NRI-ER-652-PETPN11-1-99-L

رصد وضعیت و تدوین برنامهٔ عملیاتی توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی



نام مدیر پروژه: علیرضا قائم‌پناه
نام مجری: سهراب امینی ولاشانی

DOI: 10.30503/nripress.2020.064


بسم الله الرحمن الرحيم

رصد وضعیت و تدوین برنامهٔ عملیاتی توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی

مدیر پروژه:

علیرضا قائم‌پناه

مجری:

سهراب امینی ولاشانی

انتشارات پژوهشگاه نیرو

۱۴۰۰

کد گزارش: NRI-ER-652-PETPN11-1-99-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. طرح انتقال و توسعهٔ دانش و فناوری الکتروموتورهای سنکرون رلوکتانسی و ابررسانا

تدوین برنامهٔ عملیاتی توسعهٔ فناوری‌های طراحی، ساخت و تولید و به‌کارگیری موتورهای رلوکتانسی/ علیرضا قائم‌پناه. ویراستار: عاطفه سهرابی کاشانی. کارفرما: پژوهشگاه نیرو. ۱۴۰۰.

۱۵۱ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. امینی ولاشانی، سهراب، مجری.

انتشارات پژوهشگاه نیرو

طرح انتقال و توسعهٔ دانش و فناوری الکتروموتورهای سنکرون رلوکتانسی و ابررسانا

کلیهٔ حقوق قانونی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۹-۸۸۰۷۹۴۰۱

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

بسمه تعالی

شماره:

تاریخ:

پژوهشگاه نیرو

فرم تعهدنامهٔ اصالت اثر

اینجانب علیرضا قائم‌پناه متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب و همکاران به شرح زیر است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است.

کلیهٔ حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است.

 DOI: 10.30503/nripress.2020.064

پیشگفتار

یکی از طرح‌های کلان فناوری تعریف‌شده در مرکز توسعهٔ فناوری موتورهای پیشرفته، کسب دانش فنی طراحی و ساخت موتورهای رلوکتانسی است. این موتورها علاوه‌بر این‌که از سطح بازدهی انرژی بیشتری نسبت به موتورهایی با سه فاز القایی برخوردارند و ازاین‌رو جایگزین مناسبی برای موتورهای القایی در کاربردهای استاندارد صنعتی هستند، به‌علت نیاز به آهنربا با حجم کمتر از موتورهای آهنربایی، جایگزین مناسبی برای این موتورها، به‌خصوص برای استفاده در انواع خودروهای برقی نیز محسوب می‌شوند.

برای رسیدن به درک درست از وضعیت موتورهای رلوکتانسی و تعیین صحیح گام‌های لازم برای اکتساب فناوری موتورهای رلوکتانسی و توسعهٔ کاربرد آن‌ها، پروژه‌ای با عنوان «تدوین برنامهٔ عملیاتی توسعهٔ فناوری‌های طراحی، ساخت و تولید و به‌کارگیری موتورهای رلوکتانسی» تعریف شد تا در قالب این پروژه، وضعیت تحقیقاتی، تولید و به‌کارگیری موتورهای رلوکتانسی تعیین شود و پس از آن، گام‌های لازم برای توسعهٔ این فناوری، با توجه به مقتضیات کشور، مشخص شود. در این گزارش، با استفاده از منابع مختلف علمی، شامل مقالات معتبر مجلات و کنفرانس‌های علمی، کتاب‌ها و گزارش‌های معتبر، وضعیت طراحی، تولید و کاربردهای موتورهای رلوکتانسی (شامل موتورهای سنکرون رلوکتانسی و موتورهای سوئیچ رلوکتانس) بررسی شده است و توانمندی‌های کشور در این زمینه مشخص شده است.

در ادامه، با کمک گرفتن از فعالیت‌های انجام‌شده در پروژهٔ «تدوین سند راهبردی و نقشه راه توسعهٔ فناوری‌های طراحی، ساخت و تدوین دانش فنی انواع موتورهای موردنیاز در صنعت برق ایران»، ابتدا چشم‌انداز روشنی از توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی در افق زمانی سال ۱۴۰۴ ارائه شده و سپس چالش‌های دستیابی به اهداف کلان اعلام‌شده در چشم‌انداز بررسی شده است. بررسی راهکارهای مقابله با این چالش‌ها و همچنین، ارائهٔ اهداف خرد و برنامه‌های اجرایی توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی مسائلی هستند که در ادامهٔ این گزارش به آن‌ها پرداخته شده‌اند.

این گزارش به تحقیق آقای علیرضا قائم‌پناه و با نظارت آقای مهندس حسن ابراهیمی‌راد تهیه شده است.

فهرست مطالب

کلیهٔ حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پژوهشگاه نیرو است..... أ
پیشگفتار..... أ
فهرست مطالب..... ب
فهرست جداول..... ط
مقدمه..... ۱۰
۱- فصل اول: معرفی موتورهای سنکرون رلوکتانسی..... ۱۱
۱-۱- مقدمه..... ۱۲
۱-۲- انواع ساختارهای موتورهای سنکرون رلوکتانسی..... ۱۳
۱-۳- مقایسهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی محوری و عرضی..... ۱۵
۱-۴- مزایا و معایب موتورهای سنکرون رلوکتانسی..... ۱۶
۱-۵- افزودن آهنربای دائم به موتورهای سنکرون رلوکتانسی..... ۱۷
۲- فصل دوم: مقایسهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی با سایر موتورهای الکتریکی..... ۲۰
۲-۱- مقدمه..... ۲۱
۲-۲- مقایسهٔ ماشین سنکرون رلوکتانسی با موتورهای القایی..... ۲۱
۲-۳- مقایسهٔ ماشین سنکرون رلوکتانسی با موتورهای آهنربای دائم..... ۲۲
۲-۴- مقایسهٔ ماشین سنکرون رلوکتانسی با موتورهای سوئیچ رلوکتانس..... ۲۴
۲-۴-۱- ساختار..... ۲۵
۲-۴-۲- مشخصهٔ عملکردی..... ۲۵
۲-۴-۳- نویز صوتی..... ۲۵
۲-۴-۴- عملکرد در سرعت‌های زیاد..... ۲۵
۲-۴-۵- ادوات الکترونیک قدرت..... ۲۵
۲-۴-۶- تلفات و بازده..... ۲۶
۲-۴-۷- کنترل..... ۲۶
۳- فصل سوم: روند پیشرفت موتورهای سنکرون رلوکتانسی..... ۲۷
۳-۱- مقدمه..... ۲۸
۳-۲- موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرسرعت..... ۲۸
۳-۳- موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز..... ۳۱
۳-۴- بهبود عملکرد با طراحی ساختارهای جدید..... ۳۲
۳-۵- کاربردهای کششی موتور سنکرون رلوکتانسی..... ۳۵
۳-۵-۱- خودروهای برقی ـ هیبریدی دوچرخ..... ۳۶
۳-۵-۲- خودروهای برقی ـ هیبریدی سبک و سنگین شهری و بین‌شهری..... ۳۸
۳-۵-۲-۱- موتورهای رلوکتانسی با روتور خارجی..... ۴۰
۳-۵-۲-۲- مواد به‌کاررفته در ساخت موتورهای رلوکتانسی پیشنهادی برای خودروهای الکتریکی..... ۴۰
۴- فصل چهارم: شرکت‌های سازندهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی و حامیان تحقیقات در زمینهٔ این موتورها..... ۴۲
۴-۱- مقدمه..... ۴۳

۴-۲- شرکت‌های تولیدکننده و کاربردهای موتورهای سنکرون رلوکتانسی ۴۳
۴-۳- بررسی حجم بازار موتورهای سنکرون رلوکتانسی ۴۴
۴-۴- حامیان تحقیقات در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی ۴۵
۴-۵- جمع‌بندی موتورهای سنکرون رلوکتانسی ۴۷
۵- فصل پنجم: معرفی موتورهای سوئیچ رلوکتانس ۴۹
۵-۱- مقدمه ۵۰
۵-۲- اصول عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانس ۵۰
۵-۳- فازها، قطب‌ها و سیم‌پیچی ۵۳
۵-۴- درایو ۵۶
۵-۵- ساختارهای مختلف موتور سوئیچ رلوکتانس ۵۷
۵-۵-۱- موتور سوئیچ رلوکتانس خطی ۵۸
۵-۵-۲- موتور سوئیچ رلوکتانس صفحه‌ای ۵۸
۵-۵-۳- موتور سوئیچ رلوکتانس لوله‌ای ۵۹
۵-۵-۴- موتورهای سوئیچ رلوکتانس تک‌فاز ۵۹
۵-۵-۵- موتور سوئیچ رلوکتانس دوفاز ۶۱
۵-۵-۶- موتور سوئیچ رلوکتانس با ساختار چندبخشی ۶۲
۵-۵-۶-۱- موتور سوئیچ رلوکتانس با روتور چندبخشی ۶۲
۵-۵-۶-۲- موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور چندبخشی ۶۴
۶- فصل ششم: راهکارهای ارائه‌شده برای بهبود عملکرد موتورهای سوئیچ رلوکتانس ۶۵
۶-۱- مقدمه ۶۶
۶-۲- تغییر در ساختار معمول موتور سوئیچ رلوکتانس ۶۶
۶-۲-۱- مواد مورد استفاده در ماشین ۶۶
۶-۲-۲- سیم‌پیچی استاتور ۶۸
۶-۳- تغییر کلی ساختار موتورهای سوئیچ رلوکتانس ۶۹
۶-۳-۱- موتور سوئیچ رلوکتانس با ساختار چندلایه ۶۹
۶-۳-۲- ماشین سوئیچ رلوکتانس دو استاتوره ۷۰
۶-۳-۳- ماشین سوئیچ رلوکتانس با ساختار چندبخشی ۷۱
۶-۳-۳-۱- روتور چندبخشی ۷۱
۶-۳-۳-۲- استاتور چندبخشی ۷۲
۶-۴- سیستم‌های حمل‌ونقل الکتریکی ۷۷
۷- فصل هفتم: کاربردهای ماشین سوئیچ رلوکتانس ۸۵
۷-۱- مقدمه ۸۶
۷-۲- کاربردهای صنعتی ۸۶
۷-۳- سیستم حمل‌ونقل الکتریکی ۸۷
۷-۴- جمع‌بندی موتورهای سوئیچ رلوکتانس ۸۹

۸- فصل هشتم: تعیین کنش‌گران کلیدی و بررسی توانمندی‌های کشور در زمینهٔ طراحی، تولید و به‌کارگیری موتورهای رلوکتانسی..... ۹۱
۸-۱- مقدمه..... ۹۲
۸-۲- کنش‌گران..... ۹۲
۸-۳- توانمندی‌های کشور در زمینهٔ طراحی و تولید موتورهای الکتریکی..... ۹۴
۸-۳-۱- مواد اولیهٔ مورد استفاده در موتورهای رلوکتانسی..... ۹۴
۸-۳-۲- طراحی و تولید صنعتی انواع موتورهای رلوکتانسی و درایو آن‌ها..... ۹۴
۸-۳-۳- آزمایش‌ها و استانداردهای موتورهای رلوکتانسی..... ۹۵
۹- ترسیم چشم‌انداز و تعیین اهداف کلان در زمینهٔ توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی..... ۹۶
۹-۱- مقدمه..... ۹۷
۹-۲- ادبیات چشم‌انداز و اهداف کلان..... ۹۷
۹-۲-۱- چشم‌اندازپردازی..... ۹۷
۹-۲-۲- اهداف کلان..... ۹۸
۹-۳- بررسی وضعیت فناوری موتورهای رلوکتانسی..... ۹۹
۹-۳-۱- موتورهای سنکرون رلوکتانسی..... ۹۹
۹-۳-۱-۱- زمینه‌های تحقیقاتی..... ۹۹
۹-۳-۱-۱-۱- جایگزینی موتورهای القایی..... ۹۹
۹-۳-۱-۱-۲- کاربردهای پرسرعت..... ۹۹
۹-۳-۱-۱-۳- موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز (خط راه‌انداز)..... ۱۰۰
۹-۳-۱-۱-۴- افزایش بازدهی موتورهای سنکرون رلوکتانسی..... ۱۰۰
۹-۳-۱-۱-۵- استفاده در خودروهای برقی دوچرخ، وسایل نقلیهٔ سبک و سنگین..... ۱۰۰
۹-۳-۱-۲- زمینه‌های صنعتی و بازار..... ۱۰۱
۹-۳-۱-۳- حمایت از تحقیقات در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی..... ۱۰۲
۹-۳-۱-۴- چرخهٔ عمر فناوری..... ۱۰۲
۹-۳-۲- موتورهای سوئیچ رلوکتانس..... ۱۰۳
۹-۳-۲-۱- زمینه‌های تحقیقاتی..... ۱۰۳
۹-۳-۲-۲- زمینه‌های صنعتی و بازار..... ۱۰۴
۹-۳-۲-۳- حمایت از تحقیقات در زمینهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس..... ۱۰۴
۹-۳-۲-۴- چرخهٔ عمر فناوری..... ۱۰۵
۹-۳-۳- جمع‌بندی و ارائهٔ پیشنهاد..... ۱۰۵
۹-۴- ترسیم چشم‌انداز و تعیین اهداف کلان..... ۱۰۶
۹-۴-۱- چشم‌انداز توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی..... ۱۰۶
۹-۴-۱-۱- خلاصهٔ وضعیت فناوری در دنیا و داخل کشور..... ۱۰۶
۹-۴-۱-۲- بیانیهٔ چشم‌انداز توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی..... ۱۰۷
۹-۴-۲- اهداف کلان توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی..... ۱۰۷
۱۰- بررسی چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی و پیشنهاد اقدامات مقابله با این چالش‌ها..... ۱۰۹

۱۰-۱- مقدمه ۱۱۰
۱۰-۲- کارکرد توسعه و انتشار دانش ۱۱۰
۱۰-۳- کارکرد کارآفرینی ۱۱۲
۱۰-۴- جهت‌دهی به سیستم ۱۱۳
۱۰-۵- شکل‌دهی به بازار ۱۱۴
۱۰-۶- بسیج منابع ۱۱۶
۱۰-۷- مشروعیت‌بخشی ۱۱۶
۱۰-۸- شناسنامهٔ اقدامات ۱۱۷
۱۰-۸-۱- تشکیل گروه‌های پژوهشی برای تمرکز فعالیت‌های پژوهشی آن‌ها در زمینهٔ موتورهای رلوکتانسی ۱۱۸
۱۰-۸-۲- نمونه‌سازی موتورهای رلوکتانسی (با اولویت سنکرون رلوکتانسی) برای استفاده در کاربردها و تجهیزات مختلف صنعتی و عرضهٔ نتایج آن به بخش صنعت کشور ۱۲۰
۱۰-۸-۳- تأمین هزینه‌های تهیهٔ مواد اولیه با کیفیت مناسب برای فعالیت‌های پژوهشی در کشور در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی ۱۲۰
۱۰-۸-۴- حمایت مالی برای رسیدن به دانش فنی طراحی و ساخت موتورهای رلوکتانسی و برای تجاری‌سازی آن‌ها در تعامل با شرکت‌های دانشگاهی و هسته‌های فناوری شرکت‌های رشد ۱۲۱
۱۱- برنامه‌های اجرایی و اهداف خرد و شاخص‌های اجرای برنامه ۱۲۲
۱۱-۱- مقدمه ۱۲۳
۱۱-۲- موتورهای سنکرون رلوکتانسی ۱۲۳
۱۱-۲-۱- موتورهای سنکرون رلوکتانسی با کاربردهای استاندارد صنعتی ۱۲۳
۱۱-۲-۲- موتورهای سنکرون رلوکتانسی در کاربرد تجهیزات خانگی ۱۲۷
۱۱-۲-۳- موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرسرعت ۱۲۷
۱۱-۲-۴- کاربرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی در انواع خودروهای برقی (دوچرخ و چهارچرخ) ۱۲۸
۱۱-۲-۵- ارائهٔ ساختارهای جدید برای ارتقای عملکرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی ۱۲۸
۱۱-۲-۶- بررسی انواع خطا در موتورهای سنکرون رلوکتانسی ۱۲۹
۱۱-۲-۷- جمع‌بندی پیشنهادها ۱۲۹
۱۱-۳- موتورهای سوئیچ رلوکتانس ۱۳۲
۱۱-۳-۱- کاربردهای صنعتی موتورهای سوئیچ رلوکتانس ۱۳۳
۱۱-۳-۲- موتورهای سوئیچ رلوکتانس ارزان‌قیمت (تک‌فاز و دوفاز) ۱۳۳
نتیجه‌گیری ۱۳۴
مراجع ۱۳۶

فهرست اشکال

شکل ۱-۱: ساختار موتور رلوکتانسی اولیه..... ۱۲
شکل ۱-۲: روتور یک موتور سنکرون رلوکتانسی با قفس راه‌اندازی..... ۱۲
شکل ۱-۳: موتور سنکرون رلوکتانسی عرضی ۴ قطبی با سه مانع شار در هر قطب..... ۱۳
شکل ۱-۴: ساختار روتور یک موتور سنکرون رلوکتانس عرضی..... ۱۴
شکل ۱-۵: موتور سنکرون رلوکتانسی با روتور دوبخشی..... ۱۴
شکل ۱-۶ : ساختار روتور یک موتور رلوکتانسی محوری..... ۱۵
شکل ۱-۷: ساختار روتور موتور سنکرون رلوکتانسی محوری (با ۶۲ ورق به ضخامت ۰/۵ mm در هر قطب)..... ۱۵
شکل ۱-۸: ساختار یک موتور ۴ قطبی رلوکتانسی عرضی با آهنربای دائم کمکی..... ۱۷
شکل ۱-۹: موتور سنکرون رلوکتانس تقویت‌شده با آهنربا و مقایسهٔ گشتاور سرعت آن (پایین) با موتور معمولی (بالا)... ۱۸
شکل ۱-۱۰: دیاگرام برداری موتور: A) سنکرون رلوکتانسی، B) سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی..... ۱۸
شکل ۱-۱۱: موتور سنکرون رلوکتانس با آهنربای دائم کمکی با دو لایهٔ استاتور..... ۱۹
شکل ۱-۱۲: تغییر محل آهنرباها به‌منظور کاهش اثر شار مغناطیس‌زدا بر آن‌ها..... ۱۹
شکل ۲-۱: شماتیک برش عرضی و ابعادی: a) موتورسنکرون رلوکتانسی عرضی، b) موتور القایی..... ۲۱
شکل ۲-۲: بیشینهٔ گشتاور موتورهایی با ۴ قطب مختلف در ابعاد بهینه و تلفات یکسان نسبت به x..... ۲۲
شکل ۲-۳: میزان آهنربای دائم مورد استفاده در موتورهای AC نسبت به ضریب برجستگی..... ۲۳
شکل ۳-۱: سیستم‌های پرسرعت الکترومکانیکی..... ۲۹
شکل ۳-۲: دسته‌بندی موتورهای پرسرعت برحسب نوع موتورها..... ۲۹
شکل ۳-۳: موتور سنکرون رلوکتانسی دوقطبی سرعت‌بالا..... ۳۰
شکل ۳-۴: موتور سنکرون رلوکتانسی ۴ قطبی با ساختار یکپارچه..... ۳۰
شکل ۳-۵: ساختار جدید موتور رلوکتانسی پرسرعت..... ۳۰
شکل ۳-۶: ساختار موتور سنکرون رلوکتانسی برای سرعت ۵۰۰۰۰ دور بر دقیقه..... ۳۱
شکل ۳-۷: موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز: a) پرشدگی کامل موانع شار، b) پرشدگی جزئی موانع شار..... ۳۲
شکل ۳-۸: موتورهای سنکرون رلوکتانس خودراه‌انداز..... ۳۲
شکل ۳-۹: استاتور و روتور یک موتور سنکرون رلوکتانسی با سیم‌پیچی متمرکز..... ۳۳
شکل ۳-۱۰: ساختار ارائه‌شده: a) نمای کلی، b) قطب‌های برجستهٔ روتور، c) برش مقطعی از ساختار..... ۳۵
شکل ۳-۱۱: a) ورقهٔ مورد استفاده برای ساخت روتور، b) روتور ماژولار مونتاژشده..... ۳۵
شکل ۳-۱۲: نتایج مقایسهٔ گشتاور و ریپل حاصل از آن در ساختارهایی با تعداد موانع شار متفاوت..... ۳۷
شکل ۳-۱۳: موتور سنکرون رلوکتانسی سه‌فاز ۷۵۰ وات با ۴ قطب و ۲۴ شیار و ۳ مسدودکنندهٔ شار در اسکوتر برقی... ۳۸
شکل ۳-۱۴: تعداد لایهٔ flux barrier در روتور خارجی موتور سنکرون رلوکتانس..... ۳۸
شکل ۳-۱۵: موتورهای رلوکتانسی با روتور خارجی..... ۴۰
شکل ۳-۱۶: استفاده از مواد مغناطیسی با فاز دوگانه در موتورهای سنکرون رلوکتانس..... ۴۱
شکل ۵-۱: دو نمونه موتور سوئیچ رلوکتانس..... ۵۰
شکل ۵-۲: عملکرد ماشین سوئیچ رلوکتانس: الف) هم‌راستایی فاز c و ب) هم‌راستایی فاز a..... ۵۱
شکل ۵-۳: ماشین ۳ فاز با ۴ قطب روتور و ۶ قطب استاتور (۴/۶): الف) ناهم‌راستایی فاز A و ب) هم‌راستایی فاز A... ۵۲
شکل ۵-۴: تغییرات اندوکتانس فاز با چرخش روتور..... ۵۲

شکل ۵-۵: مدار معادل تک‌فاز ماشین سوئیچ رلوکتانس..... ۵۳
شکل ۵-۶: مدار یک ساق درایور رایج ماشین سوئیچ رلوکتانس..... ۵۶
شکل ۵-۷: انواع مبدل‌های ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس براساس نوع کلیدزنی..... ۵۷
شکل ۵-۸: دسته‌بندی ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس براساس جهت شار و حرکت..... ۵۷
شکل ۵-۹: دسته‌بندی ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس براساس هندسهٔ کلی..... ۵۸
شکل ۵-۱۰: ماشین سوئیچ رلوکتانس خطی سه‌فاز: الف) شار طولی، ب) شار عرضی..... ۵۹
شکل ۵-۱۱: ماشین سوئیچ رلوکتانس لوله‌ای..... ۵۹
شکل ۵-۱۲: موتور سوئیچ رلوکتانس تک‌فاز: الف) موتور ۲/۲ و ب) موتور ۴/۲..... ۶۰
شکل ۵-۱۳: ساختار پیشنهادی موتور سوئیچ رلوکتانس تک‌فاز ۲/۲ برای استفاده در کاربردهای پرسرعت..... ۶۱
شکل ۵-۱۴: ساختار موتور سوئیچ رلوکتانس تک‌فاز شار محوری..... ۶۱
شکل ۵-۱۵: ساختار متداول موتور سوئیچ رلوکتانس دوفاز..... ۶۲
شکل ۵-۱۶: موتور سوئیچ رلوکتانس دوفاز با ساختار جدید..... ۶۲
شکل ۵-۱۷: ساختار یک موتور سوئیچ رلوکتانس با روتور چندبخشی ۱۲/۱۰..... ۶۳
شکل ۵-۱۸: مسیر شارهای مغناطیسی در هستهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس با روتور معمولی و روتور چندبخشی..... ۶۳
شکل ۵-۱۹: ماشین سوئیچ رلوکتانس با استاتور چندبخشی: (الف) E شکل، (ب) C شکل، (ج) U شکل..... ۶۴
شکل ۶-۱: توزیع بازده انواع فناوری‌های موتورهای الکتریکی برحسب توان خروجی..... ۶۷
شکل ۶-۲: منحنی گشتاور سرعت و تلفات هسته روی دو نمونه ماشین قبل و بعد از گرمادهی..... ۶۸
شکل ۶-۳: a) ماشین FT-SRM و (b) ماشین HT-SRM سه فاز ۸/۱۲..... ۶۸
شکل ۶-۴: موتورهای سوئیچ رلوکتانس دو استاتورهٔ ۱۰۰ کیلووات: الف) سیم‌پیچی توزیع‌شده، ب) سیم‌پیچی متمرکز همهٔ دندانه‌های استاتور و ج) سیم‌پیچی متمرکز نیمی از دندانه‌های استاتور..... ۶۹
شکل ۶-۵: موتور سوئیچ رلوکتانس ساختار چندلایه..... ۷۰
شکل ۶-۶: موتور سوئیچ رلوکتانس دو استاتوره با روتور چندبخشی..... ۷۰
شکل ۶-۷: موتور سوئیچ رلوکتانس دو استاتوره با روتور فنجانی: الف) مدل دوبعدی، ب) نقشهٔ انفجاری و ج) نمونهٔ آزمایشگاهی..... ۷۱
شکل ۶-۸: موتور سوئیچ رلوکتانس سه‌فاز ۱۲/۸ (با روتور ۸ بخشی)..... ۷۲
شکل ۶-۹: ساختار مغناطیسی موتور سوئیچ رلوکتانس روتور خارجی با روتور چندبخشی C شکل (فقط سیم‌پیچی یک‌فاز در این شکل نشان داده شده است)..... ۷۲
شکل ۶-۱۰: الف) موتور سوئیچ رلوکتانس با روتور و استاتور معمول و ب) موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور چندبخشی (استاتور U شکل). هسته‌های U شکل به‌وسیلهٔ قسمت‌های غیرمغناطیسی (خاکستری رنگ) در کنار هم قرار داده شده‌اند. ۷۳
شکل ۶-۱۱: موتور سوئیچ رلوکتانس شار محور با استاتور چندبخشی..... ۷۳
شکل ۶-۱۲: ساختار موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور E شکل: الف) با روتور چندبخشی و ب) با روتور معمول ۷۴
شکل ۶-۱۳: مقایسهٔ نتایج محاسبه و اندازه‌گیری گشتاور متوسط هر سه موتور برحسب سرعت..... ۷۵
شکل ۶-۱۴: موتور سوئیچ رلوکتانس ۸/۸ تک‌فاز: الف) ساختار معمول و ب) استاتور چندبخشی U شکل ۷۶
شکل ۶-۱۵: موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور (C شکل) و روتور چندبخشی: الف) نمای سه‌بعدی موتور و ب) نمای سه‌بعدی روتور..... ۷۷
شکل ۶-۱۶: موتور سوئیچ رلوکتانس شار محوری روتور بیرونی (دو روتوره) و روتور چندبخشی..... ۷۸

شکل ۶-۱۷: موتور سوئیچ رلوکتانس شار محوری روتور بیرونی (دو روتوره).....۷۹
شکل ۶-۱۸: موتور سوئیچ رلوکتانس: الف) با روتور معمول، ب) با روتور استوانه‌ای و ج) تغییرات ابعاد و ضخامت لایهٔ آهنی نازک در روتور استوانه‌ای برای افزایش استحکام لایه.....۷۹
شکل ۶-۱۹: موتور سوئیچ رلوکتانس با هسته‌های C شکل.....۸۰
شکل ۶-۲۰: موتورهای رلوکتانسی تعبیه‌شده در داخل چرخ با روتور خارجی برای کاربرد در خودروهای سنگین.....۸۱
شکل ۶-۲۱: موتور سوئیچ رلوکتانس روتور خارجی برای ساختارهای خودروی برقی درون چرخی.....۸۱
شکل ۶-۲۲: موتور سوئیچ رلوکتانس با روتور چندبخشی.....۸۲
شکل ۶-۲۳: موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور دوهسته‌ای C شکل: الف) نمای دوبعدی و ب) نمای سه‌بعدی موتور.....۸۲
شکل ۶-۲۴: الف) سطح مقطع دوبعدی و دید از روبه‌روی موتور با تک سیم‌پیچه و ب) سطح مقطع دوبعدی و دید از روبه روی موتور با دو سیم‌پیچه.....۸۳
شکل ۶-۲۵: الف) ساختار موتور سوئیچ رلوکتانس، ب) ساختار شعاعی یک قطب ، ج) ساختار محور یک قطب.....۸۴
شکل ۹-۱: روش‌شناسی چشم‌اندازپردازی.....۹۸
شکل ۹-۲: تعداد مقالات ارائه‌شده در سایت مؤسسهٔ IEEE در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی در سال‌های مختلف ۱۰۱
شکل ۹-۳: تعداد مقالات ارائه‌شده در سایت مؤسسهٔ IEEE در زمینهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس در سال‌های مختلف ۱۰۴

فهرست جداول

جدول ۲-۱: مزایا و معایب موتورهای سنکرون آهنربای دائم و سنکرون رلوکتانسی..... ۲۴
جدول ۲-۲: مقایسهٔ عملکرد موتورهای القایی، سوئیچ رلوکتانس و سنکرون رلوکتانسی..... ۲۶
جدول ۳-۱: اهداف تخصصی برای سیستم‌های الکتریکی کششی..... ۳۶
جدول ۵-۱: ترکیب‌های مجاز قطب‌های روتور و استاتور در موتور سوئیچ رلوکتانس (انتخاب ترکیب‌های بدون سایه بهتر است)..... ۵۴
جدول ۶-۱: مشخصات طراحی سه نمونه موتور مرجع..... ۷۴
جدول ۸-۱: کنش‌گران مختلف در حوزهٔ صنعت موتورهای الکتریکی و عملکرد آن‌ها..... ۹۳
جدول ۱۰-۱: جمع‌بندی چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد توسعه و انتشار دانش..... ۱۱۱
جدول ۱۰-۲: جمع‌بندی چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد کارآفرینی..... ۱۱۳
جدول ۱۰-۳: جمع‌بندی چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد جهت‌دهی به سیستم..... ۱۱۴
جدول ۱۰-۴: جمع‌بندی چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد شکل‌دهی به بازار..... ۱۱۵
جدول ۱۰-۵: جمع‌بندی چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد بسیج منابع..... ۱۱۶
جدول ۱۰-۶: جمع‌بندی چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد مشروعیت‌بخشی..... ۱۱۷
جدول ۱۰-۷: تخمین هزینه‌های هریک از مراکز پژوهشی خاص موتورهای رلوکتانسی..... ۱۲۰
جدول ۱۱-۱: لیست پروژه‌های پژوهشی و اجرایی برای توسعهٔ فناوری موتورهای سنکرون رلوکتانسی..... ۱۲۹
جدول ۱۱-۲: لیست طرح‌های پژوهشی و پایان‌نامه‌ها برای توسعهٔ فناوری موتورهای سنکرون رلوکتانسی..... ۱۳۲

 DOI: 10.30503/nripress.2020.064

مقدمه

موتورهای رلوکتانسی شامل موتورهای سنکرون رلوکتانسی و موتورهای سوئیچ رلوکتانس، هرچند مدت‌زمان زیادی است که ابداع شده‌اند، اما در سال‌های اخیر، در کاربردهای مختلف مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. مهم‌ترین دلیل این اقبال لزوم کاهش شدت مصرف انرژی الکتریکی و از طرف دیگر، افزایش قابل‌توجه قیمت آهنرباهای کمیاب خاکی است. ساختارهای مختلف موتورهای سنکرون رلوکتانسی در محدوده‌های استانداردهای انرژی IE4 و IE5 قرار دارند. از طرف دیگر، ساختار استاتور آن‌ها مشابه موتورهای القایی است. بنابراین، گزینهٔ مناسبی برای استفاده در تجهیزات صنعتی و خطوط تولیدی (به‌جای موتورهای القایی سه‌فاز) هستند. بازدهی انرژی موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی مشابه موتورهای آهنربای دائم است و از آن به‌عنوان جایگزینی برای موتورهای آهنربای دائم در انواع خودروهای برقی ـ هیبریدی محسوب می‌شوند. تلاش‌های زیادی برای ارائهٔ ساختارهای جدید از موتورهای سوئیچ رلوکتانس می‌شود تا ضمن کاهش نویز صوتی این موتورها، بازدهی انرژی موتورهای سوئیچ رلوکتانس به بازدهی موتورهای آهنربای دائم نزدیک شود.

در این گزارش تلاش شده است که وضعیت فعلی موتورهای رلوکتانسی در زمینهٔ فعالیت‌های تحقیقاتی، تولید صنعتی و کاربرد آن‌ها مشخص شود. لذا در فصل‌های اول تا چهارم به رصد وضعیت موتورهای سنکرون رلوکتانسی و در فصل‌های پنجم تا هفتم نیز به رصد وضعیت موتورهای سوئیچ رلوکتانس پرداخته شده است. در ادامه و در فصل هشتم، توانمندی‌های کشور در زمینهٔ طراحی و تولید این موتورها به‌اختصار بررسی شده است. با توجه به وضعیت این فناوری‌ها، برنامهٔ عملیاتی و نقشه راه توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی (با توجه به اسناد قبلی تدوین‌شده برای توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کشور) در این گزارش مشخص شده است. به این منظور در فصل نهم، چشم‌انداز توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی در افق سال ۱۴۰۴ شمسی، مطابق با چشم‌انداز سند توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی مشخص شده است. در فصل دهم، چالش‌های اصلی توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی بررسی شده و راهکارهای مقابله با این چالش‌ها نیز پیشنهاد شده است. با توجه به بررسی‌های این دو فصل، پروژه‌های لازم برای توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی در فصل پایانی این گزارش پیشنهاد شده‌اند.

برای جلوگیری از تکرار فعالیت‌های قبلی انجام‌شده در پژوهشگاه نیرو، در تهیهٔ مطالب فصل‌های اول تا چهارم که مربوط به موتورهای سنکرون رلوکتانسی است، از مطالب و مراجع گزارش «ماشین‌های الکتریکی سنکرون رلوکتانس» مربوط به پروژهٔ «آینده‌پژوهی و رصد وضعیت آهنرباهای دائم و کاربردهای آن‌ها در ماشین‌های الکتریکی» و گزارش‌های «رصد وضعیت فناوری محرکه‌های الکتریکی (ماشین‌های الکتریکی و مدار کنترل و درایو) در خودروهای الکتریکی دوچرخ» و «رصد وضعیت فناوری محرکه‌های الکتریکی (ماشین‌های الکتریکی و مدار کنترل و درایو) در خودروهای الکتریکی سبک و سنگین شهری» مربوط به پروژهٔ «کاربرد ماشین‌های الکتریکی در سیستم‌های حمل‌ونقل الکتریکی» استفاده شده است.

همچنین، در تهیهٔ مطالب فصل‌های پنجم تا هفتم (مربوط به موتورهای سوئیچ رلوکتانس) نیز از مراجع ارائه‌شده در پروژهٔ «آینده‌پژوهی و رصد وضعیت آهنرباهای دائم و کاربردهای آن‌ها در ماشین‌های الکتریکی» و گزارش‌های پروژهٔ «رصد وضعیت فناوری محرکه‌های الکتریکی (ماشین‌های الکتریکی و مدار کنترل و درایو) در خودروهای الکتریکی دوچرخ» و «رصد وضعیت فناوری محرکه‌های الکتریکی (ماشین‌های الکتریکی و مدار کنترل و درایو) در خودروهای الکتریکی سبک و سنگین شهری» مربوط به پروژهٔ «کاربرد ماشین‌های الکتریکی در سیستم‌های حمل‌ونقل الکتریکی» استفاده شده است.

در فصل هشتم که به بررسی توانمندهای داخل کشور پرداخته شده است، از مطالب گزارش‌های پروژه‌های مختلف که در چند سال اخیر دربارهٔ توانمندی‌های کشور در زمینهٔ تحقیقات، طراحی، تولید و آزمایش انواع موتورهای الکتریکی تهیه شده بود، استفاده شده که در جای خود به آن‌ها اشاره شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

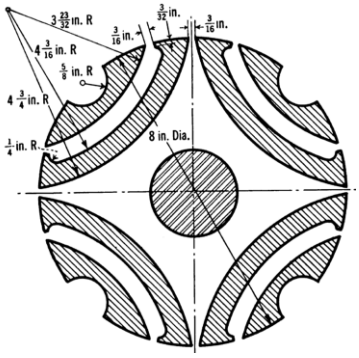
فصل اول: معرفی موتورهای سنکرون رلوکتانسی

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

۱-۱- مقدمه

همان‌طور که در مقدمهٔ این گزارش اشاره شده است، در نوشتن مطالب این فصل از مطالب و مراجع گزارش «ماشین‌های الکتریکی سنکرون رلوکتانس» مربوط به پروژهٔ «آینده‌پژوهی و رصد وضعیت آهنرباهای دائم و کاربردهای آن‌ها در ماشین‌های الکتریکی» استفاده شده است [۱].

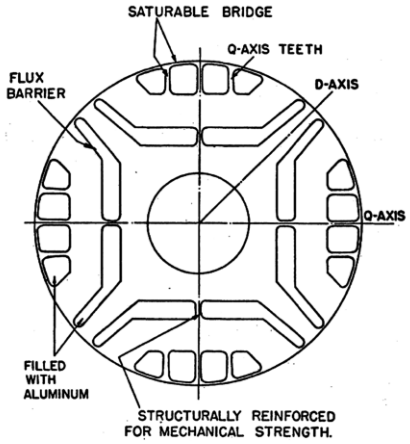
نخستین موتور سنکرون با میدان گردان در سال ۱۹۲۳ ازطرف Kostko معرفی شد [۲]. روتور پیشنهادی او به چند بخش تقسیم می‌شد و به‌منظور افزایش ضریب برجستگی، مسیرهایی مانند آنچه در شکل ۰-۱ نشان داده شده است، برای شار درنظر گرفته شد [۳].



شکل ۰-۱: ساختار موتور رلوکتانسی اولیه

قبل از توسعهٔ امروزی منابع تغذیهٔ موتورهای جریان متناوب، این نوع موتورها از یک منبع تغذیه با فرکانس ثابت تغذیه می‌شدند. لذا ضروری بود که از قفسهٔ اتصال کوتاه‌شده برای ایجاد گشتاور راه‌اندازی در این موتورها استفاده شود. در آن مقطع زمانی، استفاده از قفسه برای خودراه‌انداز کردن موتور باعث می‌شد که موتور سنکرون رلوکتانسی عملکرد بهینه نداشته باشد. شکل ۰-۲ یک نمونه از موتورهایی را که در این دوره طراحی شدند، نشان می‌دهد [۴].

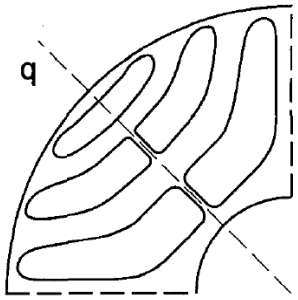
توسعهٔ ادوات الکترونیکِ قدرت به طراحان اجازه داد تا قفسهٔ راه‌اندازی را از روی موتور حذف کنند و عملکرد بهتری به‌وسیلهٔ کنترل میدان گردان به‌وجود آورند. در دههٔ ۹۰ میلادی، آقای Vagati نشان داد که این موتور می‌تواند به‌راحتی با استفاده از روش کنترل برداری و کنترل مستقیم گشتاور کار کند و بر مشکلات گذشته فائق آید [۵-۷]. متناسب با روش کنترل برداری و کنترل مستقیم گشتاور که در این دهه توسعه یافتند، ساختارهای بهبودیافته‌ای از موتورهای سنکرون رلوکتانسی که عملکرد بهتری داشتند، نیز ارائه شدند.



شکل ۰-۲: روتور یک موتور سنکرون رلوکتانسی با قفس راه‌اندازی

 DOI: 10.30503/nripress.2020.064

متناسب با اهداف جدید، روش‌های طراحی و تحلیل موتورهای سنکرون رلوکتانسی نیز تغییر کردند و موتورهای سنکرون رلوکتانسی بهینه‌ای برای کار با روش‌های جدید طراحی شدند که گشتاور بیشتر و ریپل گشتاور کمتری نسبت به موتورهای نسل قبل داشتند. عمده‌ترین تغییر ساختار در این نسل، افزایش تعداد موانع شار[1] روتور و جایابی بهینهٔ موانع شار برای کاهش ریپل گشتاور بود. یک نمونه از روتورهایی که در این دوره طراحی شدند در شکل ۰-۳ نشان داده شده است. روش‌هایی که امروزه برای طراحی و ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانسی استفاده می‌شود، بیشتر در این دهه ارائه شدند [۸-۱۱].



شکل ۰-۳: موتور سنکرون رلوکتانسی عرضی ۴ قطبی با سه مانع شار در هر قطب

۱-۲- انواع ساختارهای موتورهای سنکرون رلوکتانسی

موتورهای سنکرون رلوکتانسی امروزی، دارای دو ساختار کلی هستند که براساس نحوهٔ قرار گرفتن ورقه‌های روتور دسته‌بندی می‌شوند:

۱- موتورهای سنکرون رلوکتانسی عرضی[2]،

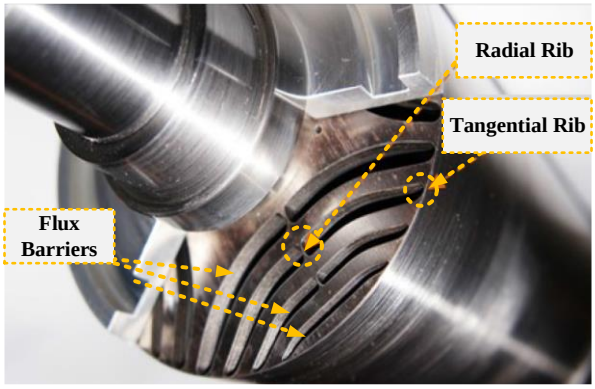
۲- موتور سنکرون رلوکتانسی محوری[3].

افزودن آهنربای دائم به هردو نوع موتور سنکرون رلوکتانسی، نوع دیگری از این موتورها به‌وجود می‌آید که به موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی[4] شهرت دارند.

در روتورهای عرضی، شکل و اندازهٔ ورقه‌ها یکسان است و ورقه‌ها به‌صورت عرضی و در راستای محور روی‌هم قرار می‌گیرند. روتور این نوع موتور به روتور چندمانعی[5] نیز شناخته می‌شود. در انتهای موانع شار، اتصالات فولادی به نام پل[6] قرار دارد. این قسمت از روتور، روتور را در مقابل نیروی گریز از مرکز در سرعت‌های زیاد مستحکم می‌کند. شکل ۰-۴ یک موتور سنکرون رلوکتانسی با روتور عرضی را نشان می‌دهد [۱۲].

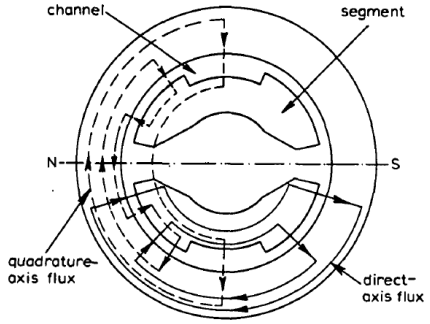
1. Flux barrieres
2. Transversally Laminated Anisotropic (TLA)
3. Axially Laminated Anisotropic (ALA)
4. PM Assisted Synchronous Reluctance Motor (PM-ASyR)
5. Multi Barrier
6. Rib

DOI: 10.30503/nripress.2020.064



شکل ۰-۴: ساختار روتور یک موتور سنکرون رلوکتانس عرضی

موتورهای سنکرون رلوکتانسی با روتور چندبخشی (شکل ۰-۵) در میانهٔ دههٔ ۶۰ میلادی معرفی شد [۱۳]. ضریب برجستگی موتورهای سنکرون رلوکتانسی با این ساختار به‌طور تقریبی ۵ و یا کمی بیشتر بود. این مقدار ضریب برجستگی باعث کاهش اندازهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی در حد ابعاد موتورهای القایی با توان مشابه شد. چندین سال بعد، موتورهای بهبودیافته‌ای از این نوع برای کار در یک یا چند سرعت ارائه شدند [۱۴–۱۶]. به‌علت ضریب برجستگی بزرگ‌تر، عملکرد آن‌ها بهتر از موتورهای با طراحی مرسوم آن زمان بود، اما پیچیدگی و هزینهٔ ساخت زیاد، توسعهٔ این نسل از موتورهای سنکرون رلوکتانسی را محدود کرد.

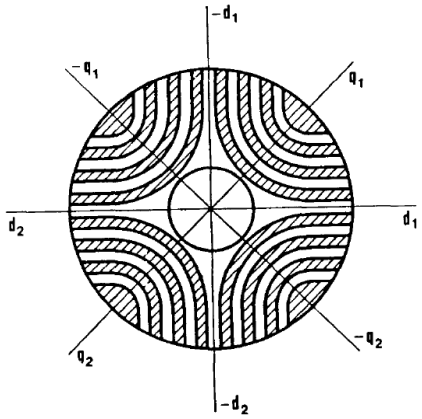


شکل ۰-۵: موتور سنکرون رلوکتانسی با روتور دوبخشی

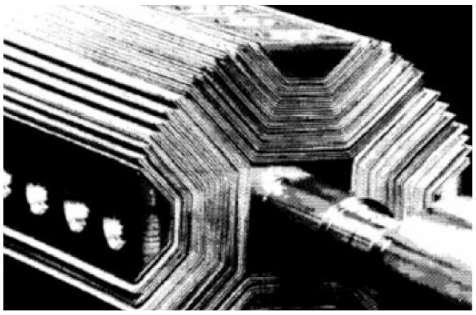
روتور موتورهای سنکرون رلوکتانسی محوری از ورقه‌های فولادی که به شکل U و V در راستای شعاعی روی‌هم قرار می‌گیرند، ساخته می‌شود. در این نوع روتور، اندوکتانس در راستای برجستگی قطب‌ها (محور d) بیشتر از جهت خم‌شدگی است (محور q). در شکل ۰-۶، یک نمونه از این نوع روتور نشان داده شده است. این ساختار همراه با قفسهٔ راه‌اندازی در میانهٔ دههٔ ۶۰ میلادی معرفی شد [۱۷] و بعداً تحت بهینه‌سازی‌های مختلفی قرار گرفت [۱۸–۲۰]. در مدل‌های ابتدایی به‌دلیل حضور قفسهٔ راه‌اندازی، دسترسی به ضریب برجستگی بزرگ ممکن نبود؛ لذا عملکرد این نوع از موتورهای سنکرون رلوکتانسی از ماشین‌های القاییِ معادل کمتر بود و رغبت چندانی برای استفاده از این موتورها در آن زمان وجود نداشت. در اوایل دههٔ ۹۰، مدل‌های بدون قفسه و با ضریب برجستگی بزرگ‌تر و عملکرد بهتر ارائه شد [۲۱–۲۴].

 DOI: 10.30503/nripress.2020.064

در روتورهای محوری، ورقه‌ها متناسب با شکل هر قطب روی همدیگر قرار می‌گیرند. جنس این ورقه‌ها از فولادهای جهت‌دار[1] است که ازنظر الکتریکی نسبت به‌هم عایق‌اند. این ورقه‌ها به‌وسیلهٔ نگه‌دارندهٔ قطب‌ها به قسمت مرکزی یا محور موتور متصل می‌شوند. شکل ۰-۷ یک نمونه روتور ۷/۵ کیلوواتی موتور سنکرون رلوکتانسی با ساختار محوری را نشان می‌دهد. مزیت اصلی این نوع روتور قابلیت افزایش تعداد موانع شار در هر قطب است. افزایش تعداد موانع شار در هر قطب منجر به افزایش ضریب برجستگی و عملکرد بهتر موتور می‌شود (افزایش بازده و ضریب توان) [۲].



شکل ۰-۶: ساختار روتور یک موتور رلوکتانسی محوری



شکل ۰-۷: ساختار روتور موتور سنکرون رلوکتانسی محوری (با ۶۲ ورق به ضخامت ۰/۵ mm در هر قطب)

۱-۳- مقایسهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی محوری و عرضی

موتورهای سنکرون رلوکتانسی که امروزه ساخته می‌شوند عمدتاً از نوع عرضی هستند. تفاوت اصلی دو ساختار عرضی و محوری عبارتند از [۱۲]:

۱- در روتورهای عرضی، شکل و اندازهٔ ورقه‌ها مانند یکدیگر است. فناوری برش و روش قرار گرفتن ورقه‌ها مانند سایر ماشین‌های AC معمول است. درحالی‌که در مدل‌های محوری، هر ورقه شکل خاص و معینی دارد؛ لذا مراحل ساخت و تولید مشکل و پرهزینه‌تر خواهد بود. اما درعین‌حال استقامت مکانیکی روتور در نوع محوری بیشتر از نوع عرضی است.

۲- ریپل به‌وجودآمده در هر دو نوع روتور ناشی از عکس‌العمل مغناطیسی روتور در مقابل هارمونیک‌های شیار است. در مدل عرضی این امکان وجود دارد که ورقه‌ها به‌صورت اریب قرار گیرند و حداقل ریپل گشتاور حاصل شود. درحالی‌که این کار برای روتورهای

1. Grain-Oriented Lamination

محوری بسیار مشکل است. لازم به ذکر است روش‌هایی برای کاهش ریپل گشتاور مدل محوری نیز ارائه شده است که معروف‌ترین آن‌ها اریب کردن شیارهای استاتور است، اما این روش زمانی‌که از سیم‌پیچی خودکار استفاده شود، غیرممکن است.

۳- ضریب برجستگی بیش از ۱۰ بیشتر در موتورهای محوری به‌دست می‌آید. این مقدار در مدل‌های عرضی، کمتر از ۱۰ است. لذا موتورهای محوری گشتاور، ضریب توان و بازده بهتری نسبت به موتورهای عرضی دارند [۲].

۴- تلفات آهن در مدل محوری به‌دلیل نوسان شار در ورقه‌های ضخیم‌تر، بیشتر از مدل عرضی است.

آنچه از مقایسهٔ این دو ساختار می‌توان دریافت آن است که مدل عرضی در بسیاری از کاربردها به‌دلیل قیمت کم و سادگی ساخت و همچنین، تلفات آهنی کمتر، به مدل محوری ترجیح داده می‌شود. ازاین‌رو، مدل محوری نسبت به مدل عرضی در مقالات و تحقیقات کمتر دیده می‌شود.

۱-۴- مزایا و معایب موتورهای سنکرون رلوکتانسی

نسل‌های اولیه موتورهای سنکرون رلوکتانسی در پایداری و گشتاور راه‌اندازی مشکل داشتند. در دههٔ ۹۰ میلادی، Vagati نشان داد که مشکلات اولیهٔ این نوع موتورها به‌آسانی و با روش‌های کنترل حلقهٔ بسته قابل رفع است و این موتورها قابلیت کار با هردو روش کنترل برداری و کنترل مستقیم گشتاور را دارا هستند [۶، ۸، ۲۵].

استاتوری که در ساخت این موتورها مورد استفاده قرار می‌گیرد مانند موتورهای القایی است. اما مهم‌ترین مزیت آن حذف تلفات مسی روتور است که قابلیت کار در گشتاوری بیشتر نسبت به موتورهای القایی فراهم می‌آورد. مهم‌ترین مزایای این نوع موتورها عبارتند از [۲]:

- هزینهٔ ساخت کم به‌دلیل عدم استفاده از مواد آهنربای کمیاب خاکی؛
- نسبت گشتاور به آمپر نسبتاً زیاد؛
- عدم حساسیت به دما در شرایط کار دائم به‌دلیل حذف تلفات مسی روتور و نداشتن تلفات جریان گردابی آهنربای دائم؛
- کنترل‌پذیری آسان موتور در همهٔ نواحی کارکرد؛
- داشتن استاتور و مدار اینورتر مشابه موتورهای القایی؛
- داشتن ناحیهٔ تضعیف میدان بزرگ (CPSR[1])، البته درصورتی‌که ضریب برجستگی موتور بزرگ باشد یا از حجم کمی از آهنربای دائم در روتور استفاده شود.

در کنار مزیت‌هایی که موتورهای سنکرون رلوکتانسی را به یک رقیب جدی برای موتور القایی تبدیل کرده است، این موتور معایبی نیز دارد که عمده‌ترین آن‌ها عبارتند از [۲]:

- ضریب توان، چگالی گشتاور و توان کم نسبت به موتورهای آهنربای دائم؛
- استحکام مکانیکی کم برای کار در سرعت‌های زیاد به‌دلیل وجود موانع شار متعدد؛
- وجود رابطهٔ غیرخطی بین گشتاور و جریان استاتور؛
- حساسیت زیاد ریپل گشتاور به پارامترهای هندسی روتور؛
- نداشتن روش جامع و استاندارد برای طراحی.

لازم به ذکر است برای رفع معایب ذکرشده، راهکارهای فراوانی پیشنهاد شده است.

پارامترهای عملکردی موتورهای سنکرون رلوکتانسی، ازجمله ضریب توان، وابسته به نسبت برجستگی موتور است. دسترسی به نسبت برجستگی بیشتر از ۱۰ عمدتاً در مدل محوری امکان‌پذیر است [۲]. راهکار دیگر برای بهبود ضریب توان، افزودن حجم کمی از

1. Constant Power Speed Range

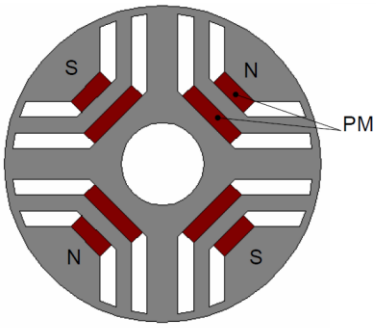
DOI: 10.30503/nripress.2020.064

آهنربای دائم ارزان‌قیمت است. این نوع موتورها که بعد از افزودن آهنربای دائم با نام موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی[1] شناخته می‌شوند، این قابلیت را دارند که در ضریب توان، مشابه موتورهای سنکرون آهنربای دائم کار کنند. وجود موانع شار در مدل عرضی، موجب کاهش استحکام مکانیکی روتور این موتورها برای کار در سرعت‌های زیاد و موتورهایی با ابعاد بزرگ شده است. اما در سال‌های اخیر، مدل‌های بهبودیافته‌ای برای کار در سرعت‌های زیاد نیز ارائه شده است [۲۶-۳۱].

آنچه می‌توان به‌عنوان یک ضعف از این موتورها در مقابل موتورهای القایی نام برد، نداشتن روشی جامع و استاندارد برای طراحی است. اگرچه این موتورها عملکرد بهتری نسبت به موتورهای القایی هم‌ردهٔ خود دارند، اما نبود استانداردهای لازم طراحی، رشد این نوع موتورها را با کندی مواجه کرده است. هرچند که شرکت‌های بزرگ تولیدی در دنیا روند جایگزین کردن این نوع موتورها را شروع کرده‌اند.

۱-۵- افزودن آهنربای دائم به موتورهای سنکرون رلوکتانسی

برای بهبود عملکرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی به موانع شار موجود در روتور، آهنربا اضافه می‌شود. هردو نوع ساختار عرضی و محوری قابلیت افزودن آهنربا را دارند. این موتورها بعد از افزودن آهنربا با نام موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی شناخته می‌شوند. برخی این نوع موتورها را در ردهٔ موتورهای آهنربای دائم طبقه‌بندی می‌کنند، اما روش طراحی و ساخت آن‌ها منطبق بر موتورهای سنکرون رلوکتانسی است. شکل ۰-۸ ساختار این نوع موتور را نشان می‌دهد. به‌طور معمول، پلاریتهٔ آهنربای دائم برای موتور سنکرون رلوکتانسی طوری انتخاب می‌شود که شار ناشی از جریان استاتور را در راستای محور q و در شرایط نامی خنثی کند.



شکل ۰-۸: ساختار یک موتور با ۴ قطب رلوکتانسی عرضی با آهنربای دائم کمکی

لازم به ذکر است که در موتورهای سنکرون رلوکتانسی، بیشترین مقدار گشتاور به‌دلیل اختلاف رلوکتانس بین محورهای d و q تولید می‌شود و وظیفهٔ آهنرباها بهبود ضریب توان موتور، به‌خصوص در سرعت‌های بالا است [۳۲]. به عبارت دیگر، به‌طور معمول هرچه نسبت برجستگی در این نوع موتورها بیشتر باشد، به آهنربای دائم کمتری برای بهبود عملکرد آن‌ها نیاز خواهد بود [۲]. نکتهٔ دیگر آن‌که برخلاف موتورهای آهنربای دائم داخلی که در آن‌ها مقدار قابل‌توجهی از شار مغناطیس‌کنندهٔ موتور از آهنرباهای دائم تأمین می‌شود و شار ناشی از جریان استاتور به‌عنوان یک شار عکس‌العمل و ناخواسته است، در موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی، مقدار شار آهنربای دائم بسیار کمتر از شار نامی موتور است. این موضوع سبب می‌شود که موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای کاربردهایی که به تضعیف میدان زیادی نیاز دارند، مناسب باشند.

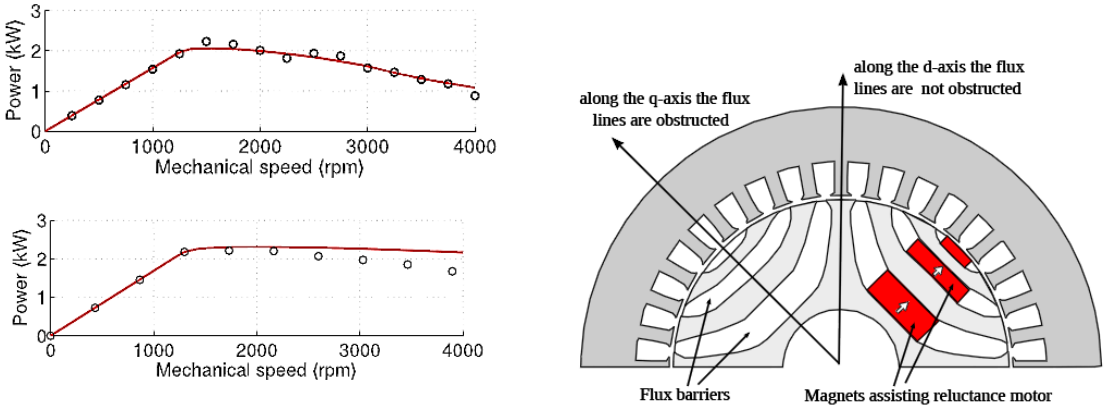
گشتاور موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی و همچنین ضریب توان آن با اضافه شدن آهنربای دائم افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ای که در مرجع [۳۲] بر روی موتورهای سنکرون رلوکتانسی با کاربرد کششی صورت گرفته، نشان داده شده است که افزودن

1. Permanent Magnet Assisted synchronous Reluctance motor (PMASynRM)

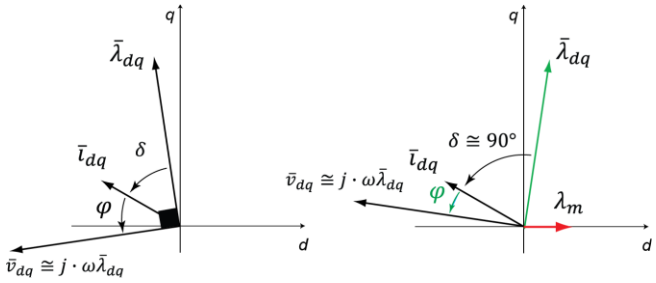
DOI: 10.30503/nripress.2020.064

آهنربا گشتاور موتور را در حدود ۷ درصد و ضریب توان آن را بین ۶ تا ۱۰ درصد (در بارهای مختلف موتور) افزایش می‌دهد. این مسئله در

شکل ۰-۹ نشان داده شده است. علاوه‌بر این، با اضافه کردن آهنربای دائم، این موتورها قادر خواهند بود در ضریب توان، مشابه با سایر موتورهای آهنربای دائم کار کنند. شکل ۰-۱۰ دیاگرام برداری موتور سنکرون رلوکتانسی را قبل و بعد از افزودن آهنربای دائم نشان می‌دهد. بردار قرمزرنگ نیز شار آهنربای دائم را نشان می‌دهد. افزودن آهنربای دائم موجب بهبود زاویهٔ بار (δ) می‌شود و در مقدار شار نامی تغییری ایجاد نمی‌کند [۱].



شکل ۰-۹: موتور سنکرون رلوکتانس تقویت‌شده با آهنربا و مقایسهٔ گشتاور سرعت آن (پایین) با موتور معمولی (بالا)



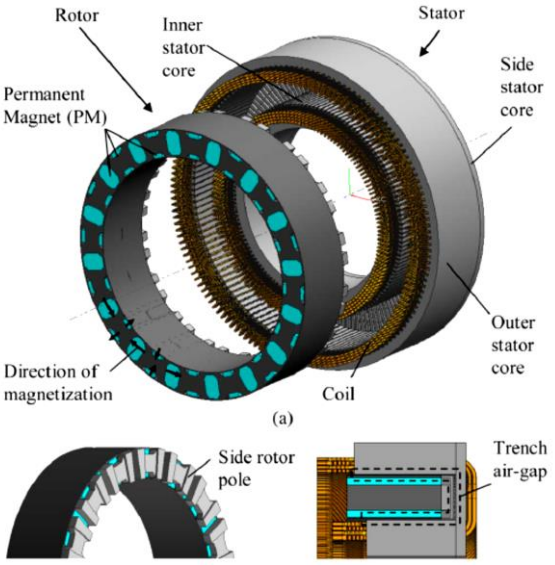
شکل ۰-۱۰: دیاگرام برداری موتور: A) سنکرون رلوکتانسی، B) سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی

برخلاف موتورهای سنکرون رلوکتانسی معمول که موانع شار در داخل روتور آن‌ها بهتر است به‌صورت دایره‌ای‌شکل و در مسیر شار طراحی گردند، در موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی، این شکاف‌ها بیشتر به‌صورت مجموعه‌ای از خطوط شکسته طراحی می‌شوند تا نیاز به استفاده از آهنرباهای خمیده که هزینهٔ ساخت موتور را بالا می‌برند، نباشد [۳۳].

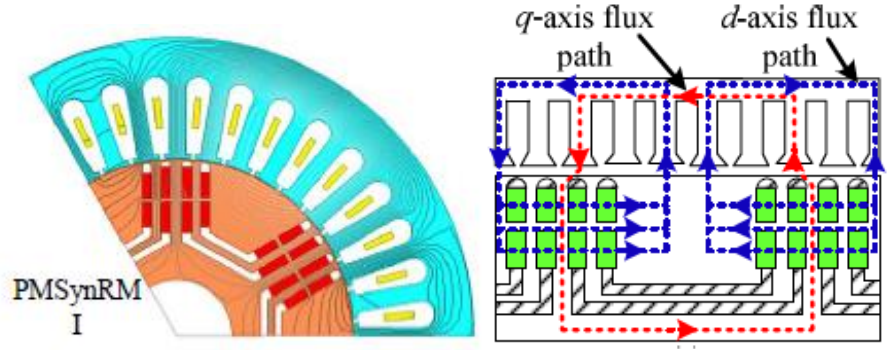
DOI: 10.30503/nripress.2020.064

برای افزایش هرچه بیشتر چگالی گشتاور که به‌خصوص در کاربردهای کششی اهمیت زیادی دارد، یکی از روش‌های پیشنهادی استفاده از دو استاتور در این موتورها است. در این ساختار که در شکل ۰-۱۱ نشان داده شده است، روتور در میان دو استاتور داخلی و خارجی قرار گرفته است و دیوارهٔ کناری موتور نیز به‌منظور هدایت شار پراکندگی به داخل موتور دارای سیم‌پیچی و هسته است. با استفاده از این ساختار می‌توان با کاربرد آهنرباهای فریتی (که قیمت بسیار کمتری نسبت به آهنرباهای NdFeB دارند)، گشتاور این موتور را با موتورهای آهنربای دائم سطحی (PMSM) که از آهنرباهای کمیاب خاکی در آن‌ها استفاده می‌شود، برابر کرد. به‌منظور بهبود بازده موتور و جلوگیری از تشکیل جریان‌های گردابی، قسمت کناری استاتور باید ساختاری دوتکه داشته باشد. همچنین به‌منظور کاهش مغناطیس‌زدایی، آهنرباهای استفاده‌شده در این ساختار، باید فاقد زاویه‌های تیز باشند [۳۴].

از مشکلات مهم استفاده از آهنرباهای فریتی، امکان مغناطیس‌زدایی آن در اثر شار استاتور است. یکی از روش‌های مقابله با این نیروی مغناطیس‌زدای استاتور، تغییر جهت آهنرباها در هسته است. این ساختار در شکل ۰-۱۲ نشان داده شده است. در این ساختار، مسیر شار استاتور در درون روتور طوری طراحی می‌شود که از آهنربا عبور نمی‌کند و درنتیجه، اثر آن بر آهنربا حداقل می‌شود [۳۵].



شکل ۰-۱۱: موتور سنکرون رلوکتانس با آهنربای دائم کمکی با دو لایه استاتور



شکل ۰-۱۲: تغییر محل آهنرباها به‌منظور کاهش اثر شار مغناطیس‌زدا بر آن‌ها

فصل دوم: مقایسهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی با سایر موتورهای الکتریکی

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

۲-۱- مقدمه

همان‌طور که در مقدمهٔ این گزارش اشاره شده است، در نوشتن مطالب این فصل، از مطالب و مراجع گزارش «ماشین‌های الکتریکی سنکرون رلوکتانس» مربوط به پروژهٔ «آینده‌پژوهی و رصد وضعیت آهنرباهای دائم و کاربردهای آن‌ها در ماشین‌های الکتریکی» استفاده شده است [۱]. در این فصل، موتورهای سنکرون رلوکتانسی، به‌صورت عمومی، با موتورهای آهنربای دائم، موتورهای القایی سه‌فاز و موتورهای سوئیچ رلوکتانس مقایسه شده‌اند و مزایا و معایب آن‌ها نسبت به‌هم بررسی شده است.

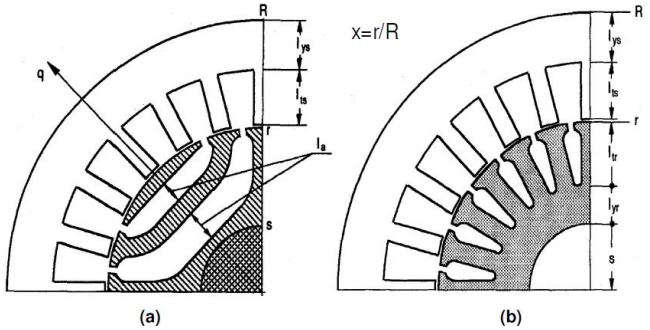
۲-۲- مقایسهٔ ماشین سنکرون رلوکتانسی با موتورهای القایی

مهم‌ترین مزیت موتورهای القایی، ارزان بودن و امکان راه‌اندازی مستقیم بدون استفاده از راه‌انداز و اینورتر است. اما زمانی‌که نیاز به تنظیم سرعت باشد، انواع مختلفی از موتورها قابل استفاده هستند و پارامترهایی مانند نسبت گشتاور به حجم، بازده و کنترل‌پذیری ساده اهمیت پیدا می‌کنند. موتورهای سنکرون رلوکتانسی با تغییر ابزارها و قالب‌های خط تولید موتور القایی، قابلیت تولید دارند. همچنین در این نوع موتور، مانند موتور القایی، می‌توان از روش اریب کردن برای کاهش ریپل گشتاور استفاده کرد [۳۶].

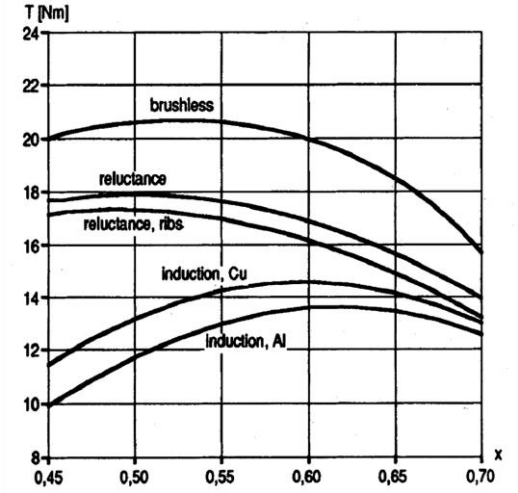
برای مقایسهٔ پارامترهای عملکردی موتورهای سنکرون رلوکتانسی با موتورهای القایی، معمولاً به یکی از دو روش زیر عمل می‌شود:

۱- روتور یک موتور سنکرون رلوکتانسی جایگزین روتور موتور القایی با فاصلهٔ هوایی یکسان می‌شود، مانند آنچه در شکل ۰-۱ نشان داده شده است (استاتور مربوط به موتور القایی). جریان الکتریکی برای هردو موتور ثابت و برابر جریان نامی موتور القایی درنظر گرفته می‌شود [۳۷-۳۹]. نتایج نشان می‌دهد درصورتی‌که روتور سنکرون رلوکتانسی دارای نسبت برجستگی ۱۰ باشد، گشتاوری معادل موتور القایی تولید می‌کند. علاوه‌بر آن، تلفات نزدیک به ۴۰٪ کمتر خواهد شد و بازده موتور ۵ تا ۸ درصد افزایش می‌یابد. درصورتی‌که هردو موتور در یک دما کار کنند، موتور سنکرون رلوکتانسی می‌تواند تا ۲۵٪ درصد گشتاور بیشتری تولید کند [۳۸].

۲- روش دوم مقایسه به صورتی است که ساختار استاتور تغییر کند و ابعاد هندسی موتورها بهینه گردد [۲۵]. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که بیشینهٔ گشتاور (در یک تلفات ثابت) در موتور سنکرون رلوکتانسی همواره از موتور القایی بیشتر است (حتی با قفسهٔ مسی). شکل ۰-۲ نمودار گشتاور تولیدی موتورهای مختلف نسبت به پارامتر x را نشان می‌دهد (x نسبت قطر داخلی استاتور به قطر خارجی آن است). همان‌طور که در نمودار نشان داده شده است، ابعادی که به‌ازای آن، بیشینهٔ گشتاور برای موتور القایی و موتور سنکرون رلوکتانسی رخ می‌دهد، یکسان نیست.



شکل ۰-۱: شماتیک برش عرضی و ابعادی: a) موتور سنکرون رلوکتانسی عرضی، b) موتور القایی



شکل ۰-۲: بیشینهٔ گشتاور موتورهایی با ۴ قطب مختلف در ابعاد بهینه و تلفات یکسان نسبت به x

به‌دلیل نداشتن تلفات در روتور موتورهای سنکرون رلوکتانسی، این نوع موتورها افزایش دمای کمتر و بازده بیشتری نسبت به موتورهای القایی دارند. دمای کمتر در این موتورها منجر به افزایش عمر عایقی و یاتاقان‌ها می‌شود و درنتیجه قابلیت اطمینان موتور افزایش می‌یابد [۲].

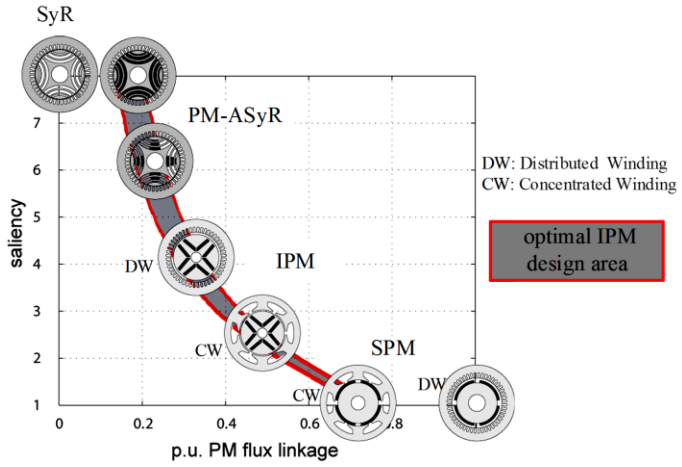
در موتورهای سنکرون رلوکتانسی، ضریب توان در حدود ۵ تا ۱۰ درصد کمتر از موتورهای القایی است. این موضوع از رلوکتانس بزرگ محور q و شاری که در پل‌های انتهایی موانع شار بسته می‌شود، ناشی می‌گردد. ضریب توان کوچک موجب افزایش مقادیر نامی و بزرگ‌تر شدن ابعاد اینورتر می‌شود [۳۸]. برای رسیدن به ضریب توان بالاتر، لازم است موتور سنکرون رلوکتانسی نسبت برجستگی بزرگ‌تری داشته باشد؛ با مورق نمودن روتور می‌توان نسبت برجستگی موتور سنکرون رلوکتانسی را افزایش داد. همچنین، جایابی مناسب موانع شار (مکان، شکل و تعداد مناسب) در ساختار روتور در افزایش نسبت برجستگی موتور تأثیر دارد [۴۰]. البته قبلاً اشاره شده است که با اضافه کردن مقدار کمی آهنربای ارزان‌قیمت در روتور و تبدیل موتور به موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی، نیز ضریب توان موتور سنکرون رلوکتانسی افزایش می‌یابد.

۲-۳- مقایسهٔ ماشین سنکرون رلوکتانسی با موتورهای آهنربای دائم

مطابق شکل ۰-۲، موتورهای آهنربای دائم بیشترین چگالی گشتاور را نسبت به سایر موتورهای الکتریکی دارا هستند. از دیگر مزایای این موتورها می‌توان به بازده و ضریب توان بزرگ و کنترل‌پذیری سادهٔ آن اشاره کرد. به‌دلیل داشتن این خصوصیات، موتورهای آهنربای دائم برای کاربردهای مختلف مناسب هستند، اما افزایش قیمت آهنرباهای کمیاب خاکی، تولید و استفاده از این موتورها را با چالش‌های جدی مواجه کرده است. این امر موجب تغییر رویکرد طراحان و تولیدکنندگان به‌سوی استفاده از موتورهای الکتریکی با آهنربای کمتر و یا بدون آهنربای دائم شده است. از این میان، موتورهای سنکرون رلوکتانسی و سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند. مزیت اصلی این موتورها در مقایسه با موتورهای آهنربای دائم، نداشتن آهنربای دائم بر روی روتور است و یا در صورت استفاده از آهنربای دائم (برای بهبود ضریب توان)، حجم آهنربای دائم مورد استفاده بسیار کم بوده و یا می‌توان از آهنربای ارزان‌تر مانند فریت استفاده کرد. شکل ۰-۳ حجم آهنربای مورد استفاده در موتورهای AC را نشان می‌دهد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

معمولاً موتورهای سنکرون آهنربای دائم، به‌دلیل استحکام مکانیکی کم آهنربای دائم، در سرعت‌های زیاد قابلیت اطمینان مکانیکی کمی دارند. محدودیت دیگری که موتورهای آهنربای دائم، مخصوصاً موتورهای آهنربای دائم سطحی[1] دارند، جریان زیاد اتصال کوتاه در این موتورهاست که ناشی از حجم نسبی زیاد آهنربای دائم مورد استفاده در روتور آن‌ها است [۲].



شکل ۰-۳: میزان آهنربای دائم مورد استفاده در موتورهای AC نسبت به ضریب برجستگی

هرچند که گشتاور و ضریب توان موتورهای سنکرون رلوکتانسی کمتر از موتورهای آهنربای دائم است، اما موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی از این نظر قابل رقابت با موتورهای آهنربای دائم هستند. در مقایسهٔ عملکرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی با موتورهای آهنربای دائم، بیشتر توجه بر روی موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی متمرکز است. در این مقایسهٔ موتورها، به موارد زیر می‌توان اشاره کرد [۲]:

- چگالی توان و گشتاور قابل‌مقایسه با حجم کمتری از آهنربای دائم؛
- قابلیت تحمل اضافه‌بار حتی در سرعت‌های زیاد و ناحیهٔ تضعیف میدان؛
- کاهش حساسیت آهنربای دائم به دما؛
- بازده زیاد در کسری از بار نامی و در سرعت‌های زیاد و ناحیهٔ تضعیف میدان؛
- هزینهٔ کم آهنربای دائم مورد استفاده؛
- استحکام مکانیکی بهتر.

موتورهای آهنربای دائم سطحی، به‌دلیل اشباع سریع ناشی از شار زیاد آهنربای دائم، قابلیت اضافه‌بار کمتری نسبت به موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی دارند. این مسئله در ناحیهٔ تضعیف میدان چشمگیرتر است و عملاً قابلیت اضافه‌بار برای موتورهای آهنربای دائم سطحی فراهم نیست، درصورتی‌که موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی قابلیت اضافه‌بار خوبی دارند [۴۱].

مقایسهٔ تلفات موتورهای آهنربای دائم و موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی در دو ناحیهٔ کاری قابل بررسی است. در ناحیهٔ بار نامی و کسری از بار نامی، تلفات این نوع موتورها تقریباً هم‌اندازه است. هرچند تلفات مسی استاتور موتورهای سنکرون رلوکتانسی در این ناحیه بیشتر است، اما تلفات آهنربای دائم موتورهای آهنربای دائم سطحی، به‌دلیل حجم آهنربای دائم مورد استفاده در روتور، این موضوع را جبران می‌کند. در ناحیهٔ تضعیف شار، برتری با موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی است؛ زیرا تلفات جریان گردابی آهنرباها در موتورهای آهنربای دائم سطحی، به‌صورت چشمگیری در این ناحیه افزایش می‌یابد و عملکرد این

1. Surface Permanent Magnet Motor

موتورها را با مشکل افزایش دما در آهنربا و خطر آهنربازدایی[1] شدن روبه‌رو می‌کند [۴۱]. در جدول ۰-۱، مزایا و معایب موتورهای سنکرون آهنربای دائم و سنکرون رلوکتانسی به‌اختصار بیان شده است [۲].

۲-۴- مقایسهٔ ماشین سنکرون رلوکتانسی با موتورهای سوئیچ رلوکتانس

اگرچه موتورهای سنکرون رلوکتانسی و سوئیچ رلوکتانس دارای شباهت اسمی هستند، اما در کلاس‌های متفاوتی از موتورها طبقه‌بندی می‌شوند. موتورهای سنکرون رلوکتانسی در گروه موتورهای AC قرار می‌گیرند و موتورهای سوئیچ رلوکتانس جزو موتورهای خاص و با راه‌اندازِ مخصوص به خود به‌شمار می‌روند. مزیت اصلی موتورهای سوئیچ رلوکتانس نسبت به سایر موتورهای الکتریکی، ساختار بسیار سادهٔ آن است. اما هرچند ساختار این موتور ساده است، کنترل پارامترهای عملکردی آن پیچیده و دشوار است. در هردو موتور، نحوهٔ تولید گشتاور به‌وسیلهٔ تحریک فاز و زمان‌بندی جریان نسبت به موقعیت روتور کنترل می‌شود، اما نحوه و نوع این کنترل بسیار متفاوت از یکدیگر است. موتورهای سنکرون رلوکتانسی و سوئیچ رلوکتانس از دیدگاه‌های مختلف قابل بررسی و مقایسه هستند [۴۲].

جدول ۰-۱: مزایا و معایب موتورهای سنکرون آهنربای دائم و سنکرون رلوکتانسی

نوع موتور	مزایا	معایب
Surface PM Motor	▪ چگالی گشتاور، چگالی توان و نیز بازده بالا ▪ رابطهٔ خطی بین گشتاور و I_q، کنترل‌پذیری ساده ▪ امکان سیم‌پیچی متمرکز استاتور ▪ عملکرد خوب در ناحیهٔ تضعیف شار در صورت سیم‌پیچی متمرکز	▪ محدودیت استفاده در سرعت‌های بالا به‌دلیل روتور آهنربای دائم ▪ امکان آسیب دیدن آهنربای دائم در سرعت‌های بالا به‌دلیل تلفات بالا ▪ جریان بالای اتصال کوتاه در هر سرعتی ▪ هزینهٔ بالای ساخت به‌دلیل حجم بالای آهنربای دائم مورد استفاده
PM/Reluctance motor (Interior PM & PM-assisted Reluctance)	▪ چگالی گشتاور، چگالی توان و نیز بازده بالا ▪ امکان سیم‌پیچی متمرکز استاتور هرچند که منجر به کاهش گشتاور رلوکتانسی می‌شود ▪ بهترین کاندید برای عملکرد در ناحیهٔ تضعیف شار ▪ حفاظت مکانیکی آهنربای دائم به‌دلیل قرار گرفتن در حفره روتور ▪ وجود ضریب برجستگی در تعیین موقعیت روتور در حالت ساکن	▪ عملکرد در سرعت‌های بالا نیاز به رعایت ملاحظات مکانیکی آهنربای دائم ▪ افزایش سهم گشتاور رلوکتانسی نیازمند افزایش تعداد حفره‌ها در هر قطب و افزایش پیچیدگی فرایند ساخت ▪ کنترل گشتاور به‌دلیل گشتاور رلوکتانسی پیچیده‌تر از موتور SPM ▪ آسیب‌پذیری هسته استاتور ناشی از تلفات آهن به‌دلیل هارمونیک‌های فضایی ناشی از شار آهنربای دائم در سیم‌پیچی گام کامل
Synchronous reluctance motor	▪ هزینهٔ پایین به‌دلیل نداشتن آهنربای دائم ▪ جریان پایین خطای اتصال کوتاه حتی در سرعت‌های بالا ▪ امکان بهبود عملکرد از طریق افزایش ضریب برجستگی ▪ عملکرد قابل‌قبول در ناحیهٔ تضعیف شار در صورت وجود ضریب برجستگی بالا و اضافه کردن آهنربای دائم ▪ وجود ضریب برجستگی در تعیین موقعیت روتور در حالت ساکن ▪ عدم وجود محدودیت در اضافه‌بارهای ناگهانی به‌علت نداشتن آهنربای دائم و خطر دی‌مگنتیاز شدن	▪ گشتاور، بازده، ضریب توان پایین و عملکرد ضعیف‌تر در ناحیهٔ تضعیف شار نسبت به موتورهای آهنربای دائم ▪ عملکرد قابل‌قبول در صورت داشتن ضریب برجستگی بالای ۷ ▪ دستیابی به گشتاور رلوکتانسی بالا در صورت وجود بیش از سه حفره شار در هر قطب، پیچیده شدن فرایند ساخت روتور ▪ وابستگی غیرخطی گشتاور به دامنهٔ جریان استاتور ▪ پیچیدگی ساخت در ساختار روتور محوری و تلفات بالای روتور در این ساختار در سرعت‌های بالا

1. Demagnetize

۲-۴-۱- ساختار

موتورهای سنکرون رلوکتانسی این قابلیت را دارند که از ورقه‌های موتورهای القایی برای ساخت استاتور و روتور استفاده شود. همچنین فرایند ساخت استاتور این نوع موتور مشابه موتورهای القایی است. روتور نوع عرضی آن نیز فرایند ساخت مشابه با استاتور آن دارد. اما موتورهای سوئیچ رلوکتانس ساختار متفاوتی با موتورهای AC دارند و جنس فولاد مورد استفاده نیز متفاوت از موتورهای AC است. سیم‌پیچی موتورهای سنکرون رلوکتانسی مانند موتورهای القایی، به‌صورت توزیع‌شده سینوسی است، اما در موتورهای سوئیچ رلوکتانس به‌صورت متمرکز و جداگانه برای هر قطب یا دندانه صورت می‌گیرد. نکتهٔ دیگر آن‌که روتور موتور سوئیچ رلوکتانس ساختار ساده‌تری دارد و استحکام مکانیکی آن نسبت به روتور موتور سنکرون رلوکتانسی بیشتر است.

۲-۴-۲- مشخصهٔ عملکردی

مشخصهٔ گشتاور ـ سرعت در هردو موتور به‌صورت ($T=\frac{1}{\omega^2}$) است. در ناحیهٔ تضعیف شار، مشخصهٔ عملکردی هردو موتور مانند موتورهای القایی هم‌اندازه است. اما موتورهای سنکرون رلوکتانسی این قابلیت را دارند که با افزودن آهنربای ارزان‌قیمت، مشخصهٔ عملکردی بهتری نسبت به موتورهای القایی داشته باشند. نسبت (اینرسی/ گشتاور) در موتورهای سنکرون رلوکتانسی قابل مقایسه با موتورهای القایی است، اما این نسبت در موتورهای سوئیچ رلوکتانس بسیار بیشتر است. به‌عنوان نمونه در موتورهای سوئیچ رلوکتانس، این نسبت (به‌دلیل اینرسی کم روتور) حدوداً ۲ تا ۵ برابر موتورهای القایی است. گشتاور تولیدی در هردو موتور با ریپل همراه است. در موتورهای سنکرون رلوکتانسی، حساسیت ریپل گشتاور نسبت به تغییر پارامترهای مختلف زیاد است. در هردو موتور میزان ریپل وابسته به نحوهٔ طراحی و ساختار موتورهاست. اما در موتورهای سوئیچ رلوکتانس، میزان ریپل گشتاور بستگی به نقطهٔ کار موتور نیز دارد. به‌عنوان مثال، در سرعت زیاد و در حالت تحریک تک‌پالس، ریپل گشتاور به ۱۰۰٪ نیز می‌رسد.

۲-۴-۳- نویز صوتی

نویز صوتی در موتورهای سنکرون رلوکتانسی بدون اریب کردن روتور اندکی بیشتر از موتورهای القایی هم‌ردهٔ خود است. اما در موتورهای سوئیچ رلوکتانس، رسیدن به نویز صوتی کم مستلزم ساختاری درست و محکم است و تحریک موتور با شکل موج جریان مناسب است. برای کاهش نویز صوتی در این موتورها، روتور باید با دقت زیادی با استاتور هم‌محور باشد.

۲-۴-۴- عملکرد در سرعت‌های زیاد

عملکرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی با روتور عرضی به‌دلیل استحکام مکانیکی ضعیف روتور که ناشی از موانع شار است، با محدودیت مواجه است. در نوع محوری که استحکام مکانیکی بهتری دارد نیز محدودیت مکانیکی اتصال روتور به محور، مانع از کار موتور در سرعت‌های زیاد می‌شود. اما روتور موتور سوئیچ رلوکتانس به‌دلیل ساختار ساده و یکپارچه در سرعت زیاد مناسب است؛ هرچند که در این موتورها تلفات بادخوری و تلفات هسته با افزایش سرعت به‌طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابد.

۲-۴-۵- ادوات الکترونیک قدرت

مدار راه‌انداز موتورهای سنکرون رلوکتانسی مانند کنترل PWM در موتورهای القایی است. در اکثر موارد، راه‌انداز موتورهای القایی برای استفاده در موتورهای سنکرون رلوکتانسی فقط نیاز به بهینه‌سازی نرم‌افزاری دارد. اما در مقابل، مدار راه‌انداز موتورهای سوئیچ رلوکتانس خاص است. تعداد کلیدهای قدرت که در مبدل موتور سوئیچ رلوکتانس استفاده می‌شود، معمولاً مانند راه‌انداز موتورهای AC، دارای دو کلید در هر فاز است. در راه‌انداز موتورهای AC، برای تنظیم جریان سه فاز به دو حسگر جریان نیاز است. اما در مبدل‌های موتور سوئیچ رلوکتانس، تعداد حسگرهای جریان برابر تعداد فازهاست. در بعضی از موارد با تعداد فاز بیش از چهار، سنسورها را می‌توان برای دو فاز نیز استفاده کرد. لازم به ذکر است آنچه در مورد راه‌اندازهای موتور سوئیچ رلوکتانس ذکر شد، مربوط به راه‌اندازهای رایج این نوع موتورهاست که دو کلید قدرت در هر فاز دارند. توپولوژی‌های دیگری نیز برای راه‌اندازی این نوع موتورها پیشنهاد شده است

که ادوات الکترونیک قدرت کمتری نسبت به راه‌اندازهای مرسوم این نوع موتور دارند، اما اغلب این کاهش ادوات منجر به محدودیت کار موتور می‌شود.

۲-۴-۶- تلفات و بازده

در هردو این موتورها تلفات ناشی از لغزش روتور وجود ندارد. بنابراین تلفات روتور این نوع موتورها کمتر از موتورهای القایی است. این مزیت در سرعت‌های کم، به‌دلیل محدودیت دمایی در تولید گشتاور، اهمیت دارد. هردو موتور بازده بهتری نسبت به موتورهای القایی استاندارد دارند، اما این مورد در سرعت‌های کم چشمگیرتر است.

۲-۴-۷- کنترل

تئوری دومحوری dq برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس قابلیت اجرا ندارد. لذا کنترل این موتورها به‌راحتی موتورهای سنکرون رلوکتانسی نیست. در موتور سوئیچ رلوکتانس، جریان ثابت برای تحریک این نوع موتور منجر به تولید گشتاور ثابت نخواهد شد. برای رسیدن به گشتاوری ثابت، شکل موج جریان باید شکل خاصی داشته باشد؛ شکل موج جریان برای هر موتور سوئیچ رلوکتانس خاص آن موتور است و با تغییر بار و سرعت تغییر می‌کند. در جدول ۲-۰، عملکرد موتور سنکرون رلوکتانسی، سوئیچ رلوکتانس و القایی را در بار نامی (۱۱ kW) و کسری از بار نامی (۶ kW) مقایسه شده‌اند. موتور القایی تغذیه‌شده با اینورتر این قابلیت را دارد که در کسری از بار نامی، بیشینهٔ گشتاور خود را بدون افزایش دما نسبت به بار نامی تولید کند. لازم به ذکر است در این مقایسه، از استاتور موتور القایی برای ارزیابی موتور سنکرون رلوکتانسی استفاده شده است [۴۲].

جدول ۲-۰: مقایسهٔ عملکرد موتورهای القایی، سوئیچ رلوکتانس و سنکرون رلوکتانسی

	موتور القایی		موتور سنکرون رلوکتانسی		موتور سوئیچ رلوکتانس	
	۶ kW	۱۱ kW	۶ kW	۱۱ kW	۶ kW	۱۱ kW
توان نامی روی شفت (kW)	۶	۱۱	۶	۱۱	۶/۱	۱۰/۹
سرعت (rpm)	۱۴۷۱	۱۴۳۹	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰
گشتاور (N.m)	۳۹	۷۳	۳۸/۲	۷۰	۳۸/۹	۶۹/۱
بیشینه kVA کلیدهای قدرت	۸۰/۳	۱۱۵	۶۳/۵	۱۱۴/۹	۶۹/۴	۱۲۲/۴
ضریب توان	۰/۶۸۸	۰/۸۶۷	۰/۸۵۶	۰/۸۵۵	–	–
بازده	۸۸/۸	۸۸/۲	۸۸/۲	۸۹/۵۵	۰/۸۹	۸۹/۲

فصل سوم: روند پیشرفت موتورهای سنکرون رلوکتانسی

۳-۱- مقدمه

همان‌طور که در مقدمهٔ این گزارش اشاره شده است، در نوشتن مطالب این فصل، از مطالب و مراجع گزارش «ماشین‌های الکتریکی سنکرون رلوکتانس» مربوط به پروژهٔ «آینده‌پژوهی و رصد وضعیت آهنرباهای دائم و کاربردهای آن‌ها در ماشین‌های الکتریکی» و گزارش‌های «رصد وضعیت فناوری محرکه‌های الکتریکی (ماشین‌های الکتریکی و مدار کنترل و درایو) در خودروهای الکتریکی دوچرخ» و «رصد وضعیت فناوری محرکه‌های الکتریکی (ماشین‌های الکتریکی و مدار کنترل و درایو) در خودروهای الکتریکی سبک و سنگین شهری» مربوط به پروژهٔ «کاربرد ماشین‌های الکتریکی در سیستم‌های حمل‌ونقل الکتریکی» استفاده شده است [۱، ۴۳، ۴۴].

نزدیک به یک قرن از معرفی مدل‌های اولیهٔ موتور سنکرون رلوکتانسی می‌گذرد. اما در سال‌های اخیر توجه خاصی به این نوع موتورها شده است. آنچه مسلم است نوسانات قیمت مواد آهنربای دائم کمیاب خاکی در سال‌های اخیر و لزوم افزایش بازدهی در موتورهای الکتریکی، موجب این توجه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که موضوعات موردمطالعه دربارهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی دارای تنوع زیادی است، اما مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی در سال‌های اخیر را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد [۴۵]:

۱- طراحی موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرسرعت و بررسی چالش‌های الکتریکی و مکانیکی آن؛
۲- موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز؛
۳- بهبود عملکرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی با طراحی ساختارهای جدید؛
۴- طراحی موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای استفاده در کاربردهای کششی، خودروهای هیبریدی و الکتریکی؛

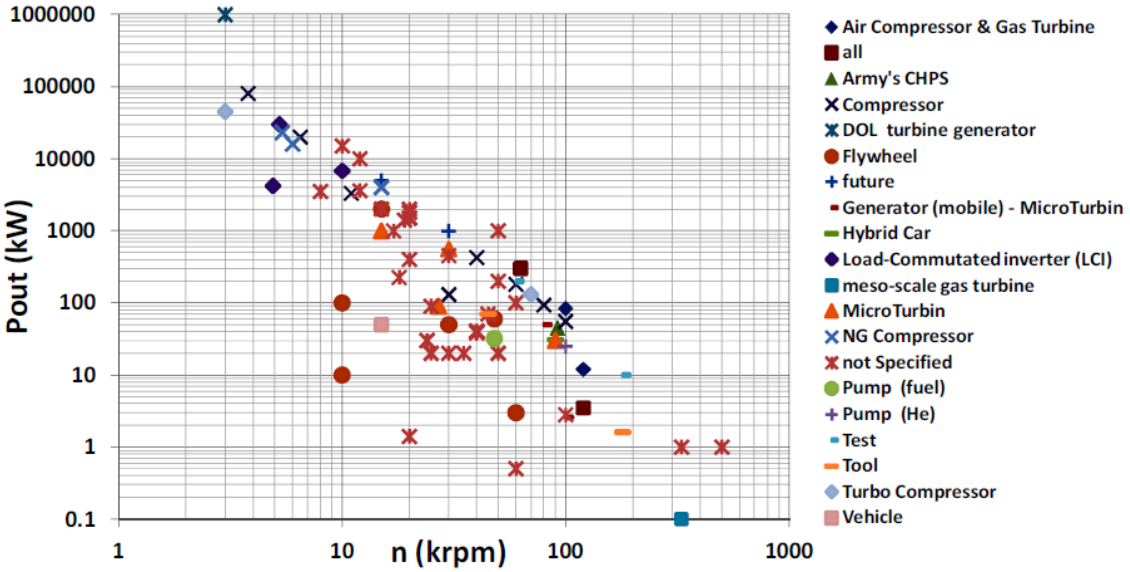
در این فصل از گزارش، پیشرفت‌های صورت‌گرفته در زمینهٔ استفاده از موتورهای سنکرون رلوکتانسی در کاربردهای فوق‌الذکر بررسی شده است.

۳-۲- موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرسرعت

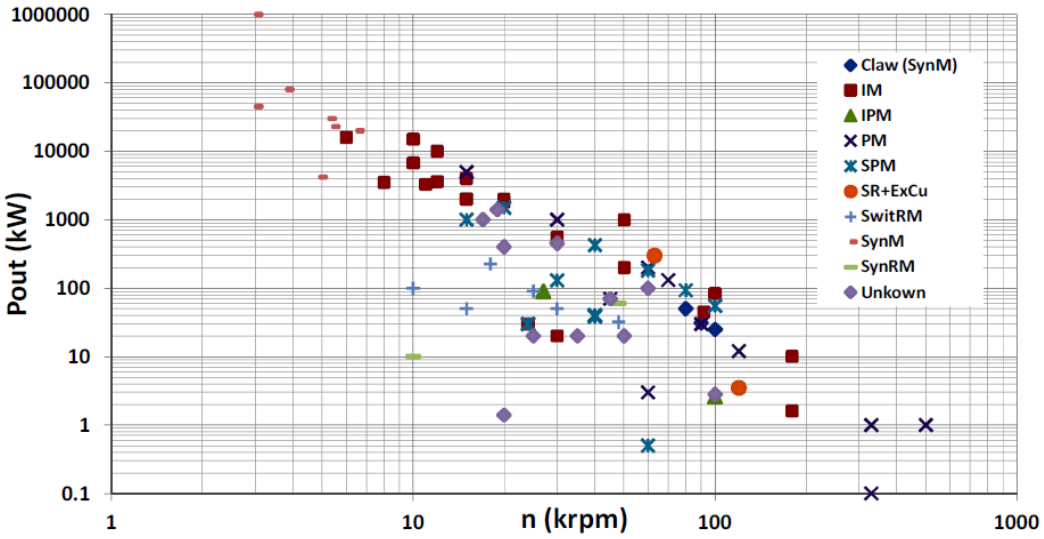
در سال‌های اخیر، تقاضا برای موتورهای پرسرعت، به‌دلیل کاهش وزن و اندازه و همچنین حذف جعبه‌دنده، در کاربردهای پرسرعت افزایش یافته است. مهم‌ترین مزیت موتورهای پرسرعت آن است که با حذف یک یا چند بخش از یک سیستم الکترومکانیکی (مانند جعبه‌دنده) موجب افزایش استحکام مکانیکی، کاهش نویز صوتی، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری در این سیستم‌ها می‌شوند [۴۶]. موتورهای الکتریکی پرسرعت در کاربردهایی مانند پمپ‌ها، کمپرسورها، توربین‌های گازی، کاربردهای گریز از مرکز، و همچنین به‌عنوان سیستم ذخیره‌سازی انرژی در چرخ طیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل ۰-۱ سیستم‌های مختلف الکترومکانیکی پرسرعت را در کاربردهای مختلف نشان می‌دهد.

به‌طور معمول، موتورهای الکتریکی پرسرعت از نوع موتورهای جریان متناوب بدون جاروبک هستند و برای افزایش استحکام مکانیکی روتور آن‌ها از راهکارهای مختلفی استفاده می‌کنند. شکل ۰-۲ موتورهای الکتریکی مختلف را در کاربردهای پرسرعت نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، در سرعت‌های بیشتر از ۱۰۰ هزار دور بر دقیقه، بیشتر موتورها یا از نوع آهنربای دائم هستند یا از نوع القایی. موتورهای آهنربای دائم برای کار در این سرعت نیاز به غلاف نگه‌دارنده دارند تا بتوانند یکپارچگی ساختار روتور را در سرعت‌های زیاد حفظ کنند. اما استفاده از غلاف منجر به افزایش تلفات و پیچیدگی فرایند ساخت روتور می‌شود. موتورهای القایی دارای ساختار مقاوم‌تری نسبت به موتورهای آهنربای دائم هستند. اما چگالی گشتاور این موتورها کمتر از موتورهای آهنربای دائم است و مقداری از انرژی ورودی در روتور آن‌ها تلف می‌شود. راه‌حل دیگر در کاربردهای پرسرعت، استفاده از موتورهای با روتور یکپارچه است که برای رسیدن به عملکرد بهینه ازنظر بازدهی و چگالی گشتاور، نیاز به مراحل ساخت و مواد خاص دارند [۴۷].

DOI: 10.30503/nripress.2020.064



شکل ۰-۱: سیستم‌های پرسرعت الکترومکانیکی



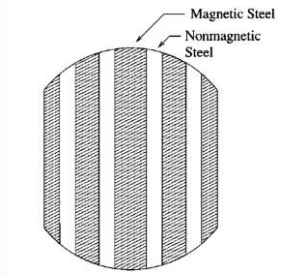
شکل ۰-۲: دسته‌بندی موتورهای پرسرعت برحسب نوع موتورها

موتورهای سنکرون رلوکتانسی کم‌سرعت به‌طور معمول با تعبیه چند مانع شار در ورقه‌های فولادی غیرجهت‌دار در ساختار روتور شکل می‌گیرند. اما در کاربردهای پرسرعت، در صورت عدم استفاده از غلاف نگه‌دارنده، افزایش ضخامت پل‌ها برای حفظ استحکام مکانیکی روتور ضروری است و این موضوع موجب کاهش عملکرد موتور می‌شود. درواقع، طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی در سرعت‌های زیاد، معمولاً چالش بین استحکام مکانیکی و عملکرد الکتریکی بهینهٔ موتور است.

تلاش برای افزایش سرعت در موتورهای رلوکتانسی در اوایل دههٔ قبل شروع شد و پس از چند کار مختصر در سال‌های اخیر، به فراموشی سپرده شد. ابتدا در سال ۹۲ میلادی یک موتور دو قطب ۱/۳ کیلوواتی با سرعت ۲۴۰۰۰ دور در دقیقه معرفی شد که تمرکز آن ارائهٔ یک روش کنترلی ساده برای موتور سنکرون رلوکتانسی در این سرعت بوده و درخصوص ساختار روتور و استحکام مکانیکی در سرعت موردنظر بحثی به میان نیامده است [۴۸].

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

در [۴۷]، ساختار یک موتور سنکرون رلوکتانسی دوقطبی برای کار در سرعت زیاد ارائه شده است که از ویژگی‌های آن، استحکام مکانیکی متناسب با کار در محیط خلأ و سرعت زیاد است. از دیگر ویژگی‌های ساختار مزبور، بازده و قابلیت اطمینان زیاد موتور و نیز هزینهٔ ساخت کم آن است. روتور مذکور از ترکیب فولادهای مغناطیسی و غیرمغناطیسی ساخته شده است. هستهٔ استاتور و سیم‌پیچی طوری طراحی شده‌اند که تلفات در روتور کمینه شود. نتایج آزمون‌های عملی انجام‌شده بر روی دو نمونهٔ آزمایشگاهی ۱۰ کیلووات، بازده ٪۹۱ در سرعت ده هزار دور بر دقیقه را نشان می‌دهد. تلفات روتور در این سرعت کمتر از ۰/۵ درصد توان ورودی است. شکل ۰-۳ ساختار روتور این موتور را نشان می‌دهد.



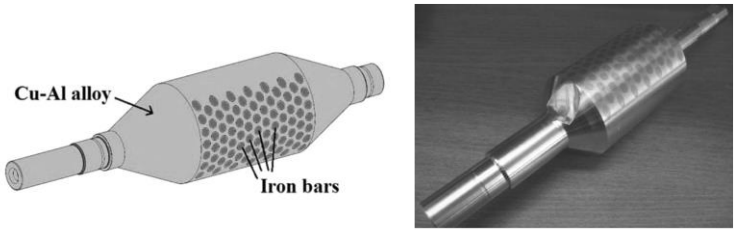
شکل ۰-۳: موتور سنکرون رلوکتانسی دوقطبی با سرعت بالا

در [۴۹]، یک موتور سنکرون رلوکتانسی برای کاربرد در چرخ طیار طراحی شده است. روتور طراحی‌شده دارای ساختار یکپارچه بوده و برای کاهش تلفات هارمونیکی آن از یک فیلتر سه‌فاز LC استفاده شده است. سرعت نامی موتور طراحی‌شده ۴۸,۰۰۰ دور بر دقیقه است. شکل ۰-۴ ساختار روتور طراحی‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۰-۴: موتور سنکرون رلوکتانسی ۴ قطبی با ساختار یکپارچه

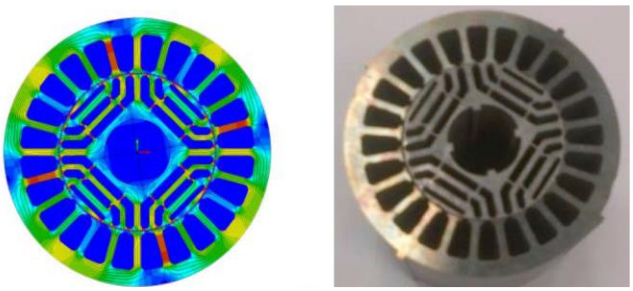
در [۲۶]، طراحی مکانیکی و الکتریکی ساختار جدیدی از موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای کاربرد در سرعت‌های زیاد ارائه شده است. این ساختار یک موتور سنکرون رلوکتانسی دوقطبی است که در ساخت روتور آن از فولادهای مغناطیسی و غیرمغناطیسی استفاده شده است. جنس موانع شار روتور از یک فولاد غیرمغناطیسی است. مراحل ساخت روتور ارائه‌شده ساده است و نیاز به شرایط خاص ساخت، مانند جوشکاری انفجاری یا چسب‌کاری آهنربا ندارد. استحکام مکانیکی با استفاده از یک مدل سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفت. براساس روش ارائه‌شده، دو نمونهٔ آزمایشگاهی ۱/۸ و ۱۰۰ کیلوواتی برای صحت‌سنجی روش طراحی و ساخته شد.



شکل ۰-۵: ساختار جدید موتور رلوکتانسی پرسرعت

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

مرجع [۵۰] به بررسی طراحی موتور پرسرعت سنکرون رلوکتانسی برای استفاده در کمپرسورِ موتور دیزل (به‌عنوان توربوشارژر برای موتور دیزل) در صنعت هوانوردی می‌پردازد. سرعت نامی موتور طراحی‌شده ۵۰,۰۰۰ دور بر دقیقه است و تمرکز بر روی طراحی ساختار روتور و تأمین استحکام مکانیکی لازم در شرایط عملکردی بهینه است. شکل ۰-۶ نمونهٔ آزمایشگاهی ساخته‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۰-۶: ساختار موتور سنکرون رلوکتانسی برای سرعت ۵۰۰۰۰ دور بر دقیقه

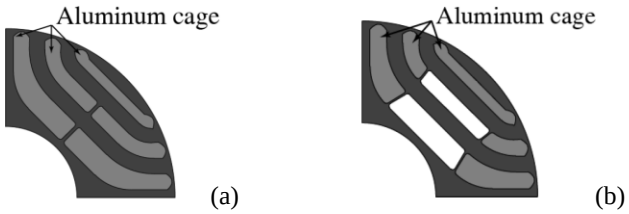
موضوع دیگر بررسی‌شده در مقالات موتورهای پرسرعت سنکرون رلوکتانسی، دربارهٔ نحوهٔ طراحی الکتریکی و مکانیکی و یا تأثیر انتخاب فولادهای مغناطیسی بر نحوهٔ عملکرد این موتورها در سرعت‌های زیاد است [۲۹، ۳۰]. در [۲۹]، تأثیر فولادهای مختلف تجاری در عملکرد مکانیکی و الکتریکی موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرسرعت مورد بررسی قرار گرفته است. فولادهای موردبررسی در این مقاله، شامل دو نمونه فولاد کبالت‌دار و یک نمونه فولاد سیلیکونی غیرجهت‌دار است. همچنین روشی برای تعیین سرعت و چگالی توان برحسب ابعاد داده‌شدهٔ ماشین ارائه شده است. نتایج محاسبات این مقاله نشان می‌دهد که تلفات هسته مهم‌ترین نکته در طراحی موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرسرعت است. همچنین ضریب توان کم نیز از دیگر معایب این موتورها در سرعت‌های زیاد است که می‌تواند با اضافه کردن آهنربای دائم به موانع شار بهبود یابد.

در [۳۰]، دو راهبرد مختلف برای بهینه‌سازی طراحی روتور موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرسرعت، با درنظر گرفتن هم‌زمان بهینه‌سازی الکترومغناطیسی و ساختار مکانیکی روتور ارائه شده است.

۳-۳- موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز

قبل از توسعهٔ اینورترهای امروزی، موتورهای سنکرون رلوکتانسی دارای قفسهٔ راه‌اندازی بودند. این قفسه‌ها اگرچه باعث تولید گشتاور آسنکرونی می‌شدند و نیاز به اینورتر را رفع می‌کردند، اما به‌دلیل مشکلاتی که در عملکرد بهینهٔ موتور به‌وجود می‌آوردند، از ساختار موتور حذف شدند. اما در سال‌های اخیر، رویکرد جایگزینی موتورهای القایی با موتورهای پربازده‌تر، بار دیگر مسئلهٔ خودراه‌اندازی موتورهای سنکرون رلوکتانسی را مورد توجه قرار داده است.

در [۵۱]، دو نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز در ابعاد استاندارد موتورهای القایی معمول معرفی شده است. هدف از طراحی این موتورها دسترسی به کلاس بازدهی بیشتر نسبت به موتورهای القایی هم‌رده است. در این مرجع، روشی برای بررسی عملکرد این موتورها در حالت سنکرون و آسنکرون ارائه شده است. تفاوت ساختاری دو موتور موردآزمایش در میزان آلومینیومی است که در موانع شار این دو نمونه موتور به‌کار رفته است. نتایج آزمون‌های عملی بر روی این دو نمونه موتور نشان می‌دهد موتوری که موانع شار به‌طور کامل با آلومینیوم پر نشده است، عملکردی قابل‌مقایسه با موتور القایی هم‌ردهٔ خود دارد و برخلاف استفادهٔ کمتر از آلومینیوم، گشتاور آن در همهٔ سرعت‌های آسنکرونی ۱۵ تا ۲۰ درصد بیشتر از موتوری است که همهٔ موانع شار آن با آلومینیوم پر شده است. شکل ۰-۷ برش مقطعی از این موتورهای طراحی‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۰-۷: موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز: a) پرشدگی کامل موانع شار، b) پرشدگی جزئی موانع شار

در [۵۲]، ابتدا انتخاب‌های مناسب و نامناسب برای خودراه‌انداز کردن موتورهای سنکرون رلوکتانسی ازنظر شکل هندسی روتور ارائه شده است. دو نمونه موتور آزمایشگاهی با رویکرد حالت بهینه در قابلیت سنکرون شدن و عملکرد در حالت سنکرون ارائه شده است. با استفاده از نتایج آزمون‌های عملی، بازده و ضریب توان موتورهای ساخته‌شده با موتورهای القایی هم‌رده مقایسه شده است. شکل ۰-۸ روتورهای ساخته‌شده در این مرجع را نشان می‌دهد.



شکل ۰-۸: موتورهای سنکرون رلوکتانس خودراه‌انداز

در [۵۳]، روش طراحی و تحلیل یک موتور خودراه‌انداز سنکرون رلوکتانسی ارائه شده است. مهم‌ترین هدف این مقاله ارائهٔ روشی سریع و کارآمد برای طراحی درست این نوع موتورهاست. در روش ارائه‌شده، پارامترهای غیرخطی، مانند اشباع و اثر پوستی درنظر گرفته شده است. نتایج به‌دست‌آمده از روش ارائه‌شده و مدل‌سازی اجزای محدود، با آزمون عملی بر روی نمونهٔ آزمایشگاهی ساخته‌شده، صحه‌گذاری شده است. در [۵۴]، ترکیب موتور سنکرون آهنربای دائم و موتور سنکرون رلوکتانسی با تعداد قطب‌های مختلف و با قابلیت خودراه‌اندازی ارائه شده است که برخلاف موتورهای معمول خودراه‌انداز قابلیت کار کردن در دو سرعت متفاوت را دارد. ساختار ارائه‌شده براساس ترکیب تعداد قطب‌ها در موتورهای سنکرون آهنربای دائم سطحی و موتورهای رلوکتانسی است. نتایج شبیه‌سازی، عملکرد بهتر این موتور را در سرعت زیاد نشان می‌دهد؛ زیرا در سرعت‌های کم، این موتور مانند یک موتور سنکرون رلوکتانسی است که ضریب توان و بازده کمتری نسبت به موتورهای سنکرون آهنربای دائم دارد.

۳-۴- بهبود عملکرد با طراحی ساختارهای جدید

موتورهای سنکرون رلوکتانسی که به‌صورت تجاری تولید می‌شوند نیز دارای ویژگی‌هایی هستند که نامطلوب‌اند. مهم‌ترین این معایب داشتن ضریب توان کوچک است که تلاش‌های بسیاری برای بهبود آن انجام شده است. معمول‌ترین این روش‌ها، که به‌صورت تجاری نیز عرضه شده است، افزودن آهنربای دائم به ساختار روتور است. اما بهبود عملکرد این موتور ازطریق ساختارهای جدید و طراحی بهینه، همواره به‌عنوان یکی از موضوعات مهم و اصلی در مقالات و کارهای تحقیقاتی بوده است. برخی از فعالیت‌های انجام‌شده بر روی این نوع موتور، مانند بهبود ساختار سیم‌پیچی برای سایر موتورهای جریان متناوب نیز انجام شده است. سیم‌پیچی گسترده که در غالب موتورهای جریان متناوب به‌کار می‌رود، دارای معایب زیر است:

– طول زیاد ناحیهٔ انتهایی (مصرف مس در ناحیهٔ غیرفعال موتور)؛

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

– ضریب پرشدگی شیار[1] پایین (به‌طور متوسط این ضریب در سیم‌پیچی گسترده کمتر از ۰/۴۵ است)؛
– نیاز به سیم‌پیچی دستی (افزایش هزینهٔ سیم‌پیچی).

استفاده از سیم‌پیچی متمرکز بیشتر در موتورهای آهنربای دائم مدرن کم‌سرعت و با چگالی گشتاور زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. چالش‌ها و مزایای آن برای موتورهای آهنربای دائم به‌طور مفصل مورد بررسی قرار گرفته است [۵۵]. استفاده از این نوع سیم‌پیچی در موتورهای سنکرون رلوکتانسی به‌تازگی در مقالات مطرح شده است، هرچند که هنوز متداول نشده است [۵۶–۶۰]. سیم‌پیچی متمرکز از یک کلاف که به دور یک دندانهٔ روتور پیچیده می‌شود تشکیل شده است. این نوع از سیم‌پیچی، مانند نوع گسترده دارای مزایا و معایب مربوط به خود است و برای استفاده در موتورهای سنکرون رلوکتانسی، نیاز به تطبیق روتور با این نوع سیم‌پیچی است. شکل ۹-۰ استاتور و روتور یک موتور ۴ قطبی با توان ۴ کیلووات از نوع سنکرون رلوکتانسی با سیم‌پیچی متمرکز نشان داده شده است. این موتور دارای ۶ شیار بر روی استاتور است که ضریب پرشدگی مس در این شیارها ۶۰ درصد است.



شکل ۹-۰: استاتور و روتور یک موتور سنکرون رلوکتانسی با سیم‌پیچی متمرکز

موتورهای سنکرون رلوکتانسی با سیم‌پیچی متمرکز نسبت به موتورهای القایی و سنکرون رلوکتانسی هم‌رده که از سیم‌پیچی گسترده استفاده می‌کنند، دارای بازده و چگالی گشتاور بهتری هستند. مهم‌ترین مزایای استفاده از این نوع سیم‌پیچی در موتورهای سنکرون رلوکتانسی عبارتند از [۴۵]:

– کوتاه شدن ناحیهٔ انتهایی کلاف و عدم هم‌پوشانی کلاف‌ها (تلفات و مصرف مس کمتر)؛
– بازده زیاد؛
– چگالی توان و گشتاور زیاد؛
– افزایش ضریب پرشدگی شیار؛
– امکان ساخت استاتور به‌صورت ماژولار (ساخت ساده‌تر و بهبود استفاده از مواد)؛
– بهبود عملکرد حرارتی موتور (دمای کار کمتر و قابلیت اضافه‌بار بهتر).

اما در کنار مزایای ذکرشده، استفاده از این ساختار مشکلاتی را نیز به‌دنبال دارد. به‌دلیل جایگذاری گسستهٔ کلاف‌ها در شیارهای استاتور، MMF به‌وجودآمده در فاصلهٔ هوایی دارای محتوای هارمونیکی زیادی است. این هارمونیک‌ها منجر به ریپل گشتاور زیاد و ضریب توان کم در این موتورها می‌شود که درنتیجهٔ آن، افزایش نویز صوتی و لرزش موتور را به‌دنبال دارد. البته که با یک طراحی بهینه می‌توان به ریپل گشتاور پایین و ضریب توان قابل‌قبول دست یافت [۶۰].

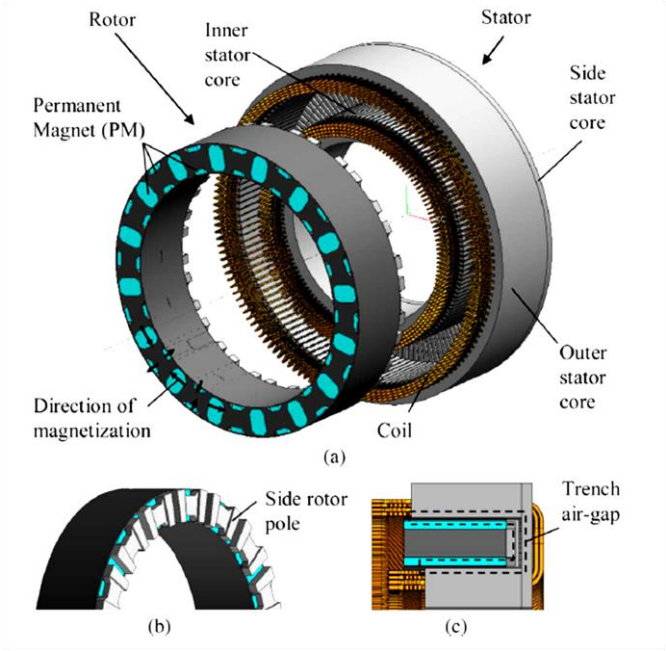
1. Filling Factor

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

با رویکردی که نسبت به مزایا و معایب استفاده از سیم‌پیچی متمرکز در موتورهای سنکرون رلوکتانسی ذکر شد، در مقالات اخیر، تمرکز بر روی افزایش نسبت گشتاور به حجم، بهبود ریپل گشتاور و ضریب توان در موتورهایی با این نوع سیم‌پیچی بوده است. به‌عنوان مثال در توپولوژی‌های ارائه‌شده، افزایش بازده تا ۳ درصد و افزایش چگالی گشتاور تا ۲۵ درصد با ضریب پرشدگی شیار ۶۰ درصد، نسبت به موتورهای سنکرون رلوکتانسی رایج و بدون استفاده از آهنربای دائم به‌دست آمده است [۵۸-۶۰].

در بخشی دیگر از مقالات، ساختارهای جدید با تغییر ساختار روتور ارائه شده است. رویکرد این مقالات بهبود عملکرد موتور و یا استفاده در کاربردهای خاص بوده است. به‌عنوان مثال، شکل ۰-۱۰ یک ساختار جدید ترکیبی را نشان می‌دهد [۳۴]. این ساختار، ترکیبی از موتورهای شعاعی و محوری و دارای هستهٔ استاتور و سیم‌پیچی جانبی است. قطب‌های روتور حلقوی آن از آهنربای فریت است. چالش به‌وجودآمده در این ساختار، وجود تلفات ناخواستهٔ جریان گردابی در هستهٔ کناری است. براساس ساختار ارائه‌شده، یک مدل سه‌بعدی از آن در نرم‌افزار اجزای محدود شبیه‌سازی شد. نتایج آزمون‌های عملی بر روی نمونهٔ آزمایشگاهی، گشتاور قابل‌مقایسهٔ این موتور با موتورهای PMSM ساخته‌شده از مواد آهنربای کمیاب را نشان می‌دهد. با کاهش تلفات ناخواستهٔ جریان گردابی در هستهٔ جانبی، بازده تا ۵ درصد افزایش یافت و نتایج آزمون‌های عملی بیشینه بازده موتور را تا ۹۲٪ نشان می‌دهد.

در روش‌های مختلفی که برای بهینه‌سازی روتور به‌کار می‌رود، تابع هدف اصلی افزایش نسبت برجستگی موتور است. نسبت برجستگی مهم‌ترین پارامتر ساختاری موتور سنکرون رلوکتانسی است که به‌طور مستقیم، بر عملکرد موتور تأثیرگذار است. افزایش نسبت برجستگی ازنظر ساختاری، درواقع چیزی جز کاهش مقاومت مغناطیسی در مسیر شار و افزایش آن در مسیر موانع شار نیست. براساس این تعریف، با استفاده از فولادهای جهت‌دار مغناطیسی[1]، روتوری طراحی و مونتاژ شده است که خواص مغناطیسی آن به افزایش نسبت برجستگی کمک می‌کند [۶۱، ۶۲]. روتور ساخته‌شده به‌صورت ماژولار (برحسب تعداد قطب) ساخته و سپس مونتاژ می‌شود. روتور ساخته‌شده از فولادهای جهت‌دار، نسبت به روتوری که از مواد همسانگرد ساخته‌شده، دارای اندوکتانس بیشتری در محور d و اندوکتانس کمتری در محور q است (به‌معنی نسبت برجستگی بیشتر) که منجر به عملکرد الکتریکی بهتر موتور شده است. شکل ۰-۱۱ ورقه‌های مورداستفاده و روتور مونتاژشده در این ساختار را نشان می‌دهد.



1. Cold Rolled Grain Oriented Electrical Steel

شکل ۰-۱۰: ساختار ارائه‌شده: a) نمای کلی، b) قطب‌های برجستهٔ روتور، c) برش مقطعی از ساختار



a b

شکل ۰-۱۱: a) ورقهٔ مورداستفاده برای ساخت روتور، b) روتور ماژولار مونتاژشده

در [۶۳]، روشی جدید برای طراحی روتور موتور سنکرون رلوکتانسی ارائه شده است. در ساختار ارائه‌شده، پل‌ها که برای استحکام مکانیکی در روتور تعبیه می‌شوند حذف شده و برای حفظ استحکام روتور، از غلاف استفاده شده است. وجود پل‌ها موجب استحکام مکانیکی روتور می‌شوند، اما در عملکرد بهینهٔ موتور تداخل ایجاد می‌کنند و کاهش بازده و ضریب توان را به‌دنبال دارند. در این مقاله با حذف این قسمت از روتور، عملکرد موتور ازنظر بازده، چگالی توان، ریپل گشتاور و تلفات روتور بهبود یافته است.

۳-۵- کاربردهای کششی موتور سنکرون رلوکتانسی

امروزه درصد زیادی از نیروی محرکهٔ موردنیاز سیستم‌های حمل‌ونقل ازطریق موتورهای درون‌سوز تأمین می‌شود. این موتورها بازدهی کمتر از ۴۰٪ دارند و بیشتر انرژی مصرفی را به‌صورت گرما هدر می‌دهند که منجر به آلودگی محیط‌زیست می‌شود. وجود این آلودگی‌ها و مشکلات ناشی از آن، دولت‌های مختلف را به‌سوی استفاده از سیستم‌های مدرن و پاک سوق داده است. یکی از اصلی‌ترین راه‌حل‌های پیشنهادی، جایگزین کردن موتورهای درون‌سوز با سیستم‌های الکترومکانیکی پربازده است. مؤسسات خصوصی و دولتی فراوانی روی تدوین نقشه راه سیستم‌های نوین حمل‌ونقل الکتریکی کار می‌کنند. این تحقیقات روی بخش‌های مختلف سیستم‌های کششی ازجمله موتور الکتریکی، سیستم باطری، مبدل توان و بخش‌های کنترل انجام می‌شود تا عملکرد، قابلیت اطمینان، هزینه و بازده این سیستم‌ها را افزایش دهند. به‌عنوان مثال، وزارت انرژی آمریکا یک نقشه راه برای سیستم‌های الکترومکانیکی کششی برای سال ۲۰۲۰ ترسیم کرده است. خلاصه‌ای از الزامات این نقشه راه، بر مبنای خنک‌سازی به‌وسیلهٔ آب و در دمای کاری ۱۰۹ درجهٔ سانتی‌گراد در جدول ۰-۱ آورده شده است [۶۴].

موتورهایی که برای کاربردهای کششی مورد استفاده قرار می‌گیرند سه فاکتور مهم وزن، هزینه و اندازه در انتخاب آن‌ها تأثیرگذار است. اما نیاز است که این موتورها دارای خصوصیات دیگری نیز باشند که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

- توان لحظه‌ای و چگالی توان زیاد؛
- گشتاور زیاد در سرعت کم و توان زیاد در سرعت‌های زیاد؛
- ریپل گشتاور کم؛
- محدودهٔ وسیع سرعت (ناحیهٔ CPSR گسترده)؛
- پاسخ دینامیکی سریع؛
- بازده زیاد در تمامی سرعت‌ها؛
- مقاوم بودن و قابلیت اطمینان زیاد در نواحی مختلف کاری.

جدول ۰-۱: اهداف تخصصی برای سیستم‌های الکتریکی کششی

اهداف تخصصی	واحد	۲۰۱۰	۲۰۱۵	۲۰۲۰
هزینهٔ توان	$/kW	< ۱۹	< ۱۲	< ۸
توان ویژه	kW/kg	>۱/۰۶	> ۱/۲۰	> ۱/۴۰
چگالی توان	kW/Lit	> ۲/۶	> ۳/۵	> ۴
سطح بازده (در ۱۰٪ -۱۰۰٪ سرعت نامی و ۲۰٪ گشتاور نامی)		> ٪۹۰	> ٪۹۳	> ٪۹۴

بر اساس ویژگی‌های یادشده، موتورهای مختلفی برای کاربرد کششی و یا در وسایل نقلیهٔ الکتریکی استفاده می‌شوند. این موتورها شامل موتورهای جریان مستقیم و جریان متناوب و موتورهای خاصی مانند سوئیچ رلوکتانس هستند. گزینهٔ اصلی موتور الکتریکی در سیستم‌های مدرن کششی و خودروهای هیبریدی در چند سال گذشته، موتورهای القایی و آهنربای دائم بودند که هرکدام دارای مزایا و معایبی هستند. امروزه تأثیرگذارترین عامل در انتخاب موتورها برای کاربردهای کششی و خودروهای هیبریدی، فاکتور هزینه است. ازاین‌رو توپولوژی‌های جدیدی مانند موتور سنکرون رلوکتانسی که می‌تواند هزینهٔ زیاد استفاده از آهنربای دائم، آلومینیوم یا مس را کم و یا حذف کند، در مرکز توجه طراحان قرار گرفته است. براساس رویکرد کاهش هزینه، در ابتدا مقایسهٔ عملکرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی و موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی با سایر موتورهای جریان متناوب در کاربردهای کششی و خودروی هیبریدی مطرح شد [۴۱، ۶۵]. نتایج این بررسی‌ها برتری نسبی موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی را نسبت به موتورهای القایی و آهنربای دائم سطحی در نواحی مختلف عملکرد موتورها نشان داد. مهم‌ترین مزیت نسبی موتورهای سنکرون رلوکتانسی نسبت به موتورهای آهنربای دائم سطحی و القایی در کاربردهای کششی، عملکرد بهتر در ناحیهٔ توان ثابت است. این موتورها قابلیت اضافه‌بار بیشتری نسبت به موتورهای آهنربای دائم سطحی در ناحیهٔ توان ثابت دارند. همچنین موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی، تلفات کمتری در ناحیهٔ توان ثابت نسبت به موتورهای القایی و آهنربای دائم دارند که منجر به بازده بیشتر برای موتور در این ناحیه می‌شود.

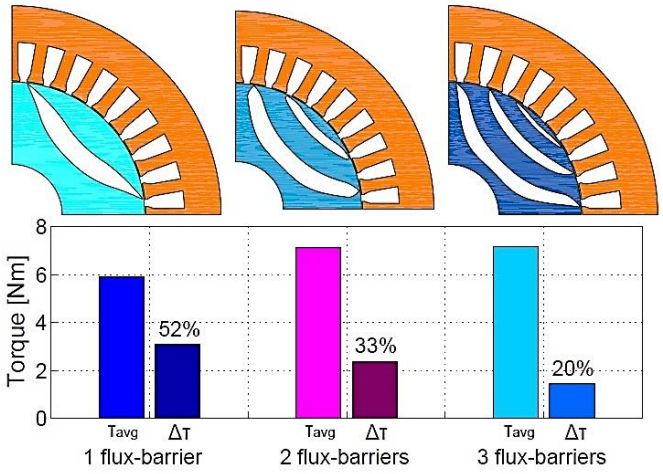
رویکرد کاهش هزینه در موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی منجر به جایگزین کردن آهنرباهای کمیاب خاکی با آهنرباهای ارزان‌تر مانند فریت شد [۳۳، ۶۶-۷۱]. یک چالش در استفاده از فریت به‌جای مواد آهنربای کمیاب خاکی، خطر مغناطیس‌زدایی آن است. این موضوع مهم‌ترین مسئلهٔ موردبحث در مقالاتی است که از فریت به‌عنوان آهنربای دائم در موتورهای سنکرون رلوکتانسی استفاده کرده‌اند [۷۲-۷۴]. راهکار پیشنهادی دیگر درخصوص کاهش هزینه، کمینه کردن مقدار آهنربای کمیاب خاکی با طراحی مناسب ساختار روتور و نحوهٔ چیدمان آهنربای دائم در موانع شار است که بعد از امکان‌سنجی استفاده از موتورهای سنکرون رلوکتانسی در کاربردهای کششی مطرح گردید [۷۵-۷۷]. ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی با رویکرد بررسی عملکرد و بهبود ساختار در این کاربرد خاص، موضوع بیشتر مقالات گردید که در ادامه، به‌اختصار به آن‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۵-۱- خودروهای برقی ـ هیبریدی دوچرخ

در [۷۸]، یک موتور سنکرون رلوکتانسی برای استفاده در وسایل نقلیهٔ هیبریدی سبک، مانند دوچرخه، طراحی و ساخته شده است. طراحی ارائه‌شده در این مقاله بر مبنای تغییر تعداد موانع شار بوده و تأثیر آن بر عملکرد روتور بررسی شده است. در هر ساختار ارائه‌شده، سعی شده است که زوایای موانع شار طوری انتخاب شود که ریپل گشتاور در کمترین مقدار ممکن قرار گیرد. شکل ۰-۱۲ ساختارهای موردمطالعه در این مقاله را نشان می‌دهد. در ادامهٔ مقاله، ساختاری که بیشترین متوسط گشتاور و کمترین ریپل را داشته انتخاب شده

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

و ازنظر استحکام مکانیکی و فرکانس طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. براساس موتور طراحی‌شده، یک نمونهٔ آزمایشگاهی ساخته شده و نتایج آزمون‌های عملی انجام‌شده بر روی این موتور ارائه شده است.



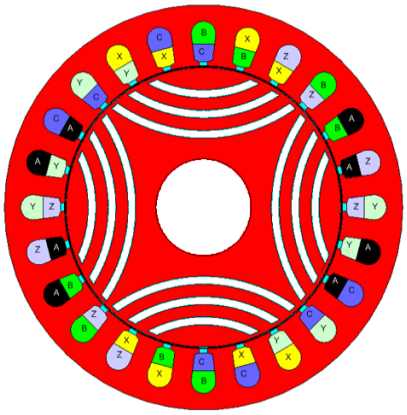
شکل ۰-۱۲: نتایج مقایسهٔ گشتاور و ریپل حاصل از آن در ساختارهایی با تعداد موانع شار متفاوت

همان‌طور که اشاره شد، برای به حرکت درآوردن یک خودروی برقی لازم است موتور الکتریکی مورداستفاده دارای چگالی گشتاور، چگالی توان، بازدهی، قابلیت اطمینان و استحکام مکانیکی بالایی باشد. اگرچه اغلب موتورهای الکتریکی مورداستفاده در وسایل نقلیهٔ برقی دوچرخ مانند دوچرخه، از نوع موتور BLDC است، ولی باید توجه داشت که بالا بودن چگالی گشتاور در این نوع موتور، به‌دلیل استفاده از آهنرباهای کمیاب خاکی است که قیمت بسیار بالایی دارند؛ لذا می‌توان گفت که موتورهای الکتریکی همچون موتور سنکرون رلوکتانسی با ساختار ساده و فشرده، چگالی توان و گشتاور بالا و هزینهٔ کم، جذابیت بالایی برای کاربرد در وسایل حمل‌ونقل برقی کوچک نظیر دوچرخه و موتورسیکلت و اسکوتر برقی خواهد داشت [۷۹، ۸۰].

در [۷۹]، یک نوع موتور سنکرون رلوکتانسی سه‌فاز با قدرت ۷۵۰ وات، سرعت ۳۴۰۰ دور بر دقیقه، ۴ قطب و ولتاژ ۱۳ ولت برای کاربرد در اسکوتر برقی طراحی شده است. علاوه‌بر طراحی بهینهٔ روتور، نیاز است که تعداد شیارهای استاتور نیز به‌درستی انتخاب شود تا اهداف حداکثر گشتاور متوسط موتور و حداقل ریپل گشتاور تأمین شود. این نتیجه به‌دست آمده است که با افزایش تعداد شیارهای استاتور، ریپل گشتاور موتور را می‌توان کاهش داد. درنهایت با درنظر گرفتن ریپل گشتاور و همچنین کاهش پیچیدگی‌های ساخت، و ایجاد مصالحه بین این دو تابع هدف، تعداد ۲۴ عدد شیار برای استاتور انتخاب می‌شود. از دیگر موارد مهم در طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی، انتخاب تعداد موانع شار[1] است که بر عملکرد الکترومغناطیسی موتور بسیار تأثیرگذار است. لذا روتور موتور (که دارای ۲۴ شیار در استاتور است) با تعداد موانع شار مختلف (۱، ۲، ۳ و ۴) طراحی و تحلیل شده است. نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که روتور با تعداد ۳ مانع شار در هر قطب انتخاب بهینه در طراحی موتور است؛ زیرا در این حالت، ریپل گشتاور موتور نسبت به سه حالت دیگر کمتر است. ساختار موتور الکتریکی طراحی‌شده برای کاربرد مذکور در شکل ۰-۱۳ نمایش داده شده است.

1. Flux-Barrier

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

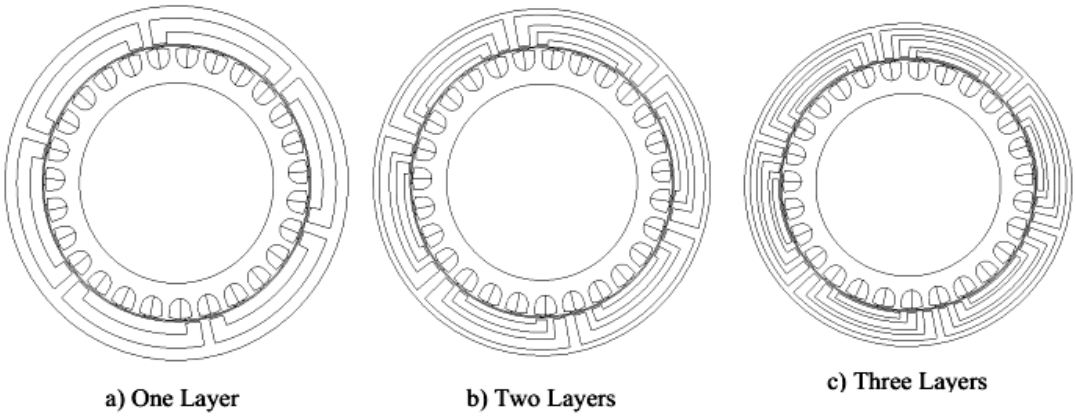


شکل ۰-۱۳: موتور سنکرون رلوکتانسی سه فاز ۷۵۰ وات با ۴ قطب و ۲۴ شیار و ۳ مسدودکنندهٔ شار در اسکوتر برقی

در [۸۰]، یک موتور سنکرون رلوکتانسی روتور خارجی سه فاز با توان ۳۵۰ وات، سرعت ۳۶۰ دور بر دقیقه، ولتاژ نامی ۴۸ ولت، جریان نامی ۱۰ آمپر و قطر خارجی ۰/۲۳ متر برای استفاده در دوچرخهٔ برقی (چرخ عقب یا جلو) طراحی شده است. در طراحی موتور برای افزایش گشتاور متوسط و کاهش ریپل گشتاور، چند پارامتر مورد بررسی قرار گرفته و بهترین حالت انتخاب شده است:

الف- انتخاب نسبت قطب/ شیار: سه ترکیب مختلف از تعداد قطب/ شیار (تعداد شیار استاتور: ۲۷ و تعداد قطب: ۴ و ۶ و ۱۲) مورد تحلیل قرار گرفته و درنهایت ترکیب ۶ قطب و ۲۷ شیار انتخاب گردیده است، زیرا نسبت به دو ترکیب دیگر، ریپل گشتاور کمتری دارد.

ب- انتخاب تعداد موانع شار روتور: تعداد موانع شار در هر قطب مطابق شکل ۰-۱۴ می‌تواند ۱ و ۲ و یا ۳ باشد. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در حالتی که ۲ مانع شار در هر قطب در روتور باشد، ریپل گشتاور موتور نسبت به بقیهٔ حالات کمتر است. همچنین مقدار متوسط گشتاور موتور نیز در این حالت بیشتر از سایر گزینه‌های بررسی‌شده است.



شکل ۰-۱۴: تعداد لایهٔ **flux barrier** در روتور خارجی موتور سنکرون رلوکتانس

۳-۵-۲- خودروهای برقی ـ هیبریدی سبک و سنگین شهری و بین‌شهری

در [۸۱]، تأثیر ورقه‌های مختلف فولاد الکتریکی برای استفاده در موتور سنکرون رلوکتانسی، با کاربرد خودروی برقی، بررسی شده است. براساس فولادهای الکتریکی مختلف مورداستفاده در استاتور و روتور، بر روی موتور سنکرون رلوکتانسی طراحی‌شده تحلیل اجزای محدود (FEM) الکترومغناطیسی و مکانیکی انجام شده است. برای استحکام مکانیکی بهتر و عملکرد الکتریکی بهینه، ترکیب‌های مختلفی از پل‌های شعاعی و انتهایی، تحت تحلیل مکانیکی و الکتریکی قرار گرفته است. در مرجع [۸۲]، ترکیب‌های

مختلف از تعداد قطب‌های موتور سنکرون رلوکتانسی ازنظر مکانیکی و الکتریکی برای استفاده در خودروی هیبریدی بررسی شده است. نتایج مقالهٔ مذکور، برتری موتور با تعداد قطب بیشتر (موتور با ۶ قطب) را ازنظر الکتریکی و مکانیکی نشان می‌دهد.

در طراحی موتورهای الکتریکی با کاربرد در خودروی هیبریدی و الکتریکی، محدودیت وزن و ابعاد اهمیت زیادی دارد؛ به عبارتی یکی از گام‌های اولیه در طراحی موتورهای الکتریکی در کاربردهای کششی، مشخص کردن ابعاد موتور است. در مرجع [۸۳]، روش محاسبهٔ ابعاد موتور سنکرون رلوکتانسی برای استفاده در یک خودروی برقی مورد بحث قرار گرفته است. متناسب با کاربرد، روشی برای به‌دست آوردن ابعاد و اندازه‌های موتور ارائه شده است. از ویژگی‌های ذکرشده در این روش، سریع و قابل اطمینان بودن آن در تشخیص پارامترهای عملکردی موتور سنکرون رلوکتانسی است.

در مرجع [۳۲]، عملکرد یک موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای دائم و بدون آن، برای کاربرد کششی مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام این مقایسه بین این دو حالت، شبیه‌سازی و آزمون عملی بر روی این دو موتور انجام شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی، چگالی گشتاور بیشتری نسبت به موتور سنکرون رلوکتانسی خالص دارد. استفاده از آهنربای فریتی موجب افزایش گشتاور تا ۷ درصد و افزایش ضریب توان از ۶ درصد تا ۱۰ درصد شده است. اما مزیت اصلی اضافه کردن فریت، در ناحیهٔ تضعیف میدان بهتر مشخص می‌شود، هرچند که قابلیت اضافه باری که توسط آهنربای فریتی ایجاد می‌شود (به‌علت خطر مغناطیس‌زدایی) محدود است. نتیجه‌ای که از این مقایسه حاصل شد نشان می‌دهد که موتور سنکرون رلوکتانسی بدون اضافه کردن آهنربای دائم، قابلیت اضافه‌بار برای کاربرد کششی را دارا است. در مطالعهٔ مذکور به‌منظور کاهش ریپل گشتاور، از دو روش مورب ساختن روتور و غیرمتقارن ساختن موانع شار استفاده شده است. در هردو روش، ریپل تا یک‌سوم مقادیر قبل کاهش یافته است. ضمن این‌که متوسط گشتاور نیز مقدار اندکی کاهش نشان می‌دهد. نتایج کلی که از این مطالعه حاصل شده است حاکی از این است که در ابعاد داده‌شده، موتور سنکرون رلوکتانسی یک انتخاب بهینه برای کاربردهای کششی و خودروی هیبریدی است که ساختاری مقاوم دارد و نیازی به استفاده از آهنرباهای کمیاب خاکی در ساختار آن نیست.

یکی از روش‌های استفاده‌شده برای افزایش قابلیت تضعیف شار موتورهای سنکرون رلوکتانسی، روش تغییر تعداد دورهای هر فاز است. موتورهای الکتریکی مورد استفاده در خودروهای برقی باید در لحظهٔ راه‌اندازی دارای گشتاور بالایی باشند؛ ازاین‌رو، در این لحظه باید مقدار آمپر دور موتور که متناسب با گشتاور است، زیاد باشد. پس از افزایش سرعت موتور، زیاد بودن مقدار اندوکتانس آن باعث می‌شود که حاصل‌ضرب سرعت در شار (که ولتاژ را ایجاد می‌کند) افزایش یابد و درنتیجه سرعت موتور محدود شود. در این هنگام می‌توان به‌منظور کاهش ولتاژ، تعداد سیم‌پیچی‌های استاتور را کاهش داد؛ برای این منظور در هنگام ساخت استاتور، سیم‌پیچی‌های استاتور به دو یا سه قسمت تقسیم می‌شود، به‌نحوی‌که در ابتدای کارکرد همهٔ سیم‌پیچی‌ها در مدار است و با افزایش سرعت از تعداد آن‌ها کاسته می‌شود [۱۲].

موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای استفاده در درون چرخ خودروهای برقی نیز پیشنهاد شده‌اند. این موتورها درحالت کلی دارای دو ویژگی مهم هستند:

۱- باید دارای گشتاور نامی بزرگی باشند. از آنجایی که این موتورها غالباً از گیربکس استفاده نمی‌کنند، باید مقدار گشتاور نامی موتور زیاد باشد.

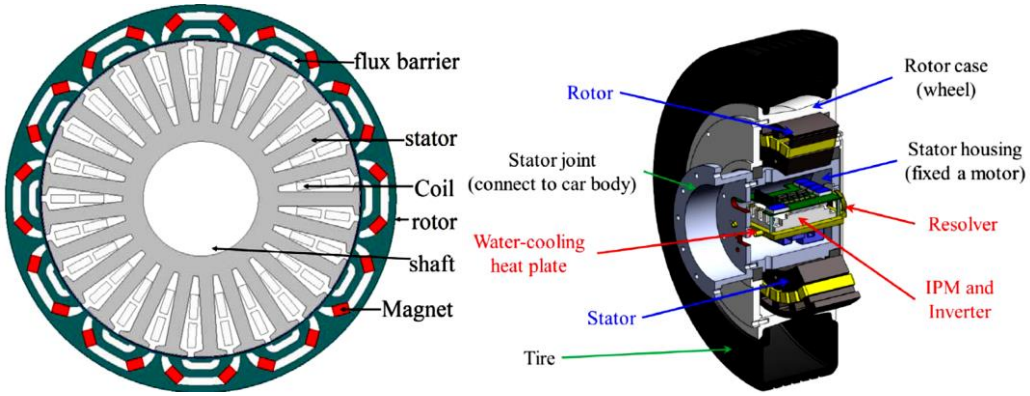
۲- نسبت قطر به طول در این موتورها بسیار بزرگ‌تر از مقادیر معمول است.

بر این اساس، دو ساختار شار محوری و روتور بیرونی برای این منظور پیشنهاد شده‌اند که در ادامه به بررسی هریک پرداخته می‌شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

۳-۵-۲-۱- موتورهای رلوکتانسی با روتور خارجی

در خودروهای بسیار سبک که به‌صورت نسبی نیاز به توان و گشتاور کمی برای جابه‌جایی دارند، می‌توان با حذف گیربکس و جاسازی موتور درون چرخ، مطابق شکل ۰-۱۵ از موتورهای شار شعاعی روتور خارجی استفاده نمود. در مرجع [۸۴]، استفاده از یک موتور سنکرون رلوکتانسی (با آهنربای کمکی) روتور خارجی ۵ فاز برای خودروهای سبک طراحی و ساخته شده است.



شکل ۰-۱۵: موتورهای رلوکتانسی با روتور خارجی

البته باید توجه داشت که در ماشین‌های الکتریکی با ساختار روتور داخلی، خنک‌سازی سیم‌پیچ‌های استاتور نسبت به ساختار روتور خارجی بهتر انجام می‌شود و درنتیجه می‌توان چگالی جریان سیم‌پیچی‌ها را در ساختار روتور داخلی مقدار بیشتر از ساختار روتور خارجی درنظر گرفت [۸۵]. یکی دیگر از چالش‌های استفاده از ساختار روتور بیرونی در چرخ خودروهای برقی، مقدار بسیار زیاد تنش مکانیکی وارده بر محور خودرو در زمان چرخیدن و یا ترمز خودرو است که این تنش به محل اتصال محور به استاتور ماشین وارد می‌شود [۸۶].

۳-۵-۲-۲- مواد به‌کار رفته در ساخت موتورهای رلوکتانسی پیشنهادی برای خودروهای الکتریکی

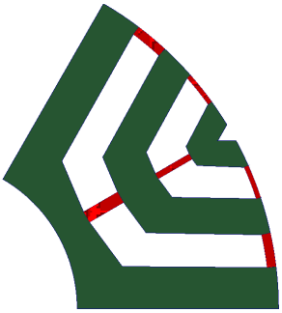
مواد مورداستفاده برای هستهٔ موتورهای رلوکتانسی، غالباً ورقه‌های آهن سیلیکون‌دار 35A300 با ضخامت ۰/۳۵ میلی‌متر است. باوجود این، برای بهبود بازده این موتورها و رقابت‌پذیر بودن بازده آن‌ها با موتورهای دارای آهنربای دائم، می‌توان از ورقه‌های با درصد سیلیکون بالاتر مانند 10JNEX900 (که دارای ضخامت ۰/۱ میلی‌متر است) نیز استفاده نمود. البته ورقه‌های آهن با درصد سیلیکون بالا، در چگالی شارهای پایین‌تری به اشباع می‌روند که این مسئله باعث پایین آمدن گشتاور موتور می‌شود. برای مقابله با این مسئله، باید ابعاد موتور را در موقع طراحی، قدری بزرگ‌تر درنظر گرفت. این مسئله نشان می‌دهد که برای انتخاب هستهٔ موتور، باید تعادلی بین افزایش چگالی توان و افزایش بازده برقرار نمود [۸۷].

یکی از مشکلات موتورهای سنکرون رلوکتانس نیاز به وجود پل‌هایی است که قطعات آهنی روتور را به یکدیگر متصل می‌کنند. این پل‌ها با عبور شار از خود باعث کاهش نسبت برجستگی موتور و افزایش شار نشتی استاتور می‌شوند. یکی از روش‌های غلبه بر این مشکل استفاده از مواد با فاز دوگانه[1] است. این مواد در اصل از جنس فریت هستند که ضریب گذردهی مغناطیسی نسبی آن‌ها برابر یک است. با انجام عملیات حرارتی در بخشی از آن‌ها، می‌توان بلور فریت را ازبین برد و ضریب گذردهی مغناطیسی نسبی را به بیش از ۱۰۰ افزایش داد. با کاربرد این مواد در موتورهای سنکرون رلوکتانسی، می‌توان روتور موتور را طوری ساخت که پل‌های آن دارای گذردهی نسبی یک و بقیهٔ نقاط آن دارای گذردهی مغناطیسی بالا باشند. این کار باعث بهبود عملکرد موتور ازنظر چگالی گشتاور و افزایش توان در ناحیهٔ تضعیف شار می‌شود. مشکل این مواد این است که چگالی شار اشباع آن‌ها نسبتاً کم (۱/۵ تسلا) است و ازاین‌رو، از آن‌ها باید تنها در روتور استفاده نمود. البته لازم به ذکر است که کاربرد این مواد در موتورهای الکتریکی در مرحلهٔ تحقیقات است و

1. Dual-Phase Magnetic Material

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

هنوز به‌صورت صنعتی مورد استفاده قرار نگرفته است. در شکل ۰-۱۶، روتور یک موتور سنکرون رلوکتانسی نشان داده شده است که ضریب گذردهی مغناطیسی نسبی قسمت‌های قرمزرنگ برابر یک و در قسمت‌های سبزرنگ ضریب گذردهی مغناطیسی مقدار بزرگ‌تری است [۸۸].



شکل ۰-۱۶: استفاده از مواد مغناطیسی با فاز دوگانه در موتورهای سنکرون رلوکتانس

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

فصل چهارم: شرکت‌های سازندهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی و حامیان تحقیقات در زمینهٔ این موتورها

 DOI: 10.30503/nripress.2020.064

۴-۱- مقدمه

برای رسیدن به جمع‌بندی درست در زمینهٔ وضعیت یک فناوری، بررسی حجم بازار و میزان استفادهٔ صنعتی از آن فناوری ضروری است. در این فصل، شرکت‌های مهم تولیدکنندهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی شناسایی می‌شوند و مشخصات فنی محصولات تولیدی این شرکت‌ها بررسی می‌شود. با کمک این اطلاعات، تلاش می‌شود که حجم بازار موتورهای سنکرون رلوکتانسی در دنیا تخمین زده شود و زمینه برای تعیین چرخهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی فراهم شود.

۴-۲- شرکت‌های تولیدکننده و کاربردهای موتورهای سنکرون رلوکتانسی

می‌توان عنوان کرد که شرکت ABB اولین شرکت سازندهٔ ماشین‌های الکتریکی بود که در سال ۲۰۱۱ میلادی موتورهای سنکرون رلوکتانسی را برای جایگزینی موتورهای القایی در کاربردهای صنعتی، مخصوصاً کاربردهای دور متغیر، به‌صورت تجاری به بازار عرضه نمود. درحال‌حاضر این شرکت محصولات زیر را عرضه می‌نماید [۸۹]:

۱- موتورهای سنکرون رلوکتانسی و سیستم درایو الکترونیکی برای استفاده در کاربردهای دور متغیر و با استاندارد انرژی IE4 در بازه‌های توانی زیر[۱]:
   - ۵/۵ تا ۵۵ کیلووات در فرکانس نامی ۱۰۰ هرتز (سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه)،
   - ۵/۵ تا ۳۱۵ کیلووات در فرکانس نامی ۵۰ هرتز (سرعت نامی ۱۵۰۰ دور در دقیقه)،
   - ۷/۵ تا ۲۰۰ کیلووات در فرکانس نامی ۳۳ هرتز (سرعت نامی ۱۰۰۰ دور در دقیقه).

۲- موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز برای کاربردهای سرعت ثابت و با استاندارد انرژی IE4 در بازهٔ توانی ۱ تا ۹۰ کیلووات و سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه (۴ قطب)؛

۳- موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی (از نوع فریتی) برای کاربردهای سرعت ثابت و دور متغیر و با استاندارد انرژی IE6 در بازهٔ توانی ۰/۵۵ تا ۱۸/۵ کیلووات و بازهٔ سرعت ۱۰۰۰ تا ۵۴۰۰ دور در دقیقه.

با توجه به مزایای فراوان موتورهای سنکرون رلوکتانسی مانند نداشتن تلفات در روتور، بازدهی بیشتر از موتورهای القایی، طول عمر نسبی بالاتر از سایر موتورها، رغبت به استفاده از این موتورها در کاربردهای مختلف افزایش پیدا کرد. البته عامل دیگری نیز در توسعهٔ استفاده از این موتورها مؤثر بود که عبارت است از افزایش قیمت آهنرباهای کمیاب خاکی و به‌تبع آن افزایش قیمت موتورهای آهنربای دائم. به همین دلایل، به‌تدریج تعداد شرکت‌های تولیدکنندهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی افزایش پیدا کرد که در لیست این شرکت‌ها، هم نام شرکت‌های بزرگ دیده می‌شود و هم نام‌های تجاری که کمتر شناخته شده‌اند. در ادامه، برخی از این شرکت‌ها (و البته نه همهٔ آن‌ها)، محصولات آن‌ها و کاربردهای موتورهای سنکرون رلوکتانسی تولیدی این شرکت‌ها بررسی می‌شود.

۱- شرکت زیمنس

موتورهای سنکرون رلوکتانسی را برای کاربردهای مختلف صنعتی ازجمله کمپرسورها، دمنده‌ها و پمپ‌ها تولید می‌کند. محصولات این شرکت چهار قطب و در بازهٔ توانی ۰/۵۵ تا ۳۰ کیلووات (برای فرکانس نامی ۵۰ هرتز) قرار دارد [۹۰].

۲- شرکت REGAL

یکی از کاربردهای موتورهای سنکرون رلوکتانسی می‌تواند استفاده از آن‌ها در کمپرسورها باشد. برند Genteq Hermetic (یکی از برندهای شرکت REGAL) که در زمینهٔ تولید کمپرسور صنعتی برای کاربردهای یخچال‌های صنعتی، تهویهٔ مطبوع صنعتی و پمپ

۱. با توجه به این‌که سرعت نامی موتورهای تولیدشده توسط این شرکت با تغییر فرکانس نامی موتور (و احتمالاً تغییر جنس ورقه‌های موتور) ساخته شده است، می‌توان این نتیجه را به‌دست آورد که کلیهٔ تولیدات این شرکت از نوع ۴ قطب است؛ به عبارت دیگر، موتورهای سنکرون رلوکتانسی ۳۰۰۰ دور در دقیقه، دو قطب نیستند. همچنین، موتورهای سنکرون رلوکتانسی ۱۰۰۰ دور در دقیقه این شرکت ۶ قطب نیستند.

گرمایی (Heat Pump) فعالیت می‌نماید، عنوان نموده است که برنامهٔ تحقیق و توسعه برای استفاده از موتورهای سنکرون رلوکتانسی (در بازهٔ توانی ۰/۵ تا ۱۵۰ کیلووات) برای رسیدن به بیشینهٔ بازدهی در بازهٔ وسیعی از سرعت دارد [۹۱].

۳- شرکت Danfoss

شرکت فنلاندی Danfoss، موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی را برای استفاده در پیشرانه‌های خودروهای برقی (سبک و سنگین) و همچنین تجهیزات دریایی (قایق‌ها، کشتی‌ها، زیردریایی و غیره) تولید می‌نماید. همچنین، این ماشین‌های الکتریکی در حالت ژنراتوری نیز می‌توانند کار کنند و درنتیجه برای استفاده در خودروهای هیبریدی گزینهٔ مناسبی هستند. این موتورها به‌وسیلهٔ مایع خنک می‌شوند. در سایت این شرکت عنوان شده است که در این کاربرد، در مقایسه با موتورهای القایی و یا آهنربای دائم استاندارد، این موتورها ابعاد کوچک‌تر، وزن کمتر و بازدهی بیشتری دارند. همچنین عنوان شده است که این شرکت موتورهای سنکرون رلوکتانسی تا توان ۴۰۰۰ کیلووات تولید می‌نماید [۹۲].

۴- شرکت REEL

این شرکت ایتالیایی موتورهای سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا) در بازهٔ توانی ۰/۵۵ تا ۴۵۰ کیلووات برای کاربردهای صنعتی (مانند پمپ‌ها) تولید می‌کند. همچنین، این شرکت موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای کاربردهای کنترلی و با گشتاور زیاد تولید می‌کند و در سایت این شرکت عنوان شده است که این موتورها قابلیت جایگزینی با موتورهای آهنربای دائم را در این کاربرد دارند [۹۳].

۵- شرکت EMACH

در سایت اینترنتی این شرکت روسی عنوان شده است که سه دسته موتور سنکرون رلوکتانسی، شامل موتورهای معمول سنکرون رلوکتانسی در بازهٔ توانی وسیع، موتورهای ابعاد کوچک (چگالی توان بالا) در بازهٔ توانی ۱/۱ تا ۱۸/۵ کیلووات و موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی در بازهٔ وسیع توانی، برای کاربردهای صنعتی تولید می‌کند. در نوع بدون آهنربا، مدعی شده است که موتورهای این شرکت کمترین وزن و بالاترین بازده را در ردهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی در دنیا دارند [۹۴].

۶- شرکت SME

این شرکت ایتالیایی موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای کاربردهای صنعتی، مانند پمپ، تولید می‌کند. همچنین این شرکت موتور سنکرون رلوکتانسی ترکیبی با آهنربای داخلی برای کاربردهای کششی خودروها، کامیون‌ها و غیره تولید می‌کند [۹۵].

۷- شرکت RICARDO

در سایت اینترنتی این شرکت انگلیسی عنوان شده است که با همکاری چند شرکت دیگر، پروژه‌ای تحقیقاتی برای نمونه‌سازی موتور سنکرون رلوکتانسی ۸۵ کیلوواتی با هدف استفاده در خودروهای برقی اجرا نموده است. هدف از این کار یافتن جایگزین مناسب برای موتورهای آهنربای دائم کمیاب خاکی است. این پروژه ازسوی سازمان نوآوری کشور انگلیس[1] حمایت مالی شده است [۹۶].

۴-۳- بررسی حجم بازار موتورهای سنکرون رلوکتانسی

همان‌طور که قبلاً نیز توضیح داده شد، تعداد شرکت‌های تولیدکنندهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی بیشتر از لیست ارائه‌شده در این گزارش است که برای جلوگیری از اطاله گزارش آورده نشده است. محدودهٔ جغرافیایی بیشتر این شرکت‌ها شامل قارهٔ اروپا و کشور آمریکا است. محصولات موتورهای سنکرون رلوکتانسی تولیدی این شرکت‌ها برای کاربردهای زیر است:

۱- جایگزینی موتورهای القایی، به‌خصوص در کاربردهای سرعت متغیر، مانند پمپ‌ها، فن‌ها و کمپرسورها؛

۲- خودروهای برقی ـ هیبریدی.

1. UK's Innovation Agancy

براساس تخمین‌های ارائه‌شده در گزارش سازمان جهانی انرژی[1] در سال ۲۰۱۱ در حدود ۷۰ درصد از انرژی الکتریکی مصرفی موتورهای الکتریکی در دنیا در کاربردهای پمپ‌ها (۱۹٪)، فن‌ها (۱۹٪) و کمپرسورها (۳۲٪) است [۹۷]. همچنین تخمین‌های انجام‌شده برای سال ۱۳۹۲ نشان می‌دهد که حدود ۵۵ درصد از انرژی مصرفی موتورهای الکتریکی در صنایع ایران مربوط به کاربردهای فن‌ها (۱۴٪)، کمپرسورها (۱۷٪) و پمپ‌ها (۲۴٪) است [۹۸]. این تخمین نشان می‌دهند که بازار بالقوهٔ بزرگی برای موتورهای سنکرون رلوکتانسی در بخش صنعت، به‌عنوان جایگزین موتورهای القایی وجود دارد. همچنین در انواع خودروهای برقی ـ هیبریدی (خودروهای دوچرخ، خودروهای سبک شهری و خودروهای سنگین)، به‌دلیل افزایش قیمت آهنرباهای دائم و همچنین نرخ رشد افزایندهٔ کاربردهای خودروهای برقی، بازار بالقوهٔ بزرگ دیگری برای استفاده از موتورهای سنکرون رلوکتانسی (به‌خصوص از نوع آهنربای کمکی) پیش‌بینی می‌شود.

۴-۴- حامیان تحقیقات در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی

در این بخش تلاش شده است که منشأ و دلایل تحقیقات انجام‌شده ازطرف نویسندگان برخی از مقالات و پایان‌نامه‌هایی که به‌عنوان مرجع در این گزارش ذکر شده‌اند، ازطریق جستجوهای اینترنتی مشخص شود. همچنین سعی شده است حتی‌المقدور، سازمان‌هایی که کارفرما یا حامی این تحقیقات بوده‌اند و نوع حمایت از این تحقیقات مشخص شود.

۱- یکی از افراد شناخته‌شده در زمینهٔ توسعهٔ دانش موتورهای سنکرون رلوکتانسی آقای رضا رجبی‌مقدم است که در دانشگاه KTH سوئد، در مقطع کارشناسی ارشد و دکتری تحصیل نموده است. در مرجع [۳۶] که پایان‌نامهٔ دکترای ایشان است، عنوان شده است که این پایان‌نامه ازسوی شرکت ABB حمایت (مالی) شده است. آقای رجبی‌مقدم درحال‌حاضر در شرکت ABB سوئد مشغول به کار هستند. با توجه به این‌که ایشان نویسندهٔ مقالهٔ مرجع [۴۶] هستند (موضوع آن، مروری بر ماشین‌های الکتریکی پرسرعت است) و در این مرجع نیز خود را به‌عنوان عضو شرکت ABB معرفی کرده است، بنابراین می‌توان گفت که شرکت ABB حامی این برنامه نیز بوده است و به‌احتمال‌زیاد، یکی از برنامه‌های شرکت ABB، توسعهٔ فناوری موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای استفاده در کاربردهای سرعت‌بالا است. همچنین، آقای رجبی‌مقدم نویسندهٔ آخر مقالهٔ مرجع [۲۶] است که موضوع آن نیز موتورهای سنکرون رلوکتانسی سرعت‌بالا است. بنابراین، همان نتیجهٔ قبل دربارهٔ مرجع [۴۶] را نیز می‌توان برای این مقاله نیز تکرار کرد.

۲- مرجع [۵۰] از گزارش، مقاله‌ای دربارهٔ ساخت یک موتور سنکرون رلوکتانسی با سرعت ۵۰ هزار دور در دقیقه است. این مقاله براساس پروژه‌ای که طی قرارداد زیر بسته شده است، منتشر شده است:

PON MALET PON01_01693PON MALET – code

این قرارداد ازسوی برنامهٔ ملی ایتالیا با عنوان زیر حمایت شده است:

National Operative Program for Research and Competitiveness 2007-2013.

در این برنامه، کشور ایتالیا در زمینهٔ سیاست‌های اتحادیهٔ اروپا درخصوص همگرایی (Cohesion Policy) مشارکت می‌کند (با بودجه‌ای معادل ۶ میلیارد یورو). در این سیاست اتحادیهٔ اروپا، صدها پروژه را در سرتاسر اتحادیهٔ اروپا تأمین هزینه می‌نماید تا این فعالیت‌ها، موتورهای توسعه‌دهندهٔ اقتصادی و اجتماعی در آینده باشند. این برنامه‌ها در مدیریت وزارت آموزش، دانشگاه و تحقیقات (Ministry of Education, University and Research) و همچنین وزارت توسعهٔ اقتصادی (Ministry of Economic Development) این کشور است.

هدف از پروژهٔ MALET که مخفف عبارت Development of technologies for medium-altitude and long-range propulsion of non-inhabited aircraft (UAV) است، توسعهٔ فناوری‌هایی است که سیستم پیشران هواپیماهای

1. International Energy Agency (IEA)

بدون سرنشین برای مأموریت‌های با زمان بالا و در ارتفاع بالا باشند. ماشین الکتریکی سرعت‌بالا در این پروژه به‌عنوان سوپر شارژر در سرعت‌های بالا و بازگشت‌دهندهٔ انرژی‌های تلف‌شده در ارتفاعات پایین کاربرد دارد.

۳- در مقاله‌های مرجع‌های [۵۷-۵۹] که دربارهٔ سیم‌پیچی گام کوتاه متمرکز است، عنوان شده است که این مقاله‌ها در قالب پروژه‌هایی که ازسوی شرکت Cummins Generator Technologies, (Stamford, UK.) حمایت مالی شده است، ارائه شده‌اند.

۴- مقاله‌های مرجع‌های [۶۱، ۶۲] و [۸۱-۸۳] که ازطرف محققین گروه PEER دانشگاه کنکوردیا (کشور کانادا) منتشر شده است، ازسوی سازمان NSERC/Hydro Quebec تحت عنوان برنامه‌ای با عنوان Design and Performance of Special Electrical Machines حمایت مالی شده است. این برنامه به مدت ۵ سال (از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹) و به مبلغ ۴۰,۰۰۰ دلار کانادا در هر سال، در قراردادی بین شرکت Hydro Quebec و دانشگاه کنکوردیا (گروه PEER) اجرا می‌شود.

۵- مقالهٔ مرجع [۶۳] که دربارهٔ طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی برای استفاده در کاربرد کششی (Traction) است، قراردادی بین شرکت جنرال الکتریک و وزارت انرژی آمریکا (DOE) با عنوان Alternative High-Performance Motors with Non-Rare Earth Materials به مبلغ ۱۲ میلیون دلار است (سهم DOE برابر ۶ میلیون دلار است).

۶- پایان‌نامهٔ مرجع [۶۴] ازسوی سازمان Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) حمایت مالی شده است.

۷- مقالهٔ مرجع [۶۷] ازطرف مؤسسهٔ Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) (آلمان) حمایت مالی شده است.

۸- مقالهٔ مرجع [۷۱] ازسوی مؤسسهٔ Engineering and Physics Science Research Council تحت گرنت شمارهٔ EP/I038543/1 حمایت مالی شده است. این گرنت به مبلغ ۳,۱۵۴,۵۳۲ پوند برای اجرای برنامه‌ای با عنوان Vehicle Electrical Systems Integration، بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶ پرداخته شده است و هدف از آن کاهش هزینه‌ها و افزایش چگالی توان درایوهای الکتریکی (موتور الکتریکی و سیستم تغذیهٔ الکترونیکی) و بهبود کنترل این سیستم‌ها برای استفاده در خودروهای برقی بوده است. این قرارداد به دانشگاه Warwick واگذار شده و کنسرسیومی از ۲۰ شرکت، شامل شرکت‌هایی مانند ABB، Arnold Magnetic Technologies، Motor Design Ltd و ... از این قرارداد حمایت نموده‌اند.

۹- مقاله‌های مرجع‌های [۷۰، ۷۳] ازسوی سازمان NEDO ژاپن، به‌عنوان قسمتی از پروژهٔ Li-EAD حمایت مالی شده است. همچنین، مقالهٔ مرجع [۷۲] ازسوی سازمان NEDO ژاپن، به‌عنوان قسمتی از پروژه با عنوان

"Development of High-Performance Battery System for Next- Generation Vehicles"

حمایت مالی شده است. تمامی این مقالات درخصوص استفاده از آهنرباهای فریتی در ساختار موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی است که ازسوی مؤسسهٔ دولتی NEDO حمایت شده است.

۴-۵- جمع‌بندی موتورهای سنکرون رلوکتانسی

در فصل اول گزارش، موتور سنکرون رلوکتانسی معرفی شد و ساختارهای مختلف آن معرفی شدند. در فصل دوم، مقایسه‌ای بین موتورهای سنکرون رلوکتانسی با موتورهای القایی، موتورهای آهنربای دائم و موتورهای سوئیچ رلوکتانس صورت گرفت و مزیت‌ها و ضعف‌های موتورهای سنکرون رلوکتانسی نسبت به این موتورها بررسی شد. عنوان شد که سادگی ساختار موتورهای سنکرون رلوکتانسی بازدهی بیشتر (کلاس استاندارد انرژی بالاتر از پربازده‌ترین انواع موتورهای القایی) مزیت این موتورها نسبت به موتورهای القایی است و در مقابل، نیاز به سیستم درایو و کم بودن نسبی ضریب توان از معایب موتورهای سنکرون رلوکتانسی است. همچنین موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی در مقایسه با موتورهای آهنربای دائم، نشان می‌دهد چگالی گشتاور زیاد، قابلیت تحمل اضافه‌بار زیاد و عملکرد مناسب در ناحیهٔ تضعیف شار از مزیت‌های مهم موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی است. در مقابل، استحکام مکانیکی کمتر در سرعت‌های زیاد و پیچیده‌تر شدن سیستم کنترل گشتاور از معایب این موتورهاست.

در فصل سوم، روند پیشرفت‌های موتورهای سنکرون رلوکتانسی در کاربردها و دسته‌بندی‌های مختلف بررسی شدند. مهم‌ترین نکات اشاره‌شده در هر دسته‌بندی به شرح زیر است:

۱- در کاربردهای پرسرعت:

- استحکام روتور موتورهای سنکرون رلوکتانسی در سرعت‌های زیاد کم است. همین دلیل باعث شده است که کمتر به کاربردهای پرسرعت موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرداخته شود. ساختار جدیدی در مرجع [۲۶] گزارش برای موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرسرعت پیشنهاد شده است.
- تلفات هسته، نکتهٔ کلیدی و اصلی در طراحی الکترومغناطیسی موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرسرعت است.
- باوجود این، موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای سرعت‌های ۴۸,۰۰۰ دور در دقیقه (برای استفاده در چرخ طیار) و همچنین ۵۰,۰۰۰ دور در دقیقه (برای استفاده در توربوشارژر) طراحی و آزمایش شده‌اند.

۲- موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز:

- پر شدن تمامی قسمت‌های موانع شار با آلومینیوم (برای خودراه‌انداز کردن موتور سنکرون رلوکتانسی) به‌معنی مشخصه عملکردی بهتر موتور سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز نیست.
- در مرجع [۵۳] گزارش، روش طراحی این موتورها بحث شده است.
- از ترکیب موتور سنکرون آهنربای دائم و موتور سنکرون رلوکتانسی با تعداد قطب‌های مختلف، موتور خودراه‌انداز دوسرعته می‌توان ساخت.

۳- فعالیت‌های انجام‌شده برای بهبود ساختار موتورهای سنکرون رلوکتانسی:

- استفاده از سیم‌پیچی متمرکز (به‌جای سیم‌پیچی گسترده) می‌تواند تا ۳ درصد موجب افزایش بازده موتور سنکرون رلوکتانسی شود.
- ساختار دو استاتوره می‌تواند موجب افزایش بازده موتور سنکرون رلوکتانسی شود.
- می‌توان به‌جای پل‌ها، از غلاف دور هستهٔ روتور برای حفظ استحکام ورقه‌های روتور استفاده کرد.
- استفاده از ورقه‌های جهت‌دار مغناطیسی می‌تواند موجب افزایش ضریب برجستگی موتور شود.

۴- دستهٔ خودروهای برقی دوچرخ:

- در مقالات این بخش به فرایند طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی برای استفاده در خودروهای برقی دوچرخ، شامل انتخاب ترکیب تعداد قطب‌ها، تعداد شیارهای استاتور و موانع شار روتور، بحث شده است.
- ساختارهای موتورهای سنکرون رلوکتانسی روتور درونی و روتور بیرونی در این کاربرد بررسی شده‌اند.

- از نرم‌افزار تحلیلی Speed برای طراحی موتورهای سنکرون رلوکتانسی در این کاربرد استفاده شده است.

۵- دستهٔ وسایل نقلیه سبک و سنگین:

- برای افزایش نسبت برجستگی موتور از فولادهای الکتریکی جهت‌دار (Grain Oriented) در ساخت روتور استفاده شده است.
- در برخی مراجع، روش جامع برای طراحی موتور سنکرون رلوکتانسی در کاربردهای کششی ارائه شده است.
- برای کاهش ریپل گشتاور از روش مورب کردن روتور استفاده شده است.
- برای افزایش نسبت برجستگی موتور از روش غیرمتقارن ساختن موانع شار در روتور استفاده شده است.
- ساختار یک موتور روتور بیرونی پنج فاز برای کاربرد کششی پیشنهاد شده است و مشکلات و چالش‌های این طرح بررسی شده است.
- تأثیر استفاده از ورقه‌های مختلف در ساخت هستهٔ موتور سنکرون رلوکتانسی بر بازده موتور و چگالی توان موتور بررسی شده است.
- پل‌های روتور از مواد (فریتی) با فاز دوگانه (Dual Phase Magnetic Materials) ساخته شد و تأثیر آن بر عملکرد موتور بررسی شده است.

در فصل چهارم که به بررسی شرکت‌های سازندهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی و حامیان تحقیقات در زمینهٔ این موتورها پرداخته شده است، عنوان شد که از سال ۲۰۱۱ میلادی که شرکت ABB اولین نسل موتورهای سنکرون رلوکتانسی را برای کاربردهای صنعتی و به‌صورت تجاری به بازار عرضه کرده، این فناوری در کاربردهای مختلف (صنعتی و خطوط تولید و حمل‌ونقل) توسعهٔ زیادی پیدا کرده و با استقبال خوبی از طرف بازار روبه‌رو شده است. درحال‌حاضر شرکت‌های زیادی موتورهای سنکرون رلوکتانسی را برای کاربردهای ذکرشده تولید می‌کنند که موقعیت جغرافیایی آن‌ها، عمدتاً در اروپا و کشور آمریکا است. در این فصل ۸ شرکت تولیدکنندهٔ این نوع موتورها و مشخصات فنی محصولات آن‌ها بررسی شد.

با توجه به محصولات شرکت‌های سازندهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی و همچنین اطلاعات ارائه‌شده در گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی، برآورد شد که بازار بالقوهٔ بزرگی برای موتورهای سنکرون رلوکتانسی (به‌عنوان جایگزین موتورهای القایی، مخصوصاً در کاربردهای سرعت متغیر، و همچنین جایگزین موتورهای آهنربای دائم در کاربردهای حمل‌ونقل) وجود دارد و با توجه به مزایای این موتور بر موتورهای القایی و آهنربای دائم، کاربرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی توسعهٔ بیشتری پیدا می‌کند.

در ادامه، با استفاده از اطلاعات ارائه‌شده در مقالات و پایان‌نامه‌های مراجع این گزارش و همچنین جستجوهای بیشتر اینترنتی، تلاش شد تا حامیان پژوهش‌های انجام‌شده در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی و نوع و میزان این حمایت‌ها شناسایی شوند. جمع‌بندی بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که درحال‌حاضر، حمایت‌های مؤسسات دولتی از تحقیقات در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی متمرکز به کاربرد خودروهای برقی ـ هیبریدی است، زیرا اولاً فناوری خودروهای برقی همچنان درحال توسعه است و برای رسیدن به محصولات قابل‌اطمینان در سیستم‌های حمل‌ونقل، هنوز نیاز به تحقیقات بیشتری است؛ و از طرف دیگر استفاده از فناوری موتورهای سنکرون رلوکتانسی در کاربردهای خودروهای برقی، در مراحل ابتدایی قرار دارد و مختص به چند سال اخیر است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

فصل پنجم: معرفی موتورهای سوئیچ رلوکتانس

 DOI: 10.30503/nripress.2020.064

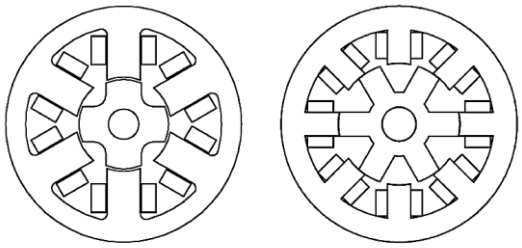
۵-۱- مقدمه

همان‌طور که در مقدمهٔ گزارش نیز اشاره شده است، در نوشتن مطالب این فصل از مراجع ارائه‌شدهٔ پروژهٔ «آینده‌پژوهی و رصد وضعیت آهنرباهای دائم و کاربردهای آن‌ها در ماشین‌های الکتریکی» استفاده شده است.

نمونه‌های اولیهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس را می‌توان در موتور ابداعی ویلیام استرگون[1] در سال ۱۸۲۴ یا ماشین چارلز ویتسون[2] در سال ۱۸۴۱ جستجو کرد. از اویل ۱۸۷۰ و با بهبود و گسترش موتورهای کموتاتوردار جریان مستقیم و جریان متناوب، موتورهای سوئیچ رلوکتانس تقریباً فراموش شدند تا این‌که در دههٔ ۳۰ و با ظهور اولیهٔ ادوات کلیدزنی الکترونیکی و چند سال بعد (در اوایل دههٔ ۶۰) با ظهور تریستور، موتورهای سوئیچ رلوکتانس دوباره مورد توجه قرار گرفتند و به‌تدریج، در سال‌های آتی (باوجود پیشرفت ادوات الکترونیک قدرت، میکروپروسسورها، کامپیوترهای پرسرعت و افزایش روزافزون کاربردهای سرعت متغیر) کاربرد موتورهای سوئیچ رلوکتانس گسترش یافت [۹۹]. در این فصل به بررسی اصول عملکرد و معرفی برخی از ساختارهای موتورهای سوئیچ رلوکتانس پرداخته می‌شود.

۵-۲- اصول عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانس

موتورهای سوئیچ رلوکتانس گونه‌ای از ماشین‌های سنکرون محسوب می‌شوند، اما سیم‌پیچی میدان آن‌ها مانند ماشین جریان مستقیم بر روی استاتور واقع شده و روتور فاقد سیم‌پیچی و یا آهنربای دائم است. استاتور و روتور هردو دارای قطب‌های برجسته هستند. شکل ۵-۱ یک نمونهٔ ساده از این موتورها را نشان می‌دهد [۱۰۰].

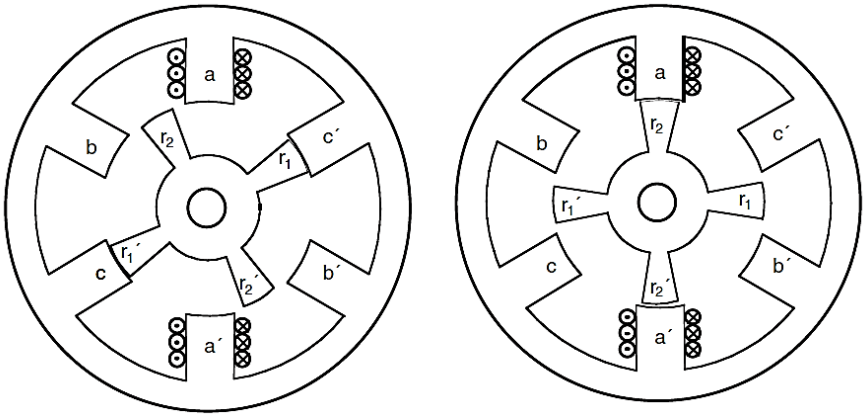


شکل ۵-۱: دو نمونهٔ موتور سوئیچ رلوکتانس

برای درک بهتر نحوهٔ کارکرد این موتور، با توجه به شکل ۵-۲، فرض می‌شود در حالت اولیه قطب‌های r_1 و r_1' روتور و قطب‌های c و c' استاتور روبه‌روی هم قرار گرفته‌اند (شکل الف). اکنون به فاز a جریانی با جهت نشان‌داده‌شده، اعمال می‌شود. شار مغناطیسی در ماشین جاری می‌شود و مسیر خود را ازطریق قطب‌های a'-a استاتور و r_2 و r_2' روتور می‌بندد و باعث می‌شود قطب‌های r_2 و r_2' روتور به‌سمت قطب‌های a و a' استاتور جذب شوند. وقتی این قطب‌ها روبه‌روی هم قرار گیرند (شکل ب)، جریان فاز a قطع شده و جریان فاز b وصل می‌شود تا قطب‌های r_1 و r_1' روتور با قطب‌های b و b' استاتور هم‌جهت شود و روبه‌روی هم قرار بگیرند (هم‌راستا شوند). به همین ترتیب، می‌توان با کنترل جریان سیم‌پیچ‌های استاتور، حرکت روتور را کنترل کرد.

1. William Sturgeon
2. Charles Wheatstone

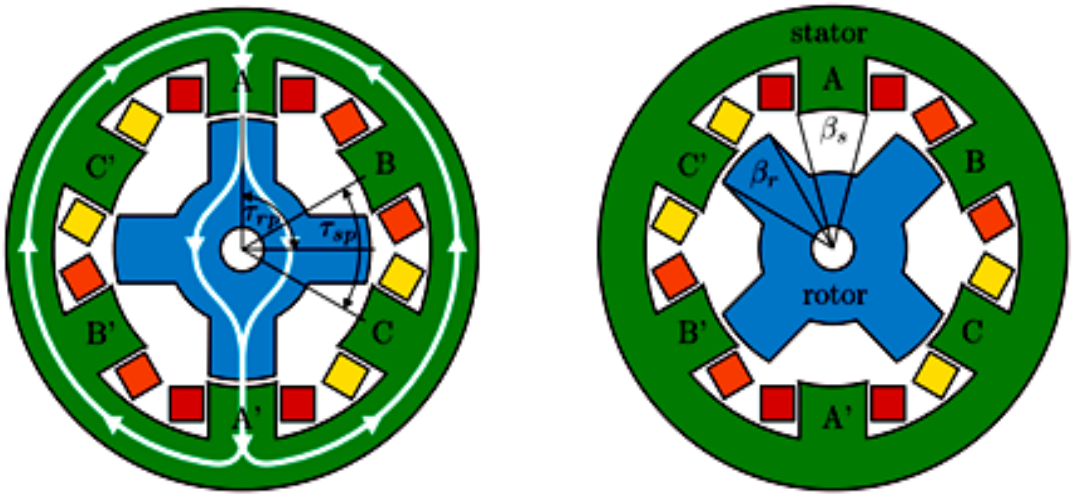
DOI: 10.30503/nripress.2020.064



شکل ۰-۲: عملکرد ماشین سوئیچ رلوکتانس: الف) هم‌راستایی فاز **c** و ب) هم‌راستایی فاز **a**

بنابراین می‌توان گفت که در موتورهای سوئیچ رلوکتانس، تمایل روتور برای قرار گرفتن در وضعیت کمترین رلوکتانس (بیشترین اندوکتانس)، عامل چرخش روتور است. هنگامی‌که دو قطب روتور با دو قطب استاتور با هم هم‌راستا شده‌اند، جفت قطب دیگر روتور و استاتور غیرهم‌راستا هستند و اگر سیم‌پیچ آن جفت قطب از استاتور را تحریک شود، نزدیک‌ترین جفت قطب روتور را به خود جذب می‌کند. بنابراین، با تحریک متوالی سیم‌پیچ‌های استاتور، روتور می‌چرخد [۱۰۰].

موقعیت هم‌راستایی[1] و ناهم‌راستایی[2] فاز A، در شکل ۰-۳ نشان داده شده است. در این تصویر، انحنای قطب استاتور (β_s)، انحنای قطب روتور (β_r)، انحنای یک قطب استاتور (τ_{sp}) و انحنای یک قطب روتور (τ_{rp}) نشان داده شده است. با چرخش روتور، مقدار اندوکتانس مطابق شکل ۰-۴ تغییر می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مشخصات این نمودار به طول انحنای قطب‌های استاتور و روتور و تعداد آن‌ها بستگی دارد. در این شکل، α_r گام قطب روتور برابر با $\frac{2\pi}{N_r}$ است (N_r تعداد قطب‌های روتور).



1. Aligned position
2. Unaligned position

شکل ۰-۳: ماشین ۳ فاز با ۴ قطب روتور و ۶ قطب استاتور (۴/۶): الف) ناهم‌راستایی فاز **A** و ب) هم‌راستایی فاز **A**

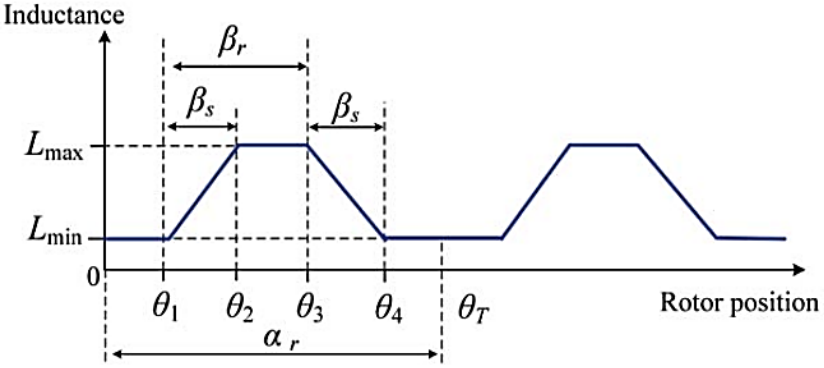
با توجه به شکل ۰-۴، اندوکتانس سیم‌پیچی هر فاز استاتور در بازه‌های زیر تغییر می‌کند [۱۰۱]:

۱- بازه $\vartheta_0 - \vartheta_1$: قطب‌های استاتور و روتور هیچ هم‌پوشانی با هم ندارند (وضعیت ناهم‌راستایی). در این بازه، اندوکتانس کمترین مقدار را دارد که به آن اندوکتانس ناهم‌راستایی گفته می‌شود.

۲- بازه $\vartheta_1 - \vartheta_2$: در این بازه، هم‌پوشانی قطب‌های استاتور و روتور شروع می‌شود و اندوکتانس سیم‌پیچی فاز به‌تدریج زیاد می‌شود.

۳- بازه $\vartheta_2 - \vartheta_3$: در این بازه، قطب‌های روتور و استاتور کاملاً هم‌پوشانی دارند (وضعیت هم‌راستایی) و اندوکتانس سیم‌پیچی فاز بیشترین مقدار را دارد که به آن اندوکتانس هم‌راستایی گویند.

۴- بازه $\vartheta_3 - \vartheta_4$: هم‌پوشانی قطب روتور و قطب استاتور به‌تدریج کم می‌شود و مقدار اندوکتانس سیم‌پیچی فاز نیز به‌تدریج کاهش می‌یابد تا این‌که به مقدار اندوکتانس ناهم‌راستایی می‌رسد.



شکل ۰-۴: تغییرات اندوکتانس فاز با چرخش روتور

گشتاور موتور سوئیچ رلوکتانس از رابطهٔ (۱-۱) به‌دست می‌آید [۱۰۰]:

$$T_e = \frac{dL(\theta,i)}{d\theta}\frac{i^2}{2} \qquad (۱-۰)$$

$$\frac{dL(\theta,i)}{d\theta} = \frac{L(\theta_2,i) - L(\theta_1,i)}{\theta_2 - \theta_1} \qquad (۲-۰)$$

θ_1 و θ_2 زاویهٔ دو موقعیت مختلف روتور است که در شکل ۰-۴ نشان داده شده است. با توجه به رابطهٔ فوق، برای تولید گشتاور به تغییر اندوکتانس نیاز است، پس در نواحی که اندوکتانس ثابت است، گشتاوری تولید نمی‌شود و هرچه اختلاف اندوکتانس هم‌راستایی و ناهم‌راستایی بیشتر باشد، دامنهٔ گشتاور موتور بزرگ‌تر می‌شود؛ این نکته در طراحی موتور حائز اهمیت است که تا جای ممکن، اندوکتانس هم‌راستایی موتور بزرگ و اندوکتانس ناهم‌راستایی آن کوچک باشد.

ولتاژ اعمالی به هر فاز استاتور برابر است با مجموع افت ولتاژ مقاومتی و نرخ تغییر شار:

$$V = Ri + \frac{d\lambda(\theta,i)}{dt} \qquad (۳-۵)$$

$$\lambda = L(\theta,i)i \qquad (۴-۵)$$

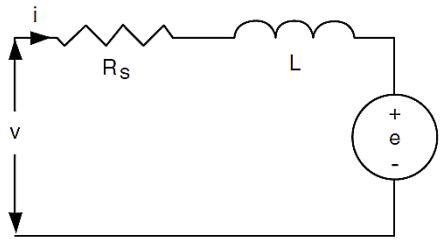
بنابراین:

$$V = Ri + L(\theta,i)\frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta,i)}{d\theta}\omega_m i \qquad (۵-۵)$$

درنتیجه، توان ورودی موتور برابر می‌شود با:

$$P_{in} = Vi = Ri^2 + L(\theta, i)\frac{di}{dt}i + \frac{dL(\theta, i)}{dt}i^2 \quad (۶-۵)$$

با توجه به این روابط، مدار معادل تک‌فاز این موتور به‌صورت نشان داده‌شده در شکل ۰-۵ به‌دست می‌آید:



شکل ۰-۵: مدار معادل تک‌فاز ماشین سوئیچ رلوکتانس

۵-۳- فازها، قطب‌ها و سیم‌پیچی

انتخاب مناسب تعداد فازها و قطب‌ها استاتور و روتور، نقش مهمی در طراحی موتور سوئیچ رلوکتانس و رسیدن به مقدار گشتاور مطلوب دارد. برای انتخاب تعداد فازها مسائل زیر را باید درنظر گرفت [۱۰۰]:

۱- توانایی راه‌اندازی[1]: برای مثال در ماشین تک‌فاز، اگر روتور و استاتور در موقعیت هم‌راستایی قرار بگیرند، ماشین راه‌اندازی نمی‌شود.

۲- قابلیت چرخش در هردو جهت[2]: توانایی چرخش روتور در یک و یا هردو جهت، حداقل تعداد فازهای استاتور را تعیین می‌کند. ماشین دو فاز نمی‌تواند در هردو جهت بچرخد و برای این منظور ماشین باید حداقل سه فاز باشد.

۳- قابلیت اطمینان[3]: هرچه تعداد فازهای ماشین بیشتر باشد، قابلیت اطمینان افزایش پیدا می‌کند؛ یعنی در صورت بروز خطا در یک فاز، ماشین می‌تواند با تعداد فاز کمتر کار کند. این قابلیت در کاربردهای حساسی مانند صنایع هوافضا اهمیت زیادی دارد.

۴- هزینه: با افزایش تعداد قطب، هزینهٔ درایور موتور افزایش می‌یابد. همچنین باعث پیچیدگی بیشتر مدار کنترلی می‌شود.

۵- چگالی توان: با افزایش تعداد فازها، چگالی توان موتور افزایش می‌یابد.

۶- عملکرد پربازده در سرعت‌های زیاد: در سرعت‌های زیاد، به‌وسیلهٔ کاهش تعداد قطب‌ها و کاهش کلیدزنی فازها، تلفات هسته را کاهش و بازدهی موتور را می‌توان افزایش داد.

هر سیکل از تولید گشتاور با یک پالس جریان، یک «تپش»[4] نامیده می‌شود. در هر چرخش کامل روتور، تعداد تپش‌ها (S) برابر با حاصل‌ضرب تعداد فازهای استاتور (m) و تعداد قطب‌های روتور (N_r) است ($S = m\,N_r$). فرکانس پایهٔ کلیدزنی هر فاز استاتور نیز برابر است با فرکانس عبور قطب روتور از مقابل آن فاز. به عبارت دیگر:

$$f_1 = \frac{rpm}{60} \times N_r \quad (۷-۵)$$

f_1 فرکانس پایهٔ کلیدزنی و rpm برابر با سرعت چرخش روتور برحسب دور در دقیقه است. زاویهٔ تپش[5] (ε) نیز از رابطهٔ زیر می‌شود [۹۹]:

1. Starting capability
2. Directional capability
3. Reliability
4. Stroke
5. Stroke angle

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{S} = \frac{2\pi}{mN_r} \qquad (۸-۵)$$

انتخاب ترکیب مناسب تعداد قطب‌های روتور و تعداد دندانه‌های استاتور محدودیت‌هایی نیز دارد. یکی از این محدودیت‌ها افزایش تعداد کلیدها، مدارهای کنترلی و هزینهٔ آن‌ها است. همچنین، اگرچه با افزایش فرکانس کلیدزنی، فیلتر کردن ریپل گشتاور موتور راحت‌تر است و موتور به‌صورت یکنواخت و آرام‌تر کار می‌کند، اما با افزایش تعداد قطب‌های روتور، فرکانس جریان موتور افزایش و درنتیجه تلفات هسته زیاد می‌شود و به‌تبع آن هزینهٔ ساخت ماشین نیز افزایش می‌یابد [۱۰۰].

از دیگر مسائل مهم در طراحی و عملکرد موتورهای سوئیچ رلوکتانس، تعیین طول انحنای قطب‌های استاتور و روتور است. برای این کار می‌توان از جداول ارائه‌شده در مرجع [۱۰۲] استفاده کرد. در این مرجع، مقادیر مجاز برای انتخاب انحنای[1] مناسب محاسبه شده است. افزایش طول انحنا از یک طرف به‌معنی ریپل گشتاور کم و حرکت نرم ماشین و از طرف دیگر کاهش فضای سیم‌پیچی است که منجر به افزایش تلفات مسی می‌شود. همچنین کاهش طول انحنا نیز منجر به کاهش اندوکتانس هم‌راستایی[2] و نهایتاً کاهش تبدیل انرژی خواهد شد. درمجموع، چند نکته برای انتخاب مناسب انحناها درنظر گرفته می‌شود [۱۰۳]:

- معمولاً طول انحنای قطب روتور کمی بزرگ‌تر از انحنای قطب استاتور است.
- لازم است که حداقل زاویهٔ انحنای روتور و استاتور، از زاویهٔ تپش بزرگ‌تر باشد تا اطمینان حاصل شود که موتور در هر وضعیتی از روتور قابل راه‌اندازی است.
- انحنای قطب‌های استاتور باید به گونه‌ای باشد که مقداری فضای خالی میان قطب‌های استاتور و روتور وجود داشته باشد تا اندوکتانس ناهم‌راستایی کوچک باشد و درنتیجه تبدیل انرژی به‌صورت مؤثر انجام پذیرد.
- انتخاب نامناسب انحناها می‌تواند پیامدهایی مانند عدم فضای کافی برای سیم‌پیچی یا افزایش اندوکتانس ناهم‌راستایی را درپی داشته باشد.

با توجه به توضیحات فوق، در جدول ۰-۱ انواع ترکیب‌های رایج برای انتخاب تعداد قطب‌های استاتور و روتور موتور سوئیچ رلوکتانس آورده شده است. نواحی سایه زده‌نشده، بهترین انتخاب‌ها هستند.

جدول ۰-۱: ترکیب‌های مجاز قطب‌های روتور و استاتور در موتور سوئیچ رلوکتانس (انتخاب ترکیب‌های بدون سایه بهتر است)

1. Arc

2. Aligned inductance

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

m	N_s	N_r	N_{wkPP}	$\varepsilon°$	S
2	4	2	1	90.00	4
2	8	4	2	45.00	8
2	4	6	1	30.00	12
2	8	12	2	15.00	24
2	12	18	3	10.00	36
2	16	24	4	7.50	48

m	N_s	N_r	N_{wkPP}	$\varepsilon°$	S
3	6	2	1	60.00	6
3	6	4	1	30.00	12
3	6	8	1	15.00	24
3	12	8	2	15.00	24
3	18	12	3	10.00	36
3	24	16	4	7.50	48

m	N_s	N_r	N_{wkPP}	$\varepsilon°$	S
4	8	6	1	15.00	24
4	16	12	2	7.50	48
4	24	18	3	5.00	72
4	32	24	4	3.75	96
4	8	10	1	9.00	40

m	N_s	N_r	N_{wkPP}	$\varepsilon°$	S
5	10	4	1	20.00	18
5	10	6	1	12.00	30
5	10	8	1	9.00	40
5	10	12	1	6.00	60

m	N_s	N_r	N_{wkPP}	$\varepsilon°$	S
6	12	10	1	6.00	10
6	24	20	2	3.00	120
6	12	14	1	4.29	84

m	N_s	N_r	N_{wkPP}	$\varepsilon°$	S
7	14	10	1	5.14	70
7	14	12	1	4.29	84

برخی ویژگی‌های موتورهای سوئیچ رلوکتانس عبارت است از [۱۰۲]:

- ✓ ساختار روتور آن بسیار ساده است. درنتیجه، ساخت آن راحت و ارزان است و ممان اینرسی کمی دارد.
- ✓ ساختار استاتور به گونه‌ای است که سیم‌پیچی آن راحت است. این سیم‌پیچی کمک می‌کند تا انتهای سیم‌پیچی[1] کوتاه و ساختار استاتور مقاوم[2] باشد.
- ✓ در اکثر کاربردها، بیشترین تلفات روی استاتور است که به‌راحتی می‌توان آن را خنک نمود.
- ✓ به‌دلیل حذف آهنربای دائم از روی روتور، موتور می‌تواند در دمای بالاتری کار کند (بدون نگرانی از افت عملکرد آهنربا و کاهش عمر آن).
- ✓ گشتاور مستقل از پلاریتهٔ جریان است که باعث می‌شود به کلیدهای کمتری برای کنترل احتیاج داشته باشیم.
- ✓ تحت شرایط خطا، ولتاژ مدارباز و جریان اتصال کوتاه صفر یا بسیار کوچک است.
- ✓ تقریباً اکثر مبدل‌هایی که با این ماشین‌ها کار می‌کنند از خطر اتصال کوتاه ساق[3] در امان هستند (برخلاف سایر موتورهای الکتریکی)، زیرا می‌توان در هر فاز تنها از یک کلید استفاده کرد.
- ✓ گزینهٔ مناسبی برای استفاده در کاربردهای سرعت بالا است.
- ✓ گشتاور راه‌اندازی می‌تواند بدون خطر جریان‌های هجومی بالا، بسیار بزرگ باشد.

همچنین، چند مورد از معایب ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس را به شرح زیر می‌توان برشمرد [۱۰۳، ۱۰۴]:

- ❋ بزرگ‌ترین مشکل موتورهای سوئیچ رلوکتانس، ریپل گشتاور زیاد و درنتیجه سروصدای زیاد آن است.
- ❋ رفتار الکترومغناطیسی این ماشین بسیار غیرخطی است.

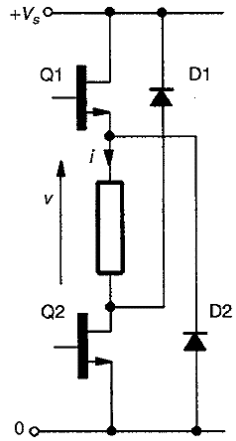
1. End-winding
2. Robust
3. Shoot-through

* این ماشین‌ها نمی‌توانند مستقیماً به شبکه متصل شوند و کنترل آن‌ها پیچیده‌تر از سایر ماشین‌های متداول است.
* غیرخطی بودن ماشین و کار در ناحیهٔ اشباع باعث می‌شود که مدل‌سازی آن پیچیده و سخت شود.

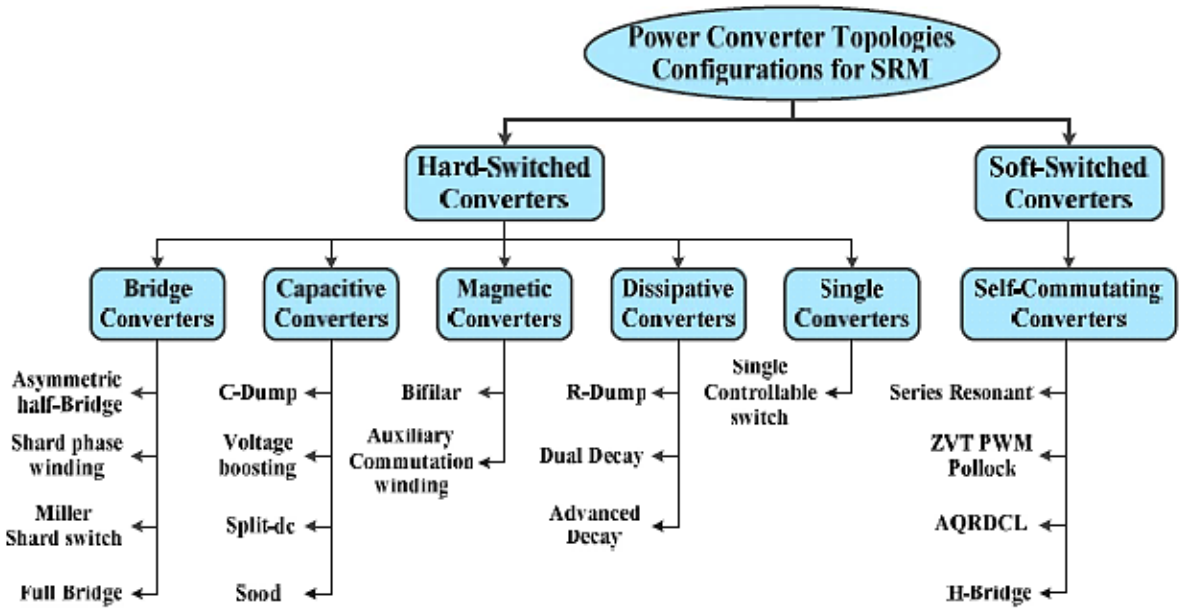
۵-۴- درایو

شکل ۰-۶ ساق یک فاز از رایج‌ترین ساختار درایو سیم‌پیچی فازهای استاتور موتور سوئیچ رلوکتانس را نشان می‌دهد که برای تغذیهٔ هر فاز استاتور، از دو سوئیچ استفاده شده است. هرچند، با توجه به رابطهٔ (۰-۱)، گشتاور موتور سوئیچ رلوکتانس به جهت جریان وابسته نیست، اما برای صفر شدن شار پیوندی، لازم است که ولتاژ اعمالی به سیم‌پیچی استاتور معکوس شود. در این شکل دیده می‌شود هرگاه کلیدها روشن باشند، ولتاژ $+V_s$ به سیم‌پیچی فاز استاتور اعمال می‌شود و هرگاه هردو خاموش باشند، ولتاژ $-V_s$ به آن اعمال می‌شود [۱۰۲].

ساختارهای متفاوتی برای تغذیهٔ سیم‌پیچی فازهای استاتور موتور سوئیچ رلوکتانس وجود دارد که در شکل ۰-۷، دسته‌بندی برای این ساختارها (با توجه به نوع کلیدزنی آن‌ها) ارائه شده است [۱۰۴].



شکل ۰-۶: مدار یک ساق درایور رایج ماشین سوئیچ رلوکتانس



شکل ۰-۷: انواع مبدل‌های ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس براساس نوع کلیدزنی

در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان روش‌های کنترلی را به دو دسته تقسیم نمود: کنترل گشتاور متوسط که با جریان تحریک تنظیم می‌شود؛ و روش کنترل گشتاور لحظه‌ای که برای اجرای آن به مدل کامل تحلیلی ماشین نیاز است. پارامترهای کنترلی درایور عبارت است از زمان روشن و خاموش شدن کلیدهای Q1 و Q2، زمان هدایت و نیز جریان فاز. با کنترل این پارامترها می‌توان گشتاور، بازده، ریپل گشتاور و سایر خروجی‌های موتور سوئیچ رلوکتانس را کنترل کرد. در یک دسته‌بندی دیگر می‌توان روش‌های کنترلی را به‌صورت زیر طبقه‌بندی نمود:

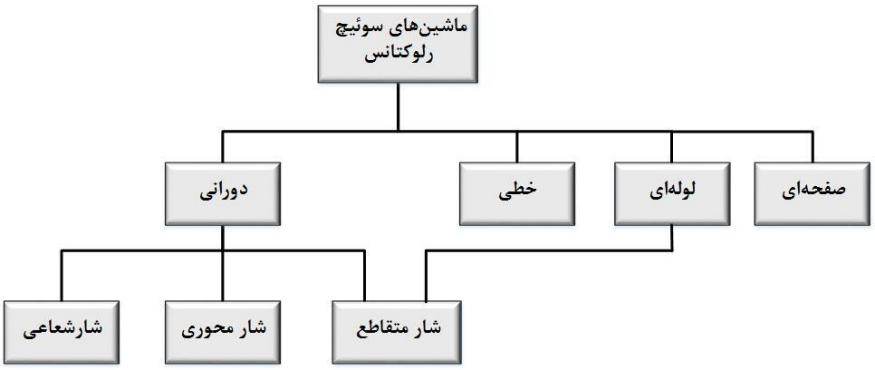
- درایوهای کنترل ولتاژ،
- درایوهای کنترل جریان،
- درایوهای ترکیبی (مانند کنترل‌کنندهٔ کاهش ریپل گشتاور) [۱۰۳].

ویژگی‌های درایوهای موتورهای سوئیچ رلوکتانس عبارتند از [۱۰۳]:

- ✓ تعداد المان‌هایی که در هر ساق استفاده می‌شود برابر با تعداد المان‌های لازم در درایو سایر ماشین‌های الکتریکی است.
- ✓ سیم‌پیچی هر فاز بین دو کلید قرار می‌گیرد؛ بنابراین احتمال خطای اتصال کوتاه ساق[1] که از مشکلات مهم سایر موتورهاست، وجود ندارد.
- ✓ فازهای مختلف موتور از هم مستقل هستند و ازدست دادن یک فاز، عملکرد سایر فازها را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد.
- ✓ سیستم درایو این موتورها منحصربه‌فرد است و نمی‌توان از سیستم‌های طراحی‌شده برای سایر ماشین‌ها استفاده کرد.
- ✓ فرکانس کموتاسیون این موتور از سایر موتورها بیشتر است که درنتیجه، تلفات و محتوای هارمونیکی را افزایش می‌دهد.
- ✓ تمام ترمینال‌های سیم‌پیچی‌ها باید به‌طور مجزا تغذیه شوند (نمی‌توان با اتصال ستاره تعداد ترمینال‌ها را کاهش داد) که منجر به افزایش تلفات می‌شود.

۵-۵- ساختارهای مختلف موتور سوئیچ رلوکتانس

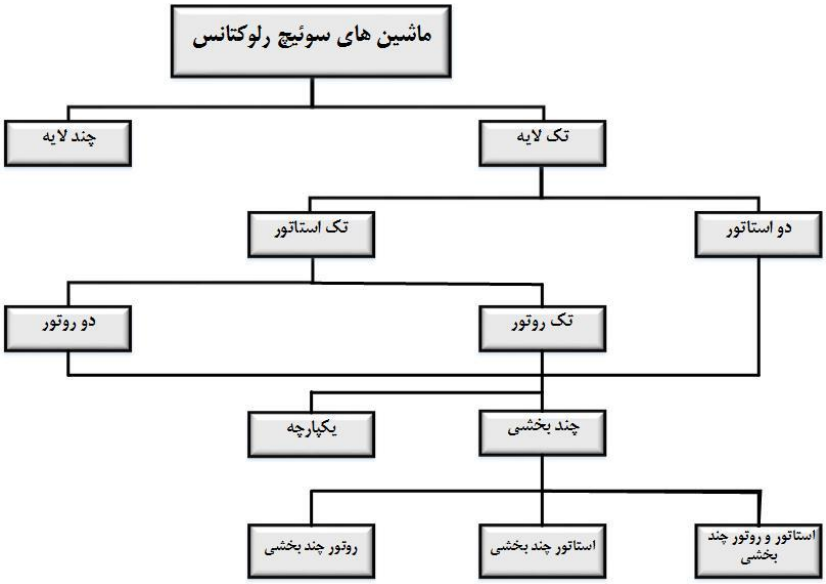
موتورهای سوئیچ رلوکتانس را می‌توان از دیدگاه‌های مختلف دسته‌بندی و بررسی کرد. در یک دسته‌بندی مشابه با سایر موتورهای الکتریکی، می‌توان ساختارهای ارائه‌شده برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس را از منظر جهت شار مغناطیسی در هستهٔ موتور و همچنین حرکت چرخش و یا خطی موتور، تقسیم‌بندی کرد. این تقسیم‌بندی در شکل ۰-۸ نشان داده شده است.



شکل ۰-۸: دسته‌بندی ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس براساس جهت شار و حرکت

1. Shoot-through fault

دسته‌بندی دیگری نیز براساس هندسهٔ کلی ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس پیشنهاد می‌شود که در شکل ۰-۹ نشان داده شده است. ساختارهای مختلفی که تاکنون در زمینهٔ موتورهای الکتریکی سوئیچ رلوکتانس ارائه شده است را می‌توان با استفاده از این دو دسته‌بندی مشخص نمود. در ادامه، برخی ساختارهای این ماشین‌ها به‌طور مختصر معرفی می‌شوند و در فصل بعد، ساختارهای جدید موتورهای سوئیچ رلوکتانس و ویژگی‌ها و مزیت‌های آن‌ها نسبت به ساختارهای معمول، براساس اطلاعات ارائه‌شده در مقالات مختلف ارائه و بررسی می‌شوند.



شکل ۰-۹: دسته‌بندی ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس براساس هندسهٔ کلی

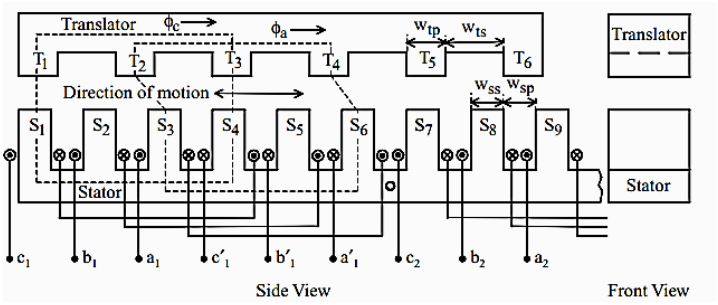
۵-۵-۱- موتور سوئیچ رلوکتانس خطی

موتورهای سوئیچ رلوکتانس خطی در کاربردهایی که حرکت خطی نیاز است، مانند آسانسورها و قطارهای پرسرعت، گزینهٔ بهتری نسبت به ماشین‌های دورانی هستند، زیرا با حذف بخش‌های مکانیکی برای تبدیل حرکت، بازدهی کل سیستم بیشتر می‌شود. برخلاف ماشین دورانی، سیم‌پیچی تحریک موتورهای سوئیچ رلوکتانس خطی می‌تواند بر روی بخش ساکن (استاتور) یا بر روی بخش متحرک قرار گیرد. به‌طور کلی، براساس جهت شار جاری در ماشین، دو دسته موتور سوئیچ رلوکتانس خطی شار طولی و شار عرضی وجود دارد که در شکل ۰-۱۰ نشان داده شده است [۱۰۰].

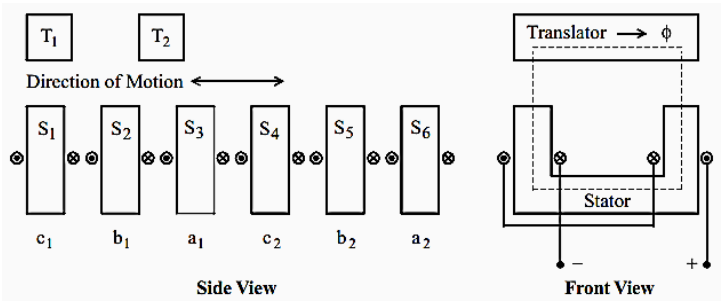
۵-۵-۲- موتور سوئیچ رلوکتانس صفحه‌ای

در موتورهای سوئیچ رلوکتانس صفحه‌ای که از ساختار خطی الهام گرفته شده‌اند، استاتور و بخش متحرک به شکل صفحه‌های روبه‌رو به‌هم قرار گرفته‌اند. سیم‌پیچ‌ها در دو جهت عمود بر هم در یک صفحه قرار می‌گیرند و امکان کنترل حرکت در هردو جهت را به‌طور مستقل فراهم می‌کند؛ بنابراین موتور سوئیچ رلوکتانس صفحه‌ای را می‌توان با دقت بالایی کنترل نمود [۱۰۰].

DOI: 10.30503/nripress.2020.064



(الف)

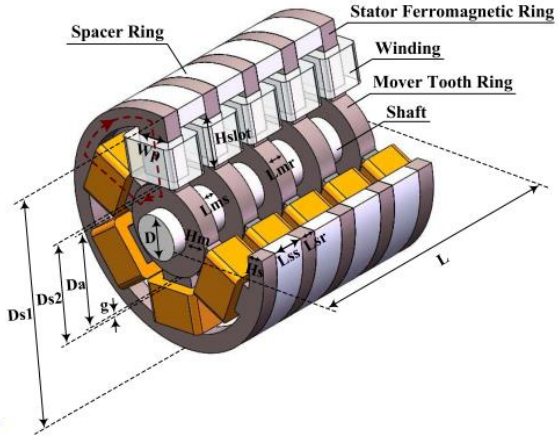


(ب)

شکل ۰-۱۰: ماشین سوئیچ رلوکتانس خطی سه فاز: الف) شار طولی، ب) شار عرضی

۵-۵-۳- موتور سوئیچ رلوکتانس لوله‌ای

ساختار موتور سوئیچ رلوکتانس لوله‌ای نیز از ساختار خطی این ماشین اقتباس شده است. هردو بخش ساکن و متحرک در این ساختار به شکل لوله‌ای است (شکل ۰-۱۱) که به دو دلیل باعث برتری نسبت به ساختار خطی شده است: یکی چگالی نیروی بیشتر و دیگری حذف اثر انتهایی عرضی که باعث یکنواختی توزیع میدان در ماشین می‌شود [۱۰۵].

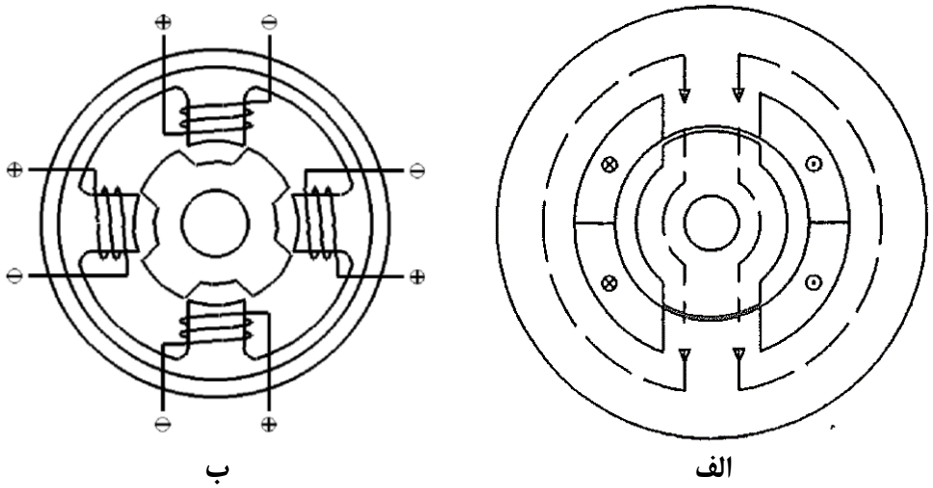


شکل ۰-۱۱: ماشین سوئیچ رلوکتانس لوله‌ای

۵-۵-۴- موتورهای سوئیچ رلوکتانس تک‌فاز

در شکل ۰-۱۲ دو نمونهٔ موتور سوئیچ رلوکتانس تک فاز، یکی با دو قطب در استاتور و دو قطب در روتور و دیگری با چهار قطب در استاتور و روتور نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل نیز پیداست، موتور سوئیچ رلوکتانس تک‌فاز در موقعیت هم‌راستایی و ناهم‌راستایی قطب‌ها، در وضعیت تعادل دارند و درنتیجه گشتاور رلوکتانسی موتور صفر است؛ بنابراین می‌توان گفت که این گشتاور

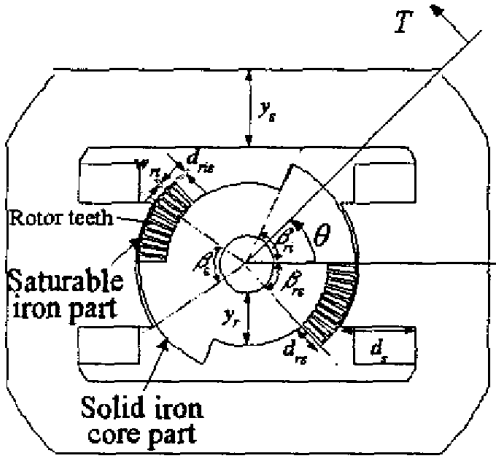
راه‌اندازی این موتورها صفر است [۱۰۶، ۱۰۷]. همچنین، موتورهای سوئیچ رلوکتانس تک‌فاز به‌صورت پیوسته نمی‌توانند گشتاور تولید کنند و در هر سیکل از تغذیهٔ فاز استاتور، در یک محدوده گشتاور وجود دارد و پس از هم‌راستا شدن روتور و استاتور و قطع تغذیهٔ فاز، روتور در اثر اینرسی اولیه به مسیر خود ادامه می‌دهد. با روشن شدن مجدد فاز استاتور، قطب روتور با یک قطب دیگر از استاتور هم‌راستا می‌شود و به همین ترتیب به مسیر خود ادامه می‌دهد.



شکل ۰-۱۲: موتور سوئیچ رلوکتانس تک‌فاز: الف) موتور ۲/۲ و ب) موتور ۴/۲

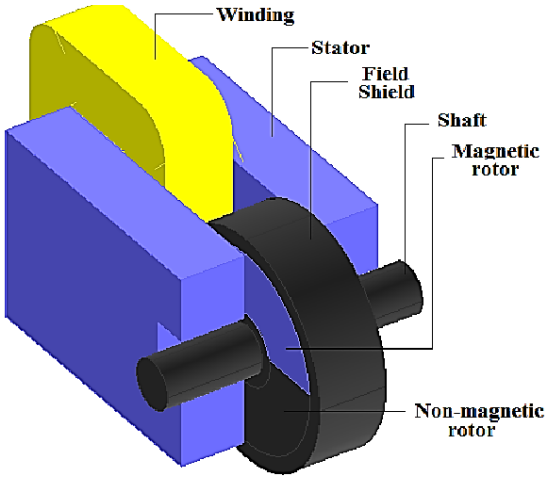
موتور سوئیچ رلوکتانس تک‌فاز مناسب برای استفاده در سرعت‌های بالا است؛ زیرا به کمترین تعداد سوئیچ برای درایو موتور نیاز است و درنتیجه تلفات هسته و کلیدزنی به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌یابد، هرچند در ساختار ۲/۲ تعداد قطب‌های استاتور و موتور کمترین مقدار است. در مرجع [۱۰۶] یک موتور سوئیچ رلوکتانس تک‌فاز ۴/۴ برای این کاربرد پیشنهاد شده است. مزیت عمدهٔ این ساختار کوتاه‌تر شدن مسیر شار مغناطیسی و کوچک‌تر شدن انتهای سیم‌پیچی‌ها و ریپل گشتاور است. برای راه‌اندازی این موتور، روش‌های مختلفی بحث شده است که ساده‌ترین آن‌ها قرار دادن آهنربا در ناحیه‌ای از قطب استاتور است که در تولید گشتاور نقش ندارد (و مدار مغناطیسی را به هم نمی‌ریزد)؛ مانند قسمتی از استاتور که پس از هم‌راستایی و خاموش شدن فاز، قطب روتور از مقابل آن عبور می‌کند [۱۰۶].

در مرجع [۱۰۸]، یک موتور سوئیچ رلوکتانس تک‌فاز ۲/۲، که در شکل ۰-۱۳ نشان داده شده است، برای استفاده در کاربرد پرسرعت پیشنهاد شده است. از خاصیت اشباع رفتن قسمت‌های دندانه‌دندانهٔ روتور، برای راه‌اندازی موتور استفاده شده است. برای افزایش استحکام استاتور و درنتیجه کاهش نویز صوتی موتور، استاتور موتور پیشنهادی به‌صورت مستطیل طراحی شده است.



DOI: 10.30503/nripress.2020.064

شکل ۰-۱۳: ساختار پیشنهادی موتور سوئیچ رلوکتانس تک‌فاز ۲/۲ برای استفاده در کاربردهای پرسرعت



شکل ۰-۱۴: ساختار موتور سوئیچ رلوکتانس تک‌فاز شار محوری

در مرجع [۱۰۹]، یک موتور سوئیچ رلوکتانس شار محوری تک‌فاز پیشنهاد و مشخصات عملکردی آن بررسی شده است (شکل ۰-۱۴). همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، بخشی از روتور از مواد مغناطیسی و بخش دیگر از مواد غیرمغناطیسی است.

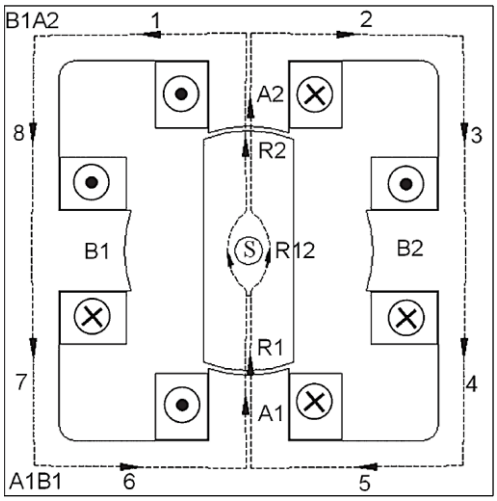
۵-۵-۵- موتور سوئیچ رلوکتانس دو فاز

همان‌طور که در جدول ۰-۱ مشاهده می‌شود، یکی از ساختارهای ممکن برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس، موتور دو فاز است که در این حالت، استاتور دارای چهار قطب و روتور دارای دو قطب خواهد بود (شکل ۰-۱۵). از مشکلات مهم این انتخاب برای ساختار موتور سوئیچ رلوکتانس، نویز صوتی زیاد موتور (نسبت به سایر ساختارهای موتور سوئیچ رلوکتانس) و همچنین تلفات بیشتر هستهٔ استاتور، به‌دلیل بیشتر بودن شار معکوس[1] در هستهٔ استاتور این ساختار است [۱۱۰]. در شکل ۰-۱۶، یک ساختار جدید برای موتور سوئیچ رلوکتانس دو فاز نشان داده شده است. در این ساختار، استاتور دارای شش قطب و روتور دارای سه قطب است. در شکل دیده می‌شود که هر فاز استاتور از سه قطب تشکیل شده است.

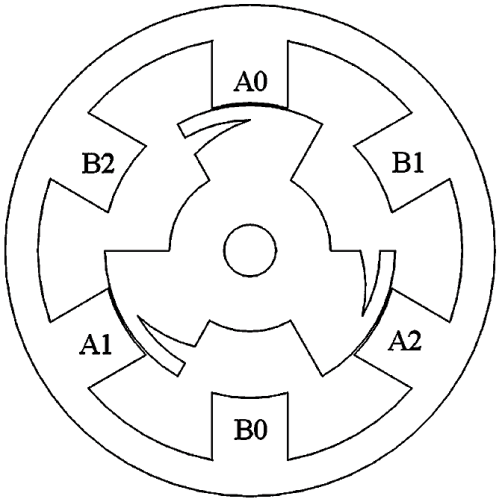
با توجه به آرایش قطب‌های روتور، برای ایجاد گشتاور رلوکتانسی در هنگام خاموش شدن جریان یک فاز و روشن شدن جریان فاز دیگر، لازم است که رلوکتانس مسیر شار مغناطیسی در راستاهای مختلف روتور، همان‌طور که در شکل ۰-۱۶ دیده می‌شود، یکسان نباشد. شایان‌ذکر است که در ساختار جدید معرفی‌شده برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس دوفاز، تعداد قطب‌های روتور و استاتور ترکیب‌های دیگری نیز می‌توانند داشته باشند. این ساختار، مشکلات نویز صوتی و همچنین تلفات مضاعف در هستهٔ استاتور موتورهای سوئیچ رلوکتانس دو فاز را مرتفع می‌نماید. مهم‌ترین مشکل ساختار پیشنهادی برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس دو فاز، عدم توانایی موتور در کارکرد در هردو جهت ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد است (موتور فقط در یک جهت می‌چرخد) [۱۱۰].

1. Flux Reversal

DOI: 10.30503/nripress.2020.064



شکل ۰-۱۵: ساختار متداول موتور سوئیچ رلوکتانس دو فاز



شکل ۰-۱۶: موتور سوئیچ رلوکتانس دو فاز با ساختار جدید

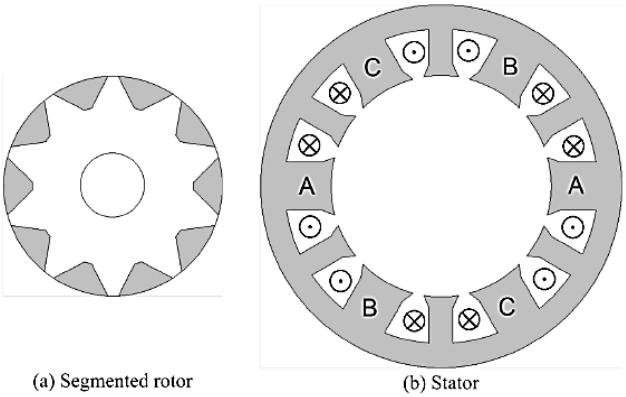
۵-۵-۶- موتور سوئیچ رلوکتانس با ساختار چندبخشی

استفاده از ساختار چندبخشی می‌تواند به کاهش حجم آهن مورداستفاده، کاهش تلفات آهن و درنهایت، افزایش چگالی توان و کاهش هزینه‌ها کمک کند. این روش به‌صورت‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است که شامل موتورهای سوئیچ رلوکتانس با روتور چندبخشی و نیز با استاتور چندبخشی است.

۵-۵-۶-۱- موتور سوئیچ رلوکتانس با روتور چندبخشی

ساختار یک موتور سوئیچ رلوکتانس با روتور چندبخشی ۱۲/۱۰ در شکل ۰-۱۷ نشان داده شده است [۱۱۱]. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، در این ساختار، استاتور مشابه سایر موتورهای سوئیچ رلوکتانس است، اما روتور آن دارای ساختار متفاوتی است؛ بخش‌های روتور (قسمت‌های تیره در شکل) از مواد مغناطیسی نرم است که با مواد غیرمغناطیسی (قسمت‌های سفیدرنگ) به‌هم متصل شده‌اند. در این ساختار، یوغ روتور وجود ندارد.

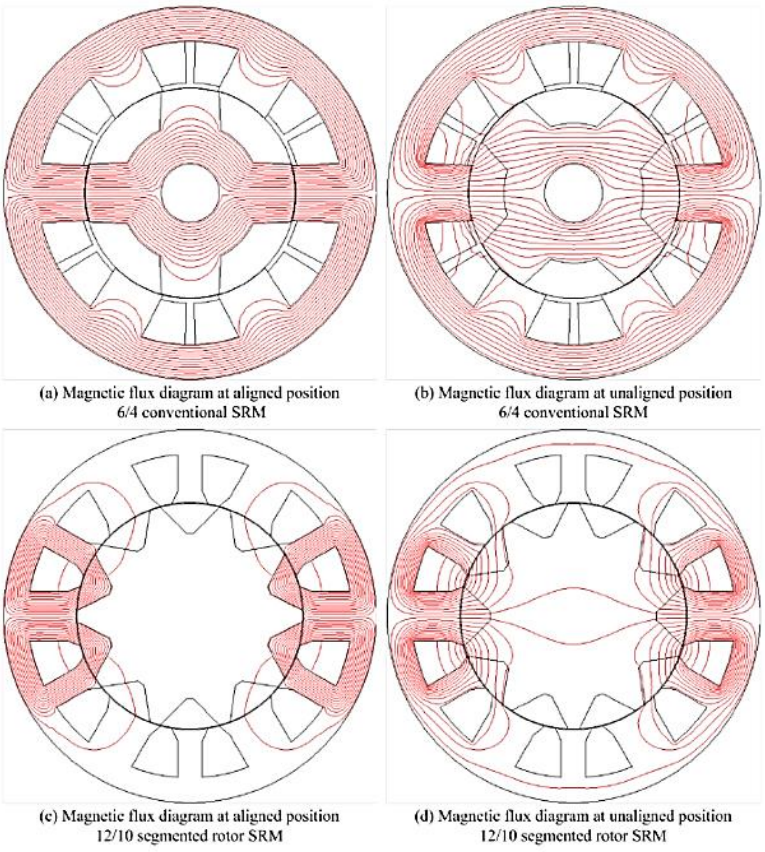
DOI: 10.30503/nripress.2020.064



(a) Segmented rotor (b) Stator

شکل ۰-۱۷: ساختار یک موتور سوئیچ رلوکتانس با روتور چندبخشی ۱۲/۱۰

در مرجع [۱۱۱]، مسیر شارهای مغناطیسی در هستهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس با روتور معمولی و روتور چندبخشی مقایسه شده است (شکل ۰-۱۸). در این ساختار نسبت عرض دندانهٔ استاتور به گام قطب بیشتر از ساختارهای معمول موتورهای سوئیچ رلوکتانس می‌تواند باشد. همچنین به‌دلیل کوتاه‌تر بودن مسیر شار مغناطیسی، نسبت به ساختارهای معمول، این موتور گشتاور بیشتری می‌تواند تولید نماید.



(a) Magnetic flux diagram at aligned position 6/4 conventional SRM

(b) Magnetic flux diagram at unaligned position 6/4 conventional SRM

(c) Magnetic flux diagram at aligned position 12/10 segmented rotor SRM

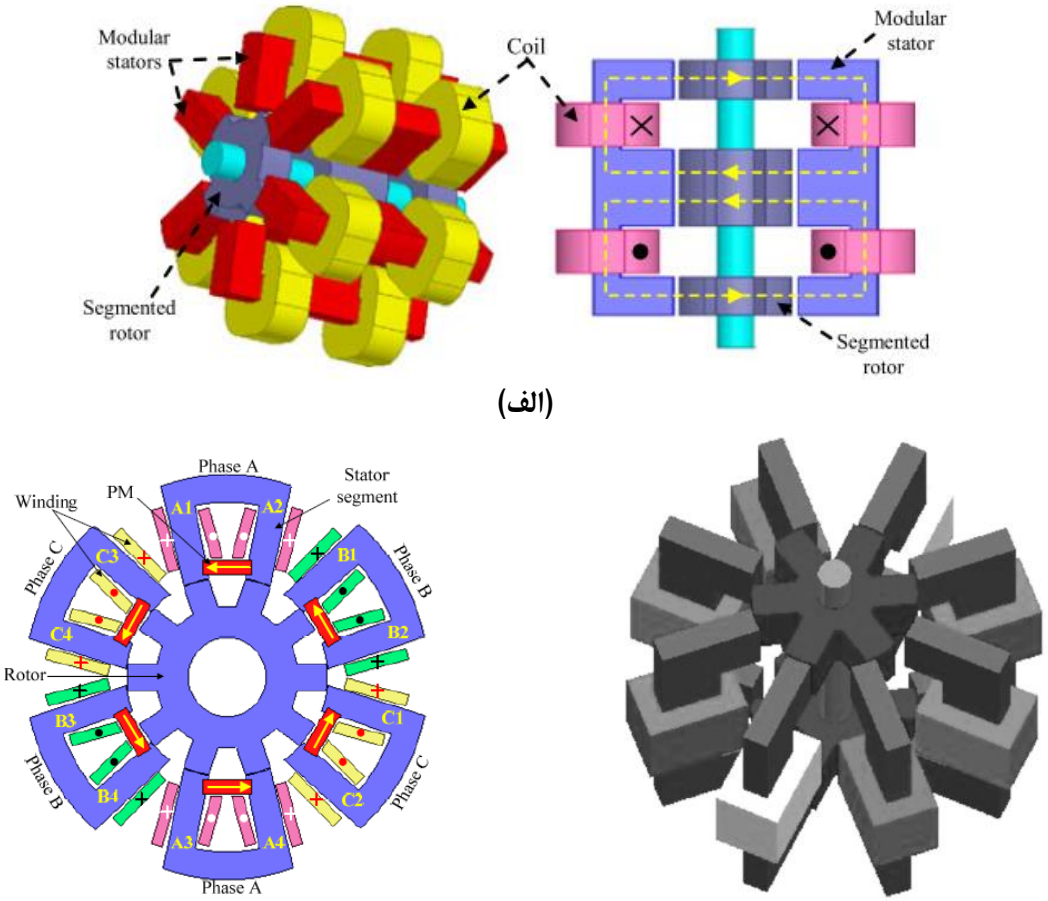
(d) Magnetic flux diagram at unaligned position 12/10 segmented rotor SRM

شکل ۰-۱۸: مسیر شارهای مغناطیسی در هستهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس با روتور معمولی و روتور چندبخشی

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

۵-۵-۶-۲- موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور چندبخشی

مشابه با ساختار موتور سوئیچ رلوکتانس با روتور چندبخشی، ساختارهایی هم برای موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور چندبخشی هم پیشنهاد شده است که نمونه‌هایی از آن‌ها در شکل ۰-۱۹ دیده می‌شود. چندبخشی بودن استاتور (یا به عبارت دیگر بخش‌بخش بودن قسمت‌های مختلف استاتور) باعث می‌شود که مسیر شار مغناطیسی کوتاه‌تر شود و درنتیجه تلفات هسته کاهش یابد [۱۱۲]. سهولت سیم‌پیچی استاتور و افزایش چگالی توان موتور از مزایای مهم ساختارهای چندبخشی است [۱۱۳, ۱۱۴].



شکل ۰-۱۹: ماشین سوئیچ رلوکتانس با استاتور چندبخشی: (الف) **E** شکل، (ب) **C** شکل، (ج) **U** شکل

فصل ششم: راه‌کارهای ارائه‌شده برای بهبود عملکرد موتورهای سوئیچ رلوکتانس

۶-۱- مقدمه

همان‌طور که در مقدمهٔ این گزارش نیز توضیح داده شده است، از مراجع ارائه‌شده در پروژهٔ «آینده‌پژوهی و رصد وضعیت آهنرباهای دائم و کاربردهای آن‌ها در ماشین‌های الکتریکی» و گزارش‌های «رصد وضعیت فناوری محرکه‌های الکتریکی (ماشین‌های الکتریکی و مدار کنترل و درایو) در خودروهای الکتریکی دوچرخ» و «رصد وضعیت فناوری محرکه‌های الکتریکی (ماشین‌های الکتریکی و مدار کنترل و درایو) در خودروهای الکتریکی سبک و سنگین شهری» مربوط به پروژهٔ «کاربرد ماشین‌های الکتریکی در سیستم‌های حمل‌ونقل الکتریکی» استفاده شده است [۴۳، ۴۴].

در کنار مزایای فراوانی که در فصل قبل برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس عنوان شد، بررسی مراجع مختلف نشان می‌دهد که موتورهای سوئیچ رلوکتانس، به‌خصوص در مقایسه با موتورهای آهنربای دائم، دارای معایب عمدهٔ زیر هستند:

۱- ریپل گشتاور زیادی دارند و درنتیجه، نویز صوتی قابل‌توجهی تولید می‌کنند.

۲- بازده آن‌ها از موتورهای آهنربای دائم کمتر است و به‌صورت ویژه، این مسئله موجب محدود شدن استفاده از این موتورها در کاربردهای حمل‌ونقل الکتریکی (انواع خودروهای برقی ـ هیبریدی)، به‌عنوان موتور الکتریکی جایگزین موتورهای آهنربای دائم داخلی (IPM)، شده است.

۳- چگالی گشتاور و توان موتورهای سوئیچ رلوکتانس در مقایسه با موتورهای آهنربای دائم کم است.

راهکارهای مختلفی که برای بهبود عملکرد موتورهای سوئیچ رلوکتانس پیشنهاد شده است و در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرند، برای رفع بخشی و یا تمامی چالش‌های فوق‌الذکر ارائه شده است. در این فصل تلاش شده است که تمامی ساختارها و حتی ایده‌های مهم (که ممکن است لزوماً به نمونه‌سازی هم منجر نشده باشد) ارائه‌شده برای بهبود عملکرد موتورهای سوئیچ رلوکتانس پوشش داده شود. این ایده‌ها در دو دستهٔ کلی زیر قابل بررسی هستند که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود:

۱- انجام تغییرات در اجزای ساختار معمول موتورهای سوئیچ رلوکتانس، مانند استفاده از ورقه‌های آهنی بهتر، تغییر در سیم‌پیچی، بهینه‌سازی اجزای موتور؛

۲- ارائهٔ ساختارهای جدید برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس، مانند موتورهای چندلایه، موتورهای شار محوری، موتورهای دواستاتوره و غیره.

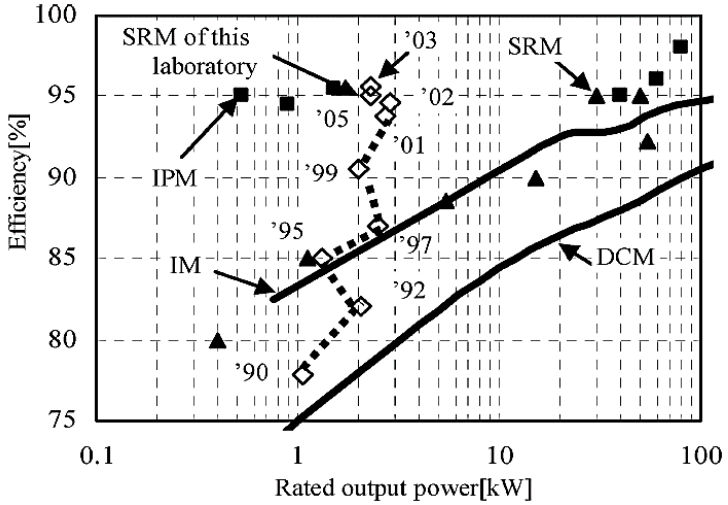
۶-۲- تغییر در ساختار معمول موتور سوئیچ رلوکتانس

در مرجع [۱۱۵]، با اریب کردن (با زوایای اریب مختلف) روتور و استاتور یک موتور سوئیچ رلوکتانس تک‌فاز ۶/۶ با توان ۱۰۰ وات، میزان نویز صوتی و لرزش آن به میزان قابل‌توجهی کاهش پیدا کرده است و عنوان شده است که از این ماشین، در کاربردهای خانگی می‌توان استفاده نمود. البته نکتهٔ مهم درخصوص استفاده از این روش این است که اریب کردن استاتور یا روتور، معمولاً باعث کاهش بازدهی موتور می‌شود که این مسئله، در نمودارهای ارائه‌شده در این مرجع نیز قابل مشاهده است.

قبلاً عنوان شد که یکی دیگر از مشکلات مهم موتورهای سوئیچ رلوکتانس کم بودن چگالی گشتاور (نسبت گشتاور بر حجم موتور) آن‌ها است. در مرجع [۱۱۶] برای حل این مسئله، یک نمونهٔ موتور سوئیچ رلوکتانس طراحی و نمونه‌سازی شده است که تعداد قطب‌های روتور آن بیشتر از تعداد قطب‌های استاتور است. کاهش تلفات سیم‌پیچی از دیگر مزایای ساختار پیشنهادی است. از این روش در مرجع [۱۱۷] برای طراحی و بهینه‌سازی یک نمونهٔ موتور سوئیچ رلوکتانس با روتور چندبخشی استفاده شده است و چگالی گشتاور بر واحد جریان تا ۲۴ درصد (نسبت به سایر موتورهای سوئیچ رلوکتانس با روتور چندبخشی) افزایش یافته است. البته نوع سیم‌پیچی این موتور توزیع شده است.

۶-۲-۱- مواد مورداستفاده در ماشین

در شکل ۰-۱ توزیع بازده برحسب توان خروجی فناوری‌های مختلف موتورهای الکتریکی نشان داده شده است [۱۱۸]. عنوان شده است که براساس این شکل، بازهٔ توانی موتورهای آهنربای داخلی در محدودهٔ ۰/۷ تا ۲ کیلووات قرار دارد و بازده آن‌ها نزدیک به عدد ۹۵ درصد است. از این موتورها بیشتر در سیستم‌های تهویهٔ مطبوع استفاده می‌شود.



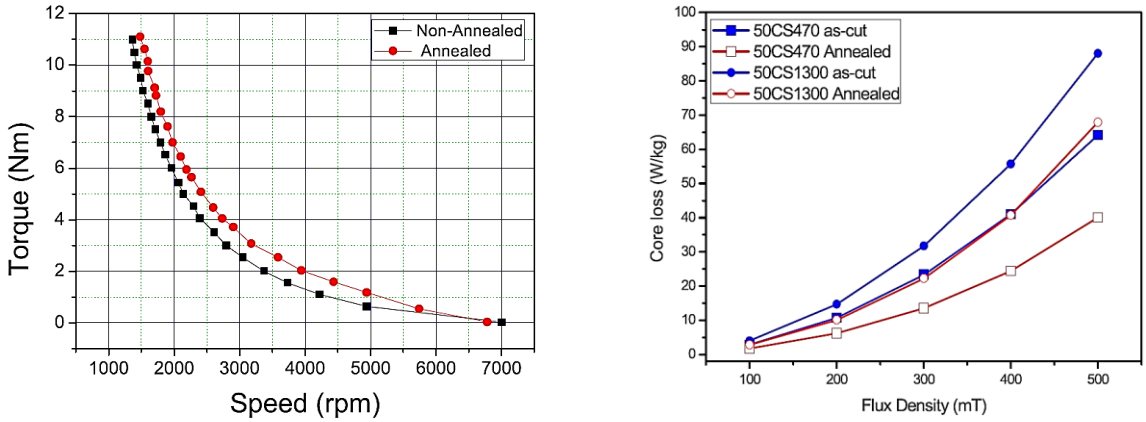
شکل ۰-۱: توزیع بازده انواع فناوری‌های موتورهای الکتریکی برحسب توان خروجی

در این مرجع [۱۱۸] عنوان شده است که با استفاده از مواد بهتر برای ساخت هستهٔ استاتور موتور سوئیچ رلوکتانس، عملکرد این موتورها را به عملکرد موتورهای آهنربای داخلی (IPM) می‌توان نزدیک کرد؛ بنابراین بازدهی عنوان‌شده (۹۵ درصد) به‌عنوان یک هدف در طراحی درنظر گرفته شده است. برای این منظور، چهار نمونهٔ موتور سوئیچ رلوکتانس؛ یک نمونه با استفاده از ورقه‌های معمولی (V300-35A)، دو نمونه (با تعداد دورهای مختلف سیم‌پیچی) با ورقه‌های با تلفات پایین (10JNEX900) و یک نمونه با ورقه‌های آمورف طراحی و نمونه‌سازی شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از مواد بهتر در هستهٔ استاتور موتور سوئیچ رلوکتانس، بازده آن تا ۵ درصد می‌تواند نسبت به موتورهای سوئیچ رلوکتانس با هستهٔ معمول افزایش یابد. سایر بررسی‌های این مرجع نشان می‌دهد که با افزایش ضریب پرشدگی شیارها در سیم‌پیچی[1]، بازدهی موتور سوئیچ رلوکتانس ۱ درصد قابل افزایش است. بنابراین درمجموع با استفاده از این روش‌ها، بازده موتور سوئیچ رلوکتانس نسبت به طراحی‌های معمول این موتور تا ۶ درصد قابل افزایش است.

در مرجع [۱۱۹]، تأثیر گرمادهی[2] در فرایند ساخت، بر خواص مغناطیسی هستهٔ موتور سوئیچ رلوکتانس، به‌منظور مقاوم‌سازی مکانیکی مورد بررسی قرار گرفته است. در روند ساخت، پانچ کردن ورق‌های هسته به یکدیگر باعث تولید اعوجاج در گوشه‌ها می‌شود که با گرما دادن به آهن، این آسیب را بهبود می‌بخشند. در این مرجع، مطالعهٔ میکروسکوپی بر روی محل پانچ صورت گرفته است. به این منظور، در یک موتور سوئیچ رلوکتانس، یک‌بار قبل از گرمادهی و یک‌بار بعد از گرمادهی هسته، آزمایش‌هایی انجام شده است. نتایج بررسی‌ها از بازیابی ناحیهٔ آسیب‌دیده در اثر گرمادهی، بهبود تلفات هسته تا ۳۷٪ و تقویت چگالی گشتاور موتور سوئیچ رلوکتانس نشان دارد. (شکل ۰-۲).

1. Winding Slot Fill
2. Annealing

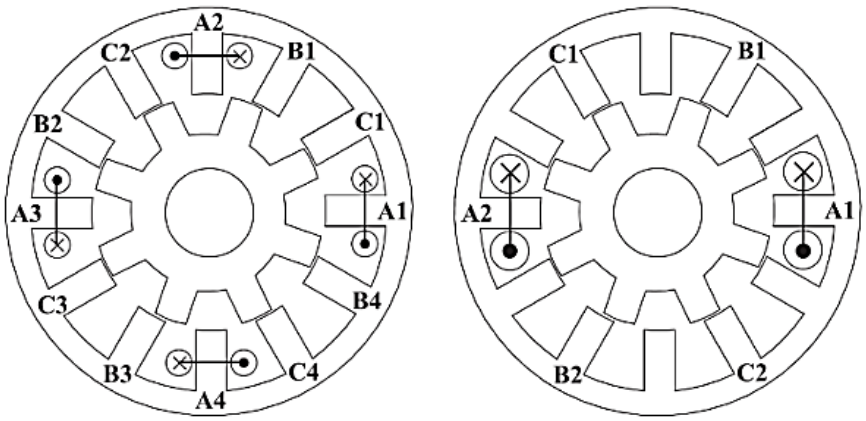
DOI: 10.30503/nripress.2020.064



شکل ۰-۲: منحنی گشتاور سرعت و تلفات هسته روی دو نمونه ماشین قبل و بعد از گرمادهی

۶-۲-۲- سیم‌پیچی استاتور

معمولاً سیم‌پیچی استاتور موتورهای سوئیچ رلوکتانس به‌صورت متمرکز است و دور همهٔ دندانه‌ها پیچیده می‌شود. در مرجع‌های [۱۲۰-۱۲۲]، با هدف افزایش چگالی گشتاور و بازدهی موتور سوئیچ رلوکتانس، پیشنهاد شده است که به‌جای سیم‌پیچی تمامی دندانه‌های استاتور، تنها نیمی از دندانه‌های استاتور سیم‌پیچی شود. برای بررسی این ایده، از ساختار یک موتور سوئیچ رلوکتانس با تعداد قطب‌های ۱۲/۸ استفاده شده است؛ یک‌بار تمام قطب‌های استاتور سیم‌پیچی شده است و بار دوم نیمی از قطب‌ها (مطابق با شکل ۰-۳) سیم‌پیچ می‌شوند.



الف ب

شکل ۰-۳: الف) ماشین **FT-SRM** و ب) ماشین **HT-SRM** سه فاز ۸/۱۲

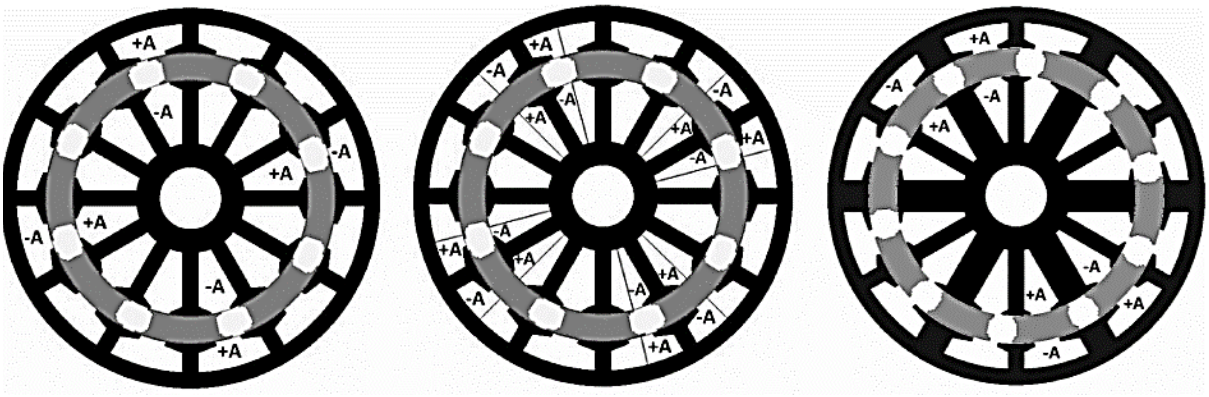
نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که:

۱- زمانی که نیمی از دندانه‌های استاتور سیم‌پیچی می‌شوند، مشخصات عملکردی در نواحی غیراشباع (جریان تحریک کم) موتور بهبود می‌یابد، ولی با افزایش جریان تحریک، به‌دلیل پدیدهٔ اشباع، مشخصات عملکردی (مانند گشتاور موتور) افت می‌کند.

۲- به‌دلیل افزایش تعداد دورهای سیم‌پیچی در زمانی که نیمی از دندانه‌های استاتور سیم‌پیچی می‌شوند، ولتاژ فاز و درنتیجه توان ظاهری مدار الکترونیکی تغذیه‌کنندهٔ فاز استاتور افزایش می‌یابد.

۳- ریپل گشتاور و به‌تبع آن نویز صوتی موتور افزایش می‌یابد.

در مرجع [۱۲۳]، به بررسی اثر سیم‌پیچی نیمی از دندانه‌های استاتور بر مشخصات عملکردی یک موتور سوئیچ رلوکتانس با دو استاتور (استاتور درونی و بیرونی)، با توان ۱۰۰ کیلووات و مقایسهٔ آن با موتور سوئیچ رلوکتانس مشابه با سیم‌پیچی توزیع‌شده پرداخته شده است. ساختارهای ارائه‌شده برای موتور با دو استاتور در شکل ۰-۴ نشان داده شده است. عنوان شده است که ساختار (ب)، که سیم‌پیچی متمرکز همان ساختار (الف) است، نتایج و مزیت‌های قابل‌توجهی نسبت به ساختار موتور (الف) ندارد و درنتیجه در این مرجع، درنظر گرفته نشده است.



شکل ۰-۴: موتورهای سوئیچ رلوکتانس دو استاتورهٔ ۱۰۰ کیلووات: الف) سیم‌پیچی توزیع‌شده، ب) سیم‌پیچی متمرکز همهٔ دندانه‌های استاتور، ج) سیم‌پیچی متمرکز نیمی از دندانه‌های استاتور

تفاوت ساختار (ج) با ساختار (ب) این است که عرض نیمی از دندانه‌های استاتور (هم استاتور داخلی و هم استاتور خارجی) دو برابر شده است و فقط همین دندانه‌ها سیم‌پیچی شده‌اند. مزیت‌های این تغییرات عبارت است از:

۱- کاهش میزان مس مورداستفاده به کمتر از ۵۵ درصد؛

۲- کاهش وزن کل موتور (هرچند میزان آهن موردنیاز اندکی افزایش می‌یابد)؛

۳- افزایش بازدهی در بارهای مختلف؛

۴- کاهش دمای قسمت‌های مختلف موتور.

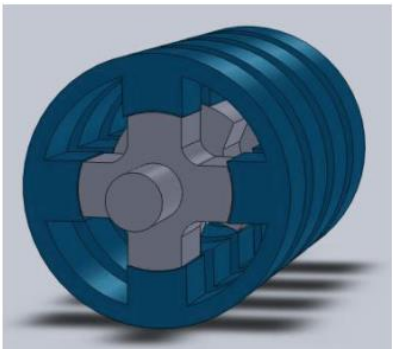
شایان‌ذکر است که با توجه به اطلاعات ارائه‌شده در نمودارهای مقاله، به‌نظر می‌رسد که با این تغییر، نویز صوتی موتور کمی افزایش می‌یابد (به‌دلیل افزایش چگالی شار عمودی موتور در حالت هم‌راستایی).

۶-۳- تغییر کلی ساختار موتورهای سوئیچ رلوکتانس

۶-۳-۱- موتور سوئیچ رلوکتانس با ساختار چندلایه

شکل ۰-۵ یک موتور سوئیچ رلوکتانس چهارلایه را نشان می‌دهد. در این موتورها، هر لایه یک فاز از ماشین را تشکیل می‌دهد که به آن فاز ایزوله می‌گویند؛ زیرا هر لایه، خود دارای یک استاتور و روتور است. استاتورها همگی مشابه و دارای وضعیت یکسان هستند؛ درحالی‌که روتورها با زاویه‌ای نسبت به هم قرار گرفته‌اند. مقدار این زاویه به عواملی مانند تعداد قطب‌های روتور و استاتور، تعداد لایه‌ها و تعداد قطب‌ها بستگی دارد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.064



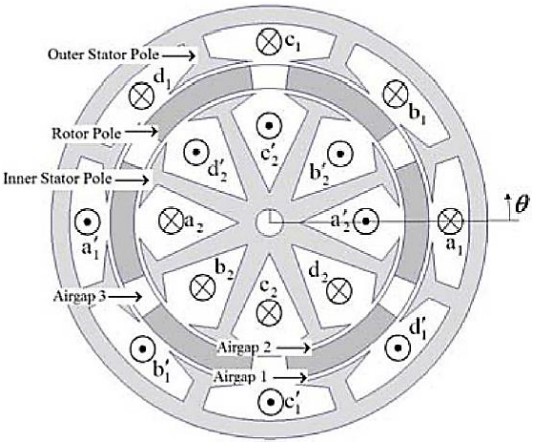
شکل ۰-۵: موتور سوئیچ رلوکتانس ساختار چندلایه

همان‌طور که قبلاً عنوان شد، بیشترین مقدار اندازهٔ گشتاور موتور، در بازهٔ هم‌پوشانی قطب‌های روتور و استاتور تولید می‌شود، بازه‌ای که وظیفهٔ تولید گشتاور از یک فاز به فاز بعدی منتقل می‌شود. با چند لایه شدن ماشین، تعداد پله‌های چرخش روتور در هر دور ماشین افزایش می‌یابد و درنتیجه هم‌پوشانی گشتاور بین فازها (ناحیهٔ هم‌پوشانی) نیز افزایش می‌یابد [۱۲۴]. با استفاده از این روش، می‌توان ریپل گشتاور و همچنین نویز صوتی موتور را کاهش داد. همچنین چگالی گشتاور موتور نیز افزایش می‌یابد.

در مرجع [۱۲۵]، یک موتور سوئیچ رلوکتانس سه لایه ۸/۸ طراحی و نمونه‌سازی شده است. قطب‌های استاتور هر سه لایه نسبت به‌هم تغییر زاویه ندارند و قطب‌های روتورها ۱۵ درجه نسبت به‌هم اختلاف زاویه دارند. نتایج تحلیل‌های عددی و همچنین آزمایش‌ها نشان می‌دهد که این موتور گشتاور راه‌اندازی بیشتری نسبت به موتور سوئیچ رلوکتانس معمول (با قطب‌های ۶/۴) دارد. در مرجع [۱۲۴]، یک موتور سوئیچ رلوکتانس دولایه طراحی شده است که استاتورها ۶ قطب و روتورها ۴ قطب دارند و قطب‌های روتور نسبت به‌هم ۱۵ درجه اختلاف زاویه دارند. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نیز آزمایش‌های عملی نشان می‌دهد که نسبت به موتور سوئیچ رلوکتانس ۶/۴ معمول، ریپل گشتاور در این ساختار هموارتر شده، گشتاور راه‌اندازی افزایش یافته و نویز صوتی آن نیز کم‌تر شده است. به‌صورت مشابه، یک موتور سوئیچ رلوکتانس ۴ لایه ۴/۴ نیز در مرجع [۱۲۶] پیشنهاد شده است.

۶-۳-۲- ماشین سوئیچ رلوکتانس دو استاتوره

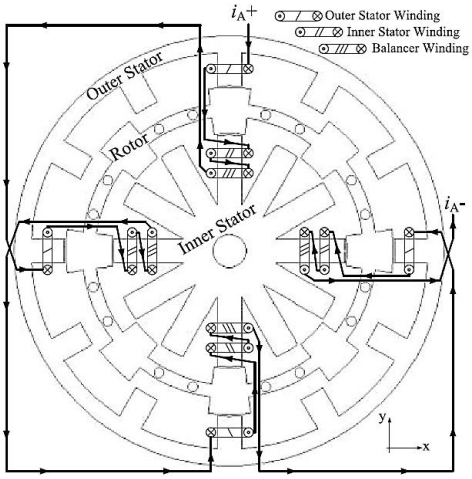
در مرجع [۱۲۷]، ساختار جدیدی از موتور سوئیچ رلوکتانس ارائه شده است که دارای دو استاتور است (هریک از استاتورها ۸ قطب دارد) و روتور از نوع چندبخشی است که دارای ۶ قطب است و در فضای بین دو استاتور درونی و بیرونی حرکت می‌کند (شکل ۰-۶). افزایش چگالی توان موتور و کاهش نیروهای عمودی وارد بر دندانه‌های استاتور که منشأ اصلی سروصدا هستند، از مزیت‌های این ساختار است. با توجه به چندبخشی بودن روتور، به‌نظر می‌رسد که استحکام مکانیکی روتور از چالش‌های این ساختار باشد.



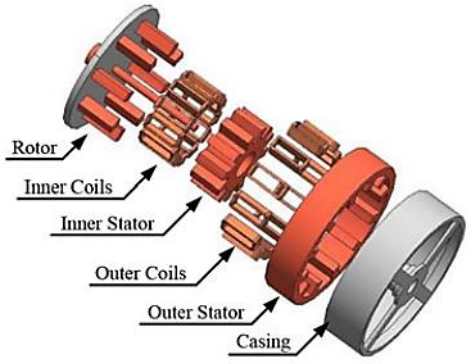
شکل ۰-۶: موتور سوئیچ رلوکتانس دو استاتوره با روتور چندبخشی

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

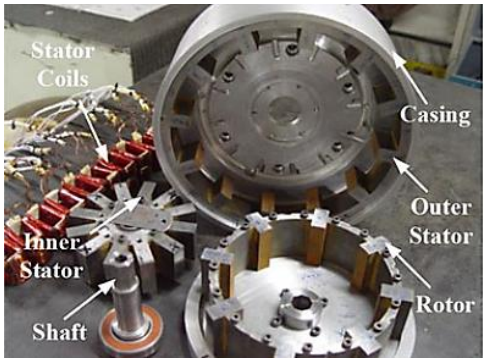
در مرجع [۱۲۸]، یک موتور سوئیچ رلوکتانس دو استاتوره با روتوری که روتور فنجانی[1] نامیده شده است، طراحی و نمونه‌سازی شده است. یکی از مزیت‌های ساختار ارائه‌شده که نقشهٔ انفجاری و قطعات نمونه‌سازی‌شدهٔ آن در شکل ۰-۷ نشان داده شده است، این است که (برخلاف ساختار مرجع [۱۲۷]) نیاز به دو بلبرینگ در هر طرف موتور برای نگه‌داشتن روتور در فضای بین دو استاتور نیست. همچنین، یکسان نبودن تعداد دور سیم‌پیچ‌های استاتور داخلی و خارجی با هم به تعلیق روتور می‌تواند کمک کند. در مرجع‌های [۱۲۹، ۱۳۰] نیز تلاش شده است با ایجاد تغییر شکل و یا بهینه‌سازی روتور یک موتور سوئیچ رلوکتانس با دو استاتور، ریپل گشتاور موتور سوئیچ رلوکتانس و به‌تبع آن نویز صوتی موتور را کاهش دهند.



الف



ب



ج

شکل ۰-۷: موتور سوئیچ رلوکتانس دو استاتوره با روتور فنجانی: الف) مدل دوبعدی، ب) نقشهٔ انفجاری و ج) نمونهٔ آزمایشگاهی

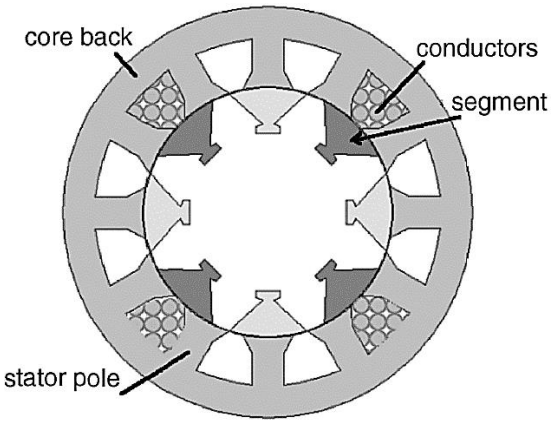
۶-۳-۳- ماشین سوئیچ رلوکتانس با ساختار چندبخشی[2]

۶-۳-۳-۱- روتور چندبخشی

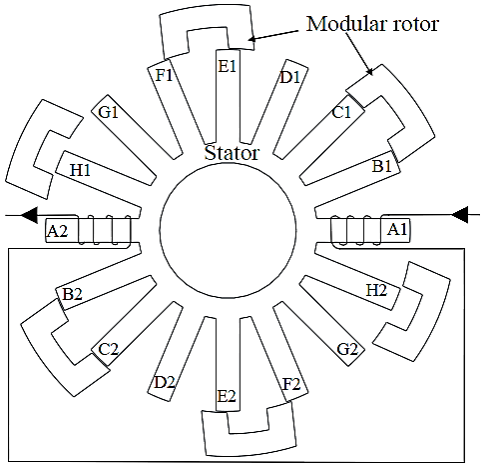
در مرجع [۱۳۱]، برای اولین بار موتور سوئیچ رلوکتانس با روتور چندبخشی معرفی شده است. در ادامه، یک نمونهٔ موتور سوئیچ رلوکتانس سه‌فاز ۱۲/۸ (با روتور ۸ بخشی) با سیم‌پیچی گام کامل طراحی و نمونه‌سازی شده است (شکل ۰-۸). محاسبات و اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که نسبت گشتاور به واحد تلفات سیم‌پیچی موتور نمونه‌سازی‌شده (در حداکثر ظرفیت گرمایی) در مقایسه

1. Double stator segmented cup-rotor SRM (DSSCR-SRM)
2. Segmented

با سایر موتورهای سوئیچ رلوکتانس با قطر خارجی و طول هستهٔ یکسان (ساختار معمول موتور سوئیچ رلوکتانس با سیم‌پیچی گام کامل و همچنین با سیم‌پیچی گام کوتاه)، ۴۱ درصد افزایش دارد. عنوان شده است که موتور سوئیچ رلوکتانس با روتور چندبخشی ارائه‌شده در این مرجع (با سیم‌پیچی گام کامل) دارای انتهای سیم‌پیچی بزرگ‌تری (در مقایسه با ساختارهای معمول با سیم‌پیچی متمرکز) است و این مسئله باعث افزایش وزن مس مورداستفاده در موتور می‌شود. بنابراین، نسبت گشتاور موتور به واحد جرم مس مورداستفاده در آن، افزایش نمی‌یابد. در مرجع [۱۳۲]، موتور سوئیچ رلوکتانس روتور خارجی، با روتور چندبخشی C شکل معرفی شده است که ساختار مغناطیسی آن در شکل ۰-۹ نشان داده شده است.



شکل ۰-۸: موتور سوئیچ رلوکتانس سه‌فاز ۱۲/۸ (با روتور ۸ بخشی)



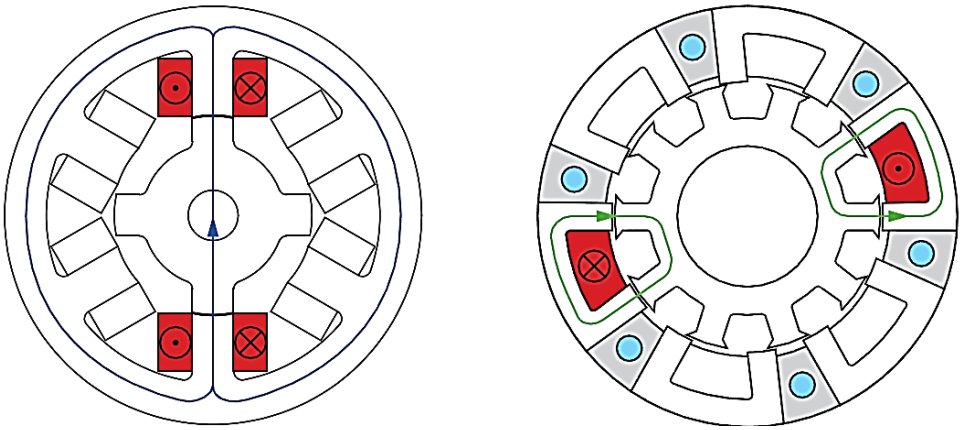
شکل ۰-۹: ساختار مغناطیسی موتور سوئیچ رلوکتانس روتور خارجی، با روتور چندبخشی **C** شکل (فقط سیم‌پیچی یک فاز در این شکل نشان داده شده است)

۶-۳-۳-۲- استاتور چندبخشی

در مرجع [۱۳۳]، یک موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور چندبخشی (استاتور U شکل) طراحی و نمونه‌سازی شده است. نوع سیم‌پیچی در این موتور (که از نوع گام کامل است) نیز با موتور معمول سوئیچ رلوکتانس متفاوت است که باعث کوتاه‌تر شدن مسیر شار مغناطیسی شده است. ساختار ارائه‌شده در این مرجع (که از یک ثبت اختراع در سال ۲۰۰۱ برداشت شده است) در شکل ۰-۱۰ نشان داده شده است. به‌دلیل همین کوتاه بودن مسیر شار مغناطیسی، تلفات هستهٔ استاتور کاهش می‌یابد و درنتیجه، بازده موتور افزایش می‌یابد. چندبخشی بودن استاتور موجب می‌شود که شار معکوس در هسته پیش نیاید که این مسئله نیز به‌نوبهٔ خود به کاهش تلفات هسته کمک می‌کند (به‌دلیل کوچک شدن سطح حلقهٔ هیسترزسیس). چگالی گشتاور این ساختار از یک موتور سوئیچ رلوکتانس ۶/۴ که دارای

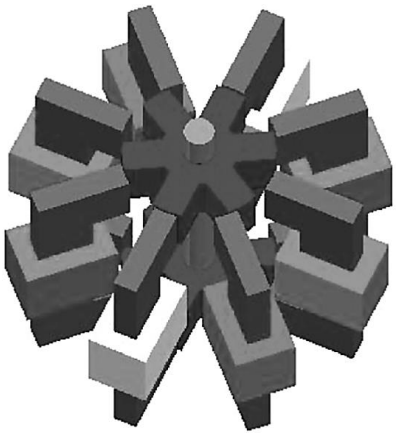
DOI: 10.30503/nripress.2020.064

حجم آهن و مس مشابه است، بیشتر است. شایان‌ذکر است که در بررسی‌های بیشتر در این مرجع نشان داده شده است که تفاوت قابل‌توجهی بین میزان تلفات هستهٔ نمونهٔ ساخته‌شده با محاسبات انجام‌شده در مدل‌سازی وجود دارد که نشان از نیاز به توجه بیشتر در این قسمت و لحاظ کردن برخی پدیده‌های پیش‌بینی نشده است.



شکل ۰-۱۰: الف) موتور سوئیچ رلوکتانس با روتور و استاتور معمول و ب) موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور چندبخشی (استاتور U شکل). هسته‌های U شکل به‌وسیلهٔ قسمت‌های غیرمغناطیسی (خاکستری‌رنگ) در کنار هم قرار داده شده‌اند.

در مرجع [۱۱۳]، یک موتور سوئیچ رلوکتانس محور با استاتور چندبخشی طراحی شده است (شکل ۰-۱۱). از مزیت‌های مهم این ساختار، سهولت سیم‌پیچی و در صورت نیاز، افزایش تعداد دورهای آن است. نتایج محاسبات مدل‌سازی ساختار ارائه‌شده در این مرجع با یک موتور سوئیچ رلوکتانس ۸/۶ با ساختار معمول (که دارای ابعاد خارجی یکسان با این موتور است و از سیم مسی با قطر یکسان برای سیم‌پیچی آن استفاده شده است) نشان می‌دهد که نسبت گشتاور به جریان در ساختار چندبخشی طراحی‌شده بیشتر از موتور سوئیچ رلوکتانس با ساختار معمول است. همچنین، تلفات مسی موتور طراحی‌شده در این مرجع نیز در گشتاور یکسان، کمتر از ساختار معمول است.

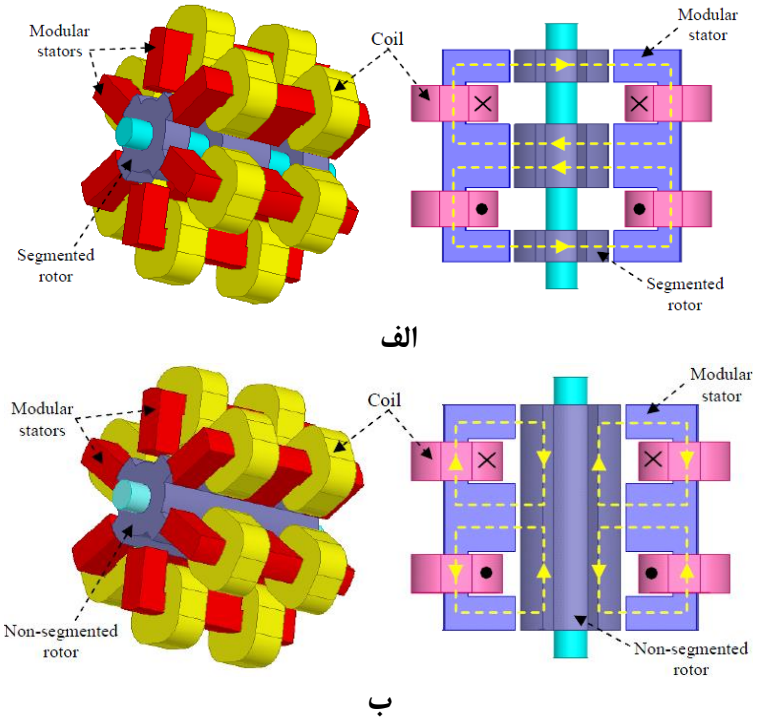


شکل ۰-۱۱: موتور سوئیچ رلوکتانس شار محور با استاتور چندبخشی

در مرجع [۱۲۲]، ساختار موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور E شکل معرفی شده است. در این مرجع دو نوع موتور ازاین‌دست، یکی با روتور چندبخشی و دیگری با روتور معمول طراحی و نمونه‌سازی شده است و نتایج مدل‌سازی و آزمون‌ها با نتایج مدل‌سازی و آزمون

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

یک موتور سوئیچ رلوکتانس ۶/۴ معمول مقایسه شده است. در شکل ۰-۱۲، ساختار مغناطیسی این دو نمونه موتور با استاتور E شکل نشان داده شده است. مشخصات طراحی این سه موتور در جدول ۰-۱ آورده شده است. نمودار نتایج محاسبه و اندازه‌گیری گشتاور متوسط هرسه موتور برحسب سرعت در شکل ۰-۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که گشتاور متوسط هردو نوع موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور E شکل مشابه و بیشتر از موتور سوئیچ رلوکتانس معمول است (چگالی گشتاور بالاتری از موتور با ساختار معمول دارند). همچنین تلفات مسی آن‌ها نیز مشابه و کمتر از موتور سوئیچ رلوکتانس معمول است.

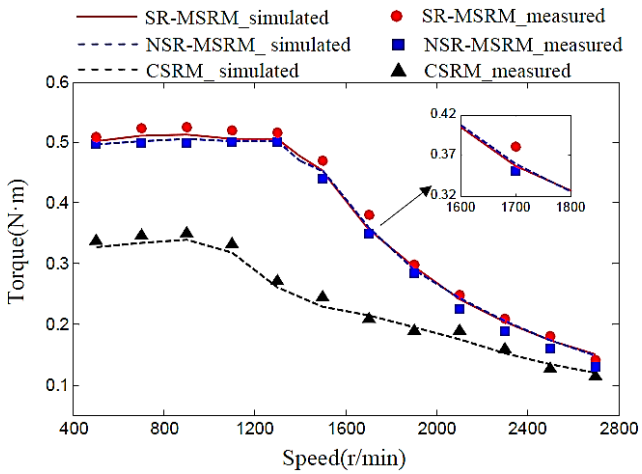


شکل ۰-۱۲: ساختار موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور E شکل: الف) با روتور چندبخشی و ب) با روتور معمول

جدول ۰-۱: مشخصات طراحی سه نمونه موتور مرجع

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

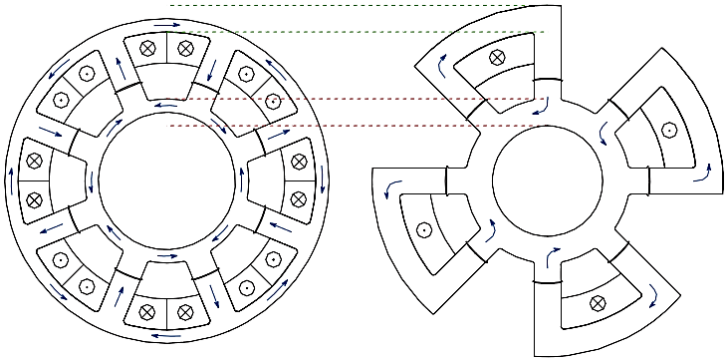
Parameters	SR-MSRM	NSR-MSRM	CSRM
Number of phase	3	3	3
Rated power (W)	75	75	80
Rated speed (r/min)	1500	1500	2000
Rated torque (N·m)	0.5	0.5	0.4
Stator outer diameter (mm)	90	90	90
Stator inner diameter (mm)	40.5	40.5	40.5
Stator yoke width (mm)	9	9	9
Rotor yoke width (mm)	9	9	9
Stator and rotor pole arcs	32°/32°	32°/32°	32°/32°
Stator pole length (mm)	12+24+12	12+24+12	48
Rotor length (mm)	12+24+12	80	48
Stator size (mm×mm)	Ø106×80	Ø106×80	Ø90×78
Minimum airgap (mm)	0.25	0.25	0.25
Stator iron weight (kg)	0.776	0.776	1.25
Rotor iron weight (kg)	0.304	0.507	0.304
Winding weight (kg)	0.209	0.209	0.213
Total machine weight (kg)	1.326	1.529	1.767
Electric steel material	DW540	DW540	DW540



شکل ۰-۱۳: مقایسهٔ نتایج محاسبه و اندازه‌گیری گشتاور متوسط هر سه موتور برحسب سرعت

در مرجع [۱۱۴]، دو نمونه موتور سوئیچ رلوکتانس ۸/۸ تک‌فاز مشابه، یکی دارای ساختار معمول و دیگری دارای استاتور چندبخشی U شکل، طراحی و مقایسه شده‌اند. این دو موتور در شکل ۰-۱۴ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل نیز دیده می‌شود، مهم‌ترین تفاوت دو ساختار این است که یوغ موتور دارای استاتور U شکل ضخیم‌تر از نوع معمول است. نتایج مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهد چگالی گشتاور و ریپل گشتاور موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور U شکل نسبت به موتور با ساختار معمول بهبود نیافته است، اما تلفات هستهٔ موتور دارای استاتور U شکل نسبت به موتور با ساختار معمول کاهش یافته است. در این مرجع عنوان شده است که سایر موتورهای سوئیچ رلوکتانس با تعداد فازها و همچنین قطب‌های متفاوت، نیاز به بررسی جداگانه دارد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.064



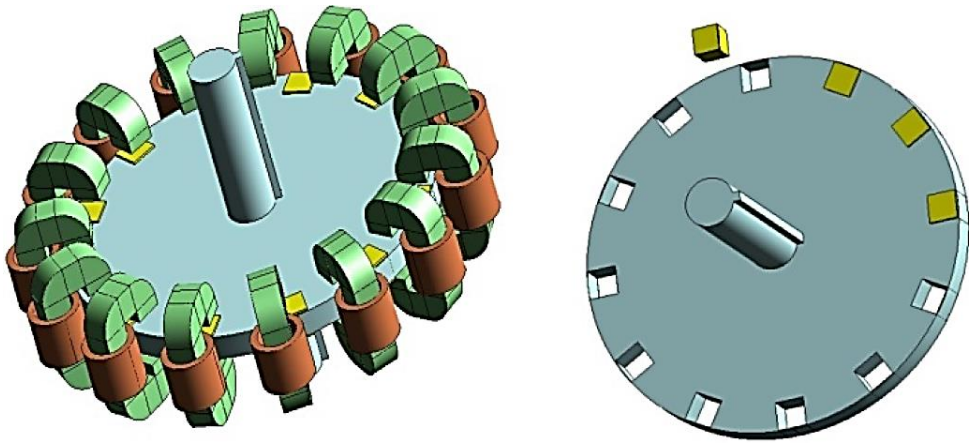
الف ب

شکل ۰-۱۴: موتور سوئیچ رلوکتانس ۸/۸ تک‌فاز: الف) ساختار معمول و ب) استاتور چندبخشی **U** شکل

در مرجع [۱۳۴]، ساختار جدیدی برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس پیشنهاد شده است که در شکل ۰-۱۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، استاتور (C شکل) و روتور موتور از نوع چندبخشی است. دیسک روتور از مادهٔ غیرمغناطیسی ساخته می‌شود و قسمت‌های مغناطیسی، همان‌طور که در شکل نیز دیده می‌شود، در روتور تعبیه می‌شود. عنوان شده است که ساختار پیشنهادی دارای مزایای زیر است:

۱- نیروی عمودی وارد بر اجزای مغناطیسی روتور صفر است و درنتیجه نویز صوتی موتور به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌یابد.
۲- از آنجایی که مسیر شار مغناطیسی مستقل از ابعاد روتور است، تعداد قطب‌ها بدون تحت تأثیر قرار دادن بارگیری مغناطیسی می‌توانند افزایش یابد. افزایش تعداد قطب‌ها به کاهش بیشتر ریپل گشتاور منجر می‌شود.
۳- تلفات هسته نسبت به موتورهای سوئیچ رلوکتانس با ساختار معمول مشابه، به‌دلیل نبودن پدیدهٔ شار معکوس، کاهش می‌یابد.
۴- با افزایش قطر دیسک، گشتاور تولیدی موتور را می‌توان افزایش داد.
۵- هسته‌های C شکل استاتور ازنظر الکتریکی و مغناطیسی از هم مستقل هستند و به‌صورت مجزا می‌توانند ساخته شوند.
۶- خنک‌سازی موتور نسبت به موتورهای با ساختار معمول آسان‌تر انجام می‌شود.

در این مرجع عنوان شده است که با توجه به این مزایا، این موتور برای کاربردهای خودروهای هیبریدی گزینهٔ مناسبی می‌تواند باشد.



ب الف

شکل ۰-۱۵: موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور (C شکل) و روتور چندبخشی: الف) نمای سه‌بعدی موتور و ب) نمای سه‌بعدی روتور

۶-۴- سیستم‌های حمل‌ونقل الکتریکی

موتور سنکرون با آهنربای دائم داخلی (IPMSM[1]) محبوب‌ترین موتور الکتریکی برای خودروهایی برقی ـ هیبریدی است. از آنجا که آهنربای دائم داخلی این موتورها شامل نئودیمیوم و دیسپروزیوم[2] بوده و طی چند سال گذشته با افزایش قیمت زیادی مواجه شده است، درحال‌حاضر تمایل زیادی برای استفاده از موتورهای الکتریکی بدون این عناصر کمیاب خاکی وجود دارد. مزایای متعدد موتورهای سوئیچ رلوکتانس ازقبیل ساختار ساده، هزینهٔ کم، روتور محکم، قابلیت کار در دماهای زیاد و سرعت‌های زیاد باعث شده است که استفاده از این موتورها در خودروهای برقی ـ هیبریدی مورد توجه قرار گیرد. به‌دلیل عدم استفاده از آهنربای دائم و نبود سیم‌پیچی در روتور، ساخت این موتورها ساده است. البته در کنار این مزایای مهم، چند مشکل عمده، ازقبیل چگالی گشتاور کم، بازده کم‌تر نسبت به موتورهای آهنربای دائم، نیاز هر موتور به سیستم درایو خاص، نویز صوتی زیاد، لرزش و ریپل گشتاور، در این موتورها وجود دارد. تاکنون تحقیقات زیادی با تمرکز بر استفاده در خودروهای برقی ـ هیبریدی، درخصوص ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس انجام شده است. علاوه بر بهینه‌سازی‌های مختلف که بر روی ساختارهای موجود برای استفاده در خودروهای برقی (مانند مرجع [۱۳۵]) انجام شده است، بیشتر ساختارهای جدیدی که در این فصل معرفی شده‌اند، نیز برای استفاده در خودروهای برقی نیز پیشنهاد شده‌اند؛ به‌عنوان مثال در مرجع [۱۳۶]، ساختار دو استاتوره با روتور چندبخشی را که قبلاً در مرجع [۱۲۷] معرفی شده بود، برای کاربرد خودروهای برقی پیشنهاد شده است. در این قسمت به ساختارهای مختلفی از موتور سوئیچ رلوکتانس که با هدف افزایش بازده و چگالی توان این موتور، برای کاربرد در انواع وسایل مورداستفاده در سیستم‌های حمل‌ونقل الکتریکی پیشنهاد شده است، اشاره می‌شود.

در مرجع [۱۳۷]، موتور سوئیچ رلوکتانس سه فاز ۶/۸ برای استفاده در دوچرخهٔ برقی طراحی و ساخته شده است. ساختار ساده و مقاوم، هزینهٔ کم و همچنین پیاده‌سازی آسان قابلیت ترمزی احیاشونده در موتور سوئیچ رلوکتانس، ازجمله مزایایی است که در این مرجع برای موتور سوئیچ رلوکتانس در کاربرد دوچرخه عنوان شده است. در [۱۳۸]، یک نمونه موتور سوئیچ رلوکتانس روتور خارجی سه فاز (۵۰۰ وات و سرعت ۵۰۰ دور در دقیقه)، با ۶ قطب در استاتور و ۱۰ قطب در روتور برای استفاده در دوچرخهٔ برقی طراحی و نمونه‌سازی شده است. گشتاور تولیدی موتور سوئیچ رلوکتانس ازطریق جعبه‌دندهٔ کاهشی با نرخ (۳:۱) به چرخ‌ها منتقل می‌شود.

موتورهای سوئیچ رلوکتانس باوجود داشتن بازدهی و چگالی گشتاور پایین‌تر نسبت به موتورهای آهنربای دائم، اما می‌توانند به‌عنوان جایگزین مناسبی برای آن‌ها مطرح باشند؛ زیرا در ساختار آن از آهنرباهای دائم استفاده نشده و ساختار موتور نیز بسیار ساده و مقاوم است. در همین ارتباط و مشابه با فعالیت انجام‌شده در مرجع [۱۱۸]، در مرجع [۱۳۹] اشاره شده است که در مقایسه بین موتورهای آهنربای دائم و موتورهای سوئیچ رلوکتانس برای استفاده در خودروهای برقی ـ هیبریدی (تویوتا پیروس هیبریدی شرکت تویوتا)، بازدهی و چگالی گشتاور کمتر موتور سوئیچ رلوکتانس نسبت به موتور سنکرون آهنربای دائم داخلی (IPMSM)، دو مشکل مهم جایگزینی موتورهای آهنربای دائم در این کاربرد است. طراحی و بهینه‌سازی موتور سوئیچ رلوکتانس ۱۸/۱۲ (۱۸ قطب در استاتور و ۱۲ قطب در روتور) و استفاده از ورقه‌های سیلیکونی با تلفات بسیار کم (ورقه با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر با نام تجاری 10JNEX900 به‌جای استفاده از ورقه‌های معمول با ضخامت ۰/۳۵ میلی‌متر و نام تجاری V300-35A) راهکارهای ارائه‌شده در این مرجع است که با انجام آن‌ها، مشخصات فنی موتور سوئیچ رلوکتانس طراحی و نمونه‌سازی شده (با توان ۵۰ کیلووات) تا حدود زیادی به مشخصات فنی موتور آهنربای دائم داخلی نزدیک شده است.

به‌صورت مشابه در مرجع [۸۷] تلاش شده است که یک موتور سوئیچ رلوکتانس با هدف جایگزینی موتورهای سنکرون آهنربای دائم درونی (IPMSM) در خودروهای تویوتا پیروس، طراحی شود. لذا، مشخصات فنی موتور آهنربای دائم، یعنی بازدهی بیشینهٔ ۹۵

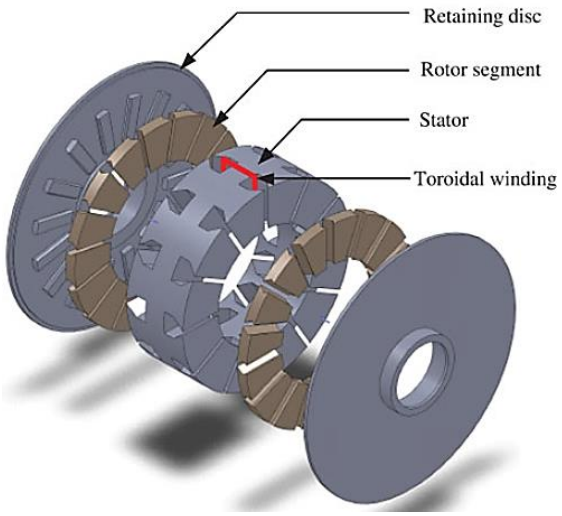
1. Interior permanent-magnet (IPM) synchronous motor
2. neodymium and dysprosium

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

درصد، چگالی گشتاور N.m/L ۴۵ و توانایی تحویل توان kW ۵۰ در بازهٔ سرعتی ۱۲۰۰ تا ۶۰۰۰ دور در دقیقه، به‌عنوان اهداف طراحی انتخاب شدند. در این مرجع نشان داده شده است که با استفاده از مواد مغناطیسی با سیلیکون زیاد (10JNEX900) می‌توان یک موتور سوئیچ رلوکتانس طراحی نمود که به اهداف ذکرشده برسد.

در مرجع [۱۴۰]، عنوان شده است که موتورهای سوئیچ رلوکتانس شار محوری قابلیت دستیابی به چگالی توان بیشتری نسبت به نوع شار شعاعی دارند. بهبود چگالی شار در موتور سوئیچ رلوکتانس شار محوری، به‌دلیل افزایش سطح فاصلهٔ هوایی (وابسته به قطر ماشین) است؛ درحالی‌که در موتور شار شعاعی، سطح هوایی به طول موتور وابسته است. به همین دلیل، موتور سوئیچ رلوکتانس شار محوری را می‌توان یکی از گزینه‌های مناسب برای کاربرد در وسایلی مانند اسکوتر برقی درنظر گرفت. استاتور و روتور موتور سوئیچ رلوکتانس طراحی‌شده در این مرجع از مواد SMC[1] است.

در شکل ۰-۱۶ ساختار یک موتور سوئیچ رلوکتانس شار محوری ۱/۵ کیلووات که استاتور آن در وسط قرار گرفته و دو روتور چندبخشی در دو طرف استاتور قرار دارد نشان داده شده است. عنوان شده که این ساختار برای کاربردهای خودروی برقی درون چرخ[2] مناسب است [۱۴۱، ۱۴۲].

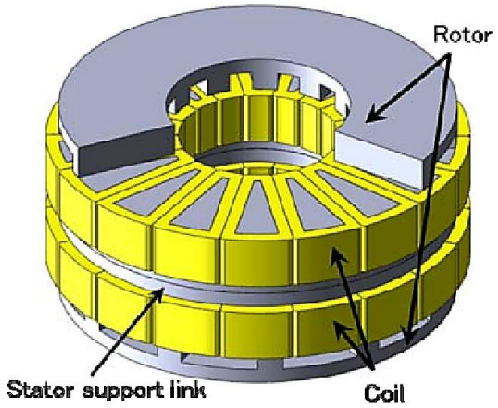


شکل ۰-۱۶: موتور سوئیچ رلوکتانس شار محوری روتور بیرونی (دو روتوره) و روتور چندبخشی

در مرجع [۱۴۳]، نیز موتور سه فاز شار محوری با تعداد دندانه‌های ۱۸/۱۲ و با بیشینهٔ گشتاور Nm ۳۰۰ برای استفاده در خودروهای برقی با ساختار درون چرخ طراحی و نمونه‌سازی شده است (شکل ۰-۱۷). از این موتور برای به حرکت درآوردن چرخ‌های یک خودرو (با کاربری عمومی) با وزن تقریبی ۲ تن استفاده شده است. عنوان شده است که داشتن نیروی عمودی بزرگ در ساختار شار محوری، از معایب مهم این ساختارها است که باعث تولید نویز صوتی نسبتاً زیادی می‌شود. با استفاده از یک سیستم کنترل مناسب، نویز صوتی موتور سوئیچ رلوکتانس در این کاربرد تا حدودی کاهش یافته است [۱۴۴].

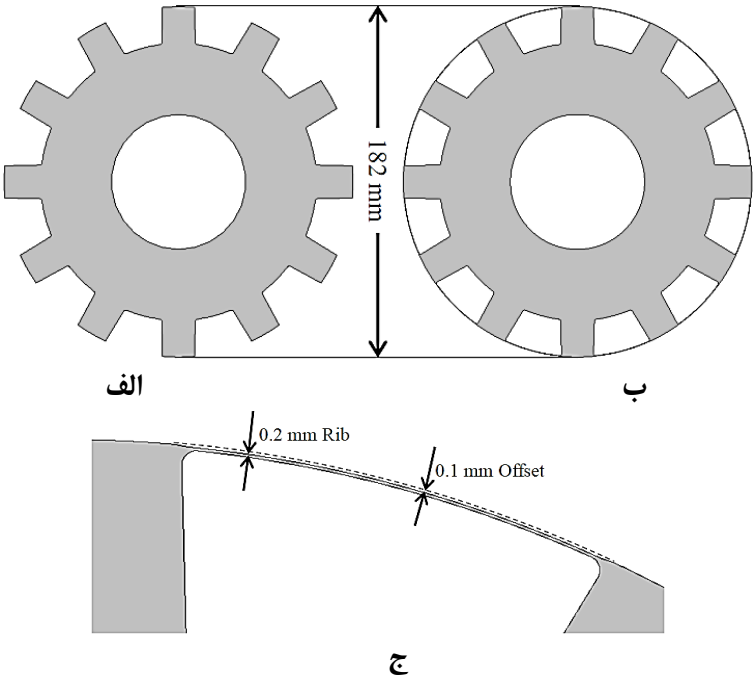
1. Soft Magnetic Composite Materials
2. In-Wheel

DOI: 10.30503/nripress.2020.064



شکل ۰-۱۷: موتور سوئیچ رلوکتانس شار محوری روتور بیرونی (دو روتوره)

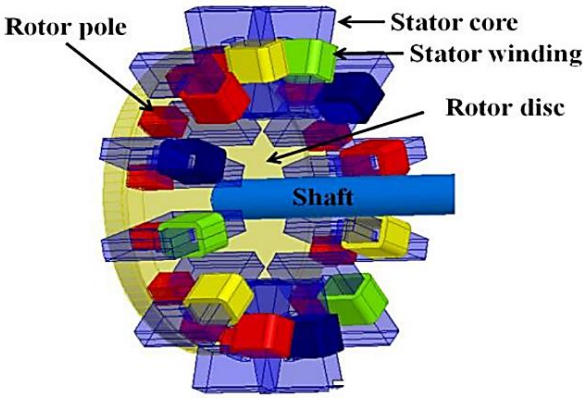
یکی از روش‌های بهبود بازده موتورهای سوئیچ رلوکتانس، کاهش تلفات مکانیکی آن‌ها است. وجود برجستگی ناشی از قطب‌های روتور در هنگام چرخش روتور، باعث ایجاد مقاومت هوایی و درنتیجه افزایش تلفات بادخوری آن می‌شود. به‌منظور کاهش این تلفات، در مرجع [۱۴۵] پیشنهاد شده است که از یک لایهٔ نازک آهن که سطح روی روتور را بپوشاند و آن را به‌شکل یک استوانه درآورد (برای یک موتور ۶۰ کیلووات با حداکثر سرعت ۱۳٫۹۰۰ دور در دقیقه)، استفاده شود (شکل ۰-۱۸). از آنجایی که تلفات بادخوری خصوصاً در سرعت‌های زیاد افزایش می‌یابد، این ساختار می‌تواند باعث افزایش بازده موتور در سرعت‌های زیاد شود. باید توجه داشت به‌دلیل ضخامت بسیار کم این لایهٔ نازک، نیروی گریز از مرکز ناشی از چرخش روتور موجب تغییر شکل این لایه می‌شود. بنابراین، برای افزایش استقامت مکانیکی، قطر خارجی استوانه در فضاهای خالی کمی کمتر از قطر خارجی آن در قطب‌ها انتخاب می‌شود [۱۴۵]. لازم به ذکر است که به دلایل مختلف که در متن این مرجع توضیح داده شده است، نتایج آزمایش نمونهٔ ساخته‌شده با طراحی‌ها اختلاف زیادی دارد و افت عملکرد در آن (در مقایسه با موتور سوئیچ رلوکتانس با ساختار معمول) دیده می‌شود.



شکل ۰-۱۸: موتور سوئیچ رلوکتانس: الف) با روتور معمول، ب) با روتور استوانه‌ای و ج) تغییرات ابعاد و ضخامت لایهٔ آهنی نازک در روتور استوانه‌ای برای افزایش استحکام لایه

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

همان‌طور که گفته شد در هرلحظه از کارکرد موتور سوئیچ رلوکتانس، بخش زیادی از هستهٔ استاتور و روتور دارای چگالی شار بسیار کمی است. به‌منظور رفع این مشکل و کاهش حجم و وزن موتور، در مرجع [۱۴۶] استفاده از چند هستهٔ مجزا در روتور و استاتور به‌جای یک هستهٔ یک‌تکه پیشنهاد شده است. این هسته‌ها هرکدام به شکل حرف C است که مطابق شکل ۰-۱۹ بر استاتور نصب می‌شوند.



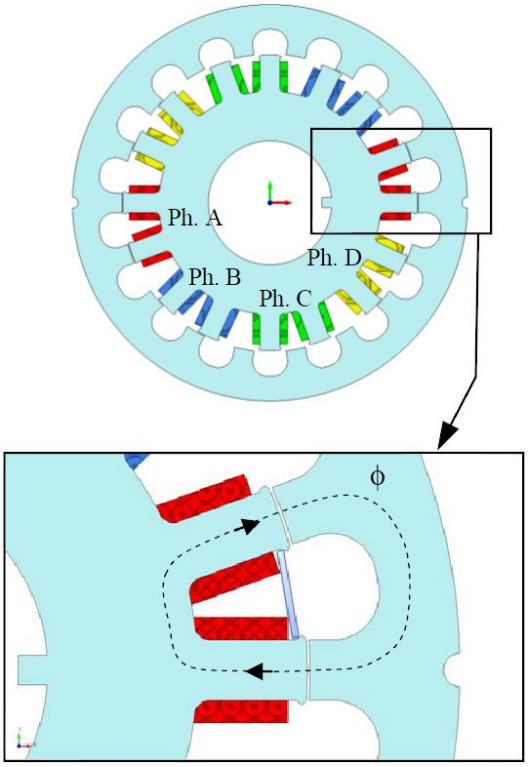
شکل ۰-۱۹: موتور سوئیچ رلوکتانس با هسته‌های **C** شکل

این ساختار دارای مزایایی مانند کاهش لرزش به‌دلیل کاهش نیروی شعاعی وارده بر روتور، کاهش تلفات هسته به‌دلیل کاهش حجم آن، سهولت در افزایش گشتاور آن با افزایش تعداد هسته‌ها، تسهیل در سیم‌پیچی استاتور، خنک‌سازی بهتر استاتور به‌دلیل فضای خالی کنار سیم‌پیچ‌ها و سهولت در جداسازی استاتور و روتور و درنتیجه تعمیر ساده‌تر آن هنگام استفاده در ساختارهای درون چرخی[1] است.

نویز صوتی زیاد موتور سوئیچ رلوکتانس در برخی کاربردها عیب مهم محسوب نمی‌شوند؛ چراکه استفاده از موتورهای سوئیچ رلوکتانس به‌عنوان محرکهٔ خودروهای سنگین، یکی از این کاربردها است. در مرجع [۱۴۷]، یک موتور سوئیچ رلوکتانس روتور خارجی برای استفادهٔ درون چرخی در خودروهای سنگین پیشنهاد شده است. سیم‌پیچی فازهای استاتور به نحوی انجام شده است (شکل ۰-۲۰) که مسیر شار مغناطیسی کوتاه باشد و درنتیجه تلفات هسته در موتور کمینه گردد. ساختار روتور خارجی در این کاربردها اجازه می‌دهد که چگالی گشتاور موتور، نسبت به ساختار روتور درونی افزایش یابد و خنک‌سازی موتور ساده‌تر انجام شود. به‌منظور افزایش بیشتر گشتاور، هر فاز استاتور در هر قطب بر روی دو دندانه پیچیده شده است که در زمان هم‌راستایی، دو دندانهٔ روتور در هر قطب هر فاز در مقابل دو دندانهٔ استاتور قرار خواهد گرفت. در مرجع [۱۴۸] نیز یک موتور سوئیچ رلوکتانس شار شعاعی روتور خارجی برای استفاده در ساختارهای درون چرخی در خودروهای برقی پیشنهاد شده است (شکل ۰-۲۱).

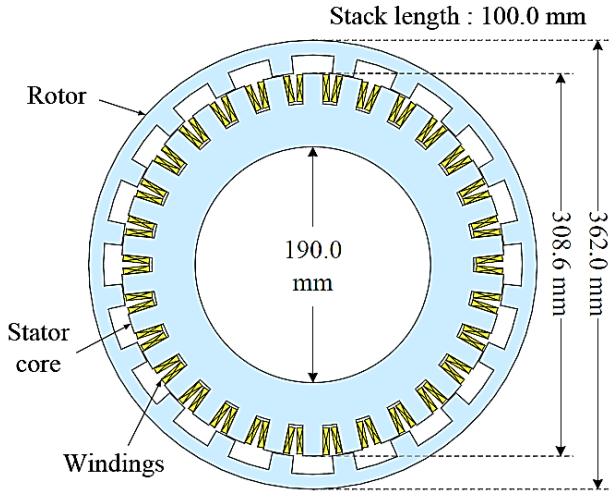
1. In-Wheel

DOI: 10.30503/nripress.2020.064



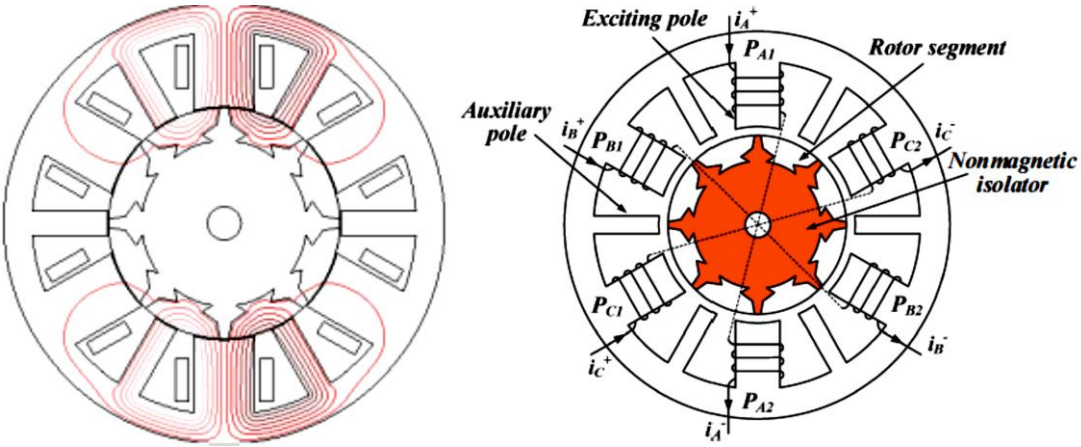
شکل ۰-۲۰: موتورهای رلوکتانسی تعبیه‌شده در داخل چرخ با روتور خارجی برای کاربرد در خودروهای سنگین

در ساختار دیگری که در شکل ۰-۲۲ نشان داده شده است، فضای داخل روتور با مادهٔ عایقی پر شده است و قطب‌های روتور به‌شکل قطعاتی مجزا از هم (چندبخشی) در شعاع خارجی این قطعهٔ عایقی قرار داده شده‌اند. به‌منظور کاهش ریپل گشتاور، قطب‌های روتور در این ساختار طوری طراحی شده‌اند که لبه‌های آن‌ها نزدیک به یکدیگر و دارای ضخامت کمی باشند تا تغییرات رلوکتانس به‌صورت نرم‌تری اتفاق بیفتد. به‌دلیل این‌که در این ساختار مسیر بسته شدن شار از داخل روتور نیست، نیاز است تا در کنار هر قطب اصلی استاتور که سیم‌پیچی بر روی آن‌ها پیچیده شده است، دو قطب کمکی نیز قرار گیرد که مسیر شار از آن‌ها و قطعات روتور بسته شود. مسیر شار در این ساختار کوتاه است و درنتیجه تلفات آهنی آن نیز نسبت به ساختارهای معمول موتور سوئیچ رلوکتانس کمتر است [۱۴۹].

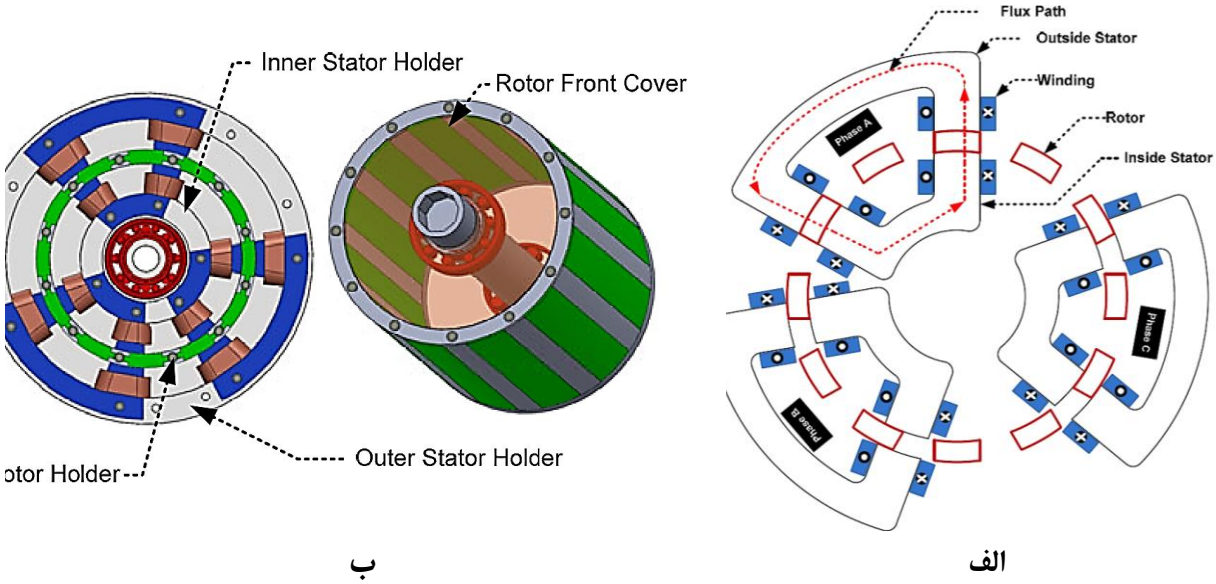


شکل ۰-۲۱: موتور سوئیچ رلوکتانس روتور خارجی برای ساختارهای خودروی برقی درون چرخی

DOI: 10.30503/nripress.2020.064



شکل ۰-۲۲: موتور سوئیچ رلوکتانس با روتور چندبخشی



ب الف

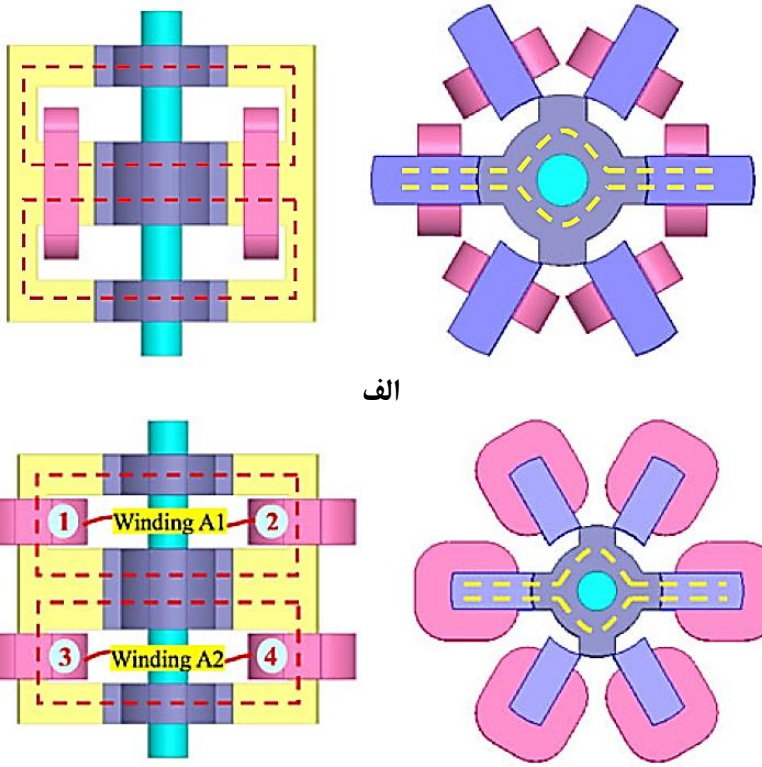
شکل ۰-۲۳: موتور سوئیچ رلوکتانس با استاتور دوهسته‌ای C شکل: الف) نمای دوبعدی و ب) نمای سه‌بعدی موتور

در ساختاری مشابه، که در شکل ۰-۲۳ نشان داده شده است، استاتور به‌صورت هسته‌هایی C شکل که مقابل یکدیگر قرار می‌گیرند، ساخته می‌شود. در این ساختار نیاز به یکپارچه بودن استاتور نیست و وزن آن و درنتیجه تلفات آن کاهش و چگالی گشتاور موتور نیز افزایش می‌یابد. مشابه طرح قبل، در این ساختار نیز روتور به‌صورت چندبخشی است [۱۵۰].

مشابه ساختار ارائه‌شده در مرجع [۱۲۲]، که استاتور E شکل و روتور چندلایه است، در مرجع [۱۵۱] نیز همین ساختار برای استفاده در خودروهای برق ـ هیبریدی پیشنهاد شده است. عنوان شده است که هسته‌های شکل E استاتور می‌توانند دارای یک یا دو سیم‌پیچ باشند (شکل ۰-۲۴). بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که اگرچه ساختار تک سیم‌پیچه دارای حجم کمتری است، اما در ساختار دو سیم‌پیچه، به‌دلیل کمتر بودن تعداد دورها، امکان خطای دور به دور کمتر است. در مرجع [۱۵۲] نیز یک ساختار از موتور سوئیچ رلوکتانس ۴ فاز با هستهٔ استاتور C شکل پیشنهاد شده است (شکل ۰-۲۵). عنوان شده است که در طراحی هستهٔ روتور، از ترکیب ورقه‌های فلزی و مواد SMC استفاده شده است. هدف از این پیشنهاد کاهش هزینه‌های ساخت و تلفات هسته است. نتایج مقایسهٔ

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

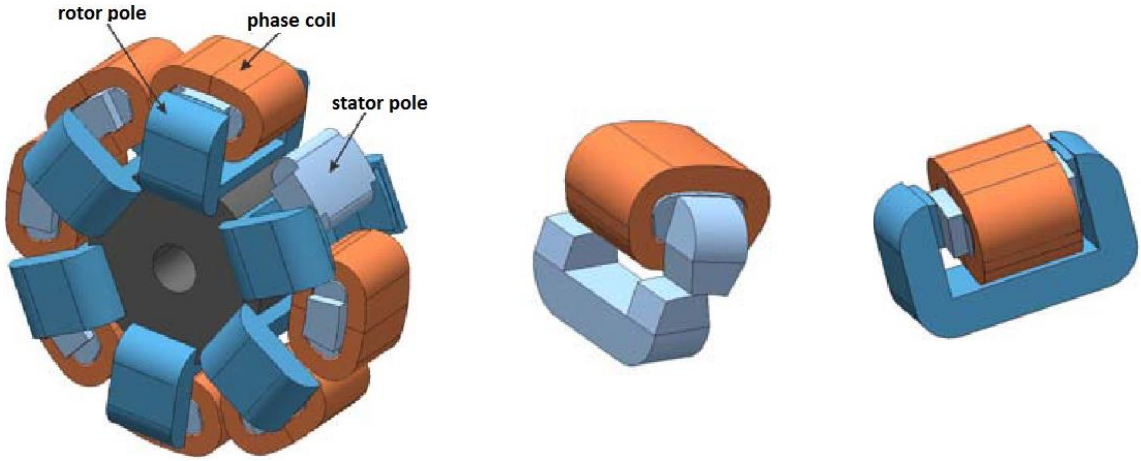
این پیشنهاد با ساختار معمول موتور سوئیچ رلوکتانس ۴ فاز، نشان از کاهش بازده موتور در ساختار پیشنهادی (به‌دلیل افزایش تلفات مسی) دارد.



الف

ب

شکل ۰-۲۴: الف) سطح مقطع دوبعدی و دید از روبه‌روی موتور با تک سیم‌پیچه و ب) سطح مقطع دوبعدی و دید از روبه‌روی موتور با دو سیم‌پیچه



الف ب ج

DOI: 10.30503/nripress.2020.064



د **ه** **و**

شکل ۰-۲۵: الف) ساختار موتور سوئیچ رلوکتانس، ب) ساختار شعاعی یک قطب، ج) ساختار محور یک قطب

د) قسمت ورقه‌های مغناطیسی روتور، ه) سرپوش از جنس SMC، و) یک قطب روتور

فصل هفتم: کاربردهای ماشین سوئیچ رلوکتانس

۷-۱- مقدمه

همان‌طور که در مقدمهٔ گزارش نیز اشاره شده است، در نوشتن مطالب این فصل از مراجع ارائه‌شدهٔ پروژهٔ «آینده‌پژوهی و رصد وضعیت آهنرباهای دائم و کاربردهای آن‌ها در ماشین‌های الکتریکی» استفاده شده است.

موتورهای سوئیچ رلوکتانس دارای مزایایی مانند سادگی ساختار و مقاوم بودن در برابر خطا است که موجب می‌شود پتانسیل خوبی برای استفاده در انواع کاربردهای خانگی و صنعتی، به‌خصوص به‌عنوان جایگزین موتورهای القایی مرسوم باشد. اما معایب این موتورها مانند نویز صوتی زیاد و ریپل گشتاور زیاد مانع از گسترش کاربرد آن‌ها شده است. همچنین، به‌دلیل بازده، چگالی گشتاور و چگالی توان پایین نسبت به موتورهای آهنربای دائم تا مدت‌ها به‌عنوان رقیب جدی برای موتورهای آهنربای دائم (در کاربردهای مختلف) محسوب نمی‌شد. با افزایش قیمت آهنرباهای کمیاب خاکی، موتورهای سوئیچ رلوکتانس در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند و بررسی‌های انجام‌شده در فصل دوم نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی در زمینهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس صورت می‌گیرد و تلاش شده است که با ارائهٔ ساختارهای جدیدی از موتور سوئیچ رلوکتانس، معایب این موتورها رفع شود. عمدهٔ این ساختارهای جدید (که در فصل دوم معرفی شد) با هدف افزایش بازده و چگالی گشتاور موتورهای سوئیچ رلوکتانس ارائه شده است و تلاش می‌شود که مشخصات عملکردی موتور سوئیچ رلوکتانس را به موتورهای آهنربای دائم داخلی نزدیک کنند و به‌عنوان جایگزینی برای آن‌ها، به‌خصوص در کاربردهای حمل‌ونقل الکتریکی، معرفی نمایند. در این فصل به معرفی کاربردها، شرکت‌های سازنده و حمایت‌های انجام‌شده از توسعهٔ فناوری موتورهای سوئیچ رلوکتانس پرداخته می‌شود.

۷-۲- کاربردهای صنعتی

همان‌طور که گفته شد، نویز صوتی زیاد موتورهای سوئیچ رلوکتانس، مخصوصاً در ساختارهای معمول آن، مانع از گسترش کاربرد صنعتی موتورهای سوئیچ رلوکتانس شده است و استفاده از این موتورها را به کاربردهایی که نویز صوتی زیاد اهمیتی ندارد، محدود کرده است. کارآیی پرسرعت، یکی از زمینه‌هایی است که موتور سوئیچ رلوکتانس تا حدودی کاربرد پیدا کرده است. به‌عنوان مثال شرکت Domel که سازندهٔ موتورهای الکتریکی تجهیزات خانگی (مانند موتور جاروبرقی) است ادعا نموده است که در حال کار بر روی فناوری موتورهای سوئیچ رلوکتانس برای استفاده در لوازم برقی خانگی است که به گشتاور زیاد و یا طول عمر زیاد نیاز دارند [۱۵۳].

شرکت SR Drives یکی از اولین و جامع‌ترین تولیدکنندگان موتور سوئیچ رلوکتانس در دنیا است. براساس اطلاعات سایت این شرکت، موتورهای سوئیچ رلوکتانس این شرکت در موتورهای جاروبرقی صنعتی شرکت Ametek Lamb Electric استفاده می‌شوند که از توانمندترین موتورهای جاروبرقی صنعتی است. همچنین از موتورهای سوئیچ رلوکتانس تولیدی این شرکت، در کمپرسورهای صنعتی شرکت CompAir استفاده می‌شود [۱۵۴]. شرکت CompAir تولیدکنندهٔ انواع کمپرسور است و بخشی از محصولات این شرکت، کمپرسورهای سرعت متغیر است که با نام کمپرسورهای سری LSR نیز شناخته می‌شوند. این نوع از محصولات CompAir، از موتور سوئیچ رلوکتانس استفاده می‌کنند. در این کمپرسورها، با تغییر سرعت موتور، مقدار انرژی مصرفی کمپرسور با خروجی آن متناسب است و بنابراین انرژی اضافی مصرف نخواهد شد. با توجه به گزینه‌های دیگر مانند موتور القایی و یا آهنربای دائم، موتور سوئیچ رلوکتانس شرایط فوق را بهتر برآورده می‌کند، به گونه‌ای که طبق اطلاعات داده‌شده از این شرکت، این نوع کمپرسورها به میزان ۲۵ درصد کاهش مصرف انرژی دارند. کمپرسورهای مذکور فقط در سری L از انواع Rotary Screw و به‌صورت Direct Drive استفاده می‌شوند.

در جاروبرقی‌های شرکت Dyson موتور جاروبرقی از نوع سوئیچ رلوکتانس با سرعت ۱۰۴,۰۰۰ دور در دقیقه است. استفاده از این موتور باعث کاهش قابل‌توجه حجم و افزایش توان مکندگی موتور جاروبرقی شده است [۱۵۵]. شرکت Regal نیز اعلام کرده است

که درحال تحقیقِ موتورهای سوئیچ رلوکتانس در بازهٔ توانی ۰/۵ تا ۶۰۰ کیلووات، به‌منظور جایگزینی آن‌ها با موتورهای القایی در کاربردهای صنعتی است [۱۵۶].

کمپانی Beckman Coulter که فعالیت آن در تولید تجهیزات آزمایشگاهی مرتبط با مهندسی پزشکی است، در سال ۱۹۹۸ بر اثر ادغام دو شرکت Beckman Instruments (تأسیس‌شده در سال ۱۹۳۵) و شرکت Coulter Corporation (تأسیس‌شده در سال ۱۹۵۰) به‌وجود آمد. ازجمله محصولات این شرکت، دستگاه‌های سانتریفیوژ پرسرعت برای استفاده در آزمایشگاه‌های پزشکی است که با نام‌های تجاری AVANTI J و AVANTI JE شناخته می‌شوند. موتور پرسرعت به‌کاررفته در این دستگاه‌ها از نوع سوئیچ رلوکتانس است که طبق اطلاعات موجود، این محصول از سال ۱۹۹۴ تولید شده است (برای اولین بار توسط شرکت Beckman Instruments ساخته شد). مزیت استفاده از موتور سوئیچ رلوکتانس به‌جای سایر گزینه‌ها، مدت‌زمان کوتاه شتاب مثبت و منفی آن است.

۷-۳- سیستم حمل‌ونقل الکتریکی

بیشتر ساختارهای ارائه‌شده در فصل دوم این گزارش، با هدف استفاده از موتورهای سوئیچ رلوکتانس در سیستم‌های حمل‌ونقل الکتریکی ارائه شده است. در این تغییرات تلاش شده است که مشخصات فنی موتور سوئیچ رلوکتانس به موتورهای آهنربای دائم نزدیک شود تا استفاده از موتور سوئیچ رلوکتانس در انواع خودروهای برقی ـ هیبریدی مقرون‌به‌صرفه باشد و وابستگی به مواد کمیاب خاکی که تأمین‌کنندهٔ اصلی آن کشور چین است، مانند نئودیمیوم و دیسپروزیوم، کاهش یابد. به همین منظور، اتحادیهٔ اروپا برنامه‌ای پژوهشی در زمینهٔ حمل‌ونقل دارد که در این برنامه مبلغی در حدود ۴ میلیارد یورو برای توسعهٔ سیستم‌های حمل‌ونقل ایمن‌تر، با سیستم هوشمندتر و آلایندگی کمتر هزینه می‌شود [۱۵۷]. در زیرمجموعهٔ این برنامه دو پروژه به شرح زیر تعریف شده است:

۱- پروژهٔ ونوس[1]: هدف از این پروژه دستیابی هم‌زمان به فناوری‌های موتورهای سوئیچ رلوکتانس و سنکرون رلوکتانس شار محوری برای استفاده در خودروهای برقی، بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ بود. یکی از خصوصیات موتورهای شار محور این است که چگالی توان در آن‌ها بیشتر از موتورهای شار شعاعی است و این ساختار می‌تواند کم بودن چگالی توان موتورهای رلوکتانسی نسبت به موتورهای آهنربایی را جبران نماید. هزینهٔ این پروژه ۲,۹۳۹,۸۹۷ یورو بود که اتحادیهٔ اروپا مبلغ ۱,۹۹۹,۴۹۱ یورو از این پروژه را تأمین کرده است و مابقی ازسوی کنسرسیومی از ۵ شرکت و یک دانشگاه تأمین شده است [۱۵۸].

۲- پروژهٔ آرموا[2]: هدف از این پروژه توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی برای استفاده در خودروهای برقی بود. ازبین انواع فناوری‌های موتورهای رلوکتانسی، موتور سوئیچ رلوکتانس انتخاب شد. هزینهٔ این پروژه ۳,۵۶۶,۱۱۰ یورو بود که اتحادیهٔ اروپا مبلغ ۲,۲۰۰,۰۰۰ یورو از این پروژه را تأمین کرده است و مابقی توسط کنسرسیومی از ۶ شرکت تأمین شده است [۱۵۹].

در کشور انگلیس، بخش تجارت، انرژی و راهبردهای صنعتی[3] و هیئت راهبردی فناوری[4] مبلغی در حدود ۱۰ میلیون پوند (با احتساب آوردهٔ شرکت‌های تجاری، کل مبلغ هزینه‌شده برابر ۱۹ میلیون پوند می‌شود) برای پژوهش دربارهٔ ۱۶ فناوری‌ای که تولید دی‌اکسید کربن را کاهش می‌دهد، هزینه کرده است. در قالب این برنامه و در زمینهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس، پروژه با عنوان «High Torque Density Switched Reluctance Drive System for Low Carbon Vehicles»، بین سال‌های

1. VENUS
2. ARMEVA: Advanced Reluctance Motors for Electric Vehicle Applications
3. Department for Business Innovation and Skills
4. Technology Strategy Board

۲۰۱۲ تا ۲۰۱۵ و به مبلغ ۱,۱۷۴,۴۰۷ پوند اجرا شده است (سهم دولت ۵۸۷,۱۷۵ پوند) که در قالب آن، موتور سوئیچ رلوکتانس برای کاربردهای خودروی برقی طراحی و نمونه‌سازی شود. از مشخصات موتور طراحی‌شده این است که برای کار در دمای ۲۴۰ درجهٔ سانتی‌گراد طراحی شده است که درنتیجه حجم موتور به مقدار قابل‌توجهی کاهش یافته است. شایان‌ذکر است که دمای کاری موتورهای آهنربای دائم بیش از ۱۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد نمی‌تواند باشد [۱۶۰].

در پروژه‌ای مشابه و با مشارکت شرکت‌های Cobham Technical Services، Jaguar Land-Rover و Ricardo با هزینه‌ای در حدود ۱/۵ میلیون پوند (که نیمی از آن ازسوی دولت تأمین شده است)، شرکت Ricarrdo موتور سوئیچ رلوکتانس برای استفاده در خودروهای برقی (به‌عنوان جایگزین موتورهای آهنربای دائم) طراحی نموده است [۱۶۱].

شرکت LeTourneau Inc در ساخت ۵۰ دستگاه از لودرهای این شرکت از موتور سوئیچ رلوکتانس ساخت شرکت SR Drives استفاده نموده است. در هر دستگاه لودر از چهار موتور ۳ مگاوات برای به حرکت درآوردن چهار چرخ لودر استفاده شده است. ابعاد این موتورها با موتور ۱۵۰ کیلووات قابل مقایسه است. همچنین از سایر موتورهای کششی ساخت این شرکت برای تجهیزاتی مانند تراموا، اسکوترها و تراک‌های دستی استفاده شده است [۱۶۲]. همچنین، شرکت John Deere دو لودر هیبریدی (دیزل ـ برق) را با موتور و ژنراتور سوئیچ رلوکتانس به بازار معرفی نموده است [۴۰].

در کشور دانمارک و در قالب پروژه‌ای با نام CPED، کنسرسیومی از ۶ شرکت و دانشگاه Aalborg برای ساخت موتور الکتریکی درون چرخی برای خودروهای برقی تشکیل شد که در این پروژه، همان‌طور که در مرجع [۱۱۴، ۱۳۳] توضیح داده شده است، یک موتور سوئیچ رلوکتانس ۳۵ کیلووات با هستهٔ استاتور U شکل طراحی و ساخته شده است. بودجهٔ این پروژه در حدود ۱۶/۸ میلیون کرون دانمارک بوده است که ۵۴ درصد آن ازسوی دولت (مؤسسهٔ EUPD) تأمین شده است [۱۶۳].

در قالب پروژه‌هایی که در دفتر پروژه‌های پیشرفتهٔ وزارت انرژی آمریکا تعریف شده است، در قراردادی با دانشگاه Texas at Dallas به مبلغ ۲,۸۴۸,۲۷۸ دلار (بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۵) و با هدف کاهش استفاده از آهنرباهای دائم کمیاب خاکی در کاربردهای خودروهای برقی و انرژی‌های نو، همان‌طور که در مرجع‌های [۱۲۷، ۱۳۰، ۱۳۶] توضیح داده شده است، موتور سوئیچ رلوکتانس دو استاتورهٔ ۱۰۰ کیلوواتی طراحی و ساخته شده است [۱۶۴].

مطالعهٔ سایر مراجع بررسی‌شده در این گزارش نیز نشان می‌دهد که برای اجرای پروژه‌های مرتبط با آن‌ها از کمک‌های مالی مؤسسات متولی مدیریت تحقیقات در کشورهای خود استفاده نموده‌اند که به‌دلیل کم بودن حجم اطلاعات ارائه‌شده ازطرف آن‌ها (مخصوصاً مراجع مرتبط با کشورهای چین، ژاپن و کره)، این پروژه‌ها به‌صورت مجزا مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.

۷-۴- جمع‌بندی موتورهای سوئیچ رلوکتانس

در بخش دوم گزارش، انواع ساختارهای موتور سوئیچ رلوکتانس و فعالیت‌های مختلفی که در زمینهٔ توسعهٔ فناوری و یا استفاده از موتورهای سوئیچ رلوکتانس صورت گرفته بود بررسی شد. عنوان شد که ریپل زیاد گشتاور موتور سوئیچ رلوکتانس و به‌تبع آن، نویز صوتی زیاد این موتور باعث شده است که استفاده از این موتورها در کاربردهای خانگی و صنعتی محدود شود. بررسی‌های انجام‌شده در فصل کاربردهای موتور سوئیچ رلوکتانس نیز مؤید این مسئله است و کاربردهای صنعتی ذکرشده در این فصل نیز، عمدتاً مربوط به دههٔ ۹۰ میلادی می‌شود که در این دوره، موتور سوئیچ رلوکتانس بسیار مورد توجه قرار گرفته بود و پس از آن، کمتر به استفادهٔ صنعتی از موتور سوئیچ رلوکتانس رغبت نشان داده شد. شایان توجه است که در کاربردهایی مانند موتورهای جاروبرقی که نویز صوتی موتور در مقابل نویز صوتی قسمت مکندهٔ هوا، مقدار قابل‌توجهی نیست، پتانسیل خوبی برای استفاده از موتور سوئیچ رلوکتانس وجود دارد که در این زمینه (براساس نتایج جستجوهای اینترنتی) سه شرکت اشاره‌شده در گزارش پیشگام هستند.

با توجه به مطالب ارائه‌شده در فصل معرفی موتورهای سوئیچ رلوکتانس، ساختارهای دو فاز جدید که در گزارش به آن‌ها اشاره شده است (بخش ۵-۵-۵-)، پتانسیل خوبی برای استفاده در تجهیزات خانگی دارند؛ زیرا نویز صوتی این ساختارها تا حد زیادی نسبت به سایر ساختارهای موتور سوئیچ رلوکتانس کمتر است و همچنین، در اغلب موارد در تجهیزات خانگی، یک‌طرفه بودن جهت چرخش موتورهای سوئیچ رلوکتانس دوفاز مشکل‌ساز نیست.

در بررسی‌های انجام‌شده در این گزارش، نشان داده شد که موتور سوئیچ رلوکتانس پتانسیل خوبی برای استفاده در خودروهای برقی ـ هیبریدی دارد و در سال‌های اخیر نیز توجه زیادی به این کاربرد موتورهای سوئیچ رلوکتانس شده است و بسیاری از ساختارهای جدید ابداع‌شده برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس نیز با هدف توسعهٔ کاربرد این موتورها در خودروهای برقی ـ هیبریدی بوده است. شایان‌ذکر است که در مقایسه بین موتورهای سوئیچ رلوکتانس و موتورهای آهنربای دائم در کاربرد خودروهای برقی ـ هیبریدی، کم بودن چگالی توان و گشتاور موتور سوئیچ رلوکتانس و همچنین، کم بودن بازدهی موتور سوئیچ رلوکتانس نسبت به موتورهای آهنربای دائم، دو چالش جدی توسعهٔ کاربرد موتورهای سوئیچ رلوکتانس در خودروهای برقی ـ هیبریدی است. برای این منظور راهکارهای مختلفی به شرح زیر پیشنهاد شده است:

الف) تغییر در اجزای ساختار معمول موتورهای سوئیچ رلوکتانس

۱- در مراجع [۱۱۵ و ۱۱۶]، بیشتر کردن تعداد قطب‌های روتور نسبت به قطب‌های استاتور و همچنین استفادهٔ هم‌زمان از روتور چندبخشی به‌عنوان راهکارهایی برای افزایش چگالی گشتاور موتور سوئیچ رلوکتانس پیشنهاد شده است.

۲- در مرجع [۱۱۷]، استفاده از هستهٔ آهنی با تلفات هستهٔ کمتر به‌عنوان راهی برای افزایش بازدهی موتور پیشنهاد شده است. با این روش، بازدهی موتور تا ۵ درصد نسبت به استفاده از ورقه‌های معمول در ساخت موتور، افزایش می‌یابد. همچنین در صورت افزایش ضریب پرشدگی شیارها در سیم‌پیچی، بازدهی موتور تا ۱ درصد قابل افزایش است.

۳- در مرجع [۱۱۸] عنوان شده است که گرمادهی ورقه‌های هستهٔ موتور در فرایند ساخت، باعث کاهش ۳۷ درصدی تلفات موتور می‌شود.

۴- در مرجع [۱۲۱] عنوان شده است که سیم‌پیچی نیمی از دندانه‌های استاتور، می‌تواند به افزایش چگالی گشتاور و بازدهی موتور سوئیچ رلوکتانس کمک کند. البته این تغییر زمانی که در هسته اشباع مغناطیسی رخ دهد مناسب نیست و باعث کاهش عملکرد موتور می‌شود. همچنین عنوان شده که افزایش نویز صوتی و افزایش توان ظاهری سیستم درایو موتور از معایب استفاده از این روش است.

۵- در مرجع [۱۴۴] برای کاهش تلفات مکانیکی، مخصوصاً در کاربرد پرسرعت، اتصال بین دو قطب روتور به‌صورت یک لایهٔ نازک از جنس هستهٔ روتور پیشنهاد شده است (البته این کار موجب افت عملکرد موتور می‌شود).

ب) تغییرات کلی در ساختار موتورهای سوئیچ رلوکتانس

۱- موتورهای سوئیچ رلوکتانس چندلایه (با لایه‌های ایزوله از هم) می‌تواند موجب کاهش ریپل گشتاور و نویز صوتی موتور شود.

۲- در مرجع [۱۲۶]، موتور سوئیچ رلوکتانس دو استاتوره با روتور چندبخشی، با هدف افزایش چگالی گشتاور موتور پیشنهاد شده است. استحکام مکانیکی این ساختار و پیچیدگی‌های ساخت موتور از چالش‌های این ساختار است.

۳- استفاده از ساختارهای استاتور چندبخشی می‌تواند موجب افزایش چگالی توان موتور سوئیچ رلوکتانس شود. همچنین، در ساختارهای استاتور چندبخشی، به‌دلیل کوتاه شدن مسیر شار مغناطیسی، تلفات هسته کاهش می‌یابد و درنتیجه بازدهی موتور سوئیچ رلوکتانس افزایش می‌یابد. ساختارهای استاتور چندبخشی، شامل ساختارهای شار متقاطع نیز هستند که در آن‌ها، هستهٔ استاتور به‌صورت C شکل و یا E شکل ساخته می‌شوند. در تمامی این موارد، چگالی گشتاور در موتور سوئیچ رلوکتانس افزایش می‌یابد.

۴- در مرجع [۱۳۳]، ترکیب ساختارهای شار متقاطع و دیسکی پیشنهاد شده است و عنوان شده که این ترکیب برای استفاده در خودروهای برقی ـ هیبریدی مناسب است. علاوه‌بر افزایش چگالی گشتاور موتور، سهولت خنک‌سازی، کاهش نویز صوتی و کاهش تلفات هسته نیز از مزایای مهم دیگری است که این ساختار موتورهای سوئیچ رلوکتانس دارد.

علاوه‌بر موارد فوق، استفاده از موتورهای سوئیچ رلوکتانس در انواع خودروهای برقی ـ هیبریدی پیشنهاد شده و در برخی موارد نمونه‌سازی نیز انجام شده است. برخی از این پیشنهادها عبارت است از:

۱- در دوچرخه‌های برقی، موتور سوئیچ رلوکتانس با ساختار معمول و همچنین با ساختار روتور بیرونی (با توان ۵۰۰ وات) طراحی و نمونه‌سازی شده است.

۲- موتور سوئیچ رلوکتانس با تعداد قطب‌های ۱۸/۱۲ و با استفاده از ورقه‌های مغناطیسی با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر و تلفات بسیار کم، برای استفاده در خودروی تویوتا پیروس، در توان ۵۰ کیلووات، طراحی و نمونه‌سازی شده است. عملکرد نمونهٔ ساخته‌شده قابل مقایسه با موتور آهنربای دائم (از نوع IPMSM) است.

۳- موتور سوئیچ رلوکتانس شار محوری دو روتوره (روتورها در بیرون و استاتور در وسط) برای استفاده در چرخ (In-Wheel) خودروهای برقی پیشنهاد شده و نمونهٔ ۱/۵ کیلوواتی نیز نمونه‌سازی شده است. کاهش نویز صوتی از مزایای مهم ساختار پیشنهادی است.

۴- موتور سوئیچ رلوکتانس روتور خارجی برای استفادهٔ درون چرخی در خودروهای سبک شهری و همچنین خودروهای سنگین نیز پیشنهاد شده‌اند.

برای جمع‌بندی کاربردهای موتورهای سوئیچ رلوکتانس می‌توان گفت که:

۱- بیشتر تحقیقات انجام‌شده در زمینهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس در کشورهای مختلف، از حمایت‌های دولتی برخوردار بوده‌اند.
۲- برخی از این تحقیقات از اعتبار تحقیقاتی که مؤسسات دولتی مستقیماً به دانشگاه پرداخت نموده‌اند، برخوردار شده‌اند.
۳- در موارد دیگر که تلاش برای تجاری‌سازی موتور سوئیچ رلوکتانس در خودروهای برقی بوده، هزینه‌های پروژه ازطریق تشکیل کنسرسیومی از شرکت‌های صنعتی تأمین شده است و مؤسسات دولتی حامی تحقیقات، بخشی از هزینه‌ها را تأمین کرده‌اند.
۴- فعالیت‌های تحقیقاتی برای توسعهٔ کاربرد موتورهای سوئیچ رلوکتانس برای رفع مشکلات ساختاری این موتور، همچنان ادامه دارد. این موتور هنوز استفادهٔ تجاری زیادی پیدا نکرده است و تعداد شرکت‌های تولیدکنندهٔ آن همچنان محدود است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

فصل هشتم: تعیین کنش‌گران کلیدی و بررسی توانمندی‌های کشور در زمینهٔ طراحی، تولید و به‌کارگیری موتورهای رلوکتانسی

۸-۱- مقدمه

بدیهی است که توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی با سایر فناوری‌های موتورهای الکتریکی پیشرفته مشابهت‌های زیادی داشته باشد. از آنجایی که مسائل مربوط به کنش‌گران کلیدی و توانمندی‌های کشور در زمینهٔ توسعه فناوری موتورهای الکتریکی، به‌صورت عام و برای تمامی انواع فناوری‌های موتورهای الکتریکی، قبلاً در پروژهٔ «تدوین سند راهبردی و نقشه راه توسعهٔ فناوری‌های طراحی، ساخت و تدوین دانش فنی انواع موتورهای موردنیاز در صنعت برق ایران» و در گزارش‌هایی با عناوین «تبیین ابعاد موضوع و محدودهٔ مطالعات» و «ظرفیت‌ها و زیرساخت‌های کشور در طول زنجیرهٔ ارزش صنعت و فناوری موتورهای الکتریکی» مورد بررسی قرار گرفته است، از تکرار این مباحث به‌صورت تفصیلی پرهیز می‌شود و به ذکر خلاصه‌ای از نکات مهم آن‌ها بسنده می‌شود و به مواردی که مخصوص به موتورهای رلوکتانسی در این زمینه است، پرداخته می‌شود.

۸-۲- کنش‌گران

در توسعهٔ فناوری، کنش‌گر را می‌توان مترادف با ذی‌نفع در برنامه‌ریزی راهبرد سازمانی قلمداد نمود. بر این اساس، کنش‌گر عبارت است از فرد، گروه یا سازمانی که می‌تواند بر ورودی‌ها (منابع) یا بروندادهای یک سیستم تأثیر بگذارد و یا از خروجی‌ها و بروندادهای آن (خدمات، محصولات، پیامدها و ...) تأثیر پذیرد. هر کنش‌گر موجود در نظام توسعهٔ فناوری براساس راهبرد خود، در چارچوب نهادهای پیرامون، و با صرف منابع لازم، به انجام فعالیت‌های نوآورانه می‌پردازد. مجموع کارکردهای برآورده‌شده توسط فعالیت‌های کنش‌گران مختلف، عملکرد نهایی سیستم را تعیین خواهد نمود. بنابراین با شناسایی و تحلیل توسعهٔ فناوری از زاویهٔ کنش‌گران می‌توان در درجهٔ اول سهم بالقوه و بالفعلی که هر کنش‌گر در برآوردن کارکردها و تأمین عملکرد سیستم دارد مشخص نمود و در درجهٔ دوم نیز جایگزین‌های ساختاری که منجر به ایجاد عملکرد در سطح قابل‌قبول یا موردنیاز در سیستم می‌شود را شناسایی کرد. در این گزارش کنش‌گران به پنج دسته تقسیم می‌شوند:

۱- سیاست‌گذار[1]: نهادی است که برنامه‌هایی را تعیین می‌کند که باید توسط دولت، کسب‌وکارها و غیره دنبال شود.

۲- تنظیم‌کننده[2]: تنظیم مجموعهٔ گوناگونی از ابزارها است که به‌واسطهٔ آن، دولت نیازمندی‌های شرکت‌ها و مردم را تنظیم می‌کند. انواع تنظیمات عبارتند از:

- فرمان و کنترل: تنظیم دستور و کنترل نوعاً وضع/ تحمیل استانداردهای حمایت‌شده با مصوبات قانونی است، هرگاه استانداردها سازگار نباشند.
- خودتنظیمی؛
- تنظیم مبتنی بر تشویق؛
- مکانیسم‌های مبتنی بر بازار.

۳- تسهیل‌کننده: سازمان‌های محلی یا بین‌المللی هستند که معمولاً ازسوی دولت سرمایه‌گذاری می‌شوند و هدف آن توسعه و بهبود بازار خدمات است. یک تسهیل‌کننده، تأمین‌کنندگان خدمات را ازطریق ایجاد محصولات خدماتی جدید، ارتقای تجارب مفید و ایجاد ظرفیت حمایت می‌کند.

۴- ارائه‌کنندهٔ خدمات آموزشی و پژوهشی؛

1. policy-maker
2. regulator

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

۵- ارائه‌کنندهٔ خدمات صنعتی.

در جدول ۰-۱ به‌صورت خلاصه، کنش‌گران مختلف در حوزهٔ صنعت موتورهای الکتریکی و عملکرد آن‌ها آورده شده است. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، در گزارش‌های قبلی نقش هریک از این کنش‌گران به تفکیک بررسی شده است. با توجه به این اطلاعات، در ادامه، تمرکز بر مسئلهٔ طراحی، ساخت و تولید موتورهای الکتریکی رلوکتانسی خواهد بود.

جدول ۰-۱: کنش‌گران مختلف در حوزهٔ صنعت موتورهای الکتریکی و عملکرد آن‌ها

نهاد	کارکرد					
	سیاست‌گذاری	تنظیم‌گری	تسهیلگری	ارائهٔ کالا و خدمات		
				آموزشی	پژوهشی	صنعتی
مجلس شورای اسلامی	❋					
مجمع تشخیص مصلحت نظام	❋					
شورای عالی علوم تحقیقات و فناوری (عتف)	❋					
معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری	❋					
سازمان برنامه و بودجه	❋					
وزارت نیرو	❋					
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری کشور	❋					
وزارت راه	❋					
پژوهشگاه نیرو					❋	
سازمان پدافند غیرعامل	❋					
سازمان حفاظت محیط‌زیست	❋					
سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی	❋					
سازمان ملی استاندارد		❋				
وزارت صنعت و معدن و تجارت	❋					
سازمان گسترش و نوسازی صنایع کشور			❋			
وزارت نفت	❋					
صندوق‌های مالی دولتی (مانند صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران ایران)			❋			
مراکز رشد و پارک‌های علم و فناوری			❋			
هیئت تنظیم بازار برق		❋				
انجمن لوازم‌خانگی			❋			
کلیهٔ دانشگاه‌های کشور				❋		
شرکت‌های پژوهشی دانشگاهی یا دانش‌بنیان					❋	❋
شرکت‌های سازندهٔ موتورهای الکتریکی						❋
شرکت‌های سازندهٔ سیم کابل						❋

 DOI: 10.30503/nripress.2020.064

۸-۳- توانمندی‌های کشور در زمینهٔ طراحی و تولید موتورهای الکتریکی

بررسی توانمندی‌های کشور در زمینهٔ طراحی تولید موتورهای رلوکتانسی در سه سطح قابل بررسی است:

۱- تأمین مواد اولیهٔ موردنیاز برای تولید موتور رلوکتانسی و درایو الکترونیکی آن؛
۲- طراحی و تولید صنعتی انواع موتورهای رلوکتانسی و درایو آن‌ها؛
۳- آزمایش‌ها و استانداردهای موتورهای رلوکتانسی.

۸-۳-۱- مواد اولیهٔ مورداستفاده در موتورهای رلوکتانسی

در زمینهٔ تأمین مواد اولیه، ابتدا نیاز است که اجزای موتورهای رلوکتانسی و درایو الکترونیکی آن شناخته شوند. مواد اولیه و اجزای موتورهای رلوکتانسی به شرح زیر است:

۱- هستهٔ مغناطیسی که از ورقه‌های مغناطیسی ساخته می‌شود؛
۲- سیم‌پیچی‌های مسی از هادی‌های مسی (سیم‌های لاکی یا میله‌های مسی) ساخته می‌شوند؛
۳- آلومینیوم (برای موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز)؛
۴- آهنربا (در موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی)، شامل آهنرباهای کمیاب خاکی و یا فریتی؛
۵- بدنهٔ خارجی و درپوش‌های موتور که اکثراً از چدن یا فولادهای غیرمغناطیسی ساخته می‌شود؛
۶- شفت که معمولاً از فولادهای غیرمغناطیسی ساخته می‌شوند؛
۷- بلبرینگ‌ها؛
۸- مواد عایقی، شامل انواع مواد عایقی مورداستفاده در موتورهای الکتریکی پرتوان یا کم‌توان.

همچنین، سیستم درایو این موتورها از اجزای زیر تشکیل شده است:

۱- انواع سوئیچ‌های قدرت مانند IGBT و MOSFET؛
۲- پردازشگرهای اطلاعات مانند میکروکنترلرها؛
۳- قطعات الکترونیکی مانند مقاومت، خازن، سلف، برخی مدارات مجتمع، ایزولاتورها و غیره؛
۴- انواع حسگرها، شامل حسگر سرعت، حسگر موقعیت، جریان و دما؛
۵- برد چاپی؛
۶- بدنهٔ خارجی.

تعداد معدودی از اجزای فوق‌الذکر، از محل تولیدات داخل کشور قابل تأمین است و عمدهٔ اجزای موردنیاز موتورهای الکتریکی رلوکتانسی، به واردات از شرکت‌های سازندهٔ بزرگ وابسته است. مهم‌ترین دلیل که بر عدم ایجاد زیرساخت‌های لازم برای تولید مواد اولیهٔ موتورهای الکتریکی مطرح می‌شود، کم بودن حجم بازار موتورهای الکتریکی در کشور و درنتیجه اقتصادی نبودن تولید این محصولات است. شایان‌ذکر است که به‌دلیل کاربردهای زیاد دیگر سیم‌های لاکی، این محصولات در کارخانجات داخلی تولید و وارد بازار می‌شود.

۸-۳-۲- طراحی و تولید صنعتی انواع موتورهای رلوکتانسی و درایو آن‌ها

بررسی توانمندی‌های کشور در حوزهٔ طراحی و تولید موتورهای رلوکتانسی، معادل بررسی وضعیت کنش‌گران فعال در زمینهٔ خدمات آموزشی و پژوهشی و همچنین در زمینهٔ خدمات صنعتی است. وظیفه و کارکرد اصلی کنش‌گران فعال در زمینهٔ خدمات آموزشی و پژوهشی، طراحی و نمونه‌سازی ماشین‌های الکتریکی رلوکتانسی است. در این زمینه باید گفت که خوشبختانه در دانشگاه‌های کشور و همچنین شرکت‌های دانشگاهی و یا دانش‌بنیان فعال در کشور پتانسیل خوبی وجود دارد و افراد فعال در این قسمت‌ها، در زمینهٔ طراحی و نمونه‌سازی موتورهای رلوکتانسی (مخصوصاً در بازه‌های کم‌توان) وجود دارد؛ بررسی وب‌سایت‌های دانشگاهی این افراد و یا در سایر

سایت‌هایی که اطلاعات پژوهشی را منتشر می‌کنند (مانند ieeexplore.ieee.org، irandoc.ac.ir یا virascience.com و امثال این پایگاه‌های دادهٔ داخلی یا بین‌المللی) نشان می‌دهد که تقریباً تمامی اساتید دانشگاهی فعال در زمینهٔ ماشین‌های الکتریکی در کشور، در یکی از زمینه‌های طراحی و نمونه‌سازی، درایو و کنترل یا تشخیص خطای موتورهای رلوکتانسی (موتور سوئیچ رلوکتانس و موتور سنکرون رلوکتانسی) و در کاربردهای مختلف، چندین پایان‌نامهٔ تحصیلات تکمیلی یا مقالهٔ پژوهشی دارند. شایان‌ذکر است که به‌دلیل زیاد بودن حجم این فعالیت‌ها و مفید نبودن ارائهٔ اطلاعات آن‌ها، از آوردن لیستی از این فعالیت‌ها در این گزارش خودداری شده است.

درخصوص شرکت‌های فعال در زمینهٔ ارائهٔ خدمات صنعتی برای تولید موتورهای الکتریکی، قبلاً در مرکز توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی پیشرفته بررسی مفصلی صورت گرفته و لیستی از شرکت‌هایی که در زمینهٔ ساخت انواع ماشین‌های الکتریکی و یا درایو الکترونیکی آن‌ها فعال هستند، ارائه شده است. همچنین، همان‌طور که در مقدمهٔ این فصل اشاره شده است، بررسی مشابهی نیز در گزارش‌های مربوط به پروژهٔ «تدوین سند راهبردی و نقشه راه توسعهٔ فناوری‌های طراحی، ساخت و تدوین دانش فنی انواع موتورهای موردنیاز در صنعت برق ایران» انجام شده و اطلاعات خوبی از توانمندی‌های شرکت‌های فعال در کشور در حوزهٔ ساخت و تولید ماشین‌های الکتریکی و سیستم درایو آن‌ها ارائه شده است. با توجه به این اطلاعات، می‌توان گفت که پتانسیل بسیار خوبی در کشور در زمینهٔ تولید موتورهای رلوکتانسی وجود دارد، هرچند که از این پتانسیل تاکنون استفادهٔ عملی نشده است.

شایان‌ذکر است که این پتانسیل برای ساخت و تولید موتورهای سنکرون رلوکتانسی بیشتر از موتورهای سوئیچ رلوکتانس است؛ زیرا ساختار استاتور موتورهای سنکرون رلوکتانسی مشابه موتورهای القایی است و از آنجا که سابقهٔ تولید موتورهای القایی سه‌فاز در کشور زیاد است، بنابراین، پتانسیل ساخت و تولید موتورهای سنکرون رلوکتانسی در کشور بیشتر از موتورهای سوئیچ رلوکتانس است. همچنین، ساختار کلی سیستم درایو الکترونیکی موتورهای رلوکتانسی با درایو موتورهای القایی تفاوت چندانی ندارد که این مسئله هم تولید صنعتی موتورهای سنکرون رلوکتانسی را آسان‌تر می‌کند.

۸-۳-۳- آزمایش‌ها و استانداردهای موتورهای رلوکتانسی

در گزارش با عنوان «گزارش نهایی مطالعات طرح و احداث آزمایشگاه مرجع تست موتور توان متوسط» پروژهٔ «طراحی و احداث آزمایشگاه مرجع دینامومتری (بازده و عملکرد) موتورهای الکتریکی با توان متوسط»، لیست نسبتاً جامعی از استانداردهای مرتبط با آزمون‌های موتورهای الکتریکی ارائه شده است و توانمندی‌های شرکت‌های مختلف در زمینهٔ انجام آزمون‌های بازده و عملکرد موتورهای الکتریکی ارائه شده است. بررسی اطلاعات ارائه‌شده نشان می‌دهد که در محدودهٔ سرعت‌های معمول (تا ۳۰۰۰ دور در دقیقه)، امکان انجام آزمون اندازه‌گیری بازدهی انرژی تا توان ۱۰۰ کیلووات در کشور وجود دارد. همچنین، سایر آزمون‌های موتورهای الکتریکی در آزمایشگاه‌های موجود در کشور قابل انجام است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

فصل نهم: ترسیم چشم‌انداز و تعیین اهداف کلان در زمینهٔ توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی

 DOI: 10.30503/nripress.2020.064

۹-۱- مقدمه

در مرحلهٔ سوم پروژه با عنوان «تدوین سند راهبردی و نقشه راه توسعهٔ فناوری‌های طراحی، ساخت و تدوین دانش فنی انواع موتورهای موردنیاز در صنعت برق ایران»، در گزارشی با عنوان «بیانیهٔ چشم‌انداز و اهداف کلان توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی» دربارهٔ ادبیات چشم‌انداز و طریق ترسیم آن و همچنین تعیین اهداف کلان توسعهٔ فناوری، به‌تفصیل صحبت شده است. در این فصل، با الگو گرفتن از گزارش فوق‌الذکر، ابتدا به‌اختصار تعریف این مفاهیم و مدل‌های مختلفی که برای رسیدن به این مقاصد تدوین شده است، اشاره می‌شود و به کمک این اطلاعات و همچنین، بررسی‌هایی که در گزارش مرحلهٔ اول پروژه انجام شد (و در اینجا اطلاعات آن تحلیل می‌شود)، مسیر رسیدن به چشم‌انداز مناسب برای توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی رلوکتانسی و اهداف کلان که باید در مسیر این چشم‌انداز به آن‌ها دست یافت، مشخص می‌شود. شایان‌ذکر است که چشم‌انداز توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی رلوکتانسی، ضروری است که اولاً در راستای چشم‌انداز ترسیم‌شده برای توسعهٔ فناوری موتورها در کشور در پروژهٔ «سند راهبردی و نقشه راه توسعهٔ فناوری‌های طراحی، ساخت و تدوین دانش فنی انواع موتورهای موردنیاز در صنعت برق ایران» باشد و از طرف دیگر متناسب با وضعیت این فناوری در دنیا و وضعیت فناوری موتورهای الکتریکی در داخل کشور باشد.

۹-۲- ادبیات چشم‌انداز و اهداف کلان

۹-۲-۱- چشم‌اندازپردازی

چشم‌انداز عبارت است از تصویر مطلوب (شفاف، واقعی، جذاب و قابل‌قبول) و آرمان قابل‌دستیابی در حوزهٔ یک فناوری که در یک افق زمانی بلندمدت و متناسب با مبانی ارزشی جامعه تعیین می‌شود. به عبارت دیگر، چشم‌انداز بیان صریح سرنوشتی است که فناوری به‌سوی آن حرکت می‌کند و تصویر آینده‌ای است که کشور/ بنگاه در جستجوی خلق آن است. چشم‌انداز فناوری اگر به‌صورت دقیق، جامع و آینده‌نگرانه تعریف شده باشد، می‌تواند مسیر توسعهٔ فناوری را همواره هدفمند و جهت‌دار نماید و مانند چراغی در افق بلندمدت، فراروی کنشگران مختلف (دولت، صنعت، دانشگاه) قرار گیرد. در زیر چهار نوع از مدل که به تعریف چشم‌انداز (در سطح بنگاه‌ها) پرداخته‌اند، بررسی می‌شود. این تعاریف را به سطح ملی نیز می‌توان تعمیم داد.

۱- مدل دیوید: براساس این مدل، بیانیهٔ چشم‌انداز در بنگاه‌ها براساس پاسخ به سؤال «ما چه می‌خواهیم بشویم و به کجا می‌خواهیم برسیم؟» توسعه داده می‌شود.

۲- مدل پاتریک لوئیس: چشم‌انداز به سؤال «چه چیزی می‌خواهیم ایجاد کنیم؟» پاسخ می‌دهد و یک تصویر ایده‌آل، واحد و جذاب از آینده ترسیم می‌نماید. چشم‌انداز برای رسیدن به آینده‌ای که معمولاً کمی دورتر از دسترس است، بر روی قوت‌های سازمانی و منابعی که باید توسعه بیابند تمرکز می‌کند.

۳- مدل آلیسون: در این مدل، بیانیهٔ چشم‌انداز به سؤال «موفقیت چگونه است و شبیه چیست؟» جواب می‌دهد. در این مدل پیش‌نویس بیانیهٔ چشم‌انداز با ایده‌ها و نگرشی که از بحث‌ها و گفتگوها بیرون می‌آید و نیز احساس و بینش مشترکی که از مسیر (جهت) و انگیزه ایجاد می‌شود، آغاز می‌گردد. تمامی ذی‌نفعان باید در طوفان فکری ابتدایی و نیز بعضی از گفتگوها حاضر باشند.

۴- مدل مک‌میلان: چشم‌انداز تصویر ذهنی قوی است از آنچه ما در آینده می‌خواهیم بشویم. چشم‌انداز ریشه در واقعیت دارد، اما روی آینده تمرکز می‌کند. تدوین چشم‌انداز، فرایندی شامل روشن نمودن ارزش‌ها، تمرکز بر روی مأموریت و گسترش افق با استفاده از بیانیهٔ چشم‌انداز است. در این مدل، دلایل تدوین چشم‌انداز سازمان عبارتند از: هماهنگی و متناسب کردن کار افراد مختلف، کمک به همه برای تصمیم‌گیری، ایجاد اصول و پایه‌ای برای برنامه‌ریزی کسب‌وکار، به چالش کشیدن اوضاع راحت و غیرایده‌آل شرایط فعلی، و ایجاد رفتارهای متناجس و موافق در افراد به‌صورت قابل توجه.

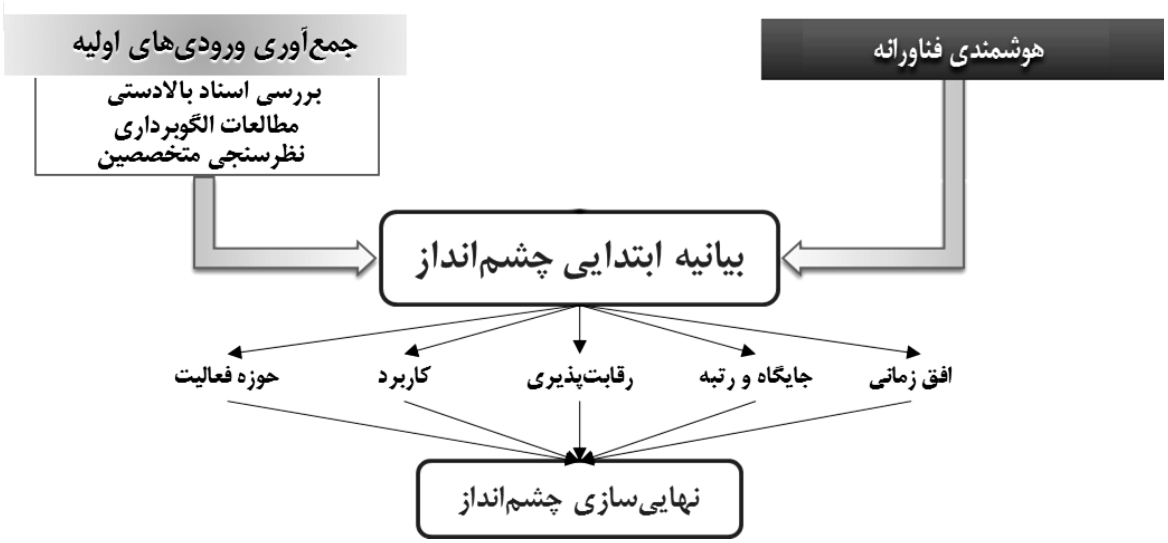
با توجه به این مقدمات و الگوهای موجود در سایر اسناد تدوین‌شده در دنیا، چشم‌انداز «سند راهبردی و نقشه راه توسعهٔ فناوری‌های طراحی، ساخت و تدوین دانش فنی انواع موتورهای موردنیاز در صنعت برق ایران» با استفاده از الگوی نشان داده‌شده در

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

شکل ۰-۱، به‌صورت زیر استخراج شده است:

با توجه به سیاست‌های کلان اقتصاد مقاومتی و به‌منظور دستیابی به محیط‌زیست پاک و بهبود کیفیت زندگی مردم، چشم‌انداز حوزهٔ صنعت و فناوری موتورهای الکتریکی به شرح ذیل است:

«با اتکا به خداوند متعال و تکیه بر توانمندی داخل و مشارکت همهٔ ذی‌نفعان، حوزهٔ فناوری موتورهای الکتریکی کشور در افق ۱۴۰۴ حوزه‌ای است برخوردار از تلفات انرژی کمتر به میزان حداقل ۱۰٪ ناشی از افزایش بازده، پیشرو در امر پژوهش با رویکرد دستیابی به مرزهای دانش و همچنین دارای جایگاه اول منطقه در عرصهٔ طراحی، تولید و ارتقای فناوری با قابلیت رقابتی و رویکرد صادراتی به گونه‌ای که در یک فضای کسب‌وکار پایدار و پویا و حضور سرمایه‌گذاران داخلی و خارجی، جایگاه نخست مصرف در محصولات تولید داخل را به خود اختصاص دهد.»



شکل ۰-۱: روش‌شناسی چشم‌اندازپردازی

۹-۲-۲- اهداف کلان

یکی دیگر از گام‌های اساسی در تعیین جهت‌گیری‌های کلان، تدوین اهداف توسعه برای چشم‌انداز تعریف شده است. این هدف‌گذاری در سطح کلان به‌منظور شفاف نمودن مسیر نیل به چشم‌انداز انجام می‌گیرد. درحقیقت، اهداف مذکور پاسخگوی یک سؤال اساسی است با عنوان «برای رسیدن به چشم‌انداز در افق زمانی تعیین‌شده، به چه مقاصدی باید دست یافت؟»

اهداف را می‌توان با استفاده از رویکردهای زیر تدوین کرد:

۱- رویکرد بالا به پایین که به‌دنبال ترسیم یک آیندهٔ مطلوب برای توسعهٔ فناوری است.

۲- رویکرد پایین به بالا نگاهی مسئله‌محور به توسعهٔ فناوری دارد.

۳- رویکرد ترکیبی که از یک طرف هم‌راستایی اهداف با چشم‌انداز حفظ می‌شود و از طرف دیگر، تمام مسائل و مشکلات موجود در مسیر توسعهٔ فناوری نیز مورد هدف تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند.

۹-۳- بررسی وضعیت فناوری موتورهای رلوکتانسی

در گزارش مرحلهٔ اول این پروژه با نام «رصد وضعیت و بررسی توانمندی‌های کشور در زمینهٔ طراحی و تولید موتورهای رلوکتانسی» روند تحقیقات، کاربردها، تولید و بازار بالقوهٔ موتورهای رلوکتانسی بررسی شدند. در این قسمت از گزارش، اطلاعات مندرج در گزارش فوق، به صورتی دیگر که در ادامه آورده شده است، دسته‌بندی می‌شود.

۹-۳-۱- موتورهای سنکرون رلوکتانسی

معرفی موتورهای سنکرون رلوکتانسی به سال‌های ۱۹۲۳ بازمی‌گردد. ابتدا ساختارهای خودراه‌انداز (خط راه‌انداز) معرفی شدند که این ساختارها به‌دلیل مشکلات زیادی که در بحث پایداری داشتند، خیلی مورد توجه قرار نگرفتند. با توسعهٔ ادوات الکترونیک قدرت در دههٔ ۹۰ میلادی، موتورهای سنکرون رلوکتانسی مجدداً مورد توجه قرار گرفتند و تحقیقات در زمینهٔ استفاده از این موتورها، برای جایگزینی آن‌ها با موتورهای القایی صنعتی، رونق گرفت. افزایش قیمت آهنرباهای دائم در سال‌های منتهی به ۲۰۱۰ میلادی، موجب شد که موتورهای سنکرون رلوکتانسی به‌عنوان یک گزینهٔ جدی برای استفاده در کاربردهای مختلف (به‌عنوان جایگزین موتورهای آهنربای دائم) مطرح شود و استفادهٔ تجاری از این موتورها شروع شد.

اولین معرفی رسمی موتورهای سنکرون رلوکتانسی، به‌عنوان موتور با کلاس استاندارد انرژی بالاتر از موتورهای القایی در کاربردهای سرعت متغیر، توسط شرکت ABB در سال ۲۰۱۱ میلادی انجام شد. به‌تدریج شرکت‌های دیگر نیز وارد این عرصه شده‌اند و موتور سنکرون رلوکتانسی را برای کاربردهای مختلف مانند پمپ‌ها، فن‌ها، خودروهای برقی ـ هیبریدی و غیره، به‌صورت تجاری عرضه می‌نمایند.

شایان‌ذکر است که با توسعهٔ ابزارهای تحلیل ماشین‌های الکتریکی (مانند نرم‌افزارهای اجزای محدود) و تسهیل تحلیل ساختارهای مختلف ماشین‌های الکتریکی، موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز مجدداً مورد توجه قرار گرفته‌اند و محصولات آن عرضهٔ تجاری شده است. با این مقدمه، موارد زیر را می‌توان بررسی کرد:

۹-۳-۱-۱- زمینه‌های تحقیقاتی

تحقیقات در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی را در حوزه‌های زیر می‌توان دسته‌بندی کرد:

۹-۳-۱-۱-۱- جایگزینی موتورهای القایی

براساس اطلاعات گزارش مرحلهٔ اول این پروژه، ارائهٔ ساختارهای جدید برای موتورهای سنکرون رلوکتانسی عمده فعالیتی بود که در سال‌های قبل از دههٔ ۹۰ میلادی بر روی این موتورها انجام می‌شد. در دههٔ ۹۰ میلادی و با تسهیل استفاده از ادوات الکترونیک قدرت، نیاز به قفسهٔ سنجابی برای به حرکت درآوردن موتورهای سنکرون رلوکتانسی ازبین رفت و ساختارهای فعلی تجاری‌شدهٔ این موتورها و روش‌های درایو آن‌ها بیشتر محصول بررسی‌هایی است که در این دهه انجام شده است. این ساختارها از موتورهای رلوکتانسی، بازدهی بیشتری نسبت به موتورهای القایی داشتند و همواره به‌عنوان جایگزینی برای موتورهای القایی سه‌فاز مطرح شده‌اند. در سال‌های اخیر، به موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی توجه بیشتری شده است.

۹-۳-۱-۱-۲- کاربردهای پرسرعت

کوچک بودن اندازهٔ پل‌هایی که برای حفظ استحکام روتور موتورهای سنکرون رلوکتانسی ایجاد می‌شوند، برای افزایش بازدهی این موتورها ضروری است؛ اما به‌عنوان یک ضعف در ساختار موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای کاربردهای پرسرعت است. باوجود این، به‌دلیل مزایای زیاد موتورهای سنکرون رلوکتانسی، کاربردهای پرسرعت این موتورها نیز در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است و تلاش شده است که مقتضیات کاربردهای پرسرعت در طراحی موتورهای سنکرون رلوکتانسی درنظر گرفته شود و یا ساختارهای

نوین برای روتور آن‌ها ارائه شود. هنوز این موتورها به‌عنوان یک رقیب جدی برای موتورهای القایی و یا آهنربای دائم در کاربردهای پرسرعت مطرح نشده‌اند.

۹-۳-۱-۱-۳- موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز (خط راه‌انداز)

مقالاتی که دربارهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی در قبل از دههٔ ۹۰ میلادی منتشر شده است، بیشتر بر روی ساختار خودراه‌انداز این موتورها تمرکز کرده است. اما به‌دلیل پایین بودن نسبی مشخصات فنی این ساختارها، بعد از توسعهٔ ابزارهای الکترونیک قدرت، کمتر به این نوع موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرداخته شد. در این موتورها تقابلی بین ضریب توان و بازدهی بهینه در شرایط مانا و قدرت راه‌اندازی و سنکرون شدن وجود دارد. ساده بودن استفاده از موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز (چون نیاز به درایو ندارند) مزیت مهم این ساختار است (به‌خصوص در کاربردهای سرعت ثابت). همین مزیت باعث شده است که موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز، در سال‌های اخیر مجدداً مورد توجه قرار گیرند و تحقیقات زیادی روی آن‌ها صورت پذیرد.

۹-۳-۱-۱-۴- افزایش بازدهی موتورهای سنکرون رلوکتانسی

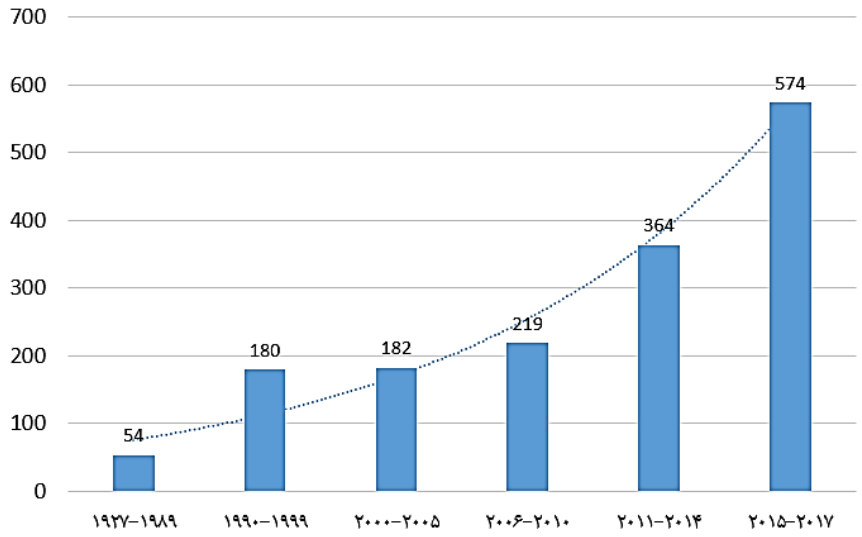
ساختارهای معمول موتورهای سنکرون رلوکتانسی دارای مشخصات فنی (مانند بازدهی و نسبت توان به حجم) بهتری از موتورهای القایی هستند (به‌استثنای ضریب توان)، اما قابل مقایسه با موتورهای آهنربای دائم نیستند. افزودن آهنربا به ساختار موتور سنکرون رلوکتانسی، استفاده از سیم‌پیچی‌های متمرکز و استفاده از هسته‌های جهت‌دار و یا با کیفیت بهتر در ساختار روتور، مواردی است که در سال‌های اخیر پیشنهاد شده است و بررسی‌ها نشان می‌دهد که به کمک این روش‌ها، می‌توان مشخصات فنی موتورهای سنکرون رلوکتانسی را به موتورهای آهنربای دائم نزدیک کرد.

۹-۳-۱-۱-۵- استفاده در خودروهای برقی دوچرخ، وسایل نقلیهٔ سبک و سنگین

هزینهٔ کمتر موتورهای سنکرون رلوکتانسی نسبت به موتورهای آهنربای دائم و امکان استفاده از آهنرباهای فریتی در ساختار آن‌ها، بدون این‌که حجم موتور به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یابد، مزایایی است که باعث شده است در چند سال اخیر، تحقیقات زیادی برای استفاده از موتورهای سنکرون رلوکتانسی در خودروهای برقی ـ هیبریدی سبک و سنگین انجام شود. تحمل اضافه‌بار در موتورهای سنکرون رلوکتانسی بیشتر از موتورهای آهنربای دائم است و محدودهٔ ناحیهٔ تضعیف شار در موتورهای سنکرون رلوکتانسی وسیع‌تر از موتورهای آهنربای دائم است. این مزایا نیز استفاده از این موتورها را در انواع خودروهای برقی جذاب‌تر کرده است. علاوه‌بر ایده‌های فوق برای افزایش کارایی موتورهای سنکرون رلوکتانسی در این کاربرد، استفاده از پل‌های غیرمغناطیسی در ساختار روتور و ساختارهای روتور بیرونی نیز در طراحی‌های انجام‌شده مدنظر بوده است.

در شکل ۰-۲ نمودار تعداد مقالات ارائه‌شده در سایت مؤسسهٔ IEEE در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی در سال‌های مختلف آورده شده است (کلمات کلیدی جستجوشده عبارت است از ۱- Synchronous reluctance motor، ۲- SynRM و ۳- RSM). در این شکل دیده می‌شود که تعداد مقالات با گذر زمان رو به افزایش است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.064



شکل ۰-۲: تعداد مقالات ارائه‌شده در سایت مؤسسهٔ **IEEE** در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی در سال‌های مختلف

باوجود این‌که با گذر زمان، هرچه بازه‌های زمانی اندازه‌گیری تعداد مقالات کاهش یافته است، تعداد مقالات ارائه‌شده رشد قابل‌توجهی نسبت به بازهٔ قبلی داشته است. نمودار این رشد تقریباً نمایی است که براساس برون‌یابی انجام شده است (در شکل به‌صورت نقطه‌چین نمایش داده شده). پیش‌بینی می‌شود که در بازهٔ زمانی سه سال بعدی (۲۰۱۸-۲۰۲۰)، تعداد ۸۵۳ مقاله در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی (در کنفرانس‌ها و مجلات مرتبط با مؤسسهٔ IEEE) ارائه شود.

با توجه به اطلاعات ارائه‌شدهٔ فوق، می‌توان گفت که پیش‌بینی می‌شود فعالیت‌های تحقیقاتی در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی در سال‌های آتی گسترش بیشتری پیدا کند و از استفادهٔ این موتورها در کاربردهای مختلف، بیشتر استقبال شود.

۹-۳-۱-۲- زمینه‌های صنعتی و بازار

عرضهٔ صنعتی موتورهای سنکرون رلوکتانسی اولین بار در سال ۲۰۱۱ توسط شرکت ABB (بخش کشور سوئد) انجام شد. در آن سال ساختارهای معمول موتورهای سنکرون رلوکتانسی و درایو آن‌ها، با ردهٔ استاندارد انرژی IE4، برای جایگزینی موتورهای القایی صنعتی عرضه شدند. با گذشت زمان، موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی و موتورهای سنکرون رلوکتانسی خودراه‌انداز (خط راه‌انداز) نیز در لیست محصولات این شرکت، برای استفاده در کاربردهایی که از موتورهای القایی سه‌فاز معمولاً در آن کاربردها استفاده می‌شود، قرار گرفتند. در سال‌های اخیر، شرکت زیمنس نیز ساختارهای معمول موتور سنکرون رلوکتانسی را برای همین کاربردها تولید می‌کند.

ازبین شرکت‌های کوچک‌تر تولیدکنندهٔ موتورهای الکتریکی، می‌توان به شرکت ایتالیایی REEL اشاره کرد که تا توان ۴۵۰ کیلووات برای کاربردهای صنعتی جایگزین موتورهای القایی و همچنین، موتورهای سنکرون رلوکتانسی با کاربرد کنترلی و یا گشتاور بالا تولید می‌کند. شرکت ایتالیایی SME و شرکت روسی EMACH نیز نمونه‌های دیگری از تولیدکنندگان موتورهای سنکرون رلوکتانسی در این رده هستند. شرکت REGAL نیز که در زمینهٔ تولید کمپرسور فعالیت می‌کند، عنوان نموده است که برنامه‌ای تحقیقاتی برای استفاده از موتورهای سنکرون رلوکتانسی در این کاربردها دارد.

در زمینهٔ تولید موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای استفاده در کاربردهای کششی، می‌توان به شرکت Danfos اشاره کرد که این شرکت، موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی برای استفاده در خودروهای برقی سبک و سنگین و همچنین، شناورهای دریایی (تا توان ۴ مگاوات) تولید می‌کند. شرکت ایتالیایی SME نیز موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی، برای کاربردهای

کششی تولید می‌نماید. شرکت انگلیسی RICARDO نیز اعلام کرده است که در این زمینه مشغول به انجام فعالیت‌های تحقیقاتی است.

در جستجوهای اینترنتی، اطلاعات دقیقی از آمار فروش موتورهای سنکرون رلوکتانسی پیدا نشد. اما اطلاعات فوق نشان می‌دهد که شرکت‌های بزرگ تولیدکنندهٔ موتور الکتریکی، عرضهٔ صنعتی موتورهای سنکرون رلوکتانسی را برای جایگزینی موتورهای القایی شروع کرده‌اند و در کنار این شرکت‌های بزرگ، شرکت‌های دیگری نیز هستند که در این زمینه فعالیت می‌کنند و یا برای تولید این موتورها برنامه‌ریزی می‌کنند. بنابراین، در سال‌های آینده می‌توان انتظار داشت که حجم بازار موتورهای سنکرون رلوکتانسی گسترش پیدا کند و رشد یابد. با توجه به حجم استفادهٔ بسیار زیاد از موتورهای القایی سه‌فاز در صنعت فعلی دنیا، بازار بالقوهٔ بسیار بزرگی برای موتورهای سنکرون رلوکتانسی، در سال‌های آینده می‌توان پیش‌بینی کرد.

با استدلال مشابه و با توجه به برنامه‌ریزی در کشورهای مختلف برای توسعهٔ استفاده از خودروهای برقی و هزینهٔ زیاد موتورهای آهنربای دائم، می‌توان گفت بازار موتورهای سنکرون رلوکتانسی (با آهنربای کمکی) نیز به‌تدریج رشد خواهد کرد. بنابراین، حجم بازار بالقوهٔ این موتورها نیز در سال‌های آتی قابل توجه است.

۹-۳-۱-۳- حمایت از تحقیقات در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی

با بررسی اطلاعات ارائه‌شده در گزارش مرحلهٔ اول پروژه، می‌توان گفت که حمایت‌های مالی انجام‌شده از تحقیقات در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی به دسته‌های زیر قابل تقسیم است:

۱- حمایت‌های صرفاً دولتی از تحقیقات اساتید دانشگاهی: بیشتر مقالات ارائه‌شده در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی از این جنس هستند که به دو صورت انجام می‌شود:

أ. صرف حمایت از تحقیقات در زمینهٔ موتورهای الکتریکی که مانند سایر حمایت‌های دولتی در قالب اعطای اعتبار محدود به پژوهشگران و یا مراکز پژوهشی دانشگاهی انجام می‌شود. ارائهٔ این اعتبارات بخشی از وظایف سازمان‌های دولتی حامی تحقیقات، مانند سازمان‌های NSERC در کشور کانادا، DFG در کشور آلمان و EPSRC کشور انگلیس است.

ب. تعریف برنامه‌ای بلندمدت و بررسی و امکان‌سنجی استفاده از موتورهای سنکرون رلوکتانسی در اجزای محصولات خروجی این برنامه. نمونه‌هایی از این حمایت‌ها عبارتند از پروژهٔ MALET در ایتالیا، حمایت‌های مالی (مطرح‌شده در گزارش مرحلهٔ قبل) ازطرف مؤسسهٔ ژاپنی NEDO، حمایت مالی شرکت Hydro Quebec از گروه PEER در دانشگاه کنکوردیا.

۲- حمایت‌های مالی که متشکل از کنسرسیومی از یک سازمان دولتی و چند شرکت تولیدکنندهٔ کاربر موتورهای الکتریکی (معمولاً شرکت‌های خودروساز) است. این حمایت‌ها به‌دلیل پیش‌بینی امکان ایجاد یک مشکل یا بحران در فعالیت‌های شرکت‌های تولیدکننده (مانند وابستگی بیش‌ازحد به آهنرباهای کمیاب خاکی که در انحصار کشور خاصی است) و یا در محیط‌زیست صورت می‌گیرد. در گزارش مرحلهٔ اول، دو نمونه از این کنسرسیوم‌هایی که برای حمایت از تحقیقات در زمینهٔ موتورهای الکتریکی تشکیل شده است (و در آن از تحقیقات در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی نیز حمایت شده است) اشاره شده است. این حمایت‌ها در کشور آمریکا (وزارت انرژی و شرکت جنرال الکتریکی) و در کشور انگلیس (کنسرسیومی از مؤسسهٔ EPSRC و ۲۰ شرکت تولیدکنندهٔ دیگر) انجام شده است.

۳- حمایت‌های مالی که ازطرف یک شرکت تولیدکننده، برای رفع نیازهای فعلی و یا برنامه‌های آتی شرکت انجام می‌شود. حمایت مالی شرکت ABB از دانشگاه KTH برای کسب دانش فنی موتورهای سنکرون رلوکتانسی و حمایت شرکت انگلیسی Cummins Generator Technologies برای طراحی موتورهای سنکرون رلوکتانسی با سیم‌پیچی متمرکز (دانشگاه نیوکاسل) انجام شده است، نمونه‌ای از این حمایت‌ها است.

۹-۳-۱-۴- چرخهٔ عمر فناوری

در این گزارش نشان داده شد که تحقیقات در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی در سال‌های اخیر رشد قابل‌توجهی داشته است و پیش‌بینی می‌شود که تحقیقات در هر پنج زمینهٔ اشاره‌شده در این گزارش، به‌خصوص در کاربردهای سرعت‌بالا (با توجه به استدلال‌هایی که در گزارش مرحلهٔ اول، مبنی بر پیگیری این مسئله ازسوی شرکت ABB ارائه شد)، در سال‌های آتی رشد یابد. از طرف دیگر، بررسی‌ها نشان می‌دهد که تعداد تولیدکنندگان موتورهای سنکرون رلوکتانسی در کاربردهای خودروهای برقی ـ هیبریدی و سایر سیستم‌های حمل‌ونقل الکتریکی و همچنین، در کاربردهای صنعتی به‌عنوان جایگزین موتورهای سه فاز القایی، نیز در آینده بیشتر می‌شود.

بنابراین اطلاعات، می‌توان گفت که چرخهٔ عمر فناوری موتورهای سنکرون رلوکتانسی در مرحلهٔ رشد و بلوغ قرار دارد.

۹-۳-۲- موتورهای سوئیچ رلوکتانس

بیش از ۱۰۰ سال از معرفی اولیهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس می‌گذرد. با ایجاد دسترسی زیاد به تجهیزات الکترونیک قدرت، موتورهای سوئیچ رلوکتانس از دههٔ ۶۰ میلادی مجدداً مورد توجه قرار گرفتند. در دههٔ ۹۰ میلادی عنوان می‌شد که این موتورها امکان جایگزینی با موتورهای القایی صنعتی را دارند. باوجود این، به‌دلیل نویز صوتی زیادی که از این موتورها تولید می‌شود و همچنین مسائلی مانند ریپل گشتاور موتور، مانع از توسعهٔ زیاد کاربرد آن‌ها در صنعت و تجهیزات صنعتی شد.

در دههٔ اخیر و پس از افزایش قیمت آهنرباهای دائم و ضرورت جایگزینی موتورهای آهنربای دائم در خودروهای برقی ـ هیبریدی، ارائهٔ ساختارهای جدید و تلاش برای افزایش بازده موتورهای سوئیچ رلوکتانس مجدداً مورد توجه مراکز تحقیقاتی قرار گرفته است.

۹-۳-۲-۱- زمینه‌های تحقیقاتی

در سال‌های اخیر ساختارهای جدیدی برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس، با هدف کاهش مشکلات ریپل گشتاور و نویز صوتی این موتورها ارائه شده است. می‌توان گفت که عمدهٔ این تحقیقات تلاش برای کاربردی شدن این موتورها در انواع خودروهای برقی ـ هیبریدی است. در این رابطه، ایده‌های مختلفی مطرح شده است:

۱- استفاده از ساختارهای شار محوری و به‌صورت درون چرخ در خودروهای برقی ـ هیبریدی؛
۲- استفاده از ساختارهای دو استاتوره؛
۳- استفاده از ساختارهای روتور چندبخشی، استاتور چندبخشی و یا استاتور و روتور چندبخشی به‌صورت هم‌زمان، استفاده از استاتورهای E شکل و C شکل در موتورهای پیشنهادی؛
۴- استفاده از مواد با کیفیت بالاتر و تلفات هستهٔ کم در هستهٔ استاتور و روتور برای رساندن بازده موتورهای سوئیچ رلوکتانس به سطح بازده موتورهای آهنربای دائم؛
۵- انجام بهینه‌سازی‌های مختلف در طراحی موتور و درایو در ساختار معمول موتور سوئیچ رلوکتانس.

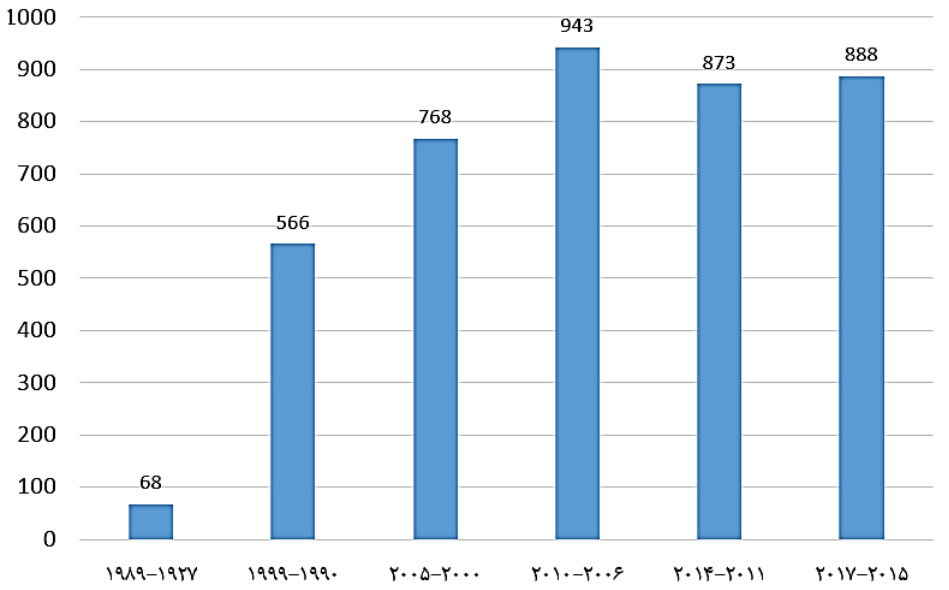
ایده‌های دیگری نیز برای افزایش بازده و کاهش نویز صوتی و ریپل گشتاور در ساختارهای معمول موتورهای سوئیچ رلوکتانس (غیر از بهینه‌سازی ساختار موتور یا درایو آن) ارائه شده است:

۱- اریب کردن روتور؛
۲- افزایش تعداد قطب‌های روتور (تعداد قطب‌های روتور بیش از تعداد قطب‌های استاتور باشد)؛
۳- سیم‌پیچی نیمی از دندانه‌های استاتور؛
۴- چندلایه کردن موتور.

البته باید توجه داشت که بیشتر ایده‌های مطرح‌شده، همان‌طور که در گزارش مرحلهٔ اول پروژه نیز بررسی شده است، یا به پیچیدگی ساخت موتور و درنتیجه هزینهٔ تمام‌شدهٔ آن می‌افزایند (مانند ساختارهای دو استاتوره یا چندبخشی) و یا با بهبود مشکلاتی مانند نویز صوتی و ریپل گشتاور، باعث افت بازدهی انرژی موتور می‌شوند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

در شکل ۰-۳، نمودار تعداد مقالات ارائه‌شده در سایت مؤسسهٔ IEEE در زمینهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس در سال‌های مختلف آورده شده است (کلمات کلیدی جستجوشده عبارت است از ۱- Switched Reluctance، ۲- SRM و ۳- SR Motor). در این شکل دیده می‌شود که تعداد مقالات تا سال ۲۰۱۰ رو به افزایش بوده است و پس از آن، در بازه‌های سه‌ساله، تقریباً ثابت باقی مانده است. با توجه به توضیحات فوق، پیش‌بینی می‌توان کرد که تعداد مقالات در زمینهٔ این موتورها، در بازهٔ سه‌سالهٔ آینده (۲۰۱۸-۲۰۲۰)، وضع موجود را حفظ نماید؛ یعنی در حدود ۸۸۰ مقاله در زمینهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس (در کنفرانس‌ها و مجلات مرتبط با مؤسسهٔ IEEE) ارائه شود. به عبارت دیگر، پیش‌بینی می‌شود فعالیت‌های تحقیقاتی در زمینهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس در سال‌های آتی، با حفظ وضعیت موجود ادامه پیدا کند.



شکل ۰-۳: تعداد مقالات ارائه‌شده در سایت مؤسسهٔ **IEEE** در زمینهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس در سال‌های مختلف

۹-۳-۲-۲- زمینه‌های صنعتی و بازار

کاربردهای پرسرعت که معمولاً نویز صوتی موتورهای الکتریکی در آن، به‌دلیل ماهیت پرسروصدای بار مکانیکی، اهمیتی ندارند، یکی از زمینه‌هایی است که موتورهای سوئیچ رلوکتانس کاربرد پیدا کرده‌اند. جاروبرقی‌های خانگی (برنامهٔ آیندهٔ شرکت Domel) و صنعتی (محصولات شرکت Ameteck) و کمپرسورهای پرسرعت صنعتی (شرکت CompAir)، ازجمله این موارد هستند. در سایر موارد، موتورهای سوئیچ رلوکتانس در تجهیزات صنعتی و به‌عنوان جایگزین موتورهای القایی، تاکنون کاربرد زیادی پیدا نکرده‌اند.

شرکت SR Drives شناخته‌شده‌ترین شرکت تولیدکنندهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس است. شایان‌ذکر است که اخیراً، شرکت Regal نیز اعلام کرده است که درحال تحقیق دربارهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس در بازهٔ توانی ۰/۵ تا ۶۰۰ کیلووات، به‌منظور جایگزینی آن‌ها با موتورهای القایی در کاربردهای صنعتی است.

در بخش استفاده از این موتورها در تجهیزات حمل‌ونقل برقی، به استفادهٔ شرکت LeTourneau Inc از موتورهای سوئیچ رلوکتانس (توان ۱۵۰ کیلووات) در لودرها و همچنین تراموا، اسکوترها و تراک‌های دستی تولیدی این شرکت اشاره کرد.

۹-۳-۲-۳- حمایت از تحقیقات در زمینهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس

با بررسی اطلاعات ارائه‌شده در گزارش مرحلهٔ اول پروژه، می‌توان گفت که حمایت‌های مالی انجام‌شده از تحقیقات در زمینهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس به دسته‌های زیر قابل تقسیم است:

۱- حمایت‌های صرفاً دولتی از تحقیقات اساتید دانشگاهی: بیشتر مقالات ارائه‌شده در زمینهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس از این جنس هستند که به دو صورت انجام می‌شود:

أ. صرف حمایت از تحقیقات در زمینهٔ موتورهای الکتریکی که مانند سایر حمایت‌های دولتی در قالب اعطای اعتبار محدود به پژوهشگران یا مراکز پژوهشی دانشگاهی انجام می‌شود. این نکته از اطلاعات ارائه‌شده در بخش قدردانی و تشکر مقالات ارائه‌شده قابل فهم است و اطلاعات ناچیزی ازطرف حامیان مالی در این زمینه منتشر شده است.

ب. تعریف برنامه‌ای بلندمدت و بررسی و امکان‌سنجی استفاده از موتورهای سوئیچ رلوکتانس در اجزای محصولات خروجی این برنامه. حمایت مالی وزارت انرژی آمریکا از دانشگاه Texas at Dallas (بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۵) و با هدف کاهش استفاده از آهنرباهای دائم کمیاب خاکی در کاربردهای خودروهای برقی و انرژی‌های نو (موتور سوئیچ رلوکتانس دو استاتوره ۱۰۰ کیلوواتی طراحی و ساخته شد)، تنها نمونهٔ منتشرشده در این زمینه است.

۲- حمایت‌های مالی که متشکل از کنسرسیومی از یک سازمان دولتی و چند شرکت تولیدکنندهٔ کاربر موتورهای الکتریکی (معمولاً شرکت‌های خودروساز) است. این حمایت‌ها به‌دلیل پیش‌بینی امکان ایجاد یک مشکل یا بحران در فعالیت‌های شرکت‌های تولیدکننده (مانند وابستگی بیش‌ازحد به آهنرباهای کمیاب خاکی که در انحصار کشور خاصی است) و یا در محیط‌زیست صورت می‌گیرد. پروژهٔ ونوس و پروژهٔ آرموا در اتحادیهٔ اروپا و پروژهٔ CPED در کشور دانمارک نمونه‌ای از این نوع حمایت‌های مالی است. دو فعالیت مشابه نیز در کشور انگلستان با مشارکت دولت و چند شرکت تولیدی انجام شده است.

۹-۳-۲-۴- چرخهٔ عمر فناوری

در این گزارش نشان داده شد که تحقیقات در زمینهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس در سال‌های اخیر حجم زیاد و تقریباً ثابتی داشته است و پیش‌بینی می‌شود که وضعیت موجود (حجم تحقیقات در زمینهٔ این موتورها)، به‌دلیل مزیت‌های موتور سوئیچ رلوکتانس، در سال‌های آتی نیز حفظ شود (به‌خصوص در زمینهٔ حمل‌ونقل برقی). از طرف دیگر، بررسی‌ها نشان می‌دهد که تعداد تولیدکنندگان موتورهای سوئیچ رلوکتانس رشد چندانی نداشته‌اند و اخیراً دو شرکت اعلام کرده‌اند که در این زمینه‌ها مشغول به فعالیت‌های پژوهشی هستند.

بنابراین اطلاعات، می‌توان گفت که چرخهٔ عمر فناوری موتورهای سوئیچ رلوکتانس در مرحلهٔ رشد و بلوغ قرار دارد.

۹-۳-۳- جمع‌بندی و ارائهٔ پیشنهاد

بررسی‌های فوق دربارهٔ وضعیت فعلی و پیش‌بینی وضعیت آیندهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی و سوئیچ رلوکتانس نشان می‌دهد که:

۱- موتورهای سنکرون رلوکتانسی، کاربرد صنعتی بیشتری از موتورهای سوئیچ رلوکتانس پیدا کرده‌اند و پیش‌بینی می‌شود که موتورهای سنکرون رلوکتانسی حجم بازار بسیار بزرگ‌تری از موتورهای سوئیچ رلوکتانس داشته باشند. بنابراین، در طرح توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی و ازبین این دو موتور، انجام هزینه برای دستیابی به فناوری موتورهای رلوکتانسی دارای اولویت بیشتری است.

۲- در بررسی نحوهٔ حمایت از تحقیقات در زمینهٔ موتورهای رلوکتانسی مشخص شد که این حمایت‌ها به سه صورت انجام می‌شود که عبارتند از:

الف) حمایت‌های دولتی؛ شامل حمایت مالی برای انجام تولیدات علمی و برنامه‌های بلندمدت توسعهٔ فناوری.

ب) حمایت‌های در قالب کنسرسیومی از دولت و شرکت‌های خصوصی؛

ج) حمایت‌های شرکت‌های خصوصی برای تأمین نیازهای آن‌ها.

با توجه به وضعیت فعلی صنعت کشور، برای توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی بیشتر با استفاده از روش حمایت‌های مستقیم دولتی می‌توان به دستیابی و توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی کمک کرد. با توجه به اولویت یافتن موتورهای سنکرون رلوکتانسی

نسبت به موتورهای سوئیچ رلوکتانس، پیشنهاد می‌شود که برای دستیابی به فناوری موتورهای سنکرون رلوکتانسی در کاربردهای مختلف، علاوه‌بر مدل ارائهٔ تسهیلات حمایتی به‌منظور افزایش تولیدات علمی (مانند طرح بهتام پژوهشگاه نیرو) برای حمایت از ایده‌های نو در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی، از مدل تعریف برنامه‌های بلندمدت، برای رسیدن به نمونه‌های نیمه‌صنعتی و اجرای طرح‌های پایلوت استفاده شود. همچنین، برای دستیابی به فناوری موتورهای سوئیچ رلوکتانس در کاربردهای مختلف، از مدل ارائهٔ تسهیلات حمایتی برای افزایش تولیدات علمی استفاده شود.

۹-۴- ترسیم چشم‌انداز و تعیین اهداف کلان

۹-۴-۱- چشم‌انداز توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی

در چشم‌انداز ترسیم‌شده برای توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کشور، که در این فصل نیز به آن اشاره شد، نکات زیر مورد توجه قرار گرفته است:

۱- مشارکت همهٔ ذی‌نفعان حوزهٔ فناوری موتورهای الکتریکی؛
۲- لزوم افزایش بازدهی موتورهای الکتریکی مورداستفاده در کشور؛
۳- پیشرو بودن در امر پژوهش در زمینهٔ موتورهای الکتریکی؛
۴- دارای جایگاه اول بودن در منطقه در زمینهٔ طراحی و تولید موتورهای الکتریکی؛
۵- وجود یک کسب‌وکار پایدار و پویا در زمینهٔ طراحی و تولید موتورهای الکتریکی؛
۶- جذب سرمایه‌گذاران داخلی و خارجی در زمینهٔ طراحی و تولید موتورهای الکتریکی؛
۷- جایگاه نخست در کشور در مصرف تولیدات داخلی.

قطعاً مشارکت تمامی ذی‌نفعان، از ضروریات توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی است. توجه به توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی، به‌دلیل بازدهی بالای این موتورها نسبت به موتورهای القایی، تأمین‌کنندهٔ نکتهٔ دوم مورد تأکید در چشم‌انداز توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی است. سایر نکات مطرح‌شده در این چشم‌انداز، مواردی است که در ترسیم چشم‌انداز توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی نیز (متناسب با وضعیت فناوری) ضروری است مورد توجه قرار گیرد.

۹-۴-۱-۱- خلاصهٔ وضعیت فناوری در دنیا و داخل کشور

در قسمت قبلی این فصل، وضعیت فناوری موتورهای رلوکتانسی در دنیا مورد بررسی قرار گرفت و عنوان شد که موتورهای رلوکتانسی در دههٔ اخیر به‌شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند و در آیندهٔ نزدیک نیز همچنان، نیاز به تحقیقات دربارهٔ موتورهای رلوکتانسی احساس می‌شود. در زمینهٔ تولیدات صنعتی و بازار، وضعیت موتورهای سنکرون رلوکتانسی و موتورهای سوئیچ رلوکتانس از هم متفاوت است؛ محصولات مرتبط با موتورهای سنکرون رلوکتانسی در همین مدت‌زمان وارد بازار شده‌اند و تعداد شرکت‌های تولیدکننده (هرچند فعلاً محدود هستند) درحال افزایش است. تمرکز این شرکت‌ها نیز در قارهٔ اروپا و کشور آمریکا است. همچنین، عنوان شد که برخی شرکت‌ها نیز برای عرضهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس درحال برنامه‌ریزی هستند.

در گزارش مرحلهٔ اول این پروژه، وضعیت تحقیقات داخلی در زمینهٔ موتورهای رلوکتانسی و امکان تولید آن‌ها در داخل کشور بررسی شد و عنوان شد که تقریباً تمامی اجزای چرخهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی در داخل کشور قابل دستیابی است. از طرف دیگر، پتانسیل خوبی در کشور برای استفاده از موتورهای رلوکتانسی وجود دارد:

۱- حجم وسیع و متنوعی از موتورهای القایی سه‌فاز در صنایع کشور و در تجهیزات صنعتی‌ای که در کشور تولید می‌شوند، استفاده می‌شود که این موتورها (مخصوصاً در کاربردهایی مانند پمپ‌ها، فن‌ها و موارد مشابه) دارای پتانسیل بالقوه برای جایگزینی با موتورهای سنکرون رلوکتانسی هستند.

۲- در مرحلهٔ چهارم از پروژه با عنوان «کاربرد ماشین‌های الکتریکی در سیستم‌های حمل‌ونقل الکتریکی»، فعالیت‌های انجام‌شده در داخل کشور برای طراحی و نمونه‌سازی و همچنین، برای تولید خودروهای برقی دوچرخ و خودروهای سبک شهری بررسی شده است. با توجه به اطلاعات ارائه‌شده در این گزارش، تعداد قابل‌قبولی از شرکت‌های کوچک وجود دارند که درحال‌حاضر در تولید خودروهای برقی (دوچرخ و سبک شهری) فعالیت می‌کنند و تقریباً تمامی این‌ها از موتورهای الکتریکی آهنربای دائم (وارداتی) در محصولات خود استفاده می‌کنند. موتورهای رلوکتانسی دارای پتانسیل زیادی برای جایگزینی با این موتورها هستند.

۳- در تجهیزات خانگی (مانند کولرهای آبی و گازی، ماشین لباسشویی و غیره) و برخی تجهیزات صنعتی مورد استفاده در ساختمان‌ها (مانند آسانسورها) از موتورهای آهنربای دائم (عمدتاً متکی بر واردات) استفاده می‌شود. در این تجهیزات نیز پتانسیل خوبی برای استفاده از موتورهای رلوکتانسی و جایگزینی آن‌ها با موتورهای آهنربای دائم وجود دارد.

۹-۴-۱-۲- بیانیهٔ چشم‌انداز توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی

با توضیحات ارائه‌شده در قسمت فوق، می‌توان گفت که سه مورد مطرح‌شده در چشم‌انداز توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی، شامل پیشرو بودن در امر پژوهش، جایگاه اول منطقه در طراحی و تولید، و جایگاه نخست در کشور در زمینهٔ مصرف تولیدات داخلی، در زمینهٔ موتورهای رلوکتانسی نیز ممکن و قابل دسترس است. درخصوص کسب‌وکارهای پایدار و پویا در زمینهٔ موتورهای رلوکتانسی و همچنین، جذب سرمایه‌گذاران داخلی و خارجی، لازم است علاوه‌بر وضعیت توسعهٔ فناوری در دنیا، افق زمانی موردنظر برای ترسیم چشم‌انداز نیز مورد توجه قرار گیرد. با توجه به این‌که چشم‌انداز ترسیم‌شده برای توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی، برای افق زمانی ۱۰ ساله (برای سال ۱۴۰۴ هجری شمسی) است، مناسب است که افق زمانی برای ترسیم چشم‌انداز موتورهای رلوکتانسی نیز، سال ۱۴۰۴ هجری شمسی درنظر گرفته شود.

با توجه به این‌که تاکنون اقدام جدی و جامعی در زمینهٔ تجاری‌سازی و تولید صنعتی موتورهای رلوکتانسی (در هیچ‌یک از کاربردهای مطرح‌شده در گزارش) در کشور انجام نشده است و از طرف دیگر، دانش طراحی این موتورها نیز در کشور تدوین نشده است، شاید بهتر باشد از این گزاره برای افق زمانی مشخص‌شده برای ترسیم چشم‌انداز توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی استفاده شود: **«ایجاد و حمایت از کسب‌وکارهای پایدار در زمینهٔ موتورهای رلوکتانسی در قالب شرکت‌های دانشگاهی یا دانش‌بنیان»**.

بنابراین، چشم‌انداز توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی تا سال ۱۴۰۴ هجری شمسی (براساس چشم‌انداز توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی) به‌صورت زیر قابل بیان (یا اصلاح) است:

«با اتکا به خداوند متعال و تکیه بر توانمندی‌های داخلی و مشارکت همهٔ ذی‌نفعان، فناوری موتورهای رلوکتانسی در کشور و در افق ۱۴۰۴، حوزه‌ای است پیشرو در امر پژوهش، دارای جایگاه اول منطقه در عرصهٔ طراحی و تولید که کسب‌وکار پایدار و پویا در قالب شرکت‌های دانشگاهی یا دانش‌بنیان، در آن ایجاد و مورد حمایت قرار می‌گیرد.»

۹-۴-۲- اهداف کلان توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی

برای انتخاب یکی از روش‌های سه‌گانه، شامل رویکرد بالا به پایین، رویکرد پایین به بالا و رویکرد ترکیبی (مطرح‌شده در ابتدای این فصل)، برای تعیین اهداف کلان توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی، نیاز است که به وضعیت فعلی فناوری در دنیا و در داخل کشور و همچنین، چشم‌انداز توسعهٔ فناوری، به‌صورت هم‌زمان توجه شود. با توجه به این‌که سابقهٔ عرضهٔ تجاری محصولات فناوری موتورهای رلوکتانسی در کاربردهای مختلف بسیار کم است و همچنین، در چشم‌انداز توسعهٔ فناوری تکیهٔ زیادی بر ایجاد جایگاه مناسب از منظر دانش طراحی و ساخت موتورهای رلوکتانسی شده است، به‌نظر می‌رسد که رویکرد بالا به پایین در ترسیم اهداف کلان توسعهٔ فناوری، روش مناسبی ازبین گزینه‌های فوق‌الذکر است. در این روش، هدف ترسیم آینده‌ای مطلوب برای توسعهٔ فناوری است.

۱- کسب دانش فنی طراحی، ساخت و به‌کارگیری موتورهای سنکرون رلوکتانسی در تمامی کاربردها و بازه‌های توانی؛

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

۲- کسب دانش فنی طراحی، ساخت و به‌کارگیری موتورهای سوئیچ رلوکتانس در کاربردهای کششی؛
۳- تجاری‌سازی محصولات فناوری موتورهای رلوکتانسی در کاربردهای کششی، صنعتی و تجهیزات خانگی.

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

فصل دهم: بررسی چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی و پیشنهاد اقدامات مقابله با این چالش‌ها

 DOI: 10.30503/nripress.2020.064

۱۰-۱- مقدمه

جهت‌گیری‌های پشتیبان مشتمل بر کلیهٔ اهداف، راهکارها و سیاست‌هایی هستند که به‌منظور محقق نمودن چشم‌انداز و برای جهت‌گیری‌های کلان طراحی می‌شوند. درحقیقت این جهت‌گیری‌ها را می‌توان راه‌های میانی و خرد برای دستیابی به اهداف کلان توسعهٔ فناوری دانست. بر همین اساس، در گزارشی با عنوان «تحلیل نظام نوآوری و شناسایی چالش‌های پیش رو و تدوین برنامهٔ سیاست‌ها و اقدامات» مربوط به مرحلهٔ چهارم پروژه با عنوان «تدوین سند راهبردی و نقشه راه توسعهٔ فناوری‌های طراحی، ساخت و تدوین دانش فنی انواع موتورهای موردنیاز در صنعت برق ایران» و در قالب نظام نوآوری، چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی به‌تفصیل بررسی شدند و اقدامات لازم برای مقابله با آن‌ها پیشنهاد شد. این چالش‌ها در قالب شش کارکرد نظام توسعهٔ فناوری زیر بررسی شدند:

۱- توسعه و انتشار دانش،
۲- کارآفرینی،
۳- شکل‌دهی به بازار،
۴- جهت‌دهی به سیستم،
۵- مشروعیت بخشی،
۶- بسیج منابع مالی.

در یک دسته‌بندی کلی، این چالش‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: اول، چالش‌هایی که مربوط به اقتصاد کلان کشور می‌شود و دوم، چالش‌هایی که خاص حوزهٔ فناوری موتورهای الکتریکی است. تمامی این چالش‌ها (به‌استثنای مواردی که در سال‌های اخیر به آن‌ها پرداخته شده است، مانند تدوین استانداردهای انرژی) در برابر توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی نیز وجود دارد و در این گزارش تلاش می‌شود با کمک گرفتن از بررسی‌های فوق‌الذکر، آن دسته از چالش‌هایی که ارتباط مستقیم به توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی دارد، توضیح بیشتری داده شود و در ادامه، راهکارهای مقابله با آن‌ها بررسی شود. برای این منظور، ابتدا کارکردهای فوق‌الذکر در نظام نوآوری، به‌صورت مختصر توضیح داده می‌شود و سپس، چالش‌ها و اقدامات خاص فناوری موتورهای رلوکتانسی در این حوزه‌ها بررسی می‌شود.

۱۰-۲- کارکرد توسعه و انتشار دانش

خلق دانش را باید به‌عنوان پیش‌نیازی ضروری برای توسعهٔ فناوری درنظر گرفت. افزایش تعداد خروجی‌ها در تولید دانش می‌تواند منجر به پیدایش گزینه‌های فناورانه و کاربردی بیشتری شود. فعالیت‌های توسعهٔ دانش می‌توانند منبع داخلی (درون‌زا) یا خارجی (انتقال فناوری) داشته باشند.

انتشار دانش شامل فعالیت‌هایی است که هدف آن، تسهیم (پراکنده‌سازی و به‌اشتراک‌گذاری) دانش و اطلاعات است. بنابراین، مهم‌ترین نقش کارکرد انتشار دانش، ایجاد یادگیری تعاملی است. وجود روابط و در حالت پیچیده‌تر، شبکه‌هایی از بازیگران از پیش‌نیازهای این کارکرد به‌شمار می‌رود. مهم‌ترین نقش یک شبکه، آسان‌سازی تبادل اطلاعات در بین بازیگران است.

در جدول ۱۰-۰، چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد توسعه و انتشار دانش که در پروژهٔ فوق‌الذکر تهیه شده است، آورده شده است. با توجه به این جدول، می‌توان گفت که عناوین اصلی چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی عبارت است از:

۱- عدم توجه به اولویت‌ها در پژوهش و نبود توان کافی در مؤسسات پژوهشی در تأمین خواسته‌های صنعت؛ این چالش در موتورهای رلوکتانسی (مخصوصاً موتورهای سنکرون رلوکتانسی)، به‌دلیل جدید بودن استفاده از این فناوری در

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

کاربردهای مختلف (نسبت به سایر فناوری‌های موتورهای الکتریکی) و نبودن یک الگوریتم یکپارچه برای طراحی این موتور، جدی‌تر است.

۲- رعایت نشدن حقوق معنوی صاحبان دانش در تعاملات مختلف بازیگران این حوزه؛

۳- نبودن تعامل سازنده بین بازیگران مختلف حوزهٔ صنعت موتورهای الکتریکی در کشور؛ این چالش دربارهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی، به‌دلیل جدید بودن استفاده از این موتورها در تجهیزات مختلف صنعتی و درنتیجه، آشنا نبودن بخش صنعت با مشخصات فنی این موتور، جدی‌تر است.

جدول ۰-۱: جمع‌بندی چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد توسعه و انتشار دانش

	بازیگران	قوانین و مقررات و استاندارد	تعاملات	زیرساخت
کارکرد توسعه و انتشار دانش	توجه بیش‌ازحد متخصصین کشور به انجام پژوهش‌ها به‌منظور تولید مقالات علمی به‌جای انجام پژوهش‌های نیاز محور	رعایت نشدن حقوق معنوی صاحب پتنت و مشخص نبودن حقوق معنوی محقق و کارفرما	عدم ارتباط صنعت با دانشگاه؛ به‌دلیل ترس از افشای توانمندی‌های خود یا عدم اعتماد و آگاهی از توانمندی‌های دانشگاه و یا به‌دلیل عدم توانایی در تقسیم مسائل بزرگ به چندین پروژهٔ قابل‌درک برای دانشگاه	نبودن آزمایشگاه‌های مناسب در رده‌های توانی مختلف برای تست موتورهای الکتریکی و همچنین آزمایشگاه مرجع سنجش کیفیت مواد اولیه
	نمایشی بودن مراکز R&D شرکت‌های صنعتی		عدم وجود انجمن تخصصی در حوزهٔ موتورهای الکتریکی	دشوار بودن تبادلات مالی برای انتقال فناوری در سطح بین‌المللی
	عدم توانمندی دانشگاه در تأمین نیاز واقعی صنعت		عدم وجود همکاری کافی میان متصدیان توسعهٔ فناوری در به مشارکت گذاشتن دانش کسب‌شده با یکدیگر	عدم وجود پایگاه اطلاعاتی جامع از آخرین دستاوردهای کشور برای عموم محققین، مسئولین و سیاست‌گذاران
	تمرکز ناکافی موضوعات پژوهشی به موضوعات اولویت‌دار و نیازهای کشور		نبود ارتباطات مناسب بین دانشگاه‌های مختلف با یکدیگر	عدم انجام حمایت‌های مادی و معنوی از ایده‌های نوآورانه
	عدم توجه به انتقال دانش طراحی در قراردادهای انتقال فناوری		عدم ارتباط مراکز R&D شرکت‌های صنعتی با دانشگاه‌ها	
			عدم وجود بازار عرضه و تقاضا (کانال صحیح ارتباطی) برای ارتباط صنعت و دانشگاه	ضعف و یا عدم وجود یک منبع اطلاعاتی قوی از آخرین دستاوردهای موتور در دنیا
	فقدان توان طراحی موتورهای با توان بالا		مشکل تأمین هزینه‌های تحقیقاتی برای حل مشکلات بخش صنعت در دانشگاه‌ها	عدم وجود سیستم مدیریت دانش در زمینهٔ موتورهای الکتریکی
			عدم آگاهی دانشگاه از نیاز و توانمندی‌های صنعت	

۴- نبودن زیرساخت‌های مناسب برای توسعه و انتشار دانش در زمینهٔ موتورهای الکتریکی؛ علاوه‌بر مطالب ذکرشده در جدول ۰-۱، دشواری دسترسی به مواد اولیه برای نمونه‌سازی موتورهای سنکرون رلوکتانسی، مانند فولادهای الکتریکی با کیفیت مناسب و آهنربا با ابعاد و کیفیت موردنظر در بازار، چالش‌های مهم دیگری است که در کارکرد توسعهٔ دانش وجود دارد. لازم به توضیح است که مهم‌ترین دلیل برای استفاده از موتورهای سنکرون رلوکتانسی در

کاربردهای مختلف، بازدهی زیاد این موتورها است که در صورت عدم دسترسی به مواد اولیهٔ موردنیاز با کیفیت مناسب، امکان دسترسی عملی به فناوری این موتورها در کاربردهای مختلف وجود ندارد.

با شناخته شدن چالش‌ها، سیاست‌ها و اقدامات مقابله با چالش‌ها نیز کاملاً مشخص می‌شود که این مسئله در مرجع [۱۶۵]، دربارهٔ توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی به‌تفصیل بررسی شده است. سیاست‌ها و اقدامات خاص توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی (چالش‌های چهارگانهٔ فوق‌الذکر) نیز به شرح زیر است:

۱- ایجاد توانمندی لازم در مؤسسات پژوهشی برای ارائهٔ محصولات در حوزهٔ موتورهای رلوکتانسی، با کیفیت موردنیاز بخش صنعت کشور؛ برای این منظور می‌توان از مدل تشکیل گروه‌های پژوهشی خاص برای تمرکز فعالیت‌های پژوهشی آن‌ها در زمینهٔ موتورهای رلوکتانسی (مخصوصاً موتورهای سنکرون رلوکتانسی) استفاده کرد.

۲- نمونه‌سازی موتورهای رلوکتانسی (با اولویت سنکرون رلوکتانسی) برای استفاده در کاربردها و تجهیزات مختلف صنعتی و عرضهٔ نتایج آن به بخش صنعت کشور؛ با توجه به این‌که موتورهای سنکرون رلوکتانسی در بیشتر کاربردهای صنعتی، جایگزین مناسبی برای موتورهای الکتریکی فعلی (القایی سه‌فاز و آهنربایی) مورد استفاده در آن‌ها هستند، لازم است که با اولویت‌بندی این کاربردها (متناسب با نیازهای داخلی) و نمونه‌سازی موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای استفاده در آن‌ها، نتایج حاصل از این کار را برای بخش صنعت کشور تبیین کرد.

۳- آموزش عملکرد و طراحی موتورهای رلوکتانسی در سیلابس درس‌های دانشجویان مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد (مانند درس ماشین‌های الکتریکی مخصوص)؛ هرچند این مسئله دربارهٔ موتورهای سوئیچ رلوکتانس (به‌علت وجود منابع بسیار بیشتر نسبت به موتورهای سنکرون رلوکتانسی) در برخی مراکز دانشگاهی اجرا می‌شود، اما برای موتورهای سنکرون رلوکتانسی، این مسئله عملاً مغفول مانده است. از آنجایی که فارغ‌التحصیلان دانشگاهی، در صنعت کشور مشغول به کار می‌شوند، می‌توان گفت که با آشنایی دانشجویان با این موتور در قالب درس، عملاً به آشنا شدن صنعت کشور با این موتورها کمک می‌شود.

۴- علاوه‌بر راهکار تأمین هزینه‌های تهیهٔ مواد اولیه با کیفیت مناسب برای فعالیت‌های پژوهشی در کشور در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی، از همکاری شرکت‌های تولیدکننده موتورهای الکتریکی که معمولاً دسترسی بیشتری به مواد اولیه با کیفیت مناسب دارند نیز می‌توان در نمونه‌سازی‌های موتورهای رلوکتانسی استفاده کرد.

۱۰-۳- کارکرد کارآفرینی

نقش کارآفرینان، ترجمهٔ دانش فنی موجود در زمینهٔ یک فناوری خاص به زبان موقعیت‌های کاری و انجام پروژه‌های عملیاتی است. همچنین، فعالیت‌های کارآفرینی شامل پروژه‌هایی با هدف اثبات مفید بودن فناوری نوظهور در محیط تجاری است. درحقیقت، کارکرد فعالیت‌های کارآفرینی نقطهٔ جدایش نظام فناوری نوآوری از یک سیستم تحقیق و توسعه است. کارکرد فعالیت‌های کارآفرینی را می‌توان در بخش خصوصی و ازطریق شرکت‌های انتفاعی و نیز ازطریق بازیگران موجود در بخش دولتی تحقق بخشید؛ یعنی بسته به نیاز فناوری و توانایی بازیگران، می‌توان از قابلیت‌های هردو بخش بهره برد.

در جدول ۰-۲، چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد کارآفرینی که در مرجع [۱۶۵] بررسی شده، آورده شده است. همان‌طور که از این جدول پیداست، تقریباً تمام چالش‌های مطرح‌شده دربارهٔ توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد کارآفرینی، در مورد فناوری موتورهای رلوکتانسی نیز صادق است. بنابراین، سیاست‌ها و اقدامات مقابله با این چالش‌ها نیز مشابه اطلاعات ارائه‌شده در مرجع [۱۶۵] است.

شایان‌ذکر است که کارآفرینان در زمینهٔ موتورهای رلوکتانسی (مانند سایر زمینه‌های صنعتی) را می‌توان به دو دسته (غیر از شرکت‌های بزرگ دارای گردش مالی مناسب) تقسیم کرد:

۱- شرکت‌هایی که درحال‌حاضر مشغول به تولید و عرضهٔ تجاری برخی انواع موتورهای الکتریکی به بازار و یا استفاده از موتور الکتریکی تولیدی در شرکت، در یکی از محصولات نهایی آن شرکت (مانند شرکت‌های سازندهٔ خودروهای برقی دوچرخ، سازندگان برخی لوازم‌خانگی) هستند.
۲- شرکت‌های دانشگاهی و هسته‌های فناوری که معمولاً در مراکز رشد یا پارک‌های فناوری مؤسسات پژوهشی کشور مستقر هستند.

برای حمایت از شرکت‌های دستهٔ اول، استفاده از مدل قراردادهای مشارکتی برای تجاری‌سازی موتورهای رلوکتانسی در یک کاربرد خاص (مثلاً دوچرخهٔ برقی)، مدل مناسبی است. در این مدل، فعالیت‌های بازاریابی محصول توسط این شرکت انجام می‌شود. اما شرکت‌هایی که در دستهٔ دوم قرار دارند، علاوه‌بر نیاز به حمایت مالی برای رسیدن به دانش فنی طراحی و ساخت موتور، در بحث تجاری‌سازی موتور نیز نیاز به حمایت دارند؛ به این معنی که سازوکارهایی باید باشند که در موضوعات مربوط به تهیهٔ طرح تجاری و تأمین سرمایه و همچنین، بازاریابی به این دسته از کارآفرینان کمک کنند.

جدول ۰-۲: جمع‌بندی چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد کارآفرینی

	بازیگران	قوانین و مقررات و استاندارد	تعاملات	زیرساخت
کارکرد کارآفرینی	فقدان نهادی برای تسهیل ورود کارآفرینان جدید در حوزهٔ موتورهای الکتریکی	فقدان قواعد و قوانین منسجم و کارآمد لازم برای حمایت از کارآفرینان	عدم وجود ارتباطات مؤثر بین تولیدکنندگان موتورهای الکتریکی	لزوم پرداخت هزینه‌های زیاد برای اخذ مجوز ایجاد و یا توسعه خطوط تولیدی
		عدم وجود قوانین مناسب برای تسهیل فعالیت‌های اداری ـ اجرایی کارآفرینان	نبودن اتحادیهٔ صنف تولیدکنندگان موتورهای الکتریکی برای پیگیری مشکلات تولیدکنندگان	در خارج از شهر تهران، امکان تأمین و حفظ سرمایه‌های انسانی (نیروی متخصص و نیروی کار ماهر) وجود ندارد.
	حجم زیاد نیازهای داخلی و کمبود تولیدکنندگان موتورهای الکتریکی	قوانین موجود در حوزهٔ کار، مشکلات و هزینه‌های سنگین حمایت از نیروی انسانی را فقط برعهدهٔ کارفرما قرار داده است.	عدم استقبال شرکت‌های سازندهٔ موتورهای الکتریکی برای شرکت در نمایشگاه‌های صنعت برق	نبود یک سیستم رقابت سالم در کشور و تأثیر روابط در تأمین سرمایه و سایر حمایت‌های مالی و غیرمالی شرکت‌ها
		عدم وجود قوانین ملزم‌کننده به استفاده از موتورهایی با بازده بالا	عدم وجود نمایشگاه‌های تخصصی در حوزهٔ موتورهای الکتریکی	نبود عزم مدیریتی در حمایت از کارآفرینان
		وجود قواعد و قوانین اضافی و متناقض		ارزش نبودن فعالیت‌های تولیدی در کشور

۱۰-۴- جهت‌دهی به سیستم

به‌علت محدود بودن منابع در دسترس، باید از میان گزینه‌های مختلف فناورانهٔ موجود دست به انتخاب زد. بدون انجام این کار، نیاز و انتظارات بازیگران از روند توسعه ناشناخته باقی می‌ماند و منابع در دامنهٔ وسیعی از گزینه‌ها پراکنده می‌شود و به هدر می‌رود. برای جلوگیری از هدر رفتن منابع، کارکرد جهت‌دهی به سیستم در روند توسعهٔ فناورانه تعریف می‌گردد.

در جدول ۰-۳، چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد جهت‌دهی به سیستم که در مرجع [۱۶۵] بررسی شده، آورده شده است. همان‌طور که از این جدول پیداست، تقریباً تمام چالش‌های مطرح‌شده در مورد توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در این کارکرد، دربارهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی نیز صادق است. بنابراین، سیاست‌ها و اقدامات مقابله با این

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

چالش‌ها نیز مشابه اطلاعات ارائه‌شده در مرجع [۱۶۵] است. شایان‌ذکر است از آنجایی که توسعهٔ استفاده از موتورهای رلوکتانسی (مخصوصاً سنکرون رلوکتانسی) در سال‌های اخیر در دنیا اتفاق افتاده است، می‌توان گفت که درحال‌حاضر، چالش‌های این کاربرد چندان گریبان‌گیر توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی نیست.

جدول ۰-۳: جمع‌بندی چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد جهت‌دهی به سیستم

	بازیگران	قوانین و مقررات و استاندارد	تعاملات	زیرساخت
کارکرد جهت‌دهی به سیستم	مرجعی که به‌عنوان مغز متفکری به پیگیری و شناسایی مشکلات موجود و تصمیم‌گیری منسجم برای رفع آن‌ها بپردازد و از اختیارات کافی برخوردار باشد، در کشور وجود ندارد.	عدم وجود سند راهبردی توسعهٔ صنعت	عدم وجود هماهنگی بین نهادهای سیاست‌گذار مختلف ازجمله وزارت نیرو، وزارت صنعت و ... در زمینهٔ موتورهای الکتریکی	
	ناکافی بودن سیاست‌های دولتی در ایجاد بازار تقاضا در کشور	ناپایداری در برنامه‌ها و سیاست‌های توسعه‌ای کشور		
	عدم وجود حلقهٔ مشترک از وزارت صنایع و نیرو و مراجع ذی‌نفع برای پیشبرد مقررات به نفع توسعهٔ صنعت موتورهای الکتریکی پربازده	عدم وجود برنامهٔ جامع تحقیقات توسعه‌ای		

۱۰-۵- شکل‌دهی به بازار

نیابد انتظار داشت که فناوری‌های نوظهور، توانایی رقابت با فناوری‌های موجود را داشته باشند. بنابراین، نیاز به ایجاد محیطی با هدف افزایش رقابت‌پذیری فناوری نوظهور احساس می‌شود. کارکرد شکل‌گیری بازار، شامل فعالیت‌هایی (مانند حمایت‌های مالی از کاربرد فناوری نوظهور) است که با ارائهٔ امتیازاتی منجر به ایجاد تقاضا برای فناوری می‌گردد. با فعالیت‌های مختلفی می‌توان به تحقق این کارکرد کمک کرد:

- ایجاد مزیت رقابتی به‌وسیلهٔ سیاست‌های مالیاتی بر فناوری و صنایع رقیب؛
- کاهش هزینه‌های مصرف فناوری؛
- وضع آیین‌نامه‌ها و قواعد تنظیم‌کنندهٔ بازار درخصوص فناوری؛
- معافیت‌های مالیاتی بر فناوری؛
- اعطای تسهیلات در صورت استفاده از فناوری؛
- تعیین حداقلی از سهم استفاده از فناوری؛
- اقدامات انجام‌شده برای بازاریابی محصولات تولیدشده از فناوری.

جدول ۰-۴: جمع‌بندی چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد شکل‌دهی به بازار

	بازیگران	قوانین و مقررات و استاندارد	تعاملات	زیرساخت
کارکرد شکل‌دهی به بازار	در زمینهٔ فناوری‌های نوین ایجاد بازار نیازمند حمایت‌های دولتی است که درحال‌حاضر در کشور این امر به‌خوبی انجام نمی‌پذیرد	عدم وجود قوانین لازم برای حذف فعالیت‌های واسطه‌گری	عدم پوشش ریسک استفاده از موتورهای الکتریکی ساخت داخل (به‌خصوص موتورهای الکتریکی با توان بالا) در خطوط تولیدی صنایع کشور	نبودن آزمایشگاه‌های مرجع برای صدور گواهی‌ها و تأییدیه‌های لازم برای موتورهای الکتریکی تولید داخل (مانند تأییدیه Atex برای موتورهای ضدانفجار)
		نبود استانداردهای مناسب برای تجهیزات وارداتی		علاقه در سازمان‌ها (مخصوصاً دولتی) برای خرید خارجی به دلیل تأمین منافع شخصی
	رقابتی نبودن بازار و رانت شرکت‌های دولتی در تصاحب بازار	عدم اجرای صحیح استانداردها برای تجهیزات وارداتی		نبودن اطلاعات میدانی کافی از انواع فناوری‌ها، توزیع توانی و سایر مشخصات فنی موتورها در صنایع و مصارف مختلف
		مناسب نبودن قوانین گمرکی		قیمت غیرواقعی و پایین انرژی در کشور

در جدول ۰-۴، چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد شکل‌دهی به بازار که در مرجع [۱۶۵] بررسی شده، آورده شده است. همان‌طور که از این جدول پیداست، تقریباً تمام چالش‌های مطرح‌شده دربارهٔ توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در این کارکرد، در مورد فناوری موتورهای رلوکتانسی نیز صادق است. بنابراین، سیاست‌ها و اقدامات مقابله با این چالش‌ها نیز مشابه اطلاعات ارائه‌شده در مرجع [۱۶۵] است.

شایان‌ذکر است که علی‌رغم پایین بودن قیمت عرضهٔ انرژی الکتریکی در کشور، موتورهای رلوکتانسی در موارد زیر می‌تواند بازار خوبی پیدا کند که:

۱- مصرف بهینه انرژی در این کاربردها دارای اهمیت زیادی باشد؛ در انواع خودروهای برقی، به‌دلیل این‌که انرژی الکتریکی تغذیه‌کنندهٔ موتور ازطریق باتری‌ها تأمین می‌شود، طبیعی است که بازدهی زیاد موتور الکتریکی مطلوب کاربر است. از آنجایی که موتورهای سنکرون رلوکتانسی آهنربای دائم امکان جایگزینی با موتورهای آهنربای دائم در انواع خودروهای برقی (شامل دوچرخه، موتورسیکلت برقی، ویلچر برقی و غیره) را دارند، موتورهای سنکرون رلوکتانسی می‌تواند بازار خوبی در این کاربردها داشته باشند.

۲- هزینهٔ تمام‌شدهٔ ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی با قیمت موتور فعلی مورد استفاده در آن کاربرد قابل رقابت باشد؛ هزینهٔ تمام‌شدهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز با قیمت تمام‌شدهٔ موتورهای القایی سه‌فاز می‌تواند رقابت کند (البته نه در کاربردهای توان بالا)، بنابراین می‌توان گفت که موتورهای سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز (برای جایگزینی موتورهای القایی سه‌فاز) می‌تواند بازار خوبی پیدا کند. به‌صورت مشابه، در کاربردهای دور متغیر که از موتورهای آهنربای دائم یا القایی سه‌فاز استفاده می‌شود (مانند موتورهای الکتریکی سیستم‌های تهویهٔ مطبوع) نیز امکان توسعهٔ این بازار وجود دارد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

۱۰-۶- بسیج منابع

کارکرد تأمین منابع، به تخصیص سرمایه‌های مالی، انسانی، مکمل و مواد موردنیاز برای توسعهٔ فناوری می‌پردازد. این کارکرد می‌تواند ازطرف دولت، صنعت و یا هر بازیگر مؤثر دیگری در توسعهٔ فناوری، برآورده گردد. با افزایش سطح بلوغ فناوری نوظهور، انتظار می‌رود سهم بخش خصوصی در تأمین منابع موردنیاز نیز بیشتر شود.

در جدول ۰-۵، چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد بسیج منابع که در مرجع [۱۶۵] بررسی شده، آورده شده است. همان‌طور که از این جدول پیداست، تقریباً تمام چالش‌های مطرح‌شده دربارهٔ توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در این کارکرد، در مورد فناوری موتورهای رلوکتانسی نیز صادق است. بنابراین، سیاست‌ها و اقدامات مقابله با این چالش‌ها نیز مشابه اطلاعات ارائه‌شده در مرجع [۱۶۵] است.

جدول ۰-۵: جمع‌بندی چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد بسیج منابع

	بازیگران	قوانین و مقررات و استاندارد	تعاملات	زیرساخت
کارکرد بسیج منابع	نبود صندوق تأمین مالی دولتی به‌منظور حمایت از صنعت‌کاران	عدم وجود برنامهٔ مشخص و مدون برای تأمین منابع مالی موردنیاز در حوزهٔ موتورهای الکتریکی	دشوار بودن تبادلات مالی برای انتقال فناوری در سطح بین‌المللی	وابستگی بعضی مواد اولیهٔ موردنیاز صنعت موتورهای الکتریکی به واردات
	عدم توجه به حفظ و توانمندسازی منابع انسانی و نیروهای تحقیقاتی در دانشگاه‌ها و صنایع			
	عدم آموزش مستمر مراکز R&D شرکت‌ها			
	نبود مؤسسه‌های مالی و اعتباری برای ارائهٔ وام‌های بلندمدت کم‌بهره	کمبود قوانین حمایتی و کمک‌های مالی از بخش خصوصی برای ورود به صنعت موتورهای الکتریکی و انتقال فناوری (مانند قوانین مالیاتی و تسهیلات بانکی)		بهرهٔ بالای وام‌های بانکی و مؤسسات مالی و اعتباری
	خروج سرمایه‌های انسانی متخصص از کشور			
	روابط ناسالم در ارائهٔ وام توسط بانک به متقاضیان			

۱۰-۷- مشروعیت‌بخشی

توسعهٔ کاربرد یک فناوری جدید، اغلب با مخالفت بازیگران ذی‌نفع در فناوری‌های کنونی روبه‌رو می‌شود. غلبه بر این امر، ازطریق تشویق صاحبان قدرت به ایجاد آرایش جدیدی از قواعد و مقررات مربوط به نظام فناورانه نوآوری صورت می‌پذیرد. باوجود امکان برآورده شدن این کارکرد توسط بخش خصوصی و عمومی، معمولاً بازیگران بخش خصوصی مانند سازمان‌های غیردولتی (NGO) یا صنایع حامی فناوری نقش پررنگ‌تری را ایفا می‌کنند. توجه شود که در تمام فعالیت‌های این کارکرد، گروهی از بازیگران، گروهی دیگر از بازیگران با قدرت اجرایی را به استفاده از فناوری نوظهور ترغیب می‌کنند. نمونه‌ای از رخدادهای مؤثر در تحقق این کارکرد، موارد زیر است:

- رایزنی‌های سیاسی بین گروه‌های درگیر برای حمایت از فناوری؛

- اعمال نفوذ گروهای پشتیبان فناوری در بخش‌های مختلف دولت و صنعت (شامل NGOها)؛
- شکل‌گیری شبکه‌هایی با هدف افزایش قدرت سیاسی بازیگران؛
- حمایت‌های انجام‌شده از فناوری ازسوی تصمیم‌گیران.

در جدول ۰-۶، چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد بسیج منابع که در مرجع [۱۶۵] بررسی شده، آورده شده است. همان‌طور که از این جدول پیداست، تقریباً تمام چالش‌های مطرح‌شده دربارهٔ توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در این کارکرد، در مورد فناوری موتورهای رلوکتانسی نیز صادق است. بنابراین، سیاست‌ها و اقدامات مقابله با این چالش‌ها نیز مشابه اطلاعات ارائه‌شده در مرجع [۱۶۵] است. شایان‌ذکر است که به‌دلیل جدید بودن استفاده از موتورهای رلوکتانسی (مخصوصاً موتورهای سنکرون رلوکتانسی) در دنیا و آشنا نبودن صنعت کشور با این فناوری، نیاز جدی به توجه به مشروعیت‌بخشی به این فناوری در کشور وجود دارد. استفاده از ظرفیت‌های مختلف اطلاع‌رسانی (مانند مجلات و خبرنامه‌ها) برای آشنا کردن صنایع کشور به مزایای استفاده از موتورهای رلوکتانسی، یک نیاز جدی برای توسعهٔ استفاده از فناوری موتورهای رلوکتانسی است.

جدول ۰-۶: جمع‌بندی چالش‌های توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی در کارکرد مشروعیت‌بخشی

	بازیگران	قوانین و مقررات و استاندارد	تعاملات	زیرساخت
کارکرد مشروعیت بخشی	استفادهٔ ناکافی از ظرفیت‌های تبلیغی و ترویجی کشور برای ترویج استفاده از موتورهایی با راندمان بالا	عدم وجود قوانین و دستورالعمل‌های ترویجی کارآمد برای استفاده از موتورهایی با بازده بالا		اثرگذاری مؤلفه‌های غیراقتصادی در بازار ایران و احساسی بودن بازار
				نبودن دانش کافی بین مصرف‌کنندگان برای انتخاب محصول مناسب و موردنیاز
				عدم وجود اعتماد به تولیدات داخل در بازار علی‌رغم وجود نیاز
				عدم توجه مردم به صرفه‌جویی در مصرف انرژی

۱۰-۸- شناسنامهٔ اقدامات

علاوه‌بر سیاست‌ها و اقداماتی که لازم است برای توسعهٔ تمامی فناوری‌های موتورهای الکتریکی پیگیری کرد (در مرجع [۱۶۵] به‌تفصیل ذکر شده است)، سیاست‌ها و اقدامات خاص حوزهٔ موتورهای رلوکتانسی، با توجه به مجموعهٔ مطالب فوق‌الذکر، که باید برای توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی پیگیری شود، به شرح زیر است:

۱- تشکیل گروه‌های پژوهشی برای تمرکز فعالیت‌های پژوهشی آن‌ها در زمینهٔ موتورهای رلوکتانسی (مخصوصاً موتورهای سنکرون رلوکتانسی)؛
۲- نمونه‌سازی موتورهای رلوکتانسی (با اولویت سنکرون رلوکتانسی) برای استفاده در کاربردها و تجهیزات مختلف صنعتی و عرضهٔ نتایج آن به بخش صنعت کشور؛
۳- آموزش عملکرد و طراحی موتورهای رلوکتانسی در سیلابس درس‌های دانشجویان مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد (مانند درس ماشین‌های الکتریکی مخصوص)؛
۴- تأمین هزینه‌های تهیهٔ مواد اولیه با کیفیت مناسب برای فعالیت‌های پژوهشی در کشور در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی؛

۵- تجاری‌سازی موتورهای رلوکتانسی در یک کاربرد خاص (مثلاً دوچرخهٔ برقی) در تعامل با شرکت‌های سازندهٔ موتورهای الکتریکی؛
۶- حمایت مالی برای رسیدن به دانش فنی طراحی و ساخت موتورهای رلوکتانسی و برای تجاری‌سازی آن‌ها در تعامل با شرکت‌های دانشگاهی و هسته‌های فناوری شرکت‌های رشد؛
۷- اولویت‌بندی (شکل‌دهی به بازار) کاربردهای موتورهای رلوکتانسی؛
۸- استفاده از ظرفیت‌های مختلف اطلاع‌رسانی (مانند مجلات و خبرنامه‌ها) برای آشنا کردن صنایع کشور به مزایای استفاده از موتورهای رلوکتانسی؛

در ادامه به تشریح برخی از این اقدامات پرداخته می‌شود.

۱۰-۸-۱- تشکیل گروه‌های پژوهشی برای تمرکز فعالیت‌های پژوهشی آن‌ها در زمینهٔ موتورهای رلوکتانسی

برای طراحی موتورهای الکتریکی نیاز به فعالیت‌های زیر است:
۱- طراحی الکترومغناطیسی موتور الکتریکی و انتخاب مواد مناسب برای اجزای موتور؛
۲- مدل‌سازی مکانیکی اجزای موتور و شبیه‌سازی دینامیکی آن؛
۳- طراحی و ساخت سیستم تغذیهٔ الکترونیکی موتور؛
۴- طراحی سیستم تهویهٔ حرارتی موتور و تغذیهٔ الکترونیکی آن.

انجام صحیح این فعالیت‌ها برای ارائهٔ محصولی قابل‌عرضه به‌صورت تجاری، نیاز به تجربهٔ زیادی در هر چهار فعالیت فوق‌الذکر دارد. این تجربه محصول چندین سال کار بر روی این موضوع و یا انجام پروژه‌های متعدد در زمینهٔ طراحی و ساخت موتورهای الکتریکی است. این تجربه‌ها در قالب مراکز تحقیق و توسعهٔ شرکت‌های تولیدکنندهٔ موتورهای الکتریکی و یا گروه‌های پژوهشی (مراکز پژوهشی) دانشگاه‌ها امکان تحقق دارند؛ به عبارت دیگر، همان‌طور که تجربه نیز ثابت کرده است، در ساختار غالب فعلی تحقیقات در دانشگاه‌های کشور که متشکل از یک استاد راهنما و یک دانشجوی تحصیلات تکمیلی است، امکان تحقق این تجربه‌ها وجود ندارد و نیاز است که مجموعه‌ای از افراد در یک قالب مشخص با هم همکاری مستمر داشته باشند تا این‌که با همکاری متخصصین هر حوزه، بتوان موتور الکتریکی با قابلیت‌های مناسب برای تولید و استفاده در صنایع کشور ارائه نمود.

در زیر به سه نمونه از این گروه‌های پژوهشی که در دانشگاه‌های کشورهای پیشرفتهٔ صنعتی فعال هستند اشاره شده است:
۱- گروه PEER[1]: این گروه پژوهشی در دانشگاه کنکوردیا واقع در کشور کانادا تشکیل شده است. ساختار این گروه به این شکل است:
   - چهار عضو هیئت‌علمی دانشکدهٔ برق این دانشگاه به‌عنوان اعضای اصلی؛ معمولاً این افراد ثابت هستند.
   - همکاران اصلی؛ تعداد آن‌ها پنج نفر است و شامل فارغ‌التحصیلان همان دانشگاه است (قبلاً دانشجویان اعضای اصلی گروه بوده‌اند). هرچند این افراد معمولاً همکاری بلندمدت با این گروه داشته‌اند، اما تعداد این افراد طی سال‌های مختلف تغییراتی داشته است.
   - دانشجویان مقاطع تحصیلات تکمیلی (دانشجویان اعضای اصلی گروه) که به‌عنوان بازوی اصلی تحقیقاتی این مرکز هستند و در قالب پایان‌نامه‌های خود، با این مراکز همکاری می‌کنند.
۲- گروه EMD[2]: این گروه در دانشگاه شفیلد کشور انگلیس تأسیس شده است و دقیقاً ساختاری مشابه ساختار گروه PEER (شامل اعضای اصلی، همکاران اصلی و دانشجویان مقاطع تحصیلات تکمیلی) دارد.

1. Power Electronics and Energy Research Group
2. Electrical Machines & Drives

۳- گروه پژوهشی با نام Power Electronic, Mechanics and Control Group که در دانشگاه ناتینگهام تشکیل شده است و دقیقاً ساختاری مشابه موارد فوق دارد.

این گروه‌های پژوهشی ازطرف مراکز مختلف صنعتی یا مؤسسات مختلف دولتی حامی تحقیقات حمایت می‌شوند و محصولات موردنیاز آن‌ها را در زمینهٔ موتورهای الکتریکی تولید می‌نمایند. شایان‌ذکر است که با جستجوی سادهٔ اینترنتی (با عبارتی مانند research group on electrical machines)، موارد بیشتری از این گروه‌های پژوهشی می‌توان یافت که در دانشگاه‌های مختلف دنیا تشکیل شده‌اند و در زمینه‌های مختلف صنعتی مرتبط با ماشین‌های الکتریکی (مثلاً خودروهای برقی) فعالیت می‌کنند و دقیقاً ساختاری مشابه موارد فوق‌الذکر دارند.

بنابراین مقدمه، ضروری است که گروه‌های پژوهشی که در دانشگاه‌های کشور در زمینهٔ موتورهای الکتریکی رلوکتانسی نیز تشکیل می‌شود، ساختار فوق‌الذکر را داشته باشد. برای این منظور:

۱- گروه پژوهشی از چند عضو اصلی، شامل حداقل دو عضو هیئت‌علمی (معمولاً با تخصص‌های طراحی ماشین‌های الکتریکی و درایو موتورهای الکتریکی یا الکترونیک قدرت)، اعضای هیئت‌علمی مدعو و یا متخصصین صنعتی، تشکیل شود.

۲- همکاران اصلی این مراکز که دارای تجربهٔ مثبت قبلی در یکی از زمینه‌های مرتبط با طراحی و ساخت موتورهای الکتریکی هستند، برای منظورهای زیر در این گروه‌ها استخدام می‌شوند:
   - انجام پروژه‌های تحقیقی نوآورانه در زمینهٔ موتورهای رلوکتانسی؛
   - هدایت مؤثر دانشجویان تحصیلات تکمیلی در انجام پایان‌نامه‌ها؛
   - ثبت دانش‌های ایجادشده در قالب پروژه‌ها و پایان‌نامه‌ها.

   شایان‌ذکر است که همکاران اصلی این گروه‌ها می‌توانند در قالب دانشجویان پسادکتری باشند (همکاری داشتن هر یک از این دانشجویان به‌مدت چندین سال با گروه پژوهشی، در دنیا معمول است) و یا از فارغ‌التحصیلان همان مرکز و غیره باشند.

۳- دانشجویان مقاطع تحصیلات تکمیلی اعضای اصلی یا مدعو در این گروه‌های پژوهشی می‌توانند پایان‌نامه‌های خود را در زمینه‌های مرتبط با اهداف تعریف‌شده برای گروه پژوهشی انجام دهند.

از طرف دیگر، به‌دلیل آشنا نبودن صنعت کشور با موتورهای رلوکتانسی و همچنین شناخته نبودن توانمندی‌های گروه‌های پژوهشی پیشنهادی در این گزارش، درحال‌حاضر آمادگی لازم برای ارتباط مؤثر بخش صنعت و این گروه‌های پژوهشی (انجام حمایت مالی برای تأمین نیازها) وجود ندارد؛ به عبارتی، برای زمینه‌سازی مناسب برای رشد توانایی‌های گروه‌های پژوهشی و امکان ایجاد اعتماد لازم نسبت به محصولات پژوهشی ارائه‌شده توسط این گروه‌ها، نیاز است که چند سال (پیشنهاد می‌شود حداقل پنج سال) از این گروه‌های پژوهشی، حمایت مالی دولتی انجام شود.

همچنین، با توجه به دولتی بودن این حمایت‌ها، نیاز است که شورایی بر فعالیت‌های سالانهٔ این گروه‌ها نظارت نماید. این شورا می‌تواند متشکل از نمایندگانی از پژوهشگاه نیرو، شرکت‌های مادر تخصصی وزارت نیرو، شرکت‌های تولیدکنندهٔ موتورهای الکتریکی و اعضایی از دانشگاه‌های کشور باشد. وظیفهٔ اصلی این شورا هدایت و تعیین برنامه‌های سالانهٔ این گروه‌ها و همچنین نظارت بر نحوهٔ اجرای این برنامه‌های سالانه است.

با فرض جذب دو نفر همکار اصلی برای هر گروه پژوهشی، بودجهٔ سالانه هریک از این مراکز پژوهشی به‌صورت جدول ۰-۷ تخمین زده می‌شود.

 DOI: 10.30503/nripress.2020.064

جدول ۰-۷: تخمین هزینه‌های هریک از مراکز پژوهشی خاص موتورهای رلوکتانسی

ردیف	عنوان هزینه	هزینهٔ ماهانه (میلیون ریال)	هزینهٔ سالانه (میلیون ریال)
۱	پرسنلی (همکاران اصلی)	۱۴۰	۱,۸۲۰
۲	شرکت در کنفرانس‌های معتبر بین‌المللی	–	۵۰۰
۳	تجهیزات موردنیاز برای ساخت نمونه‌ها	–	۲,۰۰۰
جمع (میلیون ریال)			۴,۳۲۰

در این جدول فرض شده است که هر همکار اصلی ماهانه ۷۰ میلیون ریال (با احتساب هزینه‌های سربار) هزینه برای آزمایشگاه (در سال اول) داشته باشد. همچنین هزینه‌های سالانه براساس ۱۳ ماه پرداخت این حقوق محاسبه شده است. با فرض افزایش ۲۰ درصدی سالانهٔ هزینه‌ها، مجموع هزینه‌ها برای پنج سال، برای هر گروه پژوهشی برابر ۳۲,۱۴۸ میلیون ریال می‌شود. شایان‌ذکر است که برای تأمین هزینه‌های همکاران اصلی گروه پژوهشی، از منابع بنیاد ملی نخبگان یا مراکز مشابه نیز می‌توان استفاده کرد.

پیشنهاد می‌شود برای ایجاد فضای عملکرد رقابتی و افزایش بازده گروه‌های پژوهشی ازاین‌دست، حداقل دو گروه پژوهشی با ساختار پیشنهادی فوق‌الذکر در دانشگاه‌های برخوردار کشور (یکی در دانشگاه‌های تهران و یکی دیگر نیز در دانشگاه‌های شهرهای دیگر) تشکیل شود.

۱۰-۸-۲- نمونه‌سازی موتورهای رلوکتانسی (با اولویت سنکرون رلوکتانسی) برای استفاده در کاربردها و تجهیزات مختلف صنعتی و عرضهٔ نتایج آن به بخش صنعت کشور

براساس مطالعات صورت‌گرفته در مرحلهٔ اول پروژه، موتورهای سنکرون رلوکتانسی، پتانسیل خوبی برای جایگزینی با بیشتر موتورهای الکتریکی مورد استفاده در تجهیزات صنعتی را دارا هستند. به‌دلیل ناشناخته بودن مزیت‌های استفاده از این موتورها برای بخش صنعت کشور و همچنین برای نهادهای تصمیم‌ساز در کشور در این زمینه (مانند سازمان ملی استاندارد) نیاز است که عملکرد مثبت این موتورها در زمینه‌های مختلف، به‌صورت تجربی به اثبات برسد. بنابراین، نیاز است که در کاربردهای مختلف، موتورهای سنکرون رلوکتانسی نمونه‌سازی شوند و عملکرد آن‌ها در این کاربردها به‌صورت تجربی ثبت و ارائه شود. اولویت اصلی در این زمینه می‌تواند مانند محرکهٔ پمپ‌ها، کاربردهایی باشد که بیشترین حجم مصرف انرژی الکتریکی را در زمینهٔ استفاده از موتورهای الکتریکی دارند.

۱۰-۸-۳- تأمین هزینه‌های تهیهٔ مواد اولیه با کیفیت مناسب برای فعالیت‌های پژوهشی در کشور در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی

همان‌طور که قبلاً عنوان شد، نداشتن هستهٔ آهنی با کیفیت مناسب، یکی از مشکلات اصلی برای رسیدن به محصول باکیفیت در زمینهٔ موتورهای الکتریکی سنکرون رلوکتانسی است. راهکار غلبه بر این مشکل نیز تأمین مواد اولیه با کیفیت مناسب با هدف استفاده در فعالیت‌های پژوهشی است. براساس استعلام شفاهی انجام‌شده (از یکی از شرکت‌های فعال در کشور که در زمینهٔ تولید موتور الکتریکی آهنربای دائم برای استفاده در موتورسیکلت‌های برقی فعالیت می‌کند)، قیمت تمام‌شده برای واردات ورق هستهٔ آهنی (ورق با ضخامت ۰/۳ میلی‌متر که به ورقه‌های خودرویی یا EV معروف‌اند) از کشور کرهٔ جنوبی (بدون احتساب هزینه‌های گمرکی)، درصورتی‌که حداقل ۲۰ تن وارد شود، در حدود ۱ دلار است. این مقدار برای ساخت ۳۰۰۰

 DOI: 10.30503/nripress.2020.064

نمونه موتور الکتریکی (موتور آهنربای دائم با توان ۳ کیلووات و سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه) موردنیاز این شرکت کفایت می‌کند. درصورتی‌که نیاز به واردات مقادیر کمتری باشد، هزینهٔ تمام‌شدهٔ هر کیلو (به‌دلیل نیاز به استفاده از واسطه برای خرید) ۳۰ درصد نسبت به مقدار فوق‌الذکر افزایش می‌یابد.

با توجه به این اطلاعات، پیشنهاد می‌شود که برای انجام پروژه‌های پژوهشی مرتبط با موتورهای سنکرون رلوکتانسی، مقداری ورق هستهٔ آهنی با کیفیت مناسب (در حدود ۲ تن) ازسوی پژوهشگاه نیرو تهیه شود و برای فعالیت‌های پژوهشی مرتبط با این طرح در کشور صرف شود. پیش‌بینی می‌شود که این مقدار مواد اولیه برای نمونه‌سازی حداقل ۱۰۰ عدد موتور الکتریکی کافی باشد. هزینهٔ این اقدام در حدود ۳۶۰ میلیون ریال (با فرض این‌که قیمت تمام‌شدهٔ هر کیلو ۱/۵ دلار و هر دلار معادل ۱۲۰ هزار ریال باشد) است.

۱۰-۸-۴- حمایت مالی برای رسیدن به دانش فنی طراحی و ساخت موتورهای رلوکتانسی و برای تجاری‌سازی آن‌ها در تعامل با شرکت‌های دانشگاهی و هسته‌های فناوری شرکت‌های رشد

افرادی که معمولاً ایدهٔ جدیدی برای ایجاد کسب‌وکار دارند، برای به ثمر رساندن این ایده‌ها نیاز به تأمین منابع مالی کافی دارند که غالباً ازطریق عضویت در مراکز رشد یا پارک‌های فناوری، امکان رسیدن به محصول برای آن‌ها فراهم می‌شود. صنعتی کردن و بازار مناسب پیدا کردن برای نمونهٔ محصول نیمه‌صنعتی تولیدشده، معمولاً نیازمند تجربهٔ زیاد یا آزمون و خطای زیاد است؛ غالب افرادی که در این فرایند پرریسک وارد می‌شوند، فاقد تجربهٔ کافی برای تجاری‌سازی محصول خود هستند. بنابراین نیاز است که واحدهای تجاری‌سازی وجود داشته باشند که در این امر، یاریگر هسته‌های فناوری یا شرکت‌های دانشگاهی باشند که وارد این عرصه می‌شوند. تهیهٔ طرح تجاری مناسب، نحوه و زمان مناسب برای جذب سرمایه، رسیدن به شناخت مناسب از بازار هدف، قیمت‌گذاری مناسب محصول و غیره، زمینه‌هایی هستند که نیاز است واحدهای تجاری‌سازی در آن زمینه فعالیت کنند. این واحدها یا به‌صورت مشاوره یا به‌صورت مشارکت در هزینه و منافع یک طرح، می‌توانند به هسته‌های فناوری یا شرکت‌های دانشگاهی کمک کنند.

جستجوی اینترنتی ساده نشان می‌دهد که شرکت‌هایی با هدف تجاری‌سازی محصولات ناشی از ایده‌های نو یا محصولات موردنیاز بازار (در زمینه‌های مختلف) در کشور تأسیس شده است. با توجه به مطالب فوق، نیاز است که این شرکت‌ها در زمینهٔ موتورهای الکتریکی (مخصوصاً موتورهای سنکرون رلوکتانسی) تشکیل شوند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

فصل یازدهم: برنامه‌های اجرایی و اهداف خرد و شاخص‌های اجرای برنامه

۱۱-۱- مقدمه

چشم‌انداز توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی و چالش‌ها و اقدامات توسعهٔ این فناوری‌ها در فصل‌های قبل بررسی شدند. قدم بعدی و نهایی برای کامل شدن برنامهٔ عملیاتی توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی، تهیهٔ مشخص نمودن اهداف خرد فناورانه و همچنین، مشخص کردن شاخص‌های ارزیابی توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی است که در فصل حاضر به این مسئله پرداخته می‌شود. برنامه‌های اجرایی مطرح‌شده در این فصل، با توجه به استنتاجات انجام‌شده از گزارش‌های قبل این پروژه و همچنین، مطالب فصل‌های قبل این گزارش ارائه می‌شود.

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، موتورهای رلوکتانسی موردنظر در این طرح توسعهٔ فناوری در دو دستهٔ کلی تقسیم می‌شوند: موتورهای سنکرون رلوکتانسی و موتورهای سوئیچ رلوکتانس. با توجه به مطالب فصل‌های قبل این گزارش، موتورهای سنکرون رلوکتانسی از ظرفیت بیشتری برای توسعهٔ صنعتی و تجاری برخوردار هستند و طبیعی است که در تعریف اهداف خرد، توجه بیشتری به آن‌ها شود.

۱۱-۲- موتورهای سنکرون رلوکتانسی

فعالیت‌های قبلی انجام‌شده در مورد موتورهای سنکرون رلوکتانسی به‌صورت زیر قابل دسته‌بندی است:

۱- موتورهای سنکرون رلوکتانسی با کاربردهای استاندارد صنعتی؛
۲- کاربرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی در تجهیزات خانگی؛
۳- موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرسرعت؛
۴- کاربرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی در انواع خودروهای برقی (دوچرخ و چهارچرخ)؛
۵- ارائهٔ ساختارهای جدید برای ارتقای عملکرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی؛
۶- بررسی انواع خطا در موتورهای سنکرون رلوکتانسی.

تهیهٔ نرم‌افزارهای طراحی و تحلیل موتورهای سنکرون رلوکتانسی در هریک از دسته‌های فوق‌الذکر، فعالیت مفیدی است که به توسعهٔ کاربرد فناوری موتورهای سنکرون رلوکتانسی کمک زیادی می‌نماید. در ادامه، اهداف تعریف‌شده‌ای برای هریک از این دسته‌بندی‌ها ارائه می‌شود.

۱۱-۲-۱- موتورهای سنکرون رلوکتانسی با کاربردهای استاندارد صنعتی

امروزه عرضهٔ تجاری موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای استفاده در کاربردهای استاندارد صنعتی سرعت متغیر و سرعت ثابت انجام می‌شود و شرکت‌های بزرگی مانند ABB و زیمنس در سه دسته، شامل موتورهای سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز، موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی و موتورهای سنکرون رلوکتانسی بدون آهنربا محصولات صنعتی (با استانداردهای انرژی IE4 و بالاتر) تولید می‌کنند. بنابراین، با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در گزارش‌های قبلی دربارهٔ مزایای استفاده از موتورهای سنکرون رلوکتانسی و همچنین اهداف کلان توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی، ضروری است که به کسب دانش فنی طراحی و تولید موتورهای سنکرون رلوکتانسی با کاربردهای استاندارد صنعتی پرداخته شود.

با توجه به بازه‌های توانی محصولات تولیدشده توسط شرکت‌های سازنده (که در فصل چهارم گزارش مرحلهٔ اول پروژه به‌تفصیل آورده شده است)، مسیر زیر برای رسیدن به دانش فنی موتورهای سنکرون رلوکتانسی با کاربردهای استاندارد صنعتی پیشنهاد می‌شود:

۱- موتورهای سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا) و سیستم درایو:
   I. موتور سنکرون رلوکتانسی کمتر از ۱۰ کیلووات:
   - طراحی و ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا) ۳ کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE4؛

- تهیهٔ نرم‌افزار طراحی و تحلیل موتورهای سنکرون رلوکتانسی استاندارد کمتر از ۱۰ کیلووات؛
- ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا) با توان کمتر از ۱۰ کیلووات، چهار قطب و ۳۰۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE4؛
- اصلاح نرم‌افزار طراحی و تحلیل براساس نتایج حاصل از طراحی جدید.

II. موتور سنکرون رلوکتانسی ۱۰ کیلووات تا ۱۰۰ کیلووات:

- طراحی و ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا) ۳۰ کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE4؛
- تهیه (ارتقای نسخهٔ قبلی) نرم‌افزار طراحی و تحلیل موتورهای سنکرون رلوکتانسی استاندارد کمتر از ۱۰۰ کیلووات؛
- ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا) با توان کمتر از ۱۰۰ کیلووات، چهار قطب و ۳۰۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE4؛
- اصلاح نرم‌افزار طراحی و تحلیل براساس نتایج حاصل از طراحی جدید.

III. موتور سنکرون رلوکتانسی ۱۰۰ کیلووات تا ۳۷۵ کیلووات:

- طراحی و ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا) ... کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE4؛
- تهیه (ارتقای نسخهٔ قبلی) نرم‌افزار طراحی و تحلیل موتورهای سنکرون رلوکتانسی استاندارد کمتر از ۳۷۵ کیلووات؛
- ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا) با توان کمتر از ۳۷۵ کیلووات، چهار قطب و ۳۰۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE4؛
- اصلاح نرم‌افزار طراحی و تحلیل براساس نتایج حاصل از طراحی جدید.

۲- موتورهای سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز:

I. موتور سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز کمتر از ۱۰ کیلووات:

- طراحی و ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز ۳ کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه براساس استاندارد انرژی IE4؛
- تهیهٔ نرم‌افزار طراحی و تحلیل موتورهای سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز استاندارد کمتر از ۱۰ کیلووات؛
- ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز با توان کمتر از ۱۰ کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه براساس استاندارد انرژی IE4؛
- اصلاح نرم‌افزار طراحی و تحلیل براساس نتایج حاصل از طراحی جدید.

II. موتور سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز ۱۰ کیلووات تا ۱۰۰ کیلووات:

- طراحی و ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز ۳۰ کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه براساس استاندارد انرژی IE4؛
- تهیه (ارتقای نسخهٔ قبلی) نرم‌افزار طراحی و تحلیل موتورهای سنکرون رلوکتانسی استاندارد کمتر از ۱۰۰ کیلووات؛
- ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز با توان کمتر از ۱۰۰ کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه براساس استاندارد انرژی IE4؛

- اصلاح نرم‌افزار طراحی و تحلیل براساس نتایج حاصل از طراحی جدید.

۳- موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی و سیستم درایو:

I. موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی کمتر از ۱۰ کیلووات:

- طراحی و ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی ۳ کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE5؛
- تهیهٔ نرم‌افزار طراحی و تحلیل موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی استاندارد کمتر از ۱۰ کیلووات؛
- ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی با توان کمتر از ۱۰ کیلووات، چهار قطب و ۳۰۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE5؛
- اصلاح نرم‌افزار طراحی و تحلیل براساس نتایج حاصل از طراحی جدید.

II. موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی ۱۰ کیلووات تا ۵۰ کیلووات:

- طراحی و ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی ۲۰ کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE5؛
- تهیه (ارتقای نسخهٔ قبلی) نرم‌افزار طراحی و تحلیل موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی استاندارد کمتر از ۵۰ کیلووات؛
- ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی با توان کمتر از ۵۰ کیلووات، چهار قطب و ۳۰۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE5؛
- اصلاح نرم‌افزار طراحی و تحلیل براساس نتایج حاصل از طراحی جدید.

موتورهای سنکرون رلوکتانسی (غیر از نوع خط راه‌انداز) برای عملکرد خود نیاز به درایو الکترونیکی دارند و این درایوهای الکترونیکی شامل چندین کلید قدرت (مانند IGBT) است که با روشن و خاموش شدن آن‌ها، موتور الکتریکی تغذیه می‌شود. مقدار پایدار ولتاژ خروجی کلیدهای قدرت در هر باری که روشن می‌شود (در شرایط ایده‌آل) برابر ولتاژ لینک دی‌سی سیستم درایو است، اما مقدار گذرای آن بسته به شرایط مختلف، می‌تواند افزایش قابل‌توجه و بسیار سریعی (با $^{dv}/_{dt}$ زیاد) نسبت به مقدار ولتاژ لینک دی‌سی داشته باشد که این ولتاژ گذرا طیف زیادی از فرکانس‌ها را شامل می‌شود و مانند امواج الکترومغناطیسی، در هادی‌هایی که درایو را به موتور الکتریکی متصل می‌نمایند و همچنین سیم‌پیچی‌های استاتور موتور، منتشر می‌شوند و به‌دلیل بازتابش این امواج (بسته به طول هادی‌ها)، در برخی موارد مقدار ولتاژهای گذرا در ترمینال موتور به چندین برابر مقدار ولتاژ نامی موتور می‌رسد.

درایو موتورهای سنکرون رلوکتانسی معمولاً به روش PWM انجام می‌شود و در این روش، کلیدهای قدرت به دفعات زیاد روشن و خاموش می‌شوند. این مسئله باعث می‌شود که موتور الکتریکی تحت تنش زیادی قرار بگیرد. اثرات این تنش‌ها عبارت است از:

۱- میزان تخلیهٔ جزئی در عایق سیم‌پیچی‌های استاتور در اثر این تنش‌ها بیشتر می‌شود که این مسئله باعث تسریع زوال عایقی و به مرورزمان، ایجاد اتصال کوتاه در کلاف‌های استاتور می‌شود.

۲- جریان الکتریکی عبوری از یاتاقان‌ها افزایش می‌یابد و به‌تدریج موجب خرابی در بلبرینگ موتور می‌شود.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که ولتاژ تخلیهٔ جزئی در عایق سیم‌پیچی‌های استاتور با افزایش طول هادی‌های مورد استفاده در سیم‌پیچی‌ها، کاهش می‌یابد. برای جلوگیری از آسیب به عایق‌های سیم‌پیچی‌ها، لازم است که ولتاژ دورهای مختلف هر کلاف، از ولتاژ آغاز تخلیهٔ جزئی در عایق سیم‌پیچی کمتر باشد. لذا دانستن توزیع ولتاژ در دورهای مختلف هر کلاف سیم‌پیچی، به طراحی سیستم عایقی مناسب برای موتورهای الکتریکی تغذیه‌شونده با مبدل‌های الکترونیک قدرت کمک می‌نماید. این مسئله در استاندارد زیر مورد توجه قرار گرفته است:

IEC 60034-18-41: Rotating Electrical Machines: partial discharge free electrical insulation systems (type I) used in rotating electrical machines fed from voltage converters-qualifications and quality control tests.

البته این استاندارد شامل موتورهای الکتریکی با ولتاژ نامی مؤثر (rms) کمتر از ۳۰۰ ولت نمی‌شود. به عبارتی در کاربردهایی که ولتاژ نامی موتور کمتر از این مقدار است، این مسائل نیاز به توجه ویژهٔ آن کاربرد را نیز دارند که این کار با استخراج مدل فرکانس بالای موتور الکتریکی امکان‌پذیر است.

یکی از ایده‌هایی که در مقالات مختلف بررسی شده است این است که با جایگزینی روتور یک موتور القایی سه‌فاز با یک روتور خاص موتورهای سنکرون رلوکتانسی، موتور جدیدی به‌دست می‌آید که نسبت به موتور القایی، دارای مزایایی مانند بازدهی انرژی بیشتر و امکان تحویل بار مکانیکی بیشتر است. در این حالت، اگر به مشکلات ناشی از ولتاژهایی با $^{dv}/_{dt}$ زیاد (که در بالا اشاره شد) توجه نشود، عملاً عمر مفید موتور سنکرون رلوکتانسی ساخته‌شده با این روش، به مقدار زیادی کاهش خواهد یافت.

از طرف دیگر، امواج تولیدشده از سیستم درایو می‌تواند موجب بروز تداخلات الکترومغناطیسی (EMI) در سیستم‌های اطراف شوند که لازم است مجموعهٔ درایو و موتور الکتریکی از این لحاظ نیز بررسی شوند. بنابراین لازم است که مدل‌های مختلف فرکانس بالای یک مجموعهٔ موتور سنکرون رلوکتانسی و درایو آن با اهداف زیر استخراج شود:

۱- مطالعهٔ توزیع ولتاژ در دورهای مختلف سیم‌پیچی استاتور موتورهای ولتاژ پایین (Form-Wound Coil and Random-Wound Coils) با هدف بررسی تنش‌های عایقی سیم‌پیچی؛
۲- مطالعهٔ جریان بلبرینگ، جریان زمین و ولتاژ شفت در موتورهای ولتاژ پایین و بررسی روش‌های کاهش آن‌ها؛
۳- مطالعهٔ تداخلات الکترومغناطیسی و روش‌های حذف آن‌ها.

با توجه به توضیحات فوق‌الذکر مشخص می‌شود که کسب دانش فنی طراحی و ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانسی در بازه‌های توانی یادشده با استفاده از مدل انجام پروژه‌های فوق‌الذکر توسط مراجع مختلف امکان‌پذیر نیست و نیاز است که یک واحد و به‌صورت منسجم بر روی این پروژه‌ها کار کند. تفصیل این پیشنهاد (تشکیل گروه‌های پژوهشی در دانشگاه‌ها) و بررسی هزینه‌های آن در فصل قبل آورده شده است. پیشنهاد می‌شود برای هریک از سه دستهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی (شامل موتورهای سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز، موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی و موتورهای سنکرون رلوکتانسی بدون آهنربا) یک گروه پژوهشی متولی کسب دانش فنی شود.

برخی فعالیت‌های پژوهشی با هدف توسعهٔ کاربرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی، شامل مجموعه‌ای از ایده‌های نوآورانه را می‌توان تعریف کرد. استفاده از قالب طرح‌های پژوهشی دانشگاهی (مدل طرح بهتام پژوهشگاه نیرو) یا پایان‌نامه‌های دانشگاهی، یکی از روش‌های کم‌هزینه برای پیگیری این ایده‌ها است. این فعالیت‌ها عبارتند از:

۱- بررسی‌ها نشان می‌دهد که در صورت جایگزینی روتور موتورهای القایی سه‌فاز با روتور موتور سنکرون رلوکتانسی، بازده موتور افزایش می‌یابد. بنابراین در کاربردهای سرعت ثابت (موتور به درایو متصل نیست)، می‌توان موتور القایی را با جایگزین کردن روتور آن، به موتور سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز تبدیل نمود. ارائهٔ طراحی مناسب برای روتور جایگزین، امکان‌سنجی استفادهٔ مجدد از هستهٔ روتورهای القایی، بررسی میزان صرفه‌جویی انرژی و غیره، مسائلی است که در یک طرح پژوهشی می‌توان به آن پرداخت. در بسیاری از اماکن عمومی و صنعتی، موتورهای القایی سه‌فاز سرعت ثابت به‌عنوان محرک پمپ آب مورد استفاده قرار می‌گیرند که این جایگزینی (مخصوصاً در مواقعی که موتور نیاز به تعمیر دارد)، می‌تواند صرفه‌جویی انرژی زیادی به‌همراه داشته باشد.
۲- اندازه‌گیری بازده موتورهای القایی سه‌فاز صنعتی درحین کار موضوعی است که زیاد به آن پرداخته شده است. همین ایده برای هر سه دسته موتورهای سنکرون رلوکتانسی با کاربرد صنعتی قابل پیگیری است.

 DOI: 10.30503/nripress.2020.064

پس از انجام فعالیت‌های پژوهشی و کسب دانش فنی طراحی و ساخت موتورهای رلوکتانسی، نوبت به فعالیت‌های اجرایی برای توسعهٔ کاربرد این موتورها می‌رسد. در این مورد، نیاز به انجام فعالیت‌های زیر است:

۱- انجام مطالعات بازار و تدوین طرح کسب‌وکار برای عرضهٔ تجاری موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای کاربردهای استاندارد صنعتی؛
۲- اطلاع‌رسانی و فرهنگ‌سازی برای توسعهٔ استفاده از موتورهای سنکرون رلوکتانسی ازطریق برگزاری همایش‌ها و سایر روش‌های تبلیغی؛
۳- حمایت از راه‌اندازی خطوط تولید انبوه موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای کاربردهای استاندارد صنعتی و نظارت بر آن‌ها؛
۴- پایش بازار موتورهای سنکرون رلوکتانسی با هدف نظارت بر توسعهٔ کاربرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی در کاربردهای استاندارد صنعتی.

۱۱-۲-۲- موتورهای سنکرون رلوکتانسی در کاربرد تجهیزات خانگی

در عمدهٔ تجهیزات خانگی از موتورهای الکتریکی تک‌فاز، برای کارکرد آن‌ها استفاده می‌شود. بنابراین موتورهای الکتریکی سنکرون رلوکتانسی (که عمدتاً به‌صورت سه فاز ساخته می‌شوند) در این زمینه کاربرد تجاری زیادی پیدا نکرده‌اند و فعالیت‌های پژوهشی انجام‌شده در این زمینه در حد پیشنهاد باقی مانده است. باوجود این، موتورهای سنکرون رلوکتانسی سه‌فاز (با آهنربای کمکی و بدون آهنربای کمکی) را در کولرهای آبی، کولرهای گازی، موتور جاروبرقی و کمپرسورهای یخچال ـ فریزر استفاده نمود (به مبدل تک‌فاز به سه فاز در ورودی درایو موتور نیاز است)؛ زیرا در این کاربردها استفاده از موتورهای آهنربای دائم داخلی سه‌فاز قبلاً متداول شده است و از آنجایی که موتورهای سنکرون رلوکتانسی (مخصوصاً از نوع با آهنربای کمکی) رقیبی برای موتورهای آهنربای دائم (ازنظر نسبت سطح بازدهی انرژی مناسب نسبت به موتورهای القایی تک‌فاز و همچنین، قیمت موتور) محسوب می‌شوند، می‌توانند به همان صورت کاربرد پیدا کنند.

موتورهای سنکرون رلوکتانسی تک‌فاز خط راه‌انداز نیز گزینهٔ پیشنهادی مناسبی برای جایگزینی موتورهای القایی تک‌فاز در انواع وسایل خانگی هستند، زیرا بازدهی انرژی آن‌ها از موتورهای القایی تک‌فاز بیشتر است و از طرف دیگر، ازنظر قیمت تمام‌شدهٔ موتور نیز می‌توانند با آن‌ها رقابت کنند.

با توجه به توضیحات فوق، پیشنهادهای زیر برای انجام پروژه در زمینهٔ استفاده از موتورهای سنکرون رلوکتانسی در وسایل خانگی ارائه می‌شود:

۱- طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی سه‌فاز برای استفاده در کولرهای آبی؛
۲- طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی سه‌فاز برای استفاده در کولرهای آبی؛
۳- طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی سه‌فاز برای استفاده در جاروهای برقی؛
۴- طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز تک‌فاز برای استفاده در تجهیزات خانگی.

با توجه به این‌که محصولات ناشی از پژوهش‌های پیشنهادی فوق فاقد بازار بالفعل هستند و نیاز به بازاریابی و فعالیت‌های تجاری‌سازی زیاد دارند، همان‌طور که در فصل قبل پیشنهاد شد، نیاز است که از کمک شرکت‌هایی با تجربه در زمینهٔ بازاریابی، برای معرفی و بازارسازی برای این محصولات استفاده شود.

۱۱-۲-۳- موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرسرعت

همان‌طور که در گزارش مرحلهٔ اول پروژه عنوان شد، کم بودن استحکام مکانیکی روتور در سرعت‌های زیاد، مهم‌ترین چالش استفاده از موتورهای سنکرون رلوکتانسی در کاربردهای پرسرعت است و نیاز است که با ارائهٔ ساختارهای نوین برای روتور این موتورها، با این چالش مقابله نمود. یکی دیگر از مشکلات توسعهٔ فناوری موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرسرعت در کشور، عدم دسترسی به

 DOI: 10.30503/nripress.2020.064

ورقه‌های مغناطیسی فرکانس‌بالا است. یک پیشنهاد مناسب برای رفع این چالش، استفاده از هسته‌های کامپوزیتی SMC است. با عنایت به این توضیحات طرح پژوهشی (مشابه طرح بهتام پژوهشگاه نیرو) با عنوان زیر در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرسرعت پیشنهاد می‌شود:

- طراحی و ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرسرعت با استفاده از هسته‌های SMC.

۱۱-۲-۴- کاربرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی در انواع خودروهای برقی (دوچرخ و چهارچرخ)

موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی، ازلحاظ بازده انرژی و چگالی توان و هزینه، توانایی رقابت با موتورهای آهنربای دائم داخلی در انواع خودروهای برقی را دارند. با افزایش قیمت آهنربای دائم، امروزه توجه بیشتری به موتورهای سنکرون رلوکتانسی شده است که این مسئله در گزارش مرحلهٔ اول پروژه به‌تفصیل بررسی شده است. شرکت‌های متوسط زیادی در کشور نیز در حوزهٔ خودروهای برقی، مخصوصاً خودروهای برقی دوچرخ، فعالیت دارند که تقریباً تمامی آن‌ها از موتورهای آهنربای دائم (معمولاً از کشور چین وارد می‌شوند) استفاده می‌کنند[۱]. طراحی و ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانسی آهنربای دائم در این کاربردها می‌تواند جایگزین مناسبی برای موتورهای آهنربای دائم مورد استفاده باشد. با عنایت به این توضیحات، اجرای پروژه‌های زیر پیشنهاد می‌شود:

۱- طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی آهنربای دائم روتور خارجی درون چرخی، برای استفاده در دوچرخه‌ها و موتورسیکلت‌های برقی؛
۲- طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی آهنربای دائم برای استفاده در موتورسیکلت‌های شهری؛
۳- طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی آهنربای دائم برای استفاده در مینی‌بوس‌ها (نفربرهای) شهری؛
۴- طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی آهنربای دائم برای استفاده در خودروهای برقی ـ هیبریدی سبک شهری.

با توجه به این‌که در انواع خودروهای برقی، داشتن بازدهی بالای موتور الکتریکی مورد استفاده از اهمیت زیادی برخوردار است و این مسئله تا حد زیادی به نوع و کیفیت ورقه‌های مغناطیسی مورد استفاده در ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانسی وابسته است، بنابراین بررسی اثر ورقه‌های مختلف مغناطیسی بر عملکرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی آهنربای دائم، موضوعی پژوهشی است که نیاز به بررسی دارد. با عنایت به این توضیحات، طرح پژوهشی (مشابه طرح بهتام پژوهشگاه نیرو) با عنوان زیر در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی آهنربای دائم پیشنهاد می‌شود:

- بررسی اثر ورقه‌های مختلف مغناطیسی بر عملکرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی آهنربای دائم در کاربرد خودروهای برقی؛
- طراحی و ساخت موتورهای سنکرون آهنربای دائم با استفاده از ورقه‌های مغناطیسی جهت‌دار.

پس از کسب دانش فنی موتورهای الکتریکی در این کاربردها، حمایت از ایجاد خطوط تولید برای راه‌اندازی ازجمله اقدامات مهم اجرایی است.

۱۱-۲-۵- ارائهٔ ساختارهای جدید برای ارتقای عملکرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی

در گزارش مرحلهٔ اول پروژه، ساختارهای مختلفی که برای موتور سنکرون رلوکتانسی، با هدف ارتقای عملکرد آن‌ها، تاکنون ارائه شده بود، بررسی شد. این ساختارها در عناوین زیر قابل دسته‌بندی است:

۱- استفاده از سیم‌پیچی متمرکز در استاتور موتورهای سنکرون رلوکتانسی؛
۲- ساختارهای دو استاتوره با هدف افزایش چگالی توان موتور؛
۳- حذف پل‌های محیطی در روتور و استفاده از نگه‌دارنده‌های غیرمغناطیسی برای افزایش استحکام روتور؛

۱. اطلاعات مربوط به شرکت‌های فعال در کشور در زمینهٔ خودروهای برقی و محصولات آن‌ها، در گزارش مرحلهٔ چهارم پروژه با عنوان «کاربرد ماشین‌های الکتریکی در سیستم حمل‌ونقل الکتریکی» به‌تفصیل آورده شده است و در اینجا از تکرار آن‌ها خودداری می‌شود.

۴- استفاده از هسته‌های SMC برای کاهش تلفات هسته استاتور و یا تلفات هارمونیک‌ها در روتور.

با توجه به مطالب فوق، عناوین طرح‌های پژوهشی (مشابه طرح بهتام پژوهشگاه نیرو) را به‌صورت زیر می‌توان پیشنهاد نمود:

۱- طراحی و ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانسی با سیم‌پیچی متمرکز در استاتور برای کاربردهای استاندارد صنعتی؛

۲- طراحی و ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانسی دو استاتور برای استفاده در انواع خودروهای برقی؛

۳- افزایش نسبت برجستگی موتور ارائهٔ سنکرون رلوکتانسی با استفاده از ساختارهای نوین در روتور این موتورها؛

۴- طراحی و ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانسی با هستهٔ SMC برای استفاده در کاربردهای استاندارد صنعتی؛

۵- طراحی و ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانسی با هستهٔ SMC برای استفاده در انواع خودروهای برقی.

۱۱-۲-۶- بررسی انواع خطا در موتورهای سنکرون رلوکتانسی

به بحث تشخیص خطا در موتورهای سنکرون رلوکتانسی و افزایش قابلیت تحمل خطا در آن‌ها، در مقایسه با سایر موتورهای الکتریکی، کمتر پرداخته شده است[۱]؛ شاید دلیل اصلی این قضیه این باشد که کاربرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی اخیراً توسعه پیدا کرده است. باوجود این، به‌دلیل اهمیت تشخیص به‌موقع خطا و ایجاد قابلیت تحمل خطا در موتورهای الکتریکی در برخی کاربردها، مانند خودروهای برقی، ضرورت دارد به این مسئله نیز، همراه با بحث توسعهٔ کاربرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرداخته شود که بهترین روش برای پیگیری این مسئله، تعریف طرح‌های پژوهشی (مشابه طرح بهتام پژوهشگاه نیرو) است. عناوین این طرح‌های پژوهشی به‌صورت زیر است:

۱- بررسی انواع خطاهای مکانیکی (انواع خطاهای خروج از مرکز و یاتاقان) در موتورهای سنکرون رلوکتانسی با استفاده از جریان و ولتاژ ضد تحریک موتور و ساخت سیستم قابل‌حمل تشخیص خطا؛

۲- بررسی انواع خطاهای الکتریکی (اتصال کوتاه و مدارباز) در موتورهای سنکرون رلوکتانسی و ارائهٔ روش‌های افزایش قابلیت تحمل این خطاها.

همچنین پایان‌نامه‌های مقاطع تحصیلات تکمیلی را به‌صورت زیر می‌توان تعریف کرد:

۱- طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی پنج‌فاز با آهنربای کمکی، با قابلیت تحمل خطای مدارباز برای کاربرد در خودروهای برقی سبک شهری؛

۲- طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی پنج‌فاز با آهنربای کمکی، با قابلیت تحمل خطای اتصال کوتاه برای کاربرد در خودروهای برقی سبک شهری؛

۳- طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی سه‌فاز، با قابلیت تحمل خطای مدارباز برای کاربردهای استاندارد صنعتی؛

۴- طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی سه‌فاز، با قابلیت تحمل خطای اتصال کوتاه برای کاربردهای استاندارد صنعتی.

۱۱-۲-۷- جمع‌بندی پیشنهادها

جدول ۰-۱: لیست پروژه‌های پژوهشی و اجرایی برای توسعهٔ فناوری موتورهای سنکرون رلوکتانسی

۱. در گزارش مرحلهٔ پنجم پروژه با عنوان «پروژهٔ رصد وضعیت موتورهای رلوکتانسی مخصوص و روش‌های تشخیص خطا در موتورهای رلوکتانسی»، فعالیت‌های قبلی انجام‌شده در زمینهٔ تشخیص انواع خطا در موتورهای سنکرون رلوکتانسی و راهکارهای افزایش قابلیت تحمل خطا در این موتورها به‌تفصیل بررسی شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

کاربرد	نوع اقدام	بازهٔ توانی	نوع موتور	عنوان پروژه
استاندارد صنعتی	اجرایی	–	–	تشکیل گروه‌های پژوهشی برای تمرکز فعالیت‌های پژوهشی آن‌ها در زمینهٔ موتورهای رلوکتانسی
	پژوهشی	کمتر از ۱۰ کیلووات	سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا)	طراحی و ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا) ۳ کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE4
				تهیهٔ نرم‌افزار طراحی و تحلیل موتورهای سنکرون رلوکتانسی استاندارد کمتر از ۱۰ کیلووات
				ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا) با توان کمتر از ۱۰ کیلووات، چهار قطب و ۳۰۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE4
				اصلاح نرم‌افزار طراحی و تحلیل براساس نتایج حاصل از طراحی جدید
			سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز	طراحی و ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز ۳ کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه براساس استاندارد انرژی IE4
				تهیهٔ نرم‌افزار طراحی و تحلیل موتورهای سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز استاندارد کمتر از ۱۰ کیلووات
				ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز با توان کمتر از ۱۰ کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه براساس استاندارد انرژی IE4
				اصلاح نرم‌افزار طراحی و تحلیل براساس نتایج حاصل از طراحی جدید
			سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی	طراحی و ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی ۳ کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE5
				تهیهٔ نرم‌افزار طراحی و تحلیل موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی استاندارد کمتر از ۱۰ کیلووات
				ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی با توان کمتر از ۱۰ کیلووات، چهار قطب و ۳۰۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE5
				اصلاح نرم‌افزار طراحی و تحلیل براساس نتایج حاصل از طراحی جدید
		۱۰ تا ۱۰۰ کیلووات	سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا)	طراحی و ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا) ۳۰ کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE4
				تهیهٔ (ارتقای نسخهٔ قبلی) نرم‌افزار طراحی و تحلیل موتورهای سنکرون رلوکتانسی استاندارد کمتر از ۱۰۰ کیلووات
				ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا) با توان کمتر از ۱۰۰ کیلووات، چهار قطب و ۳۰۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE4
				اصلاح نرم‌افزار طراحی و تحلیل براساس نتایج حاصل از طراحی جدید
			سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز	طراحی و ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز ۳۰ کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه براساس استاندارد انرژی IE4
				تهیهٔ (ارتقای نسخهٔ قبلی) نرم‌افزار طراحی و تحلیل موتورهای سنکرون رلوکتانسی استاندارد کمتر از ۱۰۰ کیلووات
				ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز با توان کمتر از ۱۰۰ کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه براساس استاندارد انرژی IE4
				اصلاح نرم‌افزار طراحی و تحلیل براساس نتایج حاصل از طراحی جدید
			سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی	طراحی و ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی ۲۰ کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE5
				تهیهٔ (ارتقای نسخهٔ قبلی) نرم‌افزار طراحی و تحلیل موتورهای سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی استاندارد کمتر از ۵۰ کیلووات

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

کاربرد	نوع اقدام	بازهٔ توانی	نوع موتور	عنوان پروژه
				ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی با توان کمتر از ۵۰ کیلووات، چهار قطب و ۳۰۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE5
				اصلاح نرم‌افزار طراحی و تحلیل براساس نتایج حاصل از طراحی جدید
		۱۰۰ تا ۳۷۵ کیلووات	سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا)	طراحی و ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا) ... کیلووات، چهار قطب و ۱۵۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE4
				تهیهٔ (ارتقای نسخهٔ قبلی) نرم‌افزار طراحی و تحلیل موتورهای سنکرون رلوکتانسی استاندارد کمتر از ۳۷۵ کیلووات
				ساخت یک نمونه موتور سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا) با توان کمتر از ۳۷۵ کیلووات، چهار قطب و ۳۰۰۰ دور در دقیقه و سیستم درایو آن براساس استاندارد انرژی IE4
				اصلاح نرم‌افزار طراحی و تحلیل براساس نتایج حاصل از طراحی جدید
		–	–	استخراج مدل فرکانس بالای موتورهای سنکرون رلوکتانسی
	اجرایی	–	–	انجام مطالعات بازار و تدوین طرح کسب‌وکار برای عرضهٔ تجاری موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای کاربردهای استاندارد صنعتی
تجهیزات خانگی	پژوهشی	کمتر از ۱ کیلووات	سنکرون رلوکتانسی (بدون آهنربا)	طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی سه فاز برای استفاده در کولرهای آبی
			سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی	طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی سه فاز برای استفاده در کولرهای آبی
				طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی سه فاز برای استفاده در جاروهای برقی
			سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز	طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی خط راه‌انداز تک‌فاز برای استفاده در تجهیزات خانگی
	اجرایی	–	–	انجام مطالعات بازار و تدوین طرح کسب‌وکار برای عرضهٔ تجاری موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای کاربرد در تجهیزات خانگی
خودروهای برقی	پژوهشی	کمتر از ۳/۵ کیلووات	سنکرون رلوکتانسی با آهنربای کمکی	طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی آهنربای دائم روتور خارجی درون چرخی، برای استفاده در دوچرخه‌ها و موتورسیکلت‌های برقی
				طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی آهنربای دائم برای استفاده در موتورسیکلت‌های شهری
		کمتر از ۱۰ کیلووات		طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی آهنربای دائم برای استفاده در مینی‌بوس‌ها (نفربرهای) شهری
		۲۰ کیلووات		طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی آهنربای دائم برای استفاده در خودروهای برقی ـ هیبریدی سبک شهری
	اجرایی	–	–	انجام مطالعات بازار و تدوین طرح کسب‌وکار برای عرضهٔ تجاری موتورهای سنکرون رلوکتانسی در کاربرد خودروهای برقی
تمامی کاربردها	اجرایی	–	–	اطلاع‌رسانی و فرهنگ‌سازی برای توسعهٔ استفاده از موتورهای سنکرون رلوکتانسی ازطریق برگزاری همایش‌ها و سایر روش‌های تبلیغی
				حمایت از راه‌اندازی خطوط تولید انبوه موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای کاربردهای استاندارد صنعتی و نظارت بر آن‌ها

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

کاربرد	نوع اقدام	بازهٔ توانی	نوع موتور	عنوان پروژه
				حمایت از راه‌اندازی خطوط تولید انبوه موتورهای سنکرون رلوکتانسی برای کاربرد در تجهیزات خانگی و نظارت بر آن‌ها
				حمایت از راه‌اندازی خطوط تولید انبوه موتورهای سنکرون رلوکتانسی در کاربرد خودروهای برقی و نظارت بر آن‌ها
				پایش بازار موتورهای سنکرون رلوکتانسی با هدف نظارت بر توسعهٔ کاربرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی در کاربردهای استاندارد صنعتی

جدول ۰-۲: لیست طرح‌های پژوهشی و پایان‌نامه‌ها برای توسعهٔ فناوری موتورهای سنکرون رلوکتانسی

نوع	کاربرد	عنوان
طرح پژوهشی	استاندارد صنعتی	امکان‌سنجی جایگزینی روتور موتورهای القایی سه فاز با روتور موتور سنکرون رلوکتانسی سه فاز خط راه‌انداز در کاربردهای سرعت ثابت
		اندازه‌گیری بازده موتورهای سنکرون رلوکتانسی سه فاز صنعتی درحین کار
	پرسرعت	طراحی و ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانسی پرسرعت با استفاده از هسته‌های SMC
	خودروهای برقی	بررسی اثر ورقه‌های مختلف مغناطیسی بر عملکرد موتورهای سنکرون رلوکتانسی آهنربای دائم در کاربرد خودروهای برقی
		طراحی و ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانسی آهنربای دائم با استفاده از ورقه‌های مغناطیسی جهت‌دار
	استاندارد صنعتی	طراحی و ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانسی با سیم‌پیچی متمرکز در استاتور برای کاربردهای استاندارد صنعتی
	خودروی برقی	طراحی و ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانسی دو استاتور برای استفاده در انواع خودروهای برقی
	تمامی کاربردها	افزایش نسبت برجستگی موتور ارائه سنکرون رلوکتانسی با استفاده از ساختارهای نوین در روتور این موتورها
	استاندارد صنعتی	طراحی و ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانسی با هستهٔ SMC برای استفاده در کاربردهای استاندارد صنعتی
	خودروی برقی	طراحی و ساخت موتورهای سنکرون رلوکتانسی با هستهٔ SMC برای استفاده در انواع خودروهای برقی
	استاندارد صنعتی	بررسی انواع خطاهای مکانیکی (انواع خطاهای خروج از مرکز و یاتاقان) در موتورهای سنکرون رلوکتانسی با استفاده از جریان و ولتاژ ضد تحریک موتور و ساخت سیستم قابل‌حمل تشخیص خطا
		بررسی انواع خطاهای الکتریکی (اتصال کوتاه و مدارباز) در موتورهای سنکرون رلوکتانسی و ارائهٔ روش‌های افزایش قابلیت تحمل این خطاها
پایان‌نامه	خودروهای برقی	طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی پنج‌فاز با آهنربای کمکی، با قابلیت تحمل خطای مدارباز برای کاربرد در خودروهای برقی سبک شهری
		طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی پنج‌فاز با آهنربای کمکی، با قابلیت تحمل خطای اتصال کوتاه برای کاربرد در خودروهای برقی سبک شهری
	استاندارد صنعتی	طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی سه‌فاز، با قابلیت تحمل خطای مدارباز برای کاربردهای استاندارد صنعتی
		طراحی و ساخت موتور سنکرون رلوکتانسی سه‌فاز، با قابلیت تحمل خطای اتصال کوتاه برای کاربردهای استاندارد صنعتی

۱۱-۳- موتورهای سوئیچ رلوکتانس

فعالیت‌های قبلی انجام‌شده درخصوص موتورهای سوئیچ رلوکتانس به‌صورت زیر قابل دسته‌بندی است:

۱- کاربردهای صنعتی‌شدهٔ موتور سوئیچ رلوکتانس؛

۲- موتورهای سوئیچ رلوکتانس ارزان‌قیمت (تک‌فاز و دوفاز)؛
۳- ایجاد تغییرات در ساختارهای معمول موتورهای سوئیچ رلوکتانس با هدف ارتقای عملکرد آن؛
۴- ارائهٔ ساختارهای نوین (شار شعاعی) برای موتورهای سوئیچ رلوکتانس؛
۵- استفاده از موتورهای سوئیچ رلوکتانس در انواع خودروهای برقی.

درخصوص موارد ۱ و ۲ در ادامه، توضیحات بیشتری ارائه می‌شود. جنبهٔ پژوهشی و نوآوری در سایر موارد (۳ تا ۵) همچنان بسیار پررنگ است و این موارد را در قالب پایان‌نامه‌های پژوهشی دانشگاهی متعدد می‌توان تعریف نمود، لذا در این گزارش به آن‌ها پرداخته نمی‌شود و طرح پژوهشی برای آن ارائه نمی‌شود.

۱۱-۳-۱- کاربردهای صنعتی موتورهای سوئیچ رلوکتانس

موتورهای سوئیچ رلوکتانس در کاربردهای پرسرعت، که سروصدای زیاد موتور عیب مهمی محسوب نمی‌شود، کاربرد صنعتی پیدا کرده است و در کمپرسورهای صنعتی و همچنین، برخی موتورهای جاروبرقی از آن‌ها استفاده می‌شود. بنابراین، کسب دانش فنی این محصولات را به‌صورت زیر می‌توان پیشنهاد داد:

۱- کسب دانش فنی موتورهای جاروبرقی سوئیچ رلوکتانس؛
۲- طراحی و ساخت موتورهای سوئیچ رلوکتانس پرسرعت برای استفاده در کمپرسورهای صنعتی.

با توجه به این‌که دسترسی داشتن به ورقه‌های مغناطیسی فرکانس‌بالا چالش مهمی برای ساخت موتور الکتریکی پرسرعت است، طراحی و ساخت موتور سوئیچ رلوکتانس با استفاده از هسته‌های کامپوزیتی، کمک زیادی به توسعهٔ کاربرد این موتورهای در کاربردهای پرسرعت می‌کند. بنابراین، با توجه به نوآورانه بودن این ایده، یک پایان‌نامهٔ مقاطع تحصیلات تکمیلی به‌صورت زیر می‌توان تعریف کرد:

- طراحی و ساخت موتور سوئیچ رلوکتانس پرسرعت از هسته‌های SMC برای استفاده در کمپرسورهای صنعتی

۱۱-۳-۲- موتورهای سوئیچ رلوکتانس ارزان‌قیمت (تک‌فاز و دوفاز)

ارزان بودن قیمت موتور الکتریکی در کاربرد وسایل خانگی یک مزیت مهم برای استفاده از یک فناوری محسوب می‌شود. موتورهای سوئیچ رلوکتانس تک‌فاز و دوفاز ساختاری ساده دارند و درنتیجه دارای این مزیت هستند. از طرف دیگر، موتورهای سوئیچ رلوکتانس دوفاز، در مقایسه با موتورهای القایی تک‌فاز، بازدهی انرژی بالایی نیز دارند؛ بنابراین می‌توانند گزینهٔ خوبی برای استفاده در تجهیزات خانگی (مانند کولر آبی، یخچال و فریزر) باشند. این مسئله در قالب یک طرح پژوهشی، مطابق زیر می‌تواند انجام شود:

- طراحی و ساخت موتور سوئیچ رلوکتانس دوفاز برای استفاده در لوازم‌خانگی

 DOI: 10.30503/nripress.2020.064

نتیجه‌گیری

در این گزارش به رصد وضعیت موتورهای رلوکتانسی (سوئیچ رلوکتانس و سنکرون رلوکتانسی) پرداخته شد. همچنین با توجه به اطلاعات مفیدی که در سال‌ها اخیر و در پروژه‌های مختلف، دربارهٔ توانمندی‌های کشور در زمینهٔ طراحی و تولید انواع فناوری‌های موتورهای الکتریکی فراهم شده بود، توانمندی‌های کشور در زمینهٔ طراحی و تولید و آزمایش موتورهای الکتریکی به‌اختصار بررسی شد. این بررسی‌ها نشان می‌دهد:

۱- موتورهای رلوکتانسی در خودروهای برقی به‌عنوان یک گزینهٔ مناسب برای جایگزینی موتورهای الکتریکی آهنربای دائم هستند و تمرکز تحقیقات جدید در مورد موتورهای رلوکتانسی در این زمینه قرار دارد.

۲- استفاده از موتورهای سنکرون رلوکتانسی با سرعت بیشتری از موتورهای سوئیچ رلوکتانس درحال گسترش است. رشد تعداد شرکت‌های سازندهٔ این موتورها مؤید این مطلب است.

۳- با توجه به این‌که انواع موتورهای سنکرون رلوکتانسی دارای استاندارد بازدهی انرژی بالاتری از موتورهای القایی سه‌فاز پربازده هستند، به‌نظر می‌رسد که در کاربردهای صنعتی گزینهٔ مناسبی برای جایگزینی موتورهای القایی هستند.

۴- با توجه به اطلاعات موجود، پتانسیل کافی برای طراحی، نمونه‌سازی و تولید انواع موتورهای رلوکتانسی در کشور وجود دارد.

بررسی‌های انجام‌شده در فصل نهم گزارش نشان می‌دهد که موتورهای سنکرون رلوکتانسی، کاربرد صنعتی بیشتری از موتورهای سوئیچ رلوکتانس پیدا کرده‌اند و پیش‌بینی می‌شود که موتورهای سنکرون رلوکتانسی حجم بازار بسیار بزرگ‌تری از موتورهای سوئیچ رلوکتانس داشته باشند. بنابراین، در طرح توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی و ازبین این دو موتور، انجام هزینه برای دستیابی به فناوری موتورهای رلوکتانسی، دارای اولویت بیشتری است. از آنجایی که برای توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی (با توجه به وضعیت فعلی صنعت کشور) بیشتر به استفاده از روش حمایت‌های مستقیم دولتی می‌توان تکیه کرد، پیشنهاد شده است که برای توسعهٔ فناوری موتورهای سنکرون رلوکتانسی، علاوه‌بر مدل ارائهٔ تسهیلات حمایتی به‌منظور افزایش تولیدات علمی (مانند طرح بهتام پژوهشگاه نیرو) برای حمایت از ایده‌های نو در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی، از مدل تعریف برنامه‌های بلندمدت، برای رسیدن به نمونه‌های نیمه‌صنعتی و اجرای طرح‌های پایلوت استفاده شود. همچنین، برای دستیابی به فناوری موتورهای سوئیچ رلوکتانس در کاربردهای مختلف، از مدل ارائهٔ تسهیلات حمایتی برای افزایش تولیدات علمی استفاده شود.

در ادامه، چشم‌انداز توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی تا سال ۱۴۰۴ هجری شمسی (براساس چشم‌انداز توسعهٔ فناوری موتورهای الکتریکی) به‌صورت زیر قابل بیان (یا اصلاح) شده است:

«با اتکا به خداوند متعال و تکیه بر توانمندی‌های داخلی و مشارکت همهٔ ذی‌نفعان، فناوری موتورهای رلوکتانسی در کشور و در افق ۱۴۰۴، حوزه‌ای است پیشرو در امر پژوهش، دارای جایگاه اول منطقه در عرصهٔ طراحی و تولید که کسب‌وکار پایدار و پویا در قالب شرکت‌های دانشگاهی یا دانش‌بنیان در آن ایجاد و مورد حمایت قرار می‌گیرد.»

همچنین، اهداف کلان ترسیم‌شده برای توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی به‌صورت زیر است:

۱- کسب دانش فنی طراحی، ساخت و به‌کارگیری موتورهای سنکرون رلوکتانسی در تمامی کاربردها و بازه‌های توانی؛

۲- کسب دانش فنی طراحی، ساخت و به‌کارگیری موتورهای سوئیچ رلوکتانس در کاربردهای کششی؛

۳- تجاری‌سازی محصولات فناوری موتورهای رلوکتانسی در کاربردهای کششی، صنعتی و تجهیزات خانگی.

در فصل دهم و پس از بررسی چالش‌های مختلف توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی در کارکردهای هفت‌گانهٔ نظام نوآوری، سیاست‌ها و اقدامات خاص حوزهٔ موتورهای رلوکتانسی که نیاز است پیگیری شود، به شرح زیر تعیین شده است:

۱- تشکیل گروه‌های پژوهشی برای تمرکز فعالیت‌های پژوهشی آن‌ها در زمینهٔ موتورهای رلوکتانسی (مخصوصاً موتورهای سنکرون رلوکتانسی)؛

۲- نمونه‌سازی موتورهای رلوکتانسی (با اولویت سنکرون رلوکتانسی) برای استفاده در کاربردها و تجهیزات مختلف صنعتی و عرضهٔ نتایج آن به بخش صنعت کشور؛
۳- آموزش عملکرد و طراحی موتورهای رلوکتانسی در سیلابس درس‌های دانشجویان مقطع کارشناسی و کارشناسی ارشد (مانند درس ماشین‌های الکتریکی مخصوص)؛
۴- تأمین هزینه‌های تهیهٔ مواد اولیه با کیفیت مناسب برای فعالیت‌های پژوهشی در کشور در زمینهٔ موتورهای سنکرون رلوکتانسی؛
۵- تجاری‌سازی موتورهای رلوکتانسی در یک کاربرد خاص (مثلاً دوچرخهٔ برقی) در تعامل با شرکت‌های سازندهٔ موتورهای الکتریکی؛
۶- حمایت مالی برای رسیدن به دانش فنی طراحی و ساخت موتورهای رلوکتانسی و برای تجاری‌سازی آن‌ها در تعامل با شرکت‌های دانشگاهی و هسته‌های فناوری شرکت‌های رشد؛
۷- اولویت‌بندی (شکل‌دهی به بازار) کاربردهای موتورهای رلوکتانسی؛
۸- استفاده از ظرفیت‌های مختلف اطلاع‌رسانی (مانند مجلات و خبرنامه‌ها) برای آشنا کردن صنایع کشور به مزایای استفاده از موتورهای رلوکتانسی.

در فصل آخر پروژه، با توجه به مطالب دو فصل قبل، پروژه‌های اجرایی و عناوین طرح‌های پژوهشی موردنیاز برای توسعهٔ فناوری موتورهای رلوکتانسی مشخص شده است. جمع‌بندی این عناوین در جدول ۰-۱ و جدول ۰-۲ برای موتورهای سنکرون رلوکتانسی مشخص شده است.

مراجع

[۱] مهدی علی احمدی، «ماشین‌های الکتریکی سنکرون رلوکتانس»، پروژهٔ «آینده‌پژوهی و رصد وضعیت آهنرباهای دائم و کاربردهای آن‌ها در ماشین‌های الکتریکی»، پژوهشگاه نیرو، گروه ماشین‌های الکتریکی، ۱۳۹۶.

[2] G. Pellegrino, T. M. Jahns, N. Bianchi, W. L. Soong, and F. Cupertino, *The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors: Tutorial Course Notes*: Springer, 2016.

[3] J. Kostko, "Polyphase reaction synchronous motors," *Journal of the American Institute of Electrical Engineers,* vol. 42, pp. 1162-1168, 1923.

[4] V. B. Honsinger, "Inherently stable reluctance motors having improved performance," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,* pp. 1544-1554, 1972.

[5] A. Fratta and A. Vagati, "A reluctance motor drive for high dynamic performance application," *IEEE Transactions on Industry Applications,* vol. 28, pp. 873-879, 1992.

[6] A. Vagati, "The synchronous reluctance solution: a new alternative in AC drives," in *Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1994. IECON'94., 20th International Conference on*, 1994, pp. 1-13.

[7] A. Vagati, M. Pastorelli, and G. Franceschini, "High-performance control of synchronous reluctance motors," *IEEE Transactions on Industry Applications,* vol. 33, pp. 983-991, 1997.

[8] A. Vagati, G. Franceschini, I. Marongiu, and G. Troglia, "Design criteria of high performance synchronous reluctance motors," in *Industry Applications Society Annual Meeting, 1992., Conference Record of the 1992 IEEE*, 1992, pp. 66-73.

[9] A. Fratta, G. Troglia, A. Vagati, and F. Villata, "Evaluation of torque ripple in high performance synchronous reluctance machines," in *Industry Applications Society Annual Meeting, 1993., Conference Record of the 1993 IEEE*, 1993, pp. 163-170.

[10] A. Fratta, G. Toglia, A. Vagati, and F. Villata, "Ripple evaluation of high-performance synchronous reluctance machines," *IEEE Industry applications magazine,* vol. 1, pp. 14-22, 1995.

[11] A. Vagati, M. Pastorelli, G. Francheschini, and S. C. Petrache, "Design of low-torque-ripple synchronous reluctance motors," *IEEE Transactions on Industry Applications,* vol. 34, pp. 758-765, 1998.

[12] S. Taghavi, "Design of Synchronous Reluctance Machines for Automotive Applications," Concordia University, 2015.

[13] P. Lawrenson and L. Agu, "A new unexcited synchronous machine," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1963, p. 1275.

[14] P. Lawrenson and L. Agu, "Theory and performance of polyphase reluctance machines," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1964, pp. 1435-1445.

[15] P. J. Lawrenson, S. Gupta, and S. M. Vamaraju, "Multispeed performance of segmental-rotor reluctance machines," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1968, pp. 695-702.

[16] M. Ramamoorty and P. Rao, "Optimization of polyphase segmented-rotor reluctance motor design: a nonlinear programming approach," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 527-535, 1979.

[17] A. Cruickshank, R. Menzies, and A. Anderson, "Axially laminated anisotropic rotors for reluctance motors," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1966, pp. 2058-2060.

[18] A. Cruickshank, A. Anderson, and R. Menzies, "Theory and performance of reluctance motors with axially laminated anisotropic rotors," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1971, pp. 887-894.

[19] R. Menzies, "Theory and operation of reluctance motors with magnetically anisotropic rotors part I analysis," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 35-41, 1972.

[20] S. C. Rao, "Dynamic performance of reluctance motors with magnetically anisotropic rotors," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 95, pp. 1369-1376, 1976.

[21] D. Platt, "Reluctance motor with strong rotor anisotropy," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, pp. 652-658, 1992.

[22] D. Staton, T. Miller, and S. Wood, "Maximising the saliency ratio of the synchronous reluctance motor," in *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*, 1993, pp. 249-259.

[23] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Rotor design optimization of synchronous reluctance machine," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, pp. 359-365, 1994.

[24] W. L. Soong, D. A. Staton, and T. J. Miller, "Design of a new axially-laminated interior permanent magnet motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, pp. 358-367, 1995.

[25] A. Vagati, A. Fratta, G. Franceschini, and P. Rosso, "AC motors for high-performance drives: a design-based comparison," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, pp. 1211-1219, 1996.

[26] J. Ikaheimo, J. Kolehmainen, T. Kansakangas, V. Kivela, and R. R. Moghaddam, "Synchronous high-speed reluctance machine with novel rotor construction," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, pp. 2969-2975, 2014.

[27] R.-R. Moghaddam and F. Gyllensten, "Novel high-performance SynRM design method: An easy approach for a complicated rotor topology," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, pp. 5058-5065, 2014.

[28] M. Palmieri, M. Perta, F. Cupertino, and G. Pellegrino, "High-speed scalability of synchronous reluctance machines considering different lamination materials," in *Industrial Electronics Society, IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE*, 2014, pp. 614-620.

[29] F. Cupertino, M. Palmieri, and G. Pellegrino, "Design of high-speed synchronous reluctance machines," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015 IEEE*, 2015, pp. 4828-4834.

[30] M. Di Nardo, M. Galea, C. Gerada, M. Palmieri, and F. Cupertino, "Multi-physics optimization strategies for high speed synchronous reluctance machines," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015 IEEE*, 2015, pp. 2813-2820.

[31] R.-R. Moghaddam, "Fundamental study on rotor eddy current losses in high frequency machines due to current harmonics," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015 IEEE*, 2015, pp. 2750-2756.

[32] N. Bianchi, S. Bolognani, E. Carraro, M. Castiello, and E. Fornasiero, "Electric vehicle traction based on synchronous reluctance motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, pp. 4762-4769, 2016.

[33] M. Obata, S. Morimoto, M. Sanada, and Y. Inoue, "Performance of PMASynRM with ferrite magnets for EV/HEV applications considering productivity," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, pp. 2427-2435, 2014.

[34] K. Kondo, S. Kusase, T. Maekawa, and K. Hanada, "A new PM-assisted synchronous reluctance motor with three-dimensional trench air gap," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, pp. 2485-2492, 2014.

[35] L. Ge, X. Zhu, W. Wu, F. Liu, and Z. Xiang, "Design and comparison of two non-rare-earth permanent magnet synchronous reluctance motors for EV applications," in *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017 20th International Conference on*, 2017, pp. 1-5.

[36] R. Rajabi Moghaddam, "Synchronous reluctance machine (SynRM) in variable speed drives (VSD) applications," KTH Royal Institute of Technology, 2011.

[37] T. A. Lipo, "Synchronous reluctance machines-a viable alternative for AC drives?," *Electric Machines and Power Systems*, vol. 19, pp. 659-671, 1991.

[38] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Pastorelli, and A. Vagati, "Experimental comparison of induction and synchronous reluctance motors performance," in *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005*, 2005, pp. 474-479.

[39] A. Boglietti and M. Pastorelli, "Induction and synchronous reluctance motors comparison," in *Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE*, 2008, pp. 2041-2044.

[40] K. Rajashekara, "Present status and future trends in electric vehicle propulsion technologies," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, pp. 3-10, 2013.

[41] G. Pellegrino, A. Vagati, B. Boazzo, and P. Guglielmi, "Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples," *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 48, pp. 2322-2332, 2012.

[42] T. Lipo, "Synchronous reluctance motors and drives-a new alternative," in *IEEE/IAS 27th Annal Meeting, Tutorial Course, Electric Machines Committee*, 1992.

[۴۳] رضا نصیری زرندی، «رصد وضعیت فناوری محرکه‌های الکتریکی (ماشین‌های الکتریکی و مدار کنترل و درایو) در خودروهای الکتریکی دوچرخ»، پروژهٔ «کاربرد ماشین‌های الکتریکی در سیستم‌های حمل‌ونقل الکتریکی»، پژوهشگاه نیرو، گروه ماشین‌های الکتریکی، ۱۳۹۶.

[۴۴] رضا نصیری زرندی، «رصد وضعیت فناوری محرکه‌های الکتریکی (ماشین‌های الکتریکی و مدار کنترل و درایو) در خودروهای الکتریکی سبک و سنگین شهری»، پروژهٔ «کاربرد ماشین‌های الکتریکی در سیستم‌های حمل‌ونقل الکتریکی»، پژوهشگاه نیرو، گروه ماشین‌های الکتریکی، ۱۳۹۶.

[45] C. Donaghy-Spargo, "Synchronous reluctance motor technology: opportunities, challenges and future direction," *Engineering & technology reference.*, pp. 1-15, 2016.

[46] R. R. Moghaddam, "High speed operation of electrical machines, a review on technology, benefits and challenges," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE*, 2014, pp. 5539-5546.

[47] H. Hofmann and S. R. Sanders, "High-speed synchronous reluctance machine with minimized rotor losses," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, pp. 531-539, 2000.

[48] A. Chiba and T. Fukao, "A closed-loop operation of super high-speed reluctance motor for quick torque response," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, pp. 600-606, 1992.

[49] J.-D. Park, C. Kalev, and H. F. Hofmann, "Analysis and reduction of time harmonic rotor loss in solid-rotor synchronous reluctance drive," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, pp. 985-992, 2008.

[50] M. Palmieri, M. Perta, and F. Cupertino, "Design of a 50.000-r/min synchronous reluctance machine for an aeronautic diesel engine compressor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, pp. 3831-3838, 2016.

[51] M. Gamba, E. Armando, G. Pellegrino, A. Vagati, B. Janjic, and J. Schaab, "Line-start synchronous reluctance motors: Design guidelines and testing via active inertia emulation," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015 IEEE*, 2015, pp. 4820-4827.

[52] M. Gamba, G. Pellegrino, A. Vagati, and F. Villata, "Design of a line-start synchronous reluctance motor," in *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International*, 2013, pp. 648-655.

[53] D. Mingardi and N. Bianchi, "FE-aided analytical method to predict the capabilities of line-start synchronous motors," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE*, 2014, pp. 5123-5130.

[54] A. D. Aliabad and F. Ghoroghchian, "Design and analysis of a two-speed line start synchronous motor: scheme one," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, pp. 366-372, 2016.

[55] A. M. El-Refaie, "Fractional-slot concentrated-windings synchronous permanent magnet machines: Opportunities and challenges," *IEEE Transactions on industrial Electronics*, vol. 57, pp. 107-121, 2010.

[56] Z. Azar and Z. Zhu, "Investigation of electromagnetic performance of salient-pole synchronous reluctance machines having different concentrated winding connections," in *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International*, 2013, pp. 359-366.

[57] C. Spargo, B. Mecrow, and J. Widmer, "Design of a synchronous reluctance motor with non-overlapping fractional-slot concentrated windings," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE*, 2014, pp. 1393-1399.

[58] C. M. Spargo, B. Mecrow, and J. Widmer, "Higher pole number synchronous reluctance machines with fractional slot concentrated windings," 2014.

[59] C. M. Spargo, B. C. Mecrow, J. D. Widmer, and C. Morton, "Application of fractional-slot concentrated windings to synchronous reluctance motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, pp. 1446-1455, 2015.

[60] C. M. Spargo, B. C. Mecrow, J. D. Widmer, C. Morton, and N. J. Baker, "Design and validation of a synchronous reluctance motor with single tooth windings," *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 30, pp. 795-805, 2015.

[61] S. Taghavi and P. Pillay, "An innovative rotor core assembly for high performance 4-pole synchronous reluctance traction motor using grain oriented lamination," in *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2015 IEEE International*, 2015, pp. 90-95.

[62] S. Taghavi and P. Pillay, "A novel grain-oriented lamination rotor core assembly for a synchronous reluctance traction motor with a reduced torque ripple algorithm," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, pp. 3729-3738, 2016.

[63] P. B. Reddy, K. Grace, and A. El-Refaie, "Conceptual design of sleeve rotor synchronous reluctance motor for traction applications," *IET Electric Power Applications*, vol. 10, pp. 368-374, 2016.

[64] M. H. Mohammadi, "Rotor Design Optimization of Permanent Magnet-assisted Synchronous Reluctance Machines for Traction Applications," McGill University Libraries, 2016.

[65] G. Pellegrino, A. Vagati, P. Guglielmi, and B. Boazzo, "Performance comparison between surface-mounted and interior PM motor drives for electric vehicle application," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, pp. 803-811, 2012.

[66] M. Obata, S. Morimoto, M. Sanada, and Y. Inoue, "Characteristic of PMASynRM with ferrite magnets for EV/HEV applications," in *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2012 15th International Conference on*, 2012, pp. 1-6.

[67] M. Paradkar and J. Boecker, "Design of a high performance ferrite magnet-assisted synchronous reluctance motor for an electric vehicle," in *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 4099-4103.

[68] K. Sone, M. Takemoto, S. Ogasawara, K. Takezaki, and H. Akiyama, "A ferrite PM in-wheel motor without rare earth materials for electric city commuters," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, pp. 2961-2964, 2012.

[69] M. Barcaro and N. Bianchi, "Interior PM machines using ferrite to replace rare-earth surface PM machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, pp. 979-985, 2014.

[70] S. Morimoto, S. Ooi, Y. Inoue, and M. Sanada, "Experimental evaluation of a rare-earth-free PMASynRM with ferrite magnets for automotive applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, pp. 5749-5756, 2014.

[71] B. Xia, W. Fei, P. Luk, and D. Wu, "Design of a multi-layer interior ferrite permanent magnet synchronous machine for traction applications," 2014.

[72] M. Sanada, Y. Inoue, and S. Morimoto, "Rotor structure for reducing demagnetization of magnet in a PMASynRM with ferrite permanent magnet and its characteristics," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE*, 2011, pp. 4189-4194.

[73] S. Ooi, S. Morimoto, M. Sanada, and Y. Inoue, "Performance evaluation of a high-power-density PMASynRM with ferrite magnets," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, pp. 1308-1315, 2013.

[74] A. Vagati, B. Boazzo, P. Guglielmi, and G. Pellegrino, "Design of ferrite-assisted synchronous reluctance machines robust toward demagnetization," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, pp. 1768-1779, 2014.

[75] P. Guglielmi, B. Boazzo, E. Armando, G. Pellegrino, and A. Vagati, "Magnet minimization in IPM-PMASR motor design for wide speed range application," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE*, 2011, pp. 4201-4207.

[76] E. Carraro, M. Degano, and N. Bianchi, "Permanent magnet volume minimization in permanent magnet assisted synchronous reluctance motors," in *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2013 8th International Conference and Exhibition on*, 2013, pp. 1-4.

[77] N. Bianchi, E. Fornasiero, and W. Soong, "Optimal selection of PM flux linkage in a PM assisted synchronous reluctance machine," in *Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference on*, 2014, pp. 1341-1347.

[78] M. Ferrari, N. Bianchi, A. Doria, and E. Fornasiero, "Design of synchronous reluctance motor for hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, pp. 3030-3040, 2015.

[79] F. N. Jurca, R. Mircea, C. Martis, R. Martis, and P. P. Florin, "Synchronous reluctance motors for small electric traction vehicle," in *Electrical and Power Engineering (EPE), 2014 International Conference and Exposition on*, 2014, pp. 317-321.
[80] R. A. Inte and F. N. Jurca, "A novel synchronous reluctance motor with outer rotor for an electric bike," in *Electrical and Power Engineering (EPE), 2016 International Conference and Exposition on*, 2016, pp. 213-218.
[81] S. Taghavi and P. Pillay, "A core analysis of the synchronous reluctance motor for automotive applications," in *Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference on*, 2014, pp. 961-967.
[82] S. Taghavi and P. Pillay, "A comparative study of synchronous reluctance machine performance with different pole numbers for automotive applications," in *Industrial Electronics Society, IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE*, 2014, pp. 3812-3818.
[83] S. Taghavi and P. Pillay, "A sizing methodology of the synchronous reluctance motor for traction applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, pp. 329-340, 2014.
[84] M. Z. Islam, S. S. R. Bonthu, and S. Choi, "Comparison of two different winding topologies for external-rotor five-phase PM-assisted synchronous reluctance motor in vehicle applications," in *Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2017 IEEE International*, 2017, pp. 1-6.
[85] M. D. Hennen and R. W. De Doncker, "Comparison of outer-and inner-rotor switched reluctance machines," in *Power Electronics and Drive Systems, 2007. PEDS'07. 7th International Conference on*, 2007, pp. 702-706.
[86] K. Cakir and A. Sabanovic, "In-wheel motor design for electric vehicles," in *Advanced Motion Control, 2006. 9th IEEE International Workshop on*, 2006, pp. 613-618.
[87] A. Chiba, K. Kiyota, N. Hoshi, M. Takemoto, and S. Ogasawara, "Development of a rare-earth-free SR motor with high torque density for hybrid vehicles," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, pp. 175-182, 2015.
[88] P. B. Reddy, A. M. El-Refaie, M. Zou, D. Pan, J. P. Alexander, N. Tapadia, *et al.*, "Performance testing and analysis of synchronous reluctance motor utilizing dual-phase magnetic material," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, pp. 2193-2201, 2018.
[89] *new.abb.com/motors-generators/iec-low-voltage-motors/process-performance-motors/synchronous-reluctance-motors*.
[90] *www.siemens.com*.
[91] *www.regalbeloit.com/Brands/Genteq-Hermetic*.
[92] *www.danfoss.com*.
[93] *www.ksb.com*.
[94] *http://emach.ru*.
[95] *sme-group.com*.
[96] *ricardo.com*.
[97] P. Waide and C. U. Brunner, "Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems," 2011.

[۹۸] علیرضا قائم‌پناه، «تدوین طرح‌های اجرایی نقشه راه و بودجه و برنامه‌ریزی»، پروژهٔ «تدوین سند راهبردی و نقشه راه توسعهٔ فناوری‌های طراحی، ساخت و تدوین دانش فنی انواع موتورهای موردنیاز در صنعت برق ایران»، پژوهشگاه نیرو، گروه ماشین‌های الکتریکی، ۱۳۹۴.

[99] T. J. E. Miller, "Electronic Control of Switched Reluctance Machines," *Oxford: Newnes*, pp. 6-33, 2001.

[100] R. Krishnan, *Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications*: CRC press, 2001.

[101] K. T. Chau, *Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application*: Wiley, 2015.

[102] T. J. E. Miller, *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*: Clarendon Press, 1989.

[103] A. Talha, "Design and Analysis of a Switched Reluctance Machine for Traction in a Hybrid Automotive Application," 2017.

[104] O. Ellabban and H. Abu-Rub, "Switched reluctance motor converter topologies: A review," in *Industrial Technology (ICIT), 2014 IEEE International Conference on*, 2014, pp. 840-846.

[105] H. Chen, R. Nie, and W. Yan, "A Novel Structure Single-Phase Tubular Switched Reluctance Linear Motor," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, pp. 1-4, 2017.

[106] J. Stephenson and G. C. Jenkinson, "Single-phase switched reluctance motor design," *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 147, pp. 131-139, 2000.

[107] S. Xu, D. Li, G. Deng, and G. Chen, "A single-phase switched reluctance motor drive system," in *Power Engineering and Automation Conference (PEAM), 2011 IEEE*, 2011, pp. 264-267.

[108] T. Higuchi, J. O. Fiedler, and R. De Doncker, "On the design of a single-phase switched reluctance motor," in *Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International*, 2003, pp. 561-567.

[109] O. Dabija, A. Simion, L. Livadaru, and N.-D. Irimia, "Modeling and simulation of an axial field single-pole single-phase switched reluctance motor," in *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2012 13th International Conference on*, 2012, pp. 706-711.

[110] S.-G. Oh and R. Krishnan, "Two-phase SRM with flux-reversal-free stator: concept, analysis, design, and experimental verification," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, pp. 1247-1257, 2007.

[111] T. Guo, "Double-rotor switched reluctance machine with segmented rotors," McMaster University, 2013.

[112] W. Ding, Y. Hu, T. Wang, and S. Yang, "Comprehensive research of modular E-core stator hybrid-flux switched reluctance motors with segmented and nonsegmented rotors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 32, pp. 382-393, 2017.

[113] S.-H. Mao and M.-C. Tsai, "A novel switched reluctance motor with C-core stators," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, pp. 4413-4420, 2005.

[114] R. Jæger, S. S. Nielsen, and P. O. Rasmussen, "Theoretical evaluation of the double U-core switched reluctance machine," in *Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2017 IEEE International*, 2017, pp. 1-7.

[115] H.-Y. Yang, Y.-C. Lim, and H.-C. Kim, "Acoustic noise/vibration reduction of a single-phase SRM using skewed stator and rotor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* vol. 60, pp. 4292-4300, 2013.

[116] P. C. Desai, M. Krishnamurthy, N. Schofield, and A. Emadi, "Novel switched reluctance machine configuration with higher number of rotor poles than stator poles: Concept to implementation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* vol. 57, pp. 649-659, 2010.

[117] J. D. Widmer and B. C. Mecrow, "Optimized segmental rotor switched reluctance machines with a greater number of rotor segments than stator slots," *IEEE Transactions on Industry Applications,* vol. 49, pp. 1491-1498, 2013.

[118] H. Hayashi, K. Nakamura, A. Chiba, T. Fukao, K. Tungpimolrut, and D. G. Dorrell, "Efficiency improvements of switched reluctance motors with high-quality iron steel and enhanced conductor slot fill," *IEEE Transactions on Energy Conversion,* vol. 24, pp. 819-825, 2009.

[119] C.-C. Chiang, A. M. Knight, M.-F. Hsieh, M.-G. Tsai, B. H. Liu, I.-G. Chen, *et al.*, "Effects of annealing on magnetic properties of electrical steel and performances of SRM after punching," *IEEE Transactions on Magnetics,* vol. 50, pp. 1-4, 2014.

[120] B. Mecrow, E. El-Kharashi, J. Finch, and A. Jack, "Segmental rotor switched reluctance motors with single-tooth windings," *IEE Proceedings-Electric Power Applications,* vol. 150, pp. 591-599, 2003.

[121] W. Hua, H. Hua, X. Xu, G. Zhao, and M. Cheng, "Analysis and experimental validation of a half-teeth-wound switched reluctance machine," *IEEE Transactions on Magnetics,* vol. 50, pp. 1-5, 2014.

[122] W. Hua, H. Hua, N. Dai, G. Zhao, and M. Cheng, "Comparative study of switched reluctance machines with half-and full-teeth-wound windings," *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* vol. 63, pp. 1414-1424, 2016.

[123] E. Cosoroaba, E. Bostanci, Y. Li, W. Wang, and B. Fahimi, "Comparison of winding configurations in double-stator switched reluctance machines," *IET Electric Power Applications,* vol. 11, pp. 1407-1415, 2017.

[124] F. Daldaban and N. Ustkoyuncu, "Multi-layer switched reluctance motor to reduce torque ripple," *Energy Conversion and Management,* vol. 49, pp. 974-979, 2008.

[125] E. S. Afjei and H. A. Toliyat, "A novel multilayer switched reluctance motor," *IEEE Transactions on Energy Conversion,* vol. 17, pp. 217-221, 2002.

[126] A. Siadatan, V. Najmi, and E. Afjei, "A novel 4/4 Multilayer Switched Reluctance Motor with 4 magnetically independent layers," in *Electrical Machines and Power Electronics and 2011 Electromotion Joint Conference (ACEMP), 2011 International Aegean Conference on*, 2011, pp. 255-259.

[127] M. Abbasian, M. Moallem, and B. Fahimi, "Double-stator switched reluctance machines (DSSRM): Fundamentals and magnetic force analysis," *IEEE Transactions on energy conversion,* vol. 25, pp. 589-597, 2010.

[128] M. Asgar, E. Afjei, A. Behbahani, and A. Siadatan, "A 12/8 double-stator switched reluctance motor for washing machine application," in *Power Electronics, Drives Systems & Technologies Conference (PEDSTC), 2015 6th*, 2015, pp. 168-172.

[129] M. A. Tavakkoli and M. Moallem, "Torque ripple mitigation of double stator switched reluctance motor (DSSRM) using a novel rotor shape optimization," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE*, 2012, pp. 848-852.

[130] W. Wang, M. Luo, E. Cosoroaba, B. Fahimi, and M. Kiani, "Rotor shape investigation and optimization of double stator switched reluctance machine," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, pp. 1-4, 2015.
[131] B. Mecrow, J. Finch, E. El-Kharashi, and A. Jack, "Switched reluctance motors with segmental rotors," *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 149, pp. 245-254, 2002.
[132] H. Chen and W. Yan, "Novel U-Shaped Structure Switched Reluctance Machine With a Module Outer Rotor," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, pp. 1-6, 2018.
[133] R. Jœger, S. S. Nielsen, P. O. Rasmussen, and K. Kongerslev, "Development and analysis of u-core switched reluctance machine," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016 IEEE*, 2016, pp. 1-8.
[134] A. Labak and N. C. Kar, "A novel five-phase pancake shaped switched reluctance motor for hybrid electric vehicles," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC'09. IEEE*, 2009, pp. 494-499.
[135] H. Cheng, H. Chen, and Z. Yang, "Design indicators and structure optimisation of switched reluctance machine for electric vehicles," *IET Electric Power Applications*, vol. 9, pp. 319-331, 2015.
[136] M. Abbasian, B. Fahimi, and M. Moallem, "High torque double-stator switched reluctance machine for electric vehicle propulsion," in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE*, 2010, pp. 1-5.
[137] H. Chen, "The switched reluctance motor drive for application in electric bicycle," in *Industrial Electronics, 2001. Proceedings. ISIE 2001. IEEE International Symposium on*, 2001, pp. 1152-1156.
[138] J. Lin, N. Schofield, and A. Emadi, "External-Rotor $6-10$ Switched Reluctance Motor for an Electric Bicycle," *IEEE Transactions on transportation electrification*, vol. 1, pp. 348-356, 2015.
[139] A. Chiba, Y. Takano, M. Takeno, T. Imakawa, N. Hoshi, M. Takemoto, *et al.*, "Torque density and efficiency improvements of a switched reluctance motor without rare-earth material for hybrid vehicles," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, pp. 1240-1246, 2011.
[140] P. Andrada, E. Martínez, B. Blanqué, M. Torrent, J. Perat, and J. Sánchez, "New axial-flux switched reluctance motor for E-scooter," in *Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), International Conference on*, 2016, pp. 1-6.
[141] R. Madhavan and B. G. Fernandes, "Comparative analysis of axial flux SRM topologies for electric vehicle application," in *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2012 IEEE International Conference on*, 2012, pp. 1-6.
[142] R. Madhavan and B. G. Fernandes, "Axial flux segmented SRM with a higher number of rotor segments for electric vehicles," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, pp. 203-213, 2013.
[143] H. Goto, T. Shibamoto, K. Nakamura, and O. Ichinokura, "Development of high torque density axial-gap switched reluctance motor for in-wheel direct-drive EV," in *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*, 2013, pp. 1-7.

[144] T. Tokita, H. Goto, and O. Ichinokura, "An effect of electromagnetic force on acoustic noise of axial-gap in-wheel SR motor," in *Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference on*, 2014, pp. 987-993.
[145] K. Kiyota, T. Kakishima, A. Chiba, and M. A. Rahman, "Cylindrical rotor design for acoustic noise and windage loss reduction in switched reluctance motor for HEV applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, pp. 154-162, 2016.
[146] N. R. Patel, V. A. Shah, and M. M. Lokhande, "Design and performance analysis of radial flux C-core switched reluctance motor for in-wheel electrical vehicle application," in *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2016 IEEE*, 2016, pp. 1-6.
[147] A. Labak and N. C. Kar, "Outer rotor switched reluctance motor design for in-wheel drive of electric bus applications," in *Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on*, 2012, pp. 418-423.
[148] T. Ogasawara, H. Goto, and O. Ichinokura, "A study of rotor pole shape of in-wheel direct drive SR motor," in *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*, 2013, pp. 1-7.
[149] Z. Xu, K.-I. Jeong, D.-H. Lee, and J.-W. Ahn, "Preliminary performance evaluation of a novel 12/8 segmental rotor type SRM," in *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016 19th International Conference on*, 2016, pp. 1-5.
[150] M. Tanujaya, D.-H. Lee, and J.-W. Ahn, "Design a novel switched reluctance motor for neighborhoods electric vehicle," *ICPE (ISPE) 논문집*, pp. 1674-1681, 2011.
[151] W. Ding, Y. Hu, and L. Wu, "Analysis and development of novel three-phase hybrid magnetic paths switched reluctance motors using modular and segmental structures for EV applications," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, pp. 2437-2451, 2015.
[152] S. Nikam and B. Fernandes, "Design of soft magnetic composite based modular four phase SRM for electric vehicle application," in *Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference on*, 2014, pp. 112-116.
[153] *http://www.domel.com/industries/household*.
[154] *http://www.srdrives.com/vacuum-cleaning.shtml*.
[155] *https://www.electronicsweekly.com/market-sectors/power/dyson-vacuums-104000rpm-brushless-dc-technology-2009-06/*.
[156] *https://www.regalbeloit.com/Brands/Genteq-Hermetic/Reluctance-Motors/Switched-Reluctance-Motors*.
[157] *https://cordis.europa.eu/programme/rcn/857_en.html*.
[158] *https://cordis.europa.eu/result/rcn/195792_en.html*.
[159] *https://cordis.europa.eu/project/rcn/110867_en.html*.
[160] *https://gtr.ukri.org/projects?ref=400223*.
[161] *http://www.evdriven.com/motor/motors/wind/?open-article-id=1417974&article-title=cobham--jaguar-land-rover-and-ricardo-partnering-to-develop-switched-reluctance-traction-motor&blog-domain=greencarcongress.com&blog-title=green-car-congress*.
[162] *http://www.srdrives.com/index.shtml*.
[163] *https://www.energiteknologi.dk/node/7541*.
[164] *https://arpa-e.energy.gov/?q=slick-sheet-project/double-stator-motor-design*.

DOI: 10.30503/nripress.2020.064

[۱۶۵]. علیرضا قائم‌پناه و علیرضا رحیمی، «تحلیل نظام نوآوری و شناسایی چالش‌های پیش رو و تدوین برنامهٔ سیاست‌ها و اقدامات»، پروژهٔ «تدوین سند راهبردی و نقشه راه توسعهٔ فناوری‌های طراحی، ساخت و تدوین دانش فنی انواع موتورهای موردنیاز در صنعت برق ایران»، پژوهشگاه نیرو، ۱۳۹۴.