

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه تفرش
دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد
مهندسی برق-کنترل

کنترل مبدل رزونانسی سری

نگارش: محمد مؤمنی

اساتید راهنما:

دکتر همایون مشگین کلک - دانشگاه تفرش
دکتر حیدرعلی طالبی - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۱۳۹۲

صور تجلسه دفاع

اعضای هیأت داوران نسخه نهایی پایان نامه آقای محمد مؤمنی تحت عنوان:

کنترل مبدل رزونانسی سری

را از نظر شکل (فرم) و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای دریافت درجه کارشناسی ارشد پیشنهاد می کنند.

ردیف	اعضای هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
۱	استاد راهنما			
۲	استاد راهنما			
۳	نماینده تکمیلی تحصیلات			
۴	استاد ناظر			
۵	استاد ناظر			

تفہیمِ دینیہ دینیہ

عالمِ آلِ محمد (صل)

تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و دورد بر محمد و خاندان پاک او، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است.

از پدر و مادر عزیزم، این دو معلم بزرگوار که همواره بر کوتاهی و درستی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یآوری بی چشم داشت برای من بوده اند کمال تشکر را دارم.

جناب آقای دکتر حیدرعلی طالبی استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، سعه صدر، حسن خلق و فروتنی جنابعالی بزرگترین سرمایه من در تمام مدت انجام این پایان نامه بود. راهنمایی های به موقع، معرفی افراد کارآموده در دانشگاه های مختلف، همه و همه محبت هایی است که هیچگاه فراموش نخواهم کرد، علاوه بر آن شب بارانی که ایرادات مقاله را اصلاح فرمودید.

دو سال پیش در همین روزها استادی وارد کلاس درس الکترونیک قدرت پیشرفته شدند و شروع به درس دادن کردند. نگاه مهربان آن روزهای استاد که علی رغم خستگی فراوان، با تمام انرژی تدریس می کردند، هیچوقت از ذهن من پاک نخواهد نشد. جناب آقای دکتر همایون مشگین کلک، انسانی شریف و بزرگوار، علی رغم تمام مشغله های مدیریتی دانشکده مهندسی برق، با حمایت بنده در تمامی جوانب پروژه همچون نحوه انجام آزمایش ها، فراهم نمودن کمک های مالی و بررسی مقالات، همچون پدری مهربان و دلسوز برای بنده بوده اند. دست حق نگهدار ایشان باد.

آشنایی با مهندس ابوالقاسم (حامد) هاشمی هم از دیگر افتخاراتی بود که در حین انجام پایان نامه حاصل گردید. فکر می کنم دوران خوش تحصیلات تکمیلی برای من از وقتی شروع شد که رفت و آمد من با حامد به طور جدی ادامه پیدا کرد. احساس می کنم به شما مدیونم آقای هاشمی اما نه فقط به خاطر نهارها، صبحانه ها، شام ها و تجربیاتی که با هم به اشتراک گذاشتیم، از همه این ها مهمتر به خاطر دوستیمان.

دوست عزیزم مهندس مرتضی قربانی همواره در انجام این پروژه مرا یاری نموده اند. حمایت و پشتیبانی ایشان از بنده حتی در روز دفاع، سبب شد تا من ارائه خوبی از پروژه داشته باشم. البته ایشان

نقش بسیار مهمی در برنامه های آزمایشگاه الکترونیک قدرت داشته اند، بدون ایشان هرگز کارهای بنده و مهندس هاشمی به بار نمی نشست. از ایشان کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم.

همچنین از اساتید گرامی جناب آقای دکتر درودی و جناب آقای دکتر حاجتی که با بیان نظراتشان رفع نواقص پایان نامه را مقدور ساختند تشکر و قدردانی می نمایم. از کارمندان زحمتکش گروه برق، سرکار خانم کلانتری و آقایان ابوطالبی و عباسی که کمک بسزایی در فراهم نمودن شرایط انجام این پروژه نموده اند تشکر و سپاسگزاری می نمایم.

کنترل مبدل رزونانسی سری

چکیده

امروزه مبدل‌های رزونانسی اهمیت بسیاری در کاربردهای مختلف یافته‌اند. از طرفی ماهیت غیرخطی این سیستم، طراحی کنترل‌کننده برای این کلاس خاص از مبدل‌های الکترونیک قدرت را تبدیل به مسئله‌ای جذاب نموده است. این پایان‌نامه در سه فصل به بررسی مسائل مربوط به مبدل‌های رزونانسی سری می‌پردازد. در فصل اول عملکرد مبدل و مدل‌سازی آن با استفاده از روش هارمونیک اصلی که یکی از روش‌های مهم مدل‌سازی این مبدل‌ها می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته‌است. پس از آن در فصل دوم با استفاده از مدل خطی شده سیستم و در نظر گرفتن زمان وظیفه به عنوان ورودی کنترلی، کنترل‌کننده‌های مقاوم با دو روش متفاوت طراحی شده و رفتار سیستم حلقه بسته با استفاده از شبیه‌سازی آن مورد آزمایش قرار گرفته‌است. مدل‌سازی سیستم از دیدگاه سیستم‌های هایبرید و طراحی کنترل‌کننده غیرخطی براساس عملکرد زیرسیستم‌ها در فصل سوم ارائه و صحت روش مدل‌سازی و کنترل‌کننده پیشنهادی به کمک نتایج شبیه‌سازی و ساخت یک نمونه آزمایشگاهی تایید گردیده‌است.

کلمات کلیدی: مبدل رزونانسی سری، کنترل مقاوم، سیستم‌های هایبرید، سیستم‌های تکه‌ای خطی.

صفحه

فهرست عناوین

۱	مبدل رزونانسی سری	۱
۱.۱	مقدمه	۱.۱
۲.۱	محاسبه بهره مدار	۲.۱
۳.۱	معادلات حالت سیستم و میانگین‌گیری فضای حالت	۳.۱
۴.۱	چالش‌های طراحی کنترل‌کننده برای مبدل‌های رزونانسی	۴.۱
۲	طراحی کنترل‌کننده مقاوم	۲
۱.۲	مقدمه	۱.۲
۲.۲	خطی‌سازی معادلات حالت سیستم	۲.۲
۳.۲	طراحی کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی	۳.۲
۴.۲	طراحی کنترل‌کننده فیدبک خروجی با استفاده از حل مسئله حساسیت مختلط	۴.۲
۵.۲	طراحی کنترل‌کننده فیدبک خروجی H با استفاده از روش نامساوی خطی ماتریسی	۵.۲
۶.۲	نتیجه‌گیری	۶.۲
۳	مدلسازی مبدل رزونانسی سری با استفاده از دیدگاه سیستم‌های هایبرید و کنترل مبدل با استفاده از مرز کلیدزنی گردشی	۳
۱.۳	مقدمه	۱.۳
۲.۳	بررسی عملکرد زیر سیستم‌های مبدل رزونانسی سری	۲.۳
۳.۳	مدل تکه‌ای خطی مبدل رزونانسی سری	۳.۳
۴.۳	طراحی قانون کنترل	۴.۳
۵.۳	بررسی نتایج بدست آمده از ساخت نمونه آزمایشگاهی	۵.۳
۶.۳	نتیجه‌گیری	۶.۳
۴	پیشنهادات	۴
۱.۴	پیشنهادات	۱.۴
	منابع و مراجع	
	پیوست‌ها	

صفحه

فهرست اشکال

- شکل ۱.۱ انواع شبکه LC در مبدل‌های رزونانسی [۳].....
- شکل ۲.۱ مدار مبدل رزونانسی ی [۳].....
- شکل ۳.۱ مدار مبدل رزونانسی سری به همراه اجزای آن.....
- شکل ۴.۱ شکل موج‌های نرمال شده مربوط به مبدل رزونانسی سری در حالت دائمی.....
- شکل ۵.۱ مدار مربوط به زیربازه هدایت Q_1
- شکل ۶.۱ مدار معادل زیربازه هدایت D_2
- شکل ۷.۱ مدار معادل زیربازه هدایت Q_2 و D_1
- شکل ۸.۱ مسیر حالت کامل نرمال شده مبدل رزونانسی سری در حالت هدایت پیوسته و فرکانس کلید زنی بیشتر از فرکانس رزونانس.....
- شکل ۹.۱ شکل موج‌های جریان سلف تشدید، ولتاژ خازن تشدید و جریان یکسو شده مدار تشدید.....
- شکل ۱۰.۱ مثلث مورد استفاده در قانون کوسینوس‌ها برای بدست آوردن مشخصه خروجی.....
- شکل ۱۱.۱ نواحی مجاز در مشخصه خروجی در معادله ۱-۱۲.....
- شکل ۱۲.۱ منحنی مشخصه خروجی مبدل رزونانس سری به ازای مقادیر مختلف F
- شکل ۱۳.۱ منحنی مشخصه خروجی مبدل رزونانس سری با بار مقاومتی به ازای مقادیر مختلف Q
- شکل ۱۴.۱ مبدل رزونانسی سری.....
- شکل ۱۵.۱ مدار معادل شبکه تمام پل در مبدل رزونانسی سری.....
- شکل ۱۶.۱ ورودی مدار تشدید برای حالت $d \neq 1$
- شکل ۱.۲ بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته به همراه کنترل کننده تناسبی-انتگرالی.....
- شکل ۲.۲ پاسخ سیستم حلقه بسته به تغییر ولتاژ مرجع از ۵ ولت به ۴ ولت.....
- شکل ۳.۲ خروجی کنترل کننده در آزمون تغییر ولتاژ مرجع از ۵ ولت به ۴ ولت.....
- شکل ۴.۲ پاسخ سیستم حلقه بسته به تغییر پله ای بار از ۳۷ اهم به ۶۷ اهم.....
- شکل ۵.۲ پاسخ کنترل کننده به تغییر پله ای بار از ۳۷ اهم به ۶۷ اهم.....
- شکل ۶.۲ پاسخ سیستم حلقه بسته به تغییر پله ای منبع ولتاژ ورودی از ۱۰ ولت به ۸ ولت.....
- شکل ۷.۲ تغییرات پهنای پالس در آزمایش تغییر پله ای منبع ولتاژ ورودی از ۱۰ ولت به ۸ ولت.....
- شکل ۸.۲ پاسخ سیستم حلقه بسته به ۵٪ کاهش پله ای در ولتاژ خازن تشدید.....
- شکل ۹.۲ تغییرات پهنای پالس در آزمایش تغییر پله ای خازن تشدید.....
- شکل ۱۰.۲ بلوک دیاگرام مسئله کنترل مقاوم در حالت تک ورودی- تک خروجی.....
- شکل ۱۱.۲ پاسخ فرکانسی عدم قطعیت نسبی نرمال شده در تابع تبدیل P و تابع وزن W_2
- شکل ۱۲.۲ پاسخ سیستم حلقه بسته به تغییر ولتاژ مرجع از ۵ ولت به ۴ ولت.....
- شکل ۱۳.۲ خروجی کنترل کننده در تغییر ولتاژ مرجع از ۵ ولت به ۴ ولت.....
- شکل ۱۴.۲ دفع اثر تغییر در مقاومت بار از ۳۷ اهم به ۶۷ اهم و ثابت نگه داشتن ولتاژ خروجی.....

- شکل ۱۵.۲ تنظیم پهنای پالس توسط کنترل کننده در آزمایش تغییر بار.....
- شکل ۱۶.۲ تنظیم ولتاژ خروجی در آزمایش تغییر پله ای منبع ولتاژ ورودی از ۱۰ ولت به ۸ ولت.....
- شکل ۱۷.۲ تنظیم پهنای پالس توسط کنترل کننده در آزمایش تغییر منبع ولتاژ ورودی.....
- شکل ۱۸.۲ دفع اثر تغییر خازن تشدید و ثابت نگه داشتن ولتاژ خروجی.....
- شکل ۱۹.۲ تنظیم پهنای پالس توسط کنترل کننده در آزمایش تغییر خازن تشدید.....
- شکل ۲۰.۲ پاسخ فرکانسی W_1S
- شکل ۲۱.۲ پاسخ فرکانسی W_2T
- شکل ۲۲.۲ سیستم افزوده به همراه کنترل کننده [۲۳].....
- شکل ۲۳.۲ سیستم افزوده به همراه کنترل کننده.....
- شکل ۲۴.۲ پاسخ فرکانسی عدم قطعیت نسبی نرمال شده در تابع تبدیل T_1 و تابع وزن W_3
- شکل ۲۵.۲ پاسخ فرکانسی عدم قطعیت نسبی نرمال شده در تابع تبدیل T_2 و تابع وزن W_4
- شکل ۲۶.۲ پاسخ فرکانسی عدم قطعیت نسبی نرمال شده در تابع تبدیل T_3 و تابع وزن W_5
- شکل ۲۷.۲ پاسخ سیستم حلقه بسته به تغییر ولتاژ مرجع از ۵ ولت به ۴ ولت.....
- شکل ۲۸.۲ پاسخ کنترل کننده به تغییر ولتاژ مرجع از ۵ ولت به ۴ ولت.....
- شکل ۲۹.۲ دفع اثر تغییر در مقاومت بار از ۳۷ اهم به ۶۷ اهم و ثابت نگه داشتن ولتاژ خروجی.....
- شکل ۳۰.۲ خروجی کنترل کننده در آزمایش تغییر بار از ۳۷ اهم به ۶۷ اهم.....
- شکل ۳۱.۲ دفع اثر کاهش ولتاژ ورودی از ۱۰ ولت به ۸ ولت و ثابت نگه داشتن ولتاژ خروجی.....
- شکل ۳۲.۲ تنظیم پهنای پالس توسط کنترل کننده برای دفع اثر تغییر ولتاژ ورودی در ولتاژ خروجی.....
- شکل ۳۳.۲ خروجی سیستم حلقه بسته در آزمایش تغییر خازن تشدید.....
- شکل ۳۴.۲ خروجی کنترل کننده در آزمایش تغییر خازن تشدید.....
- شکل ۱.۳ مدار مبدل رزونانسی سری.....
- شکل ۲.۳ شکل موج‌های جریان سلف تشدید، ولتاژ خازن تشدید و سیگنال روشن و خاموش کلیدهای کنترل شونده.....
- شکل ۳.۳ مدار معادل حالت های مختلف عملکرد مبدل رزونانسی سری.....
- شکل ۴.۳ یک سیستم هایبرید با پنج زیر سیستم.....
- شکل ۵.۳ صفحه فاز مبدل مبدل رزونانسی سری.....
- شکل ۶.۳ صفحه فاز کاهش یافته مبدل رزونانسی سری و محل وقوع رخداد های سیستم.....
- شکل ۷.۳ بلوک دیاگرام سیستم حلقه باز با ورودی کنترلی جدید.....
- شکل ۸.۳ صفحه فاز کاهش یافته مبدل رزونانسی سری به همراه مرز سوئیچ زنی.....
- شکل ۹.۳ مشخصه کنترلی مبدل رزونانسی سری در بالای رزونانس با توجه به شیب مرز سوئیچ زنی به ازای مقادیر مختلف ضریب کیفیت.....
- شکل ۱۰.۳ بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته با استفاده از قانون کنترل پیشنهادی.....
- شکل ۱۱.۳ مدار مبدل رزونانسی سری و مدار درایو کلیدهای نیمه هادی.....

- شکل ۱۲.۳ مدار نرمال ساز و تخمین گر متغیر حالت x_1
- شکل ۱۳.۳ مدار نرمال ساز و اندازه گیری مربوط به ولتاژ خازن تشدید.....
- شکل ۱۴.۳ مدار تولیدکننده مرز سوئیچ زنی و ورودی کنترلی.....
- شکل ۱۵.۳ شکل موجهای متغیرهای حالت x_1, x_2 و ورودی کنترلی u در حالت دائمی.....
- شکل ۱۶.۳ شکل موج متغیر حالت x_3 در حالت دائمی.....
- شکل ۱۷.۳ صفحه فاز کاهش یافته سیستم به همراه مرز سوئیچ زنی با شیب k_n
- شکل ۱۸.۳ مدار نرمال ساز ولتاژ خروجی مبدل رزونانسی سری.....
- شکل ۱۹.۳ مدار قانون کنترل ارائه شده برای پیاده سازی سیستم حلقه بسته.....
- شکل ۲۰.۳ تغییرات دامنه جریان نرمال سلف تشدید در آزمایش تغییر ولتاژ مرجع.....
- شکل ۲۱.۳ تغییرات دامنه ولتاژ نرمال خازن تشدید در آزمایش تغییر ولتاژ مرجع.....
- شکل ۲۲.۳ تغییرات ولتاژ خروجی نرمال در آزمایش تغییر ولتاژ مرجع.....
- شکل ۲۳.۳ تغییرات سیگنال کنترلی در آزمایش تغییر ولتاژ مرجع.....
- شکل ۲۴.۳ تغییرات دامنه جریان نرمال سلف تشدید در آزمایش تغییر پلهای بار.....
- شکل ۲۵.۳ تغییرات دامنه ولتاژ نرمال خازن تشدید در آزمایش تغییر پلهای بار.....
- شکل ۲۶.۳ تغییرات ولتاژ نرمال خروجی و تغییر پله در مقاومت خروجی در آزمایش تغییر بار.....
- شکل ۲۷.۳ تغییرات سیگنال کنترل در آزمایش تغییر پله ای بار.....
- شکل ۲۸.۳ تغییرات دامنه جریان نرمال سلف تشدید به تغییر منبع ولتاژ ورودی.....
- شکل ۲۹.۳ پاسخ ولتاژ نرمال خازن تشدید به تغییر پلهای در منبع ولتاژ ورودی.....
- شکل ۳۰.۳ پاسخ ولتاژ خروجی مبدل به تغییر پلهای در منبع ولتاژ ورودی.....
- شکل ۳۱.۳ تغییرات سیگنال کنترل k_n به ازای تغییر پلهای در منبع ولتاژ ورودی.....

صفحه

فهرست جداول

جدول ۱.۱	کمیت‌های نرمال سازی و تعاریف آن‌ها.....
جدول ۱.۲	پارامترهای مبدل رزونانسی سری [۱۸].....
جدول ۱.۳	مشخصات زیر سیستم‌های مبدل متناظر با مدل تکه خطی سیستم.....
جدول ۲.۳	پارامترهای مبدل رزونانسی سری.....

۱ مبدل رزونانسی سری

۱.۱ مقدمه

امروزه با توسعه و پیشرفت روزافزون تکنولوژی، مسئله اتلاف انرژی و راندمان در هر سیستم بیش از پیش مورد توجه قرار می‌گیرد. یک بخش مهم در هر سیستم الکتریکی را منبع تغذیه آن تشکیل می‌دهد که معمولاً دارای یکی از انواع مبدل‌های الکترونیک قدرت^۱ DC-DC می‌باشد. مبدل‌های الکترونیک قدرت DC-DC را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد، مبدل‌های مدولاسیون پهنای پالس^۲ (PWM) و مبدل‌های رزونانسی^۳ (RC). در مبدل‌های مدولاسیون پهنای پالس در هر دوره کلیدزنی، کلید کنترل‌شونده در لحظه روشن و خاموش شدن جریانی برابر با جریان بار از خود عبور می‌دهد. در این حالت کلید کنترل‌شونده متحمل استرس سوئیچزنی زیاد و در نتیجه توان تلفاتی بالایی می‌گردد که با فرکانس کلیدزنی رابطه خطی دارد. تداخل مغناطیسی^۴ (EMI) یکی دیگر از معایب این مبدل‌ها می‌باشد که به وسیله مقادیر بزرگ di/dt و dv/dt تولید می‌شود [۲،۱]. از طرفی برای افزایش چگالی توان، کاهش ابعاد و وزن مبدل نیاز به افزایش فرکانس داریم.

با تغییر وضعیت کلیدهای کنترل‌شونده در لحظه‌ای که جریان عبوری و/یا ولتاژ دو سر آن‌ها صفر است می‌توان اثرات فوق را کاهش داد. مبدل‌های رزونانسی دارای یک شبکه LC می‌باشند که ولتاژ و جریان این شبکه به صورت سینوسی تغییر می‌کند و شرایط را برای کلیدزنی در ولتاژ صفر^۵ (ZVS) یا

¹ Power electronic converters

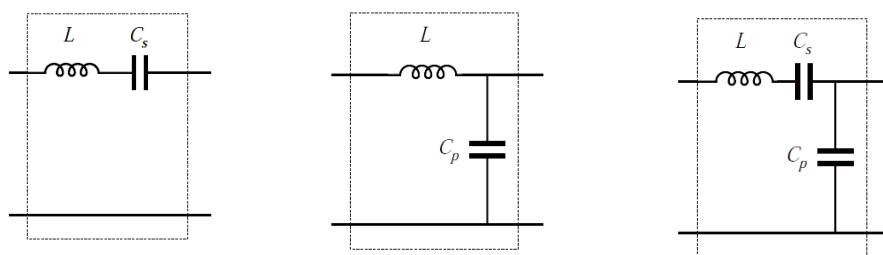
² Pulse Width Modulation

³ Resonant Converter

⁴ Electro Magnetic Interference

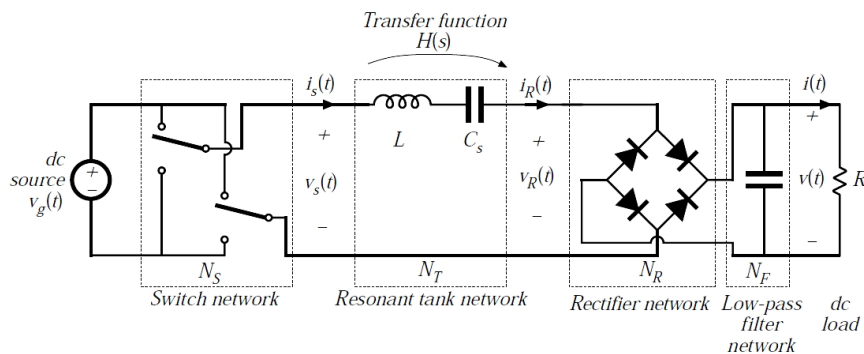
⁵ Zero Voltage Switching

کلیدزنی در جریان صفر^۶ (ZCS) فراهم می‌سازد. علاوه بر این، مبدل‌های رزونانسی را می‌توان با ثابت نگه داشتن پهنای پالس و تغییر فرکانس کلیدزنی، و هم با ثابت نگه داشتن فرکانس سوئیچ‌زنی و تغییر پهنای پالس کنترل نمود. مبدل‌های رزونانسی را با توجه به نوع شبکه LC به کار رفته در آن‌ها نام گذاری می‌کنند. شکل ۱.۱ سه ترکیب پرکاربرد و معروف شبکه‌های LC در مبدل‌های رزونانسی را نشان می‌دهد. به عنوان مثال اگر مبدل دارای شبکه LC سری باشد، مبدل را رزونانسی سری می‌نامند. شکل ۲.۱ یک مبدل رزونانسی سری را نشان می‌دهد که شامل شبکه سوئیچ‌زنی، شبکه LC، یکسوساز تمام پل و فیلتر خروجی می‌باشد. مبدل رزونانسی سری به دلیل داشتن تحلیل ساده‌تر نسبت به مبدل‌های رزونانسی موازی و سری-موازی، داشتن خازن سری و امکان استفاده از ترانس در آن از اهمیت خاصی برخوردار بوده و مدنظر این پایان‌نامه نیز می‌باشد. اگرچه مبدل‌های رزونانسی و نیز رزونانسی سری دارای مزیت کاهش تلفات سوئیچ‌زنی می‌باشند، اما معایبی هم دارند. از دیدگاه مهندسی کنترل، پیچیدگی و غیرخطی بودن معادلات حالت این سیستم نسبت به مبدل‌های مدولاسیون پهنای پالس از برجسته‌ترین معایب آن‌ها می‌باشد. به علاوه ولتاژ و جریان عناصر شبکه LC در این نوع مبدل‌ها سیگنال‌های شبه سینوسی با دامنه بزرگ می‌باشند به همین دلیل نمی‌توان همانند مبدل‌های مدولاسیون پهنای پالس از تحلیل سیگنال کوچک استفاده نمود [۳].



شکل ۱.۱ انواع شبکه LC در مبدل‌های رزونانسی [۳].

^۶ Zero Current Switching



شکل ۲.۱ مدار مبدل رزونانسی سری [۳].

در ادامه این بخش، ابتدا با استفاده از تحلیل حالت دائم رابطه بهره مبدل را محاسبه می‌کنیم. پس از آن با استفاده از تقریب هارمونیک اصلی و استفاده از روش میانگین‌گیری فضای حالت^۷ معادلات فضای حالت را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۲.۱ محاسبه بهره مدار

در این بخش عملکرد مبدل رزونانسی سری را در حالت هدایت پیوسته^۸ (CCM)، با فرکانس کلیدزنی بزرگتر از فرکانس تشدید^۹ شبکه LC و در حالت دائمی بررسی می‌کنیم. همچنین فرض می‌کنیم عناصر مدار ایده‌آل هستند و خازن فیلتر خروجی به اندازه کافی بزرگ است تا ولتاژ خروجی در یک دوره سوئیچ‌زنی ثابت بماند. نرمال‌سازی متغیرها نقش قابل توجهی در ساده‌سازی روابط دارد. بدین منظور امپدانس پایه R_{base} که برابر با امپدانس مشخصه تانک است و ولتاژ پایه V_{base} را که معمولاً برابر با منبع ولتاژ ورودی است در نظر می‌گیریم. برای بازه‌های زمانی و نرمال‌سازی فرکانس کلیدزنی نیز

⁷ State space averaging

⁸ Continuous Conduction Mode

⁹ Resonant frequency

فرکانس پایه را برابر با فرکانس تشدید $f_{base} = f_0 = 1/2f \sqrt{LC}$ تعریف می‌کنیم. بقیه متغیرهای نرمال سازی را به صورت جدول ۱.۱ در نظر می‌گیریم.

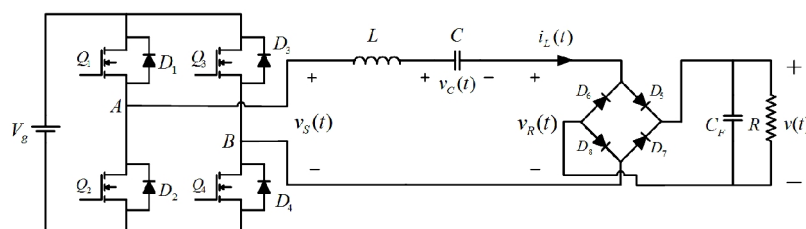
جدول ۱.۱ کمیت‌های نرمال سازی و تعاریف آن‌ها.

تعریف	نام کمیت
$R_{base} = Z = \sqrt{L/C}$	امپدانس پایه
$V_{base} = V_g$	ولتاژ پایه
$I_{base} = \frac{V_{base}}{R_{base}} = \frac{V_g}{Z}$	جریان پایه
$P_{base} = V_{base} I_{base} = \frac{V_g^2}{Z}$	توان پایه
$M = \frac{V}{V_{base}}$	ولتاژ خروجی نرمال شده
$m_C(t) = \frac{v_C(t)}{V_{base}}$	ولتاژ خازن نرمال شده
$J = \frac{I}{I_{base}}$	جریان خروجی نرمال شده
$j_L(t) = \frac{i_L(t)}{I_{base}}$	جریان سلف نرمال شده
$f_{base} = f_0 = 1/2f \sqrt{LC}$	فرکانس پایه (Hz)
$\check{S}_0 = 1/\sqrt{LC}$	فرکانس پایه (rad/s)
$F = \frac{f_s}{f_0}$	فرکانس کلیدزنی نرمال شده
$\chi = \frac{\check{S}_0 T_s}{2} = \frac{f}{F}$	نیم دوره کلیدزنی
$r = \check{S}_0 t_r$	زاویه هدایت دیودهای موازی با کلیدهای کنترل شونده

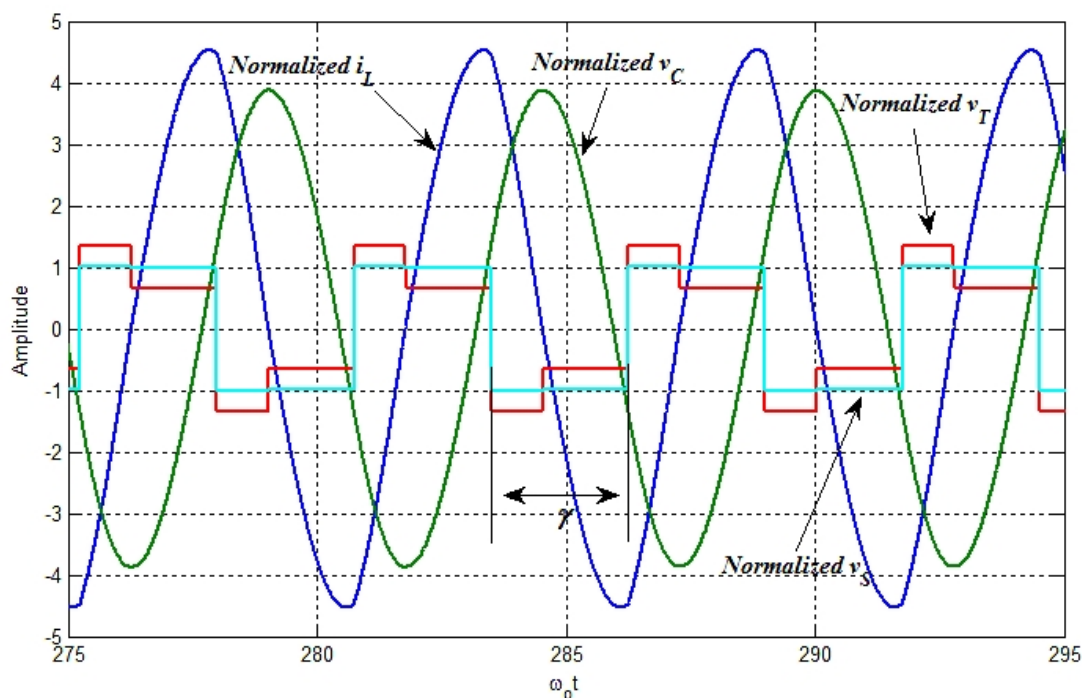
$s = \tilde{S}_0 t_s$	زاویه هدایت کلیدهای کنترل شونده
-----------------------	---------------------------------

یک مبدل رزونانسی سری در شکل ۳.۱ و شکل موج‌های نرمال شده آن در حالت دائمی در شکل ۴.۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است ولتاژ لحظه ای دو سر مدار LC برابر با تفاضل ولتاژ خروجی شبکه کلیدزنی $v_S(t)$ و ولتاژ ورودی شبکه یکسوساز $v_R(t)$ است.

$$v_T(t) = v_S(t) - v_R(t) \quad 1.1$$



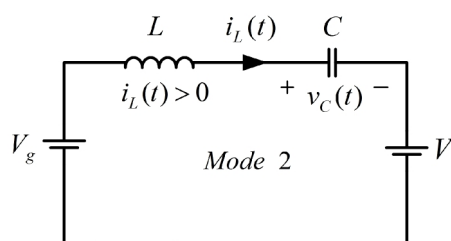
شکل ۳.۱ مدار مبدل رزونانسی سری به همراه اجزای آن.



شکل ۴.۱ شکل موج‌های نرمال شده مربوط به مبدل رزونانسی سری در حالت دائمی.

یک زیربازه مدت زمانی است که در آن وضعیت تمامی کلیدها ثابت باقی می‌ماند، همچنین در این مدت ولتاژ دو سر تانک $v_T(t)$ ، $v_S(t)$ و $v_R(t)$ نیز ثابت هستند. برای مثال، در اولین زیربازه Q_1 و Q_4 در حال هدایت و جریان سلف مثبت است، بنابراین دیودهای D_5 و D_8 روشن هستند، این زیربازه را Q_1 می‌نامیم. در این زیربازه، مدار شکل ۳.۱ به مدار شکل ۵.۱ تبدیل می‌شود. داریم:

$$\begin{aligned} v_S &= V_g \\ v_R &= V \\ v_T &= V_g - V \end{aligned} \quad 2.1$$



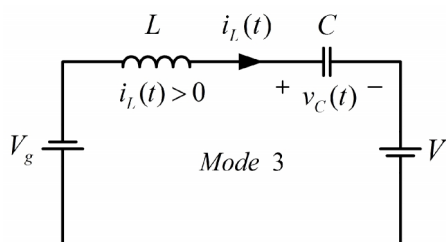
شکل ۵.۱ مدار مربوط به زیربازه هدایت Q_1 .

ولتاژ دوسر تانک ثابت و برابر با $V_g - V$ می‌باشد. با نرمال‌سازی این رابطه داریم:

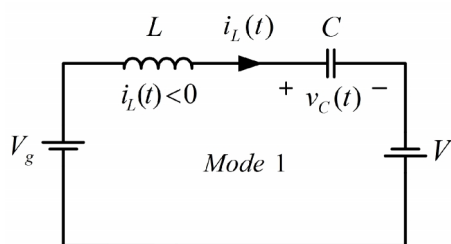
$$M_T = \frac{V_T}{V_g} = 1 - M \quad 3.1$$

با استفاده از تئوری مدار، می‌دانیم که مسیر در صفحه حالت برای این زیربازه یک کمان با مرکز $1 - M$ می‌باشد. در این زیربازه، جریان $i_L(t)$ مثبت است. با قطع شدن فرمان هدایت کلیدهای Q_1 و Q_4 ، از آنجایی که جریان مثبت است و باید پیوسته بماند، مسیر شارش آن از طریق دیودهای ذاتی D_2 و D_3 بسته می‌شود. با توجه به اینکه با روشن بودن D_2 و D_3 ولتاژ دو سر کلیدهای Q_2 و Q_3 صفر است می‌توان این کلیدها را در ولتاژ صفر روشن نمود. مدار معادل زیربازه D_2 در شکل ۶.۱ نشان داده شده است. ولتاژ نرمال دو سر مدار تشدید در این زیربازه برابر است با:

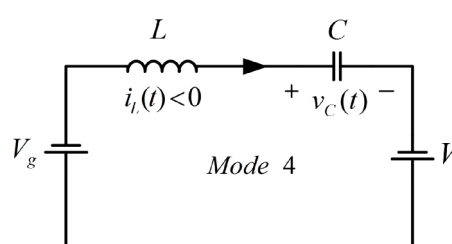
$$M_T = -1 - M \quad 4.1$$

شکل ۶.۱ مدار زیربازه هدایت D_2 .

زیربازه‌های Q_1 و D_2 به ترتیب دارای تقارن با زیربازه‌های Q_2 و D_1 می‌باشند و جریان‌ها و ولتاژها دارای پلاریته قرینه می‌باشند. مدارهای معادل این دو زیربازه به ترتیب در شکل ۷.۱ الف و شکل ۷.۱ ب نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۷.۱ مدار زیربازه هدایت Q_2 و D_1 .

ترتیب زیربازه‌ها در یک دوره کلیدزنی به صورت D_1 ، Q_1 ، D_2 و Q_2 می‌باشد که با روشن شدن دیودهای ذاتی D_1 و D_4 آغاز می‌شود و متناظر با نقطه $\tilde{S}_0 t = 0$ در صفحه فاز شکل ۸.۱ می‌باشد. مدار تانک مسیر مربوط به کمان با مرکز $1+M$ را آغاز می‌کند، در $\tilde{S}_0 t = \pi$ جریان سلف مثبت می‌شود و زیربازه Q_1 آغاز می‌شود و مدار، مسیر مربوط به کمان با مرکز $1-M$ را آغاز می‌کند. در $\tilde{S}_0 t = \pi + s = x$ (نیم‌دوره کلیدزنی) دیودهای D_2 و D_3 روشن می‌شوند و زیربازه D_2 آغاز می‌شود و مدار کمان با مرکز $-1-M$ را طی می‌کند، با عبور جریان سلف از صفر، زیربازه Q_2 آغاز می‌شود. زمانی که ترانزیستورهای Q_2 و Q_3 خاموش شوند یک دوره کلیدزنی به پایان می‌رسد.