بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

طراحی و ساخت یک مبدل جدید برای موتور سوئیچ رلوکتانس با قابلیت افزایش و کنترل ولتاژ مغناطیس زدایی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت

مرتضی نصیریان جزی

استاد راهنما
دکتر سید مرتضی سقائیان نژاد

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق – قدرت آقای مرتضی نصیریان جزی

تحت عنوان

طراحی و ساخت یک مبدل جدید برای موتور سوئیچ رلوکتانس با قابلیت افزایش و کنترل ولتاژ مغناطیس زدایی

در تاریخ .../..../۹۲ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر سید مرتضی سقائیان نژاد
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر احمدرضا تابش
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مسعود عمومی

ستایش بی حد سزاوار خدای توانایی است که در دیده خود روشن تر از همه چیز و واضح تر از وضوح است. وظیفه خود می‌دانم سپاسگزار تمام آنهایی باشم که در این دوره ارزشمند، بودنشان و امیدشان راهگشای من بود، اساتید عزیز و گرانقدر دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، جناب آقای دکتر سید مرتضی سقائیان نژاد استاد راهنمای محترم و بزرگوارم که در اجرای طرح و تهیه و تدوین این پایان‌نامه با وجود مشغله کاری فراوان مرا مورد لطف و محبت قرار دادند و به هنگام نیاز برای حل مشکلات اینجانب از هیچ کمکی دریغ نورزیدند، برای ایشان آرزوی سلامتی، موفقیت و سر بلندی را دارم. تشکر و قدردانی می‌نمایم از جناب آقای دکتر احمد رضا تابش به خاطر یاری ایشان در امر مشاوره این پایان نامه و جناب آقایان دکتر محمد ابراحیمی و دکتر حمید رضا کارشناس که برای داوری این پایان‌نامه قبول زحمت نمودند و وقت گرانبهای خود را در اختیار اینجانب قرار دادند. ازکلیه همکاران و دوستان عزیزم در گروه سوئیچ رلوکتانس به ویژه آقایان مهندس امیر رشیدی، مهندس مسعود نمازی، مهندس، مهندس میلاد افشون، مهندس مهدی عبدالحمیدی که در تدوین این پایان نامه در تمامی مباحث تئوری و عملی با اینجانب همکاری لازم را نمودند سپاس فراوان را دارم. همچنین از آقایان علی شهابی، علی آشورنژاد، لقمان سامانی و کلیه دوستان بزرگوار که در طول مدت تحصیل همواره از لطف ایشان بی نصیب نبوده ام کمال تشکر را دارم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هفت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ پیش زمینه و معرفی صورت مسئله تحقیق ۲

۱-۲ مرور کارهای انجام شده قبلی و مشکلات و محدودیت های آنها ۴

۱-۳ ساختار پایان نامه ۶

فصل دوم: اصول عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانس و مبدل آن

۲-۱ مقدمه ۷

۲-۲ عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانس ۷

۲-۲-۱ اساس عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانس ۸

۲-۲-۲ تولید گشتاور در موتور SR ۱۲

۲-۳ مبدل های درایو SRM ۱۴

۲-۳-۱ ساختارهای مختلف مبدلهای SRM ۱۴

۲-۳-۲ مبدل پل نامتقارن معمولی ۱۵

۲-۳-۳ تغییر مبدل نامتقارن ۱۸

۲-۳-۴ مبدلهای تک کلیده در هر فاز ۱۹

۲-۳-۵ مبدل دو طبقه ۲۲

۲-۴ خلاصه فصل ۲۳

فصل سوم: بررسی عملکرد مبدل های تک جهته و دو جهته موجود به منظور افزایش ولتاژ مغناطیس زدایی و بهبود بازده ماشین SR

۳-۱ مقدمه ۲۴

۳-۲ مبدل پسیو بوست ۲۵

۳-۲-۱ بررسی عملکرد مبدل پسیو بوست ۲۵

۳-۲-۲ تحلیل نتایج عملی ۲۹

۳-۳ مبدل با مدار باک- بوست اضافه ۳۱

۳-۳-۱ بررسی مبدل با مدار باک- بوست اضافه ۳۲

۳-۳-۲ تحلیل نتایج شبیه سازی و عملی ۳۴

۳-۴ مبدل رزونانسی ۳۶

۳-۵ مبدل دو جهته ۳۸

۳-۵-۱ تحلیل نیروی مغناطیسی در تحریک چند فازه ۳۸

۳-۵-۲ تحلیل مبدل دو جهته ۳۹

۳-۶ خلاصه فصل ۴۴

فصل چهارم: ارائه مبدل پیشنهادی دو جهته برای افزایش ولتاژ مغناطیس زدایی و نتایج شبیه سازی

۴-۱ مقدمه ۴۵
۴-۲ بررسی مبدل پیشنهادی ۴۸
۴-۳ بررسی مراحل مختلف عملکرد و معادلات آن در حالت اعمال جریان مثبت ۴۹
۴-۳-۱ مود تحریک فاز B از طریق لینک dc ۵۱
۴-۳-۲ مود آزادگردی فاز B ۵۱
۴-۳-۳ مود مغناطیس زدایی سریع فاز B ۵۲
۴-۳-۴ مود تحریک فاز A از طریق خازن ۵۴
۴-۳-۵ مود آزادگردی فاز A ۵۵
۴-۳-۶ مود مغناطیس زدایی سریع فاز A ۵۶
۴-۴ بررسی مراحل مختلف عملکرد و معادلات آن در حالت اعمال جریان منفی ۵۷
۴-۴-۱ مود تحریک فاز A از طریق لینک dc ۵۷
۴-۴-۲ مود مغناطیس زدایی فاز A ۵۹
۴-۴-۳ مود تحریک فاز B از طریق خازن ۶۰
۴-۴-۴ مود مغناطیس زدایی فاز B ۶۱
۴-۵ عملکرد مبدل بصورت مبدل نامتقارن معمولی ۶۲
۴-۶ طراحی مبدل با استفاده از ماژول های قدرت هوشمند ۶۵
۴-۷ بررسی توان انتقالی بین خازن و لینک dc ۶۶
۴-۷-۱ محاسبه توان انتقالی از خازن به فاز A ۶۶
۴-۷-۲ محاسبه توان انتقالی از فازها به خازن ۶۸
۴-۸ محاسبه زاویه پیش خاموشی ۶۹
۴-۹ تحلیل پارامترهای تاثیرگذار بر روی ولتاژ خازن C ۷۱
۴-۹-۱ تاثیر سیکل وظیفه ۷۲
۴-۹-۲ اثر زاویه روشنی θ_{on} ۷۲
۴-۹-۳ تاثیر زاویه خاموشی θ_{off} ۷۳
۴-۹-۴ تاثیر زاویه پیش خاموشی θ_f ۷۶
۴-۱۰ نتایج شبیه سازی ۷۸
۴-۱۰-۱ مدل شبیه سازی شده ۷۸
۴-۱۰-۲ نتایج شبیه سازی با استفاده از مبدل نامتقارن معمولی ۸۰
۴-۱۰-۳ نتایج شبیه سازی با استفاده از مبدل پیشنهادی ۸۱
۴-۱۰-۴ تاثیر کاهش ولتاژ خازن ۸۳
۴-۱۱ مقایسه دو مبدل ۸۴
۴-۱۲ خلاصه فصل ۸۷

فصل پنجم: پیاده سازی عملی و نتایج تست مبدل پیشنهادی

۵-۱ مقدمه ۸۸
۵-۲ تجهیزات آزمایشگاهی ۸۹

۵-۲-۱ موتور سوئیچ رلوکتانس ۸۹
۵-۲-۲ ژنراتور dc تحریک مستقل ۹۰
۵-۲-۳ لینک خازنی ۹۰
۵-۲-۴ مبدل قدرت ۹۱
۵-۲-۵ کدگذار موقعیت روتور ۹۳
۵-۲-۶ برد حسگر جریان ۹۳
۵-۲-۷ برد حسگر ولتاژ ۹۴
۵-۲-۸ پردازنده DSP ۹۵
۵-۳ نتایج عملی ۹۶
۵-۳-۱ مقایسه نتایج عملی مبدل پیشنهادی و مبدل نامتقارن معمولی ۹۷
۵-۳-۲ بررسی ضریب توان ۱۰۵
۵-۴ جمع بندی ۱۰۶
۵-۵ خلاصه فصل ۱۰۸
فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۶-۱ نتیجه گیری ۱۰۹
۶-۲ پیشنهادات ۱۱۰
مراجع ۱۱۱

چکیده

امروزه با توجه به ویژگی های منحصر به فرد موتور سوئیچ رلوکتانس همچون ساختاری ساده و سبک، روتور فاقد سیم پیچی و مغناطیس دائم، قیمت ارزان، قابلیت اطمینان بالا، چگالی توان بالاو نسبت گشتاور به حجم مناسب خود، توجه محققان را به خود جلب نموده است.

در سالهای اخیر هدف بیشتر محققان در تحقیقات انجام شده بر روی مبدل موتورSR به منظور افزایش ولتاژ منفی اعمالی به دو سر فاز موتور در زمان های مغناطیس زدایی بوده که این کار توسط تغییرات در ساختار مبدل آن امکان پذیر می باشد. افزایش ولتاژ مغناطیس زدایی باعث کاهش ریپل گشتاور، افزایش گشتاور خروجی و به تبع آن افزایش توان خروجی در موتور می گردد. بعلاوه کاهش زمان سوی گردانی بین دو فاز موجب افزایش بازده در سرعت های بالا خواهد شد. در همین راستا تحقیقات زیادی انجام شده که هر کدام دارای مزایا و معایب خاص خود می باشند. یک دسته از مبدل های معرفی شده دارای ساختاری ساده و در عین حال نیازی به کنترل بر روی ولتاژ خازن خود ندارند، اما عیب آنها محدویت در اعمال ولتاژ مغناطیس زدایی در زوایای همپوشانی مختلف می باشد. دسته دوم مبدل هایی هستند که با داشتن کنترل بر روی ولتاژ خازن توانسته اند مبدلی با قابلیت اعمال ولتاژ مغناطیس زدایی متغییر و بدون محدویت در زوایای همپوشانی مختلف را معرفی کنند که این مبدل ها نیز بدلیل ساختار متفاوت نسبت به مبدل های دیگر دارای حجم زیاد و بازده کمی می باشند.همچنین این مبدل ها صرفاً جزء مبدل های یک جهته در اعمال جریان به شمار می آیند. در دسته ای دیگر از مبدل ها با اعمال سیکل جریان های مثبت و منفی طی یک دوره سیکل جریان موتور، توانسته بازده را افزایش دهد.

در این پایان نامه با توجه به معایب مبدل های معرفی شده، درصدد برآمده تا مبدلی با ساختار کاملاً متفاوت نسبت به مبدل های قبلی و با هدف کاهش معایب آنها معرفی گردد. در این راستا به معرفی مبدلی پرداخته شده که نه تنها معایب مبدل های قبلی همچون محدودیت در زوایای همپوشانی مختلف را نداشته، بلکه دارای ساختاری کاملاً ساده و بدون داشتن ادوات الکترونیکی اضافی که منجر به کاهش بیش از حد بازده در موتور و افزایش هزینه و حجم درایو می شود خواهد بود. همچنین ساختار این مبدل به گونه ای است که می توان در بعضی از موارد سیکل جریان منفی به سر برخی از فازهای موتور اعمال نموده و از آن بعنوان یک مبدل دو جهته استفاده کرد که این کار با توجه به مطالبی که قبلاً شرح داده شد نه تنها باعث اختلال در عملکرد موتور نمی شود بلکه منجر به افزایش بازده نیز می گردد. بعلاوه ساختار این مبدل به گونه ای است که به سادگی و بدون تغییرات در ساختار آن و فقط با تغییر در روش کلید زنی می توان از این مبدل بعنوان یک مبدل نامتقارن معمولی نیز استفاده کرد. همچنین با توجه به ساختار این مبدل می توان از ماژول های قدرت هوشمند نیز به منظور رویکرد صنعتی شدن آن استفاده کرد. در ادامه به بررسی عملکرد مبدل پیشنهادی و بیان معادلات ولتاژ و جریان آن پرداخته و سپس نتایج شبیه سازی و عملی از این مبدل و مقایسه آن با مبدل نامتقارن معمولی صورت گرفته است. نتایج عملی کل سیستم درایو با استفاده از یک پردازندهٔ قدرتمندDSP با مدل TMS۳۲۰F۲۸۱۲ برای انجام محاسبات و تصمیم‌گیری استفاده و نتایج شبیه سازی نیز با استفاده از محیط سیمولینک نرم افزار مطلب ارائه می گردد.

کلمات کلیدی: ۱- موتور سوئیچ رلوکتانس ۲- ولتاژ مغناطیس زدایی ۳- مبدل

فصل اول
مقدمه

۱-۱ پیش زمینه و معرفی صورت مساله تحقیق

امروزه با پیشرفت تکنولوژی در زمینه ادوات الکترونیک قدرت، و به خاطر مزایایی همچون قیمت ارزان و فرکانس عملکرد بالا تمایل محققان جهت استفاده از موتور سوئیچ رلوکتانس[۱] بیشتر شده است. اعمال توان الکتریکی به موتور سوئیچ رلوکتانس به دلیل ساختار منحصر به فردش نمی تواند مستقیماً از سوی لینکdc صورت پذیرد و برای راه اندازی حتماً نیاز به یک درایو دارد. یکی از قسمت های مهم درایو موتور SR مبدل آن می باشد که می تواند تاثیر موثری در نحوه عملکرد، بازده، ریپل گشتاور و توان خروجی موتور داشته باشد. در همین راستا در سال های اخیر بر روی درایو این موتور، منجمله بر روی مبدل آن تحقیقات گسترده ای انجام گرفته که حاصل این تحقیقات ارائه انواع مبدل ها با ساختارهای مختلف و همچنین عملکردهای مختلف بوده است.

موتور سوئیچ رلوکتانس دارای مزایای متعددی همچون سیم پیچی متمرکز و مقاومت کم، کوچک بودن ممان اینرسی روتور، عدم استفاده از جاروبک، چگالی توان مطلوب، عدم تزویج متقابل بین سیم پیچ ها، آزادی انتخاب هر تعداد فاز و بالا بودن قابلیت اطمینان سیستم از ویژگی های منحصربفرد در این موتور می باشد. علاوه بر

[۱] Switched Reluctamce Motor

این به خاطر سادگی ساختار روتور ، مستحکم بودن و چگالی توان بالای خود، انتخاب مناسبی برای کابردهای با سرعت بالا است. همچنین در درایو سوئیچ رلوکتانس، بدلیل تک جهته بودن جریان تنها می توان از یک کلید قدرت استفاده کرد، که خود این امر می تواند باعث اقتصادی تر شدن درایو ماشین سوئیچ رلوکتانس شود.

این ماشین علیرغم ویژگی های منحصر به فرد خود دارای معایبی همچون:

- ریپل گشتاور بالا که می توان با تغییر در ساختار مبدل آن و همچنین روش های کنترلی مناسب آنرا کاهش و حتی به صفر رساند.
- ضریب توان نامناسب که با توجه به ارزش بیش از پیش مصرف انرژی و هزینه های مربوط به آن، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می باشد، که می توان با استفاده از مبدل های مجزا و روش های کنترلی مناسبی که بر روی این مبدل ها پیاده سازی می شود به اصلاح ضریب توان[۱] پرداخت.
- نویز صوتی که دلایل آن بررسی شده‌اند و اصلاحات جدید باعث شده که میزان صدا در مقایسه با ماشین‌های نسل اول تا حد زیادی کاهش یابد.
- موتور SR برای راه اندازی حتماً به یک مبدل نیاز دارد و قابلیت راه اندازی مستقیم و بدون مبدل را ندارد، و این در مقایسه با بعضی از موتورها، همچون موتورهای القایی و dc با تحریک جاروبک عیب قابل محسوبی بشمار می آید.

با توجه به مزایا و معایب این موتور، از درایوهای موتور سوئیچ رلوکتانس در کاربردهای زیادی، نظیر درایو رسام، درایو موتور بالابر، دستگاه اسکناس شمار، سیستم محرک درب، شوینده‌ها و خشک کن‌ها، درایوهای تهویه هوا در قطار، درایو کمپرسور، سانتریفیوژ برای کاربردهای پزشکی، کاربردهای زیر سطحی، کاربردهای نظامی، کاربردهای درایو خطی، مته‌های برقی، پمپ، درایوهایی برای یخچال و فریزر، کاربردهای اتومبیل مثل درایوهای ترمز ضد قفل و سیستم‌های فرمان کنترلی الکتریکی، مخلوط کن‌ها با حداقل نوسان گشتاور و حمل و نقل استفاده می شود [۳]. همچنین بدلیل بازده بالا و ساختار بسیار ساده آن جایگزینی مناسب برای موتورهای القایی تکفاز در کولرهای آبی که یکی از پر کاربردترین لوازم خانگی است بشمار می آید. این کار باعث کاهش مصرف انرژی کولر و نیز کنترل پذیری بهتر آن می شود و می توان میزان خنک کنندگی کولر را تنظیم و یاکنترل نمود.[۴]

همانطور که قبلاً بیان شد یکی از معایب بزرگ موتور SR ریپل گشتاور بالای آن است که در زمان های کموتاسیون جریان بین دو فاز بوجود می آید و می‌توان با کنترل همپوشانی جریان فازهای متوالی آن را کاهش داد، و حتی می توان با استفاده از توابع توزیع گشتاور، خطای گشتاور در این موتور را به صفر رسانید. البته نیازمند استفاده

---

[۱] Power Factor Correction

از پردازنده های با قدرت محاسباتی بالا می باشد. اما یکی دیگر از روش هایی که در کاهش ریپل گشتاور موتور SR موثر بوده و نیازمند به استفاده از پردازنده های با قدرت بالا ندارد، تغییر در ساختار مبدل درایو SRM می باشد. با تغییر در ساختار مبدل می توان ولتاژ منفی اعمالی به موتور را در زمان های مغناطیس زدایی افزایش داده و با این کار جریان را در انتهای سیکل فاز سریعتر کاهش داد. کاهش سریعتر جریان در انتهای سیکل فاز موجب خواهد شد تا سوی گردانی[۱] جریان بین دو فاز کاهش یابد. کاهش زمان سوی گردانی منجر به کم شدن ریپل گشتاور خروجی در موتور خواهد شد، که به تبع آن باعث افزایش متوسط گشتاور خروجی در موتور می گردد. بررسی ها نشان می دهد که افزایش ولتاژ مغناطیس زدایی تا دو برابر ولتاژ لینک dc باعث افزایش ۱۵ الی ۲۰ درصدی گشتاور خروجی موتور می گردد. همچنین افزایش ولتاژ مغناطیس زدایی باعث افزایش بازده موتور در سرعت های بالا شده و با توجه به اینکه یکی از کاربردهای مهم SRM در سرعت های بالا است، منجر به بهبود کارایی و عملکرد آن خواهد شد.

با توجه به ساختار منحصر به فرد موتور SR اعمال سیکل جریان منفی به سیم پیچی های موتور باعث تولید گشتاور منفی در موتور نخواهد شد. این امر سبب گردیده تا مبدل هایی به منظور دو جهته کردن جریان در فازهای مو تور معرفی گردند. این دو جهته کردن جریان باعث خواهد شد تا بازده موتور افزایش یافته و عملکرد آن در سرعت های بالا بهبود یابد.

با توجه به مطالب گفته شده، در این پایان نامه به معرفی یک مبدل جدیدی برای درایو SRM به منظور افزایش ولتاژ مغناطیس زدایی تا دو برابر ولتاژ لینک dc و همچنین دو جهته کردن جریان فازها، با هدف کاهش ریپل گشتاور، افزایش گشتاور خروجی، افزایش بازده موتور و بهبود عملکرد موتور در سرعت های بالا پرداخته شده است. اهداف مشخص این پایان نامه به شرح زیر است:

- معرفی اصول عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانس و مبدل آن
- بررسی مبدل های موجود به منظور افزایش ولتاژ مغناطیس زدایی و دو جهته کردن جریان فازها
- ارائه مدار مبدل پیشنهادی و بیان معادلات مربوط به آن
- ارائه نتایج شبیه سازی و تست عملی از مدار مبدل پیشنهادی و مقایسه آن با مبدل نامتقارن معمولی

۱-۲ مرورکارهای انجام شده قبلی و مشکلات و محدودیت های آنها

[۱] Commutation

با توجه به مطالب بیان شده در بخش قبل، تا کنون مبدل هایی به منظور افزایش ولتاژ مغناطیس زدایی توسط محققان معرفی گردیده که هر کدام دارای مزایا و معایب خاص خود هستند. بعنوان مثال لیانگ[۱] و آحن[۲][۱۴] در سال ۲۰۱۰ به معرفی مبدلی با یک ساختار مناسب و در عین ساده و بدون داشتن کنترل پرداخته اند، که توانسته ولتاژ دو برابر لینک را در زمان مغناطیس زدایی به دو سر فاز موتور اعمال کند. اما این ولتاژ مغناطیس زدایی محدودیت در زوایای همپوشانی مختلف داشته، بطوریکه پهنای این ولتاژ منفی به زاویه همپوشانی بستگی داشته و در همه زوایا همپوشانی یکسان نیست و حتی در بعضی از زوایا اصلاً هیچ ولتاژ مغناطیس زدایی اضافه به دو سر فاز موتور اعمال نمی گردد. همچنین موهان[۳] و جاین[۴][۱۵] به معرفی مبدلی پرداخته اند که محدودیت در اعمال ولتاژ مغناطیس زدایی تا دو برابر ولتاژ لینک dc را نداشته و از لحاظ عملکرد نیز بهتر از مبدل قبلی به شمار می آید، اما از یک مبدل باک- بوست اضافی برای کنترل ولتاژ خازن استفاده کرده که این نیز باعث افزایش المان ها و همچنین افزایش حجم درایو گردیده است. بعلاوه این مبدل یک جهته بوده و نمی توان بعنوان یک مبدل دوجهته از آن استفاده نمود. همچنین افجه ای و اصغر [۱۶] نیز به معرفی مبدل دیگری با همان ساختار و نحوه عملکرد مبدل قبلی پرداخته اند، با تفاوت که از ادوات الکتریکی و الکترونیکی بیشتری به منظور افزایش ولتاژ مغناطیس زدایی استفاده کرده اند. و بالاخره فهیمی و ادرینگتون[۵] [۱۷] نیز به معرفی مبدلی پرداخته اند که با دو جهته کردن جریان اعمالی به فازهای موتور بصورت یک در میان سیکل مثبت و منفی، توانسته بازده موتور را افزایش دهد، اما ساختار آن به گونه ای است که باعث شده تا سیم پیچی فازهای موتور از همدیگر مستقل نبوده و این امر باعث کاهش قابلیت اطمینان موتور SR گردیده و یکی از پارامترهای موثر در موتور SR که همان مستقل بودن فازها از همدیگر است را زیر سوال ببرد.

با توجه به مطالب بیان شده رویکرد این پایان نامه معرفی یک مبدل جدید به منظور افزایش ولتاژ مغناطیس زدایی و دو جهته کردن جریان فاز موتور با هدف کاهش ریپل گشتاور، افزایش گشتاور خروجی و افزایش بازده مبدل بوده است، بطوریکه معایب مبدل های قبلی همچون محدودیت در اعمال ولتاژ مغناطیس زدایی، عدم استفاده از ادوات الکترونیکی و الکتریکی اضافه را نداشته باشد. همچنین از یک قابلیت اطمینان بالاتری در عملکرد نسبت به مبدل های قبلی برخوردار بوده و فازها از همدیگر مستقل بوده و عملکرد موتور با قطع یکی از فازها همچنان ادامه داشته باشد.

---

[۱] J.Liang

[۲] J.W.Ahn

[۳] N. Mohan

[۴] A.K.Jain

[۵] C.S. Edrington

نکته ی حائز اهمیت دیگر اینکه ساختار مبدل های معرفی شده قبلی به گونه ای است که از آنها به عنوان مبدل نامتقارن معمولی نمی توان بهره برد و استفاده از آنها صرفاً محدود به حالت اعمال ولتاژ مغناطیس زدایی بالاتر از ولتاژ لینک dc شده که این نیز باعث شده تا دچار محدودیت در عملکرد باشند. اما با توجه به ساختار مبدل پیشنهادی می توان مبدل را بصورت نامتقارن معمولی نیز راه اندازی کرد. این کار بدون تغییرات در ساختار مبدل و فقط با تغییر در نحوه کلیدزنی امکان پذیر می باشد.

۱-۳ ساختار پایان نامه

در فصل دوم در بخش اول ابتدا به معرفی و بیان انواع ساختارهای موتور و اساس عملکرد آن، که سال روابط و بیان مشخصات موتور می باشد پرداخته و سپس با بیان روابط مربوط به گشتاور، به نحوه تولید گشتاور در موتور سوئیچ رلوکتانس پرداخته شده است. قسمت دوم به معرفی برخی از مبدلهای درایو SRM که شامل معرفی ساختارهای مختلف از مبدل های درایو SRM و شرح عملکرد آنها می باشد پرداخته شده است.

در فصل سوم برخی از ساختارهای مربوط به مبدلهای استفاده شده در درایوهای SRM بمنظور افزایش ولتاژ مغناطیس زدایی تا دو برابر ولتاژ لینک dc با توجه به نتایج عملی آنها ارائه شده و سپس به بیان مزایا و معایب هر کدام پرداخته می شود. و در نهایت مبدل پیشنهادی جهت افزایش ولتاژ مغناطیس زدایی تا دو برابر ولتاژ لینک dc معرفی گردیده و مزایای آن نسبت به ساختارهای قبلی بیان خواهد شد.

فصل چهارم به بررسی مراحل مختلف عملکرد مبدل پیشنهادی که شامل معرفی و بیان معادلات مربوط به مودهای مختلف عملکردی آن می باشد پرداخته و سپس توان انتقالی بین خازن و لینک dc و همچنین پارامترهای تاثیرگذار بر روی ولتاژ آن تحلیل شده اند. و در پایان به بررسی نتایج شبیه سازی از مبدل پیشنهادی نسبت به مبدل نامتقارن معمولی پرداخته شده است. نتایج شبیه سازی نیز با استفاده از محیط سیمولینک[۱] نرم افزار مطلب ارائه می گردد.

فصل پنجم به بیان نتایج عملی از مبدل پیشنهادی و مبدل نامتقارن معمولی پرداخته و سپس به مقایسه این دو مبدل از لحاظ عملکرد و بازده و ضریب توان پرداخته خواهد شد. نتایج عملی کل سیستم درایو با استفاده از یک پردازندهٔ قدرتمند DSP[۲] با مدل TMS۳۲۰F۲۸۱۲ برای انجام محاسبات و تصمیم‌گیری استفاده شده است.

در فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات مربوط به پایان‌نامه بیان می‌گردد.

---

[۱] Simulink

[۲] Digital Signal Processor

فصل دوم
اصول عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانس و مبدل آن

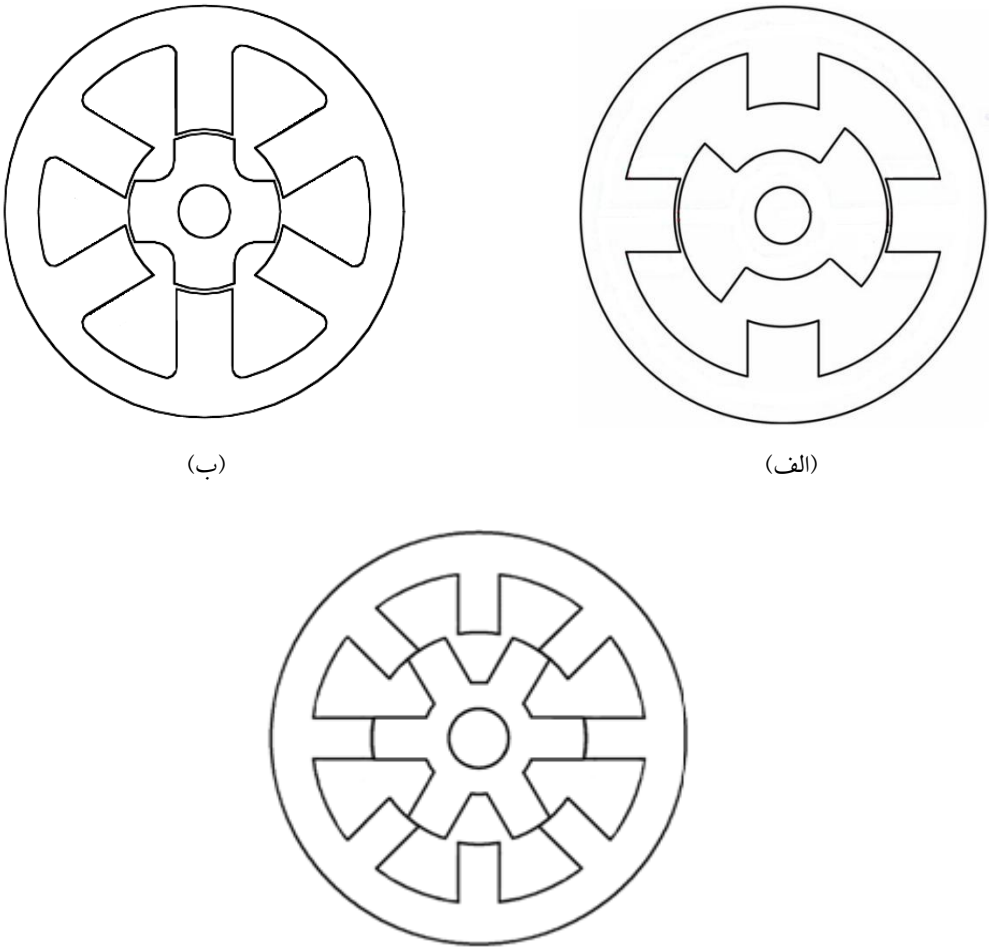
۲-۱ مقدمه

در این فصل به بیان مقدمه‌ای در مورد ماشین های سوئیچ رلوکتانس از قبیل ساختار، روابط و اصول حاکم بر عملکرد آن پرداخته شده است. سپس به معرفی مزایا و معایب برخی از مبدل های موتور SR با ساختارهای مختلف عملکردی پرداخته و در این میان به بیان اصول عملکرد مبدل نامتقارن معمولی که یکی از اساسی ترین مبدلهای درایو SRM می باشد پرداخته شده است.

۲-۲ عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانس

موتور سوئیچ رلوکتانس از لحاظ ساختار و عملکرد شباهت زیادی با موتورهای پله ای دارد، اما با این تفاوت که از قطب های کمتر و در نتیجه از زاویه پله بزرگتری داشته و از گشتاور خروجی بیشتری نیز برخوردار است. این موتور در هر قطب دارای یک دندانه بوده و تولید گشتاور رلوکتانسی آن ناشی از برجستگی های روی روتور می باشد. از سوی دیگر موتور سوئیچ رلوکتانس از خانواده موتورهای رلوکتانسی است و ساختار بسیار ساده ای دارد. این موتور دارای قطب های برجسته در روتور و استاتور بوده و تنها روی قطب های استاتور دارای سیم پیچ است. نداشتن سیم پیچ یا آهنربا روی روتور و نیز کنترل پذیری عالی سرعت، باعث انتخاب قطعی آن برای درایوهای با

سرعت متغیر و پرسرعت شده است. ساختارهای متفاوتی از SRM دوّار وجود دارد که در اینجا نمونه هایی از این موتور با تعداد قطب های ۴/۲ دو فاز، ۶/۴ سه فاز، ۸/۶ چهار فاز درشکل ۲-۱ نشان داده شده اند.



(ب) (الف)

(ج)

شکل ۲-۱:ساختارهای مختلف موتور سوئیچ رلوکتانس. الف- ۴/۲ قطب دو فاز. ب- ۶/۴ قطب سه فاز. د- ۸/۶ قطب چهار فاز[۱۳]

۲-۲-۱ اساس عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانس

تولید گشتاور در موتور سوئیچ رلوکتانس مطابق با آنچه که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، با استفاده از اصل اساسی حاکم بر تبدیل انرژی الکترومکانیکی توضیح داده می‌شود. سیم پیچ فاز دارای N دور می‌باشد و زمانی که با شدت جریان i تحریک می‌شود، شار Φ در آن ایجاد می شود. افزایش جریان تحریک باعث حرکت روتور به سمت استاتور می‌شود. شار بر حسب نیرو محرکه مغناطیسی (mmf) برای دو مقدار فاصله هوایی θ_1 و θ_2 به طوری که $\theta_1 > \theta_2$ می‌باشد، رسم شده و در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. به خاطر اینکه رلوکتانس فاصله هوایی

در موقعی θ_1، غالب می‌باشد و شار کمتری در مدار مغناطیسی ایجاد می‌شود، مشخصه شـار بـر حسـب mmf بـه ازای موقعیت θ_1 خطی می‌باشد. انرژی الکتریکی ورودی به صورت زیر نوشته می‌شود:

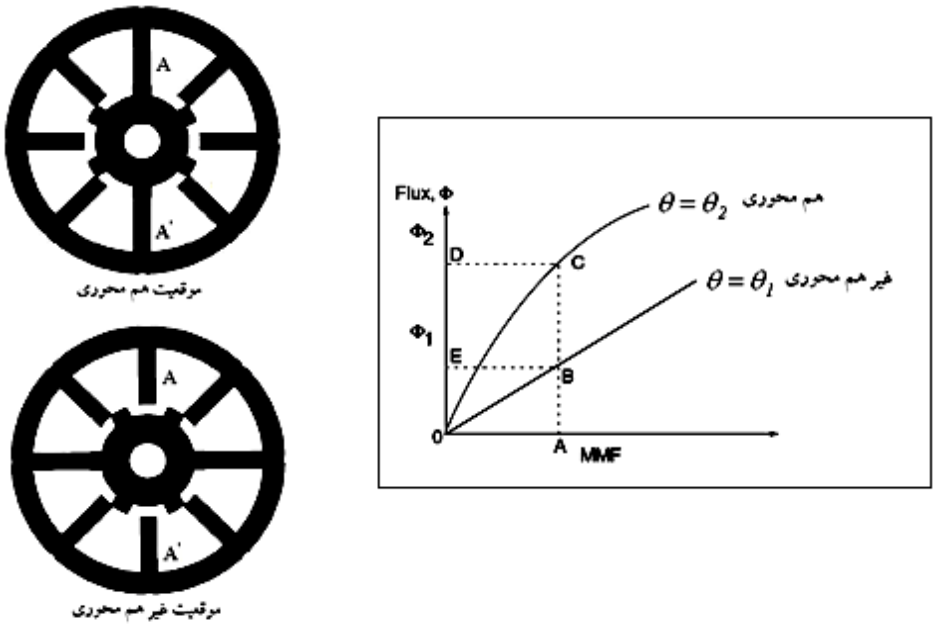
$$W_e = \int ei.dt = \int i.dt \frac{d\lambda}{dt} = \int N\ id\Phi = \int F\ d\Phi \qquad ۱-۲$$

که در آن e، نیروی محرکه القایی (emf) و F، نیروی محرکه مغناطیسی (mmf) می‌باشند.

این انرژی الکتریکی ورودی (W_e) برابر با مجموع انرژی ذخیره شده در سیم پیچ (W_f) و انرژی تبدیل شده به کار مکانیکی (W_m) می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$W_e = W_f + W_m \qquad ۲-۲$$

زمانی که هیچ کار مکانیکی انجام نگرفته است، به عنوان مثال زمانی که روتور در موقعیت اولیه θ_1 قرار دارد، انرژی ذخیره شده میدان برابر با انرژی الکتریکی ورودی بدست آمده از رابطه ۲-۱ می‌باشد.



شکل ۲-۲ : SRM در دو موقعیت هم محوری و غیر هم محوری و مشخصه‌های شار بر حسب mmf [۱]

این انرژی معادل با ناحیه OBEO در شکل ۲-۲ می‌باشد. مکمل انرژی میدان، کوانرژی نام دارد کـه بـا ناحیـه OBAO در شکل ۲-۲ نشان داده شده است و با رابطه ریاضی $\int \Phi.dF$ بیان می‌شود. به طور مشابه برای موقعیت θ_2،

انـرژی میـدان، بـا ناحیـه‌ای OCDO و کـوانرژی، بـا ناحیـه OCAO معـادل مـی‌باشـد. بـه منظـور در نظـر گـرفتن تغییراتافزایشی[1] (جزئی)، معادله ۲-۲ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\delta W_e = \delta W_f + \delta W_m \qquad ۳-۲$$

به ازای تحریک ثابت F_1 که با نقطه کار A در شکل ۲-۲ : SRM در دو موقعیت هم محوری و غیر هم محوری و مشخصه‌های شار بر حسب mmf نشان داده شده است، تغییرات انرژی به ازای این دو موقعیت به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\text{BCDEB}\,\delta W_e = \int_{\phi_1}^{\phi_2} F_1 d\phi = F_1(\phi_2 - \phi_1) = \text{مساحت ناحیه} \qquad ۴-۲$$

$$\text{OCDO}\,\delta W_f = \delta W_{f|_{x=\theta_2}} - \delta W_{f|x=\theta_1} = \text{مساحت ناحیه OBEO} - \text{مساحت ناحیه} \qquad ۵-۲$$

با جایگزینی معادله ۲-۳ در معادله ۲-۵ ، انرژی مکانیکی افزایشی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\text{OBCO}\,\delta W_m = \delta W_e - \delta W_f \text{ مساحت ناحیه} \qquad ۶-۲$$

و آن معادل با ناحیه محدود بین دو منحنی به ازای یک مقدار مشـخص نیـرو محرکـه مغناطیسـی مـی‌باشـد. در مورد ماشین دوّار، انرژی مکانیکی افزایشی برحسب پارامترهای گشتاور الکترومغناطیسـی و تغییـر موقعیـت روتـور بـه صورت زیر بیان می‌شود:

$$\delta W_m = T_e \delta\theta \qquad ۷-۲$$

کـه در آن T_e گشـتاور الکترومغناطیسـی و $\delta\theta$ زاویـه افزایشـی روتـور مـی‌باشـد. از ایـن رو گشـتاور الکترومغناطیسی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$T_e = \frac{\delta W_m}{\delta\theta} \qquad ۸-۲$$

به ازای حالت تحریک ثابت (یا زمانی که mmf ثابت می‌باشد)، کـار مکـانیکی افزایشـی انجـام شـده برابـر بـا کوانرژی افزایشی می‌باشد (W'_f)، که در واقع همان مکمل انرژی میدان می‌باشد. از ایـن رو، کـار مکـانیکی افزایشـی انجام شده به صورت زیر نوشته می‌شود:

[1] Incremental

$$\delta W_m = \delta W_f^{'} \qquad ۹\text{-}۲$$

که داریم:

$$W_f^{'} = \int \Phi dF = \int \Phi d(Ni) = \int (N\ \Phi) di = \int \lambda(\theta, i).di = \int L(\theta, i) i di \qquad ۱۰\text{-}۲$$

به طوری که L اندوکتانس و λ شار پیوندی، توابعی از موقعیت روتور و جریان می‌باشند. این تغییر در کوانرژی بین دو موقعیت θ_1 و θ_2 روتور اتفاق می‌افتد. از این رو گشتاور فاصله هوایی بر حسب پارامترهای کوانرژی به صورت تابعی از موقعیت روتور و جریان به صورت زیر بیان می‌شود:

$$T_e = \frac{\delta W_m}{\delta \theta} = \frac{\delta W_f^{'}(i, \theta)}{\delta \theta}\Big|_{i=cte} \qquad ۱۱\text{-}۲$$

اگر اندوکتانس، به ازای یک جریان مشخص، با موقعیت روتور به صورت خطی تغییر کند (اگر چه که در عمل این گونه نمی باشد) و گشتاور به صورت زیر بدست می‌آید:

$$T_e = \frac{1}{2} \frac{dL(\theta)}{d\theta} . i^2 \qquad ۱۲\text{-}۲$$

که در آن:

$$\frac{dL(\theta, i)}{d\theta} = \frac{L(\theta_2, i) - L(\theta_1, i)}{\theta_2 - \theta_1}\Big|_{i=cte} \qquad ۱۳\text{-}۲$$

و این مشتق اندوکتانس را می‌توان با در نظر گرفتن گشتاور ثابت، بر حسب $N.m/A^2$ بیان کرد. در اینجا تاکید این نکته حائز اهمیت است که اندوکتانس ثابت نبوده و مرتباً در حال تغییر می‌باشد. به همین دلیل موتور سوئیچ رلوکتانس برخلاف موتورهای dc و ac مدار معادل حالت پایدار ندارد.

همان طور که در مقدمه نیز گفته شد مفهوم عملکرد ماشین و ویژگی‌های برجسته آن از عبارت گشتاور آن قابل استنباط است و در این موتورگشتاور با مجذور جریان متناسب است. از این رو، جریان تک قطبی[۱] می‌تواند گشتاوری در یک جهت تولید کند. می توان گشتاور ثابتی توسط شیب منحنی مشخصه موقعیت روتور- اندوکتانس ماشین ایجاد کرد و از طرف دیگر مشخص شد که اندوکتانس سیم پیچی استاتور تابعی از موقعیت روتور و جریان

[۱] Unipolar