

طراحی مبدل افزایشدهنده با ساختار کلیدزنی-خازنی و سلفی با بهره ولتاژ بالا و تعداد المان کم

حامد هاتف^۱، ابراهیم سیفی نجمی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، موسسه غیرانتفاعی غیر دولتی رشدیه، تبریز، ایران hamedhatef76@gmail.com

^۲ استادیار گروه مهندسی برق، موسسه غیرانتفاعی غیر دولتی رشدیه، تبریز، ایران E.seifi@azaruniv.ac.ir

چکیده

در این تحقیق یک مبدل افزایشدهنده با ساختار کلیدزنی-خازنی و سلفی با بهره ولتاژ بالا پیشنهاد شده است. مبدل پیشنهادی جریان ورودی پیوسته دارد و ریپل جریان کمی دارد که بسیار مناسب برای انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. منابع انرژی‌های تجدیدپذیر دارای ولتاژ خروجی پایینی می‌باشند و استفاده از مبدل‌های با بهره ولتاژ بالا از جمله مبدل پیشنهادی باعث افزایش قابل توجه سطح ولتاژ منابع انرژی تجدیدپذیر می‌شود. مبدل پیشنهادی ترکیبی از ساختار کلیدزنی-خازنی و کلیدزنی سلفی می‌باشد که باعث افزایش بهره ولتاژ به طور قابل توجهی می‌شود. در ادامه، مبدل افزایشدهنده پیشنهادی در نرم افزار MATLAB شبیه‌سازی خواهد شد و عملکرد صحیح مبدل پیشنهادی توسط نرم افزار MATLAB اثبات خواهد شد.

واژه‌های کلیدی

ساختار کلیدزنی-خازنی و سلفی- مبدل افزایشدهنده DC-DC، جریان ورودی پیوسته، بهره ولتاژ بالا، ریپل کم جریان ورودی

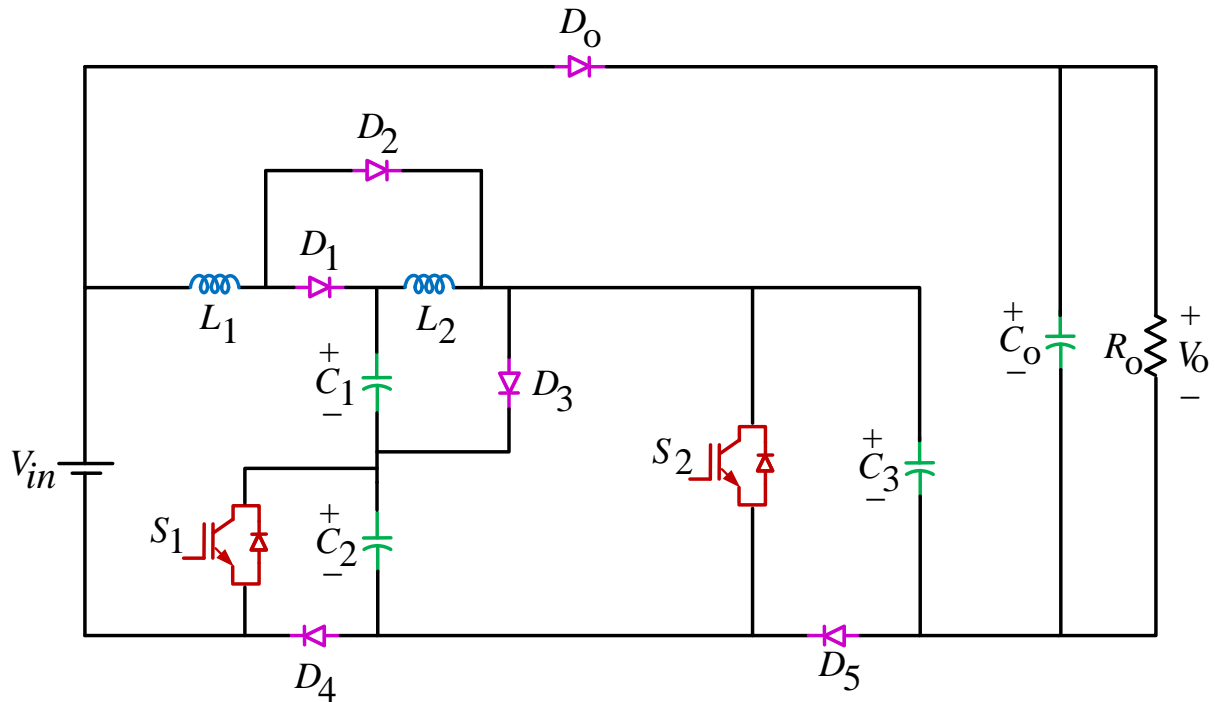
۱. مقدمه

امروزه استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار مهم و حیاتی می‌باشد چرا که سوخت‌زهای فسیلی رو به اتمام هستند و همچنین سوخت-های فسیلی باعث آلودگی محیط زیست می‌شوند [۱-۲]. انرژی‌های تجدیدپذیر به ویژه پانل‌های خورشیدی ولتاژ پایینی را در سمت خروجی تولید می‌کنند که برای افزایش ولتاژ باید از مبدل‌های DC-DC استفاده کرد. در دهه‌های گذشته محققان در تلاش بودند تا بهره ولتاژ مبدل‌های DC-DC را افزایش دهند. مبدل‌هایی که ساختارشان آبخاری است بهره ولتاژ بالایی دارند اما ساختار این مبدل‌ها پیچیده بوده و استرس ولتاژ بر روی المان‌ها بالا می‌باشد [۳]. در مرجع [۴] یک مبدل افزایشدهنده سه سطحی ارائه شده است که برای کاهش استرس ولتاژ المان‌ها مبدل بسیار مناسبی است اما بهره ولتاژ پایینی می‌باشد. در مرجع [۵] استرس ولتاژ بر روی المان‌های نیمه هادی کاهش یافته و بهره ولتاژ به صورت تئوری $1+D/1-D$ می‌باشد. ساختارهای Z-source برای بالا بردن بهره ولتاژ مبدل‌های DC-DC بکار می‌روند اما استرس ولتاژ المان‌ها در مبدل‌هایی که ساختار Z-source دارند بالا می‌باشد [۶-۷]. در مرجع [۸] یک مبدل افزایشدهنده با ساختار سری شد سه مبدل Z-source پیشنهاد شده که بهره ولتاژ بالا داشته و استرس ولتاژ بر روی المان‌ها کم می‌باشد. با این وجود، تعداد زیادی سلف و المان‌های نیمه هادی در این مبدل موجود می‌باشد که باعث افزایش هزینه و سایز مدار می‌شود. در مراجع [۹-۱۰] مبدل‌های چند سطحی ارائه شده‌اند که بهره ولتاژ بالایی دارند و همچنین استرس ولتاژ المان‌ها کم می‌باشد اما تعداد کلیدهای قدرت زیاد بوده و باعث افزایش سایز و هزینه ساخت مبدل می‌شود.

در این تحقیق یک مبدل افزایشدهنده با ساختار کلیدزنی-خازنی و سلفی ارائه شده که جریان ورودی مبدل پیوسته بوده و مناسب برای انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. مبدل پیشنهادی دارای تلفات هدایتی کم بوده و استرس ولتاژ المان‌ها نیز کم می‌باشد. حالات کاری مبدل پیشنهادی بررسی خواهد شد و نتایج شبیه سازی با استفاده نرم افزار MATLAB/Simulink انجام شده است.

۲. ساختار مبدل پیشنهادی

ساختار مبدل پیشنهادی در شکل ۱ به تصویر کشده شده است که ترکیبی از ساختار کلیدزنی-خازنی و کلیدزنی-سلفی می‌باشد. مبدل پیشنهادی دارای ۶ دیود ($D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6$)، چهار خازن (C_1, C_2, C_3, C_0)، دو کلید قدرت (S_1, S_2) و دو سلف (L_1, L_2) است.



شکل ۱. ساختار مبدل پیشنهادی

۱.۲. بررسی عملکرد مبدل پیشنهادی در حالت پیوسته کاری CCM

در این تحقیق، مبدل پیشنهادی در حالت پیوسته کاری (CCM) بررسی می‌شود و مدار معادل مبدل پیشنهادی در ۲ مدار کاری حالت شارژ و حالت دشارژ در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد. همچنین شکل موج‌های ولتاژ و جریان المان‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. مدار کاری اول (حالت شارژ): در این مدار کاری هر دو کلید قدرت روشن بوده و در این بازی زمانی دو دیود D_0 و D_2 بایاس مستقیم هستند. دیودهای D_1, D_3, D_4 و D_5 به دلیل پلاریته سلف‌ها و خازن‌ها بایاس معکوس هستند. سلف L_1 به وسیله خازن C_2 و ولتاژ ورودی از طریق مسیر دیود D_2 و کلیدهای قدرت S_1 و S_2 شارژ می‌شود. سلف L_2 از مجموع ولتاژ خازن‌های C_1 و C_2 از طریق کلید قدرت S_2 شارژ می‌شود. با استفاده از قانون ولتاژ کیرشهف (KVL) روابط زیر حاصل می‌شوند:

$$V_{in} - V_o + V_{C3} + V_{C2} = 0 \quad (1)$$

$$V_{C1} + V_{L2} - V_{C2} = 0 \quad (2)$$

$$V_{in} - V_{L1} + V_{C2} = 0 \quad (3)$$

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir

مد کاری دوم (حالت دشارژ): در این مد کاری کلیدهای قدرت خاموش بوده و دیودهای D_3 ، D_4 و D_5 بایاس مستقیم هستند. به دلیل پلاریته سلف L_1 دیودهای D_2 و D_0 بایاس معکوس و دیود D_1 بایاس مستقیم می باشد. سلفهای L_1 و L_2 انرژی خود را به خازن ها انتقال می دهند. خازن های C_2 و C_3 به وسیله منبع ورودی و سلف L_1 از طریق دیودهای D_3 ، D_4 و D_5 شارژ می شوند. بنابراین، خازن C_1 به وسیله سلف L_2 از طریق دیود D_3 شارژ می شود. روابط زیر از مدکاری دوم بدست می آیند:

$$V_{in} - V_{L1} + V_{C1} - V_{C2} = 0 \quad (4)$$

$$V_{L2} = -V_{C1} \quad (5)$$

$$V_{C2} = V_{C3} \quad (6)$$

$$\int_0^{DT_s} V_{L2} dt + \int_{DT_s}^{T_s} V_{L2} dt = 0 \quad (7)$$

$$D(-V_{C1} + V_{C2}) + (1-D)(-V_{C1}) = 0 \quad (8)$$

با استفاده از روابط (۲)، (۵) و (۸) ولتاژ خازن C_1 به صورت زیر خواهد بود:

$$V_{C1} = DV_{C2} \quad (9)$$

$$\int_0^{DT_s} V_{L1} dt + \int_{DT_s}^{T_s} V_{L1} dt = 0 \quad (10)$$

$$D(V_{in} + V_{C2}) + (1-D)(V_{in} + V_{C1} - V_{C2}) = 0 \quad (11)$$

ولتاژ خازن C_2 به صورت زیر است:

$$V_{C2} = \frac{1}{1-3D+D^2} V_{in} \quad (12)$$

با جاگذاری کردن ولتاژ خازن های C_1 و C_2 در رابطه (۱)، ولتاژ خروجی به صورت زیر خواهد بود:

$$V_o = \frac{3-3D+D^2}{1-3D+D^2} V_{in} \quad (13)$$

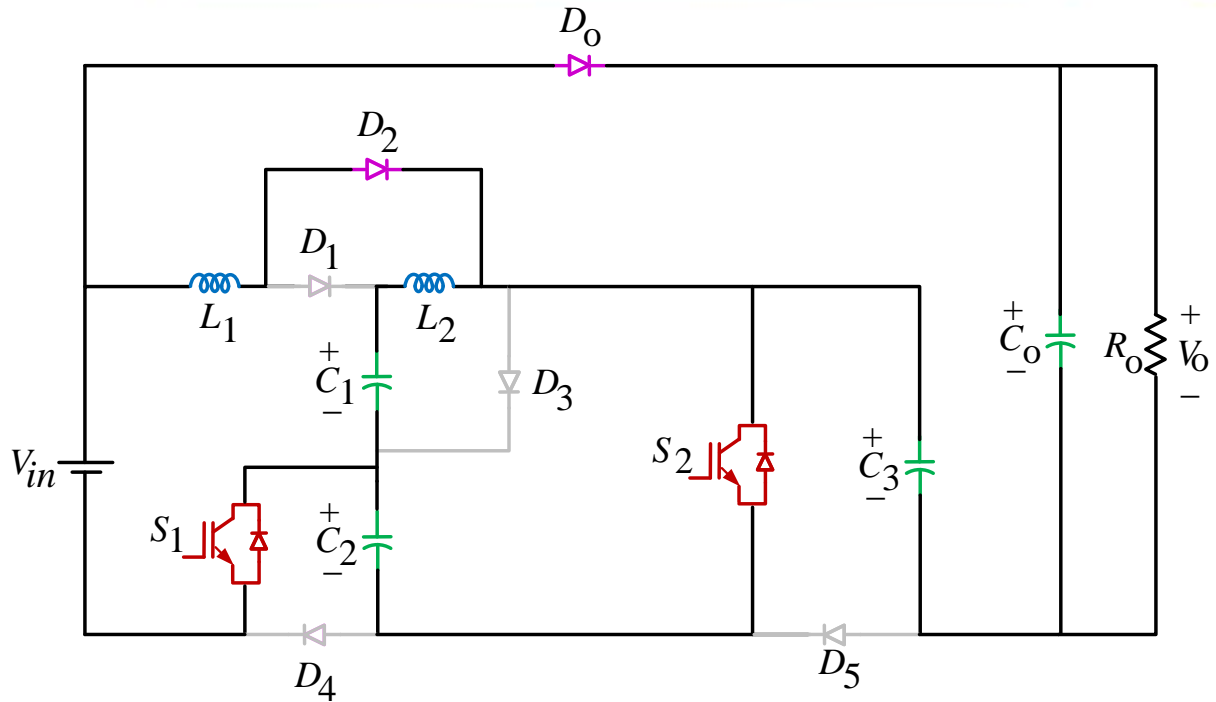
همچنین، بهره ولتاژ مبدل پیشنهادی با استفاده از رابطه بالا حاصل می شود:

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{3-3D+D^2}{1-3D+D^2} \quad (14)$$

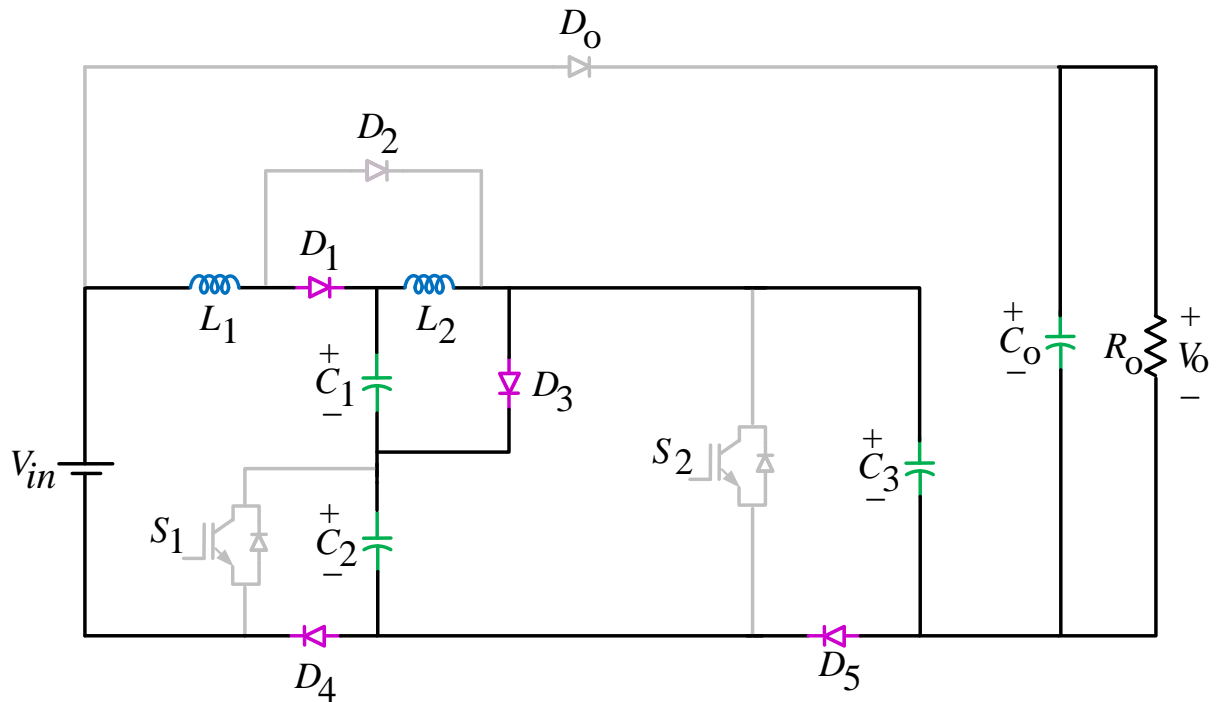
دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir



(الف)



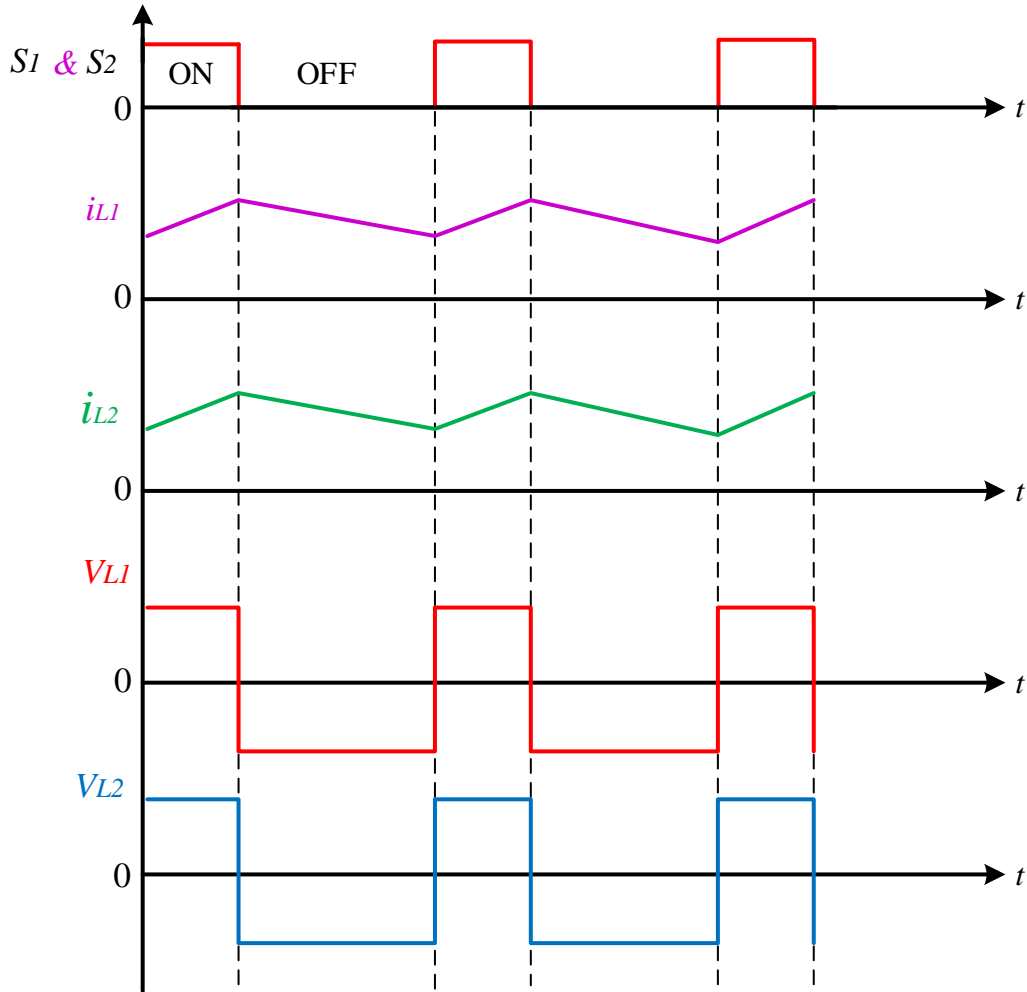
(ب)

شکل ۲. مدار معادل مبدل پیشنهادی. مد کاری اول (الف) و مد کاری دوم (ب)

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir



شکل ۳. شکل موج‌های مبدل پیشنهادی در حالت پیوسته کاری CCM

۲.۲. محاسبه استرس ولتاژ المان‌های نیمه هادی

استرس ولتاژ المان‌های نیمه هادی به صورت زیر هستند:

$$V_{S1} = \frac{1}{1-3D+D^2} V_{in} \quad (15)$$

$$V_{S2} = \frac{1}{1-3D+D^2} V_{in} \quad (16)$$

$$V_{D1} = \frac{1-D}{1-3D+D^2} V_{in} \quad (17)$$

$$V_{D2} = \frac{D}{1-3D+D^2} V_{in} \quad (18)$$

$$V_{D3} = \frac{1}{1-3D+D^2} V_{in} \quad (19)$$

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir

$$V_{D4} = \frac{1}{1-3D+D^2} V_{in} \quad (20)$$

$$V_{D5} = \frac{1}{1-3D+D^2} V_{in} \quad (21)$$

$$V_{Do} = \frac{2}{1-3D+D^2} V_{in} \quad (22)$$

۳. نتایج شبیه‌سازی

پارامترها و مقادیر شبیه‌سازی در جدول زیر بیان شده‌است و در ادامه تحقیق به نتایج شبیه‌سازی خواهیم پرداخت.

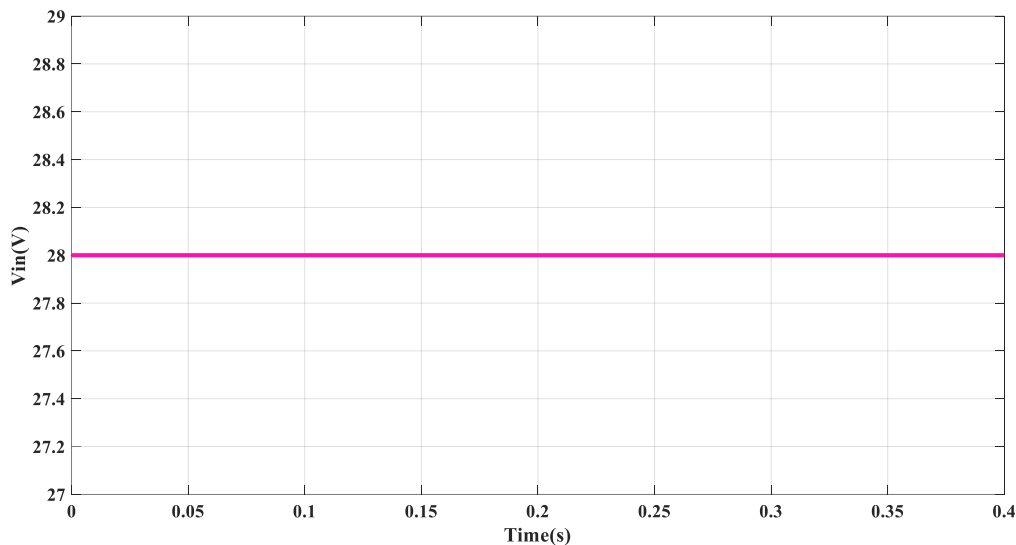
جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
ولتاژ ورودی	۲۸ ولت
فرکانس کلیدزنی	۴۰ KHz
C ₃	۱۰ میکروفاراد
C ₁ , C ₂	۲۰۰ میکروفاراد
C ₀	۴۷ میکروفاراد
L ₁	۱/۱ میلی هانری
L ₂	۰/۵ میلی هانری
D	۰/۳
R	۲۰۰ اهم
V _o	۳۲۲ ولت

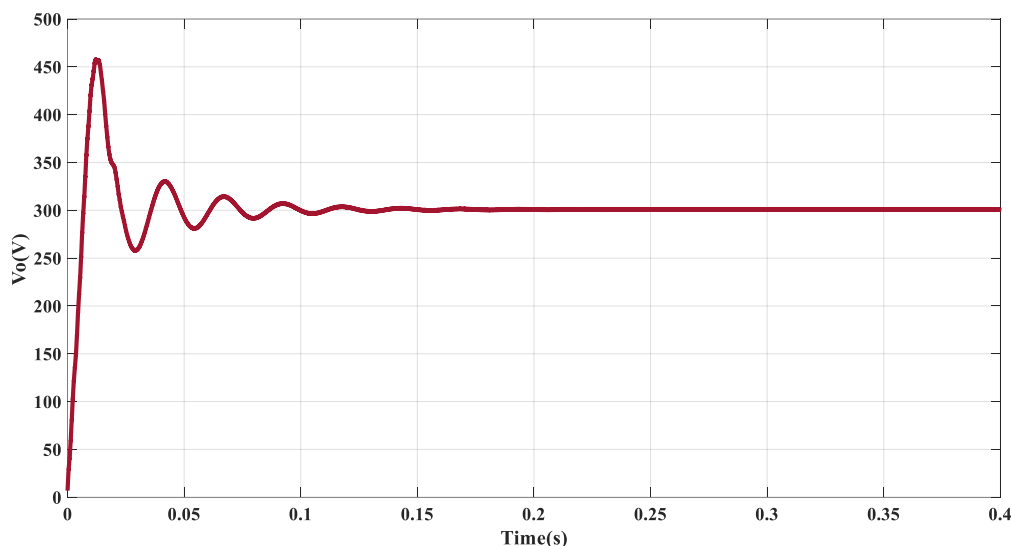
دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senacnf.ir



شکل ۴: ولتاژ ورودی



شکل ۵: ولتاژ خروجی

ولتاژ ورودی مبدل پیشنهادی برابر با ۲۸ ولت بوده و مقدار سیکل کاری کلید قدرت برابر با 0.3 می‌باشد، بنابراین با استفاده از رابطه (۱۳) ولتاژ خروجی به این صورت است:

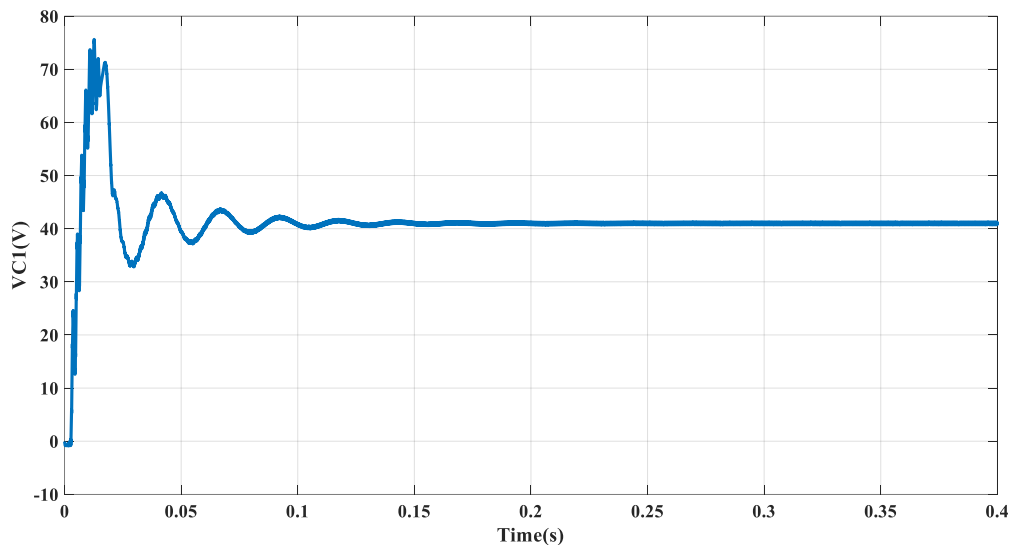
$$V_o = \frac{3-3D+D^2}{1-3D+D^2} V_m = \frac{3-3 \times 0.3+0.3^2}{1-3 \times 0.3+0.3^2} \times 28 = 322.73(V) \quad (23)$$

با مقایسه نتایج بدست آمده از شکل ۵ و رابطه (۲۳) نتیجه می‌شود که عملکرد مبدل پیشنهادی صحیح است.

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

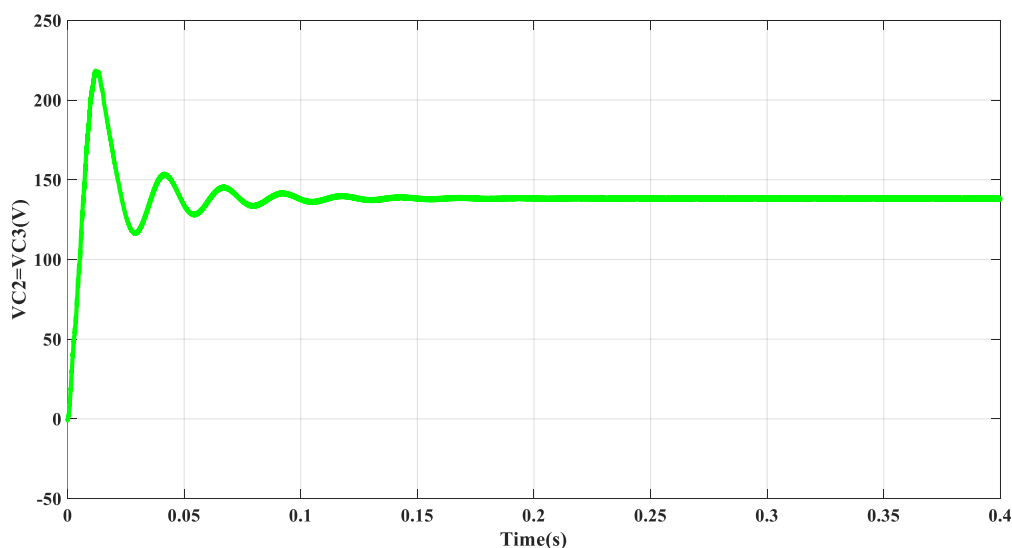
senacnf.ir



شکل ۶: ولتاژ خازن C_1

ولتاژ خازن C_1 از طریق روابط (۹) و (۱۲) بدست می‌آید:

$$V_{C1} = \frac{D}{1-3D+D^2} V_{in} = \frac{0.3}{1-3 \times 0.3+0.3^2} \times 28 = 47.36(V) \quad (24)$$



شکل ۷: ولتاژ خازن‌های C_2 و C_3

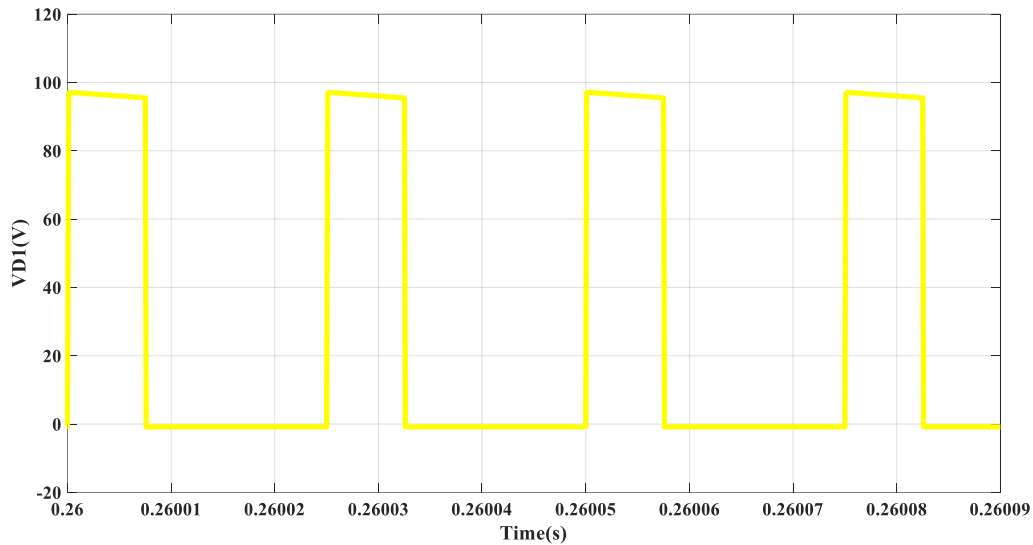
ولتاژ خازن‌های C_2 و C_3 با استفاده از روابط (۶) و (۱۴) حاصل می‌شود:

$$V_{C2} = V_{C3} = \frac{1}{1-3D+D^2} V_{in} = \frac{1}{1-3 \times 0.3+0.3^2} \times 28 = 147.36(V) \quad (25)$$

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

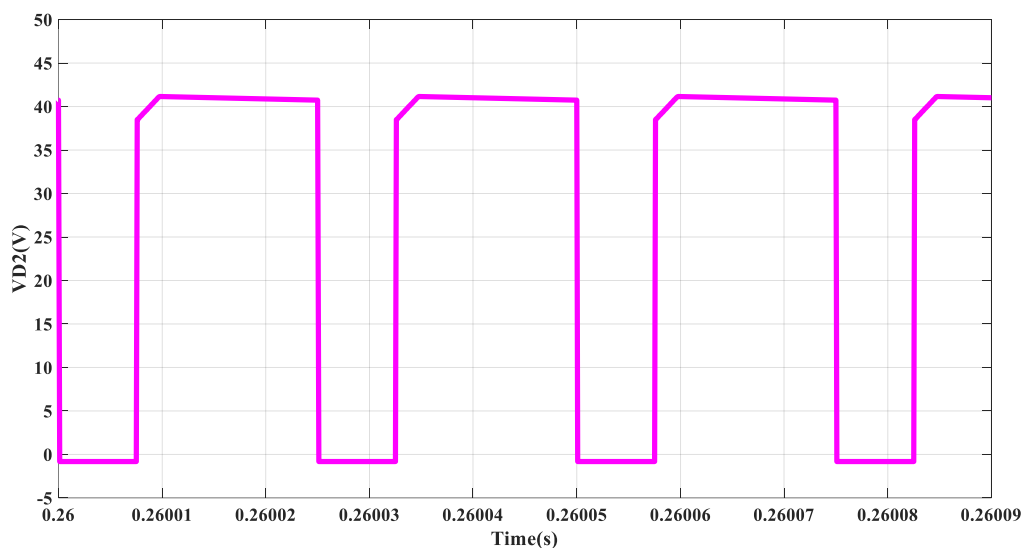
senaconf.ir



شکل ۸: ولتاژ دیود D_1

شکل ۸ نشانگر ولتاژ دیود D_1 می باشد که از طریق رابطه (۱۷) بدست می آید:

$$V_{D1} = \frac{1-D}{1-3D+D^2} V_{in} = \frac{1-0.3}{1-3 \times 0.3+0.3^2} \times 28 = 103.15(V) \quad (26)$$



شکل ۹: ولتاژ دیود D_2

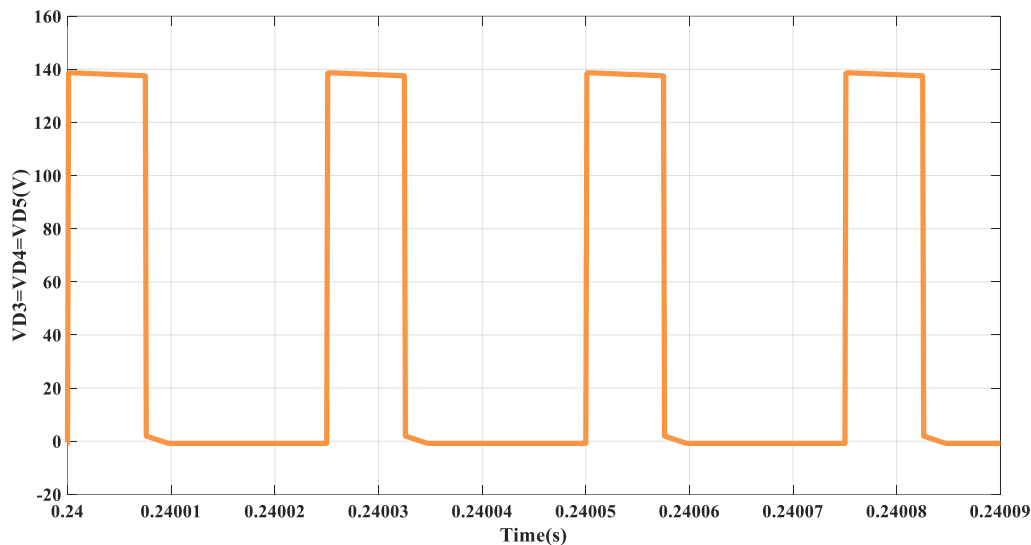
ولتاژ دیود D_2 از رابطه (۱۸) بدست می آید که به صورت زیر است:

$$V_{D2} = \frac{D}{1-3D+D^2} V_{in} = \frac{0.3}{1-3 \times 0.3+0.3^2} \times 28 = 47.36(V) \quad (27)$$

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

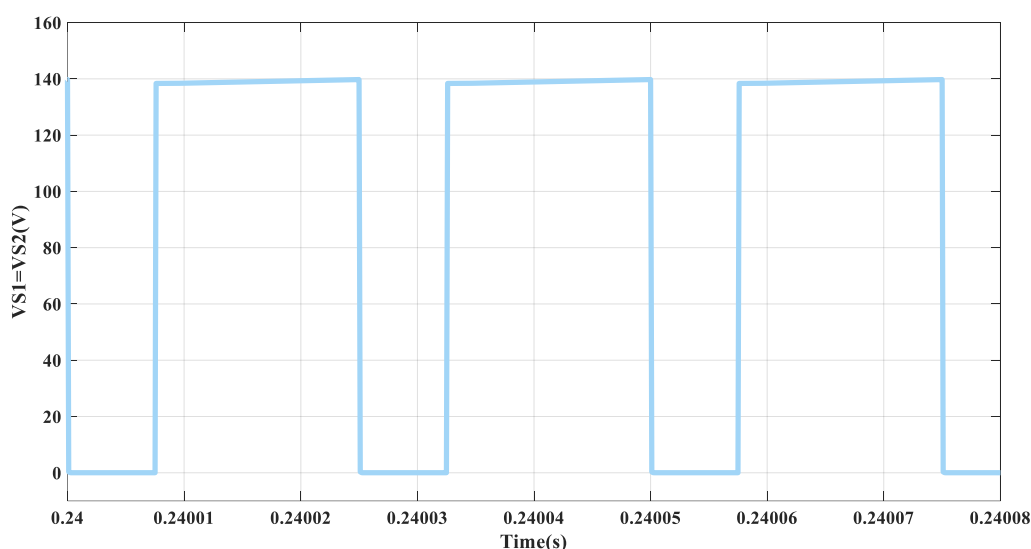
senacnf.ir



شکل ۱۰: ولتاژ دیودهای D_3 , D_4 و D_5

ولتاژ دیودهای D_3 , D_4 و D_5 از روابط (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) حاصل می‌شود:

$$V_{D3} = V_{D4} = V_{D5} = \frac{1}{1-3D+D^2} V_{in} = \frac{1}{1-3 \times 0.3+0.3^2} \times 28 = 147.36(V) \quad (28)$$



شکل ۱۱: ولتاژ کلیدهای S_1 و S_2

ولتاژ کلیدهای S_1 و S_2 از روابط (۱۵) و (۱۶) بدست می‌آیند:

$$V_{S1} = V_{S2} = \frac{1}{1-3D+D^2} V_{in} = \frac{1}{1-3 \times 0.3+0.3^2} \times 28 = 147.36(V) \quad (29)$$

۴. نتیجه گیری

دوازدهمین کنگره ملی سراسری فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران

12th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran

senaconf.ir

در این تحقیق یک مبدل DC-DC افزایشنده با بهره ولتاژ بالا ارائه شده است و این مبدل افزایشنده جهت افزایش سطح ولتاژ پایین منابع انرژیهای تجدیدپذیر بکار می رود. ساختار مبدل پیشنهادی ترکیبی از ساختار کلیدزنی-خازنی و کلیدزنی سلفی می باشد که باعث افزایش قابل توجه بهره ولتاژ می شود. مزایای مبدل پیشنهادی شامل استرس ولتاژ کم المانها، تلفات هدایتی کم کلیدهای قدرت و تعداد کم المانهای بکار گرفته در مبدل می باشند که تعداد کم المانها باعث کاهش هزینه ساخت مبدل شده و سایز مبدل کوچک خواهد بود. همچنین، جریان ورودی مبدل پیشنهادی پیوسته بوده و ریپل جریان ورودی کم می باشد که این ویژگیها بسیار مناسب برای استفاده منابع انرژیهای تجدیدپذیر به عنوان ورودی مبدل می باشند.

منابع

- [1] Müller, L., Kimball, J.W.: High gain DC-DC converter based on the Cockcroft-Walton multiplier. *IEEE Trans. Power Electron.* 31(9), 6405- 6415 (2015)
- [2] Marzang, V., et al.: A high step-up nonisolated DC-DC converter with flexible voltage gain. *IEEE Trans. Power Electron.* 35(10), 10489-10500 (2020) Atluri, S. N. and Shen, S., (2002), "The Meshless Local Petrov- Galerkin (MLPG) Method", Tech Science Press, USA.
- [3] F. L. Tofoli, D. de Castro Pereira, W. J. de Paula, and D. de Sousa Oliveira Junior, "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, Sep. 2015.
- [4] J. P. Rodrigues, S. A. Mussa, M. L. Heldwein, and A. J. Perin, "Three-level ZVS active clamping PWM for the DC-DC buck converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 10, pp. 2249-2258, Oct. 2009
- [5] Y. L. Sheng, L. T. Juu, and C. J. Fuh, "Transformerless DC-DC converters with high step-up voltage gain," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 8, pp. 3144-3152, Aug. 2009.
- [6] J. Anderson and F. Z. Peng, "A class of Quasi-Z-source inverters," *Proc. IEEE Ind. Appl. Soc.*, Oct. 2008, pp. 1-7.
- [7] V. P. Galigekere and M. K. Kazimierczuk, "Analysis of PWM Z-source DC-DC converter in CCM for steady state," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers.*, vol. 59, no. 4, pp. 854-863, Apr. 2012
- [8] G. Zhang, B. Zhang, Z. Li, and D. Qiu, "A 3-Z-network boost converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 1, pp. 278-288, Jan. 2015.
- [9] X. B. Ruan, B. Li, Q. H. Chen, T. Siew-Chong, and C. K. Tse, "Fundamental considerations of three-level DC-DC converters: Topologies, analyses, and control," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers.*, vol. 55, no. 11, pp. 3733- 3743, Dec. 2008.
- [10] L. Sun, F. Zhuo, F. Wang, and T. Zhu, "A novel topology of high voltage and high power bidirectional ZCS DC-DC converter based on serial capacitors," in *Proc. IEEE Appl Power Electron Conf Expo APEC*, Mar. 2016, pp. 810-815.