



Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2024) 3(3):1-14

A Single-Switch DC-DC High Step-Up Converter with Soft Switching for Photovoltaic Applications

Tayebeh Shamsi¹, *PhD Student*, Majid Delshad¹, *Associate Professor*, Ehsan Adib², *Associate Professor*,
Mohammad Rouhollah Yazdani¹, *Associate Professor*

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

² Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract:

A single-switch DC-DC high step-up converter is presented in this paper. There are soft switching conditions in the proposed converter for switching on and off time, which increases efficiency. In order to increase the gain, two coupled inductors have been used, and the leakage inductance of the coupled inductors has been used to create a soft switching condition, and the minimal auxiliary element has been used in the proposed converter. In the proposed converter, only one switch is used, and the condition of the converter is no different from a basic converter in terms of the control circuit. Therefore, the converter does not need to design a new control circuit. The auxiliary circuit added to the converter with a minimal element, provides soft switching conditions for the switch at turn-on, under zero current and at turn-off, under zero voltage, which, in addition to increased efficiency, the circuit has a simple structure. Therefore, the innovation of the paper is to present a switching converter high step-up soft without imposing an additional switch and with a low number of elements. The proposed converter is simulated after full theoretical analysis at 400 W output power, which shows the efficiency of 97.2 percent, in addition to proving the theoretical analysis. Also, the prototype of the converter is made and the experimental results obtained prove the theoretical and simulation results.

Keywords: DC-DC converters, High step-up, Single-switch, Soft switching, Efficiency.

Received: 09 April 2023

Revised: 02 November 2023

Accepted: 02 November 2023

Corresponding Author: Dr. Majid Delshad, delshad@khuif.ac.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2024.904808





ارائه یک مبدل تک سوئیچ DC-DC بسیار افزاینده با کلیدزنی نرم برای کاربردهای فتوولتائیک

طیبه شمسی^۱، دانشجوی دکتری، مجید دلشاد^۱، دانشیار، احسان ادیب^۲، دانشیار و محمد روح اله یزدانی^۱، دانشیار

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

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده: یک مبدل بسیار افزاینده DC-DC تک سوئیچه در این مقاله ارائه می‌گردد. شرایط کلیدزنی نرم در مبدل پیشنهادی برای زمان روشن شدن و خاموش شدن سوئیچ وجود دارد که باعث افزایش راندمان می‌شود. به منظور افزایش بهره از دو سلف کوپل شده استفاده شده است که از سلف نشستی سلف کوپل شده به منظور ایجاد شرایط کلیدزنی نرم استفاده شده است، به طوریکه که حداقل المان کمکی در مبدل پیشنهادی به کار گرفته شده است. در مبدل پیشنهادی تنها یک سوئیچ استفاده شده است که شرایط مبدل از نظر مدار کنترل هیچ تفاوتی با یک مبدل پایه ندارد. از این رو مبدل نیاز به طراحی مدار کنترل جدید ندارد. مدار کمکی اضافه شده به مبدل با حداقل المان، شرایط کلید زنی نرم را برای سوئیچ در زمان روشن شدن، تحت جریان صفر و در زمان خاموش شدن، تحت ولتاژ صفر ایجاد می‌کند، که علاوه بر افزایش راندمان، سادگی عملکرد و عدم افزایش هزینه را در پی دارد. بنابراین نوآوری مقاله ارایه یک مبدل بسیار افزاینده سویچینگ نرم بدون تحمیل سویچ اضافه و با تعداد المان پایین است. مبدل پیشنهادی پس از تحلیل تئوری کامل در توان ۴۰۰ وات شبیه سازی می‌شود، که نتایج حاصل علاوه بر اثبات تحلیل تئوری راندمان ۹۷/۲ را نشان می‌دهد. همچنین نمونه آزمایشگاهی ساخته شده از مبدل و نتایج عملی بدست آمده، تحلیل‌های تئوری و نتایج شبیه سازی را اثبات می‌نماید.

واژه های کلیدی: مبدل های DC-DC، بسیار افزاینده، تک سوئیچه، کلیدزنی نرم، راندمان

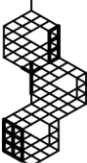
تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۰

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۱

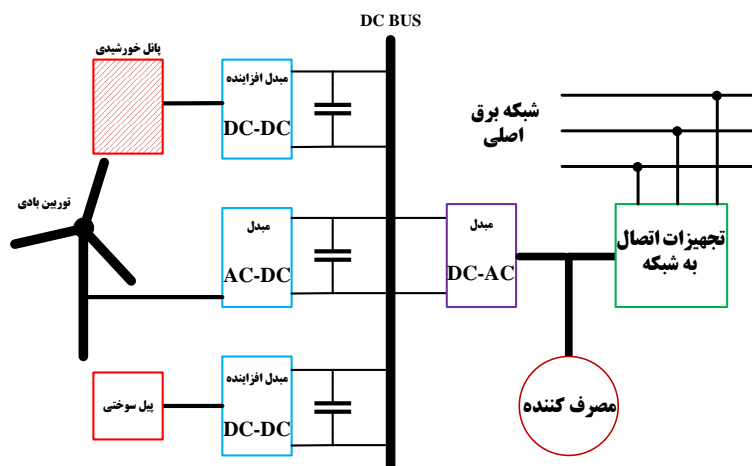
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۱

نویسنده‌ی مسئول: دکتر مجید دلشاد، delshad@khuisf.ac.ir

DOI: 10.30486/TEEGES.2024.904808



امروزه انرژی‌های تجدیدپذیر و تجهیزات و طراحی این تجهیزات مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند [۱]. مبدل‌های الکترونیک قدرت یکی از تجهیزات مورد استفاده در این سیستم‌ها است [۲]. با توجه به پایین بودن سطح ولتاژ در این سیستم‌ها، این مبدل‌ها به منظور افزایش سطح ولتاژ استفاده می‌شوند [۳]. سیستم‌هایی از قبیل خورشیدی [۳-۵] و پیل سوختی [۶] ولتاژ خروجی ولتاژ DC در سطح پایینی دارند، که نیاز به افزایش سطح ولتاژ در مرحله اولیه می‌باشد، تا به یک سطح قابل قبول برای تولید انرژی برق برسد. موجود نبودن دائم انرژی یکی از مشکلات سیستم خورشیدی می‌باشد، که وابسته به وجود انرژی خورشید است، از این رو در هنگام نبود انرژی خورشید و یا کاهش آن سیستم عملاً کاربردی نیست. بنابراین در چنین شرایطی چند سیستم مبتنی بر انرژی‌های نو با هم ترکیب شده و با ایجاد یک DC-BUS، تغذیه در این محل دائم وجود دارد و مشکل حل می‌گردد. شکل ۱ بلوک دیاگرام کلی چنین سیستمی را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است در چنین سیستمی، با ترکیب سه منبع انرژی خورشیدی، بادی و پیل سوختی تغذیه روی DC-BUS به طور دائم وجود دارد و تامین انرژی کامل انجام می‌شود.



شکل (۱): شمای کلی یک سیستم تولید انرژی برق

با افزایش فرکانس کلیدزنی می‌توان حجم المانهای مغناطیسی را کاهش داد، اما کلیدزنی سخت^۱ محدودیت افزایش فرکانس کلیدزنی دارد، به طوریکه با افزایش فرکانس همپوشانی ولتاژ و جریان کلید افزایش می‌یابد و تلفات کلیدزنی بسیار زیاد می‌شود. بنابراین باید تکنیکهای کلیدزنی نرم^۲ استفاده شود تا علاوه بر افزایش فرکانس کلیدزنی که منجر به کاهش حجم المانها می‌شود به کاهش تلفات و افزایش راندمان نیز دست یافته شود. کلیدزنی نرم در لحظات روشن و خاموش شدن سوئیچ ولتاژ یا جریان و یا هر دو را به صفر رسانده و سپس کلید روشن یا خاموش می‌گردد. از این رو کلیدزنی نرم تحت جریان صفر^۳، کلیدزنی نرم تحت ولتاژ صفر^۴ و یا هر دو^۵ معرفی شده است.

به منظور افزایش بهره ولتاژ یک راه حل استفاده از مبدل‌های ایزوله می‌باشد [۷-۹] که توسط نسبت تبدیل ترانسفورماتور، بهره‌های بالا بدست می‌آید. این نوع از مبدل‌ها در مواقعی استفاده می‌گردد که نیاز به ایزوله کردن ورودی و خروجی باشد. اما معمولاً این مدل مبدل‌ها ساختار پیچیده تر در نتیجه طراحی و پیاده سازی سختتری دارند. به علت انتقال توان به صورت مغناطیسی توسط ترانسفورماتور در مبدل‌های ایزوله، سطح راندمان این مبدل‌ها نسبت به غیرایزوله پایین تر است. در نتیجه اگر جداسازی بین ورودی و خروجی ضروری نباشد استفاده از نوع غیرایزوله به دلیل ساختارهای ساده تر و سطح راندمان بالاتر بهتر است [۱۰-۱۲]. با استفاده از ساختار اصلی مبدل بوست و ترکیب آن با یک المان افزایش بهره مانند سلفهای کوپل شده [۱۳، ۱۴]، خازن‌ها [۱۵، ۱۶] و یا هر دو [۱۷]، یک مبدل بسیار افزایشدهنده طراحی می‌شود.

مبدل‌های جدید زیادی در سالهای اخیر ارائه شده‌اند. در [۱۸] یک مبدل بسیار افزایشدهنده با ساختار ساده ارائه شده است. مبدل بر اساس سلفهای کوپل شده و سلول ضرب کننده ولتاژ طراحی شده است که توسط خازن‌ها این کار انجام می‌شود. مبدل تک سوئیچ است و ساختار ساده‌ای دارد اما توسط این ساختار بهره بسیار بالایی بدست نیامده است. مبدل معرفی شده در [۱۹] یک مبدل بسیار افزایشدهنده

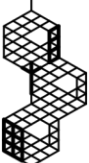


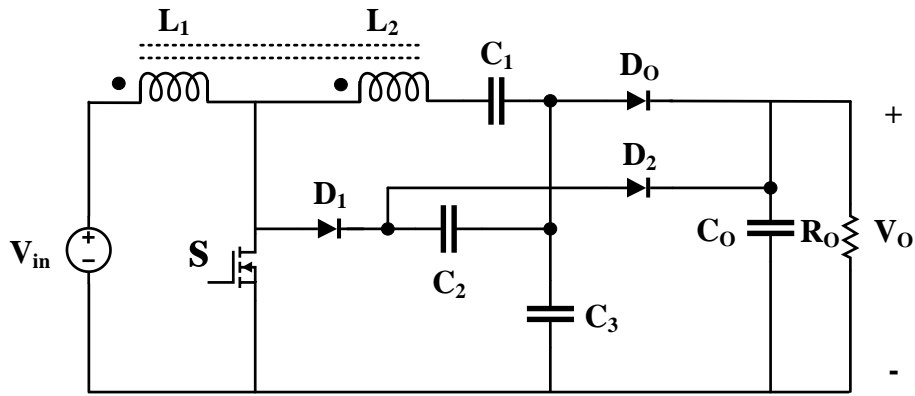
رزونانسی است. تکنیک رزونانسی یکی دیگر از روشهای ایجاد شرایط کلیدزنی نرم برای سوئیچ می‌باشد. مبدل معرفی شده تک سوئیچه است که از نظر مدار کنترل پیچیدگی ایجاد نمی‌کند و نیاز به طراحی مدار کنترل جدیدی ندارد. توسط سلفهای کوپل شده و خازنهای در مسیر خروجی، بهره ولتاژ بسیار افزایش یافته است. با اینکه مبدل معرفی شده راندمان مناسب و بهره ولتاژ بسیار بالا دارد، اما تعداد زیادی المان و سلفهای کوپل شده دارد که پیچیدگی مبدل را زیاد می‌کند. همچنین با توجه به رزونانس روی سوئیچ، استرس جریان بالایی به سوئیچ تحمیل می‌شود. در [۲۰] یک ساختار جدیدی به منظور ارائه مبدل بسیار افزاینده ارائه شده است. که توسط تعداد زیادی دیود و خازن و همچنین سلفهای کوپل شده، مبدل بسیار افزاینده‌ای طراحی و ارائه شده است. ساختار مبدل به گونه‌ای طراحی شده است که سلفهای کوپل شده اثری بر روی جریان ورودی ندارند، و ریپل جریان ورودی تقریباً صفر می‌باشد. مبدل راندمان و بهره ولتاژ بالایی دارد، اما تعداد زیادی المان از جمله خازن و دیود دارد که ساختار را پیچیده کرده است. همچنین مبدل دارای دو سوئیچ است که یک سوئیچ به عنوان مدار کمکی اضافه شده است، بنابراین با توجه به تعداد دو سوئیچ و تعداد بالای دیود و خازن ساختار پیچیدگی دارد. مبدل معرفی شده در [۲۱] یک مبدل با ساختار در هم تنیده که بهره ولتاژ بالایی نیز دارد. در هم تنیده کردن به منظور کاهش ریپل جریان ورودی انجام می‌شود، همچنین در صورتی که سلفهای کوپل شده استفاده شود، در هم تنیده کردن می‌تواند به حذف اثر سلفهای کوپل شده بر روی جریان ورودی کمک کند. بنابراین این ساختار با استفاده از سلفهای کوپل شده بهره را بسیار زیاد می‌کند و با استفاده از در هم تنیده کردن ریپل جریان ورودی را کاهش می‌دهد. بنابراین مزایای ذکر شده در این مبدل وجود دارد. با اینکه مبدل معرفی شده مزایای ذکر شده را دارد، اما تعداد سه سوئیچ در مبدل استفاده شده است که زمانبندی خاص روی سوئیچها نیاز به طراحی مدار کنترل جدید و پیچیده‌ای دارد. همچنین تعداد المانهای استفاده شده در این ساختار زیاد است که حجم و قیمت مبدل را افزایش می‌دهد. ساختار جدید بسیار افزاینده‌ای در [۲۲] ارائه گردیده است. در این ساختار نیز بهره بسیار بالایی بدست آمده است و مبدل راندمان خوبی نیز دارد. اما در این مدل معرفی شده، تعداد زیادی دیود و خازن به کارگرفته شده است و پیچیدگی طراحی را بالا برده است. برای ایجاد شرایط کلیدزنی نرم یک سوئیچ نیز به مبدل اضافه شده است، با اینکه سوئیچ اضافه شده مکمل سوئیچ اصلی کلیدزنی می‌شود و زمانبندی خاصی برای کنترل ندارد اما اضافه شدن یک سوئیچ قیمت و تلفات هدایتی مبدل را افزایش می‌دهد. مبدل در هم تنیده دیگری نیز در [۲۳] ارائه شده است، که بدون اضافه کردن سوئیچ کمکی و با سوئیچهای اصلی مبدل که تعداد دو سوئیچ می‌باشد، به بهره بالا و مزایای در هم تنیده کردن دست پیدا کرده است. با اینکه مبدل مزایای بیان شده را دارد، اما یکی از سوئیچها دارای سورس شناور است و به منظور کنترل این سوئیچ باید مدار کنترل به صورت ایزوله نسبت به خط مشترک طراحی شود. همچنین سطح راندمان مبدل ارائه شده پایین می‌باشد.

در این مقاله یک مبدل بسیار افزاینده جدیدی ارائه می‌شود که شرایط کلید زنی نرم برای سوئیچ به طور کامل فراهم می‌گردد. مبدل معرفی شده به صورت تک سوئیچ است، که ساختار مدار کنترل جدیدی نیاز ندارد و با یک مدار کنترل ساده می‌توان این مبدل را کنترل نمود. به منظور دسترسی به بهره ولتاژ بالا از سلفهای کوپل شده و خازن استفاده شده است، که با ترکیب این دو بهره‌های بالایی بدست می‌آید. مدار کمکی اضافه شده به مبدل به منظور ایجاد شرایط کلیدزنی نرم ساختار بسیار ساده‌ای دارد و هزینه و المان زیادی به مبدل تحمیل نمی‌کند. در بخش ۲ مبدل به طور کامل معرفی و تحلیل می‌گردد. در بخش ۳ طراحی المانها آورده می‌شود. به منظور اثبات نتایج تئوری، نتایج شبیه سازی مبدل پیشنهادی در بخش ۴ آورده می‌شود. در بخش ۵ مقایسه‌ای بین مبدل پیشنهادی و مبدلهای مشابه سالهای اخیر انجام می‌شود و نهایتاً در بخش ۶ نتیجه گیری از این مقاله ارائه می‌گردد.

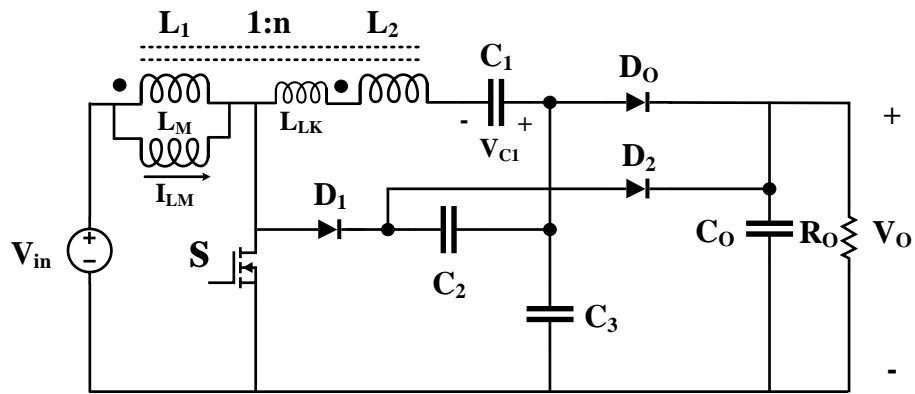
۲- معرفی و تحلیل مبدل پیشنهادی

مبدل پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است توسط سلفهای کوپل شده L_1 و L_2 همراه با خازن C_1 ، شرایط افزایش بهره ولتاژ فراهم گردیده است. مدار کمکی به منظور ایجاد شرایط کلید زنی نرم شامل دیودهای D_1 و D_2 همراه با خازنهای C_2 و C_3 می‌باشد. البته برای ایجاد شرایط کلیدزنی نرم مخصوصاً شرایط کلیدزنی تحت جریان صفر برای روشن شدن سوئیچ نیاز به یک سلف است، که از سلف نشتی ایجاد شده روی کوپل سلفها استفاده می‌گردد. این سلف در مدار معادل مبدل پیشنهادی از نظر سلفهای کوپل شده در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل موجهای کلید مبدل در شکل ۴ نشان داده شده است.

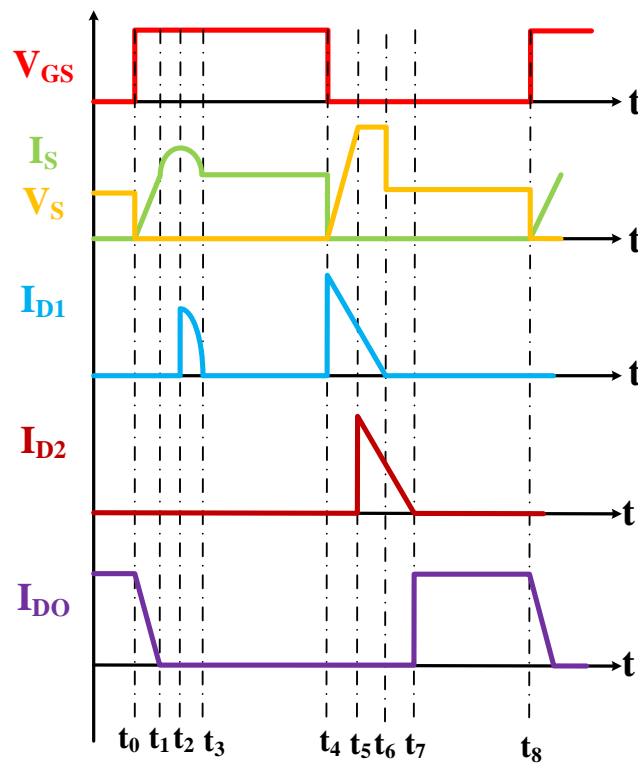




شکل (۲): مبدل پیشنهادی



شکل (۳): مبدل پیشنهادی همراه با معادل سلفهای کوپل شده



شکل (۴): شکل موجهای کلیدی مبدل پیشنهادی



وضعیت ۱ (t_0-t_1): با روشن شدن سوئیچ در t_0 این وضعیت آغاز می‌گردد. به خاطر وجود سلف نشستی L_{LK} ، جریان ناگهانی افزایش نمی‌یابد و با شیب شروع به افزایش می‌کند. از این رو در لحظه روشن شدن سوئیچ، شرایط کلیدزنی نرم تحت جریان صفر برای سوئیچ فراهم می‌گردد. شیب افزایش جریان در آن وضعیت در زیر نشان داده شده است.

$$\alpha_1 = \frac{V_O + nV_{in} - V_{C1}}{L_{LK}} \quad (1)$$

وضعیت ۲ (t_1-t_2): این وضعیت با خاموش شدن دیود اصلی مبدل (D_0) آغاز می‌شود. به علت وجود خازن C_3 ، رزونانس بین این خازن و سلف نشستی L_{LK} رخ می‌دهد. این رزونانس باعث افزایش جریان سلف نشستی و در نتیجه جریان سوئیچ می‌گردد. همچنین رزونانس رخ داده باعث کاهش ولتاژ خازن C_3 می‌شود، که این ولتاژ در نهایت به صفر می‌رسد. روابط رزونانس رخ داده در این وضعیت در زیر آورده شده است.

$$i_S = i_{LK} = \frac{V_O}{Z} \cos\omega(t - t_1) + I_S(t_1) \quad (2)$$

$$v_{C3} = -V_O \sin\omega(t - t_1) \quad (3)$$

$$Z = \sqrt{\frac{L_{LK}}{C_3}} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_{LK}C_3}} \quad (5)$$

وضعیت ۳ (t_2-t_3): زمانی که ولتاژ C_3 به صفر می‌رسد، D_1 هدایت می‌کند و رزونانس سلف نشستی این بار با C_2 ادامه می‌یابد تا سیکل رزونانس به اتمام برسد و جریان سلف نشستی صفر شود و در نتیجه جریان سوئیچ به مقدار ثابت می‌رسد. در انتهای این وضعیت D_1 خاموش می‌شود.

$$i_{LK} = \frac{V_O}{Z} \cos\omega(t - t_1) - I_S(t_2) \quad (6)$$

$$v_{C2} = V_O \sin\omega(t - t_2) \quad (7)$$

$$Z = \sqrt{\frac{L_{LK}}{C_2}} \quad (8)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_{LK}C_2}} \quad (9)$$

وضعیت ۴ (t_3-t_4): با خاموش شدن D_1 و صفر شدن انرژی سلف نشستی، جریان سوئیچ به مقدار ثابت می‌رسد. این مقدار برابر با جمع جریان ورودی و جریان کوپل شده سلف L_2 می‌باشد. این وضعیت تا خاموش شدن سوئیچ ادامه دارد.

وضعیت ۵ (t_4-t_5): هنگامی که سوئیچ خاموش می‌شود، به علت وجود سلف نشستی، جریان سلف باعث روشن شدن D_1 می‌شود. از این رو ولتاژ سوئیچ به صورت شارژ خازنی شروع به افزایش می‌کند، که شرایط کلید زنی برای سوئیچ در لحظه خاموش شدن به صورت ZVS فراهم می‌گردد. این وضعیت تا زمانی ادامه می‌یابد که شارژ خازنها منجر به روشن شدن D_2 شود.

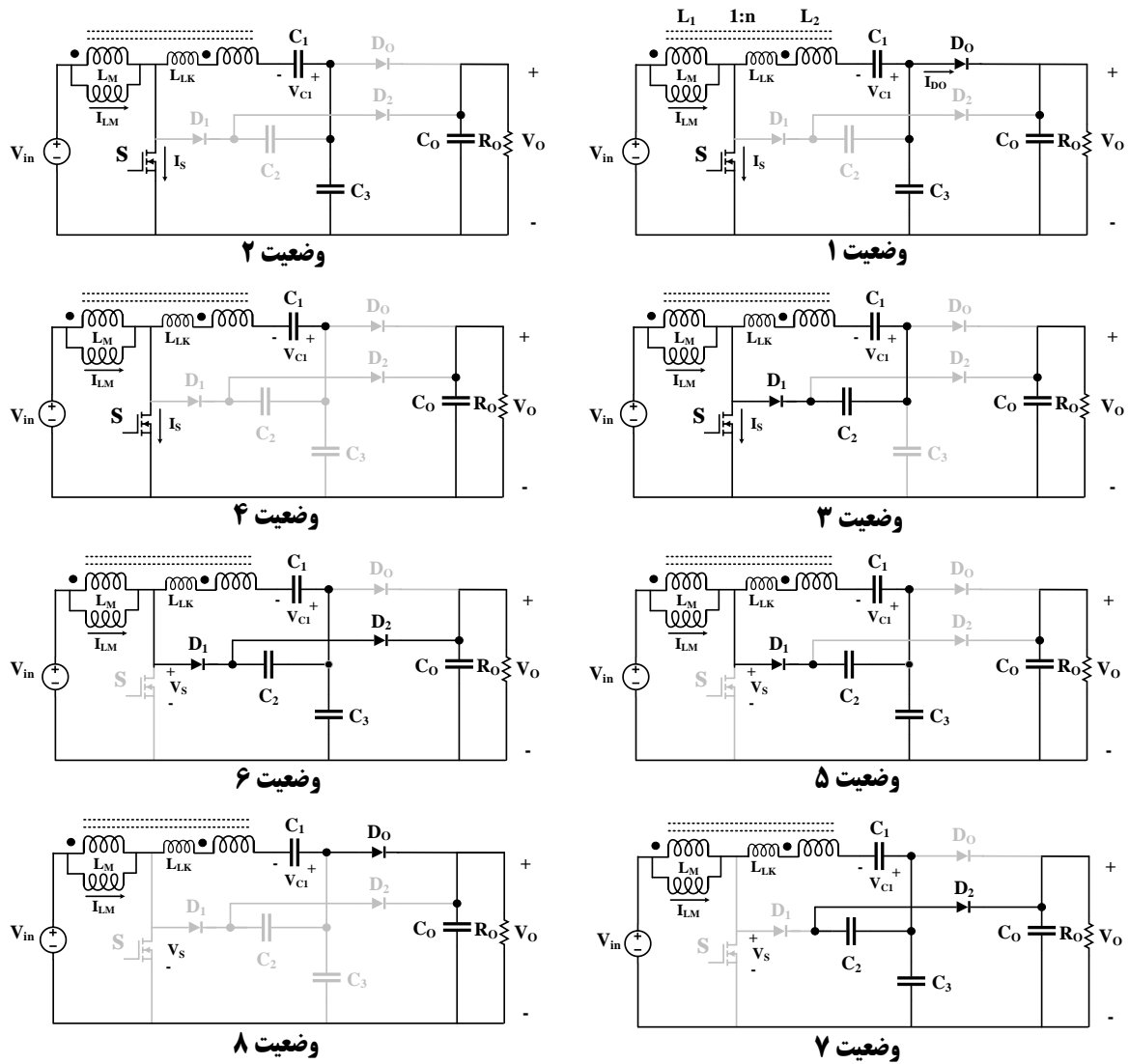
وضعیت ۶ (t_5-t_6): هنگامی که دیود D_2 روشن می‌شود، ولتاژ سوئیچ ثابت شده و انرژی سلف نشستی در خروجی تخلیه می‌گردد. این وضعیت تا صفر شدن انرژی سلف نشستی ادامه دارد.

وضعیت ۷ (t_6-t_7): با صفر شدن جریان سلف نشستی، D_1 خاموش می‌گردد، اما D_2 به خاطر وجود جریان سلفهای کوپل شده، روشن می‌ماند تا خازنها دشارژ شده و ولتاژ آنها به صفر برسد.

وضعیت ۸ (t_7-t_8): با تخلیه کامل خازنهای کمکی، دیود خروجی روشن می‌گردد. ولتاژ C_3 روی ولتاژ خروجی کلمپ می‌گردد. در این وضعیت مدار کمکی کامل از مدار خارج شده و مبدل مانند یک مبدل پایه در هنگام خاموش بودن سوئیچ و روشن بودن دیود رفتار می‌کند، که انرژی سلف مغناطیس کنندگی از طریق کوپل و خازن سری در خروجی تخلیه می‌گردد. این وضعیت با روشن شدن مجدد سوئیچ و برگشت به وضعیت اول اتمام می‌پذیرد.

مدارهای معادل هشت وضعیت عملکرد مبدل پیشنهادی در شکل ۵ نشان داده شده است.





شکل (۵): مدارهای معادل وضعیتهای عملکرد مبدل پیشنهادی

۳- طراحی مبدل پیشنهادی

۳-۱- محاسبه ظرفیت سلف کمکی (نشتی)

سلف نشتی به عنوان سلف اسنابر برای ایجاد شرایط ZCS قرار داده شده است از این رو می توان توسط رابطه سلف اسنابر آن را محاسبه نمود.

$$L_{LK} > \frac{V_{str}}{I_s} \quad (10)$$

به طوریکه V_s ولتاژ سوئیچ و I_s جریان سوئیچ می باشد، همچنین t_r زمان صعود جریان سوئیچ می باشد که از مشخصات سوئیچ انتخابی است و در دیتاشیت قطعه مشخص می باشد.

نکته قابل توجه این است که سلف نشتی المان خارجی و قرار داده شده در مدار نیست و سلفی است که ناشی از کوپل می باشد. بنابراین این سلف باید بر اساس رابطه سلف نشتی محاسبه شود و اگر مقدار سلف ایجاد شده بزرگتر از رابطه فوق نباشد نیاز به استفاده از یکی سلف کمکی سری در مسیر است تا شرایط ZCS تضمین شود.

$$L_{LK} = (1 - k^2)L_2 \quad (11)$$



به طوری که k ضریب کوپل سلفهای کوپل شده می باشد که در یک کوپل ایده آل مقدار برابر یک است. همچنین C_3 به عنوان خازن اسنابر است، که توسط رابطه محاسبه خازن اسنابر در مبدلها می توان مقدار آن را محاسبه نمود.

$$C_3 > \frac{I_{stf}}{2V_s} \quad (7)$$

t_f زمان نزول سوئیچ می باشد که در صفحه مشخصات هر سوئیچ مشخص است. خازن C_2 که موثر در انرژی سلف نشتی است. بنابراین بر اساس رابطه انرژی سلف و خازن مقدار این خازن نیز محاسبه می گردد.

$$\frac{1}{2} I_{LKmax}^2 L_{LK} > \frac{1}{2} V_{C2max}^2 C_2 + \frac{1}{2} V_{C3max}^2 C_3 \quad (12)$$

۳-۲- محاسبه بهره ولتاژ

با توجه به ساختار مبدل، سلفهای کوپل شده L_1 و L_2 و خازن C_1 به منظور افزایش بهره ولتاژ قرار داده شده است. به منظور محاسبه بهره ولتاژ بالانس ولت ثانیه بر روی سلف مغناطیس کنندگی L_M نوشته می شود.

$$V_{in}DT + \frac{V_{in} - V_o + V_{C1}}{1+n} (1-D)T = 0 \quad (13)$$

$$n = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (14)$$

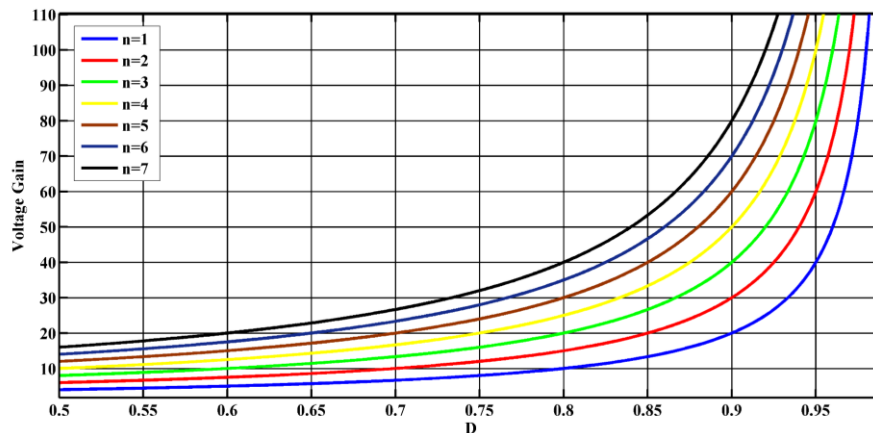
D ضریب وظیفه سوئیچ و n نسبت تبدیل سلفهای کوپل شده می باشد. همانطور که مشخص می باشد برای بدست آوردن بهره نیاز به بدست آوردن ولتاژ خازن C_1 است. بنابراین باید مقدار شارژ این خازن مشخص گردد. به منظور سادگی تحلیل زمانهای وجود سلف نشتی و خازنهای مدار کمکی به علت کم بودن صرفنظر می شود از این رو می توان مقدار شارژ خازن C_1 را برابر مقدار زیر در نظر گرفت. که خازن در زمان روشن بودن سوئیچ توسط سلفهای کوپل شده با مقدار زیر شارژ می گردد.

$$V_{C1} = nV_{in} \quad (15)$$

با جایگذاری مقدار ولتاژ خازن در رابطه بالانس ولت ثانیه نهایتاً بهره ولتاژ مبدل به صورت زیر بدست می آید.

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

منحنی های شکل ۶ توسط رابطه (۱۶) ترسیم شده است، که به صورت گرافیکی اثر افزایش یا کاهش ضریب وظیفه و نسبت تبدیل را بر روی بهره ولتاژ نشان می دهد. از این شکل مشخص می باشد که با افزایش نسبت تبدیل بهره های بالاتری بدست می آید، اما این نکته باید در نظر گرفته شود که افزایش زیاد نسبت تبدیل منجر به افزایش حجم سلفهای کوپل شده و حجم مبدل می گردد. همچنین افزایش بیش از حد مقدار سیم پیچهای سلفهای کوپل شده تلفات را در این سلفها افزایش می دهد.



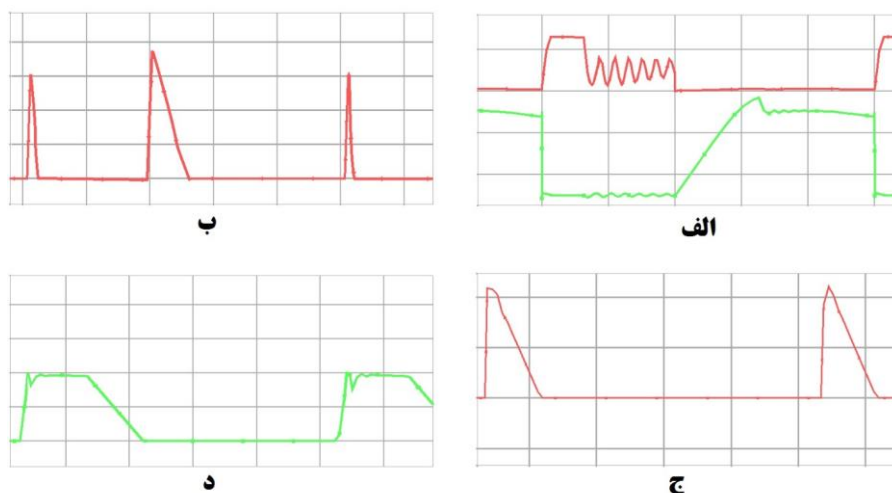
شکل (۶): بهره ولتاژ بر حسب ضریب وظیفه و نسبت تبدیل سلفهای کوپل شده



۴- نتایج شبیه سازی و نمونه ساخته شده عملی

۴-۱- نتایج شبیه سازی

شبیه سازی بر روی مبدل پیشنهادی بر اساس مقادیر مشخص شده در جدول ۱ انجام شده است. که این شبیه سازی در نرم افزار PSPICE انجام شده است. نتایج شبیه سازی مربوط به ولتاژ و جریان المانهای نیمه هادی در شکل ۷ آورده شده است. همانطور که در شکل ۷ مشخص می‌باشد، جریان سوئیچ با شیب افزایش یافته است که نشان می‌دهد شرایط کلید زنی نرم تحت جریان صفر برقرار گردیده است. همچنین شکل ولتاژ سوئیچ نشان می‌دهد که در زمان خاموش شدن با شیب افزایش پیدا کرده است که شرایط ZVS مهیا شده است. همچنین جریان دیودها در زمان خاموش شدن نشان می‌دهد که شرایط کلیدزنی نرم به صورت ZCS مهیا شده است، که مشکل بازیابی معکوس برای دیودهای مبدل حل گردیده است.



شکل (۷): نتایج شبیه سازی ولتاژ و جریان المانهای نیمه هادی مبدل پیشنهادی

الف) ولتاژ (بالایی) و جریان (پایینی) سوئیچ (مقیاس جریان 10 A/div ، مقیاس ولتاژ 150 volt/div و مقیاس زمان $2 \mu\text{s/div}$)

ب) جریان D_1 (مقیاس عمودی 2.5 A/div و مقیاس افقی $2 \mu\text{s/div}$)

ج) جریان D_2 (مقیاس عمودی 2 A/div و مقیاس افقی $2 \mu\text{s/div}$)

د) جریان D_0 (مقیاس عمودی 1 A/div و مقیاس افقی $2 \mu\text{s/div}$)

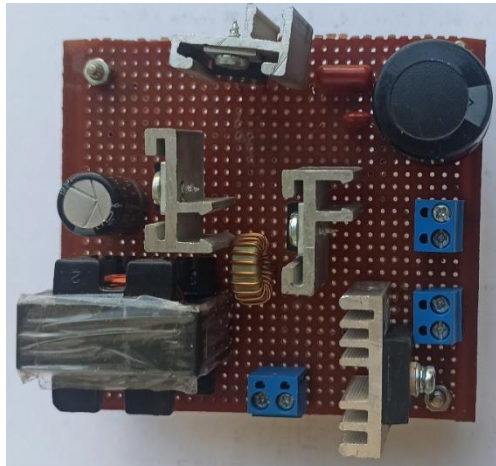
جدول (۱): مشخصات مبدل پیشنهادی به منظور شبیه سازی

مقدار	نماد	اجزاء
IRFP360	S	سوئیچ
MUR860	$D_1, D_2 \& D_0$	دیودها
$100 \mu\text{F}-250\text{V}$	C_0	خازن خروجی
$10 \mu\text{F}-200\text{V}$	C_1	خازنهای افزایش سطح
3	n	نسبت تبدیل
0.6	D	ضریب وظیفه
$15 \mu\text{H}$	LK	سلف نشتی
$400 \mu\text{H}$	L_M	سلفهای مغناطیس کنندگی
100 kHz	F_{sw}	فرکانس کلید زنی
400 W	P	توان
200 V	V_0	ولتاژ خروجی
24 V	V_{in}	ولتاژ ورودی

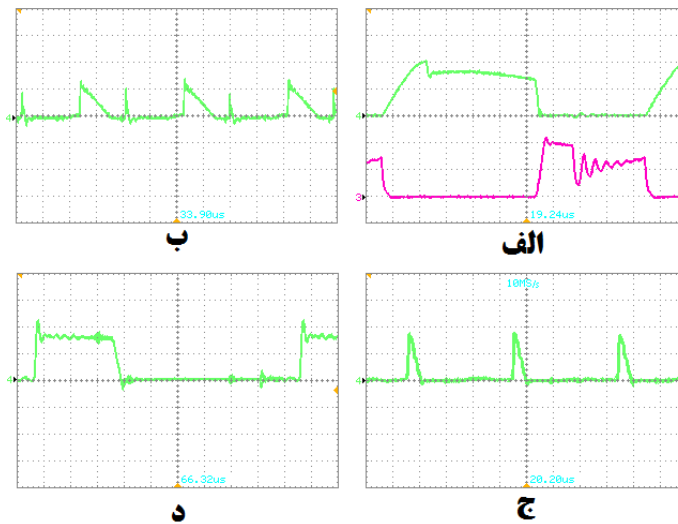


۴-۲- نتایج عملی

نمونه عملی مبدل پیشنهادی بر اساس المانهای مشخص شده در جدول ۱ ساخته شده است، که در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج عملی بدست آمده از مبدل پیشنهادی در شکل ۹ آورده شده است. همانطور که از این شکل مشخص می‌باشد در لحظه روشن شدن سوئیچ، شرایط کلیدزنی نرم تحت جریان صفر برقرار می‌باشد. همچنین در لحظه خاموش شدن ولتاژ با شیب افزایش یافته است که کلیدزنی نرم تحت ولتاژ صفر برقرار شده است. همچنین برای دیودها در لحظات خاموش شدن که از نقطه نظر بازیافت معکوس مهم می‌باشد، جریان با شیب و به آرامی کاهش یافته تا به صفر رسیده که شرایط کلیدزنی نرم تحت جریان صفر ایجاد گردیده است و مشکل بازیافت معکوس این دیودها حل شده است.



شکل (۸): نمونه ساخته شده از مبدل پیشنهادی



شکل (۹): نتایج عملی ولتاژ و جریان المانهای نیمه هادی مبدل پیشنهادی

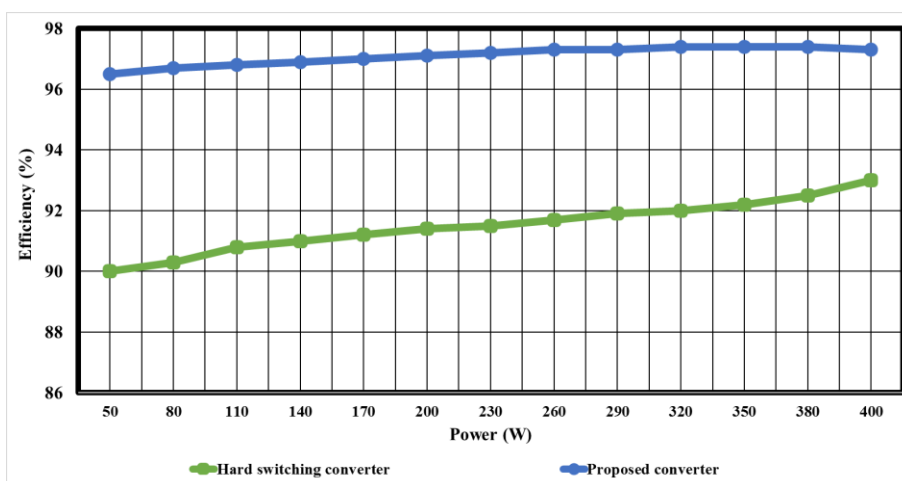
- الف) ولتاژ (پایینی) و جریان (بالایی) سوئیچ (مقیاس جریان 10 A/div، مقیاس ولتاژ 200 volt/div و مقیاس زمان 1 μ s/div)
- ب) جریان D_1 (مقیاس عمودی 10 A/div و مقیاس افقی 2.5 μ s/div)
- ج) جریان D_2 (مقیاس عمودی 2 A/div و مقیاس افقی 2.5 μ s/div)
- د) جریان D_0 (مقیاس عمودی 1 A/div و مقیاس افقی 1 μ s/div)



۵- مقایسه مبدل پیشنهادی با مبدل‌های دیگر

۱-۵- مقایسه مبدل پیشنهادی با مبدل پایه

به منظور مقایسه مبدل پیشنهادی از نظر راندمان با مبدل پایه کلیدزنی سخت مقایسه گردیده است، نتایج این مقایسه به صورت نموداری در شکل ۱۰ مشخص می‌باشد. با توجه به برقراری شرایط کلیدزنی نرم در مبدل پیشنهادی سطح راندمان بالاتری بدست می‌آید که این وضعیت به طور کامل در این شکل مشخص می‌باشد.



شکل (۱۰): مقایسه راندمان مبدل پیشنهادی با مبدل کلید زنی سخت

۲-۵- مقایسه مبدل پیشنهادی با مبدل‌های ارائه شده در سال‌های اخیر

مبدل پیشنهادی با شش مبدل جدید ارائه شده در سال‌های اخیر از نظر مشخصات مهم مبدل‌ها مقایسه گردیده است و نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است. طبق نتایج مشخص شده در جدول ۲، مبدل‌های مراجع [۱۸] و [۱۹] مانند مبدل پیشنهادی، تک سوئیچ هستند، که از نظر کنترل مبدل‌های ساده ای هستند و نیاز به طراحی مدار کنترل جدیدی ندارند. مبدل [۱۸] از نظر تعداد المان نیز شبیه به مبدل پیشنهادی است و در کل مبدل با ساختار ساده و راندمان بالایی است. اما این مبدل به نسبت مبدل پیشنهادی بهره ولتاژ کمتری دارد. مبدل [۱۹] بهره ولتاژ بسیار خوب و بالایی دارد، همچنین شرایط کلیدزنی نرم در مبدل برقرار است، اما این مبدل تعداد دیود زیادی دارد و سه سلف کوپل شده دارد که حجم و قیمت مبدل را بالا می‌برد. همچنین تعداد زیاد دیود در مبدل تلفات هدایتی را بالا برده و سطح راندمان مبدل پایین است. مبدل [۲۰] یک مبدل دو سوئیچ با راندمان بالا و بهره ولتاژ بسیار خوب می‌باشد. این مبدل مانند مبدل پیشنهادی تنها دو سلف کوپل شده دارد، اما تعداد بیشتری دیود دارد. همچنین مبدل دارای دو سوئیچ است که پیچیدگی مدار کنترل را نتیجه می‌دهد. مبدل معرفی شده در [۲۱] با اینکه تنها دو دیود دارد و مزیت این مبدل به حساب می‌آید، اما چهار عدد سوئیچ و شش عدد سلف‌های کوپل شده دارد، که این تعداد زیاد سلف کوپل شده باعث افت راندمان در مبدل شده است. همچنین کنترل چهار عدد سوئیچ پیچیدگی‌های خاص خود را در بر دارد. مبدل [۲۲] نیز یک مبدل با بهره بسیار بالا و راندمان بسیار خوب است. این مبدل نیز مشابه با مبدل قبل تعداد سلف‌های کوپل شده بالایی دارد و تعداد دو سوئیچ که ساختار مبدل را پیچیده کرده است. مبدل [۲۳] نیز بهره بسیار بالای دارد، که این مبدل با ساختاری که معرفی کرده است شرایط کلیدزنی نرم ندارد و سطح راندمان بدست آمده در این مبدل پایین است. مبدل پیشنهادی با اینکه بهره بسیار بالایی ندارد ولی بهره بدست آمده تحت کنترل ضریب وظیفه و نسبت تبدیل می‌تواند در کاربرد مورد نظر بهینه شود. همچنین مبدل ساختار ساده ای دارد که تنها یک سوئیچ دارد و مدار کمکی تنها دو خازن و دو دیود دارد که حجم زیادی به مبدل تحمیل نمی‌شود.



جدول (۲): مقایسه مبدل پیشنهادی با مبدل های معرفی شده در سالهای اخیر

راندمان (درصد)	بهره ولتاژ	شرایط کلید زنی نرم	تعداد سلفهای کوپل شده	تعداد دیود	تعداد سوئیچ	مشخصات مبدل
۹۷/۶	$\frac{1+kn}{1-D}$	تحت جریان صفر	۲	۳	۱	مبدل [۱۸]
۹۴	$\frac{1 + n_2 + n_3 + n_2(1 + D)}{1 - D}$	تحت جریان صفر	۳	۷	۱	مبدل [۱۹]
۹۷/۵۲	$\frac{1 - D}{(1 + MN)}$	تحت ولتاژ صفر	۲	۶	۲	مبدل [۲۰]
۹۴/۵	$\frac{1 - D}{2n + 2N + 4}$	تحت ولتاژ صفر	۶	۲	۴	مبدل [۲۱]
۹۶/۸۵	$\frac{1 - D}{M(2 - D)n + 1}$	تحت ولتاژ صفر	۴	۸	۲	مبدل [۲۲]
۹۲	$\frac{(1 - D)^2}{1 + N + D}$	سخت	۴	۴	۲	مبدل [۲۳]
۹۷/۲	$\frac{1 + n}{1 - D}$	تحت جریان صفر	۲	۳	۱	مبدل پیشنهادی

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، یک مبدل بسیار افزاینده جدید با کلید زنی نرم تحت جریان صفر برای زمان روشن شدن سوئیچ و تحت ولتاژ صفر برای زمان خاموش شدن سوئیچ ارائه گردید. در مبدل پیشنهادی بهره توسط سلفهای کوپل شده و خازن، افزایش یافته است. همچنین سلف نشستی ایجاد شده روی سلفهای کوپل شده، به منظور ایجاد شرایط کلیدزنی نرم برای سوئیچ استفاده گردیده، در حالی که انرژی آن کنترل شده است. مدار کمکی اضافه شده به مبدل ساختار ساده‌ای دارد و هزینه و پیچیدگی زیادی به مبدل تحمیل نمی‌کند، از این رو مبدل در کل ساختار ساده ای دارد. با توجه به عدم استفاده سوئیچ کمکی مبدل از نظر کنترل کلیدزنی نیز ساختار ساده ای دارد و نیاز به طراحی مدار کنترل جدیدی ندارد. طراحی و تحلیل مبدل پیشنهادی به طور کامل انجام شد و در نتایج شبیه سازی و نتایج نمونه عملی ساخته شده، نتایج تحلیل تئوری اثبات گردید.

مراجع

- [1] N. Hou, L. Ding, P. Gunawardena, T. Wang, Y. Zhang and Y. W. Li, "A Partial Power Processing Structure Embedding Renewable Energy Source and Energy Storage Element for Islanded DC Microgrid," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 3, pp. 4027–4039, Mar 2023, doi: 10.1109/TPEL.2022.3221349.
- [2] S. Hasanpour, Y. P. Siwakoti and F. Blaabjerg, "A New High Efficiency High Step-Up DC/DC Converter for Renewable Energy Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 2, pp. 1489–1500, Feb 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3161798.
- [3] Y. Guan, S. Mohamadian, X. She and C. Cecati, "Guest Editorial: Emerging Topics of DC–DC Converters for Solar PV," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 14–17, Jan 2023, doi: 10.1109/JESTIE.2022.3223311.
- [4] M. Uno, Y. Sasaki and Y. Fujii, "Fault Tolerant Modular Differential Power Processing Converter for Photovoltaic Systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 1, pp. 1139–1151, Jan 2023, doi: 10.1109/TIA.2022.3210074.
- [5] M. Uno, T. Suzuki and Y. Fujii, "Module-to-Panel Modular Differential Power Processing Converter With Isolated DC Bus for Photovoltaic Systems Under Partial Shading," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 97–108, Jan 2023, doi: 10.1109/JESTIE.2022.3206166.



- [6] L. Xu, R. Ma, R. Xie, Sh. Zhuo, Y. Huangfu and F. Gao, "Offset-Free Model Predictive Control of Fuel Cell DC-DC Boost Converter With Low-Complexity and High-Robustness," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 6, pp. 5784-5796, Jun 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3198249.
- [7] K. Zaoskoufis and E. C. Tatakis, "Isolated ZVS-ZCS DC-DC High Step-Up Converter With Low-Ripple Input Current," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 2, no. 4, pp. 464-480, Oct 2021, doi: 10.1109/JESTIE.2021.3063913.
- [8] J. Lee, M. Kim, S. Kim and S. Choi, "An Isolated Single-Switch ZCS Resonant Converter With High Step-Up Ratio," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 10, pp. 11555-11564, Oct 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.3072647.
- [9] N. Yang, J. Zeng, R. Hu and J. Liu, "Analysis and Design of an Isolated High Step-Up Converter Without Voltage-Drop," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 6, pp. 6939-6950, Jun 2022, doi: 10.1109/TPEL.2021.3138493.
- [10] P. H. Feretti, F. L. Tofoli and E. R. Ribeiro, "Family of Non-Isolated High Step-Up DC-DC Converters Based on the Multi-State Switching Cell," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 10, no. 5, pp. 5882-5893, Oct 2022, doi:10.1109/JESTPE.2022.3160280.
- [11] P. Talebi, M. Packnezhad and H. Farzanehfard, "Fully Soft-Switched Ultra-High Step-Up Converter With Very Low Switch Voltage Stress," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 3, pp. 3523-3530, Mar 2023, doi: 10.1109/TPEL.2022.3224831.
- [12] B. X. Zhu, Y. Liu, Sh. Zhi, K. Wang and J. Liu, "A Family of Bipolar High Step-Up Zeta-Buck-Boost Converter Based on "Coat Circuit"," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 3, pp. 3328-3339, Mar 2023, doi: 10.1109/TPEL.2022.3221781.
- [13] M. Farsijani, S. Abbasian, H. Hafezi and A. Abrishamifar, "A High Step-Up Cost Effective DC-to-DC Topology Based on Three-Winding Coupled-Inductor," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 50-59, Jan 2023, doi: 10.1109/JESTIE.2022.3217017.
- [14] T. Yao and W. Wang, "Analysis and Design of Three-End Planar Coupled Inductor Based DC-DC Converter," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 28-36, Jan 2023, doi: 10.1109/JESTIE.2022.3173177.
- [15] Y. Zheng, W. Xie and K. M. Smedley, "A Family of Interleaved High Step-Up Converters With Diode-Capacitor Technique," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 2, pp. 1560-1570, Jun 2020, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2907691.
- [16] A. Shoaee, K. Abbaszadeh and H. Allahyari, "A Single-Inductor Multi-Input Multilevel High Step-Up DC-DC Converter Based on Switched-Diode-Capacitor Cells for PV Applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 18-27, Jan 2023, doi: 10.1109/JESTIE.2022.3173178.
- [17] Y. Ye, Sh. Chen and Y. Yi, "Switched-Capacitor and Coupled-Inductor-Based High Step-Up Converter With Improved Voltage Gain," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 1, pp. 754-764, Feb 2021, doi: 10.1109/JESTPE.2020.2971525.
- [18] I. P. Rosas, E. Agostini and C. B. Nascimento, "Single-Switch High-Step-Up DC-DC Converter Employing Coupled Inductor and Voltage Multiplier Cell," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 82626-82635, Aug 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3196563.
- [19] S. Abbasian, H. S. Gohari, M. Farsijani, K. Abbaszadeh, H. Hafezi and Sh. Filizadeh, "Single-Switch Resonant Soft-Switching Ultra-High Gain DC-DC Converter With Continuous Input Current," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 33482-33491, Mar 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3161456.
- [20] P. Mohseni, S. Rahimpour, M. Dezhbord, Md. R. Islam and K. M. Muttaqi, "An Optimal Structure for High Step-Up Nonisolated DC-DC Converters With Soft-Switching Capability and Zero Input Current Ripple," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 5, pp. 4676-4686, May 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3080202.
- [21] T. Nouri, M. Shaneh, M. Benbouzid and N. V. Kurdkandi, "An Interleaved ZVS High Step-Up Converter for Renewable Energy Systems Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 5, pp. 4786-4800, May 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3080211.
- [22] P. Mohseni, Sh. Mohammadsalehian, Md. R. Islam, K. M. Muttaqi, D. Sutanto and P. Alavi, "Ultrahigh Voltage Gain DC-DC Boost Converter With ZVS Switching Realization and Coupled Inductor Extendable Voltage Multiplier Cell Techniques," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 1, pp. 323-335, Jan 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3050385.



- [23] R. Rahimi, S. Habibi, M. Ferdowsi and P. Shamsi, "An Interleaved Quadratic High Step-Up DC-DC Converter With Coupled Inductor," *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 2, pp. 647–658, Dec 2021, doi: 10.1109/OJPEL.2021.3133911.

زیرنویس‌ها

-
- ¹ Hard switching
 - ² Soft switching
 - ³ Zero current switching (ZCS)
 - ⁴ Zero voltage switching (ZVS)
 - ⁵ Zero voltage-Zero current switching (ZVZCS)

