

طراحی و آنالیز یک مبدل فوروارد با کلیدزنی نرم و اسنابر بازیابی انرژی

داوود عطریان افیانی، دکتر مجید دلشاد
D.Atrian04@yahoo.com
Delshad2khuisf.ac.ir

چکیده - امروزه منابع تغذیه سوئیچینگ کاربرد زیادی در صنعت دارند که یکی از پرکاربردترین آنها مبدل فوروارد می باشد، مبدل فوروارد یک مبدل ایزوله می باشد و اساس طراحی آن بر پایه مبدل باک است [۱] با این تفاوت که ترانسفورمر و دیود در قسمت خروجی قرار می گیرد بزرگترین مزیت مبدل فوروارد داشتن ریپل جریان خروجی پایین و ایزوله بودن خروجی از ورودی می باشد که مساله موجب گردید است تا در کاربردهای جریان بالا ولتاژ پایین مورد استفاده قرار گیرند، هدف از این تحقیق استفاده از یک مدار کمکی مناسب جهت ایجاد شرایط کلیدزنی نرم و حذف اسپایک های ناشی از سلف نشستی ترانس و بازگردانی مناسب انرژی به ورودی می باشد، [۲] مدار کمکی تنها استرس ناچیزی روی ولتاژ سوئیچ ها ایجاد می نماید، در این تحقیق مدار پیشنهادی بطور کامل تجزیه و تحلیل گردیده و برای اثبات درستی عملکرد آن در نرم افزار PSPICE شبیه سازی گردید و معادلات تئوری در روند تحقیق به نمایش در آمده است و از آن های کلیدی مبدل فوروارد، سوئیچینگ نرم، ZCS ZVS، مدار کمکی اسنابر

۱- مقدمه

در این فصل یک مبدل فوروارد با کلید زنی نرم طراحی و پیاده سازی می گردد. مبدل فوروارد پیشنهادی تنها دارای یک سوئیچ می باشد و یک مدار کمکی که برای فراهم کردن شرایط کلید زنی نرم استفاده می شود، که دارای مزایای ذیل می باشد:

- تامین شرایط سوئیچینگ نرم توسط مدار کمکی برای سوئیچ قدرت
- توانایی کاربرد در مبدل های جریان بالا
- کلید زنی سوئیچ ها بصورت PWM
- عدم استفاده از سوئیچ کمکی در مدار کمکی

در این فصل ابتدا مبدل فوروارد پیشنهادی در بخش ۴-۲ معرفی و در بخش ۴-۳ بصورت تئوری تحلیل می شود، سپس در بخش ۴-۴ ارائه می گردد. همچنین به منظور تأیید تحلیل تئوریک مبدل پیشنهادی، در بخش ۴-۵ نتایج شبیه سازی آورده شده است.

۲- توصیف مبدل فوروارد پیشنهادی

در شکل شماره (۴-۱) مبدل فوروارد با سوئیچینگ نرم نشان داده شده است. با توجه به شکل یک مبدل فوروارد و یک مدار کمکی وجود دارد که با ترکیب دو اندوکتانس $Lr1$ و $Lr2$ و $Lr5$ با نسبت $1:n$ و اندوکتانس $Lr4$ و $Lr3$ با نسبت $1:m$ و دو خازن رزونانسی $Cr1$ و $Cr2$ و دیود های D و $D1$ و $D2$ و $D3$ و $D4$ به نمایش درآمده است. این مبدل دارای هفت حالت عملکرد در یک دوره سوئیچینگ می باشد. در شکل شماره ۲ نمودارهای حالت تئوری این مبدل بیان گردیده است.

مدار معادل هر حالت عملکرد نیز بطور کامل پس از بیان هر وضعیت به نمایش درآمده است. برای تجزیه و تحلیل این مبدل فرض بر این است که در این مدار یک اندوکتانس سلفی با مقدار بزرگ وجود داشته که جریان در یک سوئیچینگ را برابر nI_o می کند. در ضمن میزان ولتاژ ورودی ثابت فرض شده است و برابر $V_{in}(1+m)$ در یک سیکل سوئیچینگ می باشد.

قبل از اینکه حالت اول را تفسیر کنیم فرض می شود ولتاژ خازن $Cr1$ برابر با صفر بوده و ولتاژ خازن $Cr2$ برابر $V_{in}(1+m)/n$

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

می باشد. دیود اصلی و تمام نیمه هادی های مدار نیز خاموش می باشد.

۲-۲- وضعیت اول ($t_0 \leq t < t_1$):

در ابتدا سویچ اصلی با توجه به اندوکتانس L_{r1} در حالت ZCS روشن می شود. جریان اندوکتانس L_{r1} شروع به افزایش و جریان دیود D_3 و D کاهش می یابد و بلعکس D_1 رو به افزایش و جریان S_1 نیز کاهش می یابد.

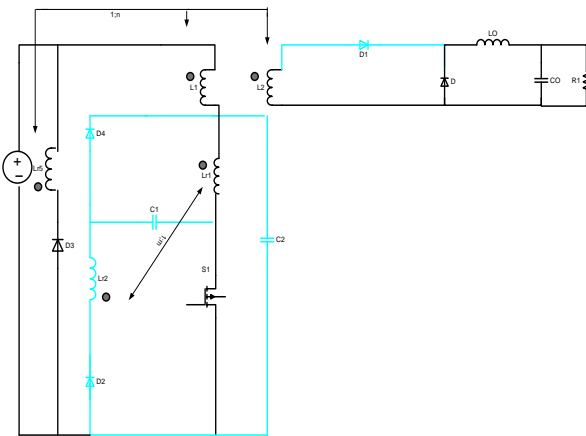
بنابراین جریان بار از دیود D_3 و D به سویچ S_1 انتقال پیدا می کند. در پایان این حالت جریان سویچ S_1 با جریان بار و برابر می شود. با توجه به این شرط که $i_{L1}(t_0) = 0$ باشد معادلات ذیل تعریف می گردد.

(۱-۴)

$$i_{Lr1}(t) = \frac{V_{in}(1+m)}{L_{r1}}(t-t_0)$$

(۲-۴)

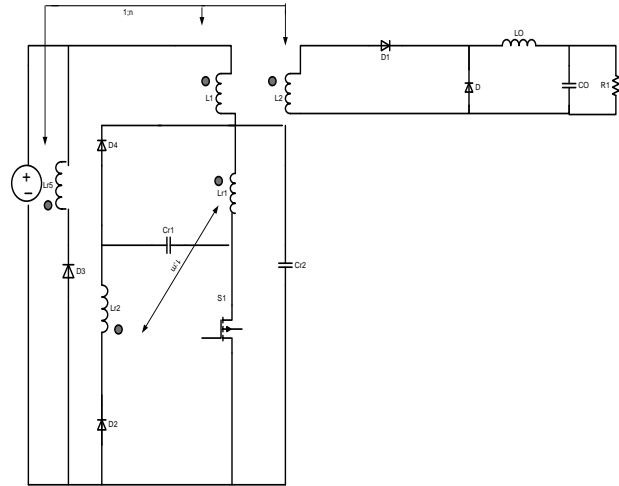
$$\Delta t_1 = t_1 - t_0 = \frac{L_{r1} n I_o}{V_{in}(1+m)}$$



شکل (۳-۴) مدار معادل وضعیت (۱) مبدل فرورارد پیشنهادی

۲-۳- وضعیت دوم ($t_1 \leq t < t_2$):

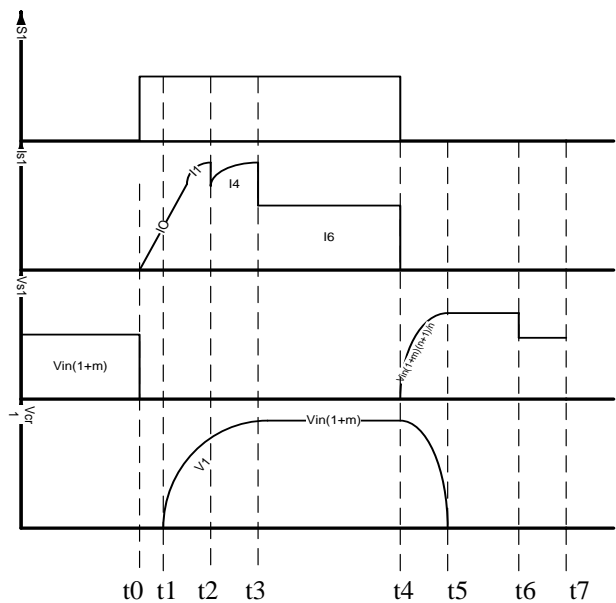
در زمانی که جریان اندوکتانس L_{r1} به جریان بار یعنی nI_o می رسد این حالت شروع می شود. دیود D_3 و D بصورت ZCS خاموش گردیده و D_1 در حالت ZCS روشن خواهد شد.



شکل (۱-۴) نمای شماتیک مبدل فرورارد پیشنهادی

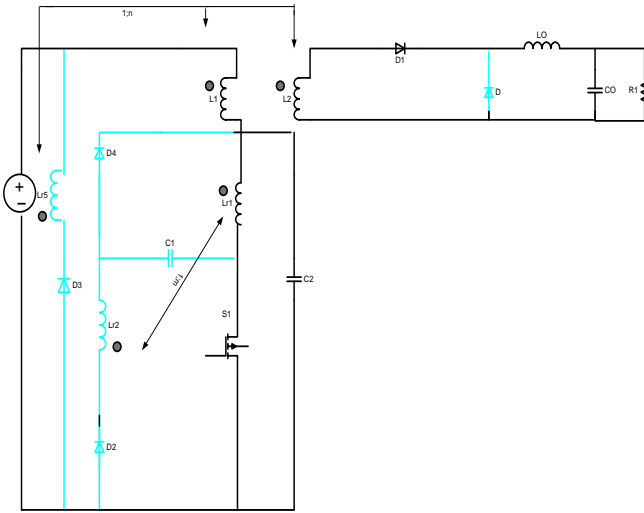
۲-۱- عملکرد مبدل فرورارد پیشنهادی

مبدل فرورارد پیشنهادی دارای هفت وضعیت عملکرد مجزا در یک سیکل کلیدزنی می باشد. شکل موج های کلیدی مبدل پیشنهادی، در شکل (۲-۴) نشان داده می شود و عملکرد هر وضعیت بصورت مجزا در ادامه بررسی خواهد شد.



شکل (۲-۴) شکل موج های کلیدی مبدل فرورارد پیشنهادی

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



شکل (۴-۴) مدار معادل وضعیت (۲) مبدل فرورارد پیشنهادی

۴-۲ - وضعیت سوم ($t_2 \leq t < t_3$):

در شروع این حالت دیود D_2 به صورت ZVS در مدار قرار می گیرد. از آنجایی که میزان آمپر اندوکتانس L_{r1} و L_{r2} به شرح ذیل می باشد.

(۸-۴)

$$I_1 = i_{Lr1}(t_2^+) + ni_{Lr2}(t_2^+)$$

در این حالت رزونانس بین خازن C_{r1} و اندوکتانس L_{r2} رخ می دهد که باعث تخلیه C_{r2} می گردد.

در پایان این وضعیت ولتاژ خازن C_{r1} برابر با ولتاژ $V_{in}(1+m)$ و ولتاژ خازن C_{r2} برابر با صفر خواهد شد. با فرض اینکه تعریف می گردد.

(۹-۴)

$$i_{Lr1}(t) = nI_o - \frac{V_{in}(1+m) - V_1}{z_1} \sin(\omega_1(t-t_2)) + (I_2 - nI_o) \cos(\omega_1(t-t_2))$$

رزونانس بین سلف L_{r1} و خازن C_{r1} شروع می شود و در نتیجه ولتاژ خازن C_{r1} افزایش می یابد. جریان اندوکتانس L_{r1} برابر با جریان حالت شارژ C_{r1} یعنی nI_o می گردد. با شرط اینکه $V_{Cr1}(t_0)=0$ و $i_{Lr1}(t_1)=nI_o$ برقرار باشد معادلات زیر برقرار است.

(۳-۴)

$$i_{Lr1}(t) = \frac{V_{in}(1+m)}{z_1} \sin(\omega_1(t-t_1)) + nI_o$$

(۴-۴)

$$z_1 = \sqrt{\frac{L_{r1}}{C_{r1}}}, \quad \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_{r1}C_{r1}}}$$

در همین لحظه با روشن شدن دیود ولتاژ اندوکتانس سلفی L_{r2} برابر با $V_{Cr2}=V_{in}(1+m)/n$ می باشد. با روشن شدن دیود D_2 این وضعیت به پایان می رسد. ولتاژ در سراسر اندوکتانس L_{r1} برابر است با $V_{in}(1+m)/n_2$ و ولتاژ خازن C_{r1} و جریان اندوکتانس L_{r1} و برابر با روابط ذیل می باشد.

(۵-۴)

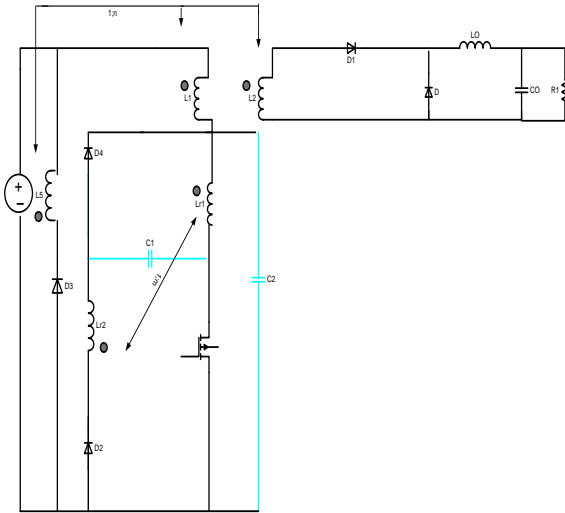
$$V_{Cr1}(t_2) = V_1 = V_{in}(1+m) \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

(۶-۴)

$$i_{Lr1}(t_2) = I_1 = \frac{V_{in}(1+m)}{z_1} \left(\frac{n^2-1}{n^2}\right) + nI_o$$

(۷-۴)

$$\Delta t_2 = t_2 - t_1 = \frac{1}{\omega_1} \cos^{-1} \left(\frac{1}{n^2} \right)$$



شکل (۶-۴) مدار معادل وضعیت (۴) مبدل فرورارد پیشنهادی

۲-۶- وضعیت پنجم ($t_4 \leq t < t_5$):

در این حالت در کسری از انتقال انرژی اندوکتانس L_{r1} و L_{r2} و سویچ خاموش می گردد. با توجه به میزان آمپر اندوکتانس L_{r1} و L_{r2} که برابر می باشند. مقدار جریان با معادلات ذیل تعریف می گردد.

(۱۲-۴)

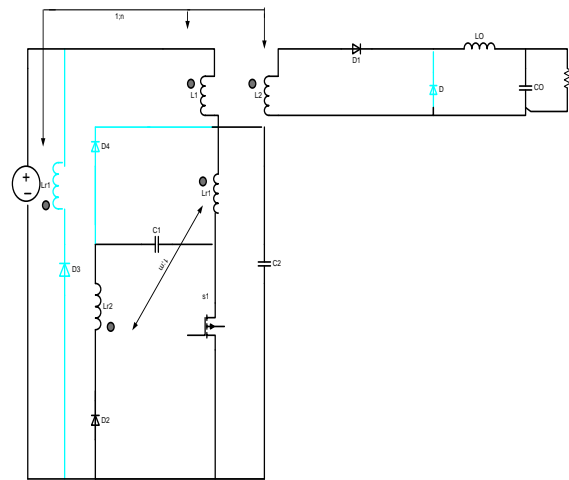
$$I_6 + nI_7 = i_{Lr1}(t_4^+) + ni_{Lr2}(t_4^+)$$

در این وضعیت دو مدار رزونانسی ایجاد می گردد. یکی رزونانس میان اندوکتانس L_{r1} و میزان شارژ C_{r2} و دیگری بعلت جریان اندوکتانس L_{r2} و جریان بار، بعلت کاهش ولتاژ خازن C_{r1} . با توجه به حضور خازن C_{r1} و سویچ S_1 در حالت ZVS خاموش می گردد. در پایان این حالت ولتاژ خازن C_{r1} صفر می گردد. در این زمان ولتاژ در سراسر اندوکتانس L_{r2} برابر با $-Vin(1+m)$ می شود. به این علت که اندوکتانس با قطب n کوبل شده است و ولتاژ اندوکتانس L_{r1} نیز برابر با $-Vin(1+m)/n$ می باشد. ولتاژ در خازن C_{r2} برابر با $Vin(1+m)/n$ خواهد بود. با توجه به این شرط $V_{cr1}(t_4) = Vin(1+m)$ و $V_{cr2}(t_4) = 0$ معادلات ذیل تعریف می گردد.

(۱۳-۴)

$$i_{Lr1}(t) = I_8 \cos(\omega_3(t - t_4))$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{L_{r2}}{C_{r2}}}, \quad \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_{r2} C_{r2}}} \quad (10-4)$$



شکل (۵-۴) مدار معادل وضعیت (۳) مبدل فرورارد پیشنهادی

۲-۵- وضعیت چهارم ($t_3 \leq t < t_4$):

این زمان در حالی شروع می شود که ولتاژ خازن C_{r1} برابر با ولتاژ $Vin(1+m)$ و ولتاژ خازن C_{r2} برابر صفر می شود. در همین حالت دیود D_3 و D_4 در حالت ZCS روشن می شود. جریان اندوکتانس L_{r1} از جریان بار بیشتر می باشد و این جریان اضافی از طریق دیود D_3 و D_2 هدایت می شود. در این حالت جریان اندوکتانس L_{r1} بعلت یکسان بودن مقدار آمپر L_{r1} و L_{r2} ثابت می باشد. معادلات مربوط به جریان اندوکتانس L_{r1} و L_{r2} در طول فاصله زمانی این حالت به شرح ذیل می باشد.

مقدار دیوتی سایکل موثر مبدل در این حالت و حالت قبلی برابر با رابطه ذیل می باشد.

(۱۱-۴)

$$\Delta t_4 = t_4 - t_3 = DT_s - \Delta t_1 - \Delta t_2 - \Delta t_3$$

با توجه به رابطه منظور از D دیوتی سایکل سویچ بوده و منظور از T_s مقدار دوره زمانی سویچینگ می باشد.

(۱۷-۴)

$$i_{Lr2}(t_5^+) = I_{12} = \frac{I_{10} + n I_{11}}{n}$$

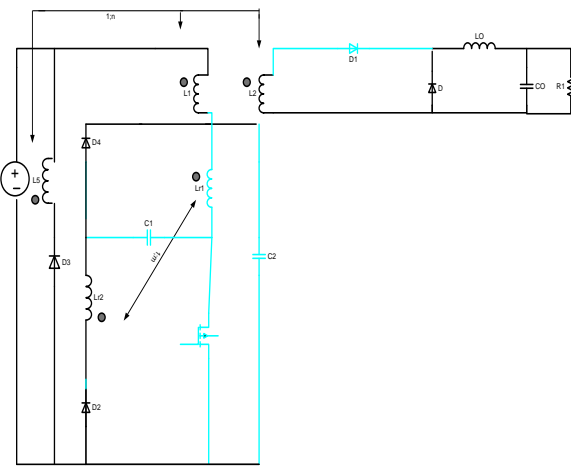
با توجه به وجود ولتاژی ثابت در اندوکتانس L_{r2} جریان بصورت خطی کاهش می یابد تا به صفر برسد. معادلات مهم در این حالت به شرح ذیل می باشد.

(۱۸-۴)

$$i_{Lr2}(t) = I_{12} - \frac{V_{in}(1+m)}{L_{r2}}(t - t_5)$$

(۱۹-۴)

$$\Delta t_6 = t_6 - t_5 = \frac{L_{r2} I_{12}}{V_{in}(1+m)}$$



شکل (۸-۴) مدار معادل وضعیت (۶) مبدل فرورارد پیشنهادی

۸-۲- وضعیت هفتم ($t_6 \leq t < t_7$):

این حالت در زمانی که جریان اندوکتانس L_{r2} بصفر برسد و دیود D_3 و D_2 تحت ZVS خاموش گردد شروع خواهد شد. در این حالت جریان دیود با جریان بار برابر می باشد و عملکرد مبدل شبیه یک مبدل فرورارد خواهد بود. در طول این فاصله زمانی معادله ذیل برقرار است.

(۲۰-۴)

$$\Delta t_6 = t_7 - t_6 = (1-D)T_S - \Delta t_5 - \Delta t_6$$

(۱۴-۴)

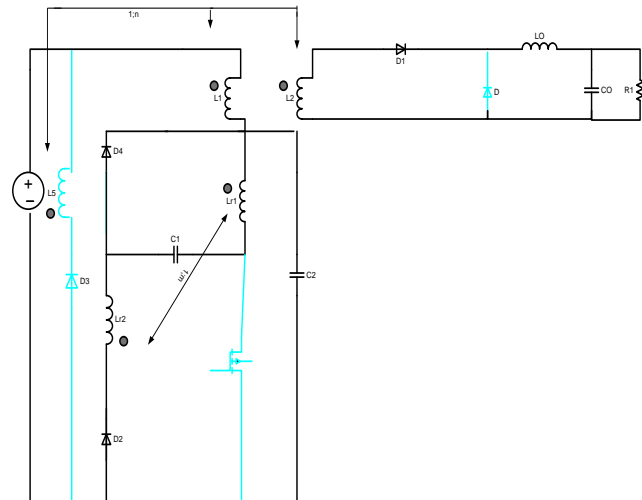
$$V_{Cr2}(t) = I_8 z_3 \sin(\omega_3(t - t_4))$$

(۱۵-۴)

$$z_3 = \sqrt{\frac{L_{r1}}{C_{r2}}}, \omega_3 = \frac{1}{\sqrt{L_{r1} C_{r2}}}$$

(۱۶-۴)

$$z_4 = \sqrt{\frac{L_{r2}}{C_{r1}}}, \omega_4 = \frac{1}{\sqrt{L_{r2} C_{r1}}}$$

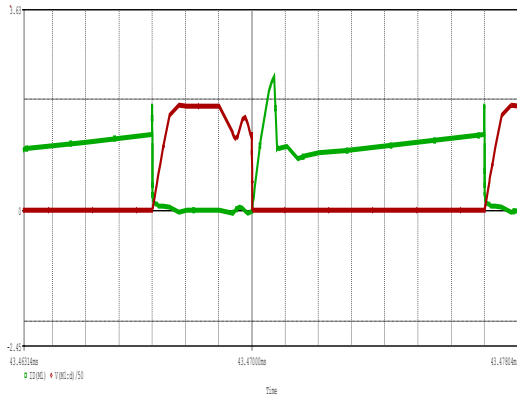


شکل (۷-۴) مدار معادل وضعیت (۵) مبدل فرورارد پیشنهادی

۷-۲- وضعیت ششم ($t_5 \leq t < t_6$):

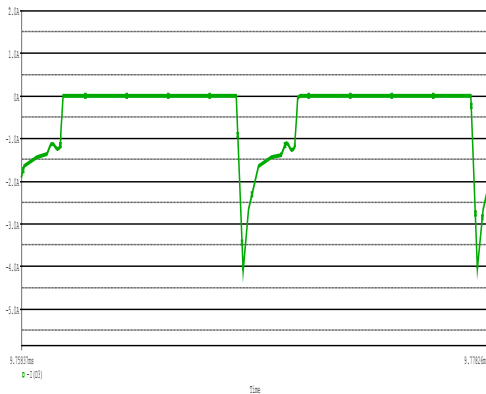
در این حالت با وجود جریان بار و جریان اندوکتانس L_{r2} دیود D_3 و D_2 بصورت ZCS روشن می گردد و دیود D_1 بصورت ZCS خاموش می شود. الباقی انرژی از طریق اندوکتانس L_{r1} به L_{r2} منتقل می شود و جریان اندوکتانس L_{r1} به صفر خواهد رسید. با توجه به ثابت بودن آمپر اندوکتانس L_{r1} و L_{r2} مقدار جریان اندوکتانس L_{r2} این گونه تعریف می گردد.

۲۰۲۰ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

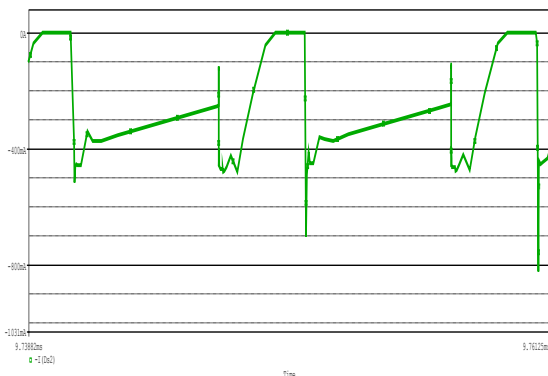


شکل (۴-۱۱) شکل موج شبیه سازی ولتاژ درین - سورس (شکل خط چین) و جریان (شکل ممتد) سوئیچ S1

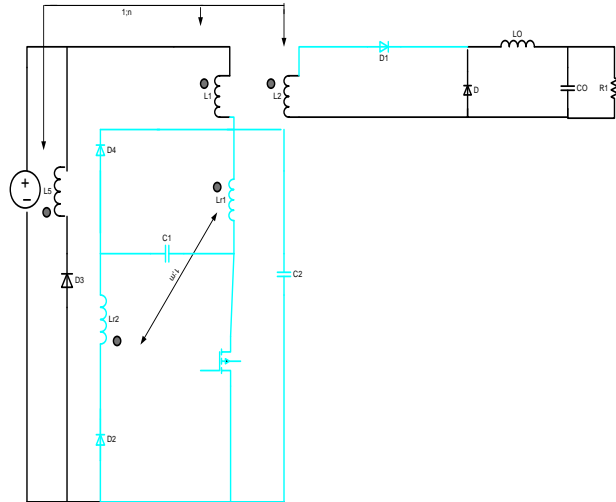
شکل موج شبیه سازی دیودهای D1 , D4 , D2 , D3 و D به ترتیب در شکل های (۴-۱۲) و (۴-۱۳) و (۴-۱۴) و (۴-۱۵) و (۴-۱۶) آورده است.



شکل (۴-۱۲) شکل موج دیود D3



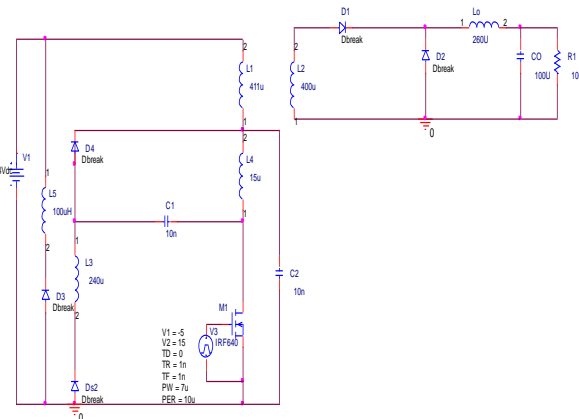
شکل (۴-۱۳) شکل موج دیود D2



شکل (۴-۹) مدار معادل وضعیت (۷) مبدل فرورارد پیشنهادی

۳- نتایج شبیه سازی مبدل فرورارد پیشنهادی

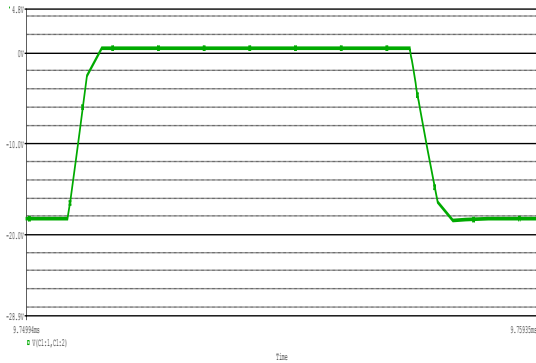
برای اثبات درستی تحلیل های صورت گرفته در بخش های قبلی مبدل پیشنهادی طراحی و سپس در نرم افزار PSpice شبیه سازی شده است. نمای شماتیک مبدل شبیه سازی شده در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است.



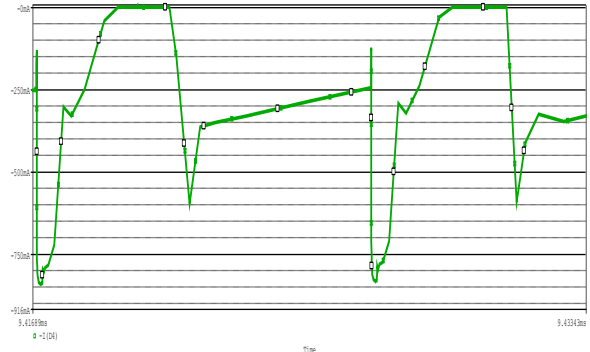
شکل (۴-۱۰) شماتیک مبدل شبیه سازی شده پیشنهادی

شکل موجهای شبیه سازی شده ولتاژ و جریان سوئیچ S1 در جهت مستقیم در شکل (۴-۱۱) نشان داده می شوند. همانطور که مشاهده می شود مطابق با نتایج تئوری سوئیچ مبدل در شرایط ZCS روشن و در شرایط ZVS خاموش می گردد.

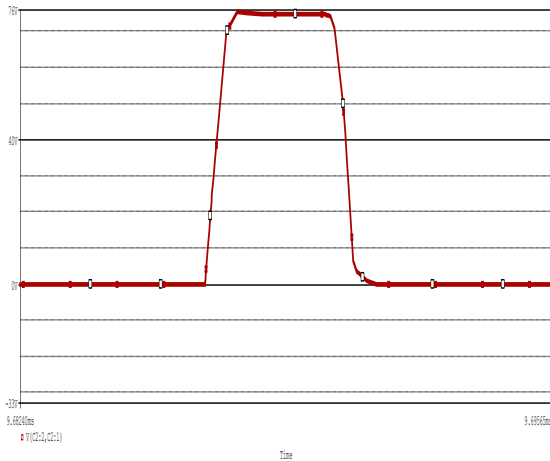
۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)



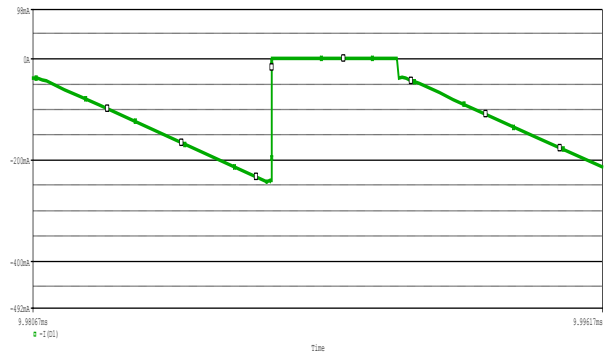
شکل (۴-۱۷) شکل موج خازن Cr1



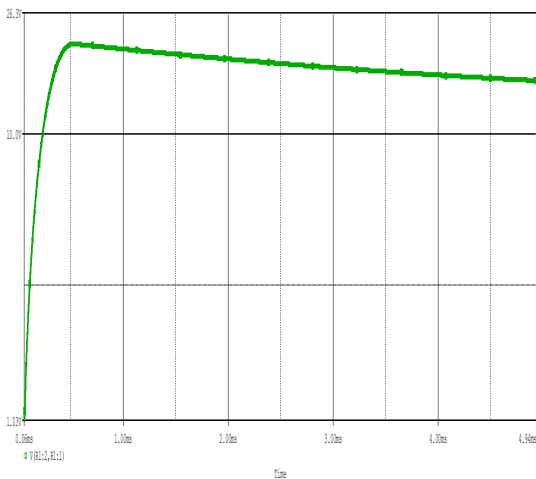
شکل (۴-۱۴) شکل موج دیود D4



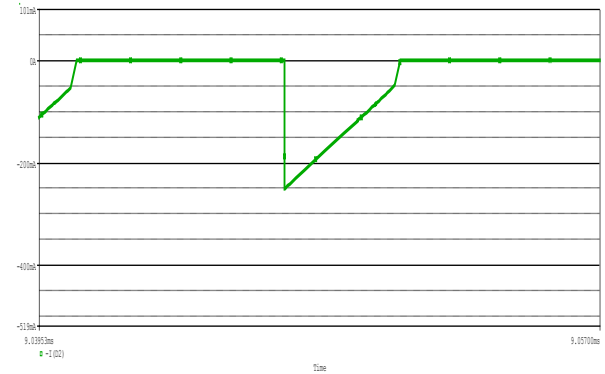
شکل (۴-۱۸) شکل موج خازن Cr2



شکل (۴-۱۵) شکل موج دیود D1



شکل (۴-۱۹) شکل موج ولتاژ خروجی Vo



شکل (۴-۱۶) شکل موج دیود D

نمودار ولتاژ خازن Cr1 , Cr2 و ولتاژ خروجی به ترتیب در شکل های (۴-۱۷) و (۴-۱۸) و (۴-۱۹) آورده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این فصل یک مبدل فرورارد با کلیدزنی نرم و بدون استفاده از سوئیچ کمکی ارائه شده است. این مبدل بصورت PWM کنترل می‌شود و برای ایجاد شرایط کلیدزنی نرم در آن از یک مدار کمکی بدون هیچ سوئیچ اضافه‌ای استفاده شده است. این مدار کمکی شرایط کلیدزنی نرم را برای سوئیچ فراهم می‌کند و استرس ولتاژ و جریان بالایی به مبدل تحمیل نمی‌کند. سوئیچ مبدل در شرایط ZCS روشن و در شرایط ZVS خاموش می‌شود. در نهایت به منظور تصدیق آنالیز تئوری مبدل پیشنهادی نتایج شبیه‌سازی آن آورده شده است.

مراجع

- [1] E. Adib, H. Farzanehfard, 'Family of zero current transition PWM converters', IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, No. 8, 2008. DC-DC
- [2] J.A. Cobos, O. Garcia, J. Sebastian, J. Uceda, "Resonant Reset Forward Topologies for Low Output Voltage On-Board Converters" IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC'94), 1994.



چهارمین کنفرانس ملی ایده های نو در مهندسی برق



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