

## اثر تعداد دندان روتور بر عملکرد ماشین شار برگردان دو استاتور با آهنربای ارزان قیمت

فاروق اسدی<sup>۱</sup>، سید احسان عبداللهی<sup>۲\*</sup>، سید اصغر غلامیان<sup>۳</sup>

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

(دریافت: ۹۸/۰۶/۱۹، پذیرش: ۹۸/۰۹/۰۸)

### چکیده

ماشین‌های شار برگردان به دلیل چگالی گشتاور و توان بالا و همچنین ساده بودن ساختار روتور آن اخیراً مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. در این ماشین‌ها سیم‌پیچ آرمیچر و سامانه تحریک هر دو بر روی ساختار استاتور قرار می‌گیرند و روتور فاقد هر نوع سیم‌پیچی، آهن‌ربا یا قفس است. یکی از مشکلات ماشین شار برگردان قیمت بالای آهن‌رباهای کمیاب خاکی آن است که به مقدار زیاد در استاتور آن استفاده شده است. هر چند می‌توان به جای آهن‌ربای کمیاب خاکی از آهن‌ربای فریت با قیمت حدودی یک‌دهم آن استفاده کرد اما چگالی گشتاور ماشین کاهش می‌یابد. جهت حل این مشکل ساختار دو استاتور پیشنهاد می‌شود. در این ماشین نیز همانند ساختار ماشین‌های شار برگردان متداول تعداد دندان‌های روتور اثر فراوانی روی عملکرد ماشین دارند. لذا در این مقاله اثر تعداد دندان‌های روتور روی عملکرد ماشین شار برگردان دو استاتور با آهن‌ربای فریت با استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی اجزا محدود آن تحت شرایط کار نامی بررسی می‌گردد. در انتها جهت ارزیابی صحت نتایج شبیه‌سازی یک نمونه آزمایشگاهی از بهترین ساختار با بیشینه گشتاور تولیدی، ساخته و آزمایش می‌شود. نتایج آزمایش، صحت نتایج شبیه‌سازی را با دقت قابل ملاحظه‌ای تأیید می‌نماید.

**کلیدواژه‌ها:** موتور شار برگردان، آهن‌ربا فریت، روش اجزا محدود، چگالی گشتاور، چگالی توان

### ۱. مقدمه

توجه به این که ۶۵٪ قیمت تمام‌شده یک ماشین با آهن‌ربای دائمی کمیاب خاکی، مربوط به آهن‌ربای به‌کاربرده شده در آن هست [۲] قیمت تمام‌شده آن را بالا خواهد بود. با توجه به بالا رفتن تقاضا برای به کار بردن این ماشین در کاربردهای گوناگون، این مسئله یک چالش اساسی برای آن هست.

البته می‌توان با استفاده از آهن‌رباهای از جنس فریت<sup>۲</sup> که قیمت آن حدود ۱۰٪ قیمت آهن‌رباهای کمیاب خاکی<sup>۳</sup> هست مشکل هزینه را برطرف نمود. هر چند باید توجه داشت که ماشین طراحی شده با استفاده از آهن‌ربای فریت به دلیل پایین بودن چگالی شار و پایین بودن حاصل‌ضرب انرژی<sup>۴</sup> آن (حدود ۱۰٪ آهن‌ربای کمیاب خاکی [۳]) چگالی گشتاور پایین‌تری دارد. در مراجع نیز جهت کاهش قیمت ماشین‌های مغناطیس دائم (PMSM)<sup>۵</sup>، آهن‌ربای فریت به‌عنوان جایگزین آهن‌رباهای کمیاب خاکی مطرح شده است اما ایراد اساسی آن‌ها نیز پایین بودن چگالی گشتاور ماشین است [۴-۵]. در ماشین‌های شار برگردان به دلیل ساختار خاص آن‌ها می‌توان با روش‌هایی مثل هیبریدی

ماشین‌های شار برگردان با آهن‌ربای دائمی به دلیل چگالی گشتاور بالا، قابلیت استفاده در سرعت‌های زیاد و همچنین روتور مستحکم مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. در این ماشین قسمت تحریک (سیم‌پیچی یا آهن‌ربا) و سیم‌پیچی آرمیچر هر دو بر روی استاتور قرار می‌گیرند و روتور ساختار ساده و مستحکمی دارد. به دلیل قرارگیری آهن‌رباها بر روی استاتور، کنترل حرارت تولیدی و دمای آن‌ها راحت‌تر هست [۱]. ماشین شار برگردان با توجه به این قابلیت‌ها برای بسیاری از کاربردها از قبیل خودروهای برقی [۱]، کمپرسورها، ژنراتورهای بادی، ژنراتورهای هوافضا [۱]، مته‌های حفاری و ... مورد توجه قرار گرفته است.

در موتورهای شار برگردان آهن‌ربا دائم که بیشترین اقبال را داشته است از آهن‌رباهای کمیاب خاکی به‌صورت عمده استفاده می‌شود. در این ساختار آهن‌رباها با تحریک مخالف به‌صورت یک‌درمیان بین قطعات استاتور قرار می‌گیرند که این موضوع، موجب افزایش مقدار آهن‌رباهای مصرفی می‌شود. این مسئله با

<sup>۲</sup> Ferrite

<sup>۳</sup> Rare Earth Magnet

<sup>۴</sup> Energy Product

<sup>۵</sup> Permanent-Magnet Synchronous Machine

همان‌گونه که در شکل (۱- الف و ب) نشان داده شده است جهت مغناطش آهن‌رباها به صورت یک‌درمیان قرار گرفته‌اند تا قطب‌بندی ماشین تشکیل شود. شایان ذکر است که در ماشین شار برگردان دو استاتور جهت مغناطش آهن‌رباهای استاتور داخلی و خارجی برعکس یک‌دیگر می‌باشند تا ولتاژ القایی در سیم‌بندی‌های فاز استاتور داخلی و خارجی هم‌فاز گردند.

### ۳. طراحی ماشین شار برگردان دو استاتور:

در طراحی این موتور مانند دیگر موتورهای الکتریکی، هدف طراحی ماشین تحت  $i_d=0$  جهت رسیدن به بیشینه گشتاور در عملکرد  $BLAC$  است. با توجه به آنکه اساس عملکرد ماشین‌های شار برگردان، بر مبنای جعبه‌دنده مغناطیسی است لذا ترکیب دندانه‌های استاتور و روتور تأثیر قابل‌توجهی بر روی عملکرد ماشین از جمله متوسط گشتاور تولیدی، رپل آن و تقارن نیروی محرکه القایی فازها دارند. با توجه به عملکرد مناسب ماشین شار برگردان متداول تک استاتور با تعداد ۱۲ دندانه استاتور [۸] در این ماشین نیز با در نظر گرفتن تعداد ۱۲ دندانه استاتور برای استاتور داخلی و خارجی تمامی حالت‌های ممکن برای تعداد دندانه‌های روتور نیز پس از طراحی استاتور مدنظر، و عملکرد آن‌ها شبیه‌سازی و تحلیل می‌شوند. برای طراحی، یک موتور با توان ۵۰ کیلووات برای کاربرد خودرو برقی مدنظر قرار می‌گیرد. مطابق شکل (۱) در این ماشین سیم‌پیچ‌ها دور دندانه‌ها و آهن‌رباها قرار دارند. جهت استخراج ابعاد ماشین از گشتاور نامی هدف از رابطه [۹] استفاده می‌شود:

$$T = 2\sigma_{\tan} V_r \quad (1)$$

که در آن،  $T$ ،  $\sigma_{\tan}$  و  $V_r$  به ترتیب استرس مماسی (برحسب پاسکال)، گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی و حجم روتور می‌باشند. از طرفی با توجه به مشخصات ماشین، نسبت طول یوغ به قطر فاصله هوایی ماشین عبارت است از:

$$K_L = \frac{l_{st}}{D_g} \quad (2)$$

که در آن،  $D_g$  و  $l_{st}$  به ترتیب طول موثر یوغ و قطر فاصله هوایی ماشین است. برای ماشین‌های شار برگردان با توجه به آنکه جزء دسته ماشین‌های سنکرون است می‌توان از رابطه مورد استفاده در ماشین‌های سنکرون [۹] رابطه زیر را به دست آورد:

$$K_L \approx \frac{\pi}{4N_r} \sqrt{N_r} \quad (3)$$

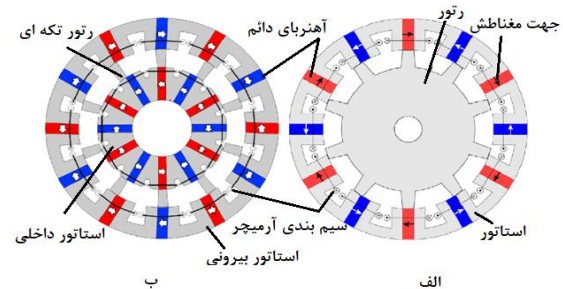
نمودن قطب‌ها دو استاتوره نمودن ماشین انتخاب تعداد دندانه روتور مناسب [۶-۷] و... این مشکل را تا حدودی حل کرد اما همچنان چگالی گشتاور در طرح‌های ارائه شده نسبت به ماشین طراحی شده با آهن‌ربای کمیاب خاکی پایین است.

هرچند برای بالا بردن چگالی گشتاور و بهبود کارایی ماشین شار برگردان طراحی شده با آهن‌ربای فریت، محققین ساختار موتور دو استاتوره شار برگردان را ارائه نموده‌اند. اما ساختار پیشنهادی بهینه نبوده است. لذا در این مقاله اثر تغییر تعداد دندانه‌های روتور بر روی چگالی گشتاور این ماشین بررسی خواهد شد و مناسب‌ترین ساختار با حداکثر چگالی گشتاور انتخاب خواهد شد. نمونه ماشین در ابعاد کوچک ساخته شده و مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. به این منظور در این مقاله در قسمت دوم ساختار موتور شار برگردان دو استاتوره (DSFSPM)<sup>۱</sup> معرفی خواهد شد. پس از آن در قسمت سوم روابط طراحی ماشین و شبیه‌سازی با روش اجزای محدود و در قسمت چهارم به تحلیل نتایج و مقایسه عملکرد و اعتبارسنجی پرداخته می‌شود.

### ۲. ساختار موتورهای شار برگردان دو استاتور و

#### نحوه عملکرد آن

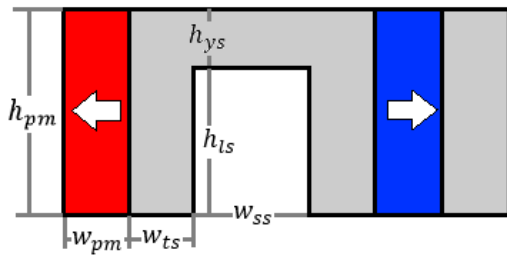
موتورهای شار برگردان مرسوم دارای یک استاتور و یک روتور یکپارچه هست که در شکل (۱- الف) ساختار یک موتور شار برگردان مرسوم با مشخص نمودن جهت مغناطش آهن‌ربا نشان داده شده است.



شکل (۱): الف) موتور شار برگردان مرسوم با ۱۲ دندانه استاتور و ۱۰ دندانه روتور، ب) موتور شار برگردان دو استاتوره با ۱۲ دندانه استاتور و ۱۰ دندانه روتور.

موتورهای شار برگردان دو استاتوره همان‌گونه که در شکل (۱- ب) نشان داده شده است دارای دو استاتور و یک روتور تکه‌ای هست که با توجه به دو استاتوره بودن ماشین حجم آهن‌ربای به کار رفته در آن تقریباً دو برابر می‌شود که این مهم باعث بالا رفتن چگالی گشتاور ماشین می‌شود.

<sup>1</sup> Double Stator Flux Switching Permanent magnet



شکل (۲): پارامترهای هندسی استاتور ماشین

همچنین نسبت زاویه کمان دندانه روتور به زاویه گام دندانه روتور عبارت است از:

$$K = \frac{\tau_{ta}}{\tau_{rt}} \quad (11)$$

که به‌عنوان نسبت شکست<sup>۲</sup> معرفی می‌شود و در آن  $\tau_{ta}$  و  $\tau_{rt}$  به ترتیب زاویه کمان دندانه روتور و زاویه گام دندانه روتور می‌باشند. نسبت شکست اثر فراوانی بر گشتاور تولیدی دارد چرا که مقادیر بزرگ (نزدیک به یک) و مقادیر کوچک آن به ترتیب سبب افزایش شار نشستی و اشباع دندانه و در نتیجه کاهش گشتاور تولیدی می‌شوند. لذا انتخاب مقدار مناسب آن در طراحی روتور بسیار مهم است.

#### ۴. مدل‌سازی و شبیه‌سازی اجزا محدود روتور

##### برای توپولوژی‌های مختلف:

جهت ارزیابی عملکرد ماشین طراحی شده با تعداد دندانه مختلف روتور، ماشین شار برگردان دو استاتور با ۱۲ دندانه استاتور و ۱۴ دندانه روتور برای سرعت ۱۲۰۰ دور در دقیقه و توان نامی طراحی می‌شود. با استفاده از رابطه (۸) با مشخص بودن گشتاور نامی موردنیاز، قطر خارجی و طول محوری ماشین به ترتیب برابر ۲۶۹ mm و ۱۳۶ mm به دست می‌آیند.

همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد تعداد دندانه‌های استاتور داخلی و خارجی هر یک ۱۲ انتخاب می‌شوند. همچنین عرض دندانه‌های هر یک از تکه‌های استاتور در هر یک از استاتورهای خارجی و داخلی با استفاده از روابط (۲-۴) برابر با ضخامت آهن‌ریا و طول فاصله هوایی ۰/۵ mm محاسبه می‌شوند، این پارامتر بر روی سطح مقطع مؤثر مسیر شار و همچنین شار نشستی نوک دندانه تأثیرگذار است. ارتفاع دندانه‌های استاتورهای داخلی و خارجی نیز بر اساس بارگذاری الکتریکی موردنیاز

که در آن،  $N_r$  تعداد دندانه‌های روتور و از آن طول یوغ و قطر فاصله هوایی به دست می‌آید. همچنین فرکانس سنکرون در یک ماشین شار برگردان برابر است با:

$$f_s = \frac{N_r * rpm}{60} \quad (4)$$

که در آن،  $rpm$  سرعت ماشین برحسب دور بر دقیقه است. همچنین، ضخامت دندانه‌های روتور و استاتور و نسبت آن‌ها از عوامل تأثیرگذار بر عملکرد ماشین است. که مقدار آن‌ها عبارت است از:

$$W_{PM} = \frac{\tau_s}{5} \quad (5)$$

$$W_{ts} = \frac{\tau_s - W_{ss} - W_{PM}}{4} \quad (6)$$

$$W_{ts} = \frac{\tau_s - W_{ss} - W_{PM}}{4} \quad (7)$$

که در آن،  $\tau_s$ ،  $W_{PM}$ ،  $W_{ss}$  و  $W_{ts}$  به ترتیب گام دندانه استاتور، عرض آهن‌ریا، عرض دهانه‌ی شیار و عرض دندانه‌ی استاتور می‌باشند که در شکل (۲) نمایش داده شده‌اند و برای هر یک از استاتورها صادق است. همچنین برای این ماشین، گشتاور تولیدی آن در قاب  $dq0$  عبارت است از:

$$T = \frac{3}{2} \times N_r (\lambda_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (8)$$

که در آن،  $L_d$ ،  $L_q$ ،  $i_d$ ،  $i_q$ ،  $\lambda_{PM}$  به ترتیب عبارت‌اند از اندوکتانس محور  $d$ ، اندوکتانس محور  $q$ ، جریان محور  $d$ ، جریان محور  $q$  و شار پیوندی آهن‌ریا. شار پیوندی سیم‌پیچ آرمیچر در راستای محور  $d$  و محور  $q$  هر دو از آهن‌ریا عبور می‌کنند. با توجه به نزدیک بودن پرمابلیته آهن‌ریا به پرمابلیته هوا لذا رلوکتانس در دو مسیر تقریباً یکی است که این منجر به آن می‌شود که در این ماشین گشتاور رلوکتانسی مقدارش ناچیز باشد بنابراین می‌توان برای گشتاور نوشت:

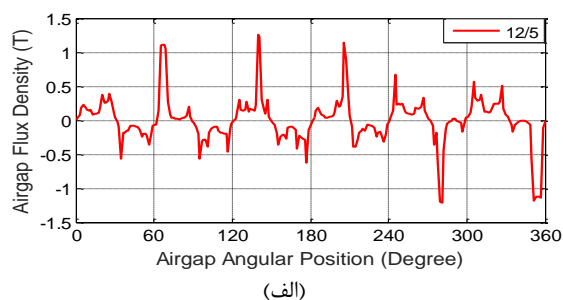
$$T = K_T i_q \quad (9)$$

$$K_T = \frac{3}{2} N_r \lambda_{PM} \quad (10)$$

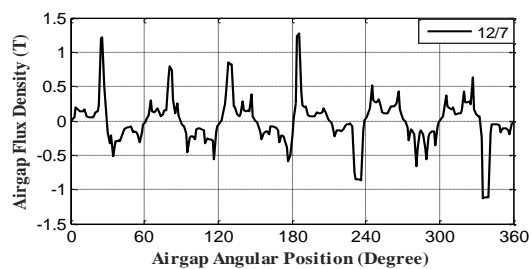
مشاهده می‌شود که گشتاور تولیدی در این ماشین مشابه گشتاور تولیدی در ماشین جریان مستقیم تنها متأثر از شار تحریک و جریان محور  $q$  است. البته در حالت تحریک آهن‌ریا دائم شار تحریک قابل تنظیم نیست که برای کنترل‌پذیر بودن شار تحریک می‌توان از ماشین شار برگردان با تحریک سیم‌پیچی و یا آمیخته<sup>۱</sup> استفاده نمود.

<sup>2</sup> Split Ratio

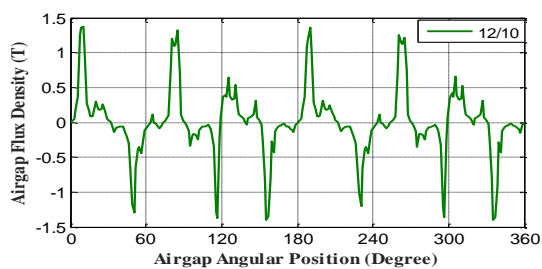
<sup>1</sup> Hybrid Excitation



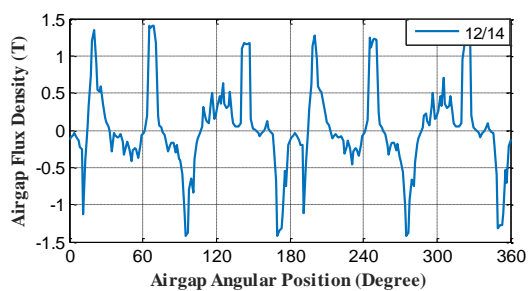
(الف)



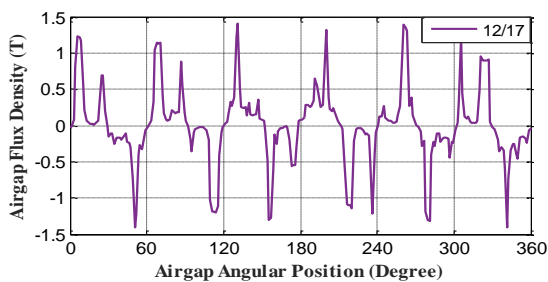
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل (۳): چگالی شار فاصله هوایی ماشین‌های DSFSP در سرعت و جریان نامی با ۱۲ دندانه استاتور و (الف) ۵، (ب) ۷، (ج) ۱۰، (د) ۱۴ و (ه) ۱۷ دندانه روتور.

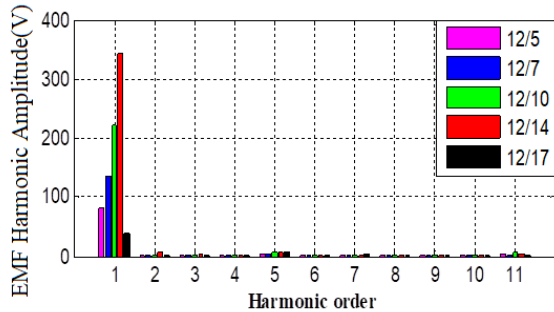
محاسبه می‌شوند. مشخصات موتور طراحی شده در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات ماشین طراحی شده.

مقادیر	پارامتر
۱۲	تعداد دندانه استاتور خارجی
۱۲	تعداد دندانه استاتور داخلی
۰/۵	فاصله هوایی (mm)
۲۶۹	قطر خارجی ماشین (mm)
۱۳۶	طول مؤثر محوری (mm)
۱۸	استاتور خارجی (دور بر کلاف)
۶	استاتور داخلی (دور بر کلاف)
۹۶	مجموع تعداد دور یک فاز
۰/۴۸	چگالی شار پسماند آهن‌ربا (T)

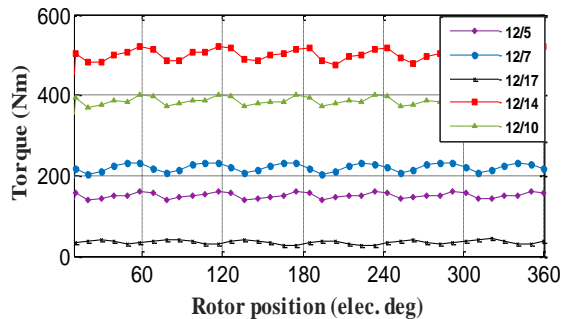
جهت ارزیابی عملکرد ماشین، با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود Flux مدل‌سازی آن تحت سرعت ۱۲۰۰ دور در دقیقه انجام می‌شود. در این راستا با شبیه‌سازی مدل، ولتاژ القایی در سیم‌پیچی‌های آرمیچر، گشتاور تولیدی و ریبیل آن برای عملکرد ماشین دربار نامی با استاتورهای داخلی و خارجی با تعداد دندانه، مشخصات سیم‌پیچی و جریان ثابت و روتور با دندانه‌های متغیر ممکن استخراج می‌شوند. برای دندانه‌های ۵، ۷، ۱۰، ۱۴ و ۱۷ ولتاژ سه فاز در سیم‌پیچی‌های آرمیچر القا می‌شود لذا عملکرد BLAC سه فاز برای آن‌ها متصور است. لازم به ذکر است با تحلیل حساسیت گشتاور الکترومغناطیسی و ولتاژ القایی ماشین به پارامتر  $K$  به کمک شبیه‌سازی اجزا محدود بهترین مقدار آن برابر ۰/۲۹۹ برای روتور در سمت استاتور خارجی و برای روتور در سمت استاتور داخلی برابر ۰/۲۷۵ استخراج و برای هر یک از روتورهای طراحی شده مدنظر قرار گرفت. چگالی شار فاصله هوایی برای ماشین طراحی شده برای تعداد دندانه‌های روتور ۵، ۷، ۱۰، ۱۴ و ۱۷ در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. در شکل (۳) چگالی شار فاصله هوایی در حالی که موقعیت روتور در تمامی حالات از صفر شروع شده است، نشان داده شده است. با توجه به تصاویر نمایان است که چگالی شار فاصله هوایی موتور با ۱۴ دندانه روتور به دلیل بهتر بودن مسیر حرکت شار دارای بالاترین مقدار است. که این موضوع باعث بالا رفتن چگالی گشتاور ماشین نسبت به سایر ماشین‌های طراحی شده است.

کمترین THD در ابتدا مربوط به توپولوژی با ۷ دندانه روتور با مقدار ۲/۵٪ و سپس مربوط به ماشین با روتور ۱۴ دندانه با مقدار ۳/۱۴٪ است.



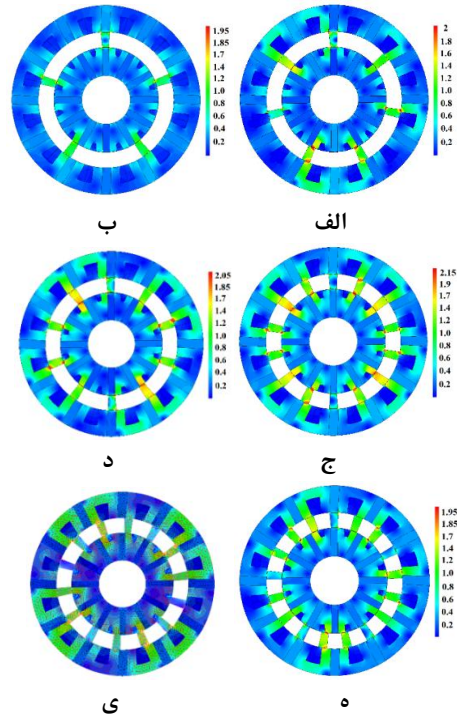
شکل (۶): طیف هماهنگ ولتاژ القایی ماشین طراحی شده با روتورهای مختلف.

گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی توپولوژی‌های مختلف در جریان نامی آرمیچر در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، بالاترین گشتاور مربوط به ماشین با ۱۴ دندانه روتور و برابر ۵۲۳ N.m است. هم‌چنین ضریب گشتاور ماشین با روتور ۱۴ دندانه در گشتاور نامی برابر ۹٪ است که با توجه به سایر توپولوژی‌ها پایین‌ترین است.



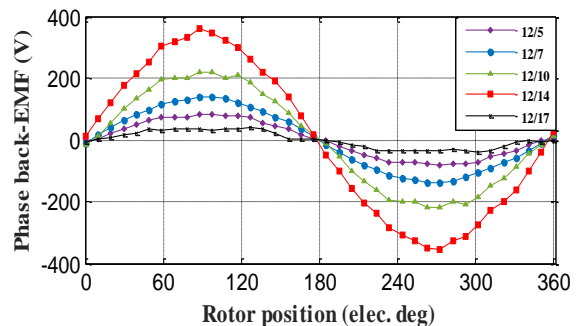
شکل (۷): منحنی گشتاور ماشین‌های DSFSPM.

هدف این تحقیق ارائه یک طراحی از ماشین DSFSPM با استفاده از آهنربای فریت برای به دست آوردن چگالی گشتاور قابل‌مقایسه با موتور FSPM با تحریک آهنربای کمیاب خاکی است. با توجه به جدول (۲) حداکثر گشتاور تولیدی با توجه به نیروی ضد محرکه القایی هرکدام از ماشین‌ها مربوط به ماشین ۱۲/۱۴ است. هم‌چنین باید به این نکته توجه کرد که کمترین ضریب گشتاور در گشتاور نامی مربوط به همین ساختار است. هم‌چنین کمترین مقدار THD نیروی ضد محرکه برای ماشین با توپولوژی ۱۲/۷ و ۱۲/۱۴ است که این مزیت دیگر توپولوژی ۱۴/۱۲ محسوب می‌شود. جدول (۲) بیان‌گر مقایسه عملکرد موتور DSFSPM با تعداد دندانه‌های ۱۴/۱۲ است.



شکل (۴): توزیع چگالی شار در ماشین شار برگردان با تعداد ۱۲ دندانه استاتور و تعداد دندانه روتور (الف) ۵، (ب) ۷، (ج) ۱۰، (د) ۱۴، (ه) ۱۷، (ی) مش‌بندی ماشین در سرعت و جریان نامی.

هم‌چنین توزیع چگالی شار در تمام مدار مغناطیسی ماشین طراحی شده با کلیه روتورها در شکل (۴) نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که در توپولوژی ۱۴ و ۱۰ دندانه اشباع جزئی در لبه‌های دندانه‌های روتور رخ داده است. نیروی ضد محرکه القایی و طیف هماهنگ آن‌ها در ماشین‌های یادشده در بالا به ترتیب در شکل‌های (۵-۶) نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل (۵)، بالاترین نیروی ضد محرکه القایی مربوط به ماشین با ۱۴ دندانه استاتور است.



شکل (۵): نیروی ضد محرکه القایی در ماشین‌های DSFSPM با توپولوژی مختلف روتور.

در شکل (۶)، طیف محتوی هماهنگ ولتاژ ضد محرکه تولیدی مشاهده می‌شود. در این شکل نشان داده شده است که

در عین حال مطابق جدول (۳) ریپل گشتاور تولیدی آن تقریباً برابر با ماشین شار برگردان متداول و حدود نصف ریپل گشتاور ماشین IPM است.

**جدول (۴):** مقایسه اقتصادی ماشین DSFSM با ماشین های FSPM معمولی و IPM.

پارامتر	DSFSM	FSPM	IPM
هزینه مس مصرفی (kg)*(kg/\$)	$8 \times 14/8 = 118/4$	$8 \times 16 = 128$	$8 \times 7 = 56$
هزینه ورق مصرفی (دلار) (kg)*(kg/\$)	$1 \times 30 = 30$	$1 \times 40 = 40$	$1 \times 29 = 29$
هزینه آهنربا مصرفی (kg)*(kg/\$)	$7 \times 7/2 = 50/4$	$5/2 \times 100 = 520$	$100 \times 1/23 = 123$
قیمت تمام شده مواد مصرفی (\$)	۱۹۸/۸	۶۸۸	۲۰۸
مقایسه قیمت موارد مصرفی نسبت به هم (%)	۱۰۰	۳۴۶	۱۰۴/۶
\$/Kw	۲/۶۵	۹/۱۷	۴/۳

## ۵. اعتبارسنجی ماشین شار برگردان دو استاتور با ۱۲ دندانه استاتور و ۱۴ دندانه روتور

با توجه به آن که یکی از اهداف این تحقیق مقایسه قابلیت های موتور شار برگردان دو استاتور با رقبای دیگر برای کاربرد خودرو برقی بوده است لذا در قسمت های قبل، موتور با توان نزدیک به رقبا طراحی و شبیه سازی شد تا مقایسه انجام گرفته در یک محدوده نزدیک توانی، قابل اتکا و منطقی باشد. برای اعتبارسنجی شبیه سازی انجام شده، موتور شار برگردان دو استاتور با توجه به محدودیت های ساخت در توان و ابعاد کوچک تر طراحی، ساخته و آزمایش شد. جنس ورق مغناطیسی استفاده شده در این ماشین، ورق M570a با ضخامت ۰/۵ mm است. همچنین مشخصات و ابعاد ماشین ساخته شده در جدول (۵) و تصاویر آن در شکل (۸) ارائه شده است. با توجه به این که تکه های ورق هسته ای استاتور نباید از لحاظ مغناطیسی هیچ ارتباطی باهم داشته باشند لذا ورق هر یک از استاتورها به صورت تکه ای ساخته شد و بر روی نگهدارنده سوار شده است (شکل (۸)).

**جدول (۲):** نتایج شبیه سازی توپولوژی های مختلف DSFSM.

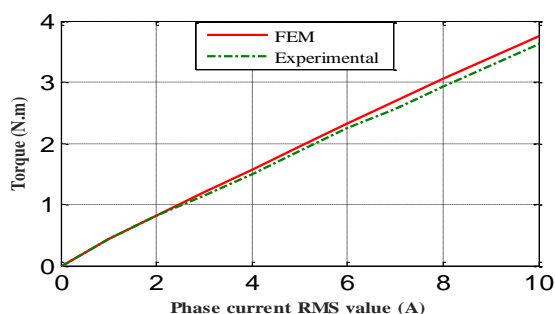
تعداد دندانه روتور	۱۷	۱۴	۱۰	۷	۵
وزن آهنربای مصرفی (kg)	۷,۲	۷,۲	۷,۲	۷,۲	۷,۲
افتشاشات هماهنگ (%)	۱۱,۸	۳,۱۴	۴,۵۲	۲,۵	۵,۸
نیروی ضد محرکه القایی (V)	۳۰	۲۷۳	۱۵۶	۱۰۸	۷۳
گشتاور بیشینه	۴۴	۵۲۳	۴۰۵	۲۳۰	۱۶۱
ضربان گشتاور در گشتاور نامی	۴۰	۹	۹,۵۷	۱۲	۱۳

همچنین موتور DSFSM از لحاظ اقتصادی با دو موتور دیگر استفاده شده در خودروهای برقی (موتور PMSM خودروی هیبریدی تویوتا پریوس و FSPM معمولی مقایسه شده است. مشخصات کلی این سه موتور در جدول (۳) و مقایسه هزینه مواد مصرفی آن ها در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به جدول (۳) مشاهده می شود که موتور DSFSM با توجه به توان سایر ماشین ها از همه بهتر است.

**جدول (۳):** مشخصات ماشین های DSFSM، FSPM و IPM مقایسه شده.

پارامتر	IPM [۱]	DSFSM	FSPM [۱]
قطر خارجی استاتور (mm)	۲۶۹/۲	۲۶۹	۲۰۵/۲
طول محوری (mm)	۸/۸۳	۱۳۶	۲۱۱
جریان مؤثر فازی (A)	۱۷۷	۱۲۲	۱۵۰
سرعت ماشین (rpm)	۱۵۰۰	۱۲۰۰	۲۰۰۰
آهنربای کمیاب خاکی (kg)	۱/۲۳	۰	۵,۲
حجم فریت مصرفی (kg)	۰	۷,۲	۰
گشتاور نامی (N.m)	۳۰۵	۵۰۰/۵	۳۵۰
ضربان گشتاور در گشتاور نامی (%)	۲۶/۱	۹	۱۱/۸
گشتاور بیشینه (N.m)	۳۵۰	۵۲۳	۳۷۰
توان در سرعت نامی (Kw)	۴۸	۷۵	۷۵

همچنین قیمت مواد مصرفی این ماشین از ماشین های مورد بررسی پایین تر و حدود ۱۹۸/۸ دلار است که با توجه به توان ماشین قابل قبول است. با توجه به جدول (۴) مشاهده می شود که قیمت تمام شده یک کیلووات توان خروجی در ماشین های شار برگردان دو استاتور، شار برگردان معمولی و آهنربای دائم به ترتیب ۲/۶۵، ۹/۱۷ و ۴/۳ دلار است. که در این صورت قیمت تمام شده یک کیلووات در ماشین شار برگردان دو استاتور با آهنربای فریت ۲۸ درصد قیمت تمام شده در ماشین شار برگردان متداول با آهنربای کمیاب خاکی و ۶۱ درصد قیمت تمام شده در ماشین سنکرون آهنربا دائم استفاده شده در خودرو تویوتا پریوس است. سنکرون نسبت گشتاور به قیمت ماشین با توجه به آهنربای مصرفی در ماشین شار برگردان دو استاتور در مقایسه با سایر ماشین ها بهتر است. البته باید این نکته را در نظر گرفت که در این ماشین از آهنربای فریت استفاده شده است.



شکل (۹): گشتاور ماشین برحسب جریان مؤثر فازی

## ۶. نتیجه گیری

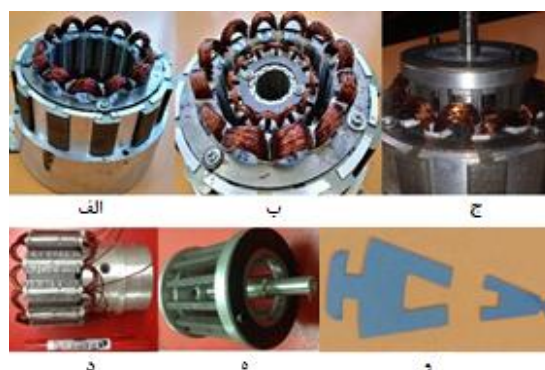
در این مقاله یک موتور شار برگردان دو استاتور با آهن‌ریای ارزان قیمت فریت طراحی شد. همچنین اثر تعداد دندانه‌های روتور روی گشتاور خروجی، ریپل آن، ولتاژ القایی و محتوی هم‌هنگ آن با ۱۲ دندانه استاتور تحت جریان نامی آرمیچر با استفاده از شبیه‌سازی اجزا محدود بررسی شد. در نهایت بهترین ساختار (۱۴ دندانه روتور) با تولید بالاترین مقدار گشتاور خروجی انتخاب شد. سپس از نظر اقتصادی عملکرد این ماشین به همراه قیمت تمام‌شده آن با یک موتور سنکرون آهن‌ریا دائم و یک موتور شار برگردان تک استاتور متداول هر دو با آهن‌ریا کمیاب حاکی مقایسه شد و برتری ضمنی اقتصادی این ساختار جهت تولید ارزان‌ترین مقدار توان خروجی مشخص گردید. در انتها جهت اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی الکترومغناطیسی یک نمونه با ابعاد کوچک ساخته شد و مورد آزمون آزمایشگاهی قرار گرفت. نتایج آزمون آزمایشگاهی صحت نتایج شبیه‌سازی اجزا محدود را با دقت مناسبی تأیید نمودند.

## ۷. مراجع

- [1] I. Afinowi, Z. Zhu, Y. Guan, J. Mipo, and P. Farah, "Performance Analysis of Switched-Flux Machines with Hybrid Ndfb and Ferrite Magnets," 17th IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 3110-3116, 2014.
- [2] H. Cai, B. Guan, and L. Xu, "Low-Cost Ferrite PM-Assisted Synchronous Reluctance Machine for Electric Vehicles," IEEE Trans. on Indust. Electronics, vol. 61, no. 10, pp. 5741-5748, 2014.
- [3] T. Miura, S. Chino, M. Takemoto, S. Ogasawara, A. Chiba, and N. Hoshi, "A Ferrite Permanent Magnet Axial Gap Motor with Segmented Rotor Structure for the Next Generation Hybrid Vehicle," IEEE XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 1-6, 2010.
- [4] K. H. Kim, H. I. Park, S. M. Jang, D. J. You, and M. Choi, "Comparative Study of Electromagnetic Performance of High-Speed Synchronous Motors with Rare-Earth and Ferrite Permanent Magnets," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 52, no. 7, pp. 1-4, 2016.

جدول (۵): مشخصات موتور ساخته‌شده

مقادیر	پارامتر
۱۲	تعداد دندانه‌های استاتور خارجی
۱۲	تعداد دندانه‌های استاتور داخلی
۱۴	تعداد دندانه‌های روتور
۰/۲۵	فاصله هوایی (mm)
۱۴۰	قطر خارجی ماشین (mm)
۸۲	طول مؤثر محوری (mm)
۲۶	استاتور خارجی (دور در کلاف)
۶	استاتور داخلی (دور در کلاف)
۱۲۸	مجموع تعداد دور یک فاز
۰/۴۱	چگالی شار پسماند آهن‌ریا (T)
۱۲۰۰	سرعت چرخش موتور (دور بر دقیقه)



شکل (۸): موتور ساخته‌شده (الف) استاتور خارجی، (ب) مجموعه استاتور داخلی و خارجی، (ج) مجموعه استاتور داخلی و خارجی و روتور، (د، ه) استاتور داخلی، (و) تکه‌های استاتور بیرونی و داخلی

این موتور به وسیله درایو شرکت LS مدل ig5 تحت فرکانس ۲۸۰ Hz راه‌اندازی شده است. بار موتور با استفاده از ستاپ آزمایشگاهی شرکت Lucas Nulle مدل SO3636-6V که یک بار ترمزی بسیار دقیق متصل به یک گشتاورسنج است تأمین شد. با افزایش پله‌ای بار ماشین، در هر پله گشتاور و جریان مؤثر ماشین اندازه‌گیری شد. شکل (۹) منحنی گشتاور تولیدی ماشین نسبت به جریان مؤثر فازی را نشان می‌دهد که گشتاور ماشین در جریان ۸ A به نزدیکی ۳ N.m رسیده است. همچنین نتایج حاصل از آزمایش با پیش‌بینی‌های ناشی از شبیه‌سازی اجزا محدود مقایسه شده است. نتایج آزمایش به خوبی دقت شبیه‌سازی را تأیید می‌نمایند.

- [7] C. Awah and Z. Zhu, "Influence of Rotor Pole Number on Electromagnetic Performance of Double-Stator Switched Flux PM Machines," in IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion (VPPC), pp. 1-6, 2016.
- [8] T. Raminosoa et al., "Reduced rare-earth flux-switching machines for traction applications," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 4, pp. 2959-2971, 2015.
- [9] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcova, Design of rotating electrical machines. John Wiley & Sons, 2013.
- [5] I. Petrov and J. Pyrhonen, "Performance of Low-Cost Permanent Magnet Material in PM Synchronous Machines," IEEE Trans. on Indust. Electronics, vol. 60, no. 6, pp. 2131-2138, 2013.
- [6] C. Awah and Z. Zhu, "Comparative Study of High Performance Double-Stator Switched Flux Permanent Magnet Machines," in IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion (VPPC), pp. 1-6, 2016.



## **Rotor Tooth Number Effect on the Performance of a Double Stator Flux Switching Motor with Low Cost Magnets**

**F. Asadi, S. E. Abdollahi<sup>\*</sup>, S. A. Gholamian**

**Babol Noshirvani University of Technology**

(Received: 10/09/2019, Accepted: 29/11/2019)

### **Abstract**

*Flux switching (FS) machines have recently received much attention because of their high torque density and their simple rotor structure. In these machines, the armature coil and excitation system are both mounted on the stator structure, and there is no coil, magnet or cage on the rotor. One of the drawbacks of the FS machines is the employment of large amounts of expensive rare earth magnets in their stator structure. Although ferrite permanent magnets can be used instead of rare earth magnets with about one tenth of the price, but the machine torque density is reduced. To solve this problem double stator structures are suggested. In machines with this structure, as in the conventional FS machines, the number of rotor teeth has a significant effect on machine's performance. Therefore, in this paper, the effect of rotor topology on the performance of a double stator ferrite magnet FS machine is investigated using finite element modeling and simulation under nominal operating conditions. Finally, to evaluate the accuracy of simulation results, a prototype of the best structure with maximum torque is manufactured and tested. The test results confirm the correctness of the simulation results with considerable accuracy.*

**Keywords:** Flux switching motor, Ferrite Permanent Magnet, Finite Element Method, Torque Density, Power Density

---

<sup>\*</sup> Corresponding author E-mail: e.abdollahi@nit.ac.ir