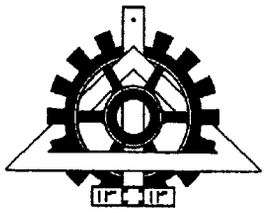
بسم الله الرحمن الرحيم

٣١٤٩٨

۱۳۷۹ /۱۰/ ۲۰



مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

دانشگاه تهران

دانشکدهٔ فنی

گروه برق و کامپیوتر

پایان‌نامه جهت دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد

مهندسی برق – گرایش کنترل

عنوان پایان‌نامه :

کنترل نویز و لرزش با منشأهای مختلف در موتور *SR*

توسط :

مجید شرکاء

۹۱۱۹

استاد راهنما :

دکتر کارو لوکس

استاد مشاور :

دکتر محمود کمره‌ای

شهریورماه ۱۳۷۹

۳۱۴۹۱

عنوان :

کنترل نویز و لرزش با منشأهای مختلف در موتور *SR*

توسط :

مجید شرکاء

پایان‌نامه جهت دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد

مهندسی برق – گرایش کنترل

از این پایان‌نامه در تاریخ ۱۳۷۹/۷/۱۲ در مقابل هیئت داوران دفاع به عمل آمد و مورد تصویب قرار گرفت:

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکدهٔ فنی :	دکتر محمد علی بنی‌عاشمی
مدیر گروه مهندسی برق و کامپیوتر :	دکتر محمود کمره‌ای
سرپرست تحصیلات تکمیلی گروه برق و کامپیوتر :	دکتر جواد فیض
استاد راهنما:	دکتر کارو لوکس
استاد مشاور:	دکتر محمود کمره‌ای
عضو هیئت داوران:	دکتر جواد فیض
عضو هیئت داوران:	دکتر شاهرخ فرهنگی

تقدیم به :

پدر بزرگوارم

و

مادر مهربانم

قدردانی

برای من شرکت در پروژهٔ موتور SR تجربه‌ای خاص در دوران تحصیل بوده است. پروژه‌ای که با شور و اشتیاق مدیران، اعضای هیئت علمی و مجریان (دانشجویان) همراه بود. قطعاً این پروژه تلاشی پرارزش در حد پیشرفتهای روز دنیا را تجربه و/ یا ارائه نموده است.

در این فرصت لازم است از آقای دکتر لوکس که فرصت شرکت در چنین پروژه‌ای را فراهم نمودند تشکر کنم. تلاش ایشان به عنوان استاد راهنمای اینجانب جهت هدایت و ایجاد انگیزه در مسیر پروژه در مقاطع مختلف آن بسیار ارزشمند و کمک اساسی برای من بوده است.

همچنین از آقای دکتر کمره‌ای به عنوان استاد مشاور پروژه نیز که راهنماییهای ارزندهٔ ایشان در امر پروژه راهگشا بوده‌اند قدردانی می‌نمایم.

استفاده از نظرات و ارزیابیهای سایر اعضای هیئت علمی گروه SR آقایان دکتر مدیر شانه‌چی، دکتر فرهنگی، دکتر غفوری‌فرد، دکتر معلم و دکتر منهاج فرصتی بسیار مغتنم بوده است.

شرکت در جمع همکاران این پروژه، آقایان مهندس مرجوی، مهندس اسدی، مهندس دیهیمی، مهندس جذبی و مهندس ملتی که شور و شوق و تواناییهای علمی هر یک عامل مهم پیشرفت پروژهٔ SR بوده است، موقعیت بسیار ارزشمندی را فراهم نمود. هم‌فکری و مصاحبت آنها تأثیر کاملاً مثبتی در روند پروژهٔ من نیز داشته است.

همچنین لازم است از پرسنل محترم پژوهشکدهٔ هوشمند و سایر اعضای گروه SR که آنها نیز در پیشرفت این پروژه تأثیر داشته‌اند تشکر کنم.

چکیده

مسئلهٔ لرزش و نویز صوتی در موتورهای *SR* (موتور مدار مغناطیسی کلید شونده یا *Switched Reluctance Motor*) در مطالعات علمی و تجاری متعدد به عنوان اصلی‌ترین گلوگاه طراحی در این فن‌آوری ذکر شده است. در سالهای اخیر با استفاده از کنترل هوشمند پیشرفتهای زیادی در حل این مشکل بدست آمده است. اما بیشتر مطالعات و راه‌حلهای ارائه شده در مورد لرزشها و نویزهای ناشی از ریپل گشتاور بوده است. با این حال بر اساس مطالعات تجربی معلوم شده است که عوامل دیگر و به ویژه تغییر شکلهای ناشی از نیروهای شعاعی اهمیتی بیشتر در ایجاد نویز و لرزش دارند.

در این پروژه دو رویکرد برای کاهش لرزش و نویز صوتی در موتور *SR* و نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه شده‌اند. در روش اول ایدهٔ کاهش با اصلاح ساختار موتور (استاتور) پیاده شده است. این روش تلاش می‌کند تا با خارج ساختن فرکانس مودهای نوسانی استاتور از محدودهٔ شنوایی انسان، میزان نویز تأثیرگذار را کاهش دهد.

همچنین روش روی خط بهبود یافته‌ای برای کاهش نویز در این موتور پیشنهاد شده است. این کار بر اساس روش خاموش‌سازی دو مرحله‌ای فاز، که در کاهش نویز ناشی از نیروهای شعاعی مؤثر است، بنا شده‌است. در این کار فرکانس مود اصلی لرزش پوسته و استاتور در محدوده‌ای نامعین فرض شده‌است. با استفاده از یک روند تطبیقی هوشمند، زمان اعمال فرمان خاموش‌سازی کامل فاز به صورت روی خط تنظیم می‌شود. این روش قادر به کاهش قابل ملاحظهٔ نویز با منشأ شعاعی خواهد بود.

۱ فصل اول : مقدمه ۱

۱ -۱ مقدمه ۲

۱ -۲ موتورهای دوار ۲

۱ -۳ خصلتهای موتور *SR* ۵

۱ -٤ تعریف پروژه ۹

۱ -۵ پروژهٔ *SR* ۱۰

۲ فصل دوم : موتور *SR* ۱۱

۲ -۱ مقدمه ۱۲

۲ -۲ ساختمان موتور *SR* ۱۲

۲ -۳ تحریک موتور *SR* ۱٤

۲ -٤ مدل موتور *SR* ۱٦

۲ -٤ -۱ مدلهای تحلیلی ۱۷

۲ -٤ -۲ مدلهای عددی ۱۹

۲ -٤ -۳ مدلهای هوشمند ۱۹

۳ فصل سوم : نویز و لرزش در موتور *SR* ۲۱

۳ -۱ مقدمه ۲۲

۳ -۲ استانداردهای نویز صوتی و لرزش ۲۲

۳ -۲ -۱ شدت نویز ۲۲

۳ -۲ -۲ اندازه‌گیری نویز ۲٤

۳ -۲ -۳ مسائل انسانی نویز ۲٦
۳ -۲ -٤ لرزش ۲٦
۳ -۳ مکانیزم انتقال نویز و لرزش ۲۸
۳ -٤ نویز در دستگاههای برقی ۲۹
۳ -٤ -۱ نویز در ترانسفورمرها ۲۹
۳ -٤ -۲ نویز و لرزش در موتورها ۲۹
۳ -٤ -۳ استانداردهای نویز در موتورها ۳۱

٤ فصل چهارم : کاهش نویز و لرزش در موتور SR ، روشهای غیرفعال ۳٦

٤ -۱ مقدمه ۳۷
٤ -۲ روشهای کلی کاهش غیرفعال نویز ۳۸
٤ -۳ روشهای غیرفعال خاص برای کاهش نویز در موتور SR ۳۹

۵ فصل پنجم : کاهش نویز و لرزش در موتور SR ، روشهای فعال ٤۲

۵ -۱ مقدمه ٤۳
۵ -۲ روشهای عمدهٔ کاهش فعال نویز ٤۳
۵ -۳ روشهای کاهش فعال نویز در موتورها ٤٤
۵ -٤ کاهش فعال نویز و لرزش در موتور SR ٤۵

۵ -٤ -۱ نویز ناشی از ریپل گشتاور ٤٦
۵ -٤ -۲ نویز ناشی از نیروهای شعاعی ٤٧
۵ -٤ -۳ محاسبهٔ نیروهای شعاعی در موتور SR ۵۲
۵ -٤ -٤ روشهای کلی‌تر کاهش فعال نویز ۵۳

٦ فصل ششم : دستیابی به روش کاهش نویز در موتور SR ۵٤

٦ -۱ مقدمه ۵۵
٦ -۲ کاهش غیرفعال نویز در موتور SR ۵۵
٦ -۳ روش فعال کاهش نویز در موتور SR ۵۷
٦ -۳ -۱ بررسی مجدد روش خاموش‌سازی دومرحله‌ای ۵۷
٦ -۳ -۲ روش بهبود یافتهٔ کاهش نویز در موتور SR ۵۹

۷ - نتیجه‌گیری و پیشنهادات ٦٦

۷ -۱ نتیجه‌گیری ٦۷
۷ -۲ پیشنهادات ٦۸

۸ ضمائم ۷۰

۸ -۱ مشخصات موتور مورد استفاده ۷۱
۸ -۲ نرم‌افزار ANSYS ۷۱

۸ -۳ مروری بر یادگیری عاطفی ۷۲
۸ -۳ -۱ یادگیری تقویتی ۷۳
۸ -۳ -۲ یادگیری عاطفی ۷٤

۹ مراجع ۷۵

۱ فصل اول : مقدمه

۱ -۱ مقدمه

امروزه در صنعت برای ایجاد حرکت از محرکهای مختلفی استفاده می‌شود. محرکهای الکتریکی یک دسته از این محرکها را تشکیل می‌دهند که در آنها از تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی برای ایجاد حرکت استفاده می‌شود. این محرکها شامل موتورها و تحریک‌کننده‌ها (Actuators) می‌شوند. ساختارهای متعددی برای محرکهای الکتریکی وجود دارد که آنها را برای بکارگیری در موقعیتهای مختلف مناسب می‌سازد. از تحریک‌کننده‌ها حرکت در محدوده‌ای خاص انتظار می‌رود. مثلاً" تحریک‌کنندهٔ یک شیر (برقی) باید دریچهٔ شیر را در مسیری از حالت باز تا بسته حرکت دهد. یا تحریک‌کنندهٔ انتخاب مسیر در یک خط توزیع مرسوله باید تیغهٔ انتخاب مسیر را از a_1 تا a_2 جابجا نماید.

ساختار مختلف موتورها حرکت مداومی بوجود می‌آورند. موتورهای خطی با حرکت خطی خود کاربردهای متعددی همچون قطارها و دستگاههای تراشکاری خطی (سطحی) دارند. موتورهای دوار بسیار متداولتر بوده و تقریباً" در زندگی هر انسان و هر روزه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱ -۲ موتورهای دوار

موتورهای دوار دارای یک بخش ثابت (استاتور) و یک بخش متحرک (روتور) هستند.

در موتورهای AC میدان چرخان در استاتور عامل ایجاد حرکت می‌باشد. ولتاژ متناوب (AC) تغذیهٔ موتور باعث ایجاد جریان و نهایتاً" شار مغناطیسی چرخان در فاصلهٔ هوایی می‌گردد. میدان موجود در روتور در تقابل با میدان چرخان استاتور موجب چرخیدن روتور می‌شود. میدان روتور ممکن است مستقل از میدان استاتور باشد یا در اثر القای از استاتور ایجاد شده باشد.

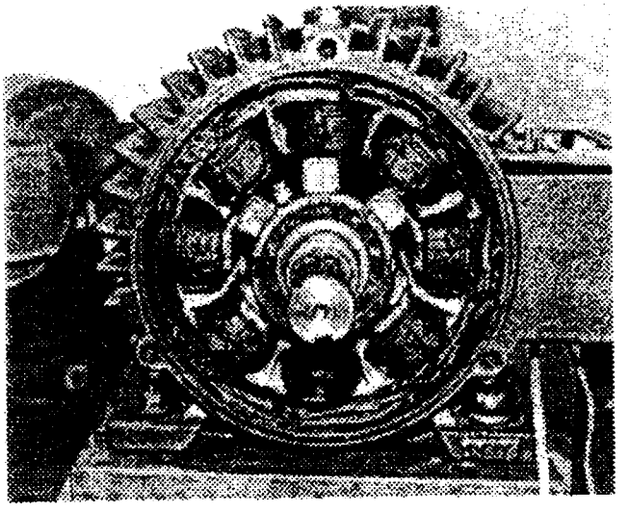
در موتورهای DC میدان استاتور ساکن است. برای ایجاد حرکت از عقب انداختن میدان روتور استفاده می‌شود. عمل عقب انداختن میدان روتور توسط مجموعهٔ کلکتور و جاروبکها انجام می‌گردد. در واقع این

مجموعه یک سیستم کلیدزنی سریع مکانیکی (متناسب با سرعت روتور) است که با ابزار و فن‌آوری نسبتاً ساده‌ای بدست می‌آید.

در موتورهای پله‌ای (Stepper Motor) اساس کار سکون می‌باشد. در واقع با تحریک یک فاز (یا ترکیبی از فازها) روتور از موقعیت قبلی خود به موقعیت متناظر با تحریک فعلی کشیده شده و در موقعیت جدید قفل می‌شود. از این رو در این موتور گشتاورهای درکشی (Pull in Torque) و قفل (Locking Torque) معیارهای مهمی می‌باشند. موتور از طریق تعدادی ورودی (فاز) توسط مدار محرک الکترونیکی تحریک می‌شود. تغییر وضعیت صحیح در این موتور موکول به مشخص بودن موقعیت قبلی روتور است. در واقع اگر قبل از رسیدن روتور به محدودهٔ قفل فاز بعدی را تحریک کنیم ممکن است گشتاور با مقدار نامناسب یا در خلاف جهت حرکت تولید گردد. چنانچه استفاده از سنسور موقعیت مد نظر نباشد باید انتخاب موتورهای پله‌ای با توجه به گشتاورهای بسیار بیشتر از بار نامی (مثلاً دو برابر بار نامی) صورت گیرد تا هنگام اعمال فرمان به فاز بدون نیاز به فیدبک از انجام حرکت اطمینان حاصل باشد. همچنین در حرکتهای پیوسته باید تأخیرهای مناسب (ناشی از گشتاور اعمالی موتور و اینرسی و اصطکاک) در اعمال فرمان به فازها در نظر گرفته شود. این تأخیر برای استفادهٔ بهینه از زمان باید نسبت به سرعت متغیر باشد. در هر حال از موتورهای پله‌ای انتظار سرعت بالا نمی‌رود. تحریک متناوب فازها به کمک مدارهای الکترونیکی و کلیدهای نیمه‌هادی قدرت سرعت متوسط و بالا صورت می‌پذیرد.

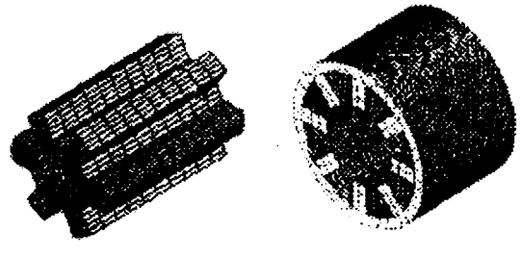
موتورهای مدار مغناطیسی کلید شونده یا Switched Reluctance Motor که در این پایان‌نامه به اختصار موتور SR عنوان خواهد شد دارای ساختمانی شبیه به موتورهای پله‌ای هستند. با این حال این موتورها دارای ساختاری ساده‌تر از موتورهای پله‌ای بوده و برای ایجاد حرکت پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ساختار از موتور در قرن نوزدهم ارائه شده لیکن به دلیل در دست نبودن ابزار مناسب کلیدزنی قدرت سرعت بالا برای مدت طولانی مورد استفاده قرار نگرفته است. از دههٔ ۱۹۶۰ و با در اختیار بودن ابزار

کلیدزنی قدرت مناسب، این موتور توجه محققین و صنعتگران را به خود جلب کرد. از موتورهای SR حرکت بدون نوسان (یا ریپل) و در سرعتهای بالا انتظار می‌رود .موتورهای SR با سرعتی در محدودهٔ ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه معمول‌اند و تا محدودهٔ سرعت ۱۰۰۰۰۰ دور در دقیقه[45] نیز ساخته شده‌اند.



شکل ۱ . موتور *SR* با قاب برداشته شده. قطبهای برجستهٔ روتور و استاتور و سیم‌پیچهای استاتور دیده می‌شوند.

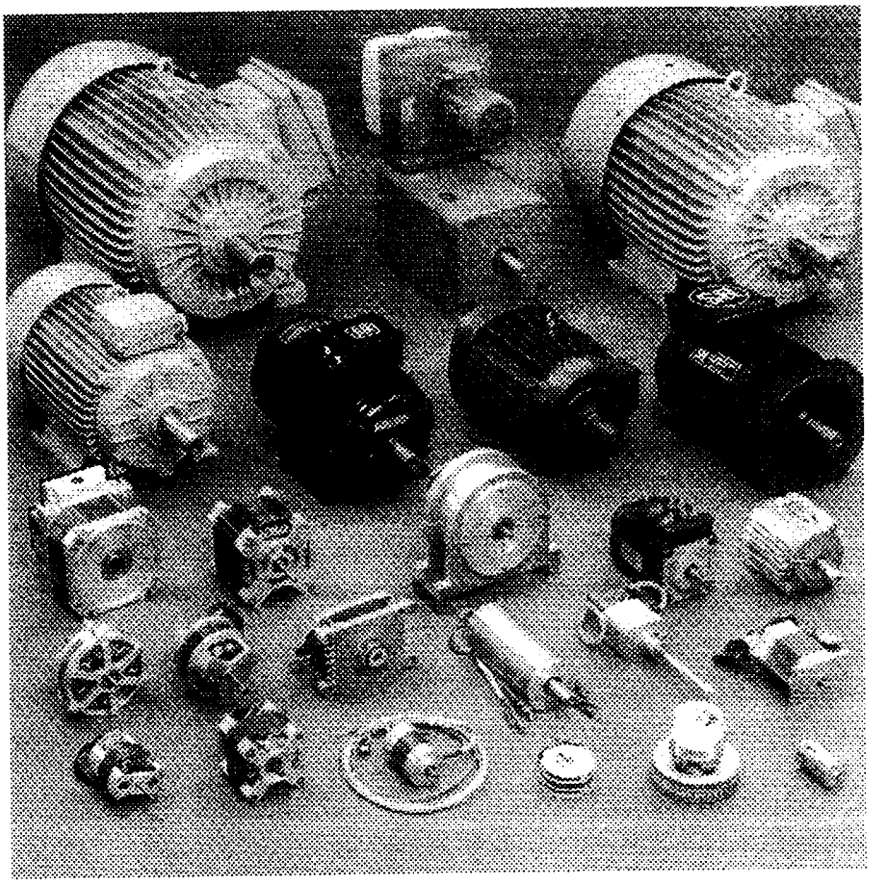
ساختار موتور SR برای حرکت دوار غیر دائمی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان مثال محرک ۳۰۰ درجه‌ای که بتواند ورودی زاویه-زمانی دلخواهی را تحت بار (ثابت، متغیر، نامعین) دنبال نماید در [41] معرفی شده که پاسخ مطلوبی از جهت ردیابی تحت بار بدست داده است.



شکل ۲. طرح سادهٔ استاتور و روتور یک موتور *SR* ۸/٦

۱ -۳ خصلتهای موتور *SR*

موتور SR از زمینهٔ خوبی برای رقابت در بازار محرکها برخوردار است. از موتورهای کم قدرت کوچک (کمتر از یک وات) تا موتورهای 400 HP در بازار موجود است که تا امکان تولید موتورهای تا قدرت چند هزار اسب وجود دارد.



شکل ۳. موتورهای *SR* در اندازه‌ها، ترکیبها و محفظه‌های گوناگون عرضه می‌شوند.

امروزه موتورهای SR بتدریج در بازار موتورهای DC وارد می‌شوند. این موتورها کاربرد بیشتری در محرکهای سرعت متغیر دارند. با وجود زمینهٔ کلیدهای فوق صوتی، تحریک‌کننده‌های الکترونیکی (drive) کم صدا (بی‌صدا) به رشد چنین بازاری کمک می‌کنند [63] .