٤٦٧٨٦

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه مهندسی برق- قدرت

رساله

برای دریافت درجه دکتری مهندسی برق-قدرت

عنوان

مدل‌سازی و طراحی روش‌های کنترلی نوین مبدل‌های ماتریسی

استاد راهنما

دکتر سید حسین حسینی

استاد مشاور

دکتر گئورک قره‌پتیان

پژوهشگر

ابراهیم بابائی

۱۳۸۷ /۲/

فروردین ۱۳۸۶

۴۶۶۸۶

تقدیم به

همسر صبورم

صفا

و

فرزند دلبندم

احسان

تشکر و قدردانی

بر خود واجب می‌دانم تا از زحمات ارزشمند اساتید محترم جناب آقای دکتر سید حسین حسینی و جناب آقای دکتر گئورک قره‌پتیان که در تمامی مراحل تحقیق، یار و پشتیبان اینجانب بوده و از راهنمایی‌های ارزنده خود دریغ ننمودند، تشکر و قدردانی نمایم.

نام خانوادگی دانشجو: **بابائی** نام: **ابراهیم**

عنوان رساله: **مدل‌سازی و طراحی روش‌های کنترلی نوین مبدل‌های ماتریسی**

استاد راهنما: **دکتر سید حسین حسینی**

استاد مشاور: **دکتر گئورک قره‌پتیان**

مقطع تحصیلی: **دکتری** رشته: **مهندسی برق** گرایش: **قدرت** دانشگاه: **تبریز**

دانشکده: **مهندسی برق و کامپیوتر** تاریخ فارغ‌التحصیلی: **۸۶/۱/۲۹** تعداد صفحه: **۱۵۱**

کلید واژه‌ها: **مبدل‌های ماتریسی، مبدل‌های مستقیم، کلیدهای دو طرفه، کیفیت توان، بازیاب دینامیکی ولتاژ.**

چکیده:

مبدل‌های ماتریسی به عنوان نسل جدیدی از مبدل‌های الکترونیک قدرت، منابع تغذیه با دامنه و فرکانس متغیر هستند که n ولتاژ ورودی را مستقیماً و بدون استفاده از المان‌های ذخیره کننده انرژی به m ولتاژ خروجی تبدیل می‌کنند. در این رساله، ابتدا روش‌های کنترلی کلاسیک برای مبدل‌های ماتریسی به همراه مزایا و معایب بررسی می‌گردند. سپس تکنیک‌های مدولاسیون جدید جامعی بر اساس تکنیک PWM برای تولید یک مجموعه ولتاژ خروجی مورد نظر از روی یک مجموعه ولتاژ ورودی، صرف نظر از نامتعادلی در سمت ورودی و هم چنین در سمت خروجی ارائه می‌گردد. روش‌های پیشنهادی به سه دسته مدولاسیون مثبت، مدولاسیون منفی و مدولاسیون ترکیبی تقسیم‌بندی می‌شود.

هر سه روش مدولاسیون مثبت، منفی و ترکیبی با نمونه‌برداری از شکل‌موج‌های ورودی قادر هستند که ولتاژهای خروجی را با دامنه و فرکانس متغیر، مستقل از یک دیگر تولید کنند. روش مدولاسیون ترکیبی، از ادغام روش‌های مدولاسیون مثبت و منفی حاصل می‌شود. در این روش یک درجه آزادی در اختیار قرار خواهد گرفت که می‌توان از آن برای کنترل یکی از کمیت‌های الکتریکی استفاده کرد. با استفاده از روش ترکیبی می‌توان در مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز ضریب توان ورودی را مستقل از ضریب توان بار کنترل نمود و یا در مبدل‌های ماتریسی سه فاز به دو فاز می‌توان هارمونیک‌های مرتبه پایین (نزدیک فرکانس اصلی) جریان‌های ورودی را بدون استفاده از فیلترهای ورودی کاهش داد. از مزیت‌های دیگر روش ترکیبی در مبدل‌های ماتریسی سه فاز به دو فاز کاهش قابل توجه THD ولتاژها و جریان‌های خروجی می‌باشد. با استفاده از روش کلیدزنی ترکیبی در مبدل‌های ماتریسی تک فاز به تک فاز می‌توان هم زمان با تولید جریان‌های سینوسی خروجی به صورت متقارن، THD جریان‌های ورودی و خروجی را نیز کاهش داد. حذف هارمونیک‌های مرتبه پایین جریان‌های ورودی و خروجی و ولتاژ خروجی و هم چنین کاهش بیش از 50 درصدی مولفه DC در سمت ورودی و خروجی از دیگر مزیت‌های روش کلیدزنی ترکیبی در مبدل‌های ماتریسی تک فاز به تک فاز می‌باشد.

در بخش بعدی رساله، الگوریتم کنترلی دیگری برای مبدل‌های ماتریسی ارائه می‌شود که بر اساس

کم‌ترین خطا پایه‌ریزی شده و با استفاده از آن می‌توان مبدل‌های ماتریسی چند سطحی ایجاد کرد. در این استراتژی با تعداد بسیار کم‌تر از کلیدزنی، می‌توان شکل موج خروجی مورد نظر را با کم‌ترین خطا تولید کرد. در نتیجه تلفات کلیدزنی به شدت کاهش یافته و راندمان مبدل افزایش چشم‌گیری خواهد داشت. هم چنین با این روش THD ولتاژها و جریان‌ها نسبت به روش‌های کلاسیک کم‌تر خواهد شد. یکی دیگر از مزیت‌های این روش این است که با وجود نامتعادلی و اعوجاج شدید در سمت ورودی، خروجی‌های مورد نظر را می‌توان تولید کرد. جهت افزایش کارآیی این روش، ساختارهای جدیدی برای انواع مبدل‌های ماتریسی چند سطحی پیشنهاد شده است.

مبدل‌های ماتریسی چند سطحی مورد بحث در فوق، خروجی‌های چند سطحی را با استفاده از ورودی‌های AC تولید می‌نمایند. برای تولید خروجی‌های چند سطحی با استفاده از ورودی‌های DC، از مبدل‌های چند سطحی کاسکاد استفاده می‌شود. این مبدل‌ها از اتصال سری چندین مبدل ماتریسی DC به تک فاز ساخته می‌شوند. برای مبدل‌های چند سطحی کاسکاد، ضمن ارائه روش‌های جدید برای تعیین اندازه سطوح منابع DC، از مبدل‌های پیشنهادی در مدارات DVRها به عنوان یک کاربرد جهت افزایش کیفیت توان شبکه‌های الکتریکی استفاده شده است.

در بخش پایانی رساله، ضمن ارائه جزئیات طراحی و ساخت یک مبدل ماتریسی جامع سه فاز به سه فاز و هم چنین یک مبدل چند سطحی کاسکاد با 189 سطح خروجی، نتایج عملی و شبیه‌سازی برای الگوریتم‌ها و ساختارهای پیشنهادی نیز توسط نرم‌افزار PSCAD ارائه شده است.

فهرست مطالب

لیست شکل‌ها viii

لیست جداول xiii

پیش گفتار ۱

قسمت اول: بررسی منابع و پیشینه پژوهش ۷

فصل اول: مروری بر مبدل‌های ماتریسی ۸

۱-۱ مقدمه ۸

۱-۲ پردازش‌گرهای توان ۹

۱-۳ مبدل‌های AC/AC با لینک DC ۱۰

۱-۴ مبدل‌های AC/AC با لینک AC ۱۱

۱-۵ مبدل‌های AC/AC با لینک مستقیم ۱۲

۱-۵-۱ سیکلوکانورترها ۱۲

۱-۵-۲ مبدل‌های ماتریسی ۱۲

۱-۶ کلیدهای دو طرفه ۱۴

۱-۶-۱ آرایش پل دیودی ۱۵

۱-۶-۲ آرایش IGBT امیتر مشترک با یک جفت دیود موازی-معکوس ۱۵

۱-۶-۳ آرایش IGBT کلکتور مشترک با یک جفت دیود موازی-معکوس ۱۷

۱-۶-۴ آرایش کلیدزنی نرم ۱۸

۱-۷ تکنیک‌های مدولاسیون برای مبدل‌های ماتریسی ۱۸

۱-۷-۱ روش کنترلی *Alesina-Venturini* ۱۸

۱-۷-۲ روش مدولاسیون عددی ۲۰

۱-۷-۳ روش مدولاسیون بردار فضایی ۲۱

۱-۷-۴ روش‌های مدولاسیون غیرمستقیم ۲۵

۱-۷-۵ روش‌های کنترلی تکمیلی و بهبود کارآیی مبدل‌های ماتریسی ۲۷

۱-۸ جمع‌بندی ۲۹

قسمت دوم: مواد و روش‌ها ۳۰

فصل دوم: روش‌های مدولاسیون و ساختارهای پیشنهادی برای مبدل‌های ماتریسی ۳۱

۲-۱ مقدمه ۳۱

۲-۲ مدل‌سازی مبدل‌های ماتریسی ۳۲

۲-۳ روش پیشنهادی برای مبدل‌های ماتریسی بر اساس تکنیک PWM ---------- ۳۵
۲-۳-۱ استراتژی کلیدزنی مثبت ---------- ۳۶
۲-۳-۲ استراتژی کلیدزنی منفی ---------- ۳۹
۲-۳-۳ استراتژی کلیدزنی ترکیبی ---------- ۴۱
۲-۳-۴ روش پیشنهادی برای مبدل‌های ماتریسی سه فاز به سه فاز ---------- ۴۲
۲-۳-۴-۱ عمل‌کرد تحت خروجی‌های متعادل در استراتژی کلیدزنی مثبت ----- ۴۵
۲-۳-۴-۲ عمل‌کرد تحت خروجی‌های متعادل در استراتژی کلیدزنی منفی ------ ۴۷
۲-۳-۴-۳ عمل‌کرد تحت خروجی‌های متعادل در استراتژی کلیدزنی ترکیبی ---- ۴۷
۲-۳-۴-۴ عمل‌کرد تحت خروجی‌های نامتعادل در استراتژی کلیدزنی مثبت ---- ۴۸
۲-۳-۴-۵ عمل‌کرد تحت خروجی‌های نامتعادل در استراتژی کلیدزنی منفی ----- ۵۰
۲-۳-۴-۶ عمل‌کرد تحت خروجی‌های نامتعادل در استراتژی کلیدزنی ترکیبی --- ۵۱
۲-۳-۴-۷ روابط جریان‌ها و ولتاژهای خروجی ---------- ۵۱
۲-۳-۵ روش پیشنهادی برای مبدل‌های ماتریسی سه فاز به دو فاز ---------- ۵۲
۲-۳-۵-۱ عمل‌کرد تحت BIBO در استراتژی کلیدزنی مثبت ---------- ۵۴
۲-۳-۵-۲ عمل‌کرد تحت BIBO در استراتژی کلیدزنی منفی ---------- ۵۵
۲-۳-۵-۳ عمل‌کرد تحت BIBO در استراتژی کلیدزنی ترکیبی ---------- ۵۶
۲-۳-۵-۴ عمل‌کرد تحت BIUO در استراتژی کلیدزنی مثبت ---------- ۵۷
۲-۳-۵-۵ عمل‌کرد تحت BIUO در استراتژی کلیدزنی منفی ---------- ۵۹
۲-۳-۵-۶ عمل‌کرد تحت BIUO در استراتژی کلیدزنی ترکیبی ---------- ۶۰
۲-۳-۵-۷ عمل‌کرد تحت UIBO در استراتژی کلیدزنی مثبت ---------- ۶۱
۲-۳-۵-۸ عمل‌کرد تحت UIBO در استراتژی کلیدزنی منفی ---------- ۶۲
۲-۳-۵-۹ عمل‌کرد تحت UIBO در استراتژی کلیدزنی ترکیبی ---------- ۶۳
۲-۳-۵-۱۰ روابط ولتاژ و جریان خروجی ---------- ۶۳
۲-۳-۶ روش پیشنهادی برای مبدل‌های ماتریسی تک فاز به تک فاز ---------- ۶۳
۲-۳-۶-۱ عمل‌کرد در استراتژی کلیدزنی مثبت ---------- ۶۴
۲-۳-۶-۲ عمل‌کرد در استراتژی کلیدزنی منفی ---------- ۶۶
۲-۳-۶-۳ عمل‌کرد در استراتژی کلیدزنی ترکیبی ---------- ۶۷
۲-۳-۶-۴ روابط ولتاژها و جریان‌های خروجی ---------- ۶۷
۲-۴ مبدل‌های ماتریسی چند سطحی ---------- ۶۷
۲-۴-۱ روش پیشنهادی برای مبدل‌های ماتریسی سه فاز به سه فاز ---------- ۶۹
۲-۴-۲ ساختار پیشنهادی جدید برای مبدل‌های ماتریسی سه فاز به سه فاز ---------- ۷۲
۲-۴-۳ روش پیشنهادی برای مبدل‌های ماتریسی سه فاز به تک فاز ---------- ۷۶
۲-۴-۴ ساختار پیشنهادی جدید برای مبدل‌های ماتریسی سه فاز به تک فاز ---------- ۷۷
۲-۵ مبدل‌های چند سطحی کاسکاد ---------- ۷۹
۲-۵-۱ روش‌های مختلف استراتژهای کلیدزنی برای مبدل‌های چند سطحی ---------- ۸۳
۲-۵-۲ کاربرد مبدل چند سطحی در DVR ---------- ۸۳

۲-۵-۲-۱ مدار DVR ---------- ۸۴
۲-۶ نتیجه‌گیری ---------- ۸۵

فصل سوم: طراحی، ساخت و محاسبات مربوط به تلفات
مبدل‌های ماتریسی و چند سطحی ---------- ۸۷
۳-۱ مقدمه ---------- ۸۷
۳-۲ تشریح نمونه آزمایشگاهی مبدل ماتریسی ---------- ۸۸
۳-۲-۱ انتخاب کلیدهای دوطرفه ---------- ۸۸
۳-۲-۲ انتخاب نیمه‌هادی‌های مورد نیاز برای کلیدهای دوطرفه ---------- ۸۸
۳-۲-۳ محاسبه rating قطعات ---------- ۸۹
۳-۲-۳-۱ محاسبه rating ولتاژ ---------- ۸۹
۳-۲-۳-۲ محاسبه rating جریان ---------- ۸۹
۳-۲-۴ مدار راه‌انداز گیت ---------- ۹۱
۳-۲-۵ طراحی مدار اسنابر ---------- ۹۲
۳-۲-۶ مشخصات نهایی نمونه مبدل ماتریسی آزمایشگاهی ---------- ۹۸
۳-۳ محاسبات تلفات در مبدل ماتریسی ---------- ۹۸
۳-۳-۱ تلفات حالت هدایت ---------- ۹۹
۳-۳-۲ تلفات کلیدزنی ---------- ۱۰۰
۳-۳-۲-۱ تلفات کلیدزنی در حالت turn-off ---------- ۱۰۱
۳-۳-۲-۲ تلفات کلیدزنی در حالت turn-on ---------- ۱۰۲
۳-۳-۳ تلفات مدار اسنابر ---------- ۱۰۳
۳-۴ تشریح نمونه آزمایشگاهی مبدل چند سطحی ---------- ۱۰۶
۳-۵ نتیجه‌گیری ---------- ۱۰۶

قسمت سوم: ارائه نتایج عملی و شبیه‌سازی توسط نرم افزار PSCAD ۱۰۷

فصل چهارم: ارائه نتایج عملی و شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار PSCAD ---------- ۱۰۸
۴-۱ مقدمه ---------- ۱۰۸
۴-۲ نتایج شبیه‌سازی و عملی برای مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز به روش PWM ------ ۱۰۸
۴-۲-۱ عمل‌کرد تحت خروجی‌های متعادل ---------- ۱۰۹
۴-۲-۲ عمل‌کرد تحت خروجی‌های نامتعادل ---------- ۱۱۳
۴-۳ نتایج شبیه‌سازی و عملی برای مبدل ماتریسی سه فاز به دو فاز به روش PWM ------ ۱۱۴
۴-۳-۱ عمل‌کرد تحت BIBO ---------- ۱۱۴
۴-۳-۲ عمل‌کرد تحت BIUO ---------- ۱۱۶
۴-۳-۳ عمل‌کرد تحت UIBO ---------- ۱۱۸
۴-۴ نتایج شبیه‌سازی و عملی برای مبدل ماتریسی تک فاز به تک فاز به روش PWM ------ ۱۲۰
۴-۵ نتایج شبیه‌سازی و عملی برای مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز چند سطحی -------- ۱۲۵

۴-۶ نتایج شبیه‌سازی و عملی برای مبدل ماتریسی سه فاز به تک فاز چند سطحی ---------- ۱۲۷
۴-۷ نتایج عملی برای مبدل‌های چند سطحی کاسکاد ---------- ۱۳۳
۴-۸ نتایج شبیه‌سازی برای کاربرد مبدل چند سطحی کاسکاد در DVR ---------- ۱۳۴
۴-۹ نتیجه‌گیری ---------- ۱۳۵

قسمت چهارم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات ۱۳۷

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات ---------- ۱۳۸

مراجع ---------- ۱۴۴
چکیده انگلیسی ---------- ۱۵۱

لیست شکل‌ها

شکل ۱-۱ بلوک دیاگرام یک سیستم الکترونیک قدرت ---------- ۹

شکل ۱-۲ بلوک دیاگرام قسمت راه‌انداز یک موتور AC ---------- ۱۰

شکل ۱-۳ ساختار عمومی مبدل ماتریسی N ورودی و m خروجی ---------- ۱۳

شکل ۱-۴ ساخت انواع مبدل‌های کلاسیک با استفاده از مبدل‌های ماتریسی ---------- ۱۶

شکل ۱-۵ تعدادی از آرایش‌های ممکن برای کلیدهای دو طرفه ---------- ۱۷

شکل ۱-۶ طرح کامل اتصالات برای مبدل سه فاز به سه فاز با استفاده از کلیدهای کلکتور مشترک ۱۷

شکل ۱-۷ نسبت تبدیل در روش *Alesina-Venturini* ---------- ۲۰

شکل ۱-۸ بردارهای شش ضلعی فضایی ولتاژهای خروجی ---------- ۲۳

شکل ۱-۹ مثال از نحوه تولید بردار فضایی خروجی ---------- ۲۴

شکل ۱-۱۰ یکی از روش‌های انتخاب زمان‌های T_α، T_β و T_0 در هر فاصله زمانی نمونه‌برداری T_S -- ۲۴

شکل ۱-۱۱ مدل روش مدولاسیون غیرمستقیم برای مبدل‌های ماتریسی ---------- ۲۵

شکل ۲-۱ شکل عمومی الگوی کلیدزنی برای مبدل‌های ماتریسی ---------- ۳۴

شکل ۲-۲ زمان نمونه‌برداری ---------- ۳۵

شکل ۲-۳ استراتژی کلیدزنی مثبت ---------- ۳۷

شکل ۲-۴ استراتژی کلیدزنی منفی ---------- ۳۹

شکل ۲-۵ استراتژی کلیدزنی ترکیبی ---------- ۴۲

شکل ۲-۶ مدار قدرت مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز ---------- ۴۲

شکل ۲-۷ تقسیم‌بندی زمان نمونه‌برداری در مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز ---------- ۴۳

شکل ۲-۸ الگوریتم کلیدزنی مثبت برای مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز ---------- ۴۳

شکل ۲-۹ فرمان کلیدها در استراتژی کلیدزنی مثبت برای مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز ---- ۴۳

شکل ۲-۱۰ استراتژی کلیدزنی منفی برای مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز ---------- ۴۴

شکل ۲-۱۱ فرمان کلیدها در استراتژی کلیدزنی منفی برای مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز ---- ۴۴

شکل ۲-۱۲ فرمان کلیدها در استراتژی کلیدزنی ترکیبی برای مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز -- ۴۵

شکل ۲-۱۳ محدوده تغییرات ضریب بهره در مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز ---------- ۵۰

شکل ۲-۱۴ مدار قدرت مبدل ماتریسی سه فاز به دو فاز ---------- ۵۳
شکل ۲-۱۵ الگوریتم کلیدزنی مثبت برای مبدل ماتریسی سه فاز به دو فاز ---------- ۵۳
شکل ۲-۱۶ استراتژی کلیدزنی منفی برای مبدل ماتریسی سه فاز به دو فاز ---------- ۵۴
شکل ۲-۱۷ محدوده تغییرات ضریب بهره در مبدل ماتریسی سه فاز به دو فاز ---------- ۵۸
شکل ۲-۱۸ مدار قدرت مبدل ماتریسی تک فاز به تک فاز ---------- ۶۴
شکل ۲-۱۹ تقسیم‌بندی زمان نمونه‌برداری در مبدل ماتریسی تک فار به تک فاز ---------- ۶۴
شکل ۲-۲۰ الگوریتم کلیدزنی مثبت برای مبدل ماتریسی تک فاز به تک فاز ---------- ۶۵
شکل ۲-۲۱ استراتژی کلیدزنی منفی برای مبدل ماتریسی تک فاز به تک فاز ---------- ۶۶
شکل ۲-۲۲ استراتژی کنترلی جدید برای ساخت مبدل‌های ماتریسی چند سطحی
با استفاده از روش حداقل خطا ---------- ۶۹
شکل ۲-۲۳ مدار قدرت مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز ---------- ۷۰
شکل ۲-۲۴ تغییرات تنظیم ولتاژ برای مبدل سه فاز به سه فاز ---------- ۷۲
شکل ۲-۲۵ مدار قدرت پیشنهادی جدید برای مبدل‌های ماتریسی سه فاز به سه فاز ---------- ۷۲
شکل ۲-۲۶ تغییرات تنظیم ولتاژ برای مبدل سه فاز به سه فاز پیشنهادی ---------- ۷۳
شکل ۲-۲۷ مدار قدرت مبدل ماتریسی چند سطحی کلاسیک ---------- ۷۵
شکل ۲-۲۸ مدار قدرت مبدل ماتریسی سه فاز به تک فاز با ۳ کلید دو طرفه قدرت ---------- ۷۶
شکل ۲-۲۹ مدار قدرت مبدل ماتریسی سه فاز به تک فاز با استفاده از ۶ کلید قدرت ---------- ۷۷
شکل ۲-۳۰ مدار قدرت پیشنهادی جدید برای مبدل‌های ماتریسی سه فاز به تک فاز ---------- ۷۸
شکل ۲-۳۱ تغییرات تنظیم ولتاژ برای مبدل‌های سه فاز به تک فاز ---------- ۷۹
شکل ۲-۳۲ مدار قدرت مبدل چند سطحی کاسکاد (تک فاز) ---------- ۸۰
شکل ۲-۳۳ مدار قدرت مبدل جریان سه سطحی تمام پل ---------- ۸۳
شکل ۲-۳۴ ساختار کلاسیک جبران کننده‌های استاتیک سری ---------- ۸۴
شکل ۲-۳۵ مدار DVR با استفاده از مبدل‌های چند سطحی ---------- ۸۵

شکل ۳-۱ یک فاز خروجی (فاز a) مبدل ماتریسی ---------- ۹۰
شکل ۳-۲ طراحی پارامترهای مدار اسنابر ---------- ۹۲

شکل ۳-۳ مدار اسنابر با کلیدهای دو طرفه ---------- ۹۵

شکل ۳-۴ مدارات معادل برای تحلیل مدار اسنابر ---------- ۹۷

شکل ۳-۵ شکل موج‌های جریان و ولتاژ کلید در زمان خاموش شدن ---------- ۱۰۱

شکل ۳-۶ شکل موج‌های جریان و ولتاژ کلید در زمان روشن شدن ---------- ۱۰۲

شکل ۴-۱ مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز ---------- ۱۰۹

شکل ۴-۲ جریان خروجی مبدل سه فاز به سه فاز با خروجی‌های متعادل ---------- ۱۰۹

شکل ۴-۳ طیف فرکانسی ولتاژ و جریان خروجی مبدل سه فاز به سه فاز با خروجی‌های متعادل ۱۱۱

شکل ۴-۴ ولتاژها و جریان‌های خروجی مبدل سه فاز به سه فاز با خروجی‌های متعادل ------- ۱۱۲

شکل ۴-۵ جریان خروجی مبدل سه فاز به سه فاز با خروجی‌های نامتعادل ---------- ۱۱۳

شکل ۴-۶ مبدل ماتریسی سه فاز به دو فاز ---------- ۱۱۴

شکل ۴-۷ جریان‌های خروجی در مبدل سه فاز به دو فاز تحت عمل‌کرد BIBO
در استراتژی کلیدزنی مثبت ---------- ۱۱۵

شکل ۴-۸ جریان‌های خروجی در مبدل سه فاز به دو فاز تحت عمل‌کرد BIBO
در استراتژی کلیدزنی منفی ---------- ۱۱۵

شکل ۴-۹ جریان‌های خروجی در مبدل سه فاز به دو فاز تحت عمل‌کرد BIBO
در استراتژی کلیدزنی ترکیبی ---------- ۱۱۵

شکل ۴-۱۰ طیف‌های فرکانسی جریان‌های ورودی و خروجی و ولتاژهای خروجی
در مبدل سه فاز به دو فاز تحت عمل‌کرد BIBO ---------- ۱۱۶

شکل ۴-۱۱ جریان‌های خروجی در مبدل سه فاز به دو فاز تحت عمل‌کرد BIUO
در استراتژی کلیدزنی مثبت ---------- ۱۱۶

شکل ۴-۱۲ جریان‌های خروجی در مبدل سه فاز به دو فاز تحت عمل‌کرد BIUO
در استراتژی کلیدزنی منفی ---------- ۱۱۷

شکل ۴-۱۳ جریان‌های خروجی در مبدل سه فاز به دو فاز تحت عمل‌کرد BIUO
در استراتژی کلیدزنی ترکیبی ---------- ۱۱۷

شکل ۴-۱۴ طیف‌های فرکانسی جریان‌های ورودی و خروجی و ولتاژهای خروجی

در مبدل سه فاز به دو فاز تحت عمل‌کرد BIUO ---------- ۱۱۷
شکل ۴-۱۵ جریان‌های خروجی در مبدل سه فاز به دو فاز تحت عمل‌کرد UIBO ---------- ۱۱۸
شکل ۴-۱۶ طیف‌های فرکانسی جریان‌های ورودی و خروجی و ولتاژهای خروجی
در مبدل سه فاز به دو فاز تحت عمل‌کرد UIBO ---------- ۱۱۸
شکل ۴-۱۷ ولتاژ خروجی مبدل تک فاز به تک فاز در استراتژی کلیدزنی مثبت ---------- ۱۲۰
شکل ۴-۱۸ جریان خروجی مبدل تک فاز به تک فاز ---------- ۱۲۱
شکل ۴-۱۹ جریان ورودی مبدل تک فاز به تک فاز ---------- ۱۲۲
شکل ۴-۲۰ طیف‌های فرکانسی جریان‌های ورودی و خروجی و ولتاژ خروجی
در مبدل تک فاز به تک فاز ---------- ۱۲۳
شکل ۴-۲۱ جریان خروجی مبدل تک فاز به تک فاز $(f_s = 2kHz)$ ---------- ۱۲۴
شکل ۴-۲۲ ولتاژ خروجی مبدل سه فاز به سه فاز با ورودی متعادل ---------- ۱۲۶
شکل ۴-۲۳ جریان خروجی مبدل سه فاز به سه فاز با ورودی متعادل ---------- ۱۲۶
شکل ۴-۲۴ ولتاژ خروجی مبدل سه فاز به سه فاز با ورودی اغتشاش یافته ---------- ۱۲۷
شکل ۴-۲۵ ولتاژ خروجی مبدل سه فاز به تک فاز در عمل‌کرد با ورودی متعادل ---------- ۱۲۸
شکل ۴-۲۶ جریان خروجی مبدل سه فاز به تک فاز در عمل‌کرد با ورودی متعادل ---------- ۱۲۹
شکل ۴-۲۷ طیف‌های فرکانسی ولتاژ و جریان خروجی مبدل سه فاز به تک فاز
در عمل‌کرد با ورودی متعادل ---------- ۱۲۹
شکل ۴-۲۸ ولتاژ خروجی مبدل سه فاز به تک فاز در عمل‌کرد با خروجی اغتشاش یافته ---------- ۱۳۰
شکل ۴-۲۹ ولتاژ خروجی و طیف فرکانسی آن برای مبدل سه فاز به تک فاز
در عمل‌کرد با ورودی نامتعادل و اغتشاش یافته ---------- ۱۳۱
شکل ۴-۳۰ جریان خروجی و طیف فرکانسی آن برای مبدل سه فاز به تک فاز
در عمل‌کرد با ورودی نامتعادل و اغتشاش یافته ---------- ۱۳۲
شکل ۴-۳۱ ولتاژهای خروجی مبدل‌های سه فاز به تک فاز در عمل‌کرد با ورودی و خروجی
نامتعادل و اغتشاش یافته ---------- ۱۳۳
شکل ۴-۳۲ نتایج اندازه‌گیری شده برای مبدل تک فاز 189 سطحی ---------- ۱۳۴
شکل ۴-۳۳ ولتاژ بار، شبکه و خروجی مبدل چند سطحی ---------- ۱۳۵

شکل ۵-۱ خلاصه کارهای پژوهشی انجام گرفته بر اساس تکنیک مدولاسیون PWM --------- ۱۴۰

شکل ۵-۲ خلاصه کارهای پژوهشی انجام گرفته بر روی مبدل‌های چند سطحی ---------- ۱۴۳

لیست جداول

جدول ۱-۱ مقایسه انواع مبدل‌های AC/AC سه فاز ---------- ۱۳

جدول ۱-۲ مدهای کاری مختلف برای مبدل ماتریسی ۳×۳ ---------- ۲۲

جدول ۲-۱ مدهای کاری مجاز برای مبدل‌های ماتریسی سه فاز به سه فاز ---------- ۷۰

جدول ۲-۲ مدهای کاری مجاز برای مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز با ساختار پیشنهادی ----- ۷۴

جدول ۲-۳ حالت‌های مختلف کلیدزنی مجاز برای مبدل ماتریسی سه فاز به تک فاز با ۳ کلید قدرت ۷۶

جدول ۲-۴ حالت‌های مختلف کلیدزنی مجاز برای مبدل ماتریسی سه فاز به تک فاز با ۶ کلید قدرت ۷۷

جدول ۲-۵ حالت‌های مختلف کلیدزنی مجاز برای مبدل ماتریسی سه فاز به تک فاز پیشنهادی -- ۷۸

جدول ۴-۱ پارامترهای مبدل سه فاز به سه فاز ---------- ۱۰۹

جدول ۴-۲ خلاصه نتایج برای مبدل سه فاز به سه فاز به روش PWM
تحت عمل‌کرد خروجی‌های متعادل---------- ۱۱۱

جدول ۴-۳ پارامترهای مبدل سه فاز به دو فاز ---------- ۱۱۴

جدول ۴-۴ THD ولتاژها و جریان‌های خروجی برای مبدل سه فاز به دو فاز ---------- ۱۱۹

جدول ۴-۵ هارمونیک‌های مرتبه پائین جریان‌های ورودی برای مبدل سه فاز به دو فاز ------- ۱۱۹

جدول ۴-۶ پارامترهای مبدل تک فاز به تک فاز ---------- ۱۲۰

جدول ۴-۷ مقادیر هارمونیک‌های مرتبه پائین ---------- ۱۲۴

جدول ۴-۸ THD کمیت‌های مختلف ورودی و خروجی ---------- ۱۲۴

جدول ۴-۹ پارامترهای مبدل ماتریسی چند سطحی سه فاز به سه فاز ---------- ۱۲۵

جدول ۴-۱۰ خلاصه نتایج برای مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز چند سطحی با ورودی متعادل ۱۲۷

جدول ۴-۱۱ پارامترهای مبدل سه فاز به تک فاز ---------- ۱۲۷

جدول ۴-۱۲ خلاصه نتایج برای مبدل سه فاز به تک فاز تحت عمل‌کرد متعادل ---------- ۱۳۰

جدول ۴-۱۳ معادلات ولتاژهای خروجی مبدل چند سطحی کاسکاد ---------- ۱۳۳

پیش گفتار

"مبدل‌های ماتریسی[1]" نسل جدیدی از مبدل‌های الکترونیک قدرت هستند که به مرور زمان جایگزین مبدل‌های نسل قدیمی می‌شوند. مبدل ماتریسی یک منبع تغذیه با دامنه و فرکانس متغیر است که n ولتاژ ورودی را مستقیماً و بدون استفاده از المان‌های ذخیره کننده انرژی به m ولتاژ خروجی تبدیل می‌کند. به عبارت دیگر مبدل ماتریسی یک راه حل تمام سیلیکانی، برای تبدیل AC به AC ارائه می‌دهد به طوری که برخلاف سیستم‌های کلاسیک یک‌سو کننده-اینورتری نیاز به المان‌های ذخیره کننده انرژی راکتیو ندارد. این مبدل، شامل ماتریسی از کلیدهای نیمه‌هادی دو طرفه می‌باشد که هر کدام از ترمینال‌های ورودی را به هر کدام از ترمینال‌های خروجی در محل تقاطع خطوط به هم وصل می‌کند. کلیدهای استفاده شده دو طرفه چهار ربعی کاملاً کنترل شونده می‌باشند. "کلیدهای دو طرفه[2]" بایستی بتوانند ولتاژها را با هر پلاریته‌ای که باشند مسدود کنند و هم چنین بایستی قادر باشند جریان را در هر جهتی از خود عبور دهند. با چنین آرایشی از کلیدها، مبدل‌های ماتریسی قادر به انتقال انرژی دو طرفه خواهند شد.

در مبدل‌های ماتریسی به دلیل عدم وجود المان‌های ذخیره کننده انرژی و با فرض ایده‌آل بودن کلیدها، توان لحظه‌ای ورودی با توان لحظه‌ای خروجی برابر است. با این حال زاویه فاز بین ولتاژها و جریان‌ها در ورودی می‌تواند کنترل شود و اجباری نیست که شبیه خروجی باشد برای مثال الزامی نیست که توان راکتیو ورودی با توان راکتیو خروجی برابر باشد [8-7]. به دلیل عدم وجود المان‌های ذخیره کننده انرژی، مبدل‌های ماتریسی دارای پاسخ سریع، راندمان بالا، اندازه کوچک و قابلیت طراحی به صورت یک‌پارچه هستند ولی به قیمت افزایش تعداد کلیدهای دو طرفه تمام می‌شود [9]. المان‌های ذخیره کننده انرژی گران قیمت بوده و فضای بزرگی را اشغال می‌کنند و کنترل انرژی ذخیره شده در آن‌ها در موقع بروز عیب مشکل است. در اتومبیل‌های برقی، مخصوصاً در خودروهای نظامی و هواپیماها که کاهش وزن و حجم حیاتی است، مبدل‌های ماتریسی در مقایسه با مبدل‌های استاندارد حاوی لینک DC دارای کاهش تقریبی حجم با ضریب ۳ تا ۱۰ می‌باشند [10]. در مبدل‌های ماتریسی شکل موج و فرکانس در دو طرف ورودی و خروجی مستقل از هم هستند. برای مثال ورودی می‌تواند سه فاز AC بوده در حالی که خروجی DC باشد، یا هر دو می‌توانند DC و یا AC باشند، ضمناً تعداد فازهای ورودی و خروجی نیز مستقل از هم هستند. بنابراین مبدل ماتریسی یک مبدل جامع می‌باشد که می‌تواند جایگزین تمامی مبدل‌های کلاسیک شود.

---

[1] *Matrix Converters*
[2] *Bi-directional Switches*

عیب عمده مبدل‌های ماتریسی این است که تعداد کلیدهای قدرت افزایش می‌یابد. حتی این مشکل نیز قابل حل است، چرا که نیمه‌هادی‌هایی با توان بالا، قیمت پایین و با راه‌اندازی آسان، اکنون قابل دسترسی هستند. در نتیجه این مبدل‌ها نسبت به مبدل‌های AC-DC-AC کلاسیک، در کاربردهایی که نیاز به جریان‌های ورودی سینوسی و توان جاری دو طرفه می‌باشد ارجحیت پیدا می‌کند [6]. با این وجود به دلیل مسائل ذاتی کموتاسیون، مبدل‌های ماتریسی هنوز کاربرد پیدا نکرده‌اند. هم چنین محدودیت‌هایی در نسبت دامنه‌های خروجی و ورودی وجود دارد. با این حال اگر یک مبدل ماتریسی، با یک مبدل AC-DC-AC کلاسیک که شامل مدار اصلاح ضریب توان ورودی و مدار بازیابی انرژی باشد، مقایسه شود، مشاهده می‌شود که مبدل ماتریسی از لحاظ حجم و قیمت بسیار پایین‌تر از مبدل کلاسیک خواهد بود. از آن جایی که مبدل‌های ماتریسی مبدل مستقیمی می‌باشند هر گونه اغتشاشات در سمت ورودی مانند نامتعادلی و Voltage Sag هر چند برای مدت زمان کوتاه، بلافاصله به سمت بار منتقل خواهد شد [13]. نامتعادلی ولتاژ در سمت ورودی می‌تواند باعث تولید هارمونیک‌های ناخواسته در جریان‌های خروجی شود [14].

ساختار مبدل‌های ماتریسی نخستین بار توسط *Gyugyi* و *Pelly* در سال ۱۹۷۶ معرفی گردید. آن‌ها با استفاده از کلیدهای دو طرفه قابل کنترل، اصول سیکلوکانورترها را برای به دست آوردن ولتاژ خروجی با فرکانس نامحدود گسترش دادند. عیب عمده روش آن‌ها این بود که ولتاژ خروجی و جریان ورودی شامل هارمونیک‌های ناخواسته بزرگی بودند، که به آسانی توسط فیلترها حذف نمی‌شدند. این مشکل با ارایه یک روش مدولاسیون جدید با استفاده از تکنیک "مدولاسیون پهنای پالس (PWM)[1]"، توسط *Venturini* و *Alesina* حل گردید [2]. گسترش واقعی مبدل‌های ماتریسی با کارهای منتشر شده *Venturini* و *Alesina* در سال ۱۹۸۰ آغاز می‌شود. آن‌ها مدار قدرت مبدل را به صورت یک ماتریسی از کلیدهای دو طرفه ارائه دادند و نام مبدل ماتریسی را معرفی کردند. یکی از کارهای ارزنده آن‌ها گسترش تحلیل ریاضی، برای تشریح رفتار فرکانس پایین مبدل بود که تحت عنوان "ماتریس مدولاسیون فرکانس پایین[2]" نام‌گذاری شده است. در این شیوه مدولاسیون که هم چنین روش "تابع تبدیل مستقیم[3]" نیز نامیده می‌شود، ولتاژهای خروجی با ضرب ماتریس مدولاسیون، در ولتاژهای ورودی حاصل می‌شوند [40]. عیب عمده روش *Venturini* و *Alesina* این بود که نسبت ولتاژ خروجی به ورودی حداکثر به 50% محدود می‌شد. در سال ۱۹۸۳ نسبت تبدیل ولتاژ در روش *Venturini* و *Alesina* توسط *Maytum* و *Colman* به 86.6% توسعه داده شد [2].

روش کنترلی متفاوت دیگری بر اساس "لینک DC مجازی[4]" توسط *Rodriguez* در سال ۱۹۸۳ معرفی گردید. در این شیوه کنترلی، ولتاژ خروجی هر خط، بین بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر ولتاژهای خطوط ورودی با استفاده از تکنیک PWM کلیدزنی می‌شود. این روش کنترلی، روش "تابع تبدیل غیرمستقیم[5]" نیز نامیده می‌شود [40]، چرا که تبدیل AC/AC در دو مرحله AC/DC و DC/AC با استفاده از "لینک DC مجازی" میانی صورت می‌گیرد. در این شیوه کنترلی نسبت تبدیل ولتاژ خروجی به بهای از دست دادن کیفیت شکل موج جریان ورودی و ولتاژ خروجی به 105.3% افزایش داده می‌شود. بنابراین بسیاری از ویژگی‌های جذاب مبدل‌های ماتریسی از بین می‌رود [2]. در سال‌های ۱۹۸۶-۱۹۸۵ *Ziogas*، ایده کنترلی *Rodriguez* را توسعه داده و بیان ریاضی قوی ارائه داد.

---

[1] *Pulse Width Modulation*
[2] *Low-frequency modulation matrix*
[3] *Direct Transfer Function*
[4] *Fictitious DC Link*
[5] *Indirect transfer function*

در سال ۱۹۸۳ *Braun* و در سال ۱۹۸۵ *Kastner* و *Rodriguez* استفاده از روش بردارهای فضایی را در آنالیز و کنترل مبدل‌های ماتریسی ارائه نمودند. در سال ۱۹۸۹ *Huber* نخستین سری از مقالات را که اصول "مدولاسیون بردار فضایی (SVM)[1]" را در مسئله مدولاسیون مبدل‌های ماتریسی به کار گرفته بودند، منتشر کرد [40].

نوع دیگری از روش کنترلی که "روش مدولاسیون عددی[2]" گفته می‌شود در سال ۱۹۸۷ توسط *Roy* معرفی گردید. این شیوه کنترلی بر اساس اندازه‌گیری مقادیر لحظه‌ای ولتاژهای ورودی پایه‌ریزی شده و مبدل ماتریسی را قادر می‌سازد که جریان‌های ورودی سینوسی هم فاز با ولتاژهای ورودی در هر پریود نمونه‌برداری را داشته باشد [47].

روش‌های دیگری نیز جهت افزایش راندمان مبدل‌های ماتریسی با استفاده از ایده حداقل کردن تلفات کلیدزنی پیشنهاد شده است. در این روش‌ها از تکنیک "کلیدزنی در جریان صفر[3]" (ZCS) و یا "کلیدزنی در ولتاژ صفر[4]" (ZVS)، که نیاز به استفاده از المان‌های اضافی در ساختمان کلیدهای دو طرفه می‌باشد استفاده شده است [32-39].

روش‌های مدولاسیونی که بر پایه روش کنترلی *Alesina-Venturini* عمل می‌کنند، تحت عنوان روش‌های مستقیم و روش‌هایی که بر اساس روش "لینک DC مجازی" می‌باشند روش‌های غیرمستقیم می‌گویند.

در سال ۱۹۸۵ توسط *Kastner* و *Rodriguez* و در سال ۱۹۹۲ توسط *Neft* و *Schauder* به طور عملی تایید شد که یک مبدل ماتریسی با ۹ کلید، به طور موثرتری در کنترل برداری یک موتور القایی با جریان‌های ورودی و خروجی با کیفیت بالا، می‌تواند به کار برده شود. با این حال، کموتاسیون لحظه‌ای کلیدهای دو طرفه به کار برده شده در مبدل ماتریسی باعث تولید اضافه ولتاژها و اضافه جریان‌ها شده و این مسئله باعث صدمه دیدن ادوات نیمه‌هادی‌های قدرت می‌شود. این واقعیت باعث محدود شدن کاربرد عملی این مبدل‌ها شده و یک تاثیر منفی در محبوبیت این دسته از مبدل‌ها شده است. خوشبختانه، این مشکل اصلی با گسترش استراتژی‌های کموتاسیون چند سطحی متعدد که اجازه عمل‌کرد صحیح کلیدها را فراهم می‌کنند، حل شده است. در سال ۱۹۸۹ *Burany* تکنیک کموتاسیون جریان *semi-soft* را معرفی کرد. روش‌های کموتاسیون جالب توجه دیگری توسط *Ziegler*، *Clare* و *Wheeler* در سال ۱۹۹۸ معرفی گردیده است [40].

در اکثر روش‌های کنترلی برای مبدل‌های ماتریسی معایب زیر وجود دارند:

۱) اکثر روش‌های مطرح شده برای مبدل‌های ماتریسی در شرایط ورودی غیرنرمال (ورودی‌های نامتعادل و اغتشاش یافته) با شکست مواجه می‌شوند و یا در غیر این صورت، روش‌های مطرح شده برای درجه نامتعادلی محدودی جواب می‌دهند.

۲) در مورد عمل‌کرد مبدل‌های ماتریسی در شرایط نامتعادلی، اکثر روش‌های مطرح شده فقط نامتعادلی از نظر دامنه را بررسی کرده‌اند. به عبارت دیگر نامتعادلی از لحاظ فاز و یا هم چنین نامتعادلی هم زمان هر دو مورد در نظر گرفته نشده است.

۳) در صورتی که نیاز به تولید خروجی‌های نامتعادل باشد اکثر روش‌های کنترلی مطرح شده ناموفق خواهند شد.

---

[1] *Space Vector Modulation*
[2] *Scalar Modulation Method*
[3] *Zero Current Switching*
[4] *Zero Voltage Switching*

۴) اگر سمت خروجی به غیر از شکل موج سینوسی خالص، دارای مولفه‌های DC باشند، اکثر روش‌های موجود جواب نمی‌دهند [47].

۵) اکثر روش‌های کنترلی جهت پیاده‌سازی ساده نمی‌باشند.

۶) بسیاری از روش‌های مدولاسیون ارائه شده، الگوهای کلیدزنی ثابتی را به خدمت می‌گیرند. به این ترتیب که برای یک خروجی مشخص از نظر دامنه، فرکانس و غیره، سیکل کاری هر کدام از کلیدها را محاسبه و در حافظه میکروپروسسور ذخیره می‌کنند.

۷) اکثر روش‌های مطرح شده برای مبدل‌های ماتریسی دارای محاسبات بسیار پیچیده ریاضی هستند که این مسئله باعث می‌شود که وقت میکروپروسسور مربوط به قسمت تولید سیگنال‌های فرمان کلیدها، بسیار گرفته شده و حتی در خیلی از موارد سرعت میکروپروسسور برای فرکانس کلیدزنی مورد نظر جواب نمی‌دهد.

۸) با ساختار موجود مبدل ماتریسی، تعداد حالات کلیدزنی برای مبدل ماتریسی ۳×۳ به ۲۷ مورد خلاصه می‌شود. همین مورد می‌تواند باعث محدودیت‌های زیادی در تنوع ولتاژهای خروجی تولیدی شود.

۹) اکثر روش‌های پیشنهاد شده برای مبدل‌های ماتریسی یا فقط به بیان ریاضی مسئله پرداخته‌اند و یا فقط به شبیه‌سازی کامپیوتری اکتفاء کرده‌اند. تعداد کمی از مقالات است که به صورت عملی روش پیشنهادی خود را مورد آزمایش قرار داده‌اند.

در این رساله، روش‌های کلاسیک کنترلی برای مبدل‌های ماتریسی بیان شده و مزایا و معایب هر کدام از روش‌های مدولاسیون مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. سپس راه‌حل‌های پیشنهادی جهت کاهش معایب و افزایش کارآیی آن‌ها در چهار محور اساسی زیر بیان می‌شود:

الف) ارائه تکنیک‌های مدولاسیون جدید جامعی بر اساس تکنیک PWM برای تولید یک مجموعه ولتاژ خروجی مورد نظر از یک مجموعه ولتاژ ورودی، صرف نظر از نامتعادلی در سمت ورودی و هم چنین در سمت خروجی،

ب) ارائه الگوریتم کنترلی جدید بر اساس روش حداقل خطا برای تبدیل مبدل ماتریسی به مبدل ماتریسی چند سطحی و هم چنین پیشنهاد ساختارهای جدید برای مبدل‌های ماتریسی جهت افزایش کارآیی آن‌ها،

ج) مبدل‌های ماتریسی چند سطحی مورد بحث در بند (ب)، خروجی‌های چند سطحی را با استفاده از ورودی‌های AC تولید می‌نمایند. برای تولید خروجی‌های چند سطحی با استفاده از ورودی‌های DC، از مبدل‌های چند سطحی کاسکاد استفاده می‌شود. برای مبدل‌های چند سطحی کاسکاد، ضمن ارائه روش‌های جدید برای تعیین اندازه سطوح منابع DC، از آن‌ها به عنوان هسته در ساختمان سیستم‌های "بازیاب دینامیکی ولتاژ (DVR)[1]"جهت افزایش کیفیت توان در شبکه‌های الکتریکی استفاده شده است که برخلاف DVRهای کلاسیک نیازی به ترانسفورماتورهای تک فاز ندارند،

د) طراحی و ساخت یک مبدل ماتریسی جامع سه فاز به سه فاز و هم چنین یک مبدل چند سطحی کاسکاد با 189 سطح خروجی.

---

[1] *Dynamic Voltage Restorer*

در فصل اول رساله، مروری کلی بر پیشینه پژوهش در مورد مبدل‌های ماتریسی صورت گرفته و ضمن بررسی روش‌های کلاسیک کنترلی برای مبدل‌های ماتریسی، مزایا و معایب آن‌ها بیان شده‌اند.

در فصل دوم، ابتدا با مدل‌سازی مبدل‌های ماتریسی، استراتژی کلیدزنی جامعی بر اساس تکنیک PWM معرفی می‌شود که خود این روش به سه دسته زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

- استراتژی مدولاسیون مثبت،
- استراتژی مدولاسیون منفی
- استراتژی مدولاسیون ترکیبی

هر سه روش مدولاسیون مثبت، منفی و ترکیبی با نمونه‌برداری از شکل‌موج‌های ورودی قادر هستند که ولتاژهای خروجی را با دامنه و فرکانس متغیر، مستقل از یک دیگر تولید کنند. این روش‌ها، برای ورودی‌ها و خروجی‌های متقارن و نامتقارن، مستقل از یک دیگر قابل استفاده هستند. با این روش‌ها می‌توان اطمینان حاصل کرد که از بروز حالت مدار باز برای بارهای سلفی و هم چنین از بروز حالت اتصال کوتاه برای منابع ولتاژ سمت ورودی جلوگیری به عمل خواهد آمد. ضمناً هر دو روش برای اکثر مبدل‌های ماتریسی صرف نظر از تعداد فازهای ورودی و خروجی و هم چنین صرف نظر از نوع ورودی و خروجی (DC یا AC) معتبر می‌باشند.

روش مدولاسیون ترکیبی، از ادغام روش‌های مدولاسیون مثبت و منفی حاصل می‌شود. در این روش یک درجه آزادی در اختیار قرار خواهد گرفت که می‌توان از آن برای کنترل یکی از کمیت‌های الکتریکی استفاده کرد. با استفاده از روش ترکیبی، می‌توان در مبدل ماتریسی سه فاز به سه فاز ضریب توان ورودی را مستقل از ضریب توان بار کنترل نمود و حتی ضریب توان ورودی را مستقل از ضریب توان بار (پیش فاز و یا پس فاز) به واحد رساند. با روش ترکیبی در مبدل‌های ماتریسی سه فاز به دو فاز می‌توان هارمونیک‌های مرتبه پایین (نزدیک فرکانس اصلی) جریان‌های ورودی را بدون استفاده از فیلترهای ورودی کاهش داد. از مزیت‌های دیگر روش ترکیبی در مبدل‌های ماتریسی سه فاز به دو فاز کاهش قابل توجه THD[1] ولتاژها و جریان‌های خروجی می‌باشد. با استفاده از روش کلیدزنی ترکیبی در مبدل‌های ماتریسی تک فاز به تک فاز می‌توان هم زمان با تولید جریان‌های سینوسی خروجی به صورت متقارن، THD جریان‌های ورودی و خروجی را نیز کاهش داد. حذف هارمونیک‌های مرتبه پایین جریان‌های ورودی و خروجی و ولتاژ خروجی و هم چنین کاهش بیش از 50 درصدی مولفه DC در سمت ورودی و خروجی از دیگر مزیت‌های روش ترکیبی در مبدل‌های ماتریسی تک فاز به تک فاز می‌باشد. هر سه روش پیشنهاد شده فوق از اثبات ریاضی قوی برخوردار هستند.

در قسمت دوم فصل دوم، الگوریتم کنترلی دیگری برای مبدل‌های ماتریسی ارائه می‌شود که آن‌ها را قادر می‌سازد که ولتاژهای چند سطحی در خروجی تولید نمایند بدون آن که نیازی به المان‌های اضافی داشته باشند. در این استراتژی با تعداد بسیار کم‌تر از کلیدزنی، می‌توان خروجی مورد نظر را با کم‌ترین خطا تولید کرد. در نتیجه تلفات کلیدزنی به شدت کاهش یافته و راندمان مبدل افزایش چشم‌گیری خواهد داشت. هم چنین با این روش THD ولتاژها و جریان‌ها نسبت به روش‌های کلاسیک کم‌تر خواهد بود. یکی دیگر از مزیت‌های این استراتژی این است که با وجود نامتعادلی و اعوجاج شدید در سمت ورودی، خروجی‌های مورد نظر را می‌توان تولید کرد. جهت افزایش کارآیی این روش، ساختارهای جدیدی برای انواع مبدل‌های ماتریسی ارائه خواهد شد.

---

[1] *Total Harmonic Distortion*