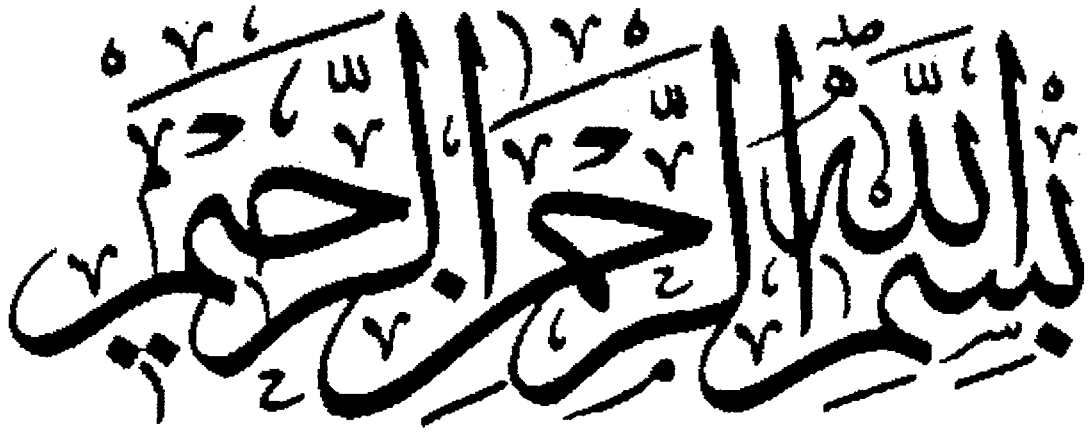
٨٧/١/١٠١٦٨٧
٨٧/١٠/٢١



١٠٨٧٦٥

دانشکده فنی

گروه برق

گرایش الکترونیک

کنترل برداری ماشین های خطی القایی

از

اکبر مهدوی

استاد راهنما :

دکتر آلفرد باغرامیان

۱۳۸۷/۱۰/۰۵

اساتید مشاور:

دکتر زکی بیاگوئی

دکتر اسماعیل فلاح چولابی

خرداد ۸۷

دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه گیلان

۱۰۸۲۶۵

تقدیم به:

پدر عزیز و مادر گرامیم

بدینوسیله لازم می دانم تا از زحمات جناب آقای دکتر آلفرد باغرامیان که مرا در انجام این پروژه یاری دادند صمیمانه تشکر نمایم.

اکبر مهدوی

خرداد ماه یکهزار و سیصد و هشتاد و هفت

رشت، ایران

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده فارسی	د
چکیده انگلیسی	ز
مقدمه	۱
فصل اول	
۱-۱ مقدمه	۵
۱-۲ مدل dq0 ماشین القایی سه فاز معمولی	۶
۱-۲-۱ ماتریس تبدیل پارک	۶
۱-۲-۲ مدل dq0 ماشین القایی سه فاز معمولی در قاب ساکن استاتور	۷
۱-۲-۳ مدل dq0 ماشین القایی سه فاز در قاب گردان دلخواه	۱۲
۱-۳ مدل dq0 ماشین القایی خطی	۱۴
۱-۳-۱ محاسبه اندوکتانس مغناطیسی مربوط به تاثیر end effect	۱۵
۱-۳-۲ مدار معادل مقاومت سری مربوط به تلفات جریان فوکو	۱۷
۱-۳-۳ معادلات ریاضی موتور	۱۸
فصل دوم	
۲-۱ مقدمه	۲۰
۲-۲ بررسی روش های کنترل موتورهای القایی	۲۲
۲-۲-۱ انواع روش های کنترل اسکالر	۲۲
۲-۲-۲ کنترل اسکالر موتور القایی با حلقه مستقل شار	۲۲
۲-۳ کنترل برداری	۲۴
۲-۳-۱ کنترل گشتاور در ماشین های جریان دائم	۲۵
۲-۳-۲ شباهت یک ماشین d.c و یک ماشین القایی در حالت کنترل برداری	۲۵
۲-۳-۳ اجرای کنترل برداری موتور القایی	۲۶
۲-۳-۴ کنترل برداری مستقیم	۲۸

۲-۳-۵ کنترل برداری غیر مستقیم ۳۱

فصل سوم

۳-۱ مقدمه ۳۶

۳-۲ شبیه سازی ماشین القایی خطی ۳۷

۳-۲-۱ بررسی سیستم کنترل PID ۴۱

۳-۳ شبیه سازی کنترل برداری برای ماشین القایی خطی ۴۵

۳-۴ بررسی نتایج کنترل برداری ماشین القایی خطی ۴۷

۳-۵ جبران تغییر پارامترهای ماشین در کنترل برداری ۶۶

۳-۵-۱ اثر تغییر پارامترها در کنترل برداری غیر مستقیم ۶۶

۳-۵-۲ مروری بر روش های جبران اثر تغییر پارامترهای ماشین القایی ۶۸

۳-۵-۳ مقایسه عملکرد روش تنظیم لحظه به لحظه با روش خود تنظیم ۷۵

نتیجه گیری و پیشنهادها ۷۷

منابع ۷۹

ضمیمه الف مشخصات موتور القایی خطی استفاده شده برای شبیه سازی ۸۱

ضمیمه ب برنامه های کامپیوتری ۸۲

ضمیمه پ مقاله ۸۸

فهرست شکل ها

شکل **صفحه**

فصل اول

شکل (۱-۱) موتور القایی خطی و نمودارهای "جریان فوکو- طول موتور" و "شار فاصله هوایی – طول موتور" ۱۵

شکل (۱-۲) جریان فوکو در طول موتور ۱۵

شکل (۱-۳) mmf در فاصله هوایی ۱۷

شکل (۱-۴) مدار معادل موتور القایی خطی ۱۸

فصل دوم

شکل(۲-۱) انواع روش های کنترل اسکالر ۲۲

شکل (۲-۲) کنترل اسکالر موتور القایی ۲۳

شکل (۲-۳) دیاگرام فازوری جریان های موتور القایی ۲۶

شکل (۲-۴) اجرای کنترل برداری ۲۶

شکل (۲-۵) بلوک دیاگرام کنترل برداری مستقیم ۲۹

شکل (۲-۶) دیاگرام برداری در حالت کنترل برداری مستقیم ۳۱

شکل(۲- ۷) دیاگرام برداری در حالت کنترل برداری غیر مستقیم ۳۱

شکل(۲-۸) اجرای کنترل برداری غیر مستقیم ۳۳

فصل سوم

شکل (۳-۱) نمودار "سرعت – زمان" ماشین القایی در حالت راه اندازی بدون بار با ولتاژ تغذیه سینوسی ۳۷

شکل (۳-۲) نمودار "سرعت خطی- زمان " ماشین القایی خطی در حالت راه اندازی بدون بار با ولتاژ تغذیه سینوسی ۳۷

شکل (۳-۳) نمودار " گشتاور- زمان" ماشین القایی خطی در حالت راه اندازی بدون بار با ولتاژ تغذیه سینوسی ۳۸

شکل (۳-۴) نمودار "جریان استاتور – زمان" ماشین القایی خطی در حالت راه اندازی بدون بار با ولتاژ تغذیه ۳۷

سینوسی
شکل (۳-۵) نمودار "سرعت خطی- زمان " ماشین القایی خطی در حالت بارگذاری با ولتاژ تغذیه سینوسی ۳۹
شکل (۳-۶) نمودار "سرعت – زمان" ماشین القایی در حالت بارگذاری با ولتاژ تغذیه سینوسی ۳۹
شکل (۳-۷) نمودار " گشتاور- زمان" ماشین القایی خطی در حالت راه اندازی بدون بار با ولتاژ تغذیه ۴۰
سینوسی
شکل(۳-۸) نمودار "جریان استاتور – زمان" ماشین القایی خطی در حالت راه اندازی بدون بار با ولتاژ تغذیه ۴۰
سینوسی
شکل (۳-۹) بلوک دیاگرام کنترلر PID ۴۱
شکل(۳-۱۰) پاسخ خروجی یک سیستم با ورودی پله ۴۲
شکل(۳-۱۱) اینورتر منبع ولتاژ ۴۴
شکل (۳-۱۲) منحنی های ولتاژ و جریان کنترل شده به روش باند هیسترزیس ۴۴
شکل (۳-۱۳) نمودار "سرعت – زمان" ماشین القایی خطی در حالت راه اندازی بدون بار با روش کنترل ۴۷
برداری
شکل(۳-۱۴) نمودار "سرعت خطی- زمان " ماشین القایی خطی در حالت راه اندازی بدون بار با روش ۴۸
کنترل برداری
شکل(۳-۱۵) نمودار " گشتاور- زمان" ماشین القایی خطی در حالت راه اندازی بدون بار با کنترل برداری ۴۸
شکل (۳-۱۶) نمودار خروجی PI در کنترل برداری در راه اندازی ۴۹
شکل (۳-۱۷) نمودار "جریان استاتور – زمان" ماشین القایی خطی در حالت راه اندازی بدون بار در کنترل ۴۹
برداری
شکل (۳-۱۸) نمودار "جریان محور d استاتور – زمان" ماشین القایی خطی در حالت راه اندازی بدون بار در ۵۰
کنترل برداری
شکل (۳-۱۹) نمودار "جریان محور q استاتور – زمان" ماشین القایی خطی در حالت راه اندازی بدون بار در ۵۰
کنترل برداری
شکل (۳-۲۰) نمودار "سرعت – زمان" ماشین القایی خطی در حالت تغییر سرعت مرجع بدون بار با روش ۵۱
کنترل برداری
شکل (۳-۲۱) نمودار "سرعت خطی- زمان " ماشین القایی خطی در حالت تغییر سرعت مرجع بدون بار با ۵۱
روش کنترل برداری

شکل (۳-۲۲) نمودار " گشتاور- زمان" ماشین القایی خطی در حالت تغییر سرعت مرجع بدون بـار بـا روش کنترل برداری ۵۲

شکل (۳-۲۳) نمودار خروجی PI در حالت تغییر سرعت مرجع بدون بار با روش کنترل برداری ۵۲

شکل (۳-۲۴) نمودار "جریان استاتور – زمان" ماشین القایی خطی در حالت تغییر سرعت مرجع بدون بار بـا روش کنترل برداری ۵۳

شکل (۳-۲۵) نمودار "جریان محور d استاتور – زمان" ماشین القایی خطی در حالـت تغییـر سـرعت مرجـع بدون بار با روش کنترل برداری ۵۳

شکل (۳-۲۶) نمودار "جریان محور q استاتور – زمان" ماشین القایی خطی در حالـت تغییـر سـرعت مرجـع بدون بار با روش کنترل برداری ۵۴

شکل (۳-۲۷) نمودار "سرعت – زمان" ماشین القایی خطی در حالت تغییر بار از صـفر بـه 50N.m بـا روش کنترل برداری ۵۵

شکل (۳-۲۸) نمودار "سرعت خطی- زمان " ماشین القایی خطی در حالت تغییر بار از صفر بـه 50N.m بـا روش کنترل برداری ۵۵

شکل (۳-۲۹) نمودار " گشتاور- زمان" ماشین القایی خطی در حالت تغییر بار از صفر بـه 50N.m بـا روش کنترل برداری ۵۶

شکل (۳-۳۰) نمودار خروجی PI در حالت تغییر بار از صفر به 50N.m با روش کنترل برداری ۵۶

شکل(۳-۳۱) نمودار "جریان استاتور – زمان" ماشین القایی خطی در حالت تغییر بار از صفر بـه 50N.m بـا روش کنترل برداری ۵۷

شکل (۳-۳۲) نمودار "جریان محور d استاتور – زمان" ماشین القایی خطی در حالت تغییـر بـار از صـفر بـه 50N.m با روش کنترل برداری ۵۷

شکل (۳-۳۳) نمودار "جریان محور q استاتور – زمان" ماشین القایی خطی در حالت تغییـر بـار از صـفر بـه 50N.m با روش کنترل برداری ۵۸

شکل (۳-۳۴) نمودار "سرعت - زمان " ماشین القـایی خطـی در حالـت تغییـر مرجـع بـار از 50N.m بـه 100N.m در سرعت 30rad/s با روش کنترل برداری ۵۹

شکل (۳-۳۵) نمودار "سرعت خطی- زمان " ماشین القایی خطی در حالت تغییر مرجع بار از 50N.m بـه 100N.m در سرعت 30rad/s با روش کنترل برداری ۵۹

شکل (۳-۳۶) نمودار " گشتاور- زمان" ماشین القایی خطی در حالت تغییر مرجع بار از 50N.m به 100N.m در سرعت 30rad/s با روش کنترل برداری ۶۰

شکل (۳-۳۷) نمودار خروجی PI در حالت تغییر مرجع بار از 50N.m به 100N.m در سرعت 30rad/s با روش کنترل برداری ۶۰

شکل (۳-۳۸) نمودار "جریان استاتور – زمان" ماشین القایی خطی در حالت تغییر مرجع بار از 50N.m به 100N.m در سرعت 30rad/s با روش کنترل برداری ۶۱

شکل (۳-۳۹) نمودار "جریان محور d استاتور – زمان" ماشین القایی خطی در حالت تغییر مرجع بار از 50N.m به 100N.m در سرعت 30rad/s با روش کنترل برداری ۶۱

شکل(۳-۴۰) نمودار "جریان محور q استاتور – زمان" ماشین القایی خطی در حالت تغییر مرجع بار از 50N.m به 100N.m در سرعت 30rad/s با روش کنترل برداری ۶۲

شکل(۳-۴۱) نمودار "سرعت - زمان " ماشین القایی خطی در حالت تغییر مرجع سرعت از 30rad/s به 50rad/s در بار 100N.m با روش کنترل برداری ۶۲

شکل (۳-۴۲) نمودار "سرعت خطی- زمان " ماشین القایی خطی در حالت تغییر مرجع سرعت از 30rad/s به 50rad/s در بار 100N.m با روش کنترل برداری ۶۳

شکل (۳-۴۳) نمودار " گشتاور- زمان" ماشین القایی خطی در حالت تغییر مرجع سرعت از 30rad/s به 50rad/s در بار 100N.m با روش کنترل برداری ۶۳

شکل (۳-۴۴) نمودار خروجی PI در حالت تغییر مرجع سرعت از 30rad/s به 50rad/s در بار 100N.m با روش کنترل برداری ۶۴

شکل (۳-۴۵) نمودار "جریان استاتور – زمان" ماشین القایی خطی در حالت تغییر مرجع سرعت از 30rad/s به 50rad/s در بار 100N.m با روش کنترل برداری ۶۴

شکل (۳-۴۶) نمودار "جریان محور d استاتور – زمان" ماشین القایی خطی در حالت تغییر مرجع سرعت از 30rad/s به 50rad/s در بار 100N.m با روش کنترل برداری ۶۵

شکل (۳-۴۷) نمودار "جریان محور q استاتور – زمان" ماشین القایی خطی در حالت تغییر مرجع سرعت از 30rad/s به 50rad/s در بار 100N.m با روش کنترل برداری ۶۵

شکل (۳-۴۸) مشخصه شار شرایط تغییر ثابت زمانی روتور ۶۷

شکل (۳-۴۹) مشخصه گشتاور در شرایط تغییر ثابت زمانی روتور ۶۷

شکل (۳-۵۰) جبران تغییر ثابت زمانی روتور ۷۲
شکل (۳-۵۱) تغییر مقاومت روتور در طی شبیه سازی ۷۳
شکل (۳-۵۲) گشتاور ماشین بدون جبران تغییر مقاومت ۷۳
شکل (۳-۵۳) گشتاور ماشین بدون جبران تغییر مقاومت با فیلترینگ برای مشاهده افت ۲۰ درصدی گشتاور ۷۳
شکل (۳-۵۴) گشتاور ماشین با استفاده از تنظیم لحظه به لحظه ثابت زمانی ۷۴
شکل (۳-۵۵) تغییر مقاومت روتور در طی شبیه سازی ۷۴
شکل (۳-۵۶) گشتاور ماشین بدون جبران تغییر مقاومت ۷۴
شکل (۳-۵۷) گشتاور ماشین بدون جبران تغییر مقاومت با فیلترینگ برای مشاهده افت ۲۰ درصدی گشتاور ۷۵
شکل (۳-۵۸) گشتاور ماشین با استفاده از تنظیم لحظه به لحظه ثابت زمانی ۷۵
شکل (۳-۵۹) مقاومت روتور تخمین زده شده در روش تطبیق به روش خود تنظیم ۷۶
شکل ۱ ضمیمه ب بلوک دیاگرام اجزاء سیستم ۸۳
شکل ۲ ضمیمه ب اجرای معادلات ریاضی موتور القایی خطی ۸۴
شکل ۳ ضمیمه ب قسمت های مختلف کنترل برداری ۸۵
شکل ۴ ضمیمه ب محاسبه F و F^* ۸۶
شکل ۵ ضمیمه ب محاسبه ΔF ۸۷
شکل ۶ ضمیمه ب تبدیل dq0 ۸۷

چکیده

کنترل برداری ماشین های خطی القایی

اکبر مهدوی

امروزه پیشرفت های صنعتی در زمینه های الکترونیک قدرت، امکان استفاده از درایوهای ac را در سیستم های مختلف صنعتی فراهم کرده است. کنترل این درایوها، با استفاده از جهت یابی میدان موتور القایی، یکی از برترین روش ها است، زیرا در این روش موتور القایی رفتاری مشابه با موتورهای dc از خود نشان می دهد. بنابراین درایوهای ac که با این روش کنترل می شوند، جایگزین بسیار مطمئنی برای موتورهای dc می باشند.

در سال های اخیر روند رو به رشدی در استفاده از موتورهای القایی خطی بوجود آمده است. شکل این موتورها باعث شده است تا در مواردی که استفاده از موتورهای دوار عملاً ممکن نیست بکار گرفته شوند.

یکی از روش های کنترلی موتورهای القایی و القای خطی،روش کنترل برداری است که در این پایان نامه به آن پرداخته شده است. ایده اصلی روش کنترل برداری جداسازی وابستگی گشتاور از شار در موتورهای القایی است تا همانند موتورهای dc این دو مستقل از یکدیگر عمل کرده و بتوان آنها را جداگانه کنترل نمود. مدل سازی ماشین القای خطی با در نظر گرفتن اثرات لبه های انتهایی انجام گرفته است. همچنین با توجه به اهمیت جبران تغییر پارامترهای موتور درکنترل برداری به جبران ثابت زمانی روتور پرداخته شده است. این پارامتر با افزایش دمای روتور و اشباع موتور و ... تغییر می یابد.

با توجه به قابلیت ها و انعطاف پذیری نرم افزار MATLAB/SIMULINK از این نرم افزار برای شبیه سازی و مدل سازی اجزاء مختلف سیستم استفاده شده است.

کلید واژه ها: موتور القایی خطی، کنترل برداری، اثر لبه موتور القایی خطی

Abstract

Vector Control of Linear Induction Motor
Akbar Mahdavi

Power electronic development in recent years introduces using of AC drives in different industrial systems. Vector control is one of the best methods of drive controls. Since in this method an induction motor behaves like a DC motor, AC drives which are controlled by this method could be a good replacement of DC motors. Recently, usage of linear induction motors is improved. The physical shape of this type of motors introduces a good replacement of round shape motors in places which is not possible to use this type of motors. In the modeling of a linear induction motor the edge effect of two ends of motor is included. Also. the time constant of the system is compensated by compensating the rotor resistor change, since it is one of important parameters in the vector control of the motor. MATLAB/SIMULINK is used as powerful software for modeling and analysis of the studied system.

Key words: Linear Induction Motor, Vector Control, End Effect

مقدمه

در گذشته استفاده از موتورهای dc در زمینه های که نیاز به کنترل سرعت دقیق داشتند بسیار مرسوم بود. دلیل محبوبیت این گونه موتورها در مجزا بودن سیم پیچ 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 فراهم می سازد. اما استفاده از این موتورها معایب و مشکلاتی نیز به همراه دارد که عمدتاً ناشی از وجود کموتاتور و جاروبک است[۱].

از جمله مشکلات استفاده از این موتورها می توان 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.

با استفاده از موتورهای ac می توان 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 می شد ساختار و الگوریتم کنترلی موتورهای ac است که بسیار پیچیده است.

پیاده سازی سیستم کنترل این موتورها از نظر اقتصادی به صرفه نبود، ولی با پیشرفت تکنولوژی نیمه هادی ها و الکترونیک قدرت هزینه ساخت درایو های ac بسیار کمتر شد.

استفاده از میکروپروسسورهای سریع و ارزان قیمت نیز در پیاده سازی تکنیک های کنترل برداری امکان استفاده از درایوهای ac را در کاربردهای با دقت و کیفیت بالا که به طور مرسوم از درایوهای dc استفاده می شده است فراهم کرده است.

در میان انواع ماشین های ac موتورهای خطی اگر چه به اندازه موتورهـای دوار شـناخته شـده نیـستند و مـورد اسـتفاده قـرار نگرفته اند اما با پیشرفت تکنولوژی و افزایش تنوع در استفاده از موتورهای الکتریکی، این موتورها نیز مورد توجـه خاصـی قـرار گرفته اند.

همان گونه که از عنوان این موتورها مشخص است جابجایی میدان در این موتورها به گونه ای است که حرکت انتقالی یا رفت و بر گشتی ایجاد می کنند و بنابراین جایگزین بسیار مناسبی برای موتورهای دوار هستند که بـرای ایجـاد حرکـت خطـی مـورد استفاده قرار می گیرند.

به طور کلی مهم ترین کاربردهای موتورهای خطی در سیستم هـای حمـل و نقـل بـین شـهری و درون شـهری، آسانـسورها و بسیاری از مواردی است که موتورهای دوار به همراه چرخ دنده و پیچ های حلزونـی توانـائی تولیـد حرکـت خطـی بـا کیفیـت مناسب را ندارند.

یکی از دلایلی که باعث عدم استفاده گسترده از این موتورها شده است، این است که این موتورها ذاتاً دارای فاصله هوائی بزرگ و راندمان کاری پایین هستند. اگر چه یک موتور خطی در مقایسه بـا موتـور دوار بـا قـدرت مـشابه، رانـدمان و کیفیـت کـاری پایین تری دارد، اما استفاده از یک موتور خطی به جای مجموعه موتور دوار و چرخ دنده دارای راندمان بالاتر، قابلیت اطمینـان بیشتر و قیمت و صدای کمتر است.

به طور کلی از مزایای موتورهای القایی خطی به موارد ذیل می توان اشاره کرد:

- شتاب گیری و ترمز سریع با حداقل فرسایش
- ساختمان ساده و سادگی خدمات نگهداری، تعمیر و تعویض قطعات

در مقابل مزایای فوق پدیده های منحصر به فردی نیز در این نوع موتورها وجود دارند که ناشی از ساختار فیزیکـی خـاص ایـن نوع موتورها است و برای دستیابی به نتایج قابل قبول باید مورد توجه قرار گیرند که عبارتند از:

- وجود اثرات لبه های انتهایی که ناشی از طول محدود مغناطیسی در امتداد مسیر حرکت موتور است و در عملکرد موتور اثر منفی دارد. البته در کاربردهای با سرعت پایین این اثر قابل چشم پوشی است.
- وجود فاصله هوائی نسبتاً بزرگ و در نتیجه کاهش راندمان و ضریب قدرت.

با استفاده از تکنیک کنترل برداری، امکان کنترل گشتاور و شار در ماشین های ac ، مشابه ماشین های dc فراهم می شود. بر اساس این روش فازور جریان استاتور به دو جزء تولید کننده شار و گشتاور تجزیه مـی شـود، بـه گونـه ای کـه امکـان کنتـرل مستقل و مجزا از هم شار و گشتاور در ماشین های ac میسر می شود[۲].

اما برخلاف ماشین های dc که کنترل اندازه جریان های آرمیچر و میدان بـه تنهـایی کـافی اسـت، در ماشـین هـای ac بایـد فرکانس، فاز و اندازه جریان استاتور به طور همزمان کنترل شود.

همچنین در ماشین های dc به علت وجود جاروبک ها و کموتاتور، میدان های آرمیچر و تحریک بر یکدیگر عمود و نسبت به هم ثابت هستند. در حالی که در ماشین های ac بردارهای فازوری جریان، شار و میدان مغناطیسی نسبت به هم متحرک هستند و کنترل اندازه و موقعیت آنها از خارج از موتور و توسط اینورتر صورت می گیرد. به همین علت انواع مختلفی از مبدل ها برای کنترل این موتورها مورد استفاده قرار می گیرند (اینورترهای منبع جریان، اینورترهای منبع ولتاژ سیکلوکنورترها). به دلایل فوق پیاده سازی سیستم کنترل موتورهای القایی در مقایسه با موتورهای جریان مستقیم بسیار پیچیده تر است.

در روش کنترل برداری قاب مرجع می تواند هم جهت با شار روتور، شار استاتور و یا شار فاصله هوائی باشد، که هر کدام از این روش ها مزایا و معایب خاص خود را دارند. ارزیابی و تجریه و تحلیل رفتار درایوهای موتور القایی که با تکنیک کنترل برداری کنترل می شوند را می توان با استفاده از شبیه سازی سیستم و صرف هزینه بسیار کم مورد مطالعه قرار داد.

از مزایای این روش اینکه می توان به راحتی با تغییر متغییرهای دلخواه سیستم ماشین های مختلف را تست نمود در حالی که در آزمایش های عملی این کار یا مستلزم صرف وقت و هزینه اضافه است.

یکی از نرم افزارهای قدرتمند و با انعطاف بالا در شبیه سازی درایوهای الکتریکی نرم افزار MATLAB و زیر مجموعه آن به نام SIMULINK است که در طراحی و مدل سازی درایوهای الکتریکی بسیار مورد توجه قرار دارد. SIMULINK یک محیط گرافیکی شامل بلوک های توابع انتقال، انتگرال گیر و بسیاری توابع از پیش تعیین شده است که امکان انجام محاسبات را بدون برنامه نویسی فراهم می آورد.

در فصل اول پروژه حاضر به مدل سازی ماشین های القایی خطی پرداخته و با استفاده از تبدیل پارک مدلی از موتور القایی ارائه می شود که با روش کنترل برداری بیشترین همخوانی را داشته باشد.

در شبیه سازی موتور القایی خطی نیز به تفاوت های آن با موتور القایی معمولی پرداخته و به معرفی اثر انتهایی (End Effect) که باعث تمایز این نوع ماشین ها می شود نموده و معادلات دیفرانسیل آن ارائه می شود.

در فصل دوم روش های کنترل موتورهای القایی بررسی شده و به اختصار روش کنترل برداری معرفی می شود و دلایل انتخاب این نوع کنترل برای ماشین های القایی شرح داده می شود، در ادامه نحوه اجرای کنترل برداری برای ماشین القایی خطی توصیف شده و معادلات آن بدست می آید.

در فصل سوم به شبیه سازی ماشین القایی خطی و کنترل برداری آن پرداخته و نتایج بررسی خواهد شد، در ابتدا ماشین خطی که بدون کنترل راه اندازی می شود بررسی می گردد، سپس با اضافه نمودن کنترل برداری به آن، پاسخ سیستم به تغییرات بار و سرعت را خواهیم داشت. در ادامه به بررسی اثر تغییر پارامترهای موتور القایی در زمان اجرای کنترل برداری پرداخته می شود.

با توجه به مدل ریاضی ماشین القایی در کنترل برداری، محاسبات اجرای کنترل برداری بستگی به مقادیر مقاومت روتور و اندوکتانس روتور خواهد داشت و این پارامتر بواسطه اشباع و افزایش درجه حرارت تغییر می کند و تغییر در این پارامترها باعث اختلال در سیستم کنترل برداری می شود که از روش تنظیم لحظه به لحظه برای جبران آنها بهره برده می شود.

در این روش با توجه به ایده ای که در انتهای فصل سوم بیان می شود مقاومت واقعی را تخمین می زنیم و در کنترل برداری اعمال می نماییم.

فصل اول

مدل سازی ماشین های القایی خطی[1]

۱-۱ مقدمه

با توجه به اینکه نیازمند این هستیم تا ماشین القایی را برای شبیه سازی به صورت مدل ریاضی بیان نماییم در این فصل سعی شده است تا مناسب ترین مدل ریاضی که برای روش های کنترلی ماشین نیز مناسب باشد بیان شود. با استفاده از تبدیل پارک[2] می توان ماشین را از فضای معمول به یک فضای سه بعدی انتقال داد و معادلات فیزیکی را بر اساس آنها نوشت، در این فضا سه بردار بر هم عمود وجود دارند که متغییرهای حقیقی بر اساس آنها باز تعریف می شوند. پس از اینکه مدل ماشین القایی را در این فضا بدست آوردیم تفاوت های آنرا با ماشین القایی خطی یادآور شده و تغییرات لازم را در معادلات ایجاد می کنیم تا مدل ماشین القایی خطی نیز بدست آید.

1 - Linear Induction Motor
2 - Park conversion

۱-۲ مدل dq0 ماشین القایی سه فاز معمولی

۱-۲-۱ ماتریس تبدیل پارک

اساس مدل dq0 یک ماشین الکتریکی بر انتقال متغییرهای حقیقی آن تحت ماتریس تبدیل پارک قرار دارد. تحت این تبدیل معادلات و متغییرهای ماشین از فضای فیزیکی و واقعی که یک فضای سه بعدی است به دو زیر فضای عمود بر هم که یکی از آنها دو بعدی است (فضای dq) و دیگری یک بعدی (فضای 0)، تصویر می شوند. عبارت ماتریس پارک برای ماشین سه فاز معمولی به صورت رابطهٔ (۱-۱) می باشد:

$$[T_P]=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\cos\theta_e & \cos(\theta_e-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e-\frac{4\pi}{3})\\ \sin\theta_e & \sin(\theta_e-\frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_e-\frac{4\pi}{3})\\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}}\end{bmatrix} \qquad (۱-۱)$$

که در آن θ_e زاویهٔ بین محور d از زیر فضای dq و محور فاز "a" استاتور می باشد. اگر در ساختار ماتریس پارک دقت شود این ماتریس از کنار هم قرار گرفتن چند بردار عمود بر هم ایجاد شده است. این بردارها را بردارهای پایه برای این ماتریس انتقال می گویند. در حالت کلی بردار متغییرهای فاز ماشین دارای شکل کلی رابطه (۱-۲) می باشند (این متغییرها می توانند ولتاژ، جریان، شار و... باشند.):

$$\vec{S}_k(\omega t)=\left[\cos k(\omega t) \quad \cos k(\omega t-\frac{2\pi}{3}) \quad \cos k(\omega t-\frac{\pi}{3})\right]^T \qquad (۱-۲)$$

اولین بردار پایهٔ تشکیل دهندهٔ ماتریس $[T_P]$ از بردار $\vec{S}_k(\theta_e)$ با قرار دادن $k=1$ بدست آمده است:

$$\vec{e}_1=\sqrt{\frac{2}{3}}\left[\cos(\theta_e) \quad \cos(\theta_e-\frac{2\pi}{3}) \quad \cos(\theta_e-\frac{4\pi}{3})\right]^T \qquad (۱-۳)$$

ضریب $\sqrt{\frac{2}{3}}$ به منظور نرمالیزه کردن بردار $\vec{e}_1$ بکار رفته است. دومین بردار با قرار دادن $k=1$ در رابطهٔ $\vec{S}_k(\theta_e-\frac{\pi}{2})$ بدست آمده است. قرار دادن $\theta_e-\frac{\pi}{2}$ عمود بودن $\vec{e}_2$ بر $\vec{e}_1$ را تامین می کند.

$$\vec{e}_2=\sqrt{\frac{2}{3}}\left[\cos(\theta_e-\frac{\pi}{2}) \quad \cos(\theta_e-\frac{\pi}{2}-\frac{2\pi}{3}) \quad \cos(\theta_e-\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{3})\right]^T$$

$$=\sqrt{\frac{2}{3}}\left[\sin(\theta_e) \quad \sin(\theta_e-\frac{2\pi}{3}) \quad \sin(\theta_e-\frac{4\pi}{3})\right]^T \qquad (۱-۴)$$

بردار سوم یعنی $\vec{e}_3$ باید هم بر $\vec{e}_1$ عمود باشد و هم بر $\vec{e}_2$ می توان ثابت کرد که بردار زیر دارای چنین خصوصیتی می باشد:

$$\vec{e}_3 = \sqrt{\frac{2}{3}}\left[\frac{1}{\sqrt{2}} \quad \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \frac{1}{\sqrt{2}}\right]^T \qquad (۵-۱)$$

عمود بودن بردارهای پایهٔ ماتریس $[T_P]$ باعث می شود که متغییرهای انتقال یافته به فضای dq0 بر یکدیگر عمود باشند و در نتیجه به هم بستگی بین آنها نباشد این مزیت باعث می شود که مدل ماشین در فضای dq0 یک مدل مجزا شده[1] باشد.

ماتریس تبدیل پارک $[T_P]$ از کنار هم قرار گرفتن سه بردار پایه $\vec{e}_1$، $\vec{e}_2$ و $\vec{e}_3$ ایجاد می شود:

$$[T_P] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos\theta_e & \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin\theta_e & \sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \qquad (۶-۱)$$

همانگونه که گفته شد θ_e بیانگر زاویهٔ بین محور d صفحهٔ dq و محور فاز a استاتور می باشد و در حالت کلی ممکن است تابع زمان باشد. اگر $\theta_e = 0$ قرار داده شود محور قاب dq همراستا با محور فاز a استاتور قرار می گیرد. در این حالت اصطلاحاً گویند که قاب dq به استاتور چسبیده است یا ساکن می باشد. ممکن است که $\theta_e = \theta_r$ قرار داده شود در این حالت محور d قاب dq همراستا با محور فاز a روتور خواهد بود، در این حالت نیز می گویند که قاب dq به روتور چسبیده است و قاب با سرعت روتور می چرخد.

در بحث مدلسازی که انجام خواهیم داد، ابتدا به منظور سهولت مدل ماشین را در قاب ساکن چسبیده به استاتور بدست می آوریم. آنگاه برای آنکه مدل ماشین را در حالت کلی که قاب dq با سرعت دلخواه می چرخد بدست آوریم از ماتریس دوران استفاده می کنیم. بدست آوردن مدل ماشین در قاب گردان که با سرعت دلخواه می چرخد در مبحث کنترل برداری ماشین بسیار مفید خواهد بود.

۱-۲-۲ مدل dq0 ماشین القایی سه فاز معمولی در قاب ساکن استاتور

برای بدست آوردن مدل dq0 ماشین القایی سه فاز معمولی ابتدا معادلات ولتاژی آنرا در فضای حقیقی (فیزیکی) برای فازهای استاتور و روتور می نویسیم. به این منظور دو فرض اساسی زیر را در نظر می گیریم:

۱- سیم بندی ماشین به صورت سینوسی توزیع شده باشد.

1- decoupled