بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق گرایش قدرت

کنترل خطی‌سازی با فیدبک ورودی-خروجی تطبیقی یک مبدل رزونانسی سری-موازی dc-dc

استادان راهنما:

دکتر نویدرضا ابجدی

دکتر غلامرضا عرب مارکده

استاد مشاور:

دکتر جعفر سلطانی

پژوهشگر:

محسن کربعلی‌زاده

بهمن ماه ۱۳۹۱

دانشکده فنی‌مهندسی

گروه مهندسی برق

پایان نامه آقای محسن کربعلی‌زاده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش قدرت با عنوان : "کنترل خطی‌سازی با فیدبک ورودی-خروجی تطبیقی یک مبدل رزونانسی سری-موازی dc-dc" در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۰۸ با حضور هیأت داوران زیر بررسی و با نمره ۱۸.۸۰ مورد تصویب نهایی قرار گرفت.

۱. **استاد راهنمای پایان نامه دکتر نویدرضا ابجدی با مرتبه علمی استادیار** **امضاء**

۲. **استاد راهنمای پایان نامه دکتر غلامرضا عرب مارکده با مرتبه علمی دانشیار** **امضاء**

۳. **استاد مشاور پایان نامه دکتر جعفر سلطانی با مرتبه علمی استاد** **امضاء**

۴. **استاد داور پایان نامه دکتر سعید اباذری با مرتبه علمی استادیار** **امضاء**

۵. **استاد داور پایان نامه دکتر محسن اکرامیان با مرتبه علمی استادیار** **امضاء**

دکتر قاسمی

معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی

دانشکده فنی و مهندسی

سپاس و ثنای بی‌حد بر آستان صفات بی‌همتای احدیت

تقدیم به

مادرم

پدرم

و همسر مهربانم

امیدوارم قادر به درک زیبایی‌های وجودشان باشم

و

با سپاس از راهنمایی‌های ارزشمند

اساتید محترم دانشگاه شهرکرد

چکیده:

تقاضای روز افزون برای منابع توان کوچک‌تر و کارآمدتر برای تجهیزات الکترونیکی فشرده، به روی آوردن درخواست‌ها برای مبدل‌های توان رزونانسی منجر شده است. در میان ساختارهای متعدد مبدل‌ها، مبدل‌های رزونانسی سری-موازی رایج-ترند. این مبدل ترکیب مزایای مبدل رزونانسی سری و مبدل رزونانسی موازی را داراست. مزایای مبدل‌های رزونانسی کاملاً شناخته شده‌اند: چگالی توان زیاد، بازدهی بالا و تداخل الکترومغناطیسی کم. مشکل کنترل کردن مبدل‌های کلیدزنی فرکانس بالا، موضوع بسیار مهمی در کاربردهای عملی است. برای حل آن، روش‌های کنترل مختلفی شامل روش‌های خطی و غیرخطی گزارش شده است. در میان آنها، روش‌های غیرخطی به دلیل بهبود پاسخ دینامیکی، مقاوم بودن و رفتار پایدار در مقابل تغییرات بار و ولتاژ ورودی توجه خاصی را دریافت کرده‌اند.

در این پایان‌نامه، به طراحی روش‌های کنترلی جدیدی برای حل مشکل تنظیم ولتاژ خروجی مبدل رزونانسی سری-موازی dc-dc با عملکرد شیفت فاز پرداخته شده است. این روش‌های کنترلی، طراحی کنترل‌کننده‌های تطبیقی و فازی-لغزشی پایدار با عملکرد مطلوب را برای این دسته از مبدل‌ها ممکن می‌سازد. این تحقیق شامل ترکیب مدل دینامیکی سیگنال بزرگ متوسط مناسب و روش خطی‌سازی ورودی-خروجی است که منجر به طراحی کنترل‌کننده‌های مختلفی از جمله: کنترل-کننده‌های لغزشی، لغزشی-فازی و تطبیقی می‌شود. این سه کنترل‌کننده برای مبدل رزونانسی سری-موازی dc-dc، طراحی و شبیه‌سازی شده و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در کنترل تطبیقی، پارامترهای کنترل‌کننده فیدبک ورودی-خروجی، در حین کار چنان تطبیق داده می‌شوند تا با وجود نامعینی در این پارامترها، عمل کنترل به درستی صورت گیرد. پایداری کلی سیستم کنترل تطبیقی با روش تابع لیاپانوف اثبات شده است. برخی ویژگی‌های مهم کنترل‌کننده تطبیقی پیشنهادی عبارتند از: کلیدزنی ولتاژ صفر، مقاوم بودن در برابر تغییرات پارامترهای خارجی و بار، فرکانس کلیدزنی ثابت، پاسخ گذرای سریع، حذف پدیده وزوز و کاهش ریپل ولتاژ خروجی در مقایسه با کنترل‌کننده‌های لغزشی و لغزشی-فازی. نتایج شبیه‌سازی برای تائید پیش‌بینی‌های نظری و کارائی بالای کنترل‌کننده تطبیقی نسبت به دیگر کنترل‌کننده‌ها ارائه شده است.

کلمات کلیدی: مبدل رزونانسی، کنترل تطبیقی، کنترل لغزشی-فازی، خطی‌سازی فیدبک، پدیده وزوز، ریپل ولتاژ، کلیدزنی ولتاژ صفر.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فهرست مطالب ۱

فهرست شکل‌ها ۴

فهرست جدول‌ها ۷

فصل اول- مقدمه ۸
۱-۱- مقدمه ۸
۱-۲- طرح مسئله ۱۰
۱-۳- تاریخچه ۱۱
۱-۴- معرفی فصل‌های پایانامه ۱۷

فصل دوم- مبدل‌های رزونانسی ۱۸
۲-۱- مقدمه ۱۸
۲-۲- کلیدزنی سخت و نرم ۱۹
۲-۲-۱- کلیدزنی سخت ۱۹
۲-۲-۱- کلیدزنی نرم ۲۰
۲- ۳- مبدل‌های رزونانسی بار dc-dc ۲۲
۲-۳-۱- مبدل‌های رزونانسی سری dc-dc ۲۲
۲-۳-۱-۱- عملکرد برای $\omega_s > \omega_o$ ۲۲
۲-۳-۱-۲- عملکرد برای $\omega_o/2 < \omega_s < \omega_o$ ۲۵
۲-۳-۱-۳- عملکرد برای $\omega_s < \omega_o/2$ ۲۵
۲-۳-۲- مبدل رزونانسی موازی dc-dc ۲۶
۲-۳-۳- مبدل رزونانسی سری-موازی dc-dc ۲۸
۲-۳-۳-۱- عملکرد حالت ولتاژ خازن پیوسته مبدل رزونانسی سری-موازی با اینورتر تمام پل ۳۰
۲-۳-۳-۲- عملکرد حالت ولتاژ خازن ناپیوسته مبدل رزونانسی سری-موازی با اینورتر تمام پل ۳۲
۲-۳-۴- مقایسه مبدل‌های رزونانسی ۳۳

فصل سوم- کنترل سیستم‌های غیرخطی ۳۴
۳-۱- مقدمه ۳۴
۳-۲- خطی‌سازی فیدبک ۳۵

۳-۲- ۱- خطی‌سازی ورودی-خروجی ۳۶
۳-۲-۲- خطی‌سازی ورودی-حالت ۳۷
۳-۳- کنترل لغزشی ۳۸
۳-۳- ۱- سطوح لغزشی ۳۸
۳-۳- ۲- کنترل لغزشی برای فرم کنترل‌پذیر معادلات حالت ۴۰
۳-۴- کنترل تطبیقی ۴۰
۳-۴-۱- مقایسه کنترل تطبیقی با کنترل لغزشی ۴۱
۳-۴-۲- کنترل تطبیقی GS ۴۲
۳-۴-۳- کنترل تطبیقی مدل مرجع (MRAS) ۴۳
۳-۴-۴- کنترل تطبیقی خود تنظیم (STR) ۴۳
۳-۴-۵- کنترل دوگانه ۴۵
۳-۴-۶- چگونگی طراحی کنترل‌کننده‌های تطبیقی ۴۵
۳-۴-۷- کنترل تطبیقی سیستم‌های خطی با فیدبک کامل حالت ۴۷
۳-۴-۸- کنترل تطبیقی سیستم‌های غیرخطی ۴۸
۳-۴-۹- همگرایی پارامتر در شرایط تحریک دائم کنترل‌کننده تطبیقی ۵۱
۳-۴-۱۰- تخمین بهنگام پارامترها ۵۱
۳-۴-۱۰-۱- مدل پارامتری کردن خطی ۵۲
۳-۴-۱۰-۲- تخمین حداقل مربعات ۵۲

فصل چهارم- کنترل مبدل رزونانسی سری-موازی ۵۵
۴-۱- مقدمه ۵۵
۴-۲- عملکرد پایه‌ای مبدل رزونانسی سری-موازی dc-dc ۵۶
۴-۳- مدل دینامیکی سیگنال بزرگ متوسط ۵۷
۴-۴- خطی‌سازی با فیدبک ورودی-خروجی ۵۸
۴-۵- مدولاسیون شیفت فاز ۵۹
۴-۶- کنترل‌کننده لغزشی ۶۲
۴-۶-۱- طراحی کنترل‌کننده ۶۲
۴-۶-۲- بررسی پایداری ۶۳
۴-۶-۳- نتایج شبیه‌سازی ۶۴
۴-۷- کنترل‌کننده لغزشی-فازی ۶۸
۴-۷-۱- طراحی کنترل‌کننده ۶۹
۴-۷-۲- نتایج شبیه‌سازی ۷۱
۴-۸- کنترل‌کننده تطبیقی ۷۸
۴-۸-۱- طراحی کنترل‌کننده ۷۸
۴-۸-۲- اثبات پایداری ۷۹
۴-۸-۳- نتایج شبیه‌سازی ۸۰

فصل پنجم- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۹۱
۵-۱- مقدمه ۹۱
۵-۲- نتیجه‌گیری ۹۱
۵-۳- پیشنهادات ۹۳

مراجع ۹۴

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل۲-۱- یک ساق از مبدل ۱۹
شکل۲-۲- شکل موج جریان و ولتاژ در کلیدزنی سخت ۱۹
شکل۲-۳- مکان هندسی کلیدزنی در کلیدزنی سخت ۲۰
شکل۲-۴- کاهش استرس (الف) مدارات اسنابر (ب) منحنی کلیدزنی با اسنابر ۲۱
شکل۲-۵- منحنی کلیدزنی ولتاژ صفر / جریان صفر ۲۱
شکل۲-۶- ZVS در یک ماسفت (الف) روشن شدن (ب) خاموش شدن ۲۲
شکل۲-۷- مبدل رزونانسی سری dc-dc با اینورتر نیم پل ۲۳
شکل۲-۸- شکل موج ولتاژ و جریان برای $\omega_s > \omega_o$ ۲۳
شکل۲-۹- مدار معادل ac برای مبدل رزونانسی سری dc-dc ۲۴
شکل۲-۱۰- پاسخ فرکانسی نرمال شده مبدل رزونانسی سری dc-dc ۲۵
شکل۲-۱۱- شکل موج‌های ولتاژ و جریان مبدل رزونانسی سری dc-dc، $\omega_o/2 < \omega_s < \omega_o$ ۲۵
شکل۲-۱۲- شکل موج جریان مبدل رزونانسی سری dc-dc، $\omega_s < \omega_o/2$ ۲۶
شکل۲-۱۳- مبدل رزونانسی موازی dc-dc ۲۶
شکل۲-۱۴- مدار معادل ac برای مبدل رزونانسی موازی dc-dc ۲۷
شکل۲-۱۵- پاسخ فرکانسی نرمال شده مبدل رزونانسی سری dc-dc ۲۸
شکل۲-۱۶- مبدل رزونانسی سری-موازی dc-dc ۲۸
شکل۲-۱۷- مدار معادل ac برای مبدل رزونانسی سری-موازی dc-dc ۲۹
شکل۲-۱۸- پاسخ فرکانسی نرمال شده مبدل رزونانسی سری-موازی dc-dc ۳۰
شکل۲-۱۹- مبدل رزونانسی سری-موازی با اینورتر تمام پل ۳۰
شکل۲-۲۰- شکل موج‌های عملکرد مبدل رزونانسی سری-موازی در حالت CCVM ۳۱
شکل۲-۲۱- مقایسه عملکرد بین حالات (الف) CCVM (ب) DCVM ۳۲
شکل۲-۲۲- پاسخ فرکانسی نرمال شده مبدل سری-موازی (الف) k=1 (ب) k=0.5 ۳۳
شکل۳-۱- مراحل کنترل لغزشی و پدیده وزوز ۴۰
شکل۳-۲- بلوک دیاگرام سیستم کنترل تطبیقی ۴۱
شکل۳-۳- بلوک دیاگرام سیستم کنترل برنامه‌ریزی بهره ۴۲
شکل۳-۴- بلوک دیاگرام سیستم کنترل تطبیقی مدل مرجع (MRAS) ۴۳
شکل ۳-۵- بلوک دیاگرام سیستم کنترل تطبیقی خود تنظیم (STR) ۴۴
شکل۳-۶- بلوک دیاگرام سیستم کنترل تطبیقی دوگانه ۴۵
شکل۳-۷ سیستم با تابع تبدیل حقیقی کاملاً مثبت (SPR) ۴۶
شکل۴-۱- ساختار مبدل رزونانسی سری-موازی dc-dc ۵۷
شکل۴-۲- شکل‌موج‌های پایه‌ای برای مدولاسیون شیفت فاز ۶۰
شکل۴-۳- شکل‌موج پایه‌ای برای مدولاسیون گسسته شیفت فاز ۶۱
شکل۴-۴- بلوک دیاگرام بدست آوردن سطح لغزشی ۶۳

شکل۴-۵- تنظیم ولتاژ خروجی مبدل رزونانسی روی ۱۵ ولت با کنترل‌کننده لغزشی ۶۵
شکل۴-۶- ولتاژ خروجی با کنترل لغزشی در حضور ۳۰٪ افزایش جریان بار در لحظه ۰.۰۱s ۶۵
شکل۴-۷- ۳۰٪ افزایش در جریان بار با کنترل لغزشی در لحظه ۰.۰۱s ۶۵
شکل۴-۸- ولتاژ خروجی با کنترل لغزشی در حضور تغییر ولتاژ مرجع از ۱۵ به ۲۰ ولت در لحظه ۰.۰۱s ۶۶
شکل۴-۹- سطح لغزش S در حضور تغییر ولتاژ مرجع از ۱۵ به ۲۰ ولت در لحظه ۰.۰۱s ۶۶
شکل۴-۱۰- ولتاژ خروجی با کنترل لغزشی در حضور تغییر ولتاژ ورودی از ۱۲ به ۱۵ ولت در لحظه ۰.۰۱s ۶۷
شکل۴-۱۱- سیگنال کنترلی u در کنترل لغزشی، ۰.۵ms قبل و بعد از تغییر ولتاژ ورودی در لحظه ۰.۰۱s ۶۷
شکل۴-۱۲- ولتاژ خروجی مبدل با کنترل لغزشی در حضور افزایش خازن C_o در لحظه ۰.۰۱s ۶۸
شکل۴-۱۳- توابع عضویت ورودی سطح لغزشی ۶۹
شکل۴-۱۴- توابع عضویت ورودی تغییرات سطح لغزشی ۷۰
شکل۴-۱۵- توابع عضویت خروجی ۷۰
شکل۴-۱۶- ساختار کنترل‌کننده لغزشی-فازی مبدل رزونانسی سری-موازی ۷۱
شکل۴-۱۷- تنظیم ولتاژ خروجی مبدل رزونانسی روی ۱۵ ولت با کنترل‌کننده لغزشی-فازی ۷۱
شکل۴-۱۸- ولتاژ V_{ab} به همراه جریان رزونانس i_L با کنترل لغزشی-فازی در حالت ماندگار ۷۲
شکل۴-۱۹- ولتاژ خروجی با کنترل لغزشی-فازی در حضور ۳۰٪ افزایش جریان بار در لحظه ۰.۰۱s ۷۲
شکل۴-۲۰- ۳۰٪ افزایش جریان بار با کنترل لغزشی-فازی در لحظه ۰.۰۱s ۷۲
شکل۴-۲۱- زاویه شیفت فاز با کنترل لغزشی-فازی در حضور ۳۰٪ افزایش جریان بار در لحظه ۰.۰۱s ۷۳
شکل۴-۲۲- ولتاژ خروجی با کنترل لغزشی-فازی برای تغییر ولتاژ مرجع از ۱۵ به ۲۰ ولت در لحظه ۰.۰۱s ۷۴
شکل۴-۲۳- زاویه شیفت با کنترل لغزشی-فازی برای تغییر ولتاژ مرجع از ۱۵ به ۲۰ ولت در لحظه ۰.۰۱s ۷۴
شکل۴-۲۴- ولتاژ V_{ab} با جریان i_L در زمان‌های قبل (چپ) و پس (راست) از تغییر ولتاژ مرجع ۷۵
شکل۴-۲۵- ولتاژ خروجی با کنترل لغزشی-فازی برای تغییر ولتاژ ورودی از ۱۲ به ۱۵ ولت در لحظه ۰.۰۱s ۷۵
شکل۴-۲۶- زاویه شیفت با کنترل لغزشی-فازی برای تغییر ولتاژ ورودی از ۱۲ به ۱۵ ولت در لحظه ۰.۰۱s ۷۶
شکل۴-۲۷- ولتاژ خروجی مبدل با کنترل لغزشی-فازی در حضور افزایش خازن C_o در لحظه ۰.۰۱s ۷۶
شکل۴-۲۸- مقایسه ولتاژ خروجی در دو طرح کنترلی (الف) شکل‌موج (ب) بزرگ‌نمایی ۷۷
شکل۴-۲۹- ساختار کنترل‌کننده تطبیقی پیشنهادی ۸۰
شکل۴-۳۰- تنظیم ولتاژ خروجی مبدل رزونانسی روی ۱۵ ولت با کنترل‌کننده تطبیقی ۸۰
شکل۴-۳۱- شکل‌موج ولتاژ خروجی اینورتر V_{ab} به همراه جریان رزونانس i_L در حالت ماندگار ۸۱
شکل۴-۳۲- ولتاژ خروجی مبدل با کنترل تطبیقی در حضور ۳۰٪ افزایش جریان بار در لحظه ۰.۰۱s ۸۱
شکل۴-۳۳- ۳۰٪ افزایش جریان بار با کنترل تطبیقی در لحظه ۰.۰۱s ۸۱
شکل۴-۳۴- زاویه شیفت فاز با کنترل تطبیقی در حضور ۳۰٪ افزایش جریان بار در لحظه ۰.۰۱s ۸۲
شکل۴-۳۵- تأثیر حضور سیگنال تحریک بر ولتاژ خروجی مبدل در کنترل‌کننده تطبیقی ۸۲
شکل۴-۳۶- ولتاژ خروجی با کنترل تطبیقی با تغییر در ولتاژ مرجع از ۱۵ به ۲۰ ولت در لحظه ۰.۰۱s ۸۳
شکل۴-۳۷- زاویه شیفت با کنترل تطبیقی در حضور تغییر ولتاژ مرجع از ۱۵ به ۲۰ ولت در لحظه ۰.۰۱s ۸۳
شکل۴-۳۸- ولتاژ خروجی با کنترل تطبیقی در حضور تغییر ولتاژ ورودی از ۱۲ به ۱۵ ولت در لحظه ۰.۰۱s ۸۴
شکل۴-۳۹- زاویه شیفت با کنترل تطبیقی در حضور تغییر ولتاژ ورودی از ۱۲ به ۱۵ ولت در لحظه ۰.۰۱s ۸۴

شکل۴-۴۰- ولتاژ خروجی مبدل با کنترل تطبیقی در حضور افزایش خازن C_o در لحظه ۰.۰۱s ۸۴
شکل۴-۴۱- مقایسه ولتاژ خروجی در سه طرح کنترلی (الف) شکل‌موج (ب) بزرگ‌نمایی ۸۵
شکل۴-۴۲- ولتاژ خروجی مبدل با کنترل تطبیقی در حضور ۲۰٪ کاهش خازن C_s در لحظه ۰.۰۱s ۸۶
شکل۴-۴۳- ولتاژ خروجی مبدل با کنترل تطبیقی در حضور ۲۰٪ کاهش خازن C_p در لحظه ۰.۰۱s ۸۶
شکل۴-۴۴- ولتاژ خروجی مبدل با کنترل تطبیقی در حضور ۱۰٪ کاهش سلف Ls در لحظه ۰.۰۱s ۸۶
شکل۴-۴۵- ولتاژ خروجی مبدل با کنترل تطبیقی در حضور ۵۰٪ افزایش سلف L_s در لحظه ۰.۰۱s ۸۷
شکل۴-۴۶- ولتاژ خروجی با کنترل تطبیقی در حضور تغییر همه سلف و خازن‌های مبدل در لحظه ۰.۰۱s ۸۷
شکل۴-۴۷- زاویه شیفت با کنترل تطبیقی برای تغییر همه سلف و خازن‌های مبدل در لحظه ۰.۰۱s ۸۸
شکل۴-۴۸- ولتاژ خروجی با کنترل تطبیقی در حضور مقدار غیرنامی همه سلف و خازن‌های مبدل ۸۸
شکل۴-۴۹- زاویه شیفت با کنترل تطبیقی در حضور مقدار غیرنامی همه سلف و خازن‌های مبدل ۸۸
شکل۴-۵۰- شکل‌موج سینوسی ولتاژ خازن موازی در حالت ماندگار ۸۹
شکل۴-۵۱- شکل‌موج سینوسی ولتاژ خازن سری در حالت ماندگار ۸۹
شکل۴-۵۲- شکل‌موج سینوسی جریان رزونانس در حالت ماندگار ۹۰

فهرست جدول‌ها

عنوان صفحه

جدول۴-۱- مقادیر عناصر الکتریکی استفاده شده در شبیه‌سازی مبدل ۶۴
جدول۴-۲- قوانین مورد استفاده در کنترل‌کننده لغزشی-فازی ۷۰

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

مبدل‌ها، مدارات تبدیل توانی هستند که یک واسطه و تطبیق توان را بین منبع و بار مهیا می‌کنند. مدار مبدل‌ها شامل: قطعات نیمه‌هادی، سیگنال‌های الکتریکی، بعلاوه عناصر ذخیره‌کننده انرژی همچون خازن و سلف است. بسته به نوع توان در سمت منبع و بار، مبدل‌ها به چهار دسته تقسیم می‌شوند: ac-ac، ac-dc، dc-ac و dc-dc. مبدل‌های dc-dc واسطه بین سیستم‌های dc با سطوح ولتاژ متفاوت را فراهم می‌کنند. آنها به طور گسترده در بسیاری از کاربردهای صنعتی که احتیاج به تبدیل منبع dc ولتاژ ثابت به منبع dc ولتاژ متغیر دارند و در کاربردهای درایو موتور dc استفاده می‌شوند. براساس روش‌های تبدیل توان، مبدل‌های dc-dc، در دو دسته مبدل‌های PWM و مبدل‌های رزونانسی قرار می‌گیرند.

مبدل‌های PWM دارای ساختار مداری ساده، کنترل آسان و هزینه نسبی کمتری هستند. در عین حال، تلفات کلیدزنی زیاد و در نتیجه بازدهی کم دارند. تلفات توان کلیدزنی وسایل به طور خطی با فرکانس کلیدزنی افزایش می‌یابد، بنابراین، مبدل‌های PWM معمولا در فرکانس‌های پایین به کار می‌روند. در کنار این مشکلات، مقدار زیاد di/dt و dv/dt منجر به استرس ولتاژ و جریان بالا روی کلیدها می‌شود.

کاملاً واضح است که اگر کلیدهای مبدل در زمانی که ولتاژ روی آنها و/یا جریان عبوری از آنها در لحظه روشن و خاموش شدن، صفر باشد، تلفات توان کاهش می‌یابد. کلیدزنی ولتاژ صفر و جریان صفر را می‌توان با استفاده از یک مدار رزونانس LC، ایجاد کرد. چنین مبدل‌هایی، مبدل‌های رزونانسی نامیده می‌شوند. در دسته‌ای از مبدل‌های رزونانسی به نام مبدل‌های رزونانس بار، از یک تانک (محفظه) رزونانسی LC برای حذف هارمونیک‌های موج مربعی ورودی آن استفاده می‌شود، بطوریکه، کلیدزنی ولتاژ صفر و جریان صفر نیز رعایت شود. ولتاژ خروجی یک اینورتر، ورودی تانک رزونانسی است که موجب تحریک جریان سینوسی رزونانسی

می‌شود. این جریان پس فاز یا پیش فاز نسبت به ولتاژ ورودی تانک، موجب روشن شدن یا خاموش شدن کلیدها به ترتیب در ولتاژ صفر یا جریان صفر می‌شود، پس استرس کلیدها و تلفات کلیدزنی کاهش و بازدهی افزایش می‌یابد. علاوه براین، فرکانس کلیدزنی بالا در مبدل‌های رزونانسی، چگالی توان را افزایش می‌دهد. دیگر مزایای عملکرد در فرکانس‌های بالاتر عبارتند از: کاهش اندازه تجهیزات و در نتیجه کاهش وزن و هزینه آنها، کاهش تداخل الکترومغناطیسی (EMI)، بهبود پاسخ گذرا و غیره.

در مبدل‌های رزونانسی، دو مجموعه عناصر ذخیره‌کننده انرژی وجود دارد: یکی مدار تانک رزونانسی و دیگری فیلتر خروجی. ولتاژ خروجی به طور غیرمستقیم، از طریق کنترل انرژی تانک رزونانسی کنترل می‌شود. با توجه به وجود تانک رزونانس، کنترل مبدل‌های رزونانسی بسیار پیچیده‌تر از مبدل‌های PWM است. مبدل‌های رزونانسی بار سری، دارای سلف و خازن سری در تانک رزونانسی خود هستند و عملکرد آنها به گونه‌ای است که در بارهای سبک، ولتاژ خروجی به فرکانس کلیدزنی وابسته نیست و بهره کمتر از یک دارند. تانک رزونانس در مبدل رزونانسی موازی، شامل آرایش موازی سلف و خازن است و در بارهای سبک بهره مبدل پایین است.

مبدل‌های رزونانسی با سه یا تعداد المان رزونانس بیشتر دارای عملکرد و پاسخ دینامیکی بهتری هستند، به علاوه در مدار رزونانس با مرتبه بیشتر امکان جذب پارازیت بیشتری خصوصاً در فرکانس‌های بالاتر وجود دارد [۱]. مبدل‌های رزونانسی سری-موازی از نوع LCC و LLC از معروف‌ترین مبدل‌های رزونانسی هستند، که از سه المان رزونانس استفاده می‌کنند و کاربرد گسترده‌ای در صنعت دارند. از مبدل LCC که فاقد عیوب هر دو مبدل سری و موازی است، به دلیل جذب کامل المان‌های پارازیت ترانسفورماتور در کاربردهای ولتاژ بالا و از مبدل LLC به دلیل راندمان بالا در بارهای سبک و تغییرات کم فرکانس سوئیچینگ در کاربردهای ولتاژ پایین استفاده می‌شود [۳-۲] . مشکلی که در مورد این مبدل‌ها مطرح است، سیستم‌های غیرخطی مرتبه بالای آنهاست که تحلیل و کنترل آنها را پیچیده و سخت می‌کند.

برای کنترل مبدل‌های رزونانسی، روش‌های غیرخطی بر روش‌های خطی ترجیح داده می‌شوند، زیرا کنترل غیرخطی دارای ویژگی‌های مطلوبی چون محدوده عملکرد وسیع‌تر، پاسخ گذرای سریع، مقاوم بودن و ... بوده و در سیستم‌های دارای پارامترهای نامعین قابل استفاده است. از جمله روش‌های غیرخطی که برای کنترل مبدل رزونانسی سری-موازی با موفقیت به کار گرفته شده، کنترل لغزشی است [۴]. کنترل دینامیک غیرخطی مرتبه بالای مبدل رزونانسی سری-موازی، به کنترل دینامیک مرتبه اول سطح لغزشی تبدیل شده و منجر به یک کنترل‌کننده مقاوم لغزشی می‌شود. اما مشکلی که کنترل‌کننده‌های لغزشی با آن روبرو هستند، وجود پدیده نامطلوب نوسان فرکانس بالا با دامنه محدود موسوم به پدیده وزوز[1] در سیگنال کنترل است. گسسته بودن سیگنال کنترل لغزشی، باعث پدیده وزوز و ایجاد ریپل در ولتاژ خروجی مبدل می‌شود.

راه‌حل پیشنهادی برای مقابله با چنین مشکلاتی، ترکیب کنترل لغزشی با کنترل فازی و طراحی کنترل‌کننده لغزشی-فازی است که با پیوسته کردن تغییرات سیگنال کنترل، دیگر شاهد بروز پدیده وزوز و ریپل ولتاژ خروجی نخواهیم بود. ولی ایرادی که به کنترل لغزشی-فازی وارد است، دینامیک کند این کنترل‌کننده است.

[1] Chattering

روش دیگر کنترل که ضمن برطرف کردن مشکلات کنترل‌کننده‌های لغزشی و لغزشی-فازی، خصوصیات مطلوب هر دو کنترل‌کننده را داراست، کنترل تطبیقی است. برای مقابله با عدم قطعیت‌ها و تغییرات پارامتری در مبدل رزونانسی سری-موازی در کنار پاسخ گذرای سریع، ریپل ولتاژ ناچیز و حذف پدیده وزوز و ... کنترل‌کننده تطبیقی انتخاب مناسبی است.

تحقیقات در زمینه کنترل تطبیقی در اوایل سال‌های ۱۹۵۰، درباره طراحی خلبان خودکار در هواپیماهای با عملکرد برجسته که در محدوده وسیعی از سرعت و ارتفاع کار می‌کنند و لذا با تغییرات زیاد پارامترها مواجه‌اند، آغاز شد.کنترل تطبیقی به عنوان یک روش برای تنظیم خودکار پارامترهای کنترل‌کننده سیستم-هایی که دینامیک آنها با تغییرات روبروست، پیشنهاد شد. پیشرفت و انسجام نظریه کنترل تطبیقی منجر به استفاده‌های متعددی مثل: ربات‌های جابجاکننده، کنترل هواپیما و موشک، فرایندهای شیمیایی، سیستم‌های قدرت، گردش کشتی‌ها، مهندسی پزشکی و ... شده است.

اهمیت کنترل تطبیقی از آنجا مشخص می‌شود که در برخی طرح‌های کنترل مثل ربات جابجاکننده، سیستمی که باید کنترل شود، ممکن است در ابتدای کار کنترل عدم قطعیت پارامتری داشته باشد. اگر میزان نامعینی این پارامترها با یک مکانیسم تطبیق و یا تخمین به صورت بهنگام تقیل داده نشود، ممکن است باعث عدم دقت یا ناپایداری در سیستم کنترل شوند. در بسیاری موارد دیگر مثل کنترل سیستم‌های قدرت، ممکن است دینامیک سیستم در ابتدای کار کاملاً معلوم باشد، ولی در حین انجام فرایند کنترل، پارامترهای آن با تغییرات غیر قابل پیش‌بینی مواجه شوند. لذا بدون طراحی مجدد کنترل‌کننده، این امکان وجود دارد که کنترل‌کننده طراحی شده اولیه که در ابتدای کار مناسب بود قادر نباشد سیستم در حال تغییر را کنترل کند. به طور کلی، هدف اصلی کنترل تطبیقی این است که عملکرد سیستم در مقابل عدم قطعیت پارامتری و یا تغییرات نامشخص آنها به طور سازگار حفظ شود.

۱-۲- طرح مسئله

مبدل رزونانسی سری-موازی dc-dc که در این پایان‌نامه به کنترل آن پرداخته شده است، از نوع مبدل رزونانسی LCC بوده که دارای سه المان رزونانس سلف و خازن است و در فیلتر خروجی نیز دارای سلف و خازن خروجی است، با در نظر گرفتن این پنج عنصر سلف و خازن به عنوان متغیرهای حالت، معادلات دینامیکی مبدل با تحلیل مداری بدست می‌آیند. در تبدیل معادلات مبدل به فرم متوسط سیگنال بزرگ، با اضافه شدن دو زاویه فاز ولتاژ خازن‌های رزونانسی، تعداد متغیرهای حالت به هفت می‌رسد. استفاده از خطی-سازی فیدبک ورودی-خروجی در ساده‌سازی این معادلات پیچیده مبدل راه‌کار مناسبی است. نامعینی‌های موجود در پارامترهای معادلات خطی شده مبدل با استفاده از کنترل تطبیقی پوشش داده می‌شوند.

بدین ترتیب اهداف اصلی طرح را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱- در ابتد مروری بر ساختار مبدل های رزونانسی خواهیم داشت و با روش‌های کلیدزنی و انواع مختلف مبدل‌های رزونانسی آشنا می‌شویم.

۲- با خطی‌سازی فیدبک ورودی-خروجی آشنا شده و به معرفی کنترل‌کننده‌های غیرخطی از جمله کنترل‌کننده لغزشی و تطبیقی می‌پردازیم.

۳- به طراحی کنترل‌کننده غیرخطی لغزشی متعارف برای مبدل رزونانسی سری-موازی پرداخته و عملکرد آن را نیز بررسی می‌کنیم.

۴- دو کنترل‌کننده پیشنهادی لغزشی-فازی و تطبیقی برای مبدل رزونانسی سری-موازی طراحی می‌شود. به تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از بکارگیری این دو کنترل‌کننده پرداخته و با کنترل‌کننده لغزشی مقایسه می‌شود.

۵- برای تایید خصوصیات و بررسی کارایی و مقایسه بین کنترل‌کننده‌های طراحی شده، نتایج شبیه-سازی ارائه می‌شوند.

۱-۳- تاریخچه

روش‌های کنترلی مختلفی برای به کارگیری در مبدل‌های رزونانسی ارائه شده است. در [۵] چند روش کنترل مبدل رزونانسی مورد بحث قرار گرفته و یک مقایسه کمی بین آنها انجام شده است تا مزایا و معایب هر یک مشخص شود. برای بررسی، از یک مبدل رزونانسی سری-موازی تمام پل استفاده شده است. روش‌های کنترل مختلف مورد بحث عبارتند از: کنترل فرکانس متغیر (VF)، کنترل مدولاسیون شیفت فاز (PSM)، کنترل نوسان خود نگهدار (SSOC)، کنترل مدولاسیون شیفت فاز خودنگهدار (SSPSM) و کنترل بهینه (LQR). در این مقاله نشان داده شده است که کنترل‌کننده‌های خطی متعارف کارایی خوبی را تنها در یک نقطه کار ارائه می‌دهند، در حالی که کنترل‌کننده‌های غیرخطی می‌توانند ثبات، قابلیت اطمینان و کارایی دینامیکی را در محدوده عملکرد وسیع بهبود دهند.

تنظیم ولتاژ مبدل‌های رزونانسی مهمترین بخش از تحقیقات و بررسی‌ها را تشکیل می‌دهد. ساده‌ترین ساختار، کنترل‌کننده خطی PI است که ورودی آن انحراف ولتاژ خروجی و تغییر در فرکانس کلیدزنی به عنوان خروجی کنترل‌کننده است [۶]. یک کنترل‌کننده فیدبک حالت با پیاده‌سازی ساده برای بهبود پایداری و مشخصه دینامیکی مبدل‌های رزونانسی در سال ۱۹۹۱ توسط آقای مارن گو کیم و همکارانش پیشنهاد شده است [۷]. این محققان در همان سال یک قانون کنترل با فیدبک انرژی را در حوزه گسسته، مدلسازی و تحلیل کرده‌اند [۸]. آقای عیسی باتارسه در سال ۱۹۹۴ به چندین ساختار رزونانسی اشاره کرده است و آنها را مورد مقایسه قرار داده است. این ساختارها به طور کلی شامل مبدل‌های رزونانسی نیم پل و تمام پل با دو، سه و چهار عنصر ذخیره‌کننده انرژی هستند [۹].

در سال ۱۹۹۷ استانکویک و همکارانش، امکان استفاده از کنترل‌کننده‌های غیرخطی اتلافی[۲] برای تنظیم ولتاژ خروجی را در حضور تغییرات بزرگ بار، مورد بررسی و تحلیل قرار داده‌اند [۱۰]. آقای اسکوبار به اتفاق چهار همکار دیگرش در سال ۱۹۹۹، گزارشی از مقایسه عملی چندین کنترل‌کننده غیرخطی را برای مبدل-های توان منتشر کرده‌اند [۱۱]. یک سال بعد آقای جان کراسکو و همکارانش به تحلیل و کاربرد عملی کنترل‌کننده‌های غیرخطی برای مبدل‌های رزونانسی سری پرداخته‌اند [۱۲]. سال ۲۰۰۴ در [۱۳] به مطالعه جامعی از انواع روش‌های کنترلی غیرخطی استفاده شده در دیگر نوشته‌ها برای مبدل‌های رزونانسی dc-dc پرداخته شده و در نهایت کنترل‌کننده مناسبی برای مبدل رزونانسی سری انتخاب شده است.

در سال ۲۰۰۹ آقای مانلی هو و دیگر همکارانش، ساختار اینورتر رزونانسی LCC که بدنبال آن مدار چند برابرکننده ولتاژ سه مرحله‌ای قرار دارد را برای سیستم‌های تست فرکانس پایین ولتاژ بالا مورد بررسی قرار داده‌اند. مدولاسیون فرکانس کلیدزنی و چرخه کاری ترکیب شده‌اند تا محدوده‌های بار و ولتاژ بزرگی را ایجاد

[2] Dissipative

نمایند. در این تحقیق، براساس مدار معادل سیگنال کوچک و تابع انتقال کاهش مرتبه یافته، کنترل‌کننده جریان حالت متوسط برای کلیدزنی ولتاژ صفر طراحی شده است [۱۴].

آقای سانژان بای و همکارانشان در سال ۲۰۱۰، سه نوع از الگوهای کلیدزنی برای مبدل‌های رزونانسی به منظور دستیابی به عملکرد کلیدزنی ولتاژ صفر، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. برای ارزیابی کارایی این سه روش کنترل، سه ساختار مختلف رزونانسی در نظر گرفته شده است: رزونانس سری، رزونانس موازی، رزونانس سری-موازی. توابع معیاری برای عملکرد کلیدزنی در ولتاژ صفر (ZVS) برای هر روش کنترلی و ساختار رزونانسی به کار رفته است. نتایج بررسی در این تحقیق نشان داده است که کنترل حالت برش نامتقارن (ACM) می‌تواند فرکانس کلیدزنی پایین را نسبت به دو کنترل‌کننده دیگر در حالی که عملکرد ZVS را حفظ می‌کند، تضمین نماید. روابط بین فرکانس کلیدزنی و حداکثر مقدار توان انتقالی برای هر سه ساختار رزونانسی بدست آورده شده است و ساختار رزونانسی سری-موازی، خصوصیات برتری را نشان داده است [۱۵].

در [۱۶] مبدل رزونانسی مرتبه سه LCC با فیلتر خازنی تحلیل شده است. در این تحلیل، از روش تقریب هارمونیک اول به همراه جبران‌سازی اثر یکسوکننده خروجی استفاده شده است. در این روش به جای استفاده از مقاومت معادل، از یک مقاومت سری با خازن به منظور مدل‌سازی قسمت خروجی مبدل استفاده شده است.

در سال ۲۰۰۰، طرحی از ساختار کنترل لغزشی برای مبدل های کوانتوم رزونانسی با دو روش مختلف معرفی شده است. ابتدا یک روش ساده برای ابداع ساختارهای کنترلی غیرخطی ارائه شده است که در آن از قواعد پایداری شناخته شده لیاپانوف استفاده شده است. سپس یک روش تناوبی که طرح لغزشی خطی را فراهم می کند، مطرح شده است که به موجودیت و وضعیت پایداری توجه دارد [۱۷].

در [۴] و [۱۸] یک مطالعه دینامیکی از عملکرد مبدل رزونانسی سری-موازی dc-dc با یک روش مدولاسیون شیفت فاز خود نگهدار گسسته ارائه شده است. این روش شامل ترکیب یک مدل دینامیکی سیگنال بزرگ متوسط مناسب و طرحی از یک کنترل کننده فیدبک غیرخطی بر اساس روش خطی‌سازی ورودی-خروجی می‌باشد. کنترل‌کننده پیشنهادی و نوع مدولاسیون، برخی ویژگی‌های برجسته را موجب می-شود: عملکرد کلیدزنی ولتاژ صفر برای تمام رنج بار، رنج تغییرات فرکانسی کوچک، پاسخ گذرای سریع و مقاوم بودن در برابر تغییرات پارامترهای خارجی. هر دوی طرح کلیدزنی و قانون کنترل از ترکیب ایده‌های پایه‌ای خطی سازی ورودی-خروجی و کنترل لغزشی، نتیجه گرفته شده‌اند.

در [۱۹] یک کنترل‌کننده لغزشی چند متغیره مجزای ساده (MSMC) برای بهبود کارایی کنترل مبدل کوانتوم رزونانسی سری افزایشی (SRC) ارائه شده است. به خاطر ناوابسته بودن ترم‌های غیرخطی در MSMC پیشنهادی، کاربرد آن ساده است و همچنین ثبات پاسخ ولتاژ خروجی برای اختلال بار می تواند بدون افزودن سنسور جریان بار بدست آید.

در [۲۰] به طراحی کنترل‌کننده‌های لغزشی مناسب برای رفع مشکل تنظیم ولتاژ خروجی مبدل رزونانسی سری-موازی کوانتومی dc-dc (QSPRC) پرداخته شده است. در ابتدا یک مدل دینامیکی مناسب برای طراحی کنترل‌کننده که تا حد لازم رفتار سیگنال بزرگ مدار قدرت را بوسیله متغیرهای حالت میانگین توصیف می‌کند، شرح داده شده است. با استفاده از خطی‌سازی فیدبک ورودی-خروجی، یک روش طراحی

کنترل ارائه و منجر به یک خانواده از سطوح لغزشی شده است که رفتار ولتاژ خروجی را با دینامیک‌های خطی سیگنال بزرگ خاص، هم‌سو می‌سازد. در میان این سطوح، ساختار نهایی سطح لغزش انتخاب شده و به طور ساده و کامل مدار کنترل آن بررسی شده است.

آقای جان کراسکو با همکارانش، در سال ۲۰۰۰، ابتدا مدلی از مبدل رزونانسی سری را بدست آورده و به منظور ساده‌سازی این مدل از تقریب هارمونیک اول استفاده کرده است. سپس کنترل‌کننده‌ای براساس فیدبک خروجی پسگام تطبیقی، طراحی شده است. نتایج عملی به وسیله سیستم DSP بدست آمده است [۲۱].

در سال ۲۰۰۷ در [۲۲] با استفاده از مدل‌های غیرخطی مبدل‌های رزونانسی، کنترل‌کننده‌های کراندار طراحی شده اند تا گستره عملکرد را برای اهداف مورد نظر تضمین کنند. برای دستیابی به بازده و چگالی توان بالا، ساختارهای مبدل‌های جدید توسعه یافتند. ولتاژ خروجی مبدل‌ها بوسیله تغییر دادن چرخه کاری که توسط کران‌های بالا و پایین محدود می‌شود، تنظیم می‌گردد. در این مقاله، برای دستیابی به طراحی مناسب و تحلیل عملکرد مبدل (زمان نشست، بالازدگی، حاشیه پایداری و دیگر کمیت ها)، محدودیت‌ها و عوامل غیرخطی به طور کامل بررسی شده‌اند. بویژه طراحی و تحلیل غیرخطی به همراه تایید تجربی برای مبدل رزونانسی با کلیدزنی در جریان صفر انجام شده و با سند ارائه شده‌اند. همچنین در آن تحقیق با استفاده از یک روش ابداعی، کنترل‌کننده غیرخطی بر پایه تئوری پایداری لیاپانوف شرح داده شده است و یک کلاس جدید از توابع لیاپانوف پیشنهاد شده است. کنترل‌کننده‌های غیرخطی برای تضمین پایداری، تعقیب و میرایی اختلال طراحی شده‌اند.

در [۲۳] و [۲۴] کنترل مسیر بهینه تعمیم یافته (GOTC) برای مبدل رزونانسی سری-موازی ارائه شده است که اجازه می‌دهد تا مدار رزونانسی غیر خطی از حالت شروع دلخواه به حالت ماندگار دلخواه در یک سیکل با دو لحظه کلیدزنی کنترل‌شده به طور بهینه برسد. این روش، تعمیمی از کنترل مسیر بهینه (OTC) است. سال ۲۰۰۶ در [۲۵] مطالعه دینامیکی از عملکرد مبدل dc-dc رزونانسی CLL-T با مدولاسیون نوسانی خود نگهدار ارائه شده است. این مطالعه شامل گسترش مدل دینامیکی سیگنال بزرگ مناسب و کنترل‌کننده فیدبک غیرخطی است که از اصول سطوح لغزشی و روش خطی‌سازی ورودی-خروجی استفاده کرده است.

در [۲۶] مدل غیرخطی برای یک مبدل رزونانسی سری-موازی با کنترل فاز شرح داده شده است که از روش تابع توصیفی گسترده و تجزیه d-q استفاده می‌کند. این مدل با استفاده از روش کاهش مدل متعادل، کاهش مرتبه یافته و نیز خطی شده است. بر اساس مدل کاهش یافته و با در نظر گرفتن تاخیراتی مثل تاخیر محاسبات در سیستم نمونه برداری اطلاعات، یک کنترل‌کننده دیجیتالی برای مبدل طراحی شده است. در نهایت مبدل حلقه بسته با کنترل کننده DSP ساخته شده و به طور عملی آزمایش شده است.

در [۲۷] روش کنترل انتگرالی برای مبدل های رزونانسی سری در منابع ولتاژ ترانزیستوری کلاس D که به عنوان مبدل های dc-dc و dc-ac به کار می روند، ارائه شده است. ابتدا کنترل انتگرالی سیگنال که ترکیبی از فرکانس تشدید و هارمونیک های آن است، بحث شده است. سپس مدولاسیون چگالی پالس انتگرالی نیم موج تشریح شده است. این روش برای محاسبه مقدار و توالی افزایش جریان برای مبدل dc-dc ارائه شده است.

در [۲۸] به مرور کاملی از کاربرد کنترل‌کننده‌های غیرخطی مختلف برای مبدل رزونانسی dc-dc پرداخته شده است، آنگاه از این مرور برای انتخاب کنترل کننده مناسب به منظور کنترل یک مبدل رزونانسی dc-dc سری استفاده شده است.

در سال ۲۰۰۳ در [۲۹] یک مبدل قدرت رزونانسی سری dc-ac با کنترل‌کننده منطق فازی ارائه شده است که می‌تواند توان را به یک بار متغیر عرضه کند. این مبدل برای منابع انرژی تجدیدپذیر همچون سلول-های سوختی و پنل‌های فتوولتائیک بسیار مناسب است و از دو بخش قدرت تشکیل یافته است: یکی مبدل رزونانسی dc-ac به عنوان بخش ورودی و یک مبدل قدرت ac-ac به عنوان بخش خروجی. کنترل کننده فازی بر اساس مشخصاتی مثل غیر خطی، تطبیقی، ثبات و حساس نبودن نسبت به تغییر پارامتر ها انتخاب شده است که آنرا یک انتخاب خوب برای این کاربرد ساخته است. بویژه در شرایطی که بار اجازه تغییر دارد، مناسب است.

در سال ۲۰۰۹ در [۳۰] نتایج تجربی بدست آمده از کاربرد عملی کنترل‌کننده کوانتومی لغزشی برای یک مجموعه آزمایشگاهی از مبدل رزونانسی سری شرح داده شده است. در آن تحقیق هدف از طراحی این کنترل‌کننده رسیدن به حداکثر بازدهی بوده است. در همین مرجع با فرموله کردن سطوح لغزشی، حداقل شدن تلفات انرژی سیستم در تمام رنج توان دلخواه تشریح شده و نیز پایداری آن را تضمین کرده است.

آقای الماگویری و همکارانش در سال ۲۰۱۰ برای تنظیم ولتاژ خروجی مبدل رزونانسی سری از کنترل تطبیقی با فیدبک خروجی استفاده کرده‌اند. مشکلاتی همچون غیرخطی بودن مدل مبدل رزونانسی و در دسترس نبودن همه متغیرهای حالت و اینکه بار نامعین و حتی متغیر است، مورد نظر این محققین بوده است. کنترل‌کننده مورد استفاده آنها، کنترل‌کننده فیدبک خروجی است زیرا نیازی به در دسترس بودن متغیرهای حالت ندارد. بکمک روش کنترل پسگام و راه‌کار طراحی مشاهده‌گر، کنترل‌کننده نهایی طراحی شده، به طوری که پایداری نیمه سراسری و تعقیب ولتاژ مرجع خروجی به طور مجانبی تضمین شده است [۳۱].

در [۳۲] روشی برای تعیین پارامترهای کنترل‌کننده به منظور عملکرد پایدار تعدادی از مبدل‌های رزونانس بار dc-dc ارائه شده است. کنترل ولتاژ خروجی با استفاده از روش مدولاسیون شیفت فاز در فرکانس ثابت برای کنترل‌کننده PI انجام گرفته است. آزمایش‌ها روی مبدل رزونانسی سری-موازی اعمال شده ولی کنترل‌کننده حاصل قابل بکارگیری برای دیگر ساختارهای رزونانسی نیز است.

در سال ۱۹۹۳ در [۳۳]، کنترل‌کننده شیفت فاز با فرکانس ثابت برای مبدل رزونانسی سری-موازی طراحی و به کار گرفته شده است. سیستم کنترلی حاصل می‌تواند ولتاژ خروجی را از بی‌باری تا بار کامل تنظیم نماید. در [۳۴] برای کنترل مبدل‌های توان dc-dc با روش خطی‌سازی ورودی-خروجی، یک کنترل-کننده PWM بر اساس الگوریتم تطبیقی پسگام پیشنهاد شده است. این کنترل‌کننده در برابر نامعینی پارامتری، اغتشاشات و دینامیک‌های مدل نشده مقاوم است.

در سال ۱۹۹۵ آقای اوجو کنترل‌کننده مقاومی را با روش‌های خطی برای مبدل رزونانسی سری-موازی طراحی کرده است. مدل‌های دینامیکی و حالت ماندگار مبدل بر اساس تعادل هارمونیکی و توابع توصیفی بوده‌اند. مقادیر ماکزیمم حالت ماندگار محاسبه و به همراه معادلات دینامیکی سیگنال کوچک مبدل برای طراحی کنترل‌کننده بهینه مقاوم استفاده شده‌اند، بطوریکه سیستم کنترلی در برابر تغییرات ولتاژ ورودی و بار مقاوم و تعقیب ولتاژ مرجع با سرعت امکان‌پذیر بوده‌است [۳۵]. در سال ۲۰۰۲ در [۳۶] کنترل‌کننده شبکه

عصبی با استفاده از انرژی محفظه رزونانسی به عنوان قانون کنترل تطبیقی پیشنهاد شده است تا پایداری و مشخصات مبدل رزونانسی سری را بهبود بخشد. کنترل‌کننده بر حالت مبدل نظارت می‌کند و الگوی کلیدزنی مناسب را تولید کرده تا کنترل مسیر بهینه فراهم شود.

در سال ۲۰۱۱ آقایان ایمانی و ملک جمشیدی بوسیله شبکه‌های عصبی مصنوعی، روش کنترلی برای مبدل رزونانسی سری-موازی ولتاژ بالا پیشنهاد داده‌اند. تنظیم ولتاژ خروجی، با عملکرد در فرکانس بالا و کلیدزنی نرم برای کاهش تلفات و افزایش بازدهی مبدل صورت گرفته است. کنترل‌کننده عصبی را بر اساس نقاط کار ایده‌آل و مدل سیگنال کوچک مبدل آموزش داده‌اند. نمونه اولیه‌ای از سیستم کنترلی در برابر تغییرات پله‌ای بار و ولتاژ مرجع مورد آزمایش قرار داده و نتایج رضایت بخش و قابل اطمینانی را بدست آورده‌اند [۳۷]. در سال ۲۰۱۲ در [۳۸] مدل دینامیکی جدیدی بر اساس تابع توصیفی تعمیم یافته برای مبدل رزونانسی سری-موازی ارائه شده است که به مقدار قابل توجهی دقت مدل‌سازی را بالا برده و از پیچیدگی مدل‌سازی کاسته است.

آقای پهلوانی‌نژاد و همکارانش در سال ۲۰۱۰ کنترل‌کننده مقاوم H_∞ را برای مبدل زرونانسی سری-موازی پیشنهاد داده‌اند. سیستم پیشنهادی در برابر تغییرات عناصر محفظه رزونانسی و بار مقاوم است و تا حد زیادی تنظیم ولتاژ خروجی را بهبود بخشیده است [۳۹]. در [۴۰] به طراحی کنترل‌کننده منطق فازی برای مبدل-های dc-dc فرکانس بالا با کلیدزنی نرم به منظور کاربرد در سسیستم‌هایی نظیر سلول‌های خورشیدی، سلول سوختی و ... پرداخته شده است. این کنترل‌کننده برای اطمینان از تعقیب ولتاژ مرجع و حذف اثر اغتشاشات مبدل رزونانسی سری-موازی شبیه‌سازی و پیاده‌سازی شده است. همچنین در [۴۱] کنترل‌کننده منطق فازی برای استفاده در منابع انرژی تجدیدپذیر معرفی و شبیه‌سازی شده است که در برابر تغییرات بزرگ ولتاژ ورودی پایدار بوده است.

در سال ۲۰۱۲ در [۴۲] با توجه به این مطلب که روش‌های معمول مدل‌سازی مبدل‌های رزونانسی در حوزه فرکانس، در صورت سینوسی نبودن ولتاژ یا جریان تانک رزونانسی، دقیق نیستند، به مدل‌سازی حوزه زمان مبدل رزونانسی سری-موازی پرداخته شده است که دارای دقت بالایی است. در همان سال در [۴۳] مبدل رزونانسی سری-موازی برای کاربرد در سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر با محدوده وسیع تغییرات ولتاژ ورودی طراحی شد.

آقایان فورسیز و مولاو در سال ۱۹۹۷ روش کنترلی برای مبدل رزونانسی سری موازی با حلقه فیدبک جریان رزونانسی معرفی کرده‌اند که در سیستم‌های جبران ضریب توان قابل به کارگیری است [۴۴]. برای مبدل تمام پل رزونانسی سری-موازی در سال ۱۹۹۱ در [۴۵]، کنترل‌کننده‌ای با عملکرد در فرکانس ثابت توسط آقای لی و همکارانش طراحی شده است. در این مقاله با استفاده از اعمال یک تبدیل مناسب روی متغیرهای حالت، مبدل در یک صفحه مختصات دو بعدی تحلیل شده که نشان می‌دهد مبدل دارای سه حالت عملکرد است. طراحی کنترل‌کننده با در نظر گرفتن این سه حالت انجام شده است.

در سال ۲۰۰۷ در [۴۶]، تحلیل نظری و نتایج عملی برای کنترل فرکانسی مبدل رزونانسی LCC با یکسوساز سنکرون ارائه شده است. یک سال بعد، روشی برای کنترل خود-نوسان مبدل رزونانسی سری-موازی با خرجی جریان توسط آقای گیلبرت و همکارانش پیشنهاد شده است که بر اساس تغییر زاویه فاز بین ولتاژ و جریان ورودی عمل می‌کند. مدل‌های مرتبه سوم سیگنال بزرگ و کوچک گسترش داده شده‌اند تا برای