

## ارائه یک مبدل DC/DC افزایشنده با ترکیب تکنیک های کلید-خازن و کوپل اینداکتور با تعداد عناصر پایین برای استفاده در سیستم های خورشیدی

سجاد ملکی و رنامخواستی\*<sup>۱</sup>، سید محمد صادق زاده<sup>۲</sup>.

۱- گروه قدرت و کنترل، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شاهد، تهران، ایران

۲- دانشیار گروه قدرت و کنترل، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شاهد، تهران، ایران

### خلاصه

در این مقاله یک مبدل DC/DC با ساختار جدید برای استفاده در سیستم های خورشیدی ارائه شده است، در این مبدل دو تکنیک کلید-خازن و کوپل اینداکتور به صورت یکجا در یک ساختار واحد آورده شده است. با استفاده از کوپل اینداکتور در این ساختار کلید خازن شارژ می شود و بهره ولتاژ به صورت قابل توجهی می تواند افزایش یابد و این موضوع باعث کاهش نسبت دور در کوپل اینداکتور می گردد. در این ساختار نه تنها تلفات رسانایی کاهش یافته بلکه راندمان تبدیل توان افزایش و تعداد قطعات و اجزای مدار نیز کاهش یافته است. ساختار پیشنهادی تنها از ۶ قطعه تشکیل شده است که سادگی مناسبی را برای مبدل فراهم می آورد که این موضوع می تواند استفاده از این مبدل را در کاربردهای مختلفی فراهم سازد. عملکرد اصلی و تجزیه و تحلیل حالت ماندگار مبدل در این مقاله مورد بحث قرار گرفته است. همچنین برای تایید صحت عملکرد مبدل یک نمونه ۳۰۰ واتی به وسیله سیمولینک متلب شبیه سازی شده است و نتایج شبیه سازی با نتایج تئوری مقایسه می گردد. این مبدل می تواند بهره ولتاژ تا ۱۲ را فراهم کند، همچنین بیشینه راندمان مبدل حدود ۹۸٫۵٪ و راندمان مبدل در بار کامل ۹۶٪ می باشد.

**کلمات کلیدی:** مبدل DC/DC، مبدل افزایشنده، کوپل اینداکتور، کلید-خازن، مبدل بدون ترانسفورماتور.

### ۱. مقدمه

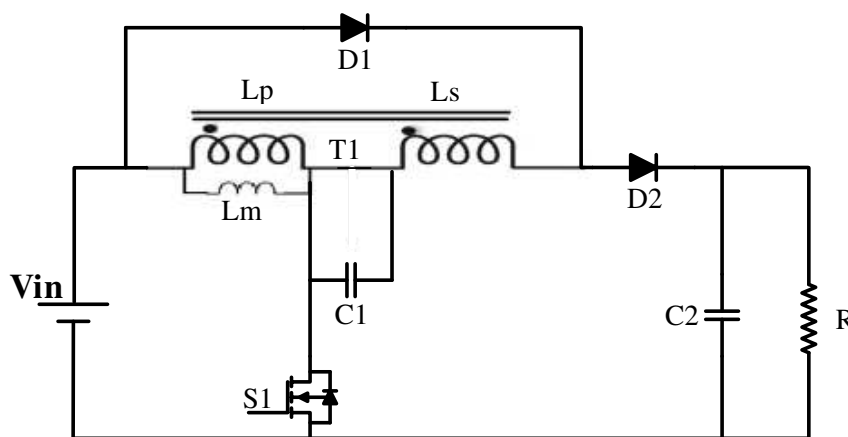
امروزه انرژی های تجدیدپذیر در سرتاسر جهان به طور افزایشدهای برای سیستم های تولید توان مورد توجه قرار گرفته اند. مبدل های DC/DC افزایشنده در کاربردهای مربوط به تولید توان بسیار مورد توجه و استفاده قرار می گیرند. از جمله مبدل هایایی که در گذشته برای کاربردهای با افزایشدهی بالا مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند می توان به مبدل های نوع کلید-سلف و کلید-خازن که در [۱-۳] ارائه شده و مبدل های بدون ترانسفورماتور نوع کلید-خازن [۴ و ۵] و مبدل های نوع

\* Email: sm7088@yahoo.com

Voltage-lift که در [۱۶ و ۱۷] آمده اشاره نمود. بعضی از مبدل‌ها، که از ترکیب ساختارهای بوست و فلای‌بک یا ترکیب انواع دیگر مبدل‌ها تشکیل شده‌اند برای فراهم آوردن بهره ولتاژ بالا از تکنیک کوپل اینداکتور استفاده کرده‌اند. [۷-۱۷] با این وجود اندوکتانس نشتی کوپل اینداکتور زمانی که کلیدها خاموش هستند باعث ایجاد اسپایک بر روی کلیدهای فعال می‌شود. یک مقاومت کوچک یا یک مدار اسنابر (RCD) می‌تواند برای مقابله با اسپایک این انرژی نشتی و کاهش ولتاژ اسپایک استفاده شود [۱۶ و ۱۷]. اما این راه‌حل ساده قادر به بهبود بازدهی مبدل نمی‌باشد. در مبدل‌های زیادی از تکنیک کلمپ فعال برای بازگرداندن انرژی نشتی و حصول شرایط سوئیچینگ نرم برای کلیدهای فعال استفاده شده است. [۱۸]

تکنیک کلمپ فعال تعداد قسمت‌ها و قطعات را افزایش می‌دهد که موجب پیچیدگی کنترل مبدل می‌شود. با این وجود، اثرات پارازیتی قطعات پس‌یو مانند جریان برگشتی از دیودها یا تلفات سوئیچینگ و تلفات انتقال کلیدهای قدرت موانعی برای راندمان تبدیل توان و افزایش بهره ولتاژ مبدل هستند.

مبدل پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. دیودهای  $D1$  و  $D2$  و خازن  $C1$  یک شبکه افزایش ولتاژ را تشکیل می‌دهند. کوپل اینداکتور  $T1$  نقش ذخیره و انتقال انرژی را برعهده دارد. سلف مغناطیس کننده  $Lm$  کوپل اینداکتور معادل با سلف ورودی یک مبدل بوست معمولی می‌باشد. خازن سوئیچینگ  $C1$  از منبع ورودی  $V_{in}$  و سیم‌پیچ ثانویه  $Ls$  شارژ می‌شود و سپس از طریق دیود  $D2$  انرژی ذخیره شده را به خازن خروجی  $C2$  و به بار  $R$  منتقل می‌کند.



شکل ۱- ساختار مدار مبدل پیشنهادی

از جمله ویژگی‌های مبدل پیشنهادی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

(الف) انرژی ذخیره شده در کوپل اینداکتور در زمان‌های روشن و خاموش بودن کلید، انتقال می‌یابد که این موضوع باعث افزایش استفاده از کوپل اینداکتور می‌شود.

(ب) انرژی در خازن سوئیچینگ  $C1$  از منبع ورودی  $V_{in}$  و سلف ثانویه کوپل اینداکتور  $Ls$  ذخیره می‌شود. که این موضوع می‌تواند نسبت تبدیل ولتاژ را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد.

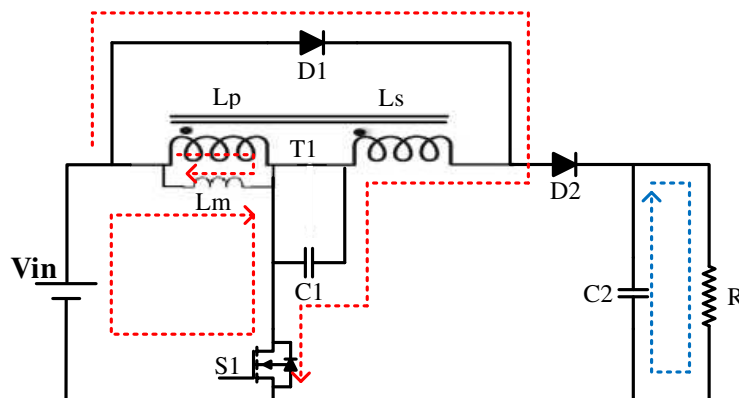
ج) جریان شارژ خازن سوئیچینگ  $C1$  از اندوکتانس نشتی تامین می‌شود. که می‌تواند به طور موثری جریان هجومی خازن سوئیچینگ را کاهش دهد.

د) انرژی سلف نشتی کوپل اینداکتور می‌تواند به طور مستقیم به بار خروجی بازگردانده شود. که به طور قابل توجهی بازده تبدیل را افزایش می‌دهد.

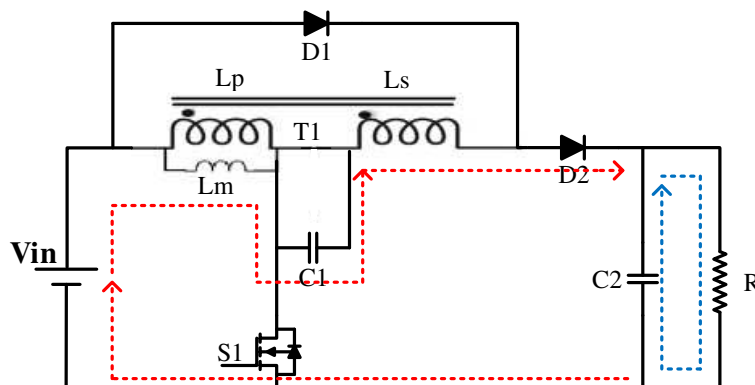
و) مبدل پیشنهادی تعداد قطعات پایینی دارد. که مزایای زیادی را برای مبدل فراهم می‌آورد. در مقایسه با مبدل فلای‌بک مرسوم، مبدل پیشنهادی استرس ولتاژ پایینی را بر روی کلید خود دارد و همچنین با دیوتی سائیکل پایین تری بهره ولتاژ بالایی را فراهم می‌آورد.

## ۲. آنالیز عملکرد اصلی و حالت ماندگار مبدل

در شکل ۲ خلاصه دو حالت عملکردی مبدل پیشنهادی نشان داده شده است. تنها عملکرد اصلی در مد پیوسته (CCM) در این قسمت توضیح داده می‌شود چونکه از مقاومت و خازن پارازیتی کلید و اندوکتانس نشتی صرف نظر شده است و عملکرد مبدل در حالت گذرا مورد بحث قرار نمی‌گیرد.



الف - مد اول



ب - مد دوم

شکل ۲- مسیر جریان در مد عملکردی پیوسته (CCM) در یک دوره سوئیچینگ در دو حالت عملکردی

در زیر فرضیات مورد نظر برای انجام آنالیزها آورده شده است.

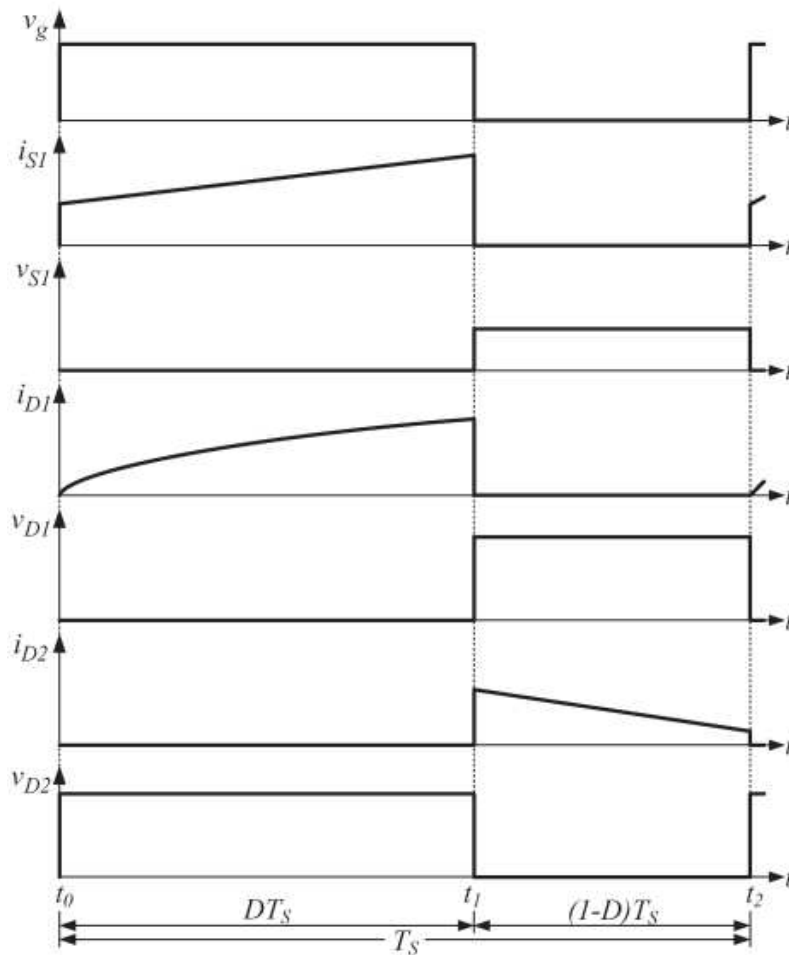
۱- همه قطعات ایده آل فرض شده است.

۲- خازنهای  $C1$  و  $C2$  به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده اند که ولتاژ دو سر آنها ثابت در نظر گرفته می شود.

۳- نسبت تبدیل (n) کوپل اینداکتور  $T1$  معادل با  $N2/N1$  است.

۴- اندوکتانس مغناطیس کنندگی به صورت یکپارچه با سیم پیچ اولیه  $Lp$  کوپل اینداکتور در نظر گرفته شده است.

دو حالت عملکرد ماندگار مبدل در زیر توضیح داده شده است.



شکل ۳- شکل موجهای مبدل پیشنهادی در عملکرد CCM

### الف) عملکرد اصلی

گام ۱:  $(t_0 - t_1)$  - در این گام انرژی ذخیره می‌شود، کلید  $S_1$  و دیود  $D_1$  هدایت می‌کنند و دیود  $D_2$  خاموش است. در طول این گام خازن  $C_1$  از منبع ورودی و کوپل اینداکتور انرژی دریافت می‌کند. چونکه جریان شارژ از منبع ورودی  $V_{in}$  به خازن  $C_1$  از طریق دیود  $D_1$  به صورت سری با سیم‌پیچ ثانویه  $L_s$  کوپل اینداکتور انتقال می‌یابد. ولتاژ خازن  $C_1$  معادل  $V_{in}(1+n)$  می‌شود. همچنین انرژی از منبع ورودی  $V_{in}$  شروع به ذخیره شدن در سلف مغناطیس کنندگی  $L_m$  می‌کند. مسیر جریان در شکل (۲-الف) نشان داده شده است. این گام زمانی که کلید  $S_1$  در زمان  $t = t_1$  خاموش می‌شود پایان می‌یابد.

گام ۲:  $(t_1 - t_2)$  - در این گام انرژی شروع به آزاد شدن می‌کند. دیود  $D_2$  هدایت می‌کند در حالی که کلید  $S_1$  و دیود  $D_1$  خاموش هستند. در طول این گام انرژی از طریق مسیر اتصال سری شامل منبع ورودی  $V_{in}$ ، سلف مغناطیس کنندگی  $L_m$ ، خازن  $C_1$ ، سیم‌پیچ ثانویه  $L_s$  و دیود  $D_2$  به خازن  $C_2$  و بار  $R$  انتشار می‌یابد. انرژی سیم‌پیچ ثانویه  $L_s$  از طریق سلف مغناطیس کنندگی  $L_m$  در طرف اولیه کوپل اینداکتور کوپل می‌شود. انرژی از طریق مسیر جریان نشان داده شده در شکل (۲-ب) آزاد می‌شود.

این گام زمانی که کلید  $S_1$  روشن می‌شود در شروع چرخه سوئیچینگ بعدی پایان می‌یابد.

### ب) آنالیز حالت ماندگار

آنالیز حالت ماندگار تنها در مد عملکردی پیوسته (CCM) انجام می‌شود و از اندوکتانس‌های نشستی در اولیه و ثانویه کوپل اینداکتور صرف نظر می‌شود. با استفاده از بالانس ولت ثانیه در سلف اولیه  $L_p$  کوپل اینداکتور خواهیم داشت:

$$V_{N1} = \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (1)$$

ولتاژ سیم پیچ ثانویه  $(V_{LS})$ ،  $n$  برابر ولتاژ سیم پیچ اولیه  $(V_{LP})$  می‌باشد.

$$V_{N2} = \frac{nD}{1-D} V_{in} \quad (2)$$

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است ولتاژ خروجی از جمع ولتاژ منبع ورودی  $V_{in}$  و ولتاژ خازن  $C_1$  و ولتاژهای اولیه و ثانویه کوپل اینداکتور حاصل می‌شود. نسبت تبدیل ولتاژ در مد پیوسته (CCM) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$M_{V-CCM} = \frac{V_o}{V_{in}} = 1 + \frac{D}{1-D} + (1+n) + \frac{nD}{1-D} = \frac{2+n-D}{1-D} \quad (3)$$

و نسبت ولتاژ مد گسسته (DCM) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$M_{V-DCM} = \frac{D_L \cdot D \cdot T_S \cdot R}{2(1+n) \cdot L_m} = \frac{D_L \cdot D}{2(1+n) \cdot \tau_m} \quad (4)$$

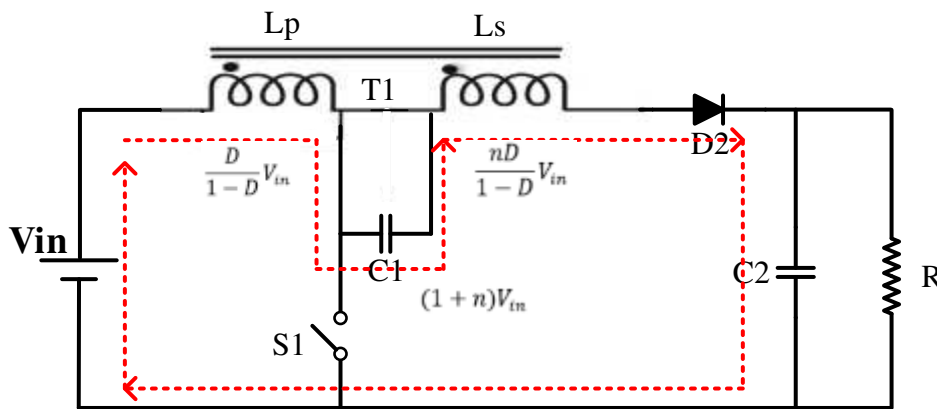
در رابطه بالا  $DL$  دوره زمانی است که جریان مغناطیس کنندگی از مقدار پیک به صفر کاهش می‌یابد. زمانی که مبدل پیشنهادی در مد عملکردی مرزی (BCM) عمل می‌کند، بهره ولتاژ تحت عملکردهای CCM و DCM برابر است.

ثابت زمانی اندوکتانس مغناطیس کنندگی  $\tau_{LmB}$  از رابطه زیر بدست می آید:

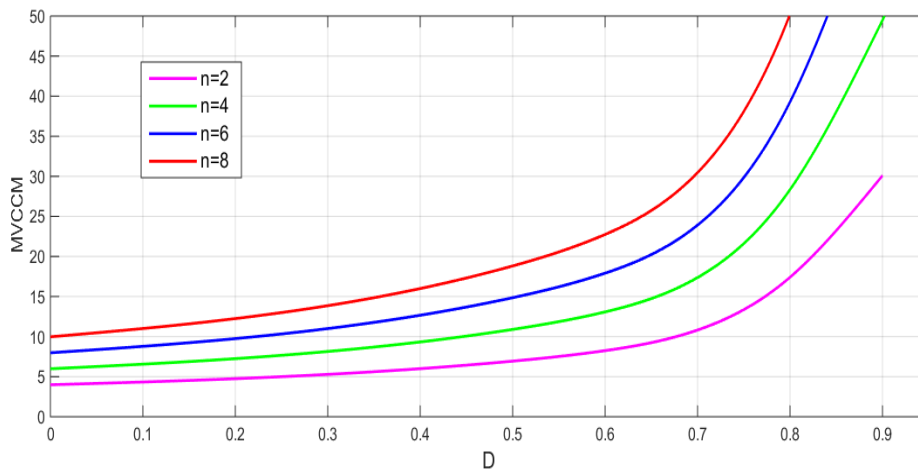
$$\tau_{LmB} = \frac{L_{mB}}{RT_s} = \frac{D(1-D)^2}{2(1+n)(2+n-D)} \quad (5)$$

نمودار نسبت تبدیل ولتاژ  $Mv - ccm$  برحسب عملکرد دیوتی سایکل  $D$  با نسبت های دور کوپل اینداکتور در شکل ۵ نشان داده شده است.

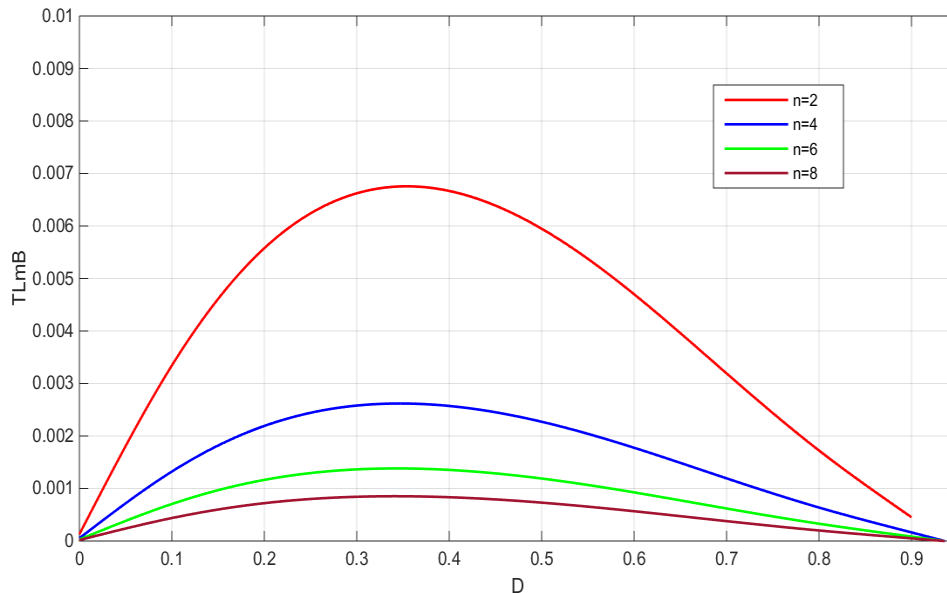
منحنی های نسبت دورهای مختلف همگی تحت شرایط CCM عمل می کنند. شکل ۶ شرایط مرزی TLmB مبدل پیشنهادی در  $n=2 \sim 8$  را نشان می دهد. مشخص است که هرچه نسبت تعداد دور کوچکتر باشد اندوکتانس مغناطیسی کوپل اینداکتور بزرگتر است.



شکل ۴- توزیع ولتاژ میان عناصر اصلی در مد عملکرد پیوسته در حالت ماندگار



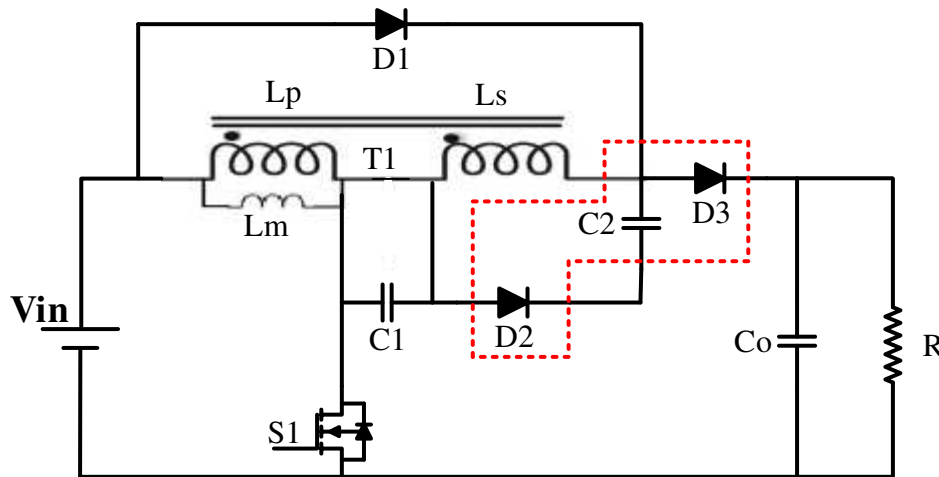
شکل ۵- نمودار بهره ولتاژ برحسب دیوتی سایکل در مد CCM برای  $n=2 \sim 8$



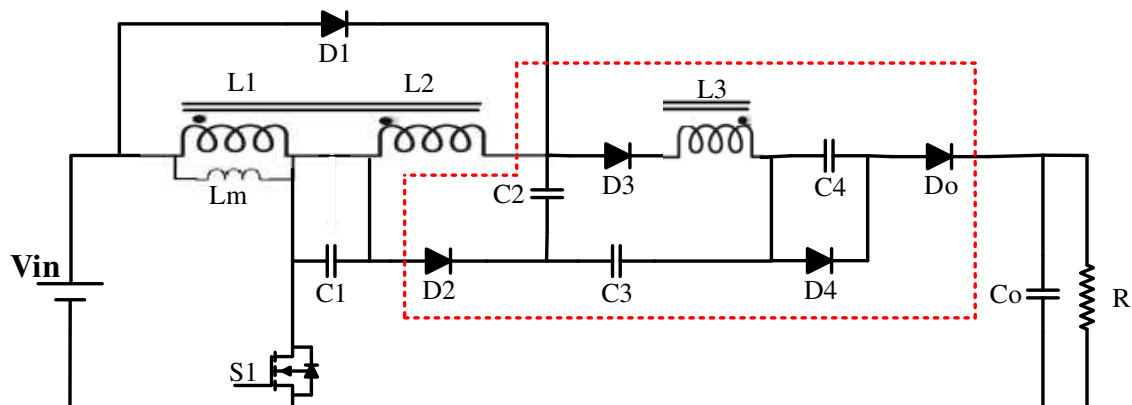
شکل ۶- نمودار TLmB بر حسب دیوتی سایکل در شرایط مرزی

### ۳. مشتقات مبدل

مبدل پیشنهادی می‌تواند با دیگر مشتقات مبدل نیز مورد استفاده قرار بگیرد. با اضافه کردن یک افزایش ولتاژ (Voltage-lift) در خروجی نسبت تبدیل ولتاژ مبدل می‌تواند افزایش یابد که در شکل ۷ نشان داده شده است. وقتی که از چندین سیم پیچ کوپل اینداکتور و چندین شبکه دیود-خازن به صورت اتصال سری برای مبدل پیشنهادی استفاده می‌شود ولتاژ خروجی می‌تواند مستقیماً افزایش یابد بوسیله اضافه کردن تعدادی کلید-کوپل اینداکتور که در شکل (۷-ب) نشان داده شده است. همچنین این ساختار می‌تواند با اضافه کردن یک کلید فعال و جایگزینی با دیود خروجی مبدل به یک مبدل دو طرفه تبدیل می‌شود.



الف- ترکیب ساختار مبدل پیشنهادی با یک شبکه Voltage-lift



ب- اضافه کردن یک طبقه کلید-خازن کوپل اینداکتور به ساختار اصلی

شکل ۷- مشتقات مبدل پیشنهادی

## ۴. نتایج شبیه سازی

یک نمونه از ساختار مبدل پیشنهادی در سیمولینک متلب شبیه سازی شده است. مشخصات مبدل پیشنهادی در جدول ۱ آمده است. مبدل تحت ولتاژ ورودی ۲۰-۴۰ ولت و ولتاژ خروجی ۴۰۰ ولت با توان نامی ۳۰۰ وات عمل می کند. نسبت تعداد دور کوپل اینداکتور ۳ می باشد و اندوکتانس مغناطیس کنندگی برابر  $23\mu\text{H}$  و همچنین اندوکتانس نشستی برابر با  $0.32\mu\text{H}$  است.



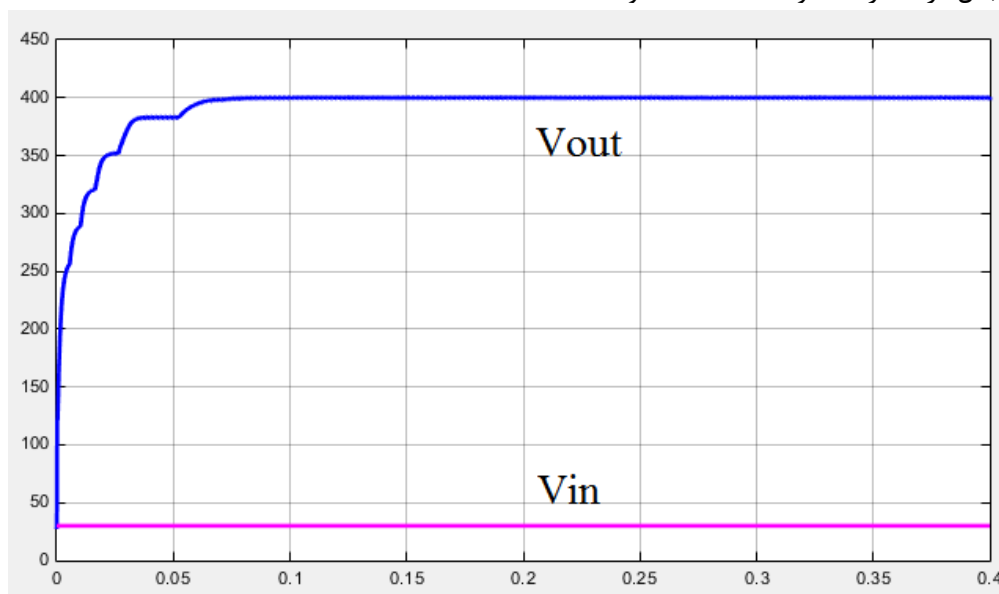
جدول ۱- مشخصات اصلی مبدل

20-40 V	ولتاژ ورودی (Vin)
400 V	ولتاژ خروجی (Vout)
300W	توان خروجی (Pout)
50 kHz	فرکانس سوئیچینگ (fs)

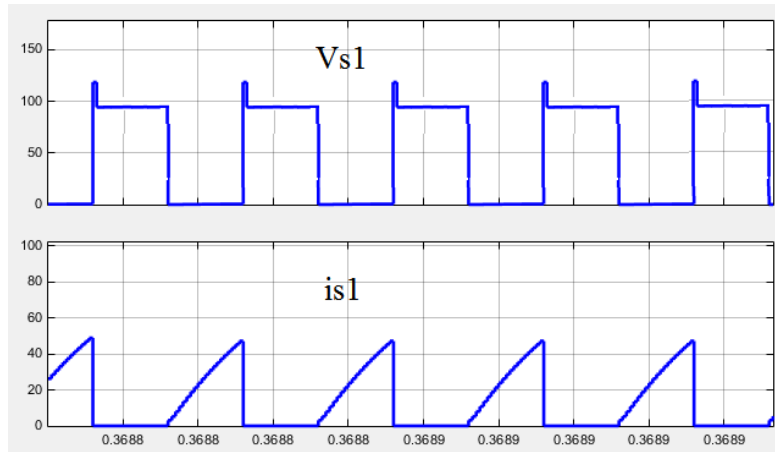
مقادیر خازن‌های  $C1$  و  $C2$  به ترتیب برابر با  $100\mu F$  و  $10\mu F$  می‌باشد. شکل موج‌های ولتاژ و جریان کلید  $S1$  و دیودهای  $D1$  و  $D2$  در وضعیت بار کامل در شکل ۸ نمای داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است شکل موج‌های ولتاژ و جریان ارائه شده با اصول عملکردی و آنالیز حالت دائم مطابقت دارد.

شکل ۹ نمودار بازدهی مبدل پیشنهادی را نشان می‌دهد که گویای این است که راندمان ماکزیمم  $98\%$  در عملکرد  $175$  واتی مبدل است و در بار کامل راندمان برابر  $96\%$  می‌باشد. همچنین در شکل ۹ دیوتی سایکل‌های متفاوت با توجه به بار خروجی را نشان می‌دهد.

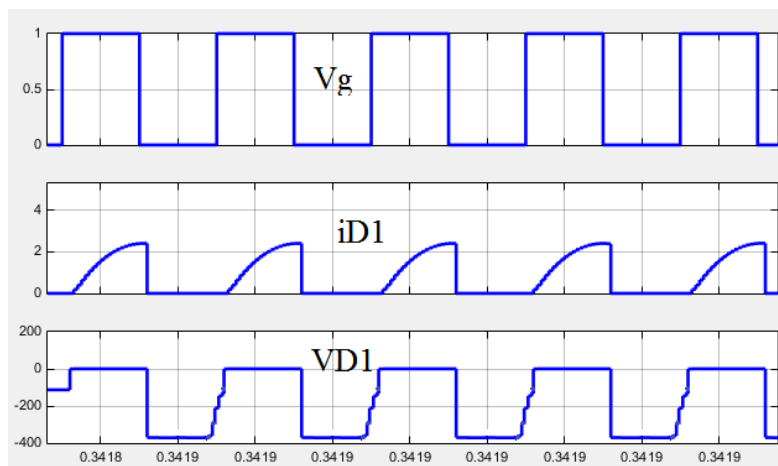
برای فراهم آوردن عملکرد مبدل تحت (CCM) بار خروجی بزرگتر از  $100$  وات تنظیم شده است که در این حالت دیوتی سایکل کلید نیز  $60\%$  می‌باشد. در شرایط عملکردی DCM مبدل، دیوتی سایکل بتدریج کاهش می‌یابد تا ولتاژ خروجی مبدل در مقدار  $400$  ولت نگه داشته شود.



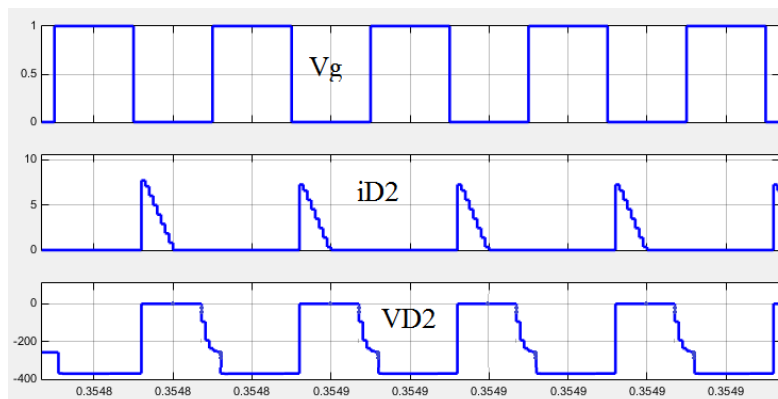
الف- ولتاژ ورودی خروجی مبدل



ب- شکل موج های ولتاژ و جریان کلید S1



ج- شکل موج های ولتاژ و جریان D1



د- شکل موج های ولتاژ و جریان D2

شکل ۸- نتایج شبیه سازی مبدل پیشنهادی

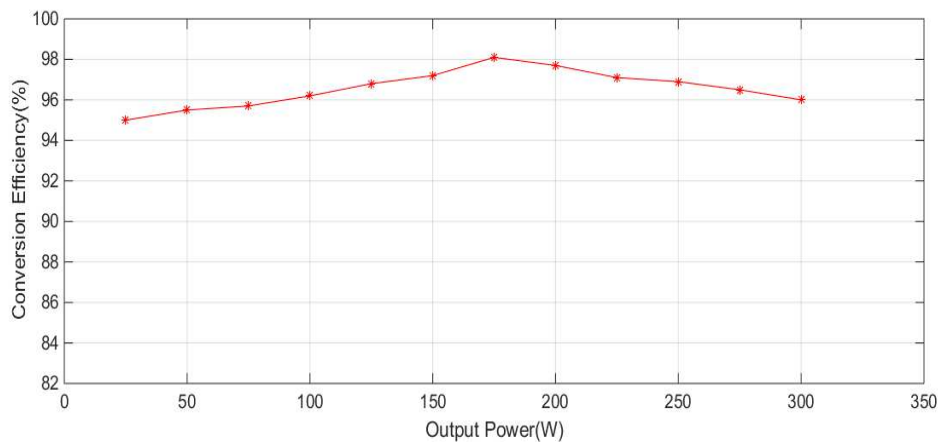
# پنجمین کنفرانس بین المللی مهندسی برق و کامپیوتر

5th International Conference

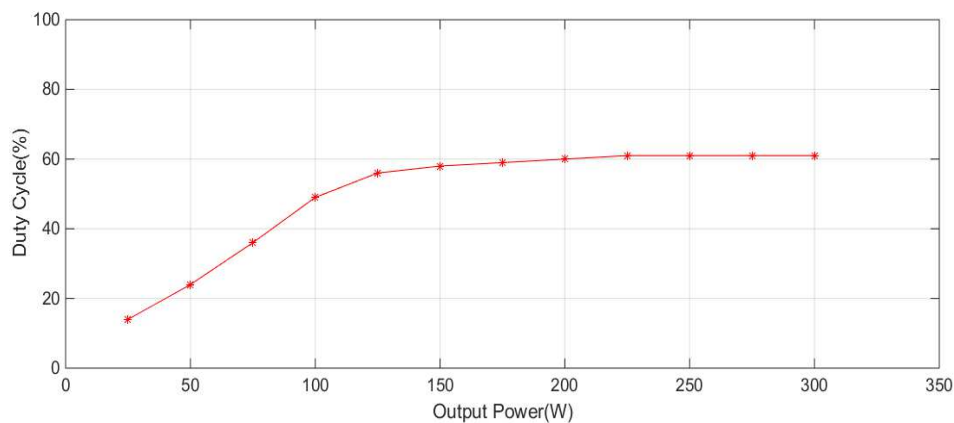
**Electrical engineering and computer**

With emphasis on native knowledge

بهمن ماه ۹۶ ، تهران - ایران



الف- نمودار راندمان مبدل در توان های مختلف



ب- نمودار دیوتی سایکل در توان های مختلف

شکل ۹- نمودار راندمان و دیوتی سایکل کلید مبدل در توان های مختلف

## ۵. نتیجه گیری

مبدل کلید-کوپل اینداکتور پیشنهادی یک مبدل DC/DC افزایشدهنده با ساختار ساده و با نسبت تبدیل ولتاژ بالا می باشد. با ترکیب تکنیک های کوپل اینداکتور و کلید-خازن در ساختار مبدل پیشنهادی موفق شدیم بدون بالا بردن نسبت دور کوپل اینداکتور به افزایش نسبت تبدیل ولتاژ دست یابیم. همچنین مبدل پیشنهادی می تواند برای کاربردهای مختلف توسعه و مورد استفاده قرار گیرد، برای این منظور به سادگی و با اضافه کردن سری و یا موازی ماژول ها با یکدیگر می توان به ساختارهای متنوعی دست یافت.

سرانجام یک نمونه از این مبدل شبیه سازی گردید و نتایج و عملکرد آن مورد بررسی و تایید قرار گرفت. ساختار پیشنهادی بسیار ساده طراحی شده است و این مبدل تنها از ۶ قطعه اصلی تشکیل می شود. نسبت تبدیل مبدل زمانی که نسبت دور کوپل اینداکتور ۳ است حدود ۱۱ می باشد و بیشینه راندمان مبدل حدود ۹۸٪ و راندمان در بار کامل حدود ۹۶٪ می باشد.

## ۱۲. مراجع

- 1.Hsieh, Y. P., Chen, J. F., Liang, T. J., & Yang, L. S. (2012). Novel high step-up DC-DC converter with coupled-inductor and switched-capacitor techniques. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(2), 998-1007.
- 2.Yang, L. S., Liang, T. J., Lee, H. C., & Chen, J. F. (2011). Novel high step-up DC-DC converter with coupled-inductor and voltage-doubler circuits. *IEEE Transactions on industrial Electronics*, 58(9), 4196-4206.
- 3.Li, D., Loh, P. C., Zhu, M., Gao, F., & Blaabjerg, F. (2013). Generalized multicell switched-inductor and switched-capacitor Z-source inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(2), 837-848.
- 4.Rosas-Caro, J. C., Mancilla-David, F., Mayo-Maldonado, J. C., Gonzalez-Lopez, J. M., Torres-Espinosa, H. L., & Valdez-Resendiz, J. E. (2013). A transformer-less high-gain boost converter with input current ripple cancelation at a selectable duty cycle. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(10), 4492-4499.
- 5.Young, C. M., Chen, M. H., Chang, T. A., Ko, C. C., & Jen, K. K. (2013). Cascade Cockcroft-Walton voltage multiplier applied to transformerless high step-up DC-DC converter. *IEEE transactions on industrial electronics*, 60(2), 523-537.
- 6.Fukuda, K., & Koizumi, H. (2013, November). Three-level buck-boost dc-dc converter with voltage-lift-type switched-inductor. In *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE* (pp. 1368-1373). IEEE.

7. Barreto, L. H., Praça, P. P., Henn, G. A., Câmara, R. A., Ranoyca, N. A. L. S., & Oliveira, D. S. (2011, March). High voltage gain boost converter battery charger applied to PV systems. In Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE (pp. 1526-1531). IEEE.
8. Li, W., Li, W., Xiang, X., Hu, Y., & He, X. (2014). High step-up interleaved converter with built-in transformer voltage multiplier cells for sustainable energy applications. IEEE Transactions on Power Electronics, 29(6), 2829-2836.
9. Hu, X., & Gong, C. (2015). A high gain input-parallel output-series DC/DC converter with dual coupled inductors. IEEE transactions on power electronics, 30(3), 1306-1317.
10. Hsieh, Y. P., Chen, J. F., Liang, T. J., & Yang, L. S. (2011). A novel high step-up DC-DC converter for a microgrid system. IEEE Transactions on Power Electronics, 26(4), 1127-1136.
11. Zhang, S., Xu, J., & Yang, P. (2012, December). A single-switch high gain quadratic boost converter based on voltage-lift-technique. In IPEC, 2012 Conference on Power & Energy (pp. 71-75). IEEE.
12. Luo, F. L. (2001). Six self-lift DC-DC converters, voltage lift technique. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 48(6), 1268-1272.
13. Hwu, K. I., Yau, Y. T., & Shieh, J. J. (2012, September). High step-up converter based on coupling inductor and bootstrap capacitors with active clamping. In Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2012 IEEE Third International Conference on (pp. 364-368). IEEE.
14. Hu, X., & Gong, C. (2014). A high voltage gain DC-DC converter integrating coupled-inductor and diode-capacitor techniques. IEEE transactions on power electronics, 29(2), 789-800.
15. Khezri, O., & Javidan, J. (2014). High-Conversion-Ratio Bidirectional DC-DC Converter With Dual Coupled Inductors. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 3(4), 251-258.
16. Baddipadiga, B. P. R. (2016). High-voltage-gain dc-dc power electronic converters-New topologies and classification (Doctoral dissertation, Missouri University of Science and Technology).
17. Kang, S. H., Maksimović, D., & Cohen, I. (2012). Efficiency optimization in digitally controlled flyback DC-DC converters over wide ranges of operating conditions. IEEE Transactions on Power Electronics, 27(8), 3734-3748.