

مبدل پیشنهادی SEPIC جدید با کلید زنی نرم و اشتراک جریان

امین اصفهانی زاده^۱ و مجید دلشاد^۲

^۱دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان(خوراسگان) ، amin.isfz@gmail.com

^۲دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان(خوراسگان) ، delshad@khuif.ac.ir

چکیده - در این مقاله مبدل سپیک با سلف کوپل شده جدید با کلید زنی نرم ارائه شده است. مبدل بصورت PWM کنترل می شود و برای ایجاد شرایط کلیدزنی نرم از مدار کمکی استفاده شده است. سوئیچ اصلی تحت شرایط ZVS و سوئیچ کمکی تحت شرایط ZCS روشن و خاموش می شوند. در نتیجه تلفات مبدل کاهش یافته و مبدل می تواند در فرکانس های بالا کار کند. علاوه بر این ها مبدل به صورت افزایشنده و کاهشنده کار می کند. از طرفی سوئیچ کمکی مقداری از جریان را تامین می کند به این ترتیب استرس جریان در سوئیچ اصلی را کاهش می دهد. در انتها به منظور تصدیق آنالیز تئوری مبدل پیشنهادی، نتایج شبیه سازی آن آورده شده است. کلید واژه- کلید زنی نرم تحت ولتاژ صفر (ZVS)، کلید زنی نرم تحت جریان صفر (ZCS)، مبدل سپیک.

مدار کمکی در مبدل پیشنهادی شامل یک سوئیچ ماسفت و دیود سری با آن ، سلف و خازن رزونانسی می باشد. در این مبدل سوئیچ کمکی زودتر روشن می شود تا با رزونانس سلف و خازن در مدار کمکی شرایط ولتاژ صفر (سوئیچینگ نرم ZVS) را برای روشن و خاموش شدن سوئیچ اصلی فراهم آورد. همچنین سوئیچ کمکی تحت شرایط جریان صفر (سوئیچینگ نرم ZCS) روشن و خاموش می شود. مبدل به صورت افزایشنده و کاهشنده کار می کند همچنین با تغییر سیکل وظیفه و نسبت دور ترانسفورمرها می توان ولتاژ خروجی مدار را تغییر داد.

۲- معرفی مبدل SEPIC^۲ پیشنهادی با روش کلید زنی نرم

سلول سوئیچ سوئیچینگ نرم در شکل (۱) نشان داده شده است. در سلول سوئیچ پیشنهادی، خازن اسنابر CS برای ZVS خاموش شدن سوئیچ اصلی به کار برده شده است زیرا خازن با تغییرات لحظه ای ولتاژ مخالفت می کند. همچنین خازن و سلف رزونانسی در مدار کمکی شرایط ZVS را برای روشن شدن سوئیچ اصلی فراهم می کنند. سلف رزونانسی سری با سوئیچ کمکی دارای جریان اولیه صفر می باشد در نتیجه سوئیچ کمکی تحت ZCS روشن می شود. ولتاژ منفی ایجاد شده توسط سلف

۱- مقدمه

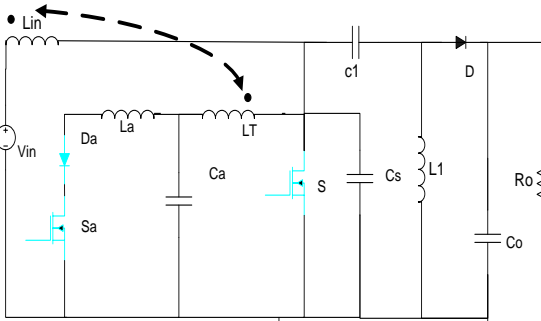
در مبدل های سوئیچینگ نرم با تکنیک های ZVT و ZCT یک مدار کمکی رزونانسی که فقط در وضعیت های سوئیچینگ برای کاهش ولتاژ به صفر (ZVT) و یا کاهش جریان به صفر (ZCT) استفاده می شوند به مدار اضافه می شود. بنابراین غیر از لحظات سوئیچینگ مبدل مثل یک مبدل PWM عادی کار می کند. در مبدل های ZVT با روشن کردن سوئیچ کمکی خازن خروجی سوئیچ اصلی دشارژ می شود تا شرایط ZVS را برای روشن شدن سوئیچ تامین کند و با اضافه کردن خازن دو سر سوئیچ اصلی سوئیچینگ نرم برای خاموش شدن سوئیچ تامین می شود. در مبدل های ZCT با روشن کردن سوئیچ کمکی جریان سوئیچ اصلی به صفر کاهش می یابد تا شرایط ZCS را برای خاموشی سوئیچ فراهم کند و با قرار دادن یک سلف سری با سوئیچ، شرایط سوئیچینگ نرم برای روشن شدن فراهم می شود. در ضمن در مبدل های ZVT و ZCT مدار کمکی شامل المان های رزونانسی و یک سوئیچ کمکی است که برای فراهم کردن سوئیچینگ نرم در لحظه ی سوئیچینگ استفاده می شود و اغلب قادر به ارسال انرژی از منبع ورودی به خروجی نیست [۱]-[۱۵].

از المان های پارازیتی صرف نظر شده است. ولتاژ ورودی در یک سیکل سوئیچینگ ثابت و برابر V_{in} فرض شده است.

خازنهای خروجی به اندازه کافی بزرگ هستند در نتیجه ولتاژ خروجی در یک سیکل سوئیچینگ ثابت و برابر V_0 در نظر گرفته می‌شود.

قبل از وضعیت اول فرض می‌شود که خازن رزونانسی C_a به وسیله جریان سلف ورودی به اندازه $V_{Ca} = V_{in}$ شارژ شده، دیود D هدایت می‌کند و سایر قطعات نیمه هادی هدایت نمی‌کنند. ولتاژ دو سر سلف کوپل شده در معادله (۱) آمده است:

$$V_{L_T} = -V_O \quad (1)$$



شکل ۳- مدار معادل وضعیت اول

وضعیت اول $[t_0 - t_1]$: جریان اولیه سلف رزونانسی در لحظه اول $I_{La}(t_0) = 0$ صفر است. در نتیجه سوئیچ کمکی S_a تحت شرایط ZCS روشن می‌شود و جریان سوئیچ در این بازه به صورت خطی با شیب V_{in}/L_a شروع به افزایش می‌کند. در انتهای این وضعیت جریان I_{Sa} ، ادر نظر گرفته می‌شود.

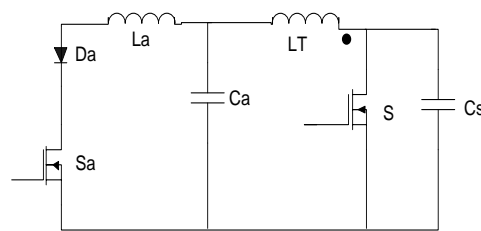
معادله جریان سوئیچ کمکی بدین شرح است:

$$I_{Sa} = \frac{V_{in}}{L_a} (t - t_0) \dots \dots \dots (2)$$

طول این وضعیت برابر است با:

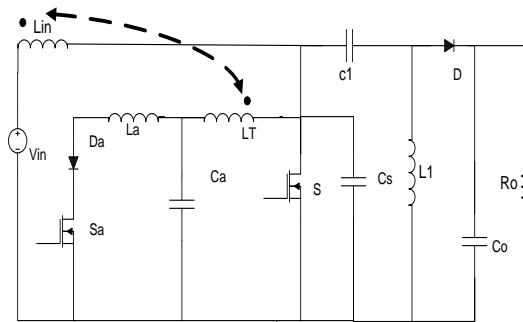
$$t_1 - t_0 = \frac{I_1 \cdot L_a}{V_{in}} \quad (3)$$

کوپل شده L_T در دو سر سلف رزونانسی جریان سلف رزونانسی را تا صفر کاهش داده و در نتیجه سوئیچ کمکی تحت ZCS خاموش می‌شود از طرفی سوئیچ کمکی مقداری از جریان ورودی را هدایت می‌کند که موجب به اشتراک گذاشتن جریان و کمک به سوئیچ اصلی و در نتیجه کاهش استرس جریان سوئیچ اصلی می‌گردد. همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده این سلول برای مبدل سپیک استفاده شده است.



شکل (۱): سلول سوئیچ پیشنهادی

مبدل سپیک پیشنهادی نشان داده شده در شکل (۲) شامل دو سوئیچ S و S_a و دو دیود D و D_a می‌باشد. C_s خازن اسنابر سوئیچ اصلی، C_o خازن فیلتر خروجی و C_a خازن کمکی است. از آنجاییکه مبدل مذکور در هنگام روشن خاموش شدن تحت شرایط کلید زنی نرم کار می‌کند، بنابراین فرکانس عملکرد مبدل بالا می‌باشد در نتیجه حجم و وزن المانهای مغناطیسی کاهش یافته و چگالی توان افزایش می‌یابد.



شکل (۲): مبدل سپیک جدید با کلید زنی ولتاژ صفر برای سوئیچ اصلی و کلیدزنی جریان صفر برای سوئیچ کمکی

۱-۲- عملکرد مبدل SEPIC پیشنهادی

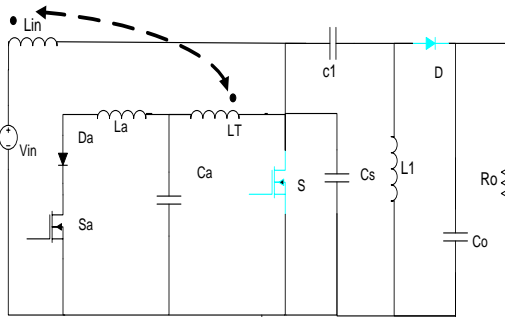
مبدل دارای پنج وضعیت عملکرد مختلف در سیکل سوئیچینگ است. برای ساده سازی تحلیل مبدل در حالت دائمی فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:

به طوری که جریان سلف رزونانسی (سوئیچ Sa) با شیب ثابت شروع به کاهش می‌کند. در پایان این بازه Sa می‌تواند تحت ZCS خاموش می‌شود.

روابط مهم این وضعیت به شرح زیر است:

$$I_{S_a}(t) = -\frac{V_{in}}{mL_a}(t - t_2) + I' \quad (9)$$

$$I_S(t) = \frac{V_{in}}{mL_a}(t - t_2) - I' \quad (10)$$

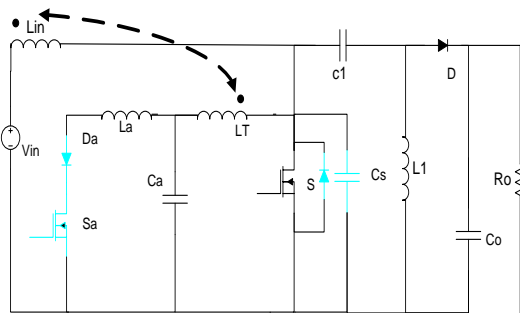


شکل ۵- مدار معادل وضعیت سوم

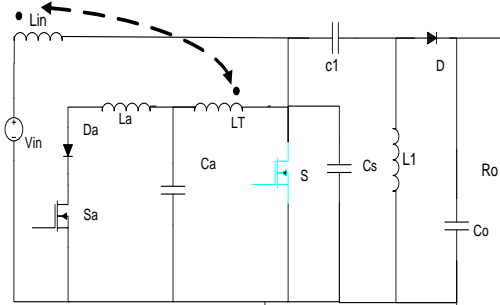
وضعیت چهارم $[t_3 - t_4]$: با صفر شدن جریان سوئیچ S در واقع جریان سلف L_T تغییر جهت داده و جریان از دیود بدنه سوئیچ S به خود سوئیچ S منتقل می‌شود. همزمان دیود D تحت ZVS روشن می‌شود. در این بازه همچنان جریان سوئیچ کمکی Sa با همان شیب قبلی کاهش می‌یابد تا به صفر برسد. با صفر شدن جریان سوئیچ کمکی Sa، این سوئیچ تحت ZCS خاموش می‌شود. با توجه به رابطه (۱۱) از این لحظه جریان سوئیچ S ثابت خواهد شد.

$$I_{in} - I_{S_a} = I_S \quad (11)$$

$$\Delta T_4 = t_4 - t_3 = \frac{I' L_a m}{V_{in}} \quad (12)$$



شکل ۶- مدار معادل وضعیت چهارم



شکل ۴- مدار معادل وضعیت دوم

وضعیت دوم $[t_1 - t_2]$: در این وضعیت جریان سوئیچ کمکی Sa به مقداری می‌رسد که دیود D تحت ZCS خاموش می‌شود. سلف رزونانسی L_a و خازن رزونانسی C_a در این بازه شروع به رزونانس می‌کنند. جریان در سوئیچ کمکی Sa به صورت سینوسی شروع به افزایش و ولتاژ C_a به صورت کسینوسی شروع به کاهش می‌کند تا اینکه در انتهای این وضعیت $(t = t_2)$ ولتاژ V_{C_a} به مقدار صفر رسیده، دیود بدنه سوئیچ S برای جلوگیری از منفی شدن ولتاژ دو سر این سوئیچ روشن شده و یک جریان منفی از سوئیچ می‌گذرد.

جریان سوئیچ و ولتاژ خازن در حالت رزونانس در زیر آمده است:

$$I_{S_a}(t) = I' + \frac{V_{C_a}}{z} \sin(\omega_o(t - t_1)) \quad (4)$$

$$V_{C_a}(t) = V_{ca} \cos(\omega_o(t - t_1)) \quad (5)$$

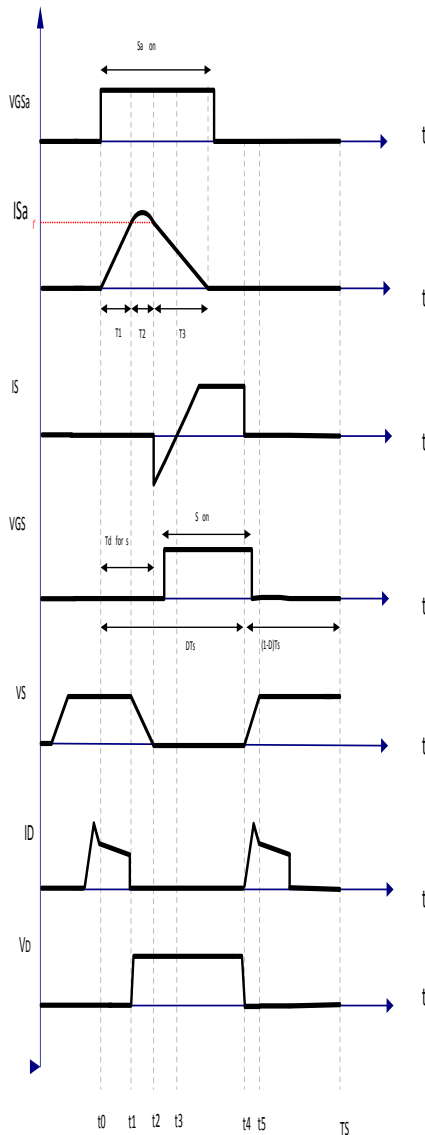
$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_a C_a}} \quad (6)$$

$$Z = \sqrt{\frac{L_a}{C_a}} \quad (7)$$

طول این بازه برابر است با:

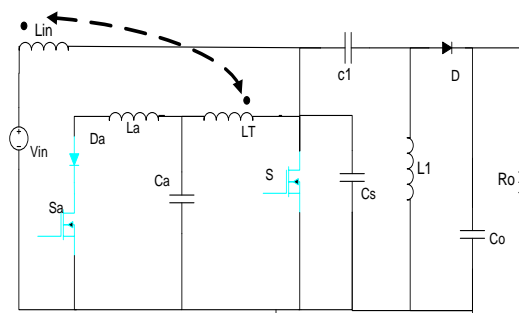
$$t_2 - t_1 = \pi/2 \sqrt{L_a C_a} \quad (8)$$

وضعیت سوم $[t_2 - t_3]$: با روشن شدن دیود بدنه سوئیچ S و عبور جریان منفی از سوئیچ، از این لحظه به بعد سوئیچ S می‌تواند تحت شرایط ZVS روشن شود. در این وضعیت، رزونانس قطع شده و جریان سوئیچ S شروع به افزایش تا مقدار صفر می‌کند. سلف رزونانسی L_a با یک ولتاژ منفی روبرو می‌شود



شکل (۸): شکل موج‌های تئوری مبدل سپیک پیشنهادی

وضعیت پنجم $[t_4 - t_5]$: با خاموش شدن سوئیچ S خازن اسنابر C_S سوئیچ S به آرامی شروع به شارژ شدن به صورت خطی می‌کند که باعث کاهش تلفات هدایتی می‌شود. در این وضعیت سوئیچ S تحت شرایط تقریبی ZVS خاموش می‌شود.



شکل ۷- مدار معادل وضعیت پنجم

شکل موج‌های تئوری مبدل در شکل (۹) آورده شده است.

۳- طراحی تئوری مبدل سپیک جدید

طراحی مبدل پایه، مطابق مبدل سوئیچینگ سخت است و تنها بایستی مدار کمکی طراحی گردد.

۳-۱- طراحی خازن اسنابر C_S

انتخاب مقدار خازن اسنابر به توان خروجی و سرعت

کوچکی از جریان سیم پیچ های اصلی مدار در آن جاری می شود در نتیجه این سیم پیچ اندازه کوچکی دارد.

۴- نتایج شبیه سازی مبدل سپیک پیشنهادی

مبدل پیشنهادی توسط نرم افزار Pspice شبیه سازی شده است و همانطور که از شکل موج های شبیه سازی مشخص است نتایج شبیه سازی، تحلیل تئوری را تایید می کند. Ca و Cs به ترتیب برابر با 1nF و 4nF قرار داده شده اند، سلف La برابر با 10μH می باشد. و سلف Lr برابر با 40μH و با سلف ورودی کوپل شده است. برای سوئیچ های Sa و S، IRF640 و برای دیود ها MUR860 که یک نوع دیود سریع می باشد انتخاب شده است. در شکل (۱۰) مبدل شبیه سازی شده نشان داده شده است. نتایج شبیه سازی در شکل های (۱۱) تا (۱۲) آمده است. همانطور که از شکل (۱۱) مشخص است در لحظه کلیدزنی جریان صفر می باشد به همین خاطر دیود بدنه روشن بوده و شرایط ZVS برقرار است و ولتاژ هم به خاطر خازن موازی با سوئیچ به کندی و با شیب بالایی رود و در نتیجه کلیدزنی در ولتاژ صفر در لحظه خاموش شدن برقرار است. همچنین با توجه به شیب جریان سوئیچ کمکی نیز مشخص است که بصورت ZCS روشن و خاموش می شود.

۵- مقایسه با همتای سوئیچینگ سخت

بازده مبدل سپیک پیشنهادی در مقایسه با مبدل سپیک سخت در شکل (۹) آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود بازده مبدل در شرایط سوئیچینگ نرم در بار کامل نسبت به مبدل در شرایط سوئیچینگ سخت افزایش یافته است.

خاموش - روشن شدن سوئیچ اصلی وابسته است. خازن اسنابر شرایط ZVS را برای لحظه خاموش شدن سوئیچ اصلی فراهم می کند. بنابراین مقدار آن می تواند به صورت زیر انتخاب شود:

$$C_{S,\min} = \frac{I_{SW} t_f}{2V_{SW}} \quad (13)$$

که t_f زمان نزول جریان سوئیچ می باشد. I_{SW} جریان سوئیچ قبل از خاموش شدن و V_{SW} ولتاژ سوئیچ بعد از خاموش شدن می باشند. در عمل برای تضمین کلیدزنی نرم مقدار خازن اسنابر بیشتر از C_{S,min} در نظر گرفته می شود.

۳-۲ طراحی مدار کمکی

سرعت افزایش جریان در مدار کمکی در بازه La به T1 بستگی دارد. مقادیر بزرگتر La طول بازه رزونانس (T2) را افزایش می دهند. این امر جریان موثر مدار کمکی را افزایش می دهد که به تلفات رسانایی منجر می شود. مقادیر La و Ca مشترکاً بازه رزونانسی T2 را تعیین می کنند. بازه رزونانسی باید تا حد ممکن کوچک باشد. این امر تلفات رسانایی را در سوئیچ کمکی به حداقل می رساند و اثربخشی سیکل وظیفه را به همان نسبت بهبود میدهد. طول بازه رزونانسی تقریباً یک چهارم دوره رزونانسی $\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{L_a C_a}\right)$ است.

مقدار Ca طوری انتخاب می شود که ولتاژ سوئیچ اصلی از یک محدوده مشخص شده تجاوز نکند. این مقدار براساس رابطه زیر بدست می آید:

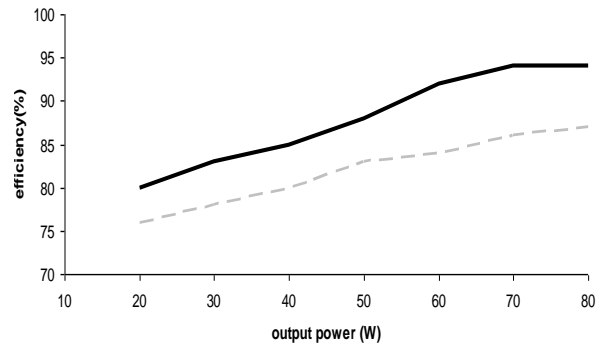
$$C_a = \frac{I \cdot t_f}{2V} \quad (15)$$

در این رابطه V ولتاژ و جریان در حالت پایدار و t_f زمان پایین آمدن سوئیچ اصلی می باشند.

سوئیچ کمکی باید دارای ظرفیت خازنی کوچکی باشد. تا اینکه تلفات دشارژ مربوط به خازن پارازیتی سوئیچ کاهش یابد. معیار اصلی برای انتخاب سوئیچ اصلی، مقدار پیک ولتاژ و جریان سوئیچ می باشد. دیود های مدار از نوع سریع هستند که بازیابی سریع دارند. سیم پیچ LT فقط باید تغییرات جریان و ریست جریان را انجام دهد. بنابراین سیم پیچ کوپل شده LT یک قسمت

۱۳۹۴-۲۰ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراگان)

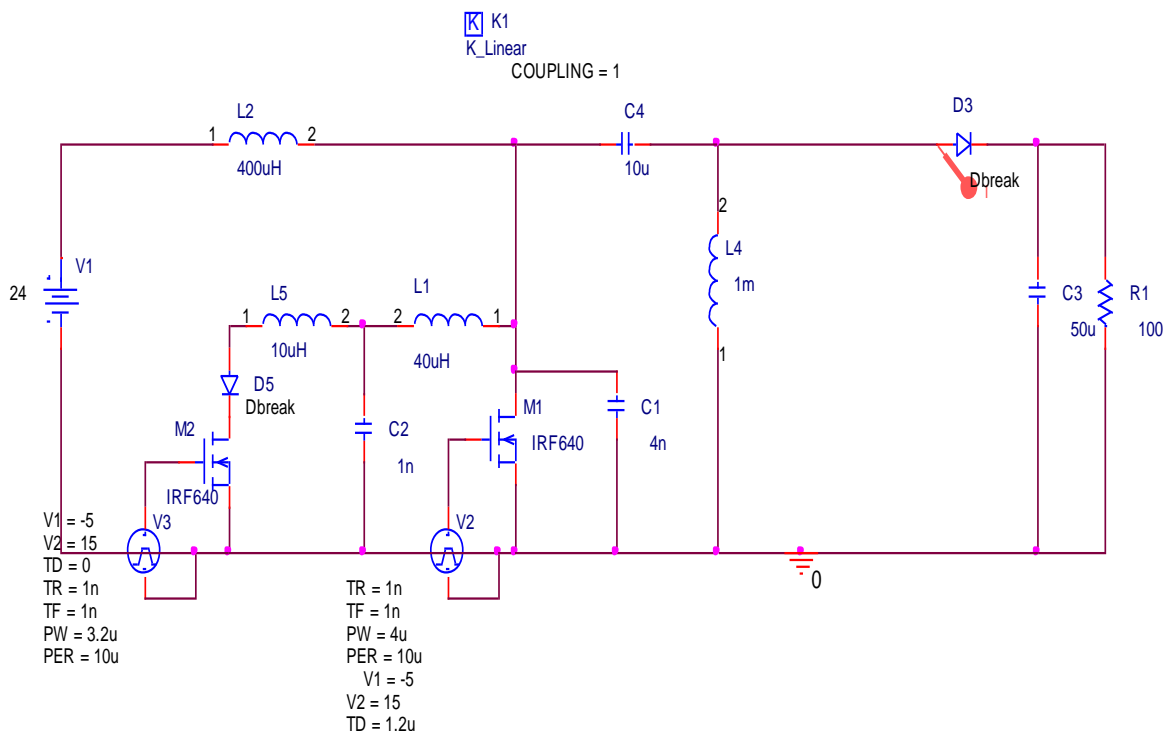
زنی نرم ارائه شده است. مبدل بصورت PWM کنترل می شود و برای ایجاد شرایط کلیدزنی نرم از مدار کمکی استفاده شده است. سوئیچ اصلی تحت شرایط ZVS و سوئیچ کمکی تحت شرایط ZCS روشن و خاموش می شوند. در نتیجه تلفات مبدل کاهش یافته و مبدل می تواند در فرکانس های بالا کار کند. علاوه بر این ها مبدل به صورت افزایشنده و کاهشنده کار می کند. از طرفی سوئیچ کمکی مقداری از جریان را تامین می کند به این ترتیب استرس جریان در سوئیچ اصلی را کاهش می دهد. در انتها به منظور تصدیق آنالیز تئوری مبدل پیشنهادی، نتایج شبیه سازی آن آورده شده است.



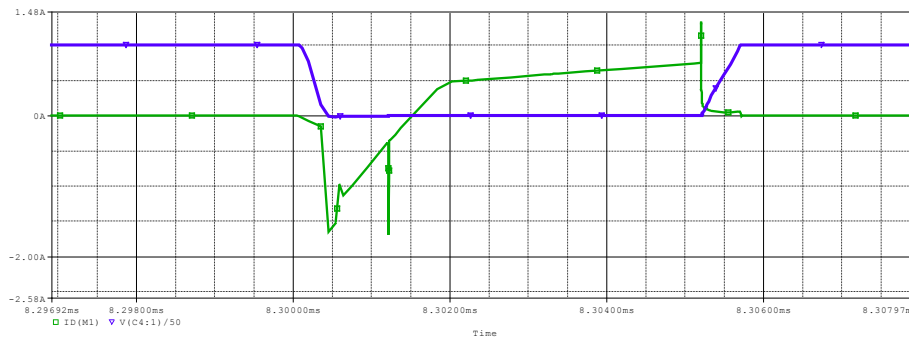
شکل (۹): بازده مبدل فلالی سبیک سوئیچینگ نرم پیشنهادی (خط ممتد) در مقایسه با مبدل در حالت سخت (خط چین)

۶- نتیجه گیری

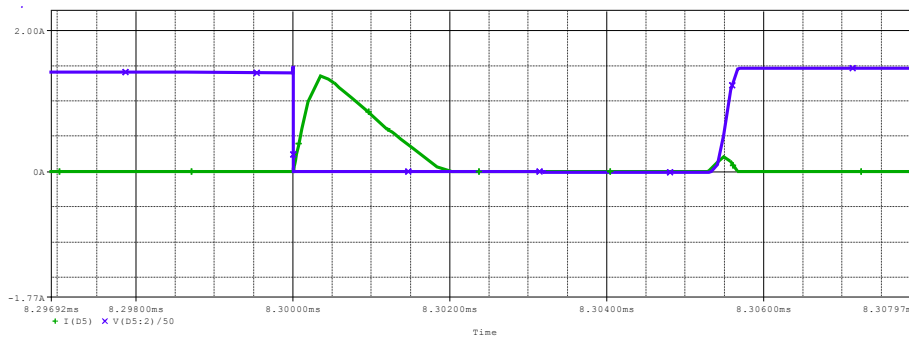
در این مقاله مبدل سبیک با سلف کوپل شده جدید با کلید



شکل ۱۰- شماتیک شبیه سازی شده مبدل پیشنهادی



شکل (۱۱): ولتاژ (خط ممتد) و جریان (خط چین) سوئیچ اصلی



شکل (۱۱): ولتاژ (خط ممتد) و جریان (خط چین) سوئیچ کمکی

- [8] MARTINS M.L., RUSSI J.L., HEY H.L.: 'Novel Zero-Current Switching (ZCS) PWM Switch Cell Minimizing Additional Conduction Loss', *Industrial Electronics, IEEE Transactions*, pp. 165–172
- [9] C. A. Canesin and I. Barbi, 'Novel Zero-current-switching PWM converters', *IEEE transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, pp. 372–381, Jun. 1997.
- [10] E. Adib and H. Farzanehfard, "Family of zero-current transition PWM converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 8, pp. 3055–3063, Aug. 2008
- [11] H. S. Choi and B. H. Cho, "Novel zero-current-switching (ZCS) PWM switch cell minimizing additional conduction loss," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 1, pp. 165–172, Feb. 2002.
- [12] P. Das and G. Moschopoulos, "A zero-current-transition converter with reduced auxiliary circuit losses," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 4, pp. 1464–1471, Jul. 2007.
- [13] WANG CM, SU JH, YANG CH: 'A novel ZCS-PWM flyback converter with a simple ZCS-PWM auxiliary circuit'. *Int. Conf. Power Electronics and Drives Systems*, pp. 805–810, 2006.
- [14] C. M. Wang, "A new family of zero-current-switching (ZCS) PWM converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 52, no. 4, pp. 1117–1125, Aug. 2005
- [15] E. Adib, H. Farzanehfard, "Family of zero-voltage transition pulse width modulation converters with low auxiliary switch voltage stress," *IET Power Electron*. Vol. 4, no. 4, pp. 447–453, 2011.

- [1] BARBI I, BOLACELL J.C. and MARTINS D.C., ET AL. 'Buck quasi-resonant converter operating at constant frequency: analysis, design and experimentation'. *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC)*, pp. 873–880, 1989.
- [2] TSENG C.J., CHEN C.L.: 'Novel ZVT-PWM converters with active snubbers', *IEEE Trans. Power Electron.* 13, (5), pp. 861–869, 1998.
- [3] YANG SP, LIN JL, CHEN SJ: 'A novel ZCZVT forward converter with synchronous rectification', *IEEE Trans. Power Electron.*, 21, (4), pp. 912–922, 2006.
- [4] E. Adib, H. Farzanehfard: 'Family of isolated zero-voltage transition PWM converters', *IET Power Electron*, Vol. 1, No. 1, pp. 144–153, 2008.
- [5] E. Adib, H. Farzanehfard: 'Family of Soft-Switching PWM Converters With Current Sharing in Switches', *IEEE Trans. Power Electron*, VOL. 24, NO. 4, APRIL 2009.
- [6] E. Adib, H. Farzanehfard: 'New zero voltage switching PWM flyback converter', *1st Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference*
- [7] Qian Sun, Huai Wang: 'A ZCS Full-Bridge PWM Converter with Self-Adaptable Soft-Switching Snubber Energy', *Power Electronics Specialists Conference. PESC 2008. IEEE*, pp. 3001–3007, 2008

مراجع



چهارمین کنفرانس ملی ایده های نو در مهندسی برق



۱۳۹۴-۲۰ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)