٤٢٨٢٢

۱۳۸۱ /۸/ ۶

دانشگاه تهران
دانشکده فنی
گروه مهندسی برق و کامپیوتر

طراحی بهینهٔ محرکه– موتور SR بر اساس بازده در بازهٔ معینی از گشتاور و سرعت

نگارش

علی دیهیمی

استاد راهنما

دکتر شاهرخ فرهنگی

اساتید مشاور

دکتر کارولوکس

دکتر حمید لسانی

۴۲۵۳۲

رساله برای دریافت درجه دکتری
رشته مهندسی برق

تیر ماه ۱۳۸۱

دانشکدهٔ
فنی

تاریخ: ۸۱/۴/۱۸

«باسمه‌تعالی»

صورتجلسه ارزیابی رساله دکترای مهندسی برق

جلسه دفاعیه از رساله دکترای مهندسی برق آقای مهندس علی دیهیمی تحت عنوان : "طراحی بهینهٔ راندمان محرکه - موتور مقاومت مغناطیسی کلیدزنی شونده در بازهٔ معینی از گشتاور و سرعت" در تاریخ ۸۱/۴/۱۸ تشکیل گردید. پس از دفاع نامبرده از رساله و پرسش و پاسخ، هیأت محترم داوران وارد شور گردید و رساله آقای مهندس علی دیهیمی را با درجه ..... مورد ارزیابی قرار دادند.

۱- دکتر شاهرخ فرهنگی	استاد راهنما
۲- دکتر کارو لوکس	استاد مشاور
۳- دکتر حمید لسانی	استاد مشاور
۴- دکتر مهدی معلم	داور
۵- دکتر ابراهیم افجه‌ای	داور
۶- دکتر صادق واعظ‌زاده	داور
۷- دکتر جواد فیض	داور و سرپرست تحصیلات تکمیلی گروه

دانشگاه تهران - دانشکده فنی
گروه مهندسی برق و کامپیوتر

«باسمه‌تعالی»

فرم ارزشیابی رساله دکتری دانشکده فنی

جلسه دفاعیه رساله دکتری آقای علی دیهیمی به شماره دانشجویی ۸۱۰۱۷۵۲۵۲ در رشته : برق گرایش : قدرت در تاریخ ۸۱/۴/۱۸ تحت‌عنوان : طراحی بهینهٔ راندمان محرکه - موتور مقاومت مغناطیسی کلیدزنی شونده در بازهٔ معینی از گشتاور و سرعت

با حضور هیأت داوران برگزار گردید. پس از ارائه گزارش دانشجو و پرسش و پاسخ ارزیابی هیأت داوران به شرح زیر است :

☑ قبول بدون اصلاحات با درجه ..عالی..
☐ قبول با اصلاحات پیوست با درجه .....
☐ دفاع مجدد پس از انجام اصلاحات پیوست
☐ غیرقابل قبول

- مشخصات و امضاء هیأت داوران

	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر شاهرخ فرهنگی	استادیار	
۲- استاد مشاور (حسب مورد)	دکتر کارو لوکس	استاد	
۳- استاد مشاور (حسب مورد)	دکتر حمید لسانی	دانشیار	
۴- داور مدعو	دکتر مهدی معلم	دانشیار	
۵- داور مدعو	دکتر ابراهیم افجه‌ای	دانشیار	
۶- داور داخلی	دکتر صادق واعظ‌زاده	دانشیار	
۸- داور داخلی و سرپرست تحصیلات تکمیلی گروه	دکتر جواد فیض	استاد	

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده :

با سلام، مراتب جهت استحضار و دستور اقدام مقتضی تأیید می‌گردد.

نام و نام خانوادگی مدیر گروه : محمود کمره‌ای

امضاء و تاریخ : ۱۳۸۱/۶/۹

بی کران سپاس و ستایش پروردگار مهر و دوستی را که بر خاک منت گذارد، بدو نسیم جان بخشید و خرد، گرانبارترین گوهر آفرینش را در صدف وجودش دمید، تا بجوید و در یابد راز گمشدهٔ هستی، عشق را.

و بی نهایت سپاس او را که به گرمی لطف، توان نوش جرعه ای از بی کران دانش خود را به این ذرهٔ ناچیز عطا فرمود تا آغاز راهی پر تلاش برای یافتن باشد.

تقدیم به لطافت گلبرگهای مریم مهر مادرم،

که از زلال شبنمش سیرابم گردانیده،

و در آسمان عشق به اوجم رسانده است.

تقدیم به ژرفای دریای آبی چشمان پدرم،

که ساحل پاک احساسش پناه بلم سختی هایم،

و مهد نکوئیش ریشهٔ نهال حیات من است.

تقدیم به راز موسیقایی لبخند برادرم،

که نوای کمان آسمان دلش امید بخش روانم،

و آفتاب وجودش دلگرمی من است.

و.....

تقدیم به بهشت شکوفه های بهاری، همسرم،

که در فضای بی انتهای دوستیش تا قله یکی شدن پر و بال گشوده ام،

و در چشمهٔ کیمیایش مس جان به زر عشق شسته ام.

و . . .

با ابراز عمیق ترین سپاسها و خالصانه ترین قدردانی ها از زحمات و رهنمودها ی استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر شاهرخ فرهنگی، که علاوه بر جایگاه بسیار رفیع علمی، به حق الگوی والای اخلاقی هستند،

و با سپاس و قدردانی بسیار از اساتید محترم مشاور آقایان دکتر کارو لوکس و دکتر حمید لسانی و هیأت محترم داوران آقایان دکتر مهدی معلم، دکتر جواد فیض، دکتر ابراهیم افجه ای و دکتر صادق واعظ زاده،

و با سپاس فراوان از جناب آقای پروفسور هن برگر و همکاران در انستیتوی ماشینهای الکتریکی دانشگاه آخن.

چکیده

ماشین *SR (Switched Reluctance)* برخلاف ماشینهای الکتریکی مرسوم صنعت مانند ماشینهای القایی و سنکرون، بدون مبدل الکترونیک قدرت خود و سنجش موقعیت زاویه‌ای روتور قابل بهره‌برداری نیست. از اینرو طراحی قسمتهای اصلی محرکهٔ *SR* شامل ماشین، مبدل الکترونیک قدرت و سیستم کنترل چنان وابستگی تنگاتنگی با یکدیگر دارند که طراحی محرکهٔ *SR* بصورت یک مسئلهٔ طراحی توأم قسمتهای مختلف آن مطرح می‌شود. بعلاوه از نظر اقتصادی کاربرد این محرکه برای عملکرد در یک نقطهٔ کار (سرعت ثابت و گشتاور ثابت) مقرون به صرفه نبوده و خصوصیات خوب این محرکه، بویژه نسبت بالای گشتاور بر اینرسی روتور و کنترل‌پذیری فوق‌العاده آن در کاربردهایی اهمیت می یابند که عملکرد کارآمد و مفید محرکه را در محدودهٔ معینی از صفحه گشتاور- سرعت نیاز دارند.

در این رساله، فلسفهٔ روند طراحی محرکهٔ *SR* براساس ساختار انتخاب شدهٔ مبدل الکترونیک قدرت و استراتژی بکار گرفته شده کنترل، در قالب یک الگوریتم طراحی بهینه محرکه *SR* بگونه‌ای ارائه می‌گردد که محرکه در سراسر محدودهٔ معینی از صفحه گشتاور- سرعت حداکثر بازده با نوسان گشتاور محدودی داشته باشد. در این الگوریتم از تکنیک بهینه‌سازی فازی به منظور در نظر گرفتن خواسته‌های طراح در طراحی محرکه استفاده می‌شود. همچنین تکنیک رتبه‌بندی زیرفضاهای جستجو براساس روش نمونه‌گیری تصادفی جهت تعیین منطقه‌ای از فضای جستجو که احتمال حضور نقطه حل بهینه در آنجا بیشتر است و نیز روش جستجوی تابو جهت جستجوی کارآمد فضای جستجو بکار گرفته می‌شوند.

جهت تحلیل عملکرد محرکهٔ *SR* قسمتهای اصلی محرکه مدلسازی می شوند. در این راستا، یک مدل غیرخطی کامل مدار معادل مغناطیسی ماشین *SR* پیشنهاد شده است. بعلاوه در مدلسازی تلفات مبدل الکترونیک قدرت، روش جدید طراحی بهینه مدار ضربه‌گیر حالت قطع شدن کلید نیمه هادی در محدودهٔ معینی از صفحه گشتاور – سرعت ارائه شده است.

نتایج کلیهٔ مدلسازیها با نتایج اندازه‌گیری شده بر روی بستر یک محرکهٔ *SR* نمونه که در دانشگاه صنعتی آخن ساخته شده است، مقایسه می شوند. در نهایت براساس مشخصات مطلوب این محرکهٔ نمونه، یک مسئلهٔ طراحی بهینه تعریف و توسط الگوریتم پیشنهادی طراحی بهینه محرکه *SR* حل می‌گردد. با مقایسه نتایج این دو محرکه ویژگیهای مهم الگوریتم پیشنهادی طراحی بهینه محرکه *SR* نتیجه‌گیری می‌شوند.

فهرست مطالب

عناوین	صفحه
فصل اول : مقدمه	۱
۱-۱- فناوری ماشین مقاومت مغناطیسی کلیدزنی شونده (SR)	۲
۱-۲- اهداف رساله	٤
۱-۳-ساختار رساله	٥
فصل دوم: ساختار و اصول کار ماشین *SR*	۷
۲-۱- ساختار و عملکرد ماشین SR	۸
۲-۲- اشباع مغناطیسی در ماشین SR	۱۱
فصل سوم: معرفی نمونه آزمایشگاهی انتخاب شده محرکه *SR* و بستر آزمایش	۱٦
مقدمه	۱۷
۳-۱- ساختار و اجزاء بستر آزمایش	۱۷
۳-۱-۱- بخش محرکه بستر آزمایش	۱۸
۳-۱-۲- بخش بار بستر آزمایش	۲۸
۳-۱-۳- حس‌گر سنجش گشتاور	۲۸
۳-۱-٤- بخش کنترل کننده بستر آزمایش	۲۹
۳-۲- عملکرد بستر آزمایش و نتایج اندازه‌گیری	۳٦
فصل چهارم: مدلسازی و روش تحلیل عملکرد محرکه *SR*	٤۱
مقدمه	٤۲

عناوین	صفحه
٤-١- مدلسازی الکترومغناطیسی ماشین *SR*	٤٢
٤-١-١- مدل غیرخطی کامل مدار معادل مغناطیسی ماشین *SR*	٤٥
٤-١-١-١- مدل قطبهای استاتور و روتور	٤٧
٤-١-١-٢- مدل یوغهای استاتور و روتور	٤٩
٤-١-١-٣- مدل فاصله هوایی	٥٣
الف- پرمینسهای نشتی فاصله هوایی	٥٣
ب- پرمینسهای ارتباطی فاصله هوایی	٥٦
٤-١-١-٤- مدل کامل مدار معادل مغناطیسی و روش تحلیل آن	٦٥
٤-١-١-٥- تحلیل دینامیکی	٦٨
٤-١-١-٦- محاسبه گشتاور	٧٢
٤-١-١-٧- مورب‌سازی قطبهای روتور	٧٦
٤-١-٢- محاسبه حداقل اندوکتانس فاز در حالت غیر همراستایی کامل	٧٨
٤-١-٣- نتایج حاصل از مدل پیشنهادی و مقایسه آنها با نتایج حاصل از *FEM* و اندازه‌گیری	٨٤
٤-١-٤- تلفات در ماشین *SR*	٩١
٤-١-٥- نتایج محاسبه تلفات ماشین *SR* با استفاده از شبیه‌سازی و مقایسه با اندازه‌گیری	٩٤
٤-٢- مدلسازی مبدل الکترونیک قدرت محرکه *SR*	٩٧
٤-٢-١- طراحی بهینه مدار ضربه‌گیر مبدل الکترونیک قدرت محرکه *SR* بر اساس بازده مبدل در ناحیه معینی از صفحه گشتاور- سرعت	١٠٠
٤-٢-٢- تلفات مبدل الکترونیک قدرت محرکه *SR*	١٠٧
٤-٢-٣- نتایج محاسبه تلفات مبدل الکترونیک قدرت محرکه *SR* و مقایسه آنها با نتایج حاصل از نرم‌افزار *Simplorer* و اندازه‌گیری	١١٠

سازمان اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

عناوین	صفحه

٤-٢-٤- بررسی تاثیر طراحی بهینه مدار ضربه‌گیر بر اساس بازده مبدل در ناحیه معینی از صفحه گشتاور- سرعت بر روی تلفات مبدل الکترونیک قدرت محرکه *SR* ١٢١

٤-٣- مدلسازی استراتژی کنترل محرکه *SR* ١٢٥

٤-٤- مدل محرکه *SR* ١٢٧

فصل پنجم: طراحی بهینه محرکه - موتور *SR* بر اساس بازده در بازه معینی از گشتاور و سرعت ١٢٩

مقدمه ١٣٠

٥-١- تحلیل المان محدود ماشین *SR* و تاثیر شکل سیم پیچی قطب استاتور ١٣٤

٥-٢- تعریف پارامترهای طراحی محرکه *SR* ١٣٨

٥-٢-١- انتخاب پارامترهای ثابت طراحی ١٤٠

٥-٢-٢- محدوده تغییرات متغیرهای طراحی ١٤٣

٥-٣- سنتز محرکه *SR* ١٤٧

٥-٣-١- سنتز محرکه *SR* با مود کنترل تک پالس ١٤٩

٥-٣-٢- سنتز محرکه *SR* با مود کنترل برشی جریان ١٥٣

٥-٤- طراحی بهینه محرکه *SR* ١٦١

٥-٤-١- نمونه‌گیری آماری تصادفی و روش رتبه‌بندی ١٦٢

٥-٤-٢- الگوریتم طراحی بهینه محرکه *SR* ١٦٩

٥-٤-٣- تحقیق عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی براساس روش جستجوی تابو ١٧٧

٥-٥- برنامه *SRopt* ١٧٩

عناوین	صفحه

فصل ششم: نتایج طراحی بهینهٔ محرکه – موتور *SR* بر اساس بازده در بازهٔ معینی از گشتاور و سرعت و مقایسه با نتایج اندازه‌گیری محرکه *SR* نمونهٔ تست ۱۸۲

مقدمه ۱۸۳

۶-۱- تعریف مسئلهٔ نمونهٔ طراحی بهینهٔ محرکهٔ *SR* ۱۸۳

۶-۲- حل مسئلهٔ نمونهٔ طراحی بهینهٔ محرکهٔ *SR* توسط برنامهٔ *SRopt* و مقایسه با محرکهٔ *SR* نمونهٔ تست ۱۸۵

فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۹۶

۷-۱- نتیجه‌گیری ۱۹۷

۷-۲- پیشنهادات ۲۰۱

مراجع ۲۰۳

ضمیمه ۱ ۲۱۵

ضمیمه ۲ ۲۲۵

فصل اول

مقدمه

۱-۱- فناوری ماشین مقاومت مغناطیسی کلیدزنی شونده[۱] (*SR*)

ماشین *SR* بعنوان قدیمی‌ترین و ساده‌ترین ماشین الکتریکی از نظر ساختار و عملکرد، اولین بار در سال ۱۸۳۸ توسط آقای دیویدسون[۲] بعنوان نیروی محرکه لوکوموتیو مورد استفاده قرار گرفت [۱]. اما بدلیل عدم وجود کلیدهای سریع با بازده مناسب جهت تحریک متناوب و متوالی فازها، کاربرد این ماشین تا چند دهۀ قبل مورد توجه نبوده است. از اواسط دهۀ ۱۹۶۰ با پیشرفت فناوری الکترونیک قدرت در ساخت و تولید ادوات نیمه هادی سریع پر قدرت و پر بازده و نیز پیدایش و پیشرفت فناوری مدارهای مجتمع و پردازنده‌های سریع این امکان بوجود آمده است که ماشین *SR* بتدریج جایگاه خود را در صنعت مبدلهای الکترومکانیکی پیدا کرده و بدلیل خصوصیات منحصر بفرد خود بعنوان رقیبی جدی برای ماشینهای الکتریکی مرسوم صنعت مانند ماشینهای القایی، سنکرون و جریان مستقیم بدون جاروبک[۳] (*BLDC*) در کاربردهایی که عملکرد مفید ماشین را در بازه‌ای از سرعت نیاز دارند، مطرح گردد. با توجه به ساختار این ماشین که در فصل دوم بدان اشاره می‌گردد، می‌توان موارد زیر را بعنوان مزایای ماشین *SR* نام برد:

۱) ساختار ساده و ارزان قیمت بدلیل شکل ساده و برجسته استاتور و روتور و عدم وجود هرگونه سیم‌پیچ یا مغناطیس دائم بر روی روتور.

۲) سیم‌پیچی ساده و متمرکز بر روی قطبهای استاتور بعنوان تنها سیم‌پیچهای تحریک ماشین.

۳) مراحل ساخت ساده و کم هزینه و عدم هر گونه پیچیدگی در مرحلۀ سیم‌پیچی ماشین.

٤) روتور سبکتر با اینرسی کمتر نسبت به سایر ماشینهای الکتریکی و در نتیجه نسبت بالای گشتاور بر اینرسی روتور که منجر به دینامیک سریع ماشین شده است.

۱- *Switched Reluctance Machine*

۲- *Davidson*

۳- *Brushless DC*