda_{5,k} = \frac{\Delta t R_0 i_k}{C_c}$$

$$C_V = [0, -R1, -R2, M, 0, 0]$$

$$D_V = [-M0, 0, -R0] \quad (11)$$

$$V_k = C_V x_{cell,k} + D_V u_{cell} + ocv$$

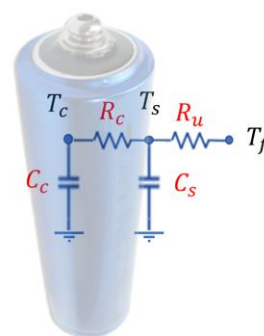
$$C_z = [1, 0, 0, 0, 0, 0] \quad (12)$$

$$z_k = C_z x_{cell,k}$$

$$C_{T_c} = [0, 0, 0, 0, 1, 0]$$

$$T_{c,k} = C_{T_c} x_{cell,k} \quad (13)$$

که در معادلات فوق x_{cell} متغیرهای سلول ها و u_{cell} بردار ورودی کنترلی می‌باشند. مانند آنچه که در بخش (۲-۱) اشاره شد در مدل مدار معادل دو خروجی مهم ولتاژ و حالت شارژ وجود دارد که معادلات خروجی آن‌ها به ترتیب در روابط (۱۱) و (۱۲) بدست آمده است. به طور مشابه یکی از خروجی های مهم برای مدل حرارتی دمای داخل سلول می‌باشد که در



شکل ۲. شماتیکی از نحوه مدل حرارتی دو متغیره

Fig. 2. A graphical representation of the two-state thermal model

شده اند. R_c و R_u در معادله (۶) نیز به ترتیب مقاومت های حرارتی فضایی و هدایتی سلول هستند.

$$T_{s,k+1} = \frac{\Delta t}{R_c C_s} T_{c,k} + \underbrace{\left(1 - \frac{\Delta t}{R_c C_s} - \frac{\Delta t}{R_u C_s}\right)}_{\kappa_2} T_{s,k} + \underbrace{\frac{\Delta t}{R_u C_s}}_{\kappa_3} T_{f,k} \quad (6)$$

$$T_{c,k+1} = \underbrace{\left(1 - \frac{\Delta t}{R_c C_c}\right)}_{\kappa_4} T_{c,k} + \underbrace{\frac{\Delta t}{R_c C_c}}_{\kappa_5} T_{s,k} + \underbrace{\frac{\Delta t}{C_c}}_{\kappa_6} Q_{gen,k} \quad (7)$$

$$Q_{gen,k} = (ocv(T, z_k) - V_k) i_k + \frac{\partial ocv}{\partial T} i_k \quad (8)$$

۲-۳- مدل الکتریکی-حرارتی سلول

در بخش های (۲-۱) و (۲-۲) مدل الکتریکی و حرارتی سلول به همراه معادلات زمان گسسته آن‌ها ارائه شدند. حال لازم است که از کوپل روابط الکتریکی و حرارتی معرفی شده استفاده نمود و مدل الکتریکی-حرارتی سلول را به صورت معادلات (۹) تا (۱۳) نمایش داد.

$$x_{cell,k+1} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{e1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{e2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{h,k-1} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{1,k-1} & \lambda_{2,k-1} & \lambda_{3,k-1} & \kappa_4 & \kappa_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \kappa_1 & \kappa_2 \end{bmatrix}}_{A_{cell}} x_{cell,k} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & -col & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{e1} & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{e2} & 0 \\ 1-Ah & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{4,k-1} & 0 & \delta_{k-1} & \lambda_{6,k-1} \\ 0 & \kappa_3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} sign(i_k) \\ T_f \\ i_k \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\delta_{k-1} = \frac{\Delta t}{C_c} (2R_0 i_{k-1} + R_1 i_{r1,k-1} + R_2 i_{r2,k-1} - Mh_{k-1}),$$

$$\lambda_{6,k-1} = -\frac{\Delta t R_0 i_{k-1}^2}{C_c}$$

باید توجه داشت که خطی سازی یک مدل غیرخطی ممکن است که سبب کاهش دقت مدل شود. هر چند خطی سازی متوالی حول نقطه کاری گذشته برای معادله فضای حالت سلول دقت مطلوبی دارد. برای بررسی این مسئله می توان حرارت تولیدی اهمی غیرخطی و خطی شده را مقایسه نمود. شکل ۳ دقت مدل خطی استخراج شده از معادله (۱۴) را با مدل غیر خطی حرارت تولیدی در دشارژ آرام و یک سیکل رانندگی مقایسه می کند. باتوجه به شکل، خطی سازی حول نقطه کاری پیشین به خوبی مدل غیرخطی سلول را توصیف می کند. لازم به ذکر است که سیکل های دینامیکی اعمالی به سلول در شکل ۳، در بخش ۱-۳ به طور کامل تشریح داده شده است.

۳- شناسایی پارامترهای سلول

در این بخش به طور خلاصه به نتایج شناسایی پارامترهای الکتریکی-حرارتی سلول پرداخته شده است. باتوجه به مدل محور بودن کنترلر مورد نظر، نیاز است که پارامترهای موجود در معادلات (۱) تا (۸) به گونه ای یافت شوند تا مدل تجربی، رفتار حرارتی-الکتریکی سلول را با حداقل خطا توصیف و پیش بینی کند. برای دستیابی به این هدف باید مجموعه ای از تست های تجربی بر روی سلول انجام شود. شکل ۴ تجهیزات سخت افزاری، نرم افزاری مورد نیاز و فرآیند طی شده برای شناسایی پارامترهای سلول را نمایش می دهد.

رابطه (۱۳) نشان داده شده است. شایان ذکر است که برای مشخص نمودن معادلات خروجی از پایین نویس V ، تو T_c استفاده شده است.

۲-۴ خطی سازی متوالی

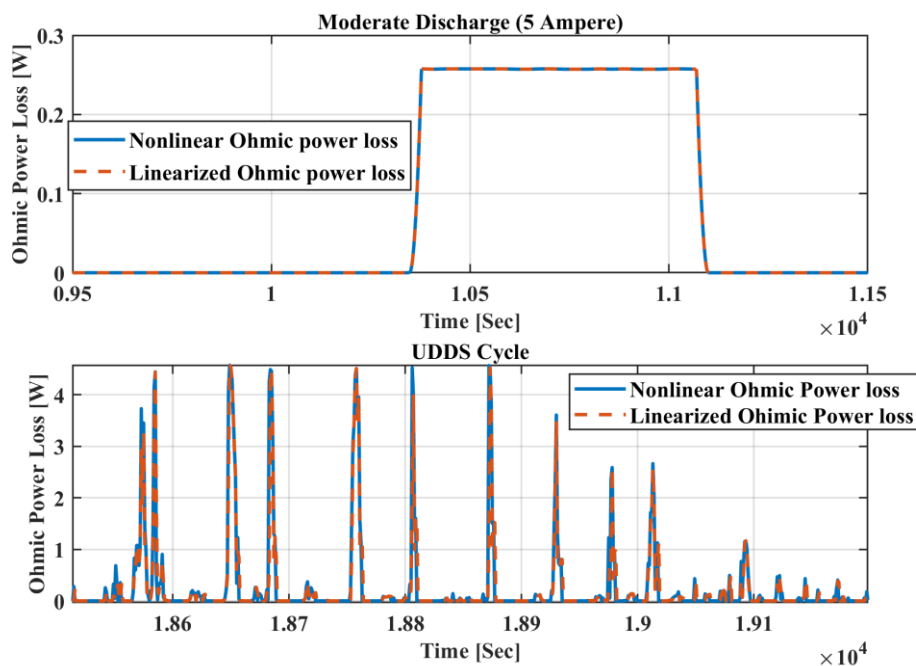
باتوجه به معادله (۱۰) ماتریس های A_{cell} و B_{cell} تابعی از ورودی کنترلی در گام کنونی سلول یعنی i_k هستند. در نتیجه برای رفع این مشکل با خطی سازی حول نقطه کاری گذشته می توان وابستگی ماتریس های A_{cell} و B_{cell} به i_k را مرتفع کرد. همچنین استفاده از خطی سازی حول نقطه کاری گذشته کمک می کند که از کنترل پیش بین خطی برای طراحی سیستم مدیریتی استفاده نمود. برای بررسی نحوه خطی سازی حول نقطه کاری گذشته حرارت تولیدی اهمی سلول را که رابطه سهموی با جریان دارد، در نظر بگیرید. برای خطی سازی این رابطه می توان از بسط تیلور استفاده نمود. معادله (۱۴) مراحل طی شده برای بدست آوردن حرارت تولیدی خطی در گام زمانی کنونی را نشان می دهد.

$$Q_{gen-ohmic_k} = R_0 i_k^2 \approx R_0 i_{k-1}^2 + 2R_0 i_{k-1} (i_k - i_{k-1})$$

$$Q_{gen-ohmic_k} \approx 2R_0 i_{k-1} i_k - R_0 i_{k-1}^2 \quad (14)$$

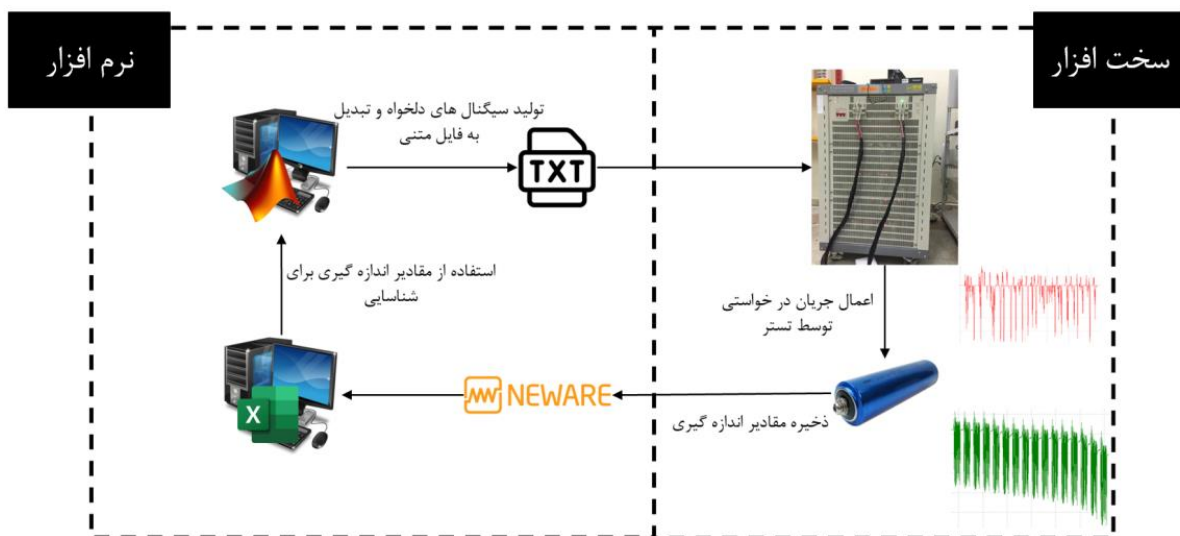
$$Q_{gen-ohmic_k} \approx \begin{bmatrix} 2R_0 i_{k-1} & -R_0 i_{k-1}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_k \\ 1 \end{bmatrix}$$

باتوجه به معادله (۱۴) حرارت تولیدی اهمی بعد از خطی سازی حول نقطه کاری گذشته به جریان الکتریکی در گام پیشین نیز وابسته خواهد بود. در ادامه معادله (۱۴) رابطه خطی شده به فرم برداری برای مجزا نمودن پارامترها و متغیرها نمایش داده شده است. طبق فرم برداری عبارت $-R_0 i_{k-1}^2$ سبب ایجاد آفست شده است. بنابراین لازم است که عدد ۱ نیز به بردار کنترلی الحاق شود. باید در نظر داشت که $-R_0 i_{k-1}^2$ سبب غیر خطی شدن رابطه نمی شود چرا که i_{k-1} در یک گام زمانی پیشین به سلول اعمال شده است. در نتیجه می توان $-R_0 i_{k-1}^2$ را به عنوان یک پارامتر در نظر گرفت. به طور مشابه می توان سایر عبارت های غیر خطی موجود در معادله (۱۰) را خطی سازی نمود. در نتیجه معادله فضای حالت خطی شده سلول برای طراحی کنترلر به صورت معادله (۱۵) خواهد بود. عبارت δ_{k-1} در معادله (۱۵) عبارات خطی شده حرارت تولیدی را که با i_k رابطه دارند، نشان می دهد.



شکل ۳. مقایسه دقت مدل حرارت تولیدی اهمی با مدل خطی شده در دشارژ آرام و یک سیکل رانندگی

Fig. 3. The accuracy comparison of nonlinear ohmic heat generation with the linearized model in Moderate discharge and driving cycle



شکل ۴. تجهیزات لازم برای پیاده سازی تست های تجربی بر روی سلول

Fig. 4. A graphical representation of equipment required for experimental tests on the cell

که یکی از قابلیت های آن شبیه سازی سیکل های رانندگی است. حال با بدست آوردن پروفیل جریان از جعبه ابزار ADVISOR و اعمال آن به سلول به کمک باتری تستر می توان رفتار الکتریکی سلول را در عمل بررسی کرد. بنابراین با ذخیره مقادیر اندازه گیری شده ولتاژ و جریان طی سیکل های دینامیک می توان از جعبه ابزار ESCtoolbox استفاده نمود و پارامترهای مجهول در معادلات (۱) تا (۵) را شناسایی کرد. شایان ذکر است که پارامترهای شناسایی شده در این جعبه ابزار مانند مقاومت تابع حالت شارژ نیستند بلکه به عبارتی پارامترها شناسایی شده در یک طیف وسیع از حالت شارژ به صورت آفلاین شناسایی می شوند. البته به دلیل وجود متغیر هیستریزس که تابعی از حالت شارژ سلول می باشد می توان تاثیر حالت شارژ در ولتاژ دینامیک سلول را در نظر گرفت و مدل تجربی مطلوبی از ولتاژ سلول استخراج کرد. برای بررسی تاثیر دما بر عملکرد سلول و پارامترهای تخمینی در دماهای بالاتر و پایین تر از دمای اتاق می توان سلول را در محفظه حرارتی قرار داد و مجدداً از پروفیل های رانندگی استفاده نمود. در ادامه این بخش به نتایج شناسایی پارامترهای الکتریکی سلول ۳۸۱۲۰ لیتیوم آهن فسفات پرداخته می شود.

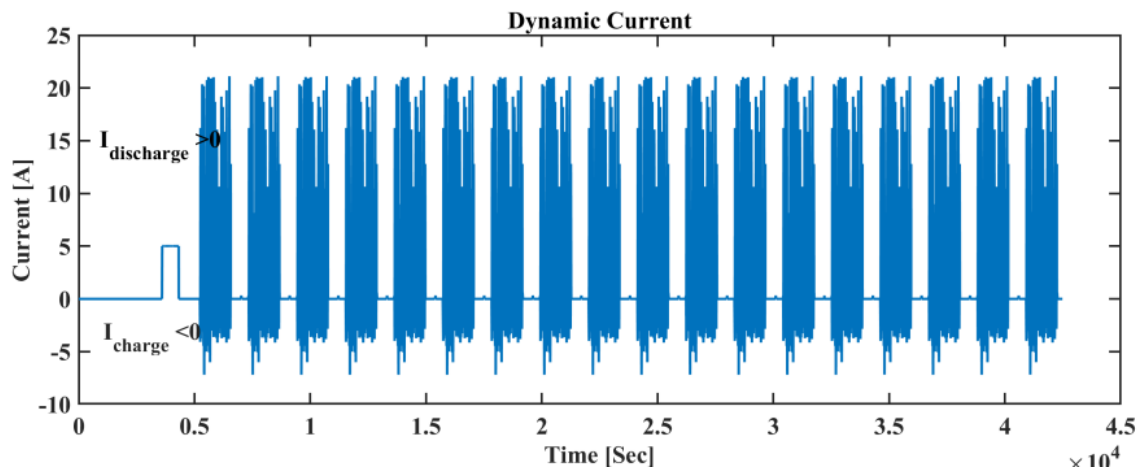
شکل ۵ جریان اعمال شده برای شناسایی پارامترهای الکتریکی توسط تستر باتری به سلول را نشان می دهد. مانند آنچه در ابتدای این بخش اشاره شد پروفیل های رانندگی چندین مرتبه به سلول اعمال می شوند تا رفتار الکتریکی سلول را در یک بازه از حالت شارژ بررسی کرد. اما در ابتدای تست سلول برای مدت کوتاهی دشارژ شده است. دشارژ کوتاه بدین منظور انجام گرفته است که قسمت شارژ پروفیل اعمالی در ابتدای تست سبب خارج شدن سلول از ولتاژ ماکسیمم تعیین شده نشود. شکل ۶ ولتاژ دینامیک سلول را که از اختلاف ولتاژ اندازه گیری شده با ولتاژ مدار باز سلول محاسبه می شود نمایش داده است. می توان مشاهده کرد که بعد از استراحت های کوتاه ۳۰۰ ثانیه ای ولتاژ دینامیک به سمت صفر میرا شده است اما در هنگامی که حالت شارژ سلول بسیار کم است مقدار ولتاژ دینامیک در هنگام استراحت به صفر میل نکرده است در نتیجه دقت OCV تخمین زده شده در حالت شارژ های بسیار پایین (۵ درصد به پایین) کاهش یافته است. علاوه بر این دامنه ی ولتاژ دینامیک در دو سیکل آخر افزایش یافته است که به دلیل افزایش مقاومت باتری در حالت شارژ بسیار کم است. اما در حالت شارژ ۱۰ تا ۹۵ درصد، OCV دقت مطلوبی دارد. در شکل ۷ نیز OCV بر حسب حالت شارژ در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد نمایش داده شده است. شکل ۸ دقت ولتاژ مدل با ولتاژ اندازه گیری شده توسط تستر، پس از شناسایی پارامترهای الکتریکی باتری

طبق شکل ۴ برای اعمال جریان الکتریکی مورد نظر به سلول نیاز به یک منبع مستقیم قابل برنامه نویسی یا تستر باتری وجود دارد. همچنین برای ذخیره اندازه گیری ها از جمله ولتاژ، جریان اعمال شده، دمای سطح سلول و سیال خنک کاری نیاز به سنسورهای متعدد وجود دارد. در بخش نرم افزاری نیز بر اساس اندازه گیری های انجام شده می توان پارامترهای مجهول الکتریکی و حرارتی را در نرم افزار متلب شناسایی نمود. همچنین برای اعمال جریان های دلخواه مانند سیکل های رانندگی لازم است که سیگنال دلخواه به صورت یک فایل متنی به تستر باتری داده شود که این عمل نیز در نرم افزار متلب انجام می گیرد. در این پژوهش پارامترهای الکتریکی و حرارتی سلول در تست های تجربی جداگانه شناسایی می شوند. نحوه شناسایی و جزییات تست های تجربی در بخش های ۱-۳ و ۲-۳ تشریح داده شده اند. ذکر این نکته لازم است که فرآیند به تصویر کشیده شده در شکل ۴ تنها منحصر به شناسایی پارامترهای سلول نمی باشد. بلکه در طراحی تخمین گر و کنترلر نیز می توان از فرآیندی مشابه برای پیاده سازی سیستم حلقه بسته استفاده نمود.

۳-۱- شناسایی پارامترهای الکتریکی

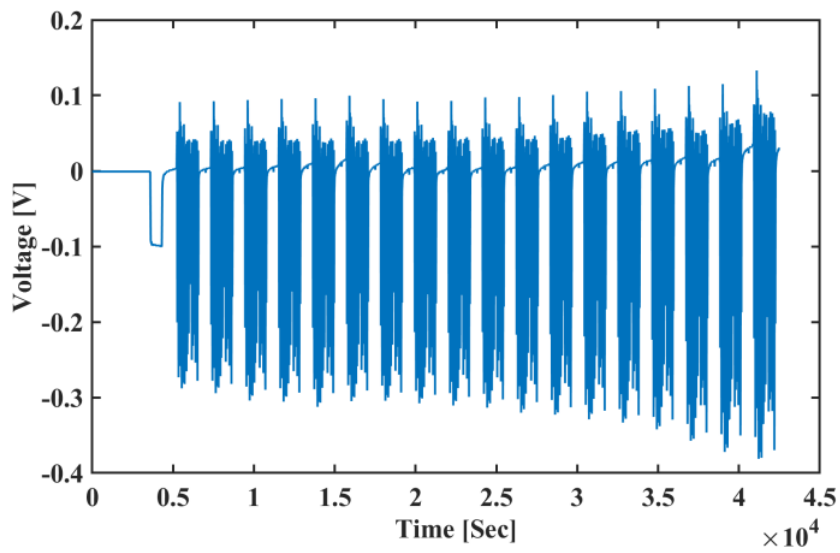
برای شناسایی پارامترهای الکتریکی سلول از روش شناسایی زیرفصا^۱ و از جعبه ابزار شناسایی پارامترهای الکتریکی باتری در مرجع [۱۹] استفاده شده است. برای استفاده از این جعبه ابزار نیاز است که چندین تست از سلول به وسیله باتری تستر انجام شود. به همین منظور ابتدا لازم است که ظرفیت سلول و OCV با شارژ-دشارژ آرام شناسایی شود. یکی از روش های متداول برای بدست آوردن نمودار OCV بر حسب حالت شارژ برای باتری های لیتیومی شارژ و دشارژ کردن سلول با جریان های ۱۵/ C یا ۳۰/ C است چرا که در جریان های بسیار کم ولتاژ اندازه گیری شده نزدیک به ولتاژ تعادلی سلول خواهد بود. C جریان نرمال شده بر حسب ظرفیت سلول را نشان می دهد. به طور مثال برای شارژ یک سلول ۱۰ آمپر ساعتی در مدت یک ساعت باید سلول با جریان ۱۰ آمپر شارژ شود. برای شناسایی سایر پارامترهای الکتریکی سلول ۳۸۱۲۰ لیتیوم آهن فسفات، ابتدا سلول به صورت کامل شارژ شده است و بعد از یک استراحت ۱ ساعته پروفیل های سیکل رانندگی شهری^۲ به باتری اعمال شده است که هر سیکل به مقدار ۴ الی ۵ درصد شارژ سلول را کاهش می دهد. برای بدست آوردن پروفیل های رانندگی مانند سیکل رانندگی شهری می توان از جعبه ابزار ADVISOR استفاده نمود

- 1 Subspace identification
- 2 Urban dynamometer driving cycle



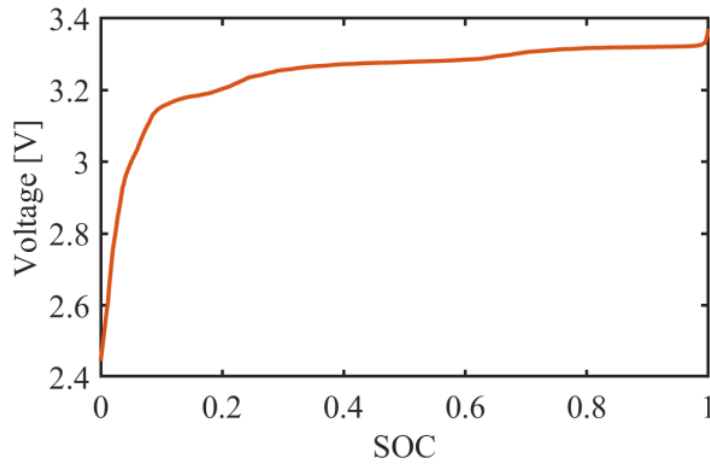
شکل ۵. جریان اعمال شده به سلول برای شناسایی پارامترهای الکتریکی

Fig. 5. The applied current for identifying electrical parameters



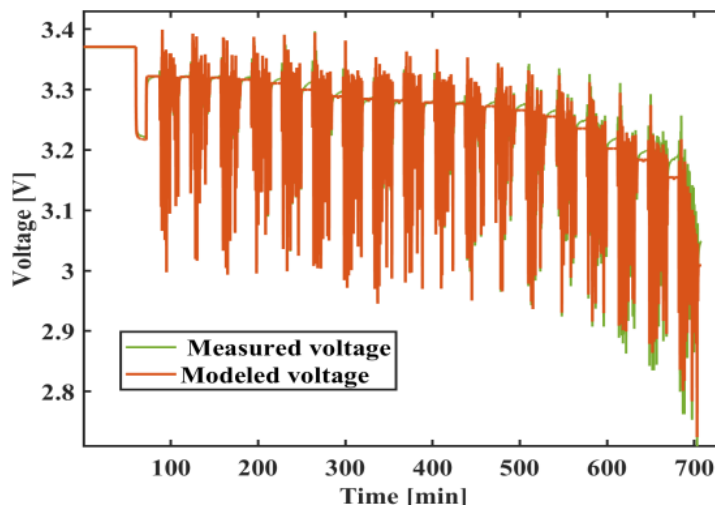
شکل ۶. ولتاژ دینامیک سلول در تست شناسایی پارامترهای الکتریکی

Fig. 6. the dynamic voltage of the cell in the electrical parameter identification process



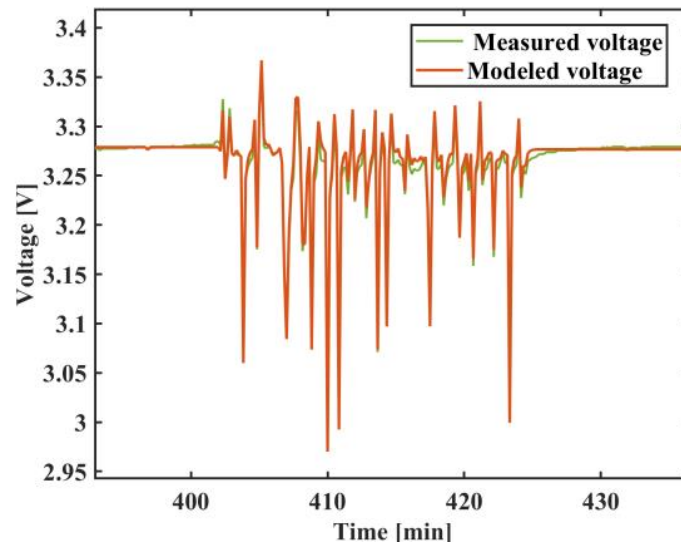
شکل ۷. ولتاژ مدار باز سلول

Fig. 7. The open circuit voltage of the cell



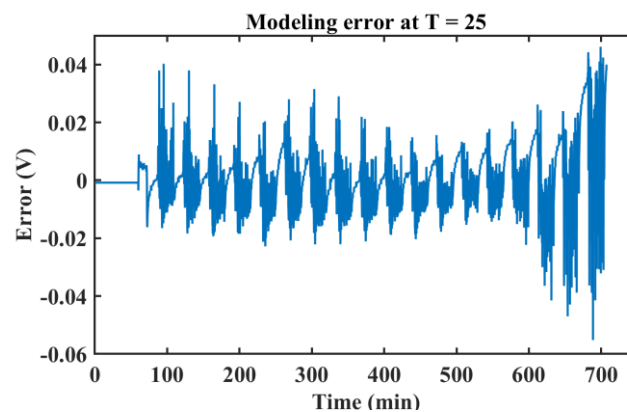
شکل ۸. ولتاژ مدل (قرمز) و اندازه گیری شده توسط تستر (سبز)

Fig. 8. The modeled voltage (red) and measured voltage via the battery tester (green)



شکل ۹. بزرگنمایی از یکی از سیکل های UDDS

Fig. 9. The magnified plot of a UDDS cycle



شکل ۱۰. خطای ولتاژ مدل سازی در تست شناسایی پارامتر های الکتریکی

Fig. 10. The voltage error in the identification of electrical parameters

به دلیل استفاده از دو مدار RC برای توصیف دیفیوژن، برای ثابت زمانی و مقاومت دیفیوژن دو پارامتر شناسایی شده است.

در مجموع، نتایج بدست آمده از شناسایی پارامترهای الکتریکی، حاکی از آن است که مدل های تجربی سلول باوجود حجم محاسباتی کم می توانند رفتار الکتریکی سلول را در حالت استراحت و هنگام جریان های دینامیک به خوبی توصیف کنند. به همین خاطر، می توان از پارامتر های تخمین زده شده برای مدل سازی الکتریکی در این بخش در کنترلر های مدل محور

را نشان می دهد. برای بررسی دقیقتر ولتاژ مدل شده یکی از سیکل ها در شکل ۹ بزرگنمایی شده است. با وجود آن که جریان اعمالی شارژ-دشارژ کاملاً دینامیک است اما ولتاژ مدل شده به خوبی می تواند رفتار الکتریکی باتری را در طیف وسیعی از حالت های شارژ (۵-۹۵ درصد) توصیف کند. شکل ۱۰ خطای ولتاژ را در طول ۷۰۰ دقیقه تست در دمای محیط ۲۵ درجه سانتی گراد نمایش داده است. در جداول (۱ و ۲) نیز به ترتیب خطای شناسایی پارامتر های الکتریکی شناسایی شده قرار گرفته اند. لازم به ذکر است که

جدول ۱. خطای مدلسازی الکتریکی در شناسایی پارامترهای الکتریکی

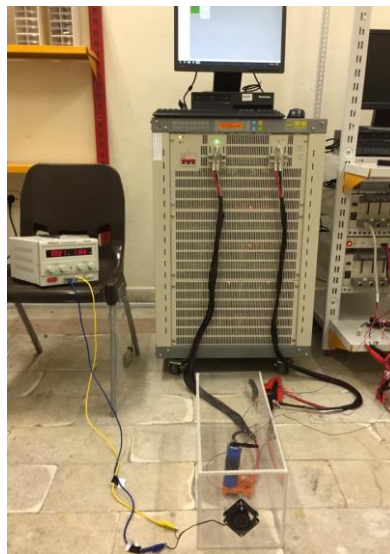
Table 1. Modeling error in the electrical parameter identification

خطای Max	خطای RMS
۰/۰۵۸(V)	۵/۱۶ (mV)

جدول ۲. پارامترهای الکتریکی شناسایی شده در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد

Table 2. The identified electrical parameters at 25 °C

پارامتر	مقدار شناسایی شده	پارامتر	مقدار شناسایی شده
M (بی بعد)	۰/۰۰۲۳	M_0 (بی بعد)	۰/۰۰۳۴
γ (بی بعد)	۹/۸۵	η (بی بعد)	۰/۹۹۵
Q_c (Ah)	۱۰/۸	R_0 (mΩ)	۱۰/۳۵
R (Ω)	$(۴/۷۷ \times 10^{-3})$ و $(۰/۰۰۷۷)$	RC	$(۱۰/۸۸ و ۰/۹۲۵)$



شکل ۱۱. تست تجربی برای شناسایی پارامترهای حرارتی

Fig. 11. The experimental setup for the identification of thermal parameters

علاوه بر این در ورودی کانال یک ترموکوپل برای اندازه گیری دمای سیال خنک کاری استفاده شده است. حال به کمک باتری تستر، سلول ابتدا با جریان CI کامل شارژ شده است سپس با جریان یکسان ۵۰ درصد دشارژ شده است. در گام بعدی باتری به مدت کوتاهی استراحت داده شده است و بعد پالس های شارژ-دشارژ و جریان با دامنه ۳C و فرکانس ۲ هرتز به سلول اعمال شده است. دشارژ قبل پالس های مربعی کمک می کند که ولتاژ

استفاده نمود.

۳-۲- شناسایی پارامترهای حرارتی

طبق شکل ۱۱ برای شناسایی پارامترهای حرارتی، باتری داخل یک محفظه که مجهز به یک فن ۱۲ ولتی است، قرار گرفته است. برای اندازه گیری دمای سطح دو سنسور ترموکوپل بر سطح سلول متصل شده است.

جدول ۳. پارامترهای حرارتی شناسایی شده

Table 3. The identified thermal parameters

$R_c (K/W)$	$R_u (K/W)$	$C_s (J/K)$	$C_c (J/K)$
۱/۵۲۴	۱/۰۵۳۷	۲۲/۴۶	۱۵۷/۶۹

$$T_s = [T_{s,k+2}, T_{s,k+2}, \dots, T_{s,k+n+2}]^T \quad (18)$$

$$\hat{\Theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T T_s$$

طبق معادله (۱۷) می‌توان دمای سطح سلول مدل سازی شده را به صورت برداری نمایش داد که Θ پارامترهای مجهول در روش حداقل مربعات و Φ شامل اندازه گیری‌های دماهای سطح، هوای اطراف سلول و حرارت تولیدی در سلول است. T_s و n نیز به ترتیب برداری از دمای مدل شده در دو گام زمانی آینده و تعداد نمونه‌های برداشته شده می‌باشد. زمان نمونه برداری برای شناسایی پارامترهای حرارتی ۰/۱ ثانیه در نظر گرفته شده است. با توجه به اندازه گیری‌های انجام شده از دمای سطح و هوای اطراف سلول و همچنین شناسایی پارامترهای الکتریکی در قسمت (۱-۳) می‌توان حرارت تولیدی را طبق معادله (۸) محاسبه نمود و از طریق رابطه (۱۸) پارامترهای مجهول را محاسبه کرد. پس از محاسبه پارامترهای مجهول a می‌توان با تشکیل یک دستگاه چهار معادله چهار مجهول طبق رابطه (۱۶) پارامترهای حرارتی سلول را یافت. ذکر این نکته لازم است که پارامترهای شناسایی شده در جدول ۳، به خصوص مقاومت فضایی، بسیار به دما و ضریب انتقال حرارت جابجایی در تست وابسته است و در هر کدام از سناریوها، به طور مثال روشن یا خاموش بودن فن مقادیر شناسایی شده متفاوت خواهند بود. اما در این مقاله هدف پوشش عدم قطعیت پارامترها در سناریوهای مختلف مثل خاموش شدن فن یا پیر شدن سلول نیست بلکه هدف اصلی طراحی یک کنترلر مدل محور است که در مرحله اول لازم است پارامترهای مجهول مدل تخمین زده شوند. بنابراین پارامترهای شناسایی شده که در این مقاله به صورت آفلاین تخمین زده شده اند، برای دستیابی به یک مدل مطلوب در شرایط آزمایشگاهی مناسب است. برای پوشش عدم قطعیت در سناریوهای گوناگون از جمله پیر شدن سلول بهتر است که پارامتر

سلول در هنگام اعمال پالس در محدوده ایمن بماند اما دمای سطح و داخل سلول افزایش یابد. سیگنال‌های تحریک برای شناسایی پارامترها ولتاژ، جریان و دمای سیال خنک کاری خواهند بود.

برای یافتن پارامترهای حرارتی مانند ظرفیت گرمایی داخل باتری، مقاومت فضایی و مقاومت حرارتی داخلی می‌توان با حذف دمای داخل در معادله (۶) و جایگزین کردن آن با مقادیر معلوم به معادله (۱۶) دست یافت [۵]. در این معادله مجهولات تنها پارامترهای حرارتی سلول خواهند بود.

$$T_{s,k+2} = \underbrace{(2 - \Delta t (\frac{1}{R_c C_c} + \frac{1}{R_c C_s} + \frac{1}{R_u C_s}))}_{a1} T_{s,k+1} + \underbrace{(\Delta t (-\frac{\Delta t}{R_u C_s C_c R_c} + \frac{1}{R_c C_c} + \frac{1}{R_c C_s} + \frac{1}{R_u C_s}) - 1)}_{a2} T_{s,k} \quad (16)$$

$$+ \underbrace{(\frac{\Delta t^2}{R_u C_s C_c R_c})}_{a3} T_{f,k} + \underbrace{\frac{\Delta t^2}{C_s C_c R_c} Q_{gen,k}}_{a4}$$

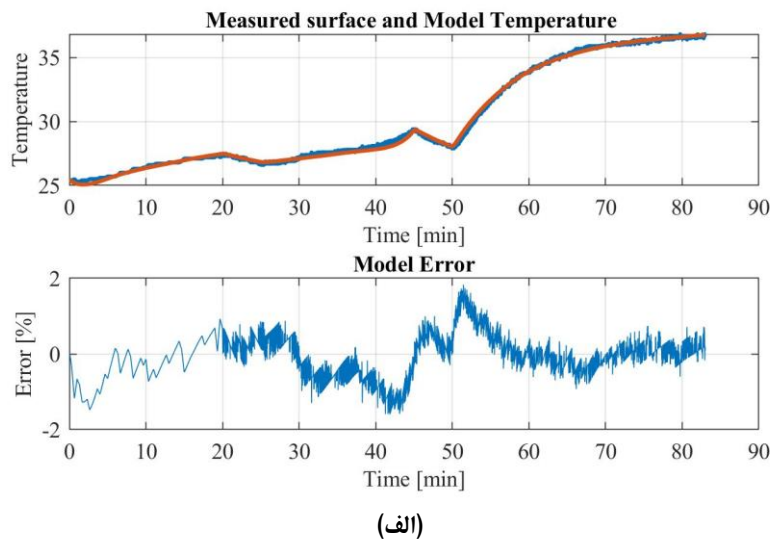
حال می‌توان با استفاده از روش حداقل مربعات پارامترهای حرارتی سلول را یافت. برای استفاده از این روش از معادلات (۱۷) و (۱۸) استفاده می‌شود.

$$T_s = \Phi \Theta$$

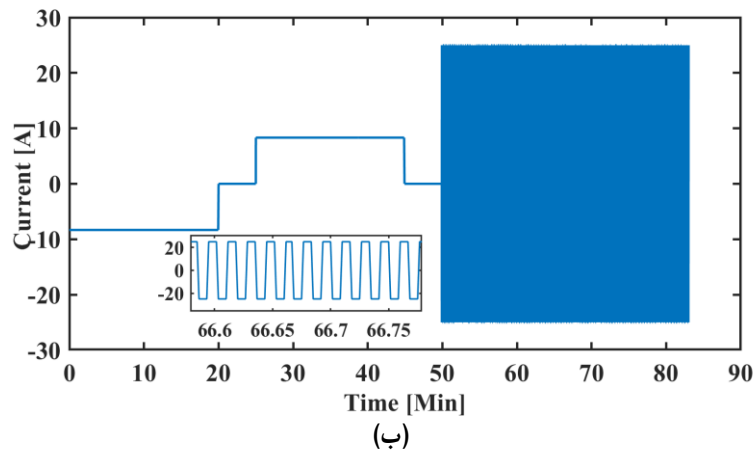
$$\Phi = \begin{bmatrix} T_{s,k+1} & T_{s,k} & T_{f,k} & Q_{gen,k} \\ T_{s,k+2} & T_{s,k+1} & T_{f,k+1} & Q_{gen,k+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{s,k+n+1} & T_{s,k+n} & T_{f,k+n} & Q_{gen,k+n} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\Theta = [a1, a2, a3, a4]^T$$

1 Least Square Method



(الف)



(ب)

شکل ۱۲. الف) دمای سطح مدل شده (قرمز) و دمای سطح اندازه گیری سلول (آبی) به همراه نمودار خطای مدل (ب) جریان اعمالی به کمک تستر باتری برای شناسایی پارامترهای حرارتی

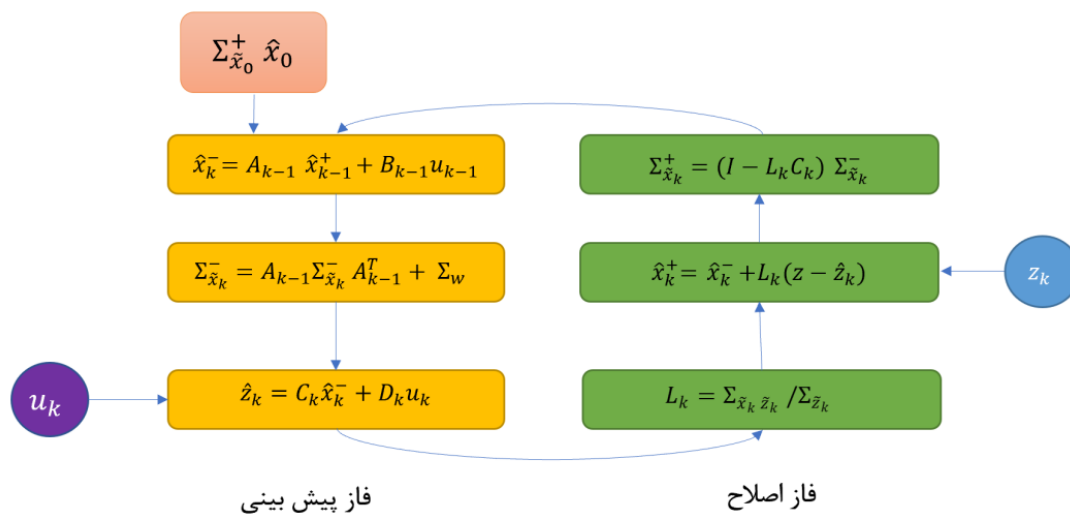
Fig. 12. a) The modeled surface temperature (red) and the measured surface temperature (blue) along with the model error, b) the applied current via the battery tester for the identification of thermal parameters

طراحی تخمین گر

باتوجه به اینکه تنها دمای سطح و ولتاژ سلول به طور مستقیم قابل اندازه گیری هستند نیاز است سایر متغیرها تخمین زده شوند. به همین دلیل در بخش (۱-۴) به طور خلاصه به معرفی فیلترهای کالمن پرداخته می شود. سپس با استفاده از تخمین گر طراحی شده، متغیرهای الکتریکی و حرارتی سلول به کمک تست های تجربی در بخش (۲-۴) تخمین زده می شوند.

های سلول به صورت تطبیقی شناسایی شوند [۲۱].

شکل ۱۲ دقت دمای مدل شده با دمای اندازه گیری شده در شناسایی پارامترهای حرارتی را در طول ۹۰ تست نشان می دهد. طبق این شکل مدل حرارتی با پارامترهای تخمین زده شده به خوبی توانایی توصیف رفتار حرارتی سلول را دارد چرا که خطای دمای محاسبه شده با دمای اندازه گیری همواره کم تر از ۲٪ است.



شکل ۱۳. فیلتر کالمن خطی

Fig. 13. Linear Kalman filter

$$\mathbb{E}[f(x)] \approx f(\mathbb{E}[x])$$

۳-۳- فیلتر های کالمن

باتوجه به فرضیات فیلتر کالمن توسعه یافته، شدت غیرخطی بودن مدل در دقت تخمین تاثیرگذار خواهد بود. دو عامل مهم غیرخطی در مدل الکتریکی-حرارتی عبارتند از:

- ۱- هیستریزیس که مطابق معادله (۳) رابطه نمایی با ورودی کنترلی دارد.
- ۲- حرارت تولیدی که حتی در صورت نظر گرفتن مقاومت داخلی باتری به عنوان تنها عامل تولید حرارت در سلول رابطه سهموی با ورودی کنترلی دارد (سایر پارامترها و حرارت تولیدی بازگشت پذیر هم در تولید حرارت نقش خواهند داشت).

بنابر عوامل غیر خطی ذکر شده و شدت غیر خطی بودن آنها می توان برای تخمین بهتر از تخمین گر سیگما پوینت^۲ استفاده کرد [۲۲]. برخی از ویژگی های این فیلتر عبارتند از:

- ۱- نیاز به مشتق پذیر بودن تابع نیست
 - ۲- حجم محاسباتی مطلوب (کمی بیشتر از فیلتر کالمن توسعه یافته)
 - ۳- محاسبه دقیق تر کواریانس متغیرها و بازه خطای تخمین آن ها
- حال در ادامه این بخش به صورت اجمالی به معرفی معادلات اصلی استفاده شده در تخمین گر سیگما پوینت پرداخته می شود. معادلات (۱۹) تا (۲۷) روابط اصلی لازم برای تخمین متغیرها به کمک روش سیگما پوینت

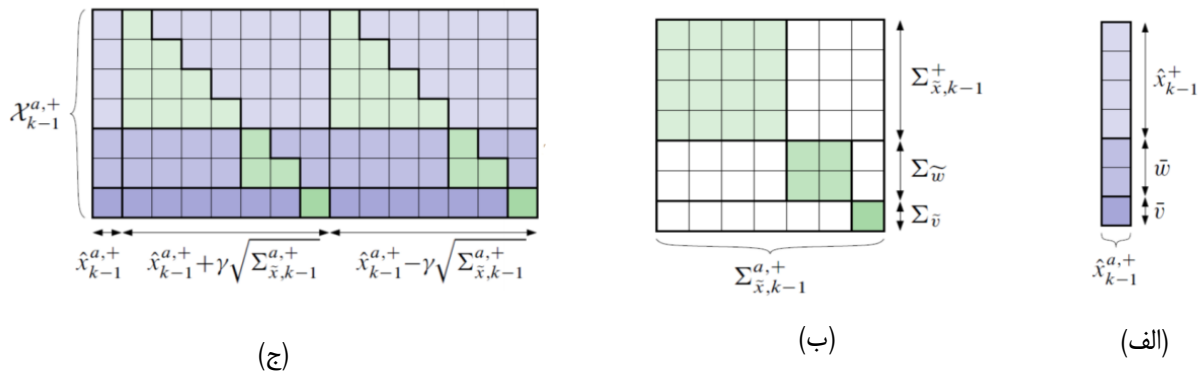
فیلتر کالمن تخمین متغیرهای زمان کنونی را به کمک تخمین انجام شده در گام قبل و اندازه گیری های کنونی انجام می دهد. در مجموع تخمین گر شامل دو فاز پیش بینی و اصلاح است که در فاز پیش بینی متغیرها و کواریانس متغیرها بر اساس مدل پیش بینی شده سپس در فاز اصلاح تخمین های انجام شده بر اساس اندازه گیری های کنونی اصلاح می شوند. شکل ۱۳ دیاگرامی از فیلتر کالمن خطی و گام های لازم در هر فاز برای تخمین متغیرها را نمایش می دهد.

لازم به ذکر است به دلیل وجود ترم های غیرخطی در مدل الکتریکی-حرارتی باتری باید برای تخمین متغیرها از فیلتر های کالمن غیرخطی استفاده کرد. فیلتر کالمن توسعه یافته^۱ یکی از روش های پرترفدار برای تخمین متغیرها در مدل های غیر خطی است که با خطی سازی مدل با استفاده از بسط تیلور در هر گام زمانی صورت می گیرد. در مجموع مراحل و فرضیات اضافه شده به فیلتر کالمن خطی در نوع توسعه یافته آن به صورت زیر خواهد بود:

- ۱- استفاده از سری تیلور برای خطی سازی معادلات سیستم حول نقطه کاری
- ۲- در تخمین متغیرهای حالت فرض می شود که رابطه ی

2 Sigma-point Kalman filter

1 Extended Kalman filter



شکل ۱۴. شماتیکی از نحوه شکل گیری (الف) بردار متغیرهای الحاق شده، (ب) کوریانس الحاق شده و (ج) مجموعه نقاط تولیدی برای محاسبه میانگین و کوریانس متغیرهای الحاقی [۲۲]

Fig. 14. A graphical representation of (a) the augmented state vector (b) the augmented covariance and (c) Sigma points for computing mean and augmented state covariance

در معادله (۲۵) Σ_{y_k} کوریانس خروجی و در معادله (۲۶) L_k بهره کالمن هستند. p تعداد نقاط تولیدی که مقدار آن به ابعاد \hat{x}_{k-1}^{a+} وابسته است. در نهایت در معادلات (۲۶) و (۲۷) در فاز اصلاح به ترتیب تخمین متغیرها و کوریانس آن‌ها انجام می‌پذیرد که خروجی‌های الگوریتم در هر گام زمانی خواهند بود [۲۲].

را نمایش می‌دهند. \hat{x}_{k-1}^{a+} متغیرهای تخمین زده شده در تخمین گر و \bar{v} و \bar{w} به ترتیب میانگین نویز پروسه و سنسور هستند. طبق معادله (۲۰) کوریانس متغیرهای الحاق شده در تخمین گر به صورت یک ماتریس قطری که شامل ماتریس کوریانس متغیرهای فضای حالت، نویز پروسه و سنسور نویز هستند شکل گرفته است. \mathcal{X} در معادله (۲۱) مجموعه نقاط تولیدی و γ ، $\alpha_{m,i}$ و $\alpha_{c,i}$ در معادلات (۲۱)، (۲۴) و (۲۵) پارامترهای قابل تنظیم در الگوریتم هستند.

$$\hat{x}_k^- \approx \sum_{i=0}^p \alpha_{m,i} f(\mathcal{X}_{k-1,i}^{x,+}, u_{k-1}, \mathcal{X}_{k-1,i}^{w,+}) \quad (22)$$

$$\Sigma_{\hat{x}_k}^- = \sum_{i=0}^p \alpha_{c,i} (\mathcal{X}_{k,i}^{x,-} - \hat{x}_k^-)(\mathcal{X}_{k,i}^{x,-} - \hat{x}_k^-)^T \quad (23)$$

$$\hat{y}_k = \sum_{i=0}^p \alpha_{m,i} f(\mathcal{X}_{k,i}^{x,-}, u_k, \mathcal{X}_{k-1,i}^{v,+}) \quad (24)$$

$$\Sigma_{y_k}^- = \sum_{i=0}^p \alpha_{c,i} (\mathcal{F}_i - \hat{y}_k)(\mathcal{F}_i - \hat{y}_k)^T \quad (25)$$

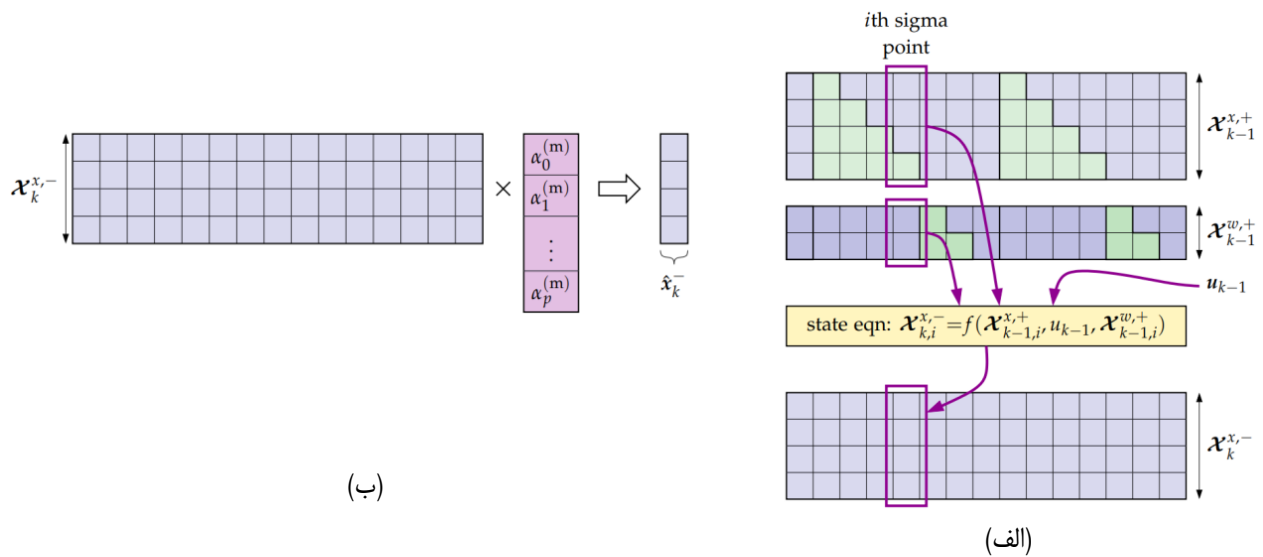
$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + L_k(y_k - \hat{y}_k) \quad (26)$$

$$\hat{x}_{k-1}^{a+} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{k-1}^+ \\ \bar{w} \\ \bar{v} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\Sigma_{x_{k-1}}^{a+} = \text{diag}(\Sigma_{x_{k-1}}^{a+}, \Sigma_w, \Sigma_v) \quad (20)$$

$$\mathcal{X}_{k-1}^{a+} = [\hat{x}_{k-1}^{a+}, \hat{x}_{k-1}^{a+} + \gamma\sqrt{\Sigma_{\hat{x}_{k-1}}^{a+}}, \hat{x}_{k-1}^{a+} - \gamma\sqrt{\Sigma_{\hat{x}_{k-1}}^{a+}}] \quad (21)$$

شکل ۱۴ شماتیکی از نحوه شکل گیری بردار \hat{x}_{k-1}^{a+} و $\Sigma_{\hat{x}_{k-1}}^{a+}$ ماتریس \mathcal{X} را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵. نمایش گرافیکی از نحوه محاسبه متغیرهای اصلی به کمک ماتریس مجموعه نقاط تولیدی و بردار وزنی [۲۲]

Fig. 15. A graphical representation of estimating states with the sigma points matrix and weight vector

[۲۳، ۲۲] مراجعه کرد.

$$\Sigma_{\hat{x}_k}^+ = \Sigma_{\hat{x}_k}^- + L_k \Sigma_{y_k} L_k^T \quad (۲۷)$$

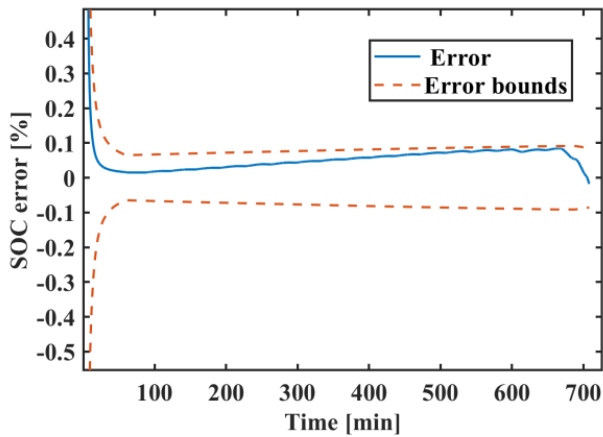
۳-۴- تخمین متغیرهای سلول به کمک تخمین گر

در این بخش برای بررسی دقت تخمین متغیرهای سلول با استفاده از روش سیگماپوینت از دو تست تجربی استفاده شده است. در تست الکتریکی تنها متغیرهای الکتریکی سلول در نظر گرفته شده است در حالی که تست الکتریکی-حرارتی علاوه بر ولتاژ و جریان دمای سطح و خنک کاری سلول نیز برای تخمین دمای داخل سلول اندازه گیری می‌شود. برای تست الکتریکی مانند تست شناسایی پارامترهای الکتریکی از پروفیل‌های دینامیک رانندگی شهری استفاده شده است. در تست الکتریکی-حرارتی برای افزایش دمای سطح و داخل سلول از جریان‌های پالس مربعی استفاده شده است.

شکل ۱۶ حالت شارژ باتری را در تست الکتریکی نمایش می‌دهد. باتوجه به اینکه در تست الکتریکی سلول از قبل به طور کامل شارژ شده است، مقدار اولیه حالت شارژ برابر ۱۰۰ درصد خواهد بود. هرچند که برای بررسی عملکرد تخمین گر، مقدار اولیه حالت شارژ تخمینی ۹۲ درصد در نظر گرفته شده است. انتظار می‌رود در صورت وجود تخمین گر مطلوب این خطا به گذشت زمان کاهش یابد و مقدار واقعی حالت شارژ همگرا شود. باتوجه به عدم توانایی در اندازه گیری مستقیم حالت شارژ واقعی در این تست و با دانش برای مقدار واقعی حالت شارژ از معادله (۱) استفاده شده است.

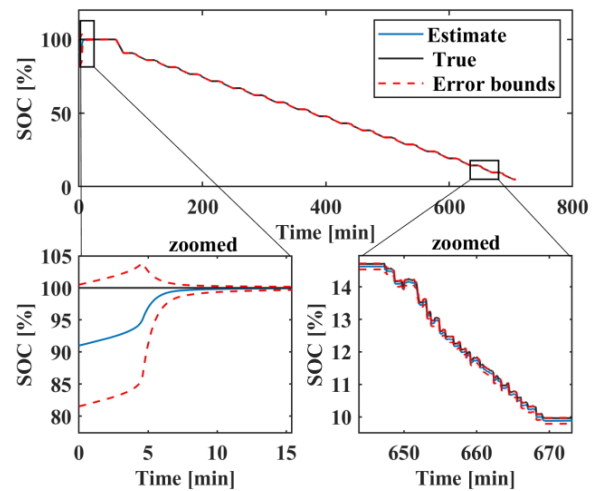
باتوجه به معادلات فوق پس از شکل گرفتن ماتریس مجموعه نقاط تولیدی که از الحاق بردار میانگین متغیرهای الحاقی و جذر کوریانس متغیرهای الحاقی بدست می‌آید، می‌توان متغیرهای الکتریکی-حرارتی سلول را در فاز پیش بینی تخمین زد. شکل ۱۵ شماتیکی از نحوه تخمین متغیرهای سلول در فاز پیش بینی را نمایش می‌دهد. طبق شکل ۱۵ در ابتدا لازم است که ماتریس مجموعه نقاط تولیدی براساس متغیرهای فضای حالت سلول، متغیرهای نویز پروسه و نویز سنسور تفکیک شوند. ماتریس $\Sigma_k^{x,-}$ در برداری وزنی ضرب خواهد شد و نهایتاً متغیرهای سلول در هر گام زمانی در فاز پیش بینی تخمین زده می‌شوند.

پس از تخمین متغیرها در فاز پیش بینی مانند فیلتر کالمن خطی با استفاده از اندازه گیری‌های کنونی و بهره کالمن متغیرهای سلول در فاز پیش بینی تخمین زده می‌شوند. بنابراین در صورت وجود مدل دقیق از سلول با توجه به وابستگی ولتاژ به حالت شارژ و دمای سطح به دمای داخل می‌توان از ولتاژ و دمای سطح اندازه‌گیری شده سلول در هر گام زمانی فیدبک گرفت و متغیرهای اصلاح شده سلول در فاز اصلاح را بدست آورد. برای درک بهتر الگوریتم و گام‌های لازم در تخمین متغیرهای سلول، می‌توان به مراجع



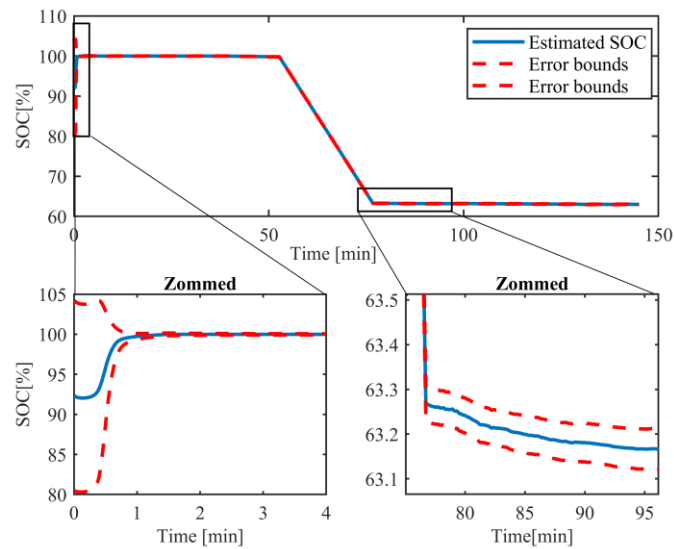
شکل ۱۷. خطای حالت شارژ در تست الکتریکی

Fig. 17. The state of charge estimation error in the electrical test



شکل ۱۶. تخمین حالت شارژ در تست الکتریکی

Fig. 16. The state of charge estimation in the electrical test



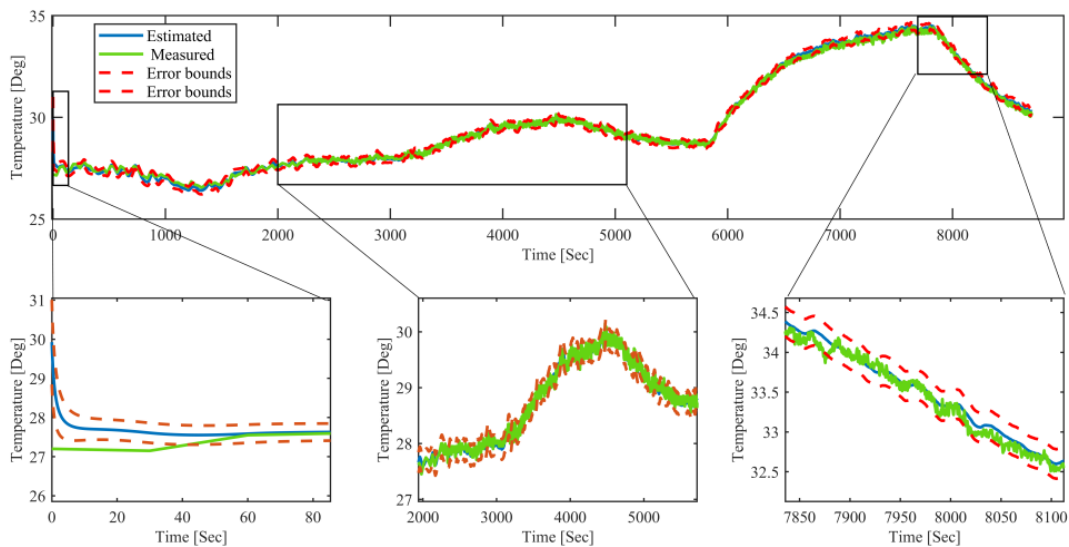
شکل ۱۸. تخمین حالت شارژ در تست حرارتی

Fig. 18. The state of charge estimation in the thermal test

باتری در تست حرارتی را نمایش می دهد. دو نمودار پایینی در شکل ۱۸، رفتار تخمین گر در ابتدا و در هنگام اعمال جریان پالسی را نشان می دهند. به دلیل وجود عدم قطعیت بالا در مقدار اولیه حالت شارژ، بازه خطای بزرگی در یک دقیقه اول به وجود آمده است اما بعد از مدت کوتاهی، بازه خطا کوچک و مقدار اولیه حالت شارژ اصلاح شده است.

شکل ۱۹ دمای سطح تخمین زده شده و دمای اندازه گیری شده توسط

بوجود خطای ۸ درصدی در ابتدای تخمین، حالت شارژ تخمینی به خوبی به حالت شارژ واقعی همگرا شده است. شکل ۱۷ نیز خطای حالت شارژ در طول تست الکتریکی را نمایش می دهد که همواره در بازه خطای محاسبه شده توسط تخمین گر قرار گرفته است. قرار گرفتن خطای متغیرها در داخل بازه خطای تولیدی فیلتر نشان می دهد که فرض گوسی بودن خطای مدل و اندازه گیری برای سلول فرض مطلوبی است. شکل ۱۸ تخمین حالت شارژ



شکل ۱۹. مقایسه دمای سطح اندازه گیری شده و دمای سطح تخمین زده شده توسط تخمین گر

Fig. 19. The comparison of measured surface temperature with estimated temperature by SPKF

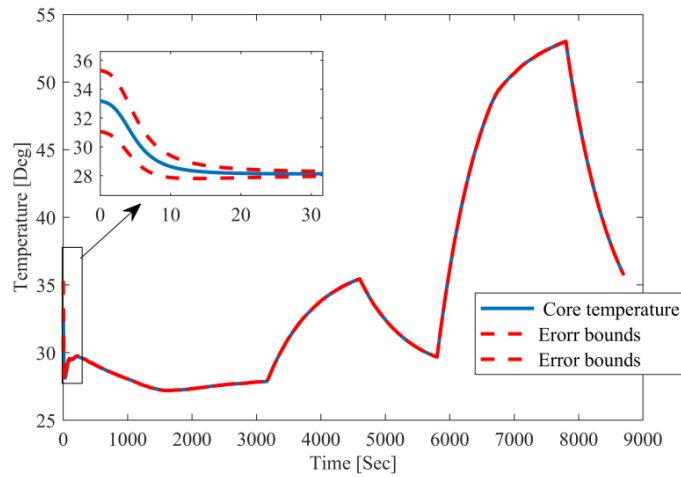
انجام تست به سلول مدت زمان طولانی استراحت داده شده است. در نتیجه انتظار می‌رود که تقریباً دمای سطح و داخل سلول به دلیل ثابت بودن دمای هوای اطراف سلول یکسان باشد. نتایج تخمین دمای داخل در ابتدای تست و همگرایی دمای سطح سلول به دمای اندازه گیری نیز حاکی از توانایی تخمین گر در اصلاح مقادیر متغیرهای حرارتی در صورت وجود خطا در مقادیر اولیه سلول است.

شکل ۲۱ ولتاژ تخمین زده شده در هنگام اعمال پالس‌های مربعی در تست الکتریکی-حرارتی را نشان می‌دهد. باتوجه به شکل ولتاژ اندازه گیری شده همواره داخل بازه خطای تولیدی قرار گرفته است و علی‌رغم خطا در مقادیر اولیه حالت شارژ و تخمین پارامترها به صورت آفلاین ولتاژ تخمین زده شده اختلاف ناچیزی با ولتاژ اندازه گیری دارد. شایان ذکر است که در تخمین گر تمامی متغیرهای حرارتی و الکتریکی سلول مانند جریان دیفیوژن و هیستریزس تخمین زده می‌شوند.

باتوجه به اینکه هیچ مدلی کاملاً ایده آل نیست نمی‌توان انتظار داشت که تنها با استفاده از مدل و به صورت حلقه باز، تخمین دقیقی از متغیرهای سلول به دست آورد. در نتیجه برای پوشش عدم قطعیت‌های موجود مانند خطای اندازه‌گیری و ناشناخته بودن مقادیر اولیه‌ی متغیرهای سلول، طراحی

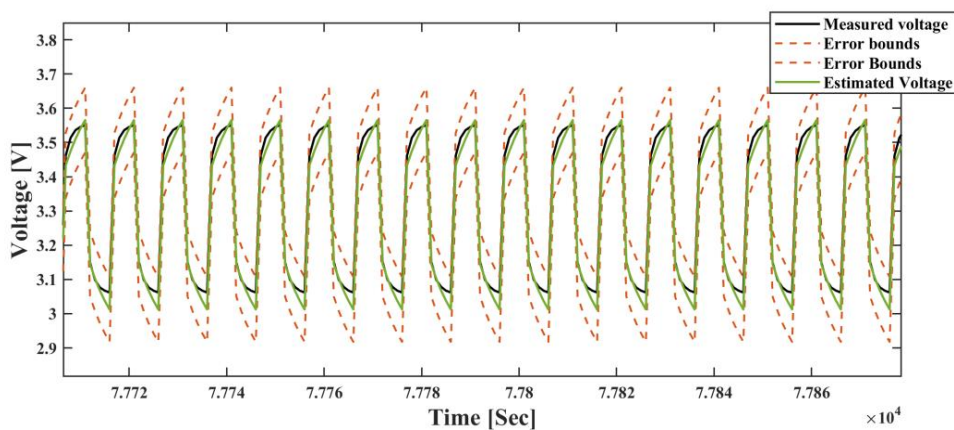
ترموکوپل را در تست حرارتی نمایش می‌دهد. دمای اولیه سطح و داخل باتری ۳۳ درجه فرض شده است. دمای اولیه در نظر گرفته شده با دمای اندازه گیری تقریباً ۵ درجه سانتی‌گراد تفاوت دارد. این تفاوت چشمگیر در صورتی که مرتفع نشود سبب تخمین اشتباه متغیرها در طول زمان خواهد شد. اما تخمین گر سرعت همگرایی مطلوبی دارد و به طوری که بعد از ۴۰ ثانیه دمای تخمین زده شده به سرعت کاهش یافته و دمای اندازه گیری شده در بازه خطای تخمین دمای سطح قرار گرفته است. بعد از گذشت یک دقیقه از تست دمای تخمینی سطح باتری کاملاً دمای اندازه گیری را دنبال کرده است. در ادامه تست هم تخمین گر به خوبی مقدار اندازه گیری را دنبال کرده است و در اکثر مدت زمان تست دمای اندازه گیری در داخل بازه خطا قرار گرفته است و تنها برای لحظاتی کوتاه از بازه خطای سطح خارج شده است.

شکل ۲۰ دما و بازه دمای تخمینی داخل سلول توسط تخمین گر را نشان می‌دهد. در ابتدا تخمین دمای اولیه داخل سلول به اشتباه ۳۳ درجه در نظر گرفته شده است. هرچند که دمای تخمینی به سرعت و بعد گذشت مدت زمانی کوتاه کاهش یافته و در هنگام استراحت سلول در ابتدای تست به مقدار ۲۸ درجه سانتی‌گراد همگرا شده است. شایان ذکر است که قبل از



شکل ۲۰. دمای تخمین زده شده توسط تخمین گر

Fig. 20. The estimated core temperature with SPKF



شکل ۲۱. مقایسه ولتاژ تخمین زده شده و ولتاژ اندازه گیری شده توسط تستر در هنگام اعمال جریان های پالسی

Fig. 21. The comparison of estimated voltage and measured voltage via battery tester when applying square wave current

سلول، حالت شارژ و دمای داخل باتری را تخمین زد. همچنین با تنظیم مناسب پارامترها موجود در تخمین گر می توان سرعت همگرایی بالا را انتظار داشت که در شارژ-دشارژ سریع برای ایمنی سلول به خصوص مدیریت مدل محور سلول بسیار ضروری است.

۴- کنترل پیش بین

در سال های اخیر یکی از کنترلر های پیشرفته ای که در تحقیقات

تخمین گر امری حیاتی است. نتایج تخمین نشان داد که باوجود ترم های غیر خطی در مدل الکتریکی-حرارتی، نویزی بودن دمای اندازه گیری و ناشناخته بودن مقادیر اولیه متغیر ها می توان تخمین مطلوبی از متغیر های سلول بدست آورد. بنابراین برای تخمین متغیر هایی مانند حالت شارژ و دمای داخل سلول که به طور مستقیم با سنسور اندازه گیری نمی شوند می توان با استفاده از تخمین گر سیگماپوینت و ولتاژ و دمای اندازه گیری شده سطح

$$\varphi = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{Np} \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$G = \begin{bmatrix} CB & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & CB & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{Np-1}B & CA^{Np-1}B & \cdots & CA^{Np-Nc}B \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$Y_{k+1} = \varphi X + G \Delta I_{k+1} \quad (33)$$

حال لازم است که برای مسئله بهینه سازی کنترلر تابع هزینه ای تعریف شود تا بتوان ورودی کنترلی بهینه شده را در حضور قيود مساوی یا نامساوی، به کمک برنامه ریزی مربعی یافت. یکی از توابع هزینه مناسب برای مدیریت الکتریکی-حرارتی سلول معادله (۳۴) می باشد.

$$J = (R_{ref} - Y_{z,k+1})^T Q (R_{ref} - Y_{z,k+1}) + \Delta I_{k+1}^T R \Delta I_{k+1} \quad (34)$$

که در آن R_{ref} و $Y_{z,k+1}$ به ترتیب بردارهای حالت شارژ پیش بینی شده و حالت شارژ مرجع هستند. ابعاد این دو بردار بستگی به اندازه افق پیش بینی است. علاوه بر این Q و R وزن های قابل تنظیم هستند که به خوبی تاثیر آن ها در عملکرد کنترلر در مرجع [۱۰] بررسی شده است. تابع هزینه تعریف شده توسط خاویز (معادله ۳۴) براساس تعقیب حالت شارژ سلول است تا سلول را در سریع ترین زمان یا به عبارتی با بیشترین جریان ممکن از یک حالت اولیه به مقدار مرجع در حضور قيود الکتریکی برساند [۱۰]. در نتیجه این کنترلر برای شارژ سریع تک سلولی بسیار مطلوب است. هرچند که لازم است در دشارژ های بحرانی و پروفیل های دینامیکی شارژ-دشارژ نیز مدیریت حرارتی-الکتریکی باتری انجام شود. بنابراین باید کنترلر را به حالت دشارژ نیز تعمیم داد. برای دستیابی به این هدف، تابع هزینه معادله (۳۵) بر اساس تعقیب جریان مرجع نوشته می شود. شاید چنین تابع هزینه ای برای کنترلر پیش بین متداول نباشد اما هدف از تعقیب جریان مرجع آن است که کاربر بتواند جریان یا به عبارتی توان مورد نیاز خود را از باتری تامین

و صنعت توجه ویژه ای به آن شده است کنترلر پیش بین می باشد. یکی از مهمترین دلایل این توجه و موفقیت توانایی اعمال قيود به صورت صریح است. با توجه به اینکه بسیاری از سیستم ها دارای محدودیت های فیزیکی هستند، مقید کردن متغیر های مسئله می تواند نقطه قوتی در طراحی کنترلر باشد. علاوه بر این کنترلر پیش بین دارای مزایای دیگری مانند تعمیم به سیستم های چند متغیره و پیاده سازی آسان برای سیستم های زمان گسسته نیز می باشد [۲۴]. در این قسمت با استفاده از کنترلر پیش بین شارژ سریع باتری و مدیریت در دشارژ و دشارژ با محدودیت های دمایی و الکتریکی در ابعاد سلولی انجام می گیرد. برای اینکه باتری در شارژ سریع و جریان های دشارژ-شارژ بحرانی از نظر ایمنی دچار مشکل نشود نیاز است که ولتاژ، جریان، حالت شارژ و دمای داخل سلول مدیریت شود. همین مسئله سبب می شود که این نوع کنترلر برای مدیریت الکتریکی و حرارتی سلول مناسب باشد.

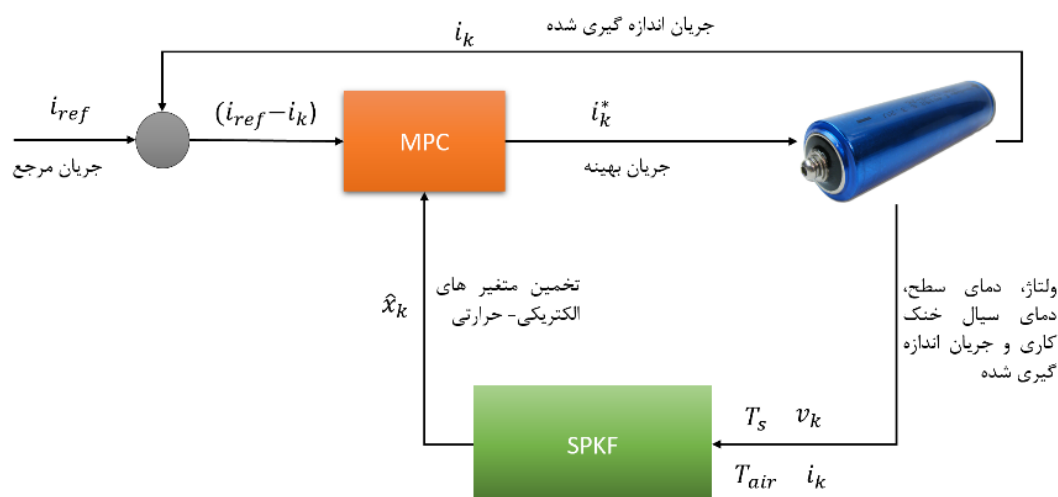
مدل باتری به دلیل وجود مقاومت داخلی، دارای ماتریس D در معادله فضای حالت خود است. در حالی که فرض کنترلر پیش بین استاندارد بر صفر بودن این ماتریس است. برای مرتفع کردن این مشکل می توان ورودی و متغیر ها حالت را الحاق کرد و معادله فضای حالت جدیدی را استفاده نمود [۲۵]. معادلات (۲۸) تا (۳۰) نحوه الحاق کردن متغیر های حالت و ورودی کنترلی را نمایش می دهند.

$$\chi_k = \begin{bmatrix} x_k \\ u_k \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\chi_{k+1} = \begin{bmatrix} A_m & B_m \\ \mathbf{o} & I \end{bmatrix} \chi_k + \begin{bmatrix} \mathbf{o} \\ I \end{bmatrix} \Delta u_{k+1} \quad (29)$$

$$y_k = [C_m \quad D_m] \chi_k \quad (30)$$

اندیس m در معادلات (۲۹) و (۳۰) نشان دهنده معادله فضای حالت اولیه یا استاندارد است که برای سلول لیتیومی معادله (۱۵) خواهد بود. برای یافتن مقدار متغیر های حالت جدید و خروجی تا N_p گام جلوتر نیاز است که از معادله (۲۹) و (۳۰) استفاده شود. φ و G در معادله خروجی پیش بینی به ترتیب برابر با معادلات (۳۱) و (۳۲) خواهند بود. N_c و N_p نیز به ترتیب افق پیش بینی و کنترلی می باشند.



شکل ۲۲. دیاگرام مدیریت حرارتی-الکتریکی سلول در پروفیل های دینامیک شارژ و دشارژ

Fig. 22. The diagram of electrothermal management in charge-discharge profiles

اندازه گیری نمی‌شوند نمی‌توان اطمینان یافت که جریان مرجع دمای داخل سلول را در بازه ایمن حفظ کند. در نتیجه باید کنترلر را به گونه ای طراحی نمود که در صورت بحرانی بودن جریان، در کنار کنترل متغیر درونی سلول، اتلاف توان را نیز به حداقل برساند که این هدف با تابع هزینه معادله (۳۵) قابل انجام است. بنابراین تابع هزینه معادله (۳۵) برخلاف تابع هزینه تعریف شده در معادله (۳۴) در حالت دشارژ یا پروفیل‌های دینامیک شارژ-دشارژ هم قابل استفاده خواهد بود. به طور مثال در تست حرارتی که شامل پالس هایی با دامنه C۲ است، حالت شارژ باتری به طور متوسط تغییرات قابل توجهی ندارد اما جریان پالسی می‌تواند دمای داخل باتری را افزایش داده یا سبب خارج شدن از محدوده ولتاژ تعریف شده شود که نهایتاً منجر به سرعت بخشیدن به سازوکارهای پیر شدن باتری شود. شکل ۲۲ دیاگرامی از نحوه مدیریت شارژ-دشارژ باتری به کمک تابع هزینه (۳۵) را نمایش می‌دهد. متغیرهای حرارتی و الکتریکی باتری توسط تخمین گر تخمین زده می‌شوند. سپس در بلوک کنترلر متغیرهای تخمین زده شده با ورودی کنترلی که جریان و دمای سیال خنک کاری هستند الحاق می‌شود و براساس تابع هزینه و قیود الکتریکی-حرارتی جریان بهینه برای شارژ-دشارژ باتری بدست می‌آید. در صورتی که جریان مرجع سبب خارج شدن ولتاژ و دمای داخل سلول از محدوده ایمن شود. کنترلر جریان اعمالی را محدود خواهد کرد.

برای پیاده سازی کنترلرهای معرفی شده در عمل می‌توان مشابه با فرآیند شرح داده شده در شکل ۴ به کمک منابع مستقیم قابل برنامه نویسی

کند. این تعقیب جریان تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که سلول به یکی از قیود الکتریکی حرارتی برسد، در این حالت کنترلر جریان را محدود خواهد کرد. بنابراین در هنگامی که جریان کشیده شده یا اعمالی به باتری بحرانی نباشد کاربر می‌تواند مورد نیاز خود از سلول را تامین کند.

$$J = (I_{ref} - I_k)^T (I_{ref} - I_k) \quad (35)$$

برای درک مفهوم جریان مرجع در حالت دشارژ، می‌توان موتور الکتریکی را در نظر گرفت که برای تامین توان مورد نیاز خود از یک سلول لیتیومی استفاده می‌کند. بنابراین جریان الکتریکی از سلول برای تامین توان مورد نیاز کشیده می‌شود. در حالت شارژ نیز می‌توان به ترمزهای احيایی اشاره کرد که از توان ترمزی برای شارژ سلول استفاده می‌شود. در نتیجه جریان مرجع مانند یک سیکل رانندگی نهایتاً تابعی از رفتار راننده یعنی فشردن پدال گاز و ترمز خواهد بود. این بدان مفهوم است که موتورهای الکتریکی (برای تامین گشتاور) و ترمزهای احيایی نقش اصلی در شکل گیری ترجکتوری جریان درخواستی یا مرجع را خواهند داشت و کنترلر طراحی شده در قسمت شارژ-دشارژ دینامیک تصمیم گیرنده در ترجکتوری جریان درخواستی نخواهد بود. باتوجه به دشوار بودن پیش بینی رفتار راننده مانند شتاب گیری ناگهانی ممکن است در مقاطعی جریان قابل توجهی از سلول کشیده شود. همچنین به دلیل وجود متغیرهایی از قبیل دمای داخل سلول که مستقیماً با سنسور

یا تستر باتری جریان بهینه یافته شده را به سلول اعمال کرد. پس از تعریف تابع هزینه، لازم است که محدودیت های الکتریکی-حرارتی برای شارژ-دشارژ سلول نیز تعیین شوند. در این مقاله، قیود حاکم بر سلول لیتیوم آهن فسفات به صورت نامساوی های معادلات (۳۶) تا (۳۹) در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که معمولاً طبق محدودیت های تعیین شده توسط شرکت سازنده، برای سلول های لیتیوم آهن فسفات ولتاژ حداکثری ۳/۶ و دمای سلول در فرآیند شارژ ۴۵ یا ۵۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته می شود [۲۶].

$$\begin{aligned} J &= (R_{ref} - \varphi_z X - G_z \Delta I_{k+1})^T \times \\ Q &= (R_{ref} - \varphi_z X - G_z \Delta I_{k+1}) + \Delta I_{k+1}^T R \Delta I_{k+1} \\ H &= R + G_z^T Q G_z \\ g &= -2G_z^T Q (R_{ref} - \varphi_z X) \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} J &= (I_{ref,k} - Cu \Delta I_{k+1} - I_{k-1})^T \\ &\quad \times (I_{ref,k} - Cu \Delta I_{k+1} - I_{k-1}) \\ J &= \frac{1}{2} \Delta I_{k+1}^T \underbrace{2Cu^T Cu}_H \Delta I_{k+1} \\ &\quad + \underbrace{(2I_{k-1}^T Cu - 2I_{ref}^T Cu)}_g \Delta I_{k+1} + const \end{aligned} \quad (41)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} Cu \\ -Cu \\ G_V \\ -G_V \\ G_{Tc} \\ -G_{Tc} \\ G_z \\ -G_z \end{bmatrix}}_E \Delta I_{k+1} \leq \underbrace{\begin{bmatrix} I_{max} - I_{k-1} \\ -I_{min} + I_{k-1} \\ V_{max} - \varphi_v X - OCV_{np} \\ -V_{min} + \varphi_v X + OCV_{np} \\ T_{max} - \varphi_{Tc} X \\ -T_{min} + \varphi_{Tc} X \\ Z_{max} - \varphi_z X \\ -Z_{min} + \varphi_z X \end{bmatrix}}_\gamma \quad (42)$$

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2} \Delta I_{k+1}^T H \Delta I_{k+1} + g^T \Delta I_{k+1} \\ E \Delta I_{k+1} &\leq \gamma \end{aligned} \quad (43)$$

شایان ذکر است که در معادلات فوق $\Delta_k I$ ، نرخ تغییرات جریان است که به عنوان متغیر تصمیم گیری در بهینه سازی مقید در نظر گرفته شده است. برای حل مسئله برنامه ریزی مربعی ارائه شده می توان از جعبه ابزار بهینه سازی متلب و یا از روش های برنامه ریزی مربعی مانند روش هیلدرت استفاده نمود [۲۷].

بنابراین در این بخش با استفاده از مدل باتری و توابع هزینه معرفی شده، کنترل پیش بین برای مدیریت متغیرهای سلول طراحی شد. در بخش ۶ از

یا تستر باتری جریان بهینه یافته شده را به سلول اعمال کرد. پس از تعریف تابع هزینه، لازم است که محدودیت های الکتریکی-حرارتی برای شارژ-دشارژ سلول نیز تعیین شوند. در این مقاله، قیود حاکم بر سلول لیتیوم آهن فسفات به صورت نامساوی های معادلات (۳۶) تا (۳۹) در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که معمولاً طبق محدودیت های تعیین شده توسط شرکت سازنده، برای سلول های لیتیوم آهن فسفات ولتاژ حداکثری ۳/۶ و دمای سلول در فرآیند شارژ ۴۵ یا ۵۰ درجه سانتی گراد در نظر گرفته می شود [۲۶].

$$-25 \leq i_k \leq 25 \quad (36)$$

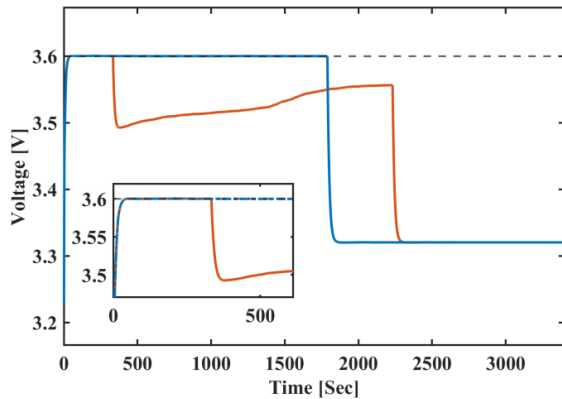
$$2.2 \leq V_k \leq 3.6 \quad (37)$$

$$0.1 \leq z_k \leq 0.9 \quad (38)$$

$$0 \leq T_{c,k} \leq 45 \quad (39)$$

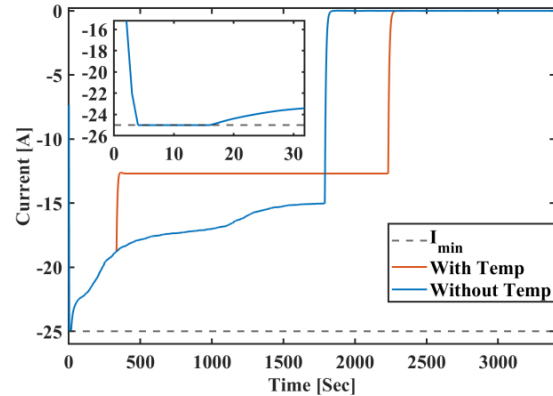
حال در قدم آخر برای طراحی کنترلر و یافتن جریان بهینه کفایت که تابع هزینه و قیود نامساوی تعیین شده به فرم برنامه ریزی مربعی تبدیل شوند. معادلات (۴۰) تا (۴۳) نحوه تبدیل تابع هزینه رابطه (۳۴) به فرم تابع هزینه استاندارد برنامه ریزی مربعی و ماتریس های مربوط به قیود نامساوی مسئله را نشان می دهند. برای بدست آوردن ماتریس های H و g که ماتریس های هسیان و گرادیان برنامه ریزی مربعی را شکل می دهند کفایت که معادله خروجی پیش بینی حالت شارژ را در تابع هزینه معرفی شده در رابطه (۳۴) مطابق معادله (۴۰) جایگذاری کرد. به طور مشابه با جایگذاری معادلات خروجی در نامساوی های (۳۶) تا (۳۹)، قیود نامساوی مسئله برای برنامه ریزی مربعی مطابق معادله (۴۲) بدست می آید. در صورت استفاده از تابع هزینه معادله (۳۵) نیز ماتریس هسیان و گرادیان را می توان مطابق با معادله (۴۱) بدست آورد.

ذکر این نکته لازم است که برای تفکیک معادلات خروجی پیش بینی ولتاژ، حالت شارژ و دمای داخل سلول از پایین نویس های V ، z و T_c در رابطه (۴۲) استفاده شده است. همچنین Cu در معادله (۴۱) و (۴۲) یک ماتریس پایین مثلثی می باشد که ابعاد آن وابسته به افق کنترلی است.



شکل ۲۴. ولتاژ سلول در شارژ سریع با قید دمایی و بدون قید دمایی

Fig. 24. The cell voltage in fast charge problem with and without temperature constraint



شکل ۲۳. جریان اعمالی به سلول با قید دمایی و بدون قید دمایی

Fig. 23. The applied current to the cell with and without temperature constraint

ماکسیمم می‌رسد. در نتیجه برای آنکه ولتاژ سلول از ولتاژ ماکسیمم تعیین شده بالاتر نرود جریان اعمالی به باتری به سرعت به صورت نمایی کاهش می‌یابد. رفتار کنترلر برای هر دو حالت تا این لحظه تقریباً مشابه پروتکل جریان-ثابت ولتاژ-ثابت است. اما با گذشت زمان دمای داخل و سطح سلول افزایش می‌یابد تا اینکه پس از ۳۳۰ ثانیه از زمان شروع شارژ دمای داخل به ۴۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. در حالتی که کنترلر دارای محدودیت دمایی نباشد، جریان بهینه شده مانند جریان در مرحله ولتاژ ثابت است. اما در حالتی که مدیریت حرارتی نیز در کنترلر اعمال شده است، جریان بار دیگر کاهش می‌یابد این کاهش جریان سبب کاهش ولتاژ دینامیک سلول نیز می‌شود. پس طبق شکل ۲۴ ولتاژ سلول هم کمی کاهش پیدا می‌کند و از مقدار ماکسیمم ولتاژ تعیین شده فاصله می‌گیرد. با ادامه دادن به شارژ سلول جریان سلول تقریباً ثابت مانده و ولتاژ سلول برای دومین بار افزایش می‌یابد چرا که حالت شارژ سلول در حال افزایش است پس ولتاژ مدار باز سلول نیز افزایش می‌یابد که خود سهم بزرگی از ولتاژ سلول را شکل می‌دهد. در نهایت طبق شکل ۲۵ هنگامی که سلول به شارژ حداکثری خود رسید جریان اعمالی به باتری به سمت صفر میل خواهد کرد. پس از مدت زمان کوتاهی از شارژ سلول در هر دو حالت، ولتاژ سلول ها به ولتاژ تعادلی خود در هنگام استراحت میل می‌کنند. از شکل ۲۶ می‌توان مشاهده کرد که دمای داخل سلول با وجود سیستم خنک کاری و بدون اعمال محدودیت‌های دمایی، در بیشتر مدت زمان شارژ فراتر از ۴۵ درجه سانتی‌گراد بوده است. این در حالی است که دمای سطح سلول در هر دو حالت، دمای به ظاهر مطلوبی دارند و اعمال

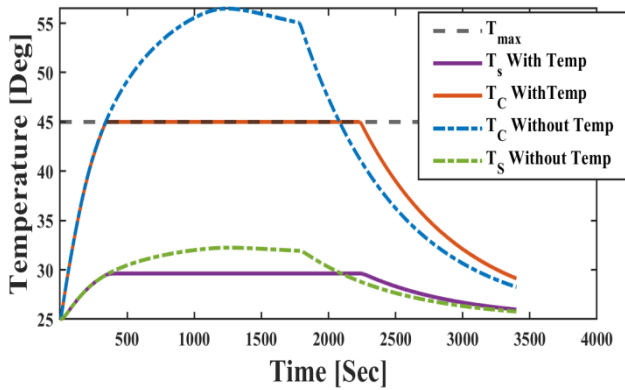
کنترلر طراحی شده در فرآیند شارژ و شارژ-دشارژ سریع برای مدیریت حالت شارژ، جریان، ولتاژ و دمای داخل سلول استفاده می‌شود.

۵- شبیه سازی

برای بررسی عملکرد مدیریت مدل محور طراحی شده در بخش ۵ این بخش دو شبیه سازی انجام می‌شود. در شبیه سازی اول هدف شارژ سریع سلول با مدیریت بر متغیر های الکتریکی و حرارتی سلول است. بنابراین از تابع هزینه معادله (۳۴) برای یافتن جریان بهینه سلول استفاده می‌شود. در شبیه سازی دوم هدف، بررسی کنترلر بر مدیریت متغیر های سلول در پروفیل‌های شارژ و دشارژ است. به همین دلیل از تابع هزینه معادله (۳۵) استفاده می‌شود.

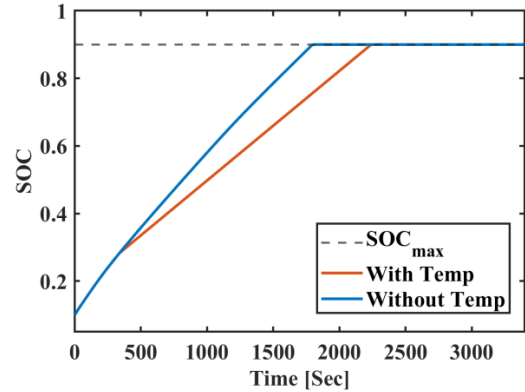
۵-۱- شبیه سازی شارژ سریع

شبیه سازی شارژ سریع با فرض آنکه حالت شارژ اولیه و دمای سطح و داخل سلول به ترتیب ۱۰ درصد و ۲۵ درجه سانتی‌گراد است شروع می‌شود. جریان بهینه شده برای شارژ سلول را در هر گام زمانی توسط کنترلر بدست می‌آید. برای بررسی تاثیر قید دمایی بر جریان بهینه شده و سرعت شارژ، کنترلر یک بار با قید دمایی و بار دیگر بدون محدودیت‌های حرارتی طراحی شده است. پارامتر های قابل تنظیم مانند وزن R برابر با 10^{-4} و افق پیش بینی و کنترلی به ترتیب ۱۰ و ۳ در نظر گرفته شده اند. طبق شکل ۲۳ جریان اعمالی به باتری برای مدت زمان کوتاهی در هر دو حالت با حداکثر جریان تعیین شده شارژ می‌شود اما پس از گذشت ۱۷ ثانیه ولتاژ سلول به ولتاژ



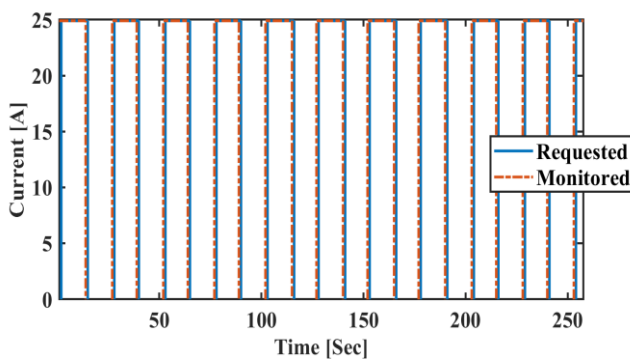
شکل ۲۶. تحولات دمای سلول در شارژ سریع با قید دمایی و بدون قید دمایی

Fig. 26. The evolution of thermal states with and without temperature constraints



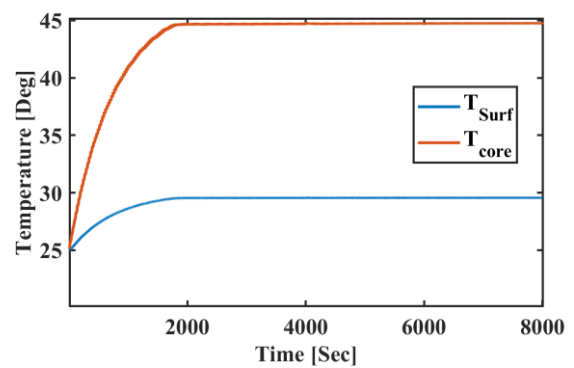
شکل ۲۵. حالت شارژ سلول در شارژ سریع با قید دمایی و بدون قید دمایی

Fig. 25. The state of charge in fast charge problem with and without temperature constraints



شکل ۲۸. تعقیب جریان مرجع در ابتدای شبیه سازی

Fig. 28. The tracking of the reference current at the beginning of simulation



شکل ۲۷. مدیریت دمای سطح و داخل سلول در پروفیل دینامیک

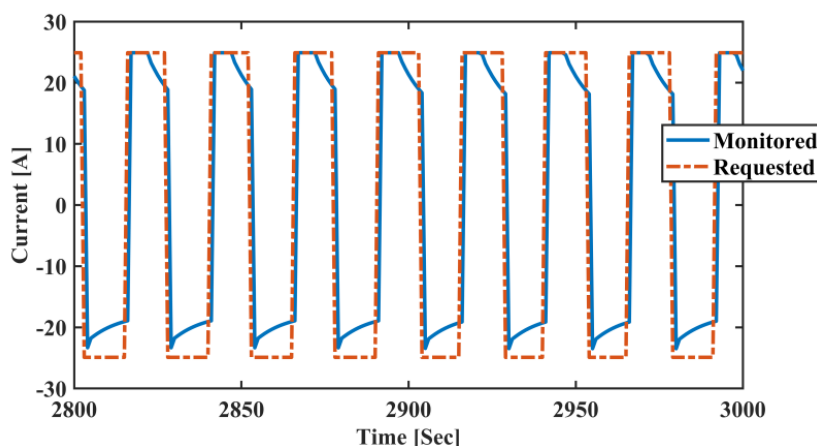
Fig. 27. The temperature management of the cell under dynamic current profile

پالس‌های مربعی با دامنه ۲۵ آمپر برای جریان مرجع استفاده شده است. همچنین فرض شده است که حالت شارژ ابتدایی سلول برابر ۵۰ درصد است. کنترلر مانند آنچه که در دیاگرام شکل ۲۲ توصیف شده است تلاش می‌کند که جریان در خواستی را دنبال کند به همین خاطر در شکل ۲۸ مشاهده می‌شود که جریان نظارت شده توسط کنترلر به خوبی جریان درخواستی را در ابتدای شبیه سازی دنبال کرده است چرا که متغیرهای ترموالکتریکی سلول در محدوده ایمن قرار دارند. هر چند که باتوجه به شکل ۲۷ دمای داخل سلول بعد از ۱۸۰۰ ثانیه به دمای ۴۵ درجه سانتی گراد رسیده است. بنابراین کنترلر برای آنکه دمای داخل سلول افزایش نیابد با حداقل مقدار ممکن از

قید دمای داخلی حداکثر سه درجه سانتی گراد در دمای سطح ایجاد کرده است. اما با تخمین دمای داخل و اعمال محدودیت‌های حرارتی دمای داخل سلول فراتر از قید دمایی نخواهد رفت. البته لازم به ذکر است که اضافه کردن قید دمایی زمان شارژ را تقریباً ۴۰۰ ثانیه افزایش داده است. هر چند که انتظار می‌رود که محدود کردن دمای داخل سلول در شارژ سریع به عمر مفید باتری و ایمنی آن کمک کند.

۵-۲- شبیه سازی فرآیند های شارژ-دشارژ سریع

برای بررسی عملکرد کنترلر در یک حالت بحرانی و شارژ-دشارژ از



شکل ۲۹. محدود کردن جریان اعمالی توسط کنترلر برای مدیریت دمای داخل سلول

Fig. 29. Restricting the applied current by the controller for the cell thermal management

در این مقاله می‌تواند در پژوهش‌های آتی با رفع کاستی‌ها زیر بهبود یابد.
۱- برای کاربرد‌های توان بالا لازم است که چندین سلول در آرایش‌های سری و موازی به یک دیگر متصل شوند. کنترلر مدل محور طراحی شده در این مقاله توانایی مدیریت متغیرهای یک سلول را دارد بنابراین در پژوهش‌های آینده لازم است مدل حرارتی و الکتریکی از ابعاد تک سلولی به ابعاد چند سلولی گسترش یابد.

۲- پارامترهای تخمین زده شده در این مقاله به صورت آفلاین شناسایی شده‌اند. علی‌رغم اینکه مدل تجربی به خوبی توانایی توصیف رفتار الکتریکی و حرارتی سلول را در شرایط آزمایشگاهی دارد در عمل ممکن است عدم قطعیت در برخی از پارامترهای الکتریکی و حرارتی وجود داشته باشد. بنابراین شناسایی پارامترها به صورت آنلاین یا استفاده از کنترل مقاوم در حضور عدم قطعیت پارامترها می‌تواند نگرانی خطا در مدلسازی را کاهش دهد.

منابع

- [1] S.F. Tie, C.W. Tan, A review of energy sources and energy management system in electric vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20 (2013) 82-102.
[2] X. Lin, H. Perez, J. Siegel, A. Stefanopoulou, Robust Estimation of Battery System Temperature Distribution

جریان در خواستی منحرف می‌شود.

۶- نتیجه گیری نهایی

باتوجه به تاثیر دما در طول عمر و ایمنی سلول، طراحی سیستم مدیریت حرارتی مناسب به خصوص در کاربرد‌های توان بالا امری حیاتی است. در این مقاله، راهکار نوینی برای مدیریت حرارتی تک-سلول، در شارژ-دشارژ بحرانی با استفاده از ادغام کنترلر و تخمین‌گر ارائه شده است تا بتوان دمای داخل سلول را در کنار سایر متغیرهای الکتریکی، مدیریت و کنترل کرد. چرا که اکثر روش‌های مدیریت مدل محور سلول تنها بر اساس مدل الکتریکی سلول انجام گرفته است. همچنین بیشتر مدیریت‌های طراحی شده براساس کنترل پیش‌بین تنها در فرآیند شارژ سریع سلول استفاده شده است. بنابراین لازم است که از ویژگی‌های مفید این روش در فرآیند‌های دشارژ هم استفاده کرد. ویژگی مطلوب روش ارائه شده در این پژوهش سبب می‌شود که فرآیند شارژ سلول بر اساس محدودیت‌های الکتریکی-حرارتی آن در حداقل زمان ممکن انجام شود. علاوه براین، مدیریت سلول می‌تواند به فرآیند دشارژ نیز تعمیم یابد. در این پژوهش، نشان داده شد که با ارائه یک تابع هزینه نوین برای کنترلر می‌توان دمای داخل سلول را در پروفیل‌های دینامیک مدیریت کرد و توازن بین توان مورد نیاز و ایمنی سلول ایجاد کرد. بنابراین ادغام کنترل پیش‌بین و تخمین‌گر سیگماپوینت می‌تواند گزینه مناسبی برای مدیریت مدل محور سلول‌ها باشد. البته مدیریت طراحی شده

- implementation of lithium-ion battery cells and packs using reduced-order electrochemical models, University of Colorado at Colorado Springs 2018.
- [13] G. Hwang, N. Sitapure, J. Moon, H. Lee, S. Hwang, J. Sang-Il Kwon, Model predictive control of Lithium-ion batteries: Development of optimal charging profile for reduced intracycle capacity fade using an enhanced single particle model (SPM) with first-principled chemical/mechanical degradation mechanisms, *Chemical Engineering Journal*, 435 (2022) 134768.
- [14] M. Araujo Xavier, A. Kawakita de Souza, K. Karami, G. Plett, M. Trimboli, A Computational Framework for Lithium-Ion Cell-Level Model Predictive Control Using a Physics-Based Reduced-Order Model, 2021.
- [15] A. Kawakita de Souza, M. Trimboli, G. Plett, A Model Predictive Control-Based State of Power Estimation Algorithm Using Adaptive Weighting, 2022.
- [16] S. Sepasi, R. Ghorbani, B.Y. Liaw, Improved extended Kalman filter for state of charge estimation of battery pack, *Journal of Power Sources*, 255 (2014) 368-376.
- [17] G.L. Plett, Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 3. State and parameter estimation, *Journal of Power Sources*, 134(2) (2004) 277-292.
- [18] Y. Ma, Y. Cui, H. Mou, J. Gao, H. Chen, Core Temperature Estimation of lithium-ion Battery for EVs using Kalman Filter, *Applied Thermal Engineering*, 168 (2019) 114816.
- [19] G.L. Plett, *Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling*
- [20] H. He, R. Xiong, H. Guo, S. Li, Comparison study on the battery models used for the energy management of batteries in electric vehicles, *Energy Conversion and Management*, 64 (2012) 113-121.
- [21] X. Lin, H. Perez, J. Siegel, A. Stefanopoulou, Y. Li, D. Anderson, Y. Ding, M. Castanier, Online Parameterization of Lumped Thermal Dynamics in Cylindrical Lithium Ion Batteries for Core Temperature Estimation and Health Monitoring, *Control Systems Technology, IEEE Under Sparse Sensing and Uncertainty, IEEE Transactions on Control Systems Technology*, PP (2019) 1-13.
- [3] X. Feng, M. Fang, X. He, M. Ouyang, L. Lu, H. Wang, M. Zhang, Thermal runaway features of large format prismatic lithium ion battery using extended volume accelerating rate calorimetry, *Journal of Power Sources*, 255 (2014) 294-301.
- [4] C. Forgez, D. Vinh Do, G. Friedrich, M. Morcrette, C. Delacourt, Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery, *Journal of Power Sources*, 195(9) (2010) 2961-2968.
- [5] X. Lin, H.E. Perez, S. Mohan, J.B. Siegel, A.G. Stefanopoulou, Y. Ding, M.P. Castanier, A lumped-parameter electro-thermal model for cylindrical batteries, *Journal of Power Sources*, 257 (2014) 1-11.
- [6] A. Tomaszewska, Z. Chu, X. Feng, S. O'Kane, X. Liu, J. Chen, C. Ji, E. Endler, R. Li, L. Liu, Lithium-ion battery fast charging: A review, *ETransportation*, 1 (2019) 100011.
- [7] Z. Rao, S. Wang, A review of power battery thermal energy management, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9) (2011) 4554-4571.
- [8] K. Chen, W. Wu, F. Yuan, L. Chen, S. Wang, Cooling efficiency improvement of air-cooled battery thermal management system through designing the flow pattern, *Energy*, 167 (2019) 781-790.
- [9] S.A. Khateeb, S. Amiruddin, M. Farid, J.R. Selman, S. Al-Hallaj, Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: experimental validation, *Journal of Power Sources*, 142(1) (2005) 345-353.
- [10] M.A. Xavier, M.S. Trimboli, Lithium-ion battery cell-level control using constrained model predictive control and equivalent circuit models, *Journal of Power Sources*, 285 (2015) 374-384.
- [11] K. Liu, K. Li, C. Zhang, Constrained generalized predictive control of battery charging process based on a coupled thermoelectric model, *Journal of Power Sources*, 347 (2017) 145-158.
- [12] G.H. Florentino, Model predictive control

- Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 98CH36171), IEEE, 1998, pp. 4740-4741.
- [26] N. Thanh Tung, A. Khan, Y. Ko, W. Choi, An Accurate State of Charge Estimation Method for Lithium Iron Phosphate Battery Using a Combination of an Unscented Kalman Filter and a Particle Filter, *Energies*, 13 (2020) 4536.
- [27] C. Hildreth, A quadratic programming procedure, *Naval research logistics quarterly*, 4(1) (1957) 79-85.
- Transactions on, 21 (2013) 1745-1755.
- [22] G.L. Plett, *Equivalent-Circuit Methods*. Artech House, 2015.
- [23] G.L. Plett, Sigma-point Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 2: Simultaneous state and parameter estimation, *Journal of Power Sources*, 161(2) (2006) 1369-1384.
- [24] J.M. Maciejowski, *Predictive control: with constraints*, Pearson education, 2002.
- [25] A. Ordys, A. Pike, State space generalized predictive control incorporating direct through terms, in:

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Adl, A. Taghavipour, F. Torabi, *Introducing a novel strategy to manage lithium-ion cells in fast-charge discharge operations with Model predictive controller*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 55(6) (2023) 677-704.

DOI: [10.22060/mej.2023.21839.7520](https://doi.org/10.22060/mej.2023.21839.7520)

