

دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران غرب

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

سمینار کارشناسی ارشد مهندسی برق

گرایش الکترونیک دیجیتال

عنوان:

**همسان‌سازی فعال باتری‌های لیتیوم یونی**

نگارش:

**مهدی امیری‌نسب**

استاد راهنما:

**دکتر سید حسین پیشگر**

بهمن 1401

**بسم اللّه الرحمن الرحیم**



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران غرب

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

سمینار کارشناسی ارشد مهندسی برق

گرایش الکترونیک دیجیتال

عنوان:

**همسان‌سازی فعال باتری لیتیوم یونی**

در تاریخ 03/12/1401 سمینار دانشجو، مهدی امیری‌نسب توسط کمیته تخصصی داوران مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت

1. استاد راهنما: آقای دکتر سید حسین پیشگر امضاء
2. استاد داور: آقای دکتر امیر امینی امضاء

**نام و نام خانوادگی: مهدی امیری نسب**

**عنوان سمینار: همسان‌سازی فعال باتری لیتیوم یونی**

**استاد راهنما: آقای دکتر سید حسین پیشگر**

اینجانب مهدی امیری‌نسب تهیه‌کننده سمینار کارشناسی ارشد حاضر، خود را ملزم به حفظ امانت داری و قدردانی از زحمات سایر محققین و نویسندگان بنا بر قانون Copyright می‌دانم. بدین وسیله اعلام می‌نمایم که مسئولیت کلیه مطالب درج شده با اینجانب می‌باشد و در صورت استفاده از اشکال، جداول، مطالب سایر منابع، بلافاصله مرجع آن ذکر شده و سایر مطالب ار کار تحقیقاتی اینجانب استخراج گشته است و امانت‌داری را به صورت کامل رعایت نموده‌ام. در صورتی که خلاف این مطلب ثابت شود، مسئولیت کلیه عواقب قانونی با شخص اینجانب می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: مهدی امیری‌نسب

امضا و تاریخ: 03/4/1402

چکیده:

افزایش چشمگیر استفاده از سوخت‌های فسیلی در عصر صنعتی حال حاضر موجب رشد تولید گازهای گلخانه‌ای و آلودگی زیست محیطی شده است که در این میان، سهم قابل توجهی به حوزه حمل و نقل اختصاص دارد. از این روی، جایگزین کردن خودروهای برقی بجای بنزینی را می‌توان از جمله اقدامات کشورها برای کنترل آلودگی هوا بشمار برد. از اجزای اصلی خودرو برقی می‌توان به باتری‌های لیتیوم یونی[[1]](#footnote-1) به عنوان عناصر ذخیره کننده انرژی اشاره کرد. امروزه، این نوع از باتری به سبب برخورداری از چگالی انرژی و توان بالا، در صنعت خودرو برقی رایج شده است. لازم به ذکر است استفاده از این عناصر ذخیره کننده خارج از نواحی مجاز تعریف شده توسط سازنده، باعث کاهش طول عمر باتری میشوند و در بدترین حالت ممکن پتانسیل بالایی برای ایجاد حادثه و انفجار دارند. بنابراین، بمنظور کنترل شرایط کاری باتری‌ها در نواحی مجاز، بکارگیری از یک سیستم مدیریت باتری[[2]](#footnote-2) الزام می‌شود. وظایف سیستم مدیریت باتری به بخش‌های متعددی از جمله تخمین وضعیت شارژ، عیب‌یابی خطا، مدیریت حرارت و همسان‌سازی تقسیم می‌شود.

هدف این نوشتار، تشریح ساخت و پیاده سازی **همسان‌سازی فعال باتری لیتیوم یونی** می‌باشد که شامل شبیه سازی و پیاده سازی عملی است. در فصل یک مقدمه‌ای از انواع باتری‌ها تشریح و در ادامه مقایسه‌ای بین آنها صورت میگیرد. همچنین، مشخصه‌های متداول باتری ذکر می‌شود. در فصل دوم نقش سیستم مدیریت باتری، وظایف و الزام استفاده از آن بیان می‌شود. در فصل سوم سیستم‌های مدیریت همسان‌سازی[[3]](#footnote-3) و انواع آن‌ها به همراه پارامتر‌های ارزیابی مورد بررسی قرار میگیرد. و در آخر، در فصل چهارم به همراه بررسی مقالات اخیر، سیستم همسان‌سازی پیشنهادی ارائه می‌شود.

فهرست مطالب

[1- باتری‌ها 2](#_Toc168174456)

[1-1 مشخصه‌های الکتریکی سلول باتری 2](#_Toc168174457)

[1-1-1 ظرفیت 2](#_Toc168174458)

[1-1-2 انرژی 2](#_Toc168174459)

[1-1-3 چگالی انرژی 3](#_Toc168174460)

[1-1-4 چگالی توان 3](#_Toc168174461)

[1-2 اصطلاحات در باتری‌ها 3](#_Toc168174462)

[1-2-1 ولتاژ مدار باز 3](#_Toc168174463)

[1-2-2 نرخ دشارژ 3](#_Toc168174464)

[1-2-3 عمق دشارژ 4](#_Toc168174465)

[1-2-4 وضعیت شارژ 4](#_Toc168174466)

[1-2-5 وضعیت سلامت 4](#_Toc168174467)

[1-2-6 دشارژ خود‌به‌خود 4](#_Toc168174468)

[2- سیستم مدیریت باتری 2](#_Toc168174469)

[2-1 وظایف سیستم مدیریت باتری 2](#_Toc168174472)

[2-1-1 تخمین وضعیت باتری 4](#_Toc168174475)

[2-1-1-1 تخمین وضعیت شارژ باتری 4](#_Toc168174476)

[2-1-2 همسان‌سازی باتری در سیستم مدیریت باتری 8](#_Toc168174477)

[3- همسان‌سازی باتری 10](#_Toc168174478)

[3-1 متغیرهای همسان‌سازی 11](#_Toc168174479)

[3-1-1 همسان‌سازی بر مبنای ولتاژ 12](#_Toc168174480)

[3-1-2 همسان‌سازی بر مبنای ولتاژ مدار باز و وضعیت شارژ 14](#_Toc168174481)

[3-1-3 همسان‌سازی بر مبنای ظرفیت 16](#_Toc168174482)

[3-2 اهداف همسان‌سازی 17](#_Toc168174483)

[3-2-1 حداکثر رساندن ظرفیت باتری 17](#_Toc168174484)

[3-2-2 حداقل رساندن زمان همسان‌سازی 18](#_Toc168174485)

[3-2-3 کاهش انرژی مصرفی 18](#_Toc168174486)

[3-3 طبقه‌بندی مدارات همسان‌سازی فعال بر اساس توپولوژی 18](#_Toc168174487)

[3-3-1 توپولوژی‌های مبتنی بر انتقال به مجاور 18](#_Toc168174488)

[3-3-1-1 انتقال سریالی سلول به سلول 19](#_Toc168174489)

[3-3-1-2 انتقال سریالی سلول به سلول در قالب ماژول 19](#_Toc168174490)

[3-3-1-3 انتقال سریالی سلول به سلول لایه‌ای 20](#_Toc168174491)

[3-3-2 توپولوژی‌های مبتنی بر انتقال به غیرمجاور 21](#_Toc168174492)

[3-3-2-1 انتقال بار سلول و پک باتری 21](#_Toc168174493)

[3-3-2-2 انتقال بار سلول و پک باتری در قالب ماژول 22](#_Toc168174494)

[3-3-3 انتقال سلول به سلول مستقیم 22](#_Toc168174495)

[3-4 مدارات همسان‌سازی فعال سلول‌ها 23](#_Toc168174496)

[3-4-1 مبدل چوک 24](#_Toc168174497)

[3-4-2 ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه 24](#_Toc168174498)

[3-4-3 سوئیچ خازنی 25](#_Toc168174499)

[3-5 مقایسه بین توپولوژی‌ها 26](#_Toc168174500)

[3-5-1 مقایسه عملکردی 26](#_Toc168174501)

[3-5-2 مقایسه اقتصادی 28](#_Toc168174502)

[3-6 الگوریتم ساده در همسان‌‌سازی 32](#_Toc168174503)

[3-6-1 الگوریتم کنترلی 34](#_Toc168174504)

[3-6-2 نتیجه‌گیری 35](#_Toc168174505)

[3-7 الگوریتم ژنتیک (GA) در همسان‌سازی 39](#_Toc168174506)

[3-7-1 روش پیشنهادی 40](#_Toc168174507)

[3-7-2 توپولوژی همسان‌سازی 40](#_Toc168174508)

[3-7-3 استراتژی همسان‌سازی 41](#_Toc168174509)

[3-7-4 شبیه‌سازی 44](#_Toc168174510)

[3-7-5 آزمایشات عملی 45](#_Toc168174511)

[3-7-6 نتیجه گیری 51](#_Toc168174512)

[3-8 الگوریتم خوشه‌بندی در همسان‌سازی 51](#_Toc168174513)

[3-8-1 ساختار و اصول کارکرد توپولوژی 52](#_Toc168174514)

[3-8-1-2 استراتژی همسان‌سازی 57](#_Toc168174515)

[3-8-2 شبیه‌سازی 59](#_Toc168174516)

[3-8-3 آزمایشات عملی 60](#_Toc168174517)

[3-8-4 نتیجه‌گیری 65](#_Toc168174518)

[4- همسان‌ساز پیشنهادی 67](#_Toc168174519)

[4-1 پیکربندی اولیه 67](#_Toc168174520)

[4-2 الگوریتم همسان‌سازی 70](#_Toc168174521)

[4-2-1 خوشه‌بندی DBSCAN 70](#_Toc168174522)

[4-2-2 بهینه‌سازی خوشه‌بندی DBSCAN با استفاده از PSO 73](#_Toc168174523)

[4-2-3 تابع هزینه 75](#_Toc168174524)

[4-2-3-1 مقدار دهی اولیه 75](#_Toc168174525)

[4-2-3-2 محاسبات همسا‌ن‌سازی سلول‌ها 75](#_Toc168174526)

[4-2-3-3 محاسبه‌ی زمان، یکپارچگی و روی‌هم‌رفت 75](#_Toc168174527)

[4-2-3-4 نرمال‌سازی 78](#_Toc168174528)

[4-2-4 بهینه‌سازی ε براساس PSO 80](#_Toc168174529)

[4-2-4-1 موقعیت 83](#_Toc168174530)

[4-2-4-2 بردار سرعت 83](#_Toc168174531)

[4-2-4-3 بهترین موقعیت شخصی و همگانی 83](#_Toc168174532)

[4-3 شبیه‌سازی 84](#_Toc168174533)

[4-3-1 متلب 84](#_Toc168174534)

[4-3-2 مولتی‌سیم 87](#_Toc168174535)

[4-4 طراحی سخت‌افزار 88](#_Toc168174536)

[4-4-1 شمای کلی 88](#_Toc168174537)

[4-4-2 گیت درایور اپتوکوپلری 89](#_Toc168174538)

[4-4-3 گیت درایور ترانس‌پالسی 90](#_Toc168174539)

[4-4-4 مبدل جریان مستقیم 90](#_Toc168174540)

[4-4-5 سوئیچ‌های دوطرفه 91](#_Toc168174541)

[4-4-6 واحد ریز کنترل کننده 91](#_Toc168174542)

[4-4-7 سنسور جریان 92](#_Toc168174543)

[4-4-8 شبکه‌ی کنترل کننده 92](#_Toc168174544)

[4-4-9 برد مدار چاپی 92](#_Toc168174545)

[5- 95](#_Toc168174546)

[6- مراجع 96](#_Toc168174547)

**فصل اول**

**باتری‌‌ها**

باتری‌ها

باتری‌ها انرژی ذخیره شده شیمیایی را توسط فرایند اکسایش-کاهش[[4]](#footnote-4) به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. اعمال معکوس این فرآیند منجر به تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی شیمیایی در نوع شارژی این باتری‌ها می‌شود. بصورت کلی این المان به سه جزء بخش بندی می‌شود.

1. آند یا پایانه منفی در طی فرآیند اکسیداسیون، الکترون از دست می‌دهد. با کمک یک مدار خارجی، الکترون‌های آزاد شده از این پایانه خارج می‌شوند.
2. کاتد یا پایانه مثبت در طی فرآیند کاهش، الکترون دریافت می‌کند و با کمک یک مدار خارجی، الکترون‌های آزاد شده به این پایانه وارد می‌شوند.
3. الکترولیت که نقش بستر انتقال بارهای یونی داخل باتری را بین کاتد و آند ایفا می‌کند. الکترولیت عمدتاً از آب یا هر حلال دیگری به همراه مواد حل شونده از جمله: نمک، مواد اسیدی و یا بازی، به جهت برقراری هدایت یونی تشکیل شده است. [1].

## مشخصه‌های الکتریکی سلول باتری

برخی از اصطلاحاتی که برای بیان ویژگی‌های الکتریکی باتری‌ها ضروری است، در بخش زیر ارائه شده است.

### ظرفیت

مقدار کل بار الکتریکی که در واکنش الکتروشیمیایی مشارکت می‌کند، به عنوان ظرفیت سلول شناخته می‌شود و یکای تعریف شده برای آن کولن یا آمپر ساعت است [2].

### انرژی

با در نظر گرفتن توان الکتریکی و زمان صرف شده برای شارژ یا دشارژ یک سلول، میزان انرژی قابل ذخیره در آن تعریف می‌شود و یکای اندازه گیری آن وات ساعت می‌باشد. این مقدار انرژی نظری حداکثر مقداری است که می‌تواند توسط یک سیستم الکتروشیمیایی ذخیره شود [1].

### چگالی انرژی[[5]](#footnote-5)

انرژی نامی باتری در واحد جرم یا حجم که گاهی اوقات به عنوان چگالی انرژی گرانشی نامیده می‌شود. چگالی انرژی از مشخصه‌های مورد توجه در بسته بندی باتری است. بطوری که تعیین می‌کند به ازای چه مقداری از جرم، چه میزان انرژی قابل ذخیره است. یکای اندازه‌گیری این پارامتر وات ساعت بر لیتر یا وات ساعت بر کیلوگرم است [3].

### چگالی توان[[6]](#footnote-6)

حداکثر توان الکتریکی موجود در واحد جرم یا حجم، چگالی توان تعریف می‌شود. چگالی توان تعیین می‌کند به ازای چه مقداری از جرم یا حجم، چه میزان توان الکتریکی قابل دریافت و یا قابل اعمال است. یکای اندازه‌گیری این پارامتر وات بر لیتر یا وات بر کیلوگرم است [2].

## اصطلاحات در باتری‌ها

برخی از اصطلاحات برای درک عملکرد و ویژگی‌های باتری‌ها ضروری هستند که در بندهای زیر تشریح شده‌اند:

### ولتاژ مدار باز[[7]](#footnote-7)

این به ولتاژ بین الکترودهای مثبت و منفی در زمانی که هیچ باری روی باتری وجود ندارد، اشاره می‌کند [4].

### نرخ دشارژ[[8]](#footnote-8)

نرخ دشارژ اندازه‌گیری سرعت دشارژ باتری نسبت به حداکثر ظرفیت آن است. نرخ 1C به این معنی است که جریان دشارژ کل باتری را در 1 ساعت دشارژ می‌کند [1].

### عمق دشارژ[[9]](#footnote-9)

میزان درصد دشارژ شده ظرفیت باتری که نسبت به حداکثر ظرفیت سلول اندازه‌گیری می‌شود [3].

### وضعیت شارژ [[10]](#footnote-10)

میزان درصد ظرفیت باقی‌مانده سلول باتری که نسبت به حداکثر ظرفیت سلول اندازه‌گیری می‌شود [2].

### وضعیت سلامت[[11]](#footnote-11)

وضعیت سلامت باتری، درصدی از میزان تغییرات ظرفیت باتری در طول زمان نسبت به مقدار اولیه تعیین شده توسط سازنده بیان می‌شود. بنا به خصوصیات الکتروشیمیایی باتری‌ها، ظرفیت قابل استفاده از آن‌ها با گذر زمان و دفعات شارژ و دشارژ کاهش می‌یابد [4].

### دشارژ خود‌به‌خود[[12]](#footnote-12)

این پدیده‌ای در باتری است که در آن واکنش‌های جانبی شیمیایی داخلی انرژی ذخیره شده در باتری را بدون اتصال مدار خارجی، کاهش می‌دهد. دشارژ خود‌به‌خود عمر مفید باتری‌ها را کاهش می‌دهد [2].

سیستم مدیریت باتری

سیستم‌های مدیریت باتری سیستم‌های بلادرنگی هستند که بسیاری از پارامتر‌های حیاتی برای عملکرد صحیح و ایمن سیستم باتری را کنترل می‌کنند [5]. نظارت بر دما، ولتاژ، جریان، بازدید‌های دوره‌ای، بهینه‌سازی عملکرد باتری، پیش‌بینی و پیشگیری خرابی و همچنین جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌های باتری است [6]. سیستم‌های مدیریت باتری از ارکان اصلی خودروهای الکتریکی به شمار می‌روند و از طیف گسترده‌ای برخوردار هستند [7]. الزامات سیستم مدیریت باتری برای این قبیل کاربری‌ها، اغلب بسیار شبیه به موارد موجود در صنعت خودرو است. به عبارتی دیگر، یک سیستم مدیریت باتری، همواره عملکرد سلول و پک باتری را به قابل اطمینان‌ترین و بهینه‌ترین شکل ممکن کنترل میکند [8].

خودروهای الکتریکی همیشه در یک محیط نا‌آرام و مملوء از گوناگونی شرایط محیطی، همراه با متغیرهای مختلفی مانند دما و رطوبت، میزان بار، فشار، خوردگی، شوک ارتعاشی، و غیره کار می‌کنند. بنابراین، باتری‌ها نیز در همچنین محیط پیچیده‌ای عمل می‌کنند. این عوامل چالش‌های بزرگی ایمنی، چرخه عمر و استفاده بهینه از آنها را ایجاد می‌کند. از آنجایی که بخش عمده‌ی قیمت یک خودروی برقی به پک باتری آن اختصاص دارد، سیستم مدیریت باتری برای جلوگیری از تعویض زودهنگام سلول‌ها، بهبود توانایی آن‌ها و محدودکردن کارکرد سلول‌ها در شرایط نامناسب، حیاتی است. استفاده از باتری در شرایط نامناسب (شامل شارژ بیش از حد، دشارژ بیش از حد، گرم شدن بیش از حد و غیره) می‌تواند باعث کاهش چرخه عمر باتری یا حتی حوادث بسیار مخربی شود که ایمنی سرنشینان را تهدید می‌کند. به دلیل تفاوت‌های شیمیایی و الکتریکی ناچیز موجود در هر سلول، مسائل و چالش‌های ذکر شده بیشتر نمایان هستند. به همین دلیل، اطمینان از ایمنی و چرخه عمر پک باتری و مدیریت جزو موارد بسیار ضروری به حساب ‌می‌آید [9].

### وظایف سیستم مدیریت باتری

در خودروهای برقی، عملکرد ایمن، بهینه‌سازی میزان مسافت قابل پیمایش، انتخاب حالت شارژ و کاهش هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری، از جمله وظایف مربوط به سیستم مدیریت باتری است. چه در حالت رانندگی، چه در فرآیند شارژ ایستا (ساکن و متصل به کابل شارژ)، سیستم مدیریت باتری می‌بایستی با نظارت بلادرنگ وضعیت باتری، تشخیص هرگونه خطا را از طریق پروتکل‌های ارتباطی به واحد کنترل خودرو یا شارژر اطلاع دهد. سپس واحد کنترل خودرو یا شارژر می‌تواند استراتژی کنترلی مربوطه را برای استفاده ایمن از باتری را اتخاذ کند. در شکل ‏2‑1 دیاگرام یک نمونه سیستم مدیریت باتری را مشاهده می‌کنید.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏1‑1 نمایی کلی از یک سیستم مدیریت باتری [10]. |

اساساً یک پک باتری مونتاژ شده دارای رابط‌های سیگنال الکتریکی، اتصالات مکانیکی و پروتکل‌های ارتباطی است که ممکن است از چندین ماژول تشکیل شده باشد. آرایش سلول‌های آن می‌تواند به صورت ترکیب سری و موازی باشد. یک ماژول به‌ عنوان بخشی از باتری توصیف می‌شود که معمولاً در محفظه باتری قرار دارد. اگر ماژول‌ها به صورت موازی متصل شوند، می‌توان جریان و ظرفیت بالاتری را به دست آورد و اتصال سری منجر به ظاهر شدن ولتاژ بالاتر در پایانه‌های پک باتری می‌شود [9]. در یک ماژول ایده‌آل می‌بایست هر سلول مورد نظارت قرار بگیرد تا عملکرد مناسب آن در محدوده عملیاتی موردنظر (ولتاژ، جریان و دما) تضمین شود. اگرچه، در پک باتری خودرو بدلیل تعدد سلول‌های باتری این امر از لحاظ اقتصادی به صرفه نیست. راهکار ارائه شده، پیدا کردن نقطه تعادل بین مورد نظارت قراردادن تعداد از سلول‌ها در یک ماژول در مقابل حفظ عملکرد صحیح سیستم مدیریت باتری می‌باشد. در سطح پک باتری، تمام مقادیر اندازه گیری شده از همه ماژول‌ها برای محاسبه و ثبت گزارش سابقه، از طریق پروتکل‌های ارتباطی به سیستم مدیریت باتری فرستاده می‌شوند [11]. در ادامه این بخش، یک کاوش جامع از سیستم مدیریت باتری ارائه شده که شامل تخمین وضعیت شارژ، همسان‌سازی باتری، تشخیص عیب و مدیریت حرارت می‌باشد.

### تخمین وضعیت باتری

سیستم سلول باتری لیتیوم یونی، بدلیل غیرخطی بودن و تغییرپذیری با زمان و دما، دارای خروجی‌های مختلفی از وضعیت به ازای متغیر‌های نام برده است. از این روی، بطور قطع نمیتوان وضعیت شارژ یک سلول را محاسبه کرد. اگرچه، با الگوریتم‌های مختلف ریاضیاتی، ‌‌می‌توان آن را تخمین زد.

تخمین دقیق وضعیت باتری، پیری باتری را به تعویق می‌اندازد. همچنین، عملکرد سلول را بهبود و قابلیت اطمینان پذیری آن را افزایش می‌دهد. به علاوه، موجب ایمن‌تر شدن سیستم پک باتری می‌شود. معمولاً تخمین وضعیت باتری در سیستم مدیریت باتری به دو گروه طبقه‌بندی می‌شوند. روش‌های مبتنی بر مدل سازی و روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های هوشمند [12]. رویکردهای تخمین وضعیت باتری مبتنی بر مدل به دانش دقیق، درک عمیق‌ باتری و مقدار کافی از داده‌ها تجربی برای توسعه مدل ریاضی نیاز دارند. علاوه بر این، دانش نظری جامع مربوط به فیزیک و شیمی المان‌های اساسی سلول باتری، مانند خواص مربوط به مواد آند، کاتد، الکترولیت، واکنش‌های شیمیایی، قطبی شدن و انتشار فاز جامد حاوی محاسبات سنگین و روابط عملکردی مفصلی برای مطالعه مورد نیاز است [13]. روش‌های تخمین وضعیت شارژ مبتنی بر مدل، زمان عملیات آفلاین کوتاه‌تری دارند و در صورتی که پارامترهای مدل باتری به ‌دقت ارزیابی شده باشند، پاسخ‌های منطقی به دست می‌آورند. با این حال، این روش دارای یک فرآیند پارامتری طولانی و پرهزینه است. همچنین، کند بودن زمان اجرای آنلاین به دلیل حجم زیادی محاسبات را دارا هستند. علاوه بر این، در برابر اثرات نویز و پیری، درصد عدم قطعیت بالایی را دچار می‌شوند[14].

#### تخمین وضعیت شارژ باتری

وضعیت شارژ به عنوان مقدار شارژ موجود در یک سلول باتری تعریف می‌شود. ارزیابی دقیق وضعیت شارژ در دستیابی به شارژ بهتر، نمودار دشارژ و افزایش طول عمر باتری بسیار مهم است. روش مرسوم از خواص فیزیکی باتری استفاده می‌کند. همچنین،. الگوریتم‌های یادگیری نیز به مقدار زیادی از داده و قابلیت پیاده‌سازی محاسبات سنگین نیاز دارند.

##### روش ولتاژ مدار باز

در یک باتری لیتیوم یونی می‌توان از ولتاژ مدار باز برای تخمین وضعیت شارژ پس از سپری کردن زمان مناسب بی‌باری و رسیدن به حالت سکون در نظر گرفت [15]. معمولاً یک رابطه خطی تقریبی بین وضعیت شارژ و ولتاژ مدار باز وجود دارد. با این حال، رابطه بین وضعیت شارژ و ولتاژ مدار باز برای همه انواع باتری‌ها دقیقاً یکسان نیست. این رابطه به ظرفیت و مواد باتری بستگی دارد. به عنوان مثال، یک باتری سربی اسیدی یک رابطه خطی بین وضعیت شارژ و ولتاژ مدار باز دارد در حالی که این در مورد یک باتری لیتیوم یونی صادق نیست [16]. این روش ساده دقت بالایی دارد. با این حال، اشکال اصلی روش ولتاژ مدار باز این است که زمان استراحت طولانی برای رسیدن به شرایط سکون را لازم دارد. مدت زمان رسیدن حالت به سکون به مقدار وضعیت شارژ، دما و غیره بستگی دارد [17]. به عنوان مثال، در دمای پایین، C/LiFePO4 بیش از دو ساعت به طول می‌انجامد تا به تعادل برسد. بنابراین، این روش تنها زمانی قابل اجرا است که وسایل نقلیه در پارکینگ قرار داشته‌ باشد؛ نه در حالت رانندگی. علاوه بر این، مشاهدات دقیقی برای اندازه‌گیری ولتاژ شارژ و دشارژ مورد نیاز است، زیرا باتری‌ها دارای ویژگی‌های هیسترزیس هستند که منجر به ولتاژ مدار باز بالا در هنگام شارژ شدن باتری و ولتاژ مدار باز پایین در هنگام تخلیه باتری می‌شود [18]. این پدیده در شکل ‏1‑2 نشان داده شده است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏1‑2 نمودار OCV/SOC باتری C/LiFePO4 [18]. |

##### روش شمارش کولن[[13]](#footnote-13)

روش شمارش کولن ساده ترین روش برای تخمین وضعیت شارژ باتری است. پیاده‌سازی این روش برای تجهیزاتی با قابلیت محاسبات محدود آسان است. این مبتنی بر جمع کردن جریان باتری در واحد زمان به هنگام شارژ و دشارژ شدن باتری است. عبارت ریاضی برای اندازه گیری وضعیت شارژ در ‏2‑1نشان داده شده است. در این روش نمی‌توان مقدار اولیه وضعیت شارژ را بدست آورد. علاوه بر این، دقت تخمین به شدت به سنسور‌های جریان مورد استفاده بستگی دارد که ممکن است تحت تأثیر خطای اندازه‌گیری قرار گیرند [19]. این امر موجب اثر خطای جمع شونده می‌شود. علاوه بر این، روش نیاز به تخلیه کامل سلول و کالیبراسیون ظرفیت دوره‌ای برای به دست آوردن حداکثر ظرفیت دارد که طول عمر باتری را کوتاه می‌کند [20].

|  |  |
| --- | --- |
| ‏1‑1 |  |

##### روش مبتنی بر مدل باتری

روش ولتاژ مدار باز نمی‌تواند به صورت آنلاین و بلادرنگ انجام شود و به زمان سکون کافی برای تخمین وضعیت شارژ نیاز دارد. بنابراین، این روش را نمی‌توان در حالی که وسیله نقلیه در حال حرکت است اجرا کرد. برای محاسبه وضعیت شارژ آنلاین، توسعه مدل باتری مورد نیاز است. در این موارد، مدل الکتروشیمیایی باتری اغلب برای تجزیه و تحلیل عملکرد باتری استفاده می‌شود. زیرا، اجزای داخلی و تأثیر الکترودینامیک و ترمودینامیک شیمیایی در آن گنجانده می‌شود [21]. شکل ‏1‑3 یک مدل RC مرتبه n را نشان‌ می‌دهد. این مدل شامل سه بخش منبع ولتاژ مدار باز، مقاومت اهمی RS که نشان دهنده مقاومت الکتریکی و عناصر مقاومتی و خازنی نیز رفتار ولتاژ دینامیکی مقاومت انتشار و ظرفیت انتشار را توصیف می‌کنند [12]. شکل ‏1‑4 این پروسه استخراج را تشریح می‌کند. همچنین، بخشی از نتایج آزمایش مشخصه‌یابی ترکیبی با پالس پرتوان در دماهای مختلف نشان داده شده است.

##### روش مبتنی بر فیلتر‌‌های تطبیق‌پذیر (فیلتر کالمن[[14]](#footnote-14))

فیلتر کالمن ابزاری هوشمند برای تخمین وضعیت دینامیکی باتری است. این ابزار مناسب فیلتر کردن مقادیری است که در آن‌ها عدم قطعیت وجود دارد و پارامتر‌ها را از مشاهدات نامشخص و نادرست فیلتر می‌کند. معمولاً در بسیاری از کاربردها مانند اتومبیل، ردیابی رادار، فناوری‌های هوافضا و ردیابی ناوبر استفاده می‌شود. در توجه در سال‌های اخیر، با وجود بار محاسباتی بالا در تخمین وضعیت باتری بسیار موفق بوده است. از جذاب ترین ویژگی آن می‌توان به ماهیت خود اصلاحی آن اشاره کرد که این مشخصه تأثیرپذیری در مقابل تغییرات زیاد جریان را کاهش می‌دهد. KF شامل معادلات حالت سیستم مدل شده می‌باشد که یک حالت جدید را به طور مکرر در حین کارکرد سیستم پیش بینی و تصحیح می‌کند [22]. شکل ‏1‑6 نمونه ساده از فیلتر کالمن نمایش می‌دهد.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏1‑3 شماتیک دیاگرام مداری سلول باتری [12]. |
|  |
| شکل ‏1‑4 فرآیند HPPC را تشریح می‌کند [23]. |
|  |
| شکل ‏1‑5 نتیجه استفاده از مقادیر RC بدست آمده توسط فرآیند HPPC [23]. |

|  |
| --- |
| Hardware implementation of an algorithm based on kalman filtrer for  monitoring low capacity Li-ion batteries | Semantic Scholar |
| شکل ‏1‑6 نمونه ساده شده از تخمین SOC توسط فیلتر کالمن [24]. |

### همسان‌سازی باتری در سیستم مدیریت باتری

پک باتری در خودروهای الکتریکی معمولاً با استفاده از چندین باتری متصل به صورت سری یا موازی پیکربندی می‌شود تا ولتاژ و ظرفیت مورد نیاز را تامین کند. در یک باتری پک ایده‌آل، با توجه به یکسان بودن پارامتر تمامی باتری‌ها، وضعیت شارژ یک به یک سلول‌ها در تمامی زمان‌های کاری پک باتری یکسان است. ولیکن به دلیل تأثیر پیری سلول باتری، تغییرات دمای محیط، و مقادیر متفاوت در مقاومت داخلی و ظرفیت سلول‌ها در اثر خطای ساخت، سلول‌های پک از این توازن خارج می‌شوند. این امر، ایمنی، طول عمر و اثربخشی پک باتری را کاهش می‌دهد [25]. از این رو، توسعه یک استراتژی کنترل همسان‌سازی کارآمد و مناسب برای رسیدگی به این مشکل در پک باتری حائز اهمیت است. با توجه به عنوان انتخاب شده پروپوزال، در فصول بعدی همسان‌سازی باتری در سیستم مدیریت باتری بطور مفصل تشریح می‌شود.

**فصل دوم**

**سیستم مدیریت همسان‌سازی (EMS)**

# همسان‌سازی باتری

همانطور که در مطالب بخش‌های پیشین اشاره شد، باتری‌های لیتیوم یونی به دلیل محدودیت‌های شیمیایی آن‌ها، ولتاژ یک سلول در محدوده 4/2 ولت تا 2/4 ولت قرار ‌می‌گیرد. از این رو، بدیهی است که نمی‌تواند نیاز ولتاژ بالای مصرف‌کننده‌های خودروی‌ الکتریکی را برآورده کند. برای حل این مشکل، باتری‌های لیتیوم یونی عمدتاً به صورت سری به عنوان یک پک باتری چینش می‌شوند تا ولتاژ بالای لازم را فراهم کنند [26]. با این حال، چنین پک باتری معمولاً به دلیل عوامل مختلف موجب عدم تعادل شارژ در بین سلول‌های پک باتری مواجه می‌شود. از آنجایی که فرآیند شارژ و دشارژ باید توسط آستانه وضعیت شارژ بالا و پایین محدود شود، سلول‌هایی که بالاترین و پایین‌ترین سطح وضعیت شارژ را دارند به ترتیب ظرفیت شارژ و ظرفیت قابل استفاده پک باتری را محدود می‌کنند [27]. بنابراین، برای افزایش ظرفیت موجود پک باتری ضروری است که وضعیت شارژ نامتعادل سلول‌ها را به یکسان کنیم. در این راستا، باتری‌های لیتیوم یونی می‌بایست توسط یک سیستم همسان‌سازی باتری[[15]](#footnote-15) که همواره مغایرت وضعیت شارژ در سلول‌های پک باتری را از بین می‌برد، کنترل شوند. امروزه، تحقیقات زیادی بر روی طراحی وظایف سیستم مدیریت باتری متمرکز شده است که همسان‌سازی از مهمترین موارد مورد توجه است [28].

دلایل بوجود آمدن این مغایرت در پک باتری وابسته به پارامتر‌های زیادی است. اغلب این پارامتر‌ها به نوع مواد استفاده شده، تکنیک‌های مونتاژ و عوامل ساخت و غیره وابسته هستند که می‌توانند عمدتاً به عنوان علل داخلی، خارجی و اتصال الکتریکی طبقه‌بندی شوند. عوامل داخلی شامل: مقاومت داخلی، ظرفیت، و نرخ دشارژ خود‌به‌خود [29] می‌شوند. در ادامه، عوامل خارجی نیز شامل جریان شارژ و دشارژ، دمای محیط و عمق دشارژ می‌باشد [30]. در طول کارکرد معمولی یک پک باتری، عوامل داخلی و خارجی اغلب موجب ناهمسانی بین سلول‌ها می‌شود [31]. شارژ بیش از حد می‌تواند باعث ایجاد واکنش‌های شیمیایی ناخواسته داخلی و تولید دی‌اکسید کربن شود که فشار و دمای داخلی سلول را افزایش می‌دهد [31].

این امر، موجب پیری زودرس و در برخی موارد حاد باعث انفجار نیز شود. ناهمسانی بین سلول‌ها موجب رسیدن یک سلول به ولتاژ قطع شارژ و تکمیل ظرفیت هستیم. در صورت ادامه فرآیند شارژ پک باتری، سلول تکمیل ظرفیت شده دچار شارژ بیش‌ از حد می‌شود. همین روال نیز در مورد فرآیند دشارژ صادق است. به طوریکه، در صورت اتمام ظرفیت یک سلول و ادامه فرآیند دشارژ، سلول مورد نظر دچار تخلیه بیش‌ از حد می‌شود [32]. همانطور که در شکل ‏3‑1 نشان داده شده است، هنگامی که هر یک از سلول‌ها به ولتاژ قطع بالا و یا پایین رسید، شارژ و یا دشارژ یک پک باتری سری 4 سلولی باید متوقف شود.

دو رویکرد اصلی به عناوین منفعل[[16]](#footnote-16) و فعال[[17]](#footnote-17) یا اتلافی[[18]](#footnote-18) و غیراتلافی[[19]](#footnote-19) برای دستیابی به همسان‌سازی سلول‌ها وجود دارد. روش‌های سلولی منفعل از مقاومت‌های شانت برای از بین بردن بار اضافی سلول‌های برای وضعیت شارژ اضافی استفاده می‌شود [32]. به دلیل سادگی در پیاده‌سازی و هزینه پایین‌ عمدتا در خودروهای الکتریکی استفاده گسترده‌ای شده است. لازم به ذکر است، که این نوع همسان‌سازی تنها در حالت شارژ خودرو به کار می‌رود [33]. از جمله مزایای می‌توان به پیچیدگی کمتر، قیمت پایین و قابلیت اطمینان بالا اشاره کرد. لازم به ذکر است، اتلاف انرژی موجود در روش‌های اتلافی باعث کاهش ظرفیت موجود پک باتری می‌شود. از طرفی تقاضا برای یک سیستم مدیریت حرارت بمنظور کنترل حرارت تولید شده توسط اتلاف انرژی‌های ذخیره شده به مجموعه اضافه می‌گردد [34]. شکل ‏3‑2 مدار همسان‌ساز اتلافی را نشان می‌دهد که به موازات هر سلول، یک سوئیچ‌ و مقاومت قرار داده شده است. فرآیند همسان‌سازی در این توپولوژی فقط در زمان شارژ باتری اجرا می‌شود. ابتدا با معیار قرار دادن کمترین ولتاژ در میان سلول‌ها، انرژی باقی سلول‌ها را تا رسیدن به میزان این ولتاژ تلف می‌کنند. با روشن شدن هر سوئیچ، مسیر عبور جریان از مقاومت شانت مهیا و اتلاف انرژی توسط آنها صورت میگیرد [35]. برخلاف روش‌های اتلافی در روش‌های غیراتلافی، بار از سلول‌هایی با شارژ بالا به سلول‌های دیگر با شارژ پایین‌تر به وسیله‌ی المان‌های فعال در مدار منتقل می‌شود. این رویکرد در مقایسه با روش‌های اتلافی، بازدهی انرژی بالایی را ارائه می‌دهد. علاوه بر این، به زمان کوتاه‌تری برای همسان‌سازی سلول‌ها نیاز دارد [36].

متغیرهای همسان‌سازی

متغیرهای همسان‌سازی جزو خروجی این سیستم‌ها به شمار می‌روند. این خروجی‌ها معیاری برای سنجش میزان همسان‌سازی پک باتری به ازای پارامتر‌های مختلف می‌باشند. در حال حاضر، متغیرهای همسان‌سازی اغلب شامل ولتاژ باتری، وضعیت شارژ، ولتاژ مدار باز و ظرفیت است [37]. اخیرا از ترکیب این متغیر‌ها برای رسیدن به همسان‌سازی هدفمند نیز مورد توجه محققان بوده است. انتخاب متغیرهای همسان‌سازی متناسب با کاربری پک باتری، امری چالش برانگیز است. در ادامه به متغیر‌های همسان‌سازی اشاره می‌شود [32].

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏3‑1 نمایی از پک باتری در حال شارژ و دشارژ. |
|  |
| شکل ‏3‑2 همسان‌ساز اتلافی با استفاده از مقاومت‌های شانت [35]. |

### همسان‌سازی بر مبنای ولتاژ

استراتژی‌های همسان‌سازی مبتنی بر ولتاژ کاری باتری، از ولتاژ بین پایه‌های مثبت و منفی به عنوان یک متغیر بمنظور همسان‌سازی استفاده می‌کند. هدف آنها این است که ولتاژ کاری هر سلول ثابت یا در محدوده مورد انتظار باشد. همانطور که در شکل ‏3‑3 نشان داده شده است. برای مثال، هنگامی که یک پک باتری دارای سه سلول به صورت سری با ولتاژهای متفاوت است، ولتاژ تمامی سلول‌ها در طول فرآیند شارژ و دشارژ می‌تواند به عنوان یک متغیر برای دستیابی به پک باتری با ولتاژ‌های یکسان باشد [32]. لازم به ذکر است که در

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏3‑3 همسان‌سازی مبتنی بر ولتاژ پک باتری در فرآیند شارژ و دشارژ. |

روش همسان‌سازی مبتنی بر ولتاژ، آغاز عمل همسان‌سازی با مقایسه تفاوت ولتاژ بین سلول‌ها و آستانه ولتاژ از پیش تعریف شده صورت می‌گیرد. سلول‌های با ولتاژ بالاتر دشارژ می‌شوند؛ در حالی که سلول‌های با ولتاژ پایین‌تر شارژ می‌شوند تا ولتاژ پک باتری را با یکدیگر همسان‌ کنند [38].

از جمله مزایای پیاده‌سازی این استراتژی در خودروهای الکتریکی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: 1) اندازه‌گیری ولتاژ پایانه‌های باتری ساده و آسان است. این امر باعث عدم پیاده‌سازی الگوریتم‌های پیچیده بمنظور تخمین سایر متغیر‌های دیگر باتری مانند وضعیت شارژ می‌شود. داده‌های ولتاژ از نوع قابل اندازه‌گیری هستند که به مراتب، دقیق‌تر و قابل اعتمادتر از داده‌های تخمینی می‌باشند. 2) با در اختیار قرار داشتن داده ولتاژ باتری‌ها می‌توان در فرآیند شارژ و دشارژ بیش از حد پک باتری جلوگیری کرد. در کنار مزایا، معایبی نیز برای این استراتژی وجود دارد: 1) ولتاژ باتری تحت تأثیر پارامترهای داخلی مانند ظرفیت، مقاومت داخلی، راندمان کولنی و غیره قرار می‌گیرد. در مورد عوامل محیطی و خارجی نیز نرخ شارژ و دشارژ، دما، پیری[[20]](#footnote-20) و غیره نیز شامل این گروه می‌شوند [39]. از این رو، نمی‌تواند وضعیت داخلی باتری را به خوبی منعکس کند 2) تغییرات و نوسانات ولتاژ باتری در شرایط عملیاتی واقعی خودرو به دلیل جریان شارژ و دشارژ زیاد است. به همین دلیل، باعث ایجاد خطا در فرآیند همسان‌سازی می‌شود. در نتیجه خطای رخ داده، موجب تکرار نابجا و طولانی‌تر شدن فرآیند همسان‌سازی و به دنبال آن کاهش راندمان فرآیند می‌شود[40].

### همسان‌سازی بر مبنای ولتاژ مدار باز و وضعیت شارژ

استفاده از وضعیت شارژ باتری به عنوان متغیر همسان‌سازی، طبیعتاً باعث حذف مغایرت وضعیت شارژ هر سلول با سایر سلول‌ها می‌شود. همانطور که در شکل ‏3‑4 یک پک باتری با مقدار وضعیت شارژ اولیه ناهمسان را نشان می‌دهد که با استفاده از این استراتژی، وضعیت شارژ یکسان از طریق همسان‌سازی توسط شارژ و دشارژ سلول‌ها به دست می‌آید [32].

در برخی تحقیقات از ولتاژ مدار باز برای تخمین وضعیت شارژ استفاده شده است. این امر، موجب کاهش احتمال بروز خطا و بار محاسباتی در تخمین وضعیت شارژ می‌شود. برخی از محققین فقط از ولتاژ مدار باز یا رابطه ولتاژ مدار باز-وضعیت شارژ برای همسان‌سازی استفاده کرده‌اند. لازم به ذکر است، همسان‌سازی مبتنی بر ولتاژ مدار باز فقط برای سلول‌های در حالت سکون اعمال می‌شود. علاوه بر اینها، پدیده بوجود آمدن منحنی فلات[[21]](#footnote-21) شکل منجر به تخمین نادرست وضعیت شارژ می‌شود. برای حل این مشکل، محققان استراتژی‌های همسان‌سازی را فقط برای ناحیه خطی منحنی‌های شارژ و دشارژ پیشنهاد کردند تا از خطاهای احتمالی مانند شارژ بیش از حد جلوگیری شود [15].

به طور خلاصه، تخمین وضعیت شارژ بر اساس رابطه ولتاژ مدار باز-وضعیت شارژ نیازی به الگوریتم پیچیده ای ندارد. در مقایسه با روش متغیر ولتاژ، ولتاژ مدار باز می‌تواند با اجتناب از تأثیر عوامل الکتروشیمیایی دینامیکی (افت ولتاژ اهمی، ولتاژ پلاریزاسیون و ولتاژ انتشار) وضعیت داخلی باتری را با دقت بیشتری منعکس کند. با این حال، معایبی نیز برای آن وجود دارد که شامل این موارد می‌شود: 1) استفاده از ولتاژ مدار باز به عنوان متغیر همسان‌سازی فقط برای سلول‌های در حالت سکون قابل استفاده است و نمی‌توان از آن برای تخمین آنلاین و بلادرنگ استفاده کرد. 2) به دلیل وجود هیسترزیس در نمودار شارژ و دشارژ ولتاژ مدار باز، ممکن است سلول‌هایی با ولتاژ مدار باز یکسان، CR متفاوتی داشته باشند. 3) منحنی‌های ولتاژ مدار باز-وضعیت شارژ نیز از سلولی به سلول دیگر به دلیل فرآیندهای تولید متفاوت است. و 4) منحنی ولتاژ مدار باز-وضعیت شارژ بسیار صاف برخی از باتری‌ها، مانند باتری‌های LFP، منجر به تخمین نادرست وضعیت شارژ می‌شود [32].

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏3‑4 همسان‌سازی مبتنی بر SOC پک باتری در فرآیند شارژ و دشارژ. |

در [24] با استفاده از فیلتر کالمن وضعیت شارژ را تخمین زده و سپس سلول‌ها بر اساس وضعیت شارژ مرتب شدند. در نهایت، انرژی مورد نظر برای انتقال محاسبه و با کنترل جریان همسان‌سازی، پک باتری متعادل شد.

در نظر گرفتن وضعیت شارژ به عنوان یک متغیر همسان‌سازی دارای مزایای زیر است: 1) تفاوت در ظرفیت کل سلول‌ها را می‌توان نادیده گرفت. به طوری که تمام سلول‌ها همزمان به حالت شارژ و دشارژ کامل می‌رسند و در نتیجه، امکان استفاده از توان پک را بطور کامل را فراهم می‌کنند. 2) همسان‌ بودن وضعیت شارژ به این معنی است که عمق دشارژ نیز همسان‌ است. این امر، موجب پیری یکسان و هماهنگ در سلول‌ها می‌شود. همچنین، در این روش عمق دشارژ باتری برای همه سلول‌ها به یک میزان انجام می‌شود که این روند به خودی خود، از گوناگونی در سرعت پیری جلوگیری می‌کند و در نتیجه عمر باتری را افزایش می‌دهد. [30] 3) با همسان‌سازی توسط وضعیت شارژ، از بروز همسان‌سازی‌های مکرر جلوگیری می‌شود و به مراتب از همسان‌سازی نوع مبتنی بر ولتاژ خطای کمتری دارد. متعاقبا، با جلوگیری از تکرار نابجای فرآیند، سرعت تکمیل آن افزایش می‌یابد. از جمله اشکالات این روش می‌توان به این موارد اشاره کرد: 1) دستیابی به تخمین دقیق وضعیت شارژ بصورت بلادرنگ و با در نظر گرفتن دما و پدیده پیری نسبتاً دشوار است [41]. 2) پیچیدگی محاسباتی را افزایش می‌دهد و کنترل‌کننده را ملزم به داشتن قدرت محاسباتی بالا می‌کند [42]. از این رو، پیاده‌سازی آن برای وسایل نقلیه در حال حاضر مقرون به صرفه نیست.

### همسان‌سازی بر مبنای ظرفیت

استراتژی‌های همسان‌سازی مبتنی بر ظرفیت، ظرفیت کل[[22]](#footnote-22)، ظرفیت باقی‌مانده[[23]](#footnote-23) و یا ظرفیت قابل‌شارژ[[24]](#footnote-24) را به عنوان یک متغیر همسان‌سازی برای بهبود استفاده از ظرفیت پک باتری در نظر می‌گیرد. در نوع اتلافی، حداکثر ظرفیت پک باتری، حداقل ظرفیت سلول آن است. در حالی که در نوع فعال، زمان شارژ و دشارژ کامل همه سلول‌ها در یک زمان اتفاق می‌افتد و ظرفیت کل به حداکثر خود می‌رسد که از لحاظ تئوری، میانگین ظرفیت همه سلول‌ها می‌باشد. در شکل ‏3‑5 تغییرات ظرفیت سلول‌ها در یک پک باتری سری را تحت شارژ و دشارژ در یک استراتژی همسان‌سازی مبتنی بر ظرفیت نشان می‌دهد. در این استراتژی‌، CC را در حین شارژ و CR را در حین تخلیه به عنوان متغیرهای همسان‌سازی انتخاب می‌کند تا بتوانند از همسان بودن پک باتری اطمینان حاصل کند.

در نظر گرفتن ظرفیت باتری به عنوان یک متغیر همسان‌سازی مزایای زیادی دارد: 1) CT پک باتری را می‌توان به طور قابل توجهی در شرایط ایده آل بهبود و به حداکثر رساند [41]. 2) استفاده از ولتاژ به عنوان یک متغیر منجر به همسان‌سازی مکرر می‌شود. ولیکن، با استفاده از متغیر ظرفیت می‌توان از این پدیده جلوگیری و در نتیجه زمان همسان‌سازی را کوتاه ‌تر کرد. 3) به سبب افزایش راندمان انتقال شارژ و جلوگیری از شارژ و دشارژ نابجا در سیستم، می‌تواند پیر شدن پک باتری را کند [42]. با این حال، کاستی ‌هایی نیز در استفاده از ظرفیت باتری به عنوان متغیر همسان‌سازی وجود دارد: 1) تخمین ظرفیت آنلاین دشوار و پیچیده است؛ زیرا، به دقت، پایداری و منابع محاسباتی بالایی نیاز دارد که هزینه‌های سخت افزاری را افزایش می‌دهد. 2) بیشتر روش‌های تخمین ظرفیت به تخمین وضعیت شارژ دارد که با کاهش دقت تخمین وضعیت شارژ، تخمین ظرفیت نیز دچار مشکل می‌شود. 3) جریان همسان‌سازی نیز باید اندازه گیری شود و افزودن سنسورهای جریان، هزینه سخت‌افزار را افزایش می‌دهد [32].

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏3‑5 همسان‌سازی مبتنی بر SOC پک باتری در فرآیند شارژ و دشارژ. |

اهداف همسان‌سازی

در هر کاربری متفاوت، اهداف خاصی بمنظور همسان‌سازی پک باتری در نظر گرفته می‌شوند که در ادامه تشریح می‌شود.

### حداکثر رساندن ظرفیت باتری

مفهوم استفاده کامل از ظرفیت پک باتری به عنوان هدف همسان‌سازی این است که تمام سلول‌ها از نظر تئوری به طور کامل در یک زمان شارژ یا دشارژ بشوند[43]. هدف به حداکثر رساندن ظرفیت پک باتری همچنین مستلزم پایداری، قابلیت اطمینان و قدرت بیشتر از مدار همسان‌سازی است که هزینه را تا حد زیادی افزایش می‌دهد[44].

### حداقل رساندن زمان همسان‌سازی

فرآیند همسان‌سازی توسط سلول با کمترین سرعت همسان‌سازی محدود می‌شود. زمان همسان‌سازی به پارامترهای زیادی مربوط می‌شود که شامل: میزان جریان‌دهی مدارات، میزان مغایرت در وضعیت شارژ سلول‌ها و مسیر بین سلول‌ها در حین فرآیند می‌باشد[45]. توپولوژی، سخت‌افزار و نوع المان‌های بکار رفته در منابع ذخیره‌کننده انرژی مورد استفاده در فرآیند همسان‌سازی تأثیر قابل توجهی بر روی این زمان دارند. مدارات‌ همسان‌سازی که المان ذخیره‌کننده آن مبتنی بر خازن است، نسبت همسان‌ساز‌های مبتنی بر سلف و ترانسفورماتور از سرعت کمتری برخوردار هستند [46]. در مداراتی که همسان‌سازی توسط اعمال ولتاژ صورت می‌گیرد، جریان به تناسب اختلاف ولتاژ تغییر و به مرور به صفر میل می‌کند [47]. انتخاب آستانه‌ای برای آغاز و پایان همسان‌سازی نیز عاملی دیگر است که بر زمان این فرآیند تأثیر می‌گذارد. انتخاب یک آستانه معقول جهت شروع فرآیند ، استفاده از یک توپولوژی مناسب، به حداکثر رساندن جریان و استفاده از یک الگوریتم کنترل برای بهینه‌سازی مسیر جریان می‌تواند زمان فرآیند را در کاهش دهد [45].

### کاهش انرژی مصرفی

بمنظور استفاده هر چه بیشتر از انرژی موجود در سلول‌ها، کاهش انرژی مصرفی نیز به عنوان یک هدف در فرآیند همسان‌سازی تعریف می‌شود. با افزایش اندازه پک باتری، اتلاف انرژی در مدارات همسان‌ساز، قابل توجه می‌گردد. از این رو، مدیریت انرژی مصرفی بیش از پیش حس می‌شود [48].

طبقه‌بندی مدارات همسان‌سازی فعال بر اساس توپولوژی

سیستم‌های همسان‌سازی فعال سلول‌ها با توجه به مسیر انرژی انتقالی، به توپولوژی‌های مبتنی بر انتقال به مجاور، غیرمجاور و سلول به سلول تقسیم می‌شوند. مطالعه و مقایسه سیستم‌های همسان‌سازی با مدارهای سخت افزاری مختلف دشوار است. از زاویه دید توپولوژی، ما می‌توانیم این سیستم‌ها را بدون در نظر گرفتن تفاوت مدارات سخت‌افزاری تجزیه و تحلیل کنیم. این امر، می‌تواند رویکرد سیستماتیک‌ و قابل فهم‌ تری برای مقایسه عملکرد آنها ارائه دهد. شکل ‏3‑6 نمایی از این دسته‌بندی را نشان داده است.

### توپولوژی‌های مبتنی بر انتقال به مجاور

این توپولوژی، همسان‌سازی را بر روی هر سلول یا ماژول مجاور انجام می‌دهد. در ابتدا، میانگین وضعیت شارژ دو سلول مجاور اندازه‌گیری می‌شود و در ادامه سلول با وضعیت شارژ بیشتر، شروع به انتقال انرژی خود به سلول یا ماژول مجاور می‌کند. در این میان، سلول‌های شارژ شده مجدداً اقدام به انتقال انرژی به سلول‌های مجاور خود می‌کنند. این چرخه تا جایی ادامه پیدا می‌کند که تمامی ‌سلول‌ها به یک میزان همسان از انرژی در

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏3‑6 طبقه‌بندی توپولوژی‌های مختلف همسان‌سازی. |

کل پک باتری برسند [49]. انتقال مجاور می‌تواند به صورت‌های مختلف انجام شود که در ادامه تشریح می‌شوند.

#### انتقال سریالی سلول به سلول

از بین تمام ساختارها، توپولوژی مبتنی بر مجاور، ساده ترین و در عین حال گسترده ترین مورد استفاده، توپولوژی انتقال سریالی سلول به سلول می‌باشد. ساختار این توپولوژی در شکل ‏3‑7 نشان داده شده است. در این روش، بین هر سلول یک همسان‌ساز که با نماد (e) نشان‌ داده شده است، وجود دارد. این همسان‌ساز دو سلول مجاور خود را همسان می‌کند. این روال در کل پک ادامه ‌می‌یابد تا کل پک یکسان‌ شود [50].

#### انتقال سریالی سلول به سلول در قالب ماژول

در این توپولوژی عملیات شارژ و دشارژ مشابه توپولوژی سلول به سلول سریالی سری می‌باشد. به اضافه اینکه ماژول‌های مجاور نیز بصورت موازی و در مرتبه بالاتری اقدام به انجام فرآیند می‌کنند. شکل ‏3‑8 دیاگرام توپولوژی همسان‌سازی سریالی مبتنی بر ماژول را مشاهده می‌کنید در این توپولوژی همسان‌سازهای داخل هر ماژول، بصورت مجزا از سایر ماژول‌ها، به همسان‌سازی سلول‌های ماژول مربوطه می‌پردازند. در همین حین، مدارات مشابه بصورت سری بین ماژول‌های پک باتری وجود دارند که ماژول‌های مجاور خود را همسان‌ میکنند

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏3‑7 نمایی از توپولوژی همسان‌ساز سریالی سلول به سلول. |
|  |
| شکل ‏3‑8 توپولوژی همسان‌سازی سریالی مبتنی بر ماژول. |

[51]. هدف از این آرایش، کاهش زمان همسان‌سازی شارژ در کل سطح پک باتری می‌باشد. همانطور که مشهود است، نسبت به همسان‌ساز سلول به سلول سریالی، این توپولوژی قطعات و اجزای بیشتری را دارا می‌باشد که به طبع الگوریتم همسان‌سازی وسیع‌تر و پیچیده‌تری نیاز دارد.

#### انتقال سریالی سلول به سلول لایه‌ای

همانطور که در شکل ‏3‑9 نشان داده شده است، در این توپولوژی، ساختاری مبتنی بر درخت دودویی دارد. هر کدام از مدارات همسان‌ساز که با نماد (e) نشان‌ داده شده‌اند، وضعیت شارژ دو سلول مجاور خود را همسان‌ می‌کنند. در لایه‌ای بالاتر، این مدارات همسان‌ساز دو سلول سری شده همسان‌سازی میکنند. این لایه‌سازی از مدارات تا جایی ادامه می‌کند که تعدادشان به یک واحد برسد [52].

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏3‑9 نمایی از انتقال سریالی سلول به سلول لایه‌ای. |

### توپولوژی‌های مبتنی بر انتقال به غیرمجاور

این توپولوژی از همسان‌سازی فعالی استفاده می‌کند که بر روی هر سلول یا ماژول غیرمجاور یک پک باتری انجام می‌شود. در ابتدا، میانگین وضعیت شارژ کل پک اندازه‌گیری می‌شود و در ادامه سلول یا ماژول با شارژ بیشتر، شروع به انتقال انرژی خود به سلول و یا ماژول‌های با شارژ پایین‌تر می‌کند. این چرخه تا جایی ادامه پیدا می‌کند که تمامی ‌سلول‌ها و ماژول‌ها به یک میزان همسان از انرژی در کل پک باتری برسند. با توجه به آرایش انتقال شارژ بین سلول‌ها و پک باتری، سه نوع توپولوژی همسان‌سازی وجود دارد که در ادامه تشریح می‌شود.

#### انتقال بار سلول و پک باتری

توپولوژی سلول به پک باتری، همانطور که در شکل ‏3‑10 نشان داده شده است، دارای سلول‌های سری شده در یک پک باتری با نماد (B) می‌باشد. سلول‌ها با پک باتری از طریق همسان‌ساز پک (ep) به تبادل بار می‌پردازند. این ساختار در عین سادگی در پیاده‌سازی و کارایی بالا، قابلیت انتقال شارژ بصورت آزادانه به هر سلول در هر کجای پک باتری را می‌دهد روشی که در آن ترانسفورماتور به عنوان ایزولاتور و بستر انتقال دهنده انرژی بین سلول‌ها و پک باتری عمل می‌کند. این توپولوژی بدلیل سهولت در پیاده‌سازی موجب استفاده فراوان از این طرح شده است [44].

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏3‑10 نمایی از انتقال سریالی سلول به پک باتری. |

#### انتقال بار سلول و پک باتری در قالب ماژول

توپولوژی انتقال سلول به پک باتری در قالب ماژول، در شکل ‏3‑11 نشان داده شده است، دارای سلول‌های سری شده در یک پک باتری می‌باشد. همانند روش ذکر شده قبلی، سلول‌ها به موازات همدیگر بطور مستقل با پک باتری از طریق همسان‌ساز پک (ep) به تبادل بار می‌پردازند؛ با این تفاوت که چینش پک باتری بصورت ماژول به ماژول است و به ازای هر ماژول، یک مدار همسان‌ساز وجود دارد. از جمله مزایای این توپولوژی پیچیدگی کمتر و بسط آسان در صورت وجود تعداد زیاد سلول می‌باشد. همچنین، سرعت بالاتری را ارائه می‌دهد.

### انتقال سلول به سلول مستقیم

در این روش یک همسان‌ساز معمولی و بکارگیری چند المان سوئیچینگ برای هر سلول به همراه یکی از اجزای ذخیره‌کننده انرژی الکتریکی مانند خازن و یا سلف استفاده می‌شود. صرف نظر از مجاورت و یا عدم مجاورت سلول‌ها انتقال انرژی از سلول به المان ذخیره کننده، سپس، از المان ذخیره کننده به سلول مورد نیاز انجام می‌گردد. در طول این استراتژی، با کنترل یک جفت سوئیچ، انرژی مستقیماً از سلولی با بیشترین سطح وضعیت شارژ به کمترین آن منتقل می‌شود. همانطور که در شکل ‏3‑13 نشان داده شده است، برای یک باتری با b تعداد سلول سری، دارای b جفت سوئیچ و یک مدار همسان‌ساز معمولی برای کل پک باتری می‌باشد. طبق استراتژی بکار رفته، در بخش‌های زمانی تعیین شده تنها یک جفت سوئیچ‌ها روشن است. در مقابل، سایر سوئیچ‌ها باید خاموش باشند تا اجازه دهند بین سلول‌های انتخاب شده در هر نقطه از پک باتری، انتقال شارژ انجام شود [53].

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏3‑12 نمایی از توپولوژی انتقال بار از سلول به پک باتری در قالب ماژول. |
|  |
| شکل ‏3‑13 نمایی از توپولوژی انتقال بار از سلول به سلول مستقیم. |

مدارات همسان‌سازی فعال سلول‌ها

انواع مختلفی از مدارهای سخت‌افزاری وجود دارد که در آنها المان‌های سوئیچینگ و سلف‌ها بیشترین استفاده را برای انجام انتقال انرژی دارند. همانطور که در بخش‌های پیشین تشریح شد، شارژ اضافی از سلول‌های با وضعیت شارژ بیشتر به سلول‌های با وضعیت شارژ کمتر منتقل می‌شوند. در ادامه، در نوع همسان‌سازی مجاور، مدارات همسان‌ساز وضعیت شارژ بین دو سلول مجاور خود را انتقال می‌دهند و در نوع غیرمجاور، وضعیت شارژ هر سلول بصورت انتخابی، جابجا می‌شود. توجه داشته باشید که ساختار متقارن هر مبدل، قابلیت انتقال انرژی را در هر دو جهت بین سلول‌های متصل به خود را می‌دهد. در ادامه به تشریح برخی از مدارات رایج در سیستم‌های همسان‌سازی اشاره می‌شود.

### مبدل چوک[[25]](#footnote-25)

ساختار این مبدل در شکل ‏3‑14 نشان داده شده است، سلول باتری i و i + 1 به آن متصل هستند. مبدل از دو سلف تزویج نشده و یک خازن انتقال دهنده انرژی به همراه دو ماسفت با دیودهای داخلی تشکیل شده است. مدار نشان‌ داده شده جزو توپولوژی‌های مبتنی بر انتقال مجاور و سریالی سلول به سلول محسوب می‌شود. سیگنال ماسفت‌ها بصورت مدولاسیون پهنای پالس[[26]](#footnote-26) اعمال می‌شود و دیوتی سایکل آن، به عنوان متغیر کنترلی به حساب می‌آید. از آنجایی که ساختار مبدل دو طرفه متقارن است، می‌توان آن را به راحتی برای کل پک باتری بسط داد. برای تشریح مدار، در ابتدا با فرض انتقال بار از سلول i به سلول (i + 1) را بررسی می‌کنیم.

مرحله اول: در حالت ماندگار ولتاژ خازن اولیه vCi (t) برابر است با VBi + VBi+1. جریان اولیه سلف‌ها برابر با صفر است. نخست، با روشن شدن ماسفت Qi1، انرژی ذخیره شده در خازن Ci به سلول (i + 1) منتقل می‌شود و سلف Li1 انرژی را از سلول i ذخیره می‌کند.

مرحله دوم: پس از مرحله نخست، ماسفت Qi1 خاموش می‌شود. به دنبال آن، انرژی ذخیره شده درLi1 توسط دیود di2 به سمت سلول i می‌رود و در مسیر، خازن را شارژ می‌کند. با شارژ کامل دوباره خازن، مدار آماده سیکل بعدی انتقال می‌شود [54].

### ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه

در این نوع مدار همسان‌سازی، عنصر ذخیره‌کننده انرژی یک ترانسفورماتور فلای‌بک است. ترانسفورماتور دارای دو وجه اولیه و ثانویه است. وجه اولیه به پک باتری و در وجه ثانویه، هر سلول به سیم‌پیچ ثانویه مجزای خود متصل است. شکل ‏3‑15 نمایی از مدار همسان‌ساز چندسیم‌پیچه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، نسبت دور سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه به نحوی انتخاب شده اند که عمل باک بوست صورت بپذیرد. برای مثال، اگر در شکل ‏3‑15 سلول B2 نیاز به دریافت شارژ داشته باشد، در ابتدا سوئیچ ثانویه S2 روشن می‌شود. سپس در همین سوئیچ اصلی T شروع به کلید زنی می‌کند و انرژی پک باتری را به سلول مورد نظر انتقال می‌دهد [55].

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| |  | | --- | |  | | شکل ‏3‑14 همسان‌ساز مبدل چوک [54]. | |
|  |
| شکل ‏3‑15 ساختار یک همسان‌ساز بر مبنای ترانسفورماتور چندسیم‌پیچه [55]. |

### سوئیچ خازنی

سوئیچ خازنی استراتژی کنترل بسیار ساده‌ای را دارد؛ چراکه، فقط شامل دو وضعیت وصل بالا و وصل پایین می‌باشد. این عمل در تمامی‌ سلول‌های پک باتری به طور متوالی تکرار صورت می‌گیرد تا همه سلول‌ها همسان‌ شوند. شکل ‏3‑16 یک نمونه ساده از ساختار مداری سوئیچ خازنی است. از مزایای این روش، می‌توان به عدم نیاز به استراتژی کنترل هوشمند اشاره کرد. بطوریکه، با اجرا کردن یک روال کلید‌زنی ساده، کلیه سلول‌ها بصورت خود به خود با سلول مجاور خود همسان می‌شوند. بدلیل عدم استفاده از المان‌های سلفی و مقاومتی، این روش از راندمان بالایی برخوردار است. در ادامه، از معایب این توپولوژی نیز می‌توان به زمان همسان‌سازی طولانی و هزینه بالای آن در مقایسه با روش همسان‌سازی اتلافی مقاومت- شانت سوئیچ شده اشاره کرد [53].

مرحله اول: در این مرحله همه سوئیچ‌ها در حالت بالا قرار می‌گیرند و دو سر خازن‌ها متناظر با هر باتری به آن متصل می‌شود. با اتصال خازن‌ها به باتری‌های متناظر خود، خازن‌ها به اندازه VBn شارژ می‌شوند.

مرحله دوم: پس از اتمام شارژ خازن‌ها، تمامی ‌سوئیچ‌ها از وضعیت بالا به وضعیت پایین تغییر حالت می‌دهند و Cn را به VBn+1 (سلول مجاور) متصل می‌کنند. در ادامه، ولتاژ سلول با ولتاژ خازن یکسان می‌شود.

ساختار سوئیچ خازنی دارای انواع توسعه یافته گوناگونی است. برای مثال، شکل ‏3‑17 نمونه یک ساختار بهبود یافته است که ظرفیت خازن کل را افزایش و در نتیجه با افزایش میزان بار قابل انتقال توسط خازن‌ها به فرآیند همسان‌سازی سرعت می‌دهد. در شکل ‏3‑17 نیز، اصول و قواعد ساختار پیشین همچنان پابرجاست؛ با این تفاوت که خازن C3 جهت افزایش ظرفیت تمامی ‌خازن‌ها به مدار اضافه شده است [53].

مقایسه بین توپولوژی‌ها

در این بخش به مقایسه ابعاد و معیارهای گوناگونی از توپولوژی‌های همسان‌سازی که قبلا ذکر شد، پرداخته و بر اساس شبیه سازی عددی مقایسه می‌شود.

### مقایسه عملکردی

سرعت یک شاخص عملکرد بسیار مهم برای سیستم همسان‌ساز است. بمنظور مقایسه زمان همسان‌سازی هشت توپولوژی سلول که مورد بحث قرار گرفت، شبیه‌سازی شده در محیط سیمولینک متلب انجام شده است. در محیط شبیه‌سازی شامل یک پک باتری متشکل از 12 سلول متصل سری با ظرفیت نامی‌1/3Ah درج شده است. برای مقایسه بهتر زمان، جریان همسان‌سازی به صورت ثابت و بر روی 5/0A تنظیم و مدارات ایده‌آل در نظر گرفته شده است. همچنین، از آرایش سه ماژول چهار سلوله در این آزمایش استفاده گردیده است. در راستای ایجاد ناهمسانی، پنج وضعیت از مقادیر از پیش تعیین شده به سلول‌های پک باتری اعمال شده که در جدول ‏3‑1 ذکر شده است. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی در جدول ‏3‑2 ارائه گردیده و نشان می‌دهد همسان‌سازی سلول‌ها در سیستمی‌ که از توپولوژی انتقال سلول به سلول مستقیم استفاده‌ شده ، طولانی‌ترین زمان همسان‌سازی را به خود اختصاص می‌دهد. در همین حین، توپولوژی انتقال سلول به سلول لایه‌ای کوتاه‌ترین زمان را دارا است. در انتها، طولانی ترین زمان تعادل در مورد 4 برای توپولوژی انتقال سلول به سلول

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏3‑16 ساختار مدار همسان‌سازی بر مبنای سوئیچ خازنی [53]. |
|  |
| شکل ‏3‑17 ساختار مدار همسان‌سازی سوئیچ خازنی دو طبقه [53]. |

مستقیم 15278 ثانیه است. در صورتی که کوتاهترین زمان تعادل در مورد 3، 3013 ثانیه است که مربوط به توپولوژی انتقال سلول به سلول لایه‌ای است.

### مقایسه اقتصادی

برای جمع بندی و مقایسه از لحاظ اقتصادی، یک مثال معمولی از یک مدار مربوط به هر توپولوژی در جدول ‏3‑3 ارائه شده است که در آن تعداد اجزای الکتریکی بکار رفته در هر مدار لحاظ شده و یک پک باتری با 8، 12 و 15 سلول باتری سری متشکل از 3 ماژول 4 سلولی برای مقایسه در نظر گرفته شده است. در

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول ‏3‑4 ارزیابی توپولوژی‌های نام‌برده شده در ابعاد مختلف [28]. | | | | | | |
| توپولوژی | پیچیدگی در الگوریتم | توان تلفاتی | اندازه | هزینه | سرعت | میانگین |
| انتقال بار سلول و پک باتری در قالب ماژول | 3 | 5 | 2 | 3 | 5 | 6/3 |
| انتقال سلول به سلول مستقیم | 3 | 4 | 5 | 4 | 4/1 | 5/3 |
| انتقال سریالی سلول به سلول در قالب ماژول | 5 | 3 | 3 | 4 | 8/1 | 2/3 |
| انتقال سریالی سلول به سلول | 5 | 1 | 3 | 5 | 6/1 | 1/3 |
| انتقال سریالی سلول به سلول لایه‌ای | 3 | 4 | 5/2 | 3 | 5/1 | 8/2 |
| انتقال بار سلول و پک باتری | 1 | 4 | 5/2 | 1 | 9/3 | 5/2 |

نیز، توپولوژی‌های مورد بحث، بر اساس پنج شاخص پیچیدگی در الگوریتم کنترلی، توان تلفاتی، اندازه، هزینه و سرعت مقایسه می‌گردند. در نهایت، از یک مقیاس عددی 1 تا 5 برای امتیازبندی شاخص‌ها استفاده ‌می‌شود.

بر این اساس،

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول ‏3‑4 ارزیابی توپولوژی‌های نام‌برده شده در ابعاد مختلف [28]. | | | | | | |
| توپولوژی | پیچیدگی در الگوریتم | توان تلفاتی | اندازه | هزینه | سرعت | میانگین |
| انتقال بار سلول و پک باتری در قالب ماژول | 3 | 5 | 2 | 3 | 5 | 6/3 |
| انتقال سلول به سلول مستقیم | 3 | 4 | 5 | 4 | 4/1 | 5/3 |
| انتقال سریالی سلول به سلول در قالب ماژول | 5 | 3 | 3 | 4 | 8/1 | 2/3 |
| انتقال سریالی سلول به سلول | 5 | 1 | 3 | 5 | 6/1 | 1/3 |
| انتقال سریالی سلول به سلول لایه‌ای | 3 | 4 | 5/2 | 3 | 5/1 | 8/2 |
| انتقال بار سلول و پک باتری | 1 | 4 | 5/2 | 1 | 9/3 | 5/2 |

نشان می‌دهند که توپولوژی مبتنی بر سری سلول به سلول ارزان‌ترین توپولوژی است. و همچنین، از آنجایی که انرژی تنها بین دو سلول مجاور منتقل می‌شود، ساده‌ترین الگوریتم کنترل را دارد. با این حال، بیشترین تلفات توان و کمترین راندمان را دارا است که از معایب آن بشمار می‌رود. بنابر دلایل ذکر شده، استفاده از این توپولوژی مناسب پک باتری در مقیاس‌های بزرگ نیست. توپولوژی‌های مبتنی بر ماژول و لایه‌ای، از ساختار طراحی ماژولار استفاده می‌کنند که در پک باتری با مقیاس بزرگ، از اتلاف انرژی کمتر و کارایی بیشتری بهره می‌برد. با این حال، در این روش پیچیدگی در پیاده‌سازی الگوریتم کنترلی و هزینه تمام شده بالاتر است. اندازه و حجم سیستم‌های مبتنی بر سلول‌های سری و سلول به سلول در قالب ماژول و ماژول تقریباً یکسان است زیرا تعداد یکسانی از مدار همسان‌ساز را استفاده می‌کنند [28].

در مورد توپولوژی مبتنی بر مجاور و غیرمجاور، به دلیل ساختار استفاده شده در غیرمجاور و توزیع انرژی بدون درگیر کردن سلول‌های نامرتبط در فرآیند، شاهد افزایش طول عمر و راندمان همسان‌سازی در پک باتری هستیم [56]. در همین حال، توپولوژی مبتنی بر سلول و پک به دلیل پیچیدگی کنترل بالایی که دارد، گران‌ترین توپولوژی به شمار می‌رود. با این حال، از تلفات توان کم و اندازه متوسط برخودار است. استفاده از این نوع توپولوژی در قالب ماژول به ماژول، پیچیدگی کنترل، تلفات و هزینه تمام شده را کاهش ‌می‌دهد. اگرچه که این امر افزایش اندازه را در پی‌ خواهد داشت. با همه این تفاسیر، این توپولوژی برای کاربری‌های توان بالا و پک باتری‌های با مقیاس بزرگ توصیه می‌شود [57].

توپولوژی سلول به سلول مستقیم از یک همسان‌سازی معمولی با سوئیچ‌ها و سایر اجزای الکتریکی ذخیره‌کننده مانند خازن و سلف برای انتقال مستقیم انرژی بین دو سلول در هر کجای پک باتری استفاده می‌شود. از این جهت، مبادله انرژی بین هر سلول در هر نقطه از پک‌ باتری می‌تواند به دست آید، که در نهایت

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول ‏3‑1 موارد آزمایش و مقادیر اولیه سلول‌ها برای شبیه‌سازی [28]. | | | | | | | | | | | | |
| X12(0) | X11(0) | X10(0) | X9(0) | X8(0) | X7(0) | X6(0) | X5(0) | X4(0) | X3(0) | X2(0) | X1(0) |  |
| %68 | %76 | %88 | %82 | %71 | %77 | %63 | %75 | %79 | %85 | %62 | 65% | وضعیت 1 |
| %65 | %69 | %88 | %72 | %89 | %82 | %56 | %77 | %85 | %52 | %68 | %80 | وضعیت 2 |
| %59 | %60 | %87 | %68 | %77 | %50 | %74 | %65 | %82 | %79 | %63 | %75 | وضعیت 3 |
| %52 | %66 | %64 | %79 | %54 | %56 | %86 | %80 | %78 | %51 | %73 | %84 | وضعیت 4 |
| %55 | %76 | %84 | %86 | %75 | %79 | %83 | %71 | %80 | %53 | %77 | %67 | وضعیت 5 |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول ‏3‑2 زمان سپری شده همسان‌سازی‌های مذکور [28]. | | | | | |
| توپولوژی | مورد 2 | مورد 3 | مورد 4 | مورد 5 | میانگین |
| مبتنی بر ماژول سلول به پک | 3688 | 3125 | 3684 | 3460 | 3489 |
| مبتنی بر سری سلول به پک | 4132 | 4133 | 3908 | 3683 | 3964 |
| مبتنی بر ماژول سلول به سلول | 4240 | 4016 | 6255 | 4522 | 4758 |
| مبتنی بر سری سلول به سلول | 5239 | 6248 | 9044 | 5466 | 6099 |
| مبتنی بر لایه ای سلول به سلول | 3684 | 3013 | 3128 | 30014 | 9660 |
| سلول به سلول مستقیم | 13258 | 12145 | 15278 | 10987 | 12917 |

به هزینه نسبتا کم و راندمان مناسب ختم می‌شود. علاوه بر این، این توپولوژی کوچکترین اندازه را در بین سایر دارد [58].

بطور خلاصه برخوردار بودن توپولوژی مبتنی بر انتقال سریالی سلول به سلول از ساختار ساده باعث پیاده‌سازی راحت‌تر آن می‌شود. در مقابل از راندمان پایین و افت توان بالا رنج می‌برد. در ساختار لایه‌ای سلول

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول ‏3‑3 مقایسه توپولوژی و مدارات همسان‌سازی به همراه تعداد اجزای آن‌ها | | | | | | |
| توپولوژی | تعداد همسان‌ساز | مثال از مدار | ترانس | سلف | سوئیچ | خازن |
| انتقال سریالی سلول به سلول در قالب ماژول |  | مبدل چوک | - | 2 | 2 | 1 |
| انتقال سریالی سلول به سلول |  |
| انتقال سریالی سلول به سلول لایه‌ای |  |
| انتقال بار سلول و پک باتری |  | ترانسفورماتور دوطرفه چند سیم‌پیچه | 1 | - | 2 | - |
| انتقال بار سلول و پک باتری در قالب ماژول |  |
| انتقال سلول به سلول مستقیم |  | سوئیچ خازنی | - | - | b2 | 1 |

به سلول شاهد بیشترین سرعت همسان‌سازی هستیم و از لحاظ هزینه تمام شده، نمره 1/3 را از 5 دریافت کرده است. توپولوژی سلول و پک باتری در قالب ماژول نیز دارای سرعت بالا و هزینه تمام شده نسبتا پایینی است. در آخر توپولوژی سلول به سلول دارای کمترین هزینه پیاده‌سازی می‌باشد و در عین حال،‌ زمان همسان‌سازی آن طولانی است [28].

الگوریتم ساده در همسان‌‌سازی

در [59]، استفاده از یک الگوریتم جدید برای انتقال شارژ بصورت چندگانه و موازی، فرآیند همسان‌سازی باتری خودرو را بهبود می‌بخشد. این الگوریتم به منظور افزایش ظرفیت قابل استفاده و پیمایش خودروها طراحی شده است، مخصوصاً در مقیاس خودروهای تجاری الکتریکی. آزمایشات الگوریتم با استفاده از شبیه‌سازی ماژول باتری و مبدل دو طرفه جریان مستقیم در محیط متلب-سیمولینک انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی با سایر الگوریتم‌ها مقایسه شده و عملکرد مطلوبی داشته است.

برای ارزیابی الگوریتم، یک توپولوژی متشکل از ماژول‌های باتری و مبدل‌های دو طرفه جریان مستقیم با سوئیچ‌های ماتریسی در محیط سیمولینک مدل‌سازی شده است. در این سیستم، انتقال شارژ بین ماژول‌ها از طریق باس انجام می‌شود. مدل ارائه شده قابلیت انتقال جریان دو طرفه بصورت ایزوله را برای انجام عملیات شارژ و دشارژ بین سلول‌های منبع یا مقصد فراهم می‌کند. هممانطور که در شکل ‏4‑1 ترسیم شده هر ماژول از

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول ‏3‑4 ارزیابی توپولوژی‌های نام‌برده شده در ابعاد مختلف [28]. | | | | | | |
| توپولوژی | پیچیدگی در الگوریتم | توان تلفاتی | اندازه | هزینه | سرعت | میانگین |
| انتقال بار سلول و پک باتری در قالب ماژول | 3 | 5 | 2 | 3 | 5 | 6/3 |
| انتقال سلول به سلول مستقیم | 3 | 4 | 5 | 4 | 4/1 | 5/3 |
| انتقال سریالی سلول به سلول در قالب ماژول | 5 | 3 | 3 | 4 | 8/1 | 2/3 |
| انتقال سریالی سلول به سلول | 5 | 1 | 3 | 5 | 6/1 | 1/3 |
| انتقال سریالی سلول به سلول لایه‌ای | 3 | 4 | 5/2 | 3 | 5/1 | 8/2 |
| انتقال بار سلول و پک باتری | 1 | 4 | 5/2 | 1 | 9/3 | 5/2 |

2 زیرماژول و هر زیرماژول از 8 سلول سری تشکیل شده است. با اتصال 7 ماژول بصورت سری، ولتاژ نهایی پک باتری 650ولت و ظرفیت پک باتری 110 آمپرساعت می‌رسد.

-

**فصل سوم**

**پیاده‌سازی طرح پیشنهادی**

# همسان‌ساز پیشنهادی

در [70]، مشکل اساسی این است که پارامترهای mp و e، که به ترتیب نمایانگر حداقل تعداد نقاط در یک همسایگی و شعاع همسایگی در الگوریتم DBSCAN هستند، قابل تنظیم نیستند. این به این معنی است که الگوریتم برای همه موارد ورودی، یکسان عمل می‌کند و خروجی خوشه‌بندی‌هایی ارائه می‌دهد که ممکن است با واقعیت مطابقت نداشته باشند. به عبارت دیگر، بدون امکان تنظیم این پارامترها، الگوریتم نمی‌تواند به طور بهینه با تغییرات در داده‌ها سازگار شود و نتایج مناسبی ارائه نمی‌دهد. این موضوع باعث می‌شود که محققان در پردازش داده‌های باتری، با مشکلاتی مواجه شوند و نتوانند به طور کامل از قابلیت‌های الگوریتم استفاده کنند. به منظور حل این مشکل، ارائه راهکارهایی برای تنظیم این پارامترها و بهبود عملکرد الگوریتم بسیار حائز اهمیت است.

پیکربندی اولیه

متغیر و معیار انتخاب‌شده به‌منظور همسان‌سازی سلول‌ها، متغیر SOC می‌باشد. بنابراین، SOC سلول‌ها به‌عنوان داده‌های ورودی الگوریتم همسان‌سازی گماشته می‌شوند. همان‌طور که در شکل ‏4‑24 جهت ارتقای راندمان سیستم همسان‌سازی و انتخاب صحیح سلول‌‌های نیاز به همسان‌سازی از دیگر سلول‌ها، توپولوژی سخت‌افزاری سلول به سلول انتخاب‌شده است. در این توپولوژی، امکان انتقال شارژ به‌صورت سلول به سلول و گروه به گروه وجود دارد. الگوریتم پیشنهادی به نحوی است که هر یک سلول و یا گروهی از سلول‌ها را به‌صورت تک‌به‌تک و گروه به گروه خوشه‌بندی می‌کند. سپس، خوشه‌ها در دسته‌های شارژ شونده و دشارژ شونده قرار می‌گیرند.

پک باتری خودرو معمولاً شامل تعداد زیادی از سلول‌های سری می‌باشد که برای اندازه‌گیری و کنترل بهتر آن، به‌صورت ماژولار بخش‌بندی می‌شود. هر ماژول مجهز به یک برد کنترلی است که وظیفه‌ی اندازه‌گیری و کنترل سوئیچ‌های متصل به سلول‌ها را دارد. در شکل ‏4‑3 نحوه پیکربندی EMS خودرویی، نمایش داده‌شده است. این پیکربندی، از یک EMS اصلی تشکیل‌شده که وظیفه‌ی نظارت و پیاده‌سازی الگوریتم را بر عهده دارد. زیر بخش‌های کوچک‌تر، سلول‌های را به‌صورت مستقیم پایش کرده و وضعیت آن‌ها را به EMS اصلی از طریق CAN[[27]](#footnote-27) گزارش می‌دهند. سپس، EMS اصلی با توجه به وضعیت سلول‌ها و نتایج الگوریتم همسان‌سازی، دستور برای کنترل سوئیچ‌های ماتریسی به زیر بخش‌های خود ارسال می‌کند. به‌منظور ساده‌سازی در چالش‌های ساخت و مهندسی، تمرکز پروژه بر روی موارد پژوهشی ذکرشده منعطف می‌گردد. با توجه به شکل ‏4‑3، پیاده‌سازی پروژه، به ساخت یک EMS جهت پیاده‌سازی الگوریتم، یک EMS زیر بخش[[28]](#footnote-28)، بستر شبکه و 9 سلول ‌سری شده مستهلک به‌عنوان پک باتری محدود می‌شود. لازم به ذکر است، محدود کردن مقیاس ساخت پژوهش تأثیری در ماهیت آن ندارد.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑1 نمایی از فرآیند انتقال شارژ سلول به سلول تکی در (الف) و گروهی در (ب) **[4]**. |
|  |
| شکل ‏4‑2 نحوه پیکربندی سیستم همسان‌سازی پیشنهادی خودرو. |

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑3 دیاگرام سیستم‌ همسان‌سازی پیشنهادی. |

جایگزاری کانفیگ نهایی

الگوریتم همسان‌سازی

پیاده‌سازی الگوریتم همسان‌سازی بر روی سخت‌افزار پیکربندی‌شده صورت می‌گیرد. استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر چگالی مانند DBSCAN می‌تواند بر توپولوژی سخت‌افزاری بکار رفته، منطبق باشد. خوشه‌ها به دسته‌های شارژ شونده و دشارژ شونده بخش‌بندی می‌شوند. این دسته‌بندی به نحوی انجام می‌شود که درنهایت، تمامی سلول‌ها پس از همسان‌سازی، در ناحیه متراکمی از SOC سلول‌ها قرار گیرند.

### خوشه‌بندی DBSCAN

الگوریتم DBSCAN دارای دو پارامتر ε (بیشینه شعاع فاصله نقاط نسبت به یکدیگر در یک خوشه) و mp ( کمینه نقاط موجود در یک خوشه) می‌باشد. نقاطی که شروط ε[[29]](#footnote-29) و mp[[30]](#footnote-30)را نقض کرده‌اند، به‌عنوان نویز در نظر گرفته می‌شوند و در هیچ خوشه‌ای جای نمی‌گیرند. در شکل ‏4‑4 نمونه‌ای از کارکرد الگوریتم DBSCAN مشاهده می‌شود. این قابلیت الگوریتم، در خوشه خوشه‌بندی سلول‌های مجاور با SOC نزدیک به یکدیگر استفاده کرد. به‌طوری‌که نقاط موجود در یک خوشه، در عمل، باتری‌های سری شده توسط سوئیچ‌های ماتریسی می‌باشند و می‌توان این باتری‌ها را (خوشه) به‌صورت سری شارژ و دشارژ کرد. طبیعتاً، این امر موجب تسریع همسان‌سازی می‌شود. لازم به ذکر است که خوشه‌بندی باید به نحوی باشد که سلول‌های مجاور را در برگیرد تا بتوان به‌وسیله‌ی سوئیچ‌های ترانزیستوری‌ آن‌ها را انتخاب و به مبدل شارژ متصل نمود.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑4 نقاط نویز، درونی و مرزی در الگوریتم DBSCAN به همراه دو خوشه و یک داده پرت به‌عنوان‌مثال. |

نکته قابل‌توجه این است که در همه شرایط از ناهمسانی سلول‌ها، نمی‌توان یک مقدار ثابت برای ε در نظر گرفت. چراکه این امر موجب خوشه‌بندی نابجا و ناکارآمدی درنتیجه نهایی همسان‌سازی شود. برای مثال، ممکن است، در نظر گرفتن ε با مقدار کم از به وجود آمدن خوشه جلوگیری کند و در حالت عکس، سبب تشکیل یک خوشه‌ی همگانی شود که کلیه نقاط را در بربگیرد.

درنتیجه، به‌منظور جلوگیری از بروز حالات تعریف‌نشده و افزایش سرعت همسان‌سازی، مقدار ε می‌بایستی با مقادیر در لحظه‌ی سلول‌ها تعیین شود. با در نظر گرفتن زمان اتمام همسان‌سازی و میزان ناهمسانی نهایی می‌توان یک تابع هزینه را تشکیل داد. مقادیر ε و mp نیز به‌عنوان ورودی تابع قرار داده می‌شوند. با به‌کارگیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، می‌توان بهترین مقادیر برای ε و mp با نتایج کمتری زمان همسان‌سازی و کمترین ناهمسانی را پیدا کرد. ازآنجایی‌که با در تشکیل نشدن خوشه، الگوریتم همسان‌سازی و توپولوژی استفاده‌شده، کارایی خود را از دست می‌دهد؛ کمینه مقدارmp برابر با 2 در نظر گرفته ‌می‌شود تا شاهد بجود آمدن خوشه باشیم.

معادله DBSCAN

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑5 سلول‌های خوشه‌بندی شده با رنگ‌های یکسان، همراه با مراحل همسان‌سازی سلول‌ها (الف) و نتیجه‌ی بدست آمده (ه) در ازای ε=2.16. |

در شکل ‏4‑6 مراحل همسان‌سازی با استفاده از الگوریتم DBSCAN شرح داده شده است در مرحله‌ی (الف) سلول‌ها در وضعیت اولیه از ناهمسانی هستند. سپس سلول‌ها با ε=2.16 و mp = 2 خوشه‌بندی می‌شوند. به عبارتی دیگر، سلول‌های با فاصله‌ی 16/2 SOC اختلاف، در یک خوشه قرار می‌گیرند. در این مثال، با توجه به فاصله اولیه بیش از مقدار ε از یکدیگر، همگی به عنوان نویز شناخته می‌شوند. سپس، سلول نویز با بیشترین مقدار در سلول نویز با کمترین مقدار انتقال بار انجام می‌دهد. این کار تا زمانی ادامه می‌یابد که به ازای ε تعریف شده، یک خوشه‌ی جدید شکل بگیرد. در (ب) سلول 4 و 2 به عنوان بیشترین و کمترین نویز شناخته شده‌اند. بنابراین، انتقال شارژ بین این دو صورت می‌گیرد و به علت نزدیک شدن به مقدار سلول1، تشکیل خوشه می‌دهد. به این سبب، مرحله انتقال شارژ به اتمام می‌رسد. در (ج) همین چرخه برای سلول 9 و 6 اتفاق می‌افتد و انتقال شارژ بین این دو با تشکیل خوشه توسط سلول 9 و 8 پایان می‌یابد. در (د) سه خوشه تشکیل شده و سلول3 به عنوان نویز شناخته شده است. این بار موقعیت نویز نسبت به میانگین سلول‌ها در نظر گرفته می‌شود؛ در صورت کمتر بودن مقدار نویز از میانگین سلول‌ها، با بالاترین خوشه‌ و درغیر اینصورت، با پایین‌ترین خوشه انتقال بار انجام می‌دهد. پس از حذف نویز‌ها و تشکیل خوشه‌ها، نوبت به انتقال بار بین خوشه‌ها می‌رسد. بیشترین و کمترین خوشه‌ها با یکدیگر انتقال بار انجام می‌دهند و با نزدیک شدن به یکدیگر، خوشه‌های جدید و پرتعداد‌تر تشکیل می‌شود. در آخر، خوشه‌های باقی‌مانده با یکدیگر همسان می‌شوند. این فرآیند در (و) و (ه) مشهود است.

به‌طور طبیعی، با کاهش مقدار پارامتر ε، خوشه‌ها کوچکتر و با تعداد بیشتری تشکیل می‌شوند. به سبب این امر، دقت در فرآیند همسان‌سازی بالا می‌رود و میزان مغایرت کمتری از SOC سلول‌ها در انتهای کار بدست می‌آید. متعاقبا با افزایش تعداد خوشه‌ها، مراحل بیشتری برای همسان‌سازی بوجود می‌آید که افزایش زمان مورد نیاز برای فرآیند همسان‌سازی را در پیش دارد. از سوی دیگر، با افزایش مقدار پارامتر ε، خوشه‌ها بزرگتر و تعداد کمتری دارند. این امر موجب عکس شدن نتایج یاد شده می‌شود. بدین ترییب، با افزایش این پارامتر، کاهش زمان مورد نیاز برای همسان‌سازی و میزان یکپارچگی نهایی بیشتری پس از اتمام فرآیند، مورد انتظار است. همچنین، اثر روی‌هم‌رفت نیز وابسته به مقدار ε می‌باشد و از قضا با دو پارامتر دیگر رابطه‌ی خاصی ندارد. در شکل ‏4‑6 تنایج همسان‌سازی به ازای ε 1 تا 20 قابل مشاهده است.

لازم به ذکر است، برای یافتن بهترین مقدار ε و دست‌یابی به اهداف همسان‌سازی مورد نظر، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. این الگوریتم‌ها بر اساس شرایط مورد نظر و معیارهای مشخصی که در فرآیند همسان‌سازی ارائه می‌شوند، به دنبال بهترین پاسخ در میان حجم زیادی از پاسخ‌ها می‌گردند و نزدیک‌ترین آن به معیارهای مشخص شده را انتخاب می‌کنند. به عبارتی دیگر، این امر کمک می‌کند تا بجای محاسبه و مقایسه‌ی حجم عظیمی از پاسخ‌ها، با تعداد تکرار محدود اجرای الگویتم بتوان به بهینه‌ترین خروجی‌ها رسید. در پی آن می‌توان از زمان و انرژی صرف شده کاست.

### بهینه‌سازی خوشه‌بندی DBSCAN با استفاده از PSO

برای تعیین بهترین مقدار پارامتر ε در الگوریتم همسان‌سازی DBSCAN، از الگوریتم بهینه‌سازی به نام ازدحام ذرات[[31]](#footnote-31) استفاده می‌شود. این الگوریتم مبتنی بر شبیه‌سازی حرکت یک گروه از ذرات است که به دنبال یافتن بهینه‌ترین حالت برای یک مسأله بهینه‌سازی می‌باشند. در اینجا، هر ذره نمایانگر یک مقدار ممکن برای پارامتر ε است، و حرکت آنها در فضای جستجوی مقادیر ممکن ε با هدف رسیدن به حالتی که بهترین نتیجه خوشه‌بندی را فراهم می‌آورد، صورت می‌پذیرد. این الگوریتم بر اساس ایده‌ی تعامل و همکاری بین اعضای

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑6 تنایج همسان‌سازی به ازای مقادیر متفاوتی از ε. یکپارچگی نهایی سلول‌ها (الف)، زمان اتمام (ب) و روی‌هم‌رفت (ج) |

گروه، بهبود مکرر و بهبود تدریجی نتیجه را به دست می‌آورد. در هر مرحله از الگوریتم، ذرات بر اساس دو عامل به نام سرعت و مکان، جابجا می‌شوند. سرعت ذره‌ها با توجه به تجربیات شخصی خود و تجربیات گروه تنظیم می‌گردد تا به سمت موقعیت بهترین پاسخ حرکت کنند. این فرآیند تکرار شده تا زمانی که یکی از شروط خاتمه مشخص شده برای پایان الگوریتم برآورده شود. در ادامه، برای رساندن سلول‌ها به یک مقدار SOC هدف‌گذاری شده در طول فرآیند همسان‌سازی، ممکن است بصورت غیرمفید شارژ و دشارژ شوند که اصطلاحاً موجب عمل روی هم رفتن می‌شود. با توجه به محدود بودن سیکل شارژ و دشارژ سلول‌های لیتیوم‌یونی، این عمل موجب کاهش عمر آن‌ها می‌گردد. برخلاف دو پارامتر یاد شده، این پارامتر از اصول خاصی تبعیت نمی‌کند و رابطه‌ای با دیگر پارامترها ندارد. بهینه‌سازی این پارامتر نیز از اهداف نهایی الگوریتم در انتخاب مقدار ε می‌باشد. به عبارت دیگر، میزان ε طوری انتخاب می‌شود که در طول فرآیند همسان‌سازی، هر سلول دچار کمترین سیکل شارژ و دشارژ بشود.

معادلات مربوطه PSO

### تابع هزینه

همانطور که گفته شد، سه هدف اصلی برای همسان‌سازی وجود دارد. به عبارتی دیگر، پس از اتمام فرآیند همسان‌سازی انتظار می‌رود به بین سه پارامتر (زمان، یکپارچگی نهایی و روی‌هم‌رفت) تعادل برقرار شود. همچنین، میزان وزن هر یک از پارامترهای ورودی توسط کاربر نعیین می‌شود که مجموع آن‌ها برار با 1 می‌باشد.

معادله‌ی وزن اهداف

در شکل ‏4‑7 فلوچارت الگوریتم تابع هزینه را مشاهده می‌کنید.

#### مقدار دهی اولیه

همانطور که پیشتر اشاره شد، DBSCAN داری دو پارامتر ε و mp می‌باشد و این دو متغیر به عنوان متغیر‌های ورودی PSO در نظر گرفته می‌شود. در راستای ایجاد پیاده‌سازی یک سیستم منعطف، پارامتر mp که نمایانگر کمترین تعداد خوشه تشکیل شونده است، ثابت و برابر با 2 در نظر گرفته شده است. بنابراین، ε به عنوان متغیر ورودی در نظر گرفته می‌شود.

#### محاسبات همسا‌ن‌سازی سلول‌ها

یک تابع بمنظور انجام محاسبات همسا‌ن‌سازی سلول‌ها بصورت خوشه به خوشه، نویز به نویز و یا نویز به خوشه در نظر گرفته شده‌است. در ابتدا، تابع، ورودی‌های مختلفی را دریافت می‌کند که شامل وضعیت شارژ فعلی سلول‌ها، نتیایج خوشه‌بندی DBSCAN، برد همسان‌شناختن سلول‌ها، جریان همسان‌سازی و ظرفیت سلول‌ها می‌باشد. سپس، خوشه‌های منبع و مقصد بر اساس بیشترین و کمترین نویز تعیین می‌شوند. در طول فرآیند همسان‌سازی، تابع به طور مداوم شرایط همسایگی سلول‌ها را بررسی می‌کند تا از اتمام یا ادامه‌ی فرآیند انتقال شارژ اطمینان حاصل کند. شکل ‏3‑49 همسان‌سازی یک خوشه به خوشه، یک نویز به نویز و یا یک نویز به خوشه در نشان می‌دهد.

#### محاسبه‌ی زمان، یکپارچگی و روی‌هم‌رفت

با توجه به رابطه، تابع هزینه با مقادیر ε، mp ،SOC ، α، β و γ خروجی تابع هزینه را مشخص می‌کند. که در آن، ε : ضریب اپسیلون، mp : کمینه عضو در هر خوشه، SOC : وضعیت شارژ هر سلول، α : وزن زمان همسان‌سازی، β : وزن یکپارچگی نهایی سلول‌ها و γ : وزن اثر روی‌هم‌رفت همسان‌سازی را مشخص می‌کنند. تابع هزینه با مقادیر ε و mp، خوشه‌بندی DBSCAN را بر رویSOC ورودی انجام می‌دهد. همانطور که در

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑7 فلوچارت الگوریتم محاسبه‌ی تابع هزینه. |
| |  | | --- | |  | | شکل ‏4‑8 فلوچارت الگوریتم محاسبه‌ی همسا‌ن‌سازی سلول‌ها بصورت خوشه به خوشه، نویز به نویز و نویز به خوشه. | |

بخش‌های پیشین یاد شد، پس از خوشه‌بندی، سلول‌های نویز و سپس خوشه‌ها با یکدیگر تبادل شارژ انجام می‌دهند. سپس، زمان اتمام همسان‌سازی، یکپارچگی نهایی و میزان روی‌هم‌رفت نیز بدست می‌آیند. از آن‌جایی که خروجی زمان و روی‌هم‌رفت، با توجه به داده ورودی مسئله تغییر میکند، می‌بایستی پروسه‌ی نرمال‌سازی روی آن‌ها انجام بگیرد.

بمنظور محاسبه‌ی اثر روی‌هم‌رفت یک تابع در نظر گرفته شده است. در طول فرآیند همسان‌سازی،SOC هر سلول دچار تغییرات می‌شود. در ابتدا، تابع قله‌ها و دره‌ها را در روند همسان‌سازی شناسایی می‌کند. سپس، شاخص‌های قله‌ها و دره‌ها را پیدا می‌کند. برای هر قله، ارتفاع محلی آن نسبت به دره‌های نزدیکش محاسبه می‌شود و برای هر دره نیز، عمق محلی آن نسبت به قله‌های نزدیکش محاسبه می‌شود. در نهایت، باتوجه به رابطه، میزان روی‌هم‌رفت با جمع کردن ارتفاعات محلی قله‌ها و عمق‌های محلی دره‌ها محاسبه می‌شود. شکل ‏4‑9 نمایی از تغییرات SOC یک سلول در هر مرحله از همسان‌سازی را نشان می‌دهد. همچنین، الگوریتم محاسبه‌گر روی‌هم‌رفت، محل قله‌ها و دره‌ها را مشخص کرده است.

رابطه روی‌هم‌رفت

#### نرمال‌سازی

طبق رابطه فرآیند نرمال‌سازی خروجی تابع هزینه به این صورت است که پس به دست آمدن هر یک از مقادیر تابع هزینه، (زمان، ناهمسانی و روی‌هم‌رفتیگ) بر بیشینه ممکن آن‌ها تقسیم می‌شود تا به شکلی و قابل مقایسه قرار بگیرند. این کار باعث می‌شود که تاثیر هر مولفه در هزینه‌ی نهایی یکنواخت و قابل فهم باشد. سپس، تأثیر وزن در آن‌ها اعمال می‌شود. این فرآیند، باعث می‌شود که تجزیه و تحلیل هر یک از مؤلفه‌ها ممکن شود تا بتوان با ترکیب آن‌ها، به خروجی نهایی تابع هزینه رسید.

رابطه نرمال‌سازی

طبق رابطه از ترکیب این مقادیر به همران ضرایبی که در ورود گماشته شده، خروجی تابع هزینه بدست می‌آید.

رابطه خروجی تابع هزینه به همراه ضرایب

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑9 نمایی از تغییرات SOC یک سلول در هر مرحله از همسان‌سازی که در آن محل قله‌ها و دره‌ها در فرآیند روی‌هم‌رفت مشخص شده است. |

با توجه به رابطه یکی از مراحل مهم در فرآیند نرمال‌سازی، محاسبه‌ی بیشینه‌ی متغیر است. برخلاف دو پارامتر مغایرت وضعیت شارژ و زمان همسان‌سازی، محاسبه‌ی بیشینه‌ی پارامتر روی‌هم‌رفت به سادگی امکان پذیر نمی‌باشد. با توجه به شکل (الف) از این روی، این میزان بیشینه‌ی این متغیر با آزمون و خطا به ازای 250 دسته از داده‌های تصادفی سلول‌ها (ناهمسانی) در ورودی بدست آمده است. شکل (ب) نیز، توزیع نرمال میزان روی‌هم‌رفت در فرآیند همسان‌سازی به ازای شرایط اولیه تصادفی سلول‌ها را نشان می‌دهد. بنا به داده‌ی بدست آمده، پر تکرارترین مقدار بدست آمده، به عنوان میزان بیشینه‌ی این پارامتر در نظر گرفته می‌شود.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑10 توزیع نرمال میزان روی‌هم‌رفت در فرآیند همسان‌سازی(ب) به ازای شرایط اولیه تصادفی سلول‌ها (ب). |

### بهینه‌سازی ε براساس PSO

الگوریتم PSO بمنظور یافتن بهینه‌ترین موقعیت برای یک نقطه در فضای چند بعدی در نظر گرفته می‌شود. در مسئله‌ی فعلی ε به عنوان متغیر وجود دارد. همچنین، تابع هزینه نقاط موجود در فضای مسئله ارزیابی و یک مقدار هزینه را برای آن محاسبه می‌کند. با در نظر گرفتن اهداف یاد شده در مسئله، هر چقدر خروجی تولید شده توسط تابع هزینه کمتر باشد، مقدار ε داده شده به تابع هزینه، در مقدار مطلوب‌تری قرار دارد و به عنوان بهترین موقعیت محسوب شود.

در ابتدا، پارامترهای الگوریتم PSO از جمله تعداد ذرات ، تعداد دوره‌های اجرا، وزن‌ها و ضرایب شتاب‌ها تعیین می‌شوند. سپس یک جمعیت (یا یک مجموعه از ذرات) ایجاد می‌شود. هر ذره دارای موقعیت ، سرعت و مقدار بهرین هزینه‌ی موقعیت شخصی خود است.

پس از مقداردهی موقعیت، سرعت و بهترین مقدار هزینه هر ذره، الگوریتم یک گام جلوتر می‌رود و ذرات مقدار هزینه موقعیت اولیه‌ی خود را حساب می‌کنند. با توجه به رابطه سرعت هر ذره بصورت برداری در نظر گرفته می‌شود. این بردار از برآیند سه بردار دیگر تشکیل می‌شود.

رابطه‌ی سرعت هر ذره

شکل فلوچارت الگوریتم بهینه سازی ε بر اساس PSO را نشان می‌دهد که در آن ε به عنوان موقعیت در فضای مسئله قرار گرفته است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑11 فلوچارت الگوریتم بهینه سازی ε بر اساس PSO. |

#### موقعیت[[32]](#footnote-32)

این کمیت مشخص می‌کند که هر ذره در فضای جستجوی مسئله کجا قرار دارد. به عبارت دیگر، موقعیت به عنوان ورودی‌ تابع هزینه استفاده می‌شود که در این مسئله ε به عنوان تنها موقعیت ورودی در نظر گرفته شده است. در ادامه، با به‌روزرسانی کردن موقعیت، ذره‌ها در فضای جستجو به سمت مقدار هزینه‌ی کمتر حرکت می‌کنند.

رابطه بردار موقعیت

#### بردار سرعت[[33]](#footnote-33)

این بردار نشان‌دهنده سرعت و جهت حرکت هر ذره در فضای جستجو است. سرعت ذره‌ها با استفاده از قوانین خاصی در هر مرحله از الگوریتم به‌روزرسانی می‌شود. سرعت‌ها نقش اصلی در هدایت ذره‌ها به سمت مناطق ممکنهای از فضای جستجو با بیشترین قابلیت بهینه‌سازی دارند.

رابطه بردار سرعت

#### بهترین موقعیت شخصی و همگانی[[34]](#footnote-34)

این کمیت نشان‌دهنده بهترین موقعیتی است که هر ذره تا کنون در فضای جستجو دیده است. هر ذره می‌تواند دارای بهترین موقعیت شخصی همگانی باشد. بهترین موقعیت شخصی از میان ذرات، به عنوان بهترین موقعیت همگانی شناخته می‌شود که از طریق به‌روزرسانی موقعیت‌ها و سرعت‌های هر ذره‌، مقدار آن به‌روز‌رسانی می‌شود. لازم به ذکر است، این کمیت در تعیین جهت بردار سرعت ذرات، تأثیر مستقیم دارد و آن‌ها سعی می‌کنند به بهترین موقعیت‌ همگانی نزدیک‌تر شوند.

رابطه تأثیر بهترین موقعیت در مسیریابی ذرات

برای به‌روزرسانی موقعیت هر ذره نیز، از سرعت به‌دست آمده در مرحله قبل استفاده می‌شود. به این صورت که موقعیت فعلی ذره با افزودن سرعت جدید به موقعیت قبلی آن به‌روزرسانی می‌شود. این فرآیند به‌روزرسانی به صورت مکرر در هر دوره از الگوریتم PSO انجام می‌شود تا کمترین مقدار خروجی تابع هزینه، پیدا شود.

شبیه‌سازی

بمنظور اطمینان از صحت عملکرد الگوریتم و همچنین سخت‌افزار پیشنهادی، از دو محیط مختلف شبیه‌سازی استفاده می‌شود. شبیه‌سازی الگوریتم و بخش نرم‌افزاری آن در محیط متلب-سیمولینک صورت می‌گیرد. این محیط نه تنها امکان پیاده‌سازی الگوریتم‌ها ترسیم نمودارهای مقایسه‌ای را فراهم می‌کند، بلکه امکان بررسی و تجزیه و تحلیل نتایج نیز را فراهم می‌سازد. از طرف دیگر، برای شبیه‌سازی سخت‌افزار و به ویژه سوئیچ‌های ماتریسی، از نرم‌افزار مولتی‌سیم[[35]](#footnote-35) استفاده می‌شود. Multisim یک محیط شبیه‌سازی قدرتمند است که امکان طراحی و شبیه‌سازی مدارهای الکترونیکی را فراهم می‌کند. با استفاده از این دو محیط، امکان تحلیل عملکرد الگوریتم همسان‌سازی در سطح نرم‌افزاری و همچنین شبیه‌سازی سخت‌افزاری سوئیچ‌های مورد استفاده در طرح پیشنهادی فراهم می‌شود. همچنین، با استفاده از متلب‌کدر[[36]](#footnote-36)، الگوریتم شبیه‌سازی شده به کد قابل اجرا بر روی سخت‌افزار تبدیل می‌شود. این قابلیت امکان اجرای الگوریتم‌ها را بر روی سخت‌افزارهای مختلف از جمله میکروکنترلرها فراهم می‌کند.

### متلب

در شکل ‏4‑12 نمای کلی اجزای بکار رفته در محیط شبیه‌سازی را مشاهده می‌کنید. بخش کنترل اصلی[[37]](#footnote-37) که با استفاده از داده‌های جریان و ولتاژ سلول‌ها و کنترل تحریک سوئیچ‌های آرایه‌ای به عنوان خروجی، الگوریتم همسان‌سازی را پیاده‌سازی می‌کند. بخش اندازه‌گیری[[38]](#footnote-38) به کمک وضعیت شارژ، جریان همسان‌سازی و ولتاژ سلول‌ها، اطلاعات دقیقی از وضعیت باتری‌ها ارائه می‌دهد. باتری پک[[39]](#footnote-39) سری شده شامل 9 سلول با ظرفیت 2.2 آمپر ساعت و ولتاژ نامی 3.7 ولت است. سوئیچ‌های آرایه‌ای[[40]](#footnote-40) برای کنترل جریان و ولتاژ در هر سلول به‌کار گرفته می‌شوند. مبدل جریان مستقیم که بین سوئیچ‌های آرایه‌ای و باتری کمکی قرار دارد، به عنوان تانک انرژی عمل کرده و انتقال شارژ بین سلول‌ها و باتری کمکی را انجام می‌دهد.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑12 نمای کلی از فایل شبیه‌سازی. |

بمنظور حفظ سادگی در شبیه‌سازی و تمرکز بر پیاده‌سازی الگوریتم همسان‌سازی، از دو منبع جریان در بخش مبدل جریان مستقیم استفاده شده و پارامتر مدل باتری‌های استفاده شده نیز، همگی بصورت پیشفرض در نظر گرفته شده اند. در این بخش، جهت مبدل و میزان جریان خروجی جزو اطلاعات ورودی این بلوک می‌باشد و با کمک منابع جریان، جریان مورد نیاز از ورودی کشیده می‌شود. لازم به ذکر است که توان ورودی و خروجی این مبدل همواره ثابت است. بنابراین، نقش یک مبدل جریان مستقیم ایده‌آل را اجرا می‌کند. مبدل از قید بیشینه‌ی جریان همسان‌سازی تبعیت می‌کند و اجازه‌ی تجاوز جریان در ورودی و خروجی را نمی‌دهد. بنابراین، ممکن است جریان خروجی مبدل، همواره از جریان ورودی تنظیم شده پیروی نکند. در راستای سنجش انتقال صحیح و بدون اتلاف مبدل قرار داده شده و باتری کمکی، توان خروجی و ورودی آن‌ها پیوسته پایش می‌شوند. شکل ‏4‑13 .(الف) پایش مبدل و (ب) پایش باتری را نشان می‌دهد.

در شکل ‏4‑14 اجزی بخش MCU را نشان می‌دهد که تمامی منتطق‌های الگوریتمی و محاسباتی را در قالب MATLAB-function اجرا و پیاده‌سازی می‌کند. انتقال شارژ سلول به سلول در دو مرحله‌ی انتقال از سلول به باتریی کمکی و انتقال از باتری کمکی به سلول انجام می‌شود. با توجه به متفاوت بودن میزان ظرفیت قابل انتقال برای هر سلول، از بلوک‌های charge\_transfer\_controller و AH\_calculation برای محاسبه‌ی میزان شارژ انتقال شونده در این دو مرحله استفاده شده است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑13 قسمت‌های اندازه گیری توان ورودی و خروجی مبدل و باتری کمکی. |

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑14 اجزای بکار رفته در بخش MCU. |

### مولتی‌سیم

مولتی‌سیم یک نرم‌افزار شبیه‌سازی مدارهای الکترونیکی است که به کاربران اجازه می‌دهد تا مدارهای الکترونیکی را طراحی، شبیه‌سازی و آنالیز کنند. مولتی‌سیم از ابزارهای گسترده‌ای برای شبیه‌سازی آنالوگ و دیجیتال، تحلیل مدارات، و نمایش نتایج به صورت گرافیکی و عددی بهره می‌برد. در شکل ‏4‑15 از مولتی‌سیم برای آزمودن یک گیت درایور ایزوله استفاده شده که در آن، یک منبع تغذیه 12 ولت و سیگنال ژنراتوربه عنوان سیگنال ورودی به مدار داده شده است. با این شبیه‌سازی، پارامترهای کلیدی نظیر عملکرد گیت درایور ایزوله در مصرف توان، فرکانس سوئیچینگ مناسب، نوع دیود مورد استفاده و ثابت زمانی دشارژ به دقت تحلیل و ارزیابی می‌شوند.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑15 شبیه‌سازی گیت درایور ایزوله در مولتی‌سیم. |

طراحی سخت‌افزار

در این پژوهش، طراحی سخت‌افزار به کمک نرم‌افزا آلتیوم[[41]](#footnote-41) انجام شده که یک ابزار قدرتمند و شناخته‌شده برای طراحی مدارات الکترونیکی است.

### شمای کلی

در شکل شکل ‏4‑16 طرح کلی پیاده‌سازی شده توسط این نرم‌افزار را مشاهده می‌کنید. که هر یک از بلوک‌های یاد شده در شکل، بصورت خلاصه شرح شده است:

* (الف): شمای پک باتری 9 عددی سری شده که در واقع یک کانکتور[[42]](#footnote-42) بمنظور اتصال پایانه‌ی باتری‌ها می‌باشد.
* (ب): سنسور جریان بمنظور محاسبه‌ی SOC به روش شمارش کلن.
* (ج): گیت درایور[[43]](#footnote-43) اپتوکوپلری[[44]](#footnote-44) سوئیچ‌ها.
* (د): سوئیچ‌های ترانزیستوری بمنظور اتصال پایانه‌ی باتری‌ها به مبدل جریان مستقیم.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑16 شمای مدار همسان‌ساز پیشنهادی در محیط آلتیوم |

* (و): واحد ریزکنترل کننده و اجرا کننده‌ی الگوریتم همسان‌سازی.
* (ه): گیت درایور ایزوله سوئیچ‌ها.
* (ز): مبدل جریان مستقیم.
* (ط): واحد ارسال کننده و دریافت کننده اطلاعات بر روی شبکه.

### گیت درایور اپتوکوپلری

برای روشن کردن سوئیچ‌ها، از گیت‌درایورهای اپتوکوپلری استفاده شده است. این گیت‌درایورها اختلاف ولتاژ موجود باتری‌های سری شده پک باتری را بمنظور کنترل سوئیچ‌ها تامین می‌کنند. به عبارت دیگر، برای روشن کردن سوئیچ متناظر با یک پایانه، از ولتاژ پایانه‌های بالاتر گرفته می‌شود. به این ترتیب، این عمل برای همه‌ی سوئیچ‌ها تکرار می‌شود و تمامی سوئیچ‌ها به درستی کنترل می‌شوند. این اختلاف ولتاژ در پایانه‌های بالایی، کم و کمتر می‌شود و در بالاترین پایانه به صفر می‌رسد. به عبارتی دیگر، در بالاترین پایانه، اختلاف ولتاژ مورد نیاز بمنظور راه‌اندازی سوئیچ‌های مربوطه وجود ندارد. بنابراین، با تغییر نوع سوئیچ‌های بالایی (بلوک‌های قرمز و سبز پررنگ در شکل ‏4‑16 (د))، از اختلاف ولتاژ منفی برای راه‌اندازی آن‌ها استفاده می‌شود. در شکل ‏4‑19 ساختار گیت درایور اپتوکوپلری را مشاهده می‌کنید.

معادله‌ی ماسفت در ناحیه‌ی خطی

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑17 شمایتیک گیت درایور اپتوکوپلری. |

### گیت درایور ترانس‌پالسی

دلیل استفاده از این نوع درایور در سیستم، درایو کردن سوئیچ‌هایی است که سورس آن‌ها شناور می‌باشد. و یک ترانزیستور برای ایجاد پالس در اولیه و یک فیلتر پایین‌گذر در خروجی قرار دارند. همچنین، اپتوکوپلر بکار رفته در خروجی، وظیفه‌ی خاموش کردن سریع خروجی را بر عهده دارد. در شکل ‏4‑18 شماتیک درایور ترانس‌پالسی را مشاهده می‌کنید.

### مبدل جریان مستقیم

مبدل جریان مستقیم دوطرفه قابلیت تنظیم جریان و ولتاژ خروجی را دارد. از این مبدل جهت انتقال توان مجموعه‌ای از باتری‌ها به مجموعه‌ای دیگر به کار می‌رود. عکس ماژول

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑18 شمایتیک گیت درایور اپتوکوپلری. |

### سوئیچ‌های دوطرفه

بمنظور ایجاد جریان دو طرفه در سوئچ‌ها از پیکربندی شکل ‏4‑19 کار می‌رود. با اتصال پی در پی آن‌ها و مشترک قرار دادن سورس، این عمل میسر می‌شود. همچنین، برای حفاظت در برابر افزایش ولتاژ احتمالی بر روی گیت-سورس، از دیود زنر به عنوان یک محافظ استفاده شده است.

### واحد ریز کنترل کننده

این واحد متشکل از یک میکروکنترلر و ادوات راه‌اندازی آن است. میکروکنترلر STM32H750VBT6 با فرکانس کلاک[[45]](#footnote-45) 480MHz برای این منظور به کار گرفته شده است که وظیفه‌ی پیاده‌سازی الگوریتم را بر عهده دارد.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑19 شمایتیک سوئیچ‌های دوطرفه کانالN (الف) و کانالN (ب). |

### سنسور جریان

یکی از اصلی‌ترین ابزار‌ها برای تخمین SOC، سنسور جریان است. با استفاده از روش شمارش کلن، می‌توان از تغییرات SOC حین انتقال شارژ بین باتری‌ها مطلع شد.

### شبکه‌ی کنترل کننده[[46]](#footnote-46)

اطلاعات بین ECU در خودرو، توسط شبکه بین واحد‌های دیگر جابجا می‌شود. این بلوک شامل یک ارسال کننده و دریافت کننده CAN می‌باشد و میکروکنترلر با کمک این واحد به شبکه متصل می‌گردد. پس از اتصال، اطلاعات ولتاژ هر باتری بمنظور تخمین SOC از شبکه دریافت می‌شود.

### برد مدار چاپی

نمونه‌ی سه بعدی برد مدار چاپی طراحی شده را شکل ‏4‑20 زیر مشاهده می‌کنید که شامل دو بخش پشت و روی برد می‌باشد و اجزای مختلف آن به‌طور واضح نشان داده شده‌اند. در (الف کانکتور اتصال باتری‌ها، اتصال بار به پک باتری، ورودی و خروجی مبدل جریان مستقیم، باتری کمکی و تغذیه‌ی راه‌اندازی مدار قرار دارد. در (ب) ) به ترتیب از چپ به راست سوئیچ‌های دوطرفه مرتبط با باتری‌ها و مرتبط با مبدل نمایش داده شده است. در (ج) گیت درایورهای اپتوکوپلری و در (د) گیت درایور‌های ایزوله مشخص شده‌اند. جدول ‏3‑8 قطعات کلیدی بکار رفته در طرح را نشان می‌دهد.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏4‑20 برد مدار چاپی مدار پیشنهادی شامل کانکتورها (الف)، سوئیچ‌های دوطرفه (ب)، گیت درایورهای اپتوکوپلری (ج) و گیت درایور‌های ایزوله(د). |

جدول ‏4‑1 جدول قطعات استفاده شده در مدار همسان‌سازی پیشنهادی.

|  |  |
| --- | --- |
| شماره قطعه | توضیحات |
| ACS712 | سنسور جریان بر پایه اثر هال 5 آمپری |
| LI-ION BATTRY | LI-ION BATTRY |
| NMOS-2 | N-Channel Power MOSFET |
| BC817 | ترانزیستور 5/0 آمپری با فرکانس قطع 100 مگاهرتز |
| IRFR9120NTRPBF | ماسفت کانال P با جریان 5/6 آمپر 100 ولتی |
| PC817 | اپتوکوپلر |
| PSTFAQ3416-600T02 | ترانس پالس مینیاتوری |
| STM32H750VBT6 | میکروکنترلر STM32 با فرکانس کاری 480 مگاهرتز |
| TJA1051T | مدل CAN |

در میان قطعات بکار رفته، ACS712 یک سنسور جریان بر پایه اثر هال است که برای اندازه‌گیری دقیق جریان AC یا DC در سیستم‌های صنعتی، تجاری و ارتباطاتی استفاده می‌شود. از BC817 بمنظور تحریک گیت درایورها بکار می‌رود که فرکانس قطع بالایی را دارا می‌باشد. ماسفت توان بالای IRFR9120NTRPBF نوع P در سوئیچ‌های آرایه‌ای بکار گرفته می‌شود. این سوئیچ‌ها توسط درایور‌های اپتوکوپلری مانند و ترانس پالس ایزوله، راه‌اندازی می‌شوند که به ترتیب PC817 و PSTFAQ3416-600T02 در این پروژه مورد استفاده قرار گرفته اند. بمنظور پیاده‌سازی الگوریتم، از میکروکنترلر 32 بیتی STM32H750VBT6 بر پایه هسته Arm Cortex-M7 مجهز به 128 کیلوبایت حافظه فلش، 1 مگابایت RAM و 480 مگاهرتز فرکانس کاری CPU استفاده شده است. ارتباط با شبکه نیز توسط TJA1051T مدیریت می‌شود. این مدار مجتمع یک دریافت کننده و ارسال کننده‌ی فیزیکی CAN با سرعت بالا است که رابط بین میکروکنترلر و دو سیم فیزیکی CAN bus می‌باشد.

مراجع

[1] T. B. Reddy, Linden’s handbook of batteries. McGraw-Hill Education, 2011.

[2] A. Aktaş and Y. Kirçiçek, "Solar hybrid systems and energy storage systems," Solar hybrid systems, pp. 87-125, 2021.

[3] A. Arora, S. Lele, N. Medora, and S. Souri, Lithium-Ion Battery Failures in Consumer Electronics. Artech House, 2019.

[4] J. T. Warner, Lithium-ion battery chemistries: A primer. Elsevier, 2019.

[5] Q. Lin, J. Wang, R. Xiong, W. Shen, and H. He, "Towards a smarter battery management system: A critical review on optimal charging methods of lithium ion batteries," Energy, vol. 183, pp. 220-234, 2019/09/15/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.128>.

[6] M. U. Ali, A. Zafar, S. H. Nengroo, S. Hussain, M. Junaid Alvi, and H.-J. Kim, "Towards a smarter battery management system for electric vehicle applications: A critical review of lithium-ion battery state of charge estimation," Energies, vol. 12, no. 3, p. 446, 2019.

[7] M. Lelie et al., "Battery management system hardware concepts: An overview," Applied Sciences, vol. 8, no. 4, p. 534, 2018.

[8] R. Zhang et al., "State of the art of lithium-ion battery SOC estimation for electrical vehicles," Energies, vol. 11, no. 7, p. 1820, 2018.

[9] J. Jiang and C. Zhang, Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles. John Wiley & Sons, 2015.

[10] M. S. Hossain Lipu et al., "Intelligent algorithms and control strategies for battery management system in electric vehicles: Progress, challenges and future outlook," Journal of Cleaner Production, vol. 292, p. 126044, 2021/04/10/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126044>.

[11] L. Buccolini, A. Ricci, C. Scavongelli, G. DeMaso-Gentile, S. Orcioni, and M. Conti, "Battery Management System (BMS) simulation environment for electric vehicles," in 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016: IEEE, pp. 1-6.

[12] R. Xiong, J. Cao, Q. Yu, H. He, and F. Sun, "Critical review on the battery state of charge estimation methods for electric vehicles," Ieee Access, vol. 6, pp. 1832-1843, 2017.

[13] D. Huang, Z. Chen, C. Zheng, and H. Li, "A model-based state-of-charge estimation method for series-connected lithium-ion battery pack considering fast-varying cell temperature," Energy, vol. 185, pp. 847-861, 2019.

[14] W. Li et al., "Electrochemical model-based state estimation for lithium-ion batteries with adaptive unscented Kalman filter," Journal of Power Sources, vol. 476, p. 228534, 2020.

[15] I. Snihir, W. Rey, E. Verbitskiy, A. Belfadhel-Ayeb, and P. H. Notten, "Battery open-circuit voltage estimation by a method of statistical analysis," Journal of Power Sources, vol. 159, no. 2, pp. 1484-1487, 2006.

[16] D. Tingting, L. Jun, Z. Fuquan, Y. Yi, and J. Qiqian, "Analysis on the influence of measurement error on state of charge estimation of LiFePO4 power Battery," in 2011 International Conference on Materials for Renewable Energy & Environment, 2011, vol. 1: IEEE, pp. 644-649.

[17] L. Zheng, L. Zhang, J. Zhu, G. Wang, and J. Jiang, "Co-estimation of state-of-charge, capacity and resistance for lithium-ion batteries based on a high-fidelity electrochemical model," Applied Energy, vol. 180, pp. 424-434, 2016.

[18] M. A. Roscher and D. U. Sauer, "Dynamic electric behavior and open-circuit-voltage modeling of LiFePO4-based lithium ion secondary batteries," Journal of Power Sources, vol. 196, no. 1, pp. 331-336, 2011.

[19] Y. Zhang, W. Song, S. Lin, and Z. Feng, "A novel model of the initial state of charge estimation for LiFePO4 batteries," Journal of Power Sources, vol. 248, pp. 1028-1033, 2014.

[20] K. S. Ng, C.-S. Moo, Y.-P. Chen, and Y.-C. Hsieh, "Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries," Applied energy, vol. 86, no. 9, pp. 1506-1511, 2009.

[21] X. Hu, S. Li, and H. Peng, "A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries," Journal of Power Sources, vol. 198, pp. 359-367, 2012.

[22] M. A. Hannan, M. 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," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 78, pp. 834-854, 2017.

[23] X. Ding et al., "A novel active equalization topology for series-connected lithium-ion battery packs," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 6, pp. 6892-6903, 2020.

[24] I. Baccouche, S. Jemmali, B. Manai, R. Chaibi, and N. E. B. Amara, "Hardware implementation of an algorithm based on kalman filtrer for monitoring low capacity Li-ion batteries," in 2016 7th International Renewable Energy Congress (IREC), 2016: IEEE, pp. 1-6.

[25] M. Shen and Q. Gao, "A review on battery management system from the modeling efforts to its multiapplication and integration," International Journal of Energy Research, vol. 43, no. 10, pp. 5042-5075, 2019.

[26] X. Hu, S. E. Li, and Y. Yang, "Advanced machine learning approach for lithium-ion battery state estimation in electric vehicles," IEEE Transactions on Transportation electrification, vol. 2, no. 2, pp. 140-149, 2015.

[27] N. H. Kutkut, "A modular nondissipative current diverter for EV battery charge equalization," in APEC'98 Thirteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1998, vol. 2: IEEE, pp. 686-690.

[28] N. Ghaeminezhad, Q. Ouyang, X. Hu, G. Xu, and Z. Wang, "Active cell equalization topologies analysis for battery packs: A systematic review," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 8, pp. 9119-9135, 2021.

[29] C. Zhang, Y. Jiang, J. Jiang, G. Cheng, W. Diao, and W. Zhang, "Study on battery pack consistency evolutions and equilibrium diagnosis for serial-connected lithium-ion batteries," Applied Energy, vol. 207, pp. 510-519, 2017.

[30] T. Baumhöfer, M. Brühl, S. Rothgang, and D. U. Sauer, "Production caused variation in capacity aging trend and correlation to initial cell performance," Journal of Power Sources, vol. 247, pp. 332-338, 2014.

[31] F. Feng, X. Hu, L. Hu, F. Hu, Y. Li, and L. Zhang, "Propagation mechanisms and diagnosis of parameter inconsistency within Li-Ion battery packs," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 112, pp. 102-113, 2019.

[32] F. Feng, X. Hu, J. Liu, X. Lin, and B. Liu, "A review of equalization strategies for series battery packs: variables, objectives, and algorithms," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 116, p. 109464, 2019.

[33] X. Hu, H. Yuan, C. Zou, Z. Li, and L. Zhang, "Co-estimation of state of charge and state of health for lithium-ion batteries based on fractional-order calculus," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 11, pp. 10319-10329, 2018.

[34] M. Daowd, N. Omar, P. Van Den Bossche, and J. Van Mierlo, "Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation," in 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2011: IEEE, pp. 1-7.

[35] W. C. Lee, D. Drury, and P. Mellor, "Comparison of passive cell balancing and active cell balancing for automotive batteries," in 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2011: IEEE, pp. 1-7.

[36] N. Nguyen, S. K. Oruganti, K. Na, and F. Bien, "An adaptive backward control battery equalization system for serially connected lithium-ion battery packs," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 63, no. 8, pp. 3651-3660, 2014.

[37] S. Zhang, J. Qiang, L. Yang, and X. Zhao, "Prior-knowledge-independent equalization to improve battery uniformity with energy efficiency and time efficiency for lithium-ion battery," Energy, vol. 94, pp. 1-12, 2016.

[38] T.-h. Kim, N.-j. Park, R.-y. Kim, and D.-s. Hyun, "A high efficiency zero voltage-zero current transition converter for battery cell equalization," in 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012: IEEE, pp. 2590-2595.

[39] S. Liu, L. Na, X. Yang, J. Jie, S. Han, and J. Zhe, "Research on Electricity Demand Forecasting Method based on System Dynamics with Electricity Market Reform. DEStech Transactions on Environment," Energy and Earth Science, 2016.

[40] X. Liu and Y. Zou, "The proportional current control strategy for equalization circuits of series battery packs," in 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2018: IEEE, pp. 846-849.

[41] Y. Zheng, M. Ouyang, L. Lu, J. Li, X. Han, and L. Xu, "On-line equalization for lithium-ion battery packs based on charging cell voltages: Part 1. Equalization based on remaining charging capacity estimation," Journal of Power Sources, vol. 247, pp. 676-686, 2014.

[42] M. Einhorn, W. Roessler, and J. Fleig, "Improved performance of serially connected Li-ion batteries with active cell balancing in electric vehicles," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 60, no. 6, pp. 2448-2457, 2011.

[43] W. Diao, N. Xue, V. Bhattacharjee, J. Jiang, O. Karabasoglu, and M. Pecht, "Active battery cell equalization based on residual available energy maximization," Applied energy, vol. 210, pp. 690-698, 2018.

[44] M. Einhorn et al., "A current equalization method for serially connected battery cells using a single power converter for each cell," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 60, no. 9, pp. 4227-4237, 2011.

[45] J. Sun, C. Zhu, R. Lu, K. Song, and G. Wei, "Development of an optimized algorithm for bidirectional equalization in lithium-ion batteries," Journal of Power Electronics, vol. 15, no. 3, pp. 775-785, 2015.

[46] M. Hoque, M. Hannan, A. Mohamed, and A. Ayob, "Battery charge equalization controller in electric vehicle applications: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 75, pp. 1363-1385, 2017.

[47] Z. Liu, X. Liu, J. Han, and W. Yang, "An optimization algorithm for equalization scheme of series-connected energy storage cells," in 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2017: IEEE, pp. 1-6.

[48] S. Zhang, L. Yang, X. Zhao, and J. Qiang, "A GA optimization for lithium–ion battery equalization based on SOC estimation by NN and FLC," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 73, pp. 318-328, 2015.

[49] H. Chen, L. Zhang, and Y. Han, "System-theoretic analysis of a class of battery equalization systems: Mathematical modeling and performance evaluation," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 64, no. 4, pp. 1445-1457, 2014.

[50] W. Han, L. Zhang, and Y. Han, "Mathematical modeling, performance analysis and control of battery equalization systems: Review and recent developments," Advances in Battery Manufacturing, Service, and Management Systems, pp. 281-302, 2016.

[51] C.-H. Kim, M.-Y. Kim, H.-S. Park, and G.-W. Moon, "A modularized two-stage charge equalizer with cell selection switches for series-connected lithium-ion battery string in an HEV," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 8, pp. 3764-3774, 2012.

[52] B. Dong, Y. Li, and Y. Han, "Parallel architecture for battery charge equalization," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 9, pp. 4906-4913, 2014.

[53] M. Daowd, M. Antoine, N. Omar, P. Van den Bossche, and J. Van Mierlo, "Single switched capacitor battery balancing system enhancements," Energies, vol. 6, no. 4, pp. 2149-2174, 2013.

[54] Q. Ouyang, J. Chen, C. Xu, and H. Su, "Cell balancing control for serially connected lithium-ion batteries," in 2016 American control conference (ACC), 2016: IEEE, pp. 3095-3100.

[55] X. Wei, X. Zhao, and H. Dai, "The application of flyback DC/DC converter in Li-ion batteries active balancing," in 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009: IEEE, pp. 1654-1656.

[56] J. Gallardo-Lozano, E. Romero-Cadaval, M. I. Milanes-Montero, and M. A. Guerrero-Martinez, "Battery equalization active methods," Journal of Power Sources, vol. 246, pp. 934-949, 2014.

[57] X. Tang et al., "Run-to-run control for active balancing of lithium iron phosphate battery packs," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 2, pp. 1499-1512, 2019.

[58] S.-H. Park, T.-S. Kim, J.-S. Park, G.-W. Moon, and M.-J. Yoon, "A new buck-boost type battery equalizer," in 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009: IEEE, pp. 1246-1250.

[59] B. Erdoğan, M. M. Savrun, T. Köroğlu, M. U. Cuma, and M. Tümay, "An improved and fast balancing algorithm for electric heavy commercial vehicles," Journal of Energy Storage, vol. 38, p. 102522, 2021.

[60] ti, "Switch matrix gate driver for active cell balancing, EMB1428Q switch matrix gate driver," 2020. [Online]. Available: <https://www.ti.com/product/EMB1428Q#samples>.

[61] S. Shah, M. Murali, and P. Gandhi, "A practical approach of active cell balancing in a battery management system," in 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2018: IEEE, pp. 1-6.

[62] ti, "Active chipset reference design guide, reference guide," 2013. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/pdf/sluuas6>,.

[63] Q. Ouyang, J. Chen, J. Zheng, and H. Fang, "Optimal cell-to-cell balancing topology design for serially connected lithium-ion battery packs," IEEE transactions on sustainable energy, vol. 9, no. 1, pp. 350-360, 2017.

[64] T. H. Phung, J.-C. Crebier, A. Chureau, A. Collet, and V. Nguyen, "Optimized structure for next-to-next balancing of series-connected lithium-ion cells," in 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011: IEEE, pp. 1374-1381.

[65] S. Jinlei, L. Wei, T. Chuanyu, W. Tianru, J. Tao, and T. Yong, "A novel active equalization method for series-connected battery packs based on clustering analysis with genetic algorithm," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 7, pp. 7853-7865, 2021.

[66] R. L. Patibandla and N. Veeranjaneyulu, "Performance analysis of partition and evolutionary clustering methods on various cluster validation criteria," Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 43, no. 8, pp. 4379-4390, 2018.

[67] C. Zhang, J. Jiang, Y. Gao, W. Zhang, Q. Liu, and X. Hu, "Charging optimization in lithium-ion batteries based on temperature rise and charge time," Applied energy, vol. 194, pp. 569-577, 2017.

[68] J. Li, S. Zhou, and Y. Han, Advances in battery manufacturing, service, and management systems. John Wiley & Sons, 2016.

[69] X. Bai et al., "Study on distributed lithium-ion power battery grouping scheme for efficiency and consistency improvement," Journal of cleaner production, vol. 233, pp. 429-445, 2019.

[70] W. Lujun et al., "Efficient and fast active equalization method for retired battery pack using wide voltage range bidirectional converter and DBSCAN clustering algorithm," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 11, pp. 13824-13833, 2022.

[71] Y. Shang, B. Xia, F. Lu, C. Zhang, N. Cui, and C. C. Mi, "A switched-coupling-capacitor equalizer for series-connected battery strings," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 10, pp. 7694-7706, 2016.

[72] T. H. Phung, A. Collet, and J.-C. Crebier, "An optimized topology for next-to-next balancing of series-connected lithium-ion cells," IEEE transactions on power electronics, vol. 29, no. 9, pp. 4603-4613, 2013.

1. Lithium ion (Li-on) [↑](#footnote-ref-1)
2. Battery Management System (BMS) [↑](#footnote-ref-2)
3. Equalization Management System (EMS) [↑](#footnote-ref-3)
4. Oxidation-Reduction [↑](#footnote-ref-4)
5. Energy Density [↑](#footnote-ref-5)
6. Power Density [↑](#footnote-ref-6)
7. Open Circuit Voltage (OCV) [↑](#footnote-ref-7)
8. C-rate [↑](#footnote-ref-8)
9. Depth of discharge (DOD) [↑](#footnote-ref-9)
10. State Of Charge (SOC) [↑](#footnote-ref-10)
11. State Of Health (SOH) [↑](#footnote-ref-11)
12. Self-Discharge [↑](#footnote-ref-12)
13. Coulomb Counting [↑](#footnote-ref-13)
14. Kalman-Filter (KF) [↑](#footnote-ref-14)
15. Equalization Management System [↑](#footnote-ref-15)
16. Passive [↑](#footnote-ref-16)
17. Active [↑](#footnote-ref-17)
18. Dissipative [↑](#footnote-ref-18)
19. None-Dissipative [↑](#footnote-ref-19)
20. Aging [↑](#footnote-ref-20)
21. Plateau [↑](#footnote-ref-21)
22. CTotal [↑](#footnote-ref-22)
23. CReleasable [↑](#footnote-ref-23)
24. CChargable [↑](#footnote-ref-24)
25. Cuk [↑](#footnote-ref-25)
26. Pulse Width Modulation [↑](#footnote-ref-26)
27. Controlled Area Network [↑](#footnote-ref-27)
28. EMS-Slave [↑](#footnote-ref-28)
29. eps [↑](#footnote-ref-29)
30. Minimum Point [↑](#footnote-ref-30)
31. PSO (Particle Swarm Optimization) [↑](#footnote-ref-31)
32. Particle Position [↑](#footnote-ref-32)
33. Velocity Vector [↑](#footnote-ref-33)
34. Best Position [↑](#footnote-ref-34)
35. Multisim [↑](#footnote-ref-35)
36. Matlab Coder [↑](#footnote-ref-36)
37. Main Control Unit (MCU) [↑](#footnote-ref-37)
38. Measurement [↑](#footnote-ref-38)
39. Battery Pack [↑](#footnote-ref-39)
40. Switch Array [↑](#footnote-ref-40)
41. Altium Designer [↑](#footnote-ref-41)
42. Connector [↑](#footnote-ref-42)
43. Gate-Driver [↑](#footnote-ref-43)
44. Optocoupler [↑](#footnote-ref-44)
45. Clocl Frequency [↑](#footnote-ref-45)
46. Controller Area Network (CAN) [↑](#footnote-ref-46)