

کلیدزنی نرم در مبدل‌های DC-DC

دکتر مجید آقابابایی^۱، رضا مسافری جعفرآبادی^۲

majid_ghababaie@iust.ac.ir

- ۱- استادیار، دانشکده برق دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علوم دریایی امام خمینی (ره)

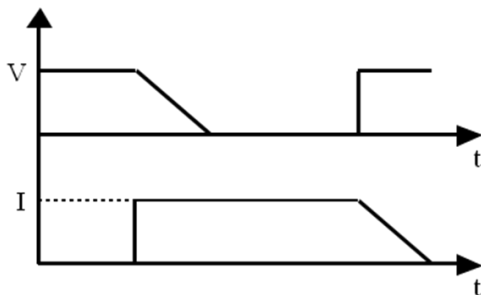
چکیده

در این مقاله نخست مفهوم کلیدزنی نرم در مبدل‌های DC-DC تشریح می‌شود. پس از آن وارد بُعد مداری شده و دو مبدل بوست تحت شرایط کلیدزنی ولتاژ صفر (ZVS) و جریان صفر (ZCS) مورد بررسی قرار می‌گیرد. این دو مبدل دارای یک مدار کمکی رزونانسی بوده که از آن جهت ایجاد شرایط مناسب برای کلیدزنی نرم استفاده شده است. در ادامه مبدل بوست با کلیدزنی نرم جریان صفر توسط نرم افزار PSIM شبیه‌سازی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار PSIM بررسی تئوری را تأیید می‌کند.
واژگان کلیدی: مبدل DC-DC بوست، کلیدزنی نرم با ZVS و ZCS، مدار کمکی رزونانس.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۴/۰۴/۲۴
تاریخ پذیرش مقاله : ۹۴/۰۸/۱۳

۱- مقدمه

و خاموش شدن کلید، قطعات قدرت به طور هم‌زمان مقابل جریان و ولتاژ زیاد از خود مقاومت زیادی نشان می‌دهند. همچنین هم‌پوشانی زیاد ولتاژ و جریان با یکدیگر موجب ایجاد تلفات کلیدزنی، تنش و فشار زیاد روی کلید می‌شود. به دلیل تلفات موجود، فرکانس کلیدزنی در مبدل‌هایی که تحت شرایط سخت کلیدزنی می‌کنند، محدود است و در حد چند ده کیلوهرتز (۵۰ - ۲۰ کیلوهرتز) می‌باشد. از طرفی اجزای خازنی و القای سرگردان در مدارهای قدرت باعث ایجاد آثار گذرای قابل توجهی می‌شود که به نوبه خود منجر به مشکلات تداخل مغناطیسی می‌گردد [۱۱ و ۳]. اگر در هنگام قطع یا وصل کلید دو زمان در نظر گرفته شود، یکی زمان ارسال دستور وصل یا قطع و دیگری زمان هدایت یا عدم هدایت کلید، در نتیجه در این روش کلیدزنی، زمانی که دستور وصل برای کلید صادر می‌شود کلید آنی وصل و شروع به هدایت می‌کند. همین‌طور زمانی که دستور قطع برای کلید صادر می‌شود کلید بلافاصله قطع و فوراً ولتاژ روی کلید افت می‌کند. با این فرض زمان ارسال دستور وصل و هدایت یا زمان ارسال دستور قطع و عدم هدایت در این روش یکی است و هم‌زمان صورت می‌گیرد. شکل ۱ این موضوع را بیان می‌کند [۴].



شکل (۱) نمودار ولتاژ جریان کلید تحت شرایط کلیدزنی سخت.

همان‌طور که مشهود است در زمان قطع کلید مقدار ولتاژ V در دو سر کلید موجود است. زمانی که دستور وصل کلید صادر می‌شود کلید به صورت آنی وصل و جریان با مقدار I از کلید عبور خواهد کرد (در زمان وصل کلید جریانی با مقدار I در حال عبور از کلید می‌باشد و با دستور قطع، کلید خاموش شده و ولتاژی با مقدار V بر روی کلید افت می‌کند). این افزایش و کاهش ولتاژ و جریان به صورت ناگهانی و پله‌ای می‌باشد و در عمل نیز ضربه‌ای در شکل موج داریم. بنابراین هم‌پوشانی ولتاژ و جریان موجب تلفات کلیدزنی می‌گردد [۴].

مبدل‌های DC-DC سیستم‌های الکترونیکی هستند که برای تبدیل سطوح مختلف ولتاژهای DC به طور گسترده‌ای در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. کلیدهای نیمه‌هادی قدرت عناصر اساسی مدارهای الکترونیک قدرت می‌باشند و ساده‌ترین راه کنترل این کلیدها، روش مدولاسیون پهنای پالس^۱ (PWM) است. به طور معمول در این روش ولتاژ روی کلید و یا جریان آن به طور ناگهانی قطع و وصل می‌گردد که این حالت به نام کلیدزنی سخت شناخته می‌شود. به خاطر تنش‌های کم جریان و سادگی کنترل در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰ روش کلیدزنی نرم مورد توجه و توسعه قرار گرفت. از معایب کلیدزنی سخت می‌توان به تلفات کلیدزنی، تنش‌های بالا، محدودیت در فرکانس کاری، تشدید نویز و نیز تداخلات الکترومغناطیسی اشاره نمود. عمل کلیدزنی سخت با راندمان پایین و افزایش تلفات کلیدزنی همراه است، به همین دلیل محققان رو به کلیدزنی با استفاده از مدارهای رزونانسی روی آوردند. این مدارهای رزونانسی جهت ایجاد یک شکل موج تقریباً سینوسی شکل بر روی شکل موج ولتاژ و جریان عمل می‌کنند تا لبه‌های افزایش و کاهش ولتاژ و جریان را صاف و هموار کنند. در این مبدل‌ها که مبدل رزونانسی نام گرفتند تلفات کاهش و به تناسب آن فرکانس کلیدزنی به مقدار زیادی افزایش یافت. از آنجایی که ولتاژ و جریان رزونانسی در این مبدل‌ها مقادیر قله‌ای زیادی داشتند لذا این امر موجب ایجاد تلفات انتقالی می‌شد. همچنین مدل‌هایی از این مبدل‌ها برای دارا بودن خروجی ثابت نیازمند به مدولاسیون فرکانس هستند. کار در فرکانس‌های مختلف موجب کنترل سخت و طراحی فیلتر نیز پیچیده‌تر می‌شود. لذا در اوایل دهه ۱۹۹۰ محققان به کلیدزنی تحت شرایط نرم روی آوردند [۱-۲].

۲- انواع کلیدزنی در مبدل‌های قدرت

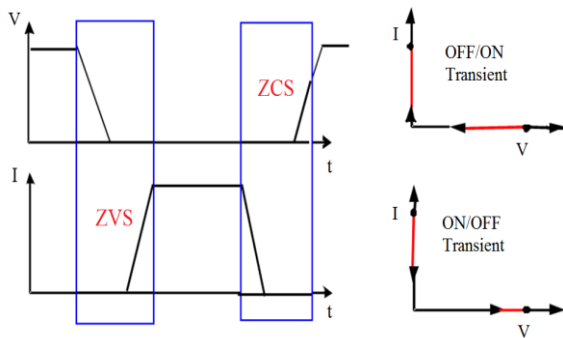
کلیدزنی در مبدل‌های قدرت به دو دسته زیر تقسیم می‌شود:

۲-۱ کلیدزنی سخت

کلیدزنی سخت اشاره به رفتار کلیدزنی پرتنش قطعات الکترونیک قدرت در مبدل‌ها دارد. در طول عملیات روشن

^۱ Pulse Width Modulation

شکل ۲ نیز گویای این بحث است.



شکل (۲) نمودار ولتاژ جریان کلید تحت شرایط کلیدزنی نرم.

۲-۲ کلیدزنی نرم

با توجه به مشکلات مبدل‌های PWM معمولی (تحت شرایط کلیدزنی سخت)، مبدل‌هایی با مدارهای خازنی گسترش یافتند ولی به دلیل تلفات انتقالی و کارکرد در فرکانس‌های متغیر، این مبدل‌ها خود جایگزین مبدل‌هایی با کلیدزنی نرم شدند [۹،۵]. محققان با استفاده از ترکیب مزایای مطلوب مبدل‌های PWM معمولی و مبدل‌های رزونانسی، مبدل‌های کلیدزنی نرم را تعریف کردند. شکل موج‌های این مبدل‌ها همانند مبدل‌های PWM معمولی می‌باشد با این تفاوت که لبه‌های افزایش و کاهش شکل موج‌های جریان و ولتاژ دیگر به صورت پله‌ای نبوده و صاف و هموار می‌شود. هم‌چنین دیگر از آثار حالت گذرای کلیدزنی که در لحظه روشن و خاموش شدن کلید اتفاق می‌افتد خبری نیست. علاوه بر این تداخلات مغناطیسی را نیز بسیار کاهش می‌دهد. عملکرد این مبدل‌ها به صورت کنترل رزونانس است. یعنی رزونانس فقط قبل و در طول فرآیند روشن و خاموش شدن کلید اجازه رخ دادن دارد تا شرایط را برای کلیدزنی نرم ولتاژ صفر^۱ (ZVS) و جریان صفر^۲ (ZCS) فراهم کند. کلیدزنی نرم توسط مدارها و قطعه‌های کمکی متفاوتی قابل پیاده‌سازی است [۳].

اصطلاح کلیدزنی نرم اشاره به روش‌های مختلفی دارد که موجب تدریجی‌تر شدن حالت گذرای کلیدزنی می‌شود. دو روش مهم آن ولتاژ صفر و جریان صفر می‌باشد که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد [۴].

الف- کلیدزنی با ولتاژ صفر (ZVS)

تکنیک ZVS روشی است که قبل از این‌که کلید تغییر وضعیت دهد عمل می‌کند و ولتاژ دو سر کلید را به صفر می‌رساند سپس کلید وصل می‌شود [۳].

ب- کلیدزنی با جریان صفر (ZCS)

تکنیکی است که قبل از خاموش شدن کلید عمل کرده و ابتدا اجازه می‌دهد تا جریان عبوری از کلید کامل به صفر برسد سپس کلید عمل کرده و قطع می‌شود [۳].

همان‌طور که در انتهای بخش ۲-۱ بیان شد اگر زمانی را برای ارسال دستور وصل یا قطع، و زمانی را برای هدایت یا عدم هدایت در نظر بگیریم، با استفاده از این تکنیک‌ها دیگر این زمان‌ها با هم برابر نبوده و زمانی که دستور وصل صادر می‌شود، کلید بعد از مدتی شروع به هدایت می‌کند.

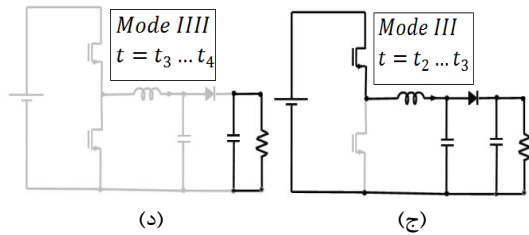
۱-۲-۲ تفاوت‌های ZCS و ZVS

تفاوت‌های موجود بین این دو تکنیک به قرار زیر می‌باشد که عبارت‌اند از:

- ۱- کلیدزنی جریان صفر ZCS می‌تواند تلفات کلیدزنی را در لحظه خاموش شدن کلید به طور کامل حذف کند. این در حالی است که این تکنیک اگر برای لحظه روشن شدن کلید استفاده شود فقط می‌تواند تلفات را در این حالت کاهش دهد [۱۲].
 - ۲- در کلیدزنی جریان صفر نیز به دلیل این‌که کلید تحت فشار جریان زیاد عمل می‌کند، لذا تلفات انتقالی زیادی در مدار ایجاد می‌گردد. با این حال باید توجه داشت که ZCS در کاهش دادن تلفات برای قطعات قدرت هم‌چون IGBTها نسبتاً مؤثر است [۷،۳].
 - ۳- کلیدزنی ولتاژ صفر ZVS نیز می‌تواند تلفات کلیدزنی را در لحظه روشن شدن کلید به طور کامل حذف کند. چرا که این تکنیک تلفات خازنی را در لحظه تخلیه شدن از بین می‌برد [۱۲].
 - ۴- ZCS با کنترل ثابت زمانی on عمل می‌کند و ZVS با کنترل ثابت زمانی off عمل می‌کند [۶].
- با توجه به این‌که این دو تکنیک را می‌توان برای هر دو لحظه روشن و خاموش شدن کلید مورد استفاده قرار داد و با توجه به تفاوت‌های مذکور بین ZVS و ZCS این نتیجه حاصل می‌شود که از ZVS برای لحظه روشن شدن و از ZCS برای خاموش شدن کلید استفاده شود. در کل به دلیل حذف تلفات خازنی ناشی از تخلیه شدن خازن توسط روش ZVS و همین‌طور تلفات انتقالی موجود در روش ZCS، تکنیک کلیدزنی ولتاژ صفر بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته و در بیش‌تر مدارها پیاده‌سازی می‌شود [۱۳].

¹ Zero Voltage Switching

² Zero Current Switching



شکل (۴) عملکرد مدار: الف) مد ۱، ب) مد ۲، ج) مد ۳، د) مد ۴ [۱].

برای سادگی تحلیل عملکرد مبدل فرضیه‌های زیر در نظر گرفته می‌شود.

- تمام المان‌های مدار ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود.
- خازن‌های خروجی به اندازه زیاد بزرگ در نظر گرفته می‌شود، به طوری که ولتاژ آن در یک سیکل ثابت در نظر گرفته می‌شود.
- هم‌چنین فرض می‌شود پیش از آغاز مد ۱ ولتاژ رزونانس V_r برابر V_o و جریان رزونانس i_r برابر صفر است و نیز کلید Q_1 و Q_2 هر دو خاموش‌اند.

۳-۱- تحلیل مدهای کاری مبدل

مدهای کاری این مبدل به صورت زیر می‌باشد:

مد ۱ $(t_1 < t < t_0)$ - مد رزونانس کامل:

با توجه به موقعیت سلف L_r در حلقه جریان، در لحظه t_0 ، کلید Q_1 تحت جریان صفر روشن می‌شود. انرژی ذخیره شده در خازن C_r از طریق رزونانس با سلف L_r سبب افزایش جریان i_r در جهت منفی شده تا اینکه در لحظه t_0 مقدار i_r به صفر می‌رسد و ولتاژ رزونانس V_r نیز به مقدار $-V_o$ کاهش می‌یابد [۱].

$$i_r(t) = \frac{-V_o}{Z_r} \sin(\omega_r(t - t_0)) \quad (5)$$

$$v_r(t) = V_o \cos(\omega_r(t - t_0)) \quad (6)$$

$$t_1 - t_0 = \frac{T_r}{2} \quad (7)$$

$$v_r(t_1) = -V_o \quad (8)$$

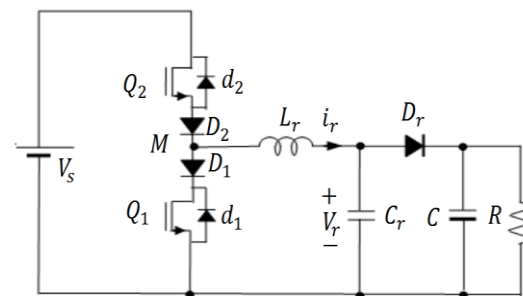
مد ۲ $(t_1 < t < t_2)$ - مد رزونانس ناکامل:

در لحظه t_1 کلید Q_2 تحت جریان صفر روشن شده و خازن C_r از طریق منبع ولتاژ ورودی شروع به شارژ شدن

لازم به ذکر است که در بعضی موارد از دو روش هم‌زمان در مدارها استفاده می‌شود که به این تکنیک نیز کلیدزنی ولتاژ و جریان صفر^۱ (ZVZCS) می‌گویند.

۳- مبدل بوست با کلیدزنی جریان صفر (ZCS)

شکل ۳ یک مبدل بوست ساده، همراه با مدار کمکی که جهت فراهم کردن شرایط کلیدزنی در جریان صفر به مدار اصلی اضافه شده است را نشان می‌دهد. این مدار کمکی شامل یک سلف L_r و یک خازن C_r می‌باشد. سلف و خازن تشکیل مدار رزونانسی را می‌دهند [۴].



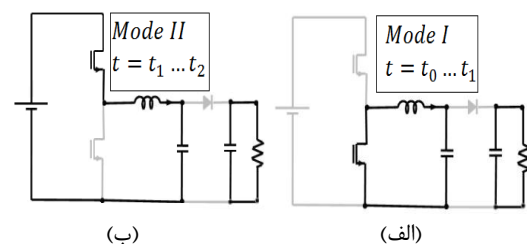
شکل (۳) مبدل بوست تحت کلیدزنی جریان صفر (ZCS) [۱].

فرکانس مدار رزونانسی از رابطه (۱) حاصل می‌شود. اگر در طرفین تساوی در L_r ضرب شود رابطه (۲) به دست می‌آید. رابطه (۳) نیز بیانگر بهره مدار می‌باشد [۱].

$$\omega_r = 2\pi f_r = \frac{2\pi}{T_r} = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (1)$$

$$Z_r = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (2)$$

$$A = \frac{V_o}{V_s} \quad (3)$$



¹ Zero Voltage Zero Current Switching

$$\int_{T_s} V_s i_1 dt = \int_{T_s} \frac{V_o^2}{R} dt \quad (16)$$

پارامتر S (به معنی مقیاس) نقش اساسی در صورت‌بندی مبدل‌های کلید رزونانسی^۱ SWRC دارد. مفهوم این پارامتر بی‌بعد عبارت است از بار نرمالیزه شده ضرب در فرکانس کلیدزنی نرمالیزه شده، ضریب $\frac{1}{\pi}$ سایر روابط را ساده‌تر می‌کند. همچنین $T_s = f_s^{-1}$ پریود کلیدزنی است [۱].

$$S = 2RC_r f_s = \frac{r}{\pi} \cdot \frac{f_s}{f_r} \quad (17)$$

$$S = A - 1 \quad (18)$$

۳-۳- شرط تحویل توان بیشینه

در غیاب مد چهارم (زمان مرده) حداکثر توان به بار انتقال می‌یابد، در این حالت فرکانس کلیدزنی بیشینه است، این حالت شرط تحویل توان بیشینه نامگذاری می‌شود. زیر نویس 'm' کمیت‌های مربوط به این حالت را مشخص می‌کند. T_m به صورت بازه زمانی عملکرد مدار، مطابق رابطه (۱۹) تعریف می‌شود. در این صورت با ترکیب روابط (۷)، (۱۱) و (۱۵)، T_m به صورت رابطه (۲۰) به دست می‌آید [۱].

$$T_m = t_4 - t_1 \quad (19)$$

$$\frac{T_m}{T_r} = 1 + \frac{1}{\pi} \left[\frac{\sqrt{A}}{A-1} - \frac{1}{2} \cos^{-1} \frac{A-1}{A+1} \right] \quad (20)$$

با جایگذاری $T_s = T_m$ و استفاده از رابطه (۱۷) رابطه (۲۱) به دست می‌آید [۱].

$$\frac{r}{S_m} = \pi \cdot \frac{T_m}{T_r} \quad (21)$$

چنانچه پارامتر بی‌بعد θ_m به صورت رابطه (۲۲) تعریف شود، رابطه (۲۱) به فرم رابطه (۲۳) در می‌آید [۱].

می‌کند و جریان رزونانس i_r نیز شروع به افزایش می‌نماید تا جایی که ولتاژ رزونانس V_r در لحظه t_2 به مقدار V_o می‌رسد [۱].

$$i_r(t) = \frac{V_s + V_o}{Z_r} \sin(\omega_r(t - t_1)) \quad (9)$$

$$v_r(t) = V_s - (V_s + V_o) \cos(\omega_r(t - t_1)) \quad (10)$$

$$t_2 - t_1 = \frac{1}{\omega_r} \left[\pi - \cos^{-1} \frac{A-1}{A+1} \right] \quad (11)$$

$$i_r(t_2) = \frac{V_s}{Z_r} 2\sqrt{A} \quad (12)$$

مد ۳ ($t_2 < t < t_3$) مد جریان خطی:

در لحظه t_2 مبدل وارد مد جریان خطی می‌شود از این لحظه به بعد خازن به طور کامل شارژ شده و ولتاژی ثابت و برابر V_o دارد. بنابراین دیود D_r تحت شرایط ZCS روشن شده و جریان رزونانس i_r از طریق این دیود به خروجی منتقل می‌شود. دیود و کلید هر دو تا لحظه t_3 یعنی تا زمانی که جریان رزونانس به صفر می‌رسد روشن می‌مانند. در طول این مدت i_r به صورت خطی کاهش می‌یابد. در لحظه t_3 کلید Q_2 و دیود D_r هر دو به صورت ZCS خاموش می‌شوند [۱].

$$i_r(t) = i_r(t_2) + \frac{V_s - V_o}{L_r} (t - t_2) \quad (13)$$

$$v_r(t) = V_o \quad (14)$$

$$t_3 - t_2 = \frac{1}{\omega_r} \cdot \frac{2\sqrt{A}}{A-1} \quad (15)$$

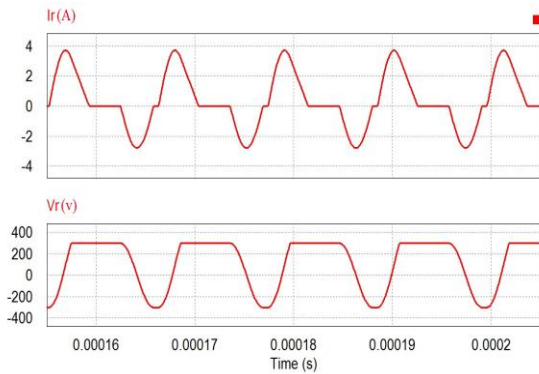
مد ۴ ($t_3 < t < t_4$) مد زمان مرده

در این مد هر دو کلید Q_1 و Q_2 و نیز دیود D_r خاموش و بار از طریق خازن خروجی تغذیه می‌شود. رگولاسیون ولتاژ خروجی با تنظیم مدت زمان این مد حاصل می‌گردد.

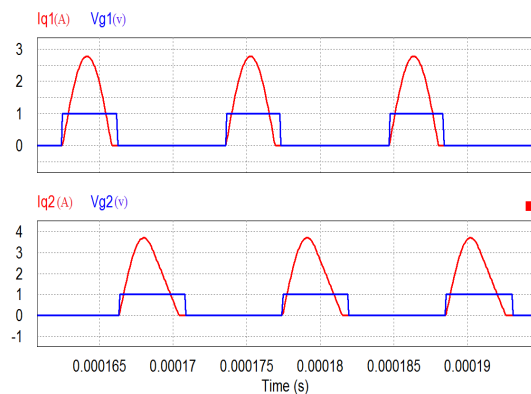
۳-۲- بهره ولتاژ

در حالت دائمی، بهره ولتاژ را می‌توان از طریق برقراری بالانس انرژی در یک پریود کلیدزنی به دست آورد [۱].

¹ Switched-Resonant Converter



شکل (۶) ولتاژ خازن و جریان سلف مدار رزونانسی.

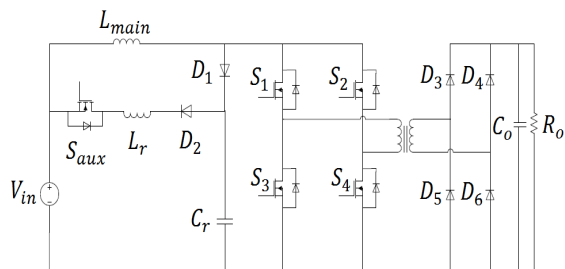


شکل (۷) شکل موج‌های ولتاژ و جریان کلیدها.

۴- مبدل بوست پل منبع جریان با ZVS

در این بخش یک مبدل جدید با عملکرد ZVS که با استفاده از یک مدار کمکی ساده شرایط را فراهم می‌کند تحلیل می‌شود. این مدار کمکی شامل یک کلید اکتیو و تعدادی عناصر پسیو شامل خازن C_r ، سلف L_r ، یک کلید کمکی و دو عدد دیود می‌باشد. این مبدل معایبی که مبدل‌های قبلی از همین نمونه داشتند را رفع نموده است. مبدل ارائه شده در شکل ۸ نشان داده شده است [۳].

این مبدل شبیه مبدل‌های بوست ایزوله شده‌ی PWM مرسوم می‌باشد. با این تفاوت که یک مدار کمکی به آن اضافه شده است.



شکل (۸) مبدل بوست پل منبع جریان تحت کلیدزنی نرم [۳].

$$r = S_m \theta_m \quad (22)$$

$$\theta_m = \pi \cdot \frac{T_m}{T_r} \quad (23)$$

از ترکیب روابط (۲۰) و (۲۱) رابطه (۲۴) که رابطه‌ای اساسی جهت طراحی مبدل است به دست می‌آید. در حقیقت A_m تابعی از r است [۱].

$$r = (A_m - 1) \left[\pi + \frac{\sqrt{A_m}}{A_m - 1} - \frac{1}{2} \cos^{-1} \frac{A_m - 1}{A_m + 1} \right] \quad (24)$$

$$\theta_m = \left[\pi + \frac{\sqrt{A_m}}{A_m - 1} - \frac{1}{2} \cos^{-1} \frac{A_m - 1}{A_m + 1} \right] \quad (25)$$

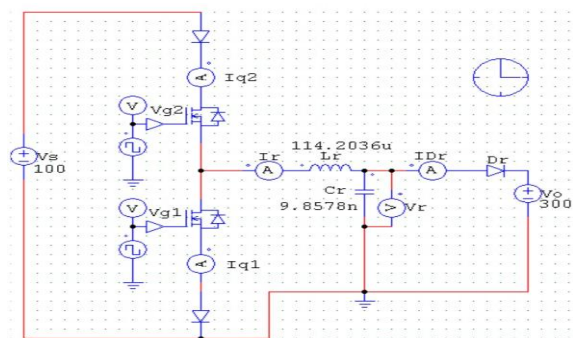
رابطه (۲۴) بیانگر این مسئله است که به ازای یک r مشخص حداکثر بهره A_m چقدر می‌تواند باشد.

۳-۴- شبیه‌سازی مدار شکل ۳

مدار شکل ۳ توسط نرم افزار PSIM پیاده‌سازی شده و در شکل ۵ به نمایش درآمده است. ولتاژ ورودی ۱۰۰ ولت و فرکانس رزونانس ۱۵۰ کیلوهرتز انتخاب شده است. با استفاده از رابطه (۷)، (۱۱) و (۱۵) مدت زمان روشن بودن هر کدام از کلیدها به صورت زیر به دست می‌آید.

$$T_F = 3.33 \mu s, T_p = 2.22 \mu s, T_L = 1.8378 \mu s$$

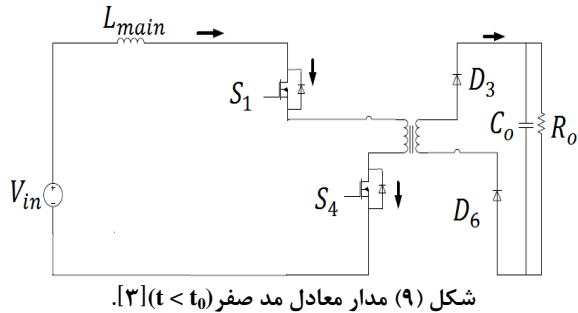
که در نهایت T_F برابر زمان روشن بودن کلید اول و $T_p + T_L$ زمان روشن بودن کلید دوم خواهد بود.



شکل (۵) مدار شبیه‌سازی شده با کلیدزنی جریان صفر (ZCS).

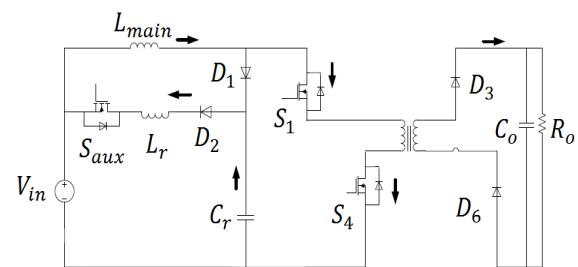
همچنین شکل ۶ ولتاژ و جریان مدار رزونانسی را نشان می‌دهد که جهت کلیدزنی نرم به مدار اضافه شده است.

هستند و مبدل در حالت انتقال انرژی از ورودی به خروجی از طریق دیود های D_3 و D_6 است. جریان عبور از L_{main} در این مد در حال کاهش است. شکل ۹ بیانگر این مد کاری است [۳].



شکل (۹) مدار معادل مد صفر $(t < t_0)$ [۳].

مد ۱ $(t_0 < t < t_1)$: با توجه به شکل ۱۰ این مد زمانی آغاز می شود که کلید S_{aux} در راستای اتصال کوتاه باس DC روشن می شود و مبدل در مد تقویت کننده گی قرار می گیرد. زمانی که ولتاژ خازن اسنابر بزرگتر از ولتاژ ورودی شود، جریان از S_{aux} مسیر خود را می بندد. کلید S_{aux} به عنوان محدود کردن میزان افزایش جریان عبوری از سلف L_r سری شده با کلید به آرامی روشن می شود. در طول این مد کاری در سلف کمکی تخلیه می شود. زمانی که ولتاژ خازن C_r بزرگتر از ولتاژ پل شد، دیود D_1 در بایاس معکوس قرار می گیرد و هدایت نمی کند. این مد زمانی که ولتاژ خازن C_r به ولتاژ دوسر کلید پل حالت خاموش برسد به اتمام می رسد. این ولتاژ برابر V_o/n است.



شکل (۱۰) مدار معادل مد ۱ $(t_0 < t < t_1)$ [۳].

مد ۲ $(t_1 < t < t_2)$: این مد زمانی آغاز می شود که D_1 در بایاس مستقیم قرار گرفته و شروع به هدایت می کند. بنابراین ولتاژ دوسر کلید پل، ولتاژ خازن C_r را که در حال کاهش است دنبال می کند. همچنین این ولتاژ با ولتاژ دوسر ترانسفورماتور برابر است. در حالت ایده آل اگر ولتاژ دوسر ترانسفورماتور کم تر از V_o/n باشد دیود خروجی در بایاس

۴-۱ اصول کلی عملکرد مبدل

عملکرد کلیدهای پل اصلی همانند کلیدها در مبدل بوست ایزوله شده PWM معمولی است. یعنی سیگنال گیت به طوری است که در هر حالت فقط دو کلید مورب و مخالف هم روشن هستند.

مدار کمکی فقط قبل از روشن شدن قسمت پل فعال می شود. با انجام این کار خازن های خروجی هر کلید و خازن C_r به طور کامل تخلیه می شوند. بنابراین کلیدها می توانند تحت شرایط ZVS روشن شوند. انرژی که در خازن های خروجی هر کلید و خازن C_r ذخیره شده بود به ورودی انتقال پیدا می کنند. به این ترتیب این مقدار انرژی به جای این که در کلیدها تخلیه شود و موجب تلفات زیادی شود به ورودی رفته و بازیافت می شود. به کمک خازن C_r می توان میزان افزایش ولتاژ دوسر کلید را پایین آورد. همچنین L_r برای پایین آوردن میزان افزایش جریان عبوری از کلید کاربرد دارد. همان طور که بیان شد هر چهار کلید اصلی مدار که کلیدهای پل هستند تحت شرایط کلیدزنی ولتاژ صفر روشن و خاموش می شوند. از طرفی کلید کمکی موجود در مدار رزونانسی کمکی توسط کلیدزنی جریان صفر روشن و خاموش می شود.

دیود D_1 به عنوان یک ایزوله کننده به مدار اضافه شده است. این دیود مدار کمکی را از بخش پل جدا می کند. لذا زمانی که این دیود در بایاس معکوس قرار دارد، مدار رزونانس کمکی نقشی در عملکرد مدار پل ندارد. به علت مسدود بودن D_1 ، مدار کمکی نمی تواند جریان اضافی را به سمت بخش پل پمپ کند، بنابراین ضرایب جریان مؤثر و جریان قله نسبت به مبدل معمولی تفاوتی نمی کند.

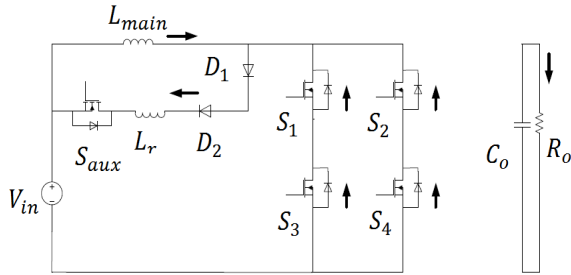
دیود D_2 نیز برای مسدود کردن دیود موازی معکوس درین-سورس داخلی کلید S_{aux} استفاده شده است. بنابراین این دیود زمانی که C_r تخلیه است نمی تواند وصل شود.

لازم به ذکر است که خاموش شدن کلیدها به نرمی انجام می گیرد و مدت زمان خاموش شدن آنها انعطاف پذیر است و می توان در هر زمان انجام داد.

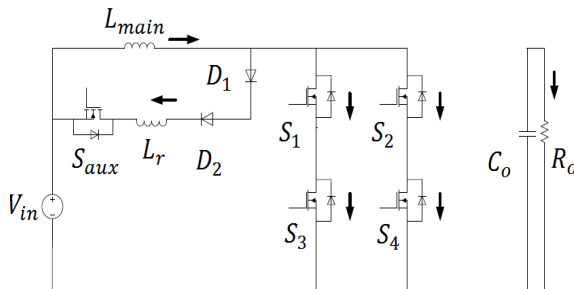
۴-۲ تحلیل مدهای کاری مبدل

مدهای کاری این مبدل را در نیم سیکل کاری تحلیل می کنیم. نیم سیکل دوم به طور مشابه صورت می گیرد.

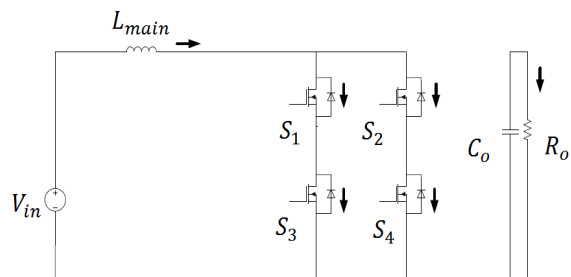
مد صفر $(t < t_0)$ - در این مد تنها کلیدهای S_1 و S_4 روشن

شکل (۱۳) مدار معادل مد ۴ $(t_3 < t < t_4)$ [۳].

مد ۵ $(t_4 < t < t_5)$: با توجه به شکل ۱۴ در t_4 جریان از طریق جهت معکوس پل و از طریق کلیدها منتقل می‌شود [۳]. جریان در مدار کمکی پیوسته کاهش می‌یابد و جریان ورودی به تدریج به پل منتقل می‌شود. در پایان مد کاری جریان مدار کمکی صفر می‌شود و کلید کمکی می‌تواند به آرامی خاموش شود.

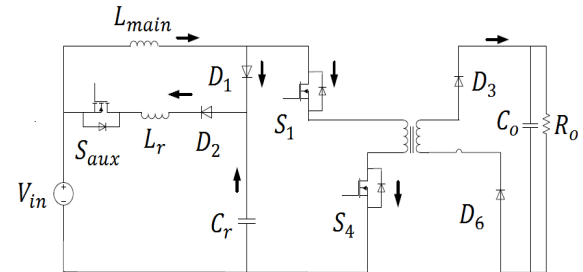
شکل (۱۴) مدار معادل مد ۵ $(t_4 < t < t_5)$ [۳].

مد ۶ $(t_5 < t < t_6)$: با توجه به مدار معادل این مد در شکل ۱۵، در طول این مد کاری مبدل در حالت تقویت قرار می‌گیرد [۳]. مدار مشابه یک مبدل بوست PWM استاندارد عمل می‌کند و همین‌طور باس DC اتصال کوتاه است. جریان عبوری از طریق L_{main} افزایش می‌یابد و مدار کمکی غیر فعال است.

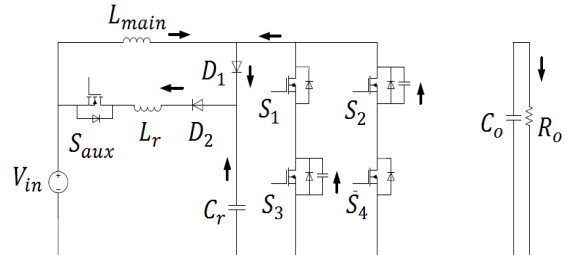
شکل (۱۵) مدار معادل مد ۶ $(t_5 < t < t_6)$ [۳].

مد ۷ $(t_6 < t < t_7)$: در $t = t_6$ کلید S_1 و S_4 خاموش هستند. با توجه به وجود خازن‌های خروجی خود کلید و خازن C_r ، کلیدها می‌توانند با ZVS خاموش شوند. خروجی کلید اصلی و C_r شروع به شارژ می‌کنند و در

معکوس قرار گرفته و توان به خروجی منتقل نمی‌شود. اما این انتقال توان به دلیل وجود اندوکتانس نشستی در ترانسفورماتور فوراً متوقف نمی‌شود. با رسیدن جریان ترانسفورماتور به صفر این مد نیز تمام می‌شود. شکل ۱۱ نشان دهنده‌ی این موضوع است [۳].

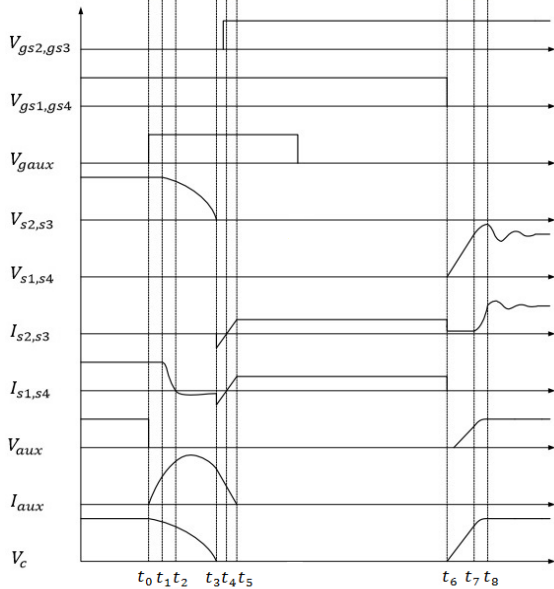
شکل (۱۱) مدار معادل مد ۲ $(t_1 < t < t_2)$ [۳].

مد ۳ $(t_2 < t < t_3)$: خازن‌های خروجی کلیدهای S_1 و S_3 و خازن C_r در طول این مد بدون بار هستند. جریان در شاخه مدار کمکی معادل جمع جریان عبوری از بخش پل به وسیله‌ی تخلیه شدن خازن‌های خروجی کلید و خازن C_r ، و جریان ورودی عبوری از L_{main} است. شکل ۱۲ بیانگر این موضوع است [۳].

شکل (۱۲) مدار معادل مد ۳ $(t_2 < t < t_3)$ [۳].

مد ۴ $(t_3 < t < t_4)$: در آغاز این مد، ولتاژ باس DC صفر است. کلیدهای S_1 و S_2 می‌توانند با ZVS روشن شوند. هم‌چنین در طول این مد جریان عبوری از مدار کمکی شروع به کاهش می‌کند زیرا ولتاژ دو سر سلف کمکی منفی است. جریان مدار کمکی در پایان این مد کاری برابر با جریان عبوری از L_{main} است. شکل ۱۳، مد ۴ را نشان می‌دهد [۳].

جریان کلیدها را در شکل ۱۹ مشاهده می‌کنیم که در مدهای مختلف تحلیل و آنالیز شده است [۳].



شکل (۱۹) شکل موج‌های ولتاژ و جریان کلیدها [۳].

۵- ویژگی‌ها و مزایای مطلوب کلیدزنی نرم

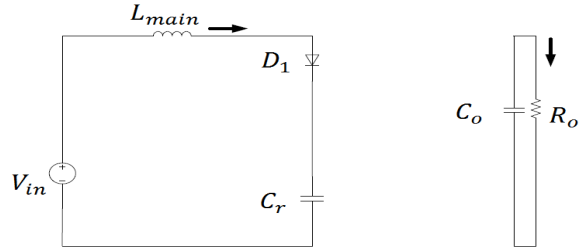
از جمله ویژگی‌هایی که می‌شود برای این تکنیک کلیدزنی بیان نمود که مهم‌ترین مزیت آن نیز به شمار می‌رود، کاهش تلفات و به متناسب آن افزایش فرکانس کاری است. مزایای دیگر این تکنیک را می‌توان در زیر دنبال کرد که عبارت‌اند از:

- افزایش چگالی توان [۱۰].
- کاهش اندازه و وزن اجزای مغناطیسی مدار [۷، ۸، ۱۱].
- کاهش و حذف کامل تداخل مغناطیسی.
- از بین بردن استرس و تنش موجود بر روی کلید.
- بازده و کارایی زیاد [۵، ۱۰].
- بهبود قابلیت اطمینان مدار [۳، ۶، ۷، ۹].
- فرکانس کلیدزنی بسیار زیاد و در حد چند مگاهرتز.
- کاربرد در مبدل‌های DC-DC، AC-DC، DC-AC.
- افزایش بهره‌وری توان و کاهش هزینه [۵، ۱۲].

۶- نتیجه‌گیری

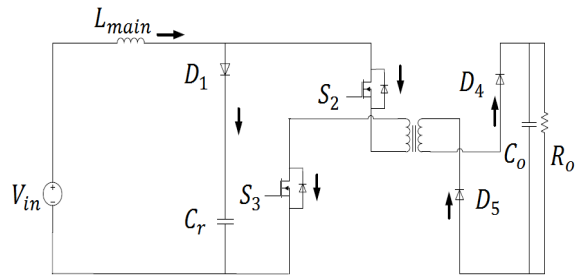
در این مقاله به توضیح کامل کلیدزنی نرم در مبدل‌های DC-DC پرداخته شد و انواع کلیدزنی تشریح گردید.

انتهای این مد ولتاژ آن‌ها به V_o/n می‌رسد. شکل ۱۶ مدار معادل این مد را نشان می‌دهد.



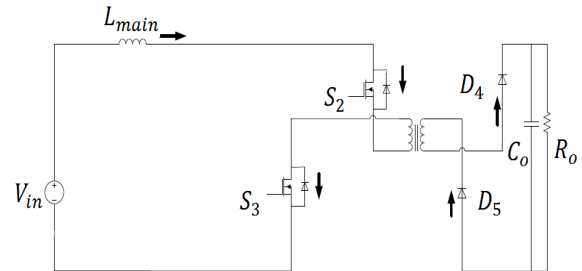
شکل (۱۶) مدار معادل مد ۷ ($t_6 < t < t_7$) [۳].

مد ۸ ($t_7 < t < t_8$): با توجه به شکل ۱۷ در آغاز این مد ولتاژ باس DC افزایش می‌یابد، ولتاژ سمت اولیه ترانسفورماتور به یک سطح مطمئن می‌رسد که در نتیجه دیودهای خروجی در بایاس مستقیم قرار می‌گیرند و جریان را هدایت می‌کنند.



شکل (۱۷) مدار معادل مد ۸ ($t_7 < t < t_8$) [۳].

مد ۹ ($t > t_8$): بعد از $t = t_8$ ، این مبدل در حالت انتقال انرژی قرار می‌گیرد. کلیدهای S_2 و S_3 جریان را عبور می‌دهند. توان از ورودی به خروجی منتقل می‌شود و جریان در L_{main} کاهش می‌یابد. اندوکتانس نشستی ترانسفورماتور با خازن خروجی کلید اصلی در آغاز این مد نوسان می‌کند اما این نوسان در نهایت به خاطر وجود مقاومت پارازیتی در مبدل از بین می‌رود. شکل ۱۸ مدار معادل این مد را به تصویر می‌کشد.



شکل (۱۸) مدار معادل مد ۹ ($t > t_8$) [۳].

در نهایت شکل موج‌های پالس‌های گیت هر کلید و ولتاژ و

- Using Output Coupled Inductor", IEEE Transaction on Power Electronic, Vol.29, No. 3, March 2014.
- [10] A. Mousavi, P. Das, G. Moschopoulos, "A Comparative of a ZCS DC-DC Full-Bridge Boost Converter with a ZVS Active-Clamp Converter", IEEE Transaction on Power Electronic, Vol.27, No. 3, March 2012.
- [11] S. Park, j. Yu, Y. Jung, C. Won, "Analusis and Design of a Soft-Switching Boost Converter with an HI-Bridge Auxiliary Resonant Circuit", IEEE Transaction on Power Electronic, Vol.25, No. 8, Agust 2010.
- [12] T.W. Ching, K.U. Chan, "Review of Soft-Switching Techniques for High-Frequency Switched-Mode Power Converter", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, September 3-8, 2008.

کلیدزنی سخت جهت تفهیم بیش تر تکنیک کلیدزنی نرم مورد بحث قرار گرفت. بعد از آشنایی با تکنیک‌های مختلف پیاده‌سازی شرایط کلیدزنی نرم در مبدل‌ها، مقایسه‌ای بین دو تکنیک رایج ZVS و ZCS انجام گرفت. جهت تفهیم بیش تر مطالب، وارد بُعد مداری شده و مبدل بوست به طور کامل مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در انتها می‌توان بیان کرد که هدف اصلی توسعه تکنیک‌های کلیدزنی نرم رسیدن به نقطه‌ای است که بتوان در فرکانس‌های بسیار زیاد و با کم‌ترین مقدار تلفات، کلیدزنی نمود. لازم به ذکر است که در هر مداری شامل کلید باشد می‌توان روش کلیدزنی نرم را در آن پیاده‌سازی نمود.

۷- منابع

- [۱] ش. شجاعی، م. جباری، غ. شاهقلیان، "یک مبدل بوست جدید با کلیدزنی نرم در شرایط ZCS"، اولین کنفرانس ملی ایده‌های نو در مهندسی برق، ۱۳۹۱.
- [۲] ن. اسدی، م. دلشاد، "ارائه یک مبدل دوجتهه غیر ایزوله جدید با کلیدزنی نرم در شرایط ZVS"، اولین کنفرانس ملی ایده‌های نو در مهندسی برق، ۱۳۹۱.
- [3] M. Baei, "A New ZVS-PWM Full-Bridge Boost Converter", A thesis Submitted in Partial Fulfillment of requirements for the Degree of Master of Engineering Science, 2012.
- [4] M. Jabbari, and H. Farzanehfard, "Family of Soft Switching Resonant DC-DC Converters," IET Power Electron, Vol. 2, Iss. 2, pp. 113-124, 2009.
- [5] R. Ramaprabha, " Implementation of Soft Switching Two Phase Boost Converter for Photovoltaic System", International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 2, Issue 6, June 2013.
- [6] L. Corradini, D. seltzer, D. Bloomquist, R. Zane, D. Maksimovic, B. Jacobson, "Zero Voltage Switching Technique for Bidirectional DC-DC Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 4, April 2014.
- [7] T. Wu, J. Yang, C. Kuo, Y. Wu, "Soft-Switching Bidirectional Isolated Full-Bridge Converter with Active and Passive Snubbers", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 3, March 2014.
- [8] A. Mousavi, G. Moschopoulos, "Anew ZCS-PWM Full-Bridge DC-DC Converter with Simple Auxiliary Circuits", IEEE Transaction on Power Electronic, Vol.29, No. 3, March 2014.
- [9] E. Chu, X. Hou, H. Zhang, M. Wu, X. liu, "Novel Zero-Voltage and Zero-Current Switching (ZVZCS) PWM Three-Level DC-DC Converter