

Designing and Simulating of Step-Up DC-DC Converter for Fuel Cell Electric Vehicles

Maher Abdalnabi Alwan¹, M.Sc, Ghazanfar Shahgholian^{2,3}, Professor

¹Department of Electrical Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Khorasgan, Isfahan, Iran

²Department of Computer Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

³Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Abstract:

Boost converters are widely used in electric cars, because the use of batteries and fuel cells increases the voltage level to drive the electric motor. One of the problems of step-up converters is the increase in volume and weight due to step-up transformers. So far, various methods such as switched capacitor, coupled inductor and multiplier circuits have been used to eliminate the transformer and reduce the size and weight of the circuit. To further reduce the volume and weight of the circuit, it is necessary to increase the switching frequency, which is possible only by using the soft switching method. Using an auxiliary switch to create soft switching conditions is common in most methods, because not using an auxiliary switch imposes voltage and current stress on the circuit. In this article, a step-up converter with an auxiliary circuit, zero voltage transition (ZVT), is presented, which provides switching conditions at zero voltage to turn on the switch, and switching at zero voltage to turn off the switch. The voltage stress of the converter is very low, and all the diodes are switched off at zero current, so they do not have reverse recovery problems. Also, besides absorbing the energy of the leakage inductor, the clamp capacitor helps to increase the gain of the converter. The provided converter is simulated in P-Spice software. The simulation results using a laboratory prototype confirm the effectiveness and feasibility of the studied converter and its suitability for fuel cell electric vehicles.

Keywords: Clamp capacitor, Step-up converter, Zero current switching, Zero voltage switching

Received: 23 September 2023

Revised: 10 February 2024

Accepted: 16 February 2024

Corresponding Author: Dr. Ghazanfar Shahgholian, shahgholian@iaun.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2024.904768>





طراحی و شبیه‌سازی مبدل بسیار افزایشنده dc/dc برای خودروهای الکتریکی پیل سوختی

ماهر عبدالنبی الوان^۱، کارشناسی/ارشد، غضنفر شاهقلیان^{۲،۳}، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، خوراسگان، اصفهان، ایران

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

۳- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

چکیده: مبدل‌های بسیار افزایشنده در خودروهای برقی کاربرد وسیعی دارند زیرا استفاده از باتری و پیل سوختی باعث می‌شود که برای درایو موتور الکتریکی سطح ولتاژ افزایش یابد. از مشکلات مبدل‌های افزایشنده، افزایش حجم و وزن به علت ترانسفورماتورهای افزایشنده است. تاکنون روش‌های متنوع مانند خازن سویچ شونده، سلف تزویج شده و مدارهای ضرب‌کننده برای حذف ترانسفورماتور و کاهش حجم و وزن مدار استفاده شده است. برای کاهش بیشتر حجم و وزن مدار لازم است تا فرکانس کلیدزنی افزایش یابد که تنها با استفاده از روش کلیدزنی نرم امکان‌پذیر است. استفاده از سویچ کمکی برای ایجاد شرایط کلیدزنی نرم در اکثر روش‌ها مرسوم است زیرا عدم استفاده از سویچ کمکی استرس ولتاژ و جریان به مدار تحمیل می‌کند. در این مقاله یک مبدل بسیار افزایشنده با مدار کمکی گذار ولتاژ صفر (ZVT) ارائه شده که شرایط کلیدزنی در ولتاژ صفر برای روشن شدن سویچ و کلیدزنی در ولتاژ صفر برای خاموش شدن سویچ فراهم می‌کند. استرس ولتاژ مبدل بسیار پایین است و تمام دیودها به‌صورت کلیدزنی در جریان صفر خاموش می‌شوند و لذا مشکل بازیابی معکوس ندارند. همچنین خازن کلمپ علاوه بر جذب انرژی سلف ناشی به افزایش بهره مبدل کمک می‌کند. مبدل ارائه شده در نرم افزار پی-اسپایس شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از یک نمونه اولیه آزمایشگاهی، اثربخشی و امکان‌سنجی مبدل مورد مطالعه و مناسب بودن آن برای وسایل نقلیه الکتریکی پیل سوختی را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: خازن کلمپ، کلیدزنی در جریان صفر، کلیدزنی در ولتاژ صفر، مبدل بسیار افزایشنده

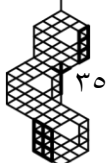
تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۷

نویسنده‌ی مسئول: دکتر غضنفر شاهقلیان، shahgholian@iaun.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2024.904768>





۱- مقدمه

انرژی برق نقش مهم و محوری در توسعه پایدار مراکز صنعتی و اقتصادی و حفاظت از محیط زیست دارد و استفاده از روش‌های جدید در حوزه صنعت برق به دلیل سریع بودن گسترش تکنولوژی، لازم و ضروری است [۱،۲]. کاهش منابع سوخت‌های فسیلی^۱ و اهمیت حفاظت زیست‌محیطی^۲ ناشی باعث افزایش کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر^۳ مانند سلول‌های خورشیدی^۴ [۳،۴]، پیل‌های سوختی^۵ [۵،۶] و انرژی بادی [۷،۸] شده است [۹،۱۰]. بنابراین نیاز به مبدل‌های dc-dc بسیار افزایش یافته^۶ بیشتر از قبل احساس می‌شود [۱۱،۱۲]. مبدل تقویت‌کننده (مبدل بسیار افزایشدهنده) ولتاژ را از ورودی (تغذیه) به خروجی (بار) افزایش می‌دهد در حالی که جریان را پایین می‌آورد [۱۳،۱۴]. مبدل بوست^۷ دارای ساختار ساده است که برای افزایش سطح ولتاژ استفاده می‌شود [۱۵،۱۶]. برای تولید بهره ولتاژ بالا در این مبدل باید ضریب وظیفه^۸ بزرگ و نزدیک به یک انتخاب شود [۱۷]. در مبدل بوست استرس ولتاژ^۹ کلید و دیود خروجی برابر با ولتاژ خروجی است که در ولتاژهای بالا باعث افزایش تلفات هدایتی^{۱۰} و کلیدزنی و نیز تشدید مشکل بازیابی معکوس دیود خروجی می‌گردد [۱۸،۱۹]. بنابراین مبدل بوست در شکل پایه‌ای برای استفاده در کاربردهای بسار افزایشدهنده مناسب نیست [۲۰،۲۱].

پیل‌های سوختی مستقیماً انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند [۲۲،۲۳]. پیل‌های سوختی به دلیل راندمان بالا، حداقل نشت آلاینده‌های زیست‌محیطی، تولید همزمان حرارت و الکتریسیته، استفاده در کاربردهای تولید غیرمتمرکز انرژی و همچنین آرام و بی سر و صدا بودن در موارد مختلفی مانند حمل و نقل و نیروگاه‌ها به کار می‌روند [۲۴،۲۵]. در وسایل نقلیه سلول سوختی ولتاژ خروجی معمولاً کمتر نسبت به ولتاژهای مورد نیاز باس dc است و با افزایش جریان خروجی، ولتاژ خروجی به سرعت کاهش پیدا می‌کند [۲۶]. بنابراین اکثر خودروهای الکتریکی^{۱۱} پیل سوختی به مبدل‌های dc-dc با افزایش ولتاژ به صورت گسترده نیاز دارند تا ولتاژ تقریباً کم پشت پیل سوختی را با باس لینک dc یا دستگاه‌های ذخیره انرژی افزایش دهند.

تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه کاربرد مبدل‌ها برای خودروهای الکتریکی پیل سوختی ارائه شده است [۲۷-۳۴].

یک مبدل dc-dc باک بوست تک-سوئیچ یک-طرفه برای کنترل پیوسته جریان توان در [۳۵] ارائه شده که مبدل پیشنهادی از تعداد محدودی از اجزای غیرفعال و شش خازن استفاده می‌شود. همچنین این مبدل در یک محدوده ولتاژ ورودی گسترده با جریان ورودی مداوم می‌تواند کار کند.

دو مبدل dc-dc غیر ایزوله برای خودروهای الکتریکی پیل سوختی در [۳۶] پیشنهاد شده که ویژگی‌های اصلی مبدل‌های بوست درجه دوم و کاک را ترکیب می‌کنند. در این مبدل ولتاژ بالا و کنترل ساده با استفاده از تنها یک کلید برق فعال ارجاع شده به زمین انجام می‌شود.

یک مبدل dc-dc چند ورودی برای خودروهای الکتریکی هیبریدی در [۳۷] بررسی شده که در مقایسه با مبدل‌های معمولی، بهره خروجی افزایش یافته است. پیل سوختی، پنل فتوولتائیک و سیستم ذخیره انرژی، منابع ورودی مبدل پیشنهادی هستند و از پیل سوختی به عنوان منبع تغذیه اصلی و فتوولتائیک به عنوان سقفی برای شارژ باتری، افزایش راندمان و کاهش مصرف سوخت استفاده می‌شود.

اعتبار سنجی زمان واقعی از یک استراتژی کنترل قوی برای یک مبدل تقویت‌کننده شناور چهار فاز dc/dc غیر ایزوله با نسبت افزایش بالا در [۳۸] ارائه شده که برای کاربردهای خودروهای الکتریکی سلول سوختی مناسب است. کنترل‌کننده بر اساس یک کنترل حلقه دوگانه با رویکرد بی‌نهایت حساسیت مختلط S/KS طراحی شده که از یک حلقه ولتاژ خارجی و یک حلقه جریان داخلی برای دستیابی به یک تنظیم سریع در برابر اختلال و تغییر بار با عملکرد دینامیکی بالا تشکیل شده است.

کارایی دو مبدل الکترونیک قدرت متصل به آبشار شامل یک تقویت‌کننده میان لایه و یک تقویت‌کننده باک با هدف تولید حداکثر توان از پیل سوختی و تنظیم ولتاژ بار تحت شرایط کاری مختلف و تغییرات بار در [۳۹] بررسی شده است. مبدل اول برای حداقل کردن امواج ولتاژ پیل سوختی و تعیین چرخه کار بهینه برای تولید حداکثر توان و مبدل دوم برای برآورد الزامات بار از نظر تنظیم ولتاژ استفاده می‌شوند. هر دو مبدل در محیط سیمولینک متلب شبیه‌سازی شده‌اند و کارایی طراحی بررسی شده است.

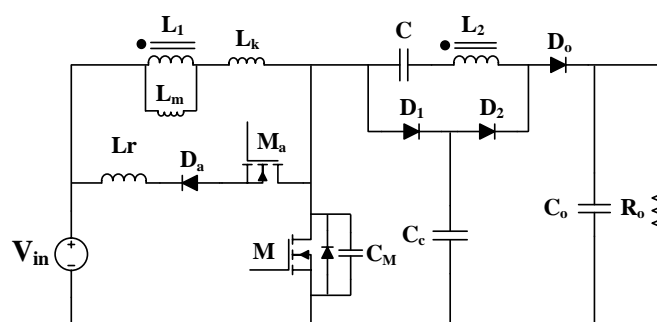
در این مقاله یک مبدل dc-dc بسیار افزایشدهنده گذار ولتاژ صفر^{۱۲} با سلف تزویج شده ارائه شده است. مدار کمکی دارای حداقل تعداد المان بوده و شرایط کلیدزنی نرم برای کلیدها فراهم است که باعث افزایش راندمان مبدل می‌شود. همچنین جهش‌های ولتاژ ناشی از سلف‌های تزویج شده نیز توسط خازن کلمپ^{۱۳} جذب می‌گردد که خازن کلمپ به افزایش بهره نیز کمک می‌کند. از مزایای مبدل ارائه شده می‌توان



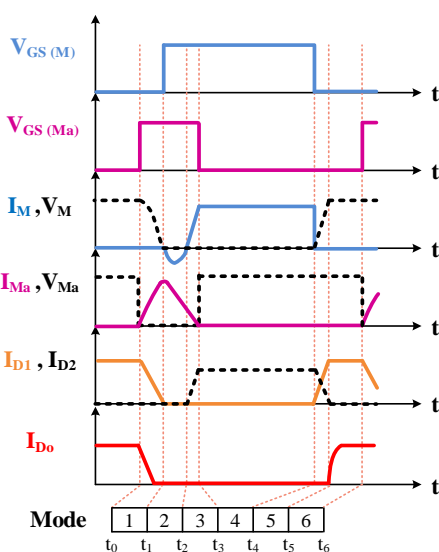
به ماژولار بودن مدار کمکی نیز اشاره نمود که می‌توان بدون اضافه کردن المان شاخه‌های موازی را افزایش داد. همچنین استفاده از تکنیک سلف‌های تزویج شده و خازن‌های سوئیچ شونده بهره مبدل را افزایش داده و استرس ولتاژ روی سوئیچ اصلی را کاهش می‌دهد.

۲- مبدل مورد مطالعه

مبدل بسیار افزاینده مورد مطالعه مطابق شکل (۱) دارای دو قسمت اصلی است. قسمت اول مدار افزایش بهره شامل سلف‌های تزویج L_1 و L_2 ، خازن سری C ، دیودهای D_1 و D_2 و خازن C_C است. قسمت دوم مدار کمکی گذار ولتاژ صفر شامل سلف L_r و سوئیچ کمکی M_a و دیود کمکی D_a و خازن اسنابر C_M است. بقیه المان‌ها شامل سوئیچ اصلی M ، دیود خروجی D_o ، خازن خروجی C_o هستند. سلف‌های تزویج نیز با سلف مغناطیس‌کنندگی L_m و سلف نشستی سری L_k مدل شده‌اند. شکل موج‌های اصلی مبدل مورد مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است.



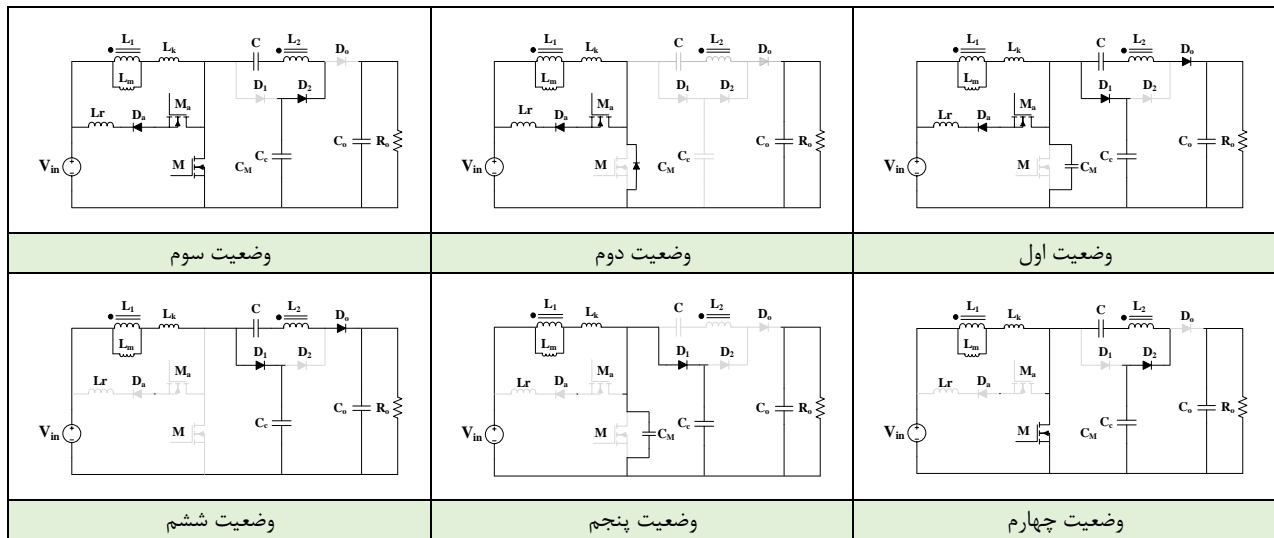
شکل (۱): مبدل بسیار افزاینده مورد مطالعه



شکل (۲): موج‌های اصلی مبدل بسیار افزاینده مورد مطالعه

۲-۱- عملکرد مبدل

مبدل بسیار افزاینده مورد مطالعه دارای شش وضعیت عملکرد مطابق شکل (۳) در یک سیکل کلیدزنی است. مدار کمکی توسط سوئیچ کمکی قبل از روشن شدن سوئیچ اصلی M وارد مبدل شده و خازن اسنابر را تخلیه و شرایط کلیدزنی ولتاژ صفر را برای سوئیچ M فراهم می‌نماید.



شکل (۳): شش وضعیت عملکرد مبدل مورد مطالعه

در هنگام خاموش شدن نیز به علت وجود خازن اسنابر، ولتاژ سوئیچ با شیب افزایش می‌یابد. برای سادگی تحلیل جریان سلف L_M ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین ولتاژ خازن‌های C_C ، C_o و C به علت اندازه بزرگ در یک سیکل ثابت هستند. المان‌ها نیز ایده‌آل فرض شده‌اند. قبل از وضعیت اول سوئیچ اصلی و کمکی خاموش هستند و دیود D_o روشن است و انرژی از ورودی به خروجی از طریق دیود خروجی D_o منتقل می‌شود. مدار کمکی نیز خاموش است.

وضعیت اول: این وضعیت با روشن شدن سوئیچ کمکی M_a آغاز می‌شود و سلف L_r شروع به رزونانس با خازن C_M می‌نماید. در نتیجه جریان سوئیچ M_a و دیود D_a به صورت رزونانس افزایش یافته و تحت شرایط جریان صفر روشن می‌شوند.

وضعیت دوم: این وضعیت با تخلیه کامل C_M و روشن شدن دیود بدنه سوئیچ اصلی آغاز می‌گردد. از این لحظه به بعد سوئیچ M می‌تواند ولتاژ صفر هدایت نماید. از طرفی ولتاژ ثابت V_{in} دو سر L_r قرار گرفته و جریان سلف L_r شروع به کاهش به صورت خطی می‌نماید.

وضعیت سوم: در این وضعیت جریان از دیود بدنه سوئیچ اصلی M به خود سوئیچ اصلی منتقل می‌شود و جریان سوئیچ کمکی به کاهش خود ادامه داده تا در انتهای این وضعیت به صورت جریان صفر خاموش شود.

وضعیت چهارم: در این وضعیت دیود خروجی D_o به صورت جریان صفر خاموش و دیود D_2 هدایت می‌کند و انرژی خازن C_C به خازن C منتقل می‌شود. جریان بار در این حالت توسط خازن خروجی تامین می‌شود و سلف مغناطیس‌کنندگی L_m خطی شارژ می‌شود.

وضعیت پنجم: این وضعیت با خاموش شدن M آغاز می‌شود و جریان L_m شروع به شارژ خازن اسنابر C_m به صورت خطی می‌نماید. بنابراین سوئیچ M ، به صورت ولتاژ صفر خاموش می‌شود. از طرفی انرژی سلف L_K نیز با روشن شدن دیود D_1 در خازن C_C تخلیه می‌گردد.

وضعیت ششم: در این وضعیت دیودهای D_o و D_1 هدایت کرده و انرژی از سلف L_m به خروجی منتقل می‌شود. همچنین خازن C نیز در خروجی تخلیه می‌شود. به این ترتیب به افزایش ولتاژ مبدل کمک می‌کند. این وضعیت با روشن شدن سوئیچ کمکی پایان می‌پذیرد.

۲-۲- آنالیز مبدل

با توجه به استفاده از سلف تزویج و خازن سری برای افزایش بهره با نوشتن رابطه بالانس ولت-ثانیه بهره به دست می‌آید.

$$V_{in}DT + (V_{in} - V_{CC})(1 - D)T = 0 \quad (1)$$

که در آن D ضریب وظیفه و T زمان پریود مبدل است. همچنین ولتاژ خازن V_{CC} و ولتاژ ورودی هستند. ولتاژ خازن C_C برابر است با:

$$V_{CC} = \frac{V_{in}}{1 - D} \quad (2)$$

اگر ولتاژ سلف L_1 برابر V_{L1} در نظر گرفته شود، رابطه زیر با نوشتن KVL تعیین می‌گردد:

$$-V_{in} + V_{L1} + nV_{L1} + V_C + V_o = 0 \quad (3)$$

بهره ولتاژ M برابر است با:

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{n+2}{1-D} \quad (4)$$

الف- محاسبه استرس ولتاژ المان‌ها: برای محاسبه استرس ولتاژ المان‌های فعال مدار لازم است یک KVL در حلقه آن المان وقتی که خاموش است نوشته شود.

$$V_M = \frac{V_{in}}{1-D} = \frac{D_o}{n+2} \quad (5)$$

ولتاژ دیود خروجی (V_{D_o}) برابر است با:

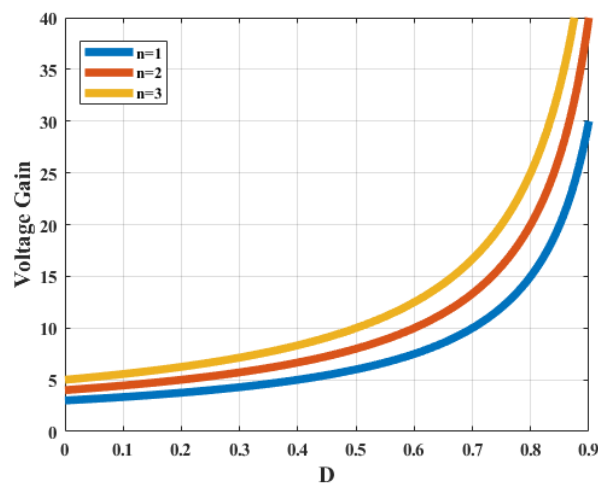
$$V_{D_o} = V_o - V_{CC} = V_o - \frac{V_o}{n+2} = V_o \frac{n+1}{n+2} \quad (6)$$

ولتاژ دیودهای D_1 و D_2 از قسمت مدار افزایش بهره از رابطه‌های (7) و (8) تعیین می‌شوند.

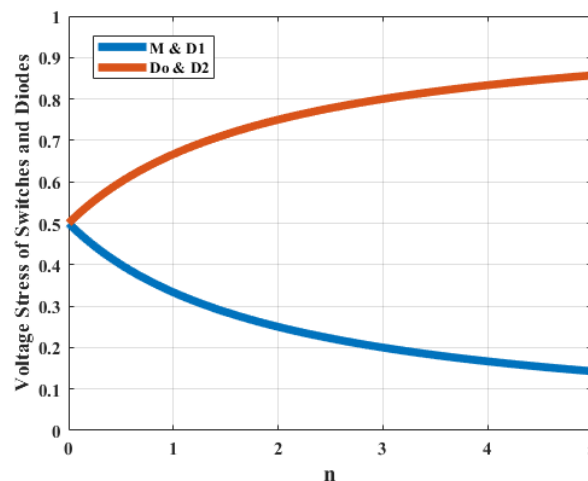
$$V_{D1} = V_M = \frac{V_o}{n+2} \quad (7)$$

$$V_{D2} = V_{D_o} = V_o \frac{n+1}{n+2} \quad (8)$$

شکل (4) بهره مبدل بر حسب تغییرات ضریب وظیفه و نسبت دور را نشان می‌دهد و شکل (5) نیز استرس ولتاژ المان‌های نیمه هادی مبدل بر حسب ولتاژ خروجی را با تغییرات نسبت دور نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش n استرس ولتاژ سوئیچ مبدل و دیود D_1 کاهش می‌یابد ولی استرس ولتاژ دیودهای D_o و D_2 افزایش می‌یابد که باید یک حد وسط در طراحی انتخاب گردد.



شکل (4): بهره ولتاژ مبدل بسیار افزایش یافته پیشنهادی



شکل (5): استرس ولتاژ سوئیچها و دیودهای مبدل بسیار افزایش یافته پیشنهادی

ب- طراحی خازن خروجی و کلمپ: خازن خروجی (C_o) و خازن کلمپ (C_c) از روی رابطه پایه خازن مطابق رابطه‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شوند.

$$i_c = C \frac{dv}{dt} \rightarrow C = \frac{i_c \Delta t}{\Delta V_c} \quad (9)$$

$$C_o = \frac{I_o D}{\Delta V_o \cdot f} \quad (10)$$

$$C_c = \frac{I_{in}(1-D)}{\Delta V_{cc} \cdot f} \quad (11)$$

ج- طراحی سلف L_r : برای طراحی سلف کمکی بایستی انرژی آن قادر به تخلیه خازن اسنابر باشد. در مدار اسنابر غیراتلافی، توانی مصرف نمی‌شود و معمولاً طراحی این نوع مدار پیچیده و پرهزینه است. اسنابر بدون تلفات معمولاً زمانی که هدف بازده بسیار بالا است و کارایی آنها در سلف و خازن است، ترجیح داده می‌شود. در این اسنابرها از سلف و خازن استفاده می‌شود. خازن به عنوان یک ذخیره‌کننده شارژ عمل می‌کند و مقاومت مسیر تخلیه را فراهم می‌نماید.

۳- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت برای بررسی تحلیل مبدل ارائه شده، یک مبدل برای ولتاژ خروجی ۳۹۰ ولت، ولتاژ ورودی ۴۰ ولت و در توان ۱۵۰ وات با استفاده از نرم‌افزار پی-اسپایس شبیه‌سازی شده است. شماتیک مبدل بسیار افزاینده مورد مطالعه در نرم‌افزار پی-اسپایس در شکل (۶) نشان داده شده است.

مقدار سلف‌های L_1 و L_2 برابر ۲۰۰ میکروهنری، سلف L_a برابر ۵ میکروهنری، خازن‌های C_c ، C_s ، C_o و C به ترتیب برابر ۲۰ نانوفاراد، ۱۰ میکروفاراد، ۴۷ میکروفاراد و ۲۲ میکروفاراد است. نسبت N و ضریب K به ترتیب برابر ۱ و ۰/۹۹ است. همه سوئیچ‌ها از نوع IRF740 و همه دیودها از نوع MUR860 انتخاب شده‌اند. توان خروجی ۱۵۰ وات و فرکانس کلیدزنی ۱۰۰ کیلوهرتز است.

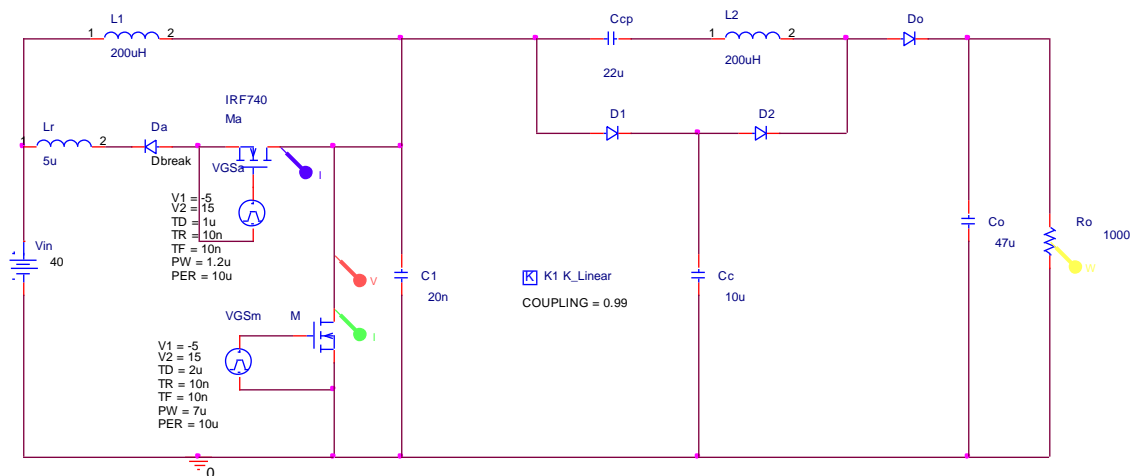
جریان سوئیچ اصلی M در لحظه روشن شدن سوئیچ‌ها منفی است و لذا دیود بدنه هدایت کرده و شرایط کلیدزنی در ولتاژ صفر برای سوئیچ‌ها برقرار است و بنابراین تلفات روشن شدن خازنی وجود ندارد. اما ولتاژ سوئیچ‌ها هم در هنگام خاموش شدن به علت وجود خازن اسنابر با شیب بالا می‌روند که مبین خاموش شدن سوئیچ‌های اصلی تحت شرایط کلیدزنی در ولتاژ صفر است.

در شکل (۷) موج جریان و ولتاژ سوئیچ کمکی Ma نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جریان با شیب بالا رفته و شرایط جریان صفر برای روشن شدن سوئیچ کمکی فراهم است.

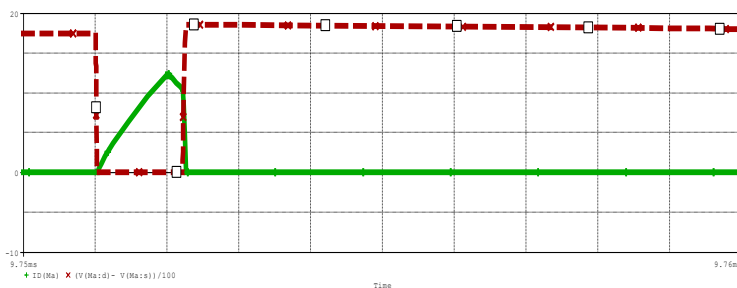
در شکل (۸) موج جریان دیودهای D_1 و D_2 نشان داده شده و شرایط جریان صفر برای این دیودها اثبات می‌گردد زیرا جریان با شیب کاهش یافته تا به صفر رسیده است. شکل موج جریان دیود خروجی D_o و شکل موج دیود کمکی D_a نیز در شکل‌های (۹) و (۱۰) آورده شده که با توجه به شیب جریان در هنگام روشن شدن و خاموش شدن دیودها شرایط جریان صفر برای آنها مسجل است و تلفات محسوسی به مبدل تحمیل نمی‌کنند.

با توجه به ولتاژ پایین پیل سوختی، نیاز به مبدل‌های بسیار افزاینده جهت افزایش ولتاژ به ولتاژ مناسب اینورترها است. روش‌های افزایش ولتاژ مانند روش سوئیچ خازنی، روش سلف کوپل شده، مدارهای ضرب کننده‌های خازنی دیودی یا ترکیب آنها بسیار متداول شده‌اند. با کارگیری این روش‌ها، مشکل ضریب وظیفه بالا در مبدل‌های بوست معمولی برای تبدیل بسیار افزاینده حل می‌شود. به عنوان مثال، می‌توان از سلف کوپل شده برای دستیابی به یک نسبت تبدیل بالا استفاده کرد، اما سلف نشستی منجر به افزایش استرس ولتاژ سوئیچ می‌شود. مدارهای چند برابر کننده ولتاژ مانند ضرب کننده‌های خازنی دیودی به دلیل کم هزینه بودن، بدون ترانسفورمر بودن، نسبت تبدیل ولتاژ بالا، استرس ولتاژ پایین، برای کاربردهای انرژی تجدیدپذیر کم توان مناسب هستند. مبدل‌های ایزوله برای افزایش ضریب تبدیل ولتاژ از ترانسفورمر استفاده می‌کنند. با این حال، وزن، حجم، تلفات و ریپل جریان ورودی به دلیل وجود ترانسفورمر افزایش می‌یابد؛ بنابراین در سیستم‌های فتوولتائیک در صورت عدم نیاز به ایزوله بودن، مبدل‌های غیر ایزوله مناسب تر هستند. کلیدزنی نرم نیز با توجه به قابلیت افزایش فرکانس کلیدزنی، کاهش حجم و وزن مدار و کاهش تلفات در مبدل‌های بسیار افزاینده استفاده شده است.

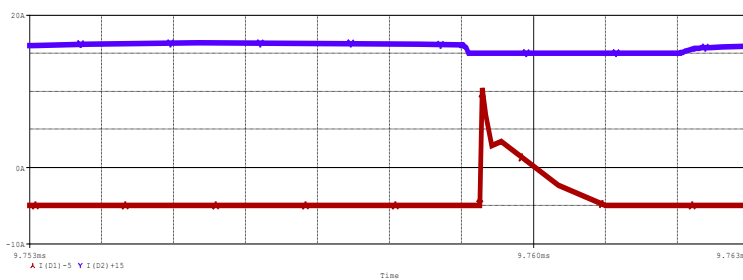
مدارهای ZCT و ZVT به علت وجود سویچ کمکی و پیچیده شدن مدار کنترل هم هزینه و هم پیچیدگی مدار افزایش می‌یابد. بنابراین استفاده از مدارهای اسنابر بدون تلفات راه کار بسیار مناسب برای حذف سویچ کمکی و کاهش هزینه‌ها است.



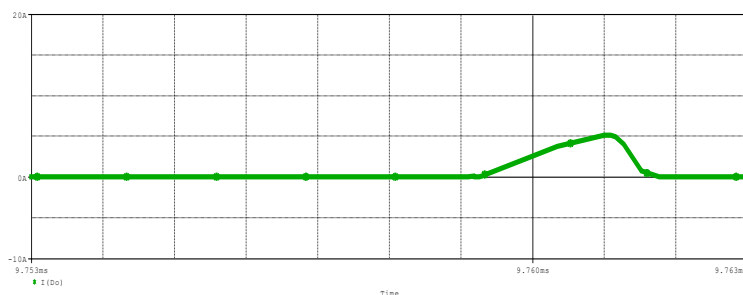
شکل (۶): شماتیک مبدل بسیار افزایشنده مودر مطالعه در نرم افزار اورکد



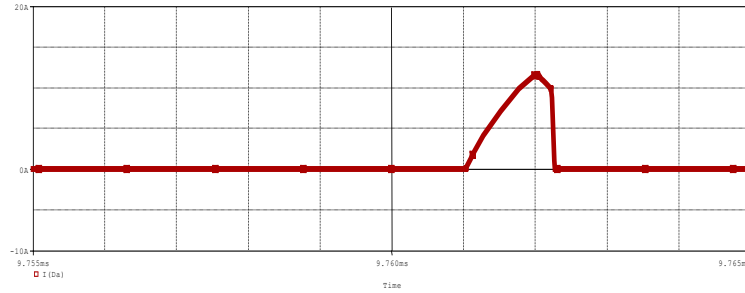
شکل (۷): جریان (سبز) و ولتاژ (قرمز) سوئیچ کمکی M_n در مقیاس (2 $\mu\text{s}/\text{div}$, 2A/div, 80V/div)



شکل (۸): جریان دیودهای کمکی D_1 و D_2 در مقیاس (1 $\mu\text{s}/\text{div}$, 2 A/div)



شکل (۹): جریان دیود خروجی D_o در مقیاس (2 $\mu\text{s}/\text{div}$, 2 A/div)



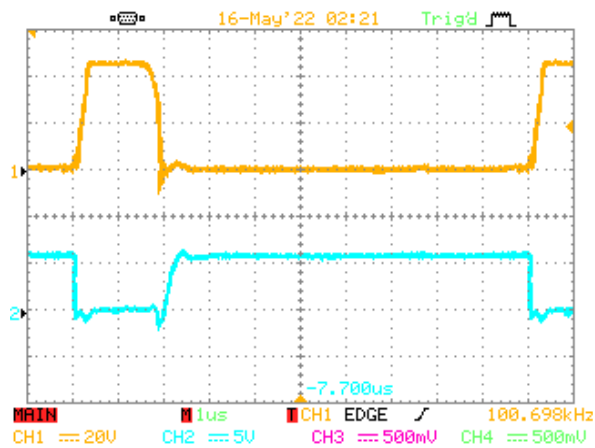
شکل (۱۰): جریان دیود کمکی D_a در مقیاس $(1 \mu s/div, 2 A/div)$

۴- نتایج آزمایشگاهی

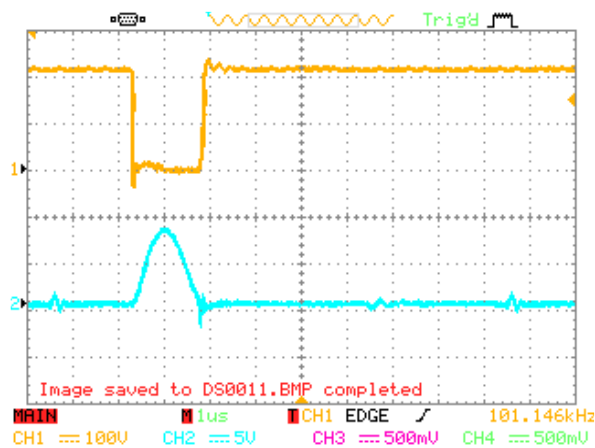
یک نمونه آزمایشگاهی ۱۵۰ واتی از مبدل بسیار افزایشده مورد مطالعه در این قسمت پیاده‌سازی شده که در شکل (۱۱) نشان داده شده است. شکل (۱۲) موج‌های ولتاژ و جریان سویچ‌های اصلی، شکل (۱۳) موج‌های ولتاژ و جریان سویچ‌های کمکی و شکل (۱۴) جریان دیودهای مدار را نشان می‌دهند که تایید کننده نتایج شبیه‌سازی هستند.



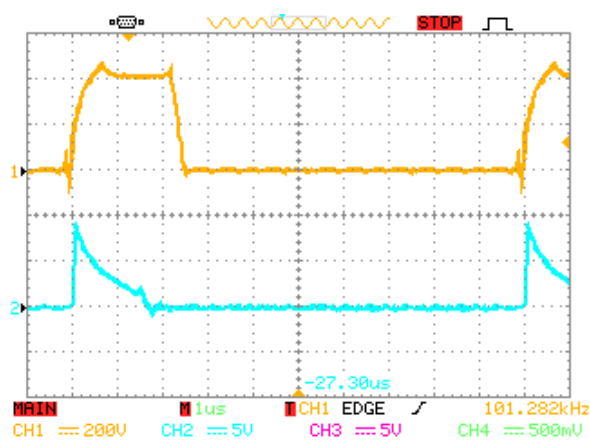
شکل (۱۱): نمونه آزمایشگاهی مبدل مورد مطالعه



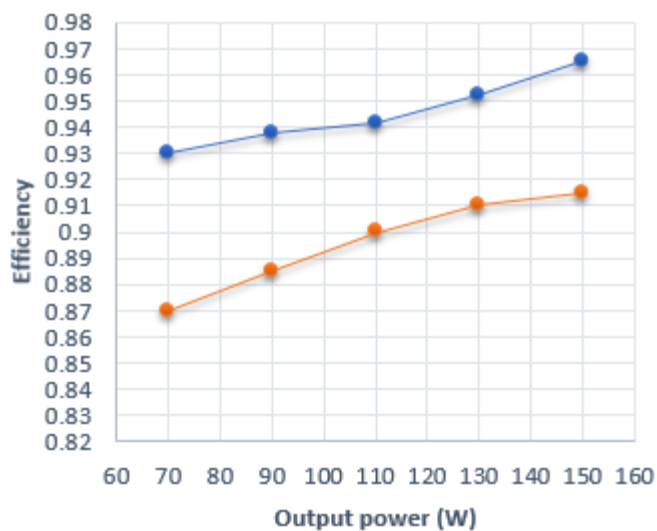
شکل (۱۲): موج ولتاژ و جریان سویچ اصلی M



شکل (۱۳): موج ولتاژ و جریان سویچ اصلی M_a



شکل (۱۴): جریان دیود D_o (بالا) و دیود D_i (پایین)



شکل (۱۵): بازده مبدل بسیار افزاینده مورد مطالعه (منحنی بالا) نسبت به مبدل بسیار افزاینده سخت (منحنی پایین)



۵- راندمان مبدل مورد مطالعه

شکل (۱۵) راندمان مبدل مورد مطالعه را در مقایسه با نمونه کلیدزنی سخت آن (بدون مدار کمکی) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در بار کامل، مبدل مورد مطالعه دارای ۵ درصد بهبود راندمان است. قابل ذکر است که در مبدل مورد مطالعه با کاهش توان، راندمان کاهش محسوس نداشته ولی در مبدل کلیدزنی سخت به علت وجود مقاومت در ساختار مدار کلمپ پسیو و تلفات کلیدزنی در سوئیچ‌ها، راندمان افت بیشتری دارد.

۶- نتیجه‌گیری

مبدل‌های dc-dc یک عملکرد حیاتی در بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر و کاربردهای پیل سوختی دارند. برای افزایش ولتاژ اینورترها در پیل سوختی به علت پایین بودن ولتاژ، نیاز به مبدل بسیار افزایش‌دهنده جهت افزایش ولتاژ است. با به‌کارگیری روش‌های متداول مانند سوئیچ خازنی و مدارهای ضرب‌کننده خازنی دیودی، مشکل ضریب وظیفه بالا در مبدل‌های افزایش‌دهنده معمولی برای تبدیل بسیار افزایش‌دهنده حل می‌شود ولی هر روش دارای مشکلات مربوط به خود هستند. کلیدزنی نرم نیز با توجه به قابلیت افزایش فرکانس کلیدزنی، باعث کاهش حجم و وزن مدار و کاهش تلفات در مبدل‌های بسیار افزایش‌دهنده می‌شود ولی به علت وجود سوئیچ کمکی و پیچیده شدن مدار کنترل، هزینه و پیچیدگی مدار افزایش می‌یابد. بنابراین استفاده از مدارهای اسنابر بدون تلفات راه‌کار مناسب برای حذف سوئیچ کمکی و کاهش هزینه‌ها است. در این مقاله یک مبدل بسیار افزایش‌دهنده با بهره ولتاژ بالا همراه با مدار کمکی ارائه شده است که انرژی مدار کمکی به ورودی بازگردانده می‌شود. کلیدزنی در ولتاژ صفر سوئیچ اصلی و انتقال انرژی مدار کمکی به ورودی همراه با پایین بودن تعداد المان مدار کمکی از مزایای مبدل ارائه شده است. همچنین افزایش بهره توسط خازن کلمپ و عدم وجود مشکل بازبایی معکوس در دیودهای مدار همراه با استرس ولتاژ پایین روی سوئیچ اصلی از ویژگی‌های دیگر مبدل است.

مراجع

- [1] A. Golsorkhi, B. Fani, M. Delshad, H. Saghafi, "A three-stage multi-agent-based peer-to-peer method for fault isolation of high distributed generation penetrated distribution networks", *IET Renewable Power Generation*, vol. 17, no. 5, pp. 1255-1266, April 2023, doi: 10.1049/rpg2.12680.
- [2] G. Shahgholian, S.M.A. Zanjani, "A study of voltage sag in distribution system and evaluation of the effect of wind farm equipped with doubly-fed induction generator", *Revue Roumaine des Sciences Techniques*, vol. 68, no. 3, pp. 271-276, Dec. 2023, doi: 10.59277/RRST-EE.2023.3.4.
- [3] H. Moradmand-Jazi, E. Adib, B. Fani, "Investigation and improvement of high step-up converters for pv module applications", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 7, no. 28, pp. 35-44, March 2017, dor: 20.1001.1.23223871.1395.7.28.4.9.
- [4] R. Ghobadi, G. Shahgholian, "Providing improved structure and adaptive control strategy for solar system with the ability to improve power quality in islanded microgrid", *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 2, no. 4, pp. 19-37, March 2024, doi: 10.30486/teeges.202-3.1986388.1073.
- [5] H.B. Farahabadi, M.R. Firozjaee, A. Pahnabi, A.M. Mir, R. Youneszadeh, "Fuel cell power system conceptual design for unmanned underwater vehicle", *Hydrogen, Fuel Cell and Energy Storage*, vol. 10, no. 1, pp. 33-50, April 2023, doi: 10.22104/ijhfc.2022.5884.1248.
- [6] J.C. Rosas-Caro, J.E. Valdez-Resendiz, J.C. Mayo-Maldonado, V.M. Sanchez, A.R. Lopez-Nuñez, R. Barbosa, L.J. Valdivia, "Fuel-cell energy generation system based on the series-capacitor boost converter", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 51, pp. 26126-26137, July 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.04.086.
- [7] M. Tavoosi, B. Fani, E. Adib, "Stability analysis and control of dfig based wind turbine using FBC strategy", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 4, no. 15, pp. 31-42, Dec. 2013, dor: 20.1001.1.23223871.1392.4.15.4.2.
- [8] M. Fooladgar, E. Rok-Rok, B. Fani, G. Shahgholian, "Evaluation of the trajectory sensitivity analysis of the DFIG control parameters in response to changes in wind speed and the line impedance connection to the grid DFIG", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 5, no. 20, pp. 37-54, March 2015, dor: 20.1001.1.23223871.1393.5.20.4.9.



- [9] M. Zamani, G.H. Riahy, N. Abdolghani, M.H. Zamani, "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.
- [10] K. Khani, G. Shahgholian, B. Fani, M. Moazzami, M. Mahdavian, M. Janghorbani, "A comparison of different structures in wind energy conversion systems", *Proceeding of the IEEE/ECTICON*, Phuket, Thailand, pp. 58-61, June 2017, doi: 10.1109/ECTICon.2017.8096172.
- [11] M. Mirtalae, 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.
- [12] S. Shabani, M. Delshad, R. Sadeghi, "A soft switched non-isolated high step-up dc-dc converter with low number of auxiliary elements", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 13, no. 51, pp. 123-136, Dec, 2022, dor: 20.1001.1.23223871.1401.13.51.8.1.
- [13] D. Taheri, G. Shahgholian, M.M. Mirtalaei, "Analysis, design and implementation of a high step-up multi-port non-isolated converter with coupled inductor and soft switching for photovoltaic applications", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 16, no. 17, pp. 3473-3497, Sept. 2022, doi: 10.1049/gtd2.12537.
- [14] A. Hussein Sachit, B. Fani, M. Delshad, G. Shahgholian, A. Golsorkhi Esfahani, "Analysis and implementation of second-order step-up converter using winding cross coupled inductors for photovoltaic applications", *Journal of Solar Energy Research*, vol. 8, no. 2, pp. 1516-1525, April 2023, doi: 10.22059/jser.2023.357285.1291.
- [15] O. Sharifiyana, M. Dehghani, G. Shahgholian, S. Mirtalae, M. Jabbari, "Overview of dc-dc non-insulated boost converters (Structure and improvement of main parameters)", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 12, no. 48, pp. 1-29, March 2022, dor: 20.1001.1.2322-3871.1400.12.48.6.6.
- [16] A. Kianpour, G. Shahgholian, "A floating-output interleaved boost DC-DC converter with high step-up gain", *Automatika*, vol. 58, no. 1, pp. 18-26, April 2017, doi: 10.1080/00051144.2017.1305605.
- [17] D. Taheri, G. Shahgholian, M.M. Mirtalaei, "The charging circuit of the energy storage system of the multi-input converter with high gain (Design, simulation and laboratory investigation)", *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 2, no. 2, pp. 26-35, Sept. 2023, doi: 10.30486/teeges.2023.1976354.1056.
- [18] O. Sharifiyana, M. Dehghani, G. Shahgholian, S.M.M. Mirtalae, "Presenting a new high gain boost converter with inductive coupling energy recovery snubber for renewable energy systems- simulation, design and construction", *Journal of Solar Energy Research*, vol. 8, no. 2, pp. 1417-1436, April 2023, doi: 10.22059/jser.2023.356571.1283.
- [19] O. Sharifiyana, M. Dehghani, G. Shahgholian, S.M.M. Mirtalaei, M. Jabbari, "Non-isolated boost converter with new active snubber structure and energy recovery capability", *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol. 32, no. 5, Article Number: 2350084, March 2023, doi: 10.1142/S021812-6623500846.
- [20] G. Haghshenas, S.M.M. Mirtalaei, H. Mordmand, "High step-up boost-flyback converter with soft switching for photovoltaic applications", *Journal of Circuits, Systems, and Computers*, vol. 28, no. 1, pp. 1-16, Jan. 2019, doi: 10.1142/S0218126619500142.
- [21] E. Adib, H. Farzanehfard, "Family of zero-current transition PWM converters", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 8, pp. 3055-3063, Aug. 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.922597.
- [22] Z. Nejati, F. Sheikholeslam, H. Mahmoodian, "Fuzzy control of polymer fuel cell for attract maximum power", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 4, no. 16, pp. 63-70, Feb. 2014, dor: 20.1001.1.23223871.1392.4.16.7.7.
- [23] A.B. Stambouli, E Traversa, "Fuel cells, an alternative to standard sources of energy", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 6, no. 3, pp. 295-304, Sept. 2002, doi: 10.1016/S1364-0321(01)00-015-6.
- [24] H. Wang, A. Gaillard, D. Hissel, "A review of dc/dc converter-based electrochemical impedance spectroscopy for fuel cell electric vehicles", *Renewable Energy*, vol, 141, pp. 124-138, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.03.130.
- [25] R. Venkatasatish, C. Dhanamjayulu, "Reinforcement learning based energy management systems and hydrogen refueling stations for fuel cell electric vehicles: An overview", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 64, pp. 27646-27670, July 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.088.





- [26] T. Jarin, S. Akkara, S.S.S. Mole, A. Manivannan, A.I. Selvakumar, "Fuel vehicle improvement using high voltage gain in DC-DC boost converter", *Renewable Energy Focus*, vol. 43, pp. 228-238, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.ref.2022.09.008.
- [27] N. Elsayad, H. Moradisizkoohi, O. Mohammed, "A new sepic-based step-up DC-DC converter with wide conversion ratio for fuel cell vehicles: Analysis and design", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 8, pp. 6390-6400, Aug. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3007110.
- [28] A. Rajabi, F.M. Shahir, R. Sedaghati, "New unidirectional step-up DC-DC converter for fuel-cell vehicle: Design and implementation", *Electric Power Systems Research*, vol. 212, Article Number: 108653, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108653.
- [29] H. Bagherian-Farahabadi, M. Kojoury-Naftchali, A. Pahnabi, "High step-up converter with low voltage stress for fuel cell applications", *Hydrogen, Fuel Cell and Energy Storage*, vol. 9, no. 2m pp. 117-132, Oct. 2022, doi: 10.22104/ijhfc.2022.5869.1247.
- [30] S. Chen, S. Zuo, Z. Wu, C. Liu, "Comprehensive vibro-acoustic characteristics and mathematical modeling of electric high-speed centrifugal compressor surge for fuel cell vehicles at various compressor speeds", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 178, Article Number: 109311, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.ymsp.2022.109311.
- [31] A. Rajabi, F.M. Shahir, R. Sedaghati, "Output voltage improvement of fuel cell electric vehicles based on a novel high step-up dc-dc converter", *AEU- International Journal of Electronics and Communications*, vol. 162, Article Number: 154574, April 2023, doi: 10.1016/j.aeue.2023.154574.
- [32] S. Naresh, S. Peddapati, M.L. Alghaythi, "A novel high quadratic gain boost converter for fuel cell electric vehicle applications", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 4, no. 2, pp. 637-647, April 2023, doi: 10.1109/JESTIE.2023.3248449.
- [33] M. Kapetanović, A. Núñez, N. Oort, R.M.P. Goverde, "Energy model of a fuel cell hybrid-electric regional train in passenger transport service and vehicle-to-grid applications", *Journal of Rail Transport Planning and Management*, vol. 28, Article Number: 100415, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jrtpm.2023.100415.
- [34] S. Farhani, A. N'Diaye, A. Djerdir, F. Bacha, "Design and practical study of three phase interleaved boost converter for fuel cell electric vehicle", *Journal of Power Sources*, vol. 479, Article Number: 228815, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.228815.
- [35] M. Dhimish, N. Schofield, "Single-switch boost-buck DC-DC converter for industrial fuel cell and photovoltaics applications", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 2, pp. 1241-1255, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.10.097.
- [36] V.F. Pires, A. Cordeiro, D. Foito, J.F. Silva, "High step-up DC-DC converter for fuel cell vehicles based on merged quadratic boost-Ćuk", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 8, pp. 7521-7530, Aug. 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2921851.
- [37] R.R. Ahrabi, H. Ardi, M. Elmi, A. Ajami, "A novel step-up multiinput DC-DC converter for hybrid electric vehicles application", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 32, no. 5, pp. 3549-3561, May 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2585044.
- [38] R. Saadi, M.Y. Hammoudi, O. Kraa, M.Y. Ayad, M. Bahri, "A robust control of a 4-leg floating interleaved boost converter for fuel cell electric vehicle application", *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 167, pp. 32-47, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.matcom.2019.09.014.
- [39] E.M. Barhoumi, S. Farhani, F. Bacha, "High efficiency power electronic converter for fuel cell system application", *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 2655-2664, Sept. 2021, doi: 10.1016/j.asej.2021.01.010.

زیر نویس‌ها

-
- ¹ Fossil fuels
 - ² Environmental
 - ³ Renewable energy
 - ⁴ Solar cells
 - ⁵ Fuel cells
 - ⁶ Step-up dc-dc converter





- 7 Boost converter
- 8 Duty cycle
- 9 Voltage stress
- 10 Conduction losses
- 11 Electric vehicles
- 12 Zero voltage transition
- 13 Clamp capacitor
- 14 Auxiliary diode
- 15 Magnetizing inductor

