بسم الله الرحمن الرحيم

٢٥٥٧٣

دانشگاه تربیت مدرس

۱۲۶۷۲/۲

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی ومهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی وساخت اینورترسه فاز PWM باکنترل جریان

غلامحسین وثوقی فرد

استاد راهنما

عبدالرضا نبوی

زمستان ۷۷

۲۵۵۷۳

۱۳۷۸/۴/۲۰

دانشگاه تربیت مدرس

تاییدیه هیات داوران

آقای غلامحسین وثوقی‌فرد پایان‌نامه ۶ واحدی خود را با عنوان طراحی و ساخت اینورتر سه فاز PWM با کنترل جریان در تاریخ ۷۷/۱۲/۳ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهائی این پایان‌نامه را از نظر فرم و محتوی تایید و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق با گرایش الکترونیک پیشنهاد می‌کنند. ۲۶ب ۱۲

اعضای هیات داوران	نام و نام خانوادگی	امضاء
۱ـ استاد راهنما :	آقای دکتر نبوی	
۲ـ استاد مشاور :	ـــــ	
۳ـ استادان ممتحن :	آقای دکتر کبیر	
	آقای دکتر فرهنگی	
۴ـ مدیر گروه : (یا نمایندهٔ گروه تخصصی)	آقای دکتر وحید احمدی	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان‌نامه/رساله مورد تایید است.

امضای استاد راهنما:

کلیهٔ حقوق اعم ازچاپ وتکثیر، نسخه برداری، ترجمه، اقتباس برای دانشگاه تربیت مدرس محفوظ است.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

با تشکرو قدردانی ازراهنمائیهای استادگرامیم جناب آقای دکترنبوی وباتشکرازحمایتهای مسئولین محترم کارخا نجات شهید باقری وتمامی دوستانیکه در انجام این پروژه مرا یاری کردند ازجمله جناب آقای مهندس سیاه کلاه وجناب آقای مهندس شایگان.

چکیده:

در این پایان نامه، طراحی و ساخت یک اینورتر منبع ولتاژ سه فاز PWM (400Hz , 1500W , 115V)، با کنترل جریان ارائه می‌شود.

برای اینکار، ابتدا ، پارامترهای یک اینورتر معرفی می‌شود، سپس انواع ساختارهای مدار قدرت با توجه به پارامترهای بیان شده، مورد بررسی قرار می‌گیرند و نقاط ضعف و قوت هر کدام بیان می‌شود و ضمناً با بررسی فیلتر خروجی (LC)، تأثیر هر کدام از المانهای فیلتر بر روی پارامترهای اینورتر تجزیه و تحلیل می‌شود.

با شبیه‌سازی اینورتر نشان داده می‌شود که تابع تبدیل اینورتر توسط فیلتر خروجی آن تعیین می‌شود، که با تغییرات بار، تغییرات وسیعی در مشخصه‌های تابع تبدیل آن به وجود می‌آید و این مسئله موجب مشکل شدن کنترل آن می‌گردد.

در این پایان نامه، با ایده گرفتن از فیدبک حالت، یک کنترلر که بر اساس رگوله کردن جریان خازن عمل می‌کند معرفی می‌گردد. در این کنترلر فیدبک داخلی جریان خازن موجب پایداری سیستم و محدود شدن تغییرات مشخصات تابع تبدیل شده و فیدبک ولتاژ موجب رگولاسیون ولتاژ خروجی می‌گردد. در ادامهٔ بحث یک کنترلر هیسترزیس معرفی می‌گردد که دارای بهترین پاسخ خروجی می‌باشد.

در انتهای پایان نامه، اجزای یک اینورتر عملی معرفی می‌شود و نتایج عملی ارائه می‌گردد که این نتایج، صحت بحثهای تئوری را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: اینورتر، مدولاسیون پهنای پالس، کنترل با فیدبک حالت .

« فهرست »

عنوان	صفحه
فصل اول : آشنایی کلی	۱
۱ـ۱ ـ مقدمه:	۱
۱ـ۲ ـ مروری بر انواع اینورترها	۳
فصل دوم : ساختار مدار قدرت اینورترها	۸
۲ـ۱ ـ مقدمه:	۸
۲ـ۲ ـ ساختار کلیدهای اینورتر	۸
۲ـ۳ ـ مسائل مربوط به تلفات و EMI	۱۱
۲ـ۴ـ۱ ـ اسنابرها	۱۴
۲ـ۴ـ۲ ـ اسنابرهای خاموش شدن	۱۴
۲ـ۴ـ۳ ـ اسنابر روشن شدن	۱۶
۲ـ۴ـ۴ ـ اسنابرهای مرکب و بدون تلف	۱۷
۲ـ۵ـ۱ ـ اینورترهای رزونانسی	۱۹
۲ـ۵ـ۲ ـ اینورتر با ولتاژ DC تشدیدی	۲۱
۲ـ۵ـ۳ ـ اینورتر با ولتاژ DC تشدیدی مهار شده با مدار فعال	۲۲
۲ـ۵ـ۴ ـ کنترل کلیدهای اصلی اینورترهای تشدیدی	۲۴
۲ـ۵ـ۵ ـ اینورترهای با ولتاژ DC شبه تشدیدی	۲۵
۲ـ۶ ـ نسبت ورودی، خروجی و ایزولاسیون:	۲۷
فصل سوم : مدل‌سازی اینورتر	۳۰
۳ـ۱ ـ مقدمه:	۳۰
۳ـ۲ ـ خطی‌سازی و متوسط گیری در فضای حالت	۳۱
۳ـ۳ ـ پارامترهای تعیین‌کننده مشخصه یک اینورتر	۳۵
۳ـ۳ـ۱ ـ تأثیر ولتاژ DC ورودی	۳۵
۳ـ۳ـ۲ ـ تأثیر بار خروجی	۳۷

۳ـ۳ـ۳ ـ تأثیر تغییرات سلف و خازن فیلتر خروجی ۳۷
۴ـ۳ـ۳ ـ تأثیر Dead-time در خروجی ۳۸
فصل چهارم: انتخاب ساختار مناسب و طراحی فیلتر خروجی ۴۱
۱ـ۴ ـ انتخاب مدار قدرت مناسب ۴۱
۲ـ۴ ـ انتخاب کلیدها ۴۲
۳ـ۴ ـ طراحی فیلتر خروجی ۴۳
فصل پنجم : طراحی کنترلر اینورتر ۴۷
۱ـ۵ ـ مقدمه ۴۷
۲ـ۵ ـ مشخصهٔ بار غیر خطی ۴۷
۳ـ۵ ـ مشخصهٔ حلقه باز اینورتر ۴۹
۴ـ۵ کنترل با استفاده از فیدبک از موثر ولتاژ خروجی ۵۴
۵ـ۵ ـ فیدبک ولتاژ ۵۵
۶ـ۵ ـ کنترلر جریان سلف ۵۸
۷ـ۵ ـ کنترلر جریان خازن ۶۲
۸ـ۵ ـ کنترلر هیسترزیس ۶۷
فصل ششم : نتایج عملی ۶۹
۱ـ۶ ـ اجزای یک اینورتر عملی ۶۹
۲ـ۶ ـ پاسخ سیستم به ورودی سینوسی ۷۳
۳ـ۶ ـ پیداکردن مشخصه‌های سیستم ۷۵
۴ـ۶ ـ کنترلر جریان خازن ۷۵
۵ـ۶ ـ کنترلر هیسترزیس ۷۵
فصل هفتم : نتیجه گیری و پیشنهادات ۸۰
فهرست مراجع ۸۲

فصل اول : آشنایی کلی

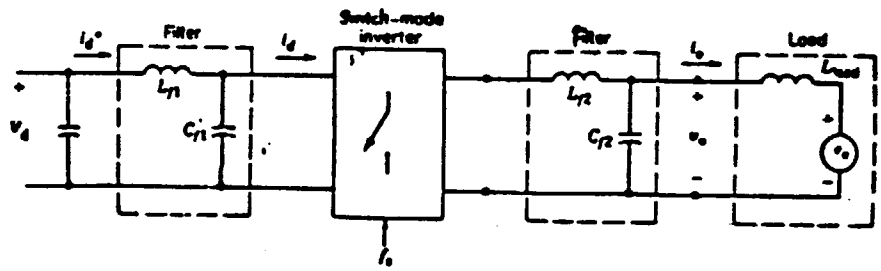
۱ـ۱ ـ مقدمه:

اینورترها، مبدلهایی هستند که ولتاژ DC را به ولتاژ AC تبدیل می‌کنند[1]، ولتاژ AC خروجی می‌تواند با یک فرکانس ثابت یا متغیر دارای دامنهٔ ثابت یا متغیر باشد.

اینورترها، دارای کاربردهای وسیعی در منابع تغذیهٔ بدون وقفه (UPS)، فیلترهای اکتیو، کوره‌های القایی، محرکه‌های الکتریکی و جاهایی که دسترسی مستقیم به برق شهر نیست (هواپیما، موشک و...) می‌باشند.

در بسیاری از کاربردهای دقیق و حساس، لازم است که اینورتر دارای پارامترهای مطلوب و در حد ایده‌آل باشد. در این پایان نامه، ابتدا، پارامترهای یک اینورتر تعریف می‌شوند و سپس روشهای رسیدن به این پارامترها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند.

شکل (۱ـ۱) ساختار مدار قدرت یک اینورتر را نشان می‌دهد. ورودی یک منبع DC است که می‌تواند یکسو شدهٔ برق شهر، باطری و یا سلول نوری باشد. ورودی DC پس از فیلتر شدن به قسمت کلید زنی اعمال می‌شود. کلیدها با توجه به توان خروجی و فرکانس کلیدزنی می‌توانند BJT، POWER MOSFET، IGBT و... باشند.



شکل (۱-۱): ساختار مدار قدرت یک اینورتر[3]

خروجی قسمت کلیدزنی یک ولتاژ مربعی می‌باشد که بعد از فیلتر شدن به ولتاژ سینوسی تبدیل می‌شود. فرکانس و دامنهٔ خروجی توسط قسمت کلیدزنی کنترل می‌شود، که این عمل معمولاً توسط مدولاسیون PWM[1] انجام می‌شود.

یک اینورتر به طور کلی شامل دو قسمت قدرت و کنترل می‌باشد. وظیفهٔ قسمت قدرت انتقال توان و تبدیل آن از حالت DC به AC می‌باشد و شامل کلیدها ولتاژ DC ورودی و فیلترها می‌باشد. قسمت کنترل، شامل فیدبک‌ها، ولتاژ مرجع و مدار مدولاسیون می‌باشد و کلیدها را طوری کنترل می‌کند که ولتاژ خروجی بر ولتاژ مرجع ورودی منطبق شود.

برای طراحی و ساخت یک اینورتر، لازم است که ابتدا پارامترهای آن تعریف شده و روشهای به کنترل در آوردن آنها مشخص شوند. پارامترهای یک اینورتر عبارتند از [2]:

۱ ـ THD[2]: معیار تشابه شکل موج خروجی و مؤلفهٔ اصلی آن می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$THD = \frac{1}{V_1}\left[\sum_{n=2,3}^{\infty} V_n^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

V_n:هارمونیک nام خروجی

برای کاهش THD لازم است که شکل موج خروجی در تمام شرایط قابلیت انطباق بر شکل موج مرجع را داشته باشد. این عمل توسط قسمت کنترل انجام می‌شود.

۲ ـ رگولاسیون و قابلیت پاسخ‌دهی به انواع بارها: اینورتر باید تحت انواع بار و تغییرات آن دارای ولتاژ سینوسی با دامنهٔ ثابت باشد. برای اینکار باید امپدانس خروجی اینورتر کاهش داده شود که این عمل توسط قسمت قدرت و کنترل انجام می‌شود.

1- Pulse Width Modulation.

2- Time Harmonic Distortion.

۳ ـ بازده: نسبت توان خروجی به توان ورودی می‌باشد. برای افزایش بازده لازم است که تلفات سیستم کاهش یابد. تلفات اینورتر شامل تلفات حالت هدایت المانها و تلفات کلیدزنی می‌باشد.

۴ ـ EMI[1]: این مسئله ناشی از $\frac{dv}{dt}$ و $\frac{di}{dt}$ حاصل از کلیدزنی می‌باشد. برای محدود کردن EMI روش کلیدزنی باید مورد اصلاح قرار گیرد.

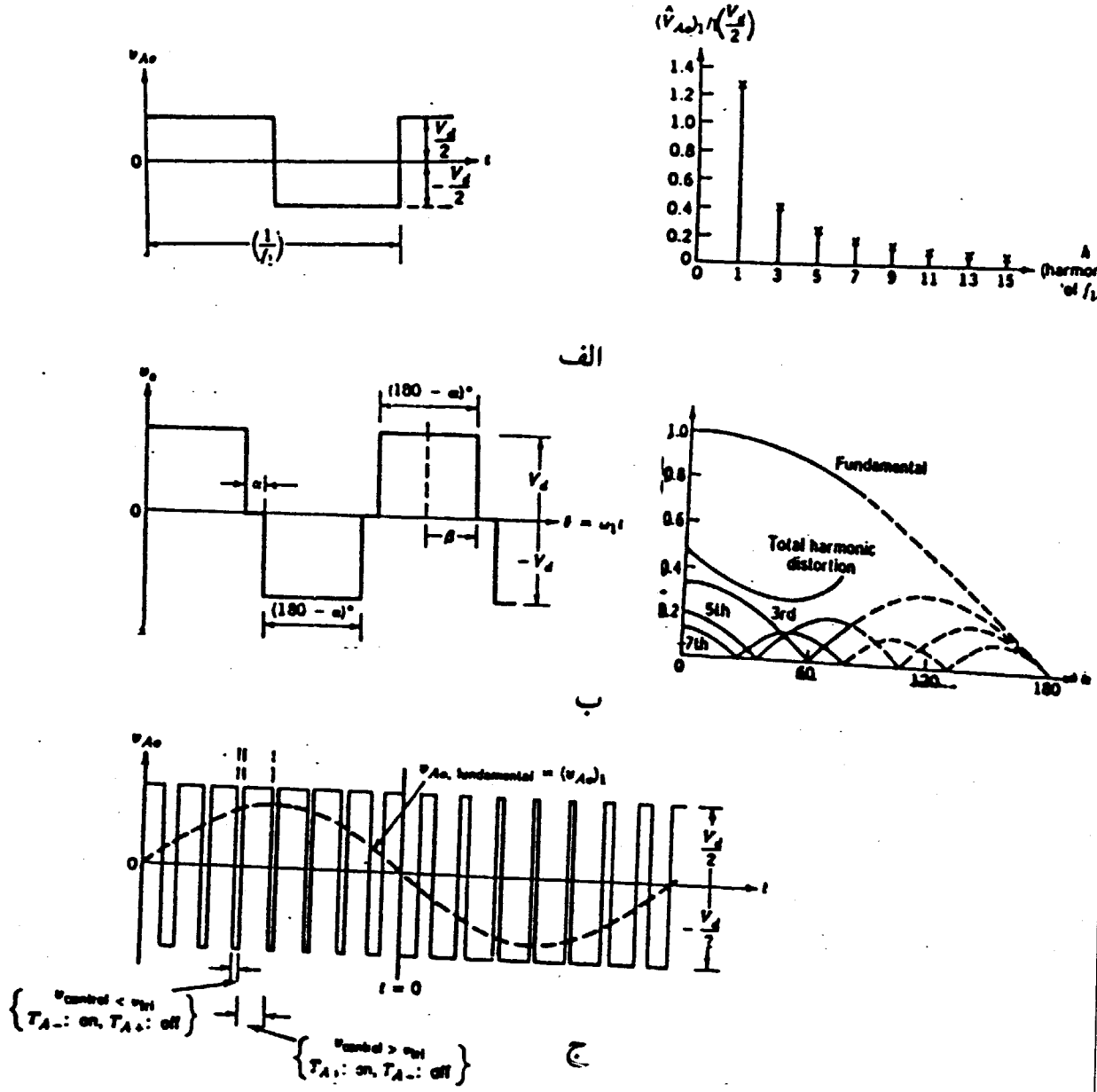
۵ ـ نسبت ولتاژ ورودی به ولتاژ خروجی و ایزولاسیون بین ورودی و خروجی؛ بسته به اینکه ولتاژ ورودی و ولتاژ خروجی چه نسبتی داشته باشند و ایزولاسیون بین ورودی و خروجی لازم باشد، در ساختار مدار قدرت از ترانسهای ورودی و خروجی با فرکانس بالا یا فرکانس پائین استفاده می‌شود.

۲ـ۱ ـ مروری بر انواع اینورترها

ساده‌ترین نوع اینورترها، اینورتر مربعی است [3]، که در آن خروجی یک ولتاژ $\pm V_{in}$ با فرکانس مورد نظر می‌باشد. طیف هارمونیکی اینورتر مربعی در شکل(الف-۲-۱) نشان داده شده است. مشکل اصلی این نوع اینورترها عدم کنترل بر روی هارمونیک اصلی و وجود هارمونیکهای اضافی می‌باشد.

شکل موج خروجی اینورتر شبه مربعی[2] در شکل(ب-۲-۱) نشان داده شده‌است[3].در اینورتر شبه مربعی با به وجود آوردن ولتاژ صفر می‌توان هارمونیک اصلی را کنترل کرد و یا یکی از هارمونیکهای اضافی را حذف نمود. مقدار هارمونیک اصلی و هارمونیکهای اضافی بر حسب زاویهٔ ولتاژ صفر (α) در شکل نشان داده شده است. با توجه به مشخصات اینورترهای مربعی و شبه مربعی می‌توان گفت، که این نوع اینورترها برای دقت‌های‌پائین انتخاب مناسبی هستند.

1- Electro Magnetic Interference. 2- Quasi Square Inverter



شکل (۲-۱):

الف) شکل موج خروجی و طیف هارمونیکی، اینورتر مربعی.

ب) شکل موج خروجی و طیف هارمونیکی اینورتر شبه مربعی بر حسب زاویهٔ α

ج) شکل موج خروجی اینورتر PWM [3,4].

شکل موج خروجی یک اینورتر PWM در شکل (ج-۲-۱) نشان داده شده است[4]. دستور روشن و خاموش شدن کلیدهای اینورتر PWM از مقایسهٔ یک موج رمپ و موج سینوسی مرجع بدست می‌آید. خروجی اینورتر PWM دارای هارمونیک اصلی و هارمونیکهایی در مضارب فرکانس کلیدزنی می‌باشد. با بزرگ انتخاب کردن فرکانس کلیدزنی می‌توان به راحتی هارمونیک اصلی را از هارمونیکهای مزاحم جدا کرد. حسن اصلی اینورتر PWM کنترل خطی و جداگانهٔ فرکانس و دامنهٔ خروجی می‌باشد واز معایب آن می‌توان به بالا بودن فرکانس کلیدزنی و کم بودن هارمونیک اصلی نسبت به ورودی اشاره کرد.

با پائین آمدن فرکانس کلیدزنی در اینورتر PWM هارمونیکهای اضافی بجز هارمونیکهای ذکر شده به وجود می‌آیند و این ناشی از به وجود آمدن عدم تقارن در محل‌های عبور سیگنالهای رمپ و سینوسی می‌باشد. برای حذف این مسئله روش نمونه برداری تنظیم شده[۱] پیشنهاد می‌شود[5]. در توانهای بالا برای حذف هارمونیکهای اضافیِ مضرب هارمونیک اصلی و برای پائین آوردن فرکانس کلیدزنی از PWM برنامه ریزی شده استفاده می‌شود[۲][6]. در این نوع مدولاسیون با کنترل زوایای کلیدزنی می‌توان هارمونیکهای خاصی را حذف کرد.

در اینورترهای سه فاز، معضل کم بودن هارمونیک اصلی را می‌توان توسط مدولاسیون پهنای پالس اصلاح شده[۳] و تزریق هارمونیک سوم[۴] حل کرد[7]. همچنین برای کاهش فرکانس کلیدزنی می‌توان از کنترل برداری[۵] استفاده نمود [8,9].

در اینورترهائی که برای درایو موتورهای الکتریکی استفاده می‌شوند، خروجی کلیدها

1-Regular Sampled PWM.
2- Programed PWM Modulatoin.
3- Modified Sinusoidal PWM.
4- Third Harmonic Injection.
5- Vector Control PWM.

مستقیماً به بار اعمال می‌شود، ولی در اینورترهائی که به عنوان منبع تغذیه استفاده می‌شوند برای بدست آوردن ولتاژ سینوسی، لازم است که از یک فیلتر LC استفاده شود. با استفاده از فیلتر LC، تابع تبدیل کل اینورتر تحت تأثیر فیلتر قرار می‌گیرد.

وجود فیلتر در بارهای خطی و در حالات ماندگار مشکلی برای اینورتر به وجود نمی‌آورد ولی تأثیر فیلتر در بارهای غیر خطی و در حالات گذرا موجب معوج شدن خروجی می‌گردد. به همین دلیل لازم است که توسط کنترلرهای مناسب ولتاژ خروجی تحت انواع بار رگوله شود. از آنجا که اینورترها دارای تغییرات وسیع بار می‌باشند و تابع تبدیل فیلتر رابطهٔ مستقیم با بار خروجی دارد، با تغییر بار خروجی،تابع تبدیل اینورتر تغییرات زیادی می‌کند و این موجب به وجود آمدن مشکلات زیاد در کنترل اینورتر می‌شود.

در مرجع[10]، کنترل توسط فیدبک از موثر شکل موج خروجی پیشنهاد شده است که برای بارهای خطی مناسب می‌باشد ولی به خاطر پاسخ گوئی کند خروجی برای بارهای غیر خطی مناسب نمی‌باشد.

در مراجع[11,12] کنترلرهائی معرفی شده‌اند که، در آنها برای حذف اثر فیلتر و انواع تغییرات موجود در سیستم از تمام حالات موجود به عنوان فیدبک به قسمت کنترلر، استفاده می‌شود. طراحی و ساخت این نوع کنترلرها، عملاً به خاطر زیاد بودن فیدبک‌ها و وجود سنسورهای مختلف ولتاژ و جریان و خطاهای موجود در آنها، مشکل و پیچیده می‌باشد.

در مراجع[13,14,15,16] انواع کنترلرهای دیجیتال با استفاده از تکنیکهای Dead Beat و رؤیت‌گرها پیشنهاد شده‌اند که این نوع کنترلها به دلیل نیاز به میکروپروسسورهای خیلی سریع دارای پیچیدگی در پیاده‌سازی می‌باشند.