

## High Step-Up Cascaded Boost Converter with Coupled Inductor and Lossless Passive Snubber

Zainab Abdul Ameer AL-Dabbagh<sup>1</sup>, M.Sc, Mohammad Rouhollah Yazdani<sup>2</sup>, Associate Professor, Fadhil H. Al-Ashaa, Associate Professor<sup>3</sup> Abbas Hassan

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Khorasgan, Isfahan, Iran

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Khorasgan, Isfahan, Iran

<sup>3</sup> Department of Electrical Engineering, Technology University, Baghdad, Iraq

### Abstract:

An effective high-step-up DC-DC converter is an important section of renewable energy systems. Cascaded boost converters provide more voltage gain than single boost converters, but they are still unsuitable for high step-up voltage conversion due to gain and hard switching conditions. To improve the voltage, gain of the cascaded boost converter, a coupled inductor can be used but the leakage inductance causes a voltage. To overcome these problems, a high step-up converter is proposed in which a cascaded structure, coupled inductor, and a lossless passive snubber are utilized together. The proposed converter has zero current and zero voltage switching conditions at turn-on and off instants. First, the proposed converter is theoretically analyzed, and then its design and simulation in OrCAD software are presented. Furthermore, the experimental results of the prototype verify soft switching conditions and high step-up gain.

**Keywords:** Cascaded DC-DC boost converter, High step-up conversion, Coupled inductor, Lossless passive snubber, Soft switching.

**Received:** 16 January 2023

**Revised:** 19 February 2023

**Accepted:** 14 May 2023

**Corresponding Author:** Dr. Mohammad Rouhollah Yazdani, m.yazdani@khuif.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2023.1977872.1060>



## مبدل سویچینگ بوست سری بسیار افزاینده با سلف تزویج و اسنابر غیرفعال بدون تلفات

زینب عبدالامیر الدباغ<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد، محمد روح اله یزدانی<sup>۲</sup>، دانشیار، فاضل عباس حسن الاشعه، دانشیار<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی برق، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، خوراسگان، اصفهان، ایران

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تکنولوژی، بغداد، عراق

**چکیده:** مبدل DC-DC بسیار افزاینده بخش مهمی در سامانه های انرژی های تجدیدپذیر است. هرچند مبدل های بوست سری نسبت به مبدل بوست مرسوم دارای بهره بیشتری هستند، ولی میزان افزایش نسبت ولتاژ آنها کافی نیست. برای بهبود بهره ولتاژ مبدل بوست سری، می توان از سلف تزویج استفاده کرد ولی سلف نشتی سلف باعث ایجاد پرش ولتاژ سویچ می شود و بازده به دلیل شرایط سوئیچینگ سخت زیاد نیست. برای غلبه بر این مشکلات، در این مقاله یک مبدل بسیار افزاینده پیشنهاد می شود که در آن ساختار مبدل بوست سری، سلف تزویج و اسنابر پسیو بدون اتلاف با هم تلفیق شده اند. در لحظه روشن و خاموش شدن، مبدل پیشنهادی دارای شرایط سوئیچینگ در جریان صفر و ولتاژ صفر است. در این مقاله، ابتدا مبدل پیشنهادی به صورت تئوری تحلیل شده و سپس طراحی و شبیه سازی آن در نرم افزار OrCAD ارائه شده است. علاوه بر این، نتایج اندازه گیری عملی برای نمونه ساخته شده مبدل پیشنهادی برای تأیید شرایط سوئیچینگ نرم و بهره بسیار افزاینده ارائه می شود.

**واژه های کلیدی:** مبدل بوست سری DC-DC، تبدیل بسیار افزاینده، سلف تزویج، اسنابر پسیو بدون تلفات، سوئیچینگ نرم.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۲۴

نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد روح اله یزدانی [m.yazdani@khuisf.ac.ir](mailto:m.yazdani@khuisf.ac.ir)

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2023.1977872.1060>





## ۱- مقدمه

منابع انرژی تجدیدپذیر به دلیل نداشتن محدودیت، عدم آلودگی محیط زیست، جلوگیری از مسئله گرم شدن زمین و قابلیت اطمینان بالا بسیار اهمیت دارند. در سال‌های اخیر، انرژی خورشیدی به دلیل کمبود منابع فسیلی، اثرات تغییرات محیطی و پیشرفت‌های فنی، پتانسیل زیادی برای رقابت با انرژی‌های فسیلی به ویژه در مکان‌هایی با پتانسیل تابش بالا داشته است. انرژی خورشیدی می‌تواند توسط سلول‌های فتوولتائیک (PV)<sup>۱</sup> به انرژی الکتریکی تبدیل شود. ماژول PV با اتصال تعدادی سلول PV به دست می‌آید و سطح ولتاژ را می‌توان با مبدل‌های DC-DC بسیار افزاینده<sup>۲</sup> با اتصال بار اصلی به شبکه افزایش داد و ولتاژ را به مقدار مورد نظر افزایش داد تا بتواند به سطح مناسب ولتاژ ورودی اینورتر برای تبدیل ولتاژ DC به AC برسد [۱]. مبدل‌های سوئیچینگ افزاینده کاربردهای متعددی دارند، مانند: تصحیح ضریب توان [۲-۳]، مبدل‌های دو طرفه به عنوان رابط برای شارژرهای باتری‌ها و منابع انرژی تجدیدپذیر [۴-۵]، خودروهای الکتریکی [۶-۷]، سلول‌های فتوولتائیک [۶-۷]، درایورهای موتور [۸]، پیل‌های سوختی [۹-۱۰] و برخی درایورهای LED صنعتی [۱۱]. روش‌های بسیار افزاینده در مبدل‌های سوئیچینگ در [۱۲] مرور و طبقه‌بندی شده‌اند که از آن جمله می‌توان به مبدل‌های بوست با سلف تزویج، بوست سری، بوست سه سطحی و سوئیچ خازنی اشاره کرد [۱۳-۱۵]. هرچند در مبدل بوست بسیار افزاینده با سلف تزویج، بهره ولتاژ نسبت به مبدل بوست مرسوم افزایش می‌یابد، ولی به دلیل وجود سلف نشستی، پرش ولتاژ در دو سر سوئیچ وجود می‌آید. این موضوع علاوه بر ایجاد مشکلات تداخل الکترومغناطیسی<sup>۳</sup>، استرس ولتاژ سوئیچ را افزایش می‌دهد. همچنین به دلیل شرایط سوئیچینگ سخت، تلفات سوئیچینگ مبدل را افزایش داده و در نتیجه بازده کاهش می‌یابد.

مدارهای اسنابر بدون اتلاف می‌توانند تلفات سوئیچینگ را کاهش دهند و هنگامی که هدف، به دست آوردن شرایط سوئیچینگ نرم برای افزایش چگالی و بهبود بازده مبدل است، استفاده می‌شوند [۱۶-۱۹]. اسنابرهای پسیو بدون اتلاف قابلیت فراهم کردن شرایط سوئیچ زنی در ولتاژ صفر<sup>۴</sup> (ZVS) یا جریان صفر<sup>۵</sup> (ZCS) را دارند [۱۹-۲۲]. از طرف دیگر، با کاهش تغییرات ولتاژ و جریان سوئیچ اصلی (di/dt, dv/dt)، تداخل الکترومغناطیسی نیز کاهش می‌یابد. در [۱۶] یک اسنابر پسیو بدون اتلاف معرفی شده است که شرایط سوئیچ زنی در جریان صفر در لحظه روشن شدن سوئیچ و ولتاژ صفر در لحظه خاموش شدن سوئیچ را فراهم می‌کند، ولی تعداد قطعات مدار اسنابر زیاد بوده و به دو هسته مغناطیسی نیاز دارد. در [۱۷] یک اسنابر پسیو برای مبدل فلای بک پیشنهاد شده است. هرچند این اسنابر به یک هسته مغناطیسی نیاز دارد ولی پنج دیود در ساختار آن استفاده شده است که هزینه را افزایش می‌دهند.

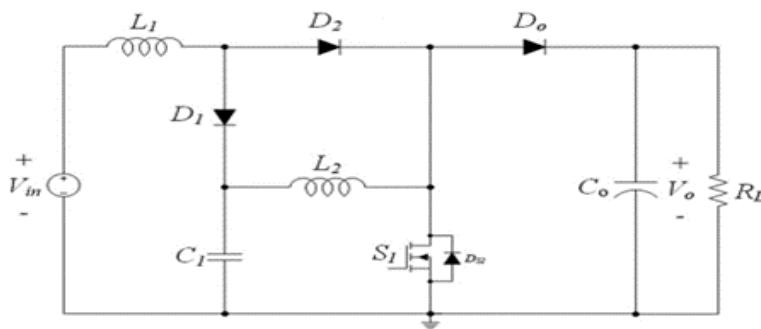
در این مقاله یک مبدل بسیار افزاینده پیشنهاد می‌شود که در آن داشتن بهره بسیار افزاینده در ساختار مبدل بوست سری، از سلف تزویج نیز استفاده شده است و همچنین برای فراهم کردن شرایط سوئیچینگ نرم برای کاهش تلفات نیز یک اسنابر پسیو بدون اتلاف (فقط با یک هسته مغناطیسی) با آن تلفیق شده است. در این ساختار علاوه بر فراهم شدن شرایط سوئیچینگ نرم، مشکل پرش ولتاژ سوئیچ به دلیل سلف نشستی نیز برطرف شده است. ساختار این مقاله به این شرح است که توصیف مبدل پیشنهادی و وضعیت‌های عملکردی در بخش دوم ارائه می‌شود. سپس نحوه طراحی و شکل موجهای شبیه‌سازی مبدل ارائه می‌شود. در ادامه، نتایج اندازه‌گیری عملی برای نمونه ساخته شده مبدل پیشنهادی برای تأیید شرایط سوئیچینگ نرم و بهره بسیار افزاینده ارائه می‌شود. در پایان هم نتیجه‌گیری مقاله آورده می‌شود.

## ۲- شرح مدار

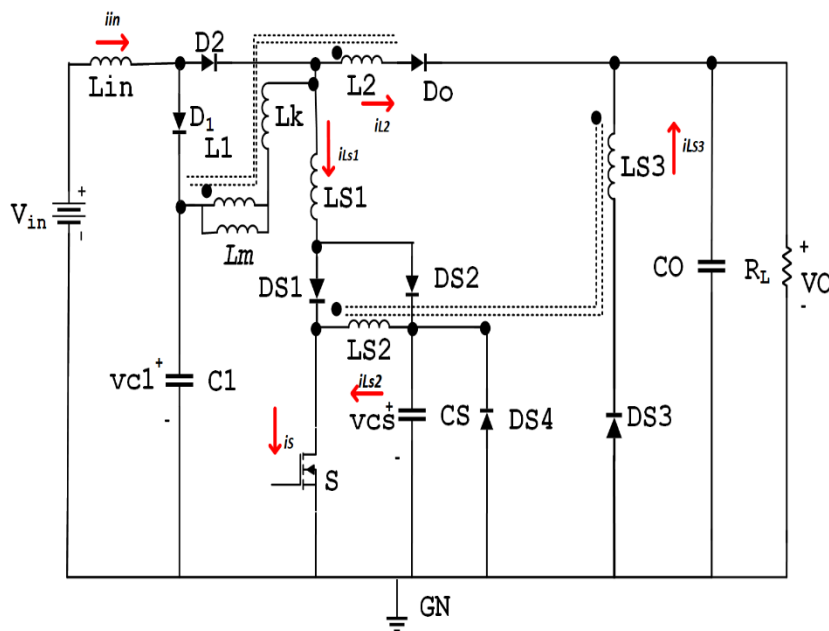
مبدل بوست سری در شکل (۱) آورده شده است [۲۲]. برای افزایش بیشتر بهره در این مبدل می‌توان از ایده سلف تزویج در آن استفاده کرد. همچنین برای فراهم کردن شرایط سوئیچینگ نرم از یک اسنابر بدون اتلاف [۲۱] که بتواند همزمان مشکل سلف نشستی را هم حل کند، استفاده می‌شود. شکل (۲) مبدل بسیار افزاینده پیشنهادی را نشان می‌دهد که برپایه ساختار بوست سری با تزویج سلف‌های مبدل و اعمال اسنابر بدون اتلاف است. اجزای اسنابر از  $L_{S1}$ ،  $L_{S2}$ ،  $L_{S3}$ ،  $C_S$  و  $D_{S1}$  تا  $D_{S4}$  تشکیل شده است و سلف‌های اسنابر  $L_{S2}$  و  $L_{S3}$  با هم تزویج شده‌اند و مزیت آن استفاده از یک هسته مغناطیسی در ساختار خود است. با استفاده از تشدید بین  $C_S$  و  $L_{S1}$ ، به ترتیب شرایط ZCS و ZVS در زمان خاموش شدن و روشن شدن سوئیچ به دست می‌آید. سایر اجزای اسنابر برای بازیابی انرژی ذخیره شده در خازن استفاده می‌شوند. هنگامی که سوئیچ خاموش است،  $C_S$  شارژ می‌شود. برای ارائه شرایط ZVS برای سوئیچ مبدل در طول دوره سوئیچینگ بعدی، ولتاژ  $C_S$  باید تخلیه شود. تحت تشدید، هنگامی که سوئیچ مبدل روشن است، انرژی ذخیره شده در  $C_S$  به  $L_{S2}$



منتقل می شود. انرژی ذخیره شده در  $LS_2$  با خاموش شدن سوئیچ مبدل به ولتاژ خروجی منتقل می شود. در شرایطی که جریان عبوری  $LS_1$  از حداکثر جریان عبوری از  $LS_2$  تجاوز می کند، بسته به توان عملیاتی مبدل، ممکن است به  $DS_4$  نیاز نباشد. از منفی شدن ولتاژ  $CS$  در توان های خروجی کم جلوگیری می کند.



شکل (۱): مبدل بوست سری مرسوم [23]



شکل (۲): مبدل بوست سری پیشنهادی با اسنابر بدون اتلاف

مبدل پیشنهادی دارای هفت حالت کاری بر اساس مدار اسنابر خود است. در شکل (۳)، مدارهای معادل برای هر حالت کار نشان داده شده است. شکل موج اصلی مبدل در شکل (۴) نشان داده شده است. قبل از حالت اول، فرض می شود که سوئیچ و دیودهای اسنابر خاموش شوند،  $LS_2$  و  $LS_3$  انرژی ذخیره ای ندارند،  $Do$  فعال شده است و  $V_{cs}$  همان  $V_{cs}(t_0)$  است.

**حالت اول  $[t_0 - t_1]$ :** در  $t_0$ ، سوئیچ برای مبدل  $S$  که تحت  $ZCS$  است به دلیل  $LS_1$  و  $LS_2$  فعال شده است. با فعال کردن  $S$ ،  $DS_1$  تحت  $ZCS$  فعال می شود. در این حالت،  $D_1$  خاموش و  $D_2$  روشن می شود. از آنجایی که جریان عبوری از  $LS_1$  کوچکتر از  $i_{in}$  است،  $Do$  روشن می ماند و در نتیجه  $Vo$  در سراسر  $LS_1$  قرار می گیرد. بنابراین جریان عبوری از  $LS_1$  با شیب  $Vo/LS_1$  به صورت خطی افزایش می یابد. علاوه بر این، از آنجایی که خازن اسنابر  $CS$  با ولتاژ بالاتری نسبت به  $Vo$  شارژ شده است، روشن کردن  $S$  باعث ایجاد تشدید بین  $CS$  و  $LS_2$  می شود. در طول این رزونانس،  $V_{cs}$  کاهش می یابد و  $i_{LS2}$  افزایش می یابد. معادلات مهم مرتبط در این حالت به شرح زیر است:

$$i_{Lin}(t) = i_{Lin}(t_0) - \frac{V_0 - V_{in}}{L_{in}}(t - t_0) \quad (1)$$



$$i_{LS1}(t) = \frac{V_0}{L_{S1}}(t - t_0) \quad (2)$$

$$i_{LS2}(t) = V_{CS}(t_0) \sqrt{\frac{C_s}{L_{S2}}} \sin(\omega(t - t_0)) \quad (3)$$

**حالت دوم**  $[t_1 - t_2]$ : در  $t_1$ ، با توجه به جریان  $I_{LS1}$ ،  $D_0$  تحت ZCS غیرفعال می شود. بنابراین، مسیر  $V_{in}$  از طریق  $L_{in}$  و  $L_{S1}$  متصل می شود تا جریان آنها را به صورت خطی افزایش دهد. این حالت رزونانس بین  $L_{S2}$  و  $C_s$  که در حالت اول آغاز شد را ادامه می دهد.  $I_{LS2}$  و  $V_{CS}$  را می توان از معادلات (۴) و (۵) تعیین کرد، برای به دست آوردن  $I_{LS1}$ ، از معادله زیر استفاده می شود:

$$i_{Lin}(t) = i_{LS1}(t) = i_{LS1}(t_1) + \frac{V_{in}}{L_{S1} + L_{in}}(t - t_1) \quad (4)$$

**حالت سوم**  $[t_2 - t_3]$ : در  $t_2$ ، ولتاژ  $C_s$  به صفر می رسد. به این ترتیب، عملکرد به توان عملیاتی مبدل بستگی دارد. حالت سوم-الف و حالت سوم-ب بر اساس جریانی که از  $L_{S1}$  می گذرد امکان پذیر است:

**حالت سوم-الف**: هنگامی که جریان در  $L_{S1}$  بیشتر از جریان محاسبه شده در  $L_{S2}$  در رابطه (۴) باشد و در تحت ZVS،  $D_{S2}$  روشن می شود. در حالت سوم-الف، هر دو  $D_{S1}$ ،  $D_{S2}$  روشن می شوند و پشت به پشت هستند. از آنجایی که هیچ ولتاژی در  $L_{S2}$  وجود ندارد، جریان آن آزادانه از  $D_{S1}$  و  $D_{S2}$  عبور می کند. در سرتاسر این حالت، ولتاژ  $C_s$  روی صفر باقی می ماند.

**حالت سوم-ب**: هنگامی که جریان در  $L_{S1}$  کمتر از جریان در  $L_{S2}(t_2)$  باشد،  $D_{S4}$  روشن می شود و  $V_{CS}$  در تحت ZVS در صفر باقی می ماند. جهت جریان از  $L_{S2}$  به  $D_{S4}$  است، در حالی که  $D_{S2}$  خاموش می ماند.

**حالت چهارم**  $[t_3 - t_4]$ : در  $t_3$ ، تحت ZVS، سوئیچ مبدل S در وضعیت خاموش است. بنابراین،  $D_1$ ،  $D_{S2}$  و  $D_{S3}$  فعال می شوند و جریان  $i_{in}$  و  $i_{LS1}$  از  $D_{S2}$  و  $C_s$  عبور می کند. در حالت چهارم، جریان  $L_{in}$  را می توان ثابت نزدیک در نظر گرفت و  $V_{CS}$  ها به صورت خطی شارژ می شوند. علاوه بر این، در زمان  $t_3$ ،  $D_{S3}$  فعال می شود و اجازه می دهد انرژی ذخیره شده در هسته سلف های  $L_{S2}$  و  $L_{S3}$  به خروجی منتقل شود. اگر حالت سوم-ب اتفاق بیفتد،  $D_{S4}$  و  $D_{S2}$  در ابتدای این حالت تحت ZVS روشن می شوند. معادلات مهم مرتبط با این حالت به شرح زیر است:

$$i_{DS3} = n_a i_{LS2}(t_2) - \frac{V_0}{L_{S3}}(t - t_3) \quad (5)$$

که در آن

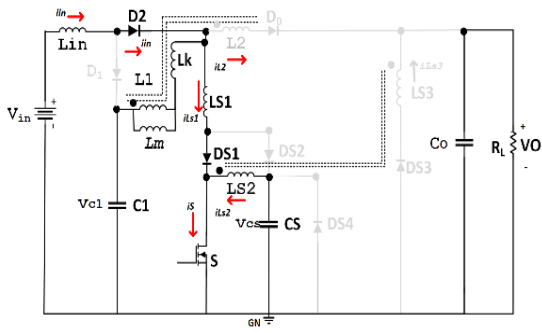
$$n_a = \sqrt{\frac{L_{S2}}{L_{S3}}} \quad (6)$$

**حالت پنجم**  $[t_4 - t_5]$ : در زمان  $t_4$ ،  $V_{CS}$  برابر با  $V_0(1 + L_{S1}/L_{in})$  است، بنابراین  $D_0$  تحت ZVS روشن می شود. همچنین ولتاژ  $V_{in} - V_0$  روی  $L_{in}$  قرار می گیرد و این سلف در خروجی تخلیه می شود. علاوه بر این، در  $t_4$ ، رزونانس بین  $C_s$  و  $L_{S1}$  آغاز می شود. طی این تشدید، انرژی از  $L_{S1}$  به  $C_s$  منتقل می شود.

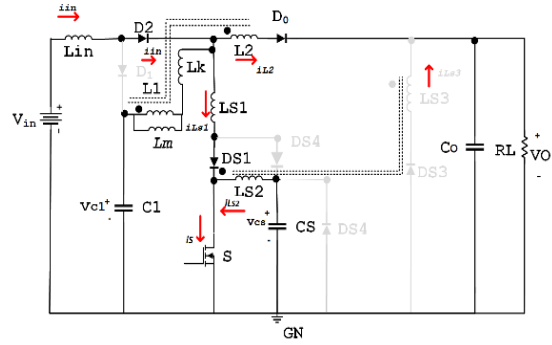
**حالت ششم**  $[t_5 - t_6]$ : در  $t_5$ ، جریان عبوری از  $L_{S1}$  صفر می شود و  $D_{S2}$  تحت ZCS غیرفعال می شود. یعنی  $L_{S3}$  به ولتاژ خروجی تخلیه می شود.

**حالت هفتم**  $[t_6 - t_7]$ : در  $t_6$ ، تمام انرژی ذخیره شده در  $L_{S3}$  آزاد می شود و باعث می شود  $D_{S3}$  تحت ZCS خاموش شود. در این حالت T عملکرد مبدل مشابه هنگامی که سوئیچ در مبدل بوست مرسوم خاموش است، می باشد.

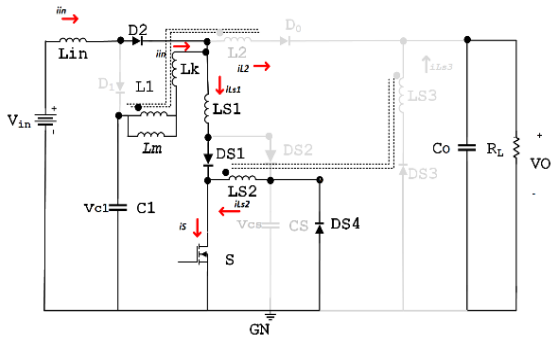




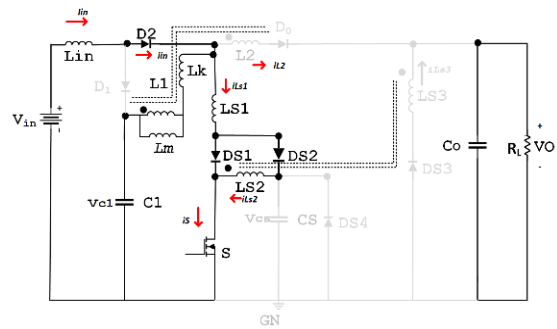
حالت دوم



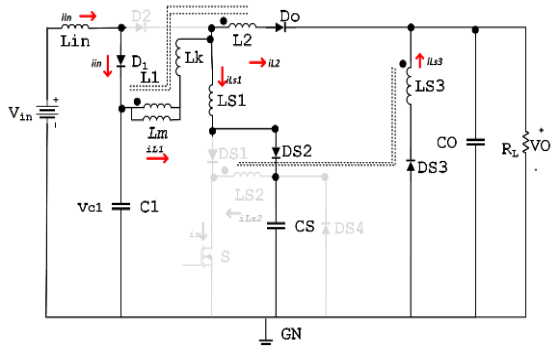
حالت اول



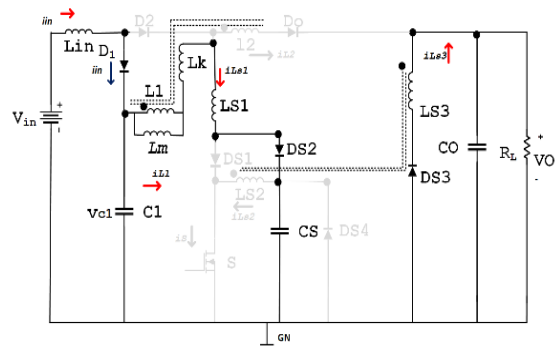
حالت سوم - ب



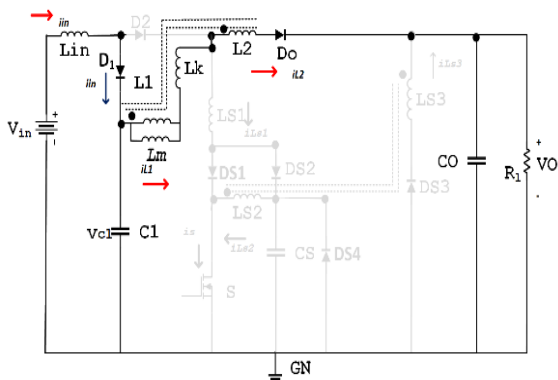
حالت سوم - الف



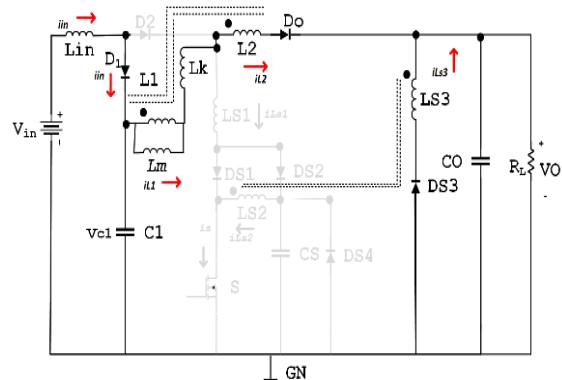
حالت پنجم



حالت چهارم

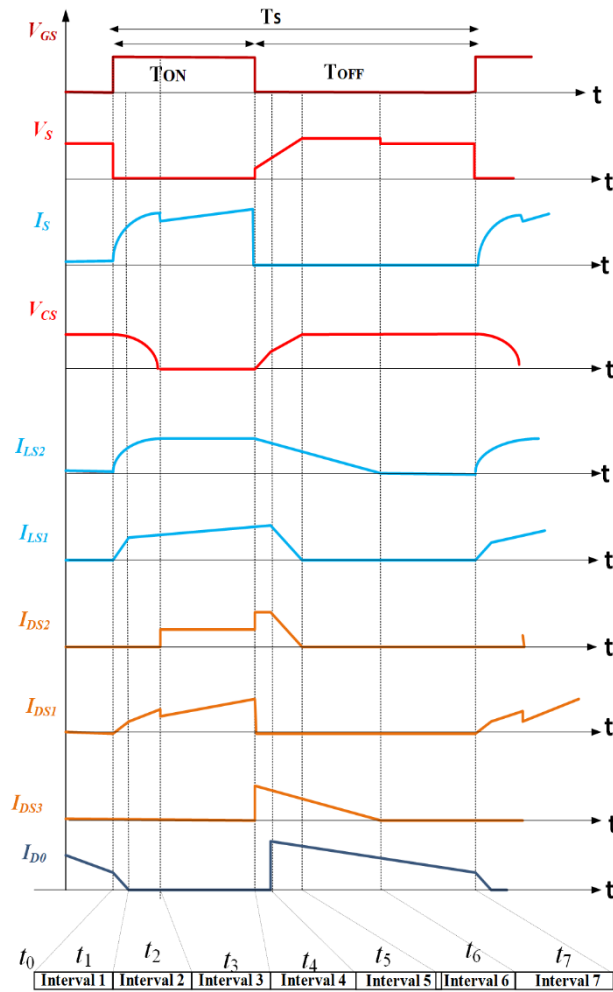


حالت هفتم



حالت ششم

شکل (۳): مدار معادل وضعیت های عملکردی مبدل پیشنهادی



شکل (۴): شکل موج های ایده آل مبدل پیشنهادی

### ۳- روابط و روند طراحی مبدل پیشنهادی

الف) بهره ولتاژ M

برای بدست آوردن نسبت تبدیل ولتاژ مبدل پیشنهادی ابتدا می توان ولتاژ  $V_{C1}$  که نشان دهنده ولتاژ در بخش اول مبدل پیشنهادی است را بدست آورد. ولتاژ این خازن را می توان مشابه مبدل بوست معمولی طبق معادله زیر بدست آورد.

$$V_{CS} = \frac{1}{1-D} V_{in} \quad (7)$$

با اعمال قانون تعادل ولت-ثانیه می توان معادله برای اندوکتانس مغناطیسی  $L_m$  بدست آورد:

$$V_{C1}DT + \frac{V_{C1}-V_o}{1+n_1}(1-D)T = 0 \quad (8)$$

براساس رابطه فوق و جایگذاری ولتاژ خازن، ولتاژ خروجی  $V_o$  به صورت زیر بدست می آید

$$V_o = \frac{(1+n_1D)}{1-D} V_{C1} \quad (9)$$

بهره ولتاژ M مبدل پیشنهادی را می توان از طریق زیر بدست آورد:



$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1+n1D}{(1-D)^2} \quad (10)$$

که در آن:

$$n_1 = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (11)$$

جهت بهره مدنظر می توان چرخه وظیفه و نسبت دور سلفها را تعیین کرد و سلف مغناطیسی نیز مشابه مبدل بوست با سلف تزویج بدست می آید.

(ب) مدار اسنابر

برای طراحی مدار اسنابر پیشنهادی، لازم است پارامترهای  $C_s$ ،  $L_{S1}$ ،  $L_{S2}$  و  $L_{S3}$  محاسبه شوند. شرایط ZCS و ZVS را می توان به ترتیب با محاسبه  $L_{S1}$  و  $C_s$  به دست آورد. می توان این اجزای اسنابر را به همان روشی که هر سلف و خازن اسنابر دیگری محاسبه می شوند، محاسبه کرد [۲۲-۲۳]:

$$L_{S1} > \frac{V_{sw} t_r}{i_{sw}} \quad (12)$$

$$C_s > \frac{i_{sw} t_f}{2V_{sw}} \quad (13)$$

که در آنها  $V_{sw}$ ،  $i_{sw}$ ، حداکثر ولتاژ سوئیچ و جریان و  $t_r$ ،  $t_f$  به ترتیب زمان افزایش و افت هستند. انتخاب یک مقدار مناسب برای  $L_{S2}$  به منظور بازیابی انرژی ذخیره شده در خازن اسنابر مهم است. برای این کار، یک چهارم دوره رزونانسی که در حالت اول شروع شده است باید کمتر از حداقل زمان روشن شدن باشد [۲۲].

$$L_{S2} < \frac{1}{C_s} \left( \frac{2D}{\pi} T \right)^2 \quad (14)$$

که در آن،  $D$  حد اقل زمان برای روشن کردن است. پس از انتخاب مقدار  $L_{S2}$ ،  $L_{S3}$  را می توان محاسبه کرد. برای انتخاب  $L_{S3}$  از معادله زیر استفاده می شود:

$$L_{S3} < \frac{1}{C_s} \left[ \frac{V_o(1-D)}{V_{Cs}} T \right]^2 \quad (15)$$

که در آن،  $D$  حداکثر زمان روشن بودن سوئیچ و  $\overline{V_{Cs}}$  حداکثر ولتاژ  $C_s$  است که می توان آن را بر اساس عملکرد مبدل تخمین زد. سلف ها و خازن های مدار اسنابر بر اساس روابط فوق محاسبه می شوند.

برای مبدل بوست پیشنهادی، مبدل، تنش (استرس) ولتاژ سوئیچ را می توان محاسبه کرد، شبیه روال گفته شده در [۲۲] به صورت زیر بدست آورد:

$$V_{sw} = (1 + n_a)V_o + \sqrt{\frac{L_{S1}}{C_s} \left( \frac{P_o}{\eta V_{in} D} + \frac{\Delta I}{2} \right)} \quad (16)$$

که در آن  $\eta$  راندمان مبدل است که برای حالت ایده آل می توان آن را برابر یک در نظر گرفت.  $\Delta I$  نیز ریپل جریان سلف ورودی است که حدود ۲۰ درصد جریان ورودی نامی مبدل در نظر گرفته می شود.

#### ۴- شبیه سازی در نرم افزار OrCAD

در این قسمت، شبیه سازی مبدل پیشنهادی ارایه شده است. مدل بسیار افزایشده پیشنهادی برای توان ۹۲ وات، ولتاژ ورودی ۲۴ ولت و ولتاژ خروجی ۹۶ ولت بر اساس روابط بخش قبل طراحی شده است که در جدول (۱) مشخصات آورده شده اند. مدل شبیه سازی شده در نرم افزار اورکد نیز در شکل (۵) نشان داده شده است. فرکانس سوئیچینگ ۱۰۰ کیلوهرتز و سوئیچ مبدل از نوع IRF640 است. دیویدهای مبدل پیشنهادی نیز MUR460 هستند. بر اساس رابطه (۶) و (۱۱) می توان نوشت:





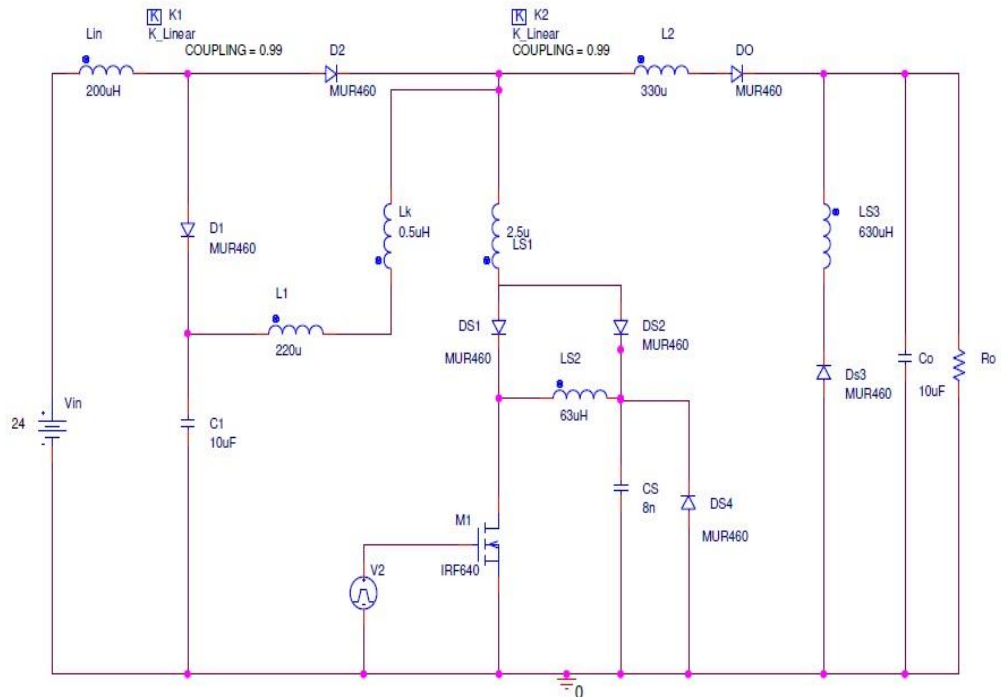
$$na = \sqrt{\frac{LS2}{LS3}} = 0.31 \quad LS2= 63 \mu H \quad LS3= 630 \mu H \quad (17)$$

$$n1 = \sqrt{\frac{L2}{L1}} \quad L2=330\mu H \quad L1=220 \mu H \quad n1= 1.23 \quad (18)$$

به عنوان مثال برای داشتن بهره حدود ۴، با جایگذاری در رابطه (۱۱)، چرخه وظیفه برابر ۰/۴ باید انتخاب شود.

جدول (۱): مشخصات و قطعات مدل پیشنهادی

مقدار	نام پارامتر
24 V	ولتاژ ورودی $V_{in}$
96 V	ولتاژ خروجی $V_{out}$
92 W	توان خروجی $W$
100 kHz	فرکانس سوئیچینگ $F_{sw}$
0.4	چرخه وظیفه $D$
200 $\mu H$	سلف ورودی $L_{in}$
220 $\mu H$ , 330 $\mu H$	سلف تزویج اصلی مدل $L_1, L_2$
63 $\mu H$ , 630 $\mu H$	سلف تزویج اسنابر مدل $LS_2, LS_3$
2.5 $\mu H$	سلف اسنابر $LS_1$
8 n F	خازن اسنابر $C_S$
10 $\mu F$	خازن $C_1$
10 $\mu F$	خازن $C_0$
IRF 640	سوئیچ $M_1$
MUR 460	دیودها $D_1, D_2, D_3, D_4$
0.99	ضریب تزویج $K_1, K_2$



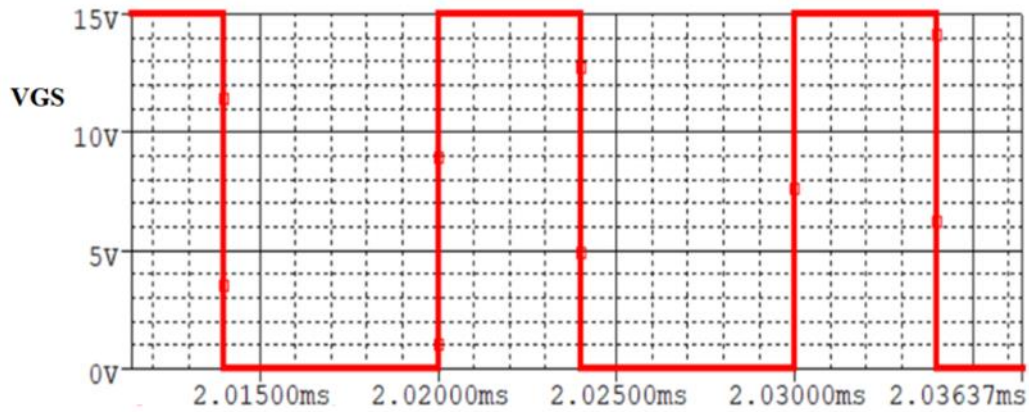
شکل (۵): مدل بسیار افزاینده پیشنهادی در نرم افزار OrCAD

شکل (۶) ولتاژ  $V_{GS}$  و شکل (۷) ولتاژ سوئیچ و جریان مدل پیشنهادی را نشان می دهد. طبق این شکل لحظه روشن شدن سوئیچ به صورت ZCS و لحظه خاموش شدن سوئیچ به صورت ZVS است. شکل (۸) ولتاژ و جریان دیود یکسو کننده  $D_0$  را نشان می دهد که

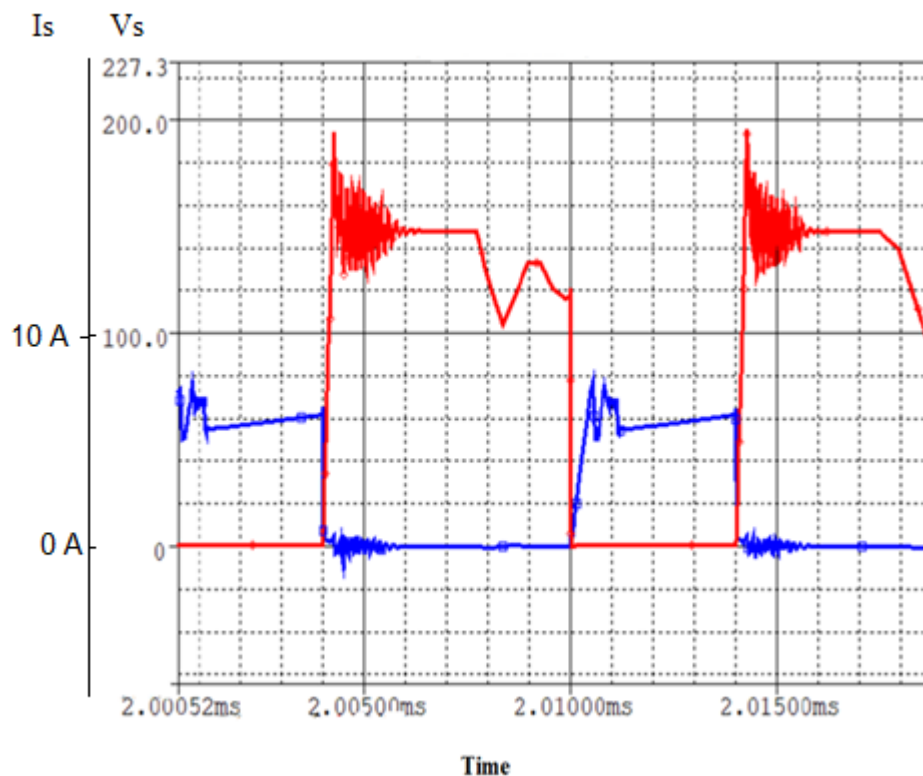




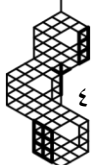
بیانگر خاموش شدن آن در جریان صفر است. شکل (۹) ولتاژ خازن اسنابر و جریان، شکل های ۱۰، شکل ۱۱، شکل ۱۲ به ترتیب شکل موجهای مربوط به دیودهای اسنابر  $D_{S1}$  تا  $D_{S3}$  را در توان نامی خروجی نشان می دهند. در شکل های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ شکل موج های مربوط به سلفها نشان داده شده است. برای بررسی عملکرد مبدل در بار سبک، در شکل (۱۶) ولتاژ سوئیچ و جریان مبدل برای توان ۲۰ وات نمایش داده شده است که بیانگر حفظ شرایط سویچینگ نرم در بار سبک است.

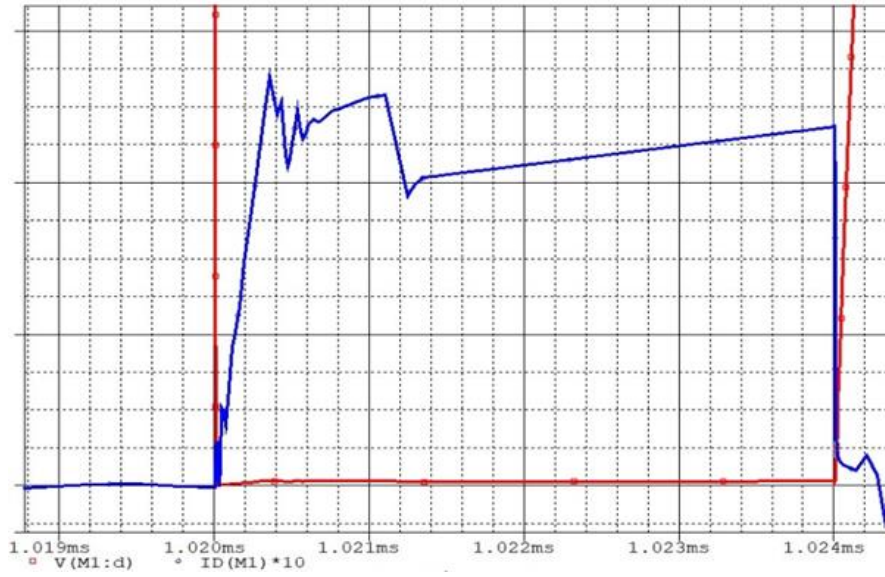


شکل (۶): شکل موج ولتاژ گیت-سورس

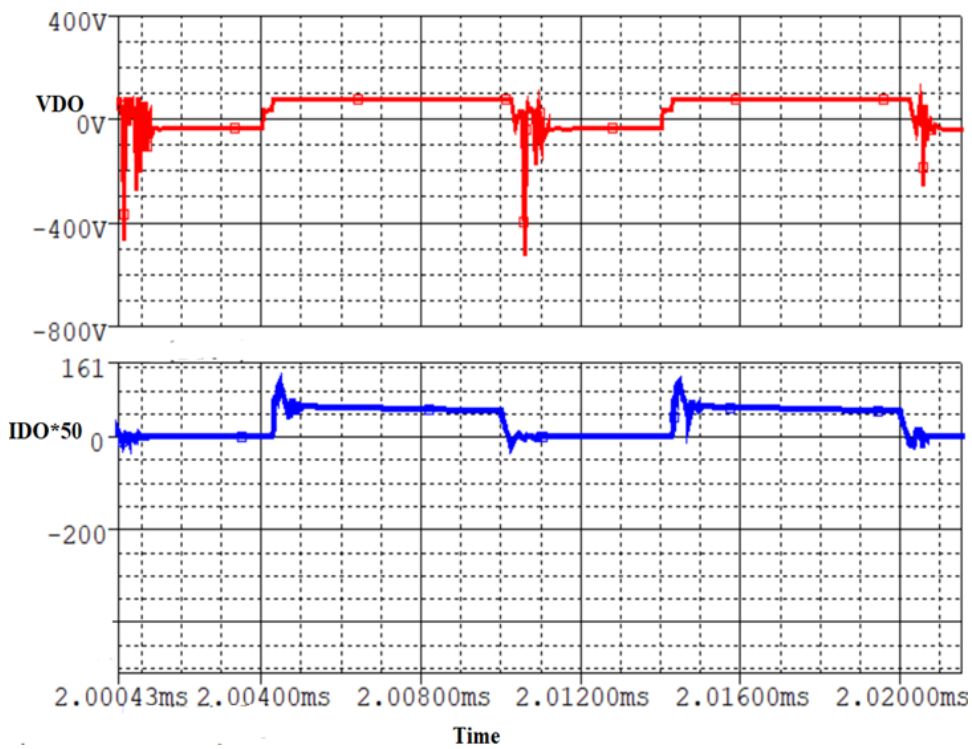


شکل (۷): الف. موج جریان و ولتاژ سوئیچ،  $V_s$ ,  $I_s$



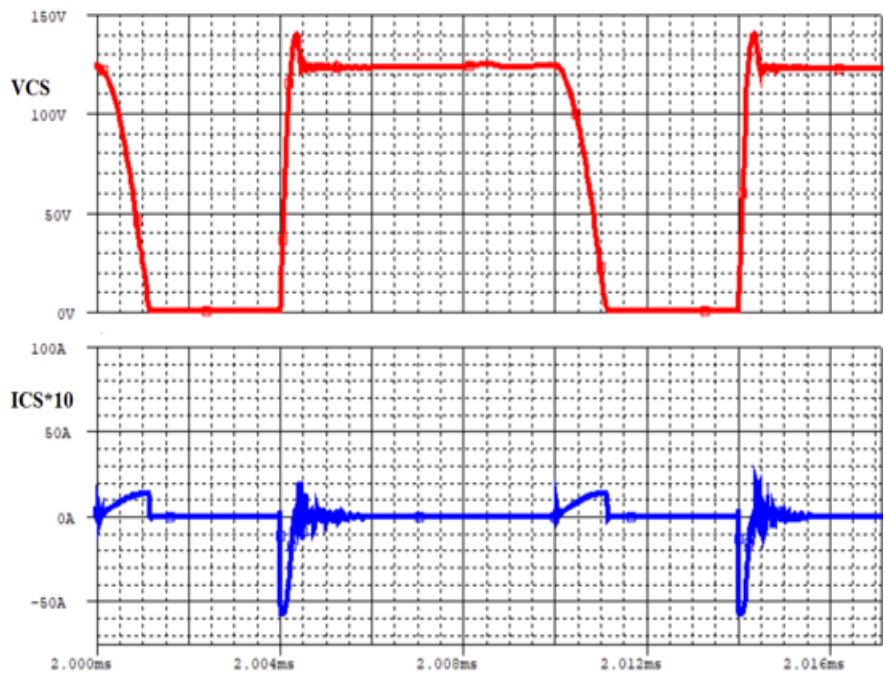


شکل (۷): ب. موج جریان و ولتاژ سوئیچ،  $V_s$ ،  $I_s$  با بزرگنمایی

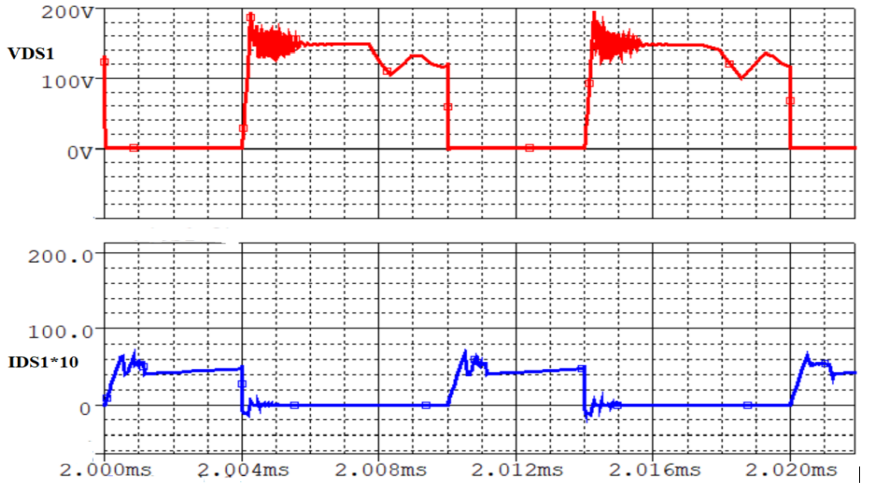


شکل (۸): موج جریان ولتاژ یکسو کننده،  $I_{D0}$ ،  $V_{D0}$

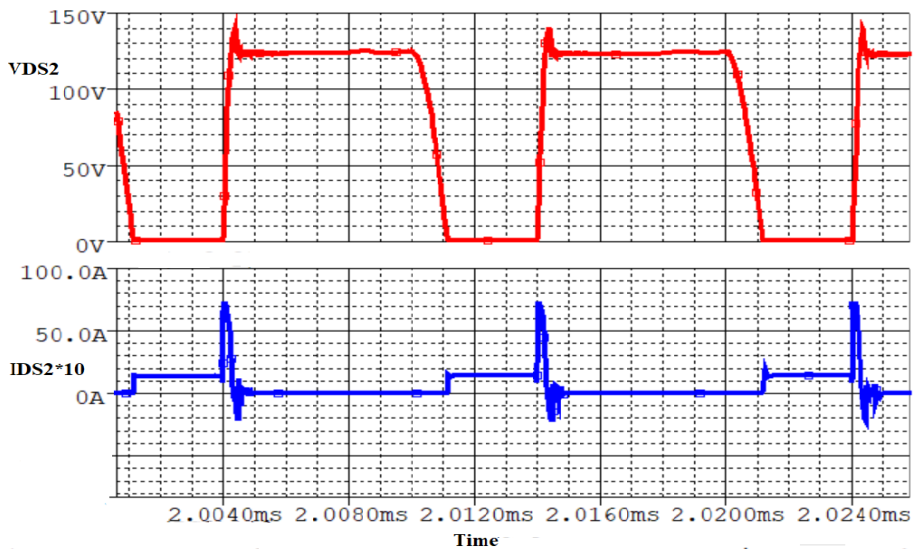




شکل (۹): موج جریان و ولتاژ  $V_{cs}$ ,  $I_{cs}$

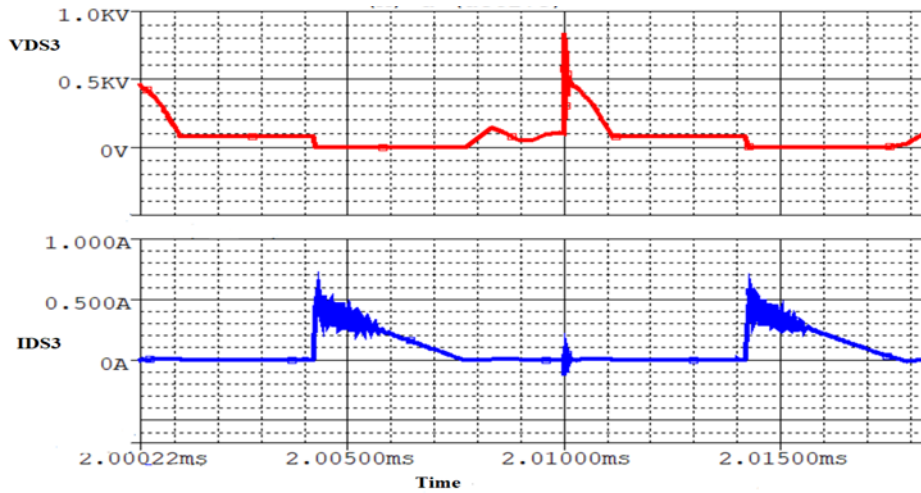


شکل (۱۰): موج ولتاژ و جریان  $V_{ds1}$ ,  $I_{ds1}$

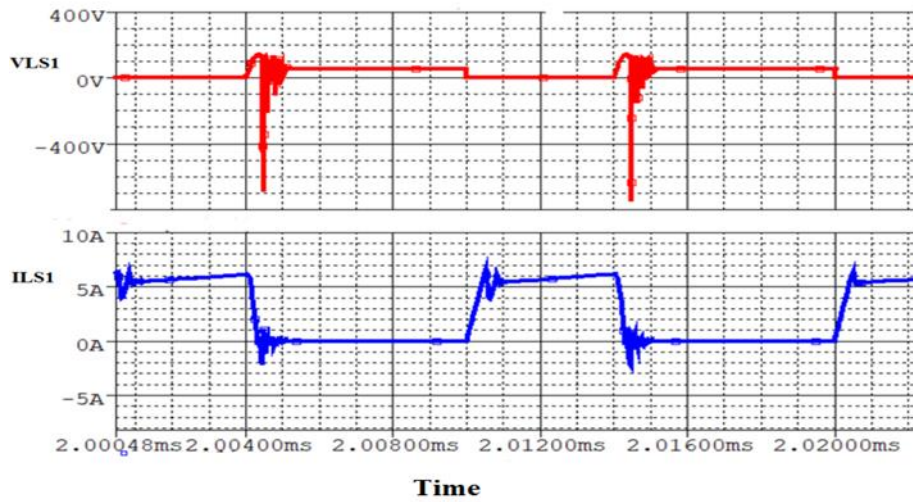


شکل (۱۱): موج ولتاژ و جریان  $V_{ds2}$ ,  $I_{ds2}$

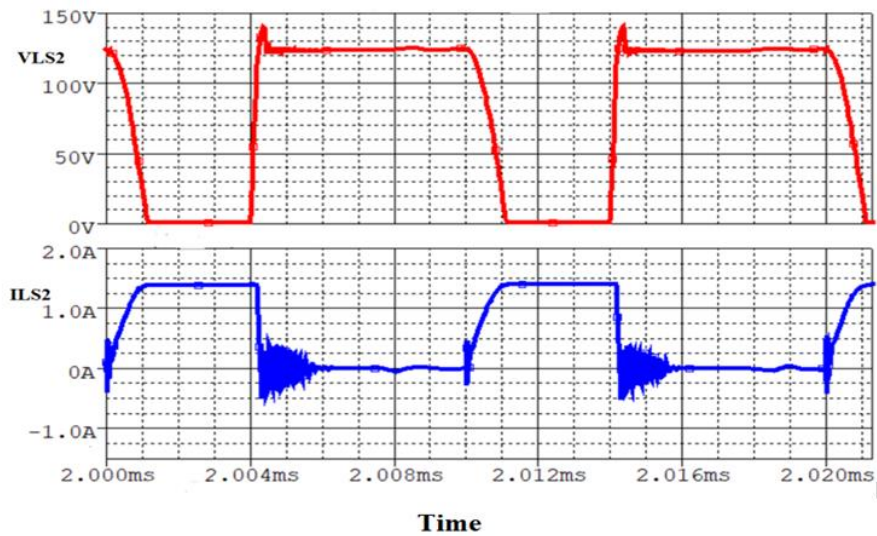




شکل (۱۲): موج ولتاژ و جریان  $V_{DS3}, I_{DS3}$

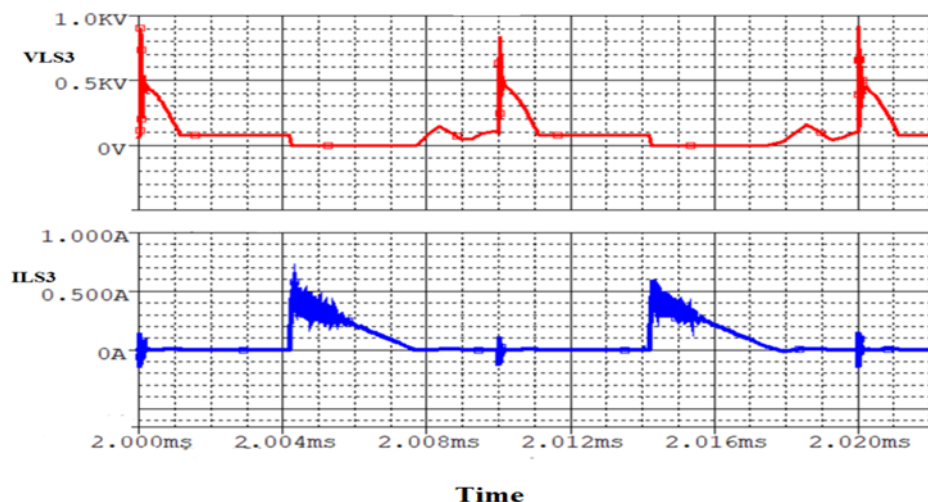


شکل (۱۳): موج ولتاژ و جریان  $V_{LS1}, I_{LS1}$

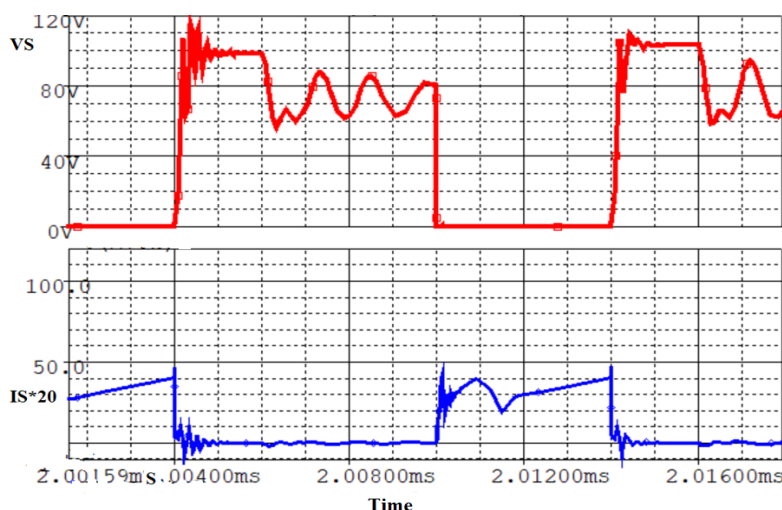


شکل (۱۴): موج ولتاژ و جریان  $V_{LS2}, I_{LS2}$





شکل (۱۵): موج ولتاژ و جریان،  $V_{LS3}, I_{LS3}$

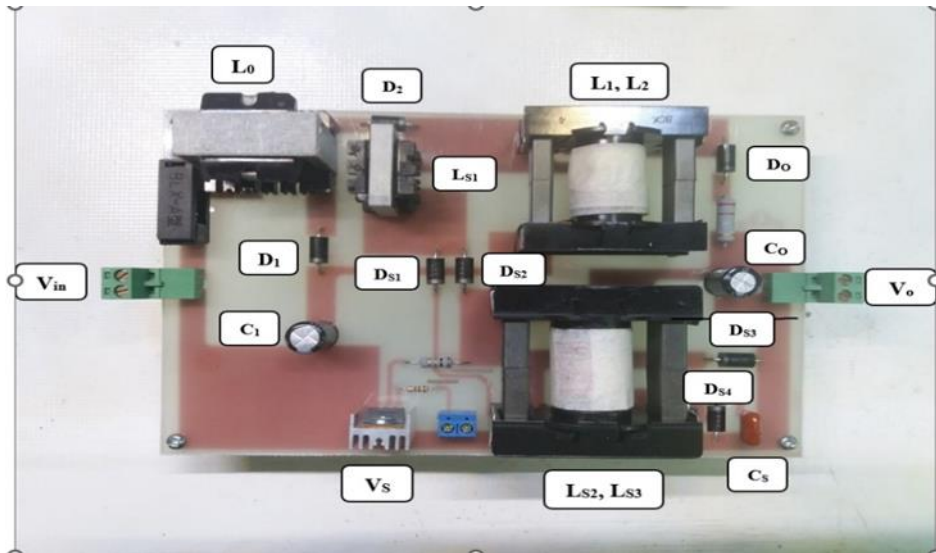


شکل (۱۶): موج جریان و ولتاژ سوئیچ،  $V_s, I_s$  در توان خروجی ۲۰ وات

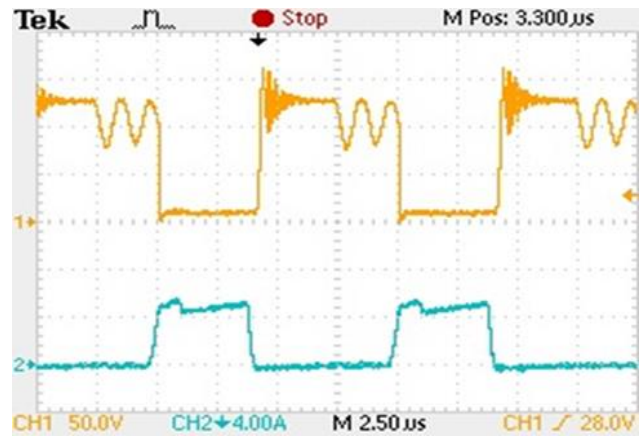
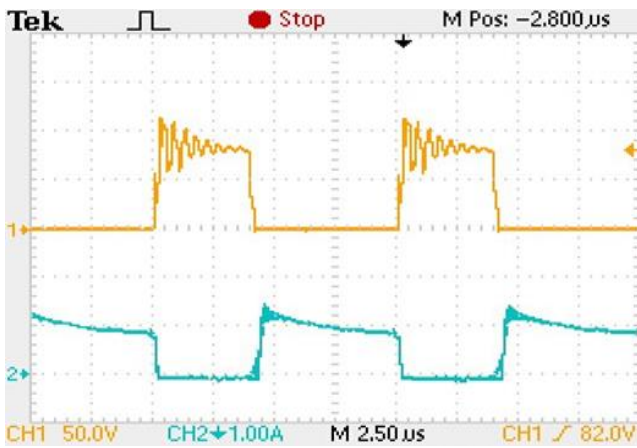
نوسانات دیده شده در شبیه سازی به دلیل عدم وجود لحاظ مقاومت‌های پارازیتی قطعات و مسیر بیشتر نمایان است. در عمل می توان برای کاهش نوسانات ولتاژ و افزایش جریان از سوئیچ با المانهای پارازیتی کمتر استفاده کرده و همچنین برای دیودها از دیودهای SiC استفاده کرد که البته می تواند هزینه مبدل پیشنهادی را افزایش دهد.

## ۵- نتایج اندازه گیری عملی

برای ارزیابی نتایج تئوری و شبیه سازی، نمونه مبدل بر اساس قطعات جدول (۱) ساخته شده است که در شکل (۱۷) تصویر آن دیده می شود. در شکل های ۱۸ تا ۱۹ شکل موج ولتاژها و جریان های سوئیچ و یکسوکنده و در شکل های ۲۰، ۲۱ و ۲۲ موجهای ولتاژ و جریان دیودها، نشان داده شده است که به دلیل وجود سلف ناشی دارای اختلاف اندکی با موجهای ایده آل است و همچنین مزایای مبدل در فراهم کردن شرایط سوئیچینگ نرم برای سوئیچ اصلی و دیودهای آن نیز مشهود است. وجود برخی نوسانات در شکل موج ولتاژ سوئیچ به دلیل تشدید بین خازن خروجی سوئیچ و سلفهای مبدل است. همچنین وجود برخی اسپایکها در شکل موجهای دیودها ناشی از عناصر پارازیتی و زمان بازیافت معکوس دیود است.



شکل (۱۷): تصویر نمونه مبدل پیشنهادی



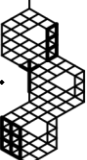
شکل (۱۹): موج ولتاژ و جریان یکسو کننده  $V_{D0}, I_{D0}$

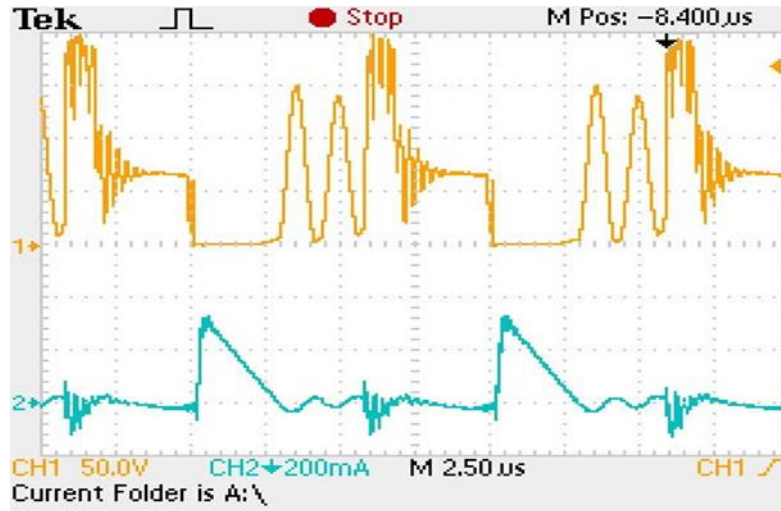
شکل (۱۸): موج جریان و ولتاژ سوئیچ  $V_s, I_s$



شکل (۲۱): موج ولتاژ و جریان  $V_{D_{S2}}, I_{D_{S2}}$

شکل (۲۰): موج ولتاژ و جریان  $V_{D_{S1}}, I_{D_{S1}}$





شکل (۲۲): موج جریان و ولتاژ  $V_{ds3}, I_{ds3}$

## ۶- نتیجه گیری

در این مقاله، مبدل بسیار افزایشده بر اساس مبدل بوست سری و تلفیق آن با ایده سلف تزویج برای بالا بردن بهره ولتاژ بالاتر معرفی شد. برای حل مشکل پرش ولتاژ سیویچ به دلیل سلف نشتی و کاهش تلفات سویچینگ از اسنابر پسیو بدون تلفات استفاده شد. در مبدل پیشنهادی، سوئیچینگ در جریان صفر و سوئیچ ولتاژ صفر در لحظه روشن و خاموش شدن فراهم شد و همچنین برای برخی دیودهای مبدل نیز از جمله دیود خروجی و دیود  $D_{s2}$  شرایط سویچینگ در جریان صفر برای خاموش شدن دیود فراهم شد. نتایج شبیه سازی و نیز اندازه گیری عملی، شرایط سویچینگ نرم مبدل و بهره بسیار افزایشده آن را تایید کرده است تا گزینه مناسبی برای سامانه های انرژی سبز نظیر سامانه های فتوولتائیک که در آن نیاز به بهره بسیار افزایشده است، باشد.

## مراجع

- [1] E. Figueres, G. Garcera, J. Sandia, F. Gonzalez-Espin, and J. C. Rubio, "Sensitivity study of the dynamics of three-phase photovoltaic inverters with an LCL grid filter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 706–717, Mar. 2009, DOI: 10.1109/TIE.2008.2010175.
- [2] O. Alonso, P. Sanchis, E. Gubia and L. Marroyo, "Cascaded H-bridge multilevel converter for grid-connected photovoltaic generators with independent maximum power point tracking of each solar array" in *Proc. IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, July 2003, DOI: 10.1109/PESC.2003.1218146.
- [3] B. Singh, N. Brij, A. Chandra, K. Al-Haddad, A. Pandey, D. P. Kothari, "A review of single-phase improved power quality AC-DC converters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 5, pp. 962-981, Oct. 2003, DOI: 10.1109/TIE.2003.817609.
- [4] Y.-W. Kim, J.-H. Kim, K.-Y. Choi, B.-S. Suh, and R.-Y. Kim, "A novel soft-switched auxiliary resonant circuit of a PFC ZVT-PWM boost converter for an integrated multichip power module fabrication", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 6, pp. 2802-2809, Nov.-Dec. 2013, DOI: 10.1109/IAS.2012.6374088.
- [5] M. R. Mohammadi and H. Farzanehfard, "New family of zero-voltage transition PWM bidirectional converters with coupled inductors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 2, pp. 912-919, Feb. 2012, DOI: 10.1109/TIE.2011.2148681.
- [6] S. Dusmez and A. Kaleigh, "A compact and integrated multifunctional power electronic interface for plug-in electric vehicles," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. 5690-5701, Dec. 2013, DOI: 10.1109/TPEL.2012.2233763.





- [7] H. F. Xiao, X. P. Liu, and K. Lan, "Zero-voltage-transition full-bridge topologies for transformerless photovoltaic grid-connected inverter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 10, pp. 5393–5401, Oct. 2014, DOI: 10.1109/TIE.2014.2300044.
- [8] N. Sukesh, M. Pahlevaninezhad, and P. K. Jain, "Analysis and implementation of a single-stage flyback PV micro inverter with soft switching," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 4, pp. 1819–1833, Apr. 2013, DOI: 10.1109/TIE.2013.2263778.
- [9] J.-S. Lai et al., "A hybrid-switch-based soft-switching inverter for ultrahigh-efficiency traction motor drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 3, pp. 1966–1973, May–June 2014, DOI: 10.1109/TIA.2013.2284296.
- [10] A. K. Rathore and P. U R, "Analysis, design, experimental results of novel snubber less bidirectional naturally clamped ZCS/ZVS current-fed half bridge dc/dc converter for fuel cell vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 10, pp. 4482–4491, Oct. 2013, DOI: 10.1109/TIE.2012.2213563.
- [11] P. Xuwei and A. K. Rathore, "Novel bidirectional snubber less naturally commutated soft-switching current-fed full-bridge isolated dc/dc converter for fuel cell vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 5, pp. 2307–2315, May 2014, DOI: 10.1109/TIE.2013.2271599.
- [12] M. Forouzes, Y. P. Siwakoti, S. A. Gorji, F. Blaabjerg, and B. Lehman, "A Comprehensive Review of Voltage-Boosting Techniques, Topologies, and Applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 12, pp. 9143–9178, Dec. 2017, DOI: 10.1109/TPEL.2017.2652318.
- [13] M. R. S. de Carvalho, E. A. O. Barbosa, F. Bradaschia, L. R. Limongi, and M. C. Cavalcanti, "Soft-Switching High Step-Up DC-DC Converter Based on Switched-Capacitor and Autotransformer Voltage Multiplier Cell for PV Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 12, pp. 12886–12897, Dec. 2022, DOI: 10.1109/TIE.2022.3142432.
- [14] M. Zhang, Z. Wei, M. Zhou, F. Wang, Y. Cao, and L. Quan, "A High Step-Up DC-DC Converter with Switched-Capacitor and Coupled-Inductor Techniques," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 3, no. 4, pp. 1067–1076, Oct. 2022, DOI: 10.1109/TIE.2011.2151828.
- [15] W. Li, X. Lv, Y. Deng, J. Liu, and X. He, "A Review of Non-Isolated High Step-Up DC/DC Converters in Renewable Energy Applications," in *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2009, pp. 364–369, DOI: 10.1109/APEC.2009.4802683.
- [16] T. H. Li River and H. S. Chung, "A Passive Lossless Snubber Cell with Minimum Stress and Wide Soft-Switching Range," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 7, pp. 1725–1738, Jul. 2010, DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316180.
- [17] E. Dzhunusbekov and S. Orazbayev, "A New Passive Lossless Snubber," *IEEE Transactions on Power Electronics* vol. 36, no. 8, pp. 9263–9272, Aug. 2021, DOI: 10.1109/TPEL.2021.3056189.
- [18] R. Faraji, H. Farzanehfard, M. Esteki, and S. A. Khajehoddin, "A Lossless Passive Snubber Circuit for Three-Port DC-DC Converter," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 2, pp. 1905–1914, April 2020, DOI: 10.1109/JESTPE.2020.3017619.
- [19] H.S. Kim, J.W. Beak, M.H. Ryu, J.H. Kim, and J.H. Jung, "Passive Lossless Snubbers Using the Coupled Inductor Method for the Soft Switching Capability of Boost PFC Rectifiers," *Journal of Power Electronics*, vol. 15, no. 2, pp.366–377, 2015, DOI: 10.6113/JPE.2015.15.2.366.
- [20] M. Mohammadi, E. Adib, and H. Farzanehfard, "Lossless passive snubber for double-ended flyback converter with passive clamp circuit," *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 2, pp. 245–250, Feb. 2014, DOI: 10.1049/iet-pel.2013.0862.
- [21] M. Mohammadi, E. Adib, and M. R. Yazdani, "Family of Soft-Switching Single-Switch PWM Converters with Lossless Passive Snubber," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 6, pp.3473–3481, June 2014, DOI: 10.1109/TIE.2014.2371436.
- [22] S. Lee and H. Do, "High Step-Up Coupled-Inductor cascaded boost dc–dc converter with lossless passive snubber," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 10, October 2018, DOI: 10.1109/TIE.2018.2803731
- [23] M. Brown, "3 - Pulsewidth Modulated Switching Power Supplies," in *Power Supply Cookbook (Second edition)*, M. Brown, Ed. Burlington: Newnes, 2001, pp. 21–133.



- <sup>1</sup> Photovoltaic
- <sup>2</sup> High Step-up
- <sup>3</sup> Electromagnetic Interference (EMI)
- <sup>4</sup> Passive Snubbers
- <sup>5</sup> Zero Voltage Switching
- <sup>6</sup> Zero Current Switching

