بسم الله الرحمن الرحيم

٢٧٨٣٠

۱۳۷۸ /۱۲/ ۱۰
مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه شده مدارک

بسمه تعالی

**دانشگاه علم و صنعت ایران**

**دانشکده مهندسی برق**

عنوان:

# شبیه‌سازی و کنترل دور موتور القایی سه فاز

نگارنده:

مهدی صیادی

**پایان‌نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد**
**(مهندسی برق)**

استاد راهنما:

دکتر عباس شولائی

5358

**تابستان ۱۳۷۸**

۲۷۸۳۰

تقدیم به پدر و مادر عزیزم
که همیشه با صبر و حوصله فراوان مشوق من بوده‌اند
و
تقدیم به برادر عزیزم ابوالفضل

## چکیده

در صنعت بخش مهمی از انرژی توسط ماشین‌های الکتریکی مصرف می‌شود که استفاده از سیستم‌های رانش با سرعت متغیر می‌تواند سبب صرفه‌جوئی قابل توجهی در مصرف انرژی گردد. موتورهای القایی امروزه در واقع به عنوان مهم‌ترین و پرکارترین وسیله رانش مطرح هستند که در عین قیمت بسیار مناسب، از کارآیی خوب و عمر طولانی برخوردار هستند. پیشرفت‌های اخیر در زمینه ساخت ادوات نیمه هادی قدرت و میکروپروسسورها امکان ساخت سیستم‌های رانش با سرعت متغیر را بخوبی فراهم آورده است.

در این پروژه برای کنترل دور موتور القایی از اینورتر منبع جریان استفاده شده است که امکان عملکرد در هر چهار ناحیه گشتاور- سرعت را امکان پذیر می‌سازد. بدلیل ناپایداری ذاتی در موتورهای القایی که با جریان تغذیه می‌گردند از روش کنترل حلقه بسته استفاده گردیده است. سخت افزار کنترل با استفاده از میکروکنترلر طراحی و ساخته شده است. همچنین برنامه شبیه سازی دیجیتال با استفاده از روش تنسور برای مدارات الکترونیک قدرت به همرا موتور القایی ارائه شده است که بسیار کارآمد بوده و نتایج آن بخوبی با نتایج عملی مطابقت دارد.

## تقدیر و تشکر

تمام مراحل این پروژه در آزمایشگاه تحقیقاتی دانشگاه علم و صنعت انجام گردیده است. که در اینجا لازم می‌دانم از راهنماییها و همکاری صمیمانه استاد عزیزم آقای دکتر شولایی قلباً تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین از اعضاء محترم هیئت داوری که زحمت مطالعه و ارزیابی این پایان‌نامه را متحمل گردیده‌اند کمال تشکر را دارم.

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


مقدمه ..... ۱

## فصل اول ـ موتور القایی سه فاز کنترل شده با اینورتر جریان

۱-۱- بررسی رفتار موتور القایی تغذیه شده با جریان ..... ۴

۱-۱-۱- تغذیه با جریان متغیر استاتور ..... ۶

۱-۲- مدار قدرت ..... ۱۱

۱-۲-۱- مبدل پل سه فاز کنترل شده ..... ۱۲

۱-۲-۱- اینورتر پل سه فاز ASCI ..... ۱۵

## فصل دوم ـ شبیه‌سازی سیستم کنترل دور موتور القایی

۲-۱- مقدمه ..... ۲۴

۲-۲- مروری بر روش تنسور ..... ۲۵

۲-۳- الگوریتم ایجاد ماتریس اتصال در روش تنسور ..... ۲۷

۲-۴- تعیین مشخصات شبکه ..... ۳۳

۲-۴-۱- تعیین ماتریس مش ..... ۳۳

## فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


۲ـ۴ـ۲ـ تعیین ماتریس تلاقی گره ..... ۳۴

۳ـ۴ـ۲ـ تعین پارامترهای قطعات شبکه ..... ۳۴

۵ـ۲ـ فرمول‌بندی اتوماتیک ..... ۳۵

۱ـ۵ـ۲ـ مدلسازی قطعات مداری ..... ۳۵

۲ـ۵ـ۲ـ تعیین ماتریس‌های امپدانس ..... ۳۶

۶ـ۲ـ الگوریتم تحلیل مدارات سوئیچینگ ..... ۳۶

۱ـ۶ـ۲ـ نتایج شبیه‌سازی مدارات سوئیچینگ ..... ۳۸

۷ـ۲ـ مدلسازی موتور القایی متقارن ..... ۴۲

۱ـ۷ـ۲ـ اصول کلی مدل موتور القایی ..... ۴۲

۲ـ۷ـ۲ـ مدل موتور القایی برای مدارات سوئیچینگ واقع در سمت استاتور ..... ۴۵

۸ـ۲ـ مدل سیستم‌های سوئیچینگ کنترل موتور القایی ..... ۵۲


### فصل سوم ـ سخت‌افزار بکار رفته در سیستم کنترل


۱ـ۳ـ مقدمه ..... ۶۱

۲ـ۳ـ مدار کنترل مبدل یکسوساز ..... ۶۳

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


۱-۲-۳- آشکارسازی عبور از صفر ..... ۶۳

۲-۲-۳- ساخت پالس تریگر (Programmable one-shat) ..... ۶۴

۳-۳- مدار کنترل اینورتر جریان ..... ۶۶

۴-۳- اندازه‌گیری دور موتور ..... ۶۸

۵-۳- اندازه‌گیری جریان حلقه dc ..... ۷۰

۶-۳- حفاظت سیستم ..... ۷۱

۱-۶-۳- حفاظت در مقابل اضافه جریان ..... ۷۱

۲-۶-۳- حفاظت در مقابل اضافه حرارت ..... ۷۳

۳-۶-۳- حفاظت در مقابل بروز ناهماهنگی در دور موتور ..... ۷۳

۴-۶-۳- حفاظت در مقابل اشکالات سخت‌افزاری و نرم‌افزاری ..... ۷۳

۷-۳- مدار ورودی آنالوگ ..... ۷۴

۸-۳- مدار خروجی آنالوگ ..... ۷۵

۹-۳- نمایشگر LCD ..... ۷۶

۱۰-۳- کی‌برد ..... ۷۷

۱۱-۳- ارتباط سریال با کامپیوتر ..... ۷۷

# فهرست مطالب

عنوان — صفحه

## فصل چهارم ـ الگوریتم کنترل


۴-۱- مقدمه ..... ۷۹

۴-۲- نمای کلی الگوریتم کنترل ..... ۷۹

۴-۳- حلقه کنترل جریان ..... ۸۰

۴-۴- تولید بیشترین گشتاور نسبت به جریان ورودی موتور ..... ۸۱

۴-۵- ایجاد گشتاور مرجع ..... ۸۲

۴-۶- حلقه کنترل لغزش ..... ۸۲

۴-۷- جبران‌کننده فرکانس ..... ۸۳


## فصل پنجم ـ مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی


۵-۱ مقدمه ..... ۸۶

۵-۲ ماتریس‌های مشخصه سیستم کنترل ..... ۸۶

۵-۳ مشخصات الکتریکی مجموعه مدارات قدرت ..... ۹۰

۵-۴- ثبت نتایج آزمایشگاهی ..... ۹۱

۵-۵- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی ..... ۹۲

۵-۶ نتیجه گیری و پیشنهادات ..... ۱۰۳

# فهرست اشکال

**عنوان** **صفحه**

## فصل اول ـ موتور القایی سه فاز کنترل شده با اینورتر جریان


شکل ۱ـ۱ـ مدار معادل هر فاز از موتور القایی ..... ۵

شکل ۲ـ۱ـ مدار معادل تقریبی هر فاز از موتور القایی ..... ۶

شکل ۳ـ۱ـ منحنی‌های مشخصه موتور القایی بصورت تابعی از لغزش ..... ۸

شکل ۴ـ۱ـ منحنی گشتاور ـ سرعت موتور القایی با جریان‌های متغیر استاتور ..... ۹

شکل ۵ـ۱ـ مدار قدرت عمومی اینورتر منبع جریان ..... ۱۱

شکل ۶ـ۱ـ مبدل پل سه فاز کنترل شده..... ۱۲

شکل ۷ـ۱ـ شکل موج‌های مبدل سه فاز در حالت یکسوسازی ( $a= 45^{\circ}$)..... ۱۴

شکل ۸ـ۱ـ شکل موج‌های مبدل پل سه فاز در حالت اینورتری ( $a= 150^{\circ}$) ..... ۱۵

شکل ۹ـ۱ـ اینورتر پل سه فاز ASCI..... ۱۶

شکل ۱۰ـ۱ـ مدار معادل اینورتر پل سه فاز ASCI در حین کموتاسیون ..... ۱۷

شکل ۱۱ـ۱ـ شکل موج‌های ولتاژ و جریان اینورتر پل سه فاز ASCI در هنگام کموتاسیون ۱۹


## فصل دوم ـ شبیه‌سازی سیستم کنترل دور موتور القایی


شکل ۱ـ۲ـ ارائه مدل یک المان ..... ۲۵

# فهرست اشکال

**عنوان** **صفحه**


شکل ۲ـ۲ـ روند نمای الگوریتم محاسبه Cn ..... ۲۹

شکل ۳ـ۲ـ گراف اینورتر جریان ..... ۳۰

شکل ۴ـ۲ محاسبه ماتریس اتصال اینورتر جریان (ادامه در صفحه بعد) ..... ۳۱

شکل ۴ـ۲ محاسبه ماتریس اتصال اینورتر جریان (ادامه از صفحه قبل) ..... ۳۲

شکل ۵ـ۲ـ الگوریتم تحلیل مدارات سوئیچینگ ..... ۳۷

شکل ۶ـ۲ـ پل سه فاز نیمه کنترل شده در حالت $a=۴۰^{\circ}$ (نتایج شبیه‌سازی) ..... ۳۸

شکل ۷ـ۲ـ پل سه فاز نیمه کنترل شده در حالت $a=۱۱۰^{\circ}$ (نتایج شبیه‌سازی) ..... ۴۰

شکل ۸ـ۲ـ پل سه فاز تمام کنترل شده (نتایج شبیه‌سازی) ..... ۴۱

شکل ۹ـ۲ـ موتور القایی متقارن دو قطب، سه فاز، اتصال Y ..... ۴۲

شکل ۱۰ـ۲ـ متغیرهای موتور القایی ۳ اسب بخار در حالت بی‌باری با استفاده از نتایج شبیه‌سازی ... ۴۸

شکل ۱۱ـ۲ـ متغیرهای موتور القایی ۳ اسب بخار در حالت بی‌باری ..... ۴۹

شکل ۱۲ـ۲ـ متغیرهای موتور القایی ۲۲۵۰ اسب بخار در حالت بی‌باری با استفاده از نتایج شبیه‌سازی ۵۰

شکل ۱۳ـ۲ـ متغیرهای موتور القایی ۲۲۵۰ اسب بخار در حالت بی‌باری ..... ۵۱

شکل ۱۴ـ۲ـ شبیه‌سازی موتور القایی کنترل شده توسط مدارات سوئیچینگ ..... ۵۳

شکل ۱۵ـ۲ـ موتور القایی کنترل شده توسط دامنه فاز ..... ۵۶

# فهرست اشکال

**عنوان** **صفحه**


شکل ۱۶-۲- آرایش هدایت موتور القایی کنترل شده توسط دامنه فاز ..... ۵۸

شکل ۱۷-۲- رفتار موتور القایی ۳ اسب بخار سه فاز در طی فرآیند راه‌اندازی (نتایج شبیه‌سازی) .... ۵۹

شکل ۱۸-۲- رفتار موتور القایی ۳ اسب بخار سه فاز در طی فرآیند راه‌اندازی..... ۶۰


## فصل سوم ـ سخت‌افزار بکار رفته در سیستم کنترل


شکل ۱-۳- بلوک دیاگرام کلی سیستم کنترل..... ۶۲

شکل ۲-۳- آشکارسازی عبور از صفر..... ۶۳

شکل ۳-۳- روند نمای کنترل زاویه آتش تریستورهای یکسوساز ..... ۶۴

شکل ۴-۳- تولید پالس‌های گیت..... ۶۵

شکل ۵-۳- اعمال پالس‌های گیت به تریستورها..... ۶۵

شکل ۶-۳- ایجاد کلاک بسیار دقیق متناسب با فرکانس خروجی اینورتر..... ۶۶

شکل ۷-۳- خروجیهای شیفت رجیستر ..... ۶۷

شکل ۸-۳- فرمان گیت تریستورهای اینورتر..... ۶۷

شکل ۹-۳- ساخت پالس‌های فرمان گیت تریستورهای اینورتر..... ۶۸

شکل ۱۰-۳- بلوک دیاگرام اندازه‌گیری دور موتور..... ۶۹

# فهرست اشکال

**عنوان** **صفحه**


شکل ۱۱-۳- اصول کارکرد ترانسدیوسرهای جریان ..... ۷۱

شکل ۱۲-۳- حفاظت در مقابل اضافه جریان ..... ۷۲

شکل ۱۳-۳- بلوک دیاگرام قسمت پردازش سیگنال ورودی آنالوگ ..... ۷۵

شکل ۱۴-۳- نمای مدار قسمت خروجی آنالوگ ..... ۷۶


## فصل چهارم - الگوریتم کنترل


شکل ۱-۴- نمای کلی الگوریتم کنترل موتور القایی ..... ۷۹

شکل ۲-۴- حلقه کنترل جریان به همراه بار ..... ۸۰

شکل ۳-۴- مدار معادل هر فاز موتور القایی ..... ۸۳

شکل ۴-۴- دیاگرام فازوری مدار معادل موتور القایی ..... ۸۴


## فصل پنجم - مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی


شکل ۱-۵ مدار قدرت سیستم کنترل ..... ۸۶

شکل ۲-۵ گراف مدار قدرت ..... ۸۷

شکل ۳-۵ ماتریس تلاقی مدار قدرت ..... ۸۸

# فهرست اشکال

**عنوان** **صفحه**


شکل ۴-۵ ماتریس مش مدار قدرت..... ۸۹

شکل ۵-۵ ماتریس‌های Tv و K مربوط به مجموعه مدار قدرت و موتور القایی ..... ۹۰

شکل ۶-۵ سرعت موتور در طی فرآیند شتاب گیری آزاد..... ۹۲

شکل ۷-۵ گشتاور موتور در طی فرایند شتاب گیری آزاد (شبیه سازی) ..... ۹۳

شکل ۸-۵ پارامترهای مدار قدرت (نتایج آزمایشگاهی) ..... ۹۴

شکل ۹-۵ پارامترهای مدار قدرت (شبیه سازی)..... ۹۵

شکل ۱۰-۵ پاسخ موتور نسبت به تغییر پله‌ای در سرعت مرجع (نتایج آزمایشگاهی) .. ۹۶

شکل ۱۱-۵ پاسخ موتور نسبت به تغییر پله‌ای در سرعت مرجع (نتایج شبیه سازی) ... ۹۷

شکل ۱۲-۵ پاسخ موتور نسبت به افزایش پله‌ای گشتاور (نتایج آزمایشگاهی)..... ۹۸

شکل ۱۳-۵ پاسخ موتور نسبت به افزایش پله‌ای گشتاور (نتایج شبیه سازی)..... ۹۹

## مقدمه

تا قبل از پیشرفت اخیر در زمینه ادوات الکترونیک قدرت در مواردی که نیاز به سرعت متغیر وجود داشت از ماشین‌های dc استفاده می‌گردید که به دلیل وجود کموتاتور محدودیت‌هایی نظیر کاهش قدرت و سرعت ماشین، نیاز به پریود زمانی منظم بازرسی و تعمیرات، افزایش وزن و پیچیدگی ساختمان موتور را در پی داشتند. در چند سال اخیر با توجه به امکان ساخت مبدل‌های استاتیک، می‌توان از موتور القایی که تا قبل از این فقط در سرعت‌های ثابت قابل استفاده بود، در زمینه کاربردهای سرعت متغیر نیز استفاده نمود. استفاده از سیستم‌های رانش سرعت متغیر در کاربردهای کنترل فرآیندها سبب صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف انرژی می‌گردد و با توجه به قیمت روبه رشد انرژی الکتریکی، هزینه اضافی ناشی از نصب مبدل‌ها و مدارهای کنترل مورد نیاز مقرون به صرفه خواهد بود.

در آینده نزدیک ناگزیر به جایگزین کردن اکثر سیستم‌های فعلی ac دور ثابت یا ماشین‌های dc با سیستم‌های رانش سرعت متغیر موتور القائی خواهیم بود. لذا بررسی رفتار سیستم‌های گوناگون تحت شرایط مختلف با توجه به یک نرم‌افزار شبیه‌سازی ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به اینکه مدلسازی سیستم‌های سوئیچینگ که دارای توپولوژی متغیر با زمان هستند نیاز به بررسی کلیه حالات ممکن دارد و این امر در مداراتی که تعداد سوئیچ‌ها زیاد باشد، مشکل‌ساز خواهد بود، در تهیه نرم‌افزار شبیه‌سازی از روش تنسور استفاده شده است [۳-۱]. در این روش رفتار مدارات سوئیچینگ فقط با استفاده از یک مجموعه اصلی معادلات مستقل (با فرض وصل بودن همه سوئیچ‌ها) تعیین می‌شود و سپس تأثیر سوئیچ‌های قطع با