

بررسی و مقایسه اثرات دمایی بر باتری لیتیوم-یونی در حالت شارژ سریع با روش جریان ثابت چندمرحله‌ای و روش جریان ثابت-ولتاژ ثابت

صهیب اژدری و رحمت‌الله میرزایی

نمی‌توان به مقدار دلخواه زمان شارژ را کاهش داد. لذا با تعریف قوانین و روش‌های شارژ سریع سعی شده تا بیشترین بازدهی گرفته شود [۵] و [۶]. باتری‌های لیتیومی به دلیل داشتن چگالی بالا در ذخیره‌سازی انرژی و توان، کاربرد وسیعی در ساخت و طراحی خودروهای الکتریکی دارند [۷]. علاوه بر این در طراحی ایستگاه‌های شارژ سریع به عنوان منبع ذخیره‌ساز انرژی نیز استفاده می‌شوند [۸]. استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی در ایستگاه‌های شارژ سریع بسیار رایج است؛ حتی ایستگاه‌هایی که به شبکه قوی متصل هستند از سیستم ذخیره‌ساز استفاده می‌کنند؛ به دلیل اینکه هنگام شارژ باتری‌ها ممکن است جریان زیادی از شبکه کشیده شود و باعث ایجاد هارمونی در شبکه گردد [۹]. با این حال، شارژ سریع و فوق سریع مستقیماً از شبکه، بار زیاد و غیر قابل پیش‌بینی را بر سیستم الکتریکی وارد می‌کند. علاوه بر این به دلیل اینکه خودروهای الکتریکی با ولتاژ و جریان مستقیم شارژ می‌شوند، در آنها از سیستم ذخیره‌ساز انرژی استفاده می‌گردد [۱۰] تا [۱۲].

باتری‌های لیتیوم-یونی به دلیل چگالی انرژی بالا، عملکرد چرخه‌ای خوب و نرخ خودتخلیه پایین به طور گسترده در دستگاه‌های الکتریکی و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌شوند [۱۳]. باتری‌های لیتیوم-یونی مورد استفاده در خودروهای الکتریکی (EVs) از لایه‌های سلولی زیادی تشکیل شده‌اند و ظرفیت زیادی دارند که معمولاً ده‌ها آمپرساعت است. با این حال، فناوری بهینه‌سازی شارژ باتری‌های لیتیوم-یونی یک چالش است. روش‌های شارژ متفاوتی در مقالات با اهداف مختلفی مانند افزایش سرعت شارژ، افزایش عملکرد شارژ و به حداکثر رساندن عمر باتری معرفی شده است. روش‌های بهینه‌سازی شده شارژ باتری را می‌توان عمدتاً به روش‌های بهبودیافته الف) مبتنی بر شکل موج جریان شارژ، ب) بر اساس مدل باتری، ج) بر اساس پلاریزاسیون و د) بر اساس مواد سازنده باتری طبقه‌بندی کرد [۱۴]. در میان رویکردهای ارائه شده، روش مبتنی بر شکل موج جریان به صورت گسترده‌ای در ایستگاه‌های شارژ سریع استفاده می‌شود و علاوه بر پیاده‌سازی ساده سیستم، کنترل آن نیز به مراتب نسبت به سایر رویکردها آسان‌تر است [۱۵].

باتری‌های لیتیوم-یونی با توجه به قابلیت‌های فراوانی که دارند به تدریج در حال تبدیل به یکی از منابع اصلی ذخیره‌سازی انرژی هستند. اگر این باتری‌ها با روشی غیر اصولی شارژ شوند، آسیب خواهند دید و به همین دلیل، به‌کارگیری روشی بهینه برای شارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی از اهمیت بالایی برخوردار است. با رعایت اصول شارژ باتری‌های لیتیومی و استفاده از تخمینگر سطح شارژ تا حد زیادی می‌توان از باتری‌ها محافظت کرد [۱۶] و [۱۷]. در این مقاله به بررسی دو شیوه شارژ سریع

چکیده: باتری‌های لیتیوم-یونی به دلیل داشتن چگالی بالا برای ذخیره‌سازی انرژی و توان در ایستگاه‌های شارژ سریع، کاربرد فراوانی دارند. نحوه شارژ شدن باتری‌های لیتیومی بسیار حائز اهمیت است؛ چرا که ساختار آنها به گونه‌ای است که به گرما بسیار حساس هستند. زمانی که از شیوه‌های شارژ سریع برای شارژ باتری‌ها استفاده می‌شود، گرمای قابل توجهی تولید می‌شود که این گرما ناشی از تلفات اهمی باتری و واکنش‌های داخلی آن است. شارژ سریع، زمان شارژ شدن باتری را به شدت کاهش می‌دهد؛ اما ممکن است به ساختار آن آسیب بزند. شیوه‌های مختلفی برای شارژ سریع ارائه شده که هر یک، مزایا و محدودیت‌های خود را دارند. با اعمال تغییراتی در شیوه شارژ جریان ثابت چندمرحله‌ای تلاش شد تا علاوه بر کاهش زمان شارژ شدن، از آسیب دیدن باتری جلوگیری شود. این شیوه بهبودیافته قادر است تا در حالت‌هایی که اثرات دمایی قابل دفع باشد مانند زمانی که سیستم تهویه وجود دارد، زمان شارژ را تا حد امکان کاهش دهد.

کلیدواژه: باتری لیتیوم-یونی، اثرات دمایی، شارژ سریع، تخمین سطح شارژ.

۱- مقدمه

امروزه استفاده از خودروهای الکتریکی به دلیل امکانات و قابلیت‌های فراوانی که دارند، در حال افزایش است و از این رو بررسی مسائل و مشکلات پیرامون آنها از اهمیت بالایی برخوردار است. کاهش سریع سوخت‌های فسیلی، خودروهای الکتریکی را تبدیل به راه حلی مناسب برای حمل و نقل نوین کرده و در سمت دیگر با کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای به کندتر شدن روند گرمای زمین کمک خواهند کرد. برای جلوگیری از سنگینی خودروهای الکتریکی، تعداد باتری‌های کمی در طراحی آنها استفاده می‌شود و همین امر باعث خواهد شد تا خودروهای الکتریکی، مسافت نسبتاً کوتاهی را طی کنند [۱] و [۲]. برای جبران این کمبود با طراحی ایستگاه‌های شارژ سریع و فوق سریع سعی گردیده تا در زمان کوتاهی، باتری‌های این خودروها شارژ شود. با ایجاد این ایستگاه‌ها می‌توان انتظار داشت که خودروهای الکتریکی، مسیرهای طولانی را بتوانند به آسانی طی کنند [۳] و [۴].

باید توجه داشت که بنا بر ساختار و محدودیت‌های باتری لیتیوم-یونی

این مقاله در تاریخ ۴ خرداد ماه ۱۴۰۱ دریافت و در تاریخ ۱۲ دی ماه ۱۴۰۱ بازنگری شد.

صهیب اژدری، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران،
(email: sohaibazhdari107@gmail.com)

رحمت‌الله میرزایی (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی برق قدرت و کنترل، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران، (email: r.mirzaei@uok.ac.ir)

روی باتری می‌شود. با این حال، هنگام انتخاب جریان شارژ، هم ظرفیت شارژ و هم عمر باتری باید در نظر گرفته شود که بیش از حد به تجربه اپراتور بستگی دارد. علاوه بر این، سرعت جریان شارژ همیشه کم است و منجر به زمان شارژ طولانی می‌شود. بنابراین روش یادشده به ندرت در عمل استفاده می‌شود.

روش شارژ CC چندمرحله‌ای، توسعه‌یافته از روش شارژ جریان ثابت است. دامنه و مدت زمان CC با توجه به وضعیت باتری در طول فرایند شارژ تنظیم می‌شود. یعنی ابتدا باتری در یک دوره اولیه با CC بالاتر شارژ می‌گردد و سپس به صورت پله‌ای، دامنه جریان کاهش می‌یابد. در این روش با در نظر گرفتن خاصیت پلاریزه شدن باتری، به صورت آگاهانه دامنه جریان در حال تغییر است. یعنی زمانی که باتری، توانایی پذیرش جریان با دامنه بالا را دارد، شارژ سریع با سرعت بالا رخ می‌دهد. زمانی که باتری در حال قطبی شدن است از شدت جریان کاسته می‌شود تا اثرات پلاریزاسیون را به حداقل برساند. بنابراین کلید استفاده از روش کنترل جریان، تعیین مقدار و مدت جریان شارژ است. با کنترل معقول‌تر، اثر شارژ بهتر خواهد بود و در غیر این صورت، حوادث ناشی از افزایش دما، ولتاژ بیش از حد و غیره در طول فرایند شارژ اتفاق می‌افتد.

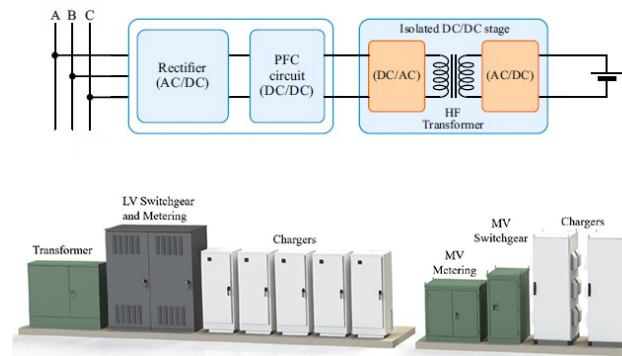
برای ایجاد این جریان‌ها چندین راه حل وجود دارد. مثلاً در مناطقی که به شبکه قدرت متصل است به کمک مبدل‌های الکتریکی می‌توان مقدار جریان مورد نیاز را از شبکه دریافت کرد. ایستگاه شارژ سریع دارای یک باس DC می‌باشد که تمامی اجزا به آن متصل است. مثلاً در شکل ۱ بین باس ایستگاه و شبکه قدرت، چند مبدل الکتریکی وجود دارد. این مبدل‌ها قابلیت کنترل دارند تا بتوانند جریان مورد نیاز باس را تأمین کنند.

۲-۲ روش ولتاژ ثابت

روش شارژ ولتاژ ثابت (CV) ولتاژ شارژ باتری را ثابت نگه می‌دارد. به دلیل کاهش ولتاژ باتری، جریان شارژ در ابتدا بیشتر از پایان فرایند شارژ است. با ظاهر شدن پلاریزاسیون در هنگام شارژ، جریان شارژ به تدریج کاهش می‌یابد و زمانی که جریان به مقدار معینی کم می‌شود، شارژ متوقف می‌گردد. مزیت این روش آن است که شارژر مربوط نسبتاً ساده است و جریان به طور خودکار تنظیم می‌شود تا از پلاریزه شدن در هنگام شارژ جلوگیری شود. نقطه ضعف آن، این است که جریان در ابتدای شارژ بسیار زیاد است که ممکن است به باتری آسیب برساند. بر اساس روش کنترل CV، یک روش شارژ که ابتدا از CC و سپس از CV استفاده می‌کند، پیشنهاد شده است. این روش یک نسخه بهبودیافته است که هدف آن حل مشکلاتی مانند جلوگیری از آسیب دیدن باتری‌ها به روش شارژ CV است. با این روش بهبودیافته، باتری در یک CC معین شارژ می‌شود و سپس زمانی که ولتاژ باتری به مقدار معینی می‌رسد، باتری با روش CV شارژ می‌شود. بر اساس این روش بهبودیافته، شارژ سریع هنگامی که باتری قادر به پذیرش جریان‌های بزرگ است با CC روند شارژ اتفاق می‌افتد. همچنین شارژ با روش CV هنگامی که ولتاژ بالاست و اثرات قطبی شدن جدی است، به خوبی پاسخگو است؛ چرا که باعث کاهش تدریجی جریان شارژ می‌شود. با این حال، مقادیر CC و CV بسیار مهم هستند؛ زیرا هر دو می‌توانند بر ایمنی و عمر باتری تأثیرگذار باشند.

۳-۲ راهکارهای ارائه شده برای بهبود عملکرد فرایند شارژ باتری‌ها

تزریق جریان زیاد به باتری باعث تشدید اثرات دمایی آن می‌شود. در



شکل ۱: نمونه‌ای از اتصال شبکه قدرت به باس ایستگاه شارژ سریع.

پرداخته شده است. این شیوه‌ها بر اساس ساختار باتری گسترش یافته‌اند و به صورت عملی در ایستگاه‌های شارژ سریع به کار گرفته می‌شوند. در ادامه سعی گردیده تا با مقایسه عملکرد و بررسی تغییرات به وجود آمده در باتری، شیوه مناسب و بهبودیافته‌ای برای شارژ سریع باتری‌های لیتیوم-یونی پیشنهاد شود.

در بخش ۲ مروری بر ادبیات موضوع صورت گرفته و هر کدام از شیوه‌های شارژ معرفی شده‌اند. در بخش ۳ مدل‌سازی‌های لازم، انجام و روابط مورد نیاز استخراج شده‌اند. بخش ۴ به تحلیل نتایج به دست آمده اختصاص یافته است. در بخش ۵ بنا بر داده‌های به دست آمده از بخش ۴، نتیجه‌گیری انجام گردیده و پیشنهادهایی جهت بهبود عملکرد سیستم ارائه شده‌اند.

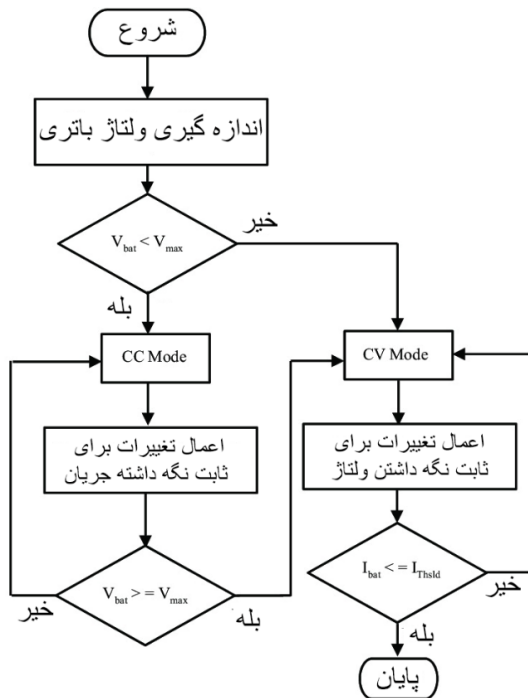
۲- مروری بر پیشینه تحقیق

ارتقا و بهبود عملکرد باتری‌های لیتیوم-یونی، امری بسیار ضروری برای خودروهای الکتریکی است. قابلیت شارژ سریع با مقدار جریان بالا، تلفات داخلی کم و تأثیرپذیری کم از اثرات دمایی، تنها بخشی از مزایای استفاده از باتری‌های لیتیومی است. باتری‌های لیتیوم-یونی به دلیل بازدهی مناسب، قابلیت ذخیره‌سازی توان و انرژی با چگالی بالا و طول عمر مفید زیاد، بیش از سایر باتری‌ها در صنعت کاربرد دارند. اغلب این خودروها از باتری‌های لیتیوم-یونی استفاده می‌کنند؛ اما مسئله اصلی خودروهای الکتریکی، باتری آنهاست. مثلاً یونیزه شدن باتری باعث می‌شود که نتوان به صورت کامل از ظرفیت باتری استفاده کرد [۱۸].

در نهایت طراحی باتری‌ها به سمتی خواهد رفت که عمری طولانی‌تر داشته باشند. همچنین ظرفیت انرژی و توان بالای خود را حفظ کنند و در هر شرایطی بتوانند در بهترین بازدهی خود عمل نمایند. اما متأسفانه در حال حاضر نمی‌توان به تمام این اهداف دسترسی پیدا کرد؛ چرا که ساختار باتری هنوز محدودیت‌های فراوانی دارد. شارژ باتری با جریان بالا می‌تواند به ساختار باتری لطمه وارد کند. به عنوان مثال شاخصه‌ای با نام نرخ پر شدن باتری وجود دارد که اجازه می‌دهد باتری حداکثر با ۳ برابر مقدار نرخ تخلیه آن شارژ شود (۳C) [۱۹]. اگر جریان شارژ باتری از مقدار معین بیشتر باشد باعث تشدید اثرات گرمایی، افزایش تلفات داخلی و کاهش عمر باتری خواهد شد. روش‌هایی که مبتنی بر شکل موج جریان برای شارژ باتری پیشنهاد شده‌اند در ادامه آمده‌اند.

۱-۲ روش جریان ثابت

روش جریان ثابت (CC) اغلب در باتری‌های با نرخ تخلیه پایین استفاده می‌شود؛ چرا که اگر جریان شارژ باتری بالا باشد باعث ایجاد تلفات زیادی در باتری خواهد شد؛ همین امر باعث تشدید اثرات دمایی



شکل ۴: فلوچارت عملکرد شیوه شارژ سریع CC-CV.

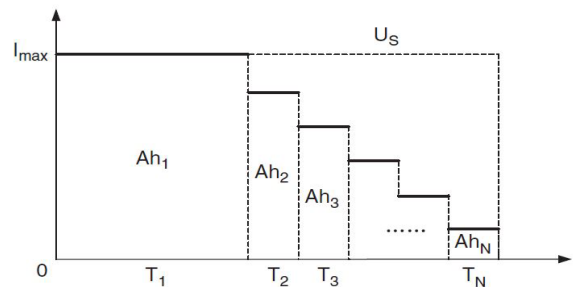
الگوریتم‌ها، الگوریتم فیلتر کالمن است [۲۵]. زمانی که از مدل خطی برای شبیه‌سازی باتری استفاده شود، فیلتر کالمن راه حلی ایده‌آل است؛ اما مقاومت داخلی باتری دارای ویژگی غیرخطی است. برای شبیه‌سازی مدل غیرخطی باتری از الگوریتم فیلتر کالمن گسترش یافته استفاده می‌کنند [۲۶]. اگر میزان غیرخطی بودن مدل زیاد باشد باید از فیلتر کالمن تطبیقی استفاده کرد. همچنین یکی دیگر از راه حل‌ها استفاده از فیلتر کالمن جزئی است.

لازمه استفاده از این فیلترها مدل‌سازی باتری لیتیومی است. مدل مدار معادل با استفاده از المان‌های ساده مداری مانند مقاومت و خازن می‌تواند با دقت بالایی رفتار دینامیکی باتری را شبیه‌سازی کند. البته مدل مدار معادل مرتبه دو و بالاتر نیز گاهی استفاده می‌شوند. هرچند با بالا رفتن مرتبه مدار، دقت مدل‌سازی نیز بالاتر خواهد رفت اما به شدت، حجم محاسبات افزایش می‌یابد [۲۷] و [۲۸].

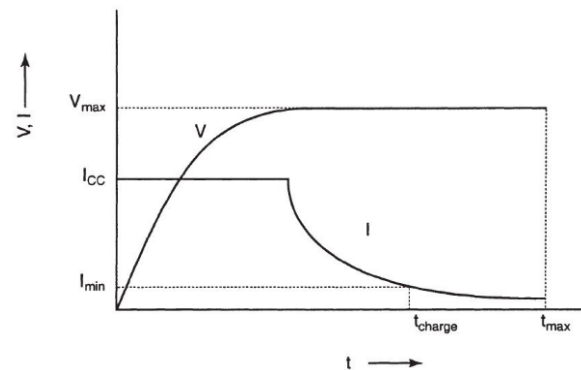
۲-۵ فیلتر H-Infinity

کنترل مقاوم^۱ یکی از استراتژی‌های طراحی سیستم‌های کنترل است که در آن بر ثبات و مقاومت عملکرد سیستم کنترلی در مقابل تغییرات و ناپیچینی‌ها تأکید می‌شود و هدف از طراحی، ایجاد یک سیستم کنترلی است که تغییرات در شرایط سیستم، کمترین اثر را در خروجی داشته باشد [۲۹]. به عبارت دیگر، افزایش قابلیت اطمینان سیستم، مهم‌ترین هدفی است که در طراحی کنترل مقاوم مد نظر قرار می‌گیرد. به ویژه، تأمین عملکرد مناسب و یا پایداری در حضور عوامل ناپیچینی، دینامیک‌های مدل نشده یا عوامل مزاحم مانند اغتشاش و ورودی‌های ناخواسته، از جمله اصلی‌ترین اهداف در طراحی سیستم‌های کنترل مقاوم است. رویکردهای مختلفی برای طراحی کنترل‌کننده مقاوم وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به رویکردهای نرم بی‌نهایت (H^∞)، نرم دو (H_2)، ترکیب نرم‌های دو و بی‌نهایت ($Mix H^\infty/H_2$) و سنتز میو^۲ اشاره نمود [۳۰].

1. Robust Control
2. μ -Synthesis



شکل ۲: شکل موج جریان تزریقی به باتری در هنگام شارژ سریع با روش جریان ثابت چندمرحله‌ای.



شکل ۳: شکل موج جریان تزریقی به باتری هنگام شارژ سریع با روش جریان ثابت-ولتاژ ثابت.

سمت دیگر ممکن است در صورت عدم کنترل مناسب، باتری بیش از حد شارژ شود و ساختار داخلی آن آسیب ببیند. از طرف دیگر ثابت نگه داشتن ولتاژ ترمینال‌های باتری باعث خواهد شد که فرایند شارژ به زمان بیشتری نیاز داشته باشد. با ترکیب دو روش ولتاژ ثابت و جریان ثابت، روشی کارآمد ایجاد خواهد گردید. یکی از شیوه‌های جدید شارژ سریع، استفاده از شیوه جریان ثابت پله‌ای است که در شکل ۲ نشان داده شده است. بنا بر ساختار باتری در چند مرحله شدت جریان کاسته می‌شود تا علاوه بر حفاظت از باتری، مزیت‌های روش جریان ثابت نیز حفظ شود.

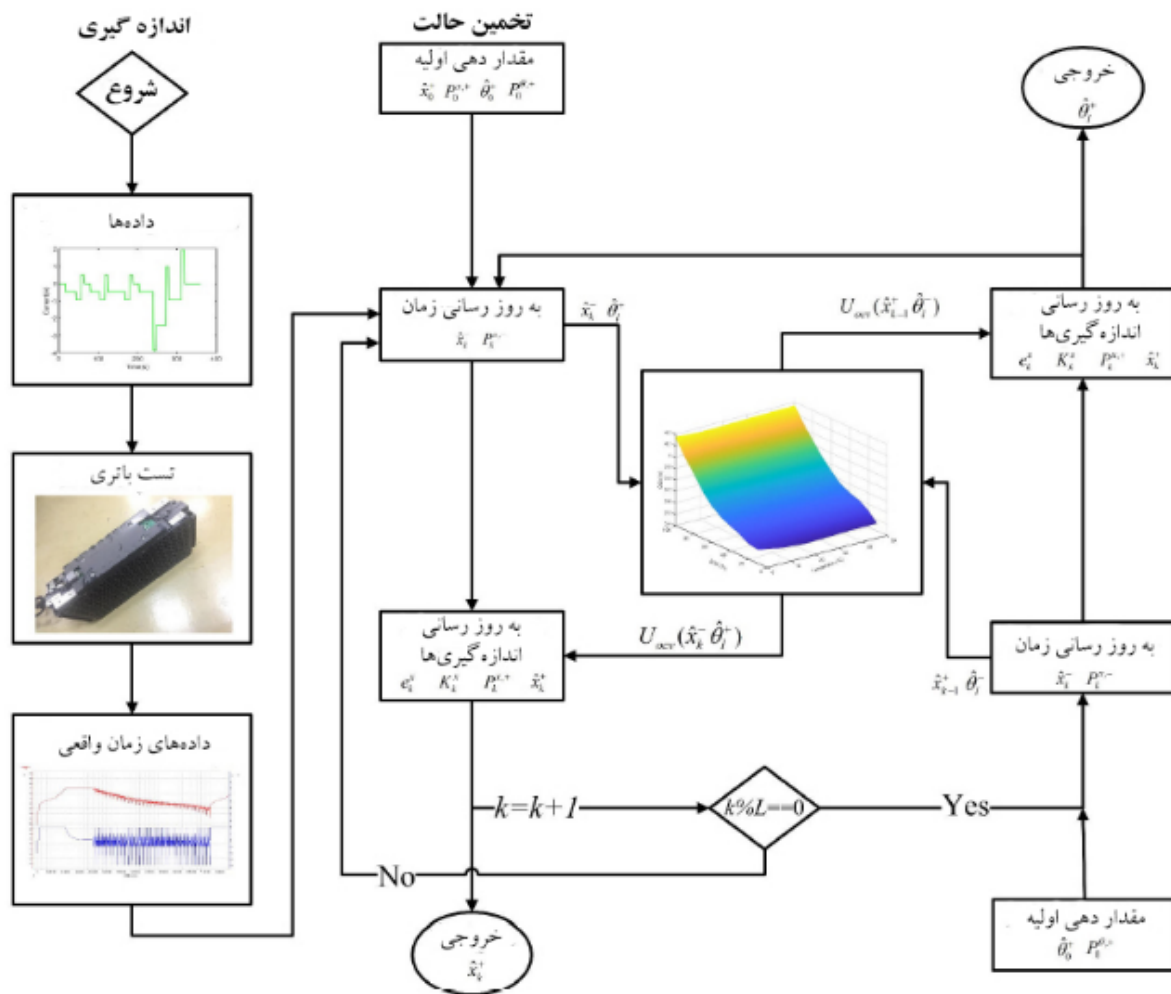
شیوه دیگری که بسیار مورد توجه قرار گرفته است بر مبنای روش جریان ثابت بنا شده است؛ اما با این تفاوت که پس از رسیدن به حد مشخصی، جریان به صورت نمایی کاهش پیدا می‌کند. در مرحله اول با جریانی ثابت اقدام به شارژ باتری می‌شود و پس از رسیدن باتری به سطح شارژ مشخصی، ولتاژ ترمینال آن ثابت نگه داشته می‌شود و جریان به صورت نمایی کاسته خواهد شد تا باتری آسیبی نبیند [۲۰] تا [۲۲]. شکل ۳ تغییرات جریان را نشان داده شده است. ساختار باتری به گرما بسیار حساس است؛ به گونه‌ای که با افزایش دما ظرفیت باتری دچار تغییری محسوس خواهد شد [۲۳] و [۲۴].

بنا بر نوع ایستگاه شارژ و استاندارد خودروهایی که ایستگاه شارژ سریع برای آنها ساخته شده است از شیوه CC-CV یا جریان ثابت چندمرحله‌ای استفاده می‌شود. در شکل ۴ فلوچارت عملکرد شارژ سریع به شیوه ترکیبی CC-CV نمایش داده شده است.

۲-۴ سطح شارژ باتری

اندازه‌گیری سطح شارژ باتری به صورت مستقیم، غیر ممکن است؛ چون باتری یک سیستم بسته می‌باشد و به همین دلیل سطح شارژ باتری تخمین زده خواهد شد. سطح شارژ باتری یک مؤلفه راهنماست که کمک می‌کند علاوه بر بهره‌برداری کارآمد، بتوان از باتری نیز محافظت کرد. به همین منظور چند الگوریتم ارائه شده‌اند که یکی از مشهورترین این

الگوریتم H-Infinity filter



شکل ۵: عملکرد فیلتر H-infinity برای تخمین سطح شارژ باتری.

ریاضی بیان می‌کند و سپس کنترل‌کننده‌ای را می‌یابد که این بهینه‌سازی را حل می‌نماید.

تکنیک‌های H_∞ نسبت به تکنیک‌های کنترل کلاسیک مزیت دارند؛ زیرا به راحتی برای مشکلات مربوط به سیستم‌های چندمتغیره با جفت‌شدن متقابل بین کانال‌ها قابل استفاده هستند [۳۲] و [۳۳]. بنا بر مزیت‌های یادشده الگوریتمی عملی برای تخمین سطح شارژ باتری بر اساس فیلتر H-infinity در شکل ۵ ارائه شده است.

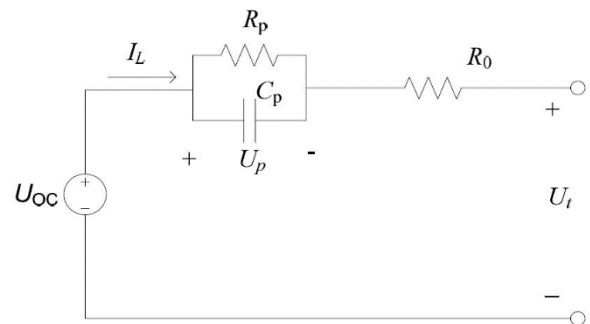
۳- فرمول‌نویسی و مدل‌سازی

۳-۱ مدل‌سازی باتری

توجه به قوانین مدار، ابتدا در حلقه بزرگ مدار با نوشتن KVL رابطه ولتاژها به دست خواهد آمد. سپس با نوشتن KCL برای خازن و مقاومت پلاریزاسیون، ارتباط بین متغیر حالت مدار و سایر پارامترها به دست می‌آید

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

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



شکل ۶: مدل مدار معادل مرتبه اول باتری لیتیوم-یونی.

البته مفهوم مقاومت، یک مفهوم مطلق نیست و هر ساختار کنترل‌کننده‌ای تا حدودی مقاوم است و از این رو بسیاری از روش‌های کنترل شناخته‌شده، مانند کنترل‌کننده PID و یا کنترل مد لغزشی (SMC)^۲، تا حدودی مفهوم مقاوم‌بودن را در خود دارند [۳۱]. روش‌های H-Infinity در تئوری کنترل برای سنتز کنترل‌کننده‌ها برای دستیابی به تثبیت با عملکرد تضمین‌شده استفاده می‌شوند. برای استفاده از روش‌های H_∞ ، یک طراح کنترل، مسئله کنترل را به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی

1. Robustness
2. Sliding Mode Control

$A(m^v)$ مساحت سطح سلول باتری است. به کمک فرمول زیر می‌توان دمای باتری را در هر زمانی تخمین زد

$$T_{cell,k} = T_{cell,k-1} + \frac{Q_g - Q_d}{mC} \quad (7)$$

که $T_{cell,k}$ نشان‌دهنده دمای باتری در زمان k است.

۳-۲ پیاده‌سازی الگوریتم H-infinity

از طریق مدل مدار معادل، به دست آوردن U_{oc} از طریق اندازه‌گیری U_t و I 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 اندازه‌گیری 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

$$J = \frac{\sum_{k=0}^{t-1} \|SOC_k - \hat{SOC}_k\|_{S_k}^2}{\|x - \hat{x}\|_{P^{-1}}^2 + \sum_{k=0}^{t-1} (\|w_k\|_{Q_k^{-1}}^2 + \|v_k\|_{R_k^{-1}}^2)} \quad (8)$$

که در آن S_k ، P ، Q_k و 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 زیر تعریف می‌گردد

$$J < \frac{1}{\theta} \quad (9)$$

جایی که q توسط کاربر تعریف شده است. تحت شرط (۹) الگوریتم می‌تواند حداکثر خطای تخمین را به حداقل برساند. فرایند تکراری H-infinity در جدول ۱ نشان داده شده است. بدیهی است وقتی که 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 می‌باشند. در واقع، پیشرفت فیلتر ترکیبی از کمیت‌های حالت و کمیت‌های اندازه‌گیری است. در طول فیلترکردن، مقدار واقعی وضعیت فعلی را می‌توان با مراجعه به وضعیت سری زمانی قبلی و نتایج اندازه‌گیری شده در این لحظه پیش‌بینی کرد.

۴- نتایج و تحلیل آن

باتری مورد آزمایش از [۱۶] انتخاب شده و مقادیر باتری در جدول ۲ آمده است. ابتدا به شیوه شارژ ترکیبی CC-CV باتری شارژ می‌شود و بنا بر شکل ۷ جریان ورودی تعریف می‌گردد. سپس به کمک الگوریتم تخمین‌گر سطح شارژ H-infinity سطح شارژ باتری بررسی خواهد شد. شکل ۸ تغییرات سطح شارژ باتری را نشان می‌دهد. اولین موردی که مورد توجه است، زمان مورد نیاز برای شارژ باتری است. در شکل ۹ مقدار تلفات اهمی نشان داده شده است. از مزایای این روش، وارد شدن جریان به صورت پیوسته است که باعث می‌شود باتری دچار شوک نشود؛ اما در سمت دیگر باعث افزایش زمان شارژ می‌شود. در شکل ۹ مقدار تلفات

جدول ۱: محاسبات بخش فیلتر H-INFINITY.

$X(k) = Ax(k-1) + BI(k-1) + w(k)$	تشکیل معادله وضعیت
$y(k) = Cx(k) + DI(k) + v(k)$	تشکیل معادل اندازه‌گیری
$k = 1: t-1$	شروع به کار حلقه
$\hat{SOC} = L\hat{x}$	
$S = L^T \bar{S} L$	
$F = [I - \theta.S.P(k) + C^T R^{-1} C^T P(k)]^{-1}$	
$K(k) = P(k).F.C^T.R^{-1}$	انجام محاسبات
$\hat{x}(k+1) = A.\hat{x}(k) +$	
$B.I(k).[U_t(k) - U_{oc}(\hat{SOC}) - D.I(k)]$	
$P(k+1) = A.P(k).F.A^T + B.Q.B^T$	
	اتمام

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

با نوشتن قانون گره برای جریان خازن و مقاومت پلاریزاسیون بر اساس (۲) برای جداسازی متغیر حالت مدار به (۳) خواهیم رسید. در اینجا C_p و R_p نماد خازن و مقاومت پلاریزاسیون هستند

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

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 گردیده است. معادله تعادل حرارتی باتری را می‌توان به صورت زیر بیان کرد

$$mC \frac{dT_s}{dt} = Q_g - Q_d \quad (4)$$

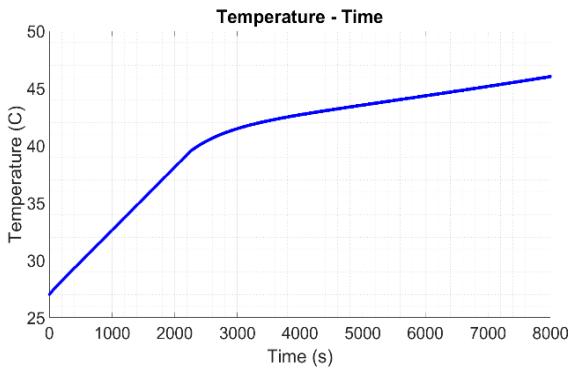
اگر m جرم باتری بر حسب گرم و C نیز نشان‌دهنده ظرفیت گرمایی باتری باشد ($Jg^{-1}K^{-1}$) و میانگین دمای سطح باتری بر حسب کلون نمایش داده شود (T_s)، مقادیر Q_d و Q_g به ترتیب نماد تولید گرما و تلفات باتری هستند که هر دوی این مقادیر بر حسب وات اندازه‌گیری می‌شوند. تولید گرما شامل دو بخش است: تولید گرمای برگشت‌ناپذیر و تولید گرمای برگشت‌پذیر؛ اولی گرمای ژول نامیده می‌شود و دومی گرمای تغییر آنتروپی است. بر این اساس از رابطه زیر می‌توان مقدار Q_g را محاسبه کرد

$$Q_g = I(U_{oc} - U_t) - IT_s \frac{\partial U_{oc}}{\partial T_s} \quad (5)$$

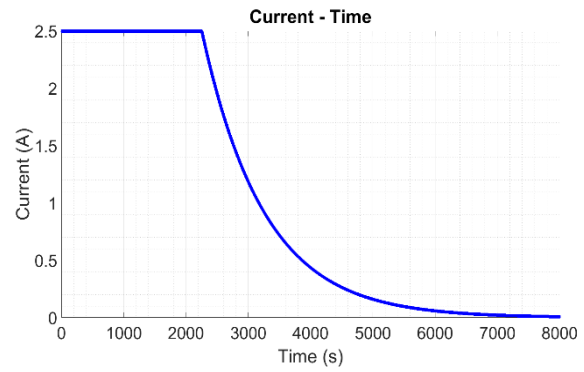
مقدار جریان I مشخص می‌شود و $\partial U_{oc} / \partial T_s$ مشخص‌کننده ضریب آنتروپی است. لذا $IT_s \Delta S / nF$ برای محاسبه تغییر آنتروپی تولید گرما استفاده می‌شود که در آن ΔS تغییر آنتروپی و n تعداد الکترون‌هاست. F ثابت فارادی است که برابر با $96486 C mol^{-1}$ می‌باشد. با دانستن $\Delta S = nF.dU_{oc} / dT_s$ ترم دوم (۵) قابل محاسبه است. مقدار ولتاژ مدار باز باتری، رابطه مستقیمی با سطح شارژ آن دارد. منحنی ضریب تغییر آنتروپی با مراجعه به روش ذکرشده در [۲۶] و [۲۹] قابل دریافت است. بخش اتلاف گرما فقط همرفت را در نظر می‌گیرد و قسمت تابش در این مطالعه نادیده گرفته می‌شود.

$$Q_d = hA(T_s - T_a) \quad (6)$$

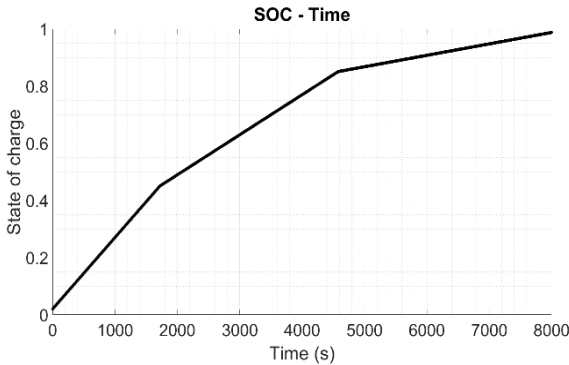
در (۶) نماد h نشان‌دهنده ضریب انتقال حرارت و واحد آن $Wm^{-2}K^{-1}$ است. $T_s(K)$ میانگین دمای سطح باتری، $T_a(K)$ دمای محیط و



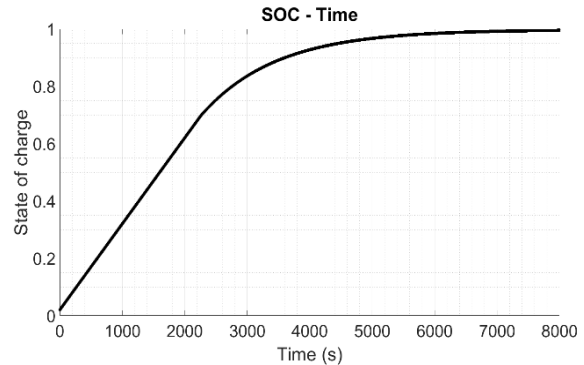
شکل ۱۰: تغییرات دمای باتری در زمان شارژ با شیوه جریان ثابت- ولتاژ ثابت.



شکل ۷: تغییرات جریان ورودی به باتری در شیوه شارژ سریع جریان ثابت- ولتاژ ثابت.



شکل ۱۱: تغییرات سطح شارژ باتری در زمان شارژ با شیوه جریان ثابت چندمرحله‌ای (شبیه‌سازی دوم).



شکل ۸: تغییرات سطح شارژ باتری در زمان شارژ با شیوه جریان ثابت- ولتاژ ثابت.



شکل ۱۲: تلفات اهمی ناشی از شارژ باتری با شیوه جریان ثابت چندمرحله‌ای (شبیه‌سازی دوم).



شکل ۹: تلفات اهمی باتری ناشی از شارژ با شیوه جریان ثابت- ولتاژ ثابت.

جدول ۲: مقادیر نامی باتری مورد آزمایش.

مدل باتری	Samsung INR18650-25R
ساختار باتری	LiNiCoAlO ₂ (NCA)
ظرفیت اسمی باتری	۲۳ آمپر ساعت
وزن باتری	۴۴۰ گرم
سطح تماس باتری	۷۵۳ سانتی‌متر مربع
متوسط ظرفیت گرمایی باتری	۰.۹۹۳۲ ژول بر کلونین گرم
ولتاژ اسمی قطع بالای باتری	۴.۲ ولت
ولتاژ اسمی قطع پایین باتری	۲.۸ ولت

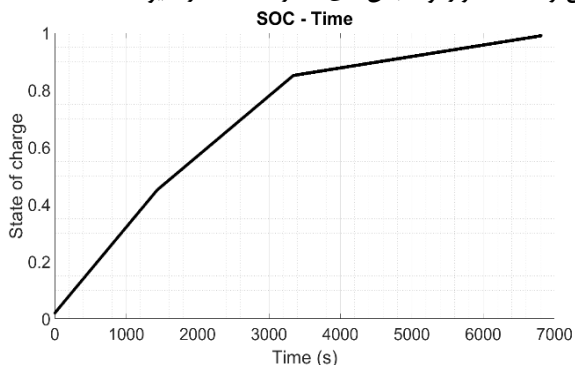
در شبیه‌سازی دوم به روش جریان ثابت چندمرحله‌ای شارژ می‌شود. جریان‌ها به این گونه تعریف می‌شوند: ۲ برابر مقدار نامی، ۱/۴ برابر مقدار نامی و ۰/۳ مقدار نامی. در شکل ۱۱ نتیجه تخمین سطح شارژ باتری با این روش نمایش داده شده است. ابتدا باتری با شدت جریان زیادی شارژ می‌شود و پس از آن، جریان به صورت پله‌ای کم می‌گردد تا باتری کاملاً شارژ شود.

مرحله بعدی تحلیل و مشاهده تغییرات دمایی باتری است. زمانی که جریان زیادی به باتری تزریق شود، تلفات اهمی آن به شدت افزایش پیدا خواهد کرد. بنا بر مدل‌سازی که انجام شد این مورد کاملاً توجیه‌پذیر است. در شکل ۱۲ میزان تلفات اهمی باتری نشان داده شده است. این تلفات باعث ایجاد گرما در سطح باتری گردیده و در نتیجه افزایش دما را در پی دارد. تغییرات دما در شکل ۱۳ قابل مشاهده است. این افزایش دما باعث خواهد شد تا ظرفیت ذخیره‌سازی باتری تغییراتی داشته باشد. هر چند ممکن است که این تغییرات برای یک باتری تنها قابل چشم‌پوشی باشد، اما زمانی که پک‌های باتری مورد آزمایش قرار بگیرند این موارد

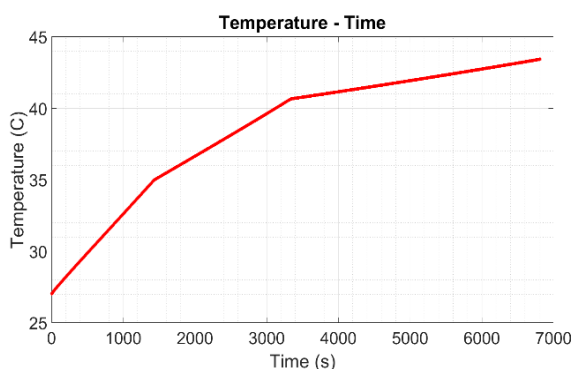
اهمی این شیوه نمایش داده شده است. با توجه به این مورد که جریان به صورت پیوسته در حال کاهش است، تلفات نیز به صورت پیوسته کاسته خواهد شد.

مزیتی که شیوه جریان ثابت- ولتاژ ثابت دارد این است که با کم‌شدن جریان ورودی- به‌خصوص زمانی که جریان به شدت کوچک می‌گردد- میزان تلفات نیز به شدت کاسته می‌شود. در شکل ۱۰ مقدار تغییرات دمایی باتری ناشی از این شیوه شارژ سریع نشان داده شده است.

آسان‌تر سخت‌افزار و میدل‌های مدار است. در شیوه CC-CV، کنترل



شکل ۱۵: تغییرات سطح شارژ باتری در زمان شارژ با شیوه جریان ثابت چندمرحله‌ای (شبیه‌سازی سوم).



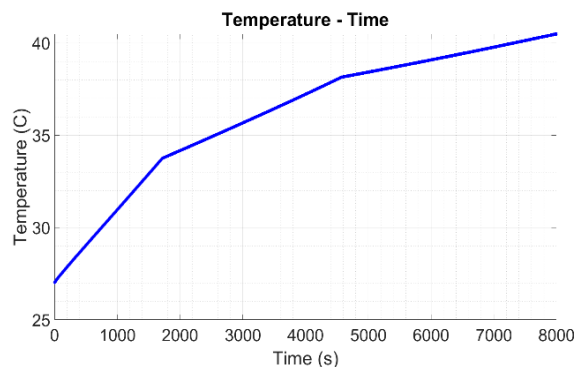
شکل ۱۶: تغییرات دمایی باتری در روش شارژ سریع چندمرحله‌ای (شبیه‌سازی سوم).

جریان واردشونده به باتری کمی سخت‌تر است و در عمل با تبدیل حالت نمایی به چندین پله مختلف، تلاش می‌شود تا ولتاژ باتری در حالت CV ثابت نگه داشته شود. نکته‌ای که در اینجا حائز اهمیت است، مربوط به تلفات سوئیچینگ و ایجاد اغتشاش ناشی از تغییر مقدار جریان ورودی است. عملکرد شیوه شارژ جریان ثابت چندمرحله‌ای علاوه بر تلفات گرمایی کمتر، کنترلی آسان‌تر و پیاده‌سازی کم‌هزینه‌تری دارد.

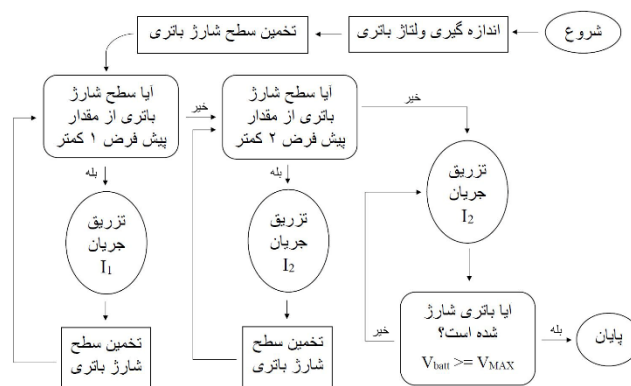
یکی از محدودیت‌هایی که به شیوه جریان ثابت چندمرحله‌ای وارد است، شارژ بیش از اندازه باتری است. اگر هنگام شارژ باتری و قبل از تغییر دادن جریان ورودی به باتری، زمانی به عنوان زمان استراحت در نظر گرفته شود، به باتری این اجازه داده می‌شود تا واکنش‌های داخلی آن به اتمام برسد و تخمینی مناسب‌تر از سطح شارژ آن داشت.

مراجع

- [1] M. R. Khalid, M. S. Alam, A. Sarwar, and M. S. Jamil Asghar, "A comprehensive review on electric vehicles charging infrastructures and their impacts on power-quality of the utility grid," *ETransportation*, vol. 1, Article ID: 100006, Aug. 2019.
- [2] S. Sharma, A. K. Panwar, and M. M. Tripathi, "Storage technologies for electric vehicles," *J. of Traffic and Transportation Engineering (English edition)*, vol. 7, no. 3, pp. 340-361, Jun. 2020.
- [3] M. A. H. Rafi and J. Bauman, "A comprehensive review of DC fast-charging stations with energy storage: architectures, power converters, and analysis," *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, vol. 7, no. 2, pp. 345-368, Jun. 2020.
- [4] A. Turksoy, A. Teke, and A. Alkaya, "A comprehensive overview of the dc-dc converter-based battery charge balancing methods in electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 133, Article ID: 110274, Nov. 2020.
- [5] H. Tu, H. Feng, S. Srdic, and S. Lukic, "Extreme fast charging of electric vehicles: a technology overview," *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 4, pp. 861-878, Dec. 2019.
- [6] R. Xiong, *Battery Management Algorithm for Electric Vehicles*, Singapore: Springer, 2020.



شکل ۱۳: تغییرات دمایی باتری با شیوه جریان ثابت چندمرحله‌ای (شبیه‌سازی دوم).



شکل ۱۴: فلوچارت شارژ سریع به شیوه جریان ثابت چندپله‌ای.

قابل تأمل هستند. اولین نتیجه‌ای که می‌توان مشاهده کرد، تفاوت دمایی نهایی دو باتری است. هر دو شبیه‌سازی در زمان تقریباً یکسانی به اتمام می‌رسند؛ اما اختلاف دمایی ۵ درجه‌ای باعث می‌شود که شیوه پیشنهادی مناسب‌تر به نظر برسد.

در شبیه‌سازی سوم، مقدار جریان تزریقی به باتری در مرحله اول به حداکثر میزان استاندارد افزایش یافته است. در این شیوه بنا بر فلوچارت نمایش داده شده در شکل ۱۴ می‌توان مقادیر پیش‌فرض را تنظیم نمود. با در نظر گرفتن محدودیت‌های ساختاری باتری، سایر مقادیر پیش‌فرض کمی بیشتر از آزمایش دوم در نظر گرفته شد. در شکل ۱۵ می‌توان تغییرات سطح شارژ باتری را مشاهده کرد و شکل ۱۶ تغییرات دمایی باتری را نشان می‌دهد.

در شبیه‌سازی سوم که مقادیر پیش‌فرض به حداکثر مقدار ممکن افزایش یافت، زمان شارژ باتری کاهش چشم‌گیری داشته است. در سمت دیگر دمایی نهایی باتری تقریباً با شیوه CC-CV یکسان است.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یکی از مزایای اصلی شیوه شارژ سریع چندمرحله‌ای، امکان مصالحه بین زمان شارژ و اثرات دمایی وارد شده به باتری است. این امکان به وجود آمده تا با تعیین مقادیر پیش‌فرض سطح شارژ باتری و جریان ورودی، زمان شارژ کاسته شود و تغییرات دمایی در بازه‌ای منطقی صورت گیرد. همچنین این امکان وجود خواهد داشت تا با اعمال تغییراتی در مقادیر یادشده، در زمانی منطقی باتری شارژ شود و در عین حال اثرات دمایی بر آن کاهش یابد. برای باتری‌هایی که حساسیت بالاتری نسبت به جریان دارند، بیش از پنج بار سطح جریان تغییر می‌یابد. البته تغییر دادن مقدار جریان ورودی نیاز به میدل‌های دقیقی دارد که این امکان را فراهم کنند. همچنین مزیت دیگری که می‌توان به آن اشاره کرد، ساخت و کنترل

- [24] M. Ye, H. Gong, R. Xiong, and H. Mu, "Research on the battery charging strategy with charging and temperature rising control awareness," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 64193-64201, 2018.
- [25] J. Hou, Y. Yang, and T. Gao, "A variational bayes based state-of-charge estimation for lithium-ion batteries without sensing current," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 84651-84665, 2021.
- [26] Z. Chen, J. Zhou, F. Zhou, and S. Xu, "State-of-charge estimation of lithium-ion batteries based on improved H infinity filter algorithm and its novel equalization method," *J. of Cleaner Production*, vol. 290, Article ID: 125180, Mar. 2021.
- [27] Y. Wang, H. Fang, L. Zhou, and T. Wada, "Revisiting the state-of-charge estimation for lithium-ion batteries: a methodical investigation of the extended Kalman filter approach," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 37, no. 4, pp. 73-96, Aug. 2017.
- [28] X. Wei, M. Yimin, and Z. Feng, "Lithium-ion battery modeling and state of charge estimation," *Integrated Ferroelectrics*, vol. 200, no. 1, pp. 59-72, 2019.
- [29] W. Xu, J. Xu, J. Lang, and X. Yan, "A multi-timescale estimator for lithium-ion battery state of charge and state of energy estimation using dual H infinity filter," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 181229-181241, 2019.
- [30] B. Liu, J. Xu, W. Xu, and W. Xia, "An improved adaptive cubature H-infinity filter for state of charge estimation of lithium-ion battery," *J. of Power Electronics*, vol. 21, no. 10, pp. 1520-1529, Oct. 2021.
- [31] Q. Yu, R. Xiong, C. Lin, W. Shen, and J. Deng, "Lithium-ion battery parameters and state-of-charge joint estimation based on H-infinity and unscented Kalman filters," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 10, pp. 8693-8701, Oct. 2017.
- [32] C. Chen, R. Xiong, and W. Shen, "A lithium-ion battery-in-the-loop approach to test and validate multiscale dual H infinity filters for state-of-charge and capacity estimation," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 33, no. 1, pp. 332-342, Jan. 2017.
- [33] J. Zhu, H. Zhang, G. Wu, S. Zhu, and W. Liu, "Thermal performance of cylindrical battery module with both axial and radial thermal paths: numerical simulation and thermal resistance network analysis," *J. of Energy Storage*, vol. 49, Article ID: 104197, Jan. 2022.
- [7] B. Liu, J. Xu, W. Xu, and W. Xia, "An improved adaptive cubature H-infinity filter for state of charge estimation of lithium-ion battery," *J. of Power Electronics*, vol. 21, no. 10, pp. 1520-1529, Oct. 2021.
- [8] P. Garcia-Triviño, J. P. Torreglosa, L. M. Fernández-Ramírez, and F. 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, pt. 1*, vol. 115, pp. 38-48, Nov. 2016.
- [9] Z. Wang, G. Feng, X. Liu, F. Gu, and A. Ball, "A novel method of parameter identification and state of charge estimation for lithium-ion battery energy storage system," *J. of Energy Storage*, vol. 49, Article ID: 104124, May 2022.
- [10] A. Tomaszewska, Z. Chu, X. Feng, S. O'Kane, X. Liu, J. Chen, C. Ji, et al., "Lithium-ion battery fast charging: a review," *ETransportation*, vol. 1, Article ID: 100011, Aug. 2019.
- [11] W. Xie, et al., "Challenges and opportunities toward fast-charging of lithium-ion batteries," *J. of Energy Storage*, vol. 32, Article ID: 101837, Dec. 2020.
- [12] M. Song and S. Y. Choe, "Fast and safe charging method suppressing side reaction and lithium deposition reaction in lithium-ion battery," *J. of Power Sources*, vol. 436, Article ID: 226835, Oct. 2019.
- [13] Y. Miao and Z. Gao, "Estimation for state of charge of lithium-ion batteries by adaptive fractional-order unscented Kalman filters," *J. of Energy Storage*, vol. 51, Article ID: 104396, Jul. 2022.
- [14] J. Jiang and C. Zhang, *Fundamentals and Applications of Lithium-Ion Batteries in Electric Drive Vehicles*, John Wiley & Sons, 2015.
- [15] J. Jiang, "Charging optimization methods for lithium-ion batteries," *Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles*, pp. 225-265, Springer, Cham, 2018.
- [16] Y. Yin, Y. Hu, S. Y. Choe, H. Cho, and W. T. Joe, "New fast charging method of lithium-ion batteries based on a reduced order electrochemical model considering side reaction," *J. of Power Sources*, vol. 423, pp. 367-379, May 2019.
- [17] S. Wang, et al., "A model-based continuous differentiable current charging approach for electric vehicles in direct current microgrids," *J. of Power Sources*, vol. 482, Article ID: 229019, Jan. 2021.
- [18] L. Wang, et al., "Modeling and state of charge estimation of inconsistent parallel lithium-ion battery module," *J. of Energy Storage*, vol. 51, Article ID: 104565, Jul. 2022.
- [19] Y. Tahir, et al., "A state-of-the-art review on topologies and control techniques of solid-state transformers for electric vehicle extreme fast charging," *IET Power Electronics*, vol. 14, no. 9, pp. 1560-1576, May 2021.
- [20] S. J. An, et al., "A fast method for evaluating stability of lithium-ion batteries at high C-rates," *J. of Power Sources*, vol. 480, Article ID: 228856, Dec. 2020.
- [21] Q. Ouyang, G. Xu, H. Fang, and Z. Wang, "Fast charging control for battery packs with combined optimization of charger and equalizers," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 11, pp. 11076-11086, Nov. 2020.
- [22] L. Patnaik, A. V. J. S. Praneeth, and S. S. Williamson, "A closed-loop constant-temperature constant-voltage charging technique to reduce charge time of lithium-ion batteries," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 2, pp. 1059-1067, Feb. 2018.
- [23] J. Sun, Q. Ma, R. Liu, T. Wang, and C. Tang, "A novel multiobjective charging optimization method of power lithium-ion batteries based on charging time and temperature rise," *International J. of Energy Research*, vol. 43, no. 13, pp. 7672-7681, 2019.

صهیب اژدری در سال ۱۳۹۷ مدرک کارشناسی مهندسی برق و در سال ۱۴۰۱ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه کردستان دریافت نمود. از سال ۱۴۰۱ نامبرده به عنوان دانشجوی مقطع دکتری به تحقیق مشغول است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند طراحی مبدل‌های الکتریکی، بررسی عملکرد باتری‌های لیتیومی و شارژ سریع می‌باشد.

رحمت‌الله میرزایی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۷۰ از دانشگاه تبریز و دانشگاه تهران و در مقطع دکتری برق در سال ۱۳۸۶ از انستیتو علوم هند بنگلور به پایان رسانده است. نامبرده از سال ۱۳۷۳ در دانشکده مهندسی دانشگاه کردستان مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز دانشیار این دانشکده می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: طراحی و کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت، منابع تغذیه سوپرجینگ، مدارات تصحیح ضریب توان و سیستم‌های انرژی خورشیدی.