اجلد ١٧

بسم الله الرحمن الرحيم

٤٢٤٧٦

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

۱۳۸۱ /۷/ ۲۰

۱۳۸۱ /۷/ ۲۰

دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی‌ومهندسی
گروه برق- قدرت

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

عنوان:

کنترل سرعت موتورهای القایی خطی به‌روش کنترل برداری

استاد راهنما:
دکتر حسین سیفی

استاد مشاور:
دکتر عباس شولایی

نگارش:
مهرداد بلادی موسوی

۴۲۴۷۶

بهار ۸۱

دانشگاه تربیت مدرس

تاییدیه هیات داوران

آقای **مهرداد بلادی موسوی** پایان‌نامه ۶ واحدی خود را با عنوان **کنترل سرعت موتورهای القایی خطی به روش کنترل برداری** در تاریخ **۸۱/۲/۱۶** 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** باگرایش **قدرت** پیشنهاد می‌کنند.

اعضای هیات داوران	نام و نام خانوادگی	امضاء
۱ـ استاد راهنما :	آقای دکتر سیفی	
۲ـ استاد مشاور :	آقای دکتر شولایی	
۳ـ استادان ممتحن :	آقای دکتر پارسا	
	آقای دکتر ذوالقدری	
۴ـ مدیر گروه :	آقای دکتر یزدیان	
(یا نمایندهٔ گروه تخصصی)		

۸۱/۲/۱۶

بسمه‌تعالی

آیین‌نامهٔ چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرّس، مبیّن بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

مادّهٔ ۱ در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

مادّهٔ ۲ در صفحهٔ سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد/رسالهٔ دکتری نگارنده در رشتهٔ ..... است که در سال ..... در دانشکدهٔ ..... دانشگاه تربیت مدرّس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر ..... ، مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر ..... و مشاورهٔ سرکار خانم/جناب آقای دکتر ..... از آن دفاع شده است.»

مادّهٔ ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهداکند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

مادّهٔ ۴ در صورت عدم رعایت مادّهٔ ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ‌شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرّس، تأدیه کند.

مادّهٔ ۵ دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در مادّهٔ ۴ را از محلّ توقیف کتابهای عرضه‌شدهٔ نگارنده برای فروش، تأمین نماید.

مادّهٔ ۶ اینجانب ..... دانشجوی رشته ..... مقطع ..... تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام‌خانوادگی:

تاریخ و امضا:

تقدیر و تشکر:

بدین‌وسیله از استاد راهنمای گرانقدرم جناب آقای **دکتر سیفی** که در مراحل مختلف پایان‌نامه مرا یاری کردند و سایر اساتید گروه قدرت دانشکده فنی که در مدت تحصیل از محضرشان سود جستم و همچنین جناب آقای **دکتر شولایی** تشکر و قدردانی می‌نمایم.

چکیده:

امروزه پیشرفت‌های تکنولوژیکی در زمینه‌های الکترونیک قدرت، اتوماسیون و پردازش سیگنال امکان استفاده از درایوهای *ac* را در پروسه‌های مختلف صنعتی فراهم کرده است.

کنترل با جهت‌یابی میدان موتور القایی، بسیار مناسب‌تر از سایر تکنیک‌های کنترل با فرکانس متغیر است. در این روش موتور القایی رفتاری مشابه موتور *dc* از خود نشان می‌دهد. بنابراین درایوهای *ac* که با این روش کنترل می‌شوند، جایگزین مطمئن و خوبی برای موتورهای *dc* در بسیاری از کاربردها خواهند بود.

هم‌اکنون موتورهای القایی خطی کاربردهای وسیعی در صنعت پیدا کرده‌اند. فیزیک خاص اینگونه موتورها امکان استفاده از آنها را در مواردی که نیاز به عملکرد با کیفیت بالا داریم و استفاده از موتورهای دوار مناسب نیست را فراهم می‌آورد. مدل‌های ارائه شده برای موتور القایی خطی باید قابلیت تحلیل شرایط گذرا را داشته باشد. زیرا محرکه‌های درایوهای خطی همواره در معرض تغییرات شتاب و نقطه کار هستند. و در نتیجه در حالت‌های گذرا کار می‌کنند.

در این پایان‌نامه اصول اساسی کنترل برداری به کار برده شده برای درایوهای القایی مورد بحث قرار گرفته است. در شبیه‌سازی‌ها نیز از استراتژی کنترل برداری غیرمستقیم با جهت‌گیری شار رتور و کنترل جریان استاتور استفاده شده است.

برای مدلسازی موتورهای القایی خطی نیز از دو روش استفاده شده است. در روش اول اثرات لبه‌های انتهایی در نظر گرفته نشده است. و در روش دوم مدل مدار معادل بر اساس مدل موتور القایی دوار و مناسب برای کنترل برداری با جهت‌یابی شار رتور ارائه شده است. اثرات لبه‌های انتهایی به صورت ضرایب متغیر با سرعت در اندوکتانس مغناطیس‌کننده و مقاومت سری با آن در مدار معادل محور *d* در نظر گرفته شده است.در معادلات شار و گشتاور نیز تغییراتی ایجاد شده است.

با توجه به قابلیت‌ها و انعطاف‌پذیری نرم‌افزار *MATLAB / SIMULINK* ، از این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی و مدلسازی اجزاء مختلف سیستم استفاده شده است. در هر مورد نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج سایر مقالات مقایسه شده است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه ۱

فصل دوم: موتورهای القایی خطی ۸

۲-۱- مقدمه ۸

۲-۲- ساختمان موتور القایی خطی و انواع آن ۱۰

۲-۲-۱- تقسیم‌بندی از جهت ساختمان ظاهری ۱۱

۲-۲-۲- شناورسازی مغناطیسی ۱۵

۲-۲-۳- سیم‌پیچی ۱۷

۲-۲-٤- کاربردها ۱۹

۲-۳- روابط الکترومغناطیسی موتور القایی خطی ۲۰

۲-۳-۱- روابط اساسی ۲۰

۲-۳-۲- معادلات میدان الکترومغناطیسی ۲٤

۲-٤- اثر لبه طولی ۲۹

۲-٤-۱- روش اشتورمن ۳۱

۲-٤-۲- روش یامامورا ۳٤

۲-٤-۳- ضریب اثر لبه‌های طولی ۳٦

۲-۵- اثر لبه عرضی ۳۹
۲-٦- مدار معادل ٤٠

فصل سوم: شبیه‌سازی موتورهای القایی خطی ٤٤

۳-۱- مقدمه ٤٤
۳-۲- شبیه‌سازی موتور القایی خطی بدون در نظر گرفتن اثر لبه انتهایی ٤٥
۳-۳- ارائه مدل جدید برای موتور القایی خطی بر اساس مدل موتور دوار ٥٣
۳-۳-۱- مدل کامل ماشین القایی دوار ٥٤
۳-۳-۲- مدار معادل برای موتور القایی خطی ٥٥

فصل چهارم: پیاده‌سازی طرح کنترل برداری غیرمستقیم ٦٣

٤-۱- مقدمه ٦٣
٤-۲- اصول کنترل برداری ٦٥
٤-۳- کنترل برداری غیرمستقیم ٦٧
٤-٤- طرح کنترل برداری غیرمستقیم ٧١

فصل پنجم: نتایج شبیه‌سازی ٧٦

٥-۱- مقدمه ٧٦
٥-۲- نتایج شبیه‌سازی مدار معادل موتور القایی خطی ٧٧
٥-۳- نتایج شبیه‌سازی مربوط به اینورتر ٨٢
٥-٤- نتایج شبیه‌سازی کنترل سرعت موتور القایی خطی ٨٣

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ٨٦

٦-١- مقدمه ٨٦

٦-٢- نتیجه‌گیری ٨٧

٦-٣- پیشنهادات ٨٨

ضمیمه الف ٨٩

ضمیمه ب ٩٢

لیست مراجع ٩٣

واژه‌نامه ٩٩

فصل اول

مقدمه

در گذشته استفاده از موتورهای DC در زمینه‌هایی که نیاز به کنترل سرعت دقیق داشتند بسیار مرسوم بود. دلیل محبوبیت این‌گونه موتورها در مجزا بودن سیم‌پیچ میدان و آرمیچر و در نتیجه کنترل مستقل شار و گشتاور است که به خصوص در موتورهای DC با تحریک جداگانه عملکرد در دامنه وسیعی از سرعت و با پاسخ دینامیکی مناسب را ممکن می‌سازد[1]. اما استفاده از این موتورها معایب و مشکلاتی نیز به همراه دارد که عمدتا ناشی از وجود کموتاتور و جاروبک است[2]. از مشکلات استفاده از این موتورها می‌توان به نیاز به سرویس و بازبینی منظم، محدودیت کارکرد در سرعت و ولتاژ بالا و همچنین کاهش عمر جاروبک و کموتاتور در بارهای بسیار سبک یا سنگین اشاره کرد[3]. با استفاده از موتورهای

جریان متناوب می‌توان بر بسیاری از مشکلات فوق غلبه کرد. این موتورها علاوه بر هزینه و وزن کمتر در مقایسه با موتورهای DC با توان مشابه، ساختار ساده، محکم و مطمئنی دارند که برای کار در شرایط محیطی آلوده که امکان استفاده از موتورهای DC وجود ندارد بسیار مناسب هستند. اما آنچه که موجب محدودیت در استفاده از موتورهای AC در صنایع می‌شد ساختار و الگوریتم کنترلی موتورهای AC است که بسیار پیچیده چند متغیره و غیرخطی است[4]، و پیاده‌سازی سیستم کنترل این موتورها از نظر اقتصادی به‌صرفه نبود. با پیشرفت تکنولوژی نیمه‌هادی‌ها و الکترونیک قدرت هزینه ساخت درایوهای AC بسیار کمتر شده است و پیش‌بینی می‌شود در آینده نیز قیمت این درایوها کمتر شود[5]. استفاده از میکروپرسسورهای سریع و ارزان‌قیمت نیز در پیاده‌سازی تکنیک‌های کنترل‌برداری امکان استفاده از درایوهای AC را در کاربردهای با دقت و کیفیت بالا که به‌طور مرسوم از درایوهای DC استفاده می‌شده است فراهم کرده است.[6]

در میان انواع ماشین‌های AC موتورهای خطی اگرچه به اندازه موتورهای دوار شناخته شده نیستند و مورد استفاده قرار نگرفته‌اند اما با پیشرفت تکنولوژی و افزایش تنوع در استفاده از موتورهای الکتریکی، این موتورها نیز مورد توجه خاصی قرار گرفته‌اند. همان‌گونه که از عنوان این موتورها مشخص است جابه‌جایی میدان در این موتورها به‌گونه‌ایست که حرکت انتقالی یا رفت و برگشتی ایجاد می‌کنند و بنابراین جایگزین بسیار مناسبی برای موتورهای دواری هستند که برای ایجاد حرکت خطی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بطور کلی مهمترین کاربردهای موتورهای خطی در سیستم‌های حمل‌ونقل بین‌شهری و درون‌شهری، آسانسورها و بسیاری از مواردی است که موتورهای دوار به همراه چرخ‌دنده و پیچ‌های حلزونی توانایی تولید حرکت خطی با کیفیت مناسب را ندارند[7,8,9,10]. یکی از دلایلی که باعث عدم استفاده گسترده از این موتورها شده است، این است که این موتورها ذاتا دارای فاصله هوایی بزرگ و راندمان کاری پایین هستند. اگرچه یک موتور خطی در مقایسه با موتور دوار با قدرت مشابه، راندمان و

کیفیت کاری پایین‌تری دارد، اما استفاده از یک موتور خطی به‌جای مجموعه موتور دوار و چرخ‌دنده دارای راندمان بالاتر، قابلیت اطمینان بیشتر و قیمت و صدای کمتر است.[10,11]

بطور کلی از مزایای موتورهای القایی خطی به موارد ذیل می‌توان اشاره کرد:

- شتاب‌گیری و ترمز سریع با حداقل فرسایش.[7]
- ساختمان ساده و سادگی خدمات نگهداری، تعمیر و تعویض قطعات.
- وجود نیروی قائم که به عنوان نیروی بالابرنده و همچنین ایجاد حالت تعلیق مغناطیسی از آن استفاده می‌شود.[12,13,14]

در مقابل مزایای فوق پدیده‌های منحصر بفردی نیز در این موتورها وجود دارند که ناشی از ساختار فیزیکی خاص این موتورها است و برای دستیابی به نتایج قابل قبول باید مورد توجه قرار گیرند که عبارتند از:

- وجود اثرات لبه‌های انتهایی که ناشی از طول محدود مدار مغناطیسی در امتداد مسیر حرکت موتور است و در عملکرد موتور اثر منفی دارد. البته در کاربردهای با سرعت پایین این اثر قابل چشم‌پوشی است.[15-17]
- وجود فاصله هوایی نسبتا بزرگ و در نتیجه کاهش راندمان و ضریب قدرت.
- عدم پیوستگی در هادی ثانویه در مسیرهای طولانی و در نتیجه قطع مسیر جریان در ثانویه که اثر منفی روی کیفیت حرکت به‌خصوص در موتورهای سبک و با سرعت کم دارد و به‌صورت نیروهای ضربه‌ای بروز می‌کند.[18-20]

در بررسی و مطالعه رفتار موتورهای القایی خطی روشها و تئوری‌های مختلفی ارائه شده است. مدل‌های ارائه شده باید قابلیت تحلیل رفتار گذرای ماشین را داشته باشند، زیرا استفاده از موتورهای القایی خطی به‌عنوان درایو الکتریکی مستلزم تغییرات دائم در نقطه کار و شتاب‌گیری و ترمزهای متوالی

و در نتیجه کار در شرایط گذراست. Ooi [21] و North [22] از جمله اولین محققینی بودند که سعی در بدست آوردن معادلات کلی مدار با استفاده از *هارمونیک‌های فضایی*[1] داشتند. در این روش با محدود در نظر گرفتن طول موتور یک تناوب مصنوعی از بی‌نهایت ماشین ایجاد می‌شود که استفاده از سری فوریه را برای مدلسازی الکترومغناطیسی فراهم می‌آورد. اما از معایب این روش به تعداد زیاد معادلات و حجم بالای محاسبات می‌توان اشاره کرد. در ادامه مطالعات *Lipo* و *Nondahl* [23,24,25] ضمن اشاره به اینکه تفاوت اساسی موتورهای القایی خطی و دوار در تقارن قطب به قطب است و تقارن در موتورهای القایی دوار باعث می‌شود که محاسبات در فاصله یک قطب انجام شود و نتایج به سایر قطب‌ها تعمیم داده شود. با توجه به اینکه در موتورهای القایی خطی فرضیه تقارن قطب به قطب صادق نیست، این دو محقق با فرض مستقل بودن قطب‌ها و تزویج مغناطیسی آنها با یکدیگر محاسبات را بطور همزمان برای تمام قطب‌ها انجام دادند. اگر چه با این روش اثر لبه‌های طولی و طول محدود موتور بطور خودکار در نظر گرفته می‌شود، اما فرض مستقل بودن قطب‌ها منجر به پیچیدگی مدل می‌شود.

در سال‌های اخیر مدل مدار تزویجی دیگری [26] ارائه شده است که برای تجزیه و تحلیل رفتار حالت ماندگار و گذرای موتورهای القایی خطی قابل استفاده است. در این روش ایده توابع سیم‌بندی برای محاسبه پارامترهای مدار معادل موتور بکار رفته است و توابع سیم‌بندی ثانویه نیز به کمک چگالی فلوی فاصله هوایی حاصل از حل معادلات ماکسول بدست می‌آیند. بنابراین اثر لبه‌های طولی بطور خودکار در پارامترهای مدار معادل لحاظ می‌شود.

اغلب مدل‌های فوق‌الذکر بر اساس تئوری میدان پایه‌ریزی شده‌اند و عملکرد موتور را با دقت مناسبی تحلیل می‌کنند، اما تصور ادراکی و فیزیکی از مدل را در اختیار خواننده قرار نمی‌دهند[7]. به همین دلیل

۱- Space harmonics

محققان بسیاری سعی در ارائه *مدار معادل تکفاز*[۲] مناسب با در نظر گرفتن شرایط فیزیکی خاص موتور القایی خطی در پارامترهای مدار معادل داشته‌اند[11,16]. اما اغلب مدل‌های ارائه شده با هدف محاسبه مشخصه‌های موتور بدست آمده‌اند.

با استفاده از تکنیک کنترل برداری، امکان کنترل گشتاور و شار در ماشین‌های AC ، مشابه ماشین‌هایDC فراهم می‌شود. بر اساس این روش، فازور جریان استاتور به دو جزء تولید کننده شار و گشتاور تجزیه می‌شود. به گونه‌ای که امکان کنترل مستقل و مجزا از هم شار و گشتاور در ماشین‌های AC میسر می‌شود، و مشخصه‌های پاسخ گذرای ماشین AC مشابه ماشین DC خواهد شد. اما برخلاف ماشین‌هایDC که کنترل اندازه جریان‌های آرمیچر و میدان به تنهایی کافی است، در ماشین‌های AC باید فرکانس، فاز و اندازه جریان استاتور بطور همزمان کنترل شود. همچنین در ماشین‌های DC به علت وجود جاروبک‌ها و کموتاتور، میدان‌های آرمیچر و تحریک عمود بر یکدیگر و نسبت به هم ثابت هستند در حالیکه در ماشین‌های AC بردارهای فازورهای جریان، شار و میدان مغناطیسی نسبت به هم متحرک هستند و کنترل اندازه و موقعیت آنها از خارج از موتور و توسط اینورتر صورت می‌گیرد. به همین علت انواع مختلفی از مبدل‌ها برای کنترل این موتورها مورد استفاده قرار گرفته‌اند.(*اینورترهای منبع جریان*[۳]، *اینورترهای منبع ولتاژ*[٤]، *سیکلوکنورترها*[٥])[28] . به دلایل فوق پیاده‌سازی سیستم کنترل موتورهای القایی در مقایسه با موتورهای جریان مستقیم بسیار پیچیده‌تر است.

در روش کنترل برداری قاب مرجع می‌تواند همجهت با شار رتور، شار استاتور و یا شار مغناطیس‌کننده در نظر گرفته شود که هر کدام از این روشها مزایا و معایب خاص خود را دارد و در مراجع [34-29] ویژگیهای سه روش فوق با هم مقایسه شده‌اند و در هر مورد نقاط قوت و ضعف و نحوه پاسخ حالت دائم و گذرا و میزان حساسیت به تغییر پارامترها مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- Per-phase equivalent circuit
۳- Current-source inverters
٤- Voltage-source invrters
٥- Cycloconverters

ارزیابی و تجزیه و تحلیل رفتار درایوهای موتور القایی که با تکنیک کنترل برداری کنترل می‌شوند، به دو طریق امکان‌پذیر است: در روش اول با استفاده از یک ماشین واقعی و اینورتر و یک کنترلر برداری که الگوریتم آن به زبان C یا اسمبلی روی یک میکروپروسسور یا میکروکنترلر کد شده است، رفتار موتور القایی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. اما در روش دوم با استفاده از شبیه‌سازی سیستم و صرف هزینه بسیار کم در مقایسه با روش اول می‌توان رفتار سیستم را مورد بررسی قرار داد[35] . از مزایای روش دوم می‌توان به دسترسی و مشاهده آسان متغیرهای دلخواه سیستم و تست سیستم با ماشین‌های مختلف بدون نصب یا اضافه کردن تجهیزات جدید اشاره کرد. در حالی که در آزمایش‌های عملی این کار یا مستلزم صرف وقت و هزینه اضافی است و یا امکان‌پذیر نیست.[36,37]

یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند و با انعطاف‌پذیری بالا در شبیه‌سازی درایوهای الکتریکی نرم‌افزار *MATLAB* و زیرمجموعه آن به نام *SIMULINK* است که اخیرا در طراحی و مدلسازی درایوهای الکتریکی مورد توجه فراوان قرار گرفته است[40 – 38]. *SIMULINK* یک محیط گرافیکی شامل بلوکهای توابع انتقال، انتگرال‌گیری، مشتق‌گیری، توابع از پیش تعریف شده ریاضی و مثلثاتی، جمع و ضرب و ... است که امکان انجام محاسبات فوق را بدون نیاز به برنامه‌نویسی فراهم می‌آورد. در صورتی‌که بلوک دلخواه در کتابخانه وجود نداشته باشد، می‌توان برنامه مربوطه را به صورت *m _ file* نوشت. سپس با استفاده از *بلوک تابع S*[٦] از مجموعه کتابخانه غیرخطی، *m _ file* نوشته شده را با مجموعه سایر بلوکهای سیستم لینک کرد.

در این پایان‌نامه مدل جدیدی برای موتور القایی خطی ارائه شده است که برای کنترل برداری موتور القایی خطی مناسب است. در این مدل که بر اساس مدار معادل موتور دوار قرار دارد، طول موتور وابسته به سرعت موتور، تغییر می‌کند. هنگامی‌که سرعت صفر است طول موتور بی‌نهایت خواهد بود و با افزایش سرعت طول موتور کاهش می‌یابد. اثر لبه انتهایی نیز با اضافه کردن ضرائب متغیر با سرعت به

٦- S_function block