

Design and Implementation of a Non-Isolated Multi-Port Converter with High Voltage Gain

Moein Shahsavari¹, M.Sc, Sayyed Mohammad Mehdi Mirtalaei^{1, 2}, Assistant Professor

¹Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

²Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najaf Abad, Iran
moein137024@yahoo.com, m.mirtalaei@pel.iaun.ac.ir

Abstract

Today, solar arrays, fuel cells and wind energy are highly regarded as sources of clean energy. These sources can deliver their energy to the grid or directly to the consumer. Usually the voltage level produced in these sources is low and the need to increase the voltage level is. To solve this problem, high voltage gain converters can be used as single-port and multi-port. In the proposed converter to increase the voltage gain, the voltage multiplier circuit, the switched inductors and the switched capacitor are used, and also the clamp circuit is used to solve the problem of energy stored in the leakage inductor. One of the features of this converter is to share the components of the converter in different modes. This is important to reduce the number of semiconductor elements in the construction of the converter. In the proposed converter, the power transfer can be from solar array to load or from solar array to battery or both. Also, in peak moments, solar array and battery consumption can provide load power at the same time. In this paper, theoretical analysis has been used to evaluate the performance of the proposed converters and the results of the converter simulation in Orcad software have been presented to evaluate the accuracy of the theoretical analysis. Finally, a laboratory sample of the proposed converter with a power of 200 watts and a frequency of 100 kHz has been implemented, the results of which show the accuracy of the analysis of the theory and performance of the proposed converter.

Keywords: high step up converter, hybrid power source, three port converter

Received: 11 October 2020

Revised: 9 December 2020

Accepted: 27 December 2020

Corresponding Author: Sayyed Mohammad Mehdi Mirtalaei

طراحی و پیاده‌سازی یک مبدل غیر ایزوله چند درگاه با بهره‌ و لتاژ بالا

معین شهسواری^{۱،۲}، کارشناسی ارشد، سید محمد مهدی میرطلائی^{۱،۲}، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریز شبکه‌های هوشمند- واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

moein137024@yahoo.com, m.mirtalaei@pel.iaun.ac.ir

چکیده: امروزه آرایه‌هایی خورشیدی، پیل‌های سوختی و انرژی باد به‌عنوان منابع انرژی پاک بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این منابع می‌توانند انرژی خود را به شبکه برق و یا به‌طور مستقیم به مصرف‌کننده تحویل دهند. معمولاً سطح ولتاژ تولیدی در این منابع، پایین و نیاز به افزایش سطح ولتاژ است. برای حل این مشکل می‌توان از مبدل‌های بهره‌ و لتاژ بالا به‌صورت یک درگاه و چند درگاه استفاده نمود. در مبدل پیشنهادی برای افزایش بهره‌ و لتاژ، از مدار چند برابرکننده ولتاژ، سلف‌های تزویج و خازن سوئیچ شده و هم‌چنین برای رفع مشکل انرژی ذخیره شده در سلف نشستی، از مدار کلمپ استفاده می‌شود. یکی از ویژگی‌های این مبدل به اشتراک گذاشتن اجزای مبدل در حالت‌های مختلف است که این مهم برای کاهش تعداد عناصر نیمه هادی در ساخت مبدل به حساب می‌آید. در مبدل پیشنهادی انتقال توان می‌تواند از آرایه خورشیدی به بار و یا از آرایه خورشیدی به باتری و یا هر دو باشد. هم‌چنین در لحظات پیک مصرف آرایه خورشیدی و باتری می‌تواند بار را همزمان تامین کنند. در این مقاله برای بررسی نحوه عملکرد مبدل‌های پیشنهادی از تحلیل‌های نظری استفاده شده و برای بررسی صحت تحلیل‌های نظری نتایج شبیه‌سازی مبدل در نرم‌افزار ارکد ارائه شده است. سرانجام یک نمونه‌ی آزمایشگاهی از مبدل پیشنهادی در توان ۲۰۰ وات و فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز پیاده‌سازی گردیده است که نتایج به‌دست آمده صحت تحلیل تئوری و عملکرد مبدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: سیستم منع انرژی ترکیبی، مبدل بهره‌ بالا، مبدل سه درگاه

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۷/۲۰

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۹/۱۹

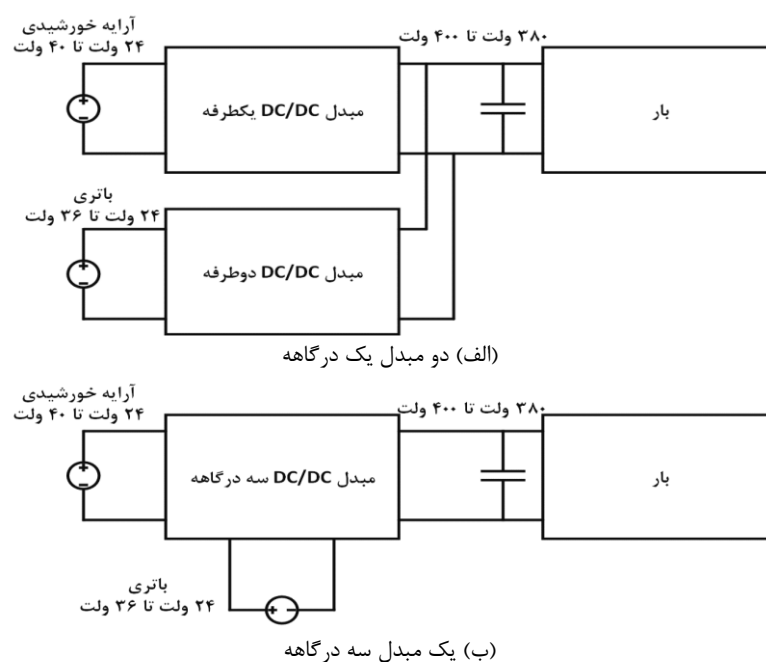
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۷

نام نویسنده‌ی مسئول: سید محمد مهدی میرطلائی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: نجف‌آباد- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد- دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

امروزه تنوع در منابع تولید انرژی و استفاده همزمان از چندین منبع انرژی باعث شده که سیستم‌های انرژی ترکیبی^۱ بیشتر مورد توجه قرار گیرند [۱،۲]. مزایای مبدل‌های چند درگاه نسبت به مبدل‌های یک درگاه عبارت است از: قابلیت اطمینان بالاتر، قابلیت انتقال بیشتر و راندمان بالاتر. با توجه به این مزایا و همچنین وجود منابع تولید انرژی با خصوصیات مختلف (ولتاژ - جریان) باعث توجه بیشتر به مبدل‌های چند درگاه شده است. می‌توان به جای استفاده از چندین مبدل یک درگاه برای انتقال نیرو از هر منبع ورودی به بار خروجی، از مبدل چند درگاه استفاده کرد. در مبدل چند درگاه می‌توان هزینه، اندازه و پیچیدگی سیستم را کاهش داد. مزیت دیگر مبدل‌های چند درگاه استفاده از دستگاه‌های ذخیره انرژی به‌عنوان منبع ورودی است [۳،۴]. در شکل (۱) ساختارهای متداول برای اتصال منابع تولید انرژی به مصرف‌کننده نشان داده شده است. شکل (۱-الف) از دو مبدل یک درگاه برای اتصال استفاده شده در حالی که در شکل (۱-ب) از یک مبدل چند درگاه برای اتصال استفاده شده است.

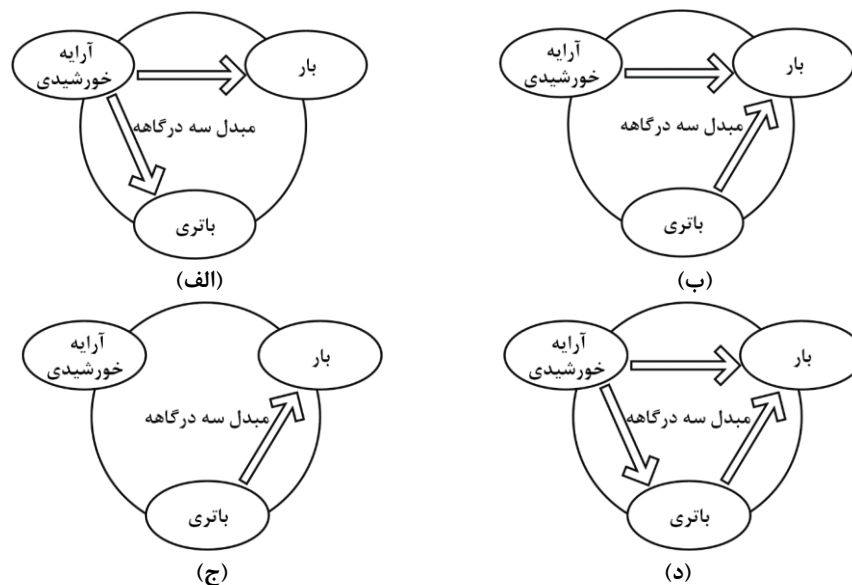


شکل (۱): سیستم‌های انرژی تجدید پذیر

Figure (1): Renewable energy systems, a) Two converters of one port b) A three-port converter

در اکثر سیستم‌های انرژی چند درگاه وجود سیستم ذخیره انرژی الزامی است. بنابراین در اکثر مبدل‌های چند درگاه امکان ذخیره‌سازی انرژی و استفاده مجدد از این انرژی فراهم شده است. این نوع مبدل‌ها به‌عنوان مبدل‌ها سه درگاه شناخته شده اند [۵،۶]. منبع ابرخازن و باتری به‌عنوان سیستم ذخیره انرژی و منابع انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان منابع تولید انرژی، در سیستم‌های انرژی چند درگاه به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجا که بیشتر منابع انرژی تجدیدپذیر دارای ولتاژ کم هستند، روش‌هایی برای افزایش بهره ولتاژ مورد نیاز است. برای افزایش بهره ولتاژ، روش‌های زیادی مانند سلف‌های تزویج شده، ترانسفورماتورهای جدا شده، خازن‌های سری ارائه شده است [۷]. در مرجع [۸] بر اساس شارژ خازن با استفاده از یک سوئیچ و اضافه شدن آن به‌صورت سری با منبع و بار عمل می‌کند. همچنین برای کاهش استرس ولتاژ سوئیچ از مدار کلمپ^۲ استفاده می‌شود. امکان دستیابی به سوئیچینگ نرم با استفاده از سلف نشستی^۳ ترانسفورماتور معرفی شده است [۹،۱۰]. ساختارهای پیشنهادی می‌تواند مشکلات مربوط به سیکل وظیفه^۴ را در مبدل‌های افزایش ولتاژ برطرف کنند و عملکرد مبدل را بهبود ببخشند. اخیراً، براساس کاربردهای مختلف، چندین توپولوژی ایزوله^۵ [۱۱،۱۲] و غیر ایزوله^۶ [۱۳،۱۴]، در مبدل‌های چند درگاه ارائه شده است. در مبدل‌های ایزوله وجود ترانسفورماتورها به همراه مدارهای اضافی باعث افزایش حجم، هزینه و پیچیدگی طراحی شده است [۱۵،۱۶]. اگرچه مبدل‌های سه درگاه ایزوله کلیدزنی نرم را به راحتی حفظ می‌کنند، اما معمولاً

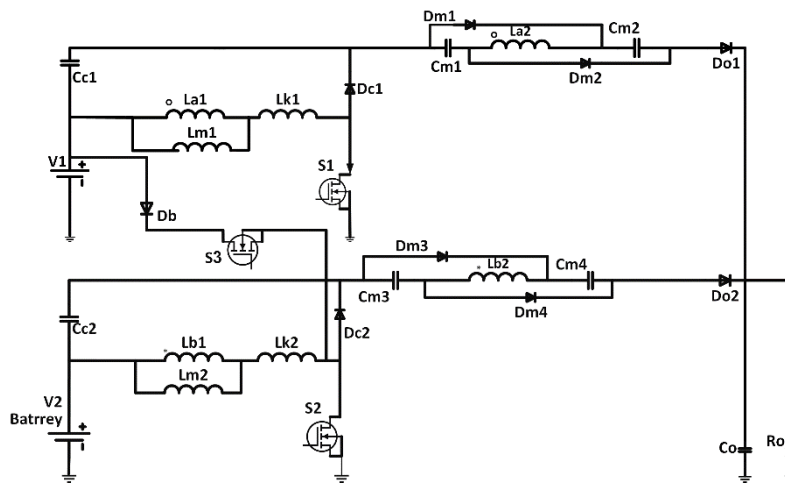
در این ساختارها از تعداد زیادی سوئیچ‌های نیمه‌هادی استفاده می‌شود [۱۷،۱۸]. برای مثال، مبدل موجود در مرجع [۱۹] پانزده سوئیچ و شش دیود دارد. در مرجع [۲۰] ترکیب سه روش سه سطحی، استفاده از سلف‌های کوپل شده و مدار کلمپ پس‌یو تشکیل شده است. در مبدل‌های سه سطحی استرس ولتاژ سوئیچ‌ها نصف مبدل‌های دو سطحی پایه خواهد بود [۲۱،۲۲]. همچنین فرکانس ریبیل جریان ورودی و خروجی مبدل‌های سه-سطحی نیز دو برابر فرکانس ریبیل جریان ورودی و خروجی مبدل‌های دو-سطحی پایه خواهد بود که این باعث کوچک شدن اندازه فیلتر مبدل خواهد شد. در مبدل‌های دارای سلف کوپل شده نیز می‌توان با تنظیم نسبت دور ترانس به بهره ولتاژ زیاد دست یافت. در مرجع [۲۳] یک مبدل بوست^۹ غیر ایزوله با سلف کوپل شده ارائه و تلاش می‌گردد با کاهش تلفات سوئیچینگ و تلفات هدایتی، راندمان مبدل را بهبود ببخشد. در سال‌های اخیر، محققان ایده‌های نو برای مبدل‌های چند درگاه dc-dc به ارمغان آوردند. مهم‌ترین آنها به این شرح است: کاهش تعداد عناصر سازنده، انعطاف‌پذیری در افزایش تعداد منابع ورودی برای ایجاد مسیرهای مجزای جریان انرژی، افزایش ولتاژ و استفاده از روش‌های سوئیچینگ نرم برای افزایش بهره‌وری در مبدل‌های چند درگاه هستند. در این مقاله از ساختار معرفی شده در [۲۴] به‌عنوان پایه مبدل پیشنهادی استفاده می‌شود که شامل مدار چند برابرکننده ولتاژ بر اساس سلف‌های تزویج شده و یک مدار کلمپ است. مبدل‌های سه درگاه دارای سه حالت کار هستند که به این صورت عمل می‌کنند، تامین انرژی بار و همچنین شارژ باتری (یک ورودی و دو خروجی)، تامین انرژی بار توسط منبع و باتری به صورت هم-زمان (دو ورودی یک خروجی) تامین انرژی بار توسط باتری (یک ورودی یک خروجی)، که در شکل (۲) نشان داده شده است. در مبدل پیشنهادی برای افزایش بهره ولتاژ، از مدار ضرب‌کننده ولتاژ، سلف‌های تزویج شده و برای از بین بردن اثر القایی ناشی، از مدار کلمپ استفاده می‌شود. یکی دیگر از ویژگی مبدل پیشنهادی، به اشتراک گذاری اجزای مبدل در حالت‌های مختلف، برای کاهش تعداد عناصر نیمه‌هادی در ساخت مبدل است. عملکرد مبدل پیشنهادی به حالت‌های شارژ/دشارژ سیستم ذخیره انرژی بستگی دارد. که هر دو حالت می‌توانند به‌طور مستقل از یکدیگر کار کنند و انرژی را از ورودی‌ها به خروجی منتقل کنند. در این مبدل شرایط کلیدزنی نرم برقرار نیست. ولی به واسطه اینکه جریان سلف ناشی از طریق دیود DC تخلیه و نزدیک به صفر شده، از استرس جریان سوئیچ در لحظه‌ی روشن شدن جلوگیری می‌کند، و دیگر نیاز به المان الکترونیکی اضافه در مدار نیست.



شکل (۲): حالت کار مبدل‌های سه درگاه الف) تامین انرژی بار و همچنین شارژ باتری (یک ورودی و دو خروجی) ب) تامین انرژی بار توسط منبع و باتری به صورت همزمان (دو ورودی یک خروجی) ج) تامین انرژی بار توسط باتری (یک ورودی یک خروجی) د) کل حالت‌ها
 Figure (2): Operating mode of three-port converters, a) Load power supply as well as battery charge (one input and two outputs), b) Load power supply by source and battery simultaneously (two inputs, one output), c) Battery power supply (one input one output), d) Total modes

۲- ساختار پیشنهادی مبدل سه درگاه بهره بالا برای سیستم‌های انرژی ترکیبی

در شکل (۳) مدار مبدل پیشنهادی ملاحظه می‌شود. در این شکل سوئیچ‌های S_1 و S_2 به‌عنوان سوئیچ اصلی مبدل (برای هر مدار) عمل کرده و برای بازیافت انرژی سلف نشستی از دو مدار کلمپ فعال که شامل اجزای D_{C1} و C_{C1} در مدار بالا و اجزای D_{C2} و C_{C2} در مدار پایین استفاده می‌کند. عناصر $C_{M1}, C_{M2}, D_{M1}, D_{M2}$ و L_{a2} در مدار بالایی و عناصر $C_{M3}, C_{M4}, D_{M3}, D_{M4}$ و L_{b2} در مدار پایینی برای تقویت ولتاژ استفاده شده است. $L_{a1}, L_{a2}, L_{b1}, L_{b2}$ و سلف‌های تزویج هستند. این مبدل دو حالت عملکردی اصلی دارد. حالت اول، زمانی است که باتری شارژ شده است و باتری به همراه آرایه خورشیدی انرژی را به بار تحویل می‌دهد. در این حالت مدار مربوط به سیستم ذخیره انرژی، دقیقاً مانند مدار بالایی، انرژی را به بار تحویل می‌دهد. حالت دوم زمانی است که باتری نیاز به شارژ شدن دارد. در لحظاتی که می‌خواهیم باتری را شارژ کنیم با تغییر در مدار کنترل بخش پایین، سیستم ذخیره انرژی تبدیل به مبدل باک شده که از S_3 به‌عنوان کلید اصلی و S_2 کلید فرعی و هم‌چنین سلف‌های مغناطیسی L_{b1} و L_{b2} به‌عنوان سلف برای شارژ باتری استفاده می‌کند. شکل (۴)، شکل موج‌های کلیدی مبدل پیشنهادی را در حالت عملکردی اول نشان می‌دهد.



شکل (۳): ساختار پیشنهادی مبدل سه درگاه بهره بالا برای سیستم‌های انرژی ترکیبی

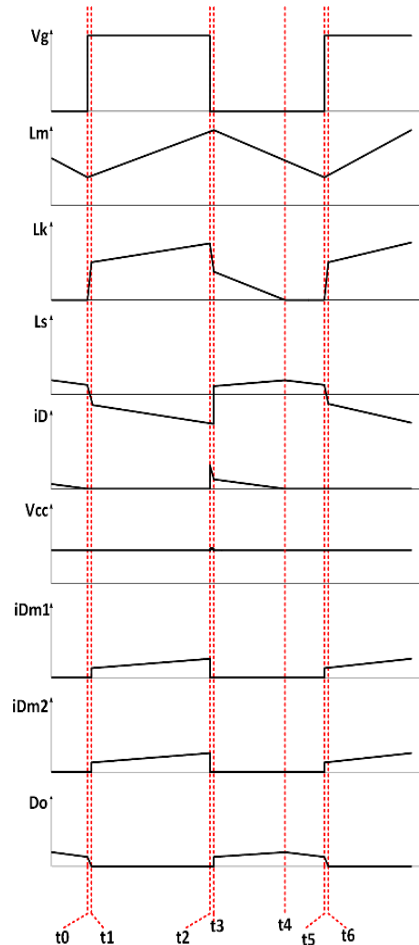
Figure (3): Proposed structure of high gain three-port converter for combined energy systems

۳- مدهای عملکردی مبدل پیشنهادی در حالت انتقال انرژی از باتری و آرایه خورشیدی به بار

در این حالت عملیاتی، یک یا هر دو مدار انرژی بار را تامین کرده و دیود D_{C1} مدارها را از یکدیگر جدا می‌کند. از آنجا که حالت‌های عملیاتی هر مدار شبیه به یکدیگر هستند و به‌منظور ساده‌سازی تجزیه و تحلیل، عملیات مدار سمت پایین حذف شده و عملیات مدار بالایی در مدهای مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این حالت مبدل پیشنهادی در یک دوره کاری دارای پنج مد است. پیش از اولین مد، فرض بر این است که S_1 روشن و D_{O1} خاموش هستند. چون ظرفیت خازن‌های C_{M1}, C_{M2}, C_{C1} به اندازه کافی بزرگ هستند، ولتاژ موجود در این خازن‌ها را می‌توان در تمامی مدها ثابت در نظر گرفت. در مدار معادل مبدل پیشنهادی، سلف‌های تزویج به‌عنوان یک ترانسفورماتور ایده‌آل با سلف مغناطیس کننده (L_m) و سلف نشستی (L_k) در نظر گرفته شده و همچنین، تمام عناصر نیمه هادی ایده‌آل در نظر گرفته شده است. در شکل (۵) مدهای عملکرد مبدل سیستم ذخیره انرژی در حالت تخلیه، نشان داده شده است.

مد اول ($t_0 < t < t_1$): در زمان t_0 سوئیچ S روشن، دیودهای D_{C1}, D_{M1} و D_{M2} خاموش و دیود D_o روشن هستند. مسیر عبور جریان در شکل (۵-الف) ملاحظه می‌شود. معادله ولتاژ سلف تزویج شده اولیه $V_{in} = V_{Lk} + V_{La1}$ و هم‌چنین ولتاژ V_{in} دو سر سیم پیچ سلف ثانویه (L_{a2}) قرار دارد. بنابراین جریان سلف نشستی (L_k) به‌طور خطی افزایش و جریان سلف ثانویه به‌طور خطی کاهش می‌یابد. سلف مغناطیس کننده (L_m) توسط منبع V_{in} شارژ شده و دیودهای D_{M1} و D_{M2} شروع به هدایت می‌کنند. در

زمان t_1 با برابر شدن جریان سلف نشستی (I_{Lk}) با $I_{Lm} + nI_s$ مد کاری به پایان می‌رسد. در این روابط V_o ولتاژ خروجی و V_{cc} ولتاژ خازن کلمپ و V_{cm} ولتاژ خازن مدار چند برابرکننده ولتاژ است.



شکل (۴): شکل موج‌های مبدل پیشنهادی

Figure (4): Proposed converter waveforms

$$I_{Lm} = I_{Lm}(t_0) + \frac{(-V_o + V_{in} + V_{cc} + 2V_{cm})}{nLm} * (t - t_0) + I_{Lm}(t_0) \quad (1)$$

$$I_{Lk} = I_{Lk}(t_0) + \frac{V_{in} + \frac{(V_o + V_{in} + V_{cc} + 2V_{cm})}{n}}{Lk} * (t - t_0) + I_{Lk}(t_0) \quad (2)$$

مد دوم ($t_1 < t < t_2$): در این فاصله زمانی سوئیچ S روشن، دیود D_o و D_{c1} خاموش و هم‌چنین دیود D_{m1} و D_{m2} روشن هستند. مسیر جریان عبوری در شکل (۵-ب) نشان داده شده است. سلف مغناطیس‌کننده (L_m) توسط منبع V_{in} شارژ در همین شرایط ولتاژی که دو سر سیم پیچ ثانویه (L_{a2}) قرار دارد خازن C_{m1} و C_{m2} را به‌صورت هم‌زمان شارژ و ولتاژ آنها برابر nV_{in} است. خازن C_o بار خروجی را تغذیه می‌کند. سوئیچ S خاموش و در زمان t_2 این مد به پایان می‌رسد.

$$I_{Lm} = I_{Lm}(t_1) + \frac{V_{in}}{L_m + L_K} * (t - t_1) + I_{Lm}(t_1) \quad (3)$$

$$I_{Lk} = I_{Lk}(t_1) + \frac{V_{in}}{L_m + L_K} * (t - t_1) + I_{Lk}(t_1) \quad (4)$$

مد سوم ($t_2 < t < t_3$): در این مد سوئیچ S خاموش، دیود D_o خاموش و دیودهای D_{m1} ، D_{m2} روشن هستند. جریان سلف نشستی از طریق دیود D_{c1} ، خازن C_{c1} را شارژ می‌کند. مسیر عبور جریان در شکل (۵-ج) ملاحظه می‌شود. خازن C_{m1} و C_{m2} توسط

ولتاژ سیم‌پیچ ثانویه (L_{a2}) شارژ می‌شود. خازن C_o بار خروجی تغذیه می‌کند. ولتاژ سیم‌پیچ ثانویه (L_{a2}) برابر با nL_{a1} در لحظه t_3 این مد به پایان می‌رسد.

$$I_{Lm} = I_{Lm}(t_2) + \frac{V_{cm}}{nL_m} * (t - t_2) + I_{Lm}(t_2) \quad (5)$$

$$I_{Lk} = I_{Lk}(t_2) + \frac{-V_{cc} - \frac{V_{cm}}{n}}{L_k} * (t - t_2) + I_{Lk}(t_2) \quad (6)$$

مد چهارم ($t_3 < t < t_4$): در این مد سوئیچ S خاموش، دیود D_{o1} و D_{c1} روشن، مسیر جریان عبوری در شکل (5-د) ملاحظه می‌شود. جریان سلف ثانویه (L_{a2}) کاهش یافته در همین صورت دیودهای D_{m1} و D_{m2} خاموش می‌شوند. دیود D_{c1} جریان L_m و L_k را به سمت خازن C_{m1} و C_{m2} هدایت کرده و هم‌چنین خازن C_{c1} با خازن C_{m1} و C_{m2} سری می‌شود و از طریق دیود D_o انرژی بار را تامین می‌کند.

$$I_{Lm} = I_{Lm}(t_3) + \frac{-V_{cc}}{L_m + L_k} * (t - t_3) + I_{Lm}(t_3) \quad (7)$$

$$I_{Lk} = I_{Lk}(t_3) + \frac{-V_{cc}}{L_m + L_k} * (t - t_3) + I_{Lk}(t_3) \quad (8)$$

مد پنجم ($t_4 < t < t_5$): در این مد سوئیچ S خاموش، دیود D_{c1} خاموش و دیود D_o روشن است. مسیر جریان عبوری در شکل (5-ه) ملاحظه می‌کنید. انرژی بار از طریق دیود D_o تامین می‌شود. جریان سلف نشستی (L_k) صفر و جریان سلف ثانویه (L_{a2}) افزایش یافته است. در همین صورت این مد در زمان t_5 به پایان می‌رسد.

$$I_{Lm} = I_{Lm}(t_4) + \frac{-V_{cc}}{L_m} * (t - t_4) + I_{Lm}(t_4) \quad (9)$$

$$I_{Lk} \sim 0 \quad (10)$$

۴- مدهای عملکردی مبدل پیشنهادی در حالت انتقال انرژی از آرایه خورشیدی به باتری و بار

در این حالت، انرژی تولید شده از منبع V_{in} بیشتر از توان تقاضای بار است و سیستم ذخیره انرژی در صورت نیاز به شارژ، از انرژی اضافی منبع V_{in} شارژ می‌شود. افزایش ولتاژ و استرس عناصر در این حالت همانند مبدل باک است [۲۵]. سیستم ذخیره انرژی از طریق فاز پایین به عنوان مبدل باک شارژ می‌شود و مدار بالا بار خروجی را تامین می‌کند. در حالت شارژ سیستم ذخیره انرژی، برای کاهش استرس ولتاژ و جریان روی سوئیچ‌های مبدل باک، باید در شرایط مرزی و پیوسته و حداقل و حداکثر جریان سلف تعیین شود [۲۶، ۲۷]. مبدل پیشنهادی در حالت شارژ سیستم ذخیره انرژی دارای سه مد کاری است و برای ساده سازی تجزیه و تحلیل، فرض بر این است که مدار بالایی در عملکرد متمایز کلی خود در تهیه بار کار می‌کند. در شکل (۶) اجزای مبدل که به شارژ سیستم ذخیره انرژی کمک می‌کند و در شکل (۷) مدهای عملکرد مبدل سیستم ذخیره انرژی در حالت شارژ، نشان داده شده است.

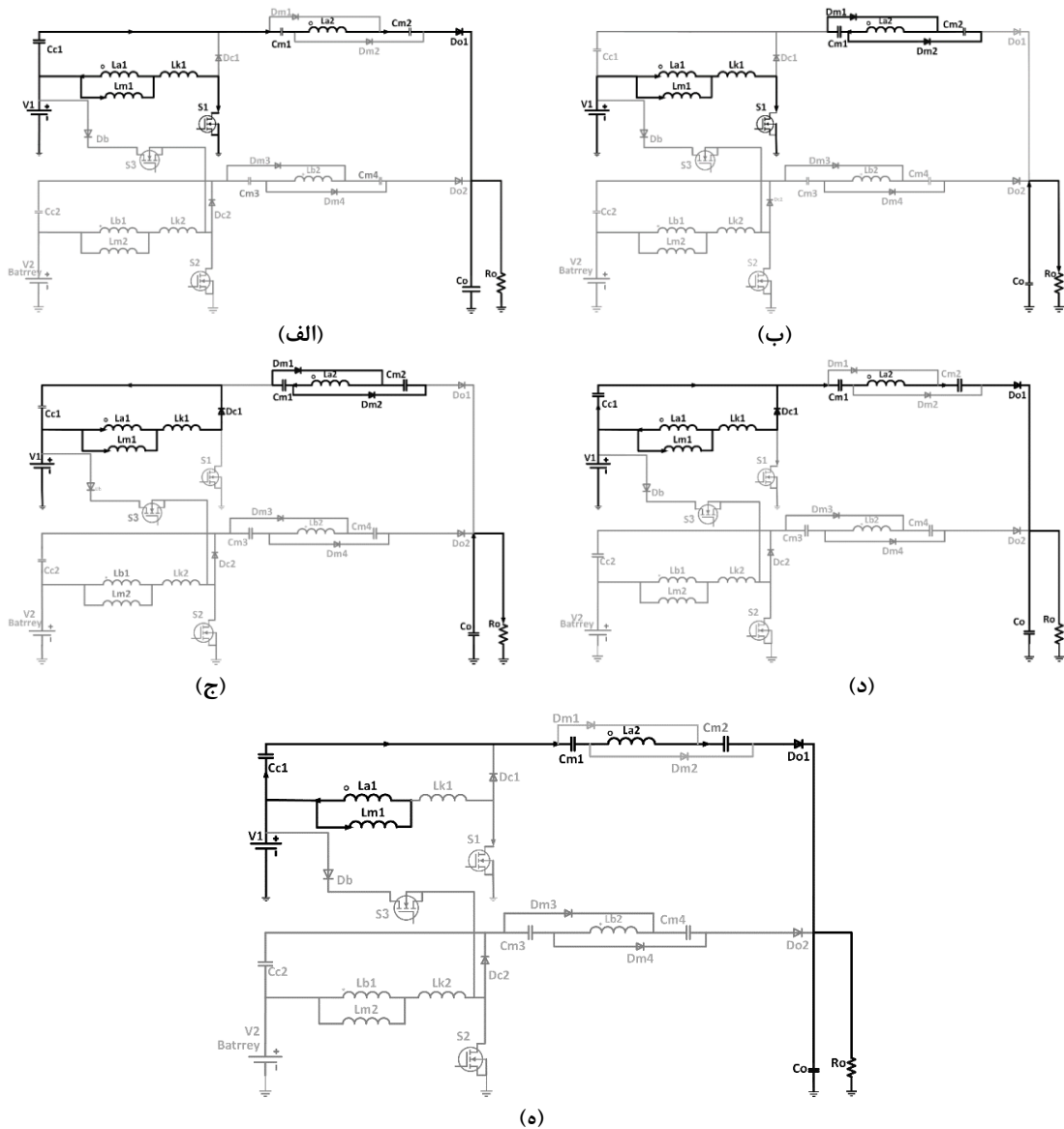
مد اول ($t_0 < t < t_1$): در این مد سوئیچ S_3 روشن و هم‌چنین جریان سلف مغناطیس کننده (I_{Lm2}) مثبت می‌شود و مطابق با آن افزایش می‌یابد. مسیر جریان عبوری در شکل (۷-الف) نشان داده شده است.

$$I_{Lm2} = \frac{V_{in} - V_{battery}}{L_{m2}} * (t_1 - t_0) + I_{Lm}(t_0) \quad (11)$$

مد دوم ($t_1 < t < t_2$): در این مد سوئیچ S_3 خاموش و بازیابی معکوس دیود بدنه سوئیچ S_2 انجام شده است مسیر عبور جریان در شکل (۷-ب) نشان داده شده است.

$$I_{Lm2} = \frac{V_{battery}}{L_{m2}} * (t_2 - t_1) + I_{Lm}(t_1) \quad (12)$$

مد سوم ($t_2 < t < t_3$): در این مد سوئیچ S_3 خاموش و جریان سلف مغناطیس کننده (I_{Lm2}) از طریق دیود بدنه سوئیچ S_2 تخلیه می‌شود تا جریان به صفر برسد. مسیر عبور جریان در شکل (۷-ج) نشان داده شده است.



شکل (۵): مدهای عملکرد مبدل سیستم ذخیره انرژی در حالت تخلیه

(الف) مد اول ($t_0 < t < t_1$)، (ب) مد دوم ($t_1 < t < t_2$)، (ج) مد سوم ($t_2 < t < t_3$)، (د) مد چهارم ($t_3 < t < t_4$)، (ه) مد پنجم ($t_4 < t < t_5$)

Figure (5): Operation modes of energy storage system converter in discharge mode

First mode ($t_0 < t < t_1$), Second mode ($t_1 < t < t_2$), Third mode ($t_2 < t < t_3$), Fourth mode ($t_3 < t < t_4$), Fifth mode ($t_4 < t < t_5$)

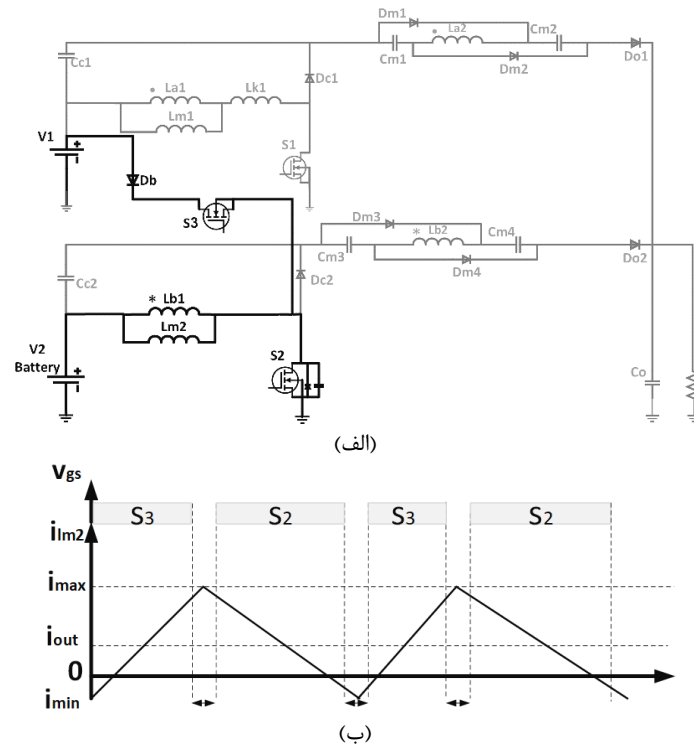
۵- تجزیه و تحلیل مبدل پیشنهادی

در این بخش، تجزیه و تحلیل مبدل پیشنهادی که افزایش ولتاژ، استرس ولتاژ و جریان عناصر نیمه‌هادی و رویکرد طراحی مبدل را مورد بحث قرار داده است. برای ساده سازی تجزیه و تحلیل، فرض بر این است که ولتاژهای موجود در C_m و C_c ثابت هستند، تمام عناصر مدار ایده آل هستند و مبدل در شرایط پایدار عمل می‌کند.

الف) ملاحظات طراحی سیستم ذخیره انرژی در حالت تخلیه: هر مدار در حالت پایدار به دو حالت اصلی یعنی حالت روشن یا خاموش سوئیچ اصلی کار می‌کند. هنگامی که سوئیچ اصلی هر مدار روشن باشد، L_M و C_{m1} ، C_{m2} از طریق V_{in} شارژ می‌شوند.

$$V_{Lm-charge} = V_{in} \quad V_{cm1} = V_{cm2} = nV_{in} \quad (13)$$

در حالت خاموش بودن سوئیچ اصلی L_M تخلیه می‌شود و ولتاژ آن برابر است با:

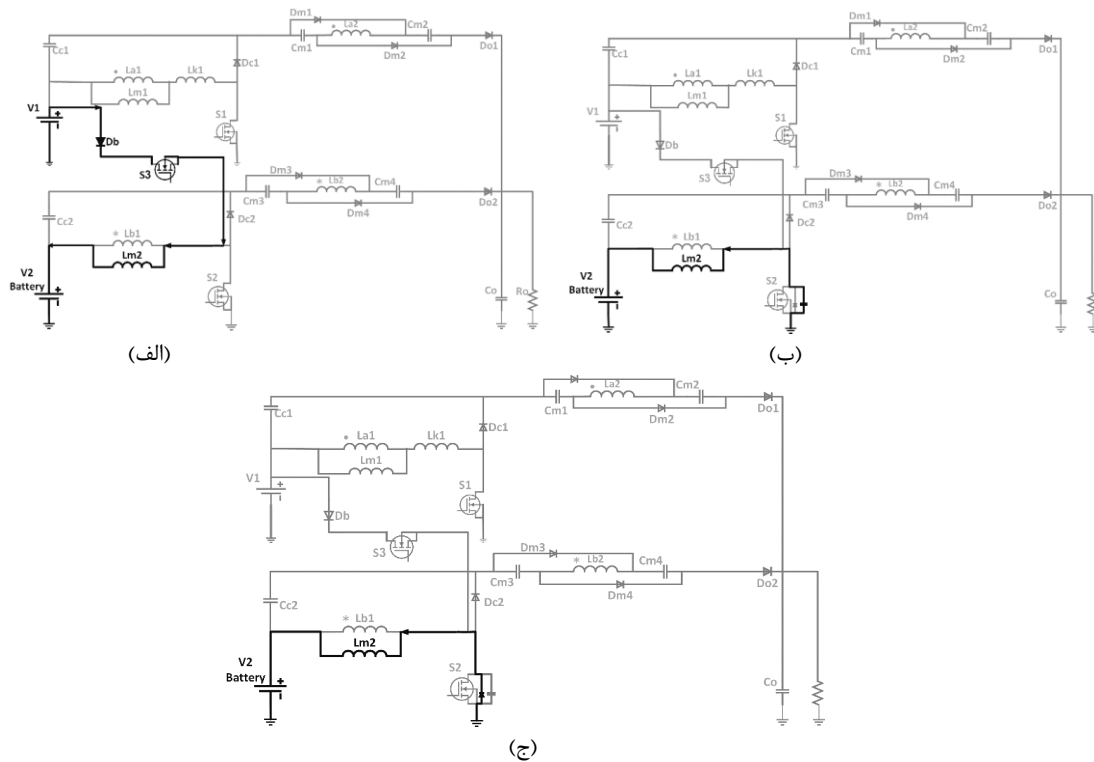


شکل (۶): اجزای مبدل که به شارژ سیستم ذخیره انرژی کمک می‌کند

(الف) پیکربندی مدار (ب) پالس سوئیچ‌ها و شکل موج جریان سلف تحت عملکرد حالت مبدل باک

Figure (6): Converter components that help charge the energy storage system

a) Circuit configuration b) Pulse switches and inductor current waveform under buck converter mode operation



شکل (۷): مدهای عملکرد مبدل سیستم ذخیره انرژی در حالت شارژ (الف) مد اول ($t_0 < t < t_1$), (ب) مد دوم ($t_1 < t < t_2$), (ج) مد سوم ($t_2 < t < t_3$)

Figure (7): Operating modes of energy storage system converter in charge mode

First mode ($t_0 < t < t_1$), Second mode ($t_1 < t < t_2$), Third mode ($t_2 < t < t_3$)

$$V_{Lm} = V_{cc} = \frac{-(2n + 1)V_{in} + V_o}{n + 1} \quad (14)$$

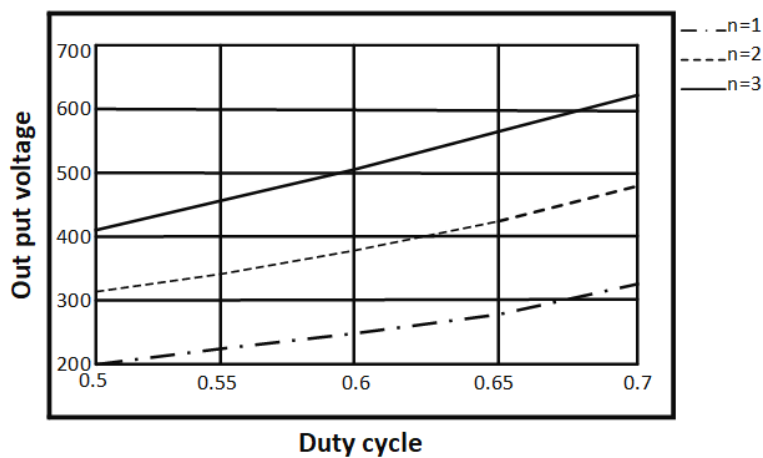
با زدن KVL در مد اول و با استفاده از رابطه V_{cm} ولتاژ خازن V_{cc} به صورت زیر محاسبه می‌گردد. در این رابطه V_o ولتاژ خروجی و V_{in} ولتاژ ورودی است.

$$V_{cc} = \frac{-(2n + 1)V_{in} + V_o}{n + 1} \quad (15)$$

از طریق رابطه (۱۳) و (۱۵) رابطه بهره ولتاژ مبدل را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم. در این رابطه D چرخه کاری است.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{n(2 - D) + 1}{1 - D} \quad (16)$$

در شکل (۸) بهره مبدل پیشنهادی به ازای ضریب وظیفه‌های مختلف برای سه نسبت دور متفاوت نشان داده شده است.



شکل (۸): نمودار بهره ولتاژ مبدل پیشنهادی برحسب تغییرات ضریب وظیفه به ازای نسبت دورهای متفاوت
Figure (8): Chart of the proposed converter voltage gain based to the duty cycle changes for the different conversion ratio

ب) استرس ولتاژ و جریان: به دلیل استفاده از ساختار مدار کلمپ در مبدل پیشنهادی، استرس ولتاژ سوئیچ‌های اصلی، دیود مدار چند برابر کننده ولتاژ، دیود مدار کلمپ و دیود خروجی در حالت خاموش به شرح زیر است. شکل (۹) استرس ولتاژ در سوئیچ اصلی در برابر سیکل وظیفه مختلف نشان داده شده است.

$$V_{sw} = V_{Dm1} = V_{Dm2} = V_{Dc1} = \frac{1}{1 - D} V_{in} \quad (17)$$

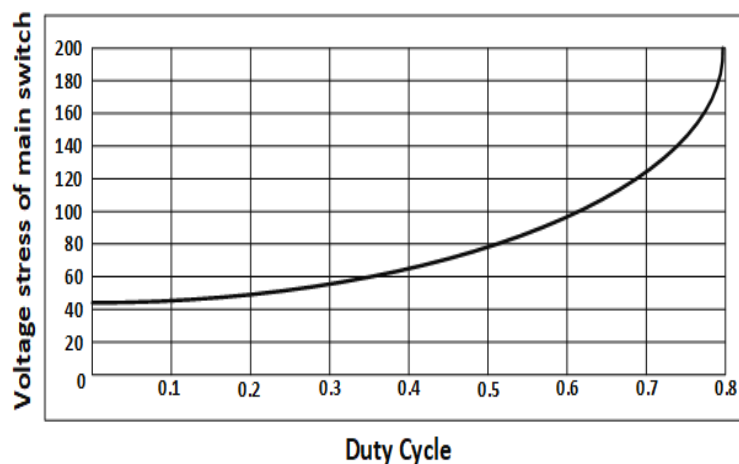
$$V_{Do} = \frac{n}{1 - D} V_{in} \quad (18)$$

بیشترین استرس فعلی عناصر نیمه هادی در مبدل پیشنهادی زمانی اتفاق می‌افتد که تنها یکی از مراحل انتقال انرژی از یک منبع ورودی به بار خروجی باشد. بنابراین، استرس جریان فعلی دیودها و سوئیچ‌ها به شرح زیر قابل توصیف است.

$$I_{ds} = \frac{2(D - Dn + 2n + 1)V_o}{(1 - D)DR} \quad (19)$$

$$I_{Do} = I_{Dc} = \frac{2V_o}{(1 - D)R} \quad (20)$$

$$I_{Dm1} = I_{Dm2} = \frac{2V_o}{DR} \quad (21)$$



شکل (۹): استرس ولتاژ در سوئیچ اصلی در برابر سیکل وظیفه مختلف

Figure (9): Voltage stress on the main switch against different duty cycles

ج) طراحی سلف مبدل: با توجه به توان خروجی نامی مبدل مقدار متوسط جریان القایی مغناطیسی $I_{LM(avg)}$ و ریپل جریان به شرح زیر است.

$$I_{LM(avg)} = \frac{(n+1)I_O}{(1-D)} \quad (22)$$

$$\Delta I_{LM} = \frac{V_{in}D}{2L_M f} \quad (23)$$

با جایگذاری رابطه (۲۲) در (۲۳) و با استفاده از رابطه (۱۸) معادله سلف نشستی L_M در حالت مرزی به دست آمده است.

$$L_m = \frac{(1-D)^2 DR}{2(n+1)[n(2-D)+1]f} \quad (24)$$

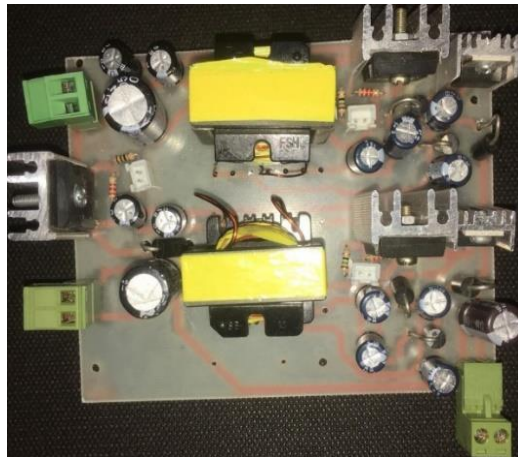
که حداکثر مقاومت بار در حالت مرزی می‌تواند ۲۰ درصد از توان خروجی نامی انتخاب شود. انتخاب مقدار L_M بیشتر از مقدار تعیین شده توسط (۲۴)، است و همچنین شرایط پیوسته برای هر دو مرحله در حالت تخلیه و شارژ سیستم ذخیره انرژی تضمین می‌شود. در این رابطه n نسبت دور سیم پیچ سلف تزویج شده است. به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$n = \frac{n_{13}}{n_{11}} = \frac{n_{12}}{n_{11}} \quad (25)$$

۶- نتایج ساخت نمونه عملی

در ساخت مبدل پیشنهادی به دلیل سیکل وظیفه مناسب از فرکانس کلیدزنی ۱۰۰ کیلوهرتز استفاده شده است. برای نشان دادن قابلیت سیستم ذخیره انرژی و ایجاد بهره ولتاژ بالا در مبدل پیشنهادی، دو منبع ورودی ۴۰ ولت و ۲۴ ولت و ولتاژ خروجی ۴۰۰ ولت انتخاب شده است. در حالت عملکردی اول، ولتاژهای ورودی، یک پارامتر اصلی برای طراحی سلف مبدل باک است به گونه‌ای که مبدل در حالت هدایت مرزی کار کند، با فرض کردن $V_{in}=40$ و $V_{battery}=24$ ولت این مقادیر شرط انتخاب مقدار سلف مبدل پیشنهادی را فراهم ساخته و سیکل وظیفه سوئیچ برای هر مرحله را می‌توان به دست آورد. سیکل وظیفه مطلوب در زمان $D=0.65$ حاصل شده بنابراین، نسبت دور سیم پیچ سلف‌های تزویج شده برای ترانسفورمر بالا $1/8$ و برای ترانسفورمر پایین $3/5$ انتخاب می‌شوند. در حالت تخلیه سیستم ذخیره انرژی، سلف مغناطیس کننده برای هر مدار باید به گونه‌ای تعیین شود که مبدل در حالت پیوسته کار کند. با استفاده از رابطه (۲۴) که ارتباط بین سلف مغناطیس کننده، مقاومت بار همراه با نسبت تبدیل سلف نشان می‌دهد. مقدار L_{m1} و L_{m2} بر اساس توان خروجی مشخص شده است. در حالت

شارژ سیستم ذخیره انرژی، مدار بالایی به عملکرد شارژ کمک نمی‌کند. اما، سلف مغناطیس‌کننده سمت پایین به‌عنوان سلف مبدل باک عمل می‌کند. شکل (۱۰) تصویر مبدل پیشنهادی ساخته شده در آزمایشگاه نشان داده شده است.



شکل (۱۰): تصویر مبدل پیشنهادی ساخته شده در آزمایشگاه
Figure (10): Image of the proposed converter made in the laboratory

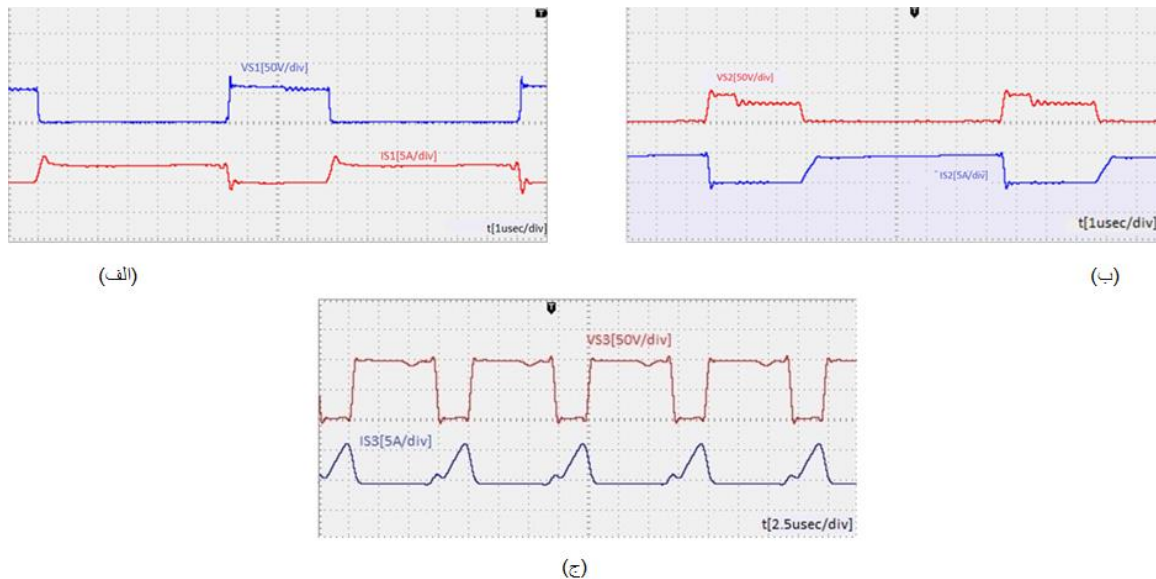
برای تأیید عملکرد و ارزیابی عملکرد مبدل پیشنهادی، نمونه اولیه ۲۰۰ وات با مشخصات تعریف شده در جدول (۱) اجرا و آزمایش می‌شود.

جدول (۱): مشخصات عناصر نیمه هادی

Table (1): Characteristics of semiconductor elements

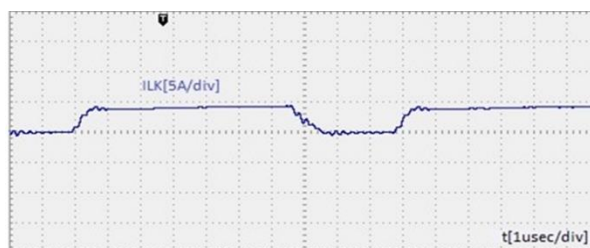
نماد	پارامتر	مقدار
V_{in}	ولتاژ ورودی	۴۰ ولت
$V_{battery}$	ولتاژ باتری	۲۴ ولت
V_o	ولتاژ خروجی	۴۰ ولت
F	فرکانس کلید زنی	۱۰۰ کیلوهرتز
S_1-S_2	سوئیچ	IRFP260
$D_{c1}, D_{c2}, D_{m1}, D_{m4}, D_{o1}, D_{o2}, D_b$	دیود	MUR460
$C_{m1}-C_{m4}$	خازن	$4,7 \mu F$
C_{c1}, C_{c2}	خازن	$1,7 \mu F$
C_o	خازن	$100 \mu F$
L_{m1}	سلف مغناطیس‌کننده	$150 \mu H$
L_{m2}	سلف مغناطیس‌کننده	$50 \mu H$
L_{k1}	سلف نشستی	$2 \mu H$
L_{k2}	سلف نشستی	$1 \mu H$
n_2/n_1	نسبت دور	۱,۸
n_4/n_3	نسبت دور	۳,۵

شکل (۱۱-الف) موج ولتاژ جریان سوئیچ اصلی (S_1) (۱۱-ب) موج ولتاژ جریان سوئیچ باتری (S_2) (۱۱-ج) موج ولتاژ و جریان سوئیچ کمکی (S_3) است که طبق این تصویر ماکزیمم ولتاژ سوئیچ‌ها ۱۵ ولت محدود شده است. بنابراین استرس ولتاژ سوئیچ‌ها بسیار کمتر از ولتاژ خروجی مدار است. عملکرد سوئیچ اصلی و سوئیچ باتری دقیقاً مانند هم می‌باشند و در لحظه t_0 روشن شدن سوئیچ با بازبایی معکوس دیود خروجی D_o تداخل دارد که در شکل (۱۱-الف) و (۱۱-ب) مشاهده می‌کنید. در این مبدل شرایط کلید زنی نرم برقرار نیست. ولی به واسطه اینکه جریان سلف نشستی از طریق دیود DC تخلیه و نزدیک به صفر شده، از استرس جریان سوئیچ در لحظه‌ی روشن شدن جلوگیری می‌کند.

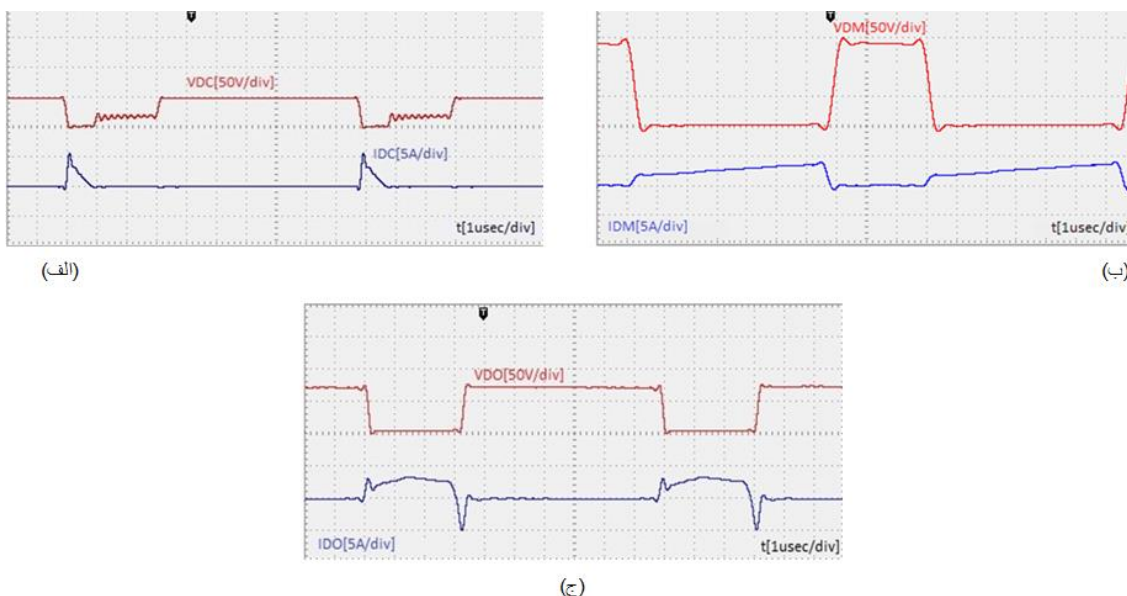


شکل (۱۱): الف) موج ولتاژ جریان سوئیچ اصلی (S_1)، ب) موج ولتاژ جریان سوئیچ باتری (S_2)، ج) موج ولتاژ و جریان سوئیچ کمکی (S_3)
 Figure (11): a) Main switch current voltage wave (S_1) b) Battery switch current voltage wave (S_2) c) Voltage switch and auxiliary switch current wave (S_3)

شکل (۱۲) موج جریان سلف نشتی همان‌طور که انتظار می‌رود در لحظه روشن شدن سوئیچ، جریان سلف نشتی با یک شیب تند رو به افزایش است که علت آن مربوط به بازایی معکوس دیود خروجی است و با خاموش شدن سوئیچ، جریان سلف نشتی از طریق دیود کلمپ کاملاً تخلیه می‌شود. شکل (۱۳-الف) ولتاژ و جریان دیود کلمپ را نشان می‌دهد. در این تصویر هنگامی که سوئیچ اصلی خاموش است جریان سلف نشتی از طریق دیود کلمپ تخلیه و خازن کلمپ (DC) را شارژ می‌کند. شکل (۱۳-ب) موج ولتاژ و جریان دیود (D_m) مدار چند برابر کننده ولتاژ است. در این تصویر هنگامی که سوئیچ روشن باشد سلف مغناطیس کننده را شارژ کرده و هم‌زمان انرژی را به سمت سلف ثانویه القاء می‌کند و از طریق این دیودها، خازن‌های سوئیچ شده شارژ می‌شوند. شکل (۱۳-ج) موج ولتاژ و جریان دیود خروجی (D_o) است که بازایی معکوس دیود را نشان می‌دهد. شکل (۱۴) موج جریان سلف مغناطیس کننده (L_{m2}) مبدل پیشنهادی در حالت انتقال انرژی از آرایه خورشیدی به باتری و بار است. باتری در صورت نیاز به شارژ با روشن شدن سوئیچ کمکی (S_3) جریان از منبع V_{in} به سمت L_{m2} هدایت می‌شود و علاوه بر این سلف مغناطیس کننده در شرایط مرزی عمل کرده و به‌صورت یک مبدل باک باتری را شارژ می‌کند. شکل (۱۵) موج ولتاژ خروجی (V_o) است. این تصویر صحت عملکرد مبدل با بهره ولتاژ بالا را نشان می‌دهد.

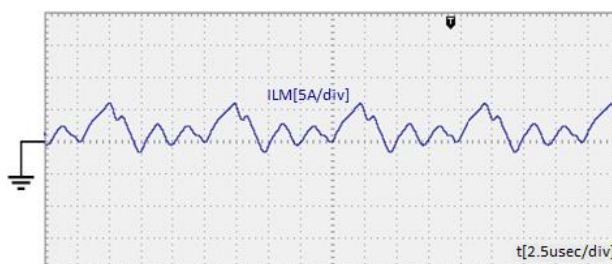


شکل (۱۲): موج جریان سلف نشتی
 Figure (12): Induction leakage current wave



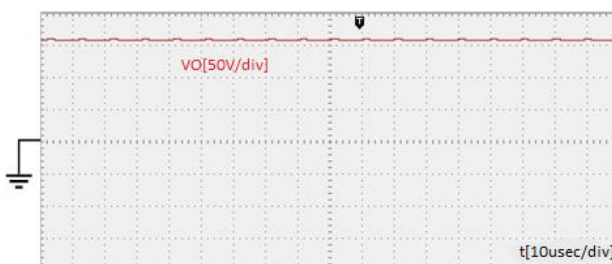
شکل (۱۳): الف) شکل موج ولتاژ و جریان دیود کلمپ (D_c)، ب) شکل موج ولتاژ و جریان دیود مدار ضریب‌زن (D_m)، ج) شکل موج ولتاژ و جریان دیود خروجی (D_o)

Figure (13): a) Voltage and current waveform of clamp diode (D_c), b) Voltage and current waveform of diode (D_m) voltage multiplier circuit, c) Waveform voltage and current of output diode (D_o)



شکل (۱۴): موج جریان سلف مغناطیس کننده (L_{m2})

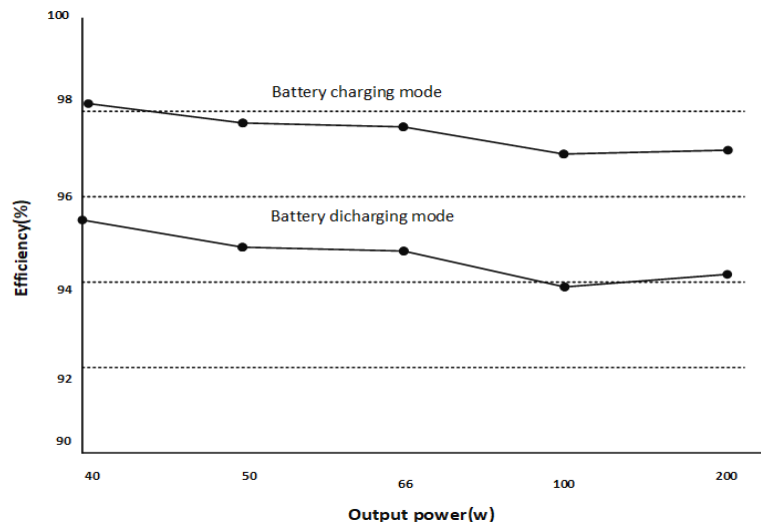
Figure (14): Magnetic inductor current wave (L_{m2})



شکل (۱۵) موج ولتاژ خروجی (v_o)

Figure (15): Output voltage wave (v_o)

بازده مبدل پیشنهادی در زیر بارهای مختلف و در حالت‌های مختلف عملکرد در شکل (۱۶) نشان داده شده است. مبدل پیشنهادی در حالت تخلیه سیستم ذخیره انرژی دارای راندمان ۹۴/۱ درصد و در حالت شارژ سیستم ذخیره انرژی و در شرایط بار کامل دارای راندمان ۹۶/۷ درصد است.



شکل (۱۶): بهره‌وری مبدل پیشنهادی در شرایط بار مختلف
Figure (16): The efficiency of the proposed converter under different load conditions

مبدل پیشنهادی، برای هر ورودی یک مسیر جریان مستقیم به خروجی به گونه‌ای ارائه می‌شود که هر طرف بتواند به‌طور مستقل کار کند. بنابراین، برداشت انرژی از هر منبع به راحتی قابل انجام است. به‌منظور کاهش تعداد اجزای مبدل، برخی از مؤلفه‌ها نقش‌های مختلفی را ایفا می‌کنند. بر این اساس، دستگاه ذخیره انرژی با همان مؤلفه‌هایی که در انتقال نیرو به بار استفاده شده شارژ می‌شود. مبدل پیشنهادی از افزایش ولتاژ خوبی برخوردار است و همچنین تمام سوئیچ‌ها در حالت‌های مختلف از استرس ولتاژ و جریان کم برخوردار است. تمام این خصوصیات بدون افزایش قابل توجهی در مؤلفه نیمه هادی در مقایسه با آثار مرتبط حاصل می‌شود. علاوه بر این، مزیت مبدل پیشنهادی در مقایسه با مقاله [۲۸]، کاهش استرس ولتاژ و جریان سوئیچ‌ها است. و در مقایسه با مقاله [۲۹]، از راندمان و خروجی مناسب‌تر و همچنین در مقایسه با مقاله [۳۰] که از ۴ سوئیچ استفاده می‌کند، از پیچیدگی مدار کمتری برخوردار است. جدول (۲) مقایسه مبدل پیشنهادی و چند مبدل ارائه شده را نشان می‌دهد.

جدول (۲): مقایسه مبدل پیشنهادی و چند مبدل ارائه شده

Table (2): Comparison of the proposed converter and several converters presented

راندمان	دید	سوئیچ	بهره ولتاژ	سوئیچینگ نرم	نوع مبدل
۹۶,۷٪	۹	۳	$\frac{n(2-D)+1}{1-D}$	ندارد	مبدل پیشنهادی
۹۵,۳٪	۵	۴	$\frac{1+n}{1-D}$	دارد	مبدل پیشنهادی مرجع [۲۸]
۹۵,۵٪	۳	۳	$\frac{DnV_{in}}{1-D}$	دارد	مبدل پیشنهادی مرجع [۲۷]
۸۶٪	۴	۴	$\frac{(1+D^2-D)}{(1-D)^2}$	ندارد	مبدل پیشنهادی مرجع [۲۶]

۷- نتیجه‌گیری

مبدل سه درگاه برای کاربردهای ترکیبی در این مقاله ارائه شده که دارای ورودی برای منابع تولید انرژی مانند سلول سوخت و منابع انرژی تجدیدپذیر و دارای درگاه برای دستگاه‌های ذخیره انرژی مانند باتری و فوق خازن است. در این مقاله یک مبدل سه درگاه بهره بالا برای سیستم‌های انرژی ترکیبی که دو مسیر جریان مجزا از هر منبع ورودی تا بار خروجی فراهم می‌کند معرفی شده و به‌منظور کاهش تعداد اجزای مبدل، برخی از مؤلفه‌ها نقش‌های مختلفی را ایفا می‌کنند. بر این اساس، دستگاه ذخیره انرژی با همان مؤلفه‌هایی که در انتقال نیرو به بار استفاده شده شارژ می‌شود. در این مبدل از تکنیک سلف‌های تزویج و

خازن سوئیچ شده برای افزایش ولتاژ استفاده می‌شود. سلف‌های تزویج شده در مبدل پیشنهادی همانند سلف‌های مبدل فوروارد و فلای‌بک عمل می‌کنند. آنها می‌توانند دو خازن را به‌صورت موازی شارژ و به‌صورت سری تخلیه کنند، که این تکنیک موجب افزایش بهره ولتاژ مبدل می‌گردد. انرژی سلف نشستی با استفاده از مدار کلمپ تخلیه و استرس ولتاژ روی کلید اصلی کاهش می‌یابد. همچنین مشکل بازیابی معکوس دیود خروجی توسط سلف نشستی کاهش می‌یابد. در این مبدل شرایط کلید - زنی نرم برقرار نیست ولی می‌توان با انتخاب یک سوئیچ به جای دیود D_c مدار کلمپ مبدل را به‌صورت فعال درآورد که شرایط کلیدزنی نرم را با استفاده از سلف نشستی و تغییر جهت جریان آن در لحظه‌های خاموش بودن کلید اصلی و روشن بودن کلید کمکی برقرار نمود. سرانجام، نتایج تجربی به‌دست آمده از اجرای مبدل نمونه اولیه، تحلیل نظری را تأیید می‌کند.

References

منابع

- [1] S.M.M. Mirtalaei, M. Mohtaj, H. Karami, "Design and implementation of a high step-up boost-sepic hybrid converter with soft switching", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 6, no. 24, pp. 27-34, March 2016 (doi: 10.1001.1.23223871.1394.6.24.3.3).
- [2] M. Zamani, G.H. Riahy, N. Abdolghani, M.H. Zamani, G. Shahgholian, "Utilization of thermal energy storage for reducing battery bank size of hybrid (wind-PV) systems", *Proceeding of the IEEE/ICCEP*, pp. 709-714, Ischia, Italy, June 2011 (doi: 10.1109/ICCEP.2011.6036358).
- [3] Z. Rehman, I. Al-Bahadly, S. Mukhopadhyay, "Multiinput dc-dc converters in renewable energy applications- An overview", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 521-539, Jan. 2015 (doi: 10.1016/j.rser.2014.08.033).
- [4] J. Faiz, G. Shahgholian, M. Ehsan, "Stability analysis and simulation of a single-phase voltage source UPS inverter with two-stage cascade output filter", *European Transactions on Electrical Power*, vol. 18, no. 1, pp. 29-49, Jan. 2008 (doi: 10.1002/etep.160).
- [5] N. Zhang, D. Sutanto, K.M. Muttaqi, "A review of topologies of three-port dc-dc converters for the integration of renewable energy and energy storage system", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 388-401, April 2016 (doi: 10.1016/j.rser.2015.11.079).
- [6] Z. Saadatizadeh, E. Babaei, F. Blaabjerg, C. Cecati, "Three-port high step-up and high step-down dc-dc converter with zero input current ripple", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 36, no. 2, pp. 1804-1813, Feb. 2021 (doi: 10.1109/TPEL.2020.3007959).
- [7] M. Forouzes, Y.P. Siwakoti, S.A. Gorji, F. Blaabjerg, B. Lehman, "Step-up dc-dc converters: A comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 32, no. 12, pp. 9143-9178, 2017 (doi: 10.1109/TPEL.2017.2652318).
- [8] M. Premkumar, C. Kumar, A. Anbarasan, R. Sowmya, "A novel non-isolated high step-up dc/dc boost converter using single switch for renewable energy systems", *Electrical Engineering*, vol. 102, pp. 811-829, 2020 (doi: 10.1007/s00202-019-00904-8).
- [9] M.C. Mira, Z. Zhang, A. Knott, M.A.E. Andersen, "Analysis, design, modeling, and control of an interleaved-boost full-bridge three-port converter for hybrid renewable energy systems", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 32, no. 2, pp. 1138-1155, Feb. 2017 (doi: 10.1109/TPEL.2016.2549015).
- [10] H. Wu, K. Sun, R. Chen, H. Hu, Y. Xing, "Full-bridge three-port converters with wide input voltage range for renewable power systems", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 27, no. 9, pp. 3965-3974, 2012 (doi: 10.1109/TPEL.2012.2188105).
- [11] H. Wu, J. Zhang, X. Qin, T. Mu, Y. Xing, "Secondary-side-regulated soft-switching full-bridge three-port converter based on bridgeless boost rectifier and bidirectional converter for multiple energy interface", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 31, pp. 4847-4860, 2016 (doi: 10.1109/TPEL.2015.2473002).
- [12] Y. Zhao, W. Li, X. He, "Single-phase improved active clamp coupled-inductor-based converter with extended voltage doubler cell", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 27, no. 6, pp. 2869-2878, June 2012 (doi: 10.1109/TPEL.2011.2176752).
- [13] S. Khosrogorji, M. Ahmadian, H. Torkaman, S. Soori, "Multi-input dc/dc converters in connection with distributed generation units- a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 66, pp. 360-379, 2016 (doi:10.1016/j.rser.2016.07.023).
- [14] E. Babaei, O. Abbasi, "Structure for multi-input multi-output dc-dc boost converter", *IET Power Electronics*, vol. 9, pp. 9-19, 2016 (doi:10.1049/iet-pel.2014.0985).
- [15] L. Wang, Z. Wang, H. Li, "Asymmetrical duty cycle control and decoupled power flow design of a three-port bidirectional dc-dc converter for fuel cell vehicle application", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 27, no. 2, pp. 891-904, 2012 (doi: 10.1109/TPEL.2011.2160405).

- [16] C. Zhao, S.D. Round, J.W. Kolar, "An isolated three-port bidirectional DC-DC converter with decoupled power flow management", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 23, no. 5, pp. 2443-2453, 2008 (doi: 10.1109/TPEL.2008.2002056).
- [17] H. Zhu, D. Zhang, B. Zhang, Z. Zhou, "Nonisolated three-port DCDC converter and three-domain control method for PV-battery power systems", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 8, pp. 4937-4947, 2015 (doi: 10.1109/TIE.2015.2393831).
- [18] H. Wu, Y. Jia, F. Yang, L. Zhu, Y. Xing, "Two-Stage isolated bidirectional dc-ac converters with three-port converters and two dc buses", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 4, pp. 4428-4439, Dec. 2020 (doi: 10.1109/JESTPE.2019.2936145).
- [19] D. Gunasekaran, L. Umanand, "Integrated magnetics based multi-port bidirectional DC-DC converter topology for discontinuous-mode operation", *IET Power Electronics*, vol. 5, no. 7, pp. 935-944, Jan. 2012 (doi: 10.1049/iet-pel.2011.0492).
- [20] M. Soltani, S.M.M. Mirtalaei, "Design, simulation and implementation of a high step-up three level boost converter with coupled-inductor and passive clamp", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 8, no. 32, pp. 3-12, June 2017 (dor: 20.1001.1.23223871.1396.8.32.1.1).
- [21] H. Nagata, M. Uno, "Nonisolated PWM three-port converter realizing reduced circuit volume for satellite electrical power systems", *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 56, no. 5, pp. 3394-3408, Oct. 2020 (doi: 10.1109/TAES.2020.2971287).
- [22] H. Wu, L. Zhu, F. Yang, "Three-port-converter-based single-phase bidirectional ac-dc converter with reduced power processing stages and improved overall efficiency", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 33, no. 12, pp. 10021-10026, Dec. 2018 (doi: 10.1109/TPEL.2018.2824242).
- [23] S.M.M. Mirtalaei, R. Amani-Nafchi, "Boost high step-up dc/dc converter with coupled inductors and diode-capacitor technique", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol 10, no. 39, pp. 3-12, Dec. 2019 (dor: 20.1001.1.23223871.1398.10.39.1.9).
- [24] Y.P. Yang, J.F. Hsieh, T.J. Chenm L.S. Liang, "Analysis and implementation of a novel single- switch high step-up DC-DC converter", *IET Power Electron Received*, vol. 5, no. 1, pp.11-21, Jan. 2012 (doi: 10.1049/iet-pel.2010.0279).
- [25] A. Pressman, *Switching power supply design*: McGraw-Hill, Inc., 1997.
- [26] J. Zhang, J.S. Lai, R.Y. Kim, W. Yu, "High-power density design of a soft-switching high-power bidirectional dc-dc converter", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 22, pp. 1145-1153, 2007 (doi: 10.1109/TPEL.2007.900462).
- [27] M. R. Mohammadi, H. Farzanehfard, "A new family of zero-voltage-transition nonisolated bidirectional converters with simple auxiliary circuit", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 63, pp. 1519-1527, 2016 (doi: 10.1109/TIE.2015.2498907).
- [28] F. Kardan, R. Alizadeh, M.R. Banaei "A new three input DC/DC converter for hybrid PV/FC/battery applications", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol.5, no.4, 2017 (doi: 10.1109/JESTPE.2017.2731816).
- [29] S. Salehi Dobakhshari, S.H. Fathi, J. Milimonfared, "A new soft-switched three-port DC/DC converter with high voltage gain and reduced number of semiconductors for hybrid energy applications", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 35, no. 4, 2019 (doi:10.1109/TPEL.2019.2933182).
- [30] R. Faraji, H. Farzanehfard, "Soft-switched non-isolated high step-up three-port dc-dc converter for hybrid energy systems", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 33, no. 12, 2018 (doi: 10.1109/TPEL.2018.27918-40).

زیر نویس ها

1. Hybrid Energy System
2. Multi-Port Converter
3. Voltage stress
4. Clamp circuit
5. Leakage inductance
6. Duty cycle
7. Isolated
8. Non-isolated
9. Boost converter
10. Soft switching