

شناسایی مغناطیس‌زدایی در یک ژنراتور سنکرون خطی مغناطیس‌دائم با استفاده از تحلیل

مولفه‌های اصلی

پدرام قصیری دربنده^{۱*}، مهدی علیاری شوره‌دلی^۲، محمد اردبیلی^۳
^۱دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، Quseiri@email.kntu.ac.ir
^۲دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، Aliyari@kntu.ac.ir
^۳دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، Ardebili@eetd.kntu.ac.ir

چکیده - از آنجایی که بهره برداری با قابلیت اطمینان بالا را می‌توان یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های محققان در حوزه ماشین‌های الکتریکی دانست، تشخیص و شناسایی به موقع عیوب در ماشین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مغناطیس‌زدایی را که می‌توان یکی از عیوب غیرقابل اجتناب در ماشین مغناطیس‌دائم دانست، تاثیر مستقیمی روی توزیع چگالی شار در فاصله هوایی دارد. در این مقاله یک راهکار جدید در شناسایی و تشخیص شدت مغناطیس‌زدایی با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی و استخراج ویژگی با استفاده از شاخص‌های زمان-فرکانس ارائه گردیده است. این روش علاوه بر تفکیک پذیری مناسب برای شناسایی عیب، از توانایی مناسبی برای تشخیص شدت عیب در شرایط متفاوت خطا برخوردار است. برای ارزیابی روش ارائه شده در تشخیص عیب از یک ژنراتور سنکرون خطی مغناطیس‌دائم دوطرفه مسطح بهینه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود ماکسول ۱۸ استفاده شده است.

کلیدواژه- مغناطیس‌زدایی، تحلیل مولفه‌های اصلی، ژنراتور خطی مغناطیس‌دائم دو طرفه، استخراج ویژگی

را به عنوان گزینه‌ای مناسب در اتصال به مبدل‌های وصل مستقیم امواج دریا مطرح کرده است [۲]. از جمله عیوبی که می‌تواند عملکرد ماشین‌های مغناطیس‌دائم را به خطر بیندازد، مغناطیس‌زدایی^۲ است. شرایط بهره‌برداری نامناسب، گرمایش بیش از حد ماشین و فرسودگی مغناطیس‌های دائم باعث وقوع مغناطیس‌زدایی در ماشین می‌شوند [۳]. مغناطیس‌زدایی باعث اختلال در توزیع شار، ایجاد نیروی نامتعادلی و ایجاد هارمونیک‌های مرتبه بالا در ماشین می‌شود. در صورت ادامه بهره‌برداری از ماشین در این شرایط، اختلال در عملکرد مبدل‌ها و دیگر اجزاء ماشین به دور از ذهن نیست. بنابراین شناسایی دقیق و به موقع این عیب می‌تواند ماشین و سیستم قدرت را از قرارگیری در یک شرایط بهره‌برداری نامطلوب نجات دهد. مغناطیس‌زدایی جزو عیوبی است که وقوع آن عمدتاً به کندی و تدریجی در طول سالیان رخ می‌دهد. بنابراین شناسایی این عیب نیاز به تحلیل و بررسی دقیقی دارد که بتوان

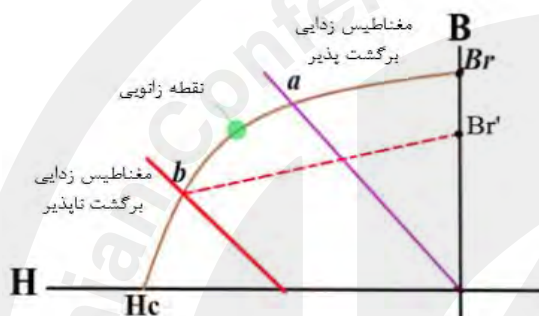
۱- مقدمه

با شروع پیشرفت‌های وسیعی که در زمینه مواد مغناطیسی و تجهیزات الکترونیک قدرت در سال‌های اخیر انجام شد، ماشین‌های مغناطیس‌دائم از کاربرد وسیع‌تری نسبت به گذشته برخوردار شدند. در این ماشین‌ها به دلیل عدم استفاده از سیم پیچی میدان، وزن و تلفات ماشین به صورت گسترده‌ای کاهش و همچنین به دلیل عدم استفاده از جعبه دنده، تلفات مکانیکی و صوتی آن نیز به شدت کاهش می‌یابد [۱]. این پیشرفت‌ها پژوهشگران را بر آن داشت که به دنبال ساختارهای جدید و بهینه‌ای در زمینه طراحی ماشین باشند. یک نمونه از این ماشین‌ها را می‌توان ژنراتورهای خطی مغناطیس‌دائم وصل مستقیم^۱ دانست که به صورت گسترده‌ای در انرژی امواج دریا مورد استفاده قرار می‌گیرند، قابلیت راهاندازی در سرعت‌ها و مسیرهای حرکتی متفاوت، این ماشین‌ها

^۱ Permanent magnet synchronous linear Generator

^۲ Demagnetization

تشخیص عیب انجام گرفت و هدف از ارائه مقاله مشخص گردید. در بخش ۲، پدیده مغناطیس زدایی به صورت مختصر مورد بررسی قرار می‌گیرد و ژنراتور خطی شبیه سازی شده در این مقاله در بخش ۳ معرفی می‌شود. قسمت ۴ به ارائه شاخص های زمان-فرکانسی اختصاص می‌یابد و قسمت ۵ به بررسی روش تحلیل مولفه اصلی می‌پردازد. شبیه سازی و نتایج در قسمت ۶ ارائه می‌گردد. نتیجه گیری کاملی در بخش ۷ ارائه می‌شود.



شکل ۱: منحنی مغناطیس زدایی با تغییر نقطه کار ماشین

۲- مغناطیس زدایی

به صورت کلی مغناطیس زدایی به دو دسته جزئی و کلی دسته بندی می‌گردد. مغناطیس زدایی جزئی به حالتی گفته می‌شود که یک یا چند مغناطیس دائم دچار مغناطیس زدایی ضعیف شوند. بیشتر مغناطیس های دائم مورد استفاده در ماشین های جدید از نوع نئودیمیوم-آهن-بور، ساماریم کبالت و آلنیکو هستند که دارای مشخصه ای تقریباً مشابه یک خط مستقیم با افت در نزدیکی نقطه زانویی هستند. منحنی $B-H$ مغناطیس دائم آلنیکو که در شکل ۱ دیده می‌شود، پدیده مغناطیس زدایی را به صورت بهتری تفسیر می‌کند [۱]. با توجه به شکل ۱، نقطه تقاطع منحنی مغناطیس دائم با خط بار، نقطه کار ماشین را تعیین می‌کند. با توجه به شکل، نقطه اولیه کار ماشین در نقطه a قرار دارد. چنانچه تغییرات دمایی و محیطی باعث تغییر نقطه کار تا نقطه زانویی شود، مغناطیس زدایی از نوع برگشت پذیر بوده و در صورتی که نقطه کاری ماشین به نقطه b زیر نقطه زانویی برسد، ماشین دچار مغناطیس زدایی برگشت ناپذیر می‌شود. در این مقاله با در نظر گرفتن یک نقطه

در همان مراحل اولیه وقوع، آن را شناسایی و از پیشرفت عیب در ماشین جلوگیری کرد. به صورت عمده روش های شناسایی عیب به دو دسته اصلی، بر پایه سیگنال و مدل تقسیم بندی می‌شوند که روش های بر پایه سیگنال از محبوبیت بیشتری در شناسایی عیب برخوردار هستند. تبدیل فوری که یکی از شناخته شده ترین روش های شناسایی عیب بر پایه سیگنال می‌باشد، در شناسایی برای سیگنال های ناپیستا از توانایی مناسبی برخوردار نیست [۴]. بنابراین روش های تبدیل موجک، تبدیل هیلبرت، فیلترکالمن و تجزیه مد تجربی که از جمله روش های زمان-فرکانسی متداول هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵-۸]. از آنجایی که اختلال در میدان مغناطیسی فاصله هوایی از نتایج مغناطیس زدایی جزئی است، بنابراین سیگنال های صوت و ارتعاش را می‌توان از کارآمدترین سیگنال ها در شناسایی عیب دانست [۹]. یکی از طرفدارترین روش های شناسایی عیب ماشین های الکتریکی، روش آنالیز اثرات جریان الکتریکی موتور ($MCSA^{\text{r}}$) است [۱۰]. این روش توانایی آشکار سازی عیب را در حالت مغناطیس زدایی کامل ندارد [۱۱]. شبکه های عصبی، منطق فازی، ماشین های بردار پشتیبان و نزدیک ترین همسایگی نیز از جمله روش های دیگر شناسایی عیب در این ماشین ها هستند [۱۲، ۱۳]. جریان، ولتاژ، صوت و ارتعاش از جمله سیگنال هایی هستند که برای شناسایی مغناطیس زدایی در ماشین های مغناطیس دائم مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش های شناسایی بر پایه مدل، پارامترهای ماشین به وسیله مدل ریاضی ماشین تخمین زده شده و با خروجی اندازه گیری شده مقایسه می‌گردند. فیلتر کالمن، شار پیوندی تخمین زده شده روتور و تحلیل ساختاری از جمله روش های شناسایی عیب بر پایه مدل هستند [۱۴-۱۶]. مدل صحیح در روش های بر پایه مدل و تغییرات بار و مبدل در روش های بر پایه سیگنال را می‌توان از جمله مهمترین مشکلات روش های فوق الذکر دانست. [۴]. در این مقاله یک راهکار جدید بر پایه استخراج ویژگی با استفاده از شاخص های زمان-فرکانسی و تحلیل مولفه های اصلی (PCA^{r}) ارائه می‌گردد. برای ارزیابی راهکار ارائه شده از سناریو عیوب مختلف استفاده شده است. این مقاله در قالب ۷ بخش سازماندهی شده است. در قسمت ۱، مروری بر روش های

^۳ Motor Current Signature Analysis

^۴ Principle Component Analysis

کاری پایین تر از نقطه زانویی عیب مغناطیس زدایی در مغناطیس دائم نئودیمیم-آهن- بور مدل می شود.

۴- استخراج ویژگی با استفاده از شاخص های زمان-

فرکانسی

از آنجایی که استفاده مستقیم از سیگنالهای الکتریکی امکان جداسازی و شناسایی عیب را نمی دهد، می بایست از این سیگنالها ویژگی هایی را جهت شناسایی استخراج کرد. در این قسمت با استفاده از سیگنال های الکتریکی بدست آمده از شبیه سازی، دسته ای از ویژگی های زمان-فرکانسی سیگنال که نحوه بدست آوردن هر کدام در جدول ۲ آمده است، استخراج می گردد.

۵- تحلیل مولفه های اصلی

تجزیه و تحلیل مؤلفه های اصلی (PCA) یک تکنیک آماری چند متغیره است که هدف اصلی آن کاهش ابعاد یک مجموعه داده متشکل از تعداد زیادی متغیر به هم پیوسته، در شرایطی است که الگوی تغییرات حفظ شود [۱۸]. این امر با تبدیل مجموعه اصلی داده های اندازه گیری شده به مجموعه جدیدی به نام مولفه های اصلی (PCs) حاصل می شود. این مولفه ها به گونه ای هستند که ویژگی داده های اصلی را در خود حفظ می کنند.

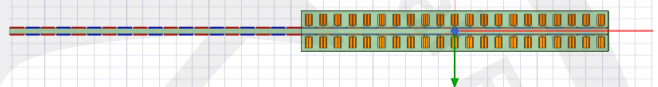
۵-۱- تئوری تحلیل مولفه اصلی

تحلیل مولفه های اصلی از n داده نمونه برداری شده (مشاهدات) تشکیل شده است که هر یک شامل m متغیر انتخاب شده (ویژگی ها) است. یعنی می توان مجموعه داده ها را به صورت ماتریس $X \in R^{n \times m}$ نمایش داد.

نکته مهم این است که تمامی داده های انتخاب شده به گونه ای نرمالیزه شده اند که به ترتیب میانگین داده ها روی صفر و واریانس داده روی یک می باشد. در ادامه نحوه محاسبه ماتریس کوواریانس مشخص می گردد. ابتدا با استفاده از رابطه (۱) میانگین داده ها محاسبه شده و با استفاده از رابطه های (۲) و (۳) و (۴) مقادیر واریانس داده ها محاسبه می گردد.

۳- ژنراتور سنکرون خطی مغناطیس دائم

ژنراتور سنکرون خطی مغناطیس دائم یکی از متداول ترین ژنراتور- های وصل مستقیم مورد بهره برداری در مبدل های انرژی امواج است که به دلیل ویژگی هایی چون راه اندازی در سرعت و مسیرهای مختلف از توانایی مناسبی در مبدل های وصل مستقیم برخوردار است [۱۷].



شکل ۲: نمایی از ژنراتور خطی سنکرون دو طرفه

در این مقاله، یک ژنراتور خطی مغناطیس دائم دو طرفه مسطح بهینه با استفاده از نرم افزار اجزا محدود ماکسول ۱۸ به صورت دو بعدی شبیه سازی شده است. شکل ۲ نمایی از ژنراتور خطی مسطح دو طرفه شبیه سازی شده را نشان می دهد. مشخصات طراحی این ژنراتور در جدول ۱ آمده است. قابل ذکر است در این طراحی از سیم پیچی متمرکز دو لایه فاقد همپوشانی روی دندانه استفاده شده است.

جدول ۱: اطلاعات طراحی ژنراتور

مقدار	پارامتر
20	تعداد قطب زیر ترانسلاتور در هر طرف
21	تعداد شیار
0.35	تعداد شیار زیر هر قطب برای هر فاز
0.945	ضریب سیم پیچی
13.525	فرکانس کاری ماشین (هرتز)
3	توان خروجی ماشین (کیلو وات)
230	مقدار موثر ولتاژ خروجی ژنراتور
51.8	گام قطب (میلی متر)
49.3	گام شیار (میلی متر)
4.2	ارتفاع مغناطیس دائم (میلی متر)
1035.5	طول استاتور (میلی متر)
104.8	عرض استاتور (میلی متر)

$$X(n, m) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \{X(i, j) / \sigma_x(j)\} \quad (4)$$

سپس ماتریس کوواریانس داده ها با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می گردد.

$$C = \frac{1}{n-1} X^T X \quad (5)$$

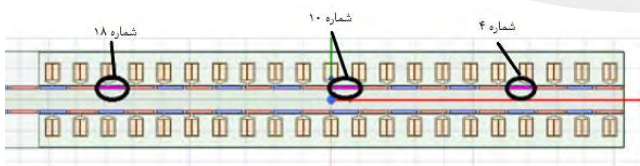
مقادیر تکین ماتریس کوواریانس بالا عبارت است از :

$$C = V \Lambda V^T \quad (6)$$

که در این رابطه Λ ، یک ماتریس قطری شامل مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس است. همچنین V عبارت است از ماتریس بردارهای ویژه ماتریس کوواریانس C . در این راهکار با مرتب کردن ماتریس مقادیر ویژه از بزرگتر به کوچکتر، مولفه های اصلی مشخص می گردند. در واقع مقدار ویژه واقع در هر سطر مربوط به شماره آن مولفه می باشد. تعیین هر مولفه به این صورت انجام می گیرد که برای داده ها در راستای بیشترین پراکنده گی، مولفه هایی تعیین می شوند که نشان دهنده پراکنده گی هر داده در آن راستا است. با توجه به همین نکته می توان داده ها را از فضای m متغیره به فضای k متغیره کاهش بعد داد. در واقع PCA همانند یک تبدیل می تواند داده ها را از فضای بزرگتر به فضای کوچکتر به گونه ای که کمترین اطلاعات ضروری حذف گردند، انتقال دهد.

۶- نتایج و شبیه سازی

ابتدا با اعمال مغناطیس زدایی روی مغناطیس دائم شماره ۱۸ که در شکل ۳ مشخص شده است، مولفه های اصلی که توانایی مناسبی در جداسازی و تشخیص دارند مشخص می گردد و سپس توانایی این روش در حالت های مختلف مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۳: مغناطیس دائم های مشخص شده شماره ۴ و ۱۰ و ۱۸

داده های زمانی برداشت شده مربوط به ۵ سیگنال ولتاژ خروجی،

جدول ۲: شاخص های زمان-فرکانسی

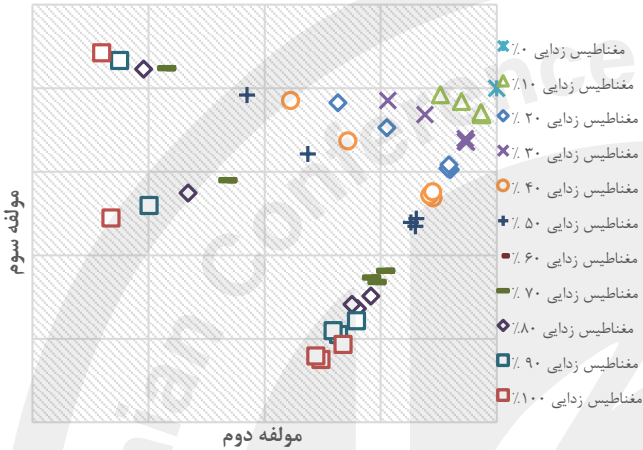
شاخص	رابطه
peak to peak	$ \max_{X_i} - \min_{X_i} $
RMS	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{N=1}^N (X_i)^2}$
kurtosis	$\frac{\frac{1}{N} \sum_{N=1}^N (X_i - \bar{X})^4}{(\frac{1}{N} \sum_{N=1}^N (X_i - \bar{X})^2)^2}$
Crest factor	$\frac{X_{peak}}{X_{RMS}}$
Skewness	$\frac{\frac{1}{N} \sum_{N=1}^N (X_i - \bar{X})^3}{(\frac{1}{N} \sum_{N=1}^N (X_i - \bar{X})^2)^{3/2}}$
Impulse factor	$\frac{X_{peak}}{\frac{1}{N} \sum_{N=1}^N X_i }$
Average power (P_x)	$\int_0^{f_{max}} S_x(f) df$
Mean Frequency	$\frac{\int_0^{f_{max}} f * S_x(f) df}{P_x}$
Median frequency	$\int_0^{f_{med}} S_x(f) df = \int_{f_{med}}^{f_{maz}} S_x(f) df$

$$\bar{X}(m) = \sum_{j=1}^m \frac{\sum_{i=1}^n X(i, j)}{n} \quad (1)$$

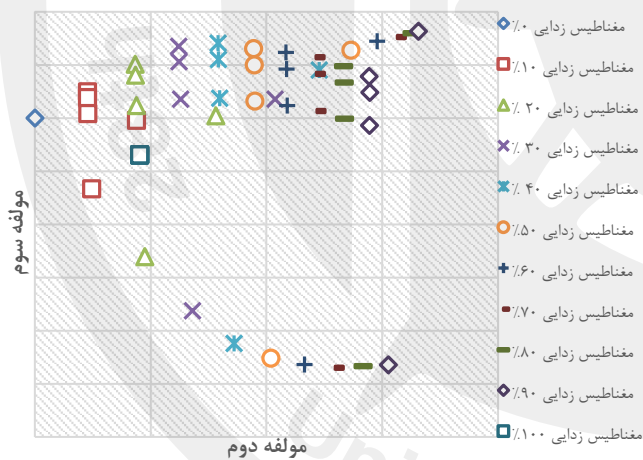
$$X(n, m) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \{X(i, j) - \bar{X}(j)\} \quad (2)$$

$$X(m) = \sum_{j=1}^m \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{X(i, j) - \bar{X}(j)\}^2} \quad (3)$$

بررسی قرار می‌گیرد. چنان که از شکل 6 مشخص است مولفه دوم و سوم در این شرایط نیز از توانایی مناسبی در تفکیک پذیری برخوردار بوده و امکان جداسازی بین حالت‌های مختلف وجود دارد.



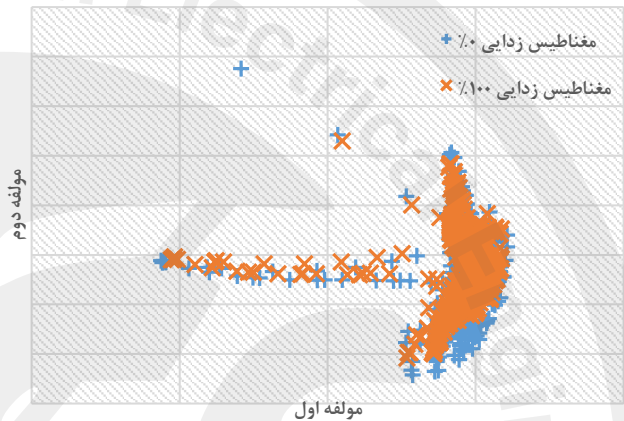
شکل ۶: بررسی تفکیک پذیری برای درصدهای مختلف از مغناطیس زدایی برای مغناطیس‌های دائم ۴ و ۱۰ و ۱۸ با استفاده از مولفه‌های دوم و سوم



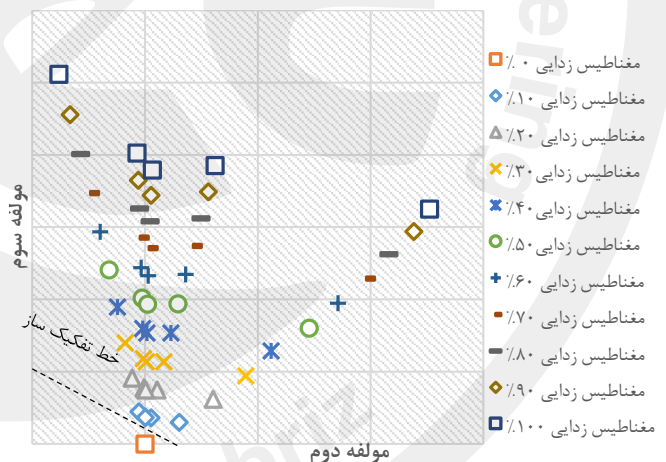
شکل ۷: بررسی تفکیک پذیری برای درصدهای مختلف از مغناطیس زدایی همه مغناطیس‌های دائم

با توجه به شکل ۷، مغناطیس زدایی با درصدهای مختلف روی همه مغناطیس‌های دائم اعمال گردیده که در این شرایط نیز این روش توانایی خوبی در تفکیک پذیری و سنجش شدت عیب از خود نشان می‌دهد. بنابراین با استفاده از مولفه دوم و سوم، نه تنها امکان شناسایی حالت سالم و معیوب وجود دارد بلکه می‌توان با توجه به قرارگیری نقاط و فاصله از حالت سالم سنجش درستی از شدت عیب داشت.

ولتاژ القائی، جریان الکتریکی، نیرو و شار دور پیوندی ژنراتور هستند. توانایی روش *PCA* برای مولفه‌های اول و دوم که تاثیرگذارترین مولفه‌های *PCA* هستند در شکل ۴ نشان داده شده است. نحوه قرارگیری داده‌ها در صفحه برای دو حالت کاملاً سالم و کاملاً معیوب (۱۰۰٪ مغناطیس زدایی) با مولفه‌های اول و دوم به گونه‌ای است که امکان جداسازی وجود ندارد.



شکل ۴: بررسی میزان تفکیک پذیری داده‌ها برای شناسایی مغناطیس زدایی در مغناطیس دائم شماره ۱۸ با استفاده از مولفه‌های اول و دوم



شکل ۵: بررسی میزان تفکیک پذیری برای درصدهای مختلف از مغناطیس زدایی برای مغناطیس دائم شماره ۱۸ با استفاده از مولفه‌های دوم و سوم

لی با بررسی همه مولفه‌های اصلی تشکیل دهنده داده‌ها، مشخص گردید که مولفه‌های دوم و سوم بیشترین تمایز را در صفحه ایجاد می‌کنند. همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود تفکیک پذیری برای مولفه‌های دوم و سوم با شرایط خوبی همراه بوده و حتی امکان تفکیک حالت‌های مختلف با استفاده از خط وجود دارد. در ادامه مولفه دوم و سوم برای مغناطیس‌های دائم شماره ۴ و ۱۰ و ۱۸ که در شکل ۳ مشخص شده است به صورت همزمان مورد

5768-5778, 2019.

[9] M. Zhu, W. Hu, and N. C. Kar, "Acoustic noise-based uniform permanent-magnet demagnetization detection in SPMSM for high-performance PMSM drive," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 1, pp. 303-313, 2017.

[10] W. T. Thomson and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 26-34, 2001.

[11] J. Faiz and H. Nejadi-Koti, "Demagnetization fault indexes in permanent magnet synchronous motors—An overview," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 4, pp. 1-11, 2015.

[12] J. Quiroga, L. Liu, and D. Cartes, "Fuzzy logic based fault detection of PMSM stator winding short under load fluctuation using negative sequence analysis," in *American Control Conference, 2008*, 2008, pp. 4262-4267: IEEE.

[13] Y. Nyanteh, C. Edrington, S. Srivastava, and D. Cartes, "Application of artificial intelligence to real-time fault detection in permanent-magnet synchronous machines," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 49, no. 3, pp. 1205-1214, 2013.

[14] X. Xiao, C. Chen, and M. Zhang, "Dynamic permanent magnet flux estimation of permanent magnet synchronous machines," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 20, no. 3, pp. 1085-1088, 2010.

[15] S. Moon, J. Lee, H. Jeong, and S. W. Kim, "Demagnetization fault diagnosis of a PMSM based on structure analysis of motor inductance," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 6, pp. 3795-3803, 2016.

[16] J. Farooq, A. Djerdir, and A. Miraoui, "Analytical modeling approach to detect magnet defects in permanent-magnet brushless motors," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 12, pp. 4599-4604, 2008.

[17] J. Song, J. Zhao, F. Dong, J. Zhao, L. Xu, and Z. Yao, "A New Demagnetization Fault Recognition and Classification Method for DPMSLM," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019.

[18] I. Jolliffe, *Principal component analysis*. Springer, 2011.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش جدید در شناسایی مغناطیس زدایی با استفاده از تحلیل مولفه‌های اصلی و ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال‌های الکتریکی ارائه گردید. مولفه‌های دوم و سوم در این روش توانستند بیشترین تفکیک‌پذیری را از میان مولفه‌های دیگر ارائه داده و امکان جداسازی و تشخیص شدت عیب را امکان‌پذیر نمایند. همچنین توانایی این روش برای تعداد مغناطیس‌دائم‌های معیوب مختلف مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که این روش توانایی مناسبی در شناسایی و تشخیص شدت مغناطیس‌زدایی در حالت‌های مختلف دارد.

۸- مراجع

[1] J. Faiz and E. Mazaheri-Tehrani, "Demagnetization modeling and fault diagnosing techniques in permanent magnet machines under stationary and nonstationary conditions: An overview," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 2772-2.2017, 785

[2] J. Faiz and A. Nematsaberi, "Linear permanent magnet generator concepts for direct-drive wave energy converters: A comprehensive review," in *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2017 12th IEEE Conference on*, 2017, pp. 618-623: IEEE.

[3] S. Moon, H. Jeong, H. Lee, and S. W. Kim, "Detection and classification of demagnetization and interturn short faults of IPMSMs," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 12, pp. 9433-9441, 2017.

[4] M. Cheng, J. Hang, and J. Zhang, "Overview of fault diagnosis theory and method for permanent magnet machine," *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 21-36, 2015.

[5] A. García Espinosa, J. A. Rosero García, J. Cusido Roura, J. L. Romeral Martínez, and J. A. Ortega Redondo, "Fault detection by means of Hilbert-Huang transform of the stator current in a PMSM with demagnetization," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 2, pp. 312-318, 2010.

[6] Y. Lei, J. Lin, Z. He, and M. J. Zuo, "A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery," *Mechanical systems and signal processing*, vol. 35, no. 1-2, pp. 108-126, 2013.

[7] M. Heydarzadeh, M. Zafarani, M. Nourani, and B. Akin, "A Wavelet-Based Fault Diagnosis Approach for Permanent Magnet Synchronous Motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 2, pp. 761-772, 2018.

[8] M. Zhu, B. Yang, W. Hu, G. Feng, and N. C. Kar, "Vold-Kalman Filtering Order Tracking Based Rotor Demagnetization Detection in PMSM," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 6, pp.