بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
گروه قدرت

پایان‌نامه
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی برق- قدرت

عنوان

ارائه‌ی روش کنترلی برای مبدل تک‌فاز به سه‌فاز بدون خازن لینک dc

استاد راهنما
دکتر ابراهیم بابائی

استاد مشاور
دکتر سید حسین حسینی

پژوهشگر
فرناز حاجبانی

بهمن ۱۳۹۰

نام خانوادگی: حاجبانی **نام:** فرناز

عنوان پایان نامه: ارائه‌ی روش کنترلی برای مبدل تک‌فاز به سه‌فاز بدون خازن لینک dc

استاد راهنما : دکتر ابراهیم بابائی

استاد مشاور: دکتر سید حسین حسینی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی برق قدرت **گرایش:** ماشین‌های الکتریکی و درایو **دانشگاه:** تبریز

دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر **تاریخ فارغ التحصیلی :** ۱۳۹۰/۱۱/۹ **تعداد صفحه:**۹۵

کلید واژه‌ها: مبدل تکفاز به سه فاز، خازن لینک **dc**، ضریب توان

چکیده

مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز برای درایو موتورهای القایی و تغذیه‌ی بارهایی که به منبع تک‌فاز دسترسی دارند به‌کار می‌رود. ساختارهای کلاسیک مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز شامل دو قسمت اینورتری و یکسوکننده با لینک dc هستند. خازنی که در لینک dc بکار می‌رود باعث افزایش حجم و وزن سیستم شده و از طرفی طول عمر کل سیستم را کاهش می‌دهد. اخیراً تلاش گسترده‌ای برای جایگزینی مبدل‌های کلاسیک دو مرحله‌ای با مبدل‌های ماتریسی صورت گرفته است. اما در زمینه‌ی مبدل‌های ماتریسی تک‌فاز به سه‌فاز، ساختارها و روش‌های کنترلی که تاکنون مطرح شده‌اند قادر نیستند جریان سینوسی متعادل تولید کنند و جریانی که در خروجی این مبدل‌ها تولید می‌شود از وجود هارمونیک‌های مرتبه‌ی پائین که حتی با استفاده از فیلترهای بزرگ قابل حذف نیستند، رنج می‌برد.

در این پایان نامه دو روش کنترلی بر اساس روش‌های کنترلی کلاسیک برای کنترل مبدل ماتریسی تک‌فاز به سه‌فاز مطرح شده است. اولین روش مورد استفاده روش مدولاسیون پهنای پالس سینوسی است. در روش کنترلی پیشنهادی بر این اساس موج‌های مرجع به نحوی تغییر داده می‌شوند که هارمونیک‌های موجود در شکل موج ولتاژ هارمونیک‌های مرتبه‌ی بالاتر باشند تا بتوان با استفاده از خاصیت اهمی-سلفی بار این هارمونیک را از شکل موج جریان حذف کرد. بر این اساس دو روش کنترلی با دو موج مرجع متفاوت تعریف شده‌اند. با استفاده از روش اول مبدل ماتریسی قادر خواهد بود به ازای فرکانس خروجی برابر با فرکانس منبع تغذیه، جریان سینوسی متعادل تولید کند. در دومین روش بر اساس مدولاسیون پهنای پالس سینوسی مبدل ماتریسی قادر خواهد بود به ازای فرکانس‌های متغیر تا فرکانس ورودی، در خروجی جریان سینوسی متعادل تولید کند. دومین روش کنترلی مورد استفاده روش کنترل باند هیسترزیس است. این روش مبدل ماتریسی را قادر می‌سازد در خروجی جریان‌های با فرکانس‌های متغیر و بدون محدودیت در مقدار فرکانس، تولید کند. در نتیجه این روش مبدل ماتریسی را قادر خواهد ساخت هم برای درایو موتور القایی و هم برای تغذیه‌ی بارهایی که منبع تک‌فاز دسترسی دارند به کار رود.

فهرست مطالب

فصل اول – بررسی منابع

۱-۱- مقدمه ۱
۱-۲- ضرورت مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز ۲
۱-۳- کاربرد مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز ۲
۱-۴- انواع مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز ۳
۱-۴-۱- مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز غیر مستقیم با لینک dc ۳
۱-۴-۱-۱- مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز برای تغذیه‌ی موتورهای القایی سه‌فاز ۳
۱-۴-۱-۱-۱- مبدل‌های تک‌فاز به تک‌فاز ac/dc/ac برای تغذیه‌ی موتورهای القایی سه‌فاز..... ۷
۱-۴-۱-۱-۲- معایب مبدل‌های تک‌فاز به تک‌فاز برای تغذیه موتورهای القایی سه‌فاز ۱۰
۱-۴-۱-۲- مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز غرمستقیم برای تغذیه‌ی بارهای خانگی ۱۱
۱-۴-۱-۲-۱- مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز استاتیکی برای تغذیه‌ی بارهای خانگی ۱۱
۱-۴-۱-۲-۲- مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز بر پایه‌ی فیلترهای اکتیو برای تغذیه‌ی بارهای خانگی... ۱۲
۱-۴-۲- مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز مستقیم بدون لینک dc ۱۴
۱-۴-۲-۱- سیکلوکانورترها ۱۴
۱-۴-۲-۱-۱- مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز بر اساس سیکلوکانورتر ۱۴
۱-۴-۲-۲- مبدل‌های ماتریسی ۱۷
۱-۴-۲-۲-۱- مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز بر اساس مبدل ماتریسی ۱۹
۱-۵- نتیجه‌گیری ۲۳

فصل دوم – مواد و روش‌ها

۲-۱- مقدمه ۲۶
۲-۲- مدولاسیون پهنای پالس (PWM) ۲۷
۲-۲-۱- مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM) ۲۷
۲-۲-۲- مدولاسیون پهنای پالس سینوسی بهبودیافته ۲۸
۲-۲-۳- مدولاسیون ذوزنقه‌ای ۲۹
۲-۳- کنترل مبدل‌های ac به ac با استفاده از مدولاسیون PWM ۲۹
۲-۳-۱- کنترل مستقیم مبدل‌های ac به ac با استفاده از مدولاسیون SPWM ۳۰
۲-۳-۱-۱ کنترل مبدل ماتریسی n ورودی و m خروجی با استفاده از مدولاسیون SPWM ۳۰

۲-۳-۱-۲- کنترل مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با استفاده از مدولاسیون SPWM ۳۴
۲-۴- کنترل مبدل ماتریسی تک‌فاز به سه‌فاز بر اساس روش مدولاسیون پهنای پالس سینوسی پیشنهادی . ۳۶
۲-۴-۱- کنترل مبدل ماتریسی تک‌فاز به سه‌فاز بر اساس روش مدولاسیون پهنای پالس سینوسی پیشنهادی به ازای فرکانس خروجی ثابت ۳۷
۲-۴-۲- کنترل مبدل ماتریسی تک‌فاز به سه‌فاز بر اساس روش مدولاسیون پهنای پالس سینوسی پیشنهادی به ازای فرکانس خروجی متغیر ۳۹
۲-۵- کنترل باند هیسترزیس ۴۰
۲-۵-۱- کنترل مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با استفاده از روش هیسترزیس ۴۲
۲-۶- نتیجه‌گیری ۴۴

فصل سوم - نتایج شبیه‌سازی

۳-۱- مقدمه ۴۷
۳-۲- نتایج شبیه‌سازی مدولاسیون پهنای پالس سینوسی ۴۸
۳-۳- نتایج شبیه‌سازی مدولاسیون پهنای پالس سینوسی بهبود یافته (MSPWM) ۵۲
۳-۴- نتایج شبیه‌سازی مدولاسیون پهنای پالس ذوزنقه‌ای ۵۵
۳-۵- نتایج شبیه‌سازی مدولاسیون پهنای پالس سینوسی پیشنهادی به ازای فرکانس خروجی ثابت ۵۸
۳-۶- نتایج شبیه‌سازی مدولاسیون پهنای پالس سینوسی بهبود یافته (ISPWM) ۶۳
۳-۷- نتایج شبیه‌سازی مدولاسیون پهنای پالس سینوسی پیشنهادی به ازای فرکانس خروجی متغیر ۷۰
۳-۸- نتایج شبیه‌سازی کنترل باند هیسترزیس ۷۷

فصل چهارم – نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۳-۹- نتیجه‌گیری ۹۱
۳-۱۰- پیشنهادات ۹۳

مراجع ۹۴

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱- ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز کلاسیک ۳
شکل ۱-۲- مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با یکسوکننده‌ی دیودی برای درایو سیستم تهویه‌ی مطبوع..... ۴
شکل ۱-۳- مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با استفاده از یکسوکننده‌ی تمام پل PWM ۵
شکل ۱-۴- ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با یکسوکننده‌ی نیم‌پل PWM ۵
شکل ۱-۵- مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با استفاده از یکسوکننده‌ی نیم پل PWM با سنسور حالت ۶
شکل ۱-۶- ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با یکسوکننده‌ی نیم پل برای درایو سیستم تهویه‌ی مطبوع ۶
شکل ۱-۷- ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با یکسوکننده‌ی نیم پل برای درایو SWDC ۷
شکل ۱-۸- اولین ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز بر اساس تغذیه‌ی مستقیم بار توسط منبع ورودی..... ۸
شکل ۱-۹- دومین ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز بر اساس تغذیه‌ی مستقیم بار توسط منبع ورودی ۸
شکل ۱-۱۰- سومین ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز بر اساس تغذیه‌ی مستقیم بار توسط منبع ورودی..... ۹
شکل ۱-۱۱- چهارمین ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز بر اساس تغذیه‌ی مستقیم بار توسط منبع ورودی ۱۰
شکل ۱-۱۲- استفاده از مبدل استاتیکی برای تغذیه‌ی بارهای سه‌فاز ۱۲
شکل ۱-۱۳- تغذیه‌ی بارهای سه‌فاز از منبع تکفاز با استفاده از APLC موازی با منبع ورودی ۱۳
شکل ۱-۱۴- تغذیه‌ی بارهای سه‌فاز از منبع تک‌فاز با استفاده از APLC سری با منبع ورودی ۱۳
شکل ۱-۱۵- سیکلوکانورتر تک‌فاز به سه‌فاز با ترانسفورماتور سر وسط ۱۵
شکل ۱-۱۶- سیکلوکانورتر تک‌فاز به سه‌فاز کنترل شونده با روش انتگرال دوگانه ۱۵
شکل ۱-۱۷- ساختار هیبرید سیکلوکانورتر و اینورتر برای تبدیل تک‌فاز به سه‌فاز ۱۶
شکل ۱-۱۸- ساختار سیکلوکانورتر کنترل شونده با روش فرکانس متغیر گسسته ۱۶
شکل ۱-۱۹- سیکلوکانورتر تک‌فاز به سه‌فاز با خازن متعادل‌کننده ۱۷
شکل ۱-۲۰- ساختار عمومی مبدل‌های ماتریسی ۱۸
شکل ۱-۲۱- مبدل ماتریسی تک‌فاز به سه‌فاز ارائه شده توسط محمد.ه. رشید ۱۹
شکل ۱-۲۲- ساختار مبدل ماتریسی تک‌فاز به سه‌فاز متداول ۲۰
شکل ۱-۲۳- مبدل ماتریسی تک‌فاز به سه‌فاز با سلف ac برای جذب ریپل توان لجظه‌ای ورودی ۲۰
شکل ۱-۲۴- مبدل ماتریسی تک‌فاز به سه‌فاز با خازن جبران‌کننده ریپل توان لحظه‌ای ورودی ۲۱
شکل ۱-۲۵- مبدل ماتریسی تک‌فاز به سه‌فاز با فیلتر ac در ورودی و خازن برای جذب ریپل توان ورودی.... ۲۱
شکل ۱-۲۶- مبدل ماتریسی تک‌فاز به سه‌فاز به روش Seprate and Link ۲۲
شکل ۱-۲۷- ساختار مبدل ماتریسی تک‌فاز به سه‌فاز با روش ISPWM ۲۳
شکل ۲-۱- مدولاسیون پهنای پالس سینوسی ۲۸

شکل ۲-۲- مدولاسیون پهنای پالس سینوسی بهبودیافته ۲۸
شکل ۲-۳- مدولاسیون ذوزنقه‌ای..... ۲۹
شکل ۲-۴- ساختار مبدل ماتریسی با n ورودی و m خروجی ۳۰
شکل ۲-۵- مبدل ماتریسی تکفاز به سه‌فاز ۳۴
شکل ۲-۶- ساختار مبدل ماتریسی تک‌فاز به سه‌فاز با استفاده از روش کنترلی پیشنهادی ۳۸
شکل ۲-۷- ساختار اینورتر کنترل شونده با روش هیسترزیس ۴۱
شکل ۲-۸- پالس‌های کلیدزنی به روش هیسترزیس ۴۲
شکل ۲-۹- ساختار مبدل ماتریسی کنترل شونده با روش باند هیسترزیس ۴۳
شکل ۲-۱۰- پالس‌های کلیدزنی مبدل ماتریسی تک‌فاز به سه‌فاز با روش هیسترزیس ۴۴
شکل ۳-۱- شکل موج ولتاژ و جریان مبدل ماتریسی تک‌فاز به سه‌فاز با روش SPWM ۴۹
شکل ۳-۲- طیف هارمونیکی ولتاژ خروجی با روش SPWM ۵۰
شکل ۳-۳- طیف هارمونیکی جریان خروجی با روش SPWM ۵۰
شکل ۳-۴- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با استفاده از روش MSPWM ۵۳
شکل ۳-۵- طیف هارمونیکی ولتاژ خروجی با روش MSPWM ۵۳
شکل ۳-۶- طیف هارمونیکی جریان خروجی با روش MSPWM ۵۴
شکل ۳-۷- شکل موج ولتاژ جریان مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با روش مدولاسیون ذوزنقه‌ای ۵۶
شکل ۳-۸- طیف هارمونیکی ولتاژ خروجی با روش مدولاسیون ذوزنقه‌ای..... ۵۶
شکل ۳-۹- طیف هارمونیکی جریان خروجی با روش مدولاسیون ذوزنقه‌ای..... ۵۷
شکل ۳-۱۰- شکل موج‌های مرجع با استفاده از روش SPWM پیشنهادی به ازای فرکانس ثابت ۵۹
شکل۳-۱۱- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با استفاده از روش SPWM پیشنهادی به ازای فرکانس ثابت .. ۶۰
شکل ۳-۱۲- طیف هارمونیکی ولتاژ خروجی با روش SPWM پیشنهادی ۶۱
شکل ۳-۱۳- طیف هارمونیکی جریان خروجی با روش SPWM پیشنهادی ۶۱
شکل ۳-۱۴- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با استفاده از روش ISPWM به ازای فرکانس ۵ هرتز ۶۴
شکل ۳-۱۵- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با استفاده از روش ISPWM به ازای فرکانس ۲۵ هرتز ۶۵
شکل ۳-۱۶- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با استفاده از روش ISPWM به ازای فرکانس ۳۵ هرتز ۶۶
شکل ۳-۱۷- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با استفاده از روش ISPWM به ازای فرکانس ۵۰ هرتز ۶۷
شکل ۳-۱۸- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با روش SPWM پیشنهادی به ازای فرکانس ۵ هرتز ۷۱
شکل ۳-۱۹- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با روش SPWM پیشنهادی به ازای فرکانس ۲۵ هرتز ۷۲
شکل ۳-۲۰- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با روش SPWM پیشنهادی به ازای فرکانس ۳۵ هرتز ۷۳
شکل ۳-۲۱- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با روش SPWM پیشنهادی به ازای فرکانس ۵۰ هرتز ۷۴

شکل ۳- ۲۲- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با روش باند هیسترزیس به ازای فرکانس ۵ هرتز ۷۸
شکل ۳- ۲۳- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با روش باند هیسترزیس به ازای فرکانس ۲۵ هرتز..... ۷۹
شکل ۳- ۲۴- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با روش باند هیسترزیس به ازای فرکانس ۳۵ هرتز ۸۰
شکل ۳- ۲۵- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با روش باند هیسترزیس به ازای فرکانس ۵۰ هرتز ۸۱
شکل ۳- ۲۶- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با روش باند هیسترزیس به ازای فرکانس ۶۰ هرتز..... ۸۲
شکل ۳- ۲۷- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با روش باند هیسترزیس به ازای فرکانس ۱۰۰ هرتز ۸۳
شکل ۳- ۲۸- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با روش باند هیسترزیس به ازای فرکانس ۱۵۰ هرتز ۸۴
شکل ۳- ۲۹- شکل موج ولتاژ و جریان خروجی با روش باند هیسترزیس به ازای فرکانس ۲۰۰ هرتز ۸۵

فهرست جداول

جدول ۲-۱- نحوه‌ی کنترل کلیدها در روش کنترل باند هیسترزیس ۴۳
جدول ۳-۱- مشخصات مقادیر شبیه‌سازی مدولاسیون پهنای پالس سینوسی ۴۸
جدول ۳-۲- دامنه‌ی طیف هارمونیکی جریان خروجی مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با استفاده از روش SPWM ۵۱
جدول ۳-۳- ضرایب ولتاژ و بازده مبدل در روش SPWM ۵۱
جدول ۳-۳- دامنه‌ی طیف هارمونیکی جریان خروجی مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با استفاده از روش MSPWM .. ۵۴
جدول ۳-۵- ضرایب ولتاژ و بازده مبدل در روش MSPWM ۵۴
جدول ۳-۶- دامنه‌ی طیف هارمونیکی جریان خروجی مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با استفاده از روش ذوزنقه‌ای .. ۵۷
جدول ۳-۷- ضرایب ولتاژ و بازده مبدل در روش ذوزنقه‌ای ۵۸
جدول ۳-۸- دامنه‌ی طیف هارمونیکی جریان با استفاده از روش مدولاسیون پیشنهادی بر حسب درصد.....۶۲
جدول ۳-۹-THD جریان روش‌های مختلف مدولاسیون پهنای پالس سینوسی به ازای فرکانس ثابت. ۶۲
جدول ۳-۱۰- مقایسه‌ی درصد کاهش THD جریان روش مدولاسیون پیشنهادی نسبت به سایر روش‌ها ۶۳
جدول ۳-۱۱- ضرایب ولتاژ و بازده مبدل در روش مدولاسیون پیشنهادی ۶۳
جدول ۳-۱۲- مشخصات مقادیر شبیه‌سازی مدولاسیون پهنای پالس سینوسی بهبودیافته ۶۸
جدول ۳-۱۳- طیف هارمونیکی جریان فاز a به روش ISPWM بر حسب درصد ۶۸
جدول ۳-۱۴- طیف هارمونیکی جریان فاز b به روش ISPWM بر حسب درصد ۶۹
جدول ۳-۱۵- طیف هارمونیکی جریان فاز c به روش ISPWM بر حسب درصد ۶۹
جدول ۳-۱۶- طیف هارمونیکی جریان فاز a به روش SPWM پیشنهادی با فرکانس‌های متغیر ۷۵
جدول ۳-۱۷- طیف هارمونیکی جریان فاز b به روش SPWM پیشنهادی با فرکانس‌های مختلف ۷۶
جدول ۳-۱۸- طیف هارمونیکی جریان فاز c به روش SPWM پیشنهادی با فرکانس‌های مختلف ۷۶
جدول ۳-۱۹- مشخصات مقادیر شبیه‌سازی به روش کنترل باند هیسترزیس ۶۸
جدول ۳-۲۰- طیف هارمونیکی جریان فاز a به روش باند هیسترزیس با فرکانس‌های مختلف ۸۶
جدول ۳-۲۱- طیف هارمونیکی جریان فاز b به روش باند هیسترزیس با فرکانس‌های مختلف ۸۶
جدول ۳-۲۲- طیف هارمونیکی جریان فاز c به روش باند هیسترزیس با فرکانس‌های مختلف ۸۷
جدول ۳-۲۳- طیف هارمونیکی جریان فاز a به روش باند هیسترزیس به ازای بارهای کوچک ۸۷
جدول ۳-۲۴- طیف هارمونیکی جریان فاز b به روش باند هیسترزیس به ازای بارهای کوچک ۸۸
جدول ۳-۲۵- طیف هارمونیکی جریان فاز c به روش باند هیسترزیس به ازای بارهای کوچک ۸۹

فصل اول

بررسی منابع

۱–۱– مقدمه

در این فصل ساختارهای مختلفی که برای مبدل تک‌فاز به سه‌فاز مطرح شده‌اند، بررسی می‌شود. ساختارهای مختلفی که وجود دارند به دو دسته مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز غیرمستقیم با لینک dc و مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز مستقیم بدون لینک dc تقسیم می‌شوند. بعد از این تقسیم بندی کلی، ساختارهایی که در هرکدام از دو دسته جای می‌گیرند با توجه به موارد کاربردشان به دو دسته‌ی کاربرد خانگی و کاربرد درایو موتور تقسیم می‌شوند. در مورد مبدل‌های مستقیم بدون لینک dc با توجه به اینکه ساختارهای موجود فقط برای درایو موتورهای القایی خاصی که در رنج فرکانسی محدودی کار می‌کنند، بکار می‌روند و قابلیت تغذیه‌ی بارهای خانگی را ندارند، در این قسمت تقسیم بندی صورت نمی‌گیرد. توضیحات بیشتر در مورد ساختارهای مختلف و نحوه‌ی کنترل آن‌ها به طور کامل در زیر بخش‌های بعدی آورده شده است.

۱–۲– ضرورت مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز

موتورهای القایی سه‌فاز به طور گسترده‌ای در مصارف صنعتی به کار می‌روند. ویژگی‌های مطلوب موتورهای القایی باعث گسترش استفاده‌ی این موتورها در مصارف خانگی و صنایع سبک شده است. از آن‌جایی که منبع تغذیه‌ی مورد دسترسی صنایع سبک و بارهای خانگی منبع تغذیه‌ی تک‌فاز است، بنابراین شاید مناسب باشد در این مناطق موتورهای القایی تک‌فاز به کار رود. اما گشتاور راه‌اندازی و ضریب توان کم و به دنبال آن جریان هجومی و قیمت بالای موتورهای القایی تک‌فاز نسبت به نوع سه‌فازشان موجب گردیده است در این مناطق از موتورهای القایی سه‌فاز استفاده شود [۱]. برای درایو موتور القایی سه‌فاز از طریق یک منبع تک‌فاز، نیاز به یک مبدل تک‌فاز به سه‌فاز است تا بتواند موتور القایی سه‌فاز را به صورت سه‌فاز تغذیه کند. علاوه بر صنایع سبک و مصارف خانگی، مناطقی وجود دارند که تنها به منبع تغذیه‌ی تک‌فاز دسترسی دارند. در این مناطق منبع تک‌فاز بارهای خانگی و صنعتی و کشاورزی را تغذیه می‌کند. در مورد بارهای خانگی چون همه‌ی بارها از یک فاز تغذیه می‌شوند، رفته رفته در طول خط دامنه‌ی ولتاژ کاهش می‌یابد و مشترکینی که در انتهای خط قرار دارند همواره با کاهش دامنه‌ی ولتاژ روبرو می‌شوند. علاوه بر آن، ولتاژی که در اختیار مشترکین قرار می‌گیرد دارای فرکانس اصلی شبکه نیست و همواره مقداری کمتر و یا بیشتر از فرکانس اصلی شبکه را داراست. استفاده‌ی روز افزون از ادوات الکتریکی و الکترونیکی که همگی بارهای غیرخطی هستند، باعث تزریق هارمونیک‌های اضافی به شبکه شده و موجبات تشدید هرچه بیشتر مشکلات مطرح شده و نارضایتی مشترکین را فراهم می‌آورد [۲]. در این میان تنها راه حل برای تغذیه‌ی بارها، استفاده از مبدل تک‌فاز به سه‌فاز است تا مشترکین با کاهش دامنه‌ی ولتاژ و تغییرات فرکانس روبرو نشوند. بارهای صنعتی و کشاورزی عمدتاً شامل ابزارهایی هستند که همگی با استفاده از موتورهای القایی کارمی‌کنند. با توجه به مشکلات مطرح شده در مورد موتورهای القایی تک‌فاز، استفاده از موتورهای القایی سه‌فاز مناسب خواهد بود که این مساله به نوبه‌ی خود بار دیگر نیاز به یک مبدل تک‌فاز به سه‌فاز را آشکار می‌سازد.

۱–۳– کاربرد مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز

با توجه به دلایل نیاز به مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز که در بخش بالا ذکر شد، در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز دارای دو کاربرد عمده هستند. اولین کاربرد شامل درایو موتورهای القایی سه‌فاز در مصارف صنعتی و مصارف خانگی است که عمدتاً نیاز به فرکانس متغیر دارند. و دومین کاربرد مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز، تغذیه‌ی بارهای تک‌فاز خانگی با فرکانس ثابت شبکه است که به جریان ورودی سینوسی و ضریب توان یک در ورودی نیاز دارند.

۱-۴- انواع مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز

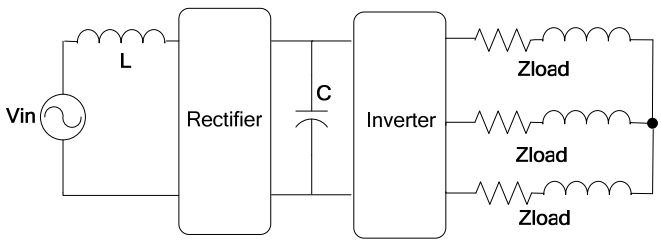
مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز به دو دسته‌ی مبدل‌های غیر مستقیم با لینک dc و مبدل‌های مستقیم بدون لینک dc تقسیم می‌شوند. در این بخش ابتدا ساختارهایی که در مورد مبدل‌های غیر مستقیم با لینک dc وجود دارند، بررسی می‌شوند سپس ساختارهایی که در مورد مبدل‌های مستقیم بدون لینک dc مطرح شده‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱-۴-۱- مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز غیر مستقیم با لینک dc

ساختارهای مختلفی بر اساس مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز غیر مستقیم با لینک dc و با تغییراتی در روش کنترلی و یا تغییراتی در ساختار مبدل معرفی شده‌اند. در این بخش سعی شده است ابتدا ساختارهایی که برای درایو موتورهای القایی سه‌فاز به‌کار می‌روند، بررسی شود سپس به بررسی ساختارهایی که برای تغذیه‌ی بارهای خانگی مطرح شده‌اند، پرداخته شود.

۱-۴-۱-۱- مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز برای تغذیه‌ی موتورهای القایی سه‌فاز

ساده‌ترین ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز غیر مستقیم با لینک dc که از یک یکسوکننده‌ی تمام پل دیودی و یک اینورتر استفاده می‌کند در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. ابتدا با استفاده از یکسوکننده، ولتاژ ac به ولتاژ dc تبدیل شده و سپس با استفاده از یک اینورتر، ولتاژ dc ورودی، به خروجی سه‌فاز متعادل تبدیل می‌گردد. با توجه به اینکه ورودی یکسوکننده منبع تک‌فاز می‌باشد توانی که منبع ورودی به لینک dc تحویل می‌دهد دارای ریپلی با فرکانس دو برابر فرکانس منبع ورودی است. در نتیجه برای دستیابی به توان ثابت در لینک dc یک خازن بزرگ در لینک dc قرار داده می‌شود تا ریپل توان را جذب کند. به دلیل وجود یکسوکننده در ساختار مبدل، جریان منبع ورودی دارای اعوجاج خواهد بود که برای رفع اعوجاج جریان ورودی از یک سلف در ورودی استفاده می‌شود. در یک جمع بندی کلی می‌توان گفت مبدل‌های ac/dc/ac تک‌فاز به سه‌فاز از یک بلوک یکسوکننده، یک بلوک اینورتری، یک سلف سری با منبع ورودی و یک خازن در لینک dc تشکیل می‌یابند [۳].

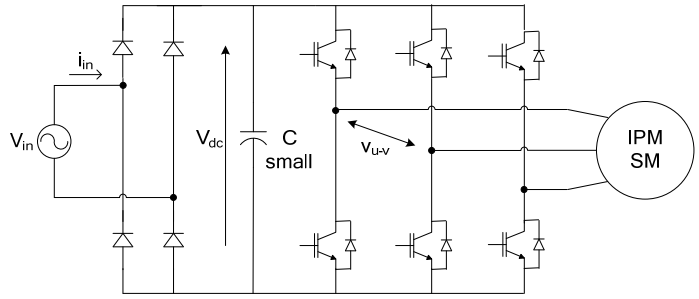


شکل ۱-۱: ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز کلاسیک

مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز غیر مستقیم با لینک dc نه تنها برای درایو موتورهایی که مصرف کشاورزی و صنعتی دارند

به‌کار می‌روند بلکه برای درایو سیستم تهویه‌ی مطبوع خانگی نیز استفاده می‌شوند. با توجه به حجم و هزینه‌ی بسیار زیاد ساختارهای تک‌فاز به سه‌فاز غیرمستقیم با لینک dc، این ساختارها نمی‌توانند برای مصارف خانگی قابل استفاده باشند. بنابراین در ساختارهایی که برای درایو سیستم تهویه‌ی مطبوع به‌کار گرفته می‌شوند سعی می‌شود تا حد امکان اندازه‌ی سلف و خازن کوچک شود تا بدین ترتیب حجم و هزینه‌ی سیستم کاهش یابد.

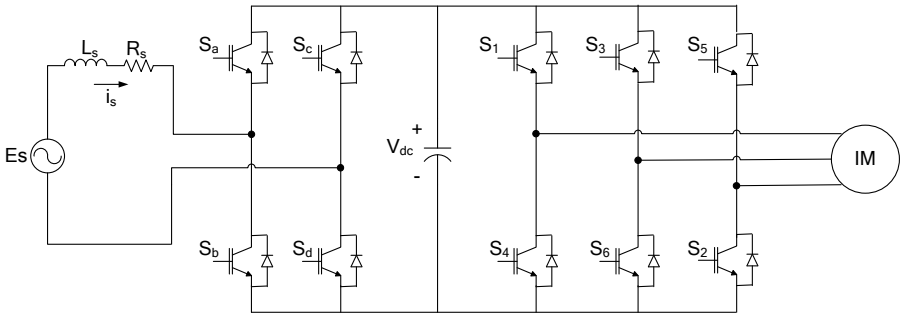
در ساختاری که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است روش کنترلی جدیدی برای مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با یکسوکننده‌ی دیودی مطرح شده است که نیاز به سلف و خازن الکترولیت بزرگ در لینک dc را حذف کرده و در عین حال جریانی سینوسی از شبکه می‌کشد. این ساختار از یکسوکننده‌ی دیودی تک‌فاز، خازن کوچک و اینورتر سه‌فاز استفاده کرده و به موتور IPMSM[1] اتصال یافته است. در روش کنترلی پیشنهادی در این ساختار از قسمتی از جریان ورودی که به محور q برده می‌شود فیدبک گرفته شده و ضریب توان نزدیک یک تحت بارهای مختلف بدست می‌آید در نتیجه جریان خروجی شامل هارمونیک زیادی در خروجی نخواهد بود. این مدار دارای مزیت‌هایی هم‌چون ضریب توان بالا، سایز کوچک، عمر زیاد و هزینه‌ی پائین برای درایو IPMSM است. در این مدار ولتاژ خروجی دارای ریپلی با فرکانس برابر با فرکانس منبع ورودی است که منجر به ریپل شدید گشتاور موتور می‌شود [۵] و [۴].



شکل ۱-۲: مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با یکسوکننده‌ی دیودی برای درایو سیستم تهویه‌ی مطبوع

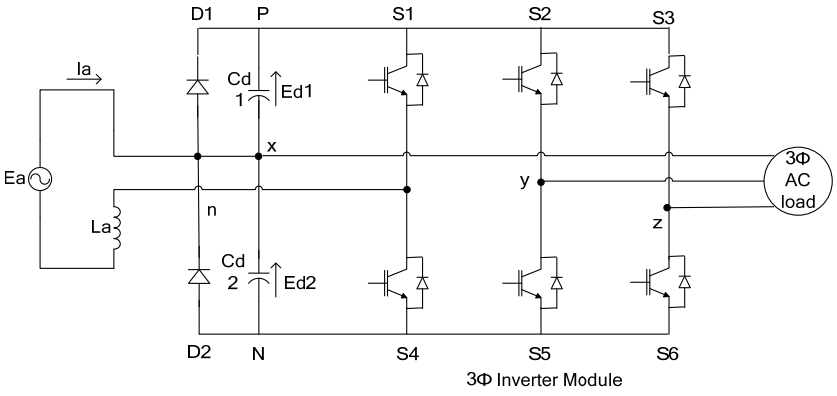
اگرچه مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز با یکسوکننده‌های تمام پل دیودی ساختار ساده و قیمت ارزانی دارند اما شدیداً از اعوجاج جریان منبع ورودی و ضریب توان کم رنج می‌برند. علاوه بر آن قابلیت شارش دو طرفه‌ی توان را ندارند. برای رفع این مشکلات ساختارهایی با تغییراتی در بلوک یکسوکننده معرفی شدند. اولین نوع از این مبدل‌ها، به‌جای یکسوکننده‌ی تمام پل دیودی از یکسوکننده‌ی تمام پل PWM استفاده کرده است. اگرچه این ساختارها دارای هزینه‌ی بسیار زیادی هستند، اما ویژگی‌هایی مانند جریان ورودی سینوسی، ضریب توان نزدیک یک، ولتاژ لینک dc ثابت و قابلیت شارش دو جهته‌ی توان، استفاده از این ساختار را در مواقعی که به جریان ورودی سینوسی و خروجی فاقد هارمونیک نیاز می‌باشد، توجیح می‌کند [۶]. یک نمونه از این ساختارها در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.

1. Interior Permanent Magnet Synchronous Motor



شکل ۱-۳: مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با استفاده از یکسوکننده‌ی تمام پل PWM

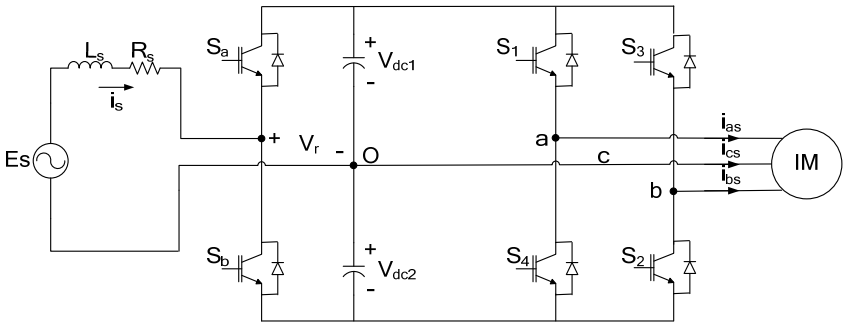
زمانی که دسترسی به جریان ورودی سینوسی و خروجی فاقد هارمونیک و از طرفی هزینه‌ی کم از اهمیت یکسانی برخوردار باشد، از مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز با یکسوکننده‌ی نیم پل PWM استفاده می‌شود. این ساختارها نسبت به ساختار یکسوکننده‌ی تمام پل PWM تعداد کلیدهای کم‌تری داشته و قابلیت تولید خروجی سه‌فاز را دارند. با این حال دارای معایبی هستند، از جمله اینکه جریان خروجی دارای اعوجاج بیشتری بوده و به ولتاژ لینک dc با دامنه‌ی دو برابر احتیاج دارند [۵]. ساختار یکی از مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز با یکسوکننده‌ی نیم پل PWM در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. در این ساختار هر دو قسمت اینورتری و یکسوکننده با استفاده از روش PWM کنترل می‌شوند. در نتیجه امکان کنترل جریان ورودی بدون از دست دادن کنترل خروجی مهیا می‌شود. در این ساختار یک پایه برای عملکرد یکسوکنندگی و دو پایه برای عملکرد اینورتری بکار می‌روند. استفاده از ادوات کلیدزنی و مدارکنترلی PWM به جای یکسوکننده‌ی دیودی باعث افزایش هزینه می‌شود اما به دلیل بهبود شکل موج جریان ورودی و ضریب توان ورودی، اندازه‌ی خازن‌های به کار رفته کاهش می‌یابد و در نتیجه هزینه‌ی کل سیستم نسبت به ساختارهای متداول کم‌تر می‌شود. از معایب این ساختار می‌توان به بالا بودن ولتاژ قابل تحمل برای ادوات و تلفات کلیدزنی اشاره کرد [۵].



شکل ۱-۴: ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با یکسوکننده‌ی نیم‌پل PWM

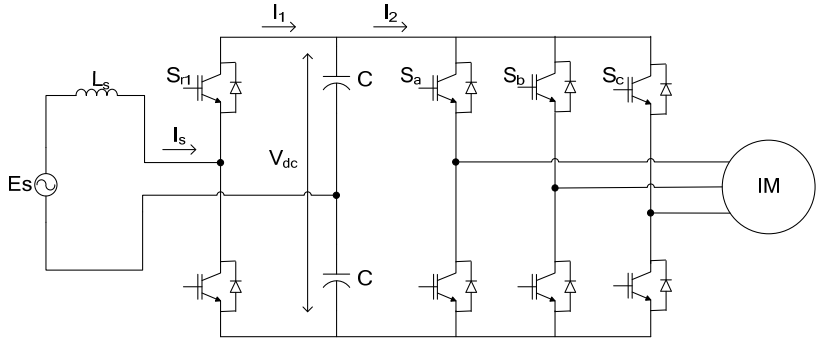
شکل ۱-۵ ساختار دیگری از مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز با یکسوکننده‌ی نیم پل PWM را نشان می‌دهد که برای درایو موتورهای القایی با توان پایین به کار می‌رود. در این ساختار از سنسور حالت استفاده می‌شود که سنسور حالت اختلاف

بین جریان سیستم و جریان مورد نظر را کنترل می‌کند و تضمین می‌کند که جریان ورودی سینوسی بوده و ضریب توان ورودی نزدیک یک باشد [۶].



شکل ۱-۵: مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با استفاده از یکسوکننده‌ی نیم پل PWM با سنسور حالت

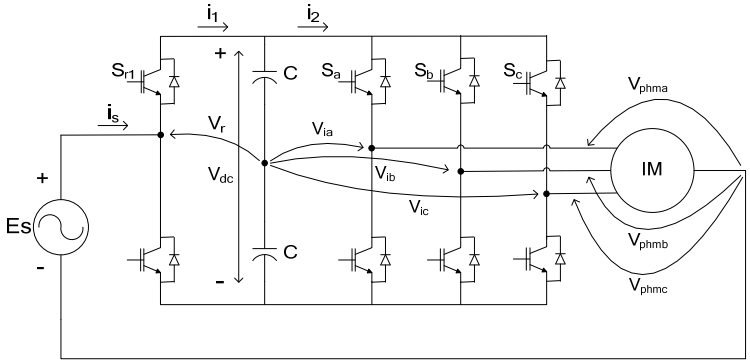
در ساختارهایی که برای درایو سیستم تهویه‌ی مطبوع استفاده می‌شوند استفاده از یکسوکننده‌ی تمام پل PWM به جای یکسوکننده‌ی تمام پل دیودی منجر به افزایش شدید هزینه‌ی تمام شده می‌شود. برای کاهش قیمت ساختارهای تمام‌پل ساختارهای نیم‌پل PWM استفاده می‌شود که در آن یک پایه‌ی ورودی به محل اتصال دو خازن اتصال می‌یابد. در این ساختارها تعداد کلیدهای قدرت کاهش می‌یابد اما سایز خازن‌های به کار رفته به منظور جذب هارمونیک پائین جریان نسبت به ساختارهایی که از یکسوکننده‌ی تمام پل PWM استفاده می‌کنند، افزایش می‌یابد. شکل ۱-۶ ساختار این مبدل را نشان می‌دهد [۱].



شکل ۱-۶: ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با یکسوکننده‌ی نیم پل برای درایو سیستم تهویه‌ی مطبوع

نوع دیگری از مبدل‌های تک‌فاز به سه‌فاز با یکسو کننده‌ی نیم پل PWM مطرح شده است که برای درایو موتورهای القایی با سیم‌پیچی درونی Y به کار می‌رود. در این موتورها منبع تغذیه می‌تواند به صورت مستقیم به مرکز موتور وصل شود. با این کار سلفی که برای فیلتر کردن به کار می‌رود حذف خواهد شد چرا که فیلترکردن توسط اندوکتانس موتور القایی انجام می‌پذیرد. با این روش هم تعداد پایه‌ها نسبت به ساختارهای متداول کاهش می‌یابد و هم از سلفی که در

ورودی استفاده می‌شود، صرف نظر می‌گردد. در نتیجه قیمت کل ساختار کاهش می‌یابد و به راحتی می‌تواند در درایو سیستم تهویه‌ی مطبوع استفاده شود. این ساختارها با نام SWDC[1] شناخته می‌شوند. ساختار این مبدل در شکل ۱–۷ نشان داده شده است [۱].



شکل ۱–۷: ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز با یکسوکننده‌ی نیم پل برای درایو SWDC

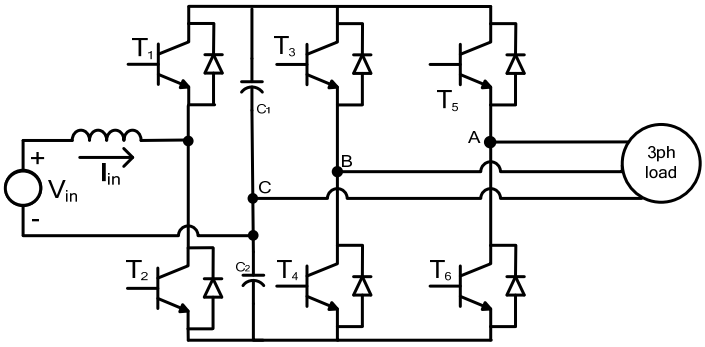
۱–۴–۱–۱–۱– مبدل‌های تک‌فاز به تک‌فاز ac/dc/ac برای تغذیه‌ی موتورهای القایی سه‌فاز

در ساختارهایی که تا به اینجا معرفی شدند ولتاژ ورودی مستقیماً در تغذیه‌ی بارها نقشی ندارد بلکه ولتاژ ورودی یکسو شده و به ولتاژ dc تبدیل می‌شود سپس ولتاژ dc توسط اینورتر به ولتاژ سه‌فاز تبدیل شده و بار مستقیماً از طریق اینورتر تغذیه می‌شود. ساختارهای مختلف دیگری برای تولید خروجی سه‌فاز از یک منبع تک‌فاز معرفی شده‌اند که در آن‌ها منبع ولتاژ ورودی به عنوان یک منبع ولتاژ برای بار عمل کرده و مستقیماً بار را تغذیه می‌کند. در این حالت دیگر نیازی به اینورتر سه‌فاز نبوده و یک اینورتر تک‌فاز برای تولید ولتاژ تک‌فاز کافی خواهد بود.

در اولین ساختار بر این اساس با استفاده از یکسوکننده‌ی نیم‌پل ولتاژ ورودی یکسوشده و ولتاژ یکسوشده توسط اینورتر تک‌فاز به خروجی متناوب تبدیل می‌شود. در این ساختار دو فاز موتور القایی سه‌فاز توسط منبع ورودی و یک‌فاز آن توسط اینورتر تغذیه می‌شود. در این حالت مجموعه‌ی منبع ورودی و اینورتر تک‌فاز همانند مثلث باز تنها با استفاده از دو منبع، موتور القایی سه‌فاز را تغذیه می‌کنند. در این ساختار که در شکل ۱–۸ نشان داده شده است کلیدهای اینورتر به نحوی کنترل می‌شوند تا خروجی اینورتر تک‌فاز که ولتاژ خط bc را تشکیل می‌دهد با ولتاژ منبع ورودی ۶۰ درجه اختلاف فاز داشته باشد. ولتاژ خروجی توسط اینورتر می‌تواند نسبت به ورودی پیش‌فاز[2] و یا پس‌فاز[3] باشد. در حالت پیش‌فاز قسمت عمده‌ی توان اکتیو بار از طرف اینورتر و قسمت اعظم توان راکتیو بار از طرف منبع تامین می‌شود. ولی در حالت پس‌فاز قسمت عمده‌ی توان اکتیو بار از طرف منبع و بیشتر توان راکتیو بار از طرف اینورتر تامین می‌شود در نتیجه بازده و ضریب توان خروجی افزایش می‌یابد. به همین دلیل حالت پس‌فاز بیشتر مورد توجه واقع می‌شود [۷]. در

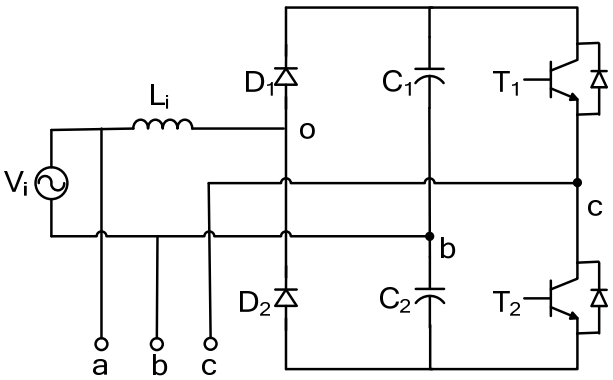
1. Source Wye Direct Connection
2. Lead
3. Lag

این ساختار مبدل قادر است همراه با اینورتر تک‌فاز، موتور القایی سه‌فاز را تغذیه کند اما جریان ورودی دارای جریان نشتی بسیار زیادی بوده و ضریب توان بسیار پائین است. از طرفی جریانی که در خروجی تولید می‌شود شامل هارمونیک از هر مرتبه‌ای است که این امر نامتعادلی جریان سه‌فاز خروجی را به همراه دارد [۹-۸].



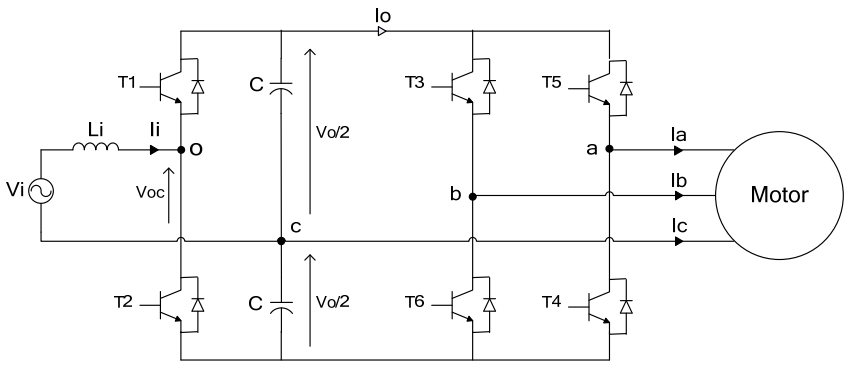
شکل ۱-۸: اولین ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز بر اساس تغذیه‌ی مستقیم بار توسط منبع ورودی

دومین ساختار بر اساس تغذیه‌ی مستقیم بار توسط منبع ولتاژ ورودی در شکل ۱-۹ نشان داده شده است این ساختار فقط از دو دیود، دو خازن و دو کلید برای تغذیه‌ی بار سه‌فاز استفاده می‌کند. این مدار کاهش یافته‌ی ساختار اول است که در اینورتر به جای چهار کلید از دو کلید و دو خازن استفاده می‌کند. کلیدها توسط مدولاسیون PWM کنترل شده و به روش حذف هارمونیک‌های دلخواه، زوایای آتش‌زنی انتخاب می‌شوند. در مقایسه‌ی این ساختار با ساختار اول می‌توان گفت با توجه به اینکه این مدار از ادوات کمتری استفاده می‌کند هزینه‌ی تمام‌شده‌ی این مدار نسبت به ساختار اول کمتر خواهد بود. اما مشابه ساختار اول جریان ورودی دارای شکل موج مناسبی نبوده و ضریب توان ورودی نیز یک نیست. علاوه بر آن در این ساختار ولتاژی که هرکدام از کلیدها تحمل می‌کنند دو برابر ولتاژ پیک منبع است و باید کلیدهایی با قدرت تحمل بالاتر که دارای قیمت بالاتری هستند به کار گرفته شود [۱۰].



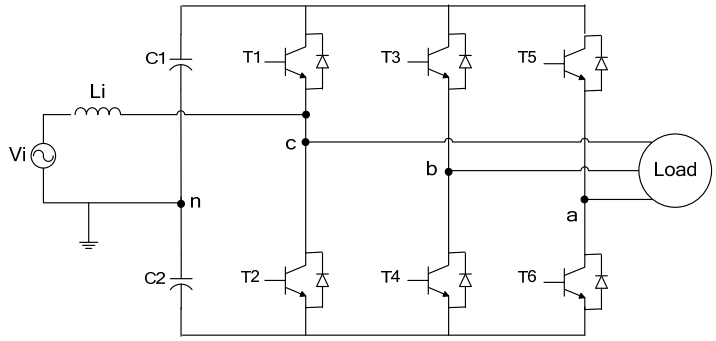
شکل ۱-۹: دومین ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز بر اساس تغذیه‌ی مستقیم بار توسط منبع ورودی

سومین ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز بر اساس تغذیه‌ی مستقیم بار توسط منبع ورودی در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است. در این ساختار دیودهای یکسوکننده حذف شده و به جای آنها دو خازن و دو کلید استفاده شده است. درنتیجه می‌توان به شارش دو جهته‌ی توان بین لینک dc و منبع ac دست یافت و اعوجاجات ولتاژ را تنظیم نمود. این ساختار از شش کلید برای تولید خروجی سه‌فاز متعادل استفاده می‌کند که می‌تواند برای درایو موتور به کار رود. در این ساختار، یکی از فازهای خروجی از سمت منفی منبع گرفته می‌شود و فاز دوم و سوم توسط اینورتر که با روش مدولاسیون PWM نامتقارن کنترل می‌شود، تولید می‌گردد. زمین منبع تغذیه به محل اتصال خازن‌ها وصل شده و کنترل دامنه‌ی ولتاژ سه فاز خروجی، با کنترل لینک dc انجام می‌پذیرد [۸]، [۱۱] و [۲]. این مدار در مقایسه با مدارهای قبلی دارای مزیت‌هایی می‌باشد از جمله اینکه جریان ورودی بهبود یافته، ضریب توان ورودی نزدیک به یک بوده و فرکانس خروجی قابل تغییر است. همچنین ولتاژ خروجی این ساختار نسبت به ساختارهای قبلی دارای کیفیت بسیار بالاتری است.



شکل ۱-۱۰: سومین ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز بر اساس تغذیه‌ی مستقیم بار توسط منبع ورودی

چهارمین ساختاری که بر اساس تغذیه‌ی مستقیم بار توسط منبع تغذیه‌ی ورودی مطرح شده است در ظاهر بسیار شبیه به ساختار سوم بوده اما اساساً بسیار متفاوت از آن است. همانطور که در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده است این ساختار یک یکسوکننده دارد که ورودی را کنترل کرده و جریان سینوسی از منبع می‌کشد. مقدار پیک فاز اول خروجی تقریباً برابر با ولتاژ لینک dc است. این به این معناست که با کنترل ولتاژ لینک dc می‌توان ولتاژ فاز اول خروجی را کنترل کرد. عیب اصلی این مدار نیاز به ولتاژ لینک dc زیاد است. به عنوان مثال اگر در خروجی به ولتاژ خط ۴۰۰ ولت نیاز باشد بایستی در لینک dc ولتاژی حدود ۱۵۰۰ ولت وجود داشته باشد. علاوه بر این، برای کاهش جریان راکتیو از سلف نسبتاً بزرگ استفاده شده است. تغییرات در جریان سلف می‌تواند باعث تغییرات در ولتاژ خازن شده و نیاز به ادوات با قدرت تحمل ولتاژ بالا را به وجود بیاورد که منجر به افزایش هزینه می‌شود. در نتیجه این مدار تنها برای درایو موتورهای کوچک مناسب خواهد بود [۱۲] و [۲].



شکل ۱-۱۱: چهارمین ساختار مبدل تک‌فاز به سه‌فاز بر اساس تغذیه‌ی مستقیم بار توسط منبع ورودی

۱-۴-۱-۱-۲- معایب مبدل‌های تک‌فاز به تک‌فاز برای تغذیه‌ی موتورهای القایی سه‌فاز

در ساختارهایی که بحث شد، یک سمت بار توسط منبع ولتاژ ورودی تغذیه می‌شود که فاقد هارمونیک است و طرف دیگر توسط اینورتر تغذیه می‌گردد که ذاتاً دارای هارمونیک می‌باشد. بنابراین در بارهایی که به خروجی اتصال یافته‌اند، یک فاز فاقد هارمونیک بوده و یک فاز دارای هارمونیک است. بنابراین فاز سوم نیز طبق روابط زیر دارای هارمونیک خواهد بود [۸]، [۱۱] و [۱۳].

با فرض اینکه $V_{ab}=V_s$ بوده و V_{bc} توسط اینورتر تولید می‌شود، مقدار موثر V_{bc} توسط رابطه‌ی (۱-۱) بدست می‌آید:

$$V_{bc}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}V_i} \qquad (۱-۱)$$

در رابطه‌ی (۱-۱) V_i مقدار موثر هارمونیک iام است. از روی رابطه مشخص است که ولتاژ V_{ab} دارای هارمونیک از هر مرتبه‌ای می‌باشد. طبق قانون کسینوس‌ها مقدار V_{ca} توسط رابطه‌ی (۱-۲) محاسبه می‌شود:

$$V_{ca}=\sqrt{V_{ab}^2+V_{bc}^2-V_{ab}V_{bc}\cos(\alpha)} \qquad (۱-۲)$$

در رابطه‌ی (۱-۲) α زاویه‌ی فاز بین منبع تغذیه‌ی ac و خروجی اینورتر بوده و در حالت نامی برابر با ۶۰ درجه است. معادله‌ی (۱-۲) به خوبی نشان می‌دهد که هارمونیک V_{bc} به V_{ca} منتقل شده و این فاز نیز دارای هارمونیک خواهد بود. زمانی که یک فاز فاقد هارمونیک بوده اما فازهای دیگر دارای هارمونیک باشند نامتعادلی ولتاژ پیش خواهد آمد. نامتعادلی ولتاژ باعث کاهش گشتاور خروجی و افزایش بیش از حد دمای موتور می‌شود [۱۳]. برای متعادل کردن این اثردو روش اتخاذ می‌شود:

۱- انتخاب روش کنترلی مناسب برای اینورتر به نحوی که قادر به حذف هارمونیک‌های مرتبه‌ی پایین باشد.

۲- افزایش فرکانس کلیدزنی.

اگرچه هرچقدر که فرکانس کلیدزنی بالا برده شود شکل موج خروجی بهبود می‌یابد اما بالابردن فرکانس کلیدزنی هم محدودیت‌هایی دارد چرا که فرکانس کلیدزنی بالا باعث افزایش تلفات شده و از طرفی اثر منفی روی ایزولاسیون ولتاژ دارد. بنابراین باید یک حالت بهینه بین فرکانس کلیدزنی و تلفات انتخاب شود [۱۳].

تاکنون ساختارهای زیادی مطرح شدند که بیشتر روی درایو موتورهای با قدرت پایین تمرکز داشته‌اند. این مدارات