

دانشکده مهندسي مکانيک

پايان‌نامه دوره کارشناسي ارشد

گرايش

مهندسي سيستم‌هاي انرژي

عنوان پايان­نامه

ارزیابی و تحلیل اقتصادی محیط­زیستی هم­بست آب، انرژی و غذا در کشاورزی غیر دیم ایران

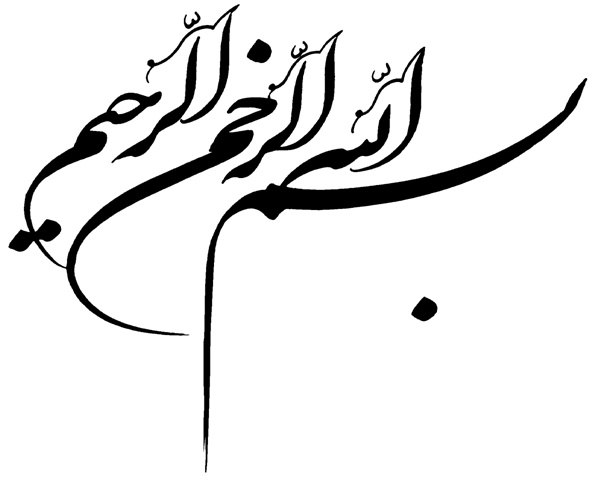
نگارش:

قاسم قاضی

استاد راهنما:

دکتر حسين صيادي

زمستان 1401



|  |
| --- |
| تاسيس 1307  دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي |
| تاييديه هيأت داوران |
| هيأت داوران پس از مطالعه پايان‌نامه و شرکت در جلسه دفاع از پايان‌نامه تهيه شده تحت عنوان :  ارزیابی و تحلیل اقتصادی محیط¬زیستی هم¬بست آب، انرژی و غذا در کشاورزی غیر دیم ایران  توسط **قاسم قاضی** صحت و کفايت تحقيق انجام شده را براي اخذ درجه **کارشناسي ارشد** رشته **مهندسي مكانيك – گرايش مهندسي سيستم هاي انرژي** در تاريخمورد تأييد قرار دادند. |
| 1- استاد راهنما دکتر حسين صيادي امضاء  2- استاد مشاور - امضاء  3- استاد ممتحن دکتر امضاء  4- استاد ممتحن دکتر امضاء  5- نماينده تحصيلات تکميلي دکتر امضاء |

|  |
| --- |
| تاسيس 1307  دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي |
| اظهارنامه دانشجو |
| اينجانب **قاسم قاضی** دانشجوي مقطع کارشناسي ارشد رشته **مهندسي مکانيک** گرايش مهندسي سيستم هاي انرژي دانشکدهمهندسي مکانيکدانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي گواهي مي‌نمايم که تحقيقات ارائه شده در پايان‌نامه با عنوان:  ارزیابی و تحلیل اقتصادی محیط­زیستی هم­بست آب، انرژی و غذا در کشاورزی غیر دیم ایران  با راهنمايي استاد محترم **جناب آقاي دکترحسين صيادي** توسط شخص اينجانب انجام شده است. صحت و اصالت مطالب نگارش شده در اين پايان‌نامه مورد تأييد مي‌باشد. در مورد استفاده از کار ديگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهي مي‌نمايم که مطالب مندرج در پايان­نامه تاکنون براي دريافت هيچ نوع مدرک يا امتيازي توسط اينجانب يا فرد ديگري در هيچ جا ارائه نشده است و در تدوين متن پايان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را به طور کامل رعايت کرده‌ام.  امضاء دانشجو:  تاريخ: |

حق طبع، نشر و مالکيت نتايج

1- حق چاپ و تکثير اين پايان‌نامه متعلق به نويسنده و استاد راهنماي آن مي‌باشد. هرگونه تصويربرداري از کل يا بخشي از پايان­نامه تنها با موافقت نويسنده يا استاد راهنما يا کتاب­خانه دانشکده مهندسي مکانيک دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي مجاز مي‌باشد.

2- کليه حقوق معنوي اين اثر متعلق به دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي مي‌باشد و بدون اجازه کتبي دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاري نيست.

3- استفاده از اطلاعات و نتايج موجود پايان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمي‌باشد.

**تقديم به خانواده‌ي عزيزم که همواره پشتيبان وحامي­ام بوده‌اند.**

**از استاد گرامي جناب آقاي دکتر حسين صيادي بسيار سپاس‌گزارم چرا که بدون راهنمايي‌هاي ايشان تامين اين پايان نامه بسيار مشکل مي‌نمود.**

**چکيده**

در اين پايان نامه به بررسي، توضيح و معرفي سيستم هاي تصفيه آب خورشيدي-تقطيري پرداخته شده است. با استفاده از تحلیل کارهای پیشین محققین و بررسی شرایط جغرافیایی کشور طبق نتايج بدست آمده استفاده از سيستم های تصفيه آب خورشيدی-تقطيری کوپل شده با کلکتور خورشیدی از نظر اقتصادی و محيط زيستی به صرفه می‌باشد. تحليل فنی اقتصادی با استفاده از تابع هزینه به ازای هر لیتر انجام شده است. هم‌چنين تحليل نکسوس با استفاده از تابع ردپاي‌آب انجام شده است. در ادامه براي يافتن بهترين اقليم جغرافيايي كشور براي استفاده از اين سيستم‌ها هشت اقلیم آب و هوایی کشور مورد بررسی قرار گرفتند. نرخ توليد ميانگين روزانه براي هر شهر بدست آمد. شهر کرمان به صورت میانگین در هر روز، مقدار 4.2 لیتر در روز را تولید می‌نماید . این مقدار با کاهشی 12 درصدی به 3.83 لیتر در روز برای زاهدان می‌رسد. شهر بوشهر به علت رطوبت بالای هوا و همجواری با دریا مقدار 3.61 لیتر در روز را تولید خواهد نمود. اهواز نیز در شرایطی مشابه به علت میانگین دمای هوای پایینتر3.4 لیتر در روز تولید خواهد کرد. رامسر و تبریز به ترتیب 3.3 و 3.1 لیتر در روز را تولید خواهند کرد. همچنین انتظار می‌رود شهرهای آزاد شهر وآبعلی با نرخ 2.98 و 2.76 کمترین نرخ تولید را در ماه داشته باشند. بر اساس تحليل فني-اقتصادي قيمت هر ليتر آب تصفيه توليدي براي شهر كرمان، زاهدان، بوشهر،اهواز، رامسر، تبریز، آزادشهر و آبعلی در بازه‌ی 0.0264 تا 0.04 دلار به ازاي هر ليتر بدست‌ آمد.همچنین با دو سناریوی در نظر گرفته شده بر اساس تابع ردپای‌آب از بازه‌ی 7.85 تا 12.11 دلار بر لیتر در سناریوی اول و در بازه‌ی 0.47- تا 3.78 لیتر بر دلار برای سناریوی دوم محاسبه شد.

**واژه­هاي کليدي:**

**انرژي خورشيدي؛مدلسازی؛تصفيه‌ي آب؛نمک زدا‌يی؛ نکسوس؛ ردپای آب**

فهرست مطالب

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

[1 باتری‌ها 3](#_Toc168070262)

[1-2 مشخصه‌های الکتریکی سلول باتری 3](#_Toc168070263)

[1-2-1 ظرفیت 3](#_Toc168070264)

[1-2-2 انرژی 3](#_Toc168070265)

[1-2-3 چگالی انرژی 4](#_Toc168070266)

[1-2-4 چگالی توان 4](#_Toc168070267)

[1-3 اصطلاحات در باتری‌ها 4](#_Toc168070268)

[1-3-1 ولتاژ مدار باز 4](#_Toc168070269)

[1-3-2 نرخ دشارژ 4](#_Toc168070270)

[1-3-3 عمق دشارژ 5](#_Toc168070271)

[1-3-4 وضعیت شارژ 5](#_Toc168070272)

[1-3-5 وضعیت سلامت 5](#_Toc168070273)

[1-3-6 دشارژ خود‌به‌خود 5](#_Toc168070274)

[سیستم مدیریت باتری 5](#_Toc168070275)

[1-1 مقدمه 7](#_Toc168070276)

[1-2 اهمیت انجام پژوهش 7](#_Toc168070277)

[1-2-1 افزایش جمعیت 7](#_Toc168070278)

[1-2-2 بحران آب 7](#_Toc168070279)

[2 مروری برادبیات موضوعی 8](#_Toc168070280)

[2-1 مقدمه 9](#_Toc168070281)

[2-2 مفاهیم و تعاریف 9](#_Toc168070282)

[2-3 پیشینه پژوهش 10](#_Toc168070283)

[2-4 نوآوری پژوهش 10](#_Toc168070284)

[3 روش تحقیق 11](#_Toc168070285)

[3-1 طرح مسئله 12](#_Toc168070286)

[3-2 مصرف آب جهت تولید برق 13](#_Toc168070287)

[4 بحث و نتایج 13](#_Toc168070288)

[4-1 مقدمه 14](#_Toc168070289)

[4-2 جمع‌بندی 14](#_Toc168070290)

[5 نتیجه‌گیری پژوهش و پیشنهادها 15](#_Toc168070291)

[5-1 مقدمه 16](#_Toc168070292)

[5-2 محدودیت های پژوهش 16](#_Toc168070293)

[5-3 پیشنهادها 16](#_Toc168070294)

[منابع و مراجع 17](#_Toc168070295)

فهرست اشکال

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

[شکل ‏1–1 نمودار تغییرات میزان بارش 1347-1399 7](#_Toc168072383)

[شکل ‏3–1 تعاملات بین آب، غذا و انرژی در سیستم تصمیم‌گیری 13](#_Toc168072384)

فهرست جداول

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

[جدول ‏2–1 مزایا و معایب فناوری‌های خنک‌کاری مورد استفاده در نیروگاه‌های حرارتی 9](#_Toc168072386)

فهرست علايم و اختصارات

عنوان علامت اختصاري

Areceiver سطح دریافت کننده تابش خورشیدی(مترمربع)

Csystem هزینه سالانه سیستم(دلار بر سال یا دلار بر لیتر)

CIPP هزینه سالانه تحمیل شده از خرید سیستم(دلار بر سال یا دلار بر لیتر)

CRF پارامتر بازیابی هزینه

CO&M هزینه عملیاتی و تعمیر و نگهداری (دلار بر سال یا دلار بر لیتر)

بازگشت سرمایه (دلار بر سال یا دلار برلیتر)

CFWP هزینه تولید آب شیرین (دلار بر سال یا دلار برلیتر)

FWP توليد آب شيرين

بهره برداری و نگهداری O&M

آب شیرین تولید شده PFW

دریافت تابش خورشیدی receiver

مصرف مجدد salvage

تغییر فاز سیال به گاز fg

آب(لیتر) water

انرژی گرمایی(کیلوژول) Q

انرژی (کیلوژول) E

fO&M ضريب هدر رفت سرمايه

G شدت دریافتی تابش خورشیدی(وات بر متر مربع)

hfg گرمای ويژه تبخیر آب(کیلوژول بر کیلوگرم)

IPP قیمت خرید اولیه سیستم (دلار)

گرمای نهان تبخیر(کیلوژول به کیلوگرم)

mPFW جرم آب شیرین(کیلوگرم)

ƞ بازده

f کسر

طول عمر سیستم (سال) N

سرعت باد (متر بر ثانیه) N

دما(درجه سانتیگراد) T

دمای محیطی(درجه‌سانتیگراد)

حجم(ليتر) V

SFFفاکتور سرمایه در حال غرق شدن

VFWP حجم آب شیرین تولید شده

WFi تابع ردپای آب(لیتر)

WFAi معیار ردپای آب(لیتر بر دلار)

**فصل اول**

**باتری‌‌ها**

# باتری‌ها

باتری‌ها انرژی ذخیره شده شیمیایی را توسط فرایند اکسایش-کاهش[[1]](#footnote-2) 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[[2]](#footnote-3)

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[[3]](#footnote-4)

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].

* 1. اصطلاحات در باتری‌ها

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

### ولتاژ مدار باز[[4]](#footnote-5)

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

### نرخ دشارژ[[5]](#footnote-6)

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[[6]](#footnote-7)

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

### وضعیت شارژ [[7]](#footnote-8)

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

### وضعیت سلامت[[8]](#footnote-9)

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[[9]](#footnote-10)

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].

* 1. 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].

* 1. 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 ‏1‑1**.**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.

#### روش شمارش کولن[[10]](#footnote-11)

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].

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

#### 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 ‏2‑3 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 ‏2‑4 این پروسه استخراج را تشریح می‌کند. همچنین، بخشی از نتایج آزمایش مشخصه‌یابی ترکیبی با پالس پرتوان در دماهای مختلف نشان داده شده است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏1‑3 شماتیک دیاگرام مداری سلول باتری [12]. |
|  |
| شکل ‏1‑4 فرآیند HPPC را تشریح می‌کند [22]. |
|  |
| شکل ‏1‑5 نتیجه استفاده از مقادیر RC بدست آمده توسط فرآیند HPPC [22]. |

#### روش مبتنی بر فیلتر‌‌های تطبیق‌پذیر (فیلتر کالمن[[11]](#footnote-12))

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 [23]. شکل ‏1‑6 نمونه ساده از فیلتر کالمن نمایش می‌دهد.

|  |
| --- |
| 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.

**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[[12]](#footnote-13) 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 ‏2‑1 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[[13]](#footnote-14) و فعال[[14]](#footnote-15) یا اتلافی[[15]](#footnote-16) و غیراتلافی[[16]](#footnote-17) 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 ‏2‑2 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 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 ‏2‑1 نمایی از پک باتری در حال شارژ و دشارژ. |
|  |
| شکل ‏2‑2 همسان‌ساز اتلافی با استفاده از مقاومت‌های شانت [35]. |

* 1. 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 ‏2‑3 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 ‏2‑3 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[[17]](#footnote-18) 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].

* 1. 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 ‏2‑4 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[[18]](#footnote-19) 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 ‏2‑4 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.

* 1. همسان‌سازی بر مبنای ظرفیت

استراتژی‌های همسان‌سازی مبتنی بر ظرفیت، ظرفیت کل[[19]](#footnote-20)، ظرفیت باقی‌مانده[[20]](#footnote-21) و یا ظرفیت قابل‌شارژ[[21]](#footnote-22) 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 ‏2‑5 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 ‏2‑5 همسان‌سازی مبتنی بر SOC پک باتری در فرآیند شارژ و دشارژ. |

* 1. 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].

* 1. 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 ‏2‑6 نمایی از این دسته‌بندی را نشان داده است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏2‑6 طبقه‌بندی توپولوژی‌های مختلف همسان‌سازی. |

### 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 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 ‏2‑7 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 ‏2‑8 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 ‏2‑7 نمایی از توپولوژی همسان‌ساز سریالی سلول به سلول. |
|  |
| شکل ‏2‑8 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 ‏2‑9 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 ‏2‑9 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 ‏2‑10 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

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏2‑10 نمایی از انتقال سریالی سلول به پک باتری. |

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].

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

توپولوژی انتقال سلول به پک باتری در قالب ماژول، در شکل ‏2‑11 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 ‏2‑13 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

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏2‑12 نمایی از توپولوژی انتقال بار از سلول به پک باتری در قالب ماژول. |
|  |
| شکل ‏2‑13 نمایی از توپولوژی انتقال بار از سلول به سلول مستقیم. |

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].

* 1. 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[[22]](#footnote-23)

ساختار این مبدل در شکل ‏2‑14 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[[23]](#footnote-24) 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 ‏2‑15 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 ‏2‑15 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 ‏2‑14 همسان‌ساز مبدل چوک [54]. | |
|  |
| شکل ‏2‑15 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 ‏2‑16 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].

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏2‑16 ساختار مدار همسان‌سازی بر مبنای سوئیچ خازنی [53]. |
|  |
| شکل ‏2‑17 ساختار مدار همسان‌سازی سوئیچ خازنی دو طبقه [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 ‏2‑17 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 ‏2‑17 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].

* 1. 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 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 ‏2‑3 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 ادامه 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، 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 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 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].

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول ‏2‑1 زمان سپری شده همسان‌سازی‌های مذکور [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 |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول ‏2‑2 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 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول ‏2‑3 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 ‏2‑4 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 |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول ‏2‑5 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 |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| جدول ‏2‑6 مقایسه توپولوژی و مدارات همسان‌سازی به همراه تعداد اجزای آن‌ها | | | | | | |
| 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 |

* 1. 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 از2 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.

هر یک زیر ماژول و انتقال شارژ از طریق باس انتقال شارژ موجب افزایش سرعت می‌شود. سوئیچ‌های ماتریسی ارتباط بین سلول‌ها و باس انتقال شارژ را از طریق مبدل فراهم می‌کنند. این مجموعه سوئیچ‌ها از 9 سوئیچ سلولی[[24]](#footnote-25) و 4 سوئیچ زوجیت تشکیل شده است [60].

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏2‑18 مدل شبیه‌سازی شده یک ماژول [59]. |

### الگوریتم کنترلی

در الگوریتم پیشنهادی، هر ماژول باتری از 2 زیر ماژول تشکیل شده است و الگوریتم دو سلول با بالاترین و دو سلول با کمترین ولتاژ در هر ماژول باتری را انتخاب می‌کند. سپس، سلول‌ها بر اساس ولتاژ خود مرتب می‌شوند و سلول با بالاترین ولتاژ به سلول با کمترین ولتاژ مرتب شده متصل می‌شود. این چرخه برای همه جفت‌های سلول‌ها ادامه پیدا می‌کند. شکل ‏4‑2 فلوچارت الگوریتم همسان‌سازی را تشریح می‌کند.

همانطور که در ‏4‑1 نشان داده شده است. اگر اختلاف بین این جفت از سلول‌ها بیش از 10 میلی‌ولت باشد، فرآیند همسان‌سازی آغاز می‌شود. در ‏4‑2 Vavg\_mi نمایان‌گر سطح ولتاژ میانگین ماژول i، Vmax\_mi و Vmin\_mi نیز به ترتیب به عنوان بیشترین و کمترین سطح ولتاژ ماژول i می‌باشند. با کمک مبدل جریان مستقیم دو طرفه، انرژی بیش از حد از سلول‌های با انرژی اضافه در زیرماژول‌ها به سلول‌های با کمترین انرژی در زیرماژول‌های دیگر از طریق باس انتقال شارژ منتقل می‌شود. برای ارائه انتقال انرژی بین سلول‌های انتخاب شده، سوئیچ‌ها در ماتریس سوئیچ باید با در نظر گرفتن سیگنال‌های کنترل (روشن/خاموش) فعال شوند.

|  |  |
| --- | --- |
| ‏4‑1 |  |
| ‏4‑2 |  |

سیستم همسان‌سازی مورد بررسی با مقایسه سه الگوریتم در یک پک باتری متشکل از ۱۷۶ سلول سری ارزیابی شده است. این سلول‌ها از نوع لیتیوم یونی با ظرفیت ۱۱۰ Ah و ولتاژ نامی ۳٫۷ ولت هستند و عملیات شارژ و دشارژ با استفاده از منابع جریان محدود به ۴ A انجام شده است. پک باتری به ۱۱ ماژول و ۲۲ زیرماژول تقسیم شده است.

با وجود دو مبدل جریان مستقیم در هر ماژول باتری، عملیات همسان‌سازی سریع‌تر از مقالات مشابه انجام شده است. همچنین، سادگی و عدم استفاده از الگوریتم‌های پیچیده کامپیوتری، این طرح پیشنهادی را کارآمدتر می‌کند. اما لازم به ذکر است که، ولتاژ پایانه‌ی سلول باتری به تنهایی ملاک مناسبی برای فرآیند همسان‌سازی نیست؛ چرا که وضعیت شارژ باتری تابعی از ولتاژ، دما و جریان است و همواره در گذر زمان تغییر می‌کند. استفاده از ولتاژ به عنوان متغیر همسان‌سازی می‌تواند باعث تکرار نابجای فرآیند شود. محدودیت جریان برای پیشگیری از آسیب رسیدن به سلول‌های باتری ایجاد شده است.

### نتیجه‌گیری

الگوریتم ارائه شده در مقایسه با روش‌های دیگر، عملکرد سریع‌تری داشته و مدل شبیه‌سازی از سوئیچ‌های ماتریسی و مبدل جریان مستقیم دو طرفه برای هر زیرماژول شامل ۱۷۶ سلول سری تشکیل شده است. برای افزایش سرعت و کاهش پیچیدگی در شبیه‌سازی، منابع جریان کنترل‌شده برای مدل‌سازی انتقال بار به کار رفته‌اند و سیگنال سوئیچ‌های ماتریسی در شرایط ناهمسانی ولتاژ فعال می‌شود. عملکرد الگوریتم پیشنهادی با

|  |
| --- |
|  |
| شکل ‏3‑19 فلوچارت الگوریتم همسان‌سازی [59]. |

دو مقاله مرتبط مورد آزمایش قرار می‌گیرد و نتایج نشان می‌دهد که این الگوریتم، زمان همسان‌سازی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و همچنین دامنه ولتاژ میان سلول‌ها را بهبود می‌بخشد. در نتیجه، پک باتری مجهز به الگوریتم پیشنهادی، عملکرد بهتری نسبت به روش‌های مشابه داشته و انتقال شارژ همزمان بین ماژول‌ها را فراهم می‌کند.

|  |
| --- |
|  |

|  |
| --- |
| شکل ‏3‑20 نتیجه شبیه‌سازی برای حالت اول (الگوریتم پیشنهادی) [59]. |

|  |
| --- |
|  |

|  |
| --- |
| شکل ‏3‑21 نتیجه شبیه‌سازی برای حالت اول (الگوریتم [61]) [59]. |

|  |
| --- |
|  |

|  |
| --- |
| شکل ‏3‑22 نتیجه شبیه‌سازی برای حالت اول (الگوریتم [62]) [59]. |

|  |
| --- |
|  |

|  |
| --- |
| شکل ‏3‑23 نتیجه شبیه‌سازی برای حالت دوم (الگوریتم پیشنهادی) [59]. |

|  |
| --- |
|  |

|  |
| --- |
| شکل ‏3‑24 نتیجه شبیه‌سازی برای حالت دوم (الگوریتم [61]) [59]. |

|  |
| --- |
|  |

|  |
| --- |
| شکل ‏3‑25 نتیجه شبیه‌سازی برای حالت دوم (الگوریتم [62]) [59]. |

# روش تحقیق

## طرح مسئله

همان‌طور که پیش تر اشاره شد، هدف از انجام این پایان نامه تعیین مساحت بهینه کشت محصولات زراعی در شش حوزه‌ی آبریز اصلی ایران می‌باشد، به طوری که قیود مسئله رعایت شوند. در هر حوزه آبریز استانی که بیشترین مساحت زیر کشت آبی را داشته انتخاب شده است. بنابراین استان‌های مازندران، خوزستان، آذربایجان غربی، اصفهان، سیستان و بلوچستان و خراسان رضوی به ترتیب نماینده حوزه‌های دریای مازندران، خلیج فارس و دریای عمان، دریاچه ارومیه، فلات مرکزی، مرزی شرق و قره‌قوم (سرخس) می‌باشند. پس از تخصیص مساحت بهینه در هر استان، پتانسیل انرژی برق تولیدی از آب صرفه‌جویی شده در کشاورزی حساب شده است.

در ادامه توابع هدف، قیود مسئله، مصرف آب جهت تولید انرژی و روش بهینه‌سازی مطرح گردیده است. در این پژوهش یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه مطرح شده است. برای این منظور تعاملات بین آب، انرژی و غذا در یک سیستم کشاورزی تحت آبیاری (غیر دیم) مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ‏3–1).

در این پژوهش از بین ارتباطات بین حوزه‌های آب، غذا و انرژی به موارد زیر پرداخته شده است؛

* انرژی مصرفی در بخش کاشت، داشت و برداشت در روند تولید غذا
* آب مصرفی در روند تولید غذا
* انرژی مصرفی در تامین آب از جمله استخراج، پمپاژ و زهکشی
* مصارف غذا توسط جمعیت
* آلودگی آب جهت تولید غذا
* استفاده از آب برای تولید انرژی

به دلیل به وجود آمدن پیچیدگی زیاد در بهینه‌سازی از -ارتباط محصولات کشاورزی جهت تولید سوخت زیستی و انرژی- که تاثیر کمتری بر نیل به حالت بهینه توابع هدف دارد، صرف نظر شده است.



شکل ‏3‑1 تعاملات بین آب، غذا و انرژی در سیستم تصمیم‌گیری

هدف نهایی این پایان نامه یافتن بهینه ترین حالت بین رشد اقتصادی - اجتماعی، مسائل زیست محیطی و مصرف آب است. برای دستیابی به حالت بهینه در این پژوهش دو سناریو تحلیل شده است که در نهایت با یکدیگر مقایسه شده اند. در .... توابع هدف موردنظر بیان شده است.

## مصرف آب جهت تولید برق

# بحث و نتایج

## مقدمه

.

## جمع‌بندی

# 

# نتیجه‌گیری پژوهش و پیشنهادها

# منابع و 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] 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.

[23] 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.

[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.

1. Oxidation-Reduction [↑](#footnote-ref-2)
2. Energy Density [↑](#footnote-ref-3)
3. Power Density [↑](#footnote-ref-4)
4. Open Circuit Voltage (OCV) [↑](#footnote-ref-5)
5. C-rate [↑](#footnote-ref-6)
6. Depth of discharge (DOD) [↑](#footnote-ref-7)
7. State Of Charge (SOC) [↑](#footnote-ref-8)
8. State Of Health (SOH) [↑](#footnote-ref-9)
9. Self-Discharge [↑](#footnote-ref-10)
10. Coulomb Counting [↑](#footnote-ref-11)
11. Kalman-Filter (KF) [↑](#footnote-ref-12)
12. Equalization Management System [↑](#footnote-ref-13)
13. Passive [↑](#footnote-ref-14)
14. Active [↑](#footnote-ref-15)
15. Dissipative [↑](#footnote-ref-16)
16. None-Dissipative [↑](#footnote-ref-17)
17. Aging [↑](#footnote-ref-18)
18. Plateau [↑](#footnote-ref-19)
19. CTotal [↑](#footnote-ref-20)
20. CReleasable [↑](#footnote-ref-21)
21. CChargable [↑](#footnote-ref-22)
22. Cuk [↑](#footnote-ref-23)
23. Pulse Width Modulation [↑](#footnote-ref-24)
24. Cell Switch (CSW) [↑](#footnote-ref-25)