مقایسه آثار خطاهای ناهم‌محوری بر روی عملکرد چند نوع موتور سنکرون مغناطیس دائم شارمحوری با سیم‌پیچی حلقوی

محمد رجبی سبدانی[1] ، دانشجوی دکتری، احمد دارابی[1] ، استاد، جواد فیض[2]، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق و رباتیک- دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران
, darabi_ahmad@hotmail.comm.rajabi67@ut.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران - تهران- ایران
jfaiz@ut.ac.ir

چکیده: خطای ناهم‌محوری از شایع‌ترین خطاهای ماشین‌های مغناطیس دائم تخت می‌باشد که می‌تواند اثرات مخربی به همراه داشته باشد. بسیاری از مطالعات گذشته به بررسی این نوع خطا و نحوه تشخیص آن در ماشین‌های با ساختار شیاردار و سیم‌پیچی-های مرسوم معطوف شده است. در این مقاله تأثیر خطاهای ناهم‌محوری بر روی عملکرد چهار ساختار ماشین‌های مغناطیس دائم تخت یعنی یکطرفه شیاردار، یکطرفه بدون شیار، دوطرفه شیاردار و دوطرفه بدون شیار مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای این منظور، این ماشین‌ها در شرایط عملکرد بی‌باری و بار کامل و در سه حالت بدون عیب، با خطای ناهم‌محوری دینامیکی و خطای ناهم‌محوری استاتیکی در محیط اجزاء محدود مدلسازی می‌شوند. این مدلسازی‌های دینامیکی-گذرایی به صورت سه بعدی انجام گرفته است و مشخصه‌های عملکردی گوناگون، از قبیل جریان‌های ورودی، جریان‌های گردشی در مسیرهای موازی، شارهای پیوندی، گشتاور و نیروهای محوری وارد بر دیسک‌های روتور، استخراج شده‌اند. این مشخصه‌ها با یکدیگر مقایسه شده و تأثیر خطاهای ناهم‌محوری بر روی عملکرد هر یک از موتورها مورد ارزیابی قرار گرفته است. طبق نتایج به دست آمده، بدون شیار بودن و دوطرفه بودن ماشین موجب کاهش اثرات نامطلوب این نوع خطاها خواهد شد. همچنین، نشان داده می‌شود که روش‌های مرسوم تشخیص خطای ناهم-محوری برای برخی از ساختارها کارآمد نیستند.

واژه های کلیدی: تشخیص خطا، خطای ناهم‌محوری، روش اجزاء محدود، سیم‌پیچی حلقوی، ماشین مغناطیس دائم شار محوری، مدلسازی گذرایی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۳/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۸/۰۶/۳۱

نام نویسنده‌ی مسئول : احمد دارابی

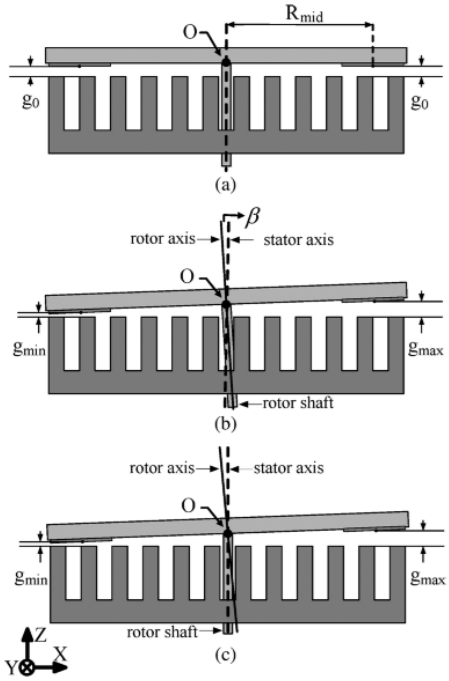
نشانی نویسنده‌ی مسئول : شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده برق و رباتیک

۱- مقدمه

امروزه موتورهای سنکرون مغناطیس دائم با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد خود، از جمله چگالی توان و بازده بالا، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. این امر به واسطه پیشرفت‌های دهه‌های اخیر در حوزه تولید آهنرباهای کمیاب خاکی قوی و نیز مدارهای الکترونیک قدرت محقق شده است [۲]. از جمله کاربردهای مهم ماشین‌های مغناطیس دائم می‌توان به سیستم‌های پیشران الکتریکی و نیز نیروگاه‌های بادی اشاره کرد [۳] ،[۴]. ماشین‌ها مغناطیس دائم دوار از نقطه نظر ساختار کلی به دو دسته استوانه‌ای و تخت (دیسکی) قابل تقسیم می‌باشند [۵] ،[۶]. ساختارهای تخت، که معمولاً به دلیل مسیر محوری عبور شار در فاصله هوایی با عنوان ساختارهای شارمحوری نیز شناخته می‌شوند، در مقایسه با ساختارهای استوانه‌ای از مزیت‌هایی نظیر چگالی گشتاور بالاتر، قابلیت ساخت به صورت ماژولار و ممان اینرسی کوچکتر برخوردار هستند [۷]. ماشین‌های تخت خود بر اساس چند معیار قابل دسته‌بندی می‌باشند [۸]: ۱) ساختارهای شیاردار، بدون شیار و بدون هسته، ۲) ساختارهای یکطرفه، دوطرفه و چند طبقه، و ۳) ساختارهای با سیم‌پیچ معمولی و سیم‌پیچ حلقوی (تروئیدال). ساختار یکطرفه شیاردار با سیم‌پیچ معمولی، متداول‌ترین نوع ماشین‌های تخت مغناطیس دائم است.

ماشین‌های مغناطیس دائم تخت ممکن است تحت تأثیر سه نوع خطای مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی قرار گیرند [۹]. در این بین احتمال خطاهای مکانیکی از دیگر انواع بیشتر است (بین ۵۰ تا ۶۰ درصد) [۱۰]. شاید بتوان خطاهای ناهم‌محوری را به عنوان متداول‌ترین و مهم‌ترین خطای مکانیکی محسوب کرد که به دلایل متعددی از جمله عیب بلبرینگ‌ها، قرارگیری نادرست یاتاقان‌ها در حین مونتاژ یا معیوب بودن آن‌ها، فرسودگی محور روتور و ... رخ می‌دهد [۱۰].

خطاهای ناهم‌محوری به سه نوع استاتیکی، دینامیکی و مرکب تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۱]. همانطور که در شکل ۱-الف نشان داده شده است، محورهای روتور، استاتور و چرخش در شرایط عملکرد سالم یک ماشین مغناطیس دائم تخت همگی بر هم منطبق هستند. در خطای استاتیکی، محور رتور و محور چرخش بر هم منطبق‌اند، اما هردوی آنها نسبت به محور استاتور زاویه دارند که این حالت در شکل ۱-ب نشان داده شده است. در این نوع خطا موقعیت کمترین طول فاصله هوائی ضمن چرخش رتور ثابت می‌ماند. این در حالی است که در خطای دینامیکی، محور چرخش و محور استاتور بر هم منطبق بوده ولی هر دو نسبت به محور روتور زاویه دارند. این شرایط در شکل ۱-ج به نمایش در آمده است. لازم به ذکر است که در این نوع خطا، موقعیت کمترین طول فاصله هوائی با چرخش رتور جابجا می‌شود. ممکن است خطاهای استاتیکی و دینامیکی به طور همزمان رخ دهند که این عمل باعث به وجود آمدن نوع سوم خطا یعنی خطای مرکب می‌شود. در این



شکل ۱: وضعیت محورهای روتور، استاتور و چرخش یک ماشین تخت در شرایط گوناگون: (الف) حالت سالم (ب) خطای ناهم‌محوری استاتیکی (ج) خطای ناهم‌محوری دینامیکی [۱۲].

نوع خطا محورهای روتور، استاتور و چرخش به صورت دو به دو نسبت به هم زاویه دارند. اکثر مراجع در زمینه خطای ناهم‌محوری ماشین‌های مغناطیس‌دائم به ساختارهای استوانه‌ای پرداخته‌اند و فقط تعداد اندکی از مطالعات چاپ شده در دسترس هستند که این نوع خطاها را در ساختارهای تخت مورد بررسی قرار داده‌اند. در [۱۲] با استفاده از تحلیل اجزاء محدود سه‌بعدی به بررسی تأثیر خطای ناهم‌محوری در ماشین شار محوری یکطرفه پرداخته شده است. مرجع [۱۳] نشان داده شده است که مدلسازی دوبعدی این ساختار در شرایط خطای ناهم‌محوری از دقت کافی برخوردار نیست و بنابراین یک تحلیل به کمک روش بازسازی سه‌بعدی میدان ارائه شده است. یک روش تحلیلی مبتنی بر توابع میدان برای ارزیابی اثرات خطای ناهم‌محوری در یک ماشین دوطرفه شیاردار با هسته بدون یوغ و سیم‌پیچی متمرکز در[۱۴] ارائه شده است. بررسی همزمان خطاهای ناهم‌محوری و مغناطیس‌زدایی در این ساختار به کمک یک روش تحلیلی هارمونیک زمانی و با استفاده از یک تابع رسانایی مغناطیسی در [۱۵] انجام شده است. اثرات خطای ناهم‌محوری در ساختار بدون هسته نیز در [۱۶] به کمک مدلسازی اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفته است.

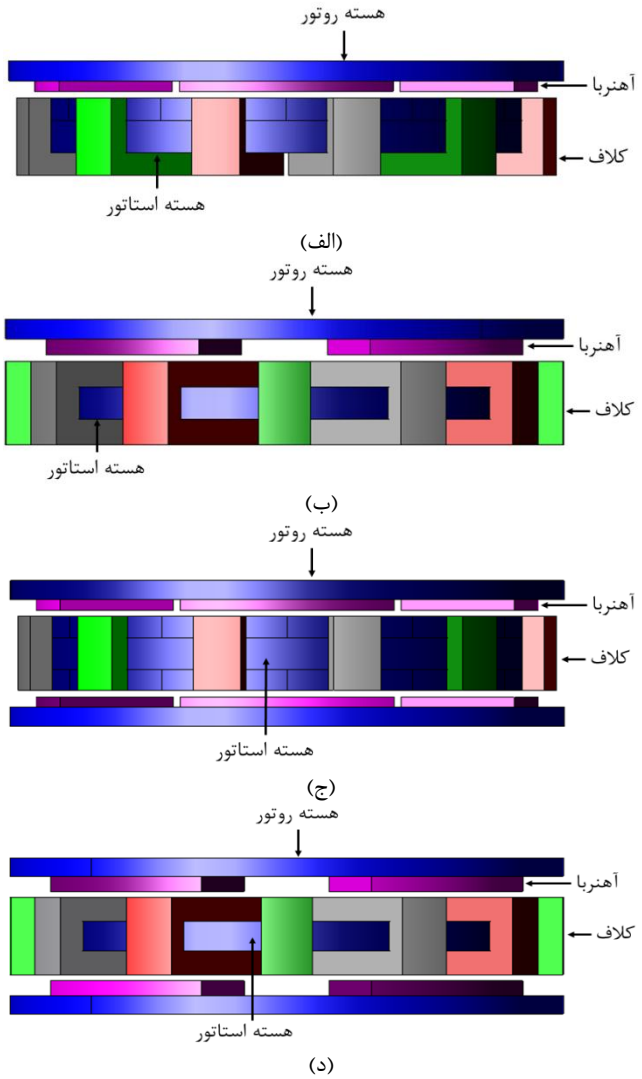
تعدادی از مراجع نیز تکنیک‌هایی را برای تشخیص این نوع از خطاها در این ساختارها پیشنهاد داده‌اند. در [۱۷] از ولتاژهای القایی در چند کلاف جستجو، که در استاتور قرار داده شده‌اند، برای تشخیص خطای ناهم‌محوری در ساختار یکطرفه شیاردار استفاده شده است. استفاده از ارتعاشات مکانیکی روشی است که در [۱۸] برای تشخیص خطای ناهم‌محوری ساختار یکطرفه شیاردار با سیم‌پیچی متمرکز ارائه شده است. همچنین، در [۱۹] از تجزیه و تحلیل همزمان جریان ورودی و

ارتعاشات مکانیکی برای تشخیص خطای ناهم‌محوری در یک ژنراتور با این ساختار بهره گرفته شده است.

استفاده از سیم‌پیچی حلقوی یا تروئیدال در ماشین‌های مغناطیس‌دائم تخت، و به ویژه در انواع دوطرفه آن، مزایای جالبی، از جمله کاهش طول سیم‌پیچ‌های انتهایی، را به همراه دارد. همچنین، ساختارهای با هسته بدون شیار نیز به دلیل ویژگی‌هایی نظیر کوچک بودن گشتاور دندانگی (کاگینگ) و تلفات هسته مورد توجه ویژه قرار گرفته‌اند. متأسفانه خطای ناهم‌محوری در این گونه ساختارها تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین، عواملی نظیر شیاردار بودن یا شیاردار نبودن هسته و نیز یکطرفه بودن یا دوطرفه بودن ساختار نقش بسزایی در میزان اثرگذاری خطای ناهم‌محوری بر روی عملکرد این گونه ماشین‌ها و نیز میزان موفقیت روش‌های تشخیص خطا دارد، که این موضوع نیز مورد غفلت واقع شده است. با توجه به این توضیحات، در این مقاله به بررسی خطاهای ناهم‌محوری استاتیکی و دینامیکی در ماشین‌های مغناطیس دائم تخت با ساختارهای گوناگون و مقایسه آن‌ها پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که این ماشین‌ها در رژیم عملکرد موتوری مورد مطالعه قرار می‌گیرند .در بخش بعد، چهار ساختار مورد مطالعه معرفی می‌شوند که عبارتند از: موتور یکطرفه شیاردار، موتور یکطرفه بدون شیار، موتور دوطرفه شیاردار و موتور دوطرفه بدون شیار، که همگی به صورت حلقوی سیم‌پیچی شده‌اند. در بخش سوم، نتایج مدلسازی اجزاء محدود این موتورها در شرایط عملکرد سالم و نیز خطاهای ناهم‌محوری دینامیکی و استاتیکی ارائه می‌شوند. برای هر موتور این نتایج در دو حالت بی‌باری و بار کامل به دست آمده است. در بخش چهارم پیرامون نتایج به دست آمده و مقایسه آن‌ها بحث خواهد شد.

۲- ساختارهای مورد مطالعه

در این مقاله چهار نوع موتور مغناطیس دائم تخت مورد مطالعه قرار می‌گیرند که عبارتند از: ۱) موتور یک طرفه شیاردار، ۲) موتور یک طرفه بدون شیار، ۳) موتور دوطرفه تک استاتوره شیاردار و ۴) موتور دوطرفه تک استاتوره بدون شیار. نمای شماتیک این چهار ساختار در شکل ۲ نشان داده شده است. این موتورها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که قابل مقایسه باشند. به هر حال، به دلیل متفاوت بودن ساختارها، مجموعه‌ای از مشخصات آن‌ها با یکدیگر یکسان است ولی برخی دیگر از مشخصات آن‌ها متفاوت می‌باشد. مشخصات اصلی این موتورها در جدول ۱ و جدول ۲ ارائه شده است. خطاهای ناهم‌محوری به دلیل آنکه یک نوع عدم تقارن ایجاد می‌کنند، می‌توانند مشکلات مهمی برای ماشین‌های با چند مسیر موازی جریان ایجاد کنند. از این رو، برای همه موتورها، دو مسیر موازی جریان در سیم‌پیچی هر فاز در نظر گرفته شده است تا اثر خطا بر روی این مسیرهای موازی قابل بررسی



شکل ۲: نمای شماتیک موتورهای مورد مطالعه: (الف) موتور یک طرفه شیاردار، (ب) موتور یک طرفه بدون شیار، (ج) موتور دوطرفه تک استاتوره شیاردار و (د) موتور دوطرفه تک استاتوره بدون شیار.

جدول ۱: مشخصات مشترک موتورهای مورد مطالعه

فرکانس تغذیه	۵۰ هرتز
تعداد قطب	۴
قطر داخلی هسته استاتور	۷۵/۵ میلیمتر
قطر خارجی هسته استاتور	۱۵۱ میلیمتر
قطر داخلی هسته روتور	۲۰ میلیمتر
قطر خارجی هسته روتور	۱۶۶/۶میلیمتر
ضخامت یوغ استاتور	۱۰ میلیمتر
ضخامت یوغ روتور	۶ میلیمتر
فاصله هوایی فیزیکی	۲ میلیمتر
نوع اتصال سه‌فاز	ستاره
نوع سیم‌پیچی	یک طبقه حلقوی
تعداد کلاف در هر فاز	۳
مقدار مؤثر جریان نامی ورودی	۲۴ آمپر
جنس آهنربا	NdFeB با B_r=1 T
جنس هسته‌های استاتور و روتور	50JN400
نسبت قوس آهنربا به گام قطب	۰/۵۶

جدول ۲: مشخصات غیر مشترک موتورهای مورد مطالعه

	ضخامت آهنربا (mm)	ضخامت محوری کلاف (mm)	عرض کلاف (mm)	ولتاژ فاز نامی	تعداد دور هر کلاف
یکطرفه شیاردار	۳/۲۵	۶/۷۱	۱۴/۷۸	۱۱/۸۷	۳۱
یکطرفه بدون شیار	۵	۷/۸	۱۵/۵	۱۰	۳۸
دوطرفه شیاردار	۳/۲۵	۶/۷۱	۱۴/۷۸	۱۷/۵	۳۱
دوطرفه بدون شیار	۵	۷/۸	۱۵/۵	۱۷	۳۸

باشد. همچنین، میزان ناهم محوری به صورت اغراق آمیز برابر ٪۷۵ در نظر گرفته شده است تا اینکه تفاوت‌ها به وضوح آشکار شوند. همچنین، به منظور مشاهده هر چه بهتر اثر دندانه‌ها، ساختارهای شیاردار با شیارهای هسته کاملاً باز طراحی شده‌اند.

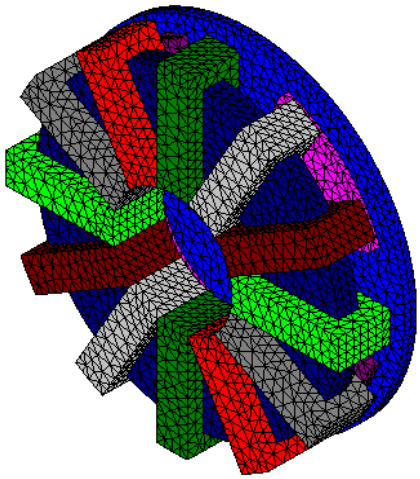
۳- نتایج مدلسازی

در این بخش نتایج مدلسازی اجزاء محدود چهار موتور مورد مطالعه در شرایط عملکرد عادی و نیز خطاهای ناهم‌محوری دینامیک و استاتیک و به صورت سه‌بعدی ارائه می‌شود. برای هر موتور، هر دو حالت بار کامل و بی‌باری (جریان ورودی صفر) در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین، تعداد کل مدلسازی‌ها برابر با ۲۴ است. این مدلسازی‌ها به کمک قابلیت‌های گذرای نرم‌افزار تجاری JMAG-Designer انجام شده‌اند.

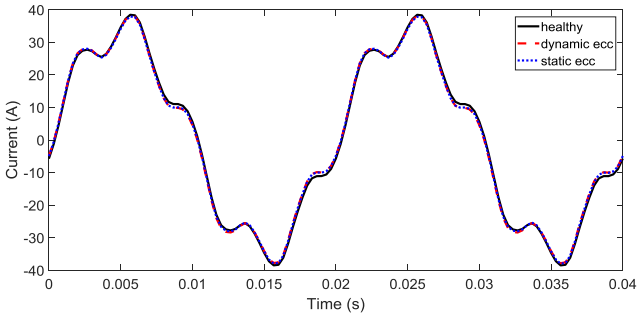
به منظور کاهش زمان محاسبات، در هر یک از مدلسازی‌ها موتور با سرعت ثابت (برابر با سرعت سنکرون، یعنی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه) به گردش درآورده می‌شود. در شرایط بی‌باری، به هر یک از فازهای موتور یک منبع جریان با دامنه صفر اعمال می‌شود و تغییرات کمیت‌های اصلی با زمان در چند سیکل ثبت می‌گردد. این حالت معادل شرایط مدار باز است. در شرایط بار کامل، به هر یک از فازها به منبع ولتاژ سینوسی با اندازه نامی متصل می‌گردد. در این حالت، فاز منابع ولتاژ به گونه‌ای انتخاب می‌شود که جریان نامی از کلاف‌ها عبور کند. پس از طی یک دوره گذرا به مدت چند سیکل، شرایط حالت دائمی حاصل می‌شود. در ادامه این بخش به ارائه نتایج مدلسازی موتورها پرداخته می‌شود.

۳-۱ موتور یکطرفه شیاردار

موتور یکطرفه شیاردار، که متداول‌ترین ساختار تخت است، اولین موتور مورد مطالعه می‌باشد. شکل ۴ جریان کل ورودی به فاز a از این موتور را در شرایط بار کامل نشان می‌دهد. همانطورکه مشاهده می‌شود، اختلاف اندکی بین جریان ورودی در حالت سالم و نیز دو حالت خطای ناهم‌محوری وجود دارد که ممکن است به راحتی قابل تشخیص نباشد. با این حال، جریان‌های دو مسیر موازی در شرایط ناهمحوری با یکدیگر متفاوت می‌باشند. این موضوع در شکل ۵ نشان داده شده است. این پدیده مطلوب نیست و مطابق شکل ۶ باعث ایجاد یک جریان گردشی در سیم‌پیچ‌های ماشین در شرایط بی‌باری می‌شود.

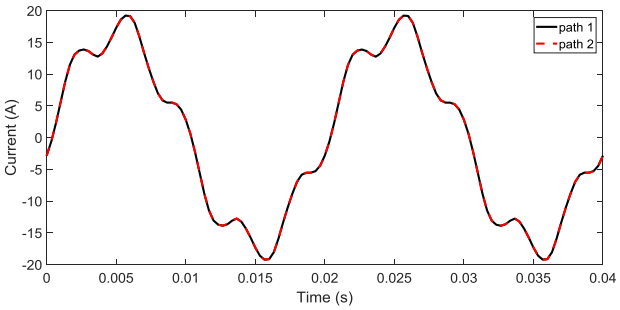


شکل ۳: مش‌بندی سه‌بعدی موتور یکطرفه بدون شیار به عنوان یک نمونه.

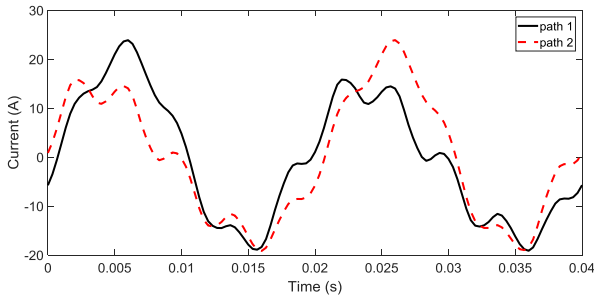


شکل ۴: جریان ورودی به فاز a از موتور یکطرفه شیاردار در شرایط بار کامل

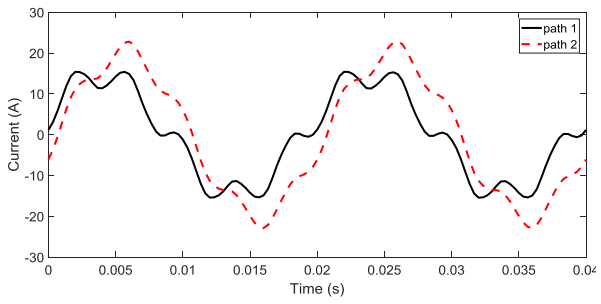
نکته قابل ذکر دیگر آن است که در حالت خطای استاتیکی، شکل موج جریان هر یک از مسیرهای موازی در همه سیکل‌ها ثابت است. این در حالی است که در خطای دینامیکی این شکل موج به صورت یک سیکل در میان تکرار می‌شود. به این معنی که در این حالت فرکانس این جریان‌ها نصف فرکانس اصلی تغذیه است. همچنین، در خطای دینامیکی، مقدار حداکثر جریان مسیرهای موازی در نیم‌سیکل‌های مثبت نسبت به نیم‌سیکل‌های منفی بزرگتر است. شار پیوندی کل فاز a در شرایط بی‌باری در شکل ۷ نشان داده شده است. مجدداً می‌توان گفت که اختلاف بین مقادیر مربوط به حالت‌های سالم و خطادار قابل ملاحظه نیست. شکل ۸ تغییرات زمانی شار پیوندی هر یک از کلاف-های سیم‌پیچی فاز a را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که در حالت-های خطای دینامیک یا استاتیک، تغییرات شار پیوندی هر یک از کلاف‌ها متفاوت از سایر کلاف‌ها می‌باشد. این بدان معنی است که می-توان با استفاده از کلاف‌های جستجو و اندازه‌گیری ولتاژ القایی در آن-ها، وجود خطای ناهمحوری را در این نوع موتور تشخیص داد. لازم به ذکر است که میزان تأثیر خطای دینامیک بر روی شار کلاف‌ها بیشتر از خطای استاتیک بوده و خطای دینامیک باعث ایجاد یک عدم تقارن بین شکل‌موج‌های دو سیکل متوالی می‌شود.



(الف)

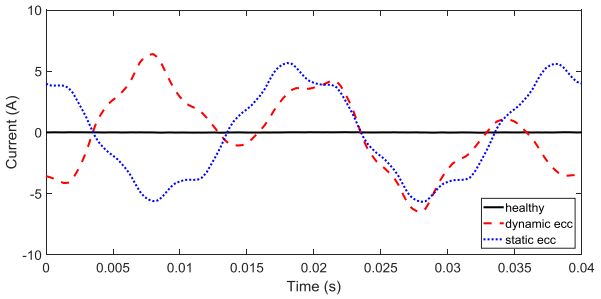


(ب)



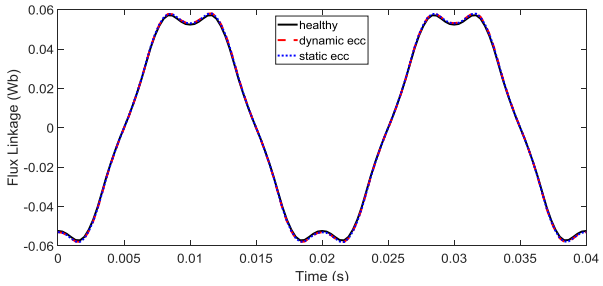
(ج)

شکل ۵: جریان دو مسیر موازی فاز a از موتور یکطرفه شیاردار در شرایط بار کامل (الف) شرایط سالم (ب) خطای دینامیکی (ج) خطای استاتیکی

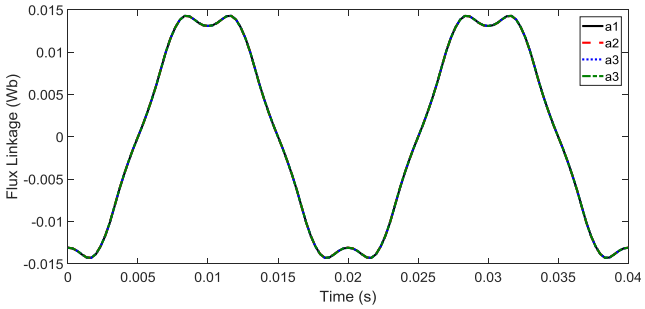


شکل ۶: جریان گردشی کلاف‌های فاز a از موتور یکطرفه شیاردار در شرایط بی‌باری

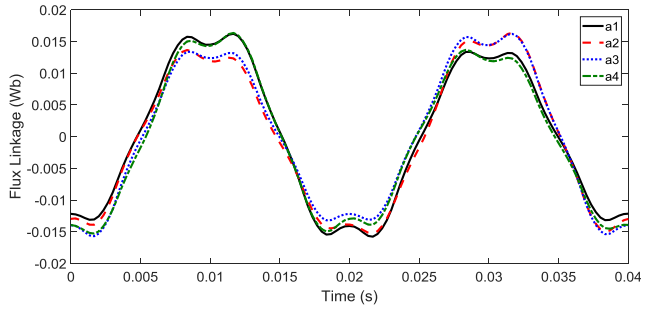
تغییرات گشتاور وارد بر روتور در شکل ۹ نشان داده شده است. طبق این شکل مشخص است که خطاهای ناهمحوری تأثیر ناچیزی بر روی گشتاور تولیدی موتور دارند.



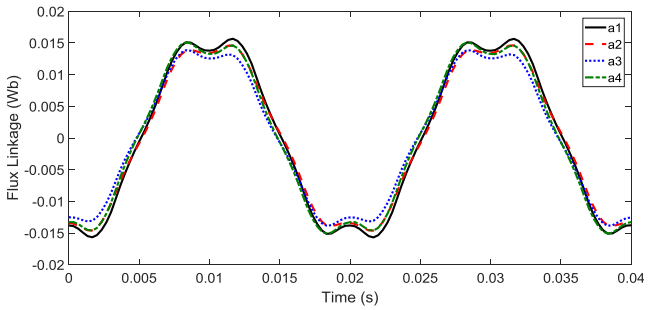
شکل ۷: شار پیوندی کل فاز a از موتور یکطرفه شیاردار بی‌باری



(الف)



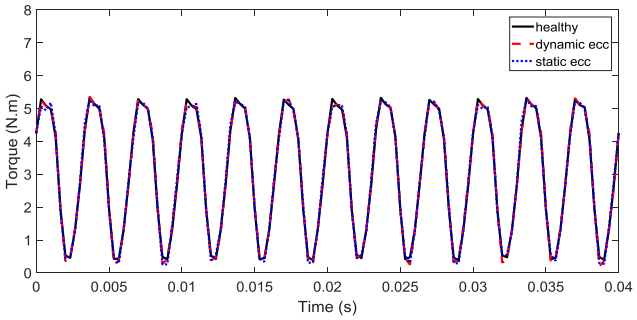
(ب)



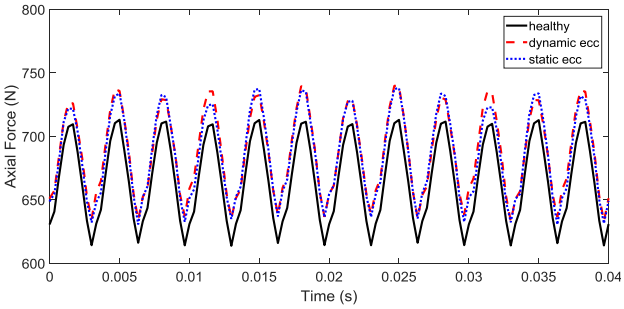
(ج)

شکل ۸: شار پیوندی کلاف‌های مختلف فاز a از موتور یکطرفه شیاردار در شرایط بی‌باری (الف) شرایط سالم (ب) خطای دینامیک (ج) خطای استاتیک

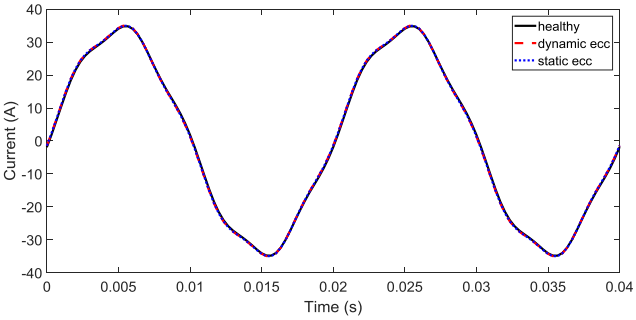
نوسانات شدید گشتاور در این شکل ناشی از باز بودن کامل شیارها است. به هر حال، این نوع خطاها باعث افزایش نیروی محوری متوسط وارد بر دیسک روتور مطابق شکل ۱۰ می‌شوند که نامطلوب می‌باشد.



شکل ۹: گشتاور وارد بر روتور موتور یکطرفه شیاردار در شرایط بار کامل



شکل ۱۰: نیروی محوری وارد بر روتور موتور یکطرفه شیاردار در شرایط بار کامل

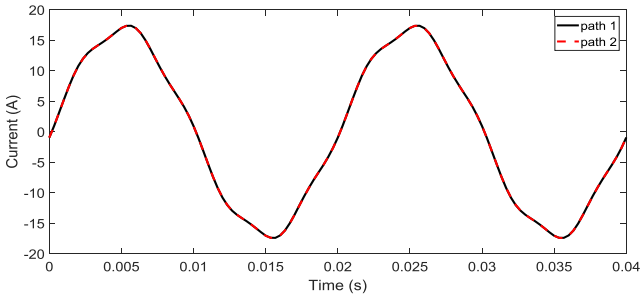


شکل ۱۱: جریان ورودی به فاز a از موتور یکطرفه بدون شیار در شرایط بار کامل

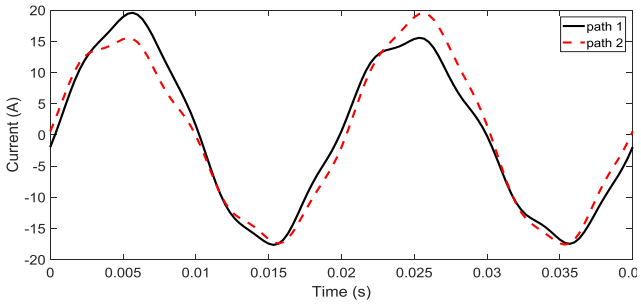
۳-۲ موتور یکطرفه بدون شیار

دومین موتور مورد بررسی در این مقاله ساختار یکطرفه بدون شیار است. شکل ۱۱، (ج)

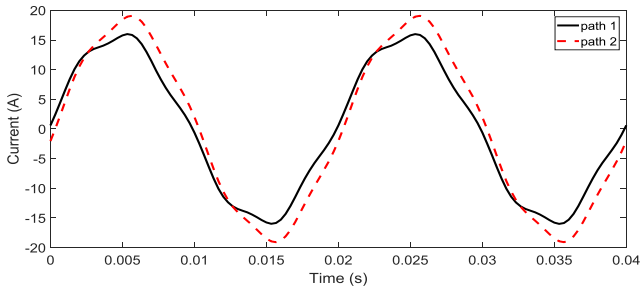
شکل ۱۲ و شکل ۱۳ به ترتیب جریان کل ورودی به فاز a در بار کامل، جریان‌های مسیرهای موازی این فاز در بار کامل و جریان گردشی این مسیرهای موازی در حالت مدار باز را نشان می‌دهند. برای این ساختار، اختلاف بین جریان کل ورودی در حالت‌های سالم و خطادار نسبت به ساختار شیاردار متناظر بسیار کمتر بوده که تشخیص خطا بر اساس جریان ورودی را دشوار می‌کند. علت این امر آن است که عدم وجود دندانه مغناطیسی در ساختار بدون شیار موجب افزایش طول مؤثر فاصله هوایی و در نتیجه کاهش تأثیر خطای ناهم‌محوری می‌شود. به هر حال، در حالت‌های خطادار، اندازه جریان گردشی و اختلاف بین جریان‌های دو مسیر موازی سیم‌پیچی همچنان قابل توجه و مشهود است.



(الف)

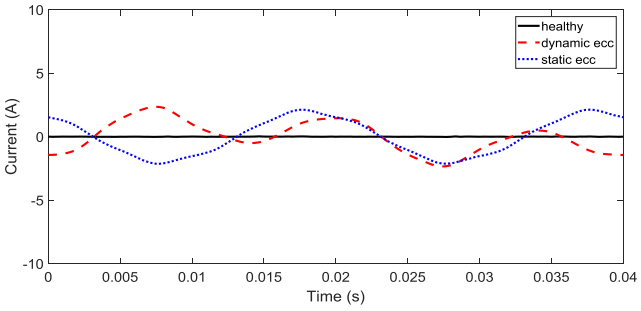


(ب)

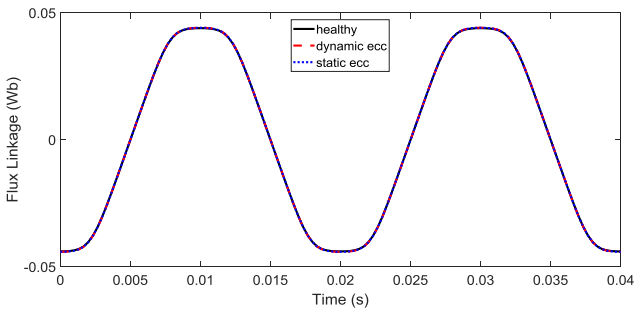


(ج)

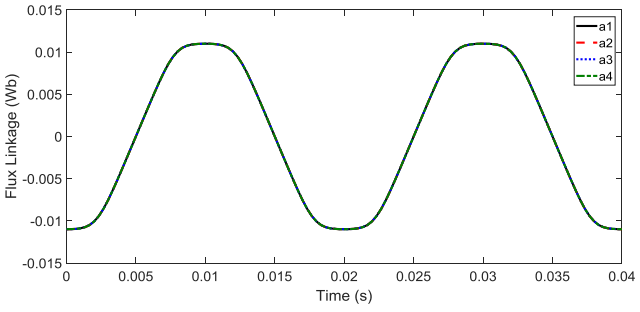
شکل ۱۲: جریان دو مسیر موازی فاز a از موتور یکطرفه بدون شیار در شرایط بار کامل (الف) شرایط سالم (ب) خطای دینامیکی (ج) خطای استاتیکی



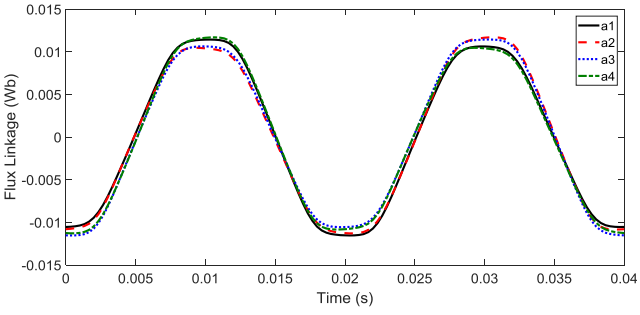
شکل ۱۳: جریان گردشی کلاف‌های فاز a از موتور یکطرفه بدون شیار در شرایط بی‌باری



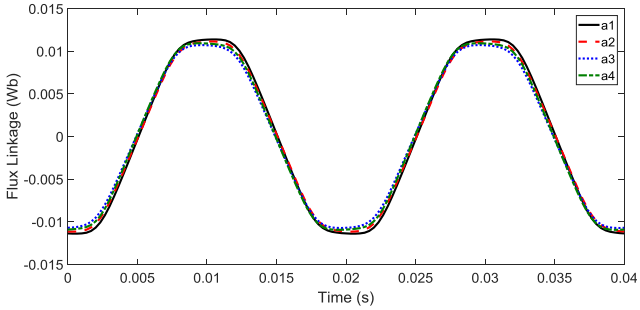
شکل ۱۴: شار پیوندی کل فاز a از موتور یکطرفه بدون شیار در شرایط بی‌باری



(الف)



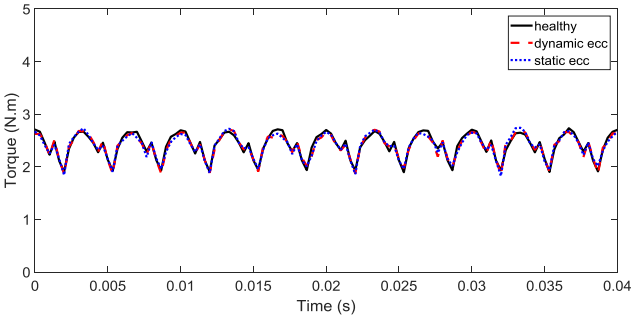
(ب)



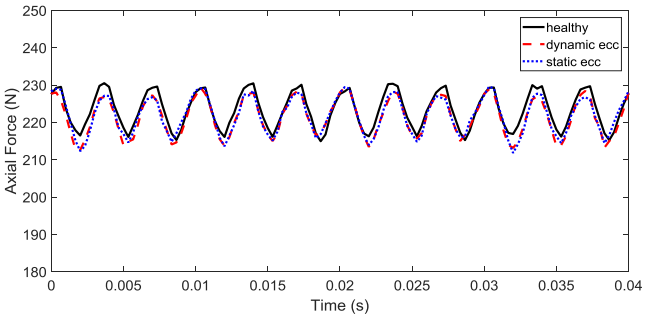
(ج)

شکل ۱۵: شار پیوندی کلاف‌های مختلف فاز a از موتور یکطرفه بدون شیار در شرایط بی‌باری (الف) شرایط سالم (ب) خطای دینامیک (ج) خطای استاتیک

شار پیوندی کل فاز a در شرایط بی‌باری و شار پیوندی هر یک از کلاف‌های سیم‌پیچی این فاز به ترتیب در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ ارائه شده‌اند. مشابه جریان ورودی، اختلاف شار پیوندی کل در حالت‌های سالم و خطادار تقریباً غیرقابل تشخیص است، اما شار پیوندی هر یک از کلاف‌ها در شرایط خطادار متمایز از سایر کلاف‌ها می‌باشد. این به معنی قابلیت استفاده از کلاف‌های جستجو برای تشخیص خطا در این ساختار است. همانطورکه از شکل ۱۶ مشخص می‌شود، در این ساختار نیز گشتاور وارد بر روتور در حالت‌های سالم و خطادار تفاوت محسوسی ندارند. به هر حال، بر خلاف ساختار یکطرفه شیاردار، نیروی محوری متوسط وارد بر روتور در ساختار بدون شیار در هر سه حالت سالم و خطادار چندان متفاوت نیست (شکل ۱۷ را ببینید). لازم به ذکر است که توضیحات ارائه شده برای ساختار یکطرفه شیاردار در مورد تفاوت خطاهای دینامیکی و استاتیکی در مورد این موتور نیز صدق می‌کند.



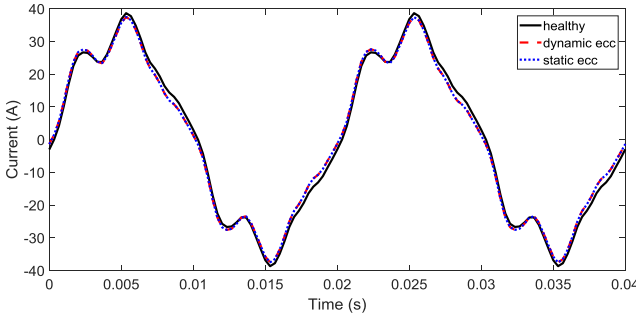
شکل ۱۶: گشتاور وارد بر روتور موتور یکطرفه بدون شیار در شرایط بار کامل



شکل ۱۷: نیروی محوری وارد بر روتور موتور یکطرفه بدون شیار در شرایط بار کامل

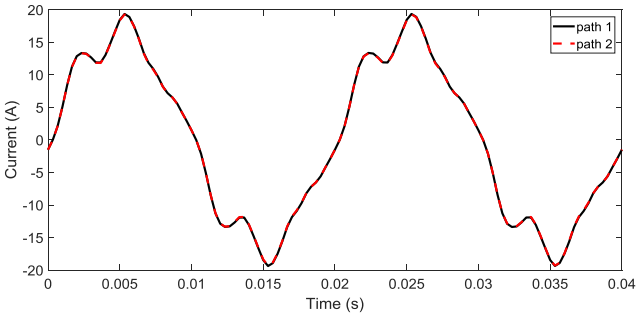
۳-۳ موتور دوطرفه شیاردار

اکنون به بررسی موتورهای دوطرفه می‌پردازیم و در ابتدا ساختار شیاردار آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. تغییرات جریان کل ورودی به یک فاز از این موتور تحت شرایط بار کامل و در حالت‌های سالم و خطادار در شکل ۱۸ ترسیم شده است. همانند ساختار یکطرفه شیاردار، در اینجا نیز تفاوت اندکی بین جریان‌های حالت‌های سالم و خطادار مشاهده می‌شود. به هر حال، بر خلاف دو ساختار قبل، مطابق شکل ۱۹ اختلاف جریان بین دو مسیر موازی سیم‌پیچی بسیار ناچیز و

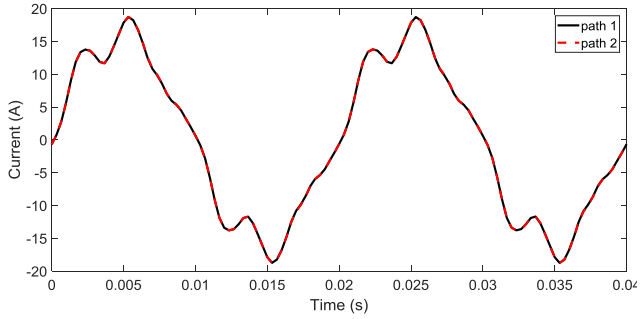


شکل ۱۸: جریان ورودی به فاز a از موتور دوطرفه شیاردار در شرایط بار کامل

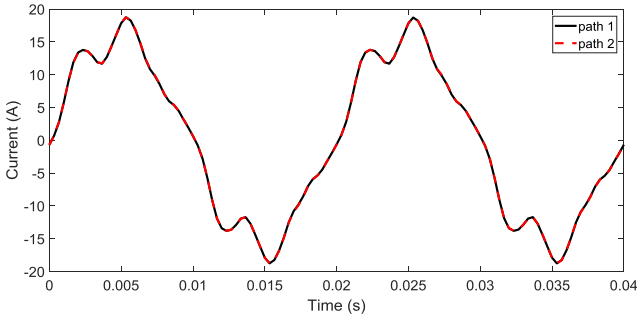
نامحسوس است که این موضوع سبب می‌شود که جریان گردشی کلاف‌ها در شرایط بی‌باری به سمت صفر میل کند (شکل ۲۰ را ببینید). این موضوع یکی از مزایای ساختار دوطرفه نسبت به ساختار یکطرفه است و دلیل آن تقارن دوطرفه این ساختار است.



(الف)

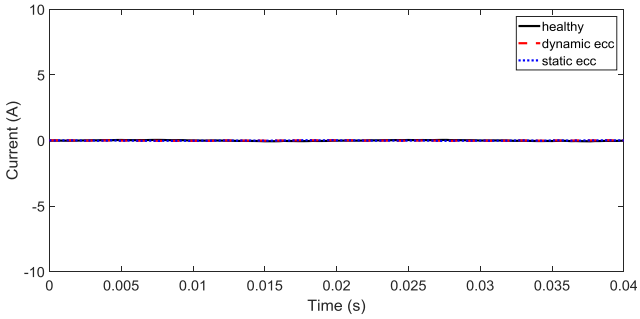


(ب)



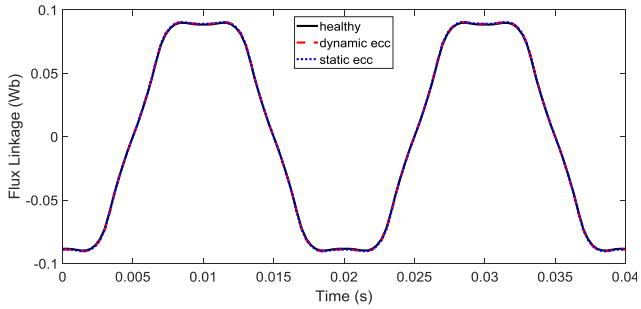
(ج)

شکل ۱۹: جریان دو مسیر موازی فاز a از موتور دوطرفه شیاردار در شرایط بار کامل (الف) شرایط سالم (ب) خطای دینامیک (ج) خطای استاتیک

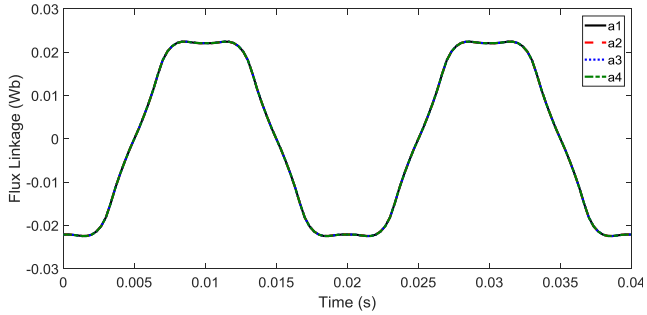


شکل ۲۰: جریان گردشی کلاف‌های فاز a از موتور دوطرفه شیاردار در شرایط بی‌باری

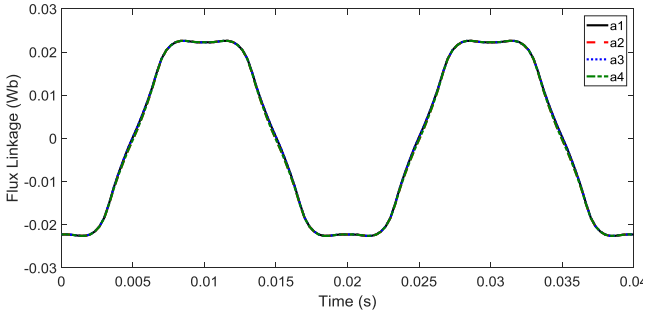
شار پیوندی کل یک فاز در شرایط بی‌باری در شکل ۲۱ و شار پیوندی هر یک از کلاف‌های این فاز در شکل ۲۲ نشان داده شده‌اند. اگرچه اختلاف بسیار اندکی بین شارهای پیوندی کل در حالت‌های سالم و خطادار مشاهده می‌شود، اما اختلاف شار پیوندی کلاف‌های مختلف یک فاز در هر یک از این حالت‌ها قابل تشخیص نیست که دلیل آن دوطرفه بودن ساختار موتور است.



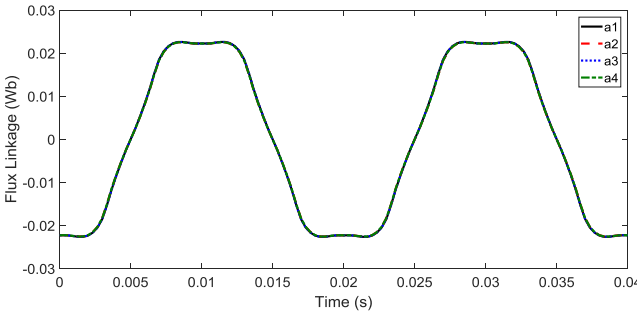
شکل ۲۱: شار پیوندی کل فاز a از موتور دوطرفه شیاردار در شرایط بی‌باری



(الف)



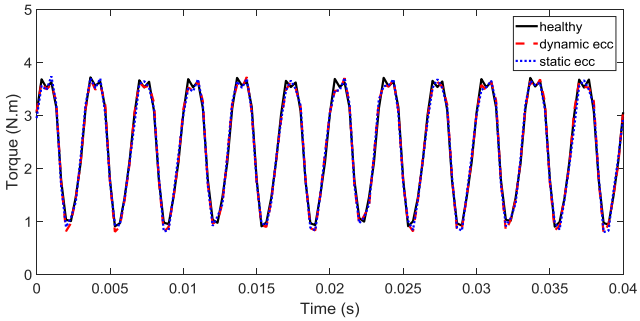
(ب)



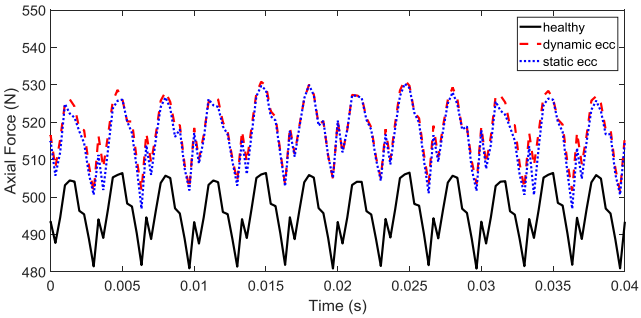
(ج)

شکل ۲۲: شار پیوندی کلاف‌های مختلف فاز a از موتور دوطرفه شیاردار در شرایط بی‌باری (الف) شرایط سالم (ب) خطای دینامیکی (ج) خطای استاتیکی

اگرچه این موضوع یک مزیت عملکردی محسوب می‌شود، اما تشخص خطای ناهمحوری با استفاده از کلاف‌های جستجو را با چالش مواجه می‌سازد. گشتاور و نیروی محوری وارد بر یکی از دو روتور به ترتیب در شکل ۲۳ و شکل ۲۴ ارائه شده‌اند. همانند دو ساختار قبل، سالم یا خطادار بودن موتور تأثیر چندانی روی گشتاور وارده بر روتور ندارد. به هر حال، نیروی محوری وارد شده بر روتور در حالت‌های خطادار بطور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از حالت سالم است و این اختلاف نسبت به ساختار یکطرفه شیاردار بیشتر می‌باشد.



شکل ۲۳: گشتاور وارد بر یکی از دو روتور موتور دوطرفه شیاردار در شرایط بار کامل



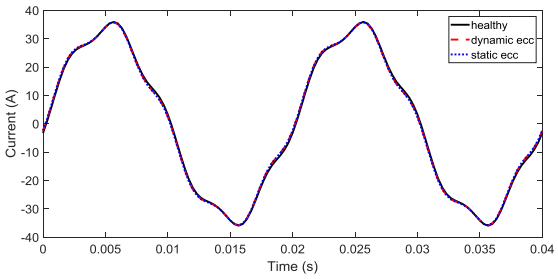
شکل ۲۴: نیروی محوری وارد بر یکی از دو روتور موتور دوطرفه شیاردار در شرایط بار کامل

لازم به ذکر است که بر اساس نتایج به دست آمده برای ساختار دوطرفه شیاردار، مشخصه‌های عملکردی در دو حالت خطای دینامیکی و استاتیکی تفاوت چندانی ندارند، که از این جنبه با دو ساختار یکطرفه قبل متفاوت است.

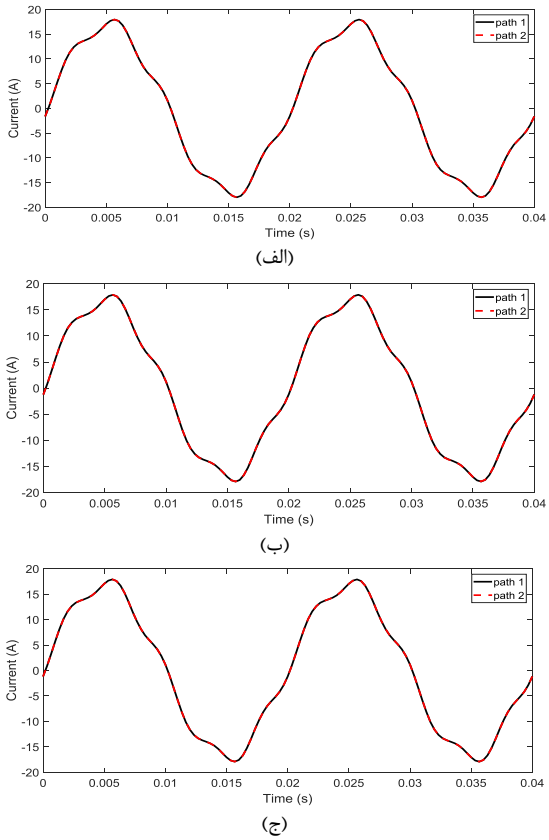
۳-۴ موتور دوطرفه بدون شیار

آخرین ساختار مورد بررسی در این مقاله ساختار دوطرفه بدون شیار است. از شکل ۲۵ مشخص است که اختلاف بین جریان‌های کل ورودی به این موتور در حالت‌های سالم و خطادار نامحسوس است. همچنین، شکل ۲۶ نشان می‌دهد که جریان‌های دو مسیر موازی سیم‌پیچی در حالت‌های خطادار منطبق بر یکدیگر هستند و طبق انتظار، جریان گردشی در کلاف‌ها به وجود نمی‌آید (شکل ۲۷ را ببینید).

بر اساس شکل ۲۸ و شکل ۲۹، اختلاف شار پیوندی کل بی‌باری یک فاز در حالت‌های سالم و خطادرا ناچیز است و نیز شار پیوندی همه کلاف‌های سیم‌پیچی یک فاز به ازای هر یک از این حالت‌ها تقریباً یکسان است. بنابراین، در این ساختار نیز استفاده از کلاف‌های جستجو برای تشخیص خطای ناهمحوری بی فایده به نظر می‌رسد. همانطورکه شکل ۳۰ و شکل ۳۱ نشان می‌دهند، می‌توان گفت که برای این ساختار هم گشتاور و هم نیروی محوری وارد بر هر یک از دو روتور در حالت سالم و حالت‌های خطادار تقریباً یکسان هستند.

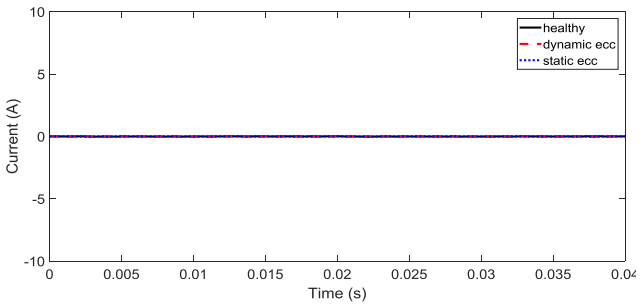


شکل ۲۵: جریان ورودی به فاز a از موتور دوطرفه بدون شیار در شرایط بار کامل.

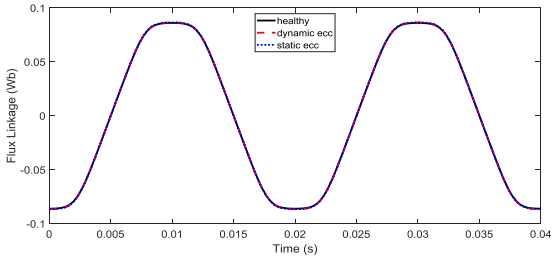


شکل ۲۶: جریان دو مسیر موازی فاز a از موتور دوطرفه بدون شیار در شرایط بار کامل(الف) شرایط سالم (ب) خطای دینامیک (ج) خطای استاتیک

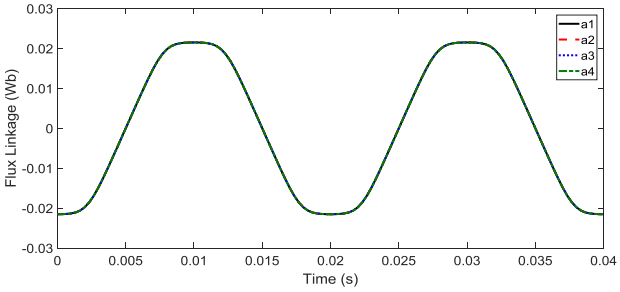
با بررسی نتایج به دست آمده، خطاهای ناهمحوری، چه از نوع استاتیک و چه از نوع استاتیک، تقریباً هیچ گونه اثر قابل توجهی بر روی عملکرد موتور دوطرفه بدون شیار ندارند و این یک مزیت مهم



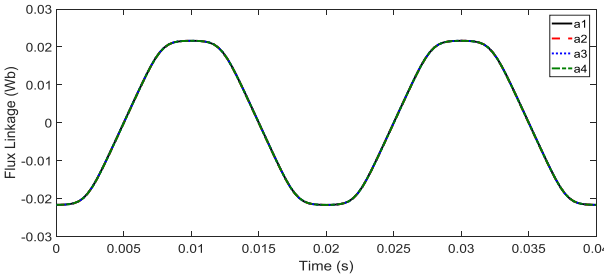
شکل ۲۷: جریان گردشی کلاف‌های فاز a از موتور دوطرفه بدون شیار در شرایط بی‌باری



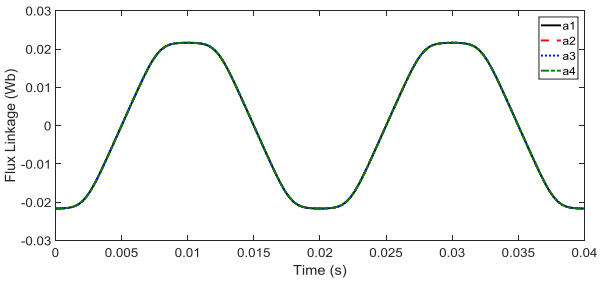
شکل ۲۸: شار پیوندی کل فاز a از موتور دوطرفه بدون شیار در شرایط بی‌باری



(الف)



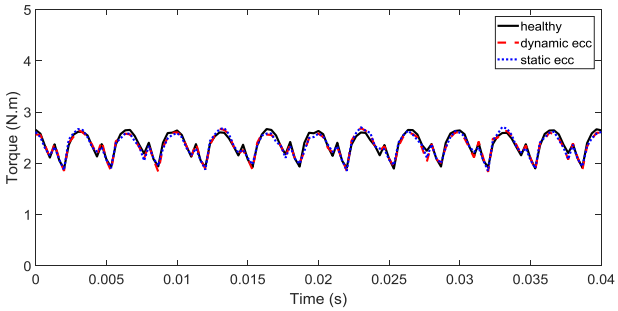
(ب)



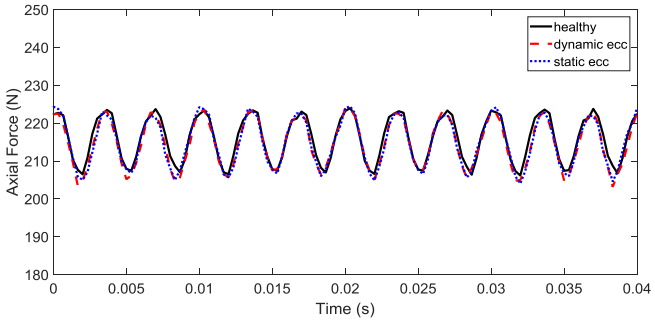
(ج)

شکل ۲۹: شار پیوندی کلاف‌های مختلف فاز a از موتور دوطرفه بدون شیار در شرایط بی‌باری (الف) شرایط سالم (ب) خطای دینامیک (ج) خطای استاتیک

برای این ساختار می‌باشد، ضمن آنکه تشخیص خطای آن را نیز دشوار می‌سازد.



شکل ۳۰: گشتاور وارد بر یکی از دو روتور موتور دوطرفه بدون شیار در شرایط بار کامل



شکل ۳۱: نیروی محوری وارد بر یکی از دو روتور موتور دوطرفه بدون شیار در شرایط بار کامل

۴- بحث در مورد نتایج

با توجه به نتایج ارائه شده در بخش قبل، می‌توان میزان تأثیر خطاهای ناهم‌محوری بر روی عملکرد موتورهای مورد مطالعه را مطابق جدول ۳ به چهار سطح زیاد، متوسط، کم و ناچیز تقسیم‌بندی نمود. همچنین، می‌توان نتایج مهم زیر مطرح نمود:

- در ساختارهای شیاردار، تفاوت اندکی بین جریان ورودی کل فاز در حالت‌های سالم و خطادار مشاهده می‌شود، که شاید بتوان از آن برای تشخیص خطا بهره گرفت. به هر حال، در ساختارهای بدون شیار این تفاوت بسیار ناچیز است که تشخیص خطا بر اساس جریان ورودی را با چالش مواجه می‌کند. همین موضوع در مورد شار پیوندی کل یک فاز نیز صادق است.
- در ساختارهای یکطرفه و در شرایط خطاهای ناهم‌محوری، یک اختلاف قابل توجه در جریان‌های مسیرهای موازی سیم‌پیچی هر فاز ایجاد می‌شود که این موضوع به معنی وجود یک جریان گردشی نامطلوب در کلاف‌ها می‌باشد. این جریان گردشی در شرایط بی‌باری مطلق (جریان ورودی صفر) نیز وجود دارند. این در حالی است که جریان‌های مسیرهای موازی برای موتورهای دوطرفه در تمام شرایط تقریباً منطبق بر یکدیگر هستند و به همین دلیل جریان گردشی در کلاف‌های سیم‌پیچی این ساختارها ایجاد نمی‌شود.
- با ایجاد خطاهای ناهم‌محوری در ساختارهای یکطرفه، شارهای پیوندی کلاف‌های مختلف سیم‌پیچ یک فاز بر یکدیگر منطبق نیستند. بر این اساس، می‌توان از کلاف‌های جستجو برای تشخیص خطای ناهم‌محوری در موتورهای یکطرفه بهره گرفت. با این حال، تغییرات شارهای پیوندی کلاف‌های مختلف یک فاز در ساختارهای دوطرفه در تمام حالت‌ها یکسان است و لذا تشخیص خطا با استفاده از کلاف‌های جستجو در این موتورها عملاً ممکن نیست.
- در ساختارهای شیاردار، و به ویژه در نوع دوطرفه آن، نیروی محوری متوسط وارد بر روتور با وقوع خطای ناهم‌محوری افزایش می‌یابد. به هر حال، در انواع بدون شیار، این نیرو تغییر محسوسی نشان نمی‌دهد.

- برای همه ساختارهای مورد مطالعه می‌توان گفت که گشتاور وارد بر روتور در حالت‌های سالم و خطادار تقریباً یکسان است.

در ساختارهای یکطرفه، دینامیکی بودن خطای ناهم‌محوری باعث می‌شود در شکل‌موج‌های جریان و ولتاژ یک عدم تقارن به وجود آید. به هر حال، در ساختارهای دوطرفه تفاوت محسوسی بین خطاهای دینامیکی و استاتیکی مشاهده نمی‌شود.

جدول ۳: مقایسه تأثیر خطاهای ناهم‌محوری بر روی عملکرد موتورهای مورد مطالعه

نوع ساختار	درصد تأثیر خطای ناهم‌محوری بر روی:					
	جریان ورودی هر فاز	جریان گردشی مسیرهای موازی	شار پیوندی کل یک فاز	شار پیوندی کلاف‌های یک فاز	گشتاور وارد بر روتور	نیروی محوری وارد بر روتور
یکطرفه شیاردار	۱۰/۲۳۴	۴۶/۴۴۹	۴/۵۷	۵۹/۵۳	۵/۳۸۰۵	۴/۱۶۳۳
یکطرفه بدون شیار	۳/۵۷۵	۱۰/۰۷۸	۰/۴۶۲	۶/۸۵۰۵	۵/۶۳۶۷	۲/۳۲۶۲
دوطرفه شیاردار	۶/۴۶۷۲	۰/۴	۱۱/۵۷	۳/۶۶	۶/۵۷۲۸	۵/۴۸۹۳
دوطرفه بدون شیار	۰/۲۰۷۱.	۰/۱۹۵۲	۰/۲۹۴۵	۰/۲۹۵۷	۱/۷۰۹۲	۲/۴۳۶۴

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی اثر خطاهای ناهمحوری دینامیک و استاتیک بر روی عملکرد چهار نوع موتور مغناطیس دائم تخت مختلف، یعنی یکطرفه شیاردار، یکطرفه بدون شیار، دوطرفه شیاردار و دوطرفه بدون شیار، که همگی به صورت حلقوی سیم‌پیچی شده‌اند، پرداخته شد. برای این منظور از قابلیت مدلسازی گذرای نرم‌افزار تجاری اجزاء محدود JMAG-Designer کمک گرفته شد. به طور خلاصه می‌توان گفت که موتور دوطرفه بدون شیار مقاوم‌ترین نوع در برابر انواع خطای ناهم‌محوری است و با وقوع این نوع خطا رفتار الکترومغناطیسی آن تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. در کنار این مزیت، لازم به ذکر است که روش‌های تشخیص خطا بر اساس جریان ورودی و کلاف‌های جستجو در این ساختار تقریباً مؤثر نیستند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که از تحلیل ارتعاشات و نویز صوتی این نوع موتورها برای تشخیص خطای ناهم‌محوری در آن‌ها بهره گرفته شود. این موضوع می‌تواند در مقالات بعدی مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

[1] S. Paul, M. Farshadnia, A. Pouramin, J. Fletcher, and J. Chang, "*Comparative analysis of wave winding topologies and performance characteristics in ultra-thin printed circuit board axial-flux permanent magnet machine*," IET Electr. Power Appl., vol. 13, no. 5, pp. 694–701, 2019.

[2] X. Zhu, W. Wu, L. Quan, Z. Xiang, and W. Gu, *"Design and Multi-Objective Stratified Optimization of a Less-rare-earth Hybrid Permanent Magnets Motor with High Torque Density and Low Cost,"* IEEE Trans. Energy Convers., vol. PP, no. c, p. 1, 2018.

[3] Z. Zhang, W. Geng, Y. Liu, and C. Wang, *"Feasibility of a New Ironless-stator Axial Flux Permanent Magnet Machine for Aircraft Electric Propulsion Application,"* China Electrotech. Soc. Trans. Electr. Mach. Syst., vol. 3, no. 1, pp. 30–39, 2019.

[4] A. Daghigh, H. Javadi, and H. Torkaman, *"Design optimization of direct-coupled ironless axial flux permanent magnet synchronous wind generator with low cost and high annual energy yield,"* IEEE Trans. Magn., vol. 52, no. 9, pp. 1–10, 2016.

[5] J. Gieras, *"Permanent Magnet Motor Technology Design and Applications,"* Taylor Fr. Group,LLC, p. 600, 2010.

[6] J. F. Gieras, R.-J. Wang, and M. J. Kamper, *"Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines,"* Springer Publ., pp. 1–364, 2008.

[7] H. Vansompel, P. Sergeant, L. Dupr, and A. Van Den Bossche, "*Axial Flux PM Machines with a Variable Airgap,"* IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 2, pp. 730–737, Feb. 2014.

[8] Y. Chen, P. Pillay, and A. Khan, *"PM wind generator topologies,"* Ind. Appl. IEEE, vol. 41, no. 6, pp. 1619–1626, 2005.

[9] B. M. Ebrahimi, J. Faiz, and M. J. Roshtkhari, *"Static-, dynamic-, and mixed-eccentricity fault diagnoses in permanent-magnet synchronous motors,"* IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 11, pp. 4727–4739, 2009.

[10] S. M. Mirimani, A. Vahedi, F. Marignetti, and E. De Santis, *"Static Eccentricity Fault Detection in Single Stator-Single Rotor Axial Flux Permanent Magnet Machines,"* IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 48, no. 6, pp. 1838–1845, 2012.

[11] B. M. Ebrahimi and J. Faiz, *"Diagnosis and performance analysis of three-phase permanent magnet synchronous motors with static, dynamic and mixed eccentricity,"* IET Electr. Power Appl., vol. 4, no. 1, pp. 53–65, 2010.

[12] S. M. Mirimani, A. Vahedi, and F. Marignetti, *"Effect of Inclined Static Eccentricity Fault in Single Stator-Single Rotor Axial Flux Permanent Magnet Machines,"* IEEE Trans. Magn., vol. 48, no. 1, pp. 143–149, 2011.

[13] E. Ajily, M. Ardebili, and K. Abbaszadeh, *"Magnet Defect and Rotor Eccentricity Modeling in Axial-Flux Permanent-Magnet Machines via 3-D Field Reconstruction Method,"* IEEE Trans. Energy Convers., vol. 31, no. 2, pp. 486–495, 2016.

[14] A. Di Gerlando, G. M. Foglia, M. F. Iacchetti, and R. Perini, *"Evaluation of manufacturing dissymmetry effects in axial flux permanent-magnet machines: Analysis method based on field functions,"* IEEE Trans. Magn., vol. 48, no. 6, pp. 1995–2008, 2012.

[15] J. De Bisschop, P. Sergeant, A. Hemeida, H. Vansompel, and L. Dupré, *"Analytical Model for Combined Study of Magnet Demagnetization and Eccentricity Defects in Axial*

Flux Permanent Magnet Synchronous Machines," IEEE Trans. Magn., vol. 53, no. 9, pp. 1–12, 2017.

[16] Z. Shabahang, M. Shahnazari, and A. Sedighi, *"Analysis of dynamic eccentricity in a coreless axial flux permanent magnet machine,"* 30th Power Syst. Conf. PSC 2015, no. November, pp. 358–362, 2017.

[17] S. M. Mirimani, A. Vahedi, F. Marignetti, and roberto Di Stefano, "*An Online Method for Static Eccentricity Fault Detection in Axial Flux Machines,"* IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 3, pp. 1931–1942, 2015.

[18] O. O. Ogidi, P. S. Barendse, and M. A. Khan, *"Detection of static eccentricities in axial-flux permanent-magnet machines with concentrated windings using vibration analysis,"* IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 51, no. 6, pp. 4425–4434, 2015.

[19] O. O. Ogidi, P. S. Barendse, and M. A. Khan, *"Fault diagnosis and condition monitoring of axial-flux permanent magnet wind generators,"* Electr. Power Syst. Res., vol. 136, pp. 1–7, 2016.