

یک ساختار جدید دوورودی - دوحروجی مبتنی بر مدل T-Source اصلاح شده با سه سیم پیچ کوپل شده در کاربرد انرژی خورشیدی - باتری

صابر زارع، امیرحسین رجائی، محمدرضا خیراتی و محمد مردانه

خورشیدی برای ارزیابی توان انرژی باتری و محتوای انرژی آن بسیار ضروری است [۲]. ذخیره انرژی وسیله‌ای کلیدی برای بهبود اقتصاد، انعطاف پذیری و امنیت سیستم انرژی است. همچنین این موضوع در ترویج مصرف انرژی و اینترنت انرژی بسیار مهم است [۳] و [۴]. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای پوشش تقاضای انرژی مسکونی، صنعت و ساختمان‌های تجاری به صورت پایدار ضروری است. از این نظر، سیستم‌های مدیریت انرژی نقش اصلی را برای به حداکثر رساندن میزان انرژی تولیدشده توسط انرژی تجدیدپذیر محلی ایفا می‌کنند [۵].

با توجه به پدیده قطعی - وصلی جذب انرژی از خورشید، دو راهکار کلی برای غلبه بر این مشکل و تأمین مداوم بار وجود دارد. راهکار اول استفاده از انرژی ترکیبی است. این راهکار مستلزم در دسترس بودن نوع دیگری از انرژی تجدیدپذیر است. این منبع انرژی دوم [۶] تا [۹]، باید مکمل خورشید باشد و به عبارتی دیگر در زمان‌هایی مانند شب که جذب انرژی از خورشید امکان پذیر نیست این منبع انرژی بتواند بار را تأمین کند. ممکن است این شرایط همیشه فراهم نبوده و لذا راهکار دوم مطرح می‌شود. راهکار دوم اتصال به شبکه [۱۰] یا استفاده از ذخیره‌کننده‌های انرژی الکتریکی [۱۱] تا [۱۴] است. با توجه به این که در این مقاله هدف، تأمین کامل بار از طریق منابع تجدیدپذیر است لذا استفاده از باتری در کنار پانل خورشیدی انتخاب شده است.

یکی از مشکلاتی که جذب انرژی از منابعی مانند خورشید دارد، کم بودن سطح ولتاژ خروجی آنها است. برای غلبه به این مشکل یک راهکار نه چندان مناسب وجود دارد. این راهکار سری کردن پانل‌های فوتوولتائیک است. سری کردن پانل‌ها امکان جذب توان حداکثری از پانل‌ها را فراهم نمی‌کند و بنابراین استفاده از چند پانل به صورت سری مقرون به صرفه نمی‌باشد. راهکار مؤثر برای حل این مشکل استفاده از مبدل‌های افزایش ولتاژ است. یک دسته از این مبدل‌ها، مبدل‌های منبع امپدانس هستند [۱۵]. عملکرد خوب شبکه‌های منبع امپدانس باعث طراحی مقاوم و متنوع در توپولوژی‌های مبدل‌ها گردیده و این باعث شده محققان و طراحان صنعتی و دانشگاهی به صورت عمیق این فصل جدید را مورد بررسی و استفاده قرار دهند. سلف‌های کوپل شده یا ترانسفورمرها برای افزایش ولتاژ بیشتر در شبکه‌های امپدانس معرفی شده‌اند [۱۶]. علاوه بر این، باعث کاهش تعداد عناصر پسیو مورد نیاز در شبکه‌ها نیز می‌شوند که با بهبود چگالی توان و کاهش قیمت کل سیستم همراه است. روش کلی برای نشان دادن نحوه استخراج برخی از شبکه‌های کوپل شده در [۱۶] آمده است. ساختار مدل T-Source به دلیل دارا بودن سلف تزویج و درجه آزادی بیشتر برای افزایش ولتاژ خروجی در طراحی مورد نظر مبدل پیشنهادی در این مقاله که از دو خروجی بهره می‌برد مناسب است. ضریب افزایش ولتاژ این مبدل بالاتر از مبدل‌های منبع امپدانس

چکیده: در این مقاله یک ساختار جدید از مبدل‌های DC-DC دوورودی و دوحروجی با بهره ولتاژ بالا مبتنی بر مبدل منبع امپدانس T-Source ارائه شده است. کاربرد اصلی این مبدل برای اتصال به سیستم‌های انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. در این ساختار یک منبع ورودی پانل خورشیدی و دیگری یک باتری در نظر گرفته شده است. از مزیت‌های مبدل پیشنهادی می‌توان به بهره ولتاژ بالا، پیوسته بودن جریان ورودی، امکان جذب توان به صورت هم‌زمان و مستقل از باتری و پانل خورشیدی و بازدهی بالا اشاره کرد. مدهای عملکردی مبدل بررسی شده و معادلات حاکم بر آن در حالت پایدار به دست آمده است. شبیه‌سازی مبدل پیشنهادی انجام گردیده و یک نمونه آزمایشگاهی از مبدل ساخته شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی و ساخت با تئوری پیش‌بینی شده برای کار سیستم، عملکرد مناسب مبدل پیشنهادی را تأیید می‌کند.

کلیدواژه: مبدل الکترونیک قدرت چندترمیناله، انرژی‌های تجدیدپذیر، مبدل منبع امپدانس، شبکه امپدانس T-Source، ردیابی نقطه ماکسیمم توان، روش Hill Climbing.

۱ - مقدمه

امروزه، توجه به اهمیت مسایل زیست‌محیطی و نگرانی‌های جهانی در مورد منابع انرژی و همچنین وجود مسایلی مانند افزایش گرمای زمین و تأثیر آن بر تغییرات آب و هوایی، محققان را بر آن داشته است که توان مورد نیاز برای تولید انرژی الکتریکی را از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر دریافت کنند. در بین این منابع مختلف انرژی نو، تمایل به بهره‌برداری از سیستم‌های خورشیدی^۱ به شدت در حال افزایش است [۱]. سهولت دسترسی و بهره‌برداری مقرون به صرفه از جمله مزایای سیستم‌های خورشیدی است. ساختمان یکپارچه پانل خورشیدی به همراه عناصر ذخیره‌کننده انرژی می‌تواند نقش مهمی را نه تنها در مدیریت سمت تقاضا بلکه در یک سیستم ریزشبکه در هماهنگی با سایر تولیدکنندگان ایفا کند. در نظر گرفتن تغییرات سالانه بار و خروجی سیستم پانل

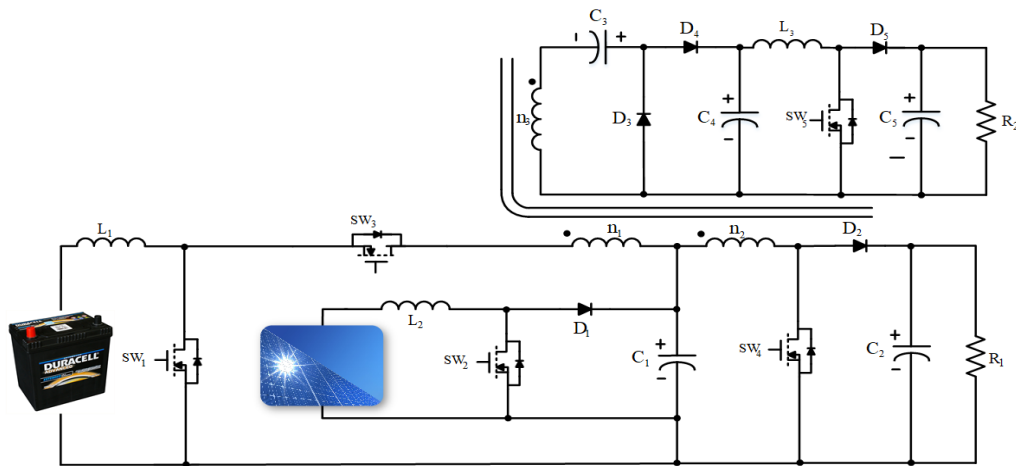
این مقاله در تاریخ ۲۵ اردیبهشت ماه ۱۳۹۸ دریافت و در تاریخ ۲۱ مرداد ماه ۱۳۹۸ بازنگری شد.

صابر زارع، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران، (email: a.zare@sutech.ac.ir).

امیرحسین رجائی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران، (email: a.rajaei@sutech.ac.ir).

محمدرضا خیراتی، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران، (email: m.kheyрати@sutech.ac.ir).

محمد مردانه، دانشکده مهندسی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران، (email: mardaneh@sutech.ac.ir).



شکل ۱: مدل پیشنهادی DC-DC دوارودی-دو خروجی مبتنی بر اینورتر منبع امپدانسی T-Source اصلاح شده با سه سیم پیچ کوپل شده.

است. توپولوژی مدارهای MIC ایزوله با یک سیم پیچ اولیه برای مدل PCSC موازی نیز باید رنج ولتاژ خروجی منابع، نزدیک داشته باشد [۲۷].

در این مقاله ساختار جدیدی بر مبنای اتصال یکی از مدل‌های دسته PCSC به یکی از مدل‌های شبکه امپدانسی دارای ترانسفورماتور پیشنهاد شده است. باتری و پنل خورشیدی به عنوان ورودی می‌توانند به صورت هم‌زمان و کاملاً مستقل، بارها را تأمین کنند. مدل بوست به دلیل تعداد کم المان‌هایش به شبکه امپدانسی T-Source اصلاح شده با سه سیم پیچ کوپل شده متصل گردیده است. برای روش ردیابی نقطه ماکسیمم توان نیز از روش Hill Climbing استفاده شده که نسبت به روش‌های دیگر دارای پیاده‌سازی آسان، هزینه پایین و قابلیت استفاده در کاربردهای مختلف است [۲۸] تا [۳۰].

در ادامه در بخش ۲ ساختار مدل پیشنهادی توضیح داده شده و روابط حاکم بر آن در حالت پایدار به دست آمده است. در بخش ۳ مدیریت انرژی بین منابع و بار معرفی گردیده و در ساختار پیشنهادی به کار گرفته شده است. در بخش ۴ نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی و ساخت برای ساختار جدید دوارودی-دو خروجی برای مدل T-Source اصلاح شده با سه سیم پیچ کوپل شده ارائه گردیده و با یکدیگر مقایسه خواهند شد و در نهایت در بخش ۵ نتایج حاصل از این مقاله آمده است.

۲- مدل پیشنهادی و نحوه عملکرد آن

در این بخش ساختار مدل پیشنهادی و نحوه عملکرد آن در حالت پایدار توضیح داده شده است.

۲-۱ ساختار مدل پیشنهادی

مدار قدرت مدل ارائه شده در شکل ۱ نشان داده شده است. مدل بوست که از دسته مدل‌های PCSC است [۲۳] به خازن مدل T-Source متصل گردیده و به دلیل وجود سلف تزویج در ساختار T-Source یک خروجی ایزوله با سیم پیچ سوم ایجاد شده است. با استفاده از کلید SW_3 ولتاژ خروجی دوم R_2 را نیز می‌توان به طور مستقل از بار R_1 کنترل کرد. توان تولیدی از پنل خورشیدی ممکن است از مقدار مورد نیاز بارها بیشتر باشد، بنابراین یک منبع ذخیره‌کننده انرژی مانند باتری باید وجود داشته باشد تا توان اضافی در باتری ذخیره شود که جریان از طریق دیود درون ماسفت SW_3 وارد باتری می‌شود. اگر توان پنل خورشیدی کمتر از مقدار مورد نیاز بارها باشد مابقی توان از طریق منبع ورودی اول تأمین می‌شود. ساختار مدل بر پایه T-Source است و

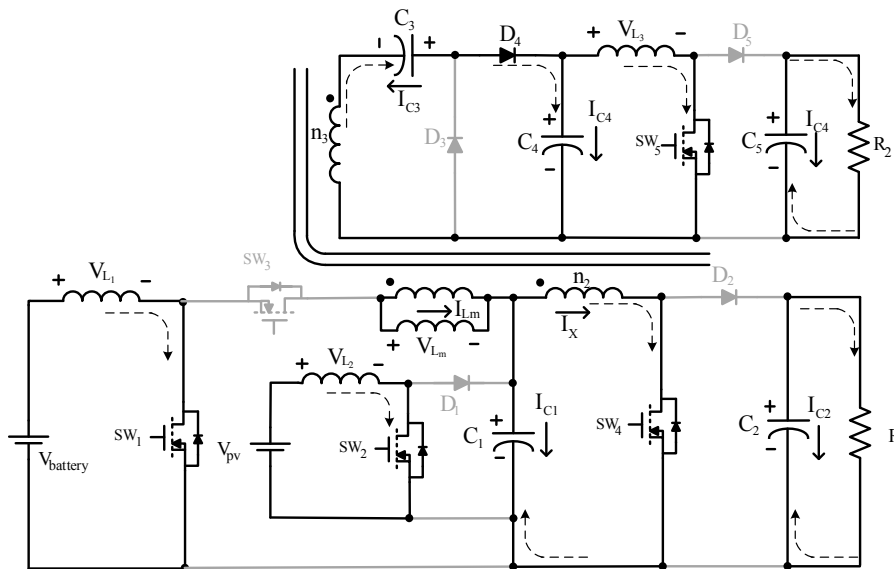
ZSI و QZSI حتی در حالت نسبت دور ترانس بالاتر از یک می‌باشد. این ساختار بسیاری از مشکلات ناشی از سازگاری الکترومغناطیسی را نیز برطرف می‌کند [۱۷]. با نفوذ بیشتر منابع انرژی تجدیدپذیر و تحمیل تنش‌های شبکه، برای اینورتر ضروری است که با وجود تغییر ولتاژ لینک DC در حالت اتصال به شبکه باقی بماند. استفاده از شبکه‌هایی مانند T-Source اصلاح شده با ویژگی‌های گفته شده برای پشتیبانی از لینک DC بسیار اهمیت دارد [۱۸].

مدل‌های چندورودی $(MIC)^1$ کاربردهای مهمی را در صنایع مختلف اعم از صنعت فضایی [۱۹]، وسایل نقلیه هیبریدی [۲۰] و موتورهای الکتریکی مغناطیس دائم [۲۱] به خود اختصاص داده‌اند. این مدل‌ها به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند [۱۰]:

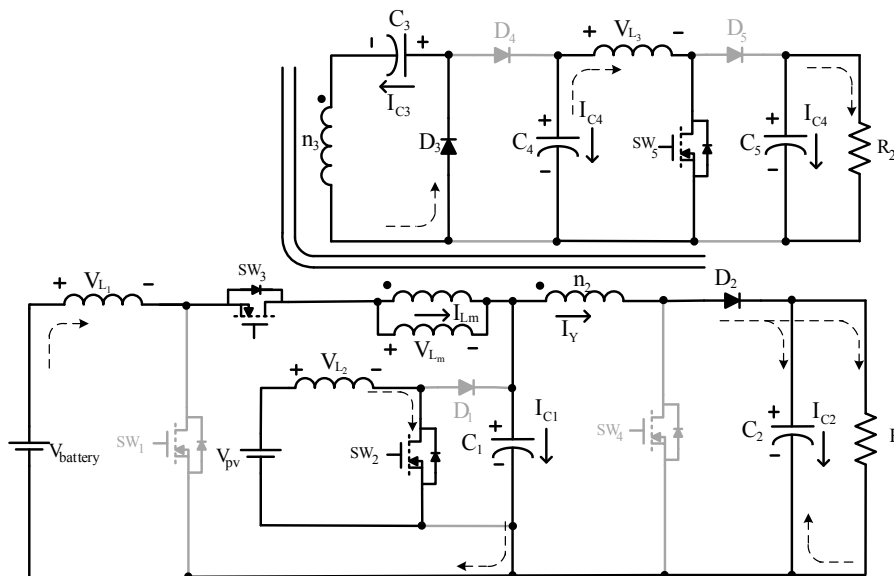
۱) ساختار با مدل‌های مجزا: هر ورودی دارای یک مدل مجزا می‌باشد. عیب عمده این ساختار هزینه ساخت آن است و در عمل یک ساختار بهینه به حساب نمی‌آید [۱۰].

۲) ساختار مجتمع: که در آن یک مدل به ورودی‌های مختلف متصل می‌باشد. در این ساختار، سیستم با به اشتراک گذاشتن المان‌های خود باعث کاهش هزینه، افزایش بهره‌وری و کاهش حجم و وزن می‌شود [۱۰]. این مدل‌ها به سه دسته مدل‌های کوپل شده مغناطیسی، الکتریکی و مدل‌های ایزوله با یک سیم پیچ اولیه تقسیم می‌شوند. مشکل اصلی مدل‌های چندورودی کوپل شده مغناطیسی این است که برای افزایش تعداد ورودی‌ها باید هسته را باز و یک سیم پیچ دیگر به هسته اضافه کرد [۲۲]. در ساختار اصلی مدل‌های کوپل شده الکتریکی، ترانسفورماتور وجود ندارد [۲۳] و [۲۴] اما تمام مدل‌ها را نمی‌توان با هم ترکیب کرد و یک مدل کوپل شده الکتریکی ساخت [۲۵]. مدل‌های ایزوله با یک سیم پیچ اولیه سبب کاهش استرس ولتاژ بر روی کلیدها و شار نشستی می‌شود و امکان افزایش تعداد ورودی‌ها راحت‌تر است [۲۶]. نحوه ارتباط با خروجی، مدل‌ها را به دو دسته مدل منبع پالس ولتاژ $(PVSC)^2$ و مدل منبع پالس جریان $(PCSC)^3$ تقسیم می‌کند [۲۳]. عیب توپولوژی مدارهای MIC ایزوله با یک سیم پیچ اولیه برای مدل PVSC سری این است که جریان عبوری از تمام منابع با هم برابر می‌باشد و برای حالت موازی قادر نبودن منابع به هدایت هم‌زمان

1. Multi Input Converter
2. Pulsating Voltage Source Cell
3. Pulsating Current Source Cell



شکل ۲: مدار معادل مبدل در حالت کاری اول.



شکل ۳: مدار معادل مبدل در حالت کاری دوم.

۲-۲ عملکرد حالت‌های کاری مبدل پیشنهادی

بر اساس جدول ۱ این شش نوع حالت مختلف کلیدزنی، هشت حالت متفاوت کاری برای مبدل پیشنهادی ایجاد می‌کند که هر هشت حالت در شکل‌های ۲ تا ۹ نشان داده شده است.

۲-۳ استخراج روابط حاکم بر مبدل پیشنهادی در حالت

کار پایدار

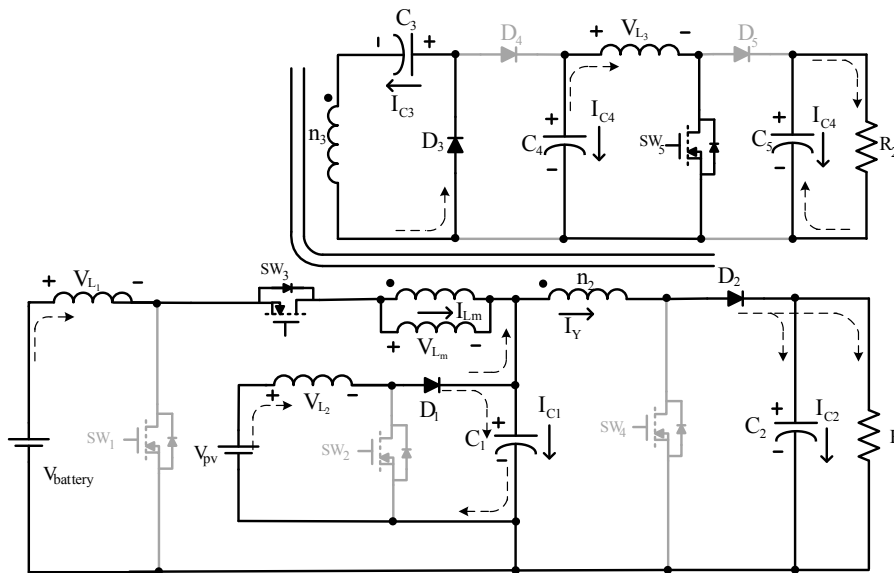
به منظور رعایت اختصار در نوشتن روابط مبدل پیشنهادی، تمامی کلیدها، دیودها و المان‌های دیگر ایده‌آل فرض شده‌اند. پس از نوشتن روابط مبدل برای هر حالت کاری می‌توان روابط کلی را برای مبدل پیشنهادی با استفاده از قانون تعادل ولت ثانیه برای سلف‌ها و ساده‌سازی و تعمیم آنها، روابط را به صورت زیر به دست آورد

$$V_{C_1} = \frac{n_1 V_{battery}}{n_1 D_{offsw1} - n_1 D_{onsw1}} \quad (1)$$

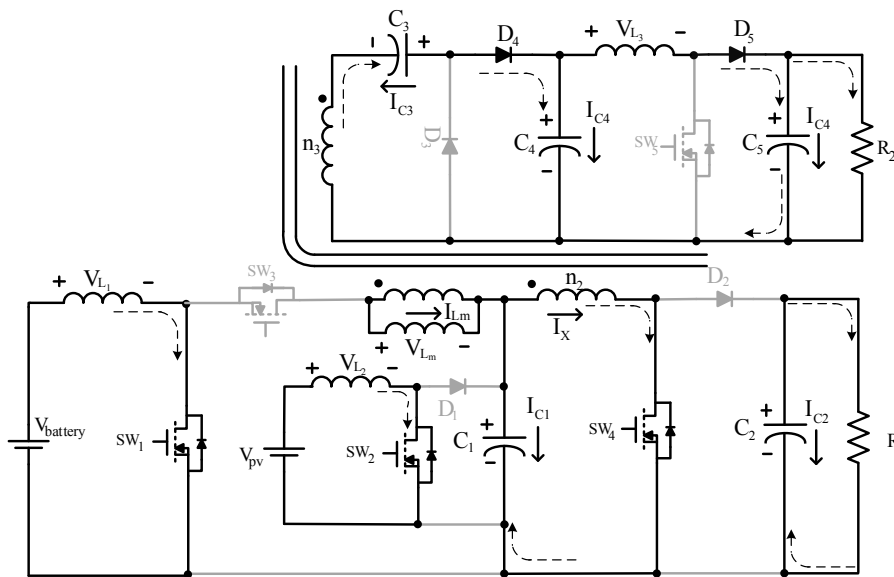
جدول ۱: حالت‌های کلیدزنی.

کلید	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم	حالت چهارم	حالت پنجم	حالت ششم	حالت هفتم	حالت هشتم
SW_1	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰
SW_2	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
SW_3	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۱
SW_4	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰
SW_5	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰

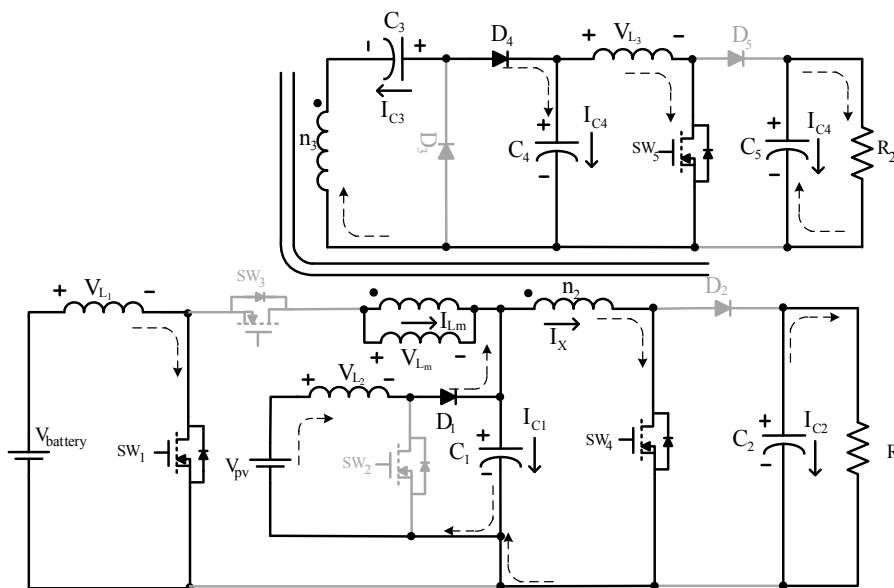
نمی‌توان جای باتری و پنل خورشیدی را جابه‌جا کرد چون پنل خورشیدی دارای توان متغیر است. ساختار T-Source به گونه‌ای است که هر گاه SW_4 روشن باشد کلید SW_3 خاموش است. زمانی که کلید SW_4 خاموش است بایستی مسیر دیگری برای جریان سلف L_1 باشد و بنابراین کلیدهای SW_1 و SW_2 هم‌زمان روشن و خاموش می‌شوند. برای پیوستگی جریان باتری از سلف L_1 و کلید SW_1 استفاده شده است. مبدل مورد نظر شش حالت کلیدزنی و هشت حالت کاری متفاوت دارد که در جدول ۱ نشان داده شده است.



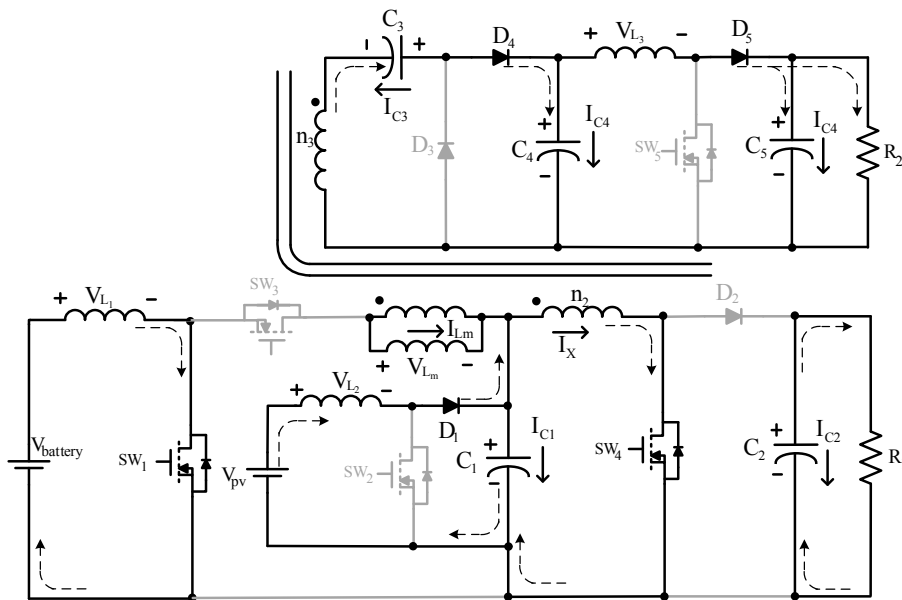
شکل ۴: مدار معادل مبدل در حالت کاری سوم.



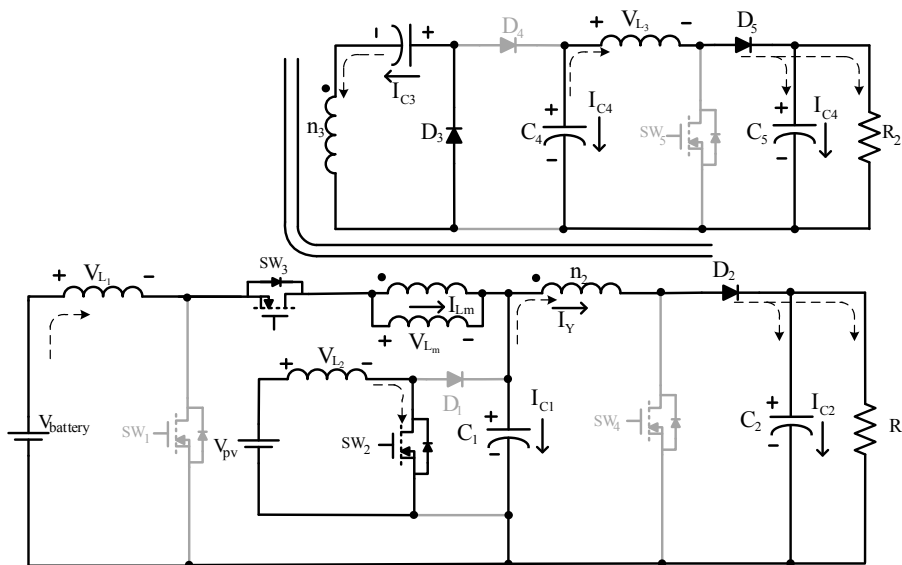
شکل ۵: مدار معادل مبدل در حالت کاری چهارم.



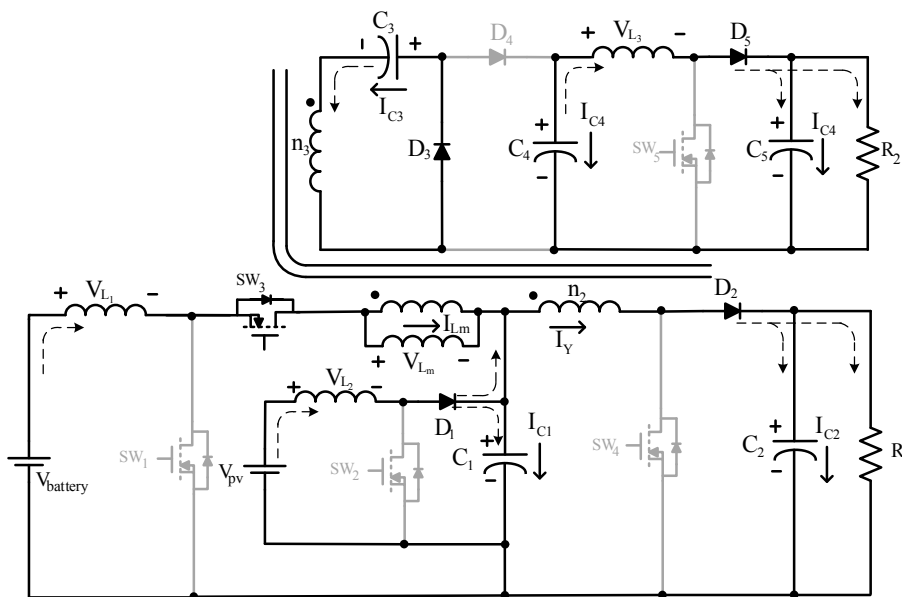
شکل ۶: مدار معادل مبدل در حالت کاری پنجم.



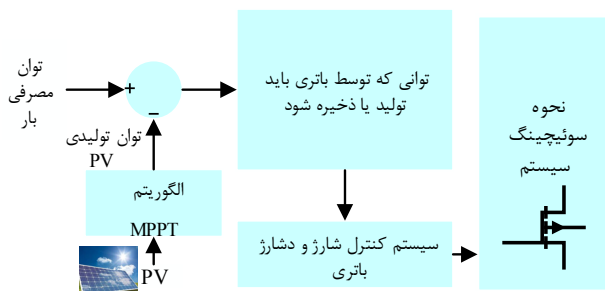
شکل ۷: مدار معادل مبدل در حالت کاری ششم.



شکل ۸: مدار معادل مبدل در حالت کاری هفتم.



شکل ۹: مدار معادل مبدل در حالت کاری هشتم.



شکل ۱۰: نحوه مدیریت انرژی در مبدل پیشنهادی.

مدیریت انرژی بین منابع و بار در این مقاله متناسب با توان مصرفی بار ایجاد می‌شود. مقدار توانی که از طریق پانل PV ایجاد می‌گردد با توان مصرفی بار سنجیده می‌شود و در صورتی که مقدار توان تولیدی پانل کمتر از توان مصرفی بار باشد، توان اضافی مورد نیاز بار از طریق باتری ایجاد می‌شود. اما در صورتی که توان تولیدی پانل PV بیشتر از توان مصرفی بار باشد، این توان در باتری ذخیره می‌شود. با در نظر گرفتن این الگوریتم و اعمال این مفاهیم در سیستم شارژ و دشارژ باتری، نحوه سوئیچینگ سیستم به دست می‌آید (شکل ۱۰).

۴- نتایج شبیه‌سازی و ساخت مبدل پیشنهادی

مبدل پیشنهادی ابتدا توسط سیمولینک متلب در سه سناریو تست متفاوت شبیه‌سازی گردیده و همچنین از الگوریتم Hill Climbing برای ردیابی ماکسیمم نقطه توان پانل خورشیدی بهره گرفته شده است [۳۱]. مبدل پیشنهادی دارای فیدبک برای کنترل ولتاژ خروجی است. برای اطمینان از کارکرد مناسب نمونه ساخته‌شده، مشابه شرایط شبیه‌سازی سه تست آورده شده و نتایج ساخت و شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۴-۱ نتایج شبیه‌سازی مبدل پیشنهادی

در شبیه‌سازی و ساخت آزمایشگاهی سه تست در نظر گرفته شده است. در تست شماره یک باتری به تنهایی بارها را تأمین می‌کند که برای نشان دادن قابلیت مبدل پیشنهادی برای تأمین بارها در زمانی که پانل توانی تولید نمی‌کند، طراحی شده است. در تست شماره دو توان دریافتی از پانل خورشیدی بیشتر از مقدار بارها بوده که این توان اضافی در باتری ذخیره می‌شود. در تست شماره سه باتری و پانل خورشیدی هر دو بارها را تأمین می‌کنند.

۴-۱-۱ تست شماره یک

در این تست پانل خورشیدی در مدار نیست و باتری به تنهایی بارها را تأمین می‌کند. داده‌های تست شماره یک در جدول ۳ و نتایج این تست در شکل ۱۱ آمده است.

۴-۱-۲ تست شماره دو

در این قسمت ابتدا بارها توسط باتری تأمین می‌شوند (تست شماره یک) و به مرور توان دریافتی از پانل خورشیدی و دوره کاری سوئیچ SW_1 افزایش می‌یابد. جریان باتری در تست قبل ۳/۴ آمپر است که با دریافت توان از پانل خورشیدی، جریان دریافتی از باتری به ۱/۹- آمپر می‌رسد و در ادامه با افزایش دوره کاری سوئیچ SW_1 جریان دریافتی از پانل خورشیدی به ۳/۶ آمپر می‌رسد. در این تست مقدار توانی که از پانل خورشیدی دریافت می‌شود بیشتر از مقدار مورد نظر بارها می‌باشد، بنابراین توان اضافی در باتری ذخیره می‌شود. داده‌های این تست در جدول ۴ و نتایج این تست در شکل ۱۲ آمده است.

جدول ۲: تنش ولتاژ و ماکسیمم جریان عبوری سوئیچ و دیود.

دستگاه	استرس ولتاژ	استرس جریان
SW_1	$\frac{n_1}{n_r}(V_{C_1} - V_{C_r}) + V_{C_1}$	$I_{battery}$
SW_r	V_{C_1}	I_{PV}
SW_r	$\frac{n_1}{n_r}(V_{C_1}) + V_{C_1}$	$I_{battery}$
SW_r	V_{C_r}	I_X
D_1	V_{C_1}	I_{PV}
D_r	V_{C_r}	I_Y
D_r	V_{C_r}	$-\frac{n_1}{n_r}(I_{L_1} - I_{L_m}) - \frac{n_r}{n_r} I_Y$
D_r	V_{C_r}	$-\frac{n_1}{n_r} I_{L_m} + \frac{n_r}{n_r} I_X$

که در آن n_1 ، n_r و n_r به ترتیب تعداد دور اولیه، ثانویه و ثالثیه ترانسفورمر می‌باشند که در شکل ۱ نشان داده شده و همچنین D_{onsw1} و D_{offsw1} به ترتیب دوره کاری روشن و خاموش شدن کلید ۱ است. ولتاژ خازن C_1 باید بزرگ‌تر از صفر باشد و بنابراین

$$n_r D_{offsw1} - n_1 D_{onsw1} > 0 \Rightarrow D_{onsw1} < \frac{n_r}{n_1} D_{offsw1} \quad (2)$$

$$V_{C_1} = \frac{V_{C_r}}{D_{offsw1}} \quad (3)$$

$$V_{C_r} = \frac{n_r}{n_r} (V_{C_r} - V_{C_1}) \quad (4)$$

$$V_{C_1} = \frac{n_r}{n_r} V_{C_1} + V_{C_r} \quad (5)$$

$$V_{C_1} = \frac{V_{C_r}}{D_{offsw1}} \quad (6)$$

$$I_Y = \frac{V_{C_r}}{R_r D_{offsw_r}} \quad (7)$$

$$I_{L_r} = \frac{V_{C_1}}{R_r D_{offsw1}} \quad (8)$$

$$I_X = \frac{\frac{n_r I_{L_r}}{D_{onsw1}} + (n_1 + n_r) I_Y D_{offsw1} - n_1 I_{L_r} D_{offsw_r}}{n_r - (n_1 + n_r) D_{onsw1}} \quad (9)$$

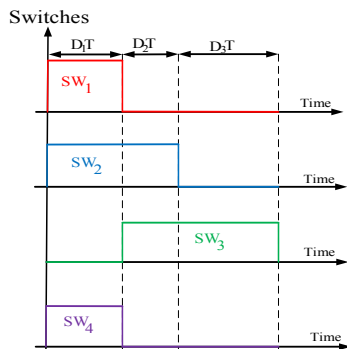
$$I_{L_1} = \frac{I_X D_{onsw1} + I_Y D_{offsw1} - I_{L_r} D_{offsw_r}}{D_{offsw1}} \quad (10)$$

$$I_{L_m} = \frac{n_r I_X D_{onsw1} - n_r I_{L_r}}{n_1 D_{onsw1}} \quad (11)$$

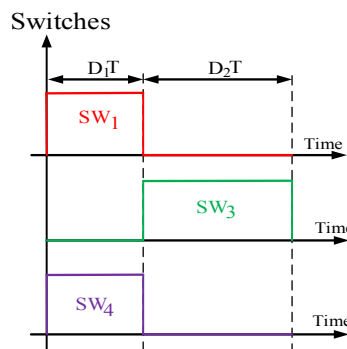
تنش ولتاژ و ماکسیمم جریان عبوری از سوئیچ‌ها و دیودها برای انتخاب مناسب در شبیه‌سازی و ساخت در جدول ۲ نشان داده شده است.

۳- مدیریت انرژی بین منابع و بار

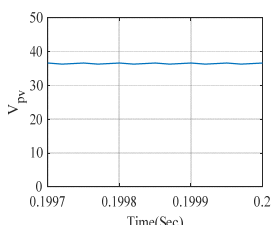
سیستم مدیریت انرژی باید طوری طراحی و ملاحظه شود که ذخیره‌سازی انرژی باتری و یا استفاده از آن در شرایط ضروری، کاهش نوسانات توان خروجی و بهینه‌سازی انتقال توان را به دنبال داشته باشد.



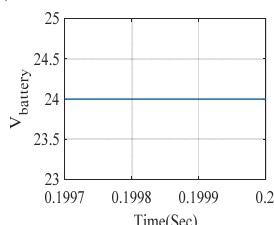
(الف)



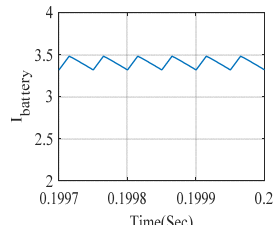
(الف)



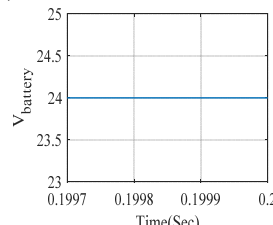
(ج)



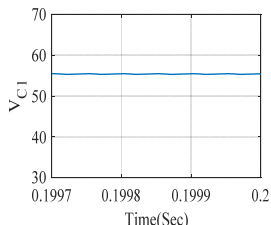
(ب)



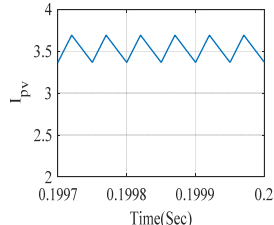
(ج)



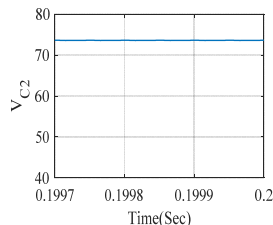
(ب)



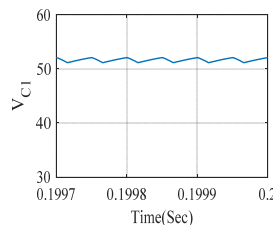
(ه)



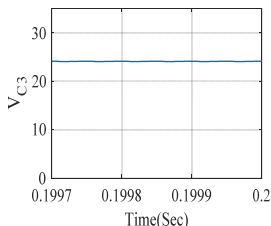
(د)



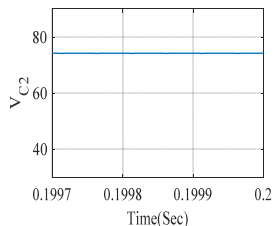
(ه)



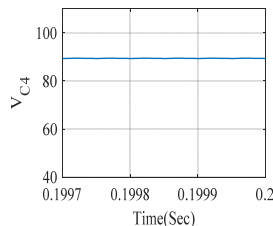
(د)



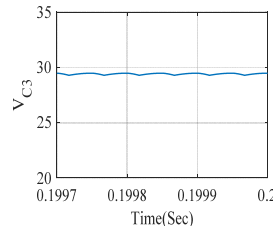
(ز)



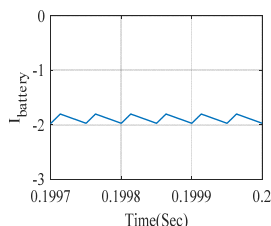
(و)



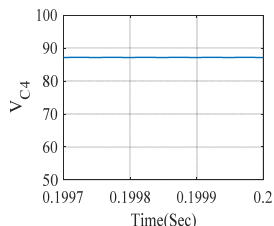
(ز)



(و)



(ط)



(ح)

شکل ۱۲: نتایج شبیه‌سازی تست شماره دو، (الف) روش کلیدزنی، (ب) ولتاژ خروجی باتری، (ج) ولتاژ خروجی پائل PV، (د) جریان خروجی پائل PV، (ه) ولتاژ خازن c_1 ، (و) ولتاژ خازن c_2 ، (ز) ولتاژ خازن c_3 ، (ح) ولتاژ خازن c_4 و (ط) جریان باتری.

۴-۲ نتایج ساخت مبدل پیشنهادی

برای تأیید نتایج تحلیل تئوری و روابط به دست آمده و همچنین بررسی نتایج شبیه‌سازی، نتایج تست عملی بر روی یک نمونه ساخته شده در مقیاس آزمایشگاهی (شکل ۱۴) در این بخش آمده است. برای ایجاد یک شرایط یکسان مقادیر راه‌اندازی برای هر سه تست یک، دو و سه به ترتیب همانند جدول ۳، ۴ و ۵ می‌باشد. مدل ساخته شده دارای حلقه بسته کنترلی برای کنترل هر دو ولتاژ خروجی می‌باشد. در تست شماره یک باتری به تنهایی بارها را تأمین می‌کند. شکل ۱۵- ب تغییرات جریان باتری را نشان می‌دهد که ابتدا جریان ۳/۴ آمپر از باتری دریافت می‌شود،

شکل ۱۱: نتایج شبیه‌سازی تست شماره یک، (الف) روش کلیدزنی، (ب) ولتاژ خروجی باتری، (ج) جریان باتری، (د) ولتاژ خازن c_1 ، (ه) ولتاژ خازن c_2 ، (و) ولتاژ خازن c_3 و (ز) ولتاژ خازن c_4 .

جدول ۳: مشخصات تست شماره ۱ در شبیه‌سازی مبدل پیشنهادی.

اندازه	پارامتر	
$V_{battery} = 24V$	ولتاژ باتری	
$V_{pv} = 0V$	ولتاژ و جریان پائل خورشیدی	
$I_{pv} = 0A$	در نقطه ماکسیمم توان	
$n_1 = 1, n_2 = 1, n_3 = 1, n_4 = 1, n_5 = 1, n_6 = 1, n_7 = 1, n_8 = 1, n_9 = 1, n_{10} = 1, n_{11} = 1, n_{12} = 1, n_{13} = 1, n_{14} = 1, n_{15} = 1, n_{16} = 1, n_{17} = 1, n_{18} = 1, n_{19} = 1, n_{20} = 1, n_{21} = 1, n_{22} = 1, n_{23} = 1, n_{24} = 1, n_{25} = 1, n_{26} = 1, n_{27} = 1, n_{28} = 1, n_{29} = 1, n_{30} = 1, n_{31} = 1, n_{32} = 1, n_{33} = 1, n_{34} = 1, n_{35} = 1, n_{36} = 1, n_{37} = 1, n_{38} = 1, n_{39} = 1, n_{40} = 1, n_{41} = 1, n_{42} = 1, n_{43} = 1, n_{44} = 1, n_{45} = 1, n_{46} = 1, n_{47} = 1, n_{48} = 1, n_{49} = 1, n_{50} = 1, n_{51} = 1, n_{52} = 1, n_{53} = 1, n_{54} = 1, n_{55} = 1, n_{56} = 1, n_{57} = 1, n_{58} = 1, n_{59} = 1, n_{60} = 1, n_{61} = 1, n_{62} = 1, n_{63} = 1, n_{64} = 1, n_{65} = 1, n_{66} = 1, n_{67} = 1, n_{68} = 1, n_{69} = 1, n_{70} = 1, n_{71} = 1, n_{72} = 1, n_{73} = 1, n_{74} = 1, n_{75} = 1, n_{76} = 1, n_{77} = 1, n_{78} = 1, n_{79} = 1, n_{80} = 1, n_{81} = 1, n_{82} = 1, n_{83} = 1, n_{84} = 1, n_{85} = 1, n_{86} = 1, n_{87} = 1, n_{88} = 1, n_{89} = 1, n_{90} = 1, n_{91} = 1, n_{92} = 1, n_{93} = 1, n_{94} = 1, n_{95} = 1, n_{96} = 1, n_{97} = 1, n_{98} = 1, n_{99} = 1, n_{100} = 1$	تعداد دور سیم‌پیچ‌های ترانسفورمر	
1 mH	مقدار سلف‌های $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8, L_9, L_{10}, L_{11}, L_{12}, L_{13}, L_{14}, L_{15}, L_{16}, L_{17}, L_{18}, L_{19}, L_{20}, L_{21}, L_{22}, L_{23}, L_{24}, L_{25}, L_{26}, L_{27}, L_{28}, L_{29}, L_{30}, L_{31}, L_{32}, L_{33}, L_{34}, L_{35}, L_{36}, L_{37}, L_{38}, L_{39}, L_{40}, L_{41}, L_{42}, L_{43}, L_{44}, L_{45}, L_{46}, L_{47}, L_{48}, L_{49}, L_{50}, L_{51}, L_{52}, L_{53}, L_{54}, L_{55}, L_{56}, L_{57}, L_{58}, L_{59}, L_{60}, L_{61}, L_{62}, L_{63}, L_{64}, L_{65}, L_{66}, L_{67}, L_{68}, L_{69}, L_{70}, L_{71}, L_{72}, L_{73}, L_{74}, L_{75}, L_{76}, L_{77}, L_{78}, L_{79}, L_{80}, L_{81}, L_{82}, L_{83}, L_{84}, L_{85}, L_{86}, L_{87}, L_{88}, L_{89}, L_{90}, L_{91}, L_{92}, L_{93}, L_{94}, L_{95}, L_{96}, L_{97}, L_{98}, L_{99}, L_{100}$	مقدار سلف‌های $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8, L_9, L_{10}, L_{11}, L_{12}, L_{13}, L_{14}, L_{15}, L_{16}, L_{17}, L_{18}, L_{19}, L_{20}, L_{21}, L_{22}, L_{23}, L_{24}, L_{25}, L_{26}, L_{27}, L_{28}, L_{29}, L_{30}, L_{31}, L_{32}, L_{33}, L_{34}, L_{35}, L_{36}, L_{37}, L_{38}, L_{39}, L_{40}, L_{41}, L_{42}, L_{43}, L_{44}, L_{45}, L_{46}, L_{47}, L_{48}, L_{49}, L_{50}, L_{51}, L_{52}, L_{53}, L_{54}, L_{55}, L_{56}, L_{57}, L_{58}, L_{59}, L_{60}, L_{61}, L_{62}, L_{63}, L_{64}, L_{65}, L_{66}, L_{67}, L_{68}, L_{69}, L_{70}, L_{71}, L_{72}, L_{73}, L_{74}, L_{75}, L_{76}, L_{77}, L_{78}, L_{79}, L_{80}, L_{81}, L_{82}, L_{83}, L_{84}, L_{85}, L_{86}, L_{87}, L_{88}, L_{89}, L_{90}, L_{91}, L_{92}, L_{93}, L_{94}, L_{95}, L_{96}, L_{97}, L_{98}, L_{99}, L_{100}$
1.33 mH	مقدار سلف L_r	
$220\text{ }\mu\text{F}$	مقدار خازن‌های $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}, C_{17}, C_{18}, C_{19}, C_{20}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}, C_{25}, C_{26}, C_{27}, C_{28}, C_{29}, C_{30}, C_{31}, C_{32}, C_{33}, C_{34}, C_{35}, C_{36}, C_{37}, C_{38}, C_{39}, C_{40}, C_{41}, C_{42}, C_{43}, C_{44}, C_{45}, C_{46}, C_{47}, C_{48}, C_{49}, C_{50}, C_{51}, C_{52}, C_{53}, C_{54}, C_{55}, C_{56}, C_{57}, C_{58}, C_{59}, C_{60}, C_{61}, C_{62}, C_{63}, C_{64}, C_{65}, C_{66}, C_{67}, C_{68}, C_{69}, C_{70}, C_{71}, C_{72}, C_{73}, C_{74}, C_{75}, C_{76}, C_{77}, C_{78}, C_{79}, C_{80}, C_{81}, C_{82}, C_{83}, C_{84}, C_{85}, C_{86}, C_{87}, C_{88}, C_{89}, C_{90}, C_{91}, C_{92}, C_{93}, C_{94}, C_{95}, C_{96}, C_{97}, C_{98}, C_{99}, C_{100}$	مقدار خازن‌های $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}, C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}, C_{17}, C_{18}, C_{19}, C_{20}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}, C_{25}, C_{26}, C_{27}, C_{28}, C_{29}, C_{30}, C_{31}, C_{32}, C_{33}, C_{34}, C_{35}, C_{36}, C_{37}, C_{38}, C_{39}, C_{40}, C_{41}, C_{42}, C_{43}, C_{44}, C_{45}, C_{46}, C_{47}, C_{48}, C_{49}, C_{50}, C_{51}, C_{52}, C_{53}, C_{54}, C_{55}, C_{56}, C_{57}, C_{58}, C_{59}, C_{60}, C_{61}, C_{62}, C_{63}, C_{64}, C_{65}, C_{66}, C_{67}, C_{68}, C_{69}, C_{70}, C_{71}, C_{72}, C_{73}, C_{74}, C_{75}, C_{76}, C_{77}, C_{78}, C_{79}, C_{80}, C_{81}, C_{82}, C_{83}, C_{84}, C_{85}, C_{86}, C_{87}, C_{88}, C_{89}, C_{90}, C_{91}, C_{92}, C_{93}, C_{94}, C_{95}, C_{96}, C_{97}, C_{98}, C_{99}, C_{100}$
$D_1 = 31\%, D_2 = 69\%$	دوره کاری سوئیچ‌ها	
$R_1 = 160\text{ }\Omega, R_2 = 240\text{ }\Omega$	بار خروجی	
$f_s = 20\text{ kHz}$	فرکانس کلیدزنی	

۴-۱-۳ تست شماره سه

در این تست باتری و پائل خورشیدی هر دو بارها را تأمین می‌کنند. داده‌های این تست در جدول ۵ و نتایج این تست در شکل ۱۳ آمده است.

جدول ۴: مشخصات تست شماره ۲ در شبیه‌سازی مبدل پیشنهادی.

اندازه	پارامتر
$V_{battery} = 24V$	ولتاژ باتری
$V_{pv} = 36.5V$	ولتاژ و جریان پانل خورشیدی
$I_{pv} = 3.6A$	در نقطه ماکسیم توان
$n_1 = 1, n_2 = 1, n_3 = 1, n_4 = 1, n_5 = 1$	تعداد دور سیم‌پیچ‌های ترانسفورمر
$1mH$	مقدار سلف‌های L_m و L_r ، L_1
$1.33mH$	مقدار سلف L_r
$220\mu F$	مقدار خازن‌های C_0 و C_1 ، C_2 ، C_3 ، C_4 ، C_5
$D_1 = 26\%, D_2 = 14\%$	دوره کاری سوئیچ‌ها
$D_3 = 60\%$	
$R_1 = 160\Omega, R_2 = 240\Omega$	بار خروجی
$f_s = 20kHz$	فرکانس کلیدزنی

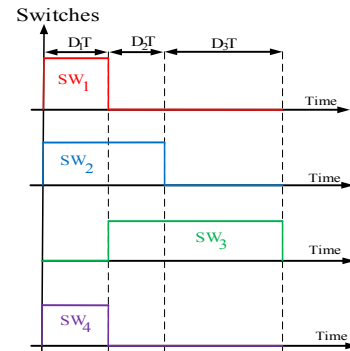
جدول ۵: مشخصات تست شماره ۳ در شبیه‌سازی مبدل پیشنهادی.

اندازه	پارامتر
$V_{battery} = 24V$	ولتاژ باتری
$V_{pv} = 47.4V$	ولتاژ و جریان پانل خورشیدی
$I_{pv} = 3.5A$	در ماکسیم توان
$n_1 = 1, n_2 = 1, n_3 = 1, n_4 = 1, n_5 = 1$	تعداد دور سیم‌پیچ‌های ترانسفورمر
$1mH$	مقدار سلف‌های L_m و L_r ، L_1
$1.33mH$	مقدار سلف L_r
$220\mu F$	مقدار خازن‌های C_0 و C_1 ، C_2 ، C_3 ، C_4 ، C_5
$D_1 = 19\%, D_2 = 7\%$	دوره کاری سوئیچ‌ها
$D_3 = 74\%$	
$R_1 = 160\Omega, R_2 = 240\Omega$	بار خروجی
$f_s = 20kHz$	فرکانس کلیدزنی

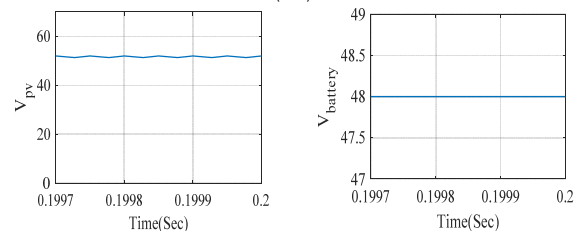
می‌کند و اگر توان تولیدی بیشتر از نیاز بارها باشد، توان اضافی در باتری تأمین می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک ساختار جدید از مبدل‌های DC-DC دوورودی و دوخروجی مبتنی بر مبدل منبع امیدانسی T-Source برای اتصال به سیستم‌های انرژی‌های تجدیدپذیر ارائه شد. یکی از خروجی‌ها ایزوله و دیگری غیر ایزوله است. در این ساختار یک منبع ورودی پانل خورشیدی و دیگری یک باتری است به طوری که می‌تواند به صورت کاملاً مستقل و هم‌زمان، بارها را تأمین کنند. ورودی متصل به باتری یک ورودی دوطرفه می‌باشد که توانایی عبور توان در دو سمت را داشته و در نتیجه می‌تواند باتری را شارژ یا دشارژ کند. الگوریتم Hill Climbing برای ردیابی نقطه ماکسیم توان پانل خورشیدی استفاده شده است. یکی از مزیت‌های این ساختار آن است که با افزودن تعداد سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور می‌توان تعداد خروجی‌ها را افزایش داد و خروجی ایزوله ایجاد کرد. عدم نیاز به اینورتر مستقل برای بارهای AC، عدم محدودیت در کلیدزنی و رسیدن به بهره ولتاژ بالا از ویژگی‌های دیگر مبدل پیشنهادی است. با اضافه‌شدن پانل خورشیدی به مدار، جریان سلف مغناطیس‌کنندگی، کم و باعث افزایش بازدهی مبدل می‌شود. این مبدل می‌تواند کاملاً مستقل از شبکه عمل کند ولی در عین حال دارای معایبی نظیر وابسته‌بودن مبدل به جریان سلف مغناطیس‌کنندگی و ایزوله‌نبودن منابع ورودی از یکدیگر می‌باشد. سه سناریو برای شبیه‌سازی و ساخت

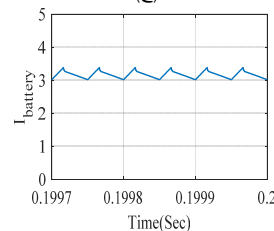


(الف)

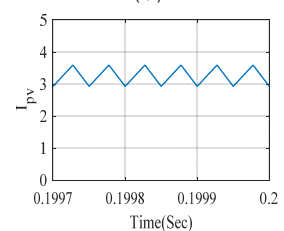


(ج)

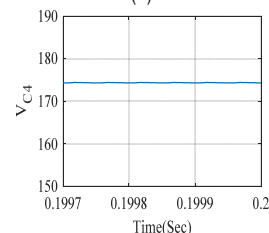
(ب)



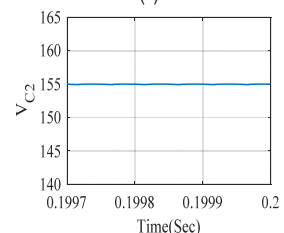
(د)



(ه)



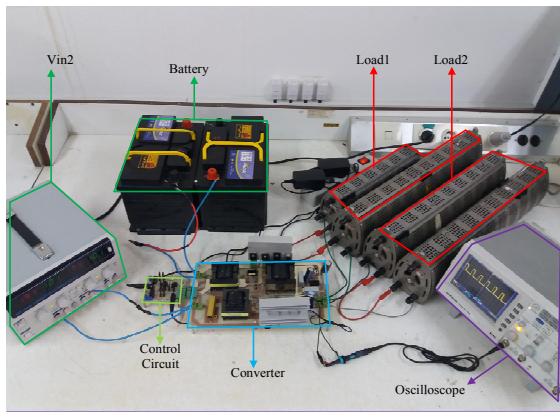
(و)



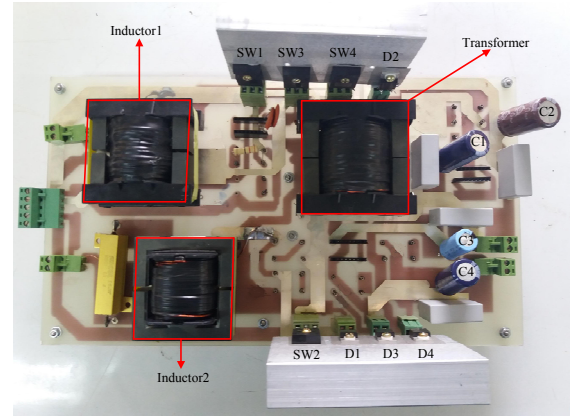
(ز)

شکل ۱۳: نتایج شبیه‌سازی تست شماره دو، (الف) روش کلیدزنی، (ب) ولتاژ خروجی باتری، (ج) ولتاژ خروجی پانل PV، (د) جریان خروجی پانل PV، (ه) جریان باتری، (و) ولتاژ خازن C_4 و (ز) ولتاژ خازن C_2 .

در ادامه با رفتن به تست دو و دریافت توان از پانل خورشیدی جریان باتری کم شده و به مقدار $1/9$ - آمپر می‌رسد (شکل ۱۶- الف) که این جریان منفی به معنای مد کاری شارژر باتری می‌باشد. دوره کاری کلید SW_1 به کمک فیدبک حلقه بسته کنترل می‌شود تا ولتاژهای خروجی تغییر نکنند. در این تست مقدار توانی که از پانل خورشیدی دریافت می‌شود بیشتر از مقدار مورد نیاز بارها بوده و بنابراین توان اضافی باتری را شارژ می‌کند. ثابت‌بودن ولتاژ خروجی نشان‌دهنده توانایی کنترل‌کننده می‌باشد. در تست سوم هر دو منبع، توان مورد نیاز بارها را تأمین می‌کنند. مطابق با شکل ۱۷- الف و ب به ترتیب از هر دو منبع باتری و پانل خورشیدی توان گرفته می‌شود. توان دریافتی از باتری معادل ۱۶۸ وات و پانل خورشیدی معادل ۱۷۰ وات است که در مجموع توانی معادل ۱۶۹ وات به بارها داده می‌شود. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی سیمولینک متلب و نمونه ساخته‌شده مبدل پیشنهادی صحت و درستی طراحی و ساخت مبدل تأیید می‌شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد که پانل‌های خورشیدی بدون هیچ گونه محدودیتی، توان خود را به مبدل تزریق می‌کنند. در صورتی که این توان کمتر از نیاز بارها باشد، باتری مابقی توان مورد نیاز را تأمین



(ب)

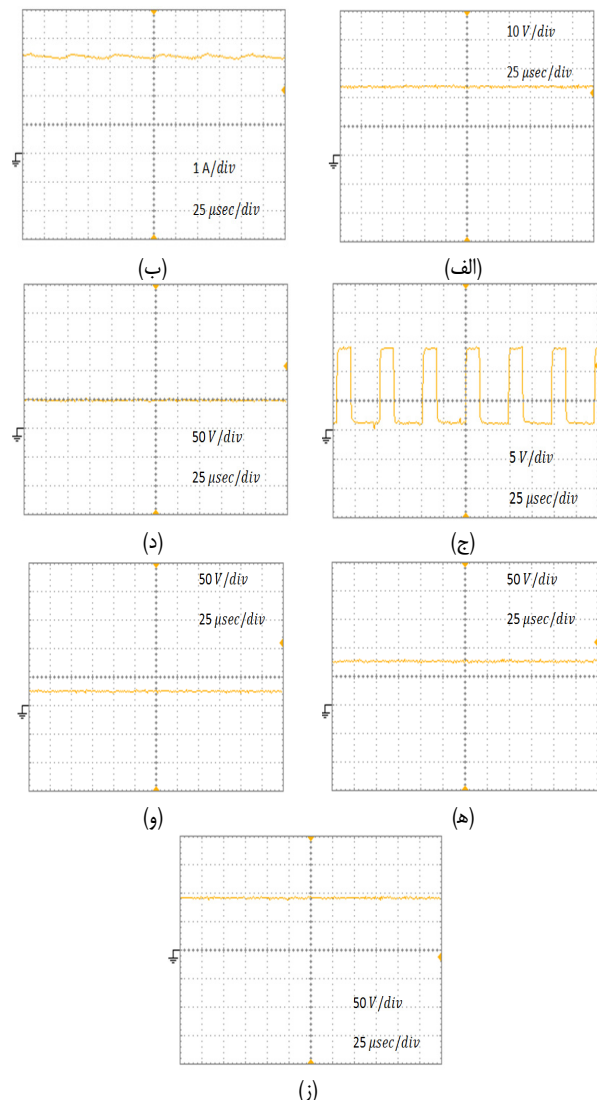


(الف)

شکل ۱۴: تصویری از نمونه ساخته شده، (الف) مبدل ساخته شده و (ب) تست آزمایشگاهی.

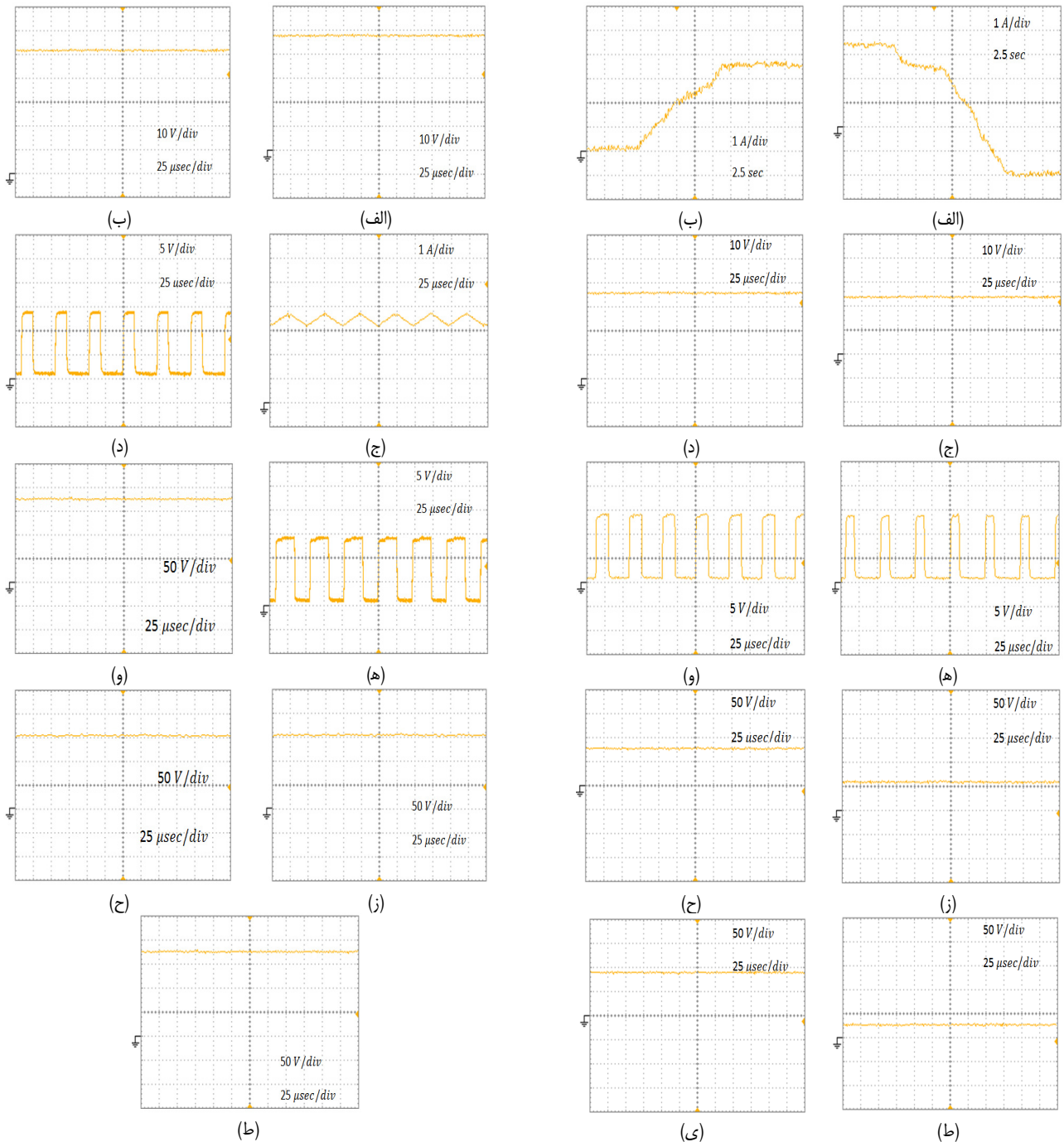
مراجع

- [1] Y. Riffoneau, S. Bacha, F. Barruel, and S. Ploix, "Optimal power flow management for grid connected PV systems with batteries," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 2, no. 3, pp. 309-320, Jul. 2011.
- [2] A. Sharma, et al., "Performance assessment of building integrated photovoltaic and battery energy system: a case study of TERI-retreat facility in India," in *Proc. 4th IEEE In. Conf. on Smart and Sustainable Technologies*, 5 pp., Split, Croatia, 18-21 Jun. 2019.
- [3] X. Li and S. Wang, "A review on energy management, operation control and application methods for grid battery energy storage systems," *CSEE J. of Power and Energy Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 181-185, Jun. 2019.
- [4] L. A. Fletscher, L. A. Suarez, D. Grace, C. V. Peroni, and J. M. Maestre, "Energy-aware resource management in heterogeneous cellular networks with hybrid energy sources," *IEEE Trans. on Network and Service Management*, vol. 16, no. 1, pp. 279-293, Aug. 2018.
- [5] G. Barchi, G. Miori, D. Moser, and S. Papantoniou, "A small-scale prototype for the optimization of PV generation and battery storage through the use of a building energy management system," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*, 5 pp., Palermo, Italy, 12-15 Jun. 2018.
- [6] C. L. Shen and S. H. Yang, "Multi-input converter with MPPT feature for wind-PV power generation system," *International J. of Photoenergy*, vol. 24, no. 1, pp. 100-113, Apr. 2013.
- [7] Y. M. Chen, Y. C. Liu, and F. Y. Wu, "Multiinput converter with power factor correction, maximum power point tracking, and ripple-free input currents," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 19, no. 3, pp. 631-639, May 2004.
- [8] C. W. Chen, K. H. Chen, and Y. M. Chen, "A semi-isolated multi-input converter for hybrid PV/wind power charger system," in *Proc. Int. Power Electronics Conf., IPEC-Hiroshima 2014-ECCE-ASIA*, pp. 3592-3597, Hiroshima, Japan, 18-21 May 2014.
- [9] Y. M. Chen, Y. C. Liu, S. C. Hung, and C. S. Cheng, "Multi-input inverter for grid-connected hybrid PV/wind power system," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 22, no. 3, pp. 1070-1077, May 2007.
- [10] S. Kashif and M. Saqib, "Multiplexed control strategy for a multi-input converter using fuzzy logic algorithm," *Electronics Letters*, vol. 52, no. 15, pp. 1327-1329, Jul. 2016.
- [11] B. Mangu and B. Fernandes, "Multi-input transformer coupled DC-DC converter for PV-wind based stand-alone single-phase power generating system," in *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE'14*, pp. 5288-5295, Pittsburgh, PA, USA, 14-18 Sept. 2014.
- [12] B. Liu, S. Duan, and T. Cai, "Photovoltaic DC-building-module-based BIPV system-concept and design considerations," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 26, no. 5, pp. 1418-1429, Oct. 2011.
- [13] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, and A. Lazaro, "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, no. 11, pp. 1555-1578, May 2006.



شکل ۱۵: نتایج ساخت تست شماره یک، (الف) ولتاژ باتری، (ب) جریان باتری، (ج) سیکل وظیفه SW_1 ، (د) ولتاژ خازن C_1 ، (ه) ولتاژ خازن C_2 ، (و) ولتاژ خازن C_3 و (ز) ولتاژ خازن C_4 .

استفاده شد که این سه سناریو برای نشان دادن قابلیت های مبدل طراحی شده بود. تطابق نتایج شبیه سازی و ساخت مؤید عملکرد صحیح مبدل پیشنهادی است.



شکل ۱۷: نتایج ساخت تست شماره سه، (الف) ولتاژ باتری، (ب) ولتاژ پانل خورشیدی، (ج) جریان پانل خورشیدی، (د) سیکل وظیفه SW_1 ، (ه) سیکل وظیفه SW_2 ، (و) ولتاژ خازن C_1 ، (ز) ولتاژ خازن C_2 ، (ح) ولتاژ خازن C_3 و (ط) ولتاژ خازن C_4 .

شکل ۱۶: نتایج ساخت تست شماره دو، (الف) تغییرات باتری، (ب) تغییرات جریان پانل خورشیدی، (ج) ولتاژ باتری، (د) ولتاژ پانل خورشیدی، (ه) سیکل وظیفه SW_1 ، (و) سیکل وظیفه SW_2 ، (ز) ولتاژ خازن C_1 ، (ح) ولتاژ خازن C_2 ، (ط) ولتاژ خازن C_3 و (ی) ولتاژ خازن C_4 .

Int. Conf. on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES'18, 6 pp., Chennai, India, 18-21 Dec. 2018.

- [19] Z. Qian, O. Abdel-Rahman, H. Al-Atrash, and I. Batarseh, "Modeling and control of three-port DC/DC converter interface for satellite applications," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 25, no. 3, pp. 637-649, Oct. 2010.
- [20] T. Bhattacharya, V. S. Giri, K. Mathew, and L. Umanand, "Multiphase bidirectional flyback converter topology for hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 1, pp. 78-84, Oct. 2009.
- [21] F. Caricchi, F. Crescimbeni, G. Noia, and D. Pirolo, "Experimental study of a bidirectional DC-DC converter for the DC link voltage control and the regenerative braking in PM motor drives devoted to electrical vehicles," in *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf. and Exposition, ASPEC'94*, pp. 381-386, Orlando, FL, USA, 13-17 Feb. 1994.
- [22] Y. M. Chen, Y. C. Liu, and F. Y. Wu, "Multi-input DC/DC converter based on the multiwinding transformer for renewable energy
- [14] F. Locment, M. Sechilariu, and I. Houssamo, "Batteries and DC charge control of stand-alone photovoltaic system: experimental validation," in *Proc. Power Electronics and Motion Control Conf., EPE/PEMC'10*, pp. T12-43-T12-48, Ohrid, Macedonia, 6-8 Sept. 2010.
- [15] P. Siwakoti, F. Peng, F. Blaabjerg, P. Chiang Loh, and G. E. Town, "Impedance source networks for electric power conversion part i: a topological review," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 30, no. 2, pp. 699-716, Mar. 2015.
- [16] P. C. Loh and F. Blaabjerg, "Magnetically coupled impedance-source inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 49, no. 5, pp. 2177-2187, May 2013.
- [17] M. K. Nguyen, Y. C. Lim, and Y. G. Kim, "TZ-source inverters," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 12, pp. 5686-5695, Nov. 2013.
- [18] A. Narula and V. Verma, "PV fed cascaded modified T source converter for DC support to grid coupled inverters," in *Proc. IEEE*

صابر زارع در سال ۱۳۹۷ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی شیراز دریافت نمود. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل ساخت و کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت، کاربرد الکترونیک قدرت در سیستم‌های انرژی و ماشین‌های الکتریکی می‌باشد.

امیرحسین رجایی در سال ۱۳۸۵ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شیراز، و در سال ۱۳۸۷ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق را از دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود. در سال ۱۳۹۲ موفق به اخذ درجه دکترا در رشته مهندسی برق از دانشگاه تربیت مدرس تهران گردید. دکتر رجایی هم‌اکنون استادیار و عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی شیراز می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند الکترونیک قدرت، طراحی کنترل و ساخت مبدل‌های الکترونیک قدرت، انرژی‌های تجدیدپذیر و ماشین‌های الکتریکی است.

محمد رضا خیراتی در سال ۱۳۹۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق را از دانشگاه شهید چمران اهواز و در سال ۱۳۹۸ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی شیراز دریافت نمود. ایشان هم‌اکنون دانش‌آموخته این دانشگاه محسوب می‌شود.

محمد مردانه تحصیلات خود را در سه مقطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی برق - قدرت را در سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۸۳ و ۱۳۸۷ به ترتیب از دانشگاه‌های شیراز، صنعتی امیر کبیر و صنعتی امیر کبیر به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شیراز می‌باشد. در حال حاضر زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل کاربرد مبدل‌های الکترونیک قدرت در شبکه‌های توزیع و طراحی و مدل‌سازی ماشین‌های الکتریکی است.

- applications," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 38, no. 4, pp. 1096-1104, Aug. 2002.
- [23] Y. C. Liu and Y. M. Chen, "A systematic approach to synthesizing multi-input DC-DC converters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 24, no. 1, pp. 116-127, Feb. 2009.
- [24] X. Sun, Y. Zhou, W. Wang, B. Wang, and Z. Zhang, "Alternative source-port-tolerant series-connected double-input DC-DC converter," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 30, no. 5, pp. 2733-2742, Aug. 2015.
- [25] Y. Li, X. Ruan, D. Yang, F. Liu, and C. K. Tse, "Synthesis of multiple-input DC/DC converters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 25, no. 9, pp. 2372-2385, Apr. 2010.
- [26] Q. Wang, J. Zhang, X. Ruan, and K. Jin, "A double-input flyback DC/DC converter with single primary winding," *Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE'10*, pp. 1938-1944, Atlanta, GA, USA, 12-16 Sept. 2010.
- [27] Q. Wang, J. Zhang, X. Ruan, and K. Jin, "Isolated single primary winding multiple-input converters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 26, no. 12, pp. 3435-3442, Sept. 2011.
- [28] B. Subudhi and R. Pradhan, "A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 89-98, Jul. 2013.
- [29] M. A. Elgendy, B. Zahawi, and D. J. Atkinson, "Assessment of perturb and observe MPPT algorithm implementation techniques for PV pumping applications," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 21-33, Dec. 2012.
- [30] M. A. Elgendy, B. Zahawi, and D. J. Atkinson, "Operating characteristics of the P&O algorithm at high perturbation frequencies for standalone PV systems," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 30, no. 1, pp. 189-198, Jul. 2015.
- [31] C. Zhang, D. Zhao, J. Wang, and G. Chen, "A modified MPPT method with variable perturbation step for photovoltaic system," in *Proc. Power Electronics and Motion Control Conf.*, pp. 2096-2099, Wuhan, China, 17-20 May 2009.