

مبدل ترکیبی مبتنی بر کلیدزنی سلفی برای پنلهای فتوولتائیک

ناصر اولاد عبدالمهی اقدم^{۱*}، طاهر عابدینزاده^۲

- ۱- کارشناسی ارشد مهندسی برق، دانشگاه آزاد واحد اهر، اهر
- ۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد واحد شبستر، شبستر

*naserolad@yahoo.com

ارسال: بهمن ماه ۹۷ پذیرش: فروردین ماه ۹۸

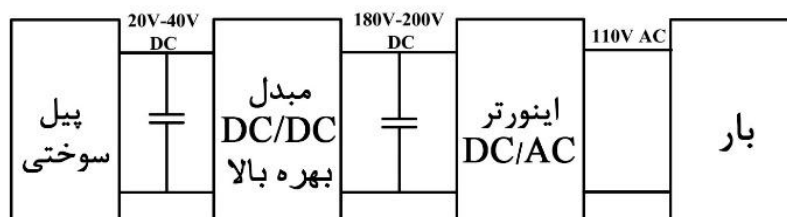
چکیده

در موارد بسیاری، از جمله سیستمهای فتوولتائیک متصل به شبکه و پیل سوختی نیاز به مبدلهای بهره بالا است. در واقع مبدلهای DC/DC بهره بالا، ولتاژ ورودی کم را به خروجی با سطح ولتاژ بالا تبدیل می کنند. بهره ولتاژ مبدلهای Boost سابق، بدلیل کاهش بازده مبدل و ریپل جریان بالا، دارای محدودیت بود. در این مقاله، یک مبدل ترکیبی مبتنی بر کلیدزنی سلفی معرفی شده که شامل ترکیبی از واحدهای کلیدزنی سلفی اکتیو و پسیو و یک مبدل Boost معمولی بوده که قادر به افزایش سطح ولتاژ خروجی با بهره بالا نسبت ورودی است. این مبدل دارای ساختاری ساده، کنترل آسان و بهره بسیار بالا می باشد. در نهایت نیز، صحت نحوه عملکرد مبدل مذکور توسط نرم افزار PSCAD/EMTDC بررسی شده است.

کلمات کلیدی: مبدلهای DC/DC، مبدلهای بهره بالا، مبدلهای کلیدزنی سلفی اکتیو و پسیو

۱- مقدمه

مبدلهای DC/DC بهره بالا جهت کاربردهای مختلفی، از جمله دشارژ سریع بالاستهای چراغ خودروها، سیستم های پشتیبان باتری برای منابع تغذیه بی وقفه، پیل سوختی و سیستم های PV مورد استفاده قرار می گیرند [۱-۳]. در شکل ۱ ساختار سیستم پیل سوختی نمونه ای نشان داده شده است [۴] با در نظر گرفتن مسائل مربوط به هزینه و قابلیت اطمینان ولتاژ خروجی پیل سوختی کمتر از ۴۰ ولت می باشد و نیاز به افزایش تا ولتاژ ۲۰۰-۱۸۰ ولت جهت ورودی اینورتر دارد. ساختارهای مختلفی بدون چرخه کاری بالا برای این افزایش ولتاژ معرفی شده اند.



شکل ۱- شماتیک سیستم با منبع پیل سوختی

۲- پیشینه تحقیق

مبدل‌های DC/DC بهره بالا را می‌توان به گروه‌های مبدل‌های ایزوله و غیرایزوله تقسیم‌بندی کرد [۵]. مبدل‌های ایزوله به دو گروه از نوع ولتاژ و از نوع جریان تقسیم می‌شوند و با افزایش نسبت دور ترانسفورماتور می‌توانند بهره ولتاژ را تنظیم کنند، اما عیب اساسی که این نوع مبدل‌ها دارند بالا بودن هزینه ساختارهای ایزوله است [۶] و [۷]. مبدل‌های غیرایزوله به دو گروه دارای سلف تزویج و بدون سلف تزویج تقسیم می‌شوند که با استفاده از این نوع مبدل‌ها می‌توان به بازده بالا با هزینه پایین رسید [۸] و [۹]. مبدل‌های ایزوله از نوع ولتاژ [۱۰-۱۳] که از مبدل‌های کاهنده بدست می‌آیند. در این ساختارها، ریپل جریان ورودی و تنش ولتاژ بر روی دیودهای سمت ثانویه بالاست. از این دسته مبدل‌ها می‌توان به مبدل‌های تمام‌پل با شیفت فازی اشاره کرد. مبدل‌های ایزوله از نوع جریان از مبدل‌های افزایشنده بدست می‌آیند که قابلیت افزایش توان بالایی دارند اما باید اسپایک ولتاژ در دو سر کلیدها به دقت کنترل شود [۱۱]. مبدل‌های غیرایزوله دارای سلف تزویج [۱۴-۱۷] شبیه به مبدل‌های ایزوله می‌باشند که با استفاده از افزایش نسبت دور می‌توانیم به ولتاژ بالایی در خروجی دست پیدا کنیم اگرچه سلف نشستی سلف تزویج اجتناب ناپذیر است که ممکن است باعث اسپایک ولتاژ و تنش ولتاژ بالا، موقعی که کلیدها خاموش هستند، بشود. در ساختار ارائه شده از ترکیب کلیدزنی خازنی و کلیدزنی سلف تزویج استفاده شده است. با اتخاذ سلف تزویج برای شارژ کلیدزنی خازنی می‌توان بهره ولتاژ را به طور موثر افزایش و نسبت تبدیل سلف تزویج را کاهش داد. مبدل پیشنهادی از شش المان تشکیل شده است که می‌تواند برای اهداف مختلف مبدل‌های متنوع به مانند مبدل‌های دوسویه استفاده شود. در مبدل‌های غیرایزوله بدون سلف تزویج با کمینه کردن اجزای مغناطیسی می‌توان به سطح ولتاژ بالایی دست یافت. از این دسته مبدل‌ها می‌توان به مبدل‌های با کلیدزنی سلفی اشاره کرد. در مراجع [۱۸] و [۱۹] ساختارهایی برای مبدل‌های غیر ایزوله بدون سلف تزویج ارائه شده است. این ساختارها از ترکیب واحدهای کلیدزنی سلفی فعال و غیرفعال بدست می‌آیند. واحد کلیدزنی سلفی فعال که در شکل ۲- الف نشان داده شده، شامل دو سلف L_1 و L_2 و سه دیود D_1 ، D_2 و D_3 است. زمانی که اختلاف ولتاژ بین دو نقطه A و B مثبت است دیودهای D_1 و D_2 هدایت می‌کنند و D_3 خاموش است و دو سلف بصورت موازی هستند. زمانی که اختلاف ولتاژ بین دو نقطه A و B منفی است دیودهای D_1 و D_2 خاموش بوده و D_3 هدایت می‌کند و دو سلف بصورت سری قرار می‌گیرند. واحد کلیدزنی سلفی غیرفعال که در شکل ۲- ب نشان داده شده شامل دو کلید S_1 و S_2 و دو سلف L_1 و L_2 است. عملکرد واحد غیرفعال مشابه با واحد فعال می‌باشد. زمانی که دو کلید S_1 و S_2 به صورت همزمان در حال هدایت هستند دو سلف بصورت موازی هستند. زمانی که دو کلید S_1 و S_2 خاموش هستند دو سلف بصورت سری متصل هستند.



شکل ۲- واحد کلیدزنی سلفی (الف) کلیدزنی سلفی غیرفعال (ب) کلیدزنی سلفی فعال

از دیگر مبدل‌های ارائه شده در راستای واحدهای کلیدزنی سلفی یا خازنی، می‌توان به مرجع [۲۰] اشاره کرد. در این مرجع، یک مبدل DC/DC افزایشنده بهره بالا بدون ترانسفورماتور بر پایه یک شبکه کلیدزنی سلفی فعال و یک شبکه کلیدزنی خازنی پس‌پس‌پس ارائه شده است. هدف اصلی این مبدل دستیابی به بهره بالای ده، کاهش استرس ولتاژ کلیدها و کاهش تعداد المان‌ها می‌باشد.

در مرجع [۲۱]، یک مبدل افزایشدهنده با سلول کلیدزنی سلفی و خازنی ارائه شده که کاربرد آن در اتصال به PV و افزایش ولتاژ پایین ورودی به مقداری مطلوب است. مبدل پیشنهادی در این مقاله از روش نوین ترکیبی مبتنی بر کلیدزنی سلفی (Hybrid switched Inductor Converter (H-SLC)) (مشابه شکل ۲) برای تبدیل بهره بالا استفاده کرده که دارای مزایایی شامل نرخ تبدیل ولتاژ به سطوح بسیار بالا، استرس ولتاژ پایین کلیدها، تلفات پایین هدایتی کلیدها و کنترل آسان است.

۳- نحوه عملکرد مبدل پیشنهادی

در این بخش نحوه عملکرد مبدل ترکیبی مبتنی بر کلیدزنی سلفی (H-SLC) در رژیم هدایت پیوسته و حالت پایدار توضیح داده می شود. نحوه عملکرد مبدل در دو مد کاری مختلف در شکل ۳ آمده است.

مد اول $[0 \leq t \leq t_1]$: در این مد هر دو کلید S_1 و S_2 روشن می باشند. دیودهای D_{a1} ، D_2 و D_4 خاموش بوده و باعث شارژ سلف های L_{1a} ، L_{2b} و L_{1b} توسط ورودی می شوند. در نتیجه جریان سلف ها ($i_{L_{1a}}$ ، $i_{L_{1b}}$ و $i_{L_{2b}}$) طبق روابط زیر افزایش می یابند.

$$V_{in} = V_{L_{1a}} = L_{1a} \frac{di_{L_{1a}}}{dt} \Rightarrow i_{L_{1a}} = \frac{V_{in}}{L_{1a}} t \quad (1)$$

$$V_{L_{1b}} = V_{L_{2b}} = V_{in} \Rightarrow i_{L_{1b}} = i_{L_{2b}} = \frac{V_{in}}{L_b} t \quad (2)$$

در این مد برای ولتاژهای المان های مختلف نیز روابط زیر حاصل می شوند:

$$V_{O1} = \frac{V_O - V_{in}}{2} \quad (3)$$

$$V_{O2} = \frac{V_O + V_{in}}{2} \quad (4)$$

$$V_{D_{O1}} = V_{C_{O1}} \quad (5)$$

$$V_{D_4} = V_{C_{O2}} \quad (6)$$

$$V_{D_2} = V_{in} \quad (7)$$

مد دوم $[t_1 \leq t \leq t_2]$: در این مد کلیدهای S_1 و S_2 خاموش هستند. دیودهای D_{a1} ، D_3 و D_{O2} بایاس معکوس و دیودهای D_2 ، D_{a1} و D_4 هدایت می کنند. در این حالت سلف های L_{1a} ، L_{2b} و L_{1b} دچار شارژ شده و بار را تامین می کنند. در نتیجه جریان سلفها ($i_{L_{1a}}$ ، $i_{L_{1b}}$ و $i_{L_{2b}}$) طبق روابط زیر افزایش می یابند.

$$V_{L_{1a}} = V_{in} - V_{O1} \Rightarrow i_{L_{1a}} = \frac{V_{in} - V_{O1}}{L_{1a}} t \quad (8)$$

$$\begin{cases} -V_{in} + V_{L_{1b}} + V_{L_{2b}} + V_{C_1} = 0 \\ V_{L_{1b}} = V_{L_{2b}} = V_{L_b} \end{cases} \Rightarrow V_{L_b} = \frac{V_{in} - V_{C_1}}{2} \Rightarrow i_{L_b} = \frac{V_{in} - V_{C_1}}{2L_b} t \quad (9)$$

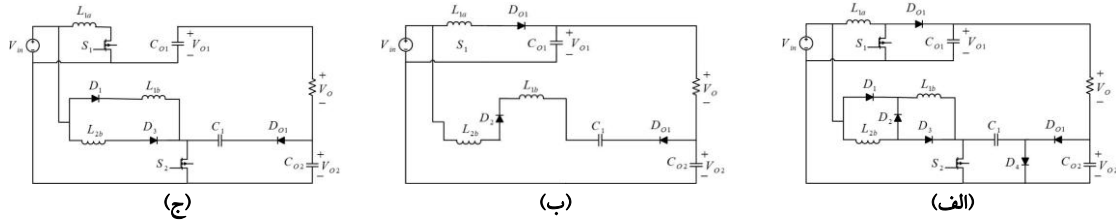
در این مد برای ولتاژهای المان های مختلف نیز روابط زیر حاصل می شوند:

$$V_{D_1} = -V_{L_b} = V_{L_1} - V_{in} \quad (10)$$

$$V_{D_3} = V_{O1} - V_{in} \quad (11)$$

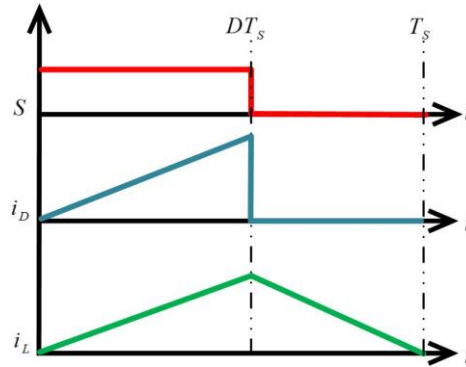
$$V_{S_1} = V_{O1} \quad (12)$$

$$V_{S_2} = V_{D_2} = V_{C_1} \quad (13)$$



شکل ۳- الف) ساختار مبدل پیشنهادی ب) نحوه عملکرد سیستم در مد اول ج) نحوه عملکرد سیستم در مد

شکل ۴ نشان دهنده شکل موج المان‌های مختلف مبدل مذکور می‌باشد. در این نمودار محور S نشان دهنده چرخه کاری کلیدها، i_D ، جریان دیودها و i_L ، جریان سلفها می‌باشند.



شکل ۴- شکل موج قسمت‌های مختلف مبدل در رژیم هدایت پیوسته

۴- محاسبه بهره ولتاژ مبدل

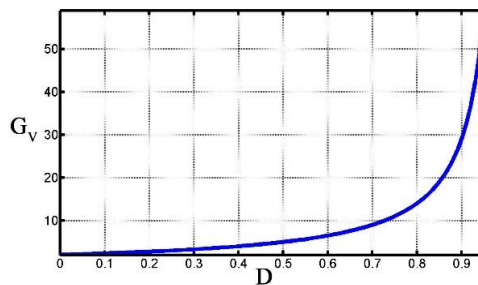
یکی از مزیت‌های مهم این مبدل، بهره ولتاژ بالای آن، بدون استفاده از سلف تزویج یا ترانس حجیم می‌باشد. در این بخش به محاسبه بهره ولتاژ این مبدل پرداخته شده است. با فرض چرخه کاری (D) برابر برای کلیدهای S_1 و S_2 ، محاسبه ولتاژ سلف‌ها رابطه بهره ولتاژ مبدل بدست می‌آید.

$$\frac{V_{in}}{L_{1a}}DT + \frac{V_{in} - V_{01}}{L_{1a}}(1-D)T = 0 \Rightarrow \frac{V_{01}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (14)$$

$$\frac{V_{in}}{L_{1a}}DT + \frac{V_{in} - V_{02}}{2L_{1b}}(1-D)T = 0 \Rightarrow \frac{V_{02}}{V_{in}} = \frac{1+D}{1-D} \quad (15)$$

$$V_o = V_{01} + V_{02} \Rightarrow \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_{01}}{V_{in}} + \frac{V_{02}}{V_{in}} \quad (16)$$

$$G_V = \frac{2+D}{1-D} \quad (17)$$



شکل ۵- بهره ولتاژ مبدل نسبت به چرخه کاری کلیدها

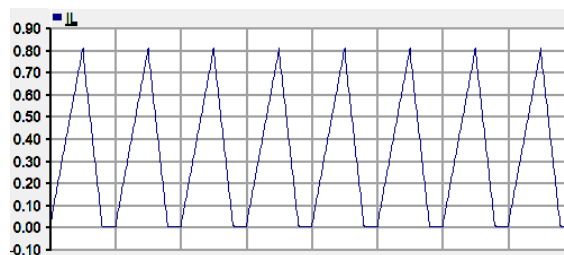
در رابطه (۱۷)، G_V نشان دهنده بهره ولتاژ مبدل بوده که در شکل ۵ میزان آن نسبت به D آمده است، که تاییدی بر بهره بالای این مبدل می باشد. در قسمت بعدی نیز نتایج حاصل از شبیه سازی ساختار مذکور ارایه می شود تا صحت عملکرد H-SLC مشخص شود.

۵- نتایج حاصل از شبیه سازی

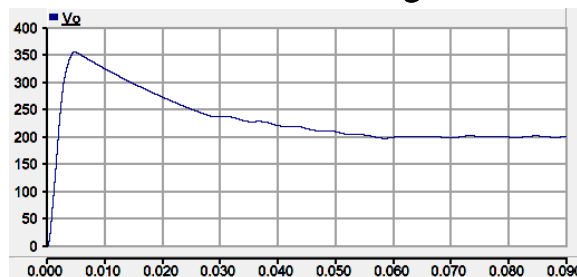
برای اعتبار بخشی به روابط ارایه شده در بخشهای قبل و تایید نحوه عملکرد مبدل، شبیه سازی ساختار مذکور توسط نرم افزار PSCAD/EMTCD صورت گرفته است. مقادیر المانهای مختلف در مبدل شبیه سازی شده، طبق جدول ۱ می باشد.

جدول ۱- پارامترهای مربوط به مبدل شبیه سازی شده

مقادیر	المان مورد نظر
40V	V_m
0.5mH	$L_{1a} = L_{1b} = L_{2b}$
22 μ F	C_1
44 μ F	$C_{O1} = C_{O2}$
50kHz	فرکانس کلیدزنی



شکل ۶- نتایج حاصل از شبیه سازی مربوط به جریان سلف ها



شکل ۷- نتایج حاصل از شبیه سازی مربوط به ولتاژ خروجی

در شکل ۶، نحوه تغییرات جریان سلف در دو مد کاری مختلف نشان داده شد است. همانطور که مشاهده می شود، جریان سلف در ابتدای امر افزایش دارد. در واقع، این افزایش ناشی از شیب مثبت جریان، مطابق رابطه (۱) بوده که در طول بازه زمانی $[0 \leq t \leq t_1]$ با گذشت زمان، میزان جریان افزایش دارد. در مد دوم $[t_1 \leq t \leq t_2]$ مطابق روابط (۸) و (۹)، جریان دارای شیب منفی می باشد. در نتیجه، جریان سلف ها با گذشت زمان کاهش می یابند. این پروسه افزایش و کاهش جریان سلف ها، به ترتیب برای مدهای اول و دوم در سیکل های بعدی کلیدزنی نیز تکرار خواهد شد.

طبق بخش ۳ برای ورودی $V_{in} = 40V$ و $D = 50\%$ ، الزاماً خروجی $V_o = 200V$ بدست می آید که در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق این شکل، میزان توان خروجی از مبدل مطابق رابطه بهره ولتاژ (رابطه (۱۷)) بوده و با چرخه کاری ۰/۵، میزان ولتاژ ورودی ۵ برابر شده است.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله ساختاری نوین برای مبدل ترکیبی مبتنی بر کلیدزنی سلفی بررسی و آنالیز گردید. مشخص شد، مبدل مذکور که ترکیبی از واحدهای کلیدزنی سلفی اکتیو و پسیو و مبدل Boost معمولی است در عمل دارای بهره ۱۵ تا ۲۰ برابر ورودی، ریبیل کم جریان در سلفها و استرس ولتاژ پایین می باشد. روابط ارایه شده و نتایج شبیه سازی نیز تاییدی بر این موارد هستند. همچنین این مبدل بدلیل عدم استفاده از ترانس و سلف تزویج جهت افزایش سطح ولتاژ ورودی، دارای تلفات کمتر، اندازه کوچکتر و راندمان بالا می باشد.

۷- مراجع

1. X. Wu, J. Zhang, X. Ye, and Z. Qian, —Analysis and derivations for a family ZVS converter based on a new active clamp ZVS cell. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 2, pp. 773–781, Feb. 2008.
2. R.G Ganesan and M. Prabhakar, —Non-isolated high gain boost converter for photovoltaic applications, in Proc. IEEE ICPEC, 2013, pp.277-280.
3. L. S. Yang and T. J. Liang. —Analysis and Implementation of a Novel Bidirectional DC–DC Converter, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 1, pp. 422–434, Jan. 2012.
4. C. T. Pan and C. M. Lai, —A High-Efficiency High Step-Up Converter With Low Switch Voltage Stress for Fuel-Cell System Applications, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 6, pp. 1998–2006, Jun. 2010.
5. B.Zhao, Q. Yu, and W. Sun, “Extended-Phase-Shift Control of Isolated Bidirectional DC–DC Converter for Power Distribution in Microgrid,” IEEE Trans. Power Electron., vol.27, no. 11, pp. 4667–4680, Nov. 2012.
6. T. Tang, D. Fu, T. Wang, and Z. Xu, “Hybrid Switched-Inductor Converters for High Step-Up Conversion,” IEEE Trans. Ind.Electron., 2015.
7. L.Zhou,B.Zhu,Q.Luo,S.Chen.,’Interleaved non-isolated high step-up DC/DC converter based on the diode–capacitor multiplier’, IET Power Electron., 2014,Vol. 7, Iss. 2, pp. 390–397 .
8. S. M. Chen, M. L. Lao, T. J. Liang, and Y. C. Shen, “A Novel Switched-Coupled-Inductor DC-DC Step-Up Converter and Its Derivatives,” IEEE Trans. TIA., 2014.
9. F. L. Tofoli, D. d. C. Pereira, W. Josias de Paula, D. d. S. Oliveira Júnior, "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.
10. L. Schmitz, D. C. Martins, R. F. Coelho, "Generalized high step-up DC-DC boost-based converter with gain cell", IEEE Trans. Circuits Syst. Reg. Papers, vol. 64, no. 2, pp. 480-493, Feb. 2017.
11. E. H. Ismail, M. A. Al-Saffar, A. J. Sabzali, A. A. Fardoun, "A family of single-switch PWM converters with high step-up conversion ratio", IEEE Trans. Circuits Syst. I Reg. Papers, vol. 55, no. 4, pp. 1159-1171, May 2008.
12. M. D. Seeman, S. R. Sanders, "Analysis and optimization of switched-capacitor dc-dc converters", IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, no. 2, pp. 841-851, Mar. 2008.
13. Y. Berkovich, A. Shenkman, B. Axelrod, G. Golan, "Structures of transformerless step-up and step-down controlled rectifiers", IET Power Electron., vol. 1, no. 2, pp. 245-254, Jun. 2008.
14. S. Sathyan, H. M. Suryawanshi, M. S. Ballal, A. B. Shitole, "Soft-switching dc–dc converter for distributed energy sources with high step-up voltage capability", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 11, pp. 7039-7050, Nov. 2015.
15. F. L. Tofoli, D. d. C. Pereira, W. J. de Paula, D. d. S. Oliveira Júnior, "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, 2015.
16. B. Wu, S. Li, Y. Liu, K. Ma Smedley, "A new hybrid boosting converter for renewable energy applications", IEEE Trans. Power Electron., vol. 31, no. 2, pp. 1203-1215, Feb. 2016.
17. X. Hu, L. Li, Y. Li, G. Wu, "Input-parallel output-series DC–DC converter for non-isolated high step-up applications", IEEE Electron. Lett., vol. 52, no. 20, pp. 1715-1717, Sep. 2016.

18. G. Wu, X. Ruan, Z. Ye, "Nonisolated high step-up dc-dc converters adopting switched-capacitor cell", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 1, pp. 383-393, Jan. 2015.
19. O. Abdel-Rahim, M. Orabi, E. Abdelkarim, M. Ahmed, M. Z. Youssef, "Switched inductor boost converter for PV applications", *Proc. 2012 27th Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, pp. 2100-2106, Feb. 2012.
20. M. A. Salvador, T. B. Lazzarin and R. F. Coelho, "High Step-Up DC-DC Converter With Active Switched-Inductor and Passive Switched-Capacitor Networks," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume: 65, Issue: 7, July 2018.
21. G. Wu, X. Ruan and Zhihong Ye, "High Step-Up DC-DC Converter Based on Switched Capacitor and Coupled Inductor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics* Volume: 65, Issue: 7, July 2018.