

ارائه یک روش جامع برای طراحی روتور ماشین رلوکتانس سنکرون

روح‌الله روحانی^۱، سید احسان عبداللهی^{۲*}، سید اصغر غلامیان^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(دریافت: ۹۸/۰۲/۱۳، پذیرش: ۹۸/۰۴/۲۴)

چکیده

ساختار روتور ماشین رلوکتانس سنکرون دارای پیچیدگی زیادی در طراحی می‌باشد. این پیچیدگی‌ها باعث عدم ارائه یک روش طراحی جامع برای این ماشین با تعداد شیارهای مختلف روتور و استاتور شده است. در واقع محققان با آزمون و خطا و یا الگوریتم‌های بهینه‌سازی زمان‌بر و پیچیده، حالت بهینه را جهت حصول بیشینه گشتاور و کمینه ریپل آن به دست می‌آورند. یکی از مشکلات این موتور ریپل بالای گشتاور آن می‌باشد که نیاز است در فرآیند طراحی با انتخاب مناسب پارامترهای طراحی روتور، دامنه آن کاهش یابد که این امر فرآیند طراحی را پیچیده می‌نماید. در این مقاله روش تحلیل جدیدی، جهت طراحی روتور ماشین رلوکتانس سنکرون با هدف کاهش ریپل گشتاور با حفظ مقدار متوسط گشتاور ارائه می‌شود. بدین منظور روش ارائه شده برای طراحی روتور یک استاتور ۲۴ شیار، با روتورهای ۲، ۳ و ۴ سد شاری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. پارامترهای به دست آمده با این روش بسیار نزدیک به مقادیر حاصل از مراجع قبلی - روش‌های بهینه‌سازی به همراه روش اجزای محدود- می‌شود. در ادامه برای ارزیابی موتور طراحی شده با این روش، عملکرد الکترومغناطیسی آن با استفاده از روش اجزای محدود شبیه‌سازی و نتایج آن بررسی می‌گردد. مشاهده می‌شود که گشتاور تولیدی و ریپل آن نیز بسیار نزدیک به مقادیر مطلوب به دست آمده از روش‌های زمان‌بر و پیچیده قبلی است.

کلیدواژه‌ها: حامل شار، ریپل گشتاور، بار کششی، سد شار، هارمونیک شیاری

۱. مقدمه

در کارخانه‌های صنعتی و صنعت خودروسازی به دلیل نیاز به گشتاور بالا در هنگام راه‌اندازی و همچنین در کاربردهای کششی، یکی از گزینه‌های برتر موتور رلوکتانس سنکرون هست. چراکه آهنربایی بر روی روتور و یا استاتور وجود ندارد که جریان بالا آن را مغناطیس زدا کند. از سوی دیگر به دلیل عدم وجود سیم‌پیچ بر روی روتور آن، مشکلات جریان راه‌اندازی بالا در روتور موتور القایی را ندارد. همچنین پیشرفت‌های اخیر در کیفیت مواد مغناطیسی، الکترونیک قدرت، و میکروکنترلرها، به ارزان‌تر شدن و کارآمدی و عملکرد بالای درایوهای موتورهای الکتریکی کمک کرده است. از جمله ویژگی‌های موتور رلوکتانس سنکرون: چگالی گشتاور مطلوب، راندمان بالا، پاسخ دینامیکی سریع، تحمل اضافه‌بار تا حدود چهار برابر در زمان کوتاه، محدوده سرعت وسیع و همچنین قابلیت درایو AC است [۵-۱]. گرچه روتور ماشین رلوکتانس سنکرون بدون سیم‌پیچ و آهن‌ربا است، ولی طراحی آن پیچیده و دارای پارامترهای زیادی می‌باشد [۶]. تغییر کوچک در پارامترهای طراحی آن، تأثیرات نامطلوبی بر مشخصه

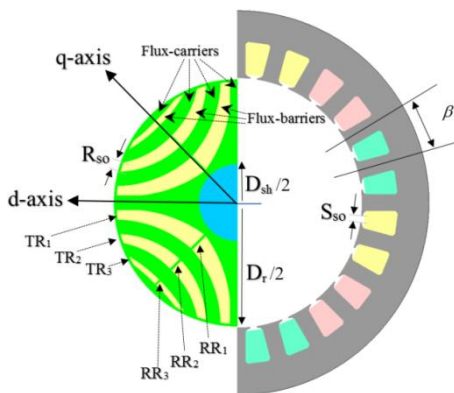
الکترومغناطیسی ماشین خواهد داشت. از نظر ساختاری، می‌توان روتور این ماشین را به دودسته تورق محوری (ALA) که از دهه نود میلادی مورد مطالعه قرار گرفت [۲۲-۷]، و تورق شعاعی (TLA) تقسیم کرد. در این مقاله به دلیل مزایای نسبی، ساختار روتور تورق شعاعی در نظر گرفته می‌شود.

از زمان معرفی ماشین رلوکتانس سنکرون از سال ۱۹۲۳ توسط کاستکو^۲ [۲۳] مطالعات و تحقیقات بسیاری بر روی این ماشین صورت گرفت. برخی تحقیقات بر روی پارامترهای طراحی و کمیت‌های الکترومغناطیسی ماشین رلوکتانس سنکرون [۴ و ۲۳-۲۴]، برخی مقایسه ماشین رلوکتانس سنکرون با توپولوژی‌های مختلف روتور [۲۱، ۲۲، ۳۱ و ۳۵-۳۹] و همچنین مقایسه با دیگر ماشین‌های الکتریکی القایی، سوئیچ رلوکتانس و آهنربای دفنی در [۳، ۴ و ۶۴-۴۰] و برخی بر تعیین ضخامت، شکل و تعداد سد شار با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی به منظور بهبود مشخصه گشتاور و ضریب قدرت [۳۷ و ۸۱-۶۴] تمرکز نموده‌اند. در دیگر مقالات طراحی تحلیلی و مدل‌سازی ماشین رلوکتانس سنکرون و ماشین رلوکتانس سنکرون

² Kostko

* نویسنده پاسخگو: e.abdollahi@nit.ac.ir

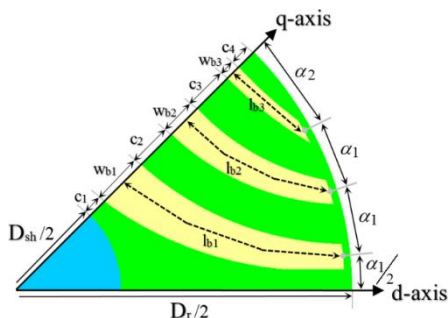
درعین حال کمترین اثر را بر روی شارها در راستای محور d بگذارد.



شکل (۱): ماشین رلوکتانس سنکرون ۲۴ شیار ۴ قطب با ۳ سد شار

۲-۱. ساختار روتور ماشین رلوکتانس سنکرون

ساختار روتور ماشین‌های $SynRM$ به دلیل پارامترهای هندسی زیاد (شکل‌های ۱ و ۲)، دارای پیچیدگی ذاتی در طراحی و بهینه‌سازی است. روند طراحی اولیه، اصلاح و بهینه‌سازی روتور به صورت فلودپاگرام در [۲۷، ۶۹ و ۷۶] ارائه شده‌اند. روتورهای نایزوتروپیک به صورت TLA و ALA به گونه‌ای طراحی می‌شود تا بیشترین نسبت برجستگی و درعین حال بیشترین یکنواختی (مانند یکسان بودن دهانه شیار باز روتور از نگاه استاتور) بر روی هر محور روتور در حال چرخش دارا باشد. این ساختار نایزوتروپیک در نهایت منجر به رپیل گشتاور بالا می‌شود.



شکل (۲): پارامترهای هندسی روتور ۴ قطب

۲-۲. شکل و تعداد سد شار

در [۲، ۲۲، ۲۵، ۳۹ و ۶۶] روتور با تعداد سدشارهای مختلف و متناسب با تعداد شیارهای استاتور و در [۲، ۳۷ و ۷۰] شکل سد شار (اعم از دوزنقه‌ای و کمانی) مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد چنانچه تعداد سد شارها به اندازه کافی زیاد باشد و همچنین شکل و زاویه سدشارهای کمانی و دوزنقه‌ای شکل در راستای خطوط شار مغناطیسی قرار گیرد، مشخصه گشتاور بهبود می‌یابد. برای نمونه پارامترهای روتور با ۳ سد شار در شکل (۲) نشان داده شد. در بخش ۴ روتور با ۲ و ۴ سد شار نیز مورد

تقویت شده با آهنربا ارائه شده است [۸۸-۸۲]. همچنین استحکام مکانیکی ساختار روتور در بخش دنده‌های (شعاعی و مماسی) روتور و فرکانس طبیعی مکانیکی به ترتیب در [۹۱-۸۹]، [۳۹] مطالعه شد. معرفی صنعتی موتور رلوکتانس سنکرون ($SynRM$)^۱ نیازمند روش طراحی سریع، دقیق، کارآمد و به خصوص ساده است. این روش باید مانند دیگر روش‌های طراحی مرسوم در ماشین‌های الکتریکی همچون روش تحلیل ساده و سریع در طراحی موتورهای القایی [۹۲]، روشی سازگار و رقابت پذیر باشد. اما محاسبه پارامترهای طراحی توسط روش‌های قبلی پیچیده و زمان بر است.

در این مقاله یک روش ساده و جامع برای طراحی روتور ماشین رلوکتانس سنکرون با هر تعداد شیار در استاتور و روتور بحث می‌شود به طوری که تا حد امکان نیاز به روش‌های مبتنی بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی و استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود را کاهش می‌دهد. بدین منظور در بخش ۲ مشخصات ساختار روتور نایزوتروپیک^۲ به منظور رسیدن به عملکرد مناسب $SynRM$ بر اساس ترکیب تئوری‌ها و مفاهیم تحلیلی و تجربی موجود در [۶، ۲۲، ۹۳ و ۹۴] بررسی می‌شود. سپس در بخش ۳ با مروری بر روابط کلی طراحی هندسه روتور در [۶ و ۷۶] و همچنین روابط اندوکتانس و گشتاور موتور در تبدیل پارک، روشی ساده، مدون و با دقت قابل قبول ارائه می‌شود. در بخش ۴ طراحی روتور با تعداد سدشارهای مختلف با استفاده از روش پیشنهادی بیان می‌شود. در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی شده برای روش پیشنهادی بر روی روتورهای مختلف ۲، ۳ و ۴ سد شاری ارائه و سرعت و دقت آن اعتبار سنجی می‌شود.

۲. پارامترهای طراحی ماشین رلوکتانس سنکرون

کلیت هندسه روتور در تعداد پارامترهای روتور (پارامتری سازی و بهینه‌سازی) بسیار مهم است. به همین دلیل باید با انتخاب روتور با شکلی ساده و معقول از تعداد پارامترها کاست. روتورهای مرسوم قطب برجسته به دلیل مشخصه گشتاور نامطلوب و تلفات آهنی آن انتخاب درستی نیست. روتورهای ALA به دلیل متفاوت بودن ابعاد و زاویه انحنای هر ورق، روند مونتاژ و هزینه ساخت بیشتر، غیرعملی بودن مورب‌سازی آن و تلفات هسته گزینه خوبی به نظر نمی‌رسد [۲۳ و ۹۵]. لذا روتور با شکلی مناسب و سدشارهای متعدد از نوع TLA مدنظر قرار می‌گیرد (شکل ۱). عملکرد کلیدی سدشارهای متعدد در ساختار روتور باید به گونه‌ای باشد که شارها را در راستای محور q تا حد امکان مسدود کند و

^۱ Synchronous Reluctance Machine ($SynRM$)

^۲ Anisotropic: با خواص فیزیکی متفاوت در جهت‌های مختلف

۳-۲. پهنای سد شار

با توجه به نمودار *mmf* نرمالیزه شده شکل (۳) و با تحریک سیم‌پیچ‌های استاتور در راستای محور *q*، متوسط *mmf* هر سد شار در راستای محور *q* عبارت است از:

$$f_{qbi} = \frac{1}{\alpha_1} \int_{\alpha_1(i-1.5)}^{\alpha_1(i-0.5)} f_q * \sin(P\alpha) d\alpha \quad (5)$$

$2 \leq i \leq N_b$

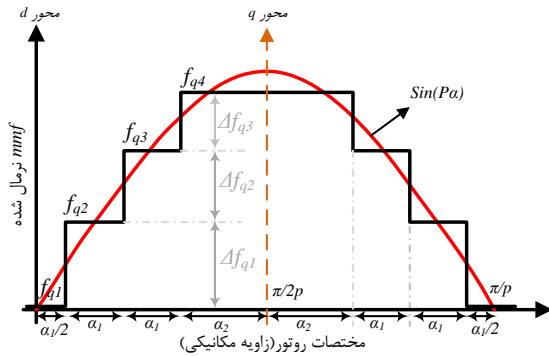
که در این رابطه، α_1 گام شیار روتور و f_q مقدار *mmf* اعمالی در راستای محور *q* است

همچنین اختلاف *mmf* سدهای شار باهم عبارت است از:

$$\Delta f_{qi} = f_{qbi+1} - f_{qbi} \quad (6)$$

که در آن، Δf_{qi} تفاضل *mmf* در قبل و بعد سد شار *i*-ام و f_{qbi} مقدار *mmf* هر سد شار در راستای محور *q* است.

برای محاسبه پهنای سدهای شار با توجه به [۶، ۲۶ و ۷۶] از رابطه (۷) استفاده می‌شود.



شکل (۴): توزیع چگالی شار در اطراف روتور با تحریک سیم‌پیچ‌ها در راستای محور *q*

$$\frac{W_{bi}}{W_{bk}} = \frac{\Delta f_{qi}}{\Delta f_{qk}} * \sqrt{\frac{l_{bi}}{l_{bk}}} \quad (7)$$

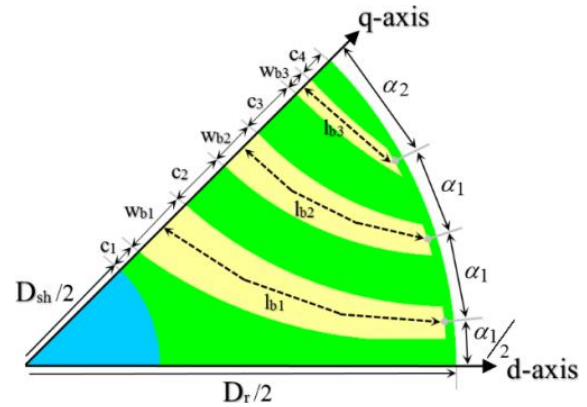
در این رابطه، W_{bi} پهنای سد شار *i*-ام، l_{bi} طول عرضی انتهای سد شار *i*-ام تا محور *q* و Δf_{qi} تفاضل *mmf* در قبل و بعد سد شار *i*-ام در راستای محور *q* است.

با توجه به [۷۶] می‌توان معادله ۷ را برحسب گام شیار روتور هم بازنویسی کرد:

$$\frac{W_{bi}}{W_{bk}} \approx \frac{\Delta f_{qi}}{\Delta f_{qk}} * \sqrt{\frac{\alpha_2 + (\alpha_1 * (N_b - N_{bi}))}{\alpha_2 + (\alpha_1 * (N_b - N_{bk}))}} \quad (8)$$

در این رابطه، W_{bi} پهنای سد شار *i*-ام، Δf_{qi} تفاضل *mmf* در قبل و بعد سد شار *i*-ام در راستای محور *q*، α_1 گام شیار روتور و

بررسی قرار می‌گیرد و مشاهده خواهد شد که روش پیشنهادی برای روتور با هر تعداد سد شار صادق است.



شکل (۳): پارامترهای هندسی روتور ۴ قطب

گرچه در برخی مراجع عنوان شده که k_w (ضریب برجستگی) بزرگ‌تر از ۱۰ است و حتی برخی آن را حدود ۲۵ نیز پیش‌بینی کرده‌اند، ولی در عمل نسبت برجستگی موتورها در حالت بارداری کوچک‌تر از ۱۰ است [۲۲]. این نسبت برجستگی با ضریب k_{wq} بهینه‌سازی می‌شود که برای آن:

$$k_{wq} = \frac{\sum_{i=1}^{N_b} W_{bi}}{N_b * \sum_{i=1}^{b+1} C_i} \quad (1)$$

در این رابطه W_{bi} پهنای سد شار، C_i پهنای حامل شار، و N_b تعداد کل سدشارهای موجود در هر قطب روتور می‌باشند. مقدار بهینه (۱) معمولاً از روش FEM و یا روش‌های بهینه‌سازی به دست می‌آید. روابط اندوکتانس ماشین به‌طور مستقیم متأثر از توزیع سد شارها در ساختار نایزوتروپیک روتور است که در معادلات بخش ۳ جلوه می‌کند [۲۲، ۲۶، ۳۱]. ضریب k_{wq} به‌منظور رسیدن به گشتاور بیشینه در [۳۹، ۹۴] حدوداً برابر ۰/۵۵ و در [۶، ۹۰، ۹۶] معمولاً بین ۰/۶ تا ۰/۹ است. همچنین تعداد حامل شار عبارت است از:

$$N_c = N_b + 1 \quad (2)$$

که در آن، N_c تعداد حامل شار و N_b تعداد سد شار است.

رابطه تعداد شیار روتور برای *SynRM* دو قطب و چهار قطب به بالا عبارت است از:

$$n_r = 2N_b + 2 \quad 2P = 2 \quad (3)$$

$$n_r = 2 * (4N_b + 2) \quad 2P \geq 4 \quad (4)$$

که N_r تعداد دندانه‌های روتور، $2P$ تعداد قطب‌ها و N_b تعداد سدهای شار است

در این رابطه، f_d مقدار mmf اعمالی در راستای محور d ، P تعداد جفت قطب و N_b تعداد سد شار است. بنابراین، پهنای حامل شارها در راستای محور q عبارت است از:

$$C_i = \frac{(D_r - D_{sh})^2 * f_{dci}}{4 * (1 + k_{wq}) \sum_{i=1}^{N_b+1} f_{dci}} \quad (11)$$

$1 \leq i \leq N_b + 1$

در این رابطه، D_r قطر روتور، D_{sh} قطر شفت، k_{wq} ضریب توزیع سد شار در بین حامل شارها و f_{dci} متوسط mmf هر حامل شار در راستای محور d است.

۳-۱-۲. گام شیار روتور

مهم‌ترین پارامترهای طراحی روتور $SynRM$ ، گام شیار روتور و سپس نسبت برجستگی بالا در روتور با ساختار نایزوتروپیک همگن است. محدوده نسبت برجستگی در بخش ۲ آورده شد که در این محدوده، چگالی گشتاور تفاوت متناهی ندارد. با انتخاب مناسب k_{wq} و مشخص شدن نسبت برجستگی، گام شیار روتور تنها پارامتر کلیدی است که باید آن را یافت. برای به دست آوردن گام شیار روتور مناسب هدف اصلی بر سر رسیدن به ریپل گشتاور کمینه است. در [۳۶] به منظور کاهش ریپل، روتور به صورت نامتقارن بررسی شد. در این روش گام شیار سد شارها در هر قطب، با قطب هم‌جوار و متقابل متفاوت است.

در هر قطب گام شیار روتور برای هر سد شار در برخی مراجع به طور معمول متفاوت، ولی مشابه گام شیار سدشارهای واقع در قطب مقابل است [۳۵، ۳۹، ۷۶، ۸۷، ۹۳، ۹۴]. همچنین در برخی دیگر گام شیار روتور برای تمامی سد شارها یکسان است [۶، ۹۰، ۹۶]. به دلیل سادگی و رسیدن به یک اصل و قاعده ثابت و جامع، که برای همه ماشین‌های $SynRM$ (با هر تعداد شیار روتور و استاتور) صادق باشد، در این مقاله نیز از گام شیار ثابت استفاده می‌شود.

۳-۲. روابط گشتاور

یکی از مهم‌ترین مشکلات در طراحی و بهینه‌سازی روتور $SynRM$ (به منظور رسیدن به ریپل گشتاور کمینه) تأثیر قابل ملاحظه تعداد و شکل دندانه‌های استاتور است. به این منظور، در این مقاله با در نظر گرفتن تعداد دندانه‌های استاتور روشی نظری برای طراحی روتور ارائه می‌شود.

با توجه به [۳۹، ۹۳، ۹۴، ۱۰۰]، واضح است که مؤلفه اول و دوم هارمونیک‌های شیار (چگالی میدان مغناطیسی) نسبت به سایر هارمونیک‌ها، به خصوص هارمونیک‌های مکانی ۵ و ۷ اثر به مراتب بیشتری دارند. در [۱۰۱] برای یک روتور دو قطب با

N_{bi} سد شار مورد نظر است. همچنین با توجه به شکل (۳) می‌توان α_2 را بر حسب α_1 نوشت:

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2P} - \alpha_1 (N_b - 0.5) \quad (9)$$

در این رابطه، α_2 فاصله نشان داده شده در شکل (۳) است.

۳. اصول و روابط طراحی روتور

همان‌طور که قبلاً عنوان شد طراحی روتور ماشین $SynRM$ قسمت پیچیده طراحی آن می‌باشد. در [۲۳] عملکرد این ماشین و هارمونیک‌های چگالی شار فاصله هوایی به‌زای کمان‌های مختلف قطب تا حدودی تحلیل شد. همچنین در [۳۱، ۳۴، ۹۷ و ۹۸] به‌طور مستقیم با استفاده از تحلیل FEM، اثر پارامترهای هندسی روتور برای بهینه‌سازی هندسه روتور و رسیدن به اندوکتانس مطلوب مطالعه شد. هرچند در فرآیند طراحی به دلیل پیچیدگی‌های روتور، زمان محاسبات و تعداد دفعات بهینه‌سازی زیاد است. در عین حال در این روش‌ها در نظر گرفتن اثر اشباع بسیار ضروری است. بهینه‌سازی طراحی $SynRM$ بر اساس الگوریتم‌های کاملاً ریاضی در [۳۴، ۳۷، ۶۶، ۶۹، ۹۷ و ۹۹] ارائه شده است که عمدتاً اشکال زمان‌بر بودن فرآیند طراحی را دارند. در این مقاله روشی بسیار ساده با چشم‌پوشی از اثر اشباع ارائه می‌شود.

۳-۱-۱. اثر دندانه و شیارها بر روی ریپل گشتاور

به نظر می‌رسد که در روتور ALA (چنانچه تعداد لایه‌های حامل شار زیاد و نازک باشد [۱۷]) هم ΔL_a (تغییرات اندوکتانس در راستای محور d) و هم ΔL_q (تغییرات اندوکتانس در راستای محور q) کوچک، ولی در اطراف محور q و در راستای محور d جنس روتور از مواد غیرمغناطیسی است. بنابراین، دارای ΔL_{dq} (تغییرات اندوکتانس متقابل محور d - q) قابل توجهی است. از طرف دیگر روتور TLA چنانچه دارای گام شیار روتور مناسب و بدون برش بیرونی^۱ در محور q باشد، مؤلفه ΔL_q ، ΔL_a و ΔL_{dq} دارای مقدار نسبتاً کم و مطلوبی خواهد شد.

۳-۱-۱-۱. پهنای حامل شارها

با تحریک سیم‌پیچ‌های استاتور در راستای محور d و با توجه به اینکه mmf نرمالیزه در راستای محور d ۹۰ درجه با mmf نرمالیزه در راستای محور q اختلاف فاز دارد، متوسط mmf هر حامل شار در راستای محور d عبارت است از:

$$f_{dci} = \frac{1}{\alpha_1} \alpha_1^{i-0.5} f_d * \cos(\rho \alpha) d \alpha \quad (10)$$

$2 \leq i \leq N_b + 1$

^۱ Cut off

بنابراین، معادله گشتاور برای ماشین سه فاز برابر خواهد بود با:

$$T = \left. \frac{\partial W'}{\partial \theta} \right|_{i=const} = \frac{m}{2} P \lambda_{dq} \times I_{dq} + \frac{1}{2} I_{dq}^T \frac{\partial \lambda_{dq}}{\partial \theta} \quad (17)$$

که در آن، λ_{dq} ماتریس شار دور، I_{dq} ماتریس جریان m و تعداد فاز است. ترم اول گشتاور متوسط تولیدی و ترم دوم ریپل گشتاور است. با قرار دادن سه معادله (۱۵-۱۲) در معادله (۱۶) و سپس قرار دادن نتیجه در معادله (۱۷) عبارت گشتاور حاصل می‌شود:

$$T = \frac{m}{2} P [I_d I_q (L_{do} - L_{qo} + (\Delta L_d + \Delta L_q) \cos(PN_s \theta)) - (\Delta L_{dq} \sin(PN_s \theta) (I_d^2 - I_q^2))] - \frac{1}{2} P N_s [2 I_d I_q \Delta L_{dq} \cos(PN_s \theta) + I_d^2 \Delta L_d \sin(PN_s \theta) - I_q^2 \Delta L_q \sin(PN_s \theta)] \quad (18)$$

به‌طور کلی می‌توان گفت که رابطه (۱۸) دارای دو ترم مولد ریپل می‌باشد که ضرایب \sin و \cos هستند. مشاهده می‌شود که ضرایب \cos همانند گشتاور متوسط دارای ضریب $I_d I_q$ است. از نگاه دیگر در حالت بی‌باری که $I_q = 0$ است، ضریب \cos حذف می‌شود ولی ضریب \sin همچنان باقی می‌ماند. همچنین اگر $I_q \gg I_d$ شود از بین ترم‌های مولد ریپل گشتاور، ضرایب \sin غالب می‌باشند. ΔL_q و ΔL_d در اثر نوسان ناشی از شیار باز استاتور (ضریب کارتر) و همچنین شار چرخشی (L_{qc}) ایجاد می‌شود. برای کمینه کردن L_{qc} کافی است تا روتور را مورب ساخت. ولی کمیت ΔL_{dq} اثر متقابل دندانه‌های روتور و استاتور است که گشتاور ضربانی قابل ملاحظه‌ای را ایجاد می‌کند. چنانچه گام شیار روتور به‌گونه‌ای انتخاب شود که مجموع دامنه بیشینه و کمینه این ریپل‌ها برای انتهای تمام سدشارهای موجود در یک قطب برابر صفر شود، آن‌گاه می‌توان گفت که ΔL_{dq} به‌صورت تئوری متمایل به صفر می‌شود. مؤلفه ΔL_{dq} اصلی‌ترین عامل ریپل گشتاور منتهی از هارمونیک‌های شیار است. چنانچه دندانه‌های روتور (انتهای سدشارهای روتور) به‌طور هم‌زمان به شیارهای دندانه‌های استاتور نزدیک (دور) شوند یک پالس گشتاور مثبت (منفی) ایجاد می‌شود. گرچه مقدار متوسط این ریپل‌های مثبت و منفی صفر می‌باشد ولی گام شیار روتور باید به‌گونه‌ای انتخاب شود تا دامنه برآیند لحظه‌ای این پالس‌های گشتاور مثبت و منفی، کمینه (متمایل به صفر) شود. معادله (۱۸) بیان می‌دارد که به‌زای هر دور چرخش روتور (درجه مکانیکی)، به تعداد $PN_s \theta$ بار مؤلفه اول هارمونیک ریپل گشتاور ناشی از مؤلفه اول هارمونیک شیار، در اطراف روتور تکرار می‌شود. به‌عبارت‌دیگر به تعداد $PN_s \theta$ حوزه پالس گشتاوری

ساختار نایزوتروپیک روتور مشخص شد که هارمونیک‌های مکانی (تسمه‌ای) ۵ و ۷ به‌سختی می‌توانند در ساختار نایزوتروپیک هسته روتور جاری شوند. البته این‌که آیا دیگر هارمونیک‌ها در طراحی لحاظ شوند یا خیر به پارامترهای متعددی مانند شیار باز استاتور و روتور و ضخامت فاصله هوایی بین روتور و استاتور و... وابسته است. گرچه با احتساب دیگر هارمونیک‌ها یک مدل کامل‌تر حاصل می‌شود. اما با لحاظ کردن دیگر هارمونیک‌ها، تعیین عملی همه پارامترهای درگیر بسیار سخت می‌شود [۳۰]. بنابراین، در روش پیشنهادی برای راحتی در تحلیل و به‌دست آوردن گام شیار روتور (α_1)، با صرف‌نظر کردن از اثر اشباع، فقط مؤلفه اول هارمونیک شیار در نظر گرفته می‌شود و در انتها با اندکی اصلاح توسط FEM مشخص می‌شود که فقط در نظر گرفتن هارمونیک اصلی شیار در به‌دست آوردن گام شیار روتور کافی است.

با توجه به [۲۲، ۳۰، ۹۲] و پارامترهای ماشین در قاب مرجع روتور (پارک)، اندوکتانس محورهای d و q عبارتند از:

$$L_d(\theta) = L_{do} + \sum_{v=1}^{\infty} \Delta L_d \cos(vPN_s \theta) \quad (12)$$

$$L_q(\theta) = L_{qo} - \sum_{v=1}^{\infty} \Delta L_q \cos(vPN_s \theta) \quad (13)$$

$$L_{dq}(\theta) = - \sum_{v=1}^{\infty} \Delta L_{dq} \sin(vPN_s \theta) \quad (14)$$

در این معادلات θ زاویه روتور، N_s تعداد شیار استاتور در هر جفت قطب و L_{do} و L_{qo} به‌ترتیب مقدار ثابت اندوکتانس‌های محور d و q و همچنین L_d و L_q و اندوکتانس متقابل (L_{dq}) تابعی از θ هستند. برای سادگی در محاسبات در اینجا فقط هارمونیک اصلی شیار یعنی $v=1$ در نظر گرفته می‌شود.

با صرف‌نظر از اشباع مغناطیسی، رابطه بین شار دور و جریان عبارت است از:

$$\begin{cases} \lambda_d = L_d I_d + L_{dq} I_q \\ \lambda_q = L_{dq} I_d + L_q I_q \end{cases} \quad (15)$$

که در آن، λ_d ، λ_q ، L_d ، L_q ، L_{dq} ، I_d و I_q به ترتیب شار دور محور d ، شار دور محور q ، اندوکتانس محور d ، اندوکتانس محور q ، اندوکتانس متقابل بین محور d و q در هر گام شیار استاتور، جریان الکتریکی محور d و جریان الکتریکی محور q می‌باشد. که معادله شبه انرژی W' عبارت است از:

$$W' = \frac{1}{2} [I_d \lambda_d + I_q \lambda_q] \quad (16)$$

اینکه دوره تناوب (به درجه مکانیکی) هارمونیک اول شیاری استاتور برای استاتور با تعداد شیارهای مختلف کاملاً مشخص و برابر با $\beta = 360/n_s$ می‌باشد؛ چنانچه روتور به اندازه $0 < \theta < \beta/2$ چرخانده شود و همچنین به دلیل این که α_1 در حوالی β می‌باشد، می‌توان محدوده جواب را به سادگی به دست آورد که برای نمونه یک ماشین SynRM با استاتور ۲۴ شیار و روتور با ۳ سد شار در شکل (۵) نشان داده شده است. با صرف نظر از اثر اشباع هسته، اگر مؤلفه‌ی اصلی شکل موج مولد ریپل پیرامون روتور در شکل (۴) یک پریودیت فرض شود، آن گاه به صورت نسبی ریپل گشتاور به ازای α_1 و β مختلف، همانند نمودار توپوگرافی نشان داده شده در شکل (۵) خواهد شد. این نمودار صرفاً یک شاخصی بر میزان نسبی ریپل گشتاور به ازای گام شیاری روتور مختلف می‌باشد. اولین نکته‌ای که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، بیشینه شدن ریپل گشتاور در حالت مساوی بودن گام شیاری روتور و استاتور است. در این شکل چند جواب برای رسیدن به کمینه ریپل مشاهده می‌شود. ولی باید توجه داشت که شکل‌های (۴-۵) فقط برای کمینه کردن ریپل حاصل از ΔL_{dq} می‌باشد و در آن ΔL_d و ΔL_q ترتیب اثر داده نشد. به عبارت دیگر این روش گرچه در مواردی حتی منجر به کاهش ریپل ناشی از ترم‌های ΔL_d و ΔL_q می‌شود ولی تضمین کننده کاهش آن نیست.

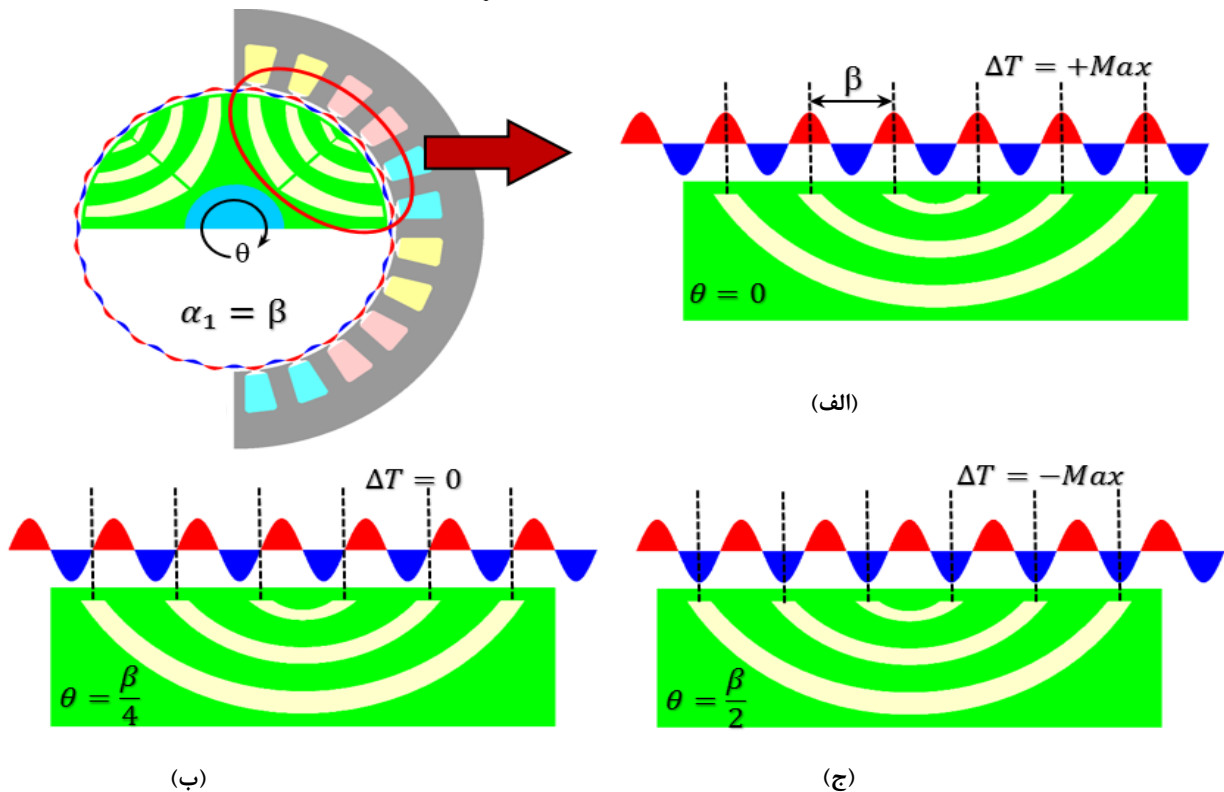
به وجود می‌آید که در شکل (۴) مشاهده می‌شود. همچنین در این شکل مرتبه اول هارمونیک مولد ریپل (منتجه از مؤلفه اصلی هارمونیک شیاری) به همراه سه شکل از گشتاور پالسی در سه موقعیت مختلف اطراف یک قطب روتور نشان داده شده‌اند. علامت مثبت (منفی) بیانگر هم‌جهت (نا هم‌جهت) بودن ریپل گشتاور در جهت چرخش روتور می‌باشد. بنابراین برای داشتن کمینه ریپل، جمع آثار ریپل گشتاور دیده شده در انتهای سدشارهای موجود در زیر هر جفت قطب باید برابر صفر باشد. ریپل گشتاور ناشی از هارمونیک اول شیاری برای استاتور و روتور با هر تعداد شیاری در زیر هر قطب برابر است با:

$$\Delta T = \sum_{i=1}^{N_b} \sin(P * h_{s1}((i-0.5)\alpha_1 - \theta)) + \sin(P * h_{s1}((90 - (i-0.5)\alpha_1) - \theta)) \quad (19)$$

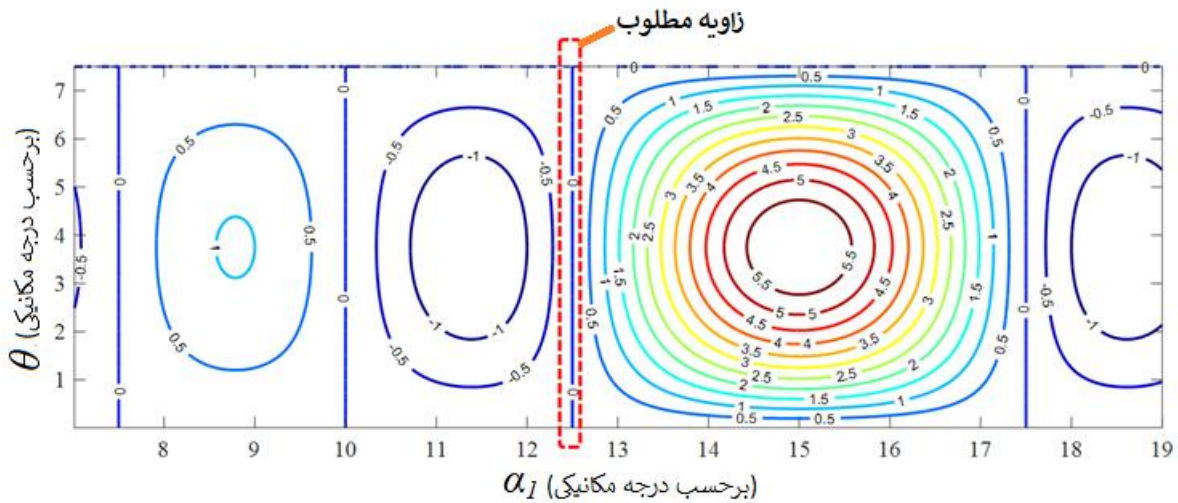
$$h_{s1} = \frac{n_s}{p} = N_s$$

که در آن، h_{s1} مرتبه اول هارمونیک مولد ریپل، N_d تعداد سد شار، زاویه روتور و n_s تعداد شیاری استاتور است.

حال برای کمینه کردن ریپل گشتاور از معادله ۱۹ کافی است تا α_1 و θ مناسب را قرارداد. معادله ۱۹ یک معادله دو مجهولی می‌باشد که در مرحله اول قابل حل نیست. با توجه به



شکل (۵): گشتاور پالسی حول روتور، (الف) گشتاور پالسی در موقعیت $\theta = 0$ ، (ب) گشتاور پالسی در موقعیت $\theta = \frac{\beta}{4}$ ، (ج) گشتاور پالسی در موقعیت $\theta = \frac{\beta}{2}$



شکل (۶): نمودار توپوگرافی ریپل گشتاور به‌ازای گام شیار روتور و جابجایی هارمونیک اصلی مولد ریپل از یک موتور رلوکتانس سنکرون ۴ قطب ۲۴ شیار با ۳ سد شار

۴. بررسی موردی و کارآمدی روش ارائه‌شده برای روتورهای مختلف

بنا بر نیاز و شرایط موجود در طراحی هندسه روتور، طراح ممکن است برای رسیدن به عملکرد مکانیکی و یا مغناطیسی موردنظر، نیاز به ساختارهای مختلفی از روتور پیدا کند بنابراین، روش پیشنهادی باید برای هر ساختاری از روتور کارایی داشته باشد.

با استفاده از استاتور یک موتور القایی ۱۵۰۰ وات و طراحی روتور با تعداد سدشارهای مختلف برای آن، می‌توان مشاهده کرد که روش ارائه‌شده، با دقت مطلوبی در مدت‌زمان بسیار کوتاهی منجر به طراحی ساختار مناسب روتور می‌شود. برای اعتبار سنجی روش پیشنهادی، سه روتور با تعداد سد شار مختلف در نظر گرفته شد. بنابراین روش بیان‌شده در بخش ۳، علاوه‌بر روتور ۳ سد شاری، برای روتورهای ۲ و ۴ سد شاری نیز مورد مطالعه قرار گرفت، که در شکل (۶) نتایج آن به‌همراه توزیع چگالی شار در بارنامی نشان داده شده‌اند. بدین‌صورت که در ابتدا گام شیار روتور از روش ارائه‌شده به‌دست آورده شد و سپس در نرم‌افزار اجزای محدود با اندکی اصلاح بهینه‌سازی شد. پارامترهای طراحی هندسی استاتور و روتور ماشین *SynRM* با سه روتور مختلف به ترتیب در جدول‌های (۲-۱) آورده شده است. در جدول (۱) مشخصه هندسی استاتور و در جدول (۲) مشخصه هندسی ۳ روتور مختلف آورده شد.

با توجه به آنچه از شار چرخشی در [۴، ۲۶، ۳۰، ۸۸، ۱۰۲] آورده شد می‌توان چنین استنتاج کرد که جوابی از شکل (۴) موردقبول است که از همه بزرگ‌تر و در دو شرط معادله (۲۰) صدق کند:

$$\begin{cases} \alpha_1 < \beta \\ \alpha_2 > \alpha_1 \end{cases} \quad (20)$$

چنانچه $\alpha_2 > \alpha_1$ شود، گرچه در کوچک‌ترین حامل شار نزدیک به محور q ، شار چرخشی حتی بیشتر هم می‌شود ولی با تغییر θ ، تغییرات شار چرخشی در این حامل شار کاهش می‌یابد. و همچنین این شرط منجر می‌شود تا انتهای حامل شارها در نواحی نزدیک به محور d نازک‌تر شود و در نتیجه شار چرخشی در این نواحی کاهش می‌یابد.

با توجه به فرمول و شروط ذکرشده در رابطه (۲۰-۱۹)، گام شیار روتور به‌دست‌آمده در این فرایند $\alpha_1 = 12/496$ می‌باشد که با خط‌چین در شکل (۵) نشان داده شد. گام شیارهای کوچک‌تر به دلیل این‌که منجر به اشباع حامل شارها به‌خصوص در نواحی انتهایی [۹۴] و در نتیجه کاهش چگالی گشتاور می‌شود؛ و همچنین گام‌های شیار روتور بزرگ‌تر از گام شیار استاتور نیز به دلیل افزایش شار چرخشی [۲۶، ۳۰، ۸۸]، انتخاب نمی‌شوند.

ازنقطه‌نظر زمان تحلیل هم با یک کامپیوتر ساده با مشخصات RAM: 8GB و Core: i7 در چند ثانیه نمودار توپوگرافی شکل (۵) حاصل می‌شود.

مناسب در تحلیل مکانیکی می‌شوند. همچنین روش پیشنهادی بر روی سه روتور ۲، ۳ و ۴ سد شار با استاتور ۳۶ شیاری نیز اعتبار سنجی شد که به‌طور نمونه برای روتور ۴ سد شاری و استاتور ۳۶ شیار [۹۶] نیز با دقت خوبی به $\alpha_I=8/75$ درجه رسید که گام شیار روتور بهینه به‌دست‌آمده که در مرجع [۹۶] $\alpha_I=8/3$ درجه می‌باشد. در شکل (۷) روند و مراحل طراحی و محاسبه ابعاد هندسه روتور به روش پیشنهادی به‌صورت یک نمودار درختی آورده شد.

۵. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل

مشخصه گشتاور خروجی این ماشین با سه روتور مطالعه شده به‌صورت شکل‌های (۱۰-۸) می‌باشد. همان‌طور که انتظار می‌رفت، ریپل گشتاور تا حد زیادی کاهش یافت و در حدود ۱۵٪ رسید. ولی با توجه به آنکه جهت سادگی و سرعت روش طراحی اثر اشباع در آن لحاظ نشده بود، با اصلاح جزئی طراحی به کمک FEM ریپل گشتاور به زیر ۱۰٪ رسید. این مقادیر برابر با مقادیر به‌دست‌آمده از روش‌های قبلی با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی است. در شکل (۶- الف و ب) مجموع R_{so} در هر سمت از سد شارها برابر ۱۰ mm در نظر گرفته‌شد تا روتور در شرایط یکسان باهم مقایسه شود و گشتاور متوسط در هر دو حالت یکسان گردد. ولی در شکل (۶- ج) به دلیل این‌که تعداد سد شار روتور کم بوده و به‌منظور کمینه کردن ریپل گشتاور مجموع R_{so} در هر سمت از سد شارها به ۵ mm کاهش یافت که در نهایت منجر به کاهش اندک گشتاور متوسط شد. در جدول (۳) مقدار ریپل گشتاور برای سه روتور مختلف برای حالت بهینه‌سازی شده و روش پیشنهادی آورده شد. به‌عنوان نمونه، در شکل (۸) زمانی که گام شیار روتور از ۹/۴ درجه (مقدار محاسبه‌شده) به ۸/۸ درجه (نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های قبلی) تغییر یابد، ریپل گشتاور از ۱۴/۶۱٪ به ۹/۴۹٪ کاهش می‌یابد. این تأیید می‌کند که فقط با اندکی تنظیم در حدود ۰/۶ ریپل گشتاور کمینه می‌شود. علاوه‌بر این، متوسط گشتاور نیز تغییر قابل‌ملاحظه‌ای نداشته است و حتی به میزان بسیار کمی بیشتر هم شد. نتایج (گام شیار روتور) به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی با دقت مطلوبی نزدیک به مقادیر به‌دست‌آمده از روش‌های بهینه‌سازی قبلی می‌باشد. چنانچه گام شیار روتور از روش ارائه‌شده در معادلات (۲۰-۱۹)، محاسبه شود، آن‌گاه می‌توان با داشتن k_{wq} همه هندسه روتور را با استفاده از معادلات (۱۱-۲) طراحی کرد.

جدول (۱): مشخصه هندسی استاتور

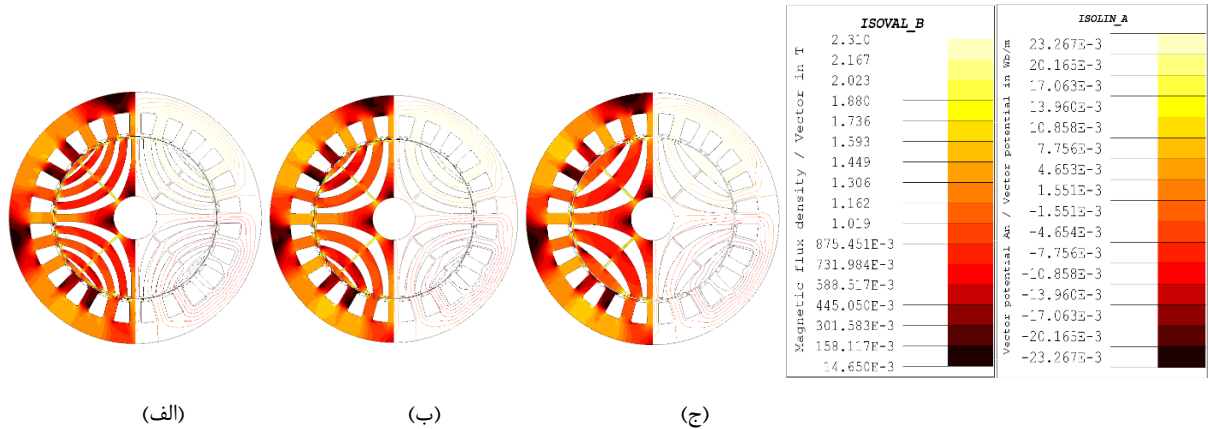
پارامتر	مقدار
توان نامی (kW)	۱/۵
طول فاصله هوایی (mm)	۰/۵
قطر خارجی استاتور (mm)	۱۴۰
طول موتور (mm)	۹۰
تعداد شیار استاتور	۲۴
جریان نامی (A)	۴/۵
سرعت نامی (rpm)	۱۵۰۰
شیار باز دندانه استاتور (mm)	۲/۵
تعداد دور در شیار	۷۶

جدول (۲): مشخصه هندسی روتور ۲، ۳ و ۴ سد شاری

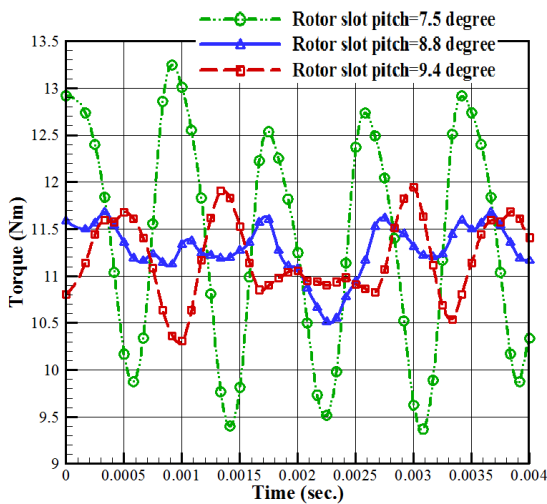
پارامتر	مقادیر		
	$N_b=2$	$N_b=3$	$N_b=4$
قطر روتور (mm)	۹۰	۹۰	۹۰
شعاع شفت (mm)	۱۴	۱۴	۱۴
شیار باز دندانه روتور (R_{so}) (mm)	۲/۵	۳/۳	۲/۵
پهنای دنده‌های مماسی (TR_x) (mm)	۱	۱	۱
پهنای دنده‌های شعاعی (RR_x) (mm)	۱	۱	۱
گام شیار روتور (α_I) (deg)	۱۱/۶	۱۱/۸	۸/۸
نسبت ضخامت هوا به آهن (k_{wq})	۰/۸	۰/۸	۰/۸

به‌منظور کاهش هارمونیک‌های چگالی شار و در نتیجه کاهش ریپل گشتاور R_{so} با S_{so} در جدول‌های (۲-۱) یکسان در نظر گرفته شد. البته برای روتور سه سد شاری به دلیل این‌که نسبت برجستگی حفظ شود $R_{so}=3/3$ mm در نظر گرفته‌شد. همچنین برای روتور دو سد شاری به دلیل کم بودن تعداد سد شار آن و حفظ ریپل گشتاور کمینه، $R_{so}=2/5$ mm در نظر گرفته‌شد، به همین دلیل اندکی از نسبت برجستگی و در نتیجه گشتاور متوسط کاسته شد.

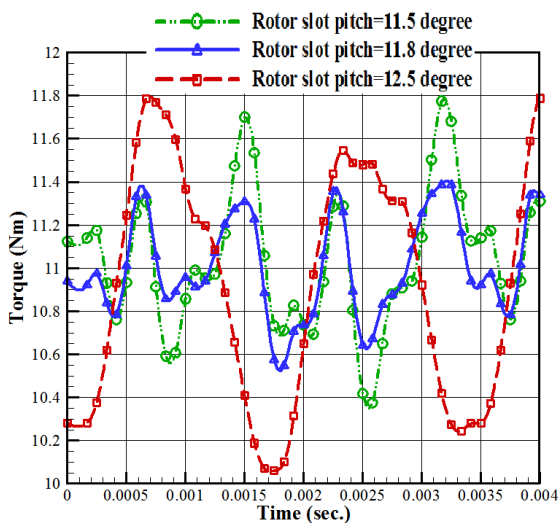
ضخامت دنده‌های مماسی (TR_x) و شعاعی (RR_x) در جدول (۲) برابر ۱ mm در نظر گرفته شده‌اند که منجر به عملکرد



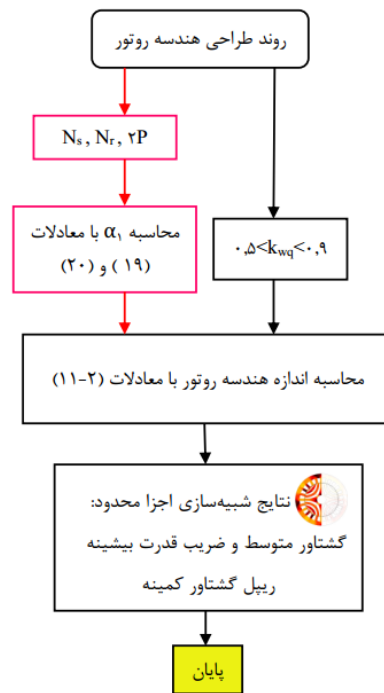
شکل (۶): شبیه‌سازی اجرا محدود ماشین طراحی شده با، الف) روتور ۴ سد شاری با گام شیار ۸/۸ درجه، ب) روتور ۳ سد شاری با گام شیار روتور ۱۱/۸ درجه، ج) روتور ۲ سد شاری با گام شیار ۱۱/۶ درجه.



شکل (۸): مشخصه گشتاور روتور ۴ سد شار موتور طراحی شده.



شکل (۹): مشخصه گشتاور روتور ۳ سد شار موتور طراحی شده.



شکل (۷): خلاصه مراحل طراحی روتور با روش پیشنهادی.

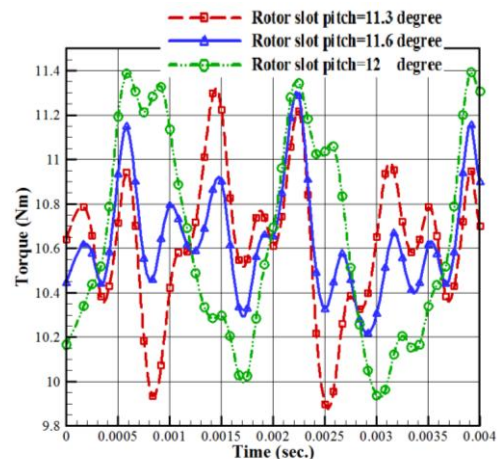
طراح ماشین بنا بر شرایط و ملاحظات مکانیکی و مشخصات الکترومغناطیسی مانند: سرعت روتور، ابعاد و حجم، توان، گشتاور، ضریب قدرت و ... در قدم اول با انتخاب تعداد سد شارهای (N_b) مناسب به‌سادگی می‌تواند شروع به طراحی هندسه روتور کند بدین‌صورت که برای توان پایین در حجم کم ۲ سد شار و برای توان بالا در قطر روتور زیاد از ۴ سد شار و یا بیشتر استفاده شود. سپس با توجه به ضریب k_{wq} که بین ۰/۵ تا ۰/۹ می‌باشد، با استفاده از معادلات ۱۹ و ۲۰ هندسه روتور را طراحی کند. همان‌طور که برای سیم‌پیچی استاتور به روش توزیع سینوسی به‌منظور حذف و یا کاهش برخی هارمونیک‌های مکانی سیم‌پیچی با گام کوتاه تعریف می‌شود، در روش پیشنهادی نیز عملی مشابه

با روندهای پیچیده بهینه‌سازی به دست آورند. البته محاسبه مقدار دقیق پارامترهای طراحی در روش پیشنهادی با اصلاح جزئی طراحی اولیه، در نرم‌افزار اجزاء محدود انجام می‌شود.

این فرایند یک طراحی مفهومی جدید و نقطه شروعی برای روش‌های تحلیلی و شبیه‌سازی می‌باشد تا به سادگی و بسیار سریع به حالت بهینه، یعنی گشتاور متوسط بیشینه و رپل گشتاور کمینه منتهی شود. قابلیت دیگر این طرح امکان طراحی روتور ماشین رلوکتانس سنکرون با هر تعداد شیار روتور و استاتور است.

۷. مراجع

- [1] S. Taghavi, "Design of Synchronous Reluctance Machines for Automotive Applications," Concordia University, 2015.
- [2] R. Rajabi Moghaddam, "Synchronous reluctance machine (SynRM) in variable speed drives (VSD) applications," KTH Royal Institute of Technology, 2011.
- [3] I. Boldea, L. N. Tutelea, L. Parsa, and D. Dorrell, "Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: An overview," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, pp. 5696-5711, 2014.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] B. J. Chalmers and L. Musaba, "Design and field-weakening performance of a synchronous reluctance motor with axially-laminated rotor," In Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS'97, Conference Record of the 1997 IEEE, pp. 271-278, 1997.
- [8] N. Bianchi and B. J. Chalmers, "Axially laminated reluctance motor: analytical and finite-element methods for magnetic analysis," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 38, pp. 239-245, 2002.
- [9] B. J. Chalmers, L. Musaba, and D. F. Gosden, "Variable-frequency synchronous motor drives for electric vehicles," IEEE transactions on industry applications, vol. 32, pp. 896-903, 1996.
- [10] Y. H. Kim and J. H. Lee, "Optimum Design of ALA-SynRM for Direct Drive Electric Valve Actuator," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, pp. 1-4, 2017.
- [11] I. Boldea, Z. Fu, and S. Nasar, "Performance evaluation of axially-laminated anisotropic (ALA) rotor reluctance synchronous motors," IEEE transactions on industry applications, vol. 30, pp. 977-985, 1994.
- [12] F. Isaac, A. Arkadan, and A. El-Antably, "Characterization of axially laminated anisotropic-rotor synchronous reluctance motors," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, pp. 506-511, 1999.



شکل (۱۰): مشخصه گشتاور روتور ۲ سد شار موتور طراحی شده.

جدول (۳): مقایسه گام شیار روتور حاصل از روش پیشنهادی و روش‌های قبلی مبتنی بر بهینه‌سازی به همراه مقایسه مشخصه گشتاور حاصله.

نتایج طراحی		تعداد سدهای شار روتور		
		$N_b=4$	$N_b=3$	$N_b=2$
روش پیشنهادی	Tav (Nm)	۱۱/۲	۱۰/۹۵	۱۰/۶۱
	α_1 (deg)	۹/۴	۱۲/۵	۱۱/۳
	ΔT (%)	۱۴/۶۱	۱۵/۲	۱۳/۱۸
روش‌های قبلی	Tav (Nm)	۱۱/۲۵	۱۱/۰۱	۱۰/۶۴
	α_1 (deg)	۸/۸	۱۱/۸	۱۱/۶
	ΔT (%)	۹/۵۲	۹/۶۱	۱۰/۰۴
Tolerance (deg)		۰/۶	۰/۷	۰/۳

با آن بر هارمونیک‌های شیار اعمال شد. حال برای سیم‌پیچی گام کوتاه فقط داشتن تعداد قطب و تعداد شیار استاتور کافی است ولی در روش ارائه شده علاوه بر، تعداد قطب و تعداد شیار استاتور، تعداد سد شار موجود در هر قطب نیز مورد نیاز می‌باشد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش جامع و سریع برای طراحی روتور ماشین رلوکتانس سنکرون ارائه شد. در ابتدا با استفاده از روابط ارائه شده گام شیار روتور مطابق تعداد سدهای شار مدنظر به سرعت به دست می‌آید. در این روش جهت سادگی با صرف‌نظر از اشباع هسته و هارمونیک‌های مکانی، فقط اثر هارمونیک اول شیار استاتور در نظر گرفته می‌شود. با مقایسه نتایج و زاویه گام شیار روتور طراحی شده با روش پیشنهادی و مقادیر حاصل از روش‌های زمان بر قبلی طراحی و بهینه‌سازی، به وضوح تطابق قابل قبول آن‌ها مشخص می‌شود. این تأییدی است بر معتبر بودن روش پیشنهادی که به طراحان اجازه می‌دهد با استفاده از آن، مقدار گام شیار روتور بسیار نزدیک به مقدار بهینه راه بدون درگیر شدن

- [29] P. Lawrenson and L. Agu, "Theory and performance of polyphase reluctance machines," In Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, pp. 1435-1445, 1964.
- [30] 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, Conference Record of the 1993 IEEE, pp. 163-170, 1993.
- [31] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Rotor design optimization of synchronous reluctance machine," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 9, pp. 359-365, 1994.
- [32] P. J. Lawrenson and S. Gupta, "Developments in the performance and theory of segmental-rotor reluctance motors," In Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, pp. 645-653, 1967.
- [33] V. B. Honsinger, "Steady-state performance of reluctance machines," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 305-317, 1971.
- [34] M. Kamper and A. Volsdhenk, "Effect of rotor dimensions and cross magnetisation on L_d and L_q inductances of reluctance synchronous machine with cageless flux barrier rotor," IEEE Proceedings-Electric Power Applications, vol. 141, pp. 213-220, 1994.
- [35] N. Bianchi, S. Bolognani, D. Bon, and M. Dai Pre, "Rotor flux-barrier design for torque ripple reduction in synchronous reluctance and PM-assisted synchronous reluctance motors," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 45, pp. 921-928, 2009.
- [36] M. Sanada, K. Hiramoto, S. Morimoto, and Y. Takeda, "Torque ripple improvement for synchronous reluctance motor using asymmetric flux barrier arrangement," In Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the, pp. 250-255, 2003.
- [37] G. Pellegrino, F. Cupertino, and C. Gerada, "Automatic design of synchronous reluctance motors focusing on barrier shape optimization," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, pp. 1465-1474, 2015.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Pastorelli, and A. Vagati, "Experimental comparison of induction and synchronous reluctance motors performance," In Industry Applications Conference, Fourtieth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2005, pp. 474-479, 2005.
- [41] J.-R. Riba, C. López-Torres, L. Romeral, and A. Garcia, "Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 57, pp. 367-379, 2016.
- [42] 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.
- [43] R. R. Moghaddam, F. Magnussen, and C. Sadarangani, "A FEM 1 investigation on the Synchronous Reluctance Machine rotor geometry with just one flux barrier as a guide toward the optimal barrier's shape," in EUROCON 2009, EUROCON'09. IEEE, pp. 663-670, 2009.
- [13] E. Obe, "Calculation of inductances and torque of an axially laminated synchronous reluctance motor," IET electric power applications, vol. 4, pp. 783-792, 2010.
- [14] F. Isaac, A. Arkadan, and A. El-Antably, "Magnetic field and core loss evaluation of ALA-motor synchronous reluctance machines taking into account material anisotropy," IEEE transactions on magnetics, vol. 34, pp. 3507-3510, 1998.
- [15] A. Arkadan, F. Isaac, and O. Mohammed, "Parameters evaluation of ALA synchronous reluctance motor drives," IEEE transactions on magnetics, vol. 36, pp. 1950-1955, 2000.
- [16] A. Arkadan, A. Hanbali, and N. Al-Aawar, "Design optimization of ALA rotor SynRM drives using T-AI-EM environment," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 43, pp. 1645-1648, 2007.
- [17] C. Coates, D. Platt, and B. Perera, "Design optimisation of an axially laminated synchronous reluctance motor," In Industry Applications Conference, Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS'97, Conference Record of the 1997 IEEE, pp. 279-285, 1997.
- [18] A. Arkadan, M. ElBsat, and M. Mneimneh, "Particle swarm design optimization of ALA rotor SynRM for traction applications," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, pp. 956-959, 2009.
- [19] F. Martin, A. Belahcen, A. Lehikoinen, and P. Rasilo, "Homogenization technique for axially laminated rotors of synchronous reluctance machines," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, pp. 1-6, 2015.
- [20] 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.
- [21] W. L. Soong and N. Ertugrul, "Field-weakening performance of interior permanent-magnet motors," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, pp. 1251-1258, 2002.
- [22] D. Staton, T. Miller, and S. Wood, "Maximising the saliency ratio of the synchronous reluctance motor," in IEEE Proceedings B (Electric Power Applications), pp. 249-259, 1993.
- [23] J. Kostko, "Polyphase reaction synchronous motors," Journal of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 42, pp. 1162-1168, 1923.
- [24] V. B. Honsinger, "The inductances L_d and L_q of reluctance machines," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 298-304, 1971.
- [25] A. Vagati, M. Pastorelli, G. Franceschini, and C. Petrace, "Design of low-torque-ripple synchronous reluctance motors," in Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS'97, Conference Record of the 1997 IEEE, pp. 286-293, 1997.
- [26] A. Vagati, G. Franceschini, I. Marongiu, and G. Troglia, "Design criteria of high performance synchronous reluctance motors," In Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1992 IEEE, pp. 66-73, 1992.
- [27] 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.
- [28] R. R. Moghaddam, F. Magnussen, and C. Sadarangani, "Theoretical and experimental reevaluation of synchronous reluctance machine," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, pp. 6-13, 2010.

- harmonic contents,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, pp. 1-9, 2014.
- [59] 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.
- [60] M. A. Raj and A. Kavitha, “Effect of Rotor Geometry on Peak and Average Torque of External-Rotor Synchronous Reluctance Motor in Comparison With Switched Reluctance Motor for Low-Speed Direct-Drive Domestic Application,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, pp. 1-8, 2017.
- [61] E. Carraro, M. Degano, M. Morandin, and N. Bianchi, “PM synchronous machine comparison for light electric vehicles,” in Electric Vehicle Conference (IEVC), 2014 IEEE International, pp. 1-8, 2014.
- [62] A. T. De Almeida, F. J. Ferreira, and G. Baoming, “Beyond induction motors—Technology trends to move up efficiency,” IEEE transactions on industry applications, vol. 50, pp. 2103-2114, 2014.
- [63] P. Niazi, H. A. Toliyat, D.-H. Cheong, and J.-C. Kim, “A low-cost and efficient permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motor drive,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, pp. 542-550, 2007.
- [64] Y. Wang, D. M. Ionel, M. Jiang, and S. J. Stretz, “Establishing the relative merits of synchronous reluctance and PM-assisted technology through systematic design optimization,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, pp. 2971-2978, 2016.
- [65] Y. Wang, D. Ionel, D. G. Dorrell, and S. Stretz, “Establishing the power factor limitations for synchronous reluctance machines,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, pp. 1-4, 2015.
- [66] F. Cupertino, G. Pellegrino, and C. Gerada, “Design of synchronous reluctance motors with multiobjective optimization algorithms,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, pp. 3617-3627, 2014.
- [67] L. Yang, S. Ho, and W. Fu, “Design optimizations of electromagnetic devices using sensitivity analysis and Tabu algorithm,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, pp. 1-4, 2014.
- [68] F. Cupertino, G. Pellegrino, E. Armando, and C. Gerada, “A SyR and IPM machine design methodology assisted by optimization algorithms,” in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE, pp. 3686-3691, 2012.
- [69] E. Howard, M. J. Kamper, and S. Gerber, “Asymmetric flux barrier and skew design optimization of reluctance synchronous machines,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, pp. 3751-3760, 2015.
- [70] S. T. Boroujeni, M. Haghparast, and N. Bianchi, “Optimization of flux barriers of line-start synchronous reluctance motors for transient-and steady-state operation,” Electric Power Components and Systems, vol. 43, pp. 594-606, 2015.
- [71] E. Carraro, M. Morandin, and N. Bianchi, “Traction PMASR motor optimization according to a given driving cycle,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, pp. 209-216, 2016.
- [72] Y. S. Kim and I. H. Park, “Topology optimization of rotor in synchronous reluctance motor using level set method and shape design sensitivity,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 20, pp. 1093-1096, 2010.
- [73] P. Alotto, M. Barcaro, N. Bianchi, and M. Guarnieri, “Optimization of interior PM motors with machaon rotor
- [44] J. Germishuizen, F. Van der Merwe, K. Van der Westhuizen, and M. Kamper, “Performance comparison of reluctance synchronous and induction traction drives for electrical multiple units,” In Industry Applications Conference, Conference Record of the 2000 IEEE, pp. 316-323, 2000.
- [45] T. Miller, A. Hutton, C. Cossar, and D. A. Staton, “Design of a synchronous reluctance motor drive,” IEEE Transactions on industry applications, vol. 27, pp. 741-749, 1991.
- [46] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Pastorelli, D. Staton, and A. Vagati, “Thermal analysis of induction and synchronous reluctance motors,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, pp. 675-680, 2006.
- [47] A. Boglietti and M. Pastorelli, “Induction and synchronous reluctance motors comparison,” In Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE, pp. 2041-2044, 2008.
- [48] H. Murakami, Y. Honda, H. Kiriya, S. Morimoto, and Y. Takeda, “The performance comparison of SPMSM, IPMSM and SynRM in use as air-conditioning compressor,” In Industry Applications Conference, Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE, pp. 840-845, 1999.
- [49] T. K. Brekken, H. Hapke, and J. Prudell, “Drives comparison for reciprocating and renewable energy applications,” In Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE, pp. 732-738, 2009.
- [50] G. Pellegrino, E. Armando, P. Guglielmi, and A. Vagati, “A 250kW transverse-laminated Synchronous Reluctance motor,” In Power Electronics and Applications, EPE'09. 13th European Conference on, pp. 1-10, 2009.
- [51] H. Kiriya, S. Kawano, Y. Honda, T. Higaki, S. Morimoto, and Y. Takeda, “High performance synchronous reluctance motor with multi-flux barrier for the appliance industry,” In Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE, pp. 111-117, 1998.
- [52] E. Bostanci, M. Moallem, A. Parsapour, and B. Fahimi, “Opportunities and challenges of switched reluctance motor drives for electric propulsion: a comparative study,” IEEE transactions on transportation electrification, vol. 3, pp. 58-75, 2017.
- [53] K. Lang, A. Muetze, R. Bauer, and S. Pircher, “Comparison of induction and synchronous reluctance machine based actuators for elevated temperature environments,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 31, pp. 1012-1022, 2016.
- [54] G. Štumberger, M. Hadžiselimović, B. Štumberger, D. Miljavec, D. Dolinar, and I. Zagradišnik, “Comparison of capabilities of reluctance synchronous motor and induction motor,” Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 304, pp. e835-e837, 2006.
- [55] B. Kerdusup and N. H. Fuengwarodsakul, “Performance and cost comparison of reluctance motors used for electric bicycles,” Electrical Engineering, vol. 99, pp. 475-486, 2017.
- [56] S. Cai, M.-J. Jin, H. Hao, and J.-X. Shen, “Comparative study on synchronous reluctance and PM machines,” COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 35, pp. 607-623, 2016.
- [57] 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.
- [58] J. Wang, V. I. Patel, and W. Wang, “Fractional-slot permanent magnet brushless machines with low space

- [88] E. C. Lovelace, T. M. Jahns, and J. H. Lang, "A saturating lumped-parameter model for an interior PM synchronous machine," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, pp. 645-650, 2002.
- [89] J. Kolehmainen, "Synchronous reluctance motor with form blocked rotor," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, pp. 450-456, 2010.
- [90] S. M. Taghavi and P. Pillay, "A mechanically robust rotor with transverse laminations for a wide-speed-range synchronous reluctance traction motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, pp. 4404-4414, 2015.
- [91] M. Barcaro, G. Meneghetti, and N. Bianchi, "Structural analysis of the interior PM rotor considering both static and fatigue loading," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, pp. 253-260, 2014.
- [92] S. A. Nasar and I. Boldea, "The induction machines design handbook," CRC press, 2009.
- [93] N. Bianchi, S. Bolognani, D. Bon, and M. Dai Pre, "Torque harmonic compensation in a synchronous reluctance motor," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 23, pp. 466-473, 2008.
- [94] M. Ferrari, N. Bianchi, and E. Fornasiero, "Analysis of rotor saturation in synchronous reluctance and PM-assisted reluctance motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, pp. 169-177, 2015.
- [95] T. Fukami, M. Momiyama, K. Shima, R. Hanaoka, and S. Takata, "Steady-state analysis of a dual-winding reluctance generator with a multiple-barrier rotor," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, pp. 492-498, 2008.
- [96] 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.
- [97] M. J. Kamper, F. Van der Merwe, and S. Williamson, "Direct finite element design optimisation of the cageless reluctance synchronous machine," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 1, pp. 547-555, 1996.
- [98] R. Rouhani, S. E. Abdollahi, and S. A. Gholamian, "Torque ripple reduction of a synchronous reluctance motor for electric vehicle applications," In 2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC), pp. 386-391, 2018.
- [99] S. Talebi, P. Niazi, and H. A. Toliyat, "Design of permanent magnet-assisted synchronous reluctance motors made easy," In *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE*, pp. 2242-2248, 2007.
- [100] S.-H. Han, T. M. Jahns, and W. L. Soong, "Torque ripple reduction in interior permanent magnet synchronous machines using the principle of mutual harmonics exclusion," in *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE*, pp. 558-565, 2007.
- [101] X. Bomela and M. Kamper, "Effect of machine design on performance of reluctance synchronous machine," In *Industry Applications Conference, Conference Record of the 2000 IEEE*, pp. 515-522, 2000.
- [102] B. Stumberger, G. Stumberger, D. Dolinar, A. Hamler, and M. Trlep, "Evaluation of saturation and cross-magnetization effects in interior permanent-magnet synchronous motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, pp. 1264-1271, 2003.
- flux barriers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, pp. 958-961, 2011.
- [74] M. Barcaro, N. Bianchi, and F. Magnussen, "Permanent-magnet optimization in permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motor for a wide constant-power speed range," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, pp. 2495-2502, 2012.
- [75] G. Pellegrino and F. Cupertino, "FEA-based multi-objective optimization of IPM motor design including rotor losses," In *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE*, pp. 3659-3666, 2010.
- [76] Y. Wang, G. Bacco, and N. Bianchi, "Geometry analysis and optimization of PM-assisted reluctance motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, pp. 4338-4347, 2017.
- [77] J. M. Park, S. I. Kim, J. P. Hong, and J. H. Lee, "Rotor design on torque ripple reduction for a synchronous reluctance motor with concentrated winding using response surface methodology," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, pp. 3479-3481, 2006.
- [78] Y. C. Choi, H.-S. Kim, and J.-H. Lee, "Optimum design criteria for maximum torque density and minimum torque ripple of SynRM according to the rated wattage using response surface methodology," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, pp. 4135-4138, 2008.
- [79] S. J. Mun, Y. H. Cho, and J. H. Lee, "Optimum design of synchronous reluctance motors based on torque/volume using finite-element method and sequential unconstrained minimization technique," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, pp. 4143-4146, 2008.
- [80] J. H. Lee, "Optimum design criteria for maximum torque density and minimum torque ripple of SynRM according to the rated wattage using response surface methodology," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, pp. 1578-1581, 2009.
- [81] M. Degano, E. Carraro, and N. Bianchi, "Selection criteria and robust optimization of a traction PM-assisted synchronous reluctance motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, pp. 4383-4391, 2015.
- [82] M. Degano, H. Mahmoud, N. Bianchi, and C. Gerada, "Synchronous reluctance machine analytical model optimization and validation through finite element analysis," in *Electrical Machines (ICEM), 2016 XXII International Conference on*, pp. 585-591, 2016.
- [83] A. Tassarolo, "Modeling and analysis of synchronous reluctance machines with circular flux barriers through conformal mapping," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, pp. 1-11, 2015.
- [84] N. Bianchi and H. Mahmoud, "An analytical approach to design the PM in PMAREL motors robust toward the demagnetization," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, pp. 800-809, 2016.
- [85] H. Mahmoud and N. Bianchi, "Eccentricity in synchronous reluctance motors—Part I: Analytical and finite-element models," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, pp. 745-753, 2015.
- [86] M. Barcaro, N. Bianchi, and F. Magnussen, "Rotor flux-barrier geometry design to reduce stator iron losses in synchronous IPM motors under FW operations," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, pp. 1950-1958, 2010.
- [87] G. Bacco, N. Bianchi, and H. Mahmoud, "A Nonlinear Analytical Model for the Rapid Prediction of the Torque of Synchronous Reluctance Machines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2018.

Presentation of a Generalized Method for Rotor Design of Synchronous Reluctance Machine

R. Rouhani, S. Ehsan Abdollahi* , S. A. Gholamian

Babol Noshirvani University of Technology

(Received: 03/05/2019, Accepted: 15/07/2019)

Abstract

The rotor structure of a synchronous reluctance machine (SynRM) engages some design complexities. These complexities have made it impossible to employ a generalized design method valid for all machine topologies with various number of rotor and stator slots till now. However, using trial and error and optimization algorithms such as genetic algorithms, etc., an optimal design is obtained which is both time consuming and complicated. Indeed, high amount of ripple in the developed torque is a serious problem of SynRMs, which could be reduced by employing an effective design method. This paper presents a new SynRM rotor analytical design method with the aim of reducing torque ripple while maintaining average torque. To this end, the proposed method is applied to a SynRM with 24 stator slots and 2, 3, and 4 rotor flux barriers. In order to evaluate the proposed method's effectiveness, three designed SynRMs' electromagnetic performances are simulated using finite elements method (FEM). It has been shown that the design parameters resulted by the proposed analytical method is close to the optimal state obtained by preceding time-consuming complicated methods.

Keywords: Flux Carrier, Torque Ripple, Traction Load, Flux Barrier, Slot Harmonics

* Corresponding author E-mail: e.abdollahi@nit.ac.ir