

## Research Article

# A Quadratic High Step-Up Converter with Zero-Current Switching

**Rasol Sareban<sup>1</sup>, PhD student, Mohammadreza Amini<sup>2\*</sup>, Assistant Professor, Majid Delshad<sup>3</sup>, Associate Professor, Mohammad Rouhollah Yazdani<sup>4</sup>, Associate Professor**

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Isfahan (Khrasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran, [rasol.sareban@iau.ir](mailto:rasol.sareban@iau.ir)

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Isfahan (Khrasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran, [mr.amini@khuif.ac.ir](mailto:mr.amini@khuif.ac.ir)

<sup>3</sup> Department of Electrical Engineering, Isfahan (Khrasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran, [delshad@khuif.ac.ir](mailto:delshad@khuif.ac.ir)

<sup>4</sup> Department of Electrical Engineering, Isfahan (Khrasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran, [m.yazdani@khuif.ac.ir](mailto:m.yazdani@khuif.ac.ir)

### Abstract:

In this study, a novel high step-up converter without utilizing a coupled inductor at the input is presented. The converter incorporates two coupled inductors: one to enhance the voltage gain and the other to facilitate zero-current switching (ZCS) and transfer snubber energy. A lossless snubber is employed to achieve soft-switching conditions. All diodes in the circuit operate under ZCS, effectively eliminating the issue of reverse recovery. The converter features a continuous input current and reduced conduction losses due to low voltage stress on the switches. The proposed converter has been comprehensively analyzed, and a 60 W prototype was simulated in PSPICE and subsequently implemented to validate the circuit analysis. The converter achieves an efficiency of 96% under full-load conditions, representing a 6% improvement compared to a hard-switching boost converter.

**Keywords:** High Step-Up Converter, Continuous Input Current, Coupled Inductor, Zero-Current Switching (ZCS)

**Received:** 26 July 2024

**Revised:** 15 Aug. 2024

**Accepted:** 1 Oct. 2024

**\* Corresponding Author:** Dr. Mohammad Reza Amini

**Citation:** R. Sareban, M. R. Amini, M. Delshad, M. R. Yazdani, "A Quadratic High Step-Up Converter with Zero-Current Switching", Journal of Novel Researches on Smart Power Systems, vol. 13, no. 3, pp. 1-13, December 2024 (in Persian).

مقاله پژوهشی

## مبدل بسیار افزاینده کوادراتیک با کلیدزنی در جریان صفر

رسول ساربان<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری، محمدرضا امینی<sup>۲\*</sup>، استادیار، مجید دلشاد<sup>۳</sup>، دانشیار، محمدروح اله یزدانی<sup>۴</sup>،  
دانشیار

- ۱- گروه مهندسی برق، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران، rasol.sareban@iau.ir
- ۲- گروه مهندسی برق، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران، mr.amini@khuif.ac.ir
- ۳- گروه مهندسی برق، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران، delshad@khuif.ac.ir
- ۴- گروه مهندسی برق، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران، m.yazdani@khuif.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک مبدل بسیار افزاینده جدید بدون استفاده از سلف تزویج شده در ورودی ارائه شده است. این مبدل دارای دو سلف کوپل شده است: یکی برای افزایش بهره ولتاژ و دیگری برای ایجاد شرایط کلیدزنی در جریان صفر و انتقال انرژی اسنابر. از اسنابر بدون تلفات برای ایجاد شرایط کلیدزنی نرم استفاده شده است. تمامی دیودهای مدار در جریان صفر کلیدزنی می‌شوند، بنابراین مشکل بازیابی معکوس در آنها وجود ندارد. جریان ورودی مبدل پیوسته است و به دلیل استرس ولتاژ پایین روی کلیدها، تلفات هدایتی در مبدل کاهش یافته است. این مبدل به‌طور کامل تحلیل شده و نمونه‌ای ۶۰ وات از آن در PSPICE شبیه‌سازی و سپس ساخته شده است تا تحلیل‌های مدار را تأیید کند. راندمان مبدل در بار کامل ۹۶٪ است و یک بهبود ۶ درصد را نسبت به مبدل افزاینده با کلیدزنی سخت نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** مبدل بسیار افزاینده، جریان ورودی پیوسته، سلف تزویج شده، کلیدزنی در جریان صفر

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۵/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۱۰

\* نام نویسنده مسئول: دکتر محمدرضا امینی

نشانی نویسنده مسئول: اصفهان، بلوار ارغوانیه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)، گروه مهندسی برق

## ۱- مقدمه

اخیراً، سیستم‌های میکروشبکه<sup>۱</sup> DC برای خودکفایی در مناطق کوچک به عنوان نسل بعدی سیستم‌های قدرت مورد توجه قرار گرفته‌اند. به‌ویژه، منابع تجدیدپذیری<sup>۲</sup> مانند فتوولتائیک<sup>۳</sup>، توربین بادی، امواج و منابع زمین‌گرمایی به‌عنوان مولدهای برق DC در یک سیستم میکروشبکه به کار گرفته شده‌اند. علاوه بر این، سلول‌های سوختی، باتری‌ها و ابرخازن‌ها نیز به‌عنوان منابع تغذیه پشتیبان برای منابع تجدیدپذیر استفاده می‌شوند. با این حال، این منابع برق ولتاژ بسیار پایینی تولید می‌کنند و برای بهره‌برداری از بارهایی که به ولتاژهای عملکردی بالا نیاز دارند، یک مبدل DC-DC با افزایش ولتاژ بالا ضروری است [۱]-[۴].

برای کاربردهای افزایش ولتاژ، معمولاً از یک مبدل DC-DC بوست معمولی<sup>۴</sup> استفاده می‌شود. این مبدل دارای ساختار ساده و هزینه کم است. با این حال، بهره ولتاژ آن برای کاربردهای با افزایش ولتاژ بالا کافی نیست. علاوه بر این، این مبدل برای کاربردهای توان بالا مناسب نیست، زیرا تنها دو عنصر توان برای پردازش توان بار استفاده می‌شوند و دارای تنش‌های ولتاژ و جریان بالا است [۵]-[۷]. ساده‌ترین روش برای دستیابی به بهره ولتاژ بالا، اتصال سری دو مبدل بوست است. این مبدل‌ها به عنوان مبدل‌های بوست آبشاری<sup>۵</sup> یا بوست درجه دوم شناخته می‌شوند. ساختار آبشاری نیاز به تعداد زیادی اجزا دارد که به تعداد مراحل بستگی دارد و این امر منجر به بازدهی پایین، مدار پیچیده و هزینه بالا می‌شود [۸]-[۹]. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، هدف اصلی این است که با استفاده از تعداد کمتری اجزا، بهره ولتاژ بالا و بازدهی زیاد حاصل شود. معمولاً مبدل بوست کوادراتیک<sup>۶</sup> به‌صورت یک مبدل تک‌سویچی یکپارچه می‌شود تا تعداد اجزا کاهش یابد. این نوع مبدل‌ها در منابع [۱۰] تا [۱۴] پیشنهاد شده‌اند. با این حال، تلفات هدایتی و تلفات کلیدزنی افزایش می‌یابد، زیرا جریان هر سلول بوست تنها از یک کلید مشترک عبور می‌کند. بنابراین، استفاده از فناوری کلیدزنی نرم و کاهش ولتاژ کلید برای بهبود بازده توان ضروری است. در منبع [۱۱]، عملیات کلیدزنی در ولتاژ صفر (ZVS) برای بهبود بازده توان پیاده‌سازی شد، اما نیاز به یک کلید اضافی وجود دارد و مدار کنترلی پیچیده است.

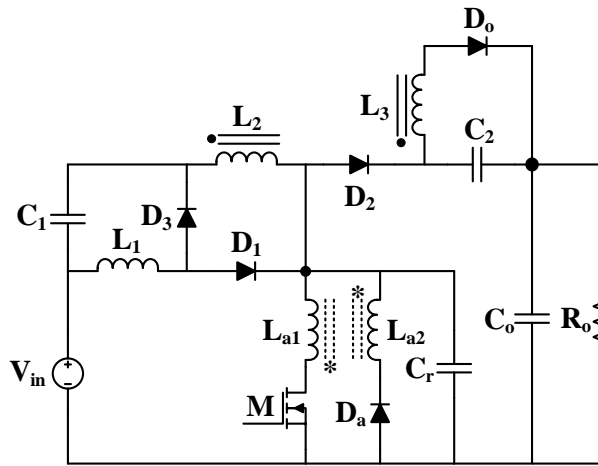
در روش دیگری برای دستیابی به بهره ولتاژ بالا، می‌توان از یک سلف کوپل شده<sup>۷</sup> به‌جای سلف اصلی استفاده کرد. مبدل‌های بوست با افزایش ولتاژ بالا که از سلف کوپله استفاده می‌کنند، در منابع [۱۵] تا [۱۹] پیشنهاد شده‌اند. نسبت دور سلف کوپل شده برای تنظیم بهره ولتاژ مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، به دلیل نیاز به نسبت دور بالا برای دستیابی به بهره ولتاژ زیاد، اندازه سلف کوپله و تلفات هدایتی سیم‌پیچ افزایش می‌یابد. علاوه بر این، به دلیل اندوکتانس ناشی<sup>۸</sup> سلف کوپل شده، به یک مدار اسنابر یا مدار کلمپ نیاز است [۱۵]-[۱۶]. برای غلبه بر این مشکل، یک مدار کلمپ فعال باک-بوست در منبع [۱۵] پیشنهاد شده است. این مدار کلمپ نه‌تنها تنش ولتاژ کلید را کاهش می‌دهد، بلکه عملیات کلیدزنی در ولتاژ صفر<sup>۹</sup> (ZVS) را نیز فراهم می‌کند. در منبع [۱۶]، اسنابرهای فعال/غیرفعال با استفاده از سلف‌ها، خازن‌ها و دیودهای اضافی به همراه کلید فعال پیشنهاد شده‌اند.

در این مقاله یک مبدل ابتکاری بسیار افزاینده از نوع کوادراتیک ارائه شده که دارای جریان ورودی پیوسته، استرس ولتاژ پایین روی سویچ، کلیدزنی نرم در المانها و جذب انرژی سلف ناشی در خازنهای افزاینده است. این ویژگیها باعث افزایش راندمان و چگالی توان گردیده و مبدل را برای کاربردهای انرژی سبز مناسب می‌سازد.

در این مقاله، در بخش دوم ابتدا مبدل پیشنهادی معرفی شده و عملکرد آن به طور مفصل توضیح داده شده است. در بخش سوم، تحلیل مبدل صورت گرفته و روش طراحی آن ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های عملی مبدل طراحی شده در بخش چهارم نمایش داده شده‌اند تا کارایی مبدل تأیید شود. راندمان مبدل پیشنهادی در بخش پنجم با مبدل بوست متداول مقایسه شده و در نهایت، در بخش ششم نتیجه‌گیری آورده شده است.

## ۲- مدل بسیار افزاینده پیشنهادی

مدل پیشنهادی در شکل (۱) آورده شده است. مدل پیشنهادی دارای یک سوئیچ  $M$ ، یک سلف کوپل شده  $L_2-L_3$ ، سلف ورودی  $L_1$ ، دیودهای  $D_1, D_2, D_3$  و  $D_0$  و خازنهای  $C_1$  و  $C_2$  و  $C_0$  می‌باشد. اسنابر مدل نیز دارای سلفهای کوپل شده  $L_{a1}-L_{a2}$ ، دیوید کمکی  $D_a$  و خازن  $C_r$  می‌باشد.



شکل (۱): نمای شماتیک مدل کوادراتیک پیشنهادی

Figure (1): Schematic representation of the proposed quadratic converter

## ۲-۱- عملکرد مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی دارای ۶ وضعیت عملکرد در یک سیکل کلیدزنی می‌باشد. برای سادگی تحلیل فرض می‌گردد که جریان ورودی ثابت است و ولتاژ خازنهای  $C_1$  و  $C_2$  و  $C_0$  نیز به علت بزرگ بودن آنها ثابت است. از طرفی از سلف نشتی سلفهای کوپل شده در مدار کمکی صرف نظر می‌گردد.

شکل موجهای کلیدی مدل در شکل (۲) آورده شده است و مدارهای معادل هر وضعیت در شکل (۳) نشان داده شده است. قبل از وضعیت اول سوئیچ  $M$  خاموش است و دیودهای  $D_2$  و  $D_0$  و  $D_3$  روشن هستند و انرژی  $L_m$  از طریق دیوید  $D_0$  به خروجی منتقل می‌شود.

### وضعیت اول:

این وضعیت با روشن شدن سوئیچ  $M$  آغاز می‌شود. به خاطر سلف سری  $L_{a1}$  جریان با شیب افزایش یافت و در نتیجه سوئیچ به صورت  $ZC$  روشن می‌شود. با رسیدن جریان سوئیچ به  $I_{Lm}$  دیوید خروجی خاموش و این وضعیت پایان می‌پذیرد.

### وضعیت دوم:

با خاموش شدن  $D_0$  جریان از  $D_3$  به دیوید  $D_1$  منتقل شده و دیوید  $D_3$  به صورت  $ZC$  خاموش می‌شود. از طرفی یک رزونانس بین  $C_r$  و  $L_{a1}$  آغاز می‌شود و خازن  $C_r$  به صورت رزونانسی دشارژ می‌شود تا به صورت کامل تخلیه شود.

### وضعیت سوم:

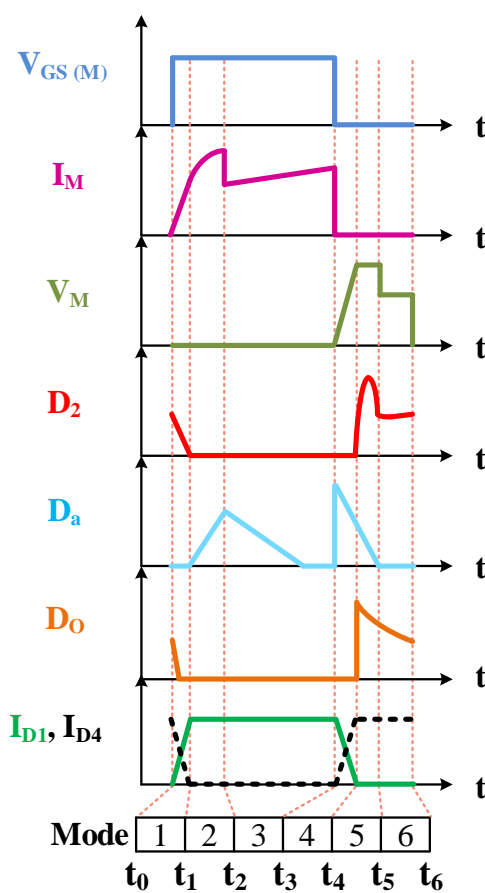
با دشارژ کامل  $C_r$  دیوید  $D_a$  روشن شده و سطح جریان سوئیچ  $M$  کاهش می‌یابد زیرا جریان بین دو سلف  $L_{a1}$  و  $L_{a2}$  تقسیم می‌شود. این وضعیت با خاموش شدن سوئیچ پایان می‌پذیرد.

### وضعیت چهارم:

با خاموش شدن سوئیچ  $M$  و خازن  $C_r$  خطی توسط سلف  $L_{a2}$  و  $L_m$  شارژ می‌شود. در این وضعیت دیودهای  $D_1$  و  $D_3$  وضعیتشان عوض می‌شود و جریان از  $D_1$  به  $D_4$  منتقل می‌گردد.

### وضعیت پنجم:

در این وضعیت دیودهای  $D_2$  و  $D_0$  روشن شده و جریان دیوید  $D_a$  کاهش می‌یابد تا به صفر رسیده و در پایان این وضعیت به صورت  $ZC$  خاموش شود.



شکل (۲): شکل موجهای کلیدی مبدل کوادراتیک پیشنهادی  
Figure (2): Key waveforms of the proposed quadratic converter

### وضعیت ششم:

در این وضعیت دیود  $D_a$  خاموش شده و ولتاژ دو سر سوئیچ به خاطر تخلیه کامل جریان  $I_{a1}$  کاهش می‌یابد. از طرفی انرژی سلف  $L_m$  از طریق  $D_o$  در خروجی تخلیه می‌شود. این وضعیت با روشن شدن دوباره سوئیچ به پایان می‌رسد.

### ۳- تحلیل مبدل پیشنهادی

در این قسمت طراحی المان‌های مبدل، بهره ولتاژ مبدل و استرس المان‌ها محاسبه و ارائه می‌شود.

#### ۳-۱- بهره ولتاژ

در ابتدا برای محاسبه بهره یک رابطه بالانس ولت ثانیه برای  $L_1$  نوشته می‌شود.

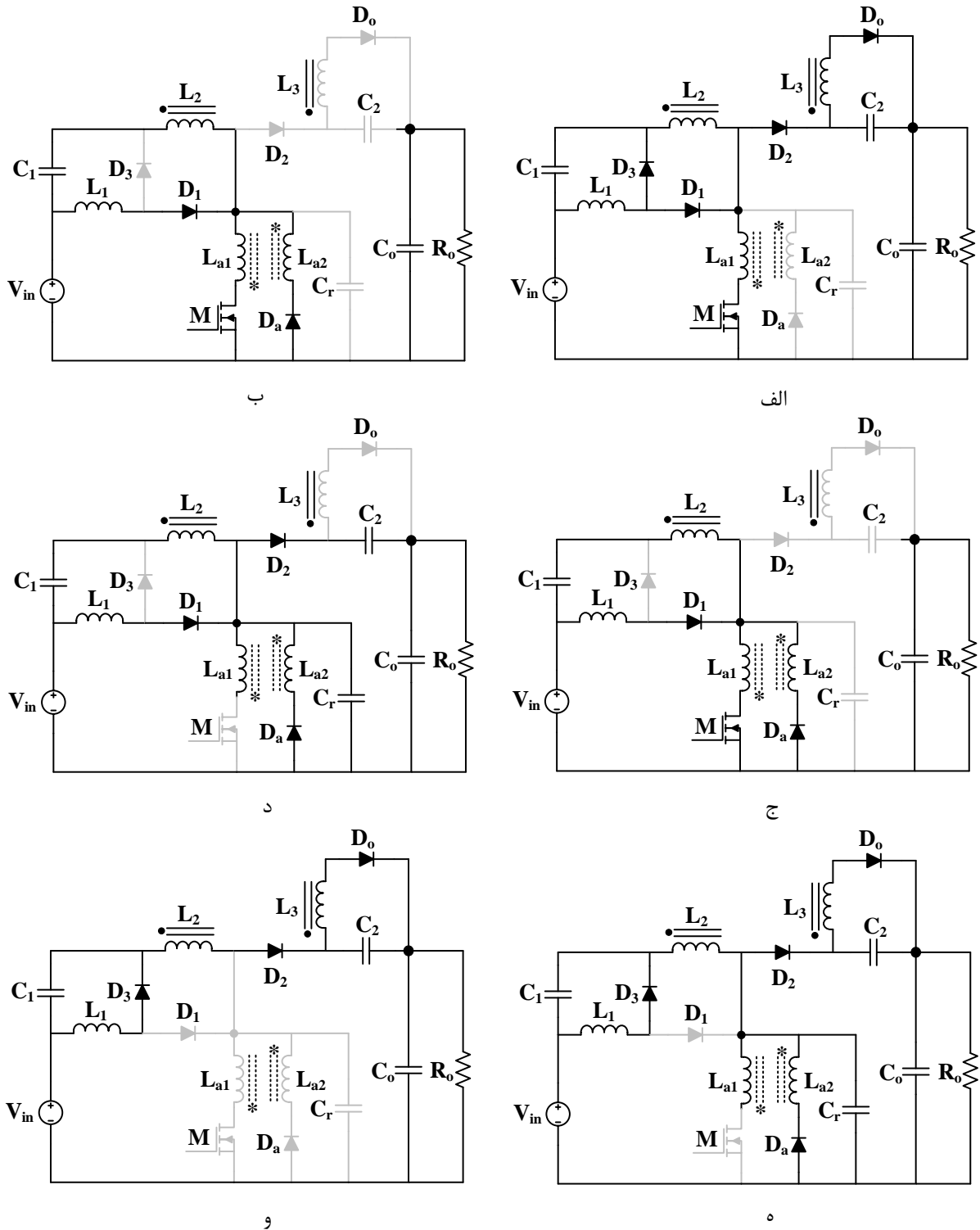
$$V_{in}DT - V_{C1}(1-D)T = 0 \quad (1)$$

$$V_{C1} = \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (2)$$

با نوشتن بالانس ولت ثانیه بر روی  $L_2$  داریم.

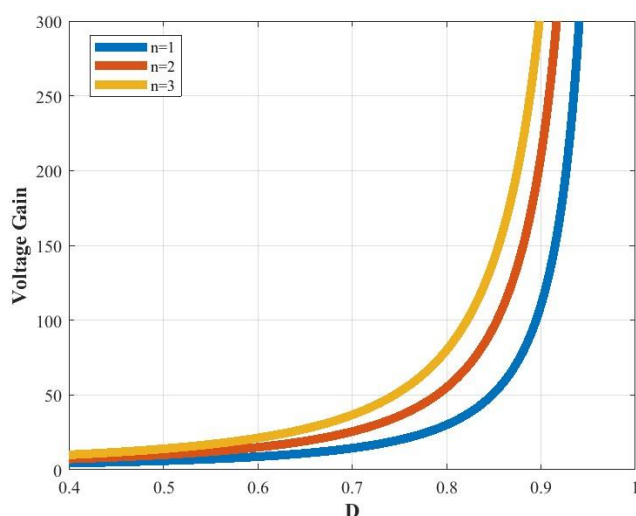
$$(V_{in} + V_{C1})D - \frac{V_{C2}}{n}(1-D)T = 0 \quad (3)$$

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



شکل (۳): مدارهای معادل مبدل پیشنهادی در (الف) وضعیت اول (ب) وضعیت دوم (ج) وضعیت سوم (د) وضعیت چهارم (ه) وضعیت پنجم (و) وضعیت ششم

Figure (3): Equivalent circuits of the proposed converter in (a) first state, (b) second state, (c) third state, (d) fourth state, (e) fifth state, and (f) sixth state.



شکل (۴): بهره مبدل پیشنهادی در برابر تغییرات ضریب وظیفه به ازای مقادیر مختلف نسبت دور

Figure (4): Voltage gain of the proposed converter versus duty cycle variations for different turns ratio values.

### ۳-۲ استرس ولتاژ المان‌ها

هنگامی که سوئیچ در وضعیت چهارم خاموش است ولتاژ دوسر آن برابر  $V_o - V_{C2}$  می‌باشد. بنابراین استرس ولتاژ از رابطه زیر به دست می‌آید. شکل ۵ نمودار استرس نرمالیزه شده المانهای نیمه هادی مبدل را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار با افزایش نسبت دور استرس کلیه المانها افزایش می‌یابد بنابراین انتخاب نسبت دورهای بالا در طراحی مبدل پیشنهادی مناسب نیست.

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

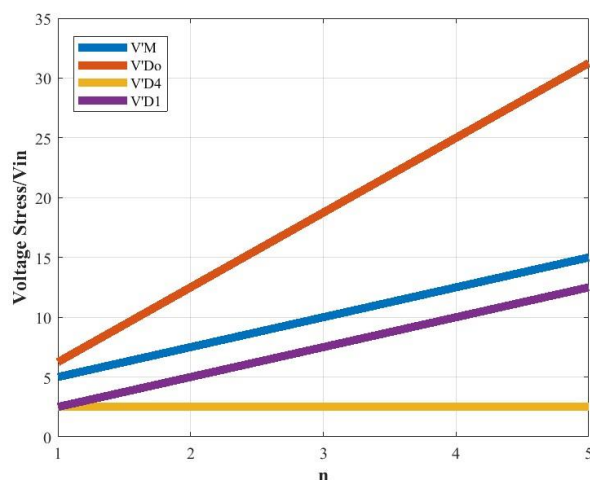
$$V_{D_o} = \frac{nV_{in}}{(1-D)^2} \quad (6)$$

$$V_{D1} = V_{in} + V_{C1} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (7)$$

$$V_{D2} = V_o - V_{in} - V_{C1} - V_{C2} = \frac{nV_{in}}{1-D} \quad (8)$$

$$(1+n)(V_{in} + V_{C1}) + V_{C2} - V_o = 0 \quad (9)$$

$$V_{C2} = V_o - \frac{(1+n)V_{in}}{1-D} \quad (10)$$



شکل (۵): نمودار استرس المانهای نیمه هادی مبدل بر حسب تغییرات نسبت دور

Figure (5): Stress diagram of the semiconductor components of the converter as a function of turns ratio variations

### ۳-۳ ماکزیمم جریان $L_1$ و $L_m$ :

میانگین جریان  $L_1$  برابر  $I_{in}$  می باشد بنابراین مینیمم و ماکزیمم جریان ورودی برابر است با:

$$I_{L1} \max = I_{in} + \frac{V_{in}}{2L_1} DT \quad (11)$$

$$I_{L1} \min = I_{in} - \frac{V_{in}}{2L_1} DT \quad (12)$$

همچنین میانگین جریان  $L_m$  برابر  $\frac{nI_o}{1-D}$  می باشد بنابراین ماکزیمم و مینیمم جریان بصورت زیر بدست می آید.

$$I_{Lm} (\max) = \frac{nI_o}{1-D} + \frac{V_{in} + VC_1}{2L_m} DT \quad (13)$$

همچنین در وضعیت یک با ثابت فرض کردن ولتاژ خازن های  $C_1$  و  $C_2$  داریم:

$$I_{Lm} \min = \frac{nI_o}{1-D} - \frac{V_{in} + VC_1}{2L_m} DT \quad (14)$$

### ۳-۴ طراحی سلف های $L_1$ و $L_m$ :

با داشتن ریپل جریان هر دو سلف به راحتی اندازه سلفها به دست می آید.

$$L_1 > \frac{V_{in} D}{\Delta I_{L1} f} \quad (15)$$

$$L_m > \frac{V_{in} D}{\Delta I_{Lm} (1-D) f} \quad (16)$$

### ۴- نتایج شبیه سازی و عملی مبدل بسیار افزاینده پیشنهادی

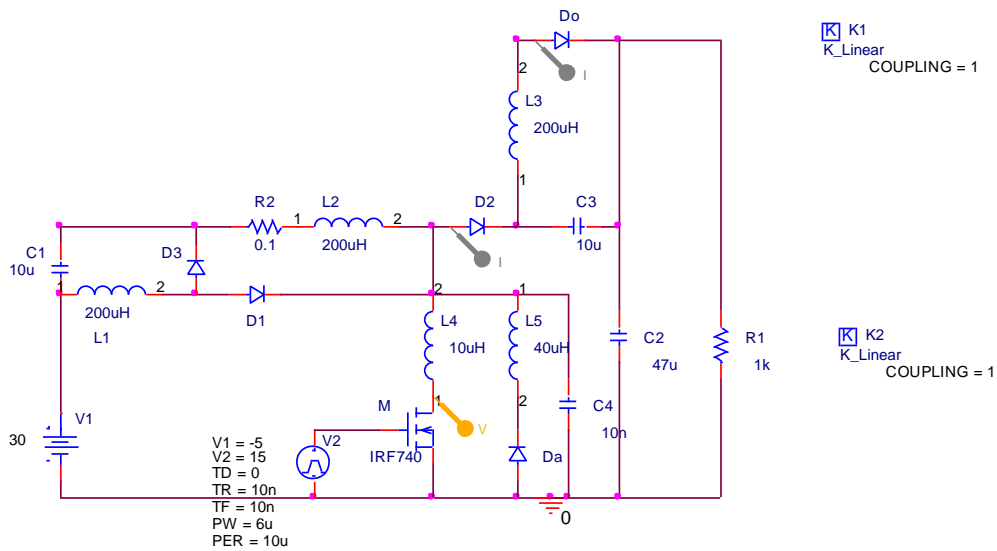
برای اثبات درستی تحلیل های مبدل پیشنهادی، مبدل پیشنهادی برای ولتاژ خروجی ۲۴۰ ولت، ولتاژ ورودی ۳۰ ولت و در توان ۶۰ وات در نرم افزار PSPICE شبیه سازی گردیده است. در جدول ۱ مشخصات المان های طراحی شده آورده شده است. همچنین شماتیک مبدل بسیار افزاینده پیشنهادی در نرم افزار PSPICE در شکل ۶ نشان داده شده است و نتایج شبیه سازی در شکل های ۷ تا ۱۰ نشان داده شده است. در شکل ۷ شکل موج جریان و ولتاژ شبیه سازی سوئیچ  $M$  نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است جریان سوئیچ در لحظه روشن شدن با شیب افزایش می یابد و شرایط کلیدزنی در ولتاژ جریان صفر برای سوئیچ برقرار است. از طرفی ولتاژ سوئیچ هم در هنگام خاموش شدن به علت وجود خازن اسنابر با شیب بالا رفته است که مبین خاموش شدن سوئیچ اصلی تحت شرایط ولتاژ صفر می باشد. در شکل ۸ شکل موج جریان دیودهای  $D_1$  و  $D_2$  آورده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می گردد جریان دیودها با شیب بالا رفته و با شیب کاهش می یابد، بنابراین شرایط  $ZC$  برای هر دو حالت روشن و خاموش شدن دیودها فراهم است. در شکل ۹ شکل موج جریان دیودهای  $D_3$  و  $D_0$  نشان داده شده است و شرایط  $ZC$  برای دیودها به خاطر شیب جریان در لحظات خاموش شدن اثبات می گردند. شکل موج جریان دیودهای  $D_a$  که در مدار اسنابر می باشد در شکل ۱۰ آورده شده است که نشان می دهد این دیود به خاطر وجود سلف سری، نیز بصورت  $ZC$  روشن و خاموش می شود و مشکل بازیابی معکوس ندارد. بنابراین دیودهای مبدل تلفات هدایتی محسوسی به آن تحمیل نمی کنند. تنها مشکل تلفات روشن شدن خازنی در سوئیچ است در نهایت در شکل ۱۱ تصویر مبدل پیاده سازی شده نشان داده شده است. این مبدل در توان ۶۰ وات برای اثبات نتایج تئوری مبدل ساخته شده است. شکل ۱۲ الف شکل موجهای ولتاژ و جریان سوئیچ مبدل و شکل ۱۲ ب جریان دیودهای ورودی  $D_1$  و  $D_2$  و شکل ۱۲ ج جریان دیودهای  $D_0$  و  $D_2$  شکل ۱۲ د جریان دیودهای  $D_3$  و  $D_a$  را نشان می دهد که نتایج شبیه سازی را تایید می کنند.



Table (1): Specifications of the proposed converter and the values of its components

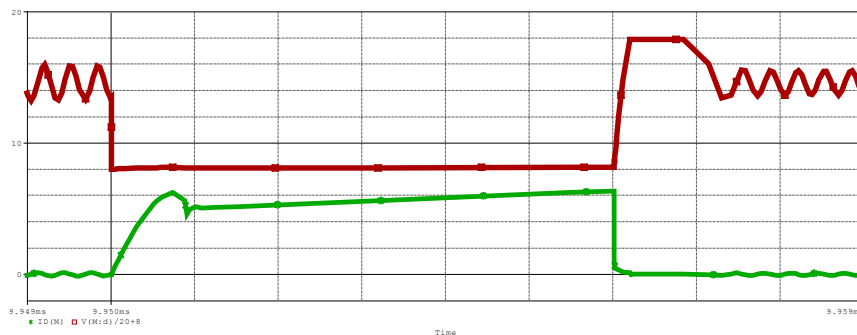
جدول (۱) مشخصات مبدل پیشنهادی و مقادیر المانهای آن

المان ها/ مشخصات	مقدار/نام قطعه
All switches	IRF740
All diodes	MUR860
$L_1, L_2$	200 $\mu$ H
Turns ratio= $N$	1
$L_a$	10 $\mu$ H
$C_1, C_2$	10 $\mu$ F
$P_o$	60W
$f_s$	100kHz
$C_r$	10nF
$C_o$	47 $\mu$ F



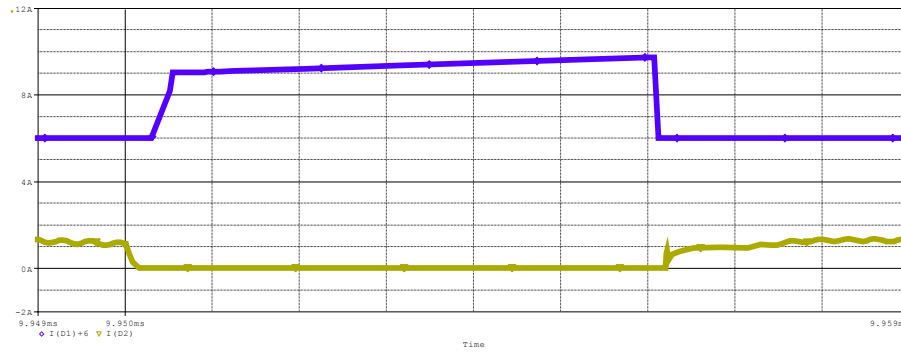
شکل (۶) شماتیک مبدل شبیه سازی شده مبدل بسیار افزاینده پیشنهادی در نرم افزار اورکد

Figure (6): Schematic of the simulated ultra-boost converter in the proposed design using OrCAD software.



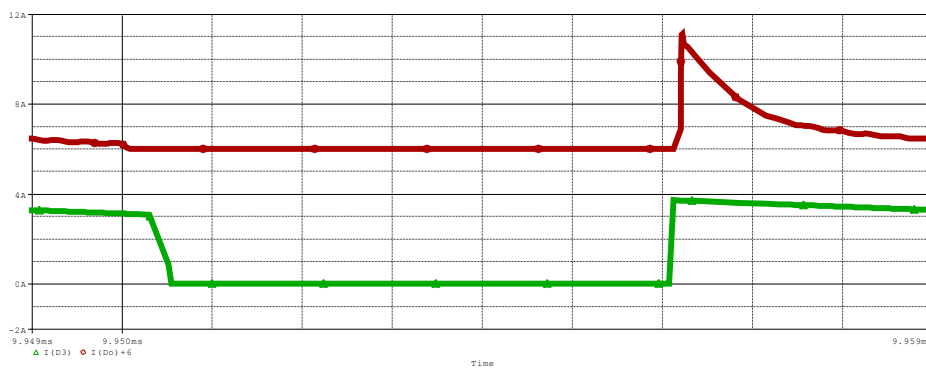
شکل (۷) شکل موج جریان (پایین) و ولتاژ (بالا) سوئیچ M مبدل شبیه سازی شده در مقیاس (1  $\mu$ s/div, 5A/div, 125V/div)

Figure (7): Current waveform (bottom) and voltage waveform (top) of the switch M in the simulated converter



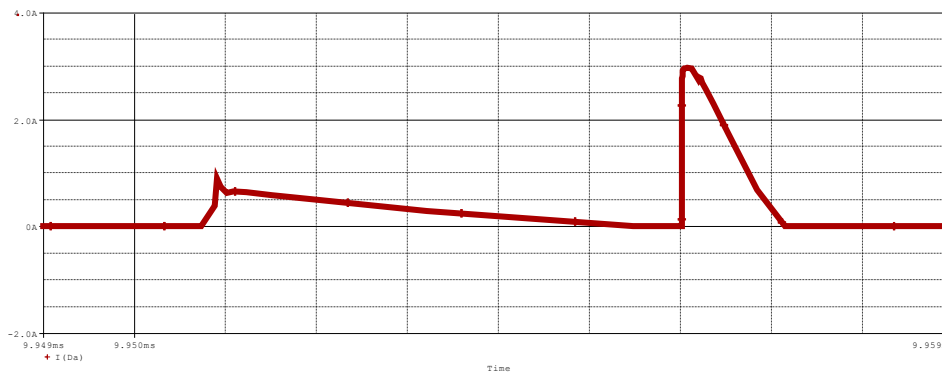
شکل (۸) شکل موج جریان دیودهای D1 و D2 مدل شبیه سازی شده در مقیاس (1  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 1A/div)

Figure (8): Current waveforms of diodes D1 and D2 in the simulated converter.



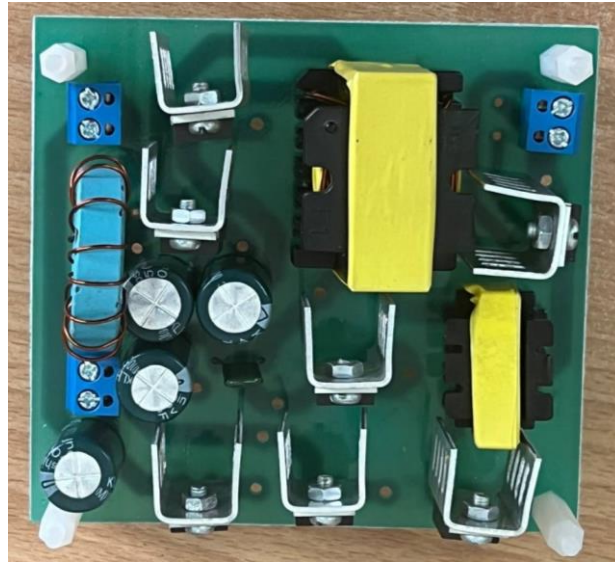
شکل (۹) شکل موج جریان دیودهای D3 و Do مدل شبیه سازی شده در مقیاس (1  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 1 A/div)

Figure (9): Current waveforms of diodes D3 and Do in the simulated converter.



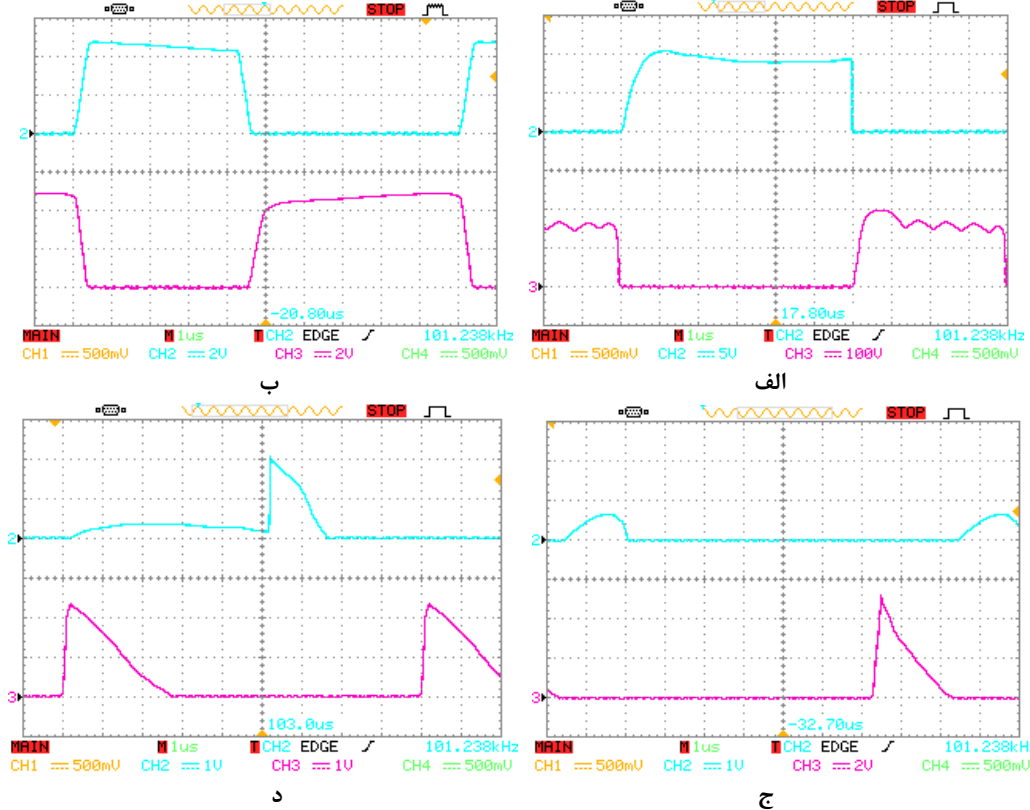
شکل (۱۰) شکل موج جریان دیود Da مدل شبیه سازی شده در مقیاس (1  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 0.5 A/div)

Figure (10): Current waveform of diode Da in the simulated converter.



شکل (۱۱): تصویر مبدل پیشنهادی ساخته شده

Figure (11): Image of the constructed proposed converter



شکل (۱۲) شکل موجهای عملی مدار الف- شکل موج جریان (پایین) و ولتاژ(بالا) سوئیچ M مبدل ساخته شده در مقیاس (1  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 5A/div, 125V/div) ب- شکل موج جریان دیودهای D1 و D2 ج- شکل موج جریان دیودهای D3 و D0 د- شکل موج جریان دیودهای Da و Do در مقیاس (1  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 1A/div)

Figure (12): Practical waveforms of the circuit

(a) Current waveform (bottom) and voltage waveform (top) of switch M in the constructed converter at scale (1  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 5A/div, 125V/div)

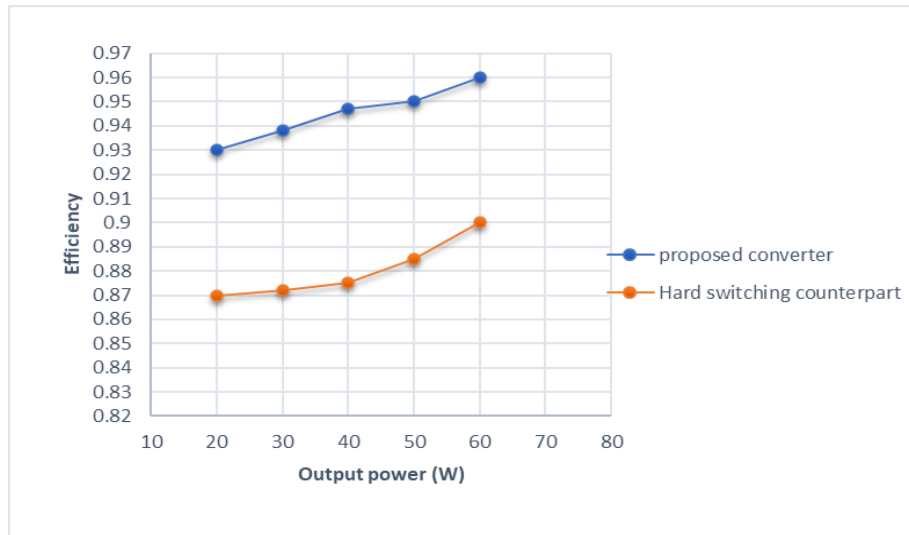
(b) Current waveform of diodes D1 and D2

(c) Current waveform of diodes D3 and D0

(d) Current waveform of diodes Da and Do at scale (1  $\mu\text{s}/\text{div}$ , 1A/div)

### ۵- مقایسه راندمان مبدل پیشنهادی با همتای سوئیچینگ سخت

در شکل ۱۳ راندمان مبدل پیشنهادی در مقایسه با نمونه سوئیچینگ سخت آن (بدون مدار کمکی) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد در بار کامل، مبدل پیشنهادی دارای ۵,۵ درصد بهبود راندمان می‌باشد. قابل ذکر است که در مبدل پیشنهادی با کاهش توان، راندمان کاهش محسوس نداشته ولی در مبدل سوئیچینگ سخت به خاطر وجود مدارکلمپ پسیو، راندمان افت بیشتری دارد.



شکل (۱۳): نمودار بازده مبدل بسیار افزاینده پیشنهادی نسبت به مبدل بسیار افزاینده سخت

Figure (13): Efficiency comparison of the proposed ultra-boost converter versus the hard-switched ultra-boost converter

### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مبدل بسیار افزاینده غیرایزوله با ساختاری ساده و با کلیدزنی در جریان صفر بدون سویچ اضافه ارائه شده است. استفاده از یک سلف کوچک در مدار اسنابر باعث کاهش نشتی و جلوگیری از افزایش حجم و وزن مدار شده است. مبدل پیشنهادی با ویژگی‌هایی نظیر کلیدزنی در جریان صفر هنگام روشن شدن و در ولتاژ صفر هنگام خاموش شدن، ریپل پایین جریان ورودی، عدم وجود مشکل بازبایی معکوس در دیودها، استرس ولتاژ پایین روی کلیدها، کنترل ساده به صورت PWM، حذف کلیدهای کمکی، و بهره ولتاژ بسیار بالا، گزینه‌ای کارآمد و عملی برای کاربردهایی مانند سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر است.

### References

#### مراجع

- [1] E. Salary and S. Sabzi, "Providing voltage boosting DC/DC converter with direct connection between source and load," *Journal of Novel Researches on Smart Power Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 57–70, 2023(in Persian)..
- [2] J. Jalili, S. M. M. Mirtalaei, M. R. Mohammadi, and B. Majidi, "The current-fed high step-up switching converter with low coupled-inductor RMS current," *Journal of Novel Researches on Smart Power Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 1–7, 2023(in Persian)..
- [3] F. Ghasemi, M. R. Yazdani, and M. Delshad, "Step-up three-output single-switch DC-DC converter for solar cell applications," *Journal of Novel Researches on Smart Power Systems*, vol. 11, no. 2, pp. 39–47, 2022(in Persian).
- [4] J. Qasim Fahad, M. Delshad, W. Riyadh Abdul-Adheem, B. Fani, and H. Saghafi, "A new interleaved high step-up converter with cancellation input current ripple and soft switching," *Journal of Novel Researches on Smart Power Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 33–43, 2024(in Persian).

- [5] J. Rosas-Caro, J. M. Ramirez, F. Z. Peng, and A. Valderrabano, "A transformer-less high-gain boost converter with input current ripple cancelation at a selectable duty cycle," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 10, pp. 4492–4499, Oct. 2013 (doi:10.1109/TIE.2013.2254095).
- [6] J. C. Rosas-Caro, J. M. Ramirez, F. Z. Peng, and A. Valderrabano, "A DC–DC multilevel boost converter," *IET Power Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 129–137, Jan. 2010 (doi:10.1049/iet-pel.2008.0083).
- [7] Z. Chen, W. Gao, J. Hu, and X. Ye, "Closed-loop analysis and cascade control of a nonminimum phase boost converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 4, pp. 1237–1252, Apr. 2011 (doi:10.1109/TPEL.2010.2082544).
- [8] F. L. Tofoli, D. C. Pereira, W. J. de Paula, and D. S. Oliveira Jr., "Survey on non-isolated high-voltage step-up DC–DC topologies based on the boost converter," *IET Power Electron.*, vol. 8, no. 10, pp. 2044–2057, Oct. 2015 (doi:10.1049/iet-pel.2014.0465).
- [9] L. Huber and M. M. Jovanovic, "A design approach for server power supplies for networking applications," in *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf. and Exposition*, 2000, pp. 1163–1169 (doi:10.1109/APEC.2000.826251).
- [10] F. L. Luo and H. Ye, "Positive output cascade boost converters," *Proc. Inst. Elect. Eng. (IEE) Electr. Power Appl.*, vol. 151, no. 5, pp. 590–606, Sep. 2004 (doi:10.1049/ip-epa:20040829).
- [11] B.-R. Lin and J.-J. Chen, "Analysis and implementation of a soft switching converter with high-voltage conversion ratio," *IET Power Electron.*, vol. 1, no. 3, pp. 386–394, Sep. 2008 (doi:10.1049/iet-pel:20070393).
- [12] S.-M. Chen, T.-J. Liang, L.-S. Yang, and J.-F. Chen, "A cascaded high step-up DC–DC converter with single switch for microsource applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 4, pp. 1146–1153, Apr. 2011 (doi:10.1109/TPEL.2010.2084090).
- [13] P. Saadat and K. Abbaszadeh, "A single-switch high step-up DC–DC converter based on quadratic boost," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 12, pp. 7733–7742, Dec. 2016 (doi:10.1109/TIE.2016.2581138).
- [14] J. Yang, D. Yu, H. Cheng, X. Zan, and H. Wen, "Dual-coupled inductors-based high step-up DC/DC converter without input electrolytic capacitor for PV application," *IET Power Electron.*, vol. 10, no. 6, pp. 646–656, May 2017 (doi:10.1049/iet-pel.2016.0709).
- [15] T.-F. Wu, Y.-S. Lai, J.-C. Hung, and Y.-M. Chen, "Boost converter with coupled inductors and buck–boost type of active clamp," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 1, pp. 154–162, Jan. 2008 (doi:10.1109/TIE.2007.906228).
- [16] T.-F. Wu, Y.-D. Chang, C.-H. Chang, H.-X. Lee, K.-Y. Lee, and J.-G. Yang, "A 5 kW Boost converter with various passive/active snubbers for reducing component stress and achieving high efficiency," in *Proc. Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, Nov. 2009, pp. 187–192 (doi:10.1109/PEDS.2009.5385934).
- [17] F. S. F. Silva, G. M. Soares, R. P. Torrico-Bascopé, and D. S. Oliveira Jr., "High gain DC-DC boost converter with a coupling inductor," in *Proc. Brazilian Power Electron. Conf.*, 2009, pp. 486–492 (doi:10.1109/COBEP.2009.5347583).
- [18] R.-J. Wai, C.-Y. Lin, R.-Y. Duan, and Y.-R. Chang, "High-efficiency DC-DC converter with high voltage gain and reduced switch stress," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp. 354–364, Feb. 2007 (doi:10.1109/TIE.2006.888774).
- [19] R.-J. Wai, L.-W. Liu, and R.-Y. Duan, "High-efficiency voltage-clamped DC–DC converter with reduced reverse-recovery current and switch-voltage stress," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp. 354–364, Feb. 2006 (doi:10.1109/TIE.2006.888772).

زیرنویس‌ها:

1. Microgrid
2. Renewable sources
3. Photovoltaic
4. Conventional boost converter
5. Cascade
6. Quadratic
7. Coupled-inductor
8. Leakage inductance
9. Zero Voltage Switching