مدار متعادل‌ساز خودکار و سریع برای باتری‌های لیتیم-یون سری شده مبتنی بر مبدل ترکیبی فورووارد-فلای بک

حمید خلیلی[۱] سید ادیب ابریشمی‌فر[۲] فرهادباقر اسکویی[۳]

۱- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت - تهران- ایران
khalili_h@elec.iust.ac.ir

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت - تهران- ایران
abrishamifar@iust.ac.ir

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد- عضو هیأت علمی پژوهشکده سامانه‌های ماهواره-تهران- ایران
F.bageroskuee@AUT.AC.IR

چکیده: عوامل بسیاری بر روی کارایی سامانه‌های مبتنی بر باتری لیتیم-یون (هم‌چون ماهواره‌ها و خودروهای الکتریکی) تأثیرگذار هستند. از مهم‌ترین آن‌ها نامتعادل شدن سلول‌های باتری براثر شارژ و دشارژ متوالی، دمای محیط باتری و فرآیند ساخت باتری‌ها است. با نامتعادل شدن سلول‌های بسته باتری لیتیم-یون ظرفیت بسته باتری و عمر مفید آن‌ها کاهش می‌یابد و حتی در مواردی سبب نابودی و انفجار بسته باتری می‌شود. تاکنون روش‌های مختلفی برای متعادل‌سازی سلول‌های باتری لیتیم-یون پیشنهادشده است. در این مقاله پیکربندی جدیدی برای مدار متعادل‌ساز باتری‌های لیتیم-یون ارائه‌شده است. مدار پیشنهادشده دارای فرآیند متعادل‌سازی خودکار بوده و نحوه انتقال انرژی در آن به‌صورت بسته به سلول در هر دو دوره کلیدزنی اتفاق می‌افتد. درنتیجه سرعت متعادل‌سازی آن نیز نسبت به طرح‌های مشابه افزایش قابل‌توجهی پیداکرده است. مدار پیشنهادی برای توان ۴۲ وات در نرم‌افزار Orcad Capture شبیه‌سازی‌شده که دارای راندمان ۸۱٪ و زمان متعادل‌سازی ۱/۵ میلی‌ثانیه (با توجه شرایط مدل شده بسته باتری در شبیه‌سازی) در شرایط اختلاف ولتاژ ۰/۵ ولت بین سلول ضعیف و قوی است و نتایج حاصل‌شده نشان‌دهنده عمل‌کرد مناسب مدار پیشنهادی است.

واژه‌های کلیدی: مدار متعادل‌ساز، باتری لیتیم- یون، ماهواره‌ها، خودروهای الکتریکی، متعادل‌سازی خودکار.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.29252/jiaeee.18.4.159

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۱۴
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۰۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۲۱
نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر سید ادیب ابریشمی‌فر
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران – میدان رسالت – خیابان هنگام- خیابان دانشگاه علم و صنعت– دانشگاه علم و صنعت – دانشکده‌ی برق

۱- مقدمه

به سبب چگالی انرژی زیاد، نرخ خوددشارژی کم و نداشتن اثر حافظه‌ای باتری‌های لیتیم-یون نقش مهمی را در کاربردهای توان‌زیاد باتری‌ها ازجمله خودروهای الکتریکی و ماهواره‌ها ایفا می‌کنند. به سبب کم بودن سطح ولتاژ و انرژی یک سلول لیتیم-یون برای کاربردهای نام‌برده تعداد بسیار زیادی از این سلول‌ها را سری و موازی می‌کنند تا به سطح ولتاژ و جریان قابل‌قبول برای آن کاربرد دست یابند. سری کردن این سلول‌ها باعث به وجود آمدن مشکلاتی نیز می‌شود، برای مثال در هنگام شارژ شدن اگر سلولی زودتر از سایر سلول‌ها شارژ شود اجازه شارژ شدن را به سایر سلول‌ها نمی‌دهد و هم‌چنین اگر سلولی زودتر از سایر سلول‌ها شارژ خود را از دست بدهد اجازه دشارژشدن را به سایر سلول‌ها نمی‌دهد، در این حالات گفته می‌شود بسته باتری تعادل سلولی خود را از دست‌داده است که این امر علاوه بر کاهش کارایی بسته باتری در مواردی سبب آتش‌سوزی یا انفجار بسته باتری نیز شده است. بر این اساس کارایی، طول عمر و ایمنی بسته باتری به متعادل بودن سلول‌های آن وابسته است [۱].

روش‌های مداری متفاوتی برای رفع مشکل عدم تعادل‌سلولی ارائه‌شده است که به‌صورت کلی می‌توان این روش‌ها را به دو دسته اتلافی و غیراتلافی تقسیم‌بندی کرد[۱]. در روش‌های اتلافی که با اتلاف انرژی سلول با سطح انرژی بیش‌تر در یک مقاومت موازی فرآیند متعادل‌سازی صورت می‌گیرید به سبب راندمان کم و کاهش عمر مفید سلول‌های باتری در کاربردهای توان‌زیاد مورداستفاده قرار نگرفته و در کاربردهای توان کم (مانند لپ‌تاپ‌ها که اغلب از ۶ سلول لیتیم-یون استفاده می‌شود) به سبب کم‌حجم و ارزان بودن و پایین بودن سختی طراحی مدارهای آن مورداستفاده قرار می‌گیرد درنتیجه در سال‌های اخیر باتوجه به افزایش کاربردهای توان‌زیاد باتری‌های لیتیم-یون هم‌چون ماهواره‌ها و خودروهای الکتریکی یا هیبریدی، تحقیقات به روش‌های غیراتلافی که مبتنی بر انتقال انرژی از سلول (های) قوی به سلول (های) ضعیف است سوق پیدا کرده است. در سال‌های اخیر ایده‌های بسیاری مطرح شده‌است که به‌صورت کلی می‌توان این ایده‌ها را بر اساس نحوه و نوع انتقال انرژی در پنج دسته کلی قرار داد: ۱- سلول به سلول (مستقیم) ۲- سلول به سلول مجاور ۳- بسته به سلول ۴- سلول به بسته ۵- سلول به بسته به سلول. این روش‌ها به‌خوبی در مرجع [۱] بررسی‌شده است که از این بین به سبب سادگی پیاده‌سازی و سرعت متعادل‌سازی مناسب (در طرح‌های دارای ترانسفورماتور) دسته بسته به سلول، برای طراحی متعادل‌ساز جدید انتخاب‌شده است. اما از مشکلات اساسی این ساختارها که دارای ترانسفورماتور هستند، طراحی و پیاده‌سازی دشوار مدار کنترلی بهینه و سطح مصرفی زیاد (در ساختارهای با چند سیم‌پیچ اولیه و ثانویه مرجع [۲]) می‌توان نام برد. درنتیجه در این مقاله ساختار جدیدی پیشنهادشده است که برخلاف ساختارهای مرسوم در مراجع [۱] و [۳-۶] فاقد مدار کنترلی جهت کنترل فرآیند متعادل‌سازی است و درواقع فرآیند متعادل‌سازی در این مدار به‌صورت خودکار انجام می‌شود. هم‌چنین در این طرح از یک ترانسفورماتور با یک سمت اولیه و چند سمت ثانویه استفاده‌شده است که درنتیجه در این مدار علاوه بر کاهش قیمت و پیچیدگی طراحی، سطح مصرف نهایی مدار را نیز نسبت به گستره زیادی از طرح‌های سال‌های اخیر (به سبب کاهش تعداد سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور و تعداد کلیدهای قدرت و درنتیجه کاهش مدارهای راه‌انداز آن‌ها) کاهش داده است.

در قسمت دوم به بررسی مدار پیشنهادی پرداخته می‌شود، در بخش سوم نتایج شبیه‌سازی مدار پیشنهادی و در بخش چهارم مقایسه‌ی بین این مدار و یک مدار روش بسته به سلول پایه و یک مدار از دسته سلول به سلول مستقیم و نتیجه‌گیری انجام‌شده است.

۲- مدار پیشنهادی

در این مقاله یک مدار متعادل‌ساز خودکار برای یک بسته چهارتایی از سلول‌های لیتیم-یون سری شده طراحی‌شده است (شکل(۱)). این متعادل‌ساز از یک مبدل ترکیبی فوروارد-فلای‌بک بهره می‌برد و هم‌چنین ترانسفورماتور آن دارای یک سمت اولیه و چندین (با توجه به تعداد سلول‌های باتری) سمت ثانویه است. درنتیجه این تغییر سبب کاهش حجم مدار نسبت به نمونه‌های مداری مشابه خود در مرجع [۲] است. در این طرح برای سادگی شبیه‌سازی هر سلول لیتیم-یون (با توجه به ساده‌ترین نمونه موجود آن) با یک خازن و یک مقاومت مدل شده و هم‌چنین جهت ساده‌تر نمودن تحلیل، فرض‌های زیر (با توجه به شکل(۱)) در نظر گرفته‌شده است:

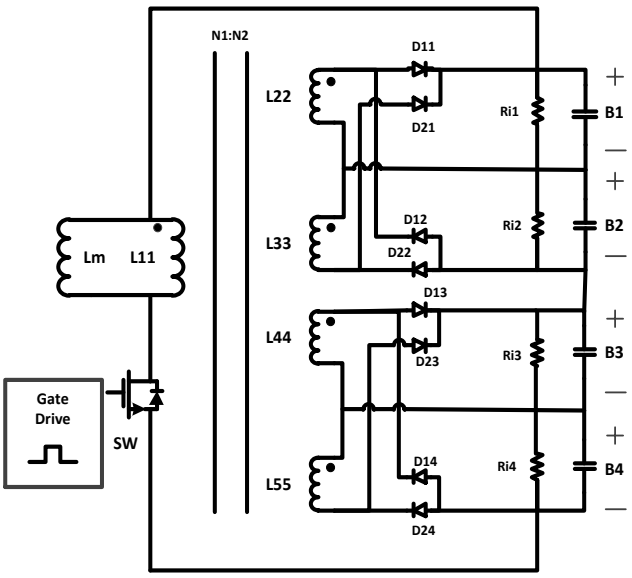
- مقدار سلف مغناطیسی از سلف پراکندگی بسیار بزرگ‌تر در نظر گرفته‌شده است.
- همه ادوات به‌کاررفته هم‌چون دیود، خازن، ترانسفورماتور و ماس‌فت همگی ایده‌آل هستند.
- Ri ها که نماینده مقاومت‌های داخلی باتری‌ها هستند بسیار بزرگ بوده و درنتیجه جریان متعادل‌سازی از آن‌ها عبور نمی‌کند.
- ولتاژ همه سلول‌ها و درنهایت ولتاژ کل بسته سلول در یک دوره کلیدزنی ثابت می‌ماند.
- ولتاژ سلول B1 (نخستین سلول باتری با توجه به شکل(۱)) از همه سلول‌ها کم‌تر است و انرژی باید از سایر سلول‌ها به این سلول منتقل شود.
- ضریب تزویج ترانسفورماتور ۱۰۰ درصد در نظر گرفته‌شده است.
- با آمدن پالس کلید، بی‌درنگ کلید روشن‌شده و جریان می‌کشد و

هم‌چنین با خاموش شدن پالس ورودی، کلید بدون تأخیر خاموش می‌شود.

- نسبت دور ترانسفورماتور ۱/۴ انتخاب‌شده است. این مقدار با توجه به تعداد سلول‌ها (برای مثال برای n سلول ۱/n انتخاب می‌شود) به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که یک میانگین‌گیری روی ولتاژ سلول‌ها انجام‌شده و ولتاژ میانگین به‌طرف ثانویه ترانسفورماتور القا شود تا سطح ولتاژ همه سلول‌ها (به‌ویژه سلول‌های ضعیف) همیشه حول ولتاژ میانگین قرار گیرد.

همان‌طور که بیان شد این مدار از یک مبدل ترکیبی فوروارد-فلای‌بک بهره می‌برد به این صورت که درزمانی که کلید سمت اولیه ترانسفورماتور (SW) وصل است عملکردش مشابه مبدل فوروارد بوده و انرژی از بسته سلول‌ها گرفته‌شده و به سلول (های) با سطح ولتاژ کم‌تر (سلول ضعیف) منتقل می‌شود و درزمانی که کلید SW خاموش می‌شود انرژی ذخیره‌شده در سلف مغناطیس‌کنندگی ترانسفورماتور به سلول (های) ضعیف منتقل می‌شود. درنتیجه عمل‌کرد آن در این بازه مشابه مبدل فلای‌بک است. این نوع از انتقال دائم انرژی به سلول‌های ضعیف سبب افزایش سرعت متعادل‌سازی این مبدل نسبت به ساختارهای مرسوم این دسته شده است. در این مدار با توجه به فرض‌های مطرح شده انرژی در هر دو نیم دوره به سلول B1 منتقل می‌شود تا زمانی که ولتاژ آن با ولتاژ سایر سلول‌ها در یک سطح قرار بگیرد.

در بخش ۲-۱ ابتدا به معرفی و چگونگی عمل‌کرد مدار پیشنهادی پرداخته‌شده و در بخش۲-۲ به بررسی نتایج شبیه‌سازی آن در نرم‌افزار Orcad Capture پرداخته می‌شود.



شکل (۱): پیکربندی متعادل‌ساز پیشنهادی

۲-۱- اصول کارکرد مدار پیشنهادی

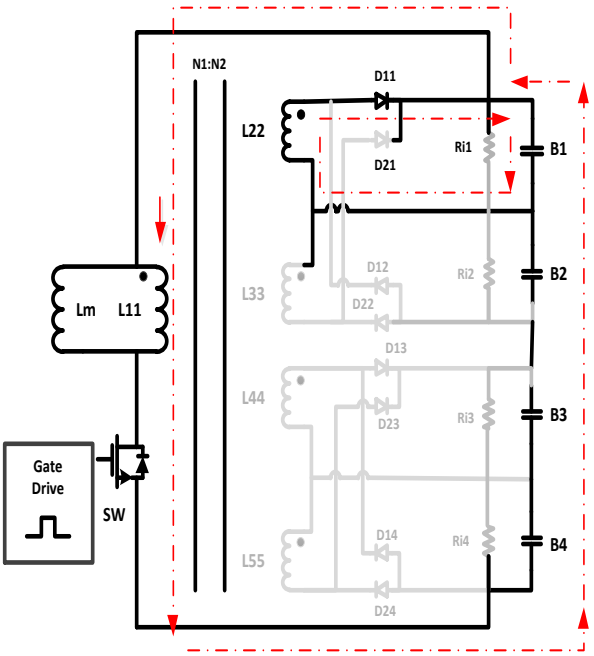
همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود مدار پیشنهادی در هر دوره تناوب دارای دو وضعیت است. وضعیت نخست همان عمل‌کرد فورواردی مبدل پیشنهادی است و وضعیت دوم نیز عمل‌کرد فلای‌بکی این مبدل است که در شکل‌های ۲ و ۳ شمای این دو وضعیت مشاهده می‌شود.

حالت نخست ($0 \le t < DT$): در این وضعیت کلیدSW روشن بوده و مطابق شکل (۲) جریان از سمت اولیه ترانسفورماتور عبور کرده و از طریقL11 و L22 و دیودD11 به سمت (های) ثانویه منتقل‌شده و به سلول ضعیف یعنیB1 می‌رسد و هم‌زمان مقداری از این انرژی در سلف مغناطیس‌کنندگی (Lm) ترانسفورماتور ذخیره می‌شود.

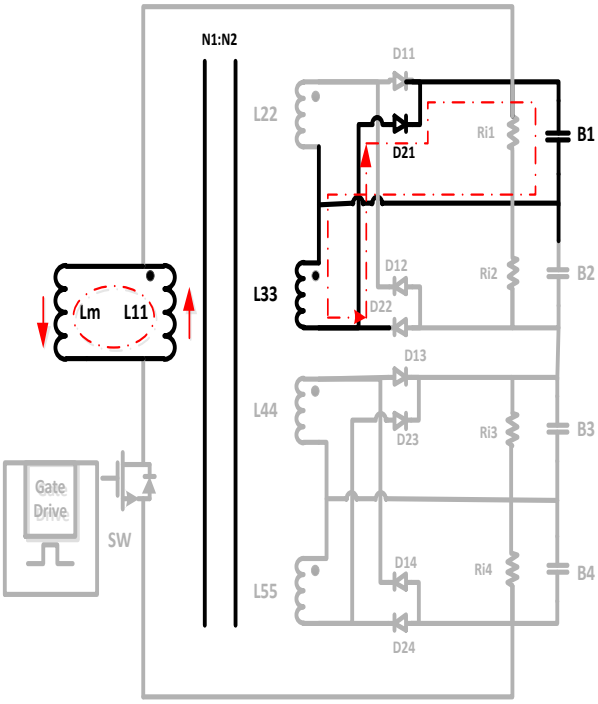
حالت دوم ($DT \le t < T$): با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌شود که انرژی ذخیره شده در نیم دوره کلیدزنی قبل در سلف مغناطیس‌کنندگی با قطع شدن کلیدSW و روشن شدن دیود (های) مربوط به سلول ضعیف (در اینجا به سبب ضعیف فرض کردن سلول B1 دیود D21 مدنظر است) به سمت (های) ثانویه ترانسفورماتور و درنهایت به سلول ضعیف (B1) منتقل می‌شود.

این فرآیند تا جایی ادامه دارد که سطح ولتاژ سلول ضعیف با سطح ولتاژ سایر سلول‌ها برابر شود و بعدازآن دیودهای ثانویه به دلیل مثبت نشدن ولتاژ دوسرشان خاموش بوده و هیچ انتقال انرژی از سمت اولیه یا بسته به سلول‌ها صورت نمی‌گیرد و درنتیجه مبدل از مدار خارج می‌شود (البته در عمل به سبب غیر ایده‌آل بودن ادوات مبدل از مدار خارج نمی‌شود).

عملکرد خودکار شناسایی سلول ضعیف و انتقال سریع انرژی به آن و خارج شدن مدار متعادل‌ساز در زمان اتمام متعادل‌سازی نیاز به کنترل‌کننده مرکزی را که در طرح‌های پیشین امری بدیهی بود برطرف نموده و لذا هزینه ساخت و حجم مصرفی را کاهش داده و امر پیاده‌سازی مدار را نیز نسبت به طرح‌های مشابه راحت‌تر نموده است.



شکل (۲): جهت جریان متعادل‌سازی در نیم دوره کلیدزنی نخست مدار پیشنهادی



شکل (۳): جهت جریان متعادل‌سازی در نیم دوره کلیدزنی دوم مدار پیشنهادی

۲-۲- شبیه‌سازی

به سبب پیچیدگی‌های طراحی مدل‌های مداری پیشنهادشده سال‌های اخیر برای باتری‌های لیتیم-یون، در این مقاله از ساده‌ترین مدل مداری باتری‌های لیتیم-یون (یک خازن و یک مقاومت) برای شبیه‌سازی استفاده‌شده است و مقادیر خازن و مقاومت نمایان‌گر باتری، با توجه به شبیه‌سازی مدار [۶] در نرم‌افزار Orcad Capture (خازن ۲ میلی فاراد و مقدار مقاومت ۱۰ کیلو اهم) و با آزمون و خطا محاسبه شده است.

در این مقاله برای سادگی تحلیل فقط یک سلول لیتیم-یون نامتعادل بوده و دارای ولتاژ ۳/۷ ولت است و تمامی سلول‌های دیگر در حالت شارژ کامل (۴/۲ ولت) قرار دارند. این اختلاف ولتاژ ۰/۵ ولتی بین سلول ضعیف و سلول‌های قوی یکی از بدترین حالات ممکن برای سلول‌ها محسوب می‌شود. برای بسته سلول‌های لیتیم-یون ۴ تایی با این شرایط ولتاژ کل بسته ۱۶/۱ ولت می‌شود.

جدول (۱) نشان‌دهنده ادوات به‌کار رفته یا دیگر پارامترهای موردنظر در شبیه‌سازی را در نرم‌افزار Orcad Capture نشان می‌دهد.

جدول (۱): ادوات مدار پیشنهادی به همراه دیگر پارامترهای موردنظر در شبیه‌سازی

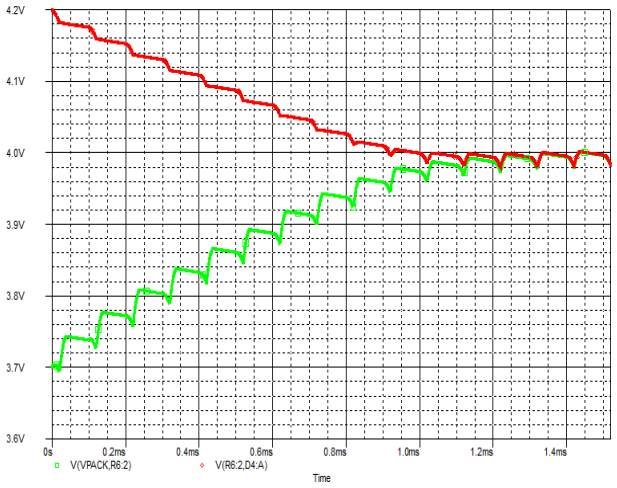
مدل ساده مقاومت و خازنی	باتری
120NQ045	دیود
M2N6767	ماس‌فت
٪۹۹	ضریب تزویج ترانسفورماتور

جدول (۲): ویژگی‌های ادوات نیمه‌هادی به‌کاررفته

نوع	جریان قابل تحمل	ولتاژ قابل تحمل	نوع
شاتکی	۱۲۰ A	۴۵ V	دیود 120NQ045
قدرت (کانال نوع N)	۱۲ A	۳۵۰ V	ماس‌فت M2N6767

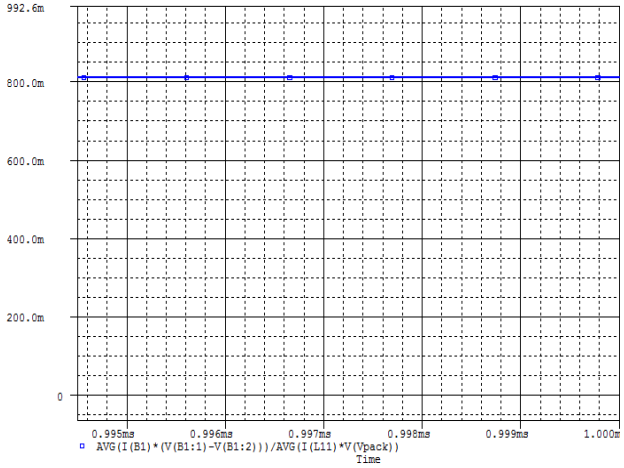
جدول (۲) ویژگی‌های کلی ادوات نیمه‌هادی به‌کاررفته را نشان می‌دهد.

- نمودار ولتاژ سلول‌ها



شکل (۴): نمودار ولتاژ سلول‌ها: رنگ قرمز نمایانگر ولتاژ سایر سلول‌ها و رنگ سبز نمایانگر ولتاژ سلول ضعیف است

- همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود زمان متعادل‌سازی در شبیه‌سازی حدود ۱/۴ یا ۱/۵ میلی‌ثانیه شده است.
- بازدهی



شکل (۵): نمودار بازدهی مدار پیشنهادی

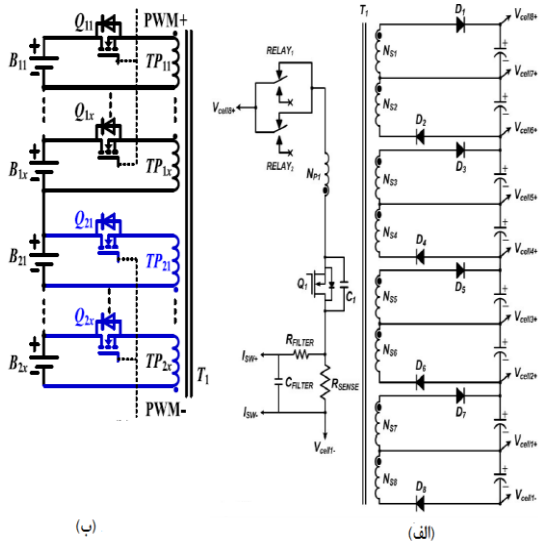
با وارد کردن رابطه (۱) در بخش ترسیم نمودار نرم‌افزار Orcad Capture مقدار بازدهی در نرم‌افزار حدود ۸۱ درصد (شکل (۵)) حاصل می‌شود.

$$\eta = \frac{AVG(V_{B1} \times I_{B1})}{AVG(V_{PACK} \times I_{PACK})} \quad (۱)$$

که در این رابطه AVG() نشان‌دهنده میانگین، V_{B1} و I_{B1} ولتاژ و جریان مربوط به سلول نخست و V_{PACK} و I_{PACK} ولتاژ و جریان خروجی کل بسته سلول‌های لیتیم-یون در شبیه‌سازی است.

۳- مقایسه

در جدول (۳) به مقایسه بین طرح پیشنهادی مراجع [۷] و [۸] (که در شکل (۶) مشاهده می‌شود) از جهات مختلف پرداخته‌شده است. این مقایسه در شرایط مشابه برای چهار سلول لیتیم-یون و با اختلاف ولتاژ حداکثر ۰/۵ ولت و با استفاده از دیودهای شاتکی 120NQ045 و ماس‌فت قدرت M2N6767 انجام‌شده است.



شکل (۶): مدارهای مورد مقایسه: الف) مرجع [۸] ب) مرجع [۷].

جدول (۳): مقایسه طرح پیشنهادی با طرح‌های مشابه که تاکنون ارائه‌شده است

نوع و دسته متعادل‌ساز	نوع مبدل	راندمان (٪)	زمان متعادل‌سازی (mS)	تعداد دیود	تعداد کلید	روش
روش غیراتلافی از دسته سلول به سلول مستقیم	فورواردـ فلای‌بک	۸۵/۸	۲۵/۷	۰	۴	مرجع [۷]
روش غیراتلافی از دسته بسته به سلول	فلای‌بک	۷۸/۳	۲/۵	۴	۱	مرجع [۸]
روش غیراتلافی از دسته بسته به سلول	فورواردـ فلای‌بک	۸۱	۱/۵	۸	۱	طرح پیشنهادی

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود روش پیشنهادی در مقایسه با طرح پایه روش بسته به سلول (فلای‌بک) و یکی از جدیدترین طرح‌های پیشنهادی در روش سلول به بسته به سلول سال‌های اخیر ازنظر زمان متعادل‌سازی عمل‌کرد بهتری داشته و حتی ازنظر راندمان نیز از طرح پایه مطرح‌شده در مرجع [۸] عمل‌کرد بهتری از خود نشان داده است ولی ازنظر تعداد قطعات، کمی از مراجع بررسی‌شده ([۷] و [۸]) بیش‌تر است، طرح پیشنهادی قابلیت ماژولار شدن را نیز مانند طرح‌های بررسی‌شده دارا است. نکته مهم طرح پیشنهادشده عدم نیاز آن به کنترل‌کننده است و فرآیند متعادل‌سازی به‌صورت خودکار (با دادن یک پالس PWM به گیت ماس‌فت SW) انجام می‌شود که این مهم برتری طرح پیشنهادی را نسبت به بسیاری از طرح‌های پیشنهادی سال‌های اخیر (مانند مراجع [۱] و [۳-۶]) نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک پیکربندی مداری جدید برای مدارهای متعادل‌ساز باتری‌های لیتیم-یون ارائه شد. مدار ارائه‌شده از دسته بسته به سلول روش‌های غیراتلافی بوده و با حذف کنترل‌کننده با متعادل‌سازی خودکار و استفاده از یک ترانسفورماتور با یک سمت اولیه و چند سمت ثانویه سبب کاهش سختی پیاده‌سازی و سطح مصرفی مدار و درنهایت هزینه تمام‌شده مدار شده است و هم‌چنین با استفاده از انتقال انرژی در هر دو دوره کلیدزنی سبب افزایش سرعت فرآیند متعادل‌سازی شده است. مدار پیشنهادی این مقاله قابلیت ماژولار شدن را نیز دارا است این امر به همراه خودکار بودن فرآیند متعادل‌سازی و سرعت زیاد این مدار، سبب شده است که برای کاربردهای توان‌زیاد هم‌چون خودروهای الکتریکی (هیبریدی) یا ماهواره‌ها مناسب‌تر از طرح‌های نام‌برده سال‌های اخیر باشد.

مراجع

[1] Y. Shang, C. Zhang, N. Cui and J. M. Guerrero, "A Cell-to-Cell Battery Equalizer With Zero-Current Switching and Zero-Voltage Gap Based on Quasi-Resonant LC Converter and Boost Converter," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 7, pp. 3731-3747, July 2015.

[2] M. Daowd, N. Omar, P. Van Den Bossche, and J. Van Mierlo, "Passive and active battery balancing comp. based on MATLAB sim.," Veh. Power Propuls. Conf., 2011.

[3] C. Young, N. Chu, L. Chen, Y. Hsiao and C. Li, "A Single-Phase Multilevel Inverter With Battery Balancing," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 5, pp. 1972-1978, May 2013.

[4] 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 Trans. Power Electron., vol. 27, no. 8, pp. 3764–3774, 2012.

[5] S. Lee, K. Lee, Y. Choi and B. Kang, "Modularized Design of Active Charge Equalizer for Li-Ion Battery Pack," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 11, pp. 8697-8706, Nov. 2018.

[6] F. Peng, H. Wang and L. Yu, "A Hierarchical ZVS Battery Equalizer Based on Bipolar CCM Buck-Boost Units," 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, 2018.

[7] Y. Shang, B. Xia, C. Zhang, N. Cui, J. Yang and C. C. Mi, "An Automatic Equalizer Based on Forward–Flyback Converter for Series-Connected Battery Strings," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 7, pp. 5380-5391, July 2017.

[8] K. H. Park, C. H. Kim, H. K. Cho, and J. K. Seo, "Design Considerations of a Lithium Ion Battery Management System (BMS) for the STSAT-3 Satellite," Journal of Power Electronics, vol. 10, no. 2, pp. 210–217, Mar. 2010.