مبدل کلیدزنی بهره ولتاژ بالای ورودی جریان با جریان موثر سلف تزویج کم

جلیل جلیلی[۱]، سید محمد مهدی میرطلائی*[۲]، محمدرضا محمدی[۳]، سید بهروز مجیدی[۴]

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، jaliljalili@sel.iauc.ac.ir
*۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، m.mirtalaei@pel.iaun.ac.ir
۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، mr.mohammadi87@yahoo.com
۴- استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، bmx@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۷/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰

چکیده: در این مقاله یک مبدل کلیدزنی افزاینده ولتاژ غیرایزوله با ورودی جریان ارائه شده است. در این مبدل برای تحقق افزایش بهره ولتاژ از سلف‌های کوپل شده و خازن بوت استرپ استفاده شده است. جریان ورودی این مبدل پیوسته و در مقایسه با مبدل‌های مشابه دارای ریپل جریان ورودی کمتری می‌باشد. در این مبدل با کاهش جریان موثر در سلف تزویج، از مس کمتر و هسته فریت کوچکتری برای سیم‌پیچ سلف تزویج استفاده می‌باشد. همچنین به دلیل اشتراک زمین بین ورودی و خروجی مبدل، جریان مد مشترک کاهش یافته است. در این مقاله عملکرد اولیه مبدل به طور کامل تشریح شده و به منظور تایید مبدل پیشنهادی نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار ارکد و یک نمونه آزمایشگاهی ساخته شده برای ولتاژ ورودی ۲۰ ولت و خروجی ۴۰۰ ولت در توان ۲۰۰ وات به طور کامل ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: بهره ولتاژ بالا، سلف تزویج، غیرایزوله، مبدل کلیدزنی.

۱- مقدمه

یکی از مهمترین انرژی‌های جایگزین سوخت‌های فوسیلی، انرژی خورشید است. زمانی که پنل‌های خورشیدی در معرض نور خورشید قرار می‌گیرند، ولتاژی در حدود ۴۵-۲۰ ولت را تولید می‌کند. برای تبدیل ولتاژ پایین پنل‌های خورشیدی به ۲۲۰ ولت متناوب نیاز به یک مبدل بهره ولتاژ بالا می‌باشد [۱]. از طرفی جریان‌کشی با ریپل[۱] بالا یا جریان-کشی گسسته باعث کاهش طول عمر پنل‌های خورشیدی می‌شود. همچنین برای حذف جریان مد مشترک نیاز است تا پنل سلول خورشیدی زمین مشترک با شبکه داشته باشد. بنابراین لازم است زمین ورودی و خروجی مبدل بهره ولتاژ بالا نیز یکسان باشد [۲].

به دلیل مشکلات متعدد مبدل بوست مرسوم از جمله: بهره ولتاژ پایین، استرس ولتاژ بالای کلید[۲] و راندمان پایین، برای تبدیل ولتاژ سلول خورشیدی به ۲۲۰ ولت متناوب مناسب نمی‌باشد [3]. به همین دلیل مبدل‌های بهره ولتاژ بالای متنوعی توسط محققان ارائه می‌شود.

مبدل بهره ولتاژ بالای [۴] از ترکیب یک مبدل بوست و یک مبدل SEPIC ایزوله تشکیل شده است. در این مبدل با توجه به شباهت ورودی هر دو مبدل، با ترکیب این دو مبدل از یک کلید و سلف ورودی مشترک استفاده شده است. ریپل جریان ورودی در این مبدل پایین است. اما مبدل به صورت کلیدزنی سخت می‌باشد.

مبدل [۵] یک مبل بهره ولتاژ بالا می‌باشد. در این مبدل با اضافه کردن یک مدار کلمپ-اکتیو، کلیدها در شرایط کلید زنی در ولتاژ صفر (ZVS)[۳] خاموش می‌شوند. ریپل جریان ورودی این مبدل بالا است، بنابراین برای سلول‌های خورشیدی مناسب نیست. برای کاربرد این مبدل در سلول خورشیدی باید از فیلتر LC در ورودی مبدل استفاده کرد تا با کاهش ریپل جریان ورودی مانع از کاهش طول عمر سلول

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.1.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

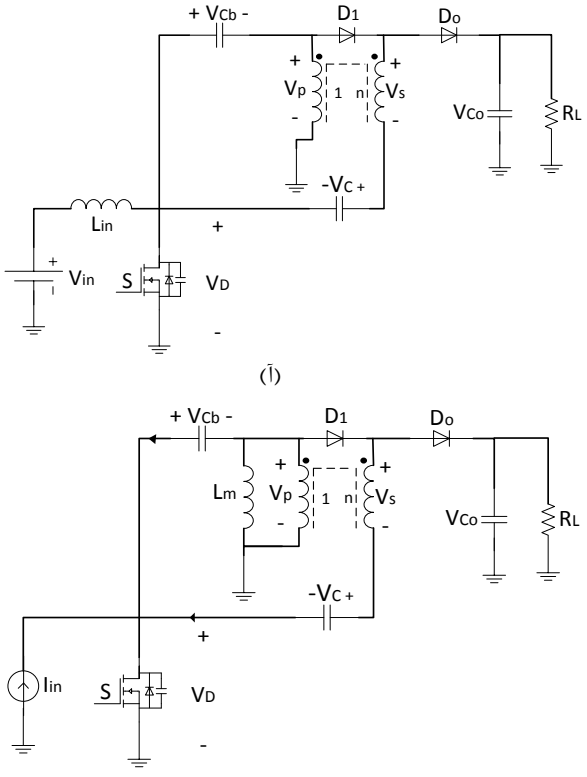
خورشیدی شود. جریان موثر (RMS)[۴]سیم‌پیچ اولیه در این مبدل بالا است. بنابراین نیازمند فریت بزرگتر و مصرف مس بیشتری می‌باشد [۶] و [۷].

در این مقاله، یک مبدل کلیدزنی بهره ولتاژ بالا ارائه شده است (شکل۱). در مبدل پیشنهادی، جریان ورودی مبدل به صورت پیوسته با ریپل پایین می‌باشد. زمین ورودی و خروجی مبدل مشترک می‌باشد. همچنین جریان RMS سلف تزویج اولیه نسبت به مبدل‌ها مشابه پایین-تر می‌باشد.

۲- توصیف و عملکرد مبدل

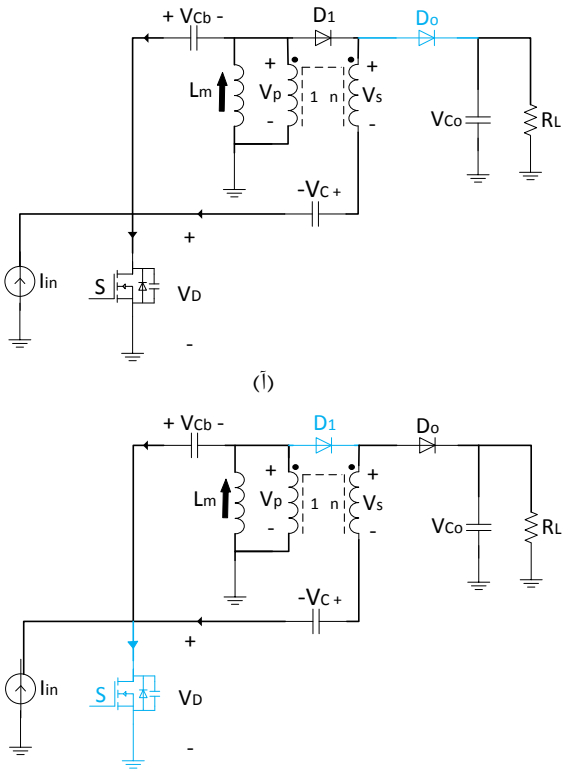
مبدل بهره ولتاژ بالای پیشنهادی در شکل (۱) نمایش داده شده است. این مبدل دارای کلید S ، ۳ خازن C_b ،C و C_o و سلف تزویج و ۲ دیودهای D_1 و D_o می‌باشد.

عملکرد مبدل پیشنهادی در ۲ مد (شکل (۲)) ارائه شده است و شکل موج‌های ولتاژ و جریان در شکل (۳) نمایش داده شده است. در تحلیل عملکرد مدارها، مبدل در وضعیت پایدار و المان‌ها به صورت ایده آل در نظر گرفته شده است. سلف نشتی در نظر گرفته نشده است.



شکل (۱): مبدل پیشنهادی و مدار معادل. آ) مبدل پیشنهادی. ب) مدار معادل

خازن‌ها به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده است به طوری که ولتاژ دو سر خازن‌ها ثابت باشد. همچنین عملکرد مبدل در حالت هدایت پیوسته (CCM)[۵] بررسی می‌شود.



شکل (۲): وضعیت‌ها مبدل پیشنهادی. آ) وضعیت ۱. ب) وضعیت ۲.

وضعیت ۱ $[t_0 - t_1]$ (شکل ۳-آ):

در این فا صله زمانی، کلید رو شن می با شد. در این و ضعیت دیود D_1 رو شن و دیود D_o خاموش می با شد. برای محا سبه ولتاژ خازن C داریم:

$$-V_p + V_s + V_C = 0 \quad (۱)$$

$$V_s = nV_p \quad (۲)$$

$$V_p = -V_{Cb} \quad (۳)$$

از روابط (۱) تا (۳) می شود نتیجه گرفت:

$$V_C = (n-1)V_{Cb} \quad (۴)$$

در این فاصله زمانی جریان سلف ورودی برابر است با:

$$\Delta I_{in} = \frac{DTV_{in}}{L_{in}} \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، D چرخه وظیفه[۶] می باشد.

وضعیت ۲ $[t_1 - t_2]$ (شکل ۳-ب):

در این فاصله زمانی، کلید خاموش می باشد. در این وضعیت دیود D_1 خاموش و دیود D_o روشن می باشد. ولتاژ خروجی مبدل برابر است با:

$$V_O = V_D + V_C + V_S \quad (۶)$$

$$V_p = V_D - V_{Cb} \quad (۷)$$

بنابراین ولتاژ خروجی برابر است با:

$$V_O = V_D + (n-1)V_{Cb} + n(V_D - V_{Cb}) \quad (۸)$$

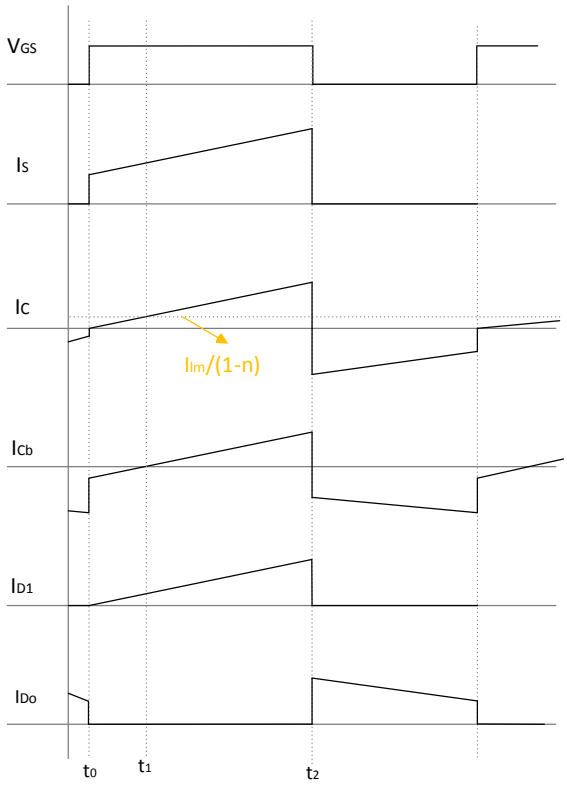
$$V_O = (n+1)V_D - V_{Cb} \quad (۹)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.1.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

در این فاصله زمانی جریان سلف ورودی برابر است با:

$$\Delta I_{\text{in}} = \frac{(1-D)T(V_{in}-V_D)}{L_{in}} \quad (۱۰)$$



شکل (۳): شکل موج‌های ولتاژ و جریان مبدل پیشنهادی

۳- ملاحظات طراحی

در این بخش بهره ولتاژ مبدل و تنش ولتاژ دیودها بررسی می‌شود.

۳-۱- بهره ولتاژ

با استفاده از بالانس ولت-ثانیه سلف ورودی L_{in} بر طبق روابط (۵) و (۱۰) ولتاژ کلید V_D در وضیت ۲ برابر است با:

$$V_{\text{D}} = \frac{1}{1-D}V_{in} \quad (۱۱)$$

بنابراین بهره ولتاژ مبدل طبق روابط ۶ و ۹ برابر است با:

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{n+D}{1-D} \quad (۱۲)$$

۳-۲- تنش‌ولتاژ دیودها

مطابق وضعیت ۱، استرس ولتاژ D_o برابر است با:

$$V_{D_o} = V_o - V_{in} \quad (۱۳)$$

همچنین مطابق وضعیت ۲، استرس ولتاژ D_1 برابر است با:

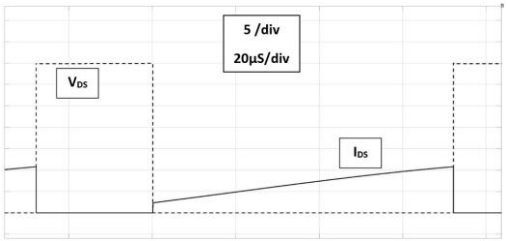
$$V_{D_1} = V_o - \frac{D}{1-D}V_{in} \quad (۱۴)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

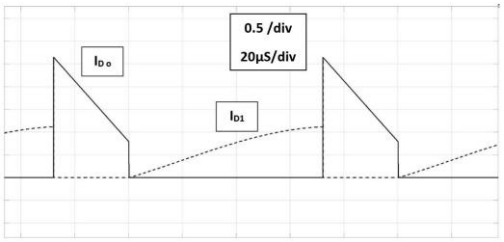
نتایج شبیه‌سازی برای مبدل پیشنهادی با ورودی ۲۰V و خروجی ۴۰۰ ولت در توان ۲۰۰ ولت مطابق جدول (۱) در نرم افزار ارکد انجام شده و در شکل (۴) ارائه شده است. در شکل (۴- آ)، شکل موج ولتاژ و جریان کلید نمایش داده شده‌است. همانگونه که مشاهده می‌شود استرس ولتاژ کلید حدودا ۷۰V می‌باشد. شکل (۴-ب)، شکل موج جریان دیود D_1جریان دیود D_o را نشان می‌دهد. شکل (۴-ج) جریان خازن C_b را نشان می‌دهد.

جدول (۱): مشخصات مبدل شبیه‌سازی شده

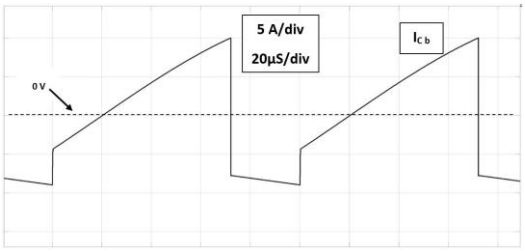
عناصر	نماد	مقادیر
توان	P_o	۱۰۰ W
ولتاژ ورودی	V_{in}	۲۰ V
ولتاژ خروجی	V_o	۴۰۰ V
فرکانس کلید	f_{sw}	۵۰ kHz
خازن	C, C_b	۴۷ µF
خازن	C_o	۱۰ µF
سلف ورودی	L_{in}	۱۰۰ µH
نسبت تبدیل ترانس	1/n	۵
دیود	D_1, D_2	MUR840
کلید	S	IRF540



(آ)



(ب)

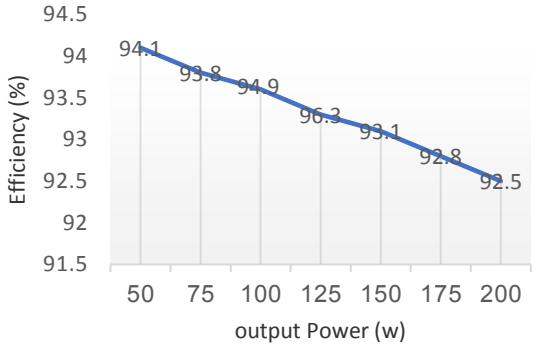


(ج)

شکل (۴): شکل موج‌های شبیه‌سازی شده با ارکد . آ) شکل موج ولتاژ و جریان کلید ۱. ب) شکل موج جریان دیودها. ج) شکل موج خازن C_b.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.1.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

بازده مبدل پیشنهادی در بارهای بین ۵۰-۲۰۰ وات شبیه‌سازی و در شکل (۵) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می شود بالاترین بازده در این مبدل حدود ٪۹۴/۱ می‌باشد. با توجه به شکل (۵) هر چه توان مبدل کاهش یابد بازدهی مبدل نیز کاهش می‌یابد. مبدل ساخته شده مشابه مبدل شبیه سازی شده و بر طبق جدول (۱) می‌باشد.



شکل (۵): بازده مبدل پیشنهادی در توان های مختلف

۵- نتایج آزمایشگاهی ساخته شده

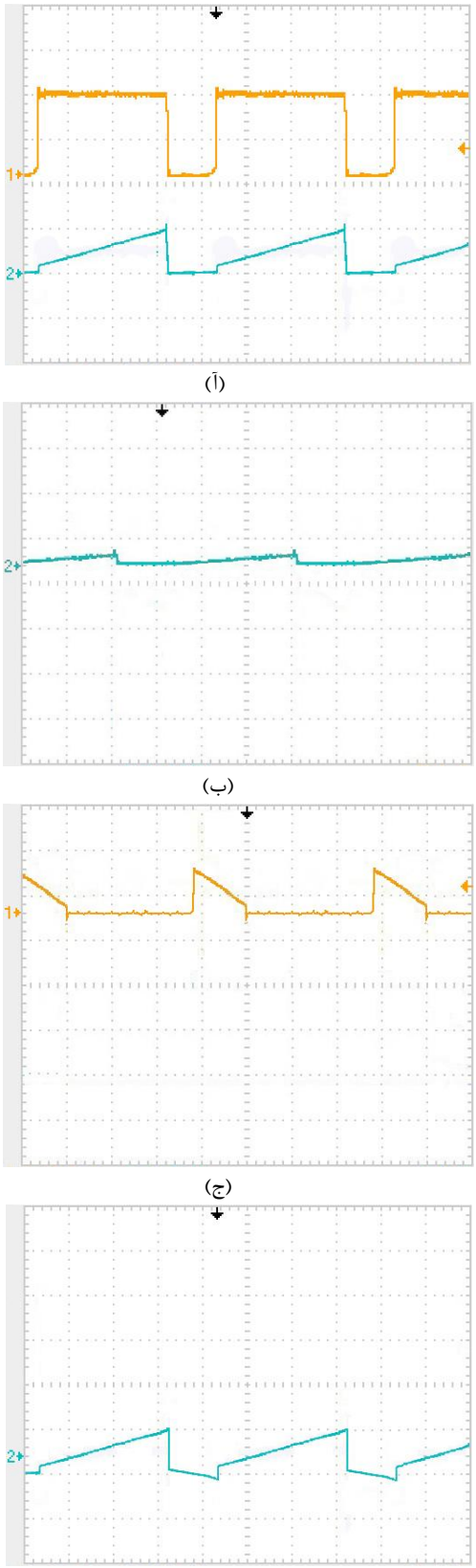
همان طور که مشاهده می‌شود شکل (۶- آ) شکل موج ولتاژ گیت-سورس و جریان کلید را نمایش می‌دهد. در این مبدل از کلید IRFP540 استفاده شده است که ولتاژ درین-سورس ۱۰۰ ولت را تحمل می کند همچنین مقاومت این کلید در زمان روشن شدن ۰/۰۷ اهم می‌باشد. شکل (۶- ب) شکل موج جریان‌های دیودها را نمایش می‌دهد. در این مبدل از دیود های MUR840 استفاده شده است که در جریان کشی کمتر از ۳ آمپر افت ولتاژ کمتر از ۱ ولت را دارد. شکل (۶-ج) شکل موج جریان خازن C_b را نمایش می‌دهد. این شکل موج می توان دریافت که با حذف جریان DC سیم‌پیچ اولیه سلف تزویج، جریان RMS سیم‌پیچ کاهش یافته است.

با کمی مقایسه می‌توان دریافت که بهره مبدل [۵]، از مبدل [۴] و مبدل پیشنهادی بیشتر است، اما ریپل جریان ورودی مبدل پیشنهادی و مبدل [۴] از مبدل [۵] کمتر است.

۶- تنوع مبدل پیشنهادی

مطابق شکل (۷-آ) با اضافه کردن یک مدار کلمپ-اکتیو می‌توان مبدل پیشنهادی را به یک مبدل کلیدزنی نرم بهره ولتاژ بالا تبدیل کرد. با استفاده از مدار کلمپ-اکتیو شرایط ZVS برای کلیدها فراهم می‌شود. ولتاژ گیت-سورس مبدل شکل (۷-آ) در شکل (۷-ب) نمایش داده شده است.

شکل (۸) مبدل کلیدزنی سخت بهره ولتاژ را نشان می‌دهد. این مبدل نسبت به مبدل شکل (۱) دارای بهره بالاتری می‌باشد اما از یک

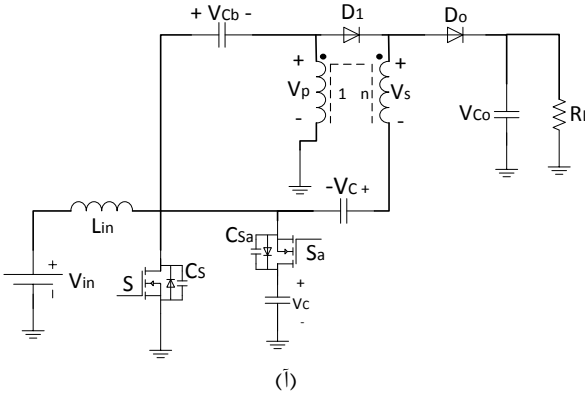


شکل ۶: شکل موج‌های مبدل پیشنهادی ساخته شده. محور زمان در کلیه شکل‌ها (2.5µS/div) می‌باشد. آ) شکل موج ولتاژ گیت-سورس(5V/div) و جریان درین سوئیچ (25A/div). ب) شکل موج جریان دیود D_1 (5A/div). ج) شکل موج جریان D_O (5A/div). د) شکل موج جریان خازن C_b(20A/div).

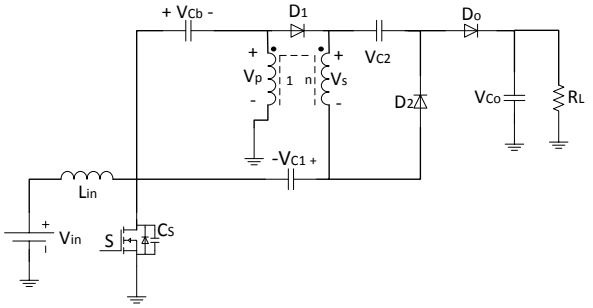
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.1.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

خازن و یک دیود اضافه‌تر استفاده کرده است. بهره ولتاژ در مبدل شکل (۹) برابر است با:

$$M = \frac{2-D}{1-D}(1+n) \qquad (۱۵)$$



شکل ۷: مبدل کلیدزنی نرم بهره ولتاژ بالای پیشنهادی. آ) مبدل کلیدزنی نرم. ب) شکل موج ولتاژ گیت-سورس کلیدها



۷- نتیجه

در این مقاله ابتدا مبدل‌های مورد استفاده در زمینه انرژی‌های خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است، سپس یک مبدل کلیدزنی بهره ولتاژ بالا غیرایزوله با کاربرد مشابه پیشنهاد شده است. برای بررسی و ارزیابی مبدل پیشنهادی نتایج شبیه‌سازی و عملی مبدل در قسمت ۴ و ۵ ارائه شده است. از آنجایی که جریان ورودی مبدل پیشنهادی به طور پیوسته است می‌تواند برای کاربردهای سلول خورشیدی مناسب باشد. همچنین به دلیل پایین بودن مقدار RMS جریان سلف تزویج اولیه از مس کمتر و هسته فریت کوچکتری استفاده شده است.

مراجع

[1] B. P. R. Baddipadiga, V. A. K. Prabhala, and M. Ferdowsi, "A family of high-voltage-gain dc–dc converters based on a generalized structure," *IEEE Trans. Power Electron., vol. 33, no. 10, pp. 8399–8411, 2017.* dio: 10.1109/TPEL.2017.2777451.

[2] M. Forouzesh, Y. Shen, K. Yari, Y. P. Siwakoti, and F. Blaabjerg, "High-Efficiency High Step-Up DC–DC Converter With Dual Coupled Inductors for Grid-Connected Photovoltaic Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 7, pp. 5967–5982, Jul. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2746750.

[3] J. Jalili, S. M. M. Mirtalaei, M. R. Mohammadi, and B. Majidi, "A ZVS high step-up converter based on an integrated boost-cuk topology," *Electr. Eng.*, pp. 1–10, 2021. dio: 10.1007/s00202-021-01340-3.

[4] K.-B. Park, G.-W. Moon, and M.-J. Youn, "Nonisolated high step-up boost converter integrated with sepic converter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 25, no. 9, pp. 2266–2275, 2010. dio: 10.1109/TPEL.2010.2046650.

[5] K. I. Hwu, Y. T. Yau, and J.-J. Shieh, "High step-up converter based on coupling inductor and bootstrap capacitors with active clamping," in *2012 IEEE Third International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*, 2012, pp. 364–368. dio: 10.1109/TPEL.2013.2289387.

[6] J. Guo *et al.*, "Design considerations for PPS controlled current-fed DAB converter to achieve full load range ZVS and low inductor current stress," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 57, no. 6, pp. 6261–6276, 2021. dio: 10.1109/TIA.2021.3116541.

[7] Z. Li, Y. Wang, L. Shi, J. Huang, and W. Lei, "Optimized modulation strategy for three-phase dual-active-bridge DC-DC converters to minimize RMS inductor current in the whole load range," in *2016 IEEE 8th international power electronics and motion control conference (IPEMC-ECCE Asia)*, 2016, pp. 2787–2791.dio: 10.1109/IPEMC.2016.7512739.

رزومه



جلیل جلیلی سیانی در نائین متولد شده است (۱۳۶۶). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک از دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (۱۳۸۹)، کارشناسی-ارشد مهندسی برق- الکترونیک از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد (۱۳۹۳) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه الکترونیک قدرت، مبدل‌های DC-DC بهره ولتاژ بالا است. و در حال حاضر دانشجوی دکترای گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد می‌باشد.



سید محمد مهدی میرطلائی مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه صنعتی اصفهان در سال ۱۳۸۴ و مدارک کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق خود را به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۹۱ از دانشگاه صنعتی امیرکبیر دریافت نمود. نامبرده از سال ۱۳۸۸ عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان الکترونیک قدرت، محرکه‌های الکتریکی و سازگاری الکترومغناطیسی می‌باشد.



محمدرضا محمدی مدرک کارشناسی خود در رشته مهندسی برق از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و مدرک کارشناسی ارشد و دکتری را از دانشگاه صنعتی اصفهان دریافت نموده است. او در حال حاضر استادیار

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.1.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد است زمینه های تحقیقاتی او شامل مبدل‌های الکترونیک قدرت می‌باشد.



بهروز مجیدی در اصفهان متولد شده است. او مدرک دکترای خود را در رشته مهندسی برق از دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران دریافت نموده است. او در حال حاضر استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد است. زمینه های تحقیقاتی او شامل ماشین های الکتریکی، الکترونیک قدرت و درایوهای سرعت متغیر می‌باشد.

زیرنویس‌ها

[1] Ripple
[2] Switch
3 Zero Voltage Switch
[4] Root Mean Square
[5] Continuous Conduction Mode
[6] Duty cycle

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.1.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023

The current-fed high step-up switching converter with low coupled-inductor RMS current

Jalil Jalili [1], Sayyed Mohammad Mehdi Mirtalaei [2], Mohammad Reza Mohammadi [3], Behrooz Majidi[4]

1- Ph.D. Student, Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, jaliljalili@sel.iauc.ac.ir
2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, m.mirtalaei@pel.iaun.ac.ir
3- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, mr.mohammadi87@yahoo.com
4- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, bmx@aut.ac.ir

Abstract: In this paper, a non-isolated current-fed high step-up switching converter, is presented. In proposed converter are used of coupled-inductor and bootstrap capacitor. Input current proposed converter is continuous and compared to its high step-up counterpart has less ripple input current. With low coupled-inductor RMS current in the proposed, used of copper losses and smaller ferrite core. Also, due to common ground, common mode current is decreased. In this paper, the operational principle and characteristics of proposed converter are presented, and in order to verify the proposed converter, a 20-400V, 200W prototype converter is implemented and experimental results are provided.

Keywords: high step-up, coupled-inductor, non-isolated, switching converter.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1401.11.4.1.9]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 11 -No. 4- Winter 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]