

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



طراحی و ساخت کنترل کننده هوشمند شارژ باتری های لیتیوم- یون با استفاده از تخمین حالت شارژ

محمد چرخگرد

پایان نامه کارشناسی ارشد
مهندسی برق-کنترل

استاد راهنما
دکتر محمد فرخی

اسفند ۸۴

تقدیم به پدر و مادر مهربانم که همواره راهنما و مشوق
دلسوزی برایم بوده‌اند.

و همچنین تقدیم به شهیدان و جانبازان که از
خودگذشتگی‌شان در راه وطن جاودانه در قلبمان می‌ماند.

چکیده:

در این پروژه از الگوریتمهای هوشمند نظیر شبکه‌های عصبی برای مدل‌سازی، فیلتر کالمن توسعه یافته برای تخمین حالت شارژ و نیز منطق فازی برای کنترل حالت شارژ باتری در محدوده مشخص استفاده می‌گردد، که در این صورت علاوه بر شارژ سریع باتری از فرشارژ شدن آن و در نتیجه صدمه زدن به باتری جلوگیری می‌گردد. گفتنی است که الگوریتمهای مورد استفاده نسبت به تغییر پارامترهای باتری مقاوم‌اند و لذا در تمام مدت کارکرد باتری تخمین خوب و کنترل مناسبی را انجام می‌دهند.

برای پیاده‌سازی، ابتدا مدار واسطی طراحی شد که بتواند داده‌های موردنظر را با نرخ مطلوب نمونه‌برداری کند و از طریق درگاه پیاپی به رایانه بفرستد و نیز سیگنال کنترلی را که کنترل‌کننده فازی درون رایانه تولید می‌کند از همان درگاه دریافت و محقق نماید و به راه‌انداز شارژ باتری اعمال کند.

نرم‌افزار به‌کار رفته برای پیاده‌سازی الگوریتمهای تخمین، کنترل فازی و نیز ارتباط با سخت‌افزار با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Visual C++ نوشته شده‌است. تمام آزمایشات عملی بر روی باتری لیتیوم-یون با ظرفیت نامی ۱٫۵ آمپر ساعت و ولتاژ نامی ۳٫۷ ولت و شرایط دمایی آزمایشگاه انجام یافته‌است. دلیل استفاده از باتری لیتیوم-یون آن است که باتری مذکور یکی از متداول‌ترین باتری‌ها در کاربردهای صنعتی، مانند: خودروهای الکتریکی ترکیبی، نیروگاه‌های خورشیدی، زیردریایی‌ها و ماهواره‌ها است.

نتایج عملی به‌دست آمده با استفاده از کنترل‌کننده هوشمند طراحی شده، با شارژکننده تجارتي موجود در بازار نیز مقایسه شده‌است و نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که کنترل‌کننده هوشمند در مقایسه با شارژکننده تجارتي دارای سرعت شارژ بالا همراه با حفظ حالت شارژ مطلوب است.

در اینجا بر خود لازم می‌دانم که از استاد راهنمایم جناب آقای دکتر محمد فرخی و استاد مشاورم جناب آقای دکتر جواد پشتان تشکر و قدردانی نمایم. به ویژه از آقای دکتر فرخی سپاسگزارم که همچون پدری دلسوز، راه تحقیق و پژوهش را به من آموخت و با سعه صدر، بنده را در تمام مراحل انجام پروژه یاری رساند.

همچنین از جناب آقای دکتر وحید جوهری مجد، دانشیار دانشگاه تربیت مدرس که قبول زحمت داوری پایان‌نامه بنده را پذیرفتند و با طرح پرسشهای آموزنده خود، جلسه دفاع را پربارتر نمودند، قدردانی می‌نمایم. نیز از جناب آقای دکتر علی‌اکبر جلالی دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران به خاطر قبول زحمت داوری پایان‌نامه بنده تشکر می‌نمایم.

فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱ مقدمه:.....	۲
۲-۱ مفهوم حالت شارژ.....	۳
۳-۱ بررسی روشهای تخمین حالت شارژ باتری.....	۴
۱-۳-۱ اندازه‌گیری حالت شارژ از طریق ویژگیهای فیزیکی الکترولیت.....	۴
۲-۳-۱ ولتاژ مدار باز.....	۵
۳-۳-۱ شمارش آمپر ساعت.....	۶
۴-۳-۱ تخمین با استفاده از منطق فازی.....	۷
۵-۳-۱ شبکه‌های عصبی مصنوعی.....	۸
۶-۳-۱ تخمین با استفاده از فیلتر کالمن.....	۸
۴-۱ کنترل حالت شارژ.....	۹
۵-۱ روش پیشنهادی برای پیاده‌سازی.....	۱۰
فصل دوم: پیاده‌سازی و ملاحظات عملی.....	۱۲
۱-۲ مقدمه.....	۱۳
۲-۲ طراحی بخش نمونه‌بردار و ارتباط با رایانه.....	۱۴
۱-۲-۲ طراحی مدارهای وفق‌دهنده سیگنال با نمونه‌بردار (A/D).....	۱۵
۲-۲-۲ طراحی مدار نمونه‌بردار و ارتباط‌دهنده با رایانه.....	۱۷
۳-۲-۲ طراحی الگوریتم برنامه ریز کنترل‌کننده 89C52.....	۱۸
۳-۲ طراحی مدار شارژ‌کننده باتری و راه‌انداز.....	۲۱
۱-۳-۲ طراحی منبع جریان شارژ همراه با راه‌انداز.....	۲۲
۲-۳-۲ طراحی مدار کنترل ولتاژ.....	۲۴
۴-۲ طراحی نرم‌افزار با استفاده از زبان VISUAL C++.....	۲۶
۱-۴-۲ برنامه‌نویسی شیء‌گرا.....	۲۶
۲-۴-۲ کلاسهای مورد استفاده در این پروژه.....	۲۷
فصل سوم: مدل‌سازی.....	۲۸
۱-۳ مقدمه.....	۲۹
۲-۳ شبکه‌های عصبی با تابع پایه شعاعی.....	۲۹
۳-۳ حالت شارژ باتری به‌عنوان متغیر فضای حالت.....	۳۱
۴-۳ مدل پیشنهادی.....	۳۱

فصل چهارم: تخمین ۳۴

- ۱-۴ مقدمه ۳۵
- ۲-۴ خطی سازی مدل پیشنهادی ۳۷
- ۳-۴ تخمین حالت شارژ باتری ۳۹
- ۱-۳-۴ طراحی فیلتر پایین گذر ۴۳

فصل پنجم: کنترل حالت شارژ ۴۸

- ۱-۵ مقدمه ۴۹
- ۲-۵ کنترل کننده نخست حالت شارژ باتری ۴۹
- ۱-۲-۵ تعیین پایگاه قواعد فازی و توابع عضویت ۴۹
- ۲-۲-۵ نتایج عملی ۵۲
- ۳-۵ کنترل کننده دوم حالت شارژ باتری ۶۱
- ۱-۳-۵ تعیین پایگاه قواعد فازی و توابع عضویت جدید ۶۱
- ۲-۳-۵ نتایج عملی ۶۳
- ۴-۵ مقایسه با یک شارژ کننده معمولی ۶۶

فصل شش: نتیجه گیری و پیشنهادات ۷۳

- ۱-۶ خلاصه انجام طرح ۷۴
- ۲-۶ ویژگیها ۷۵
- ۳-۶ معایب ۷۶
- ۴-۶ پیشنهادات ۷۶

ضمیمه ۷۸

- الف: فیلتر کالمن ۷۹
- الف-۱ فیلتر کالمن خطی ۷۹
- الف-۲ فیلتر کالمن توسعه یافته ۸۲
- ب: ساختار سیستمهای فازی ۸۶
- ب-۱ متغیرهای زبانی ۸۶
- ب-۲ توابع عضویت ۸۷
- ب-۳ ایجاد پایگاه قواعد فازی ۸۷
- ب-۴ روشهای فازی زدایی ۸۹

مراجع ۹۱

- شکل ۱-۱: تفسیر تصویری از ظرفیت و حالت شارژ باتری ۴
- شکل ۱-۲: ساختار کلی مدار طراحی شده ۱۴
- شکل ۲-۲: مدار وفوقدهی خروجی حسگرها با نمونه بردار ۱۶
- شکل ۳-۲: ساختار مدار نمونه بردار و ارتباط دهنده با رایانه ۱۸
- شکل ۴-۲: مدار کنترل شارژ باتری همراه با راه انداز ۲۱
- شکل ۵-۲: شکل موج جریان در حالت شارژ بازتابی ۲۲
- شکل ۶-۲: مدار کنترل ولتاژ یا ضرب کننده ولتاژ امیتر ۲۵
- شکل ۱-۳: ساختار شبکه عصبی با تابع پایه شعاعی ۳۰
- شکل ۱-۴: نمایش گردش سیگنال (signal-flow graph) سیستم خطی دینامیکی گسسته زمان ۳۵
- شکل ۲-۴: داده های تجربی ذخیره شده در یک دوره شارژ باتری لیتیوم-یون. شکل موج ولتاژ (اولی از بالا)، شکل موج جریان (دومی)، دما (سومی)، حالت شارژ باتری (چهارمی). ۴۰
- شکل ۳-۴: داده های مربوط به ۵۰۰ ثانیه اول شکل ۲-۴ ۴۱
- شکل ۴-۴: داده های مربوط به ۵۰۰ ثانیه انتهایی شکل ۲-۴ (از ثانیه ۱۴۰۰۰ تا ثانیه ۱۴۵۰۰) ۴۱
- شکل ۵-۴: منحنی آموزش برای ۳۵۰۰ داده مربوط به شکل ۲-۴ ۴۲
- شکل ۶-۴: نتایج حاصل از تخمین حالت شارژ باتری به صورت قطع - خط با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته (نمودار پایین)، حالت شارژ واقعی از روش شمارش آمپرساعت (نمودار بالا)، برای داده های شکل ۲-۴ ۴۳
- شکل ۷-۴: خروجی تخمینگر حالت شارژ (خط توپر) با اعمال فیلتر پایین گذر و حالت شارژ واقعی باتری (خط چین)، برای همان داده های شکل ۲-۴ ۴۵
- شکل ۸-۴: تخمین حالت شارژ باتری در فرآیند شارژ با جریان متناوب دارای چرخه - وظیفه برابر ۵۰٪ ۴۶
- شکل ۹-۴: داده های ذخیره شده در فرآیند شارژ با جریان متناوب دارای چرخه - وظیفه برابر ۵۰٪ ۴۶
- شکل ۱-۵: توابع عضویت متغیر ورودی حالت شارژ باتری ۵۰
- شکل ۲-۵: توابع عضویت متغیر خروجی چرخه - وظیفه ۵۰
- شکل ۳-۵: ساختار کنترل کننده به همراه تخمینگر حالت شارژ باتری ۵۲
- شکل ۴-۵: سیگنال کنترل (چرخه - وظیفه سیگنال جریان شارژ) یا خروجی کنترل کننده فازی (نمودار پایین)، حالت شارژ باتری (نمودار بالا) - روش شمارش آمپرساعت (خط چین)، تخمینگر کالمن (خط پیوسته). ۵۳
- شکل ۵-۵: ۳۰۰ ثانیه از ابتدای فرآیند شارژ مربوط به شکل ۴-۵ ۵۴
- شکل ۶-۵: ۳۰۰ ثانیه از نقاط میانی فرآیند شارژ مربوط به شکل ۴-۵ ۵۴
- شکل ۷-۵: ۳۰۰ ثانیه از انتهای فرآیند شارژ مربوط به شکل ۴-۵ ۵۵
- شکل ۸-۵: فرآیند شارژ باتری با استفاده از کنترل کننده فازی و تخمینگر حالت شارژ. سیگنال کنترل یا چرخه - وظیفه سیگنال جریان شارژ (نمودار پایین)، حالت شارژ تخمین زده شده (خط پر در نمودار بالا)، حالت شارژ واقعی (خط چین در نمودار بالا). ۵۶

- شکل ۵-۹: ۳۰۰ ثانیه از ابتدای فرآیند شارژ مربوط به شکل ۵-۸..... ۵۷
- شکل ۵-۱۰: ۳۰۰ ثانیه از اواسط فرآیند شارژ مربوط به شکل ۵-۸..... ۵۷
- شکل ۵-۱۱: ۳۰۰ ثانیه از هنگامی که حالت شارژ باتری به حدود ۷۵٪ رسیده و بار ۰/۷ آمپری به مدت ۳۰ ثانیه اعمال می‌گردد..... ۵۸
- شکل ۵-۱۲: ۶۰۰ ثانیه از هنگامی که بار ۰/۱ آمپری به باتری اعمال می‌شود..... ۵۸
- شکل ۵-۱۳: ۳۰۰ ثانیه از انتهای فرآیند شارژ و اعمال پیوسته بار ۰/۱ آمپری به باتری..... ۵۹
- شکل ۵-۱۴: آزمایش کنترل و تخمینگر حالت شارژ با شرایط اولیه متفاوت..... ۶۰
- شکل ۵-۱۵: ۳۰۰ ثانیه آغازین فرآیند شارژ مربوط به شکل ۵-۱۴..... ۶۰
- شکل ۵-۱۶: ۳۰۰ ثانیه پایانی فرآیند شارژ مربوط به شکل ۵-۱۴..... ۶۱
- شکل ۵-۱۷: توابع عضویت متغیر ورودی حالت شارژ باتری..... ۶۲
- شکل ۵-۱۸: توابع عضویت متغیر خروجی چرخه-وظیفه..... ۶۳
- شکل ۵-۱۹: فرآیند کنترل و تخمین حالت شارژ باتری با کنترل‌کننده دوم طراحی شده.
سیگنال کنترل (نمودار پایین)، حالت شارژ تخمین زده شده (خط پر در نمودار بالا)،
حالت شارژ واقعی (خط چین در نمودار بالا)..... ۶۴
- شکل ۵-۲۰: ۳۰۰ ثانیه آغازین فرآیند شارژ مربوط به شکل ۵-۱۹..... ۶۴
- شکل ۵-۲۱: ۳۰۰ ثانیه از آغاز اعمال بار ۰/۳۷ آمپری هنگامی که حالت شارژ باتری به حدود ۷۵٪ رسیده،
مربوط به شکل ۵-۱۹..... ۶۵
- شکل ۵-۲۲: ۳۰۰ ثانیه انتهایی فرآیند شارژ همراه با بار ۰/۳۷ آمپری مربوط به شکل ۵-۱۹..... ۶۶
- شکل ۵-۲۳: فرآیند شارژ باتری خالی با استفاده از شارژکننده معمولی..... ۶۷
- شکل ۵-۲۴: ۱۰۰ ثانیه نخست فرآیند شارژ مربوط به شکل ۵-۲۳..... ۶۷
- شکل ۵-۲۵: ۱۰۰ ثانیه پایانی فرآیند شارژ مربوط به شکل ۵-۲۳..... ۶۸
- شکل ۵-۲۶: توابع عضویت متغیر ورودی حالت شارژ باتری..... ۶۹
- شکل ۵-۲۷: فرآیند شارژ باتری با استفاده از شارژکننده هوشمند طراحی شده. حالت شارژ تخمین زده شده (خط پر در نمودار بالا)، حالت شارژ واقعی (خط چین در نمودار بالا)، سیگنال کنترل یا چرخه-وظیفه سیگنال جریان شارژ (نمودار پایین)..... ۷۰
- شکل ۵-۲۸: شکل موج‌های مربوط به فرآیند شارژ شکل ۵-۲۶..... ۷۰
- شکل ۵-۲۹: ۴۰۰ ثانیه آغازین از شکل موج‌های فرآیند شارژ مربوط به شکل ۵-۲۶..... ۷۱
- شکل ۵-۳۰: ۴۰۰ ثانیه پایانی از شکل موج‌های فرآیند شارژ مربوط به شکل ۵-۲۶..... ۷۱
- شکل الف-۱: نمایش گردش سیگنال (signal-flow graph) سیستم غیرخطی دینامیکی گسسته‌زمان..... ۸۳
- شکل ب-۱: مثالی از تعریف توابع عضویت برای حالت شارژ باتری..... ۸۶

فهرست جدول‌ها

صفحه

جدول ۵-۱: قواعد فازی برای کنترل حالت شارژ باتری در نخستین گام.....	۵۱
جدول ۵-۲: قواعد فازی برای کنترل حالت شارژ باتری در دومین گام.....	۶۳
جدول ۵-۳: قواعد فازی بهینه شده برای کنترل حالت شارژ ۱۰۰٪.....	۶۹
جدول الف-۱: خلاصه فیلتر کالمن.....	۸۰
جدول الف-۲: خلاصه فیلتر کالمن توسعه یافته.....	۸۵

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه:

نیاز به بهینه‌سازی مصرف سوخت در خودروها بدون به‌وجود آوردن مشکلات جدید برای مصرف‌کنندگان امریست ضروری، که در عین حال باید قابلیت اطمینان بیشتری برای تأمین انرژی وسایل دیگر در خودرو را دارا باشد. بنابراین نیاز به استفاده از سیستم هیبرید در خودرو، گزینه‌ناپذیر است، که منجر به استفاده از مصرف‌کننده‌های الکتریکی بیشتر و قوی‌تر می‌گردد و در نتیجه انرژی الکتریکی مورد نیاز خودرو افزایش می‌یابد.

با توجه به افزایش نیاز به انرژی الکتریکی در خودرو، ساختار الکتریکی خودروها به تدریج تغییر می‌یابد. در حال حاضر سیستم‌هایی با باتری دوگانه با ولتاژهای ۱۴ ولت و ۴۲ ولت، استارتر و AC ساز، سیستم شارژ از طریق جذب انرژی از ترمزها و دشارژ هنگام تحویل انرژی به موتور و نظایر آنها، که می‌توانند به صورت مستقل از هم یا با هم در طراحی لحاظ گردند، برای ارتقاء راندمان توزیع، کنترل و ذخیره انرژی الکتریکی در خودرو، تحت مطالعه و بررسی هستند [1].

از این روی، صنایع باتری‌سازی در صدد عرضه باتری‌های نو هستند، که همگام با تغییر تدریجی ساختار الکتریکی خودروها باشد. این درحالی است که نقش باتری به عنوان یک وسیله محوری برای حفظ عملکرد مطلوب و افزایش قابلیت اطمینان خودرو، که قابل نظارت و مدیریت نیز باشد، ارتقا یافته است [1].

از طرفی اغلب باتری‌ها نسبت به فراشارژ (overcharge) و فرودشارژ (over discharge) شدن حساسیت دارند و موجب تخریب باتری و صدمه زدن به آن می‌گردد. علاوه بر آن در فرآیندهای شارژ سریع، مطلوب است که باتری با استفاده از روشهای شارژ معمول که عمدتاً با استفاده از جریانهای بالا انجام می‌گیرد، در کوتاهترین زمان ممکن به حالت شارژ کامل برسد در عین حال که از ورود به ناحیه فراشارژ، جلوگیری گردد [2,3].

بنابراین عملکرد مطلوب باتری به تخمین حالت شارژ (SOC) و کنترل مناسب آن بستگی دارد. لذا ضروری است که با اندازه‌گیری و تخمین آن، شرایط را برای عملکرد مناسب باتری و نیز

دستگاه‌های الکتریکی، از طریق مدیریت باتری در خودرو فراهم آورد. نظارت بر باتری سبب می‌گردد که بتوان از تمام توانایی باتری به بهترین شکل برای تأمین انرژی وسایلی که وابستگی بالایی به انرژی الکتریکی دارند استفاده کرد [3,1]. از آنجا که موضوع اصلی پایان‌نامه تخمین حالت شارژ باتری و کنترل آن در سطح مشخصی است، در ادامه به ارائه تعریفی از حالت شارژ می‌پردازیم.

۲-۱ مفهوم حالت شارژ

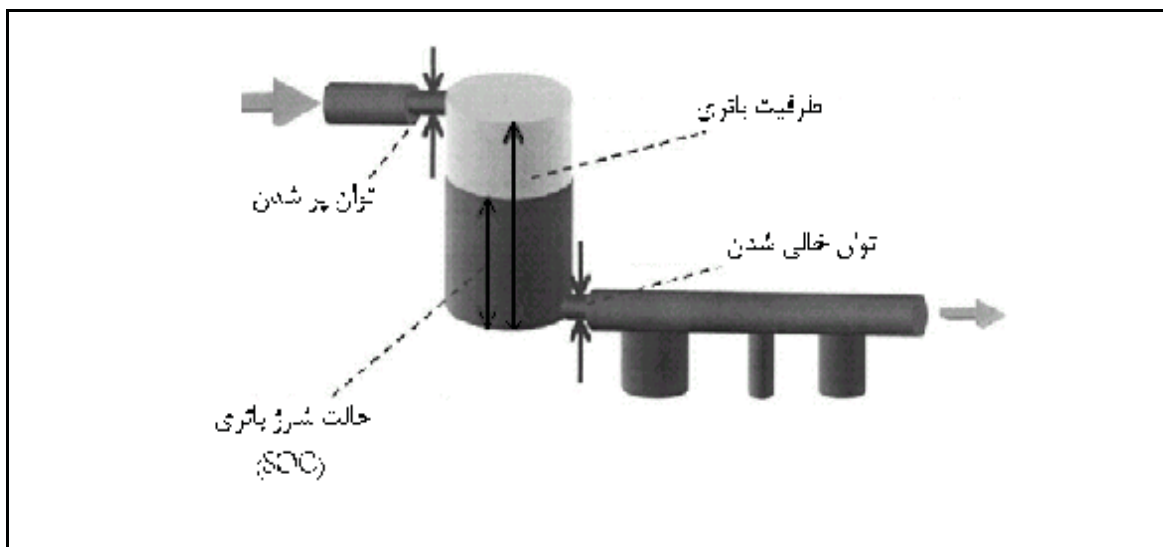
حال که ضرورت آگاهی از حالت شارژ (SOC^1) باتری بیان گردید باید تعریف دقیقی از آن بیان نمود. در نظر نخست می‌توان گفت که حالت شارژ به‌طور ساده، درصد بار الکتریکی ذخیره شده حقیقی به کل باری است که می‌توان در باتری ذخیره نمود. فرض کنید یک باتری در اختیار داریم که از قبل دارای مقداری انرژی $Q(t_0)$ است و اکنون آن را با جریان شارژ (وارد به باتری) $I_b(t)$ شارژ می‌کنیم. در این صورت مقدار بار تحویل داده شده به باتری برابر است با $\int_{t_0}^t \eta_I I_b(\tau) d\tau$ و از طرفی اگر باتری کاملاً خالی از انرژی باشد در نتیجه $Q_0 = \int_0^\infty \eta_I I_b(\tau) d\tau$ برابر کل باری است که می‌توان در باتری ذخیره نمود. η_I در روابط فوق، راندمان باتری را نشان می‌دهد که وابسته به جریان باتری است، زیرا در هنگام شارژ مقداری از توان الکتریکی در باتری تلف می‌شود. برای جریان شارژ $\eta_I \leq 1$ و برای جریان دشارژ $\eta_I = 1$ است. با استفاده از تعریف بالا، حالت شارژ با رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{\int_{t_0}^t \eta_I I_b(\tau) d\tau}{Q_0} \times 100 \quad (1-1)$$

که در آن $SOC(t_0) = Q(t_0)/Q_0$ حالت شارژ اولیه باتری، $Q(t_0)$ بار الکتریکی در لحظه t_0 و Q_0 کل بار الکتریکی است که می‌توان در باتری ذخیره نمود. اما نکته قابل توجه، در دسترس نبودن

¹State-of-Charge

حالت شارژ اولیه باتری در اغلب کاربردهایی است که به طور پیوسته از آن بهره می‌گیرند، مانند: خودروهای هیبرید. لازم به ذکر است که رابطه (۱-۱) یکی از روشهای مستقیم اندازه‌گیری حالت شارژ باتری در آزمایشگاه است که در ادامه بررسی روشهای تخمین حالت شارژ به طور اجمالی معرفی خواهد شد. شکل ۱-۱ تفسیر تصویری از حالت شارژ باتری را به‌عنوان یک تابع حالت یکنواخت، با چشم‌پوشی از اثر دما، دشارژ درونی و انتشار جریان الکتریکی، ارائه می‌دهد. همان‌گونه که در ادامه بیان می‌گردد، روشهای بسیاری برای بدست آوردن حالت شارژ باتری، چه با استفاده از حسگرهای ویژه و چه با استفاده از الگوریتمهای کلاسیک و هوشمند، بکار رفته است، که هرکدام دارای مزایا و معایبی است که به آن اشاره خواهد شد [1,2,3,4].



شکل ۱-۱: تفسیر تصویری از ظرفیت و حالت شارژ باتری

۳-۱ بررسی روشهای تخمین حالت شارژ باتری

مشخص کردن حالت شارژ باتری (SOC) بر اساس پیچیدگی یا سادگی نوع باتری و کاربردی که در آن استفاده می‌گردد، می‌تواند مسأله‌ای اساسی باشد. در زیر به بررسی اجمالی روشهای بکار رفته برای تخمین حالت شارژ باتری‌ها می‌پردازیم.

۱-۳-۱ اندازه‌گیری حالت شارژ از طریق ویژگیهای فیزیکی الکترولیت

در اغلب باتری‌های دارای الکترولیت مایع، مانند: انواع سربی-اسیدی، الکترولیت در بیشتر

واکنشهای هنگام شارژ و دشارژ شرکت می‌کند. وابستگی خطی (بیشتر در مورد انواع سربی-اسیدی) که بین تغییر چگالی اسید و حالت شارژ باتری وجود دارد، برای تعیین حالت شارژ باتری بکار می‌رود. این روش تنها برای باتریهای دارای الکترولیت مایع کاربرد دارد و برای اندازه‌گیری چگالی اسید، با استفاده از حسگرهای ویژه، قابل انجام است.

مشکلات ناشی از این روش اندازه‌گیری، مربوط به لایه لایه شدن اسید، کاهش آب اسید، و همچنین عمر و توانایی سنسور مورد استفاده می‌باشد. دو مشکل نخست با استفاده از هم زدن الکترولیت داخلی و نیز اضافه کردن آب مورد نیاز به صورت خودکار می‌تواند تا حدودی برطرف گردد. از طرف دیگر توجه به این نکته اهمیت دارد که اندازه‌گیری خواص فیزیکی اسید، درون سوراخ و منفذ الکترودها، که محل مصرف و تولید اسید است قابل انجام نیست. بنابراین در فرآیندهایی که جریان بالا وجود دارد، انتشار الکترولیت به صورت آرام به عنوان یک عامل تولید خطا در این روش عمل می‌نماید [4].

۱-۳-۲ ولتاژ مدار باز

مشابه آنچه که در مورد اندازه‌گیری چگالی اسید در بخش قبل گفته شد، ولتاژ مدار باز باتری به صورت مستقیم با حالت شارژ آن بستگی دارد. در کاربردهایی که عموماً دوره‌های طولانی از استراحت، یعنی عدم شارژ و دشارژ باتری وجود دارد، روش ذکر شده پیشنهاد می‌گردد. در این صورت اندازه‌گیری ولتاژ مدار باز بیشتر برای تنظیم کردن روشهای دیگر تخمین حالت شارژ بکار می‌رود.

تفاوت بین ولتاژ مدار باز باتری هنگامی که به‌طور کامل شارژ باشد، با هنگامی که فرشارژ شده باشد، ناچیز است و در نتیجه در هنگام فرشارژ، آزمون دچار خطا می‌گردد. همچنین باتری‌هایی وجود دارند که ساعتهای زیادی طول می‌کشد به حالت ماندگار خود برسند، تا برای انجام آزمون ولتاژ مدار باز آماده شوند. این ویژگی می‌تواند باعث مشکلاتی گردد. علاوه بر آن، در اغلب کاربردها مقداری جریان به‌طور دائم برای دیگر وسایل الکتریکی مورد استفاده لازم

است، که در این صورت آزمایش ولتاژ مدار باز برای تخمین حالت شارژ کارا نمی‌باشد. وابستگی خطی حالت شارژ با ولتاژ مدار باز به صورت رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$S(t) = \frac{V_{oc}(t) - a_0}{a_1} \quad (۲-۱)$$

که در آن $S(t)$ نشان دهنده حالت شارژ باتری برحسب درصد است، a_0 ولتاژ پایانه باتری هنگامی که $S(t) = 0\%$ است و a_1 با استفاده از a_0 و اندازه گیری ولتاژ مدارباز در $S(t) = 100\%$ از معادله (۲-۱) قابل محاسبه است. از رابطه (۲-۱) برای محاسبه حالت شارژ با استفاده از تخمین ولتاژ مدار باز باتری با مدل تونن یا نورتن، در روشهای کلاسیک تخمین مانند: فیلتر کالمن استفاده می‌شود، که در قسمتهای بعد به این روش می‌پردازیم [4].

۳-۳-۱ شمارش آمپر ساعت

این روش یکی از معمولی‌ترین روشها برای محاسبه حالت شارژ است. از آنجا که شارژ و دشارژ بطور مستقیم به جریان باتری بستگی دارند، استفاده از جریان شارژ یا دشارژ برای اندازه‌گیری حالت شارژ باتری ایده‌ای معقول است. اگر از قبل بدانیم که چه مقدار انرژی در باتری وجود دارد، با استفاده از رابطه (۱-۱) که در زیر تکرار می‌گردد، به‌طور مستقیم حالت شارژ را می‌توان بدست آورد:

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{\int_{t_0}^t \eta_I I_b(\tau) d\tau}{Q_0} \times 100 \quad (۳-۱)$$

که در آن Q_0 ظرفیت نامی، I_b جریان باتری و η_I راندمان باتری است. همانگونه که مشخص است، روش ذکر شده دارای دو مشکل اساسی است، نخست آنکه اندازه‌گیری نادرست جریان می‌تواند به خطای زیادی منجر گردد، در عین حال که اندازه‌گیری جریان دقیق گران تمام می‌شود. دوم اینکه تمام جریانی که باتری را تغذیه می‌کند برای شارژ مصرف نمی‌گردد، در نتیجه تلفات باید محاسبه گردد. مشکل نخست، با استفاده از صرف هزینه برای تهیه تجهیزات اندازه‌گیری دقیق جریان قابل رفع است و برای برطرف کردن مشکل دوم، یکی از ساده‌ترین روشها برای محاسبه

جریان تلفاتی، به کاربردن ضریبی ثابت از جریان شارژ باتری در هر شارژ است. به این معنی که تلفات را به صورت ثابت که با ضریب مناسبی با جریان شارژ رابطه مستقیم دارد، در نظر بگیریم.

شمارش آمپرساعت یکی از معمولی ترین روشهای اندازه گیری حالت شارژ است، که برای بیشتر سیستمها و کاربردها بکار می رود. اما روش ذکر شده مادامی که اندازه گیری جریان به صورت دقیق انجام شود، روشی آسان و قابل اطمینان برای اندازه گیری حالت شارژ است. برای مثال در خودروهای الکتریکی خالص روش به کار رفته اگر طوری باشد که بازشارژهای کامل به صورت منظم و تحت شرایط کنترل شده انجام گیرد، دارای مزیت است. در این زمینه کاربرد روش ارائه شده دارای محدودیت است، زیرا همیشه مقدار شارژ اولیه باتری در دسترس نیست، اما از طرفی این روش قابل اعمال به تمام سیستمهای باتری که در خودروهای الکتریکی خالص به کار می رود، مانند باتری های سربی- اسیدی، نیکل کادمیوم، نیکل- متال- هیدرید و باتری های لیتیومی است [4].

۱-۳-۴ تخمین با استفاده از منطق فازی

تحقیقات زیادی بر روی طیف امپدانس باتری انجام گرفته است. این روش، تکنیکی عمومی برای اندازه گیری و بررسی فرآیندهای الکتروشیمیایی است و تا کنون بر روی تمام انواع باتری، نه تنها برای تخمین حالت شارژ، بلکه برای تعیین حالت سلامتی باتری (SOH^2) نیز، به کار رفته است [4,5].

همانگونه که از تحقیقات تجربی بدست آمده است، امپدانس باتری در فرکانسهای مختلف موج تحریک سینوسی و همچنین بسته به مقدار حالت شارژ باتری، متفاوت است [6]. اما از آنجاکه بدست آوردن رابطه ای ریاضی، برای مشخص کردن حالت شارژ (SOC) از روی ویژگی های بدست آمده از طیف نمایی امپدانس کاری پیچیده است، بنابراین از منطق فازی برای ایجاد چنین رابطه ای استفاده می گردد. دو روش برای بهینه سازی مدل فازی وجود دارد، که عبارتند از: روش

² State-of-Health

یادگیری تحت نظارت و یادگیری آزاد. به این معنی که با تنظیم کردن توابع عضویت ورودی و خروجی، مدل سیستم فازی بهینه می‌گردد. در حالت یادگیری تحت نظارت، می‌توان با استفاده از پس‌خورخبره (Expertfeedback) یا شبکه عصبی، مانند الگوریتم پس انتشار، مدل فازی را بهینه کرد. ولی در حالت یادگیری آزاد، برای دسته‌بندی کردن فضای ورودی و خروجی که از آن، توابع عضویت و قواعد اولیه قابل استخراج باشد، می‌توان از الگوریتم‌هایی چون خوشه‌سازی بهره گرفت [7,5].

با وجود آنکه تحقیقات گسترده‌ای در این روش انجام گرفته است، طیف‌نمای امیدانس به ندرت در عمل برای اندازه‌گیری حالت شارژ بکار می‌رود. طبق تحقیقات انجام‌شده، مشخص شده است که طیف‌نمای امیدانس حساسیت بسیار زیادی به دما دارد به‌طوری‌که تنها در فرکانسهای بسیار بالا قابل استفاده است [3].

۱-۳-۵ شبکه های عصبی مصنوعی

از آنجا که شبکه‌های عصبی بین داده‌های ورودی و خروجی هر سیستمی، رابطه‌ای مشخص ایجاد می‌کنند، بنابراین برای هر نوع باتری و هر نوع سیستمی می‌توانند به‌کار روند. در بعضی روشها برای تخمین حالت شارژ باتری با استفاده از شبکه‌های عصبی، شبکه قبل از استفاده، آموزش داده می‌شود. در صورتیکه در بعضی روشهای دیگر، شبکه به‌صورت وقتی و در حین کار باتری آموزش می‌بیند. در روش آخر استفاده از دیگر روشهای تخمین، برای تولید داده‌های آموزشی ضروری است. خطای بوجود آمده در تخمین به نحو چشمگیری به داده‌های آموزشی و روش آموزشی مربوط است [8,9,10,11,12].

۱-۳-۶ تخمین با استفاده از فیلتر کالمن

فیلتر کالمن یکی از الگوریتمهای موفق تخمین است که براساس مدل گسسته فضای حالت سیستم‌های دینامیکی، به‌صورت وقتی و با محاسبات برگشتی، قادر است حالت‌های درونی سیستم را

که به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری نمی‌باشند، تخمین بزنند. از این‌روی در بسیاری از تحقیقات، که بر روی تخمین حالت شارژ باتری‌ها انجام شده‌است، از الگوریتم فیلتر کالمن بهره جسته‌اند [17,16,15,14,13].

در برخی از کارهای انجام شده، از این تخمینگر برای تخمین ولتاژ مدارباز باتری یا برخی پارامترهای داخلی باتری که دارای رابطه‌ای مستقیم با حالت شارژ باتری هستند، استفاده شده‌است [14,13]. اما در برخی دیگر با استفاده از حالت شارژ به‌عنوان یکی از متغیرهای حالت مدل باتری، حالت شارژ به‌طور مستقیم، با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته، تخمین زده می‌شود [17,16,15,3]. یکی از مزایای فیلتر کالمن، قابلیت اعمال آن به هر نوع باتری است و از معایش، حجم بالای محاسباتی و همچنین طراحی مدلی خوب برای باتری استفاده شده، می‌باشد.

۱-۴ کنترل حالت شارژ

همان‌گونه که در مقدمه این فصل ذکر گردید، به‌دلیل ویژگی‌های خاص در خوردروهای الکتریکی هیبرید، نیاز به باتریهای جدید و کارآتر، چه در ذخیره‌سازی و چه در تولید توان الکتریکی مورد نیاز، ضروری است. لذا باتری‌های پیشرفته‌ای نظیر باتری‌های لیتیوم-یون، لیتیوم-پلیمر، نیکل-متال هیدرید و همچنین باتری‌های سربی-اسیدی پیشرفته برای کاربرد در خودروهای هیبرید در نظر گرفته می‌شوند [۱۸]. از طرفی باتری‌های ذکر شده حساسیت بیشتری به عملکرد نادرست در مقایسه با باتری‌های معمولی دارند، بنابراین به سیستم کنترلی نیاز است که عملکرد باتری در خودروهای هیبرید را کنترل کند [19,1]. در روشهای سنتی کارکرد باتری‌ها، تنها از حدود مشخص برای ولتاژ پایانه‌های باتری جهت حفاظت آن از اضافه شارژ و اضافه دشارژ آن استفاده می‌شد که روشی ناکارآمد است و باعث تخریب و کاهش عمر باتری می‌گردد [18,3].

در [20] از یک کنترل‌کننده فازی، با استفاده از دو مد دریافت و شارژ، برای کنترل حالت شارژ باتری استفاده شده است. در مد دریافت، که دارای بازه زمانی بسیار کوچکتری نسبت به مد شارژ است، ولتاژ مدارباز و همچنین جریان شارژ اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از داده‌های به‌دست

آمده، کنترل‌کننده فازی به کنترل حالت شارژ در مد شارژ می‌پردازد. روش ارائه شده به دلیل قطع کردن بار در مد دریافت، نیاز به سوئیچ‌های اضافی و بیشتر شدن هزینه دارد و همچنین برای کاربرد در خودروهای هیبرید که علاوه بر افزایش هزینه، قطع بار می‌تواند موجب صدمه به مصرف‌کننده‌های الکتریکی باشد، مناسب به نظر نمی‌آید.

در مرجع [21] از سیستم کنترلی برای کنترل یک مازول هیجده تایی متشکل از دو شارژکننده، استفاده شده است که شارژکننده اصلی برای شارژ کردن کل مازول به کار می‌رود، در صورتیکه شارژرکننده کمکی برای متوازن کردن حالت شارژ هر کدام از سول‌ها استفاده می‌گردد. در مرجع ذکر شده برای کنترل از روش شارژ جریان ثابت و برای تخمین حالت شارژ از روش شمارش آمپرساعت بهره گرفته شده است.

۵-۱ روش پیشنهادی برای پیاده‌سازی

از آنجا که تخمین حالت شارژ باتری در خودروهای هیبرید از مهمترین متغیرها، برای کنترل بهینه مصرف سوخت است، و از طرفی برای تامین گشتاور مورد نیاز خودرو و وسایل الکتریکی دیگر و همچنین افزایش کارایی باتری، لازم است که حالت شارژ باتری همواره در محدوده مشخصی قرار گیرد، بنابراین در این پایان‌نامه طراحی و پیاده‌سازی تخمینگر و کنترل‌کننده حالت شارژ از اهداف اصلی می‌باشد. در این پایان‌نامه از باتری لیتیوم-یون با ظرفیت نامی $1.5Ah$ و ولتاژ نامی $3.7V$ استفاده شده است و تمام نتایج عملی ارائه شده مربوط به این نوع باتری می‌باشد. در فصل ۲ ابتدا ملاحظات عملی و نحوه پیاده‌سازی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای طراحی تخمینگر حالت شارژ باتری، ابتدا در فصل ۳ مدل فضای حالت باتری را که حالت شارژ یکی از متغیرهای حالت است، با استفاده از آموزش شبکه عصبی پایه شعاعی (RBF^3)، به دست آورده خواهد شد. در فصل ۴ با استفاده از الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته و مدل آموزش دیده شبکه عصبی، حالت شارژ باتری به صورت وصل - خط با دقت خوب،

³ Radial-Basis Function