دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
گروه مهندسی برق قدرت

پایان‌نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق – قدرت

عنوان:

تخمین سرعت موتور هیسترزیس سنکرون در حالت کارکرد آسنکرون

استاد راهنما:

دکتر ابوالفضل حلوایی نیاسر

به‌وسیله:

محمد زارع

مهر ماه ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
گروه مهندسی برق قدرت

پایان‌نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق – قدرت

عنوان:

تخمین سرعت موتور هیسترزیس سنکرون در حالت کارکرد آسنکرون

استاد راهنما:

دکتر ابوالفضل حلوایی نیاسر

به وسیله:

محمد زارع

مهر ماه ۱۳۹۱

تقدیم به

محضر ارزشمند پدر و مادرم
و همه اســتادان فرزانه وفرهیخته‌ای که مرا در راه کسب
علم و معرفت یاری فرموده‌اند.

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس خدای را که توفیق کسب دانش و معرفت را به ما عطا فرمود. در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تمامی اساتید بزرگوار، به ویژه اساتید دوره کارشناسی ارشد که در طول سالیان گذشته مرا در تحصیل علم و معرفت و فضایل اخلاقی یاری نموده‌اند تقدیر و تشکر نمایم.

از استاد گرامی و بزرگوار جناب آقای دکتر ابوالفضل حلوایی که راهنمایی اینجانب را در انجام تحقیق، پژوهش و نگارش این پایان‌نامه تقبل نموده‌اند نهایت تشکر و سپاسگزاری را دارم.

همچنین از تشریک مساعی آقایان دکتر سید عباس طاهر و دکتر بابک گنجی به عنوان اساتید داور که این پایان‌نامه را مورد مطالعه قرار داده و در جلسه دفاعیه شرکت نموده‌اند تشکر می‌نمایم.

در پایان از جناب آقای دکتر غلامحسین فتح‌تبار که به عنوان نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه قبول زحمت نموده‌اند سپاسگزاری می‌نمایم.

چکیده

موتورهای هیسترزیس در گروه موتورهای سنکرون قرار می‌گیرند که معمولاً در سرعت-های بسیار بالا کار می‌کنند و کاربردهای مختلفی در صنعت دارند؛ از جمله توربین گازهای کوچک، سانتریفیوژهای سرعت بالا و ... این موتورها اگرچه سنکرون هستند، اما در حالت آسنکرون نیز کار می کنند. در برخی کاربردهای خاص ممکن است موتور در حالت آسنکرون کار کند، بنابراین اطلاع از میزان سرعت آن ضروری خواهد بود. علاوه بر این، در این حالت استفاده از حسگرهای سرعت به دلیل نوع خاص بار و سختی نصب آن، غیر ممکن بوده و همچنین حضور حسگرهای سرعت اغلب هزینه و پیچیدگی سیستم درایو را افزایش می‌دهد. بنابراین استفاده از روش های تخمین سرعت بدون حسگر، راه‌حل مناسبی خواهد بود. اما تاکنون هیچ راهکار و تکنیک بدون حسگری برای موتورهای هیسترزیس طراحی نشده است. در این پروژه، پس از معرفی موتور هیسترزیس و چگونگی کارکرد آن، مدل‌های استاتیکی و دینامیکی به دست آمده برای موتور، در محیط Simulink شبیه سازی می‌شود و کارکرد آن به صورت تغذیه مستقیم و حلقه‌باز مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. پس از آن به معرفی روش‌های تخمین سرعت پرداخته می‌شود. مناسب‌ترین روش برای تخمین سرعت، روش سیستم تطبیقی مدل مرجع (MRAS) می‌باشد که دقت مطلوب و بار محاسباتی کمتری دارد. برای اجرای کنترل برداری نیز، از روش کنترل برداری غیرمستقیم با اینورتر منبع ولتاژ کنترل‌شده با جریان استفاده می‌شود. این روش که پیچیدگی محاسباتی کمتری دارد و استفاده از حسگر موقعیت اثر هال نیز حذف شده است، نسبت به سایر روش‌ها ارجح است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌هد درایو بدون حسگر ارائه شده، کنترل موتور هیسترزیس را در شرایط مختلف، تحت بارها و سرعت‌های مختلف با دقت مناسب و خطایی کمتر از یک درصد انجام می‌دهد.

کلمات کلیدی: موتور هیسترزیس، تخمین سرعت، سیستم تطبیقی مدل مرجع، حسگر سرعت

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... الف
فهرست جداول ..... ه
فهرست شکل‌ها ..... و
لیست علائم و اختصارات ..... ی

فصل اول: مقدمه

۱-۱- موتورهای هیسترزیس ۲
۱-۲- کلیات ۲
۱-۳- اهداف پایان‌نامه ۴
۱-۴- راهنمای پایان‌نامه ۵

فصل دوم: موتورهای هیسترزیس

۲-۱- مقدمه ۷
۲-۲- گشتاور در موتور هیسترزیس ۸
۲-۲-۱- معادلات عمومی گشتاور ۹
۲-۲-۲- بیان فیزیکی معادله گشتاور ۱۲
۲-۲-۳- گشتاور در سرعت سنکرون ۱۳
۲-۲-۴- محاسبه گشتاور از توان تلفاتی هیسترزیس در روتور ۱۴
۲-۳- خصوصیات موتور هیسترزیس ۱۶
۲-۴- مقایسه موتور هیسترزیس با انواع دیگر موتور سنکرون ۱۷
۲-۵- مواد مغناطیسی و تأثیر آن‌ها بر عملکرد موتور ۱۸

فصل سوم: مدل سازی موتور هیسترزیس

۳-۱- مقدمه ۲۳
۳-۲- مدل استاتیکی موتور هیسترزیس ۲۴
۳-۲-۱- تحلیل موتور هیسترزیس شار محیطی ۲۴

فهرست مطالب

۳-۲-۲- مدارهای معادل موتور هیسترزیس در حالت سنکرون ۳۰
۳-۲-۲-۱- مدار معادل با حلقه هیسترزیس ایده‌آل ۳۰
۳-۲-۲-۲- مدار معادل بهبود یافته موتور هیسترزیس ۳۲
۳-۲-۲-۳- مدار معادل بهبود یافته به روش تقریب دوم ۳۶
۳-۲-۲-۴- رابطه گشتاور در موتور هیسترزیس شار محیطی ۳۸
۳-۲-۲-۵- روابط حاکم بر ماشن‌های چند قطبی ۳۹
۳-۲-۳- مدار معادل موتور هیسترزیس در حالت زیر سنکرون ۴۰
۳-۳- استخراج پارامترهای مدار معادل موتور هیسترزیس ۴۵
۳-۳-۱- محاسبه مقاومت سیم‌پیچ استاتور ۴۵
۳-۳-۲- محاسبه راکتانس پراکندگی سیم‌پیچ استاتور (X_{ls}) ۴۶
۳-۳-۳- محاسبه راکتانس مغناطیس کنندگی (X_m) ۴۸
۳-۳-۴- محاسبه مقاومت معادل روتور (R'_r) و مقاومت هیسترزیس (R_h) ۵۲
۳-۳-۵- محاسبه راکتانس نشتی روتور (X'_{lr}) و راکتانس هیسترزیس (X_h) ۵۴
۳-۴- مدل‌سازی دینامیکی موتور هیسترزیس ۵۵
۳-۴-۱- مدل ریاضی غیرخطی موتور هیسترزیس ۵۶
۳-۴-۲- مدل موتور هیسترزیس در مختصات مرجع گردان qd0 ..... ۵۹
۳-۴-۲-۱- معرفی دستگاه مختصات مرجع گردان qd0 ..... ۶۰
۳-۴-۲-۲- معادلات ولتاژ در دستگاه qd0 ..... ۶۱
۳-۴-۲-۳- معادلات شار پیوندی در دستگاه qd0 ..... ۶۳
۳-۴-۲-۴- معادله گشتاور در قاب مرجع qd0 ..... ۶۴
۳-۴-۳- پیاده‌سازی مدل موتور هیسترزیس در محیط Matlab/Simulink ۶۸
۳-۴-۳-۱- معادلات ولتاژ و تعیین جریان‌ها ۶۸
۳-۴-۳-۲- رابطه‌ی گشتاور ۷۱
۳-۴-۳-۳- معادله حرکت مجموعه روتور ۷۲
۳-۴-۳-۴- روابط پریونیت گشتاور و معادله حرکت ۷۳
۳-۴-۳-۵- روابط توان ۷۴
۳-۴-۳-۶- بلوک دیاگرام مدل دینامیکی موتور هیسترزیس ۷۴

فهرست مطالب

۳-۴-۴- شبیه‌سازی موتور هیسترزیس ۷۶

۳-۴-۴-۱- پیاده‌سازی مدل دینامیکی در نرم‌افزار Simulink ۷۶

۳-۴-۴-۲- نتایج شبیه‌سازی ۸۰

فصل چهارم: تخمین سرعت موتور هیسترزیس

۴-۱- مقدمه ۸۹

۴-۲- روش‌های تخمین سرعت موتور هیسترزیس ۹۰

۴-۲-۱- روش‌های حلقه‌باز در تخمین سرعت ۹۰

۴-۲-۱-۱- روش شماره ۱ ..... ۹۰

۴-۲-۱-۲- روش شماره ۲ ..... ۹۱

۴-۲-۱-۳- روش شماره ۳ ..... ۹۱

۴-۲-۲- تخمین سرعت با استفاده از سیستم تطبیقی مدل مرجع (MRAS) ... ۹۲

۴-۲-۲-۱- استفاده از قضیه پایداری پوپوف و ناتساوی انتگرالی ۹۳

۴-۲-۲-۲- استفاده از $\mathrm{Im}\left(\psi_r \hat{\psi}_r^*\right)$ به عنوان سیگنال تنظیم سرعت ۹۵

۴-۲-۲-۳- استفاده از $\mathrm{Im}\left(e\hat{e}^*\right)$ به عنوان سیگنال تنظیم سرعت ۹۶

۴-۲-۲-۴- استفاده از توان راکتیو لحظه‌ای ($\mathrm{Im}(v_s i_s^*)$) به عنوان سیگنال تنظیم سرعت ۹۷

۴-۲-۳- تخمین سرعت روتور با استفاده از رویتگرها ۹۸

۴-۲-۳-۱- رویتگر حالت تطبیقی مرتبه کامل (LO) ۹۹

۴-۲-۳-۲- فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) ۱۰۴

۴-۲-۴- استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در تخمین سرعت ۱۰۸

۴-۲-۴-۱- تخمینگر عصبی همزمان تطبیقی با استفاده از مدل مرجع ... ۱۰۹

۴-۲-۴-۲- استفاده از شبکه عصبی ناهمزمان جهت تخمین سرعت ۱۱۲

۴-۲-۵- شبیه‌سازی تخمینگر سرعت موتور هیسترزیس ۱۱۲

۴-۲-۵-۱- شبیه‌سازی تخمینگر سرعت با روش سیستم تطبیقی مدل مرجع ۱۱۰

۴-۲-۵-۲- شبیه‌سازی تخمینگر سرعت با رویتگر لیونبرگر ۱۱۵

۴-۳- کنترل برداری موتور هیسترزیس ۱۱۸

فهرست مطالب

۴-۳-۱- انواع روش‌های کنترل برداری ۱۲۰

۴-۳-۱-۱- کنترل برداری غیرمستقیم با اینورتر منبع ولتاژ کنترل شده با جریان ۱۲۱

۴-۴- کنترل برداری بدون حسگر سرعت موتور هیسترزیس ۱۲۲

۴-۵- شبیه‌سازی کنترل برداری بدون حسگر سرعت موتور هیسترزیس ۱۲۴

۴-۵-۱- نتایج شبیه‌سازی ۱۲۹

۴-۵-۱-۱- کنترل برداری بدون حسگر سرعت در حالت بی‌باری ۱۲۹

۴-۵-۱-۲- کنترل برداری بدون حسگر سرعت تحت بار کامل ۱۳۱

۴-۵-۱-۳- کنترل برداری بدون حسگر سرعت در حالت آسنکرون ۱۳۲

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری ۱۳۶

۵-۲- پیشنهادات ۱۳۷

مراجع و مآخذ ۱۳۸

پیوست‌ها

پیوست ۱: جدول پارامترهای موتور هیسترزیس ۱۴۳

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول (۲-۱): مشخصات مغناطیسی مواد به‌کار رفته در رینگ روتور موتور هیسترزیس ... ۲۰

جدول (۳-۱): محاسبه ضریب C_x برحسب ضریب گام سیم‌پیچی استاتور ۴۷

جدول (پ-۱): پارامترهای موتور هیسترزیس مورد استفاده در شبیه‌سازی ۱۴۳

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل (۲-۱): اجزای اصلی موتور هیسترزیس ۸
شکل (۲-۲): نمای مقطعی موتور هیسترزیس ۸
شکل (۲-۳): رابطه لحظه‌ای B-H در رینگ روتور موتور هیسترزیس ۱۳
شکل (۲-۴): حلقه‌های B-H در حالت افت بار ۱۴
شکل (۲-۵): حلقه‌ی هیسترزیس برای مواد مختلف ۱۶
شکل (۳-۱): مسیر عبور شار مغناطیسی حول یک هادی ۲۵
شکل (۳-۲): منحنی B-H ایده‌آل ماده هیسترزیس روتور ۲۶
شکل (۳-۳): تغییرات چگالی شار فاصله هوایی برحسب θ ۲۸
شکل (۳-۴): نمودار تغییرات ضریب J و زاویه β برحسب توابعی از ضریب K ۳۰
شکل (۳-۵): مدار معادل الکتریکی برای موتور هیسترزیس با حلقه هیسترزیس ایده‌آل ۳۲
شکل (۳-۶): حلقه هیسترزیس اصلاح شده با ضریب نفوذپذیری غیراشباع محدود و ضریب نفوذپذیری اشباع غیر صفر ۳۳
شکل (۳-۷): مدار معادل بهبود یافته موتور هیسترزیس ۳۴
شکل (۳-۸): نمودار تغییرات J و β در تقریب‌های اول و دوم و حالت دقیق بر حسب K ۳۵
شکل (۳-۹): مدار معادل بهبود یافته موتور هیسترزیس (دوگان الکتریکی شکل (۳-۷)) ۳۶
شکل (۳-۱۰): تغییرات تابع گشتاور $JK\sin\beta$ بر حسب K برای روش‌های مختلف تحلیل حلقه هیسترزیس ۳۸
شکل (۳-۱۱): جایگزینی منبع E_p با امپدانس سری در مدار معادل الکتریکی موتور هیسترزیس در حالت سنکرون ۴۱
شکل (۳-۱۲): جایگزینی منبع E_p با امپدانس سری در مدار معادل الکتریکی موتور هیسترزیس در حالت آسنکرون ۴۳
شکل (۳-۱۳): مدار معادل استاتیکی موتور هیسترزیس در حالت کارکرد آسنکرون ۴۴

شکل (۳-۱۴): مدار معادل استاتیکی کلی موتور هیسترزیس با درنظر گرفتن تمام منابع تلفاتی ۴۵
شکل (۳-۱۵): مشخصات شیارهای استاتور موتور هیسترزیس ۴۶
شکل (۳-۱۶): تغییرات ضریب K_b برحسب تعداد شیارهای هر قطب ۴۸
شکل (۳-۱۷): حلقه‌های هیسترزیس یک نمونه ماده به کار رفته در روتور موتور هیسترزیس ۴۹
شکل (۳-۱۸): مساحت حلقه هیسترزیس بر حسب شدت میدان مغناطیسی ۴۹
شکل (۳-۱۹): تغییرات a_1 برحسب شدت میدان مغناطیسی ۵۰
شکل (۳-۲۰): مدل مداری موتور هیسترزیس سه‌فاز برمبنای سیم‌پیچ‌های تزویج شده ۵۷
شکل (۳-۲۱): ارتباط بین محورهای abc و qd0 روی روتور ۶۰
شکل (۳-۲۲): مدار معادل موتور هیسترزیس در دستگاه مختصات qd0 دوار متصل به روتور ۶۴
شکل (۳-۲۳): بلوک دیاگرام مدل دینامیکی موتور هیسترزیس ۷۵
شکل(۳-۲۴): بلوک دیاگرام کلی شبیه‌سازی موتور هیسترزیس در محیط Simulink ۷۷
شکل (۳-۲۵): مدار داخلی بلوک تولیدکننده ولتاژ سه‌فاز موتور ۷۷
شکل (۳-۲۶): مدار داخلی بلوک تبدیل abc به qd0 ..... ۷۷
شکل (۳-۲۷): مدار داخلی بلوک Qaxis ۷۸
شکل (۳-۲۸): مدار داخلی بلوک Daxis ۷۸
شکل (۳-۲۹): مدار داخلی بلوک Rotor ۷۹
شکل(۳-۳۰): مدار داخلی بلوک qd2abc ۸۰
شکل (۳-۳۱): مدار داخلی بلوک Zero_Sequence ۸۰
شکل(۳-۳۲): تغییرات لحظه‌ای ولتاژ موتور هیسترزیس در حالت بی‌باری ۸۱
شکل (۳-۳۳): تغییرات لحظه‌ای جریان موتور هیسترزیس در حالت بی‌باری ۸۲
شکل (۳-۳۴): تغییرات گشتاور، سرعت و توان حقیقی موتور هیسترزیس در حالت بی‌باری ۸۳
شکل (۳-۳۵): تغییرات ضریب توان، توان‌های حقیقی، موهومی و ظاهری موتور هیسترزیس در حالت بی‌باری ۸۴
شکل (۳-۳۶): تغییرات لحظه‌ای ولتاژ موتور هیسترزیس تحت بار کامل ۸۵

شکل (۳-۳۷): تغییرات لحظه‌ای جریان موتور هیسترزیس تحت بار کامل ۸۵
شکل (۳-۳۸): تغییرات گشتاور، سرعت و توان حقیقی موتور هیسترزیس تحت بار کامل ۸۷
شکل (۳-۳۹): تغییرات ضریب توان، توان‌های حقیقی، موهومی و ظاهری موتور هیسترزیس تحت بار کامل ۸۷
شکل (۴-۱): شمای تخمین‌گر سرعت براساس مدل MRAS ۹۳
شکل (۴-۲): تخمینگر سرعت مبتنی بر MRAS با سیگنال تنظیم سرعت شار روتور ۹۶
شکل (۴-۳): تخمینگر سرعت مبتنی بر MRAS با سیگنال تنظیم سرعت نیروی ضدمحرکه ۹۷
شکل (۴-۴): رویتگر تطبیقی سرعت (ALO) ۱۰۲
شکل (۴-۵): ساختار فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) ۱۰۸
شکل (۴-۶): تخمنگر سرعت تطبیقی با استفاده از ANN ۱۰۹
شکل (۴-۷): شبکه عصبی دولایه جهت تخمین سرعت ۱۱۱
شکل (۴-۸): پیاده سازی موتور هیسترزیس با تخمینگر سرعت MRAS در محیط Simulink ۱۱۳
شکل (۴-۹): تخمینگر سرعت MRAS ۱۱۴
شکل (۴-۱۰): مقایسه سرعت واقعی و سرعت تخمینی MRAS در موتور هیسترزیس ... ۱۱۵
شکل (۴-۱۱): موتور هیسترزیس با تخمینگر سرعت لیونبرگر ۱۱۶
شکل (۴-۱۲): مدار داخلی تخمینگر سرعت لیونبرگر ۱۱۷
شکل (۴-۱۳): مدار داخلی بلوک تخمینگر حالت در رویتگر لیونبرگر ۱۱۷
شکل (۴-۱۴): مقایسه سرعت واقعی و سرعت تخمینی رویتگر لیونبرگر در موتور هیسترزیس ۱۱۸
شکل (۴-۱۵): مؤلفه‌های محورهای qd موتور در مختصات سنکرون ۱۲۱
شکل (۴-۱۶): کنترل برداری غیرمستقیم با اینورتر کنترل‌شده با جریان ۱۲۲
شکل (۴-۱۷): بلوک دیاگرام سیستم کنترل برداری بدون حسگر موتور هیسترزیس ۱۲۳
شکل (۴-۱۸): پیاده‌سازی کنترل برداری بدون حسگر سرعت موتور هیسترزیس در Simulink ۱۲۵
شکل (۴-۱۹): مدار داخلی بلوک Vector Control ۱۲۵

شکل (۴-۲۰): مدار داخلی بلوک qd2abc ۱۲۵
شکل (۴-۲۱): مدارهای داخلی بلوک PWM Inverter ۱۲۷
شکل (۴-۲۲): مدارهای داخلی بلوک تخمینگر سرعت ۱۲۸
شکل (۴-۲۳): گشتاور، سرعت واقعی و تخمینی و خطای تخمین موتور هیسترزیس در حالت بی‌باری در کنترل برداری بدون حسگر ۱۲۹
شکل (۴-۲۴): تغیرات لحظه‌ای ولتاژ استاتور در حالت بی‌باری در کنترل برداری بدون حسگر سرعت ۱۳۰
شکل (۴-۲۵): تغیرات لحظه‌ای جریان استاتور در حالت بی‌باری در کنترل برداری بدون حسگر سرعت ۱۳۰
شکل (۴-۲۶): گشتاور، سرعت واقعی و تخمینی و خطای تخمین موتور هیسترزیس تحت بار کامل در کنترل برداری بدون حسگر سرعت ۱۳۱
شکل (۴-۲۷): تغیرات لحظه‌ای ولتاژ استاتور در حالت بار کامل در کنترل برداری بدون حسگر سرعت ۱۳۲
شکل (۴-۲۸): تغیرات لحظه‌ای جریان استاتور در حالت بار کامل در کنترل برداری بدون حسگر سرعت ۱۳۲
شکل (۴-۲۹): گشتاور، سرعت واقعی و سرعت تخمینی و خطای تخمین موتور با تغییر حالت کاری از سنکرون به زیرسنکرون ۱۳۳
شکل (۴-۳۰): گشتاور، سرعت واقعی و سرعت تخمینی و خطای تخمین موتور با تغییر حالت کاری از سنکرون به فوق سنکرون ۱۳۴

لیست علائم و اختصارات

ضریب مؤلفه کسینوسی مؤلفه اصلی بسط فوریه چگالی شار در ماده روتور	a_1
سطح حلقه هیسترزیس B-H	A
سطح فاصله هوایی در هر قطب	A_g
سطح مقطع دندانه استاتور	A_t
سطح مقطع یوغ استاتور	A_y
گام متوسط سیم‌پیچی استاتور	ACT
ضریب مؤلفه سینوسی مؤلفه اصلی بسط فوریه چگالی شار در ماده روتور	b_1
چگالی شار پسماندی نسبی	b_r
چگالی شدت میدان (شار) مغناطیسی	B
چگالی شار فاصله هوایی	B_g
چگالی شار فاصله هوایی در زاویه θ	$B_{g\theta}$
چگالی شار در ماده هیسترزیس	B_h
چگالی شار در ماده هیسترزیس در تقریب متوازی‌الاضلاع حلقه B-H	B'_h
چگالی شار در ماده هیسترزیس در زاویه θ	$B_{h\theta}$
چگالی شار مغناطیسی اشباع در منحنی B-H	B_m
دامنه مؤلفه هارمونیک اصلی چگالی شار در ماده هیسترزیس	B_q
چگالی شار پسماند	B_r
چگالی شار در دندانه استاتور	B_t
چگالی شار در یوغ استاتور	B_y
مقدار ثابت وابسته به θ در رابطه چگالی شار	C
ثابت توزیع	C_x
تعداد هادی‌های داخل شیار استاتور	CSL
قطر مقطع هادی استاتور	d
عمق ورودی شیار	d_{10}
طول بخش ذوزنقه‌ای شیار	d_{11}
طول بخش مستطیلی شیار	d_{14}
ضریب میرایی روتور	D_{omega}
ولتاژ اعمال شده به فاز a سیم‌پیچی استاتور در مدل ماندگار	E_a
مؤلفه روی محور d بردار ولتاژ القا شده در استاتور	E_{ds}
مؤلفه روی محور q بردار ولتاژ القا شده در استاتور	E_{qs}
ولتاژ القا شده در فاصله هوایی در مدل ماندگار	E_g
مقدار مؤثر ولتاژ القا شده در سیم‌پیچی استاتور در مدل ماندگار	E_p
انرژی هیسترزیس	E_h
فرکانس تغذیه استاتور برحسب هرتز	f
متغیر عمومی فاز a استاتور (ولتاژ فاز، جریان یا شار)	f_a
متغیر عمومی فاز b استاتور (ولتاژ فاز، جریان یا شار)	f_b

لیست علائم و اختصارات

متغیر عمومی فاز c استاتور (ولتاژ فاز، جریان یا شار)	f_c
متغیر عمومی استاتور (ولتاژ فاز، جریان یا شار) انتقال یافته روی محور d	f_d
متغیر عمومی استاتور (ولتاژ فاز، جریان یا شار) انتقال یافته روی محور q	f_q
مؤلفه صفر متغیر عمومی استاتور (ولتاژ فاز، جریان یا شار) انتقال یافته به دستگاه qd0	f_0
نیروی محرکه مغناطیسی ناشی از جریان فاز a در زاویه θ	$F_{a\theta}$
نیروی محرکه مغناطیسی کل در زاویه θ	F_θ
نیروی محرکه مغناطیسی تونن	F_q
حداکثر دامنه نیروی محرکه مغناطیسی تونن	$\hat{F}_q$
نیروی محرکه مغناطیسی یا آمپر-دور فاصله هوایی	F_g
مجموع آمپر-دورهای دندانه، یوغ و فاصله هوایی	F_{ytg}
فاصله هوایی	g
طول مؤثر فاصله هوایی	g_e
بهره رویتگر حالت	G
شدت میدان مغناطیسی پسماندزدای نسبی	h_c
ارتفاع استاتور	h_s
ثابت اینرسی موتور	H
شدت میدان مغناطیسی در فاصله هوایی	H_g
شدت میدان مغناطیسی در ماده هیسترزیس	H_h
شدت میدان مغناطیسی در ماده هیسترزیس در تقریب متوازی‌الاضلاع حلقه B-H	H'_h
شدت میدان مغناطیسی در ماده هیسترزیس در زاویه θ	$H_{h\theta}$
شدت میدان مغاطیسی پسماندزدا	H_c
شدت میدان مغناطیسی اشباع منحنی B-H	H_m
دامنه مؤلفه اصلی شدت میدان مغناطیسی در ماده هیسترزیس	H_p
جریان فاز a استاتور	i_a
جریان فاز a استاتور	i_{as}
جریان فاز b استاتور	i_{bs}
جریان فاز c استاتور	i_{cs}
بردار جریان استاتور	i_s^{abc}
جریان فاز a روتور	i_{ar}
جریان فاز b روتور	i_{br}
جریان فاز c روتور	i_{cr}
بردار جریان روتور	i_r^{abc}
مؤلفه روی محور d بردار جریان روتور	i_{dr}
مؤلفه روی محور d بردار جریان روتور در قاب مرجع سنکرون	i_{dr}^e
مؤلفه روی محور q بردار جریان روتور	i_{qr}
مؤلفه روی محور q بردار جریان روتور در قاب مرجع سنکرون	i_{qr}^e

لیست علائم و اختصارات

مؤلفه صفر بردار جریان روتور	i_{0r}
مؤلفه صفر بردار جریان روتور در قاب مرجع سنکرون	i^{e}_{0r}
مؤلفه روی محور d بردار جریان روتور ارجاع شده به استاتور	i'_{dr}
مؤلفه روی محور d بردار جریان روتور ارجاع شده به استاتور در قاب مرجع سنکرون	i'^{e}_{dr}
مؤلفه روی محور q بردار جریان روتور ارجاع شده به استاتور	i'_{qr}
مؤلفه روی محور q بردار جریان روتور ارجاع شده به استاتور در قاب مرجع سنکرون	i'^{e}_{qr}
مؤلفه صفر بردار جریان روتور ارجاع شده به استاتور	i'_{0r}
مؤلفه صفر بردار جریان روتور ارجاع شده به استاتور در قاب مرجع سنکرون	i'^{e}_{0r}
بردار جریان روتور در دستگاه مختصات qd0	i^{qd0}_{r}
مؤلفه روی محور d بردار جریان استاتور	i_{ds}
مؤلفه روی محور d بردار جریان استاتور در قاب مرجع سنکرون	i^{e}_{ds}
مؤلفه روی محور q بردار جریان استاتور	i_{qs}
مؤلفه روی محور q بردار جریان استاتور در قاب مرجع سنکرون	i^{e}_{qs}
مؤلفه صفر بردار جریان استاتور	i_{0s}
مؤلفه صفر بردار جریان استاتور در قاب مرجع سنکرون	i^{e}_{0s}
بردار جریان استاتور در دستگاه مختصات qd0	i^{qd0}_{s}
جریان مغناطیس کنندگی موتور	i_{mr}
مقدار پیک جریان استاتور	$\hat{I}$
جریان آرمیچر موتور DC	I_a
جریان ورودی فاز a استاتور در مدل حالت ماندگار	I_a
جریان پایه (مبنا)	I_b
جریان فوکو روتور در شرایط آسنکرون در مدل حالت ماندگار	I_e
جریان تلفات پارازیتی ناشی از شار فاصله هوایی موتور در مدل حالت ماندگار	I_f
جریان میدان در موتور DC	I_f
جریان مقاومت هیسترزیس روتور در مدل حالت ماندگار	I_h
جریان متناظر تلفات هسته استاتور در مدل حالت ماندگار	I_i
جریان مغناطیس کنندگی استاتور	I_m
ممان اینرسی کل روی محور روتور	J
ضریب وابسته به K در رابطه چگالی شار	J
ضریب وابسته به ساختمان موتور در رابطه گشتاور	K
ماتریس بهره فیلتر کالمن	K
میزان جریان بر واحد استاتور برای ایجاد نیروی پسماندزدا	K
ضریب وابسته به تعداد شیار	K_b
مقدار بحرانی ضریب K	K_c
ضریب کارتر	K_c

لیست علائم و اختصارات

ضریب وابسته به g_e	K_m
ضریب سطح مقطع دندانه و یوغ استاتور	K_p
ضریب گام سیم‌پیچی شیار	K_{pp}
ضریب فشردگی هسته استاتور	K_{sf}
طول محوری (ارتفاع) رینگ هیسترزیس	l
طول متوسط رینگ هیسترزیس	l_h
اندوکتانس فاصله هوایی	L_g
اندوکتانس معادل ماده هیسترزیس روتور برای حلقه B-H ایده‌آل	L_h
اندوکتانس افزایشی غیراشباع	L_o
اندوکتانس افزایشی اشباع	L_p
اندوکتانس معادل دیده شده از F_q	L_q
اندوکتانس نشتی هر فاز روتور	L_{lr}
اندوکتانس نشتی هر فاز روتور ارجاع شده به استاتور	L'_{lr}
اندوکتانس نشتی هر فاز استاتور	L_{ls}
اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی موتور	L_m
اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی (متقابل) روی محور d	L_{md}
اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی (متقابل) روی محور q	L_{mq}
اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی (متقابل) بین فازهای روتور	L_{rm}
اندوکتانس خودی هر فاز روتور	L_{rr}
اندوکتانس گذرای روتور	L'_r
اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی (متقابل) بین فازهای استاتور	L_{sm}
اندوکتانس متقابل بین یک فاز استاتور و یک فاز روتور و بالعکس	L_{sr}
اندوکتانس خودی هر فاز استاتور	L_{ss}
اندوکتانس گذرای استاتور	L'_s
ماتریس اندوکتانس روتور	L_{rr}^{abc}
ماتریس اندوکتانس متقابل روتور نسبت به استاتور	L_{rs}^{abc}
ماتریس اندوکتانس متقابل استاتور نسبت به روتور	L_{sr}^{abc}
ماتریس اندوکتانس استاتور	L_{ss}^{abc}
طول سیم در هر فاز	L_{ph}
طول هادی در هر نصف دور	LMC
تعداد فازهای موتور هیسترزیس	m
مغناطیس شوندگی ماده روتور	M
نیروی محرکه مغناطیسی	mmf
تعداد دورهای فاز a استاتور	n_a
تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز استاتور	N_{ph}
تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز روتور	N_r