

ساختار بهینه موتورهای مغناطیس دائم شار محور پیشران الکتریکی زیردریایی با هدف کاهش ریپل گشتاور

محمد رضا علیزاده پهلوانی^۱، حمیدرضا قلی نژاد عمران^{۲*}

۱- دانشیار، ۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۴/۰۱/۰۱، پذیرش: ۹۴/۰۹/۱۷)

چکیده: امروزه موتورهای مغناطیس دائم به دلیل خصوصیات بارزی از قبیل راندمان بالا، وزن کم و چگالی انرژی بالا کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف خصوصاً صنایع نظامی پیدا کرده‌اند. ریپل گشتاور یکی از خصوصیات ذاتی این نوع موتورها بوده که هارمونیک‌های زمانی ناشی از درایو و هارمونیک‌های مکانی ناشی از ساختار هندسی، از جمله دلایل ایجاد آن در این نوع موتورها می‌باشند. ساختار هندسی مغناطیس‌های دائم و شیارهای استاتور از جمله عوامل ایجاد گشتاور دندانه‌ای (یکی از عوامل ایجاد ریپل گشتاور) در این موتورها می‌باشند. این گشتاور ناخواسته سبب ایجاد نویز، لرزش و راه‌اندازی نامناسب می‌شود. همچنین سبب ایجاد حباب در کاربری این موتور به‌عنوان پیشران زیردریایی‌ها در خط اثر آن‌ها می‌گردد. شایان‌ذکر است حباب‌های خط اثر زیردریایی از عوامل شناسایی این وسیله می‌باشد. در این مقاله سعی شده تا با ارائه روابط تحلیلی و راستی‌آزمایی به کمک شبیه‌سازی سه‌بعدی مبتنی بر تحلیل اجزای محدود، گشتاور ناخواسته فوق کاهش یابد تا گامی مهم در تحقق اهداف سازمان صنایع دریایی کشور برداشته شود.

کلید واژه‌ها: موتورهای مغناطیس دائم شار محور، ریپل گشتاور، گشتاور دندانه‌ای، پیشران زیردریایی، شبیه‌سازی سه‌بعدی اجزای محدود.

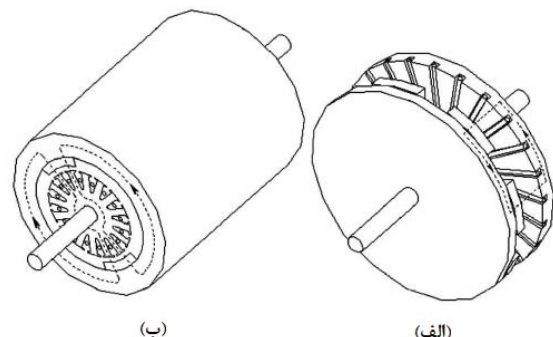
۱. مقدمه

انواع شار محوری که به موتورهای دیسکی نیز معروف‌اند، دارای چگالی گشتاور و راندمان بالاتری نسبت به انواع شار شعاعی می‌باشند [۱]. علاوه بر این، نسبت قطر به طول بالا در موتورهای شار محوری، سبب به‌کارگیری آن‌ها در پیشران^۳ الکتریکی زیردریایی شده است [۲].

به‌عبارت‌دیگر راندمان بالا، چگالی توان بالا، ساختار فشرده و چگالی گشتاور بالا در این موتورها از الزامات به‌کارگیری آن‌ها در پیشران‌های الکتریکی زیردریایی‌ها می‌باشند. همچنین این موتورها از ویژگی‌های فنی زیر نیز برخوردار می‌باشند [۳]:

- کارکرد بیش از ۱۰۰ هزار ساعت بدون بروز خطا
- قابلیت خنک‌سازی توسط آب دریا
- چگالی توان در شرایط نامی برابر $2/2$ (KW/Kg)
- چگالی گشتاور در شرایط نامی برابر $5/5$ (N.m/Kg)
- ایجاد سرعت خطی ۲۰ تا ۳۰ (m/s) در پیشران‌های الکتریکی زیردریایی‌ها.

موتورهای مغناطیس دائم، دارای خصوصیتی همچون راندمان بالا، قابلیت اطمینان بالا، چگالی توان و چگالی گشتاور بالاتری نسبت به انواع دیگر موتورها می‌باشند. این موتورها از لحاظ مسیر عبور شار، همان‌طور که در شکل (۱) نیز نشان داده شده، به انواع شار محوری^۱ و شار شعاعی^۲ تقسیم می‌شوند.



شکل (۱): انواع موتورهای مغناطیس دائم، (الف) شار محوری (ب) شار شعاعی روتور خارجی [۳]

*نویسنده پاسخگو: ffamid.reza@gmail.com

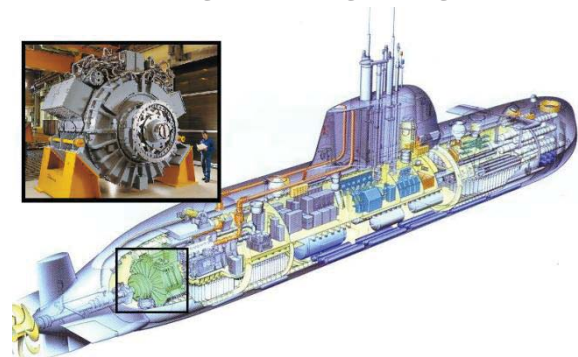
موتورهای مغناطیس دائم، عملاً غیرممکن و مخصوص نوع خاصی از آن‌ها می‌باشد. به همین دلیل در این مقاله، بناست تا روش‌هایی مورد بررسی قرار گیرند تا با هزینه نسبتاً کمتر، ضمن تأثیر چشمگیر در کاهش دامنه گشتاور دندانه‌ای، کمترین اثر منفی را بر عملکرد موتور داشته باشند. روش‌های موردنظر این مقاله، جابه‌جایی^۲ (یا گروه‌بندی)^۳ و مورب‌سازی^۴ قطب‌ها می‌باشند. تاکنون این دو روش در مقالات متعددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که تعدادی از این مراجع در ادامه آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات موتور مورد نظر

مقدار	مشخصات
۱۶۰	توان خروجی (KW)
۳	تعداد فاز
۴۳۵	ولتاژ نامی خط (V)
۲۱۵	جریان نامی فاز (A)
۱۰۰	فرکانس (Hz)
۵۱	تعداد دور هر فاز استاتور
۲۰	تعداد جفت قطب‌ها
۰/۴۲	قطر هادی سیم‌پیچی (mm)
۱۰/۷	ارتفاع آهنربا (mm)
۱۵/۷	ضخامت سیم‌پیچ (mm)
۲/۷۵	فاصله هوایی (mm)
۰/۵۸	چگالی شار فاصله هوایی (tesla)
۷/۱	چگالی جریان (A/mm ²)
۷۲۰	قطر خارجی استاتور و روتور (mm)
۴۹۶/۸	قطر داخلی استاتور و روتور (mm)
۲۵	طول استاتور (mm)
۱۵	طول روتور (mm)
۲/۵	دهانه باز شیار (mm)
F	کلاس عایق‌بندی

در مرجع [۵] به کاهش گشتاور دندانه‌ای در موتور مغناطیس دائم شار محوری توسط جابه‌جایی و یا گروه‌بندی کردن قطب‌ها پرداخته شده است. عملکرد این روش با یک موتور مرجع با شکل آهنربای استاندارد و دیگر روش‌های مربوط کاهش گشتاور دندانه‌ای مقایسه شده است، نتایج نشان‌دهنده آن است که این روش در حذف گشتاور دندانه‌ای مؤثرتر عمل نموده به‌طوری‌که تحت این روش، گشتاور دندانه‌ای نسبت به مدل مرجع حدود ۹۷/۵ درصد کاهش داشته است. این مقدار حدود ۰/۵ درصد از گشتاور متوسط موتور را به خود اختصاص می‌دهد که البته قابل چشم‌پوشی می‌باشد. در مرجع [۶] به بررسی یکی از مهم‌ترین

شکل (۲) نشان‌دهنده موتور مغناطیس دائم (به‌نام Permasyn) ساخت شرکت زیمنس آلمان جهت کاربرد در پیشران الکتریکی زیردریایی کلاس ۲۱۴ می‌باشد.



شکل (۲): نمای از زیر دریایی کلاس ۲۱۴ با پیشران موتور مغناطیس دائم Permasyn

به‌عنوان مثال، به‌طور تقریبی یک زیردریایی با طول ۱۰۰ m، نیازمند ۴ موتور دیزلی (MW) ۱/۲ و مجموع (MW) ۴ موتور الکتریکی است. زیردریایی زمانی که به عمق بیش از موتور الکتریکی است. زیردریایی زمانی که به عمق بیش از پرسکوپ^۱ برسد، موتورهای دیزلی خاموش و موتورهای الکتریکی به‌کار می‌افتد [۴]. در این حالت، توجه به امر کاهش تولید حباب ناشی از ریبیل گشتاور توسط پروانه‌ها نیز بسیار حائز اهمیت خواهد شد. به‌منظور رفع این عیب و پیرو بومی‌سازی تجهیزات نظامی، لازم است تا کیفیت گشتاور موتورهای مغناطیس دائم شار محور ساخته‌شده در کشور بیش‌ازپیش افزایش یابند تا روزه‌روز شاهد پیشرفت صنایع نظامی و دریایی کشور باشیم. به‌همین منظور در این مقاله، دو روش کارآمد و درعین حال مقرون‌به‌صرفه جهت کاهش گشتاور دندانه‌ای (به‌عنوان یکی از عوامل کاهش ریبیل گشتاور) معرفی خواهند شد. معرفی این روش‌ها به‌همراه ارائه روابط تحلیلی بوده که با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی مبتنی بر تحلیل اجزای محدود راستی آزمایی خواهند شد. مشخصات موتور موردنظر در این مقاله در جدول (۱) آورده شده است.

۲- کاهش گشتاور دندانه‌ای

روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای که تاکنون در پژوهش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند، جدا از میزان عملکردشان در کاهش نقش دندانه بر ریبیل گشتاور، هرکدام دارای معایبی از قبیل هزینه بالای پیاده‌سازی، کاهش ماکزیمم گشتاور موتور، کاهش راندمان و ... می‌باشند. همچنین بسیاری از این پژوهش‌ها بر روی موتورهای شار شعاعی بحث نموده و منابع نسبتاً کمتری در این زمینه و در رابطه با موتورهای شار محوری موجود می‌باشد. پیاده‌سازی برخی از این روش‌ها نیز در انواع مختلف

2. Displacement
3. Grouping
4. Skewing

1. Periscope

قطب، روش‌ها تأثیر بیشتری داشته و موتور دارای عملکرد الکترومغناطیسی بهتری است. مرجع [۱۰] با تعریف گشتاور دندانه‌ای با استفاده از بسط سری فوریه، علاوه بر معرفی چند روش کاهش گشتاور دندانه‌ای در موتورهای شار شعاعی، چند روش جدید در موتورهای شار محوری را نیز بررسی کرده است. این روش‌ها شامل مورب‌سازی دندانه‌ها و قطب‌ها، جابه‌جایی، تغییر شکل، تغییر پهنای قطب‌ها، ایجاد شیارهای ساختگی و تغییر نسبت پهنای آهنربا به گام قطب‌ها است. نتایج این پژوهش به کمک تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی صورت پذیرفته است که بر طبق آن، روش مورب‌سازی نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری را از خود نشان داده است.

نشان دادن تأثیر هر روش، نیازمند بیان تحلیلی گشتاور دندانه‌ای است. در روش تحلیلی معمولاً از شار مغناطیسی داخل شیارها و اشباع دندانه‌ها صرف‌نظر شده و می‌توان گشتاور دندانه‌ای را بر اساس رابطه (۱) و از طریق مشتق انرژی ذخیره‌شده در کل حجم فاصله هوایی نسبت به زاویه روتور، به‌دست آورد [۱۱].

$$T_{Cog} = \frac{dW}{d\theta} = \frac{1}{2\mu_0} \frac{\partial}{\partial \theta} (\iiint B_g^2 dV) \quad (1)$$

μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی خلأ و B_g چگالی شار فاصله هوایی تولیدشده توسط آهنرباها در موتورهای مغناطیس دائم شار محوری بوده که بر اساس رابطه (۲) محاسبه و در آن اثر شیارها نیز لحاظ می‌شود [۳].

$$B_g(\theta) = \frac{1}{k_c} B_{PM}(\theta) + B_{sl}(\theta) \quad (2)$$

در این رابطه، k_c ضریب کارتر بوده که از رابطه (۳) به‌دست می‌آید.

$$k_c = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma g} \quad (3)$$

در آن؛

$$\gamma = \frac{4}{\pi} \left[\frac{w_s}{2g} \tan^{-1} \left(\frac{w_s}{2g} \right) - L_n \left(\sqrt{1 + \frac{w_s^2}{2g}} \right) \right] \quad (4)$$

در روابط بالا g طول فاصله هوایی، τ_s گام شیار و w_s دهانه باز شیار می‌باشند [۳]. چگالی شار تولیدشده توسط آهنرباها در حالت استاتور بدون شیار از رابطه (۵) به‌دست می‌آید.

$$B_{PM}(\theta) = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{\sigma_l} B_{mg} b_v \cos \left[v \left(\frac{\pi}{\tau} r \theta - \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (5)$$

در رابطه (۵) B_{mg} ماکزیمم چگالی شار بوده که مطابق رابطه (۶) محاسبه می‌شود. τ گام قطب، r شعاع روتور و σ_l ضریب شار نشی^۲ آهنرباست که مقدار آن کمی بیشتر از یک است.

روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای در موتورهای مغناطیس دائم، یعنی تغییر شکل آهنربا پرداخته شده است. ابتدا انواع مدل‌های تغییر شکل آهنربا نظیر مدل پره پنکه‌ای، لبه‌های موازی، دایره‌ای، مثلثی، ذوزنقه‌ای و ... و تأثیر هرکدام روی کارایی موتور بررسی و سپس نتایج با یک موتور شارمحوری مغناطیس دائم مرجع (مدل پره پنکه‌ای) مقایسه شدند. موتور موردنظر دارای یک استاتور، روتور دوتایی، ۸ قطب و ۲۴ شیار بوده و توسط تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاکی از آن‌اند که تغییر شکل آهنربا سبب کاهش مقدار قابل توجهی از گشتاور دندانه‌ای می‌شود، به طوری که برخی انواع سبب کاهش ۳۷/۵ تا ۶۲/۵ درصدی نسبت به نوع مرجع شدند. در مرجع [۷] هدف تحلیل و آزمایش یک موتور مغناطیس دائم شار محوری با گشتاور دندانه‌ای کاهش یافته می‌باشد. معادلات خطوط شار مغناطیسی مابین آهنرباها و هسته به صورت ریاضی تخمین زده شده و به دنبال آن مقدار مینیمم گشتاور دندانه‌ای با روش‌های تئوری و هندسی و بدون تحلیل اجزای محدود محاسبه شده است. همچنین به صورت تئوری، زاویه تورب آهنربا که تحت آن گشتاور دندانه‌ای کمترین مقدار خودش را دارد نیز محاسبه شده که صحت آن توسط تحلیل اجزای محدود و نتایج آزمایشگاهی تأیید شد. نتایج نشان‌دهنده آن است که تحت زاویه تورب ۴ درجه، گشتاور دندانه‌ای تا حدود ۹۰ درصد کاهش پیدا خواهد کرد. در مرجع [۸] یک روش به نام اریب کردن هابرید^۱ جهت کاهش گشتاور دندانه‌ای در ژنراتور مغناطیس دائم شار محور ۱۲ قطب و ۱۸ شیار، جهت کاربرد در توربین‌های بادی معرفی شده است. تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی کاهش ۸۸ درصدی گشتاور دندانه‌ای را پس از اعمال این روش تأیید کرد. کاربرد این روش سبب بهبود قابل توجه کارایی توربین در سرعت پایین راه‌اندازی با حفظ چگالی توان بالا می‌شود. همچنین از نقطه نظر ساخت، سردرگمی جایگذاری قطب‌های مثبت و منفی را کاهش داده و به دلیل شکل ساده آهنرباها، هزینه ساخت ژنراتور را پایین آورد. در مرجع [۹] به بررسی تحلیلی چند روش مقرون به صرفه جهت کاهش گشتاور دندانه‌ای پرداخته شده است. موتور ۵ کیلوواتی موردنظر این پژوهش شار محوری با آهنربای سطحی و دارای دو روتور و یک استاتور بوده که با استفاده از روش‌های سه‌بعدی تقریبی و سه‌بعدی اجزای محدود تأثیر هریک از روش‌ها بر روی آن محاسبه و باهم اعتبار سنجی می‌شوند. روش‌های مورد بررسی اعم از جابه‌جایی آهنرباها و شیارها، تغییر کمان قطب آهنرباها و استاتور بر دو ساختار از موتور موردنظر، شامل ۱۲ شیار با ۸ قطب و ۱۰ شیار با ۸ قطب، اعمال شدند که طبق نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، در ساختار ۱۲ شیار با ۸

$$T_{\text{Cog}} = \frac{g}{2\mu_0} \frac{\partial}{\partial \varphi} \int \int B_{\text{PM}}^2(\varphi) r^2 d\varphi dr \quad (12)$$

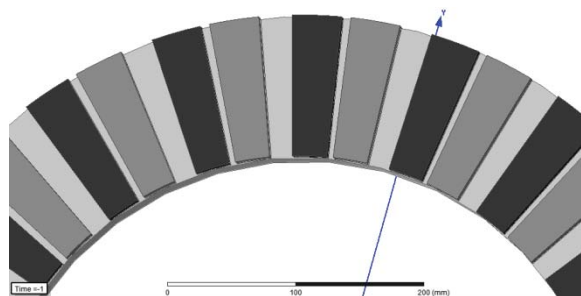
سپس با جای گذاری روابط (۲) تا (۱۱) در رابطه (۱۲)، گشتاور دندانه‌ای به صورت رابطه (۱۳) حاصل خواهد شد. در واقع این رابطه، بسط سری فوریه گشتاور دندانه‌ای بوده که در مراجع زیادی از جمله [۴] و [۵] و [۱۰] به کار گرفته شده است.

$$T_{\text{Cog}}(\theta) = \sum_{k=1,2,3,\dots}^{\infty} T_m \sin(kN_c \theta) \quad (13)$$

در این رابطه T_m ضریب سری فوریه و N_c کوچک‌ترین مضرب مشترک بین تعداد قطب‌های روتور و تعداد شیارها می‌باشند.

۱-۲- روش جابه‌جایی مکان قطب‌ها

گروه‌بندی یا جابه‌جایی قطب‌ها که بیشتر در رابطه با موتورهای شار محوری به کار برده می‌شود، از جمله ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌هایی است که تاکنون در این زمینه معرفی شده است. چراکه در این روش شکل قطب‌ها و شکل استاتور تغییری نکرده و تنها محل استقرار آن‌ها جابه‌جا می‌شود. عملکرد این روش به این صورت است که، با جابه‌جایی آهنرباها شار ناشی در یک سمت قطب‌ها افزایش و در سمت دیگر کاهش یافته که سبب نامتقارن شدن توزیع میدان مغناطیسی و در نتیجه سبب کاهش گشتاور دندانه‌ای خواهد شد. شکل (۳) نشان‌دهنده جابه‌جایی قطب‌ها در موتور مورد نظر می‌باشد.



شکل (۳): نحوه جابه‌جایی قطب‌ها (رنگ روشن‌تر: قطب مثبت و رنگ تیره‌تر: قطب منفی)

مدل‌سازی این روش، با اعمال تغییراتی در رابطه (۱۳)، به صورتی که در رابطه (۱۴) بیان شده، صورت می‌پذیرد [۵].

$$T_{\text{Cog}} = 2p n_{\text{rot}} \sum_{h=0}^{2p} \sum_{k=1}^{\infty} T_m \sin(kN_c(\theta - h\gamma)) \quad (14)$$

در این رابطه p تعداد جفت قطب‌ها و n_{rot} تعداد روتورهای موتور شار محوری بوده که در این مقاله برابر ۱ می‌باشد. همچنین γ زاویه جابه‌جایی قطب‌ها بوده که به عواملی چون تعداد جفت قطب‌ها، شیارها و نسبت قوس قطب آهنربا به گام

$$B_{mg} = \frac{B_r}{1 + \mu_r g / h_m} \quad (6)$$

h_m ارتفاع آهنربا (در جهت محور موتور)، μ_r ضریب نفوذپذیری آهنربا^۱ و B_r نیز چگالی شار پسماند^۲ آهنربا می‌باشد. همچنین رابطه مربوط به ضریب b_v نیز در رابطه (۷) آورده شده است.

$$b_v = \frac{4}{\tau} \left[\frac{c_p}{c_p^2 + \beta_v^2} \sinh(\alpha) - 6 \left(\frac{1}{\beta_v} \right)^4 \frac{1}{b_t^3} \cosh(\alpha) + 3 \left(\frac{1}{\beta_v} \right)^2 \frac{2}{\tau - b_p} \cosh(\alpha) \right] \times \sin\left(v \frac{\pi}{2}\right) \sin\left(v \frac{\pi b_t}{\tau}\right) + \frac{4}{\tau} \left[\frac{\beta_v}{c_p^2 + \beta_v^2} + 6 \left(\frac{1}{\beta_v} \right)^3 \frac{1}{b_t^2} - \frac{1}{\beta_v} \right] \cosh(\alpha) \sin\left(v \frac{\pi}{2}\right) \cos(\beta_v b_t) \quad (7)$$

که در آن، $\beta_v = v \frac{\pi}{\tau}$ ، $b_t = \frac{\tau - b_p}{2}$ ، $c_p = 2 \frac{\alpha}{b_p}$ می‌باشند. همچنین α ضریب است که تأثیر عکس‌العمل آرمیچر یا عکس‌العمل جریان گردابی را بر شکل موج چگالی شار اعمال می‌کند. مقداری بین ۰ تا ۱ داشته و برای حالت منحنی صاف و بدون در نظر گرفتن عکس‌العمل‌ها، مقدار آن برابر ۱ می‌باشد. b_p نیز پهنا یا قوس کمان آهنربا می‌باشد [۳]. اثر شیارها بر چگالی شار بر اساس رابطه (۸) مدل می‌شود.

$$B_{sl}(\theta) = \frac{k_c g}{\mu_0} \lambda_{sl}(\theta) B_{PM}(\theta) \quad (8)$$

$\lambda_{sl}(\theta)$ پرمانس ناشی^۳ شیار بوده که از طریق رابطه (۹) قابل استحصال است.

$$\lambda_{sl}(\theta) = - \sum_{v=1,3,5,\dots}^{\infty} a_v \cos(vs\theta) \quad (9)$$

در رابطه فوق، s تعداد شیارهای استاتور بوده و a_v نیز دامنه هارمونیک ناشی از شیارها بوده که در زیر آورده شده است.

$$a_v = \mu_0 \frac{\beta(k) \frac{1}{k} \frac{4}{g v \pi} \left(0.5 + \frac{v^2 \left(\frac{w_s}{\tau_s} \right)^2}{0.78 - 2v^2 \left(\frac{w_s}{\tau_s} \right)^2} \right) \sin\left(1.6v\pi \frac{w_s}{\tau_s}\right)}{\quad} \quad (10)$$

که در آن؛

$$\beta(k) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{w_s}{g + h_m / \mu_r} \right)^2}} \right) \quad (11)$$

با استفاده از رابطه (۱) و تعریف حجم فاصله هوایی در دستگاه استوانه‌ای، گشتاور دندانه‌ای به صورت رابطه (۱۲) بیان می‌گردد [۹].

1. Permeability
2. Residual flux
3. Leakage Permeability

جریان متناوب نیز شود. این روش را می توان مطابق رابطه (۱۵)، بر اساس مفهوم رابطه (۱۳) مدل سازی نمود [۴].

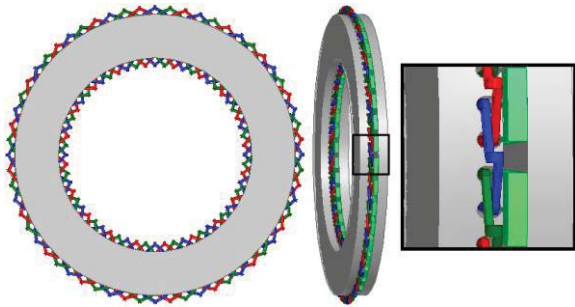
$$T_{cog}(\theta) = \sum_{k=1}^{\infty} T_m \frac{\sin[k \frac{\alpha_{skew} D}{k \alpha_{skew} p / D}]}{k \alpha_{skew} p / D} \sin(k N_c (\theta - \alpha_{skew})) \quad (15)$$

در رابطه فوق، D میانگین قطر موتور و α_{skew} میزان زاویه مورب شدگی است.

۳- اعتبارسنجی روابط تحلیلی به کمک تحلیل

اجزای محدود سه بعدی

در این بخش صحت روابط تحلیلی توسط نرم افزار ماکسول که مبتنی بر تحلیل اجزای محدود بوده تحقیق خواهند شد. تحلیل موتورهای شار محوری در نرم افزار ماکسول، برخلاف موتورهای شار شعاعی فقط در فضای سه بعدی صورت می گیرد که شکل (۵) نشان دهنده نمای سه بعدی موتور شبیه سازی شده در این نرم افزار نام برده شده می باشد.



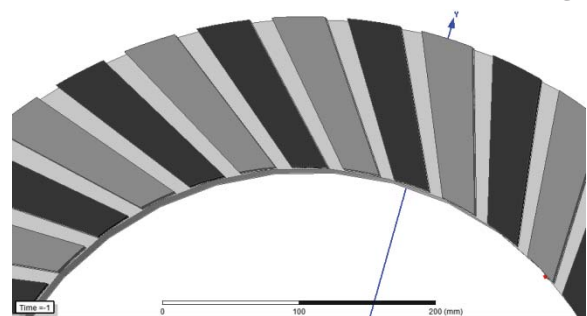
شکل (۵): نمایی از موتور مغناطیس دائم شار محوری مورد بررسی

ابتدا هریک از روش هایی که در بخش قبل معرفی شده اند، به ازای مقادیر مختلف زوایا مورد تحلیل قرار خواهند گرفت. هریک از این زوایا مقادیر قابل قبول داشته و بر اساس شرایط موتور انتخاب شدند که پس از تحلیل، میزان تأثیر هر کدام مشخص خواهد شد. نتایج حاصل از این تحلیل ها در شکل های (۶ و ۷) آمده که در آن ها مقدار پیک تا پیک گشتاور دندانه ای، به ازای زوایای مختلف نشان داده می شود. بر اساس همین نتایج می توان مقادیر مناسب زاویه جابه جایی و تورب قطب ها را انتخاب کرد. جهت تعیین تأثیر هریک از روش ها، می بایست دامنه گشتاور دندانه ای موتور قبل از اعمال هرگونه تغییر به دست آید. شکل (۸) نشان دهنده منحنی گشتاور دندانه ای در یک دندانه و در شرایط قبل از اعمال تغییرات می باشد. در این شکل، نتایج حاصل از رابطه تحلیلی شماره (۷) و حل عددی توسط شبیه سازی کامپیوتری، باهم ترسیم و مورد مقایسه قرار گرفته اند. تعیین چگالی شار مغناطیسی یا چگونگی توزیع آن در بخش های مختلف موتور از اهمیت زیادی برخوردار می باشد. چراکه این

قطب بستگی دارد. لازم به ذکر است که انتخاب زاویه جابه جایی بسیار مهم و حساس است. به صورتی که با انتخاب نادرست این زاویه، ممکن است مراتب جدیدی در هارمونیک های گشتاور دندانه ای به وجود آید، اما در مقابل با انتخاب درست آن می توان موتوری با گشتاور دندانه ای بسیار کم و با نیروی ضد محرکه سینوسی داشت.

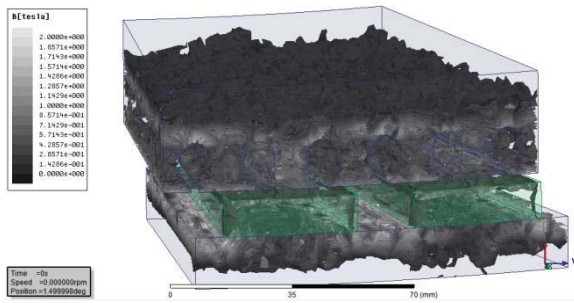
۲-۲- روش مورب سازی قطب ها

روش مورب سازی چه در سمت استاتور و چه در سمت روتور، یکی از ساده ترین (معمولاً در سمت قطب ها)، مؤثرترین و مرسوم ترین روش های کاهش گشتاور دندانه ای به شمار می آید. اعمال این روش در انواع موتورهای مغناطیس دائم متفاوت بوده، به عنوان مثال در انواع ماشین های شار شعاعی و آهنربا داخلی به دلیل ساختار پیچیده روتور، مورب سازی قطب ها بسیار دشوار و عملاً غیرممکن بوده اما در انواع موتورهای شار محوری با آهنربای سطحی، بسیار ساده و کارآمد می باشد. به همین دلیل در انواع ماشین های شار شعاعی و آهنربا داخلی اعمال این روش در سمت استاتور، یعنی مورب سازی دندانه ها صورت می پذیرد. این رویکرد اثر مخرب بیشتری بر سایر عملکردهای موتور نسبت به تغییرات در سمت روتور دارد. به همین دلیل، با توجه به هدف این مقاله که معرفی روش هایی ساده، کم هزینه، کارآمد و با کمترین تأثیر منفی بر عملکرد موتور بوده، روش مورب سازی قطب ها در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۴) چگونگی وضعیت قطب ها را پس از اعمال این روش بر روی موتور مورد نظر نشان می دهد.



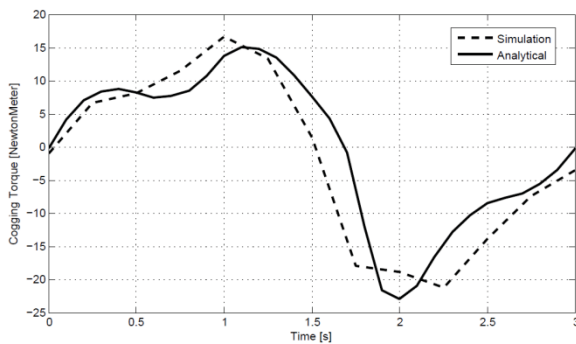
شکل (۴): نحوه مورب سازی قطب ها

میزان مورب سازی آهنرباها در مراجع مختلف، به اندازه یک گام شیار پیشنهاد شده است. اما به طور معمول، در موتورها با شرایط متفاوت، مقدار مناسب این پارامتر از میان چند نمونه که با توجه به شرایط مسئله کاندید شده اند، انتخاب خواهد شد. انتخاب مناسب این پارامتر علاوه بر کاهش چشم گیر در دامنه گشتاور دندانه ای، می تواند سبب حذف هارمونیک های بالای نیروی ضد محرکه الکتریکی در ماشین های مغناطیس دائم



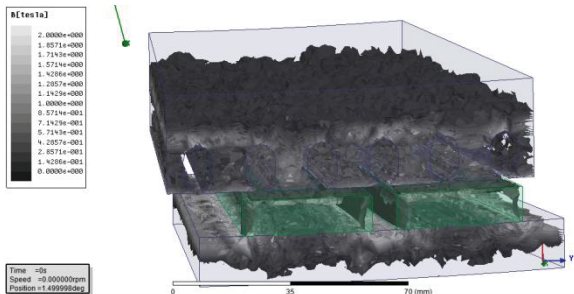
شکل (۹): مقدار چگالی شار مغناطیسی در نواحی مختلف موتور قبل از اعمال تغییرات

با توجه به شکل (۶)، مؤثرترین زاویه جهت جابه‌جایی قطب‌های موتور مورد مطالعه، 0.75° درجه بوده که شکل (۱۰) میزان دقت رابطه (۹) را تحت این زاویه نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): منحنی گشتاور دندانه‌ای یک دندانه پس از جابجایی قطب‌ها

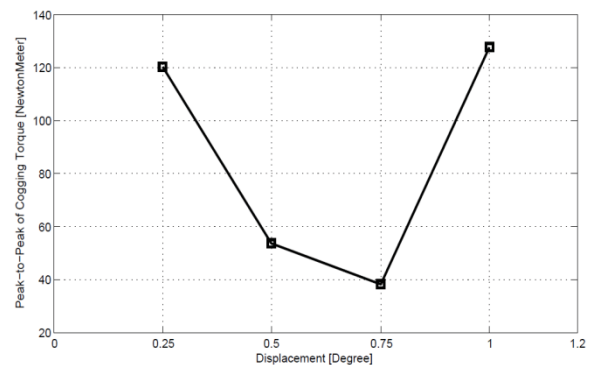
با جابجایی قطب‌ها، طبیعتاً توزیع شار و در نتیجه مقدار چگالی شار در نواحی مختلف موتور نیز تغییر خواهد کرد. اگر این تغییرات به‌طور نامناسبی صورت گیرد می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد موتور داشته باشد. شکل (۱۱) مقدار و چگونگی توزیع چگالی شار را در نواحی مختلف موتور تحت این روش نشان می‌دهد.



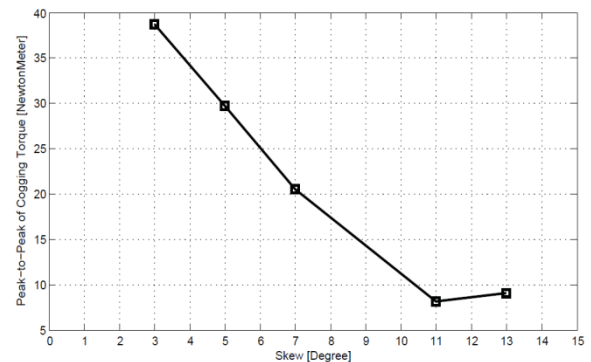
شکل (۱۱): مقدار چگالی شار مغناطیسی در نواحی مختلف موتور پس از جابجایی قطب‌ها

در این تصویر تأثیر جابجایی قطب‌ها که همان تضعیف میدان در یک سمت و تقویت آن در سمت دیگر بوده، به‌خوبی نمایان است. همچنین هیچ اثر منفی نظیر اشباع هسته و دندانه در این

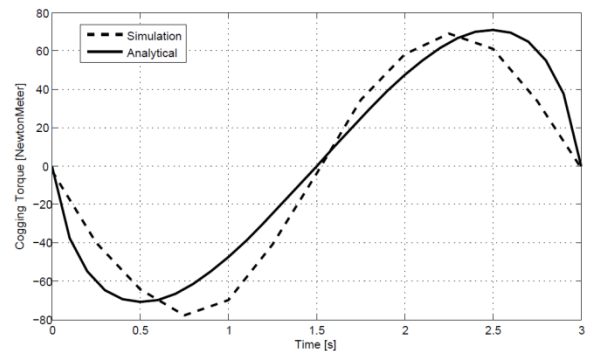
پارامتر بر مشخصات عملکردی موتور بسیار تأثیرگذار بوده به‌طوری‌که به‌عنوان مثال چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی با گشتاور تولیدی موتور نسبت مستقیم دارد. این در حالی است که اعمال هریک از روش‌های فوق می‌تواند بر مقدار و توزیع این پارامتر تأثیرگذار باشد. به همین دلیل، در این مقاله مقدار و چگونگی توزیع این پارامتر به‌طور سه‌بعدی نشان داده شده است. شکل (۹) نشان‌دهنده چگونگی توزیع این پارامتر در بخش‌های مختلف موتور، قبل از اعمال روش‌ها می‌باشد.



شکل (۶): تغییرات دامنه گشتاور دندانه‌ای به ازای زوایای مختلف جابجایی



شکل (۷): تغییرات دامنه گشتاور دندانه‌ای به ازای زوایای مختلف تورب



شکل (۸): منحنی گشتاور دندانه‌ای یک دندانه قبل از اعمال تغییرات

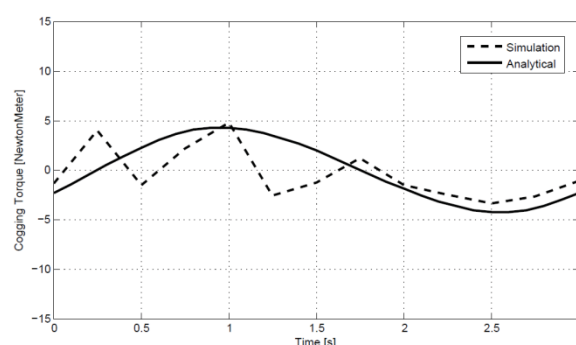
محدودیت‌هایی از قبیل محدودیت ساختی و محدودیت اقتصادی می‌باشند. از سوی دیگر، هرچند روش مورب‌سازی کاهش بیشتری را بر دامنه گشتاور دندانه‌ای اعمال می‌کند، اما در عوض روش جابجایی نیز از سادگی اعمال برخوردار می‌باشد. چراکه هزینه شکل‌دهی به آهنرباها در آن حذف خواهد شد. به همین دلیل، با در نظر گرفتن عواملی چون هزینه و سادگی پیاده‌سازی، این دو روش تا حدودی تأثیر مشابهی خواهند داشت که در این مقاله مقادیر بهینه هر کدام محاسبه شدند.

روش	تغییرات	
	زاویه‌ای (درجه)	پیک تا پیک (N.m)
بدون تغییر	۱۴۶	۱۹۶۸۸
	۰/۲۵	۱۰۰۶۳
جاب‌جایی محل قطب‌ها	۰/۵	۵۳/۵۰۵۱
	۰/۷۵	۱۹۳۱۴
مورب‌سازی قطب‌ها	۱	۱۶۰۵۶
	۳	۳۸/۶۹۷۳
	۵	۲۹/۷۰۳
	۷	۲۰/۵۰۶۸
	۱۱	۸/۱۳۷۳
	۱۳	۹/۰۱۸۶

۴- نتیجه‌گیری

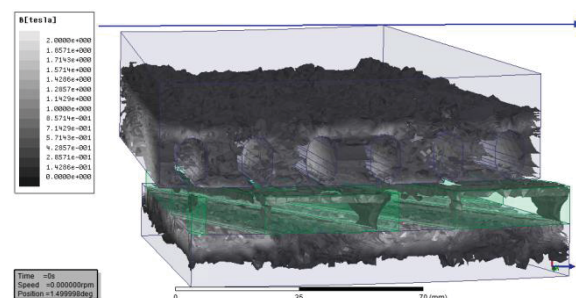
در این مقاله ابتدا روش‌های مورب‌سازی و جاب‌جایی قطب‌ها جهت کاهش گشتاور دندانه‌ای موتورهای مغناطیس دائم شار محوری به همراه روابط آنها معرفی شدند. این دو روش، به دلیل سادگی و مقرون‌به‌صرفه بودن اعمال آن‌ها و نیز عملکرد مؤثرشان، از میان روش‌های موجود انتخاب و مورد بررسی قرار گرفتند. به کمک تحلیل اجزای محدود، مقادیر بهینه زوایا جهت حصول بیشترین کاهش در دامنه گشتاور دندانه‌ای به دست آمدند. نتایج تحلیل نشان‌دهنده آن است که زوایای بهینه تورب و جاب‌جایی در موتور مورد نظر به ترتیب ۰/۷۵ و ۱۱ درجه می‌باشند که تحت این زوایا، دامنه گشتاور دندانه‌ای کاهش چشم‌گیر ۹۴/۵ و ۷۴ درصدی را به ترتیب در روش‌های مورب‌سازی و جاب‌جایی قطب‌ها داشته است.

تصویر مشاهده نمی‌شود. به‌طور مشابه و مطابق شکل (۷)، مؤثرترین زاویه جهت تورب قطب‌ها ۱۱ درجه می‌باشد. البته هرچه قطب‌ها بیشتر مورب شوند، شرایط اعمال این روش را سخت‌تر می‌کنند که این امر خلاف اهداف این مقاله می‌باشد. اما همان‌طور که از این تصویر نیز پیداست، تحت زاویه ۱۱ درجه، دامنه گشتاور دندانه‌ای موتور بسیار کاهش پیدا کرده به طوری که دامنه پیک تا پیک در این نقطه، نسبت به نقطه قبل (۷ درجه)، حدود ۶۰ درصد کاهش پیدا خواهد کرد. شکل (۱۲) نشان‌دهنده تغییرات گشتاور دندانه‌ای تحت این زاویه و میزان دقت رابطه (۱۰) می‌باشد.



شکل (۱۲): منحنی گشتاور دندانه‌ای یک دندانه پس از تورب قطب‌ها

شکل (۱۳) نیز نشان‌دهنده پراکندگی چگالی شار در نواحی مختلف موتور می‌باشد. توزیع یکنواخت شار مغناطیسی به خوبی در این تصویر مشخص است، اما تحت این روش امکان اشباع در برخی نواحی بالا خواهد رفت.



شکل (۱۳): مقدار چگالی شار مغناطیسی در نواحی مختلف موتور پس از مورب‌سازی قطب‌ها

جدول (۲) نیز نتایج به دست آمده مقاله را یکجا و به صورت عددی نشان می‌دهد. با توجه به اطلاعات این جدول، می‌توان این‌طور استنباط کرد که جهت افزایش هرچه بیشتر هر یک از روش‌ها باید به دنبال مقادیر بهینه زوایای جاب‌جایی و یا تورب قطب‌ها بود. چراکه افزایش هر یک از این کمیت‌ها به‌طور حتم سبب افزایش تأثیر روش‌ها نشده بلکه ممکن است به ازای مقادیر بیشتر، اثر عکس داشته باشند. از سوی دیگر، این مقادیر دارای

۵- مراجع

- [7] J. H. Choi, J. H. Kim, D. H. Kim, and Y. S. Baek, "Design and Parametric Analysis of Axial Flux PM Motors With Minimized Cogging Torque," IEEE Trans. vol. 45, pp. 2855 - 2858, June 2009.
- [8] M. Hsieh, D. G. Dorrell, Y. Yeh, and S. Ekram, "Cogging Torque Reduction in Axial Flux Machines for Small Wind Turbines," 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, pp. 4435 - 4439, 2009.
- [9] W. Fei and P. C. K. Luk, "Cogging Torque Reduction Techniques for Axial-Flux Surface-Mounted Permanent-Magnet Segmented-Armature-Torus Machines," IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, pp. 485-490, 2008.
- [10] M. Aydin, Z. Q. Zhu, T. A. Lipo, and D. Howe, "Minimization of Cogging Torque in Axial-Flux Permanent-Magnet Machines: Design Concepts," IEEE Transactions On Magnetics, vol. 43, pp. 3614-3622, September 2007.
- [11] A. Parviainen, "Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines," Phd. thesis, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, 2005.
- [1] T. J. Woolmer, M. D. McCulloch, "Axial Flux Permanent Magnet Machines: A New Topology For High Performance Applications," in Hybrid Vehicle Conference: IET The Institution of Engineering and Technology, Coventry, pp. 27-42, 2006.
- [2] F. Sahin, "Design and development of a high-speed axial-flux permanent Machine," in Technische Universities Eindhoven, 2001.
- [3] J. F. Gieras, "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines," in Springer Science, Kluwer Academic Publishers, 2005.
- [4] J. F. Gieras and M. Wing, "Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications," Boca Raton: CRC Press, 3rd ed, 2010.
- [5] M. Gulec and M. Aydin, "Influence of Magnet Grouping in Reduction of Cogging Torque for A Slotted Double-Rotor Axial-Flux PM Motor," International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Sorrento, pp. 812-817, 2012.
- [6] M. Aydin, "Magnet Skew in Cogging Torque Minimization of Axial Gap Permanent Magnet Motors," International Conference on Electrical Machines, Vilamoura, pp. 1-6, 2008.

Optimized Structure of Axial Flux Permanent Magnet Motors used as Submarines' Propulsion in Order to Reduce Torque Ripple

M. Alizadeh Pahlavani, H. Gholinezhad Omran*

Malek Ashtar University of Technology

(Received: 21/03/2015, Accepted: 08/12/2015)

Abstract

Today, the permanent magnet motors are widely used in various industries especially military applications due to such characteristics as high efficiency, low weight and high energy density. Torque ripple is an inherent characteristic of this type of motors. Time and space harmonics produced by the motor drive and the motor structure itself give rise to torque ripples in these motors. Geometric structure of the magnets and stator slots lead to cogging torque (one of the causes of torque ripple) in these motors. This unwanted torque component causes noise, vibration and motor starting issues. It also creates bubbles in the application of these motors as the submarines' propulsion. It should be noted that bubbles could lead to submarine detection which is undesirable in military application. This paper provides analytical formulations and validation by three-dimensional finite element analysis to reduce this unwanted torque. This is an important step in achieving the goals of the country's marine industries organization.

Keywords: Axial flux permanent magnet motors, Torque ripple, Cogging torque, submarines propulsion, three dimensional finite element analysis

* Corresponding author E-mail: ffamid.reza@gmail.com