بسم الله الرحمن الرحيم

باسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب نعمت اله غفاری جزی معتهد میشوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مأخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارایه نشده است. در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی می باشد.

نعمت اله غفاری جزی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

ارائه روشی نوین در کنترل مبدل‌های ماتریسی AC/AC جهت بهبود شرایط هارمونیکی سیستم و کاهش تلفات سوئیچینگ

نگارش

نعمت اله غفاری جزی

استاد راهنما: دکتر رضا قندهاری

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق قدرت

بهمن ماه ۱۳۹۰

چکیده فارسی:

مبدل ماتریسی به عنوان نسل جدیدی از مبدل های الکترونیک قدرت، یک منبع تغذیه با دامنه و فرکانس متغیر است که N ولتاژ ورودی را مستقیما و بدون استفاده از عناصر ذخیره کننده انرژی به M ولتاژ خروجی تبدیل می کند. این مبدل شامل ماتریسی از کلیدهای نیمه هادی دو طرفه با کموتاسیون اجباری بوده و هر کدام از پایانه های ورودی را به هر کدام از پایانه های خروجی در محل تقاطع خطوط به هم وصل می کند. به عبارتی مبدل ماتریسی یک راه حل کاملا سیلیکانی برای تبدیل ac به ac ارائه می دهد به طوری که بر خلاف سیستمهای کلاسیک (یکسوکننده-اینورتری) ، این مبدل دارای ساختاری یک طبقه بوده و نیاز به عناصر ذخیره کننده انرژی راکتیو نداشته و فاقد رابط DC می باشد. با چنین آرایشی از کلیدها ، مبدل قادر به انتقال انرژی دو طرفه خواهد بود. در این مبدلها تعداد فاز، شکل موج و فرکانس در دو طرف ورودی و خروجی مستقل از هم می باشند. با این وجود مبدل ماتریسی یک مبدل جامع بوده که می تواند با برش ولتاژ ورودی جهت تامین ولتاژ خروجی، جایگزین تمامی مبدل های کلاسیک AC و DC گردد.

کلید واژه ها: مبدل‌هایac/ac ، مبدل ماتریسی، کموتاسیون، مدولاسیون، کلیدهای دو جهته

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مبدل‌های AC/AC ۲

۱-۲- مبدل‌های ماتریسی..... ۴

۱-۲-۱- تاریخچه..... ۴

۱-۲-۲- معرفی مبدل ماتریسی..... ۷

۱-۲-۳- اهداف پایان نامه..... ۱۳

فصل دوم: ساختارهای مبدل ماتریسی و کلیدهای دوطرفه (Bidirectional Switches)

۲-۱- طبقه‌بندی مبدل‌های ماتریسی بر اساس عملکرد آنها..... ۱۴

۲-۱-۱- مبدل‌های ماتریسی مرسوم(دوسطحی)..... ۱۴

۲-۱-۲- مبدل ماتریسی چندسطحی..... ۱۷

۲-۲- طبقه‌بندی مبدل ماتریسی AC/AC بر اساس ماتریس کلیدزنی مبدل..... ۲۱

۲-۲-۱- مبدل ماتریسی تک‌فاز به تک‌فاز..... ۲۱

۲-۲-۲- مبدل ماتریسی سه‌فاز به دوفاز..... ۲۱

۲-۲-۳- مبدل ماتریسی سه‌فاز به سه‌فاز..... ۲۲

۲-۳- کلیدهای دوطرفه..... ۲۳

۲-۳-۱- آرایش پل دیودی..... ۲۳

۲-۳-۲- آرایش امیتر مشترک..... ۲۴

۲-۳-۳- آرایش کلکتور مشترک..... ۲۴

۲-۴- انتخاب نیمه‌هادی‌های برای کلیدهای دوطرفه..... ۲۵

فصل سوم: سیستم‌های مکمل در پیاده‌سازی مبدل‌های ماتریسی

۳-۱- مدارات کلمپینگ ۲۷

۳-۱-۱- قابلیت بازیابی انرژی بار ۲۹

۳-۲- اسنابرها..... ۳۰
۳-۳- راه‌اندازها ۳۱
۳-۴- فیلترها ۳۲
۳-۴-۱- فیلترهای ورودی..... ۳۳
۳-۵- سیستم حفاظت در برابر اضافه جریان..... ۳۴
۳-۶- سیستم‌های خنک‌کننده..... ۳۴
۳-۷- سیستم‌های کنترل‌کننده..... ۳۴

فصل چهارم: الگوریتم‌های کنترلی مبدل‌ماتریسی

۴-۱- اساس عملکرد..... ۳۷
۴-۲-نسبت ولتاژ مبدل ماتریسی..... ۴۱
۴-۳-مدولاسیون..... ۴۲
۴-۳-۱- مشکلات مدولاسیون و راه حل پایه..... ۴۳
۴-۳-۲- تکنیک‌های مدولاسیون..... ۴۴
۴-۳-۳- روش‌های مدولاسیون ونتورینی..... ۴۴
۴-۳-۴- روش‌های مدولاسیون اسکالر..... ۴۷
۴-۳-۵- روش‌های مدولاسیون بردارفضایی..... ۴۸
۴-۳-۶- روش مدولاسیون غیرمستقیم..... ۵۱
۴-۴- استراتژی‌های کموتاسیون..... ۵۵
۴-۴-۱- کموتاسیون ساده..... ۵۶
۴-۴-۲- کموتاسیون جریان با هم‌پوشانی کلیدها ۵۶
۴-۴-۳- کموتاسیون با زمان مرده ۵۶
۴-۴-۴- کموتاسیون برمبنای جهت جریان..... ۵۷
۴-۴-۵- کموتاسیون برمبنای دامنه ولتاژ..... ۶۰
۴-۴-۶- تکنیک کلیدزنی نرم..... ۶۰

فصل پنجم: مقایسه و شبیه‌سازی استراتژی‌های مدولاسیون و ارائه یک الگوی کلیدزنی نوین جهت کاهش تلفات و اثرات هارمونیکی

۵-۱- مقدمه..... ۶۴

۵-۲- رهیافت ماتریسی سیکل‌کاری..... ۶۵

۵-۲-۱- روش AV (Alesina-Venturini 1981)..... ۶۶

۵-۲-۲- روش AV بهینه (Alesina-Venturini 1989)..... ۶۷

۵-۳- رهیافت بردار فضائی..... ۶۸

۵-۳-۱- بردارهای MC..... ۶۸

۵-۳-۲- تکنیک SVM..... ۶۹

۵-۴- رهیافت بردار فضایی سیکل‌کاری جدید..... ۷۵

۵-۵- استراتژی مدولاسیون تعمیم یافته..... ۷۷

۵-۶- مقایسه استراتژی‌های مدولاسیون..... ۸۰

۵-۶-۱- روش AV(Alesina-Venturini 1981)..... ۸۰

۵-۶-۲- روش AV (۱۹۸۹)..... ۸۳

۵-۶-۳- تکنیک SVM ۸۵

۵-۷- استراتژی‌های مدولاسیون پیشرفته..... ۸۸

۵-۷-۱- رهیافت بردار فضایی سیکل‌کاری..... ۸۸

۵-۷-۲- استراتژی مدولاسیون تعمیم یافته..... ۹۰

۵-۷-۳- نتایج شبیه‌سازی مربوط به استراتژی‌های مدولاسیون..... ۹۳

۵-۸- الگوی کلیدزنی پیشنهادی..... ۹۶

۵-۹- نتیجه‌گیری..... ۱۰۲

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- جمع‌بندی..... ۱۰۵

۶-۲- نتیجه گیری..... ۱۰۵

۶-۳ - پیشنهادات..... ۱۰۶

فهرست شکل‌ها

شکل۱-۱: مبدل فرکانسی با ساختAC/DC/AC.....۲

شکل۱-۲: سیکلوکانورتر سه‌فاز سه پالسی.....۳

شکل۱-۳: مبدل ماتریسی با ساختار غیرمستقیم.....۵

شکل۱-۴: ساختار مبدل ماتریسی سه‌فازه معمولی.....۸

شکل ۱-۵: محدودیت‌های کلیدزنی مبدل ماتریسی.....۱۰

شکل ۲-۱: مبدل ماتریسی معمولی(CMC).....۱۵

شکل۲-۲: مبدل ماتریسی غیرمستقیم (IMC).....۱۶

شکل۲-۳: مبدل ماتریسی sparce (SMC).....۱۶

شکل۲-۴: مبدل ماتریسی خیلی sparce (VSMC).....۱۶

شکل۲-۵: مبدل ماتریسی فوق sparce (Usmc).....۱۷

شکل ۲-۶: مقایسه راندمان بر حسب توان، مبدل سه‌سطحی و دوسطحی با ساختار غیرمستقیم.....۱۸

شکل۲-۷: مقایسه شکل موج ولتاژ خروجی مبدل ماتریسی دوسطحی و سه‌سطحی.....۱۹

شکل ۲-۸: ساختار یک مبدل چندسطحی با سلول کلیدی H-Bridge.....۱۹

شکل ۲-۹: نمونه سلول کلیدیِ Diod-Clamped.....۲۰

شکل ۲-۱۰: نمونه سلول کلیدی Bi-Directional Switch Interconnection ۲۰

شکل ۲-۱۱: نمونه سلول کلیدی Fly-Capacitor.....۲۰

شکل ۲-۱۲: مبدل ماتریسی سه‌فاز به دوفاز به‌همراه یک نمونه کلیدزنی متناظر با آن.....۲۱

شکل۲-۱۳: مبدل ماتریسی تک‌فاز به تک‌فاز به‌همراه یک نمونه کلیدزنی متناظر با آن.....۲۲

شکل ۲-۱۴: کلید دوطرفه با آرایش پل دیودی.....۲۴

شکل ۲-۱۵: کلید دوطرفه با آرایش امیتر مشترک.....۲۴

شکل ۲-۱۶: کلید دوطرفه با آرایش کلکتور مشترک.....۲۵

شکل ۳-۱:یک نمونه از مدار کلمپینگ قابل استفاده در مبدل‌های ماتریسی سه‌فاز.....۲۸

شکل۳-۲: یک نمونه از اعمال مدار کلمپینگ برای مبدل‌های ماتریسی.....۲۸

شکل ۳-۳: ساختار پیشنهادی جهت تامین قابلیت بازیابی انرژی بار.....۲۹

شکل ۳-۴: یک نمونه سه کلیدی از مدار کلمپینگ قابل استفاده در مبدل‌های ماتریسی.....۳۰

شکل ۳-۵: استفاده از اسنابر برای کلیدهای مربوط به یک فاز خروجی مبدل.....۳۱

شکل۳-۶: یک نمونه از مدار راه انداز قابل استفاده در مبدل ماتریسی.....۳۲
شکل۳-۷: مدار مربوط به یک مبدل ماتریسی با وجود مدار کلمپینگ و فیلتر ورودی مبدل.....۳۲
شکل۳-۸: استفاده از فیلتر ورودی در مبدل ماتریسی.....۳۳
شکل ۳-۹: مبدل ماتریسی با مدارات جانبی از جمله سیستم‌های کنترل‌کننده مبدل.....۳۵
شکل ۴-۱: ساختار ماتریسی کلیدهای دوطرفه و مدار قدرت مبدل ماتریسی.....۳۷
شکل۴-۲: سیکل‌کاری مربوط به کلیدهای دوطرفه برای هر فاز، در یک پریود کلیدزنی.....۳۹
شکل ۴-۳: شکل موج‌های جریان ورودی و ولتاژ خروجی مبدل به‌همراه طیف هارمونیکی هر کدام.....۴۰
شکل۴-۴: مقایسه شکل موج ورودی و خروجی مبدل ماتریسی با نسبت ولتاژ ۵۰٪..... ۴۲
شکل۴-۵: مقایسه شکل موج ورودی وخروجی با نسبت ولتاژ ۰/۸۶۶ .....۴۷
شکل ۴-۶: شکل موج ولتاژ خروجی و جریان ورودی مبدل ماتریسی تحت مدولاسیون ونتورینی.....۴۶
شکل ۴-۷: الگوی کلیدزنی مربوط به تکنیک اسکالر.....۴۸
شکل ۴-۸: الگوی کلیدزنی و شکل موج‌های خروجی مبدل تحت مدولاسیون اسکالر.....۴۸
شکل ۴-۹: موقعیت بردارهای فضائی ولتاژ خروجی با توجه به کلیدزنی مبدل.....۵۰
شکل ۴-۱۰: ترکیب یک نمونه از بردار فضائی ولتاژ خروجی.....۵۰
شکل۴-۱۱: یک نمونه از زمان‌بندی کلیدزنی مبدل ماتریسی با استفاده از مدل فضای برداری.....۵۱
شکل۴-۱۲: مدار قدرت مربوط به یک مبدل ماتریسی سه‌فاز با ساختار غیرمستقیم.....۵۳
شکل۴-۱۳: وضعیت فاز A در مبدل ماتریسی با ساختار معادل غیرمستقیم.....۵۴
شکل۴-۱۴: ولتاژ خط به خط خروجی و جریان مربوط به بار با اعمال روش غیرمستقیمSVM.....۵۵
شکل ۴-۱۵: بررسی کموتاسیون در یک مبدل دوفاز به تک‌فاز.....۵۸
شکل ۴-۱۶: فرایند کموتاسیون چهار مرحله‌ای کلیدهای دوطرفه در مبدل دوفاز به تک‌فاز.....۵۸
شکل۴-۱۷: دیاگرام زمانی مربوط به عملکرد کلیدها در کموتاسیون چهار مرحله مبدل دوفاز به یک‌فاز.....۵۹
شکل ۴-۱۸: یک نمونه از کاربرد مدارات رزونانس کمکی در کلیدزنی نرم مبدل‌های ماتریسی.....۶۲
شکل ۵-۱: ساختار یک مبدل ماتریسی.....۶۵
شکل ۵-۲: الگوی کلیدزنی دوطرفه در یک پریود سیکل T_p.....۶۷
شکل ۵-۳: (الف):جهت بردارهای ولتاژ فازی خروجی تولید شده به‌وسیله حالات فعال.....۷۰
شکل ۵-۳: (ب): جهت بردارهای جریان خط خروجی تولید شده به‌وسیله حالات فعال.....۷۰
شکل ۵-۴: (a) :اصول مدولاسیون بردارهای ولتاژ خروجی (b) : اصول مدولاسیون جریان ورودی.....۷۱
شکل ۵-۵: الگوی کلیدزنی دوطرفه در یک پریود سیکلT_p ۷۴

شکل ۵-۶: نمایش هندسی از ناحیه معتبر برای $\overline{m}_1$ ۷۶
شکل۵-۷ (a): نمایش هندسی از چهار موقعیت سگمنت متصل‌کننده $\overline{m}_1$، $\overline{m}_2$ و $\overline{m}_3$ ۷۹
شکل۵-۷(b): نمایش هندسی از سگمنت متصل‌کننده $\overline{m}_1$، $\overline{m}_2$ و $\overline{m}_3$ ۷۹
شکل ۵-۸: موقعیت سگمنت a) مسیر جابه‌جایی $\overline{m}_1$ b) $\overline{m}_2$ c) و $\overline{m}_3$ d) بدست آمده با استفاده از استراتژی AV با: $q=0.5$ ، $f_1=50Hz$ ، $f_2=25Hz$..... ۸۱
شکل ۵-۹: الگوی کلیدزنی مربوط به تکنیکAV..... ۸۲
شکل۵-۱۰: شکل موج‌های ولتاژ و جریان خروجی مربوط به تکنیک AV..... ۸۳
شکل۵-۱۱: موقعیت سگمنت a) مسیر جابه‌جایی $\overline{m}_1$ b) $\overline{m}_2$ c) و $\overline{m}_3$ d) بدست آمده با استفاده از استراتژی AV بهینه با: $q=0.5$ ، $f_1=50Hz$ ، $f_2=25Hz$..... ۸۴
شکل ۵-۱۲: الگوی کلیدزنی مربوط به تکنیک بهبود یافته AV..... ۸۴
شکل۵-۱۳: شکل موج‌های ولتاژ و جریان خروجی مربوط به تکنیک بهبودیافته AV..... ۸۵
شکل ۵-۱۴: موقعیت سگمنت a) مسیر جابه‌جایی $\overline{m}_1$ b) $\overline{m}_2$ c) و $\overline{m}_3$ d) بدست آمده با استفاده از استراتژی SSVM با: $q=0.5$ ، $f_1=50Hz$ ، $f_2=25Hz$..... ۸۶
شکل ۵-۱۵: موقعیت سگمنت a) مسیر جابجایی $\overline{m}_1$ b) $\overline{m}_2$ c) و $\overline{m}_3$ d) بدست آمده با استفاده از استراتژی ASVM با: $q=0.5$ ، $f_1=50Hz$ ، $f_2=25Hz$..... ۸۶
شکل۵-۱۶:شکل موج‌های ولتاژ و جریان خروجی مربوط به تکنیک SVM..... ۸۷
شکل ۵-۱۷: تحلیل گرافیکی بردار فضایی سیکل‌کاری $\overline{m}_1$..... ۹۰
شکل ۵-۱۸: الگوی کلیدزنی مربوط به تکنیک SVM با یک بردار صفر..... ۹۳
شکل۵-۱۹: شکل‌موج‌های ولتاژ و جریان خروجی مربوط به تکنیک SVM با یک بردار صفر..... ۹۴
شکل ۵-۲۰: الگوی کلیدزنی مربوط به تکنیک SVM با دو بردار صفر..... ۹۴
شکل ۵-۲۱: شکل موج‌های ولتاژ و جریان خروجی مربوط به تکنیک SVM با دو بردار صفر..... ۹۵
شکل ۵-۲۲: الگوی کلیدزنی مربوط به تکنیک SVM با سه بردار صفر..... ۹۵
شکل۵-۲۳: شکل موج‌های ولتاژ و جریان خروجی مربوط به تکنیک SVM با سه بردار صفر..... ۹۶
شکل ۵-۲۴: مدل مبدل ماتریسی سه‌فاز جهت محاسبات سیکل‌کاری کلیدها..... ۹۸
شکل ۵-۲۵: الگوی کلیدزنی پیشنهادی مبدل ماتریسی..... ۹۸.
شکل۵-۲۶: شکل موج‌های ولتاژ و جریان خروجی مربوط به تکنیک پیشنهادی..... ۱۰۲
شکل۵-۲۷: نمودار میله‌ای مربوط به مقایسه مولفه‌های هارمونیکی حاصل از روش‌های موجود با روش پیشنهادی..... ۱۰۳

فهرست جداول

جدول ۱-۱: مقایسه مبدل ماتریسی با چند مبدل فرکانسی.....۷
جدول۲-۱: مقایسه مشخصات ساختاری انواع مبدل‌ها.....۱۷
جدول ۵-۱: حالات کلیدزنی در الگوریتم SVM.....۶۹
جدول ۵-۲ : انتخاب چهار حالت کلیدزنی برای هر ترکیبی از قطاع‌های ولتاژ خروجی و جریان ورودی.....۷۲
جدول ۵-۳: تعداد BSOهای مربوط به استراتژی‌ها با توجه به تحلیل گرافیکی آن‌ها.....۹۱
جدول ۵-۴: تعداد کموتاسیون‌های مربوط به استراتژی در طول یک پریود.....۹۲
جدول۶–۱:مقایسه THD جریان خروجی مبدل ماتریسی ۳× ۳ تحت روش‌های کنترلی ارائه شده با روش پیشنهادی.....۱۰۶

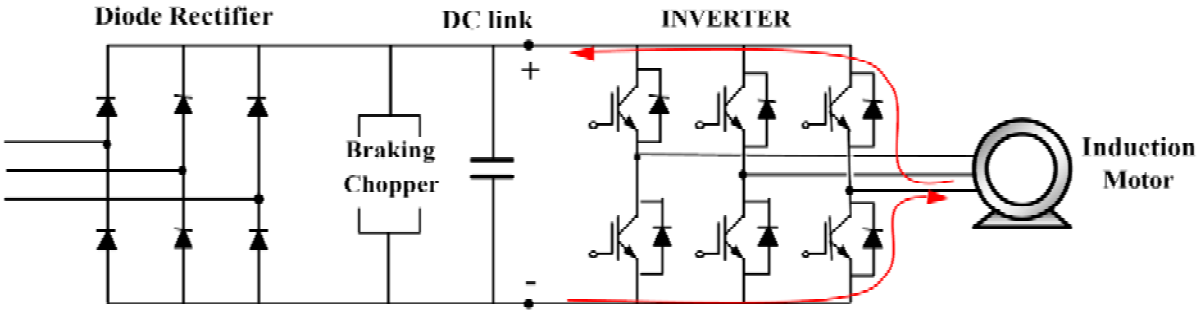
فصل اول

مقدمه

۱-۱- مبدل‌های AC/AC

مبدل‌های فرکانسیAC به AC در دهه‌های اخیر جایگاه ویژه‌ای را در الکترونیک قدرت به خود اختصاص داده‌اند. از این مبدل‌ها می‌توان در رگولاتورهای توان، درایوهای موتورهای القایی و مبدل‌های مربوط به ژنراتورهای بادی و... استفاده نمود. این مبدل‌ها قابلیت انتقال دو جهته توان را علاوه بر یک‌طرفه بودن دارند. با توجه به روند رو به رشد تکنولوژی کلیدهای توان بالا و استراتژی‌های کموتاسیون و تکنیک‌های مدولاسیون و کلیدزنی متناسب با آنها، این مبدل‌ها در راستای افزایش کیفیت تبدیل توان، راندمان و کاهش تلفات و هزینه روزبه‌روز بهبود می یابند[۱]. مبدل‌های AC به AC از نظر ساختاری به دو قسمت اصلی طبقه‌بندی می‌گردند:

الف) ساختار(AC/DC/AC) : مبدل‌های دارای رابط dc با ذخیره‌کنندگی انرژی، شامل مبدل‌های اینورتر منبع ولتاژ [۱](VSR/VSI) و اینورتر منبع جریان [۲](CSR/CSI)می‌باشند. به‌عنوان نمونه اینورتر (VSR/VSI) مطابق شکل (۱-۱) در ساختار خود دارای یک طبقه یکسوساز و یک طبقه اینورتر است. این دو طبقه توسط یک المان واسط ذخیره‌کننده انرژی بزرگ و گران قیمت از قبیل خازن و سلف به هم‌دیگر کوپل می-گردند[۲].



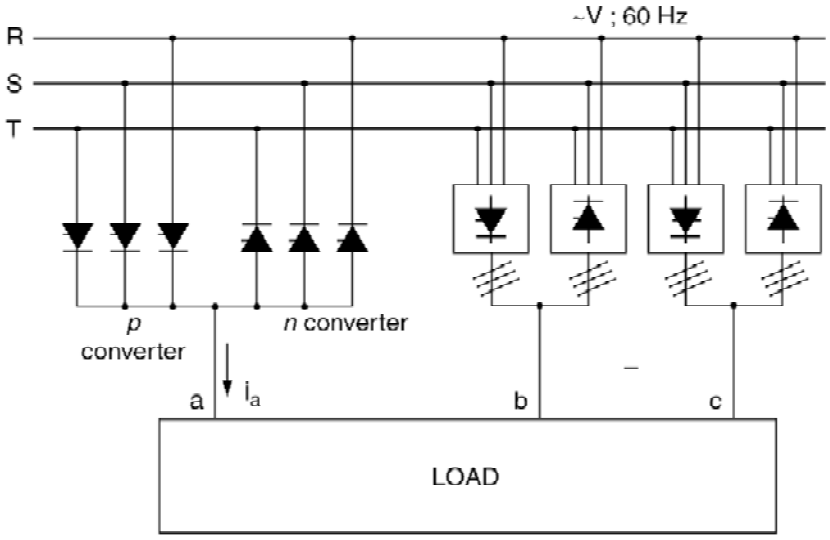
شکل۱-۱: مبدل فرکانسی با ساختار AC/DC/AC [۲]

[1] -Voltage source rectifier/ Inverter
[2] -Current source rectifier/ Inverte

(VSR/VSI)ها دارای لینک ولتاژ DC و المان خازن موازی بوده و (CSR/CSI)ها دارای رابط جریان DC و المان سلف سری می‌باشند. علاوه بر این المان‌های واسط این دسته از مبدل‌ها، به المان‌های فیلترکننده اضافی برای حذف هارمونیک‌ها و تجهیزات استراتژی کموتاسیون‌ها و غیره مجهز گشته‌اند. بنابراین اصلاح ضریب توان[1](PFC) در این مبدل‌ها قابل توجه می‌باشد و راه حل‌هایی چون استفاده از واسط‌های رزونانس و فرکانس بالای [2](HF) برای این مبدل‌ها پیشنهاد می‌گردند[۳].

ب) (AC/AC) مستقیم : مبدل‌های فاقد رابط DC و بدون ذخیره‌کنندگی انرژی، شامل سیکلوکانورترها و مبدل‌های ماتریسی که دارای دو ساختار مستقیم و غیر مستقیم می‌باشند.

سیکلوکانورترها و مبدل‌های ماتریسی به دسته دوم از مبدل‌های AC به AC که فاقد واسط DC و المان-های ذخیره کننده انرژی[3](ZES) می‌باشند، تعلق دارند. سیکلوکانورترها دارای دو نوع سه‌فاز و تک‌فاز در سطوح مختلف بوده که اغلب به صورت سه‌فاز برای کاربردهای توان بالا و فرکانس پایین مورد استفاده قرار می‌گیرند(شکل۱-۲). در این مبدل‌ها فرکانس خروجی کسری از فرکانس ورودی می‌باشد[۴].



شکل۱-۲: سیکلوکانورتر سه‌فاز سه پالسی[۴]

به‌طور طبیعی سیکلوکانورترها قادر به عملکرد مطمئن در هر چهار ربع (ولتاژ- جریان) هستند. این مبدل‌ها حتی با وجود اشکال در یک SCR می‌توانند به کار خود با افزایش اعوجاج کم ادامه دهند. همچنین

[1]-Power factor correction
[2] -High frequency
[3] -Zero energy storage

تبدیل توان AC در این مبدل‌ها بر خلاف اینورترها به‌صورت مستقیم و با کیفیت جریان خروجی مناسب صورت می‌پذیرد. از معایب این مبدل‌ها، علاوه بر حجیم بودن و دارا بودن محدوده فرکانس خروجی کم، استفاده از تعداد زیادی SCR و پیچیدگی سیستم کنترل آنها را می‌توان برشمرد. این مبدل‌ها مانند یکسوکننده‌های کنترل فاز، دارای ضریب توان ورودی پایین هستند. تصحیح ضریب توان (PFC)[1] آنها پرهزینه و مشکل است زیرا مبدل فرکانس با توان بالا به فیلتر ورودی با اندازه متناسب نیاز دارد. بنابراین بهینه کردن خصوصیات و معایب مربوط به سیکلوکانورترها به ظهور و تکامل تدریجی مبدل‌های ماتریسی انجامید. این موضوع اهمیت هر چه بیشتر این مبدل‌ها را در عرصه کنونی الکترونیک قدرت بیان می‌کند[۵].

۱-۲-مبدل‌های ماتریسی

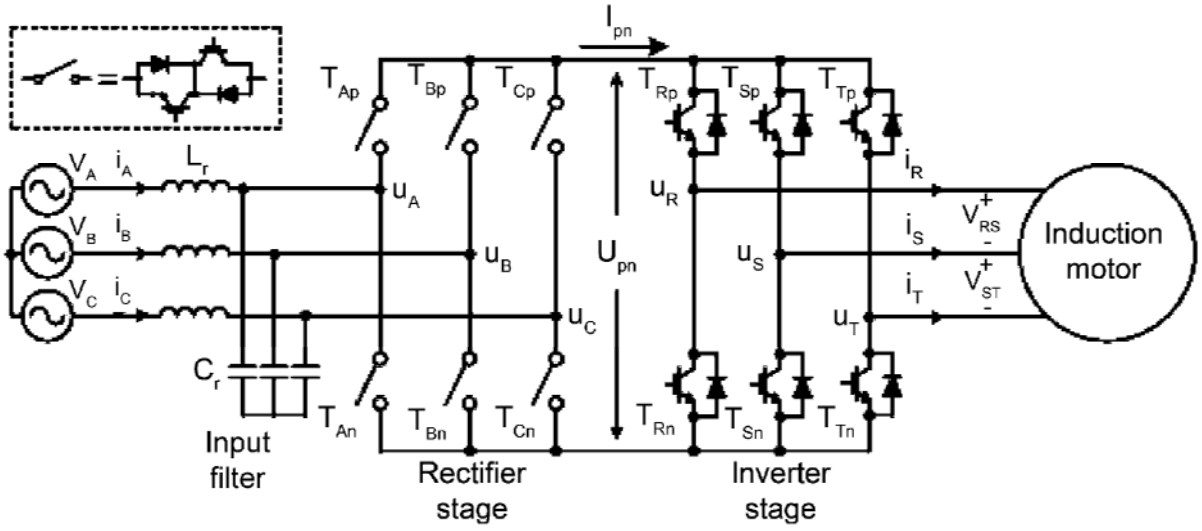
۱-۲-۱- تاریخچه

در سال ۱۹۷۶، برای نخستین بار ساختار مبدل ماتریسی توسط Gyugyi و Pully تحت عنوان یک مفهوم هوشمندانه صرفا نظری، با انگیزه بهینه سازی عملکرد اصولی سیکلوکانورترها، جهت بدست آوردن ولتاژ خروجی با فرکانس نامحدود و تبدیل مستقیم با استفاده از کلیدهای دو طرفه قابل کنترل، ارائه گردید. مبدل‌های ماتریسی اولیه با معایبی همچون وجود هارمونیک‌های ناخواسته بزرگ در ولتاژ خروجی و جریان ورودی همراه بوده که به آسانی توسط فیلترها حذف نمی‌شوند. این مشکل در سال ۱۹۸۰ توسط Venturini وAlesinne با ارائه یک روش مدولاسیون جدید با استفاده از تکنیک مدولاسیون پهنای پالس (PWM)[2] حل گردید[۶].

در آن زمان به‌علت معضلات کموتاسیون جریان و پیچیدگی الگوریتم کنترل آن کاربردهای عملی این مبدل خیلی محدود بود. البته با تداوم تحقیقات در این زمینه کاربردهای عملی این مبدل در حال بهبود می باشد. لذا محققین به آنالیز روابط ریاضی و بررسی مبدل در فرکانس‌های پایین پرداختند. لیکن با ارائه یک روش مدولاسیون مناسب، مدار قدرت مبدل به صورت یک ماتریس از کلیدهای دو طرفه کنترل شونده ارائه گردید و مبدل ماتریسی را با روش مدولاسیون مستقیم (ونتوریم) معرفی نمودند. چندی بعد این نظریه توسط Landmark بر مبنای الگوریتم کنترل و توابع ریاضی قوی‌تری بیان گردید[۶].

[1] Power Factor Correction
[2]-Pulse wide modulation

تا این‌که در سال ۱۹۸۳، توسط Rodriguez یک تکنیک کنترلی متفاوت مبتنی بر رابط DC مجازی[۱] ارائه گردید. در این روش کلیدزنی هر خط خروجی با استفاده از تکنیک PWM بین خطوط ورودی که مینیمم مقدار را دارا می‌باشند، کلید می‌گردید(مشابه VSI ها). این روش تبدیل غیرمستقیم هم نامیده می شود[۴] (شکل ۱-۳).



شکل۱-۳: مبدل ماتریسی با ساختار غیرمستقیم[۴]

Ziogas et al در سال ۸۶-۱۹۸۵ دو مقاله برای تشریح بیشتر ریاضیات مربوط به روش غیر مستقیم ارائه نمود. در سال ۱۹۸۳، Braun و در ۱۹۸۵، Kasther وRodriguez اولین کسانی بودند که در فضای برداری، کنترل و تحلیل مبدل‌های ماتریسی را مطرح نمودند. در سال ۱۹۸۹، Huber et al اولین سری مقالات مربوط به اصول مدولاسیون فضای برداری[۲](SPVM) را برای مبدل‌های ماتریسی ارائه نمود[۷]. Roy نیز در سال ۱۹۸۷-۱۹۸۸ مقالاتی را در زمینه مدولاسیون اسکالر، مبتنی بر محاسبه سیگنال تحریک کلیدها توسط اندازه‌گیری هم‌زمان ولتاژهای ورودی و مقایسه دامنه آنها، ارائه نمود.

در سال ۱۹۹۲، Neft و Schauder بیان کردند که می‌توان از یک مبدل ماتریسی ۹ کلیدی، به‌طور موثری برای کنترل برداری موتور القایی، با کیفیت بالای جریان ورودی و خروجی، استفاده نمود. در این مورد از کموتاسیون هم‌زمان کلیدهای دو جهتی کنترل شونده، با وجود آسیب‌های مربوط به ضربات ولتاژ و جریان، استفاده کردند. در سال ۱۹۸۹ تکنیک کموتاسیون جریان شبه‌نرم[۳] توسط Burany معرفی شده بود.

[1] -Fictitious Dc Link
[2] -Space Vector Modulation
[3] Semi-soft Cummotation

سرانجام در سال ۱۹۹۸ استراتژی‌های کموتاسیون کامل‌تری توسط Ziegher et al وChare معرفی گردید [۵]. محققان ذیل در راستای کاربردهای صنعتی و بهبود عملکرد مبدل ماتریسی، مقالات پژوهشی معتبری را ارائه داده‌اند:

Huber and Borojevic, (1995); Kaznierkowski, Krishnan et al., (2002); Roth-Deblon, (2006) Kwak, (2007); Braun and Stahl, (2008) ; Ortega and Arias, (2009).

از پژوهشگران زیر هم در راستای تنوع و بهبود ساختارهای مبدل ماتریسی مقالات تاثیرگذاری ارائ گردیده است:

Minari et al.,(1993); Kolar et al., (2002); Wheeler et al., (2002); Jussila et al., (2004); Klumpner,(2005); Klumpner and Blaabjerg, (2005); Kolar et al., (2007); Zhang et al.,(2009); Takeshita and Andou,(2010).

مقالات منتشر شده در ذیل نیز از محققین ذکر شده، در ارتباط با بهبود الگوریتم‌های کنترلی مبدل‌های ماتریسی اعم از استراتژی‌های کموتاسیون و تکنیک‌های مدولاسیون، تاثیر چشمگیری را بر روی روند تکامل این مبدل‌ها به‌جای گذاشته است:

Wheeleret al., (2002); Sun et al.(2003); Chekhet et al. (2003); Tabone et al. ,(2004);Djahbar et al. (2005); Zhou et al. ,2005; Ortega et al. (2005); Dzung and Phuong (2005); Mohapatra et al. (2006); Joshi et al. (2007); Yang et al. (2007); Lee et al.(2007); Chen et al. (2007); Gambôa et al.(2007); Kabasta,(2008); Yamamoto et al. (2008); Vargas et al. (2008); Lee and Blaabjerg (2008); Xiaohong et al.(2009); Rivera et al. (2009); Jun aNd Ming (2009);Bradaschia et al. (2009); Kwak ,(2009); Cai et al. (2009); Ahmed et al. (2011).

همچنین مقالات مربوط به روند بهبود تلفات، شرایط هارمونیکی و عدم تعادل ولتاژ در مبدل‌ها توسط ارائه دهنده‌گان زیر منتشر شده است:

Kang et al. (2002); Mei and Huang (2006); Kumar and Bansal, (2008); Wheeler et al. (2008).

در آخر هم تعدادی از پژوهشگران ارائه‌دهنده مقالات مربوط به پیاده‌سازی مبدل ماتریسی معرفی شده است:

Podlesak et al. (2004); Wang et al. (2004); Wheeler et al. (2005); Imayavaramban et al.(2007); Thomas and Doncker (2008); Ahmed et al. (2011).

بطورکلی تا حدود سال‌های ۲۰۰۰ میلادی، مبدل‌های ماتریسی در حد مفاهیم نظری و نمونه‌های آزمایشگاهی مورد بررسی و طراحی قرار گرفته‌اند و بعد از آن پا به عرصه واقعی الکترونیک صنعتی نهاده‌اند.

مبدل‌های ماتریسی به‌دلیل ساختار ساده‌ای که دارند در راستای پیشرفت هر چه بیشتر الگوریتم‌های کلیدزنی و استراتژی‌های مدولاسیون رشد قابل توجهی در زمینه‌های علمی داشته اند.

۱-۲-۲- معرفی مبدل ماتریسی

مبدل ماتریسی در واقع یک سیکلوکانورتر کامل شده با کلیدهای کاملا قابل کنترل می‌باشد. به این دلیل مبدل‌های ماتریسی را بعضی اوقات سیکلوکانورترهای با کموتاسیون اجباری می‌گویند. ساختار مبدل ماتریسی نسبت به دیگر مبدل‌های AC/AC مزایای زیادی دارد.[۴].

البته با توجه به مقایسه‌ای که در جدول (۱-۱) انجام شده مشاهده می‌شود که مبدل ماتریسی به ازاء نداشتن وسایل ذخیره‌کننده بزرگ دارای شش کلید اضافی می‌باشد. این تفاوت در صورتی است که مبدل ماتریسی نسبت به دو مبدل اینورتری ذکر شده دارای تشابهاتی از جمله جاری شدن توان در دو جهت و سینوسی بودن جریان ورودی می‌باشد.

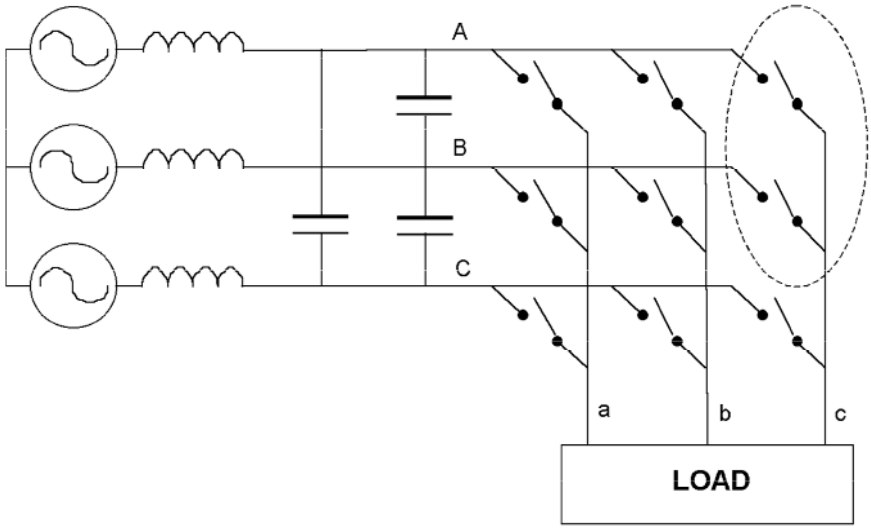
جدول ۱-۱: مقایسه مبدل ماتریسی با چند مبدل فرکانسی

ساختار	تعداد کلیدهای فعال	دیودهای سریع	دیودهای یکسوساز	خازن الکترولیتی بزرگ	سلف بزرگ
مبدل ماتریسی	۱۸	۱۸	۰	۰	۰
اینورترBACK-TO-BACK	۱۲	۱۲	۰	۱	۳
اینورتر پل دیودی	۶	۶	۶	۱	۱یا۰

از خصوصیات مبدل ماتریسی جامع بودن این مبدل، به‌عنوان جایگزین تمام مبدل‌های کلاسیک AC/AC، AC/DC، DC/AC، DC/DC می‌باشد. به‌عبارتی نوع شکل موج جریان، ولتاژ، فرکانس و تعداد فاز در دو طرف ورودی و خروجی از نظر AC و DC بودن مستقل از هم می‌باشند. با این وجود چه در مباحث تئوری و چه در مباحث کاربردی اغلب، نوع AC/AC آن مورد استفاده قرار گرفته است. در بین مبدل‌های

AC/AC هم اغلب نوع سه فاز به سه فاز آن کاربردی‌تر بوده و مورد ارزیابی و بررسی تئوری قرار می-گیرد[۸].

اگر چه نوع سه‌فاز به دوفاز و نوع تک‌فاز به تک‌فاز آن هم موجود می‌باشند. با این‌حال مرسوم‌ترین و کاربردی‌ترین این نوع مبدل‌ها به صورت سه‌فاز به سه‌فاز بوده و دارای ماتریس کلیدزنی ۳×۳ می‌باشد. ولتاژ وجریان سه‌فاز مبدل‌های ماتریسی، در ورودی و خروجی این مبدل‌ها، دارای دامنه و فرکانس متفاوت می-باشند. همان‌طور که در شکل (۱-۴) مشاهده می‌شود، این مبدل دارای ۹ کلید دو جهتی به صورت ماتریسی می‌باشد. با چنین آرایشی از کلیدها مبدل ماتریسی قادر به انتقال انرژی دوطرفه خواهد بود. لذا چون تبدیل به‌طور مستقیم در این مبدل صورت می‌پذیرد، اعوجاج و عدم تعادل ولتاژ و زیر هارمونیک‌ها در طرف ورودی مستقیما به علت نبودن واسط DC بر روی خروجی مبدل تاثیر خواهد گذاشت[۹].



شکل۱-۴: ساختار مبدل ماتریسی سه‌فاز معمولی[۹]

مبدل ماتریسی در حال حاضر به‌علت ویژگی‌های قابل توجهی که دارند از محبوبیت فراوانی برای محققین این زمینه برخوردار است. با این وجود مسائل زیادی در جهت بهینه شدن این مبدل‌ها هنوز باید مورد بررسی قرار گیرند.

ویژگی‌های ممتاز مبدل‌های ماتریسی را به‌صورت زیر می‌توان بیان نمود[۸]-[۱۳]:

الف) جریان ورودی و خروجی سینوسی نسبتا صاف و کامل؛

ب) ضریب جابجائی فازهای ورودی نزدیک یک و امکان تصحیح این ضریب برای انواع بارها؛

پ) تلفات کلیدزنی پایین، راندمان بالا در مقایسه با مبدل‌های AC/DC/AC به‌دلیل فقدان عناصر ذخیره-کننده انرژی بزرگ؛

ت) پاسخ سریع، کنترل مبدل در شرایط عدم تعادل و اغتشاشات منبع تغذیه با اعمال مدولاسیون مناسب؛

ث) ساختاری ساده، طراحی فشرده، قابلیت طراحی یک‌پارچه مبدل، اندازه کوچک و ارزان قیمت به‌دلیل دارا بودن ساختار کاملا سیلیکونی نسبت به مبدل‌های (AC/DC/AC)؛

ج) استفاده از فیلترهای کوچکتر برای بهبود جریان شبکه؛

چ) عملکرد مبدل در چهار ربع و توانایی تبدیل مجدد[1] انرژی برگشتی از طرف بار؛

ح) جامع بودن مبدل به‌عنوان جایگزین برای همه مبدل‌های کلاسیک.

مبدل‌های ماتریسی از یک ماتریس N×M کلیدهای دوطرفه تشکیل شده که N فاز ورودی را به M فاز خروجی، با دامنه و فرکانس دلخواه، تبدیل می‌کند. این کلیدها توسط تکنیک‌های مدولاسیون به‌گونه‌ای کنترل می‌شوند که در هر سطر این ماتریس تنها یک کلید در هر لحظه وصل می‌باشد. از طرفی هر کلید دارای دو وضعیت، قطع و وصل، می‌باشد. بنابراین، به‌عنوان نمونه، در مبدل‌های سه‌فاز به سه‌فاز با ۹ کلید دوطرفه کنترل شونده، 2^9یا۵۱۲ حالت کلیدزنی برای ماتریس کلیدها تعریف می‌گردد. ولی با توجه به تغذیه مبدل‌ها توسط منابع ولتاژ و دارا بودن خاصیت سلفی اغلب بارهای مصرفی، برای عملکرد سالم مبدل‌های ماتریسی باید دو قاعده زیر رعایت گردد. این دو قاعده محدودیت‌های کنترلی را به مبدل اعمال می-نمایند[۱۰]:

الف) برای جلوگیری از اتصال کوتاه در سمت منبع ولتاژ، نباید دو خط ورودی به یک خط خروجی مشابه وصل گردد؛

ب)برای جلوگیری از اضافه ولتاژ در خروجی، به‌علت خاصیت سلفی بار، نباید خطوط خروجی باز شوند(بروز اضافه ولتاژ).

[1] Regeneration