بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشگاه صنعتی اصفهان**
دانشکده برق و کامپیوتر

# کاهش ریپل گشتاور در موتور رلوکتانسی سوییچ شونده با استفاده از روش کنترل مود لغزشی و کنترل فازی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

**مهدی مولوی**

استاد راهنما

**دکتر سید مرتضی سقائیان نژاد**

**فروردین ۱۳۸٦**

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت آقای مهدی مولوی

تحت عنوان

# کاهش ریپل گشتاور در موتور رلوکتانسی سوییچ شونده با استفاده از روش کنترل مود لغزشی وکنترل فازی

در تاریخ ۱۳۸٦/۱/۲۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

| | |
|---|---|
| ۱- استاد راهنمای پایان‌نامه | دکتر سید مرتضی سقائیان نژاد |
| ۲- استاد مشاور پایان‌نامه | دکتر محمد ابراهیمی |
| سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده | دکتر علی‌محمد دوست‌حسینی |

**تشکر و قدردانی**

خداوند را سپاسگزارم که به من توفیق داد تا این دوره را به پایان برسانم. بی‌شک گذارندن این دوره بدون همکاری و همراهی خانواده، اساتید و دوستان ارجمندم، امکان‌پذیر نبود لذا از خداوند متعال موفقیت و بهروزی این عزیزان را خواستارم.

لازم می‌دانم از زحمات بی‌دریغ پدر و مادر و خانواده عزیزم که در دوران تحصیل یار و مشوق بنده بوده و راه را در این مسیر هموار نموده‌اند تشکر و قدردانی کنم.

از استاد ارجمند، جناب آقای دکتر سید مرتضی سقائیان نژاد که با رهنمودهای دلسوزانه، در طول انجام پایان‌نامه همراه بنده بوده‌اند قدردانی می‌نمایم. همچنین از جناب آقای دکتر محمد ابراهیمی که در طول این دوره از نعمت مشاوره با ایشان بهره‌مند بوده‌ام و آقایان دکتر مهدی معلم و دکتر حمیدرضا کارشناس که زحمت داوری این پایان‌نامه را پذیرفتند و دکتر علی‌محمد دوست‌حسینی سرپرست تحصیلات تکمیلی تشکر و قدردانی می‌کنم.

**مهدی مولوی**

فروردین ۱۳۸۶

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعـــات، ابتکارات
و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پـایـــان نامه
(رساله) متعلق به دانشگـــــاه صنعتـــــی اصفهان است.

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

## فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


فهرست مطالب.....هشت

چکیده.....٤

**فصل اول: مقدمه** **١**

١-١-مقدمه.....١

١-٢-معرفی موتور SRM.....٢

١-٣-مزایا ومعایب موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده.....٢

١-۴-هدف پروژه و روند ارایه مطالب.....٥

**فصل دوم: ساختمان ومعادلات حاکم بر موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده** **٨**

٢-١-مقدمه.....٨

٢-٢-قطب‌ها، فازها و سیم‌پیچ‌ها.....٨

٢-٣-تولید گشتاور استاتیکی.....١١

٢-۴-حلقه تبدیل انرژی.....١٧

٢-٥-تقسیم بندی انرژی و اثرات اشباع.....١٩

٢-۶ تولید گشتاور دینامیکی.....٢٤

٢-٧-مدارهای مبدل.....٢٤

**فصل سوم:آشنایی با کنترل فازی واعمال آن به موتور SRM** **٢٨**

٣-١-مقدمه.....٢٨

٣-٢-تعاریف مقدماتی.....٢٨

٣-٣-استلزام فازی.....٣٠

٣-۴-استنتاج فازی.....٣٢

٣-٥-فازی کننده.....٣٤

٣-۶-نافازی کننده.....٣٥

۳-۶-۱-نافازی کننده مرکز ثقل ..... ۳۶
۳-۶-۲-نافازی کننده متوسط مرکز ویا ارتفاع ..... ۳۶
۳-۶-۳-نافازی کننده ارتفاع تعدیل یافته ..... ۳۷
۳-۴-۶-نافازی کننده ماکزیمم ..... ۳۷
۳-۷-انواع قوانین کنترل فازی ..... ۳۸
۳-۸.توابع پایه فازی وتوابع پایه شعاعی گوسی ..... ۳۹

**فصل چهارم: کنترل لغزشی** ۴۲

۴-۱-مقدمه ..... ۴۲
۴-۲-سطوح لغزش ..... ۴۴
۴-۲-۱-ساده سازی‌های نوشتاری ..... ۴۴
۴-۲-۲-ساختار فیلیپوف دینامیک‌های معادل ..... ۴۹
۴-۲-۳-عملکرد کامل و برآورد هزینه ..... ۵۰
۴-۲-۴-اعمال مستقیم ورودی‌های کنترلی کلیدزنی ..... ۵۳
۴-۳-تخمین پیوستهٔ قانون کنترل سوئیچینگ ..... ۵۴
۴-۴-سیستم‌های چند ورودی ..... ۵۵

**فصل پنجم: شبیه سازیهای انجام شده و بررسی نتایج** ۵۷

۵-۱-مقدمه ..... ۵۷
۵-۲-شبیه سازی موتور SRM ۸:۶ چهار قطب با اندوکتانس خطی ..... ۵۸
۵-۳-کنترل، تنظیم جریان و کموتاسیون ..... ۶۰
۵-۳-۱-کنترل موتور *SRM* با مدل خطی بوسیله جریان مرجع ..... ۶۱
۵-۳-۲-کنترل موتور *SRM* با مدل خطی بوسیله جریان مرجع و با وجود برش شار ..... ۶۳
۵-۳-۳-کنترل موتور *SRM* با مدل خطی بوسیله منطق فازی و با مدل خطی ..... ۶۴
۵-۳-۴-کنترل موتور *SRM* بوسیله روش کنترل لغزش و مدل اندوکتانس خطی و برش شار ..... ۷۰
۵-۳-۵-کنترل موتور *SRM* با مدل اندوکتانس غیرخطی بوسیله روش کنترل لغزش ..... ۷۲
۵-۳-۶-کنترل موتور *SRM* اندوکتانس غیرخطی با روش کنترل لغزش و تعیین زوایای آتش فازی ..... ۷۷
۵-۴-نتیجه گیری ..... ۸۰

**فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات** ۸۱

۶-۱-نتیجه گیری ۸۱

۶-۲-پیشنهادات ۸۲

**مراجع** ۸۳

**ضمیمه** ۸۶

**ABSTRACT** ۹۰

چکیده

در سالهای اخیر و با پیشرفت چشمگیر صنعت نیمه‌هادیها و عرضه‌ی تجهیزات الکترونیک قدرت به بازار،کنترل موتورهای الکتریکی، پیشرفت سریعی داشته است.ماشینهای الکتریکی متعارف بدون وجود ادوات الکترونیک قدرت نیز می‌توانندکارکرد قابل قبولی ارائه دهند اما ماشینهایی نظیر موتورهای رلوکتانسی سوئیچ شونده، ماشینهای سنکرون رلوکتانسی،موتورهای پله‌ای و انواع دیگر ماشینهای غیرمتعارف تنها با وجود ادوات کنترل و الکترونیک قدرت می‌توانند تمامی‌قابلیت‌های خود را بروز دهند.
موتورهای رلوکتانسی سوئیچ شونده یکی از انواع ماشینهای غیر متعارف هستند که بخاطر مزایای متعدد، کاربرد روزافزونی پیدا کرده‌اند.این موتورها دارای معایبی نیز هستند که مهمترین آنها ریپل گشتاور بالای این موتورهاست. این اشکال بخاطر مکانیزم ناپیوسته و منقطع تولید گشتاور در این موتورهاست.عواملی نظیر تغییر فاز و رفتار بشدت غیرخطی این موتورها باعث تولید گشتاور شدیدا متموج می‌گردد.ریپل گشتاور علاوه بر اثرات مخرب مکانیکی باعث تولید نویز شنیداری نیز می‌گردد
در این پایان نامه ابتدا یک موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده، ۸:٦، چهار فاز با اندوکتانس خطی و کنترل شونده با جریان مرجع وکنترل باند هیسترزیس جریان شبیه سازی می‌شود و نتایج حاصله با نتایج موجود مقایسه ومطابقت داده می‌شود.پس از آن، ریپل گشتاور موجود که ناشی از عدم همپوشانی کامل و یا زیاد بودن همپوشانی بین فازهای مجاور است بوسیله‌ی کنترل و تنظیم زوایای روشنی و خاموشی و بروش فازی کنترل می‌گردد.سپس این روش کنترل به موتور با اندوکتانس غیر خطی و اشباع مغناطیسی اعمال شده، بررسی می‌شود که آیا این روش می‌تواند ریپل گشتاور ناشی از اثرات غیر خطی را جبران نماید یا خیر. سپس اندوکتانس بصورت غیر خطی تخمین زده می‌شود و گشتاور تنها با اعمال جریان مرجع، مشاهده می‌شود.پس از آن با اعمال روش کنترل «مد لغزشی» که یک روش ساختار متغیر است وبا اعمال گشتاور مرجع بعنوان متغییر ورودی، نتایج بررسی شده، با حالت قبل(کنترل فازی) مقایسه می‌شود در پایان محاسن و معایب هر یک از روشهای کنترل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

# فصل اول: مقدمه

**۱-۱-مقدمه [۱]**

مفهوم و کاربرد موتور رلوکتانسی برای اولین بار در سال ۱۸۳۸ میلادی بنیان نهاده شد. اما این نوع موتور تا قبل از پیشرفت الکترونیک قدرت و طراحی الکترومغناطیسی مبتنی بر کامپیوتر و روش‌های عددی، نتوانست تمامی‌پتانسیل خود را آشکار کند. تا اواسط دهه ۱۹۶۰ پیشرفت در این زمینه‌ها شروعی مجدد در زمینه موتور رلوکتانسی را نوید داد و عملکرد این نوع موتور را تا حد درایوهای dc و ac و dc بدون جاروبک ارتقا داد. اصطلاح « موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده » برای اولین بار توسط پروفسور ناصر[۱] و برای موتور ساخت پروفسور لاورنسن[۲] به کار برده شده که این موتور هم اکنون کانون توجه بحث موتور رلوکتانسی است. علاوه بر این، اصطلاحات، « موتور رلوکتانسی بدون جاروبک »، « موتور رلوکتانس متغیر » و « موتور رلوکتانسی کموتاتوری » اصطلاحات دیگری هستند که از بین اصطلاحات معادل دیگر، کاربرد بیشتری داشتند. عبارت دقیق بیانگر ساختمان این موتور را می‌توان « موتور رلوکتانس متغیر، با برجستگی دوگانه استاتور و روتور و کموتاسیون استاتیکی » بیان کرد.

---

[1] Nasar
[2] Lawrenson

**۱-۲-معرفی موتور SRM**

تا اواسط دهه ۱۹۵۰ میلادی تحقیقات زیادی روی موتور رلوکتانسی انجام گردید. به عنوان مثال پروفسور لاورنسن و همکارانش از دانشگاه لیدز[۱] انگلستان، فرنچ[۲] و ویلیامز[۳] ( ۱۹٦۷ ) بدفورد[٤] ( ۱۹۷۲ ) فورد[٥] ( ۱۹۷٤ ) پروفسور برن[٦] از دانشگاه روبلین، شرکت جرت[۷] در فرانسه، پروفسور هریس[۸] از دانشگاه نیوکستل،لانگ[۹] از دانشگاه MIT کسانی بودند که بر روی ساختمان و استراتژی‌های کنترلی این موتور کار کردند.

موتور سوئیچ رلوکتانس دارای دو تفاوت اساسی با موتور پله‌ای رلوکتانس متغیر است اول این که در موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده زاویه هدایت جریان با توجه به موقعیت روتور که معمولاً به وسیله سنسور موقعیت نصب شده روی شافت سنجیده، کنترل و همزمان می‌شود. از این جهت موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده دقیقاً شبیه به موتور dc بدون جاروبک است و با موتور پله‌ای که معمولاً به وسیله شکل موج جریان مربعی و بدون سنجش محل روتور تغذیه می‌شود، تفاوت اساسی دارد.

تفاوت دوم بین موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده و موتور پله‌ای در این است که موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده مشابه موتور dc بدون جاروبک برای تبدیل انرژی با بازده بالا در سرعت‌های زیاد طراحی شده است. در حالی که موتور پله‌ای به عنوان یک موتور گشتاوری و برای محدوده سرعت کم مناسب است.

تفاوت اخیر، تفاوت اساسی بین این دو نوع موتور بوده، به تفاوت‌های ساختاری در ساختمان، مبدل الکترونیک قدرت، سیستم کنترلی و طراحی موتور منجر می‌شود. موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده فراتر از یک موتور پله‌ای سرعت بالا است. این موتور بسیاری از ویژگی‌های جالب توجه درایوهای القائی و درایوهای dc کموتاتوری را با هم‌ترکیب می‌کند.مشابه آن چه در موتورهای dc بدون جاروبک مشاهده می‌شود.عملکرد این موتور همچنین هزینه پایین ساخت آن باعث شده است که در سال‌های اخیر به عنوان یک موضوع پژوهشی مهم مورد توجه محققین قرار گیرد.

**۱-۳-مزایا ومعایب موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده[۱و۲]**

.مهم‌ترین مزایای موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد :

---

[۱] Ledes [۲] French [۳] Williams [٤] Bedford [٥] Ford
[٦] J.V.Byrne [۷] Jarret [۸] M.R.Harris [۹] J.H.Lang

۱)روتور این نوع موتور ساده است و مراحل ساخت آن نسبت به بقیه انواع موتورها کمتر است. همچنین لختی روتور در این نوع موتور کم است.

۲)سیم پیچی استاتور این نوع موتور ساده است ؛ انتهای کلاف‌ها کوتاه بوده، بین سیم پیچی فازها هیچ گونه تقاطعی وجود ندارد.

۳).در اکثر کاربردهای عملی، کلیه تلفات روی استاتور ظاهر می‌شوند و به همین جهت عمل خنک کاری به سهولت انجام می‌شود.

٤)به خاطر عدم وجود مغناطیس دائم بیشینه دمای مجاز روتور بیش از موتور PM خواهد بود.

٥)گشتاور تولیدی مستقل از پلاریته جریان فاز است. این مطلب به کم شدن تعداد کلیدهای نیمه‌هادی در کنترل‌کننده کمک می‌کند.

٦)در شرایط خطا، ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه صفر و یا بسیار کم است.

۷)بر خلاف کنورتورهای موتورهای ac و dc بدون جاروبک اکثر مدارهای کنورتور به کار رفته با موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده از خطر اتصال کوتاه داخلی مصون هستند.

۸)گشتاور راه‌اندازی مقدار قابل ملاحظه‌ای دارد و مشکل جریان هجومی‌اولیه مانند آنچه که در موتورهای القائی دیده می‌شود وجود ندارد.

۹)سرعت‌های بسیار بالا قابل دست یابی هستند.

۱۰)مشخصه گشتاور به جریان را می‌توان به سادگی جهت کاربردهای مورد نیاز، گسترش و تغییر داد.

موارد یاد شده مزایای بدیهی موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده هستند که بدون دقت یا با کمی‌دقت اثبات می‌شوند. مزایای دیگر این موتور با محاسبات ریاضی و مدل سازی‌های دقیق مشخص می‌شوند.

به خاطر عدم وجود شار مغناطیسی ثابت، سرعت ماکزیمم در توان ثابت مانند موتورهای PM، به وسیله کنترل‌کننده ولتاژ محدود نمی‌شود. با این وجود، نبود تحریک مغناطیس دائم، بار تحریک را به دوش سیم‌پیچ‌های استاتور و کنترل‌کننده قرار می‌دهد و تلفات پریونیت مس را افزایش می‌دهد. خصوصاً در موتورهای کوچک این مسئله یک عیب عمده محسوب می‌شودکه کارآئی و گشتاور به جریان موتور را کاهش می‌دهد.موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده تعداد معایب آشکاری دارد که مهم‌ترین آنها پالسی بودن و یا حداقل طبیعت غیر همگون[1] گشتاور تولیدی است که منجر به ریپل گشتاور و نهایتاً نویز صوتی می‌شود. در محدوده سرعت کم امکان کاهش ریپل گشتاور به کمتر از ۱۰ درصد مقدار مؤثر گشتاور وجود دارد که

---

[1] uniform

با موتورهای القائی و موتورهای dc بدون جاروبک قابل رقابت است ولی این کار در گستره‌های وسیع سرعت عملاً ناممکن است. خوشبختانه به دست آوردن گشتاور یکنواخت در سرعت‌های کم که در آن بارهای مکانیکی به ریپل گشتاور حساسند، ساده‌تر است. نویز صوتی در ماشین‌های بزرگ که فرکانس‌های کلید زنی فراصوتی عملی نیستند، بسیار جدی است ؛ با این وجود در ماشینهای کوچک نیز حتی اگر همه نویزهای صوتی حذف شوند یک نویز صوتی پایه باقی می‌ماند. سطح نویز به اندازه ماشین بستگی دارد به طوری که در ماشین‌های کوچک بسیار کمتر رخ می‌نماید. همچنین نویز و ریپل گشتاور به ساختمان مکانیکی ودقت زوایای آتش بستگی دارد. با وجود سادگی ساختمان این موتور ملاحظات الکتریکی و مکانیکی جهت کم کردن نویز صوتی، به افزایش هزینه منجر خواهد شد.

اثر دیگر ریپل گشتاور این است که ریپل جریان به وجود آمده در منبع تغذیه dc بزرگ خواهد شد که نیاز به فیلترهای خازنی بزرگ را باعث خواهد شد. این مسئله باعث به وجود آمدن هارمونیک در خط تغذیه ac می‌شود.

ساختار قطب برجسته روتور و استاتور باعث ایجاد مشخصه مغناطیسی به شدت غیر خطی می‌شود که مباحث شبیه سازی،آنالیز و کنترل آنها را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده مانند موتورهای پله‌ای بر اساس اصل « ورنر » که در آن گشتاور از چرخش روتور با سرعت کمتر از سرعت میدان دوار ماشین و تقاطع دو میدان با تعداد قطب‌ها و فازها مساوی روتور، به وجود می‌آید، کار می‌کند. بدون این تقاطع، گشتاور بر واحد حجم بسیار کمتر از مقدار گشتاور بر واحد حجم موتور القائی و موتور PM و هزینه پرداختی زیادتر از انواع دیگر موتورها خواهد بود.

جهت عملکرد بهینه موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده ، فاصله هوایی در این نوع موتور بایستی مساوی موتور القائی با قطر مشابه یا کمی‌بیش از آن باشد.موتور PM بدون جاروبک با فاصله هوایی بزرگ‌تر می‌تواند کار کند در نتیجه در مراحل تولید، تلرانس بزرگ‌تری می‌توان به کار برد.

شکل قطب موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده را نمی‌توان مانند موتورهای ac و dc عادی به صورت مربعی ساخت. با وجود این که این نکته در تمامی‌طراحی‌ها به کار گرفته می‌شود اما بررسی‌های کمی در این زمینه انجام شده است. قطب‌های بلند و باریک با توجه به کاهش اثر منفی انتهای کلاف‌ها، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ با این وجود این شکل قطب، اثر کاهش شار و اندوکتانس را نیز به دنبال خواهد داشت که برای یک موتور نمونه نیاز به تعداد دورهای زیادتر از سیم نازک‌تر در مقایسه با ماشین ac را سبب خواهدشد که این امر منجر به کاهش زمان سیکل کلید زنی در عناصر الکترونیک قدرت و نیاز به کلیدهای سریعتر در کنترل موتور خواهد شد.

تلاش‌های زیادی در جهت مقایسه توان خروجی و بازده موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده و دیگر درایوهای الکتریکی انجام گرفته است. جهت معنی دار و کاربردی شدن این مقایسه‌ها لازم است مقایسه‌ها بر روی تعداد محدودی از ویژگی‌های این موتورها انجام شود. و یک مقایسه کلی و همه جانبه بین این موتورها تقریباً غیر ممکن است.

موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده نمی‌تواند به وسیله منبع ولتاژ ac راه‌اندازی شود یا کار کند. همچنین استفاده همزمان بیش از یک موتور از یک اینورتر امکان‌پذیر نیست. معمولاً استفاده از سنسور موقعیت شافت موتور جهت مشخص کردن زمان‌های کموتاسیون و پسخورد سرعت، ضروری است. تلاش‌های زیادی جهت عملکرد بدون سنسور موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده انجام شده است؛ اما با حذف سنسور، پیچیدگی مدار کنترلی، پیچیدگی عملکرد موتور و هزینه تمام شده را افزایش می‌دهد

.سیم بندی موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده به صورت نوعی از موتور القائی بسیار پیچیده‌تر است. حداقل چهار و معمولاً شش سیم برای یک موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده سه فاز علاوه بر سیم‌کشی سنسور لازم است.

**۱-۴-هدف پروژه و روند ارایه مطالب**

هدف اصلی این پایان نامه، ابتدا بررسی عوامل موثر بر ریپل گشتاور در موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده است؛ سپس با استفاده از روشهای کنترل، سعی در کاهش ریپل گشتاور تولیدی می‌شود.

فصل اول به معرفی موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده می‌پردازد و مزایا و معایب آن را بررسی می‌کند.

فصل دوم معادلات ریاضی حاکم بر موتور را بیان می‌کند و پارامترهای اساسی موتور را معرفی می‌کند و با استفاده از قوانین الکترومغناطیس، روابط گشتاور و انرژی را اثبات می‌کند.همچنین اشباع و اثرات آن را بررسی می‌نماید.روابط دینامیکی حاکم بر کارکرد این موتور نیز در این فصل بررسی می‌شوند.انواع مدارهای مبدل موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده و مزایا و معایب هر یک بررسی شده‌اند.استراتژی‌های کنترل مربوط به این موتور به اختصار تشریح شده‌اند.

در فصل سوم، ابتدا منطق فازی وریاضیات مربوط به آن شرح داده شده است سپس روش اعمال آن به موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده ومدارات شبیه سازی آن ارایه شده‌اند. همچنین نتایج شبیه سازی بحث شده نتیجه‌گیری شده است.

در فصل چهارم، روش کنترل لغزش که یک روش غیر خطی و ساختار متغییر است معرفی می‌شود و مزایای آن بیان می‌شوند و ریاضیات حاکم بر آن،قضایای مورد نیاز و محدودیتهای این روش بحث می‌شوند.

در فصل پنجم ابتدا موتور سوئیچ رلوکتانس با استفاده از فصول قبلی و بصورت اندوکتانس خطی شبیه سازی شده، نتایج با اعمال جریان مرجع مشخص، مشاهده شده‌اند.سپس کنترل فازی جهت، تنظیم زوایای روشنی و خاموشی به موتور اعمال می شود و گشتاور بدون ریپل بدست می آید.پس از آن مدل موتور بصورت اندوکتانس غیر خطی تغییر می کند و نتایج با اعمال جریان مرجع مشاهده می شود و پس از آن با اعمال کنترل مود لغزشی به مدل غیر خطی، نتایج مشاهده و تفسیر می شود.پس از آن دو کنترل کننده (فازی و مود لغزشی)بصورت همزمان به مدل کامل ارائه شده نتایج، بحث می شوند.

# فصل دوم: ساختمان ومعادلات حاکم بر موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده

## ۲-۱-مقدمه

موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده یک موتور با برجستگی دوگانه روی استاتور و روتور و تحریک واحد است. این بدان معناست که این موتور دارای قطب‌های برجسته روی روتور و استاتور است ؛ ولی تنها یکی از این دو ( معمولاً استاتور ) دارای سیم پیچ است. روتور فاقد سیم پیچ یا قفس بوده لیکن مشتمل بر قطب‌های برجسته مورب است. (همانگونه که در شکل۲-۱ مشخص شده است.)

## ۲-۲-قطب‌ها، فازها و سیم‌پیچ‌ها [۱]

شکل‌های کلاسیک و رایج موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده در شکل ۲-۱ برای تعداد قطب‌های استاتور:روتور٦:٤ و ٨:٦ نشان داده شده‌اند . آرایش‌های دیگر مانند٦:٤،٦:٢:٤، ١٠:٤، ١٢:٨ و موارد متنوع با بیش از یک دندانه در قطب مثل ١٢:١٠ [۳] نیز وجود دارد.

بسیاری از قوانین پایه‌ای در انتخاب تعداد قطب‌ها، سطح قطب‌ها و تعداد فازها به وسیله پرفسور لاورنسن[1] ( ۱۹۸۰ ) پایه‌گذاری شد[٤]. ارتباط بین سرعت و فرکانس کلید زنی اصلی از این اصل اساسی که اگر قطب‌ها به صورت زوج مخالف برای تشکیل یک فاز پیچیده شوند یک پالس گشتاور در هر گام چرخش روتور تولید می‌کنند، به دست می‌آید.

فرکانس اصلی کلید زنی در یک فاز برابر است با

$$f_1 = nN_r = \frac{r.p.m}{60} \times N_r \qquad Hz \tag{۱-۲}$$

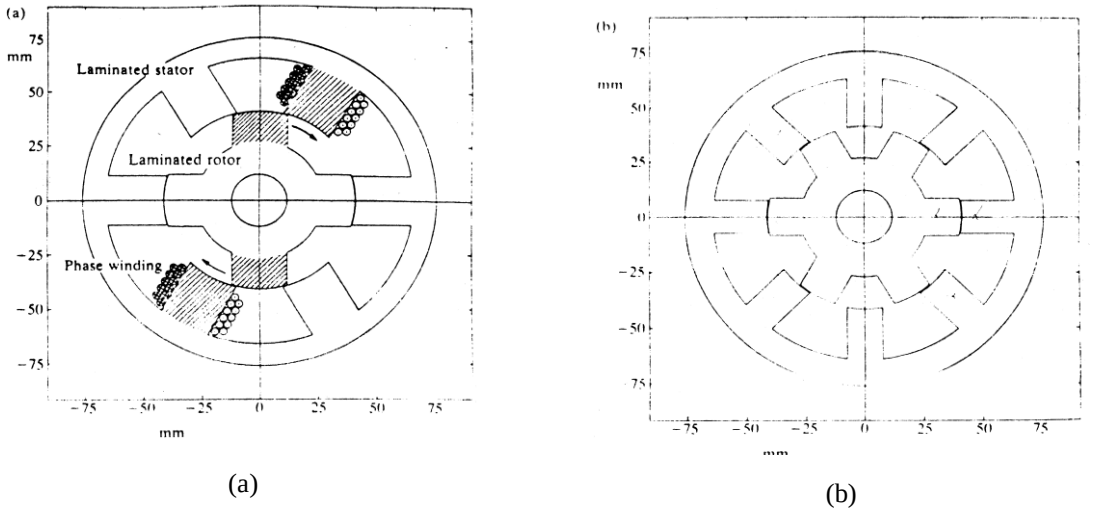
---

[1] Lawrenson

که در آن n سرعت بر حسب دور بر ثانیه و $N_r$ تعداد قطب‌های روتور است. اگر q فاز وجود داشته باشد $qN_r$ گام ( مرحله ) در هر چرخش وجود خواهد داشت و زاویه گام یا تق برابر خواهد بود با

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{qN_r} \qquad rad \tag{۲-۲}$$

تعداد قطب‌های استاتور معمولاً بیش از قطب‌های روتور است. مساحت قطب‌ها معمولاً به وسیله مکانیزم تولید گشتاور که مبتنی بر تمایل استاتور و روتور به کم کردن فاصله هوایی و هم محور کردن قطب‌ها است، مشخص می‌شود. اگر از شکفتگی شار صرفنظر کنیم بایستی همپوشانی بین زوج قطب‌های




(a) (b)

شکل (۲-۱) مقطع عرضی یک موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده. هر فاز شامل سیم پیچ‌هایی روی دو قطب مقابل است (a) سه فاز ۶:۴ (b) چهار فاز ۸:۶

روتور و فازهای تحریک شده استاتور وجود داشته باشد. در این حالت، گشتاور در طول زاویه $\beta$ که کمتر از کمان قطبی روتور و استاتور است به وجود می‌آید. برای ایجاد یک گشتاور یک جهتی در تمامی ۳۶۰ درجه، واضح است که $\beta$ نباید کوچک‌تر از زاویه گام باشد. در غیر این صورت فواصلی که در آنها هیچ گشتاوری تولید نمی‌شود وجود خواهد داشت بنابراین

$$\beta > \varepsilon \tag{۳-۲}$$

برای دست یابی به بزرگ‌ترین تغییرات اندوکتانس فاز با چرخش روتور، باید زوایای بین قطبی روتور بیش از طول قطب‌ها باشد و یا

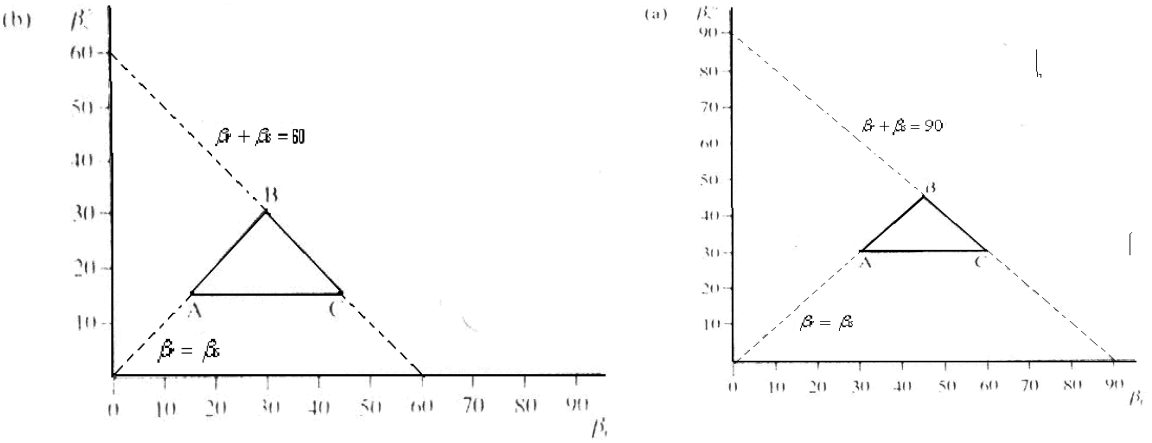
$$\frac{2\pi}{N_r} - \beta_r > \beta_s \tag{٤-۲}$$

این شرط، تضمین می‌کند هنگامی‌که روتور در وضعیت غیر هم محور مربوط به قطب‌های استاتور یک فاز قرار دارد، هیچ همپوشانی بین قطب‌های روتور و استاور وجود ندارد و بنابراین اندوکتانس بسیار کم خواهد بود.

وضعیت غیر هم محوری به صورت تقابل هر یک از محورهای بین قطبی روتور و محور قطبی استاتور یک فاز تعریف می‌شود. در شکل ۲-۱-b، فاز عمودی در وضعیت غیر هم محور و فاز افقی در وضعیت هم محور قرار دارد.

نکته دیگر درباره قوس قطب‌ها این است که قوس قطب استاتور معمولاً کمی‌کوچکتر از قوس قطب روتور ساخته می‌شود این کار باعث افزایش جزئی در سطح شیارها و سطح مقطع سیم پیچ مسی و نسبت اندوکتانس هم‌محور/غیرهم‌محور می‌شود.

بررسی دقیق‌تر قوس‌های قطب به صورت گرافیکی در شکل۲-۲ نشان داده شده است. مثلث‌های ABC که به نام مثلث‌های قابل اجرا[1] نامیده می‌شوند [۴]. محدوده تغییرات‌ترکیبی $\beta_s$ و $\beta_r$ را نمایش می‌دهند.




شکل (۲-۲) محدودیتهای زوایای کمان قطب (مثلثهای قابل اعمال) a)سه فاز ۶:۴ b ) چهار فاز ۸:۶

همان گونه که انتظار داریم تغییر در عملکرد ماشین با تغییر نقاط روی مثلث، قابل ملاحظه خواهد بود. شکل ۲-۳ سطح مقطع یک موتور سه فاز را به‌ترتیب برای نقاط A، B و C نشان می‌دهد.

در شکل ۲-۳-a طراحی C سبب می‌شود که اندوکتانس غیر هم محوری خیلی زیاد شود و فضای سیم بندی قطبی کاهش یابد. طرح B فضای سیم پیچی زیادتری نسبت به C دارد ولی اندوکتانس غیر هم محوری آن هنوز خیلی زیاد است که این اثر ناشی از شکفتگی شار است.

---

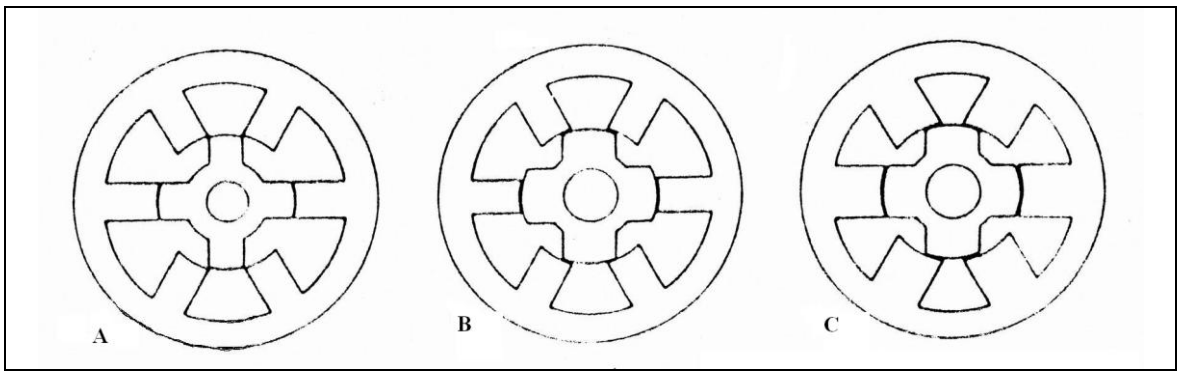
[1] feasible

طرح A فضای سیم پیچی زیاد و نسبت اندوکتانس بالایی دارد که باعث بالا رفتن کارآئی و توان بر واحد حجم می‌شود، اما ضربان گشتاور آن بیش از موارد دیگر است.

نسبت پهنای دندانه به گام دندانه در حالت بهینه آن که در طراحی موتورهای stepper به کار گرفته می‌شود را نمی‌توان در موتورهای رلوکتانسی سوئیچ شونده به کار برد. واضح است که می‌توان ترکیبی از قوس قطب‌ها را طوری انتخاب کرد که بالاترین نسبت اندوکتانس را داشته باشند و بنابراین بیشترین نسبت گشتاور به جریان استاتیکی را ایجاد کند. اما عوامل متعدد دیگر را باید در نظر گرفت تا این انتخاب بهترین انتخاب ممکنه باشد؛ از جمله این عوامل می‌توان ریپل گشتاور، گشتاور راه اندازی و اثر اشباع را نام برد.

اثرات انحناء قطبی معمولاً بیش از موتورهای پله‌ای مطرح هستند که به دلیل کمتر بودن تعداد قطب‌ها نسبت به موتور پله‌ای است. همانند موتور پله ای، شکل قطب‌ها در موتور رلوکتانسی سوئیچ شونده به نحوی ساخته می‌شود که تلفات هسته، mmf القائی در آهن روتور و استاتور و اثرات منفی اشباع کاهش یابند. همچنین شکل قطب استاتور اندوکتانس غیر هم محوری را کاهش می‌دهد اما در عوض فضای سیم پیچی را اندکی کاهش می‌دهد.

تغییرات جزئی دیگری در شکل ساده۲-۳ لازم و مفید خواهد بود و مثلاً ساختن استاتور به شکل شش ضلعی که فضای سیم بندی را افزایش می‌دهد و استحکام مکانیکی هسته را افزایش می‌دهد و همزمان هزینه تولید را نیز کاهش می‌دهد.




شکل (۲-۳) مقطع عرضی حاصل از تغییرات مطابق مثلثهای قابل اجرا شکل(۲-۲)

**۲-۳-تولید گشتاور استاتیکی**

در شکل ۲-٤ موتور رلوکتانسی ابتدائی نشان داده شده است. هنگامی‌که جریان از سیم پیچ فاز عبور می‌کند روتور تمایل دارد تا با قطب‌های استاتور هم جهت شود که سبب تولید گشتاوری می‌شود که روتور را در جهت مینیمم کردن رلوکتانس حرکت می‌دهد.