



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>



Research Article

Design and analysis of electric bus Battery Management System (BMS) based on charge state estimation

Seyyed Mahdi Mousavi Badjani ^{a,*}, Mohammad Hadi Rismani ^b, Mustafa Islami ^c,
Mahdi Salehi Eskandari ^d

1. Electromagnetic complex, Malek Ashtar University of Technology
2. Electromagnetic complex, Malek Ashtar University of Technology
3. Electromagnetic complex, Malek Ashtar University of Technology
4. Electromagnetic complex, Malek Ashtar University of Technology

*Corresponding Author: Seyyed Mahdi Mousavi Badjani

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2022-03-13

Revised: 2022-05-12

Accepted: 2022-10-19

Keywords:

Electric bus,

battery pack,

battery management system,

lithium-ion cell.

ABSTRACT

Due to the environmental pollution and technological progress, the production of electric vehicles has grown exponentially. The most vital part in electric cars and buses is the electric energy storage system and a energy storage source with excellent performance is lithium-ion batteries. In order to control performance, maintain stable conditions and safety, increase productivity and its lifespan, it is necessary to use a Battery Management System (BMS). In this article, to design a battery pack for an electric bus with a weight of 19 tons, by estimating the required power and energy (2kWh consumption per kilometer), so that you have a chargeable battery pack with a power of 330kW, choosing the appropriate cell. We pay While continuously monitoring the battery, the BMS estimates the State of Charge of the battery (SoC) using a Unscented Kalman Filter (UKF). To estimate the battery State of Health (SoH), joint estimation method is used. In order to replace the energy of the closed cells, the switched parallel resistance method is used, and finally, a battery thermal management system (BTMS) is used for the environmental stability of the closed cell depending on the working conditions. The results of the simulation show that the different parts of the designed BMS correctly estimate the working states of the battery and create stability and safe conditions.

© 2013 Published by Semnan University Press. All rights reserved.

DOI: <https://doi.org/>

طراحی و آنالیز سیستم مدیریت باتری (BMS) اتوبوس برقی بر پایه تخمین وضعیت شارژ

سیدمهدی موسوی بادجانی^{۱*}، محمدهادی ریسمانی^۲، مصطفی اسلامی^۳ و مهدی صالحی اسکندری^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	
دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۰	امروزه به دلیل آلودگی محیط زیست و پیشرفت تکنولوژی، تولید خودروهای برقی رشد تصاعدی پیدا کرده است. حیاتی ترین بخش در اکثر خودروها و اتوبوس های برقی، سیستم ذخیره ساز انرژی الکتریکی و مهم ترین عنصر ذخیره ساز انرژی الکتریکی، باتری های لیتیوم یونی است. به منظور کنترل عملکرد باتری، حفظ شرایط پایدار و ایمنی، افزایش بهره وری و طول عمر آن، استفاده از سیستم مدیریت باتری (BMS) الزامی می باشد. در این مقاله، برای طراحی بسته باتری اتوبوس برقی با وزن ۱۹ تن، با تخمین توان و انرژی مورد نیاز (مصرف ۲ kWh به ازای هر کیلومتر)، به طوریکه بسته باتری امکان شارژ با توان ۳۳۰ kW را داشته باشد، به انتخاب سلول مناسب پرداخته شده است. BMS ضمن پایش مداوم بسته باتری، با استفاده از فیلتر کالمن بدون اثر (UKF) وضعیت شارژ باتری (SoC) را تخمین می زند. برای تخمین وضعیت سلامت باتری (SoH)، روش تخمین مشترک به کار رفته است. جهت متعادل سازی انرژی سلول های بسته باتری، روش مقاومت موازی سوئیچ شونده استفاده گردیده و در نهایت به منظور پایداری دمایی بسته باتری تحت شرایط کاری مختلف، از یک سیستم مدیریت گرمایی (BTMS) استفاده شد. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهد که بخش های مختلف BMS طراحی شده به درستی حالات کاری باتری را تخمین زده و باعث ایجاد پایداری و شرایط ایمن می گردد.
واژگان کلیدی:	
اتوبوس برقی، سیستم مدیریت باتری، بسته باتری، سلول لیتیوم یونی.	

۱- مقدمه

استفاده وسیع از خودروهای سوخت فسیلی که به منظور تولید نیروی پیشران خود از موتور احتراق داخلی استفاده می نمایند، منجر به افزایش آلودگی و انتشار گازهای گلخانه ای شده است [۱]. در سال های اخیر تولید خودروهای برقی و صنایع وابسته به آن، در کشورهای صنعتی جایگاه ویژه ای پیدا کرده است. پیش بینی ها نشان می دهد که تا سال ۲۰۴۰ خودروهای برقی با باتری، حدود نیمی از خودروهای تولیدی در دنیا خواهند بود [۲]. اتوبوس های درون شهری به دلیل ساعات کاری زیاد و میزان

جابجایی مسافری از مهم ترین عوامل مؤثر در کیفیت زندگی شهروندان بوده و هرگونه سرمایه گذاری در این زمینه باعث بهبود وضعیت و سلامت جامعه می گردد. مهم ترین و هزینه برترین بخش از یک اتوبوس برقی، سیستم ذخیره کننده انرژی الکتریکی قابل شارژ (REESS) به خصوص بخش بسته باتری آن می باشد، که در اتوبوس های برقی شارژ شبانه، قیمت آن حدود نصف کل هزینه تمام شده اتوبوس می گردد؛ البته با طراحی خوب و دقیق، ضمن ایجاد شرایط ایمن، افزایش طول عمر و بازدهی را برای سیستم ذخیره کننده انرژی اتوبوس برقی به همراه

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: drmosavi@chmail.ir

۱. استادیار، مجتمع الکترومغناطیس، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲. پژوهش یار، مجتمع الکترومغناطیس، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳. دانش آموخته ارشد، مجتمع الکترومغناطیس، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۴. دانش آموخته ارشد، مجتمع الکترومغناطیس، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تشکیل دهنده بسته باتری در محدوده ولتاژ، جریان و دمای مجاز و تخمین وضعیت باتری، با شرح وظایف ذیل باعث عملکرد بهینه در اتوبوس برقی می‌گردد [۱۰]:

- پایش مداوم جریان، ولتاژ و دمای نقاط مختلف بسته باتری و محیط

- تعیین وضعیت شارژ (SoC) و وضعیت سلامت (SoH) - متعادل سازی انرژی ذخیره شده در سلول ها جهت افزایش بازدهی و طول عمر

- کنترل توان ورودی و خروجی از بسته باتری

- ایجاد شرایط پایدار دمایی مطبوع

- اعلام هشدار و ایجاد ایمنی

ساختار الکتروشیمیایی سلول مناسب برای طراحی بسته باتری اتوبوس های شارژ شبانه، از نوع LFP است، که علاوه بر ایمنی زیاد و ارزان بودن، در قالب ها و ظرفیت های مختلف تولید می گردد. یکی از گزینه های مناسب در میان سلول های LFP، سلول مکعبی مدل SE200 ساخت شرکت CALB می باشد که در شکل (۱) نمای ظاهری آن نشان داده شده است. همچنین برجسته ترین ویژگی های سلول های SE200 در جدول ۱ آورده شده است [۱۱].



شکل ۱- قالب سلول SE200 [۱۱]

خواهد داشت [۳]. ویژگی های انواع اتوبوس های برقی با سیستم ذخیره انرژی باتری در مرجع [۴] آمده است.

مهم ترین خصوصیات بسته باتری مورد نیاز تلفات کم، ایمنی بالا، چگالی انرژی و انرژی مخصوص بالا، مقاومت کافی در برابر نفوذ آب و کم بودن احتمال آتش سوزی یا انفجار در حوادث می باشد [۵].

مهم ترین مزایای باتری های لیتیوم یونی در مقایسه با سایر باتری های قابل شارژ، بالا بودن انرژی مخصوص (Wh/kg)، توان مخصوص (W/kg)، چگالی انرژی (Wh/Liter)، چگالی توان (W/Liter)، نرخ دشارژ (C-rate)، عمر مفید در تعداد زیاد چرخه های شارژ- دشارژ و همچنین کم بودن خود دشارژی و اثر حافظه ای است. علی رغم مزایای مذکور، باتری های لیتیوم یونی دارای نقاط ضعف بزرگی مانند کاهش عمر و آسیب جدی در شرایط اضافه شارژ و دشارژ، کار در دمای زیاد و یا کم نامتعارف، جریان شارژ و دشارژ بیش از نرخ تعریف شده، می باشند [۶].

در اتوبوس های برقی، شرایط بارگذاری سخت در حالت ترمز و شتاب خودرو و همچنین تغییرات دمای محیط در فصول مختلف، در عملکرد باتری بسیار تأثیرگذار است و می بایست در مدل سازی باتری لحاظ شوند [۷ و ۸].

با توجه به محدودیت های ولتاژ و ظرفیت یک سلول، به یک بسته باتری متشکل از چندین سلول موازی یا سری نیاز است، تا تقاضای کاربرد انرژی و توان زیاد را برآورده کند. برای مدیریت این بسته های انرژی زیاد (بیش از ۱۰۰ کیلووات ساعت) و ولتاژ زیاد (بیش از ۳۰۰ ولت)، به یک سیستم مدیریت باتری برای کنترل، نظارت و بهینه سازی استفاده از باتری ها، به طور ایمن و کارآمد نیاز است [۹]. سیستم مدیریت باتری با تنظیم عملکرد مجموعه سلول های

جدول ۱- مشخصات سلول SE200 [۱۱]

ظرفیت نامی (Ah)	۲۱۲	SoC مناسب برای کارکرد	۱۰٪ ~ ۹۰٪
ظرفیت مشخصه (Ah)	۲۰۰	دمای کارکرد (°C)	شارژ ۰ - ۴۵
وزن (Kg)	۵/۶		دشارژ -۲۰ - ۵۵
مقاومت داخلی (mΩ)	۰/۱ - ۰/۵	بیشترین اختلاف ظرفیت در ۳۰ سلول	< ۵٪
محدوده ولتاژ (V)	ولتاژ قطع شارژ		۳/۶۵
	ولتاژ قطع دشارژ	۲/۵	ضخامت ۷۱
نرخ ظرفیت دشارژ (h ⁻¹)	تخلیه پیوسته	۱C	پهنا ۱۸۲
	تخلیه مقطعی	۳C (۱۰ sec) ۲C (۳ min)	طول ۲۷۵
زمان شارژ (h)	شارژ استاندارد	۴ (~۰/۲۵ C)	سال معرفی ۲۰۱۹

تخمین SoC یک فناوری حیاتی در زمینه خودروهای برقی است که دقت آن تأثیر مستقیمی بر عملکرد، قابلیت اطمینان و هزینه وسیله نقلیه می‌گذارد و اطلاعات حیاتی مربوط به میزان ظرفیت رانندگی را در اختیار رانندگان قرار می‌دهد. همچنین به عنوان پایه‌ای حیاتی برای کاهش اثرات مضر شارژ و تخلیه بیش از حد باتری بر طول عمر باتری و همچنین تسهیل مدیریت و نگهداری بسته باتری عمل می‌کند [۱۲].

وضعیت داخلی باتری را نمی‌توان به طور مستقیم اندازه‌گیری کرد و فقط می‌توان به طور غیرمستقیم از سیگنال‌هایی مانند ولتاژ، جریان و دما تخمین زد [۱۳]. فاکتورهای زیادی از جمله مشخصه ولتاژ مدار باز (OCV) بر حسب SoC، نویز اندازه‌گیری و محدوده دقت اندازه‌گیری ولتاژ و جریان در تخمین SoC تأثیرگذار هستند. روش‌های زیادی تاکنون جهت تخمین SoC ارائه شده است که به چهار دسته کلی مبتنی بر جدول، روش انتگرال آمپرساعت، روش‌های تخمین داده‌محور و روش‌های تخمین مبتنی بر مدل تقسیم می‌شود [۱۴].

مرجع [۱۵] به شرح چگونگی تخمین حالت از طریق فیلتر کالمن می‌پردازد و چند روش پرکاربرد تخمین وضعیت شارژ در خودروهای برقی از جمله فیلتر کالمن توسعه‌یافته (EKF) و فیلتر کالمن بدون اثر (UKF) را معرفی می‌کند. با توجه به ماهیت غیرخطی و اثرپذیری حالت‌های باتری از شرایط محیطی، فیلتر کالمن توسعه‌یافته و فیلتر کالمن بدون اثر با خطای کم‌تری تقریب را انجام می‌دهند. در [۱۶] این دو روش در تخمین وضعیت شارژ با هم مقایسه شده و با انجام چندین آزمایش و شبیه‌سازی، فیلتر کالمن توسعه‌یافته را پیشنهاد می‌کند. برای تخمین وضعیت شارژ در این مقاله با توجه به مزیت‌هایی مانند دقت زیاد، توانایی تخمین حالت در سیستم‌های غیرخطی مرتبه بالا و پر نویز، از فیلتر کالمن بدون اثر استفاده شده است.

تخمین وضعیت سلامت، یک شاخص تعیین توانایی باتری برای تحویل انرژی یا توان مورد انتظار در خروجی (خودروی برقی) است. انواع روش‌های تخمین SoH که در دو دسته کلی تجربی و مبتنی بر مدل تقسیم می‌شود، در [۱۷] آمده است. در روش‌های تجربی، اطلاعات و عواملی که بر طول عمر باتری در طول عملکرد چرخه‌ای مؤثر است، تجزیه و تحلیل می‌شود. روش‌های مبتنی بر مدل، SoH را در طول زمان کار واقعی با برآورد پارامترهایی از سلول که حساس

به فرسودگی است، تعیین می‌کنند. در [۱۸] تخمین وضعیت شارژ و عمر مفید باقی‌مانده (RUL) سلول‌های لیتیوم یونی مورد بررسی قرار گرفته و روشی بهبودیافته جهت تخمین SoH مبتنی بر مدل‌سازی سلول، بیان می‌شود.

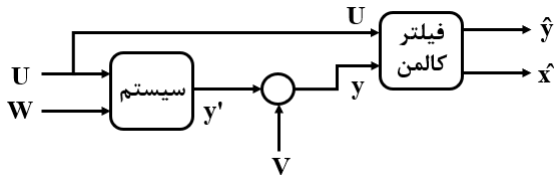
سلول‌های تشکیل‌دهنده بسته باتری به دلیل محدودیت‌های ساخت تولیدکننده و محل‌های نصب متفاوت در مونتاژ، دارای اختلاف‌های مشخصه‌ای بوده که در طول چرخه‌های شارژ و دشارژ ضمن کاهش بازدهی، باعث ایجاد اضافه شارژ و دشارژ در سلول‌های ضعیف‌تر و کاهش طول عمر بسته باتری شده و گاهی باعث بروز حوادث ناگوار خواهد شد [۱۹]. به‌طور کلی سه روش برای متعادل‌سازی وجود دارد که شامل روش انتخاب سلول، متعادل‌سازی غیرفعال و متعادل‌سازی فعال می‌باشد. مراجع [۱۹ و ۲۰] روش‌های مختلف برای متعادل‌سازی باتری لیتیومی به همراه مزایا و معایب آن روش را بیان می‌کنند.

هدف اصلی این مقاله، ارائه یک نمای کلی از مدل بسته باتری، سیستم مدیریت باتری و همچنین بررسی عملکرد آن در اتوبوس برقی است. در مراجع [۲۱-۲۳] چندین مدل شبیه‌سازی BMS وجود دارد که عمدتاً به مدل باتری و خصوصیات خود مدل مربوط می‌شوند.

در مرجع [۲۱] یک BMS در سیمولینک متلب شبیه‌سازی شده و انواع مختلف روش‌های تخمین پارامترهای اصلی آن تحلیل شده است. پارامترهای اصلی شامل متعادل‌سازی بسته باتری، روش‌های تخمین وضعیت شارژ (SoC)، تخمین وضعیت سلامت (SoH)، کنترل شارژ و دشارژ و نظارت بر دما است که به بهبود عملکرد باتری کمک می‌کند. در این مرجع از روش شمارش کولمب برای تخمین SoC استفاده شده است، اما در پایان بیان کرده است که روش EKF تخمین دقیق‌تری از SoC ارائه می‌دهد.

در مرجع [۲۴] یک سیستم مدیریت باتری برای خودروهای برقی معرفی شده است که از یک شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و تئوری کنترل افت تطبیقی مبتنی بر منطق فازی استفاده می‌کند. در نهایت این سیستم بر روی یک بسته باتری لیتیوم یونی ۱۰۰ کیلووات ساعتی اجرا و آزمایش شده است.

در مرجع [۲۳] تخمین SoC با استفاده از سه روش شمارش کولن، فیلتر کالمن توسعه‌یافته و فیلتر کالمن بدون اثر پیاده‌سازی شده است و در نهایت نتایج شبیه‌سازی



شکل ۲- ساختار کلی فیلتر کالمن برای تخمین حالت‌های یک سیستم با داشتن نویزهای فرآیند و اندازه‌گیری

با توجه به گستردگی انواع روش‌های تخمین SoC، انتخاب روشی که علاوه بر تعیین SoC به صورت لحظه‌ای و برخط، توانایی حذف اثر نویزهای موجود در اتوبوس برقی بر روی تخمین را داشته باشد، بسیار اهمیت دارد. به همین منظور، تخمین SoC با استفاده از روش تطبیقی مبتنی بر مدل UKF، در این مقاله پیشنهاد شده و در طراحی BMS با استفاده از نرم‌افزار متلب مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم فیلتر کالمن بدون اثر، از تبدیل بدون اثر استفاده می‌کند تا انتشار خواص آماری از تخمین حالت به وسیله توابع غیرخطی را بدست آورد. این روش براساس روش‌های خطی‌سازی آماری است. این الگوریتم ابتدا مجموعه‌ای از مقادیر حالت را ایجاد می‌کند که نقاط سیگما نامیده می‌شوند و از هر یک از نقاط سیگما به عنوان ورودی برای انتقال حالت و توابع اندازه‌گیری استفاده می‌کند تا مجموعه‌ی جدیدی از نقاط حالت تبدیل شده بدست آورد. سپس از میانگین و کوواریانس نقاط تبدیل شده برای بدست آوردن تخمین حالت و کوواریانس خطای تخمین حالت استفاده می‌شود. روابط و روش UKF ارائه شده از مرجع [۲۵]، در ایجاد تابع UKF نرم‌افزار متلب مورد استفاده قرار گرفته است.

در شبیه‌سازی واقعی یک سیستم دینامیکی با استفاده از مدل، اختلاف‌ها و یا عدم قطعیت‌هایی وجود دارد که در اصطلاح به آن نویز فرآیند می‌گویند. همچنین حسگرهای اندازه‌گیری استفاده شده برای یک سیستم واقعی، هر چند گران‌قیمت هستند، اما کاملاً دقیق نبوده و همواره یک محدوده تلورانس دارند که با عنوان نویز اندازه‌گیری شناخته می‌شود. این عوامل باعث ایجاد اختلاف بزرگی در تعیین حالت مورد نظر می‌گردد. فیلتر کالمن، اثر این عوامل مخرب را در تخمین حالات مورد نظر، تا محدوده بزرگی کاهش می‌دهد [۲۶].

نویز فرآیند برای SoC، بر اساس مشخصات دینامیکی سیستم باتری تخمین زده می‌شود. در محاسبات، نویز

این روش‌ها به صورت مقایسه‌ای مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

BMS توسعه یافته در این مقاله، شامل یک سیستم تخمین SoC مبتنی بر فیلتر کالمن بدون اثر، تخمین SoH با استفاده از روش تخمین مشترک، متعادل‌سازی سلول‌های باتری با استفاده از روش مقاومت موازی سوئیچ‌شونده، الگوریتمی برای کنترل جریان و خنک‌سازی بسته باتری است. این اجزا با هم کار می‌کنند، تا از عملکرد ایمن و کارآمد بسته باتری اتوبوس برقی در دماهای عملکردی متفاوت اطمینان حاصل کنند. نتایج شبیه‌سازی، عملی بودن این روش را برای شرایط رانندگی اتوبوس برقی در دنیای واقعی تأیید می‌کند.

۲- معادلات حاکم بر سیستم مدیریت باتری

بر اساس مجموع نیروهای وارد بر اتوبوس در شرایط مختلف جاده‌ای که نیروی پیشران اتوبوس می‌بایست بر آن غلبه کند، محاسبات الگوی حرکتی سرعت- زمان، بر اساس مدت زمان فعالیت و سایر نیازهای جانبی مانند تهویه مطبوع، صورت می‌گیرد. به‌طور خلاصه همان‌طور که در رابطه (۱) مشاهده می‌شود، نیروی بار جاده‌ای (F_L)، برآیند نیروی کشش آیرودینامیکی (F_d)، نیروی مقاومت چرخشی (F_T) و نیروی صعود (F_c) می‌باشد [۲۴]:

$$F_L = F_d + F_T + F_c = \rho \cdot A \cdot C_d (V - V_w)^2 / 2 + M_g \cdot C_{IT} \cdot \cos \theta + M_g \cdot \sin \theta \quad (1)$$

در این رابطه ρ چگالی هوای محیط، A سطح جلویی خودرو، C_d ضریب کشش آیرودینامیکی، V سرعت حرکت خودرو، V_w سرعت باد مقابل، M وزن خودرو، g نیروی گرانش، C_{IT} ضریب مقاومت چرخشی و θ زاویه شیب می‌باشد [۲۴].

۲-۱- معادلات تخمین وضعیت شارژ

فیلتر کالمن یک رؤیت‌گر با در نظر گرفتن خطای عدم قطعیت مدل (فرآیند) و خطای اندازه‌گیری است. اصول کار فیلتر کالمن، پیش‌بینی رفتار سیستم و تصحیح خطای پیش‌بینی، با مقایسه خروجی واقعی و تخمین زده شده برای یک گام جلوتر خواهد بود. شکل (۲) ساختار کلی فیلتر کالمن را برای تخمین حالت‌های یک سیستم واقعی که در نرم‌افزار متلب استفاده شده است، نشان می‌دهد.

باتری را می‌توان با داشتن مقادیر SoC در زمان‌های t_1 و t_2 و همچنین آمپرساعت جمع‌شده در طی دوره بین t_1 و t_2 بدست آورد.

با بدست آمدن ظرفیت فعلی به وسیله این روش و داشتن ظرفیت اولیه سلول نو که توسط سازنده داده می‌شود، SoH سلول برحسب درصد طبق رابطه (۵) بدست می‌آید [۱۷]:

$$\text{SoH} = 100 - \frac{C_{\text{prime}} - C_{\text{max}}}{C_{\text{prime}}} \times 50 \quad (5)$$

در این معادله C_{max} حداکثر ظرفیت کنونی و C_{prime} ظرفیت اولیه سلول نو است. لازم به ذکر است عمر بسته باتری خودروهای برقی هنگامی به پایان می‌رسد که ظرفیت کنونی آن در مقایسه با ظرفیت اولیه، حداکثر ۲۰٪ کاهش یابد.

لازم به ذکر است ظرفیت اولیه سلول‌های SE200، ۲۰۰ Ah است که طبق کاتالوگ سازنده بعد از ۲۰۰۰ سیکل کاری، ظرفیت سلول ۲۰٪ کاهش می‌یابد. در این طراحی کاهش ظرفیت سلول‌ها به ازای هر چرخه کاری، ۲ Ah است. این کار نتیجه‌ی بخش تخمین SoH را ملموس می‌کند.

۲-۳- متعادل‌سازی انرژی سلول‌های بسته باتری

روش مقاومت موازی سوئیچ‌شونده، روشی ارزان و با الگوریتم کنترلی ساده برای متعادل‌سازی سلول‌های باتری بوده که در این طراحی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش هر چند اضافه انرژی سلول‌ها را به گرما تبدیل می‌کند، اما اهداف گزینشی ذکر شده را برآورده می‌نماید و نقاط قوت ذکر شده آن، باعث گردیده که در مقایسه انجام شده در مرجع [۲۰]، نمره ۱/۹۲ از ۳ را گرفته و در بین ۲۴ روش متعادل‌سازی فعال در رتبه ۹ قرار بگیرد.

مدار متعادل‌کننده به ازای هر سلول از یک مقاومت توان بالا، یک سوئیچ که معمولاً از قطعات الکترونیک قدرت (مانند ماسفت) بوده و یک دیود جهت جلوگیری از جریان معکوس، تشکیل می‌شود. شکل (۳) ساختار کلی متعادل‌کننده مقاومت موازی سوئیچ‌شونده را که در این طراحی مورد استفاده قرار گرفته، نشان می‌دهد [۱۹].

به‌صورت افزودنی فرض شده و این بدان معنی است که این پارامتر مستقیماً به سیگنال‌های نهایی، اضافه می‌گردد. نویز اندازه‌گیری بر اساس دقت تجهیزات اندازه‌گیری برآورد می‌شود. اگر دقت ولت‌متر برای اندازه‌گیری ولتاژ سلول‌های بسته باتری حدود ۱٪ باشد، با توجه به ولتاژ سلول که ۲/۳۷ است، حداکثر اختلاف اندازه‌گیری برابر خواهد بود با [۲۷]:

$$\max(dE_m) \approx 3/2 \times 0.01 = 0.032 \quad (2)$$

بنابراین مقدار نویز اندازه‌گیری بر اساس رابطه (۳) بدست می‌آید [۲۷]:

$$V = (\text{Max}(dE_m)) \times 2 \approx 1e-3 \quad (3)$$

۲-۲- معادلات تخمین وضعیت سلامت

وضعیت سلامت باتری (SoH) را می‌توان با کاهش ظرفیت باتری و یا افزایش مقاومت داخلی تعریف کرد که به عبارت دیگر میزان سلامت سلول باتری را به‌صورت درصد منعکس می‌کند. هنگامی که مقاومت داخلی باتری دو برابر شود، که منجر به افت قابل توجهی از انرژی می‌گردد، یا هنگامی که ظرفیت باتری به ۸۰٪ از ظرفیت اولیه برسد، یعنی SoH به ۸۰٪ کاهش یابد، بسته باتری اتوبوس برقی باید تعویض گردد [۱۷].

با انتخاب روش‌های تخمین SoH مبتنی بر مدل تطبیقی، می‌توان از مدل مدار معادل مورد استفاده در تخمین SoC، برای این بخش هم استفاده کرد. یکی از روش‌های مناسب در این گروه، روش تخمین مشترک است. این روش از معادلات و داده‌های بدست آمده از تخمین گر SoC برای کاهش محاسبات تخمین SoH بهره می‌برد و حداکثر ظرفیت واقعی باقی‌مانده از عمر سلول را به‌صورت برخط و لحظه‌ای بدست می‌آورد. همان‌طور که از رابطه (۴) مشخص است، در تشریح روش تخمین مشترک، ابتدا معادله SoC بر اساس ظرفیت و شمارش کولمب بیان می‌گردد [۱۷]:

$$Z(t_2) = Z(t_1) + \frac{1}{C_{\text{max}}} \int_{t_1}^{t_2} \frac{\eta i(\tau)}{3600} d\tau \quad (4)$$

در این رابطه $Z(t_1)$ و $Z(t_2)$ مقادیر SoC در زمان‌های t_1 و t_2 ، C_{max} حداکثر ظرفیت موجود باتری و η ضریب بازدهی کولمب است ($\eta \approx 1$) بیان‌گر پایین بودن نرخ خود دشارژی است) [۱۷]. با استفاده از رابطه (۴)، حداکثر ظرفیت موجود

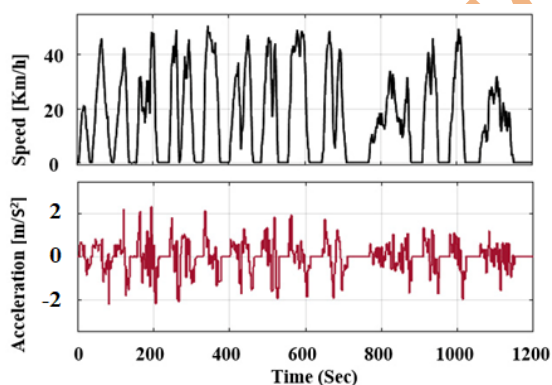
SoC، روشن خواهد شد و اضافه شارژ حاصل از مقایسه آن سلول کاهش خواهد یافت.

۲-۴- ایجاد شرایط ایمن و پایداری باتری

این بخش از BMS را می‌توان در قالب دو وظیفه کلی پایدارکننده‌ها و محدودکننده‌ها تقسیم‌بندی کرد. مهم‌ترین عامل مخرب در بسته باتری، افزایش دما است. گذر جریان مورد نیاز شارژ و دشارژ در اتوبوس‌های برقی از سلول‌های بسته باتری، با توجه به وجود مقاومت داخلی سلول‌ها و مقاومت سایر اتصالات، حجم زیادی از گرما را تولید می‌کند. علاوه بر این، در روزهای سرد زمستان، هنگام شارژ شبانه و یا شروع کار در لحظات اولیه، سرمای شدید باعث تخریب باتری می‌گردد [۲۹]. بهره‌گیری از سیستم مدیریت گرمایی باتری (BTMS) علاوه بر ایمنی، طول عمر باتری را افزایش داده و با ثابت ماندن دما در نقطه مطلوب، دقت تخمین SoC افزایش می‌یابد.

۳- سیستم مدیریت باتری در اتوبوس برقی

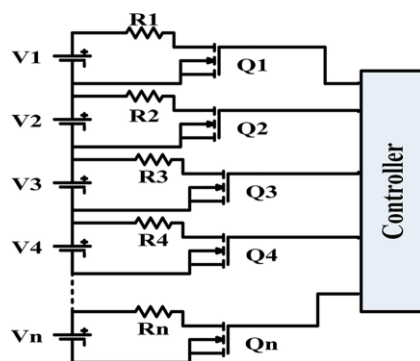
شکل (۵) یک الگوی حرکتی حرکتی سرعت و شتاب اتوبوس برقی در خطوط شهری را که در این مقاله برای شبیه‌سازی وضعیت رانندگی اتوبوس (دشارژ بسته باتری) طراحی شده است، نشان می‌دهد [۳۰].



شکل ۵- الگوی حرکتی حرکتی سرعت و شتاب اتوبوس برقی در خطوط شهری برای انجام محاسبات توان و انرژی [۳۰]

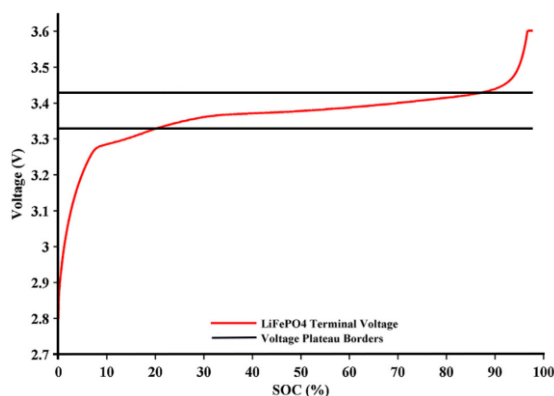
۳-۱- محاسبات چیدمان و مشخصات بسته باری

با توجه به توان مورد نیاز سیستم پشیران و سایر سیستم‌های به کار رفته در اتوبوس برقی، تأمین توان ۹۰۰KW توسط بسته باتری این نیاز را پوشش داده و نقطه‌ای قابل اطمینان خواهد بود. حجم انرژی ذخیره‌شده در بسته باتری اتوبوس برقی، برای پوشش بیش‌ترین میزان پیمایش روزانه و تأمین انرژی سیستم تهویه مطبوع در بدترین شرایط آب و هوایی محاسبه شده است. بر اساس



شکل ۳- ساختار کلی روش مقاومت موازی سوئیچ‌شونده [۱۹]

معیار تعادل در این طراحی، SoC تخمین زده شده در بخش UKF، در نظر گرفته می‌شود. علت این انتخاب به دو دلیل است: اول اینکه ولتاژ ترمینال به خصوص در هنگام کارکرد بسته باتری، تحت تأثیر عوامل زیادی بوده و تقریب مستقیم SoC با اندازه‌گیری ولتاژ ترمینال، خطای زیادی دارد. دوم اینکه، سلول مورد استفاده در بسته باتری از نوع LFP است، در نتیجه همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، مشخصه ولتاژ-SoC این نوع سلول، در محدوده ۲۰٪ تا ۹۰٪ SoC بسیار مسطح است و این محدوده بیش‌ترین گستره کاری در خودروهای برقی است. تخمین مستقیم در این بازه، استفاده از حسگرهای اندازه‌گیری دقیق را الزامی کرده که در نتیجه آن هزینه ساخت افزایش قابل توجهی می‌یابد.



شکل ۴- ارتباط بین SoC و ولتاژ پایانه در سلول‌های LFP [۲۸]

اگر اختلاف SoC بیش‌ترین و کم‌ترین سلول از یک حد آستانه (در این طراحی ۰/۰۱) کم‌تر باشد، نیاز به متعادل‌سازی نیست. در صورت بیش‌تر بودن این اختلاف از سطح آستانه، سوئیچ متناظر با سلول دارای بیش‌ترین سطح

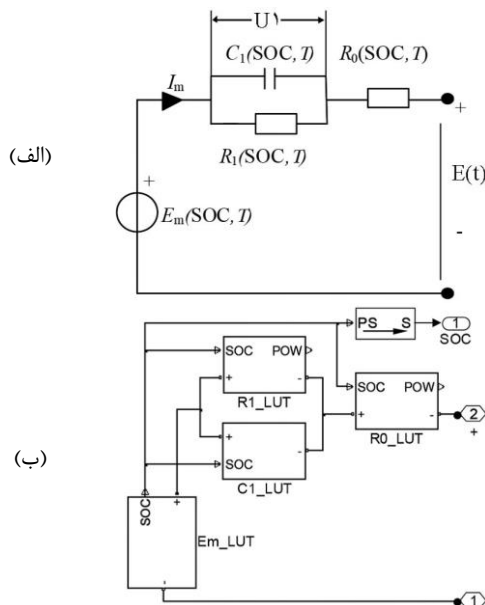
$$V_{bp} = N_{c_bp} \cdot V_c \cdot (1 + R_{V_aux}) \quad (7)$$

$$m_{bp} = N_{c_bp} \cdot m_c \cdot (1 + R_{V_aux}) \quad (8)$$

در این دو رابطه N_{c_bp} تعداد سلول‌های تشکیل دهنده باتری، V_c حجم یک سلول، R_{V_aux} نسبت تقریبی حجم سایر ملحقات بسته باتری به حجم مجموع سلول‌ها و m_c وزن یک سلول می‌باشد.

۳-۲- طراحی سیستم مدیریت باتری

مدار معادل معرفی شده در [۳۴] با توجه به استفاده از یک شبکه RC، محاسبات نسبتاً ساده‌ای دارد و به راحتی قابل تحلیل در قالب فضای حالت است. شکل (۶) ساختار کلی مدل مذکور را در محیط سیمولینک متلب نشان می‌دهد. این مدل مورد تایید طراحان کمپانی MathWorks قرار گرفته است [۲۸].



شکل ۶- الف) مدار معادل استفاده شده در این مقاله. ب) بلوک

مدار معادل مرجع [۲۸] طراحی شده با بلوک‌های جدول

جستجوی دو بعدی Simscape در سیمولینک متلب.

جهت استخراج مقادیر اجزا مدار معادل، از نمودارهای ارائه شده توسط سازنده سلول SE200 و اطلاعات موجود از مدار معادل یک سلول NMC واقعی ۳۱Ah که در [۳۵] موجود بود، استفاده گردید. معادله کلی ولتاژ مدار معادل با استفاده از رابطه (۹) بیان می‌شود [۱۹]:

$$E(t) = E_m(\text{SoC}, T_b) - U_1 - i(t) \cdot R_0 \cdot (\text{SoC}, T_b) + V \cdot R_0 \cdot (\text{SoC}, T_b) \quad (9)$$

در این رابطه $E(t)$ ولتاژ خروجی اندازه‌گیری شده، مقاومت سری، $E_m(\text{SoC}, T_b)$ نیروی محرک الکتریکی باتری یا

میزان پیمایش ۱۲۰ تا ۱۴۰ کیلومتر در روز اتوبوس‌های شهری در ایران [۳۱] و انرژی ۲kWh به ازای یک کیلومتر پیمایش در شرایط دمایی نامطبوع [۳۲] و همچنین در نظر گرفتن ظرفیت بیش‌تر برای ایجاد حاشیه ایمن و امنیت در جهت جلوگیری از شرایط اضافه شارژ و دشارژ، محدوده انرژی مورد نیاز اتوبوس در این طراحی، در محدوده ۳۲۰kWh در نظر گرفته می‌شود.

برای دستیابی به توان مورد نیاز، در انتخاب ولتاژ و جریان بسته باتری محدودیت‌هایی وجود دارد. در جریان‌های زیاد، قطر سیم‌ها بزرگ‌تر و تلفات حرارتی بسته باتری نیز بیش‌تر می‌شود. در ولتاژهای بزرگ، احتمال اتصالی و شوک‌های الکتریکی افزایش یافته، لذا ضخامت عایق‌ها و هزینه ایجاد ایمنی افزایش می‌یابد. با بررسی ساختار چندین اتوبوس برقی از جمله YUTONG(E12)، BYD(K9) و الزاماتی که در [۳۳] بیان شده است، مناسب‌ترین ولتاژ در محدوده ۵۰۰V تا ۵۵۰V می‌باشد، که در این پژوهش ولتاژ ۵۳۰V در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است، مرجع [۳۳] طبقه‌بندی سطوح ولتاژ برای بخش‌های مختلف انواع خودرو برقی، کیفیت و شماره کابل‌ها، ویژگی اتصالات، استانداردهای مربوطه و سایر اطلاعات مورد نیاز برای ساخت بخش‌های ولتاژ بالا را نیز شرح می‌دهد. با توجه به در نظر گرفتن توان ۹۰۰kW و ولتاژ ۵۳۰V و همچنین حداکثر نرخ دشارژ ۳C برای بسته باتری، ظرفیت کل ۶۰۰Ah محاسبه می‌شود.

با توجه به حجم بزرگ بسته باتری، به‌منظور سهولت در ساخت، جابجایی و نصب راحت‌تر، سیستم مدیریت بهینه و قابلیت اضافه یا کم کردن حجم باتری با توجه به نیاز اتوبوس، می‌توان آن را به چند بخش یکسان کوچک تقسیم کرد. لذا بسته باتری به ۳ بخش ۲۰۰Ah تقسیم می‌شود که به‌صورت موازی کنار هم قرار می‌گیرند و هر ماژول با توجه به رابطه (۶) از یک رشته سلول سری ۱۶۸ عددی تشکیل می‌گردد.

$$N_{CS} = \frac{U_{bp}}{U_{bc}} \quad (6)$$

در این رابطه U_{bp} ولتاژ کل بسته باتری و U_{bc} ولتاژ هر تک سلول می‌باشد. بنابراین با توجه به تعداد سلول‌های سری و موازی بسته باتری، تعداد کل سلول‌ها برابر ۵۰۴ سلول می‌باشد. همچنین حجم و وزن بسته باتری با استفاده از روابط (۷) و (۸) محاسبه می‌شود.

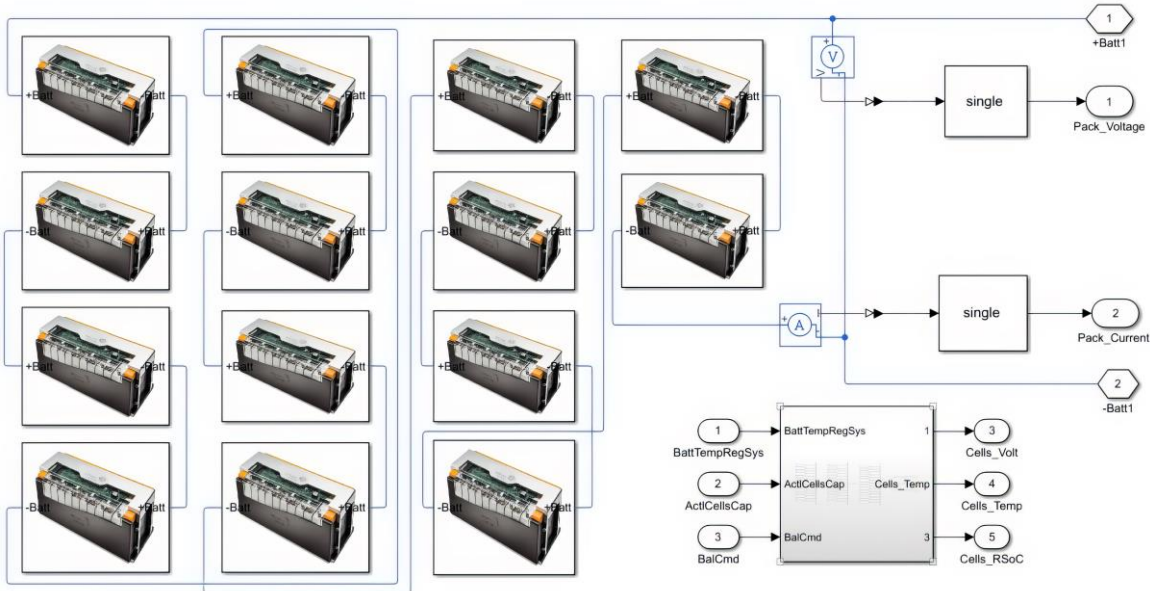
از توپولوژی ماژولار است. با توجه به محاسبات انجام شده برای انرژی مورد نیاز اتوبوس برقی و تقسیم آن به سه بخش ماژولار، که به صورت موازی در سیستم ذخیره انرژی اتوبوس برقی نصب می گردد، بسته باتری طراحی شده در این مقاله نیز بر این مبنا بوده است. انرژی قابل ذخیره آن در حدود یک سوم انرژی مورد نیاز اتوبوس برقی (۱۰۷/۵kWh) بوده که با سری کردن ۱۴ ماژول ۱۲ سلولی، ایجاد گردیده است. شکل (۷) این بخش از طراحی را نشان می دهد.

شکل (۸) نیز طرح کلی پروژه BMS در نرم افزار متلب را که برای یک ماژول ۱۲ سلولی است، نشان می دهد.

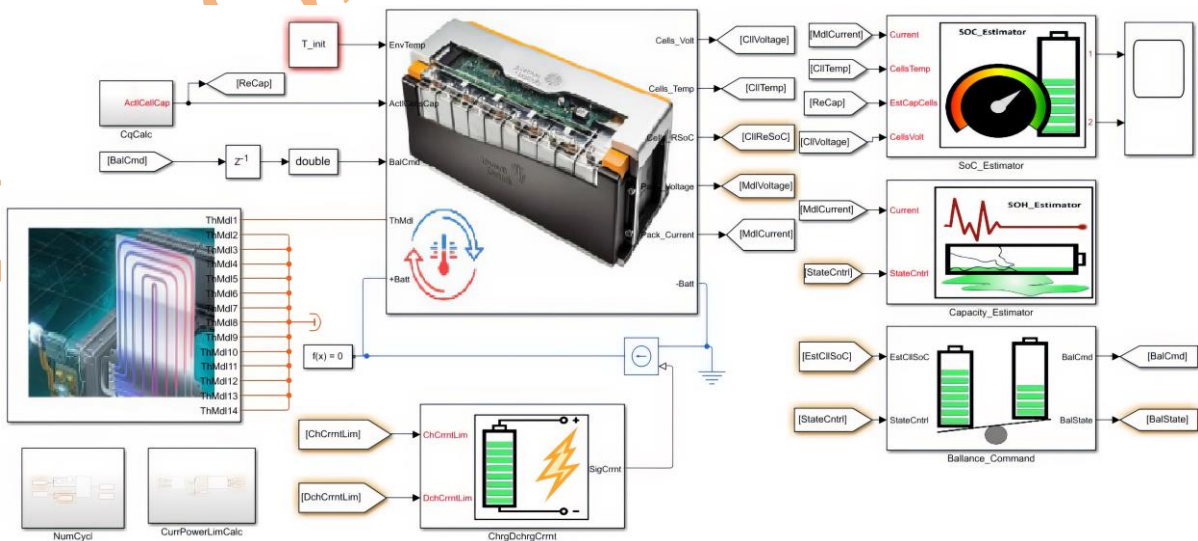
منبع ولتاژ، T_b دمای باتری و v نویز اندازه گیری است. همچنین در این مدل، R_0 ، R_1 ، C_1 و E_m از نوع جداول جستجوی دو بعدی وابسته به SoC و دمای باتری هستند. با توجه به اینکه روابط مدار معادل در روش های تخمین مبتنی بر مدل حالت گسسته، به صورت فضای حالت گسسته استفاده می شود، برای مدل مورد استفاده نیز باید روابط بدین صورت بیان گردد. لذا برای نوشتن معادلات از روش گسسته سازی اوپلر استفاده می شود [۲۲].

۴- محاسبات چیدمان و مشخصات بسته باتری

مناسب ترین روش مدیریتی برای این طراحی، تقسیم هر بسته باتری ۱۶۸ سلولی، به ۱۴ ماژول ۱۲ سلولی و استفاده



شکل ۷- مدار داخلی بسته باتری طراحی شده شامل ۱۴ ماژول نهایی ۱۲ سلولی و اتصالات لازم



شکل ۸- طرح کلی طراحی و شبیه سازی BMS برای یک ماژول ۱۲ سلولی

در ادامه هر یک از بلوک‌های به کار رفته شرح داده می‌شود: بلوک ۱، ماژول ۱۲ سلولی را که شامل صفحات انتقال حرارات و قابلیت اتصال به سیستم مدیریت گرمایی باتری است، نشان می‌دهد. این بلوک شامل اجزای تشکیل دهنده مدار معادل الکتریکی نشان داده شده در شکل (۶) است. با توجه به گرمای تولیدی در سلول که حاصل عبور جریان از اجزای مقاومتی مدار معادل است، ملاحظات انتقال گرما در این بلوک لحاظ گردیده است. علاوه بر این، قابلیت محاسبه دما را بر اساس مشخصات فیزیکی سلول که شامل وزن، سطح و ضریب انتقال گرمایی سلول است، را دارد.

بلوک ۲ بیان‌گر زیرسیستم تخمین وضعیت شارژ بسته باتری می‌باشد. برای آماده‌سازی این بلوک ابتدا می‌بایست سیستم مورد نظر که حالت‌های آن قرار است تخمین زده شود، به صورت فضای حالت و در دو بخش تابع حالت و تابع اندازه‌گیری، تعریف گردد. این دو تابع با استفاده از بلوک Simulink Function از کتابخانه تابع تعریف‌شده توسط کاربر ایجاد می‌گردد. توابع ایجاد شده در بخش حالت و اندازه‌گیری، دقیقاً بر اساس ساختار مدار معادل سلول SE200 بوده که دما و جریان و ظرفیت سلول به عنوان ورودی، وضعیت شارژ و ولتاژ دو سر شاخه RC به عنوان حالت‌ها و ولتاژ ترمینال سلول به عنوان خروجی فضای حالت سیستم تعریف می‌شود. با توجه مزیت‌هایی مانند دقت زیاد، توانایی تخمین حالت در سیستم‌های غیر خطی مرتبه بالا و پر نویز، برای تخمین وضعیت شارژ در این مقاله، از فیلتر کالمن بدون اثر استفاده شده است. با اجرای شبیه‌سازی و مقایسه مقادیر حاصل تخمین با مقدار واقعی وضعیت شارژ سلول‌ها، مشخص شد که بعد از مدت زمان کوتاهی اختلافات ابتدایی که ناشی از تعریف مقادیر اولیه است کاهش یافته و این تخمین‌گر با دقت بسیار خوبی و به صورت لحظه‌ای مقدار شارژ را برآورد می‌کند.

بلوک ۳ وظیفه تخمین ظرفیت سلول‌ها را بر عهده دارد که علاوه بر تخمین ظرفیت باقی‌مانده، برای بخش متعادل‌کننده بسیار حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به اینکه SoC با دقت خوبی تخمین زده می‌شود، با محاسبه آمپرساعت به وسیله انترگرال‌گیری از جریان به ازای یک بازه مشخص از SoC می‌توان ظرفیت سلول را به فاصله گذر از یک چرخه کاری بدست آورد.

اکثر ماژول‌های سلولی، علاوه بر بخش سلول‌ها و مدارات پایش، شامل بخش الکتریکی متعادل‌کننده نیز می‌باشد. به

همین منظور بخش الکتریکی متعادل‌کننده که بر اساس روش مقاومت موازی سوئیچ‌شونده است، جهت متعادل‌سازی ۱۲ سلول و در قالب یک زیرسیستم مجزا طراحی گردید که بلوک ۴ نمایان‌گر آن است.

در اغلب مدارهای واقعی و یا شبیه‌سازی سیستم مدیریت باتری، برای ایجاد فرامین کنترلی در بخش متعادل‌ساز از ولتاژ ترمینال سلول‌ها استفاده می‌شود. این روش به دلیل دقیق نبودن ولتاژ اندازه‌گیری و تأثیر پذیری از شرایط محیطی، بسیار ضعیف است. در این طراحی به ازای هر سلول یک مدار تخمین‌گر وضعیت شارژ در نظر گرفته شده و بر اساس خروجی حاصل از آن، قسمت کنترلی متعادل‌ساز، فرامین راه‌اندازی سوئیچ‌های بخش الکتریکی را تولید می‌کند. این زیرسیستم به ازای هر سلول شامل یک مقاومت توان بالا، یک سوئیچ الکترونیکی قدرت و دیود محافظ جریان معکوس است که قابلیت اتصال الکتریکی به دو سر هر سلول را دارد.

با روشن شدن سوئیچ سلول مربوطه، یک مقاومت توان بالا به دو سر قطب‌های سلول متصل شده و اضافه شارژ موجود در این سلول مصرف می‌گردد. این سوئیچ تا زمانی که اختلاف سطح شارژ از بین نرود، روشن می‌ماند. همچنین در طول متعادل‌سازی به محض اینکه وضعیت حالت کنترلی از حالت انتظار خارج شود، این بخش نیز غیرفعال می‌گردد.

مهم‌ترین پایدارکننده شرایط کاری باتری که در ارتباط مستقیم با BMS است، سیستم مدیریت گرمایی باتری (BTMS) می‌باشد که بلوک ۵ بیان‌گر آن می‌باشد. علاوه بر گرمای ناشی از فعالیت باتری در جریان‌های زیاد، اکثر عوامل آسیب‌زا با ایجاد گرما باعث تخریب و حادثه در بسته باتری می‌شود. فعالیت در دمای پایین نیز باعث اتصال کوتاه داخلی سلول خواهد شد. بهره‌گیری از BTMS علاوه بر ایمنی، طول عمر باتری را افزایش داده و با ثابت ماندن دما در نقطه مطلوب، دقت تخمین SoC افزایش می‌یابد. برای بخش BTMS این طراحی، از یک مثال در نرم‌افزار متلب با عنوان EV Battery Cooling System استفاده گردید که البته با اعمال تغییرات، قابلیت نصب و انتقال حرارت به ۱۴ ماژول ۱۲ سلولی در آن فراهم شد. همچنین با رفع برخی از عیوب آن، ضمن کاهش توان مصرفی، امکان گرمایشی بسته باتری در دماهای زیر صفر، برای آن ایجاد گردید. علاوه بر این در دماهای خیلی زیاد یا کم و هنگامی

همچنین ممکن است که بخش BTMS دچار مشکل شده و نتواند دمای باتری را در نقطه مطلوب، به طور ثابت نگه دارد. در چنین شرایطی، محدود کننده جریان بر اساس دمای باتری، میزان جریان باتری را محدود می‌کند تا از آسیب و بروز خطر جلوگیری نماید. در این طراحی یک محدود کننده جریان در نظر گرفته شده که متناسب با دمای باتری، میزان جریان باتری را از ۰ تا ۲۰۰ آمپر برای حالت شارژ و ۰ تا ۴۰۰- آمپر برای حالت دشارژ محدود کند. بلوک ۸ این زیرسیستم را نشان می‌دهد. عملکرد این بخش بدین صورت بوده که محدوده مجاز جریان شارژ و دشارژ باتری، توسط کم‌ترین مقدار دو جدول جستجوی یک بعدی، که بر اساس مقدار دمای باتری ترسیم شده، تعیین می‌گردد. در دمای متعادل (از ۱۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد) این محدودکننده اجازه عبور حداکثر جریان را می‌دهد ولی در دماهای خارج از این بازه، به صورت نمایی جریان را محدود می‌نماید.

بازه زمانی ۲۵۰۰۰ ثانیه برای شبیه‌سازی سیستم در نظر گرفته شده است که با توجه به محدوده ۲۰٪ برای تغییر وضعیت خودکار در یک چرخه شارژ و دشارژ، تقریباً ۱۲ چرخه در این بازه زمانی صورت می‌گیرد. نمودار (۹- الف) وضعیت حالات کنترل خودکار طراحی را نشان می‌دهد که به عنوان یک نشان برای سایر منحنی بخش‌های شبیه‌سازی قابل استفاده است. نمودار (۹- ب) جریان باتری را در دمای ۲۰ °C و در طول چرخه‌ها نشان می‌دهد. لازم به ذکر است در مقاردهای اولیه به بلوک UKF جهت تخمین SoC، مقدار شارژ اولیه پیش‌فرض باتری، ۸۰٪ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است، به منظور دقت‌سنجی تخمین‌گر SoC جهت نزدیک کردن شبیه‌سازی به محیط واقعی، به این طراحی و در بخش اندازه‌گیری ولتاژ و جریان باتری، بلوک‌های تولیدکننده نویز اضافه گردیده و تخمین‌گر اثرات این نویزها را حذف کرده است.

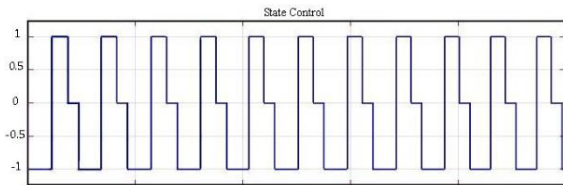
همان‌طور که در نمودارهای شکل (۹) مشخص است، در ابتدای کار تخمین SoC، در دماهایی که اختلاف زیادی وجود دارد، خطای تخمین نیز به صورت متناسب زیاد است. با گذشت زمان و تنظیم دمای باتری به وسیله BTMS، دقت تخمین بسیار افزایش یافته و مقدار خطا به زیر ۵٪ کاهش می‌یابد.

که باتری در وضعیت رانندگی است، مصرف توان این بخش نصف شده تا به باتری آسیب نرسد و در این زمان، محدودکننده‌های جریان فعال خواهند بود. اما اگر در این دماها باتری به شارژ وصل باشد، با توجه به اینکه توان BTMS از شارژر تأمین می‌شود، جهت کاهش زمان BTMS با حداکثر توان تعریف شده کار خواهد کرد. روش انتقال حرارت در این سیستم، از طریق اتصال صفحات رسانای حرارتی به ماژول‌های سلولی و گردش مایع سیال منتقل کننده گرما از این صفحات به بخش سرمایشی- گرمایشی است.

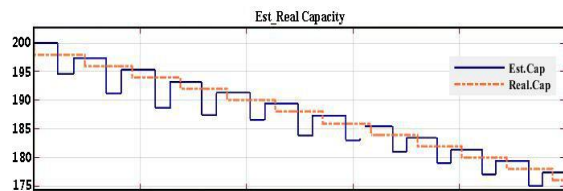
جریان اعمالی به باتری در وضعیت شارژ، با توجه مشخصات سلول SE200 و محاسبات انجام شده، حداکثر ۲۰۰A است در حالت انتظار هیچ جریان خارجی به باتری اعمال نشده و تنها در صورت نیاز، متعادل کننده فعال می‌شود. بلوک ۶ بیان‌گر این زیرسیستم می‌باشد.

یکی از مهم‌ترین اهداف این طراحی بررسی و مدیریت شرایط باتری در طول چرخه‌های زیاد شارژ و دشارژ است. بر همین اساس یک سیستم خودکار برای ایجاد چرخه‌های شارژ و دشارژ در نظر گرفته شد. بلوک ۷ این زیرسیستم را نشان می‌دهد که براساس سطوح حداکثر و حداقل وضعیت شارژ، یک چرخه تکرار شونده شامل: رانندگی (لود)، شارژ و دوره استراحت ایجاد می‌کند. در این بخش، مقادیر حداکثر و حداقل شارژ و مدت زمان انتظار توسط کاربر و به عنوان ورودی شبیه‌سازی مشخص می‌گردد. خروجی این بخش، یک سیگنال کنترلی در سه وضعیت عددی: حالت شارژ (+۱)، دشارژ (-۱) و انتظار (۰) است.

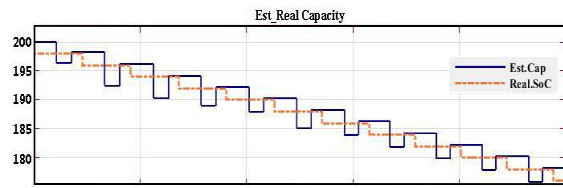
در این روش، با فرض اینکه اتوبوس برقی دارای شارژ اولیه بوده، رانندگی آغاز شده و سطح شارژ باتری کاهش می‌یابد. سپس یک سطح تعریف شده حداقل شارژ، برای ورود به حالت شارژ استفاده می‌شود. سطح تعریف شده حداکثر شارژ نیز، زمان پایان حالت شارژ را تعیین می‌کند. بعد از اتمام زمان شارژ، یک زمان انتظار یا استراحت نیز برای باتری در نظر گرفته شده است، تا علاوه بر اینکه شرایط کاری یک اتوبوس برقی شارژ شبانه شبیه‌سازی شود، این زمان انتظار به بخش متعادل کننده اضافه شارژ سلول‌ها اختصاص یابد و سطح شارژ سلول‌ها متعادل گردد. با اتمام زمان استراحت مجدداً حالت رانندگی آغاز شده و چرخه به این ترتیب ادامه می‌یابد.



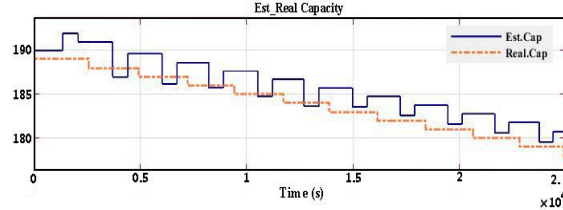
(الف)



(ب)



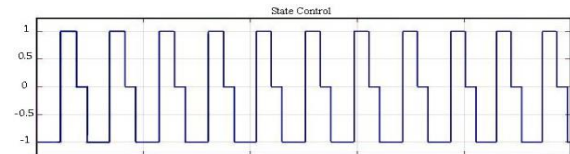
(پ)



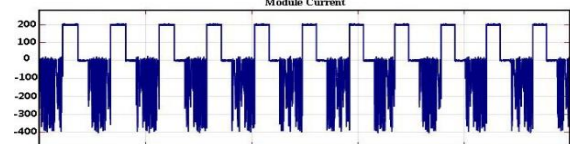
(ت)

شکل ۱۰- نمودار کنترل حالت شبیه‌سازی. ب، پ و ت) نمودار تخمین ظرفیت باتری در طی چرخه‌های شارژ و دشارژ متوالی و در مقایسه با مقدار ظرفیت واقعی باتری، به ترتیب در دماهای 50°C و 20°C ، -5°C

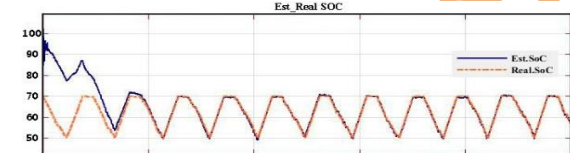
همان‌طور که از نمودارهای شکل (۱۱) مشخص است زمان فعال شدن متعادل‌ساز تنها در زمان استراحت باتری بوده و زمانی که اختلاف سطح شارژ سلول‌ها از یک مقدار مشخص بیش‌تر باشد، فعال می‌گردد. این مدار باعث یکسان‌سازی سطح انرژی سلول‌های تشکیل‌دهنده باتری می‌گردد. نکته حاصل شده در این بخش از شبیه‌سازی، متعادل شدن سریع‌تر انرژی سلول‌ها در دمای محیطی 20°C است.



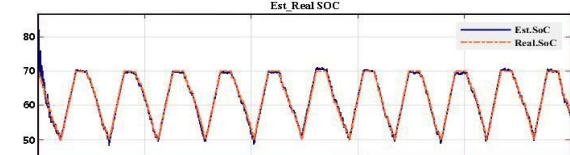
(الف)



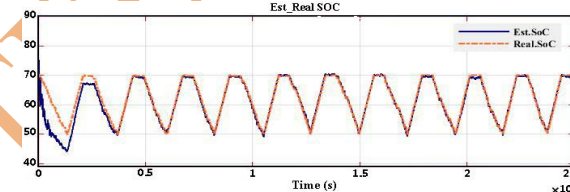
(ب)



(پ)



(ت)



(ث)

شکل ۹- الف) نمودار کنترل حالت شبیه‌سازی. ب) نمودار جریان باتری در دمای 20°C . پ، ت و ث) نمودارهای تخمین SoC در مقایسه با مقدار واقعی و اختلاف آن به ترتیب در دماهای 50°C ، 20°C ، -5°C

نمودارهای شکل (۱۰) تخمین ظرفیت باتری در طول چرخه‌های مختلف را نشان می‌دهد که با دقت کمتر از ۱۰٪ نسبت به مقدار واقعی، ظرفیت باتری محاسبه می‌شود. با توجه به روش تخمین مشترک و داده‌های تخمین SoC برای تخمین ظرفیت باتری در دماهای با اختلاف زیاد، دقت تخمین کمتر می‌باشد. نمودارهای شکل (۱۰)، میانگین ظرفیت ۱۲ سلول یک ماژول بوده و ظرفیت پیش‌فرض تخمین ۲۰۰ Ah است.

شارژ سلول‌های قوی‌تر را به وسیله مقاومت کاهش می‌دهد. مقاومت ۰/۱ اهمی باعث جریان‌کشی بیش‌تر و در نتیجه مشاهده‌پذیر شدن عملکرد این بخش از طراحی می‌گردد.

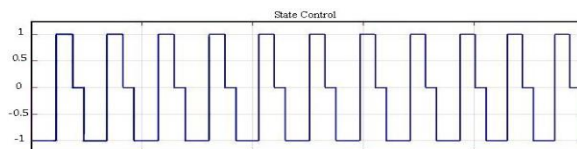
۴- نتیجه‌گیری

براساس میزان پیمایش ۱۲۰ تا ۱۴۰ کیلومتری اتوبوس‌های شهری در ایران و انرژی ۲kWh به ازای هر کیلومتر پیمایش در شرایط دمایی نامطبوع و همچنین در نظر گرفتن ظرفیت بیش‌تر برای ایجاد حاشیه امن و در جهت جلوگیری از شرایط اضافه شارژ و دشارژ، انرژی مورد نیاز اتوبوس برقی در این طراحی، در محدوده ۳۲۰kWh در نظر گرفته شده است؛ بنابراین تأمین توان ۹۰۰kW توسط بسته باتری، نقطه‌ای قابل اطمینان خواهد بود. وزن بسته باتری طراحی شده، با در نظر گرفتن ملحقات ۳۲۵۰kg می‌باشد.

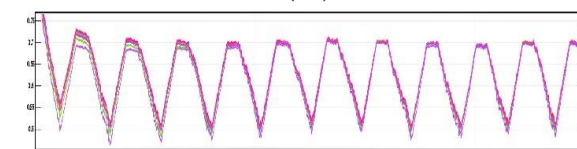
به منظور تحلیل چگونگی عملکرد باتری، استفاده از روش مدار معادل الکتریکی بر اساس جداول جستجو پیشنهاد گردید. این روش، ضمن منطبق بودن با شرایط کاری خودروهای برقی، از دقت بالایی برخوردار است. توپولوژی پیاده‌سازی در این مقاله، طراحی و شبیه‌سازی سیستم مدیریت باتری به صورت ماژولار بوده که برای هر بسته باتری ۱۲ سلول سری، یک واحد مدیریت مستقل محلی در نظر گرفته شده است.

برای تخمین SoC که پیش‌نیاز قسمت‌های دیگر است، از روش‌های تخمین فیلتر کالمن و فیلتر کالمن بدون اثر استفاده شده است. نتایج حاصل از این تخمین، خطای قابل قبول و کم‌تر از ۳٪ را نشان می‌دهد. برای تخمین وضعیت سلامت از روش تخمین مشترک، که از داده‌های تخمین SoC، بهره می‌برد و در یک محدوده شارژ مشخص، ظرفیت باتری محاسبه می‌شود، استفاده شده است. مزیت استفاده از این روش این است که حجم محاسبات را به شدت کاهش می‌دهد. در این شبیه‌سازی برای ملموس شدن بخش SoH ظرفیت سلول‌ها به ازای هر سیکل کاری ۲Ah کاهش یافته است.

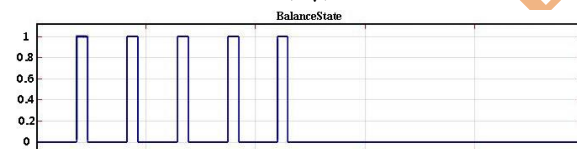
در نهایت پس از طراحی با ملاحظات بسته باتری و سیستم مدیریت آن شامل تخمین وضعیت شارژ، وضعیت سلامت، متعادل‌سازی و سیستم مدیریت گرمایی در دماها و حالات مختلف شبیه‌سازی شد که نتایج، همگرایی و پایداری سیستم را نشان می‌دهند.



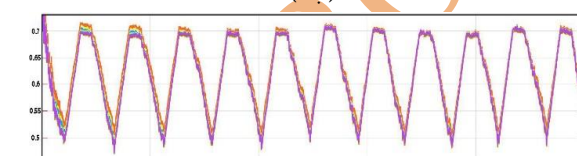
(الف)



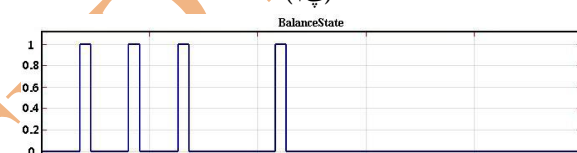
(ب ۱)



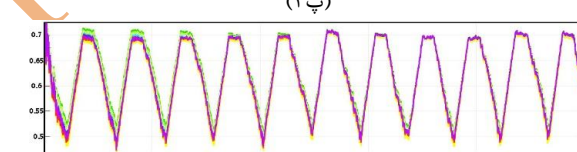
(ب ۲)



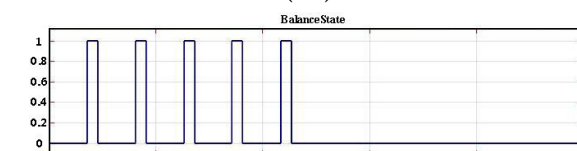
(ب ۱)



(ب ۲)



(د ۱)



(د ۲)

شکل ۱۱- الف) نمودار کنترل حالت شبیه‌سازی. ب ۱، پ ۱ و ت ۱) نمودارهای تخمین وضعیت شارژ ۱۲ سلول یک ماژول در طی چرخه‌های مختلف به ترتیب در دماهای 0°C ، 20°C و 40°C . ب ۲، پ ۲ و ت ۲) نمودارهای متعادل‌ساز برای زمان‌های فعال شدن مدار متعادل‌ساز

جهت مشاهده‌پذیری، اختلاف ظرفیت ۱۰٪ به صورت تصادفی برای سلول‌های تشکیل‌دهنده ماژول ۱۲ سلولی در این طراحی استفاده شده است، که باعث شده اختلاف سطح انرژی سلول‌ها محسوس گردد. زیرسیستم فرمان متعادل‌کننده، در حالت‌های استراحت باتری، اختلاف سطح

- [1] A. Hatami, P. Bayat, P. Bayat, S. M. Toosi, "Presentation of a new strategy magazine for motor vehicle energy management based on two-way converter and fuzzy controller", *Tabriz University Electrical Engineering*, Volume 46, Number 3, Pages 122, 2015.
- [2] Seeking Alpha, "The EV Boom Just Keeps Getting Bigger", <https://seekingalpha.com/article/4235630-ev-boom-just-keeps-getting-bigger-update-for-end-of-2018>, Last modified: Jan 25 2019.
- [3] Slideshare, Bus Karo: Future of Electric Buses, C.K. Goel, DIIMTS, Delhi, https://www.slideshare.net/sachiagarwal/bus-karo-future-of-electric-buses?from_action=save, Last modified: Nov 21 2016.
- [4] D. Göhlich, T.-A. Fay, and S. Park, "Conceptual Design of Urban E-Bus Systems with Special Focus on Battery Technology", *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, vol. 1, pp. 2823-2832, 2019/01/07, doi: 10.1017/dsi.2019.289.
- [5] B. Scrosati, J. Garche and W. Tillmets, "Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles – chapter10: Design of high-voltage battery packs for electric vehicles", 1nd edition, Woodhead Publishing, Cambridge, ch. 10, pp. 245-263, 2015.
- [6] A. Nikolian, J. Jaguemont and J. Hoog, "Complete cell-level lithium-ion electrical ECM model for different chemistries (NMC, LFP, LTO) and temperatures (-5°C to 45°C) – Optimized modelling techniques", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 98, pp. 133-146, 2018/06/01, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.11.031>.
- [7] A. Fotouhi, D. J. Auger, K. Propp, S. Longo, and M. Wild, "A review on electric vehicle battery modelling: From Lithium-ion toward Lithium – Sulphur", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 1008-1021, 2016/04/01, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.009>.
- [8] M. Daowd, N. Omar, B. Verbrugge, P. Van den Bossche, and J. Van Mierlo, "Battery Models Parameter Estimation based on Matlab/Simulink", *The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition*, Shenzhen, China, 2010.
- [9] L. Zhou et al., "State Estimation Models of Lithium-Ion Batteries for Battery Management System: Status, Challenges, and Future Trends," *Batteries*, vol. 9, no. 2, p. 131, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2313-0105/9/2/131>.
- [10] M. A. Hannan, M. S. H. Lipu, A. Hussain, and A. Mohamed, "A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations", *ELSEVIER, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 834-854, 2017/10/01, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.001>.
- [11] Alibaba, 3.2v 200Ah LiFePO4 battery lithium SE200 CALB Battery for boat car energy storage 200ah prismatic cell, https://evlithium.en.alibaba.com/product/60684809939-817515004/200Ah_LiFePO4_lithium_SE200_CALB_Battery_for_boat_car_energy_storage.html, Last modified: 2021.
- [12] J. Sarda, H. Patel, Y. Papat, K. L. Hui, and M. Sain, "Review of Management System and State-of-Charge Estimation Methods for Electric Vehicles," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 14, no. 12, p. 325, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2032-6653/14/12/325>.
- [13] Z. Chen, H. Zhao, Y. Zhang, S. Shen, J. Shen, and Y. Liu, "State of health estimation for lithium-ion batteries based on temperature prediction and gated recurrent unit neural network," *Journal of Power Sources*, vol. 521, p. 230892, 2022/02/15, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230892>.
- [14] R. Xiong and W. Shen, "Advanced Battery Management Technologies for Electric Vehicles- chapter3: Battery State of Charge and State of Energy Estimation", 1nd edition, JohnWiley & Sons, New Jersey, ch. 3, pp. 67-92, 2019.
- [15] W. Wang and J. Mu, "State of Charge Estimation for Lithium-Ion Battery in Electric Vehicle Based on Kalman Filter Considering Model Error", *IEEE Access, Advanced Energy Storage Technologies and Their Applications*, vol. 7, pp. 29223 – 29235, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2895377.
- [16] A. I. Ilies, G. Chindris and D. Pitica, "A Comparison between State of Charge Estimation Methods: Extended Kalman Filter and Unscented Kalman Filter", in *2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, 21-24 Oct. 2020, pp. 376-381, doi: 10.1109/SIITME50350.2020.9292232.

- [17] R. Xiong and W. Shen, "Advanced Battery Management Technologies for Electric Vehicles- chapter4: Battery State of Health Estimation", 1nd edition, JohnWiley & Sons, New Jersey, ch. 4, pp. 95-129, 2019.
- [18] M. F. Ge, Y. Liu, X. Jiang and J. Liu, "A review on state of health estimations and remaining useful life prognostics of lithium-ion batteries", ELSEVIER, Measurement vol. 174, p. 109057, 2021/04/01, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109057>.
- [19] M. M. Hoque, M. A. Hannan, A. Mohamed and A. Ayob, "Battery charge equalization controller in electric vehicle applications: A Review", ELSEVIER, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 75, pp. 1363-1385, 2017/01/03, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.126.
- [20] J. Gallardo-Lozano, E. Romero-Cadaval, M. Milanés-Montero, and M. Guerrero-Martinez, "Battery equalization active methods," Journal of Power Sources, vol. 246, pp. 934-949, 2014/01/15, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.08.026.
- [21] V. K. A. N. U. Ramanan, R. Joseph, and T. Tharunsushreeth, Simulation study of a battery management system for electric vehicles using MATLAB/Simulink. 2022, p. 060005.
- [22] M. Z. Afzal et al., "A Novel Electric Vehicle Battery Management System Using an Artificial Neural Network-Based Adaptive Droop Control Theory," International Journal of Energy Research, vol. 2023, p. 2581729, 2023/07/28, doi: 10.1155/2023/2581729.
- [23] R. Bhovi, R. C. S. M., and K. Bs, "Modeling and Simulation of Battery Management System (BMS) for Electric Vehicles," Journal of University of Shanghai for Science and Technology, vol. 23, pp. 805-815, 2021/06/18, doi: 10.51201/JUSST/21/05347.
- [24] R. Xiong and W. Shen, "Advanced Battery Management Technologies for Electric Vehicles - chapter1: Introduction, 1nd edition", JohnWiley & Sons, New Jersey, Ch. 1, pp. 12-19, 2019.
- [25] D. Simon, "Optimal State Estimation", 1nd edition, JohnWiley & Sons, New Jersey, ch. 14, pp. 433-459, 2006.
- [26] M.R. Vale, R.S. Martins and A.L. Maitelli, "Hybrid Method for Fault Detection and Identification Based on State Observers and Decision Trees," Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA), vol. 48, pp. 185-210, 2014/05/30, doi: 10.3166/jesa.48.185-210.
- [27] MathsWorks. Help Center. Nonlinear State Estimation of a Degrading Battery System, <https://www.mathworks.com/help/predmaint/ug/nonlinear-state-estimation-of-a-degrading-battery-system.html>, Last modified: 2021.
- [28] R. Xiong and W. Shen, "Advanced Battery Management Technologies for Electric Vehicles- chapter7: Battery Balancing, 1nd edition", JohnWiley & Sons, New Jersey, ch. 7, pp. 183-227, 2019.
- [29] M. Yao, Y. Gan, J. Liang, D. Dong, L. Ma and Y. Li, "Performance simulation of a heat pipe and refrigerant-based lithium - ion battery thermal management system coupled with electric vehicle air - conditioning", Applied Thermal Engineering, vol. 191, p. 116878, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116878>.
- [30] Electronics Weekly, EW. Staff, Will supercapacitors supersede batteries, <https://www.electronicweekly.com/news/design/will-supercapacitors-supersede-batteries-2018-11>, Last modified: 6th November 2018.
- [31] J. Jiang, W. Shi, W. Zhang, "Investigation of path dependence in commercial lithium-ion cells for pure electric bus applications: Aging mechanism identification", Journal of Power Sources, vol. 274, pp. 29-40, 2015.
- [32] D. Gohlich, T. A. Fay, D. Jefferies, E. Lauth, A. Kunith and X. Zhang, "Design of urban electric bus systems", Design Science, vol. 4, 2018/07/08, doi: 10.1017/dsj.2018.10.
- [33] H. M. Fischer, "Voltage Classes for Electric Mobility, ZVEI. German Electrical and Electronic Manufacturers' AsSoCiation", Centre of Excellence Electric Mobility, 2014.
- [34] T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri and R. Jackey, "High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells", Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, 2012/01/03, doi: 10.1109/IEVC.2012.6183271.
- [35] MathWorks, Y. Altman, Design and Test Lithium Ion Battery Management Algorithms, <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/72865-design-and-test-lithium-ion-battery-management-algorithms>, Last modified: January 15, 2022.