

مقایسه آثار خطاهاي ناهممحوري بر روی عملکرد چند نوع موتور سنکرون مغناطيس دائيم شارمحوري با سيمپيچي حلقوی

محمد رجبی سبدانی^۱، دانشجوی دکتری، احمد دارابی^۱، استاد، جواد فیض^۲، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق و رباتیک- دانشگاه صنعتی شهرود- شهرود- ایران

, darabi_ahmad@hotmail.comm.rajabi67@ut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران - تهران- ایران

jfaiz@ut.ac.ir

چکیده: خطاهاي ناهممحوري از شایع ترین خطاهاي ماشين هاي مغناطيس دائيم تخت می باشد که می تواند اثرات مخربی به همراه داشته باشد. بسیاري از مطالعات گذشته به بررسی اين نوع خطا و نحوه تشخيص آن در ماشين هاي با ساختار شياردار و سيمپيچي- هاي مرسوم معطوف شده است. در اين مقاله تأثير خطاهاي ناهممحوري بر روی عملکرد چهار ساختار ماشين هاي مغناطيس دائيم تخت يعني يکطرفه شياردار، يکطرفه بدون شيار، دوطرفه شياردار و دوطرفه بدون شيار مورد مطالعه قرار می گيرد. برای اين منظور، اين ماشين ها در شرایط عملکرد بی باری و بار كامل و در سه حالت بدون عيب، با خطاهاي ناهممحوري ديناميکي و خطاهاي ناهممحوري استاتيکي در محيط اجزاء محدود مدلسازی می شوند. اين مدلسازی هاي ديناميکي- گذرائي به صورت سه بعدی انجام گرفته است و مشخصه هاي عملکردي گوناگون، از قبيل جريان هاي ورودي، جريان هاي گرددشي در مسیر هاي موازي، شارهای پيوندي، گشتاور و نيروهای محوري وارد بر ديسک های روتور، استخراج شده اند. اين مشخصه ها با يكديگر مقایسه شده و تأثير خطاهاي ناهممحوري بر روی عملکرد هر يك از موتورها مورد ارزیابی قرار گرفته است. طبق نتایج به دست آمده، بدون شيار بودن و دوطرفه بدون ماشين موجب کاهش اثرات نامطلوب اين نوع خطاها خواهد شد. همچنان، نشان داده می شود که روش هاي مرسوم تشخيص خطاهاي ناهم- محوري برای برخی از ساختارها کارآمد نیستند.

واژه های کلیدی: تشخيص خطا، خطاهاي ناهممحوري، روش اجزاء محدود، سيمپيچي حلقوی، ماشين مغناطيس دائيم شارمحوري، مدلسازی گذرائي.

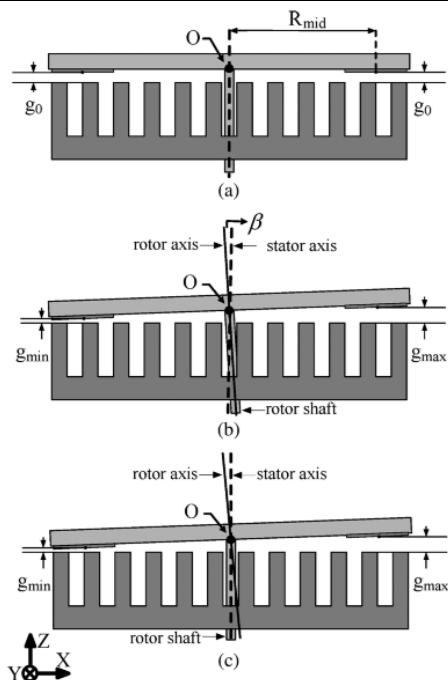
تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۳/۲۹

تاریخ پذيرش مقاله : ۱۳۹۸/۰۶/۳۱

نام نويسندهي مسئول : احمد دارابي

نشانی نويسندهي مسئول : شهرود، دانشگاه صنعتی شهرود، دانشکده برق و رباتیک

۱- مقدمه



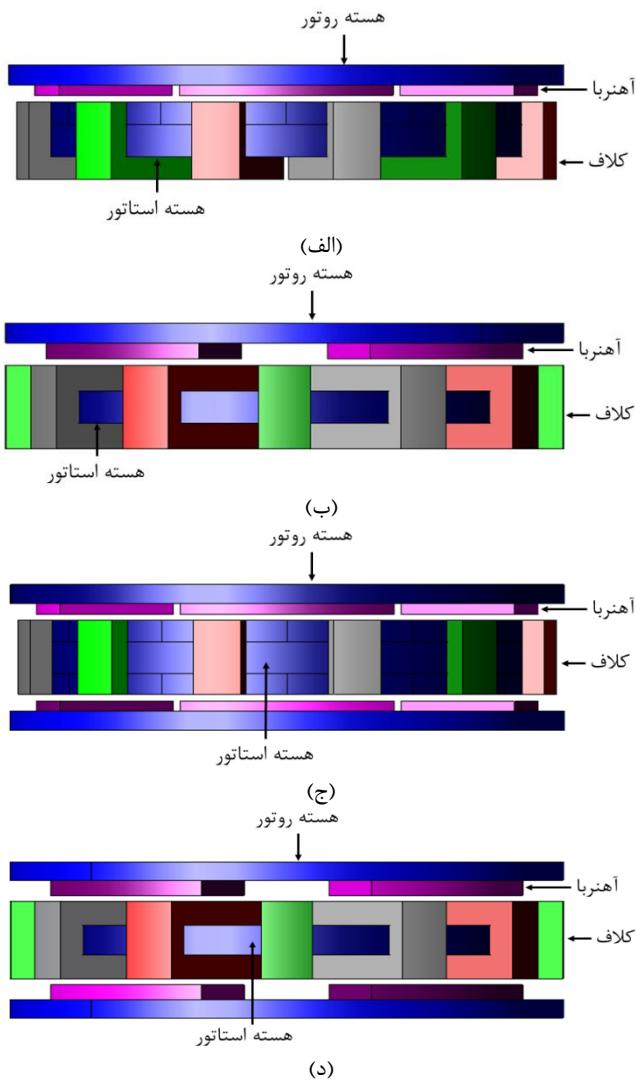
شکل ۱: وضعیت محورهای روتور، استاتور و چرخش یک ماشین تخت در شرایط گوناگون: (الف) حالت سالم (ب) خطای ناهممحوری استاتیکی (ج) خطای ناهممحوری دینامیکی [۱۲].

نوع خطای محورهای روتور، استاتور و چرخش به صورت دو به دو نسبت به هم زاویه دارند. اکثر مراجع در زمینه خطای ناهممحوری ماشین‌های مغناطیس دائم به ساختارهای استوانه‌ای پرداخته‌اند و فقط تعداد اندکی از مطالعات چاپ شده در دسترس هستند که این نوع خطای 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 ممحوری 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 خطای ناهممحوری و مغناطیس‌زدایی در این ساختار به کمک یک روش تحلیلی هارمونیک زمانی و با استفاده از یکتابع 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 خطای 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

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 مهم ماشین‌های مغناطیس دائم می‌توان به سیستم‌های پیشان الکتریکی و نیز نیروگاه‌های بادی اشاره کرد [۲]. ماشین‌ها مغناطیس دائم دوار از نقطه نظر ساختار کلی به دو دسته استوانه‌ای و تخت (دیسکی) قابل تقسیم می‌باشند [۳]، [۴]. ساختارهای تخت، که معمولاً به دلیل مسیر محوری عبور شار در فاصله هوایی با عنوان ساختارهای شار ممحوری نیز شناخته می‌شوند، در مقایسه با ساختارهای استوانه‌ای از مزیت‌های نظیر چگالی گشتاور بالاتر، قابلیت ساخت به صورت مازوچار 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 ۶۰ تا ۶۰ درصد) [۱۰]. شاید بتوان خطاهای ناهممحوری را به عنوان متداول‌ترین و مهم‌ترین خطاهای 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 منطبق‌اند، اما هردوی آنها استاتیکی، محور روتور 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 خطای موقعيت کمترین طول فاصله هوایی 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 آمدند. لازم به ذکر است که در این نوع خطای، موقعيت کمترین طول فاصله هوایی با چرخش رتور جایجا می‌شود. ممکن است خطاهای استاتیکی و دینامیکی به طور همزمان رخ دهند که این عمل باعث به وجود آمدن نوع سوم خطای یعنی خطای مرکب می‌شود. در این



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 تقذیه	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	۱۶۶/۶ میلیمتر
ضخامت بیوگ استاتور	۱۰ میلیمتر
ضخامت بیوگ روتور	۶ میلیمتر
فاصله هوایی فیزیکی	۲ میلیمتر
نوع اتصال سه‌فاز	ستاره
نوع سیم پیچی	یک طبقه حلقوی
تعداد کلاف در هر فاز	۳
مقدار مؤثر جریان نامی ورودی	۲۴ آمپر
جنس آهنربا	$B_r=1\text{ T}$ با NdFeB
جنس هسته‌های استاتور و روتور	50JN400
نسبت قوس آهنربا به گام قطب	۰/۵۶

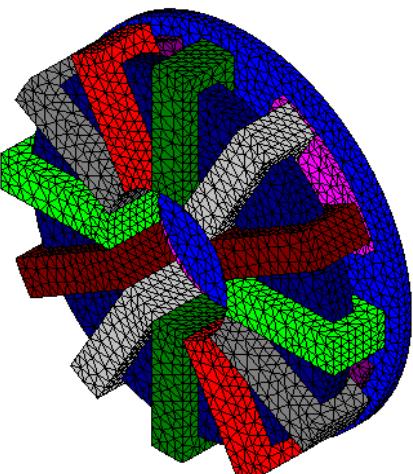
ارتعاشات مکانیکی برای تشخیص خطای ناهم محوری در یک ژنراتور با این ساختار بهره گرفته شده است.

استفاده از سیم پیچی حلقوی یا تروئیدال در ماشینهای مغناطیس دائم تخت، و به ویژه در انواع دوطرفه آن، مزایای جالبی، از جمله کاهش طول سیم پیچی‌های 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 ناهم محوری 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 ناهم محوری بر روی عملکرد این گونه ماشین‌ها و نیز میزان موقوفیت روش‌های تشخیص خطا دارد، که این موضوع نیز مورد غفلت واقع شده است. با توجه به این توضیحات، در این مقاله به بررسی خطاهای ناهم محوری 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 بکطرفه بدون شیار، موتور دوطرفه شیاردار و موتور دوطرفه بدن شیار، که همگی به صورت حلقوی سیم پیچی شده‌اند. در بخش سوم، نتایج مدلسازی اجزاء محدود این موتورها در شرایط عملکرد سالم و نیز خطاهای ناهم محوری 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.

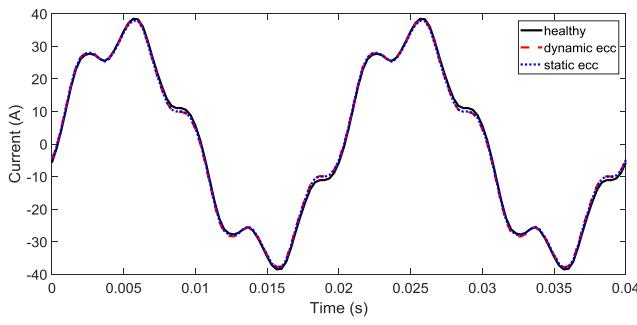
۲- ساختارهای مورد مطالعه

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 ناهم محوری 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 سیم پیچی هر فاز در نظر گرفته شده است تا اثر خطا بر روی این مسیرهای موازی قابل بررسی

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 حداقل 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 خطای قابل ملاحظه نیست. شکل ۸ تغییرات زمانی شار پیوندی هر یک از کلاف‌های سیم‌پیچی فاز a را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که در حالت‌های خطای دینامیک یا استاتیک، تغییرات شار پیوندی هر یک از کلاف‌ها متفاوت از سایر کلاف‌ها می‌باشد. این بدان معنی است که می‌توان با استفاده از کلاف‌های جستجو و اندازه‌گیری ولتاژ القایی در آن‌ها، 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.

جدول ۲: مشخصات غیرمشترک موتورهای مورد مطالعه

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

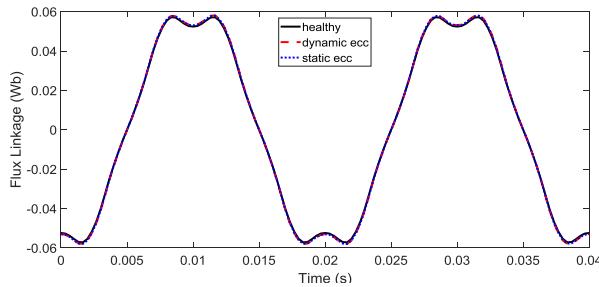
باشد. همچنین، میزان ناهم محوری به صورت اغراق آمیز برابر ۷۵٪ در نظر گرفته شده است تا اینکه تفاوت‌ها به وضوح آشکار شوند. همچنین، به منظور مشاهده هر چه بهتر اثر دندانه‌ها، ساختارهای شیاردار با شیارهای هسته کاملاً باز طراحی شده‌اند.

۳- نتایج مدلسازی

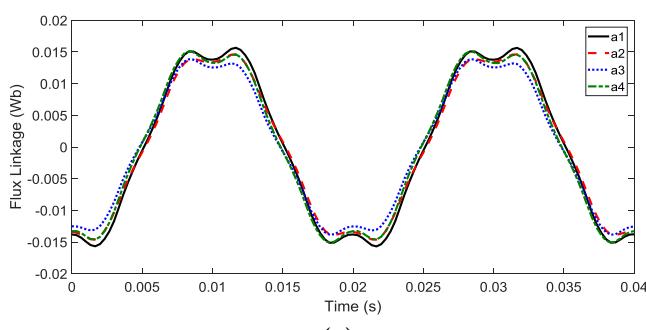
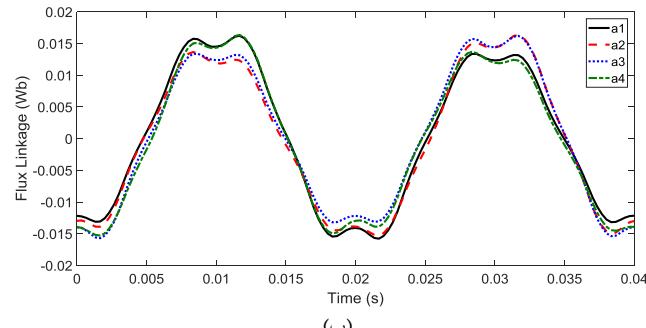
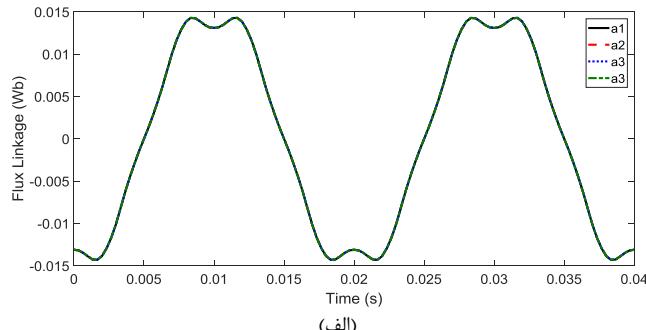
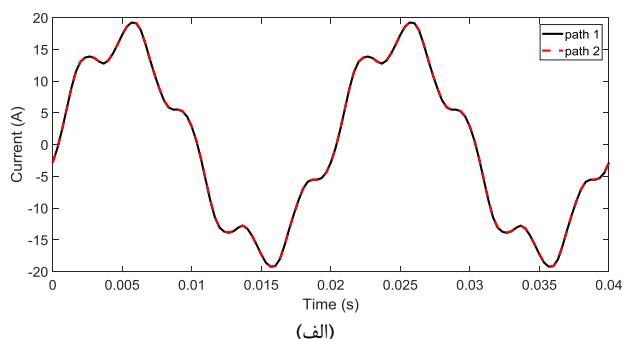
در این بخش نتایج مدلسازی اجزاء محدود چهار موتور مورد مطالعه در شرایط عملکرد عادی و نیز خطاهای ناهم محوری دینامیک و استاتیک و به صورت سه‌بعدی ارائه می‌شود. برای هر موتور، هر دو حالت بار کامل و بی‌باری (جریان ورودی صفر) در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین، تعداد کل مدلسازی‌ها برابر با ۲۴ است. این مدلسازی‌ها به کمک قابلیت‌های گذراي 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 متدالوئرین 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. همانطور که مشاهده می‌شود، اختلاف اندکی بین جریان ورودی در حالت سالم و نیز دو حالت خطای ناهم محوری وجود دارد که ممکن است به راحتی قابل تشخیص نباشد. با این حال، جریان‌های دو مسیر موازی در شرایط ناهم محوری با یکدیگر متفاوت می‌باشند. این موضوع در شکل ۵ نشان داده شده

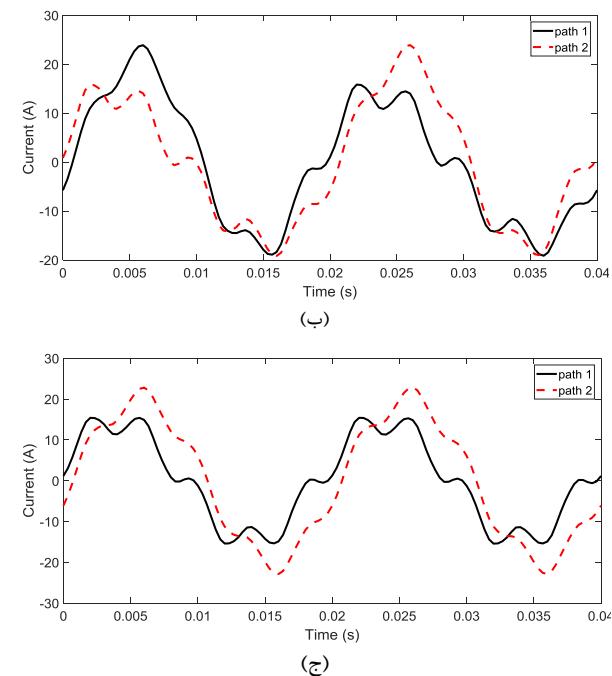


شکل ۷: شار پیوندی کل فاز a از موتور یکطرفه شیاردار بی‌باری

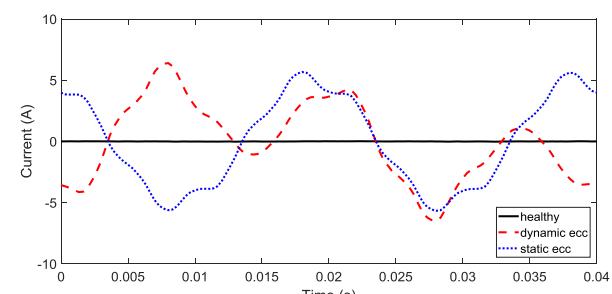


شکل ۸: شار پیوندی کلافهای مختلف فاز a از موتور یکطرفه شیاردار در شرایط بار کامل (الف) شرایط سالم (ب) خطا دینامیکی (ج) خطا استاتیک

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

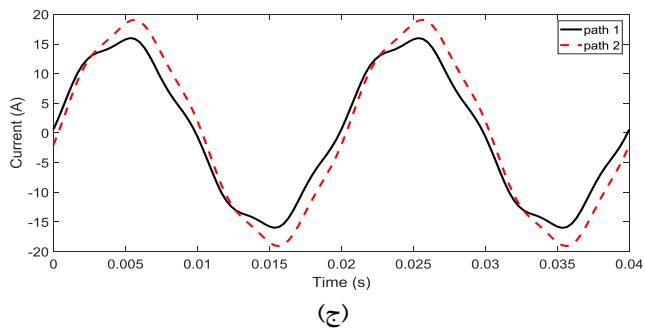
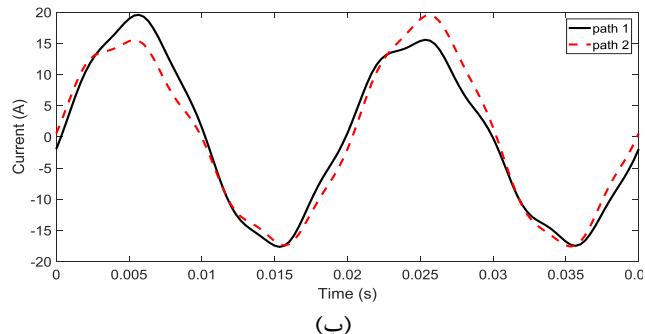
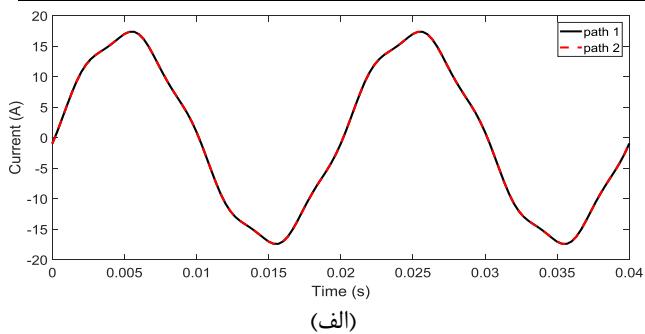


شکل ۵: جریان دو مسیر موازی فاز a از موتور یکطرفه شیاردار در شرایط بار کامل (الف) شرایط سالم (ب) خطا دینامیکی (ج) خطا استاتیکی

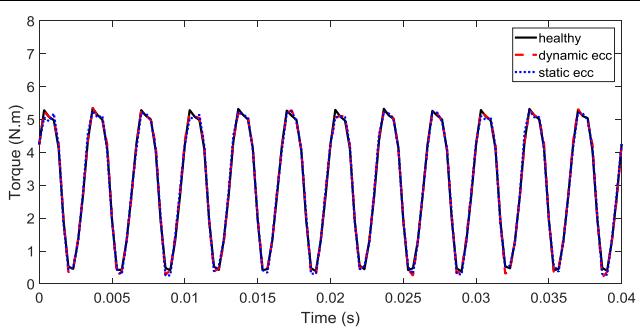


شکل ۶: جریان گردشی کلافهای فاز a از موتور یکطرفه شیاردار در شرایط بی‌باری

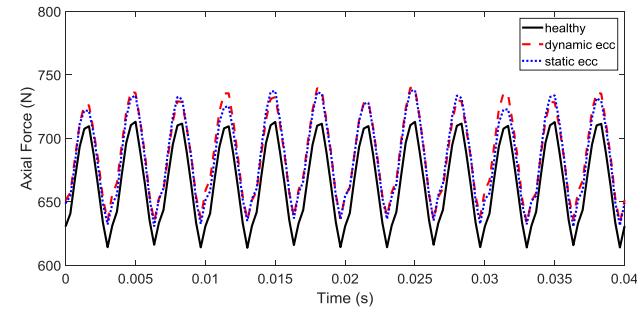
تفییرات گشتاور وارد بر روتور در شکل ۹ نشان داده شده است. طبق این شکل مشخص است که خطاهای ناهم محوری تأثیر ناچیزی بر روی گشتاور تولیدی موتور دارند.



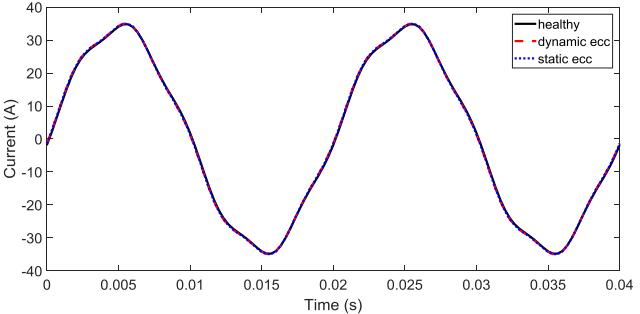
شکل ۱۲: جریان دو مسیر موازی فاز a از موتور یکطرفه بدون شیار در شرایط بار کامل (الف) شرایط سالم (ب) خطای دینامیکی (ج) خطای استاتیکی



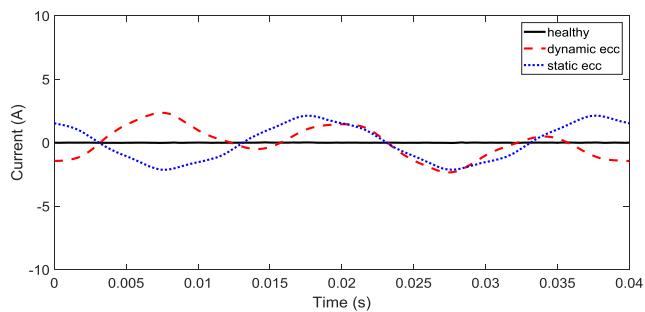
شکل ۹: گشتاور وارد بر روتور موتور یکطرفه شیاردار در شرایط بار کامل



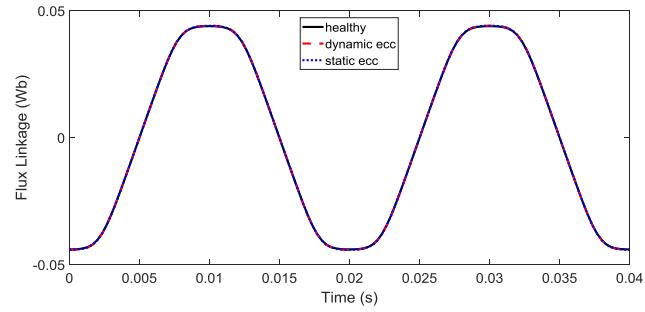
شکل ۱۰: نیروی محوری وارد بر روتور موتور یکطرفه شیاردار در شرایط بار کامل



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



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

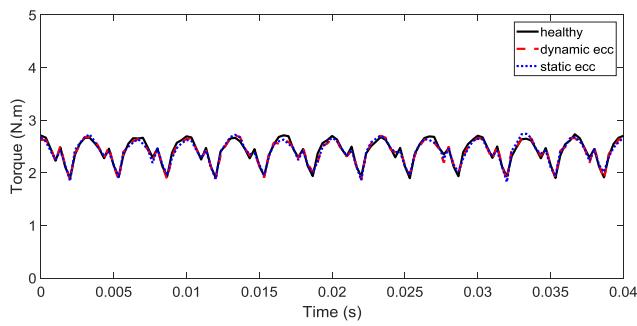


شکل ۱۴: شار پیوندی کل فاز a از موتور یکطرفه بدون شیار در شرایط بی‌باری

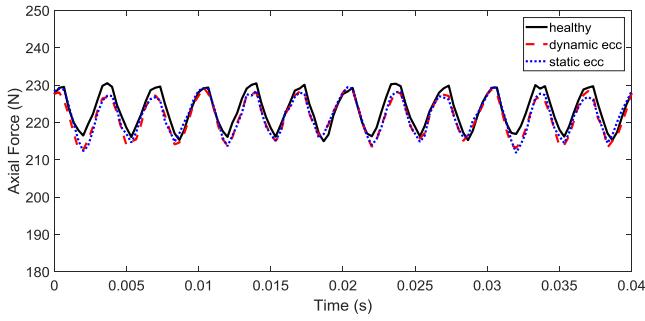
۲-۳ موتور یکطرفه بدون شیار

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

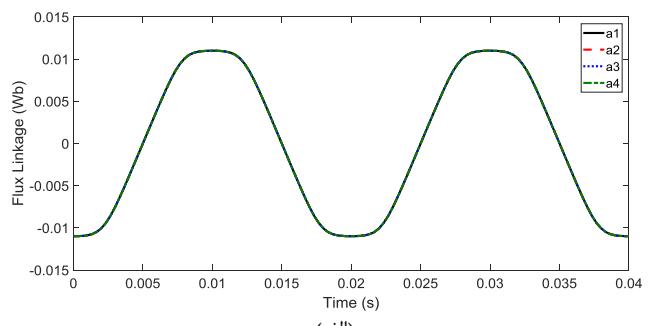
شکل ۱۲ و شکل ۱۳ به ترتیب جریان کل ورودی به فاز a در بار کامل، جریان‌های مسیرهای موازی این فاز در بار کامل و جریان گردشی این مسیرهای موازی در حالت مدار باز را نشان می‌دهند. برای این ساختار، اختلاف بین جریان کل ورودی در حالت‌های سالم و خطدار نسبت به ساختار شیاردار متناظر بسیار کمتر بوده که تشخیص خطا بر 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 ناهم محوری می‌شود. به هر حال، در حالت‌های خطدار، اندازه جریان گردشی و اختلاف بین جریان‌های دو مسیر موازی سیم‌پیچی همچنان قابل توجه و مشهود است.



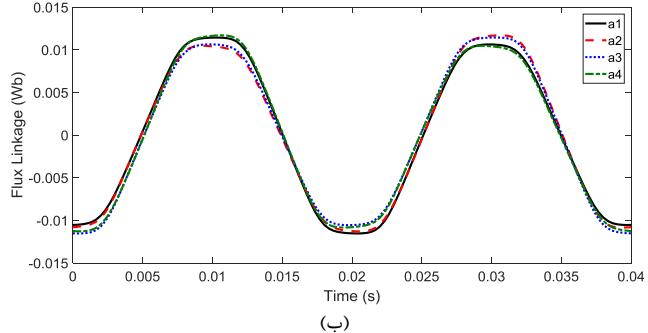
شکل ۱۶: گشتاور وارد بر روتور موتور یکطرفه بدون شیار در شرایط بار کامل



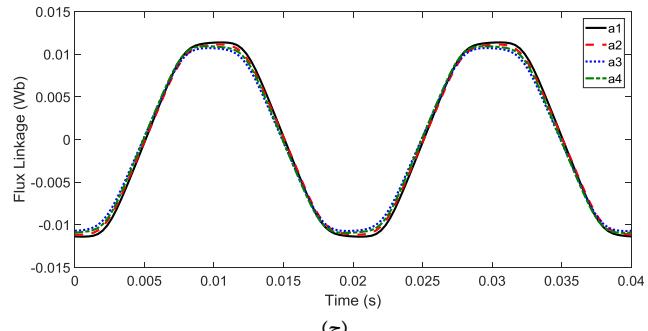
شکل ۱۷: نیروی محوری وارد بر روتور موتور یکطرفه بدون شیار در شرایط بار کامل



(الف)



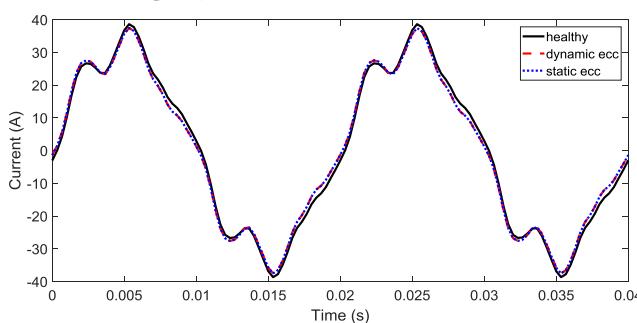
(ب)



(ج)

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

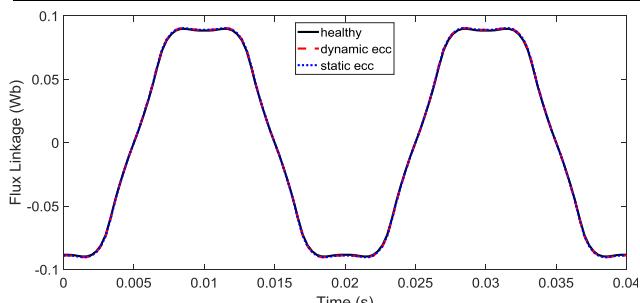
اکنون به بررسی موتورهای دوطرفه می‌پردازیم و در ابتدا ساختار شیاردار آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. تغییرات جریان کل ورودی به یک فاز از این موتور تحت شرایط بار کامل و در حالت‌های سالم و خطدار در شکل ۱۸ ترسیم شده است. همانند ساختار یکطرفه شیاردار، در اینجا نیز تفاوت اندکی بین جریان‌های حالت‌های سالم و خطدار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



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

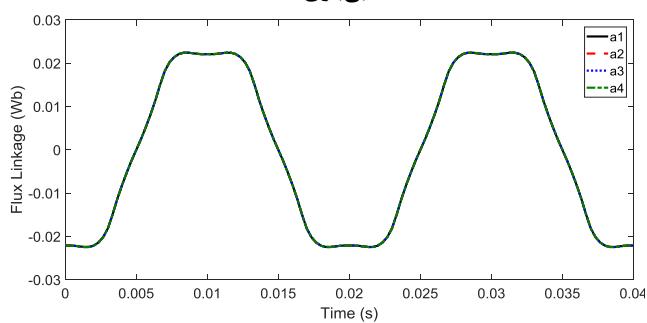
نامحسوس است که این موضوع سبب می‌شود که جریان گردشی کلافها در شرایط بی باری به سمت صفر میل کند (شکل ۲۰ را ببینید). این موضوع یکی از مزایای ساختار دوطرفه نسبت به ساختار یکطرفه است و دلیل آن تقارن دوطرفه این ساختار است.

شار پیوندی کل فاز a در شرایط بی باری و شار پیوندی هر یک از کلافهای سیم پیچی این فاز به ترتیب در شکل ۱۴ و شکل ۱۵ ارائه شده‌اند. مشابه جریان ورودی، اختلاف شار پیوندی کل در حالت‌های سالم و خطدار تقریباً غیرقابل تشخیص است، اما شار پیوندی هر یک از کلافها در شرایط خطدار متمایز از سایر کلافها می‌باشد. این به معنی قابلیت استفاده از کلافهای جستجو برای تشخیص خط در این ساختار است. همانطور که از شکل ۱۶ مشخص می‌شود، در این ساختار نیز گشتاور وارد بر روتور در حالت‌های سالم و خطدار تفاوت محسوسی ندارند. به هر حال، برخلاف ساختار یکطرفه شیاردار، نیروی محوری متوسط وارد بر روتور در ساختار بدون شیار در هر سه حالت سالم و خطدار 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.

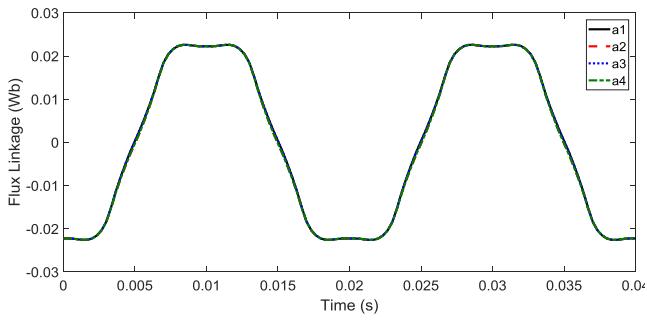


شکل ۲۱: شار پیوندی کل فاز a از موتور دوطرفه شیاردار در شرایط

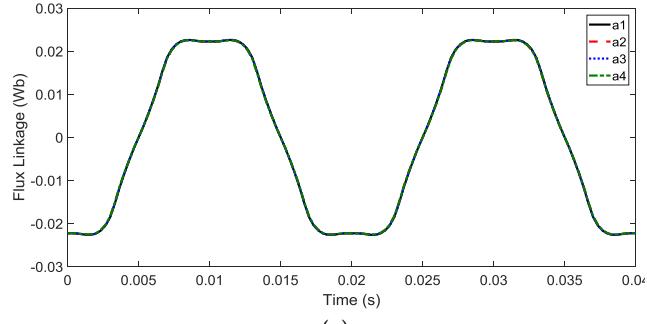
بی‌باری



(الف)



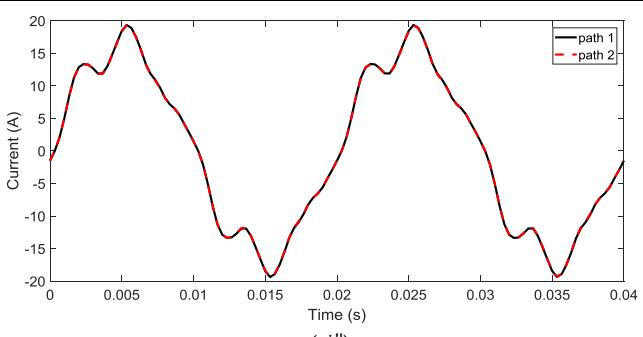
(ب)



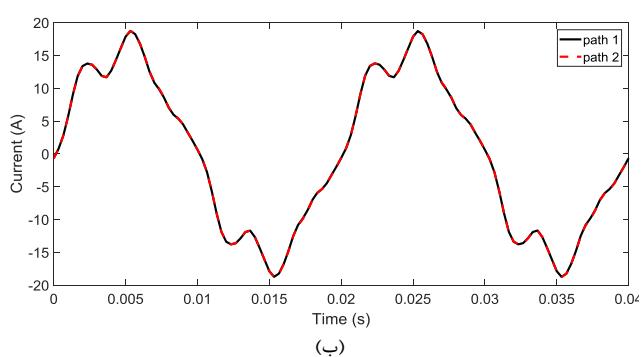
(ج)

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

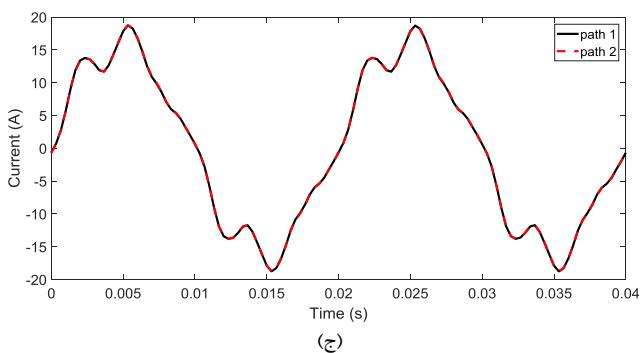
اگرچه این موضوع یک مزیت عملکردی محسوب می‌شود، اما تشخیص خطای ناهمحوری با استفاده از کلافهای جستجو را با چالش مواجه می‌سازد. گشتاور و نیروی محوری وارد بر یکی از دو روتور به ترتیب در شکل ۲۳ و شکل ۲۴ ارائه شده‌اند. همانند دو ساختار قبل، سالم یا خطدار بودن موتور تأثیر چندانی روی گشتاور وارد بر روتور ندارد.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



(الف)

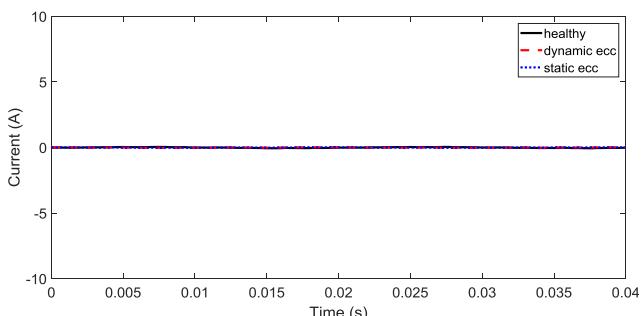


(ب)



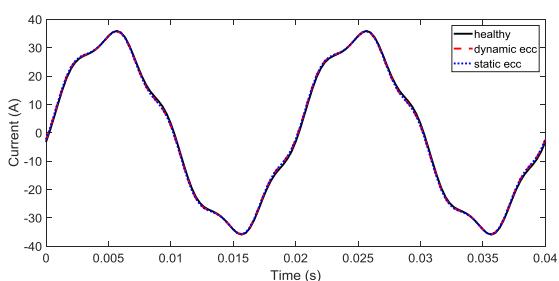
(ج)

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

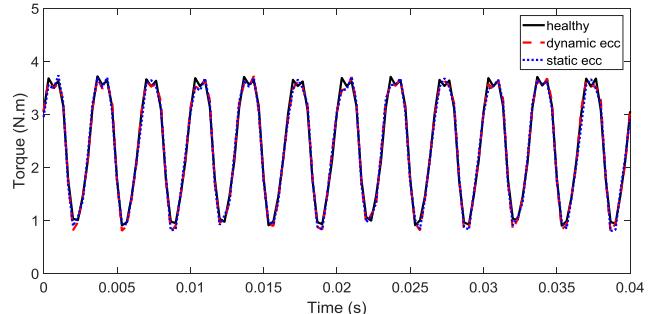


شکل ۲۰: جریان گردشی کلافهای فاز a از موتور دوطرفه شیاردار در شرایط بی‌باری

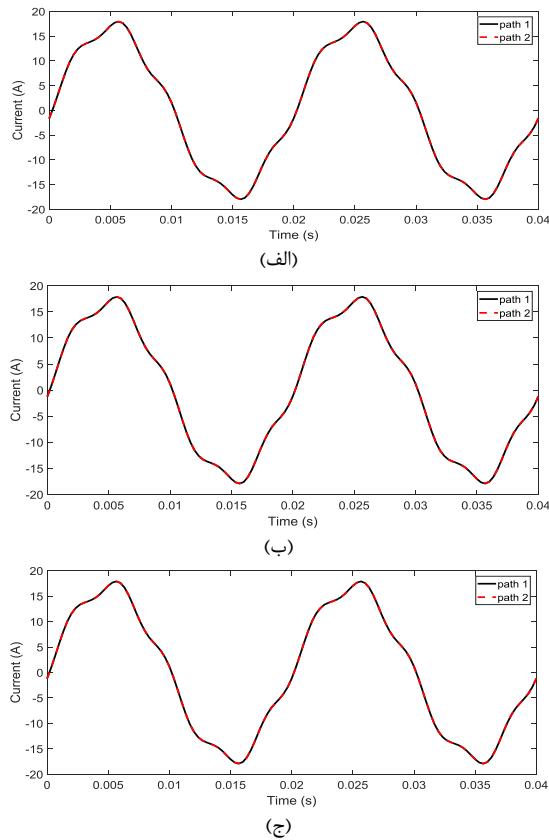
شار پیوندی کل یک فاز در شرایط بی‌باری در شکل ۲۱ و شار پیوندی هر یک از کلافهای این فاز در شکل ۲۲ نشان داده شده‌اند. اگرچه اختلاف بسیار اندکی بین شارهای پیوندی کل در حالت‌های سالم و خطدار مشاهده می‌شود، اما اختلاف شار پیوندی کلافهای مختلف یک فاز در هر یک از این حالت‌ها قابل تشخیص نیست که دلیل آن دوطرفه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



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

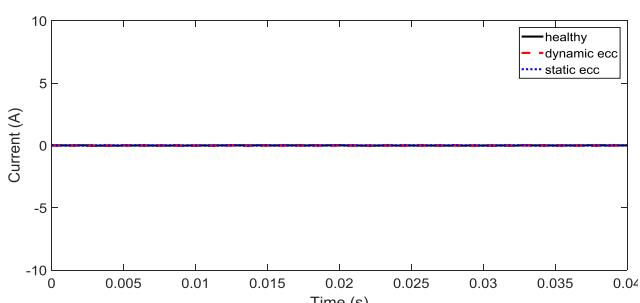


شکل ۲۳: گشتاور وارد بر یکی از دو روتور موتور دوطرفه شیاردار در شرایط بار کامل

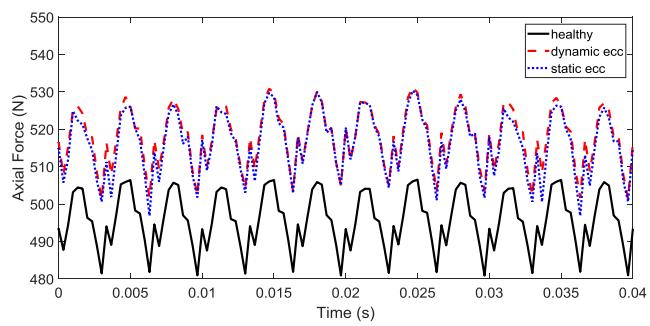


شکل ۲۶: جریان دو مسیر موازی فاز a از موتور دوطرفه بدون شیار در شرایط بار کامل (الف) شرایط سالم (ب) خطای دینامیک (ج) خطای استاتیک

با بررسی نتایج به دست آمده، خطاهای ناهممحوری، چه از نوع استاتیک و چه از نوع دینامیک، 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



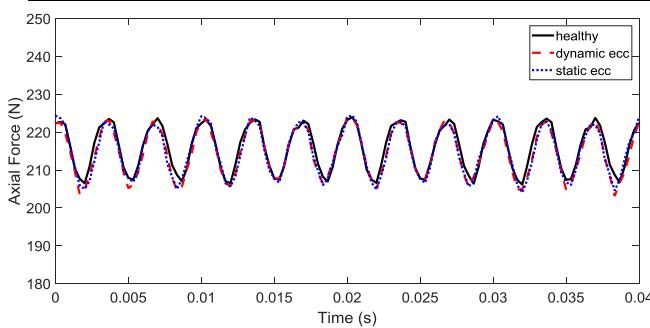
شکل ۲۴: نیروی محوری وارد بر یکی از دو روتور موتور دوطرفه شیاردار در شرایط بار کامل

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 یکنفره قبل متفاوت است.

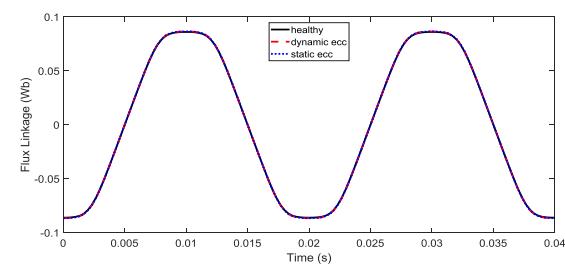
۴-۳ موتور دوطرفه بدون شیار

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 ناهممحوری بی فایده به نظر می‌رسد. همانطور که 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 ۳۱: نیروی محوری وارد بر یکی از دو روتور موتور دوطرفه بدون شیار در شرایط بار کامل

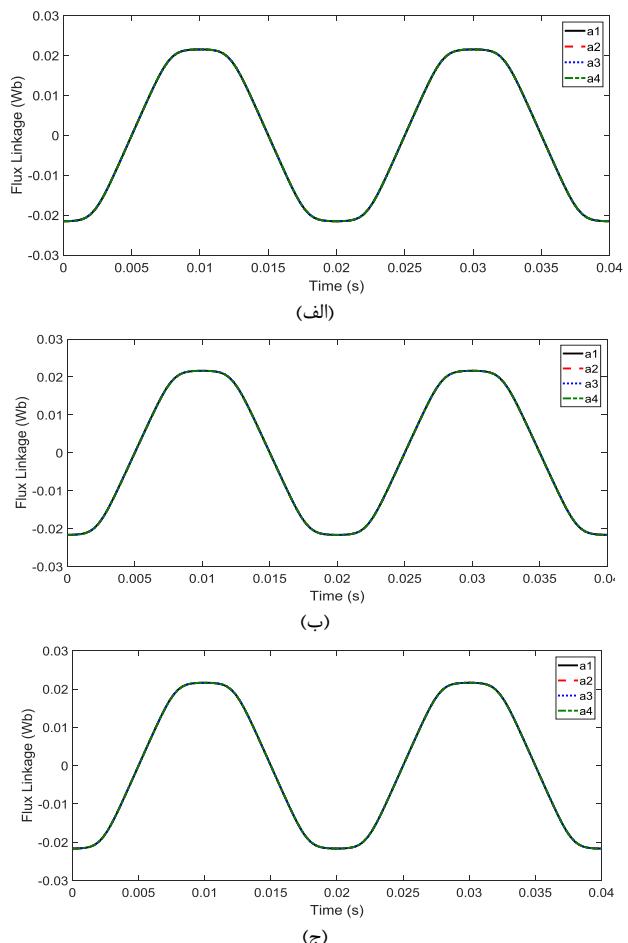


شکل ۲۸: شار پیوندی کل فاز a از موتور دوطرفه بدون شیار در شرایط باری

۴- بحث در مورد نتایج

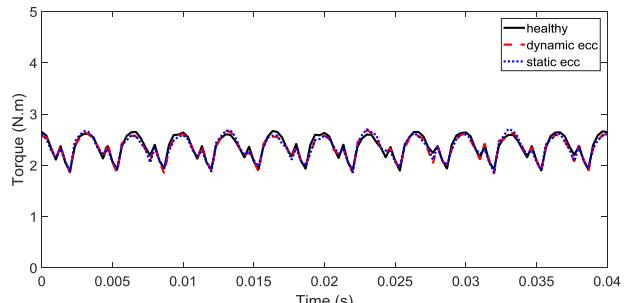
با توجه به نتایج ارائه شده در بخش قبل، می‌توان میزان تأثیر خطاهای ناهممحوری بر روی عملکرد موتورهای مورد مطالعه را مطابق جدول ۳ به چهار سطح زیاد، متوسط، کم و ناچیز تقسیم‌بندی نمود. همچنین، می‌توان نتایج مهم زیر مطرح نمود:

- 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 عملآممکن نیست.
- در ساختارهای شیاردار، و به ویژه در نوع دوطرفه آن، نیروی محوری متوسط وارد بر روتور با موقع خطا ناهممحوری افزایش می‌یابد. به هر حال، در انواع بدون شیار، این نیرو تغییر محسوسی نشان نمی‌دهد.



شکل ۲۹: شار پیوندی کلافهای مختلف فاز a از موتور دوطرفه بدون شیار در شرایط باری (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

- [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. Daghighi, 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

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 ناهم محوری 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 ناهم محوری بر روی عملکرد موتورهای مورد مطالعه

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

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی اثر خطاهای ناهم محوری 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 سیم پیچی 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 خطاهای ناهم محوری است و با وقوع این نوع خط رفتار الکترومغناطیسی آن تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. در کنار این مزیت، لازم به ذکر است که روش‌های تشخیص خطای 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 خطاهای ناهم محوری در آن‌ها بهره گرفته شود. این موضوع می‌تواند در مقالات بعدی مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

- 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.*