

تخمین سطح شارژ باتری لیتیوم - یونی با در نظر گرفتن اثرات دمایی

صهیب اژدري

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران sohaibazhdari107@gmail.com

چکیده

باتری‌های لیتیوم - یونی قابلیت بالایی در ذخیره سازی انرژی و توان دارند. به همین دلیل استفاده از آنها در ایستگاه‌های شارژ سریع به عنوان ذخیره ساز انرژی بسیار مرسوم است. با توجه به این امر که باتری یک سیستم بسته است، نمی‌توان به صورت دقیق مقدار توان ذخیره شده در آن را محاسبه کرد. استفاده از شاخصی سطح شارژ باتری این امکان را فراهم می‌آورد تا تخمینی نسبتاً دقیق از میزان توان و انرژی ذخیره شده در باتری وجود داشته باشد. یکی از پرکارترین‌های شیوه‌های تخمین استفاده از فیلتر کالمن و فیلتر H-infinity می‌باشد. مدلسازی، تعیین ظرفیت دقیق باتری و روش تخمین سطح شارژ آن یکی از مهم‌ترین و دشوارترین تکنیک‌ها برای اطمینان از عملکرد کارآمد و ایمن باتری است. از آنجایی که ظرفیت و سطح شارژ باتری به شدت مرتبط هستند، تخمین دقیق سطح شارژ بدون دانستن ظرفیت دقیق باتری دشوار است. در سمت مقابل عملکرد باتری تا حدی به اثرات دمایی نیز وابسته است. استفاده از پارامترهای آفلاین باتری این امکان را فراهم می‌آورد تا الگوریتم علاوه بر سطح شارژ باتری، بتواند تخمینی از دمای باتری را نیز بدست آورد. با تخمین لحظه‌ای دمای باتری می‌توان از این شاخص به عنوان یک سیگنال کنترلی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تخمین سطح شارژ باتری، اثرات دمایی بر باتری، باتری لیتیوم - یونی، فیلتر H-infinity

۱. مقدمه

خودروهای الکتریکی پتانسیل مناسبی جهت کاهش آلودگی هوا و گازهای گلخانه‌ای دارند. افزایش چشمگیر استفاده از خودروهای الکتریکی در سال‌های اخیر، باعث شده است که مسائل و مشکلات آن به صورت همه جانبه مورد بررسی قرار گیرد. هر چند که گروه‌های زیادی و شرکت‌های متعددی مشغول تحقیق و بهبود خودروهای الکتریکی هستند اما این مبحث هنوز نیازمند تکمیل و بهبود است. هدف اصلی این تکنولوژی جدید استفاده از الکتریسیته به عنوان منبع تامین کننده نیرو محرکه خودروهای الکتریکی (EVs) است. چرا که تا چند سال آینده منابع نفت و گازی به شدت کاهش می‌یابند و از سوی دیگر تولید گازهای گلخانه‌ای کاهش می‌یابد و باعث حفظ محیط زیست خواهد شد. اما مسئله‌ای که به توجه ویژه‌ای نیاز دارد، نحوه شارژ کردن باتری‌های خودرو الکتریکی است. برای عملکرد مطلوب باید این باتری‌های لیتیومی در مدت زمان کوتاهی شارژ شوند. همین امر نیازمند تامین توان بالایی است [۱]. در مکان‌هایی که شبکه برق ضعیف باشد، امکان شارژ سریع باتری‌های خودرو الکتریکی وجود ندارد. بنابراین دو راه حل ارائه می‌شود. اول: شارژ کردن باتری بدون در نظر گرفتن زمان، دوم: استفاده از منابع ذخیره ساز انرژی [۲]. منابع ذخیره ساز انرژی به سه بخش عمده تقسیم می‌شوند. استفاده از فلای ویل، بهره گیری از پیل سوختی و یا استفاده از باتری‌های ذخیره ساز انرژی. بنابر نتایج بدست آمده از [۱-۳] استفاده از باتری لیتیوم یونی علاوه بر بازدهی بیشتر، هزینه‌ی کمتری را نسبت به دو دسته‌ی قبل در بر خواهد داشت.

یکی از پرهزینه‌ترین قسمت‌های ایستگاه شارژ، سیستم ذخیره ساز انرژی (BSS) است. باتری‌های استفاده شده در آن از جنس لیتیوم-یون می‌باشند. باتری‌های لیتیومی به دلیل چگالی بالا در ذخیره سازی انرژی و طول عمر بیشتر نسبت به سایر باتری‌ها بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما ایرادی که به آن وارد است، قیمت بالای آن است. به همین دلیل محافظت از باتری‌های BSS در اولویت قرار دارد. یکی از راه‌های مراقبتی استفاده از مبدل‌های الکتریکی ایزوله می‌باشد [۴]. این نوع مبدل‌ها با جدا سازی باس و سیستم ذخیره ساز انرژی از وارد شدن شوک و استرس ولتاژی به باتری‌های لیتیومی جلوگیری می‌کند. در ضمن نباید اجازه داد که باتری‌های لیتیومی بیش از حد شارژ شوند چون طول عمر آنها به شدت کاهش می‌یابد. همچنین باید از خالی شدن بیش از حد آنها نیز جلوگیری کرد. با تعریف شاخصی سطح شارژ (SOC) باتری این مسئله قابل حل است [۵]. روش‌ها و رویکردهای زیادی برای تخمین زدن سطح شارژ باتری وجود دارد. اما با توجه به این موضوع که عملکرد باتری به صورت غیر خطی در حال تغییر است و باتری لیتیومی یک

سیستم بسته می‌باشد، لذا با شبیه سازی عملکرد باتری چندین مدل برای عملکرد باتری ارائه شده است. در حال حاضر می‌توان باتری‌های لیتیومی را هم با برق متناوب و هم با برق مستقیم شارژ کرد [۶]. اما شارژ کردن باتری با جریان مستقیم به زمان کمتری نیاز خواهد داشت. در نهایت طراحی باتری‌ها به سمتی خواهد رفت که عمری طولانی‌تر و عملکردی بهتر داشته باشند. همچنین ظرفیت انرژی و توان بالای خود را حفظ کنند و در هر شرایطی بتوانند در بهترین بازدهی خود عمل کنند. اما متأسفانه در حال حاضر نمی‌توان به تمام این اهداف دسترسی پیدا کرد. چرا که ساختار باتری هنوز محدودیت‌های فراوانی دارد. یکی دیگر از فاکتورهایی که باید مد نظر داشت و تاثیر مستقیم بر عملکرد باتری دارد، دمای محیط است. همچنین مشخصه‌ی دیگری با نام نرخ پر شدن باتری مطرح است. شارژ کردن باتری با جریان بالا می‌تواند به ساختار باتری لطمه وارد کند. به همین دلیل استاندارد تعریف شده است که اجازه می‌دهد باتری حداکثر با ۳ برابر مقدار نرخ تخلیه‌ی آن شارژ شود [۶-۷]. اگر جریان شارژ باتری از مقدار تعیین شده بیشتر باشد باعث تشدید اثرات گرمایی، افزایش تلفات داخلی و کاهش عمر باتری خواهد شد [۸-۹]. برای انجام محاسبات و مدلسازی عملکرد باتری از مدار معادل مرتبه اول آن استفاده می‌کنند. این مدل قابلیت حفظ خواص غیرخطی بودن باتری را دارد. در شکل ۲ شماتیک مدار معادل نمایش داده شده است. بر اساس این مدل سازی، باتری دارای یک ولتاژ مدار باز است که با سطح شارژ آن ارتباط مستقیم دارد. یک مقاومت خروجی برای آن در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای مدلسازی عملکرد غیر خطی آن دو المان با عنوان خازن و مقاومت پلاریزاسیون در نظر گرفته می‌شود. U_1 بیانگر ولتاژ دو سر باتری است. [۱۰]

اندازه گیری سطح شارژ باتری به صورت مستقیم غیر ممکن است. چراکه باتری یک سیستم بسته می‌باشد. به همین دلیل سطح شارژ باتری تخمین زده خواهد شد. سطح شارژ باتری یک مولفه‌ی راهنما است که کمک می‌کند علاوه بر بهره برداری کارآمد، بتوان از باتری نیز محافظت کرد. به صورت کلی شیوه‌های مختلفی برای تخمین سطح شارژ باتری وجود دارد. این شیوه‌ها به چهار دسته عمده تقسیم می‌شوند. اولین دسته، روش مرسوم است. که شامل روش‌های بر اساس آمپر-ساعت و ولتاژ مدار باز می‌شود. دسته دوم، رویکرد غیرخطی نظارگر است. که می‌توان روش‌های رویکرد مود لغزشی و رویکرد انتگرالی-تناسبی اشاره کرد. دسته سوم، فیلترها هستند که می‌توان فیلتر کالمن را به عنوان یکی از شیوه‌های پر کاربرد نام برد. دسته چهارم، شیوه‌های هوش مصنوعی است. به عنوان مثال می‌توان روش‌های شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان اشاره کرد. در میان روش‌های ارائه شده، استفاده از فیلترها به دلیل مقاوم بودن و امکان اصلاح خطا و دقت بالا در

تخمین نسبت به سایر شیوه‌ها، کاربرد بیشتری دارند [۱۱-۱۲]. هدف اصلی الگوریتم، تخمینی قابل اطمینان و دقیق از سطح شارژ باتری است. لذا الگوریتم انتخاب شده برای تخمین سطح شارژ باید با نوع مدلسازی باتری متناسب باشد. واضح است که برای رسیدن به یک نتیجه‌ی مطلوب باید به دو شاخه‌ی مدلسازی باتری و روش تخمین سطح شارژ توجه ویژه داشت. به عنوان مثال استفاده از فیلتر کالمن گسترش یافته بسیار مرسوم است. چراکه تخمینی نسبتاً دقیق از سطح شارژ باتری را بدست می‌آورد و در سمت دیگر امکان اصلاح خطا را دارد. فیلتر کالمن گسترش یافته مناسب برای سیستم‌های خطی است، در حالیکه باتری به شدت عملکردی غیرخطی دارد. همین امر باعث می‌شود تا دقت محاسبات کاهش یابد. فیلتر H-infinity برای تخمین سطح شارژ باتری با چند مدل توسعه داده شده است و از روش احتمال مبتنی بر قضیه بیز برای تعیین وزن‌های بهینه استفاده می‌کند. از آنجایی که مدل باتری یک سیستم غیر خطی قوی است، پارامترهای باتری به راحتی تحت تأثیر عناصر زیادی مانند SOC، دما و نقطه کار قرار می‌گیرند.

۲. یافتن ارتباط بین پارامترهای باتری و سطح شارژ آن

از آنجایی که باتری یک سیستم بسته است، برای یافتن روابط مورد نیاز باید از روش‌های آزمایشگاهی استفاده کرد. مهمترین داده‌ای که به آن نیاز است، ارتباط ولتاژ مدار باز باتری و سطح شارژ آن است. برای اینکار معمولاً آزمایش تخلیه پالسی توصیه می‌شود. (الف) ابتدا باتری به صورت کامل شارژ می‌شود. سپس به مدت یک ساعت در حالت ثابت قرار داده می‌شود. سپس مقدار ولتاژ مدار باز را می‌توان با اندازه گیری ولتاژ ترمینال بدست آورد. (ب). باتری را به مدت ۱۰ ثانیه با جریان ثابت (یک سوم مقدار نرخ تخلیه نامی) تخلیه می‌شود. پس از ۳۰ دقیقه استراحت ولتاژ ترمینال را اندازه گرفته می‌شود. (ج). روند تخلیه ادامه می‌یابد تا ۵ درصد ظرفیت اسمی مصرف شود و پس از یک ساعت استراحت ولتاژ مدار باز اندازه‌گیری می‌شود. (د). مراحل (ب) و (ج) را تا رسیدن به ولتاژ قطع پایین باتری تکرار می‌شود. پس از آزمایش تخلیه پالسی فوق، اندازه گیری ولتاژ مدار باز مربوط به هر نقطه از سطح شارژ باتری جمع آوری شده است. بر اساس داده های آزمایش شده، رابطه OCV-SOC با استفاده از یک مدل چند جمله‌ای قابل بیان است.

به کمک قوانین مداری ابتدا در حلقه‌ی بزرگ مدار با نوشتن KVL رابطه‌ی میان ولتاژها محاسبه خواهد. سپس با نوشتن KCL برای خازن و مقاومت پلاریزاسیون، ارتباط بین متغیر حالت مدار و سایر پارامترها بدست خواهد آمد:

$$U_t = U_{oc} - U_p - I_L R_0 \quad (1)$$

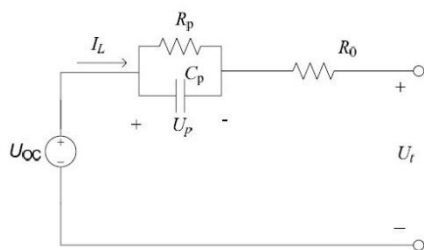
$$I_L = C_p \frac{dU_p}{dt} + \frac{U_p}{R_p} \quad (2)$$

$$\dot{U}_p = \frac{I_L}{C_p} - \frac{U_p}{R_p C_p} \quad (3)$$

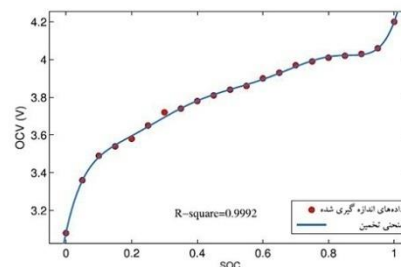
در فرمول ۱ ولتاژ ترمینال باتری (ولتاژ دو سر پایانه‌های باتری)، ولتاژ مدار باز باتری و مقدار ولتاژ پلاریزاسیون به ترتیب با نمادهای U_{oc} ، U_t و U_p نمایش داده شده است. I_L نماد شدت جریان خروجی یا جریان بار است. مقاومت داخلی باتری با نماد R_0 مشخص شده است.

با نوشتن قانون گره برای جریان خازن و مقاومت پلاریزاسیون بر اساس فرمول ۲ برای جداسازی متغیر حالت مدار به فرمول ۳ خواهیم رسید. در اینجا C_p و R_p نماد خازن و مقاومت پلاریزاسیون هستند. یکی از متغیرهای حالت ما ولتاژ پلاریزاسیون است. متغیر حالت بعدی مقدار سطح شارژ باتری است. برای محاسبه‌ی SOC فرمول ۴ ارائه شده است.

$$SOC_t = SOC_{t_0} - \frac{1}{Q_{rate}} \int_{t_0}^t \eta_c I_{L,t} dt \quad (4)$$



ب



الف

شکل ۱ - الف) منحنی تخمین زننده مقدار ولتاژ مدار باز باتری بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده - ب) مدار معادل مرتبه اول باتری

اگر بخواهیم در هر زمانی مقدار سطح شارژ باتری را بدست آوریم یعنی SOC_t بر اساس فرمول ۴ باید عمل کرد. در این فرمول SOC_{t_0} نشان دهنده مقدار اولیه سطح شارژ باتری است. Q_{rate} معرف نرخ تخلیه باتری است. این شاخصه بر اساس نوع باتری متفاوت است. نماد η_c نشان دهنده راندمان کولن است. اما محاسبات در حالت زمان گسسته انجام می‌شود. پس فرمول زمان گسسته محاسبه SOC به صورت زیر قابل تبدیل است:

$$Z_k = Z_{k-1} + \phi i_k \quad (5)$$

$$\frac{\Delta t \times \eta_c}{Q_{rate}} \quad (6)$$

در این فرمول مقدار ϕ ضرب آهنگ تخلیه باتری است که از فرمول ۶ قابل محاسبه است. اما سطح شارژ باتری را در حالت زمان گسسته به صورت Z_k نمایش می‌دهند.

حال معادلات سیستم را در حالت زمان گسسته بازنویسی می‌کنیم تا ماتریس سیستم را بدست بیاوریم. یکی از متغیرهای حالت ولتاژ خازن پلاریزاسیون باتری است. متغیر حالت دیگر سطح شارژ باتری می‌باشد. بر این اساس ماتریس سیستم یک ماتریس دو در دو خواهد بود. همچنین جریان بار می‌توان به عنوان ورودی در نظر گرفت. اگر اغتشاش را در سیستم اثر دهیم به فرمول ۷ خواهیم رسید.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= f(x_k, I_{L,k}) + w_k \\ y_k &= h(x_k, I_{L,k}) + v_k \end{aligned} \quad (7)$$

در معادلات ۷ متغیرهای حالت در ماتریس X تعریف می‌شوند که $x = [SOC, U_p]^T$ می‌باشد. همچنین بردارهای w_k و v_k نماد اغتشاشات وارده به سیستم هستند. خروجی سیستم با نماد y_k نمایش داده می‌شود. خروجی در مدار همان ولتاژ ترمینال باتری می‌باشد.

$$f(\cdot) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{\frac{\Delta t}{\tau_p}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC_k \\ U_{p,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\eta_c \Delta t}{Q_{rate}} \\ R_p(1 - e^{\frac{\Delta t}{\tau_p}}) \end{bmatrix} I_{L,k} \quad (8)$$

اگر معادلات ۷ را به صورت ماتریسی بازنویسی کنیم، تابع f به صورت ۹ تعریف خواهد شد. پس از جداسازی ماتریس‌های سیستم و ورودی در فرمول ۱۱ نمایش داده شده‌اند.

$$h(\cdot) = U_{oc}(SOC_k) - U_{p,k} - I_{L,k} R_0 \quad (9)$$

بخش معادلات خروجی نیز به صورت فرمول ۹ خواهد بود. باید دقت داشت که ضریب k در این روابط نشان دهنده‌ی متغیر در زمان k می‌باشد. چراکه سیستم به صورت زمان گسسته تعریف می‌شود. بنابر محاسبات بالا:

جدول ۱ - ماتریس‌های سیستم تشکیل شده برای تخمین SOC

$A_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta t}{\tau_p}} \end{bmatrix}$
$B_k = \begin{bmatrix} -\frac{\eta_c \Delta t}{Q_{rate}} & R_p (1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_p}})^T \end{bmatrix}$
$C_k = [1 \quad \frac{\partial U_{oc}}{\partial SOC}]$
$D_k = R_0$
مجموعه روابط ۱۰

ماتریس‌های سیستم، ورودی، خروجی و پیشرو به صورت بالا تعریف می‌شوند. در این محاسبات مقدار Δt سمپل زمانی در نظر گرفته می‌شود. همچنین مقدار τ_p برابر است با $R_p C_p$. مقدار $U_{oc}(SOC_k)$ به کمک آزمایش‌های انجام شده محاسبه می‌گردد.

۳. پیاده سازی الگوریتم *H-infinity*

یکی از مشهورترین این الگوریتم‌ها، الگوریتم فیلتر کالمن است. زمانی که از مدل خطی برای شبیه سازی باتری استفاده شود، فیلتر کالمن یک راه حل ایده‌آل است. اما مقاومت داخلی باتری دارای ویژگی غیرخطی است. برای شبیه سازی مدل غیرخطی باتری از الگوریتم فیلتر کالمن گسترش یافته استفاده می‌کنند. اگر میزان غیرخطی بودن مدل زیاد باشد باید از فیلتر کالمن تطبیقی شده استفاده خواهد شد. از طریق مدل مدار معادل، بدست آوردن U_{ocv} از طریق اندازه گیری I و U_t آسان است، سپس SOC را می‌توان به راحتی تخمین زد. با این حال، سنسور ولتاژ و سنسور جریان هر دو دارای خطا هستند و به دلیل تداخل نویز محیط ناپایدار می‌شوند. برای افزایش دقت اندازه گیری سنسورها، استفاده از الگوریتم‌های فیلتر ضروری است. کالمن تخمین‌گری است که واریانس حالت را به حداقل می‌رساند، اما نیاز دارد که مقادیر مورد انتظار نویز حالت w_k و نویز اندازه‌گیری v_k صفر باشد و واریانس‌های w_k و v_k باید دقیقاً مشخص شوند. این در کاربردهای

عملی غیر واقعی است. برای حل مسئله فیلتر H-infinity تابع هزینه J را به صورت زیر تعریف می‌کند:

$$J = \frac{\sum_{k=0}^{t-1} \|SOC_k - \widehat{SOC}_k\|_{S_k}^2}{\|x_0 - \hat{x}_0\|_{P_0}^2 + \sum_{k=0}^{t-1} \left(\|w_k\|_{Q_k}^2 + \|v_k\|_{R_k}^2 \right)} \quad (11)$$

$$J < \frac{1}{\theta} \quad (12)$$

که در آن S_k ، P_0 ، Q_k ، R_k در هنجارهای وزنی به صورت دستی تنظیم می‌شوند. به جای به حداقل رساندن J از مرز عملکرد q برای کاهش سختی مسئله استفاده می‌شود و به صورت تعریف می‌شود. جایی که q توسط کاربر تعریف شده است. تحت شرط معادله (۱۲)، الگوریتم می‌تواند حداکثر خطای تخمین را به حداقل برساند. فرآیند تکراری H-infinity در جدول ۱ نشان داده شده است. بدیهی است که وقتی همه حالت‌ها ($L_k=I$) در نظر گرفته می‌شوند، همه خطاهای تخمین وزن یکسانی دارند ($S_k=I$) و مرز عملکرد q صفر است، فیلتر H-infinity تبدیل به کالمن می‌شود. برای تخمین SOC سیستم باتری، مقادیر حالت SOC و ولتاژ U_p در سراسر حلقه RC هستند، در حالی که مقادیر اندازه‌گیری U_t و I هستند. در واقع، پیشرفت فیلتر ترکیبی از کمیت‌های حالت و کمیت‌های اندازه‌گیری است، در طول فیلتر کردن، مقدار واقعی وضعیت فعلی را می‌توان با مراجعه به وضعیت سری زمانی قبلی و نتایج اندازه‌گیری شده در این لحظه پیش‌بینی کرد.

ماتریس‌های Q و S به صورت دستی وارد معادله خواهند شد. ماتریس‌های اغتشاش و مقدار نرخ تخلیه باتری جزو پارامترهایی هستند که باید بر اساس داده‌های آزمایشگاهی نوشته شوند. لذا در هر قسمت از تحقیق متفاوت خواهند بود. برای جلوگیری از سردرگمی، در بخش تحلیل نتایج مقادیر فوق مشخص شده‌اند. در این الگوریتم مقادیر δ_x و S_k^x به ترتیب یک ضریب خطا و ماتریس خطا است که به محاسبات اضافه می‌شود. این مقادیر به نوعی نقش w_k را در محاسبات دارند. همچنین Q_k^x ماتریس خطا است که به محاسبات اضافه می‌گردد تا اثرات اغتشاش وارده به سیستم نیز لحاظ گردد.

با توجه به این که طراحی تخمینگر سطح شارژ در این پژوهش ارتباط مستقیمی با نحوه شارژ شدن باتری دارد، لذا در الگوریتم یک سطح کنترلی بالاتر را معرفی کردیم. این واحد کنترلی دستوراتی مانند حالت شارژ، حالت دشارژ، مقدار جریان خروجی، مقدار جریان ورودی و ... را به

واحد کنترلی تخمینگر سطح شارژ انتقال می‌دهد. به دلیل پیچیدگی طراحی واحد کنترلی سطح بالاتر، دستورات لازمه به صورت دستی هنگام شبیه سازی وارد می‌شوند.

جدول شماره ۲ – عملکرد فیلتر H -Infinity برای تخمین سطح شارژ باتری

$\begin{bmatrix} SOC_k \\ U_{P_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & e^{\frac{\Delta t}{\tau_p}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC_{k-1} \\ U_{P_{k-1}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\eta_c \Delta t}{Q_{rate}} \\ R_p(1-e^{\frac{\Delta t}{\tau_p}}) \end{bmatrix} I_{k-1} + w_k$	تشکیل معادله
$y(k) = U_{oc}(SOC_k) - U_P(k) - R_o I(k)$	تشکیل معادله اندازه گیری
$\hat{x}_0^+ = E(x_0)$ $P_0^{x,+} = E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T]$	مقدار دهی اولیه
$\hat{x}_k^- = A_k x_{k-1} + B_k i_k$ $P_k^{x,-} = A_k P_{k-1}^{x,+} A_k^T + Q_k^x$	شروع به کار حلقه
$e_k^x = y_k - h(x_k^-)$ $K_k^x = P_k^{x,-} (I - \delta_x S_k^x P_k^{x,-} + (C_k^x)^T (R_k^x)^{-1} C_k^x P_k^{x,-})^{-1} (C_k^x)^T (R_k^x)^{-1}$ $\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + A_k K_k^x e_k^x$ $P_k^{x,+} = P_k^{x,-} (I - \delta_x S_k^x P_k^{x,-} + (C_k^x)^T (R_k^x)^{-1} C_k^x P_k^{x,-})^{-1}$	محاسبات خطا و تخمین سطح شارژ باتری

۳. بررسی اثرات دمایی بر باتری

یک مدل حرارتی برای محاسبه افزایش دما در طول شارژ ایجاد شده است. در این تحقیق دمای سطح به عنوان دمای باتری در نظر گرفته شده و یکنواخت فرض شده است. معادله تعادل حرارتی باتری را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$mC \frac{dT_s}{dt} = Q_g - Q_d \quad (13)$$

اگر جرم باتری را با m بر حسب گرم باشد، C نیز نشان دهنده‌ی ظرفیت گرمایی باتری باشد ($Jg^{-1}K^{-1}$) و میانگین دمای سطح باتری بر حسب کلونین نمایش داده شود (T_s) مقادیر Q_d و Q_g به ترتیب نماد تولید گرما و تلفات باتری می‌باشد. هر دو این مقادیر بر حسب وات اندازه گیری می‌شوند. تولید گرما شامل دو بخش است: تولید گرمای برگشت ناپذیر و تولید گرمای برگشت پذیر. اولی گرمای ژول نامیده می شود و دومی گرمای تغییر آنتروپی است. بر این اساس از فرمول ۱۴ می‌توان مقدار Q_g را محاسبه کرد:

$$Q_g = I(U_{oc} - U_l) - IT_s \frac{\partial U_{oc}}{\partial T_s} \quad (14)$$

مقدار جریان با I مشخص می‌شود. مقدار $\frac{\partial U_{oc}}{\partial T_s}$ مشخص کننده‌ی ضریب آنتروپی است. لذا - مقدار $IT_s \Delta S / nF$ برای محاسبه تغییر آنتروپی تولید گرما استفاده می شود. که در آن ΔS تغییر آنتروپی و n تعداد الکترون ها است. F ثابت فارادی است که برابر است با: $96486 C mol^{-1}$. با دانستن ΔS $nF.dU_{oc}/dT_s$ = ترم دوم معادله ۱۴ قابل محاسبه است. مقدار ولتاژ مدار باز باتری رابطه‌ی مستقیم با سطح شارژ آن دارد. منحنی ضریب تغییر آنتروپی با مراجعه به روش ذکر شده در [۱۳] قابل دریافت است. بخش اتلاف گرما فقط همرفت را در نظر می گیرد و قسمت تابش در این مطالعه نادیده گرفته می شود. عبارت در معادله نشان داده شده است.

$$Q_d = hA(T_s - T_a) \quad (15)$$

در معادله ۱۵ نماد h نشان دهنده ضریب انتقال حرارت است. واحد آن ($Wm^{-2}K^{-1}$) می‌باشد. $T_s(K)$ میانگین دمای سطح باتری و $T_a(K)$ دمای محیط و $A(m^2)$ مساحت سطح سلول باتری است. می‌توان با ارائه ضریب دمایی، هنگامی که الگوریتم فیلتر $H-infinity$ در حال تخمین سطح شارژ است اثرات دمایی را نیز در الگوریتم لحاظ کرد.

۴. شبیه سازی اثرات دمایی

توان تلف شده در باتری به دو بخش تقسیم می‌شود. اول تلفات ناشی از مقاومت درونی باتری. دوم تلفات برگشت پذیر که مربوط به ساختار باتری است [۱۴]. یکی دیگر از تلفاتی که باید در نظر گرفت، تلفات ناشی از همرفت گرما می‌باشد.

$$mCdT/dt = Q_s + Q_o + Q \quad (16)$$

$$Q_s = T\Delta S I/n_{re}F \quad (17)$$

$$Q = hA(T-T_{amb}) \quad (18)$$

$$Q_o = I^2R_o + U_p^2/R_p \quad (19)$$

در روابط ۱۶ تا ۱۹ تمامی تلفات لحاظ شده است. مقدار m جرم باتری است. C ظرفیت گرمایی ویژه باتری است. T نشان دهنده دمای کار باتری است بر حسب کلوین، Q_s تلفات برگشت پذیر است. Q_o تلفات انرژی است و Q تبادل گرمایی و T_{amb} دمای محیط می باشد. ΔS تغییرات آنتروپی، I جریان شارژ باتری، n_{re} تعداد مول الکترون های جابه جا شده است. F ثابت فارادی، R_o مقاومت درونی باتری و R_p و U_p به ترتیب نشان دهنده مقاومت و ولتاژ پلاریزاسیون باتری است. بر اساس روابط بالا می توان دمای باتری را در هر لحظه به کمک رابطه ی ۲۰ محاسبه کرد [۱۴].

$$T_k = \exp(-hA/mC)T_{k-1} + [1-\exp(-hA/mC)]\frac{Q_{o,k}+Q_s+hAT_{amb}}{hA} \quad (20)$$

۵. نتایج و تحلیل آن

در مقاله [۱۵] باتری به صورت مدار معادل مرتبه اول مدلسازی شده است. مقاومت درونی باتری، خازن و مقاومت پلاریزاسیون. در این مقاله داده ها به صورت *offline* استخراج شده اند که در جدول ۲ نمایش داده شده است. مدل باتری مورد آزمایش SAMSUNG ICR18650 می باشد. جنس باتری لیتیوم-یونی است. ولتاژ نامی آن ۳.۶۳ ولت و ظرفیت اسمی آن نیز برابر ۲۶۰۰ میلی آمپر ساعت می باشد. بنابر آزمایش انجام داده شده شکل ۱-الف نشان دهنده ارتباط سطح شارژ باتری و ولتاژ مدار باز آن است. بر اساس ابزار *cftool* نرم افزار متلب تابعی که برای این داده ها استخراج می شود.

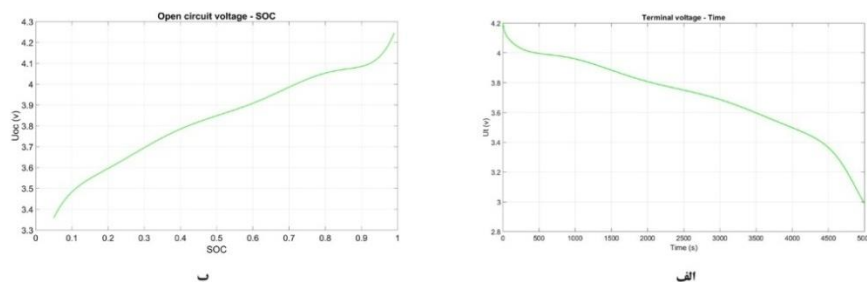
در این شبیه سازی سطح شارژ باتری برابر ۱ قرار داده می شود. مقدار ولتاژ ترمینال باتری برابر ۴.۲ ولت است و شدت جریان خروجی از باتری برابر ۰.۶۵ آمپر در نظر گرفته می شود. اغتشاش در نظر گرفته برای این آزمایش $\text{diag}(10^{-6}, 0.1)$ می باشد. در شکل ۲ تغییرات ولتاژ ترمینال (خروجی) باتری هنگام تخلیه شدن را نمایش می دهد. نتایج بدست آمده از شبیه سازی در شکل ۳-الف نشان

می‌دهد که الگوریتم قادر است مقدار سطح شارژ باتری را با دقت بالایی تخمین بزند. با توجه به این موضوع که ولتاژ خازن (پلاریزاسیون) و سطح شارژ باتری به عنوان متغیر حالت در نظر گرفته شده‌اند و در عمل امکان اندازه‌گیری آنها وجود ندارد، از ولتاژ ترمینال به عنوان سیگنال فیدبک استفاده می‌شود. چراکه ترمینال باتری در در دسترس است و اندازه‌گیری ولتاژ آن تنها به یک ولت متر نیاز دارد. ولتاژ خروجی باتری زمانی اهمیت پیدا می‌کند که در لایه کنترلی بالایی عمل متعادل‌کنندگی میان سلول‌ها انجام شود.

جدول ۳ - مقادیر اندازه‌گیری شده برای پارامترهای باتری در SOC متفاوت [۱۶]

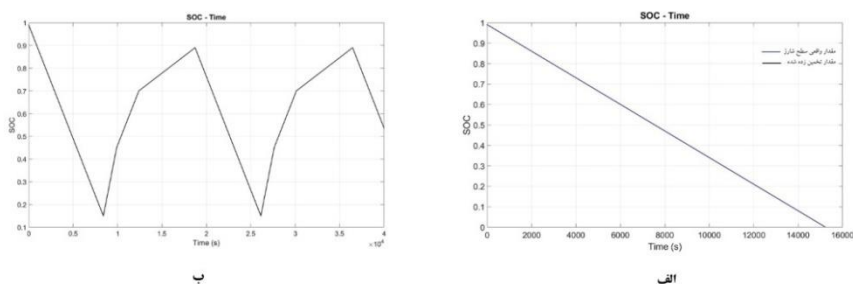
SOC	1	0.95	0.9	0.85	0.8	0.75	0.7	0.65	0.6	0.55
$Ro(m\Omega)$	79.7	19.48	19.59	19.25	19.03	19.11	18.57	18.6	18.58	19.26
$Rp(m\Omega)$	26.7	23.32	22.39	23.65	24.34	26.58	28.43	27.8	28.85	27.11
$Cp(F)$	620	836	1105	1003	946	833	638	723	647	604
SOC	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05
$Ro(m\Omega)$	19.6	19.37	19.09	19.42	20.04	20.11	20.09	20.6	21.09	21.48
$Rp(m\Omega)$	22.5	25.63	28.70	24.23	21.76	22.09	21.02	21	28.46	26.53
$Cp(F)$	999	1013	978	888	804	757	877	843	789	906

در شکل ۴-الف تغییرات ولتاژ مدار باز باتری بر حسب سطح شارژ آن در سه دمای مختلف نشان داده شده است. پس از تخمین سطح شارژ باتری و اطمینان از عملکرد مطلوب الگوریتم می‌توان اثرات گرمایی را نیز شبیه‌سازی کرد. به همین منظور در سه دمای متفاوت باتری مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در هر باز آزمایش سعی می‌شود دمای باتری ثابت نگه داشته شود تا هنگام شبیه‌سازی و جمع‌آوری داده‌ها، تغییرات ناشی از دما قابل تشخیص باشد.



شکل ۲ - الف) ولتاژ خروجی باتری بر اساس سطح شارژ - ب) مقدار ولتاژ مدار باز باتری بر اساس سطح شارژ آن

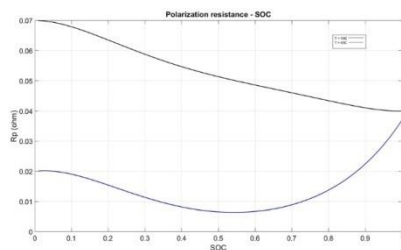
با تغییر دما پارامترهای باتری دستخوش تغییراتی می‌شوند. البته که میزان تغییرات پارامترهای باتری به سطح شارژ باتری نیز وابسته است. لذا می‌توان بر اساس روابط بدست آمده برای پارامترهای باتری نیز ضرایب دمایی تعریف کرد. در شکل ۴-ب می‌توان تغییرات مقاومت پلاریزاسیون را نسبت به سطح شارژ باتری در دو دمای متفاوت مشاهده کرد. به کمک روابط ۱۶ تا ۲۰ تاثیرات گرمای تلف شده در باتری را بررسی خواهد شد. در شکل ۵-الف توان تلف شده در مقاومت درونی و مقاومت پلاریزاسیون باتری شبیه سازی شده است. بر اساس نتیجه‌ی بدست آمده، مقدار گرمایی که هنگام تخلیه شارژ باتری تولید می‌شود، دمای باتری را در حد ۰.۱ درجه سانتی گراد تغییر خواهد داد. این مقدار قابل چشم پوشی است.



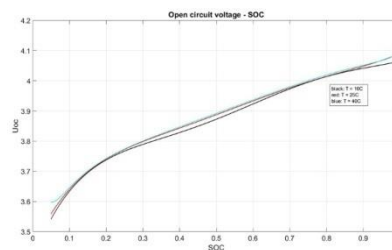
شکل ۳ - الف) نمودار سطح شارژ باتری بر حسب زمان هنگام تخلیه باتری - ب) سطح شارژ باتری هنگام تخلیه و شارژ سریع با جریان پله‌ای

زمانی که باتری در حالت شارژ شدن قرار دارد، باتوجه به الگوریتم پیشنهاد شده برای شارژ که بر اساس جریان ثابت چند پله‌ای است؛ در زمان شروع فرآیند جریان زیادی به باتری منتقل می‌شود. در شکل ۳-ب می‌توان تغییرات سطح شارژ باتری را در طول زمان شارژ و تخلیه باتری مشاهده

نمود. این امر باعث افزایش تلفات درونی باتری می‌شود. پس از رسیدن سطح شارژ باتری به حد معینی، شدت جریان به صورت پله‌ای کاهش می‌یابد.



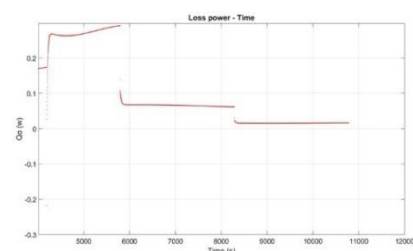
ب



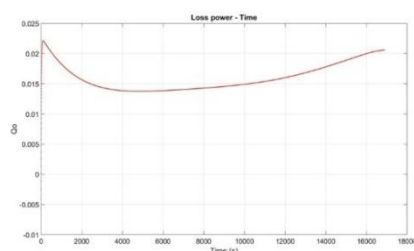
الف

شکل ۴ - الف) تغییرات ولتاژ مدار باز باتری بر حسب سطح شارژ باتری در سه دمای ۱۰ درجه (مشکی) ۲۵ درجه (قرمز) و ۴۰ درجه سانتی گراد (آبی) - ب) تغییرات مقاومت پلاریزاسیون باتری هنگام شارژ شدن باتری در دمای ۱۰ درجه (مشکی) و ۴۰ درجه سانتی گراد (آبی)

در شکل ۵-ب و ۶ توان تلف شده در باتری هنگام شارژ شدن نمایش داده شده است. بنابر روابط ۱۹ تا ۲۳ تغییرات دمای باتری هنگام شارژ شدن حدود ۰.۶ درجه خواهد بود. لذا اثر گرمایی بر سیستم هنگام شارژ شدن قابل چشم پوشی نیست. هنگامی که باتری در حالت تخلیه قرار دارد، بر اثر گذر زمان و تلفات ناشی از اهمی باتری، مقدار انرژی گرمایی تولید می‌شود. این انرژی رفته رفته روی سیستم اثر گذار خواهد بود.



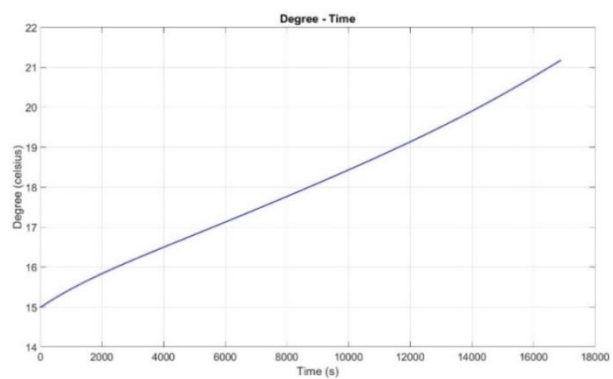
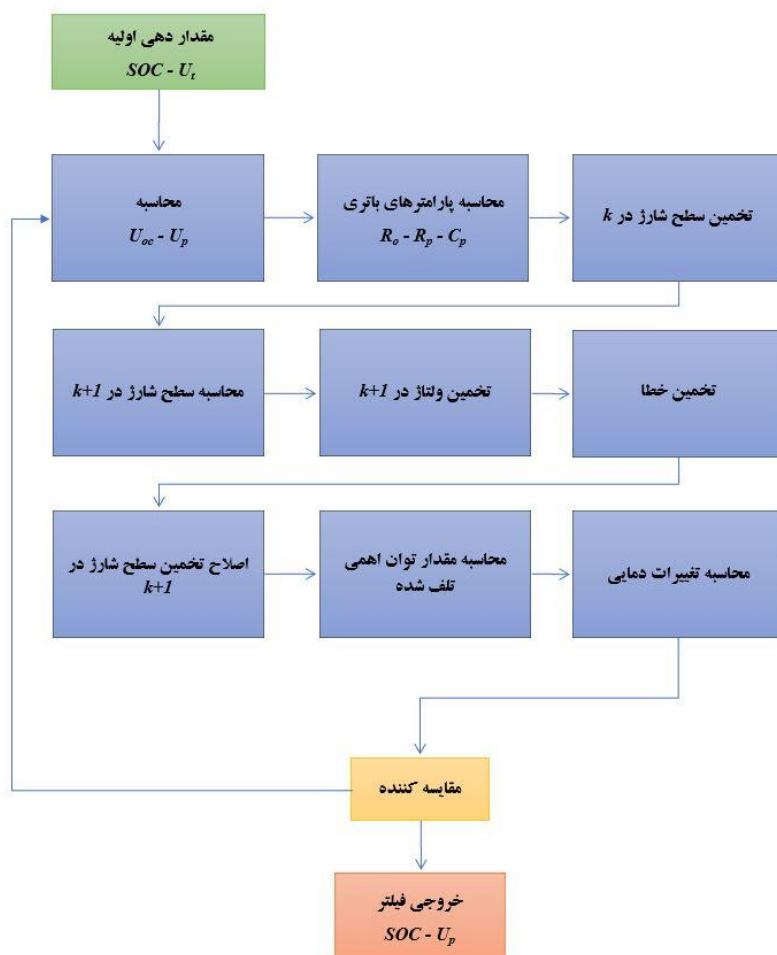
ب



الف

شکل ۵ - الف) توان تلف شده در مقاومت درونی و مقاومت پلاریزاسیون باتری هنگام تخلیه باتری - ب) تلفات اهمی باتری هنگام شارژ شدن

جدول ۴ - نحوه عملکرد الگوریتم پیشنهادی



شکل ۶ - تغییرات دمای باتری هنگام تخلیه با جریان ثابت

۶. نتیجه گیری

ابتدا با تشکیل الگوریتم پیشنهادی که در جدول ۴ قابل مشاهده است تلاش شد تا با حذف یک حلقه درونی، میزان محاسبات کاهش یابد. برای این کار لازم بود تا پارامترهای باتری به صورت offline محاسبه شوند. سپس به کمک آزمایش تخلیه پالسی ارتباط بین ولتاژ مدار باز باتری و سطح شارژ آن مشخص شد. با فرمول بندی اثرات دمایی و اعمال آن در الگوریتم مشاهده شد که گرچه پارامترهای باتری تحت تاثیر تغییر دما هستند اما در نتیجه‌ی نهایی (تخمین سطح شارژ باتری) تغییر چندانی حاصل نمی‌شود. اما زمانی که باتری در فرآیند شارژ سریع قرار دارد ممکن است که تحت تاثیر اثرات دمایی عملکرد آن همراه با تغییراتی باشد. لذا با تخمین دمای باتری سعی می‌شود تا همواره باتری در بازه‌ی عملکردی مطلوب قرار گیرد.

منابع

1. Rafi, Md Ahsanul Hoque, and Jennifer Bauman. "A Comprehensive Review of DC Fast-Charging Stations With Energy Storage: Architectures, Power Converters, and Analysis." *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 7, no. 2 (2020): 345-368.
2. Tu, Hao, Hao Feng, Srdjan Srdic, and Srdjan Lukic. "Extreme fast charging of electric vehicles: A technology overview." *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 5, no. 4 (2019): 861-878.
3. Mahfouz, Mostafa M., and M. Reza Iravani. "Grid-integration of battery-enabled dc fast charging station for electric vehicles." *IEEE Transactions on Energy Conversion* 35, no. 1 (2019): 375-385.
4. Vishnu Mahadeva, Srinivas Gulur, Ghanshyamsinh Gohil, and Subhashish Bhattacharya. "An approach towards extreme fast charging station power delivery for electric vehicles with partial power processing." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 67, no. 10 (2019): 8076-8087.
5. Ashique, Ratil H., Zainal Salam, Mohd Junaidi Bin Abdul Aziz, and Abdul Rauf Bhatti. "Integrated photovoltaic-grid dc fast charging system for electric vehicle: A review of the architecture and control." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69 (2017): 1243-1257.
6. García-Triviño, Pablo, Juan P. Torreglosa, Luis M. Fernández-Ramírez, and Francisco Jurado. "Control and operation of power sources in a medium-voltage direct-current microgrid for an electric vehicle fast charging station

- with a photovoltaic and a battery energy storage system." *Energy* 115 (2016): 38-48.
7. Wang, Shuoqi, Languang Lu, Xuebing Han, Minggao Ouyang, and Xuning Feng. "Virtual-battery based droop control and energy storage system size optimization of a DC microgrid for electric vehicle fast charging station." *Applied Energy* 259 (2020): 114146.
 8. Tomaszewska, Anna, Zhengyu Chu, Xuning Feng, Simon O'Kane, Xinhua Liu, Jingyi Chen, Chenzhen Ji et al. "Lithium-ion battery fast charging: A review." *ETransportation* 1 (2019): 100011.
 9. Yin, Yilin, Yang Hu, Song-Yul Choe, Hana Cho, and Won Tae Joe. "New fast charging method of lithium-ion batteries based on a reduced order electrochemical model considering side reaction." *Journal of Power Sources* 423 (2019): 367-379.
 10. Turksoy, Arzu, Ahmet Teke, and Alkan Alkaya. "A comprehensive overview of the dc-dc converter-based battery charge balancing methods in electric vehicles." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 133 (2020): 110274.
 11. Charkhgard, Mohammad, and Mohammad Farrokhi. "State-of-charge estimation for lithium-ion batteries using neural networks and EKF." *IEEE transactions on industrial electronics* 57, no. 12 (2010): 4178-4187.
 12. Wei, Xiong, Mo Yimin, and Zhang Feng. "Lithium-ion battery modeling and state of charge estimation." *Integrated Ferroelectrics* 200, no. 1 (2019): 59-72.
 13. Yin, Yilin, and Song-Yul Choe. "Actively temperature controlled health-aware fast charging method for lithium-ion battery using nonlinear model predictive control." *Applied Energy* 271 (2020): 115232.
 14. Yu, Quanqing, Rui Xiong, Cheng Lin, Weixiang Shen, and Junjun Deng. "Lithium-ion battery parameters and state-of-charge joint estimation based on H-infinity and unscented Kalman filters." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 66, no. 10 (2017): 8693-8701.
 15. Hou, Jing, Yan Yang, and Tian Gao. "A Variational Bayes Based State-of-Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries Without Sensing Current." *IEEE Access* 9 (2021): 84651-84665.
 16. Xu, Wei, Jinli Xu, Jinfeng Lang, and Xiaofeng Yan. "A multi-timescale estimator for lithium-ion battery state of charge and state of energy estimation using dual h infinity filter." *IEEE Access* 7 (2019): 181229-181241.

Estimation of state of charge of lithium-ion battery taking into account temperature effects

Sohaib Azhdari

Master student of Electrical Engineering, Kurdistan University,
Sanandaj, Iran, sohaibazhdari107@gmail.com

Abstract - Lithium-ion batteries have a high capacity for storing energy and power. That is why it is very common to use them in fast-charging stations as energy storage. Due to the fact that the battery of a system is closed, it is not possible to accurately calculate the amount of power stored in it. Using the battery charge level indicator allows a relatively accurate estimate of the amount of power and energy stored in the battery. One of the most widely used estimation methods is the Kalman filter and the H-infinity filter. Modeling, determining the exact capacity of the battery, and how to estimate its charge level is one of the most important and difficult techniques to ensure efficient and safe battery operation. Because the capacity and charge level of a battery are highly correlated, it is difficult to accurately estimate charge level without knowing the exact capacity of the battery. On the other hand, battery performance is partly dependent on temperature effects. Using the offline parameters of the battery allows the algorithm to estimate the battery temperature in addition to the battery charge level. This indicator can be used as a control signal by estimating the battery temperature moment.

Keywords: estimate the battery charge level, temperature effects on the battery, Lithium-ion battery, H-infinity filter