

## ارایه یک مبدل جدید ZETA با کلیدزنی نرم و بدون سوئیچ کمکی

سجاد رحیمی ریگی<sup>۱</sup>، مجید دلشاد<sup>۲</sup>

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان) jojsajad@yahoo.com

آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان) دانشگاه delshad@khuisf.ac.ir

چکیده - این مقاله یک مبدل  $PWM ZETA$  که به صورت  $ZCS$  کلید زنی می گردد را ارائه می دهد. این مبدل به دلیل داشتن یک سوئیچ فعال و نداشتن سوئیچ کمکی نسبت به بقیه مبدل هایی که در مدار کمکی شان از سوئیچ کمکی استفاده می شود دارای مزیت است و تلفات هدایتی را حتی نسبت به نوع مبدل های چند سوئیچه با کلید زنی نرم کاهش می دهد. از طرفی نیاز به مدار درایو اضافی نیز نمی باشد. مبدل شرایط کلید زنی نرم را با حداقل قطعات، بدون فیلتر سلفی اضافی در خروجی و با استرس ولتاژ و جریان پایین ایجاد می کند. در مبدل پیشنهادی، مدار کمکی استفاده شده شرایط کلید زنی نرم را برای مبدل فراهم می کند و استرس ولتاژ و جریان بالایی را به مبدل تحمیل نمی کند. با توجه به اینکه تمام المانهای نیمه هادی این مبدل به صورت نرم کلید زنی می شوند، فرکانس کلید زنی به راحتی افزایش یافته و چگالی توان این مبدل را افزایش می دهد. مبدل پیشنهادی توسط نرم افزار  $PSPICE$  شبیه سازی شده شده است. نتایج شبیه سازی تحلیل تئوری را تایید می کند.

کلید واژه - مبدل زتا، ZCS, ZVS

یک راه کار برای افزایش فرکانس سوئیچ های IGBT

با کاهش تلفات کلید زنی، روش های گوناگون تکنیک  $ZCS$  ارائه شده است که یکی از آنها مقاله [۴] می باشد که در آن سوئیچ اصلی با یک سلف رزونانسی سری شده و سوئیچ کمکی با یک خازن رزونانس به صورت سری قرار گرفته است. عیب اصلی تکنیک  $ZCS$  استرس جریان بالا در سوئیچ اصلی و استرس ولتاژ بالا روی دیود هاست.

روش هایی که در مقاله های [۶] - [۸] ارائه شده است که در  $ZCS$  جریان رزونانس فقط در مدار کمکی جاری می شود در حالیکه شدت جریان در سوئیچ اصلی حذف می شود. دو دیود قدرت در مسیر توان قرار داده شده است که باعث افزایش تلفات هدایتی دیود ها می شود.

در مقاله [۹] نشان داده شده که پیک جریان سوئیچ اصلی با استفاده از یک سلف اضافی به طور اساسی کاهش می یابد، متأسفانه این راه حل در کاهش تلفات رسانایی IGBT موثر نیست زیرا ولتاژ IGBT تقریباً مستقل از جریان است.

در مبدل پیشنهادی هر دو سوئیچ اصلی و کمکی به صورت  $ZCS$  روشن می شوند و به خاطر آن که جریان گردشی

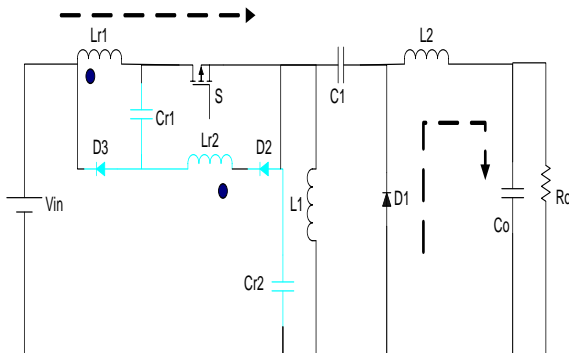
۱- مقدمه

اخیراً مدل های مختلفی از تکنیک های سوئیچینگ نرم برای سوئیچ های قدرت ارائه شده که بتوانند سبک تر و کوچکتر بوده و بازده بیشتری داشته باشند این تکنیک ها به عملکرد با بازده بالا کمک می کند و سایز مبدل را کاهش می دهد، در کل سوئیچینگ نرم می تواند به دو گروه عمده تقسیم شود.

تکنیک سوئیچینگ در ولتاژ صفر ( $ZVS$ ) [۱] - [۳] و تکنیک سوئیچینگ در جریان صفر ( $ZCS$ ) [۴] - [۸].

تکنیک  $ZVS$  برای نیمه هادیهای مثل ماسفت که افت آنها به خاطر خازن بزرگ خروجی آنهاست، مفید تر است در حالی که  $ZCS$  برای نیمه هادیهای مثل ترانزیستور دو قطبی با گیت ایزوله شده (IGBT) مناسب ترند در حالیکه تلفات آنها در لحظه خاموش شدن به دلیل وجود جریان دنباله ای بالاست. امروزه IGBT ها به خاطر ولتاژ بالا و کاربردهای آن با توان بالا در حال جایگزین شدن به جای ماسفت ها هستند چون IGBT ها در مقایسه با ماسفت ها افت ولتاژ و چگالی توان بیشتر و هزینه کمتری دارند.

۲۰ و ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

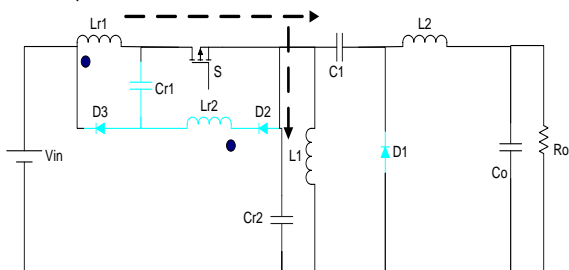


شکل (۲) مدار معادل وضعیت اول مبدل پیشنهادی وضعیت دوم: این وضعیت با خاموش شدن دیود D1 آغاز می‌شود و یک رزونانس بین Lr1 و Cr2 شروع و ولتاژ Cr2 شروع به افزایش می‌نماید جریان Lr1 برابر جریان شارژ خازن Cr2 و جریان بار می‌گردد.

$$I_{Lr1} = \frac{V_{in}}{Z_1} \sin(\omega_1(t - t_1)) + I_o \quad (3)$$

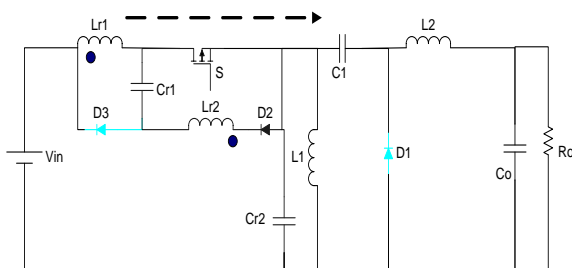
$$V_{Cr1}(t) = -V_{in} \cdot \cos(\omega_1(t - t_1)) + V_{in} \quad (4)$$

$$Z_1 = \sqrt{\frac{Lr1}{Cr2}} \quad \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{Lr1 \cdot Cr2}} \quad (5)$$



شکل (۳) مدار معادل وضعیت دوم مبدل پیشنهادی

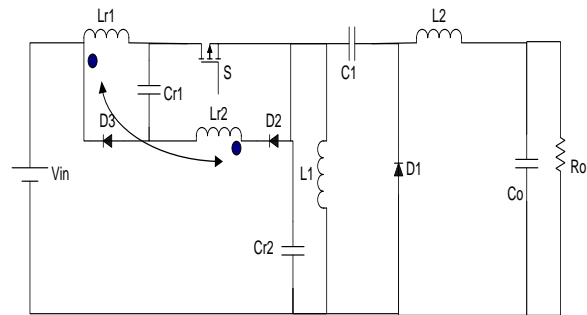
وضعیت سوم: این وضعیت با روشن شدن D2 تحت شرایط ZVS آغاز می‌گردد. در این وضعیت یک رزونانس بین Cr2 و Lr1 اتفاق افتاده و ولتاژ خازن Cr2 همچنان افزایش می‌یابد همچنین یک رزونانس بین Lr2 و Cr1 اتفاق افتاده و دشارژ می‌شود در پایان این وضعیت ولتاژ Cr2 برابر Vin گردیده و ولتاژ Cr1 نیز صفر می‌شود.



سوئیچینگ نرم فقط از مدار کمکی عبور می‌کند، تلفات هدایتی و استرس جریان سوئیچ اصلی مینیمم می‌شود و استرس ولتاژ دیود اصلی نیز نسبت به مبدل‌های قبلی ۱۵٪ کاهش می‌یابد. آنجایی که کنترل مبدل به صورت PWM باقی مانده، پیاده‌سازی مدار و کنترل آن آسان است.

## ۲- معرفی مبدل پیشنهادی ZETA

مبدل پیشنهادی همراه با مدار کمکی در شکل (۱) نشان داده شده است. مدار کمکی مبدل پیشنهادی دارای دو عدد دیود، دو خازن رزونانس و دو سلف تزویج شده می‌باشد. در این مبدل سوئیچ به صورت کلیدزنی در جریان صفر روشن می‌شود و بصورت کلیدزنی در ولتاژ صفر خاموش می‌گردد.



شکل (۱) نمای شماتیک مبدل ZETA پیشنهادی

## ۳- عملکرد مبدل پیشنهادی

برای سادگی تحلیل سلف فیلتر خروجی به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته می‌شود در نتیجه جریان آن در یک سیکل سوئیچینگ ابت می‌باشد. همچنین ولتاژ ورودی و خروجی نیز ثابت در نظر گرفته می‌شود.

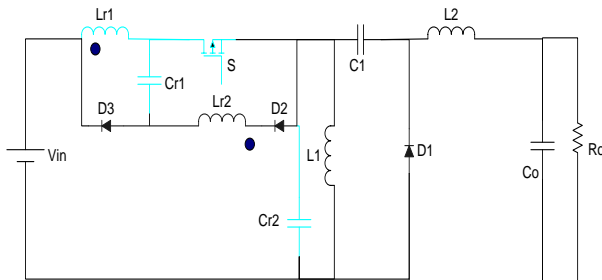
قبل از وضعیت اول ولتاژ خازن Cr2 صفر بوده و Cr1 نیز تا سطح Vin شارژ شده و دیود D روشن و بقیه المانها خاموشند.

وضعیت اول: در این وضعیت S1 تحت شرایط ZCS روشن می‌شود. در این وضعیت جریان خطی و با شیب Vin/Lr1 افزایش یافته و جریان دیود D با شیب -Vin/Lr1 کاهش می‌یابد. با رسیدن جریان S1 به IO و خاموش شدن دیود تحت شرایط ZCS پایان می‌پذیرد.

$$I_{S1} = \frac{V_{in}}{Lr1} (t - t_0) \quad (1)$$

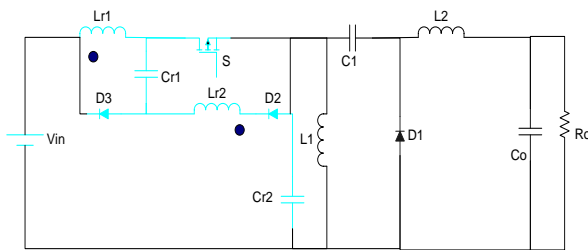
$$\nabla t_1 = t_1 - t_0 = \frac{I_o \cdot Lr1}{V_{in}} \quad (2)$$

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)



شکل (۷) مدار معادل وضعیت ششم مبدل پیشنهادی

وضعیت هفتم: در این وضعیت جریان  $Lr2$  صفر می شود و دیودهای  $D3$  و  $D2$  تحت خاموشی می شوند. در این وضعیت جریان دیود  $D1$  برابر جریان بار می باشد و مبدل مانند یک مبدل ZETA معمولی کار می کند.



شکل (۷) مدار معادل وضعیت هفتم مبدل پیشنهادی

#### ۴- ملاحظات طراحی

مدار پیشنهادی مشابه یک مبدل زتا متداول طراحی می شود، اما المان های کمکی شامل خازن ها و سلف های کوپل شده باید طراحی شوند.

#### ۴-۱- طراحی خازن های کمکی

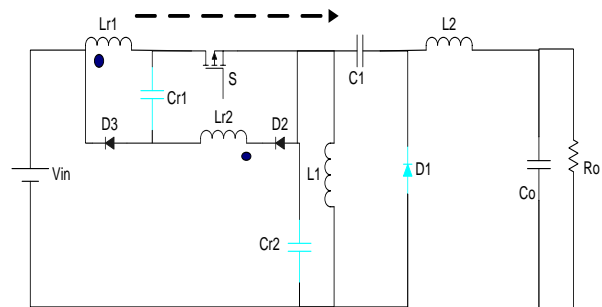
خازن  $Cr1$ ، شرایط ZVS را برای لحظه خاموش شدن سوئیچ ها فراهم می کنند. بنابراین مقادیر آنها می تواند شبیه به خازن های اسنابر بصورت زیر انتخاب شود

$$C_{r1,2} > C_{r,min} = \frac{I_{sw} t_f}{2V_{sw}} \quad (13)$$

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 ها خیلی بیشتر از  $C_{r,min}$  در نظر گرفته می شود.

شکل (۴) مدار معادل وضعیت سوم مبدل پیشنهادی

وضعیت چهارم: این وضعیت با رسیدن ولتاژ  $Cr2$  به  $V_{in}$  آغاز می شود در این حالت دیود  $D3$  تحت شرایط ZVS روشن شده و جریان  $Lr1$  که بزرگتر از جریان بار بوده در دیودهای  $D2$  و  $D3$  جاری می شود. در این حالت جریان سلفها ثابت باقی می ماند



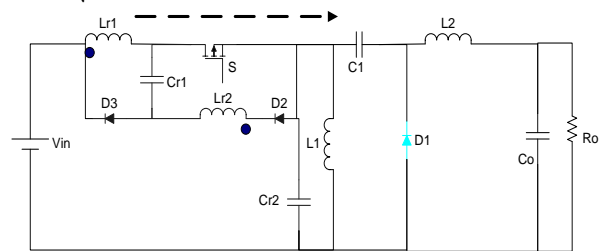
شکل (۵) مدار معادل وضعیت چهارم مبدل پیشنهادی

وضعیت پنجم: در این وضعیت سوئیچ  $S1$  خاموش می شود و انرژی  $Lr1$  به  $Lr2$  منتقل می شود. در این وضعیت دو مدار رزونانس ایجاد می گردد رزونانس بین  $Lr1$  و  $Cr2$  اتفاق افتاده و ولتاژش کاهش می یابد. همچنین جریان  $Lr2$  و جریان بار ولتاژ  $Cr1$  را کاهش میدهد با توجه به ولتاژهای  $Cr1$  و  $Cr2$ ، سوئیچ تحت شرایط ZVS خاموش می شود.

$$I_{Lr1} = I_1 \cos(\omega_3(t - t_4)) \quad (6)$$

$$V_{Cr2}(t) = I_1 \cdot Z_3 \sin(\omega_3(t - t_3)) \quad (7)$$

$$Z_3 = \sqrt{\frac{Lr1}{Cr1}} \quad \omega_3 = \frac{1}{\sqrt{Lr1 \cdot Cr1}} \quad (8)$$

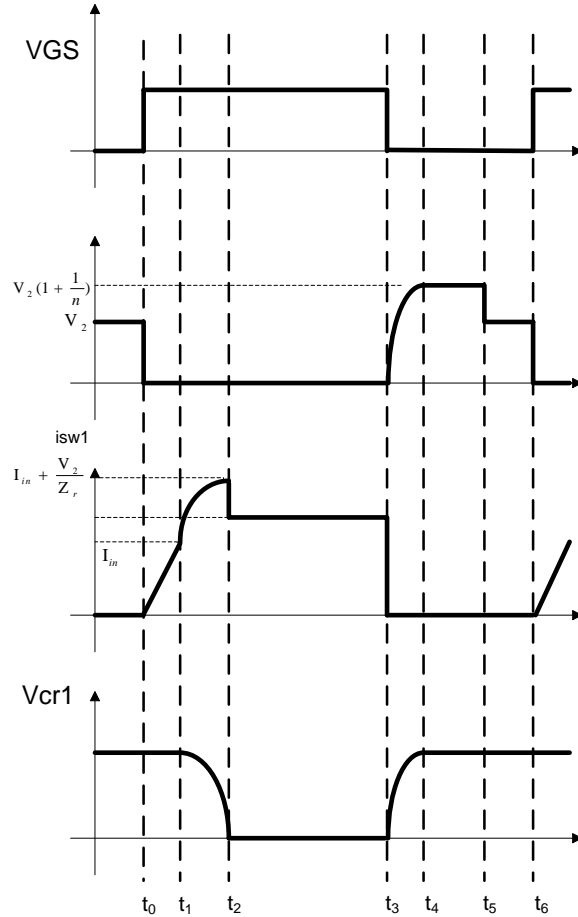


شکل (۶) مدار معادل وضعیت پنجم مبدل پیشنهادی

وضعیت ششم: در این وضعیت دیود  $D$  تحت شرایط ZVS روشن می شود و جریان بار بعلاوه جریان  $Lr2$  در آن جاری می گردد و انرژی  $Lr2$  به  $Lr1$  منتقل می گردد و جریان  $Lr1$  صفر می گردد و جریان  $Lr2$  نیز خطی کاهش می یابد.

۲۰۲۱ و آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد صغمان (خوراسگان)

المان / مشخصات	نام قطعه / مقدار
S	IRF640
D <sub>1</sub> -D <sub>3</sub>	MUR860
C <sub>r1</sub> -C <sub>r2</sub>	10nF
L <sub>r1,2</sub>	10-240μH
m	1
L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub>	1mH
ولتاژ ورودی (V <sub>i</sub> )	24V
ولتاژ خروجی (V <sub>o</sub> )	48V
فرکانس کلیدزنی	100KHz

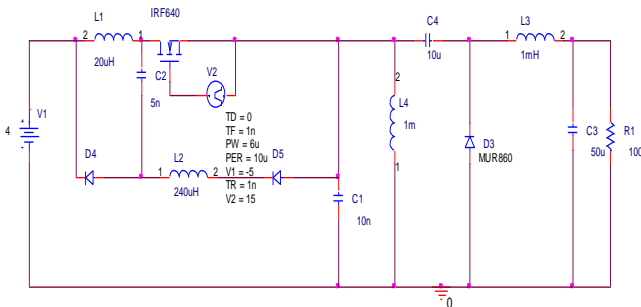


شکل (۸-۴) موجهای کلیدی مبدل زتا پیشنهادی

#### ۵- نتایج شبیه سازی مبدل زتا پیشنهادی

برای اثبات درستی تحلیل های صورت گرفته در بخش های قبل مبدل پیشنهادی طراحی و سپس در نرم افزار PSpice شبیه سازی شده است. مشخصات و مقادیر المان های مبدل طراحی شده در جدول (۴-۱) آورده شده است. نمای شماتیک مبدل شبیه سازی شده در شکل (۴-۹) نشان داده می شود.

K1  
K\_Linear  
COUPLING = 1



شکل (۴-۹) شماتیک مبدل شبیه سازی شده پیشنهادی

شکل موج های شبیه سازی شده ولتاژ و جریان سوئیچ S<sub>1</sub> در جهت مستقیم در شکل های (۴-۱۰) و (۴-۱۱) نشان داده می شوند. همانطور که مشاهده می شود، مطابق با نتایج تئوری

#### ۴-۲-۴-۲-۴- طراحی سلف های کمکی

سلف L<sub>r1</sub>، شرایط ZCS را برای لحظه روشن شدن سوئیچ فراهم می کند. این سلف می تواند مطابق با رابطه ارایه شده برای اسنایرها بصورت زیر انتخاب شوند:

$$L_{r1,3} > L_{r,min} = \frac{V_{SW} t_r}{I_{SW}} \quad (14)$$

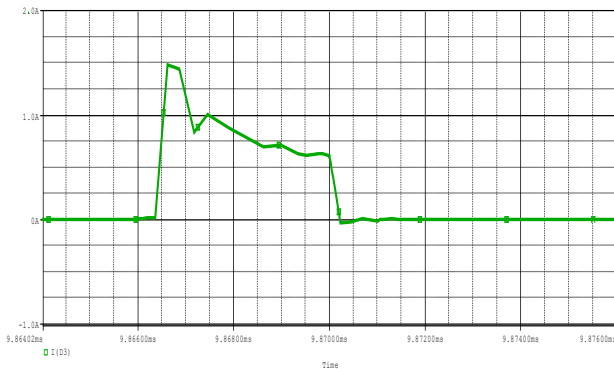
که زمان صعود جریان سوئیچ است. در عمل مقادیر L<sub>r1</sub> خیلی بزرگتر از L<sub>r,min</sub> در نظر گرفته می شوند.

مقدار سلف L<sub>r2</sub> به صورت زیر محاسبه می شود:

$$L_{r1} = m^2 \cdot L_{r2} \quad (15)$$

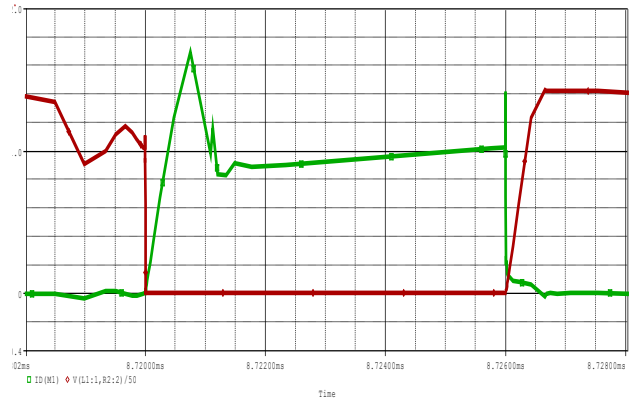
المان های مبدل طراحی شده در جدول (۱) نمایش داده شده است.

جدول (۱) مشخصات و مقادیر المان های مبدل پیشنهادی



شکل (۴-۱۳) شکل موج دیود D3

سوئیچ مبدل در شرایط ZCS روشن و در شرایط ZVS تقریبی خاموش می شود.

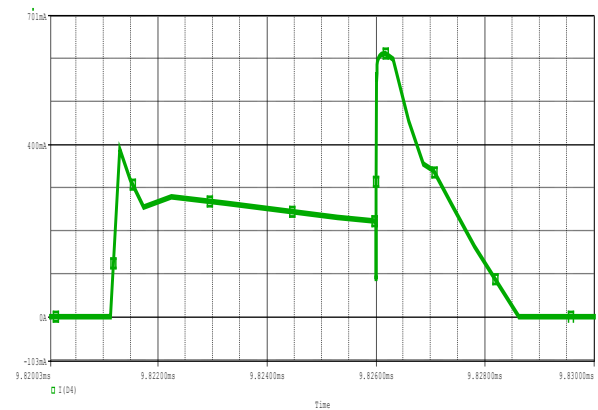


شکل (۴-۱۰) شکل موج های شبیه سازی ولتاژ درین- سوس (شکل ممتد) و جریان (شکل خط چین) سوئیچ S1

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک مبدل زتا با کلید زنی نرم و بدون استفاده از سوئیچ کمکی ارائه شده است. این مبدل بصورت PWM کنترل می شود و برای ایجاد شرایط کلیدزنی نرم در آن از یک مدار کمکی بدون هیچ سوئیچ اضافه ای استفاده شده است. این مدار کمکی شرایط کلیدزنی نرم را برای سوییچها فراهم می کند و استرس ولتاژ و جریان بالایی به مبدل تحمیل نمی کند. سوئیچ مبدل در شرایط ZCS روشن و در شرایط ZVS تقریبی خاموش می شود. همچنین دیود کمکی تحت شرایط ZCS روشن می شود. در نهایت به منظور تصدیق آنالیز تئوری مبدل پیشنهادی، نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی آن آورده شده است.

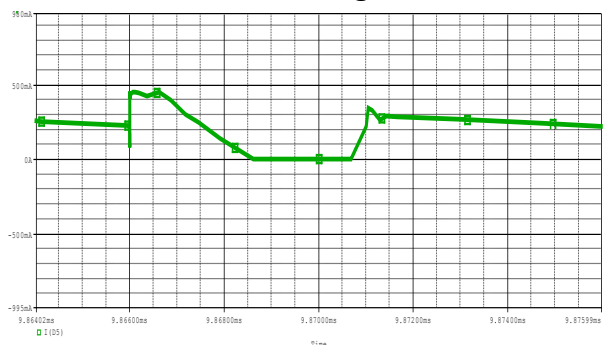
شکل موج شبیه سازی دیودهای D4, D5 و D3 به ترتیب در شکل های (۴-۱۱) و (۴-۱۲) و (۴-۱۳) آورده شده است. همانطور که مشاهده می گردد این دیودها نیز بصورت ZCS خاموش و روشن می گردند.



شکل (۴-۱۱) شکل موج دیود D4

## مراجع

- [1] K. H. Liu and F. C. Lee, "Zero-voltage switching technique in DC/DC converters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 53, pp. 293-304, July 1990.
- [2] D. C. Martins, F. J. M. Seixas, J. A. Brilhante, and I. Barbi, "A family of DC-to-DC PWM converters using a new ZVS commutation cell," in Proc. IEEE PESC'93, 1993, pp. 524-530.
- [3] G. Hua, C. S. Leu, Y. Jiang, and F. C. Lee, "Novel zero-voltage-transition PWM converters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 9, pp. 213-219, Mar. 1994.
- [4] I. Barbi, J. C. Bolacell, D. C. Martins, and F. B. Libano, "Buck quasiresonant converter operating at constant frequency: Analysis, design and experimentation," in Proc. IEEE PESC'89, 1989, pp. 873-880.
- [5] G. Ivensky, D. Sidi, and S. Ben-Yaakov, "A soft switcher optimized for IGBT's in PWM topologies," in Proc. IEEE APEC'95, 1995, pp. 900-906.
- [6] C. A. Canesin, C. M. C. Duarte, and I. Barbi, "A new family of pulswidth-modulated zero-current-switching DC/DC converters," in Proc. IEEE IPEC, 1995, pp. 1379-1384.



شکل (۴-۱۲) شکل موج دیود D5



- zero-voltage-switching and zero-current switching,” in Proc. IEEE PESC’94, 1994, pp. 1196–1204.
- [11] K. Wang, G. Hua, and F. C. Lee, “Analysis, design and ZCS-PWM boost converters,” in Proc. IEEJ Int. Power Electronics Conf., 1995, pp. 1202–1207.
- [12] H. S. Choi and B. H. Cho, “Zero current switching (ZCS) PWM switch cell minimizing additional conduction loss,” in Proc. KIFE Power Electronics Autumn Conf., 2000, pp. 159–162.
- [7] C. A. Canesin and I. Barbi, “Novel zero-current-switching PWM converters,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 44, pp. 372–381, June 1997.
- [8] F. T. Wakabayashi, M. J. Bonato, and C. A. Canesin, “A new family of zero-current-switching PWM converter,” in Proc. IEEE PESC’99, 1999, pp. 451–456.
- [9] R. C. Fuentes and H. L. Hey, “An improved ZCS-PWM commutation cell for IGBT’s applications,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 14, pp. 939–948, Sept. 1999.
- [10] K. Wang, F. C. Lee, G. Hua, and D. Borojevic, “A comparative study of switching losses of IGBT’s under hard-switching,