



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 13, No. 2, 2022
Research Paper

Demagnetized Magnet Diagnosis in a Double-Layer Winding Permanent Magnet Synchronous Machine using Wavelet Packet Transform

Pedram Quseiri Darbandeh¹, Mohammad Ardebili^{2*}, Mahdi Aliyari Shoorehdeli³

^{1,2} Department of Power, Faculty of Electrical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

³ Department of Control and Mechatronics, Faculty of Electrical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Abstract:

Permanent Magnets (PM), which are one of the most vulnerable and important components of permanent magnet machines, are at risk of demagnetization for reasons such as overheating and corrosion. One of the most critical tasks of engineers in the industry is to prevent the machine's operation in the demagnetization condition and replace the machine's defective PMs as much as possible. Demagnetization causes linkage flux reduction, electromagnetic force changes, and machine heating. This paper presents a new approach for demagnetized PM diagnosis in a permanent magnet linear synchronous machine using wavelet packet transform. Due to the high sensitivity to the flux changes, the electromotive force signal was selected as a detection signal. By examining this method in different demagnetization cases, it is determined that this method has a proper performance. In this paper, the finite element software (Maxwell) and MATLAB were used to simulate the machine and analyze the data, respectively.

Keywords: Wavelet Packet Transform, Permanent Magnet, Demagnetization, linear Synchronous machine



2252-083X/ © 2022 The Authors. Published by University of Isfahan
This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/ISEE.2021.125528.1416>

تشخیص مغناطیس دائم معیوب در یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم با سیم پیچی دولایه با

استفاده از تبدیل بسته‌ای موجک

پدرام قصیری دربنده^۱، محمد اردبیلی^{۲*}، مهدی علیاری شوره دلی^۳

۱- دانشجوی دکتری - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران

quseiri@email.kntu.ac.ir

۲- استاد گروه قدرت - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی - تهران - ایران

ardebili@eetd.kntu.ac.ir

۳- دانشیار گروه کنترل و مکترونیک - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی - تهران -

ایران

aliyari@kntu.ac.ir

چکیده: مغناطیس‌های دائم، یکی از آسیب‌پذیرترین و مهم‌ترین اجزای ماشین‌های مغناطیس‌دائم جدیدند که به دلایلی همچون گرمایش بیش از حد و فرسودگی در خطر مغناطیس‌زدایی قرار دارند. یکی از مهم‌ترین وظایف مهندسين در صنعت، جلوگیری از بهره‌برداری ماشین در شرایط مغناطیس‌زدایی و تا حد امکان تعویض مغناطیس‌های دائم معیوب ماشین است؛ زیرا بهره‌برداری در این شرایط باعث کاهش شار دور پیوندی سیم‌پیچی، کاهش نیروی الکترومغناطیسی تولیدی، افزایش نوسانات نیرو و گرم‌شدن ناحیه‌ای در ماشین می‌شود. در این مقاله، یک راهکار جدید برای شناسایی مغناطیس‌زدایی در یک ژنراتور سنکرون خطی مغناطیس‌دائم با استفاده از تبدیل بسته‌ای موجک با هدف تعیین دقیق محل مغناطیس‌دائم معیوب ارائه می‌شود. با بررسی این روش روی موارد مختلف مغناطیس‌زدایی، مشخص شد این روش از عملکرد مطلوبی در شناسایی برخوردار است. در این روش از سیگنال ولتاژ القایی به‌عنوان سیگنال شناساگر استفاده شد. همچنین، از نرم‌افزار اجزای محدود ماکسول برای شبیه‌سازی ماشین و نرم‌افزار متلب برای تحلیل داده‌ها و ارائه روش مذکور بهره برده شد.

واژه‌های کلیدی: تبدیل بسته‌ای موجک، ماشین سنکرون مغناطیس‌دائم، مغناطیس‌زدایی

۱- مقدمه

میدان، وزن و تلفات ماشین به‌صورت گسترده‌ای، کاهش و نیز به دلیل استفاده‌نشدن از جعبه دنده، تلفات مکانیکی و صوتی آن نیز به‌شدت 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 ژنراتور خطی مغناطیس‌دائم (PMLSG) است که به‌صورت گسترده‌ای در مبدل‌های انرژی امواج دریا استفاده می‌شود. قابلیت راه‌اندازی در سرعت‌ها و مسیرهای حرکتی متفاوت، این ماشین‌ها را گزینه‌ای مناسب در اتصال به مبدل‌های امواج دریا مطرح کرده است [۲]. ازجمله عیوبی که عملکرد ماشین‌های مغناطیس‌دائم را به خطر می‌اندازد،

با شروع پیشرفت‌های وسیع در زمینه مواد مغناطیسی و تجهیزات الکترونیک قدرت در سال‌های اخیر، ماشین‌های مغناطیس‌دائم از کاربرد وسیعی نسبت به گذشته برخوردار شدند. در این ماشین‌ها به دلیل استفاده‌نشدن از سیم‌پیچی

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۱۴

نام نویسنده مسئول: محمد اردبیلی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - دانشکده مهندسی برق

۲ تشخیص مغناطیس‌دائم معیوب در یک ماشین سنکرون مغناطیس‌دائم با سیم‌پیچی دولایه با استفاده از تبدیل بسته‌ای موجک

ماشین می‌شود، سیگنال‌های صوت و ارتعاش را می‌توان از کارآمدترین سیگنال‌ها در شناسایی عیب دانست [۱۱-۱۴]. اندازه‌گیری سیگنال‌های ارتعاش و صوت به ترتیب با استفاده از شتاب‌سنج‌ها و میکروفون‌های دقیق انجام می‌شود. با وجود توانایی مناسب این روش‌ها در شناسایی عیب، به دلیل زیادبودن هزینه بهره‌برداری از این تجهیزات، این روش‌ها از محبوبیت زیادی برخوردار نیستند.

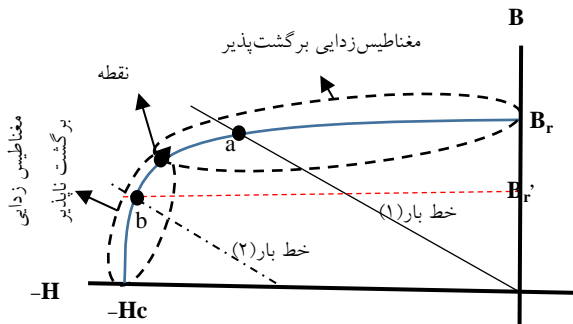
سیگنال‌های الکتریکی ولتاژ و جریان، جزو مهم‌ترین سیگنال‌های داده‌برداری در شناسایی عیب محسوب می‌شوند. هزینه کم داده‌برداری و دسترسی به اطلاعات دقیق از ماشین برای پایش وضعیت، این سیگنال‌ها را در مرتبه بالاتری نسبت به روش‌های دیگر قرار داده است. یکی از روش‌های پُرکاربرد صنعتی در سال‌های اخیر، روش تحلیل اثرات سیگنال جریان موتور (MCSA) است که با بررسی دقیق سیگنال‌های جریانی، نامتقارنی‌های مختلف در ماشین را می‌یابد [۱۵، ۱۶]. درخور ذکر است این روش از توانایی مناسبی در تشخیص مغناطیس‌زدایی کامل به دلیل نداشتن عدم تقارن در یک ناحیه خاص برخوردار نیست [۱۷]. تبدیل فوری، یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های شناسایی عیب بر پایه سیگنال است که در شناسایی برای سیگنال‌های نایستا از توانایی مناسبی برخوردار نیست [۳]. در صنعت سیگنال، ایستایی وجود ندارد و ماشین‌های الکتریکی همواره تحت تغییرات بار و سرعت‌اند؛ بنابراین، روش‌های زمان-فرکانسی مختلفی همچون تبدیل فوری کوتاه‌مدت (STFT)، تبدیل موجک، تبدیل هیلبرت، فیلترکالمن و تجزیه مد تجربی (EMD) استفاده می‌شوند [۱۸-۲۰]. در رویکردهایی که از تبدیل فوری کوتاه‌مدت و تبدیل موجک استفاده شده بود، به دلیل نیاز به تنظیم پارامترهای مختلف از جمله طول پنجره و رزولوشن، این روش‌ها از محبوبیت زیادی برخوردار نشدند. همچنین، شبکه‌های عصبی، منطق فازی، ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) و نزدیک‌ترین همسایگی (KNN) از جمله روش‌های دیگر شناسایی عیب با استفاده از سیگنال‌ها محسوب می‌شوند.

یکی از مهم‌ترین اهداف استفاده از روش‌های مختلف شناسایی عیب در صنعت، تشخیص دقیق محل عیب است؛

مغناطیس‌زدایی است. شرایط بهره‌برداری نامناسب، گرمایش بیش از حد ماشین و فرسودگی مغناطیس‌های دائم از جمله دلایل وقوع مغناطیس‌زدایی در ماشین‌ها هستند. مغناطیس‌زدایی باعث اختلال در توزیع شار، ایجاد نیروی نامتعادلی و ایجاد هارمونیک‌های مرتبه بالا در ماشین می‌شود [۳]. در صورت ادامه بهره‌برداری از ماشین در این شرایط، اختلال در عملکرد مبدل‌ها و دیگر اجزای ماشین دور از ذهن نیست؛ بنابراین، شناسایی دقیق و به‌موقع این عیب، ماشین و سیستم را از فرارگیری در یک شرایط بهره‌برداری نامطلوب نجات می‌دهد. مغناطیس‌زدایی جزو عیوبی است که وقوع آن عمدتاً به کندی و تدریجی در طول سالیان رخ می‌دهد؛ بنابراین، شناسایی این عیب به تحلیل و بررسی دقیقی نیاز دارد تا بتوان در همان مراحل اولیه وقوع، آن را شناسایی و از پیشرفت عیب در ماشین جلوگیری کرد. روش‌های شناسایی عیب به‌صورت عمده به دو دسته اصلی، بر پایه سیگنال و مدل تقسیم‌بندی می‌شوند که روش‌های بر پایه سیگنال از محبوبیت بیشتری در شناسایی عیب برخوردارند. در روش‌های شناسایی بر پایه مدل، پارامترهای ماشین به‌وسیله مدل ریاضی ماشین تخمین زده و با خروجی اندازه‌گیری‌شده مقایسه می‌شوند. فیلتر کالمن، شار پیوندی تخمین زده شده روتور و تحلیل ساختاری از جمله روش‌های شناسایی عیب بر پایه مدل‌اند [۴-۶].

در روش‌های بر پایه سیگنال با استخراج سیگنال از پایانه ماشین و اعمال روش‌های مختلف تجزیه و تحلیل سیگنالی، شناسایی عیب انجام می‌گیرد. اندازه‌گیری تغییرات شار فاصله هوایی با استفاده از سنسورهای اثر هال و پروب‌های اندازه‌گیری شار جزو ساده‌ترین و مطمئن‌ترین راه‌های شناسایی مغناطیس‌زدایی در ماشین‌ها هستند؛ ولی این روش‌ها به دلیل استفاده از تجهیزات اضافی در ساختار ماشین و افزایش شدید هزینه باز و بسته کردن آن از استقبال زیادی برخوردار نیستند [۳]. در [۷-۱۰] روش‌های زیادی بر پایه اندازه‌گیری شار و میدان مغناطیسی فاصله هوایی ارائه شده است. با توجه به اینکه اختلال در میدان مغناطیسی فاصله هوایی از نتایج مغناطیس‌زدایی جزئی است که باعث افزایش نیروی نامتعادلی و افزایش ارتعاش و لرزش در

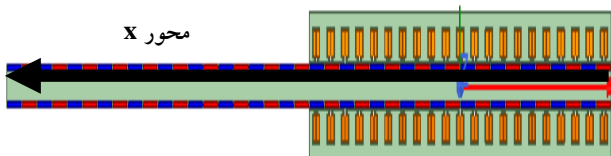
در این مقاله با در نظر گرفتن یک نقطه کاری پایین تر از نقطه زانویی عیب مغناطیس زدایی جزئی در مغناطیس دائم نئودیمیم - آهن - بور مدل می شود.



شکل (۱): منحنی B-H مغناطیس دائم با تغییر نقطه کار

۳- ژنراتور سنکرون خطی مغناطیس دائم

انرژی امواج دریا یکی از انرژی های در دسترس بشر و از منابع آبی بوده است که به دلیل محدودیت منابع فسیلی و تغییرات اقلیمی و تقاضای بالای انرژی از محبوبیت بالایی برخوردار است. انرژی حاصل از امواج به دلیل ویژگی هایی چون قابلیت دسترسی بالا، پیش بینی پذیر بودن و چگالی توان بالا در میان انرژی های نو، جایگاه ویژه ای دارد [۲]. در این مقاله، یک ژنراتور خطی مغناطیس دائم دو طرفه مسطح بهینه با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ماکسول به صورت دوبعدی 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. درخور ذکر است در طراحی از سیم پیچی متمرکز دولایه فاقد هم پوشانی روی دندان استفاده شده است.



شکل (۲): یک ژنراتور سنکرون خطی مسطح دو طرفه بهینه با سیم پیچی دولایه فاقد هم پوشانی روی دندان

از جمله روش های مدل سازی ماشین، روش اجزای محدود (FEM) است. این روش دارای دقت بسیار زیادی

زیرا تعیین دقیق محل عیب باعث جلوگیری از صرف وقت و هزینه مهندسی و نیز آسیب نرسیدن به اجزای مختلف ماشین به دلیل باز و بسته کردن های غیر ضروری خواهد شد.

در این مقاله یک الگوریتم جدید شناسایی برای تشخیص مکان مغناطیس دائم معیوب در یک ژنراتور سنکرون خطی مغناطیس دائم با استفاده از تبدیل بسته ای موجک ارائه می شود. برای ارزیابی راهکار ارائه شده از سناریو خطاهای مختلف استفاده شده است.

این مقاله در قالب ۷ بخش سازماندهی شده است. در قسمت ۱ مروری بر روش های تشخیص عیب، انجام و هدف از ارائه مقاله مشخص شد. در بخش ۲ پدیده مغناطیس زدایی به صورت مختصر، بررسی و ژنراتور خطی شبیه سازی شده در این مقاله در بخش ۳ معرفی شد. در قسمت ۴، تئوری تبدیل بسته ای موجک، ارائه و در قسمت ۵، الگوریتم شناسایی بررسی شد. شبیه سازی و نتیجه گیری به ترتیب در بخش های ۶ و ۷ ارائه شدند.

۲- مغناطیس زدایی

به صورت کلی مغناطیس زدایی به دو دسته جزئی^۱ و کامل (کلی)^۲ دسته بندی می شود. مغناطیس زدایی جزئی به حالتی گفته می شود که یک مغناطیس دائم دچار مغناطیس زدایی شود. بیشتر مغناطیس های دائم به کار رفته در ماشین های جدید از نوع نئودیمیم - آهن - بور (Nd-Fe-B)، 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 نمونه ای در شکل ۱، پدیده مغناطیس زدایی را به صورت بهتری تفسیر می کند [۳]. با توجه به شکل ۱، نقطه تقاطع منحنی مغناطیس دائم با خط بار (۱)، نقطه کار ماشین را تعیین می کند. با توجه به شکل ۱، 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^۳ است و در صورتی که نقطه کار ماشین به نقطه b زیر نقطه زانویی برسد، ماشین دچار مغناطیس زدایی برگشت ناپذیر^۴ می شود.

۴ تشخیص مغناطیس دائم معیوب در یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم با سیم پیچی دولایه با استفاده از تبدیل بسته‌ای موجک

آنها در بازه کوچکی متمرکز و به سرعت میرا می‌شوند؛ بنابراین، با انتخاب مناسب موجک‌های مادر می‌توان تقریب‌زنی بهتری در مقایسه با تبدیل فوریه انجام داد. برای کاربردهایی همچون تجزیه و تحلیل سیگنال‌های گسسته می‌توان از تبدیل موجک گسسته استفاده کرد. تبدیل موجک گسسته عبارت است از [۲۲]:

$$DWT(m, n) = \frac{1}{m\sqrt{a_0}} \sum_k x(kT) \Psi\left(\frac{kT - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (1)$$

که در آن، n گام انتقال، m گام مقیاس و Ψ تابع موجک گسسته است. برای داشتن یک محاسبه پربازده می‌توان در محاسبات به جای a_0 و b_0 به ترتیب ۲ و ۱ وارد کرد [۲۳]، که در این حالت به آن تبدیل موجک متعامد دوتایی گفته می‌شود. الگوریتم تبدیل بسته‌ای موجک یک عملکرد و کاربرد مناسب از تبدیل موجک گسسته ارائه می‌دهد که با تبدیل موجک گرفتن از سطح‌های مختلف و باندهای فرکانسی مختلف و استفاده از فیلترهای پایین‌گذر (h) و بالاگذر (g) می‌توان اطلاعات بهتری از سیگنال مدنظر برداشت کرد. با استفاده از این الگوریتم، سیگنال $x(t)$ به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود [۲۱-۲۴].

$$x(t) = \sum_{j=1}^{j_0} \sum_k c_{j_0}(j, k) \Phi_{(j_0, k)}(t) + \sum_{j=1}^{j_0} \sum_k d(j, k) \Psi_{(j, k)}(t) \quad (2)$$

که در آن، $\Phi(t)$ تابع مقیاس‌کننده، $\Psi(t)$ تابع پایه موجک، $c(k)$ ضرایب تقریبی و $d(k)$ ضرایب جزئی‌اند. همچنین، در این رابطه، k ضریب تبدیل موجک گره مدنظر و j_0 پایین‌ترین باند شامل فرکانس اصلی است. تبدیل موجک سطح j ام شامل سیگنالی است که در باند فرکانسی j ام قرار دارد. در این روش، ضرایب به نسبت مساوی در همه باندهای فرکانسی تقسیم می‌شوند. به‌طور کلی، شماتیک این روش به صورت شکل ۳ است که فرایند تجزیه سیگنال برای هر گره به صورت همسان ادامه پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، فرایند تجزیه سیگنال برای هر باند فرکانسی به صورت مشابه انجام می‌شود. در این روش، ابتدا با استفاده از دو

در شبیه‌سازی است و در مقابل دارای زمان شبیه‌سازی بیشتری است [۳]. با توجه به اینکه دقت در شناسایی عیب، از اهمیت زیادی برخوردار است، این روش روش مدلسازی عیب در نظر گرفته شده است.

۴- تبدیل بسته‌ای موجک

جدول (۱): اطلاعات طراحی ژنراتور

مقدار	پارامتر
۲۰	تعداد قطب زیر ترانسلا تور در هر طرف
۲۱	تعداد شیار
۰,۳۵	تعداد شیار زیر هر قطب برای هر فاز
۰,۹۴۵	ضریب سیم پیچی
۱۳,۵۲۵	فرکانس کاری ماشین (هرتز)
۳	توان خروجی ماشین (کیلووات)
۲۳۰	مقدار موثر ولتاژ خروجی ژنراتور
۵۱,۸	گام قطب (میلی متر)
۴۹,۳	گام شیار (میلی متر)
۴,۲	ارتفاع مغناطیس دائم (میلی متر)
۱۰۳۵,۵	طول استاتور (میلی متر)
۱۰۴,۸	عرض استاتور (میلی متر)

موجک‌ها دسته‌ای از توابع ریاضی‌اند که برای تجزیه سیگنال‌های پیوسته و گسسته به مؤلفه‌های فرکانسی خود براساس دو عمل اصلی انتقال و مقیاس به کار می‌روند. در این تبدیل، رزولوشن هر مؤلفه برابر با مقیاس آن است. تبدیل موجک، تجزیه یک تابع بر مبنای توابع موجک است [۲۱]. موجک که موجک‌های دختر شناخته می‌شوند، نمونه‌های انتقال یافته و مقیاس شده یک تابع موجک مادر با طول متناهی و اعوجاجی به شدت میرا هستند. به صورت کلی تبدیل موجک نسبت به تبدیل فوریه دارای خصوصیت محلی سازی بهتری است؛ برای مثال، یک تابع با مقدار ماکزیمم نامتناهی دارای تعداد ضرایب بی‌نهایتی جهت تقریب‌زنی با استفاده از تبدیل فوریه است؛ زیرا توابع سینوسی و کسینوسی تبدیل فوریه دارای دامنه ثابتی‌اند؛ در حالی که توابع موجک توابعی‌اند که بیشتر انرژی

۵- لگوریتیم شناسایی مغناطیس دائم معیوب

گام اول در زمینه شناسایی عیب در روش‌های بر پایه سیگنال، تعیین سیگنال شناساگر است. طبق روابط (۶) و (۷) داریم:

$$E = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (6)$$

$$\phi \propto B \quad (7)$$

که در این روابط ϕ ، B و N به ترتیب شار، میدان مغناطیسی و تعداد دور سیم‌پیچی هستند.

با توجه به اینکه طبق رابطه (۶)، ولتاژ القایی سیم‌پیچی ارتباط مستقیمی با شار دور پیوندی سیم‌پیچی دارد و نیز طبق رابطه (۷)، شار ارتباط مستقیمی با چگالی شار فاصله‌هایی تولیدی با مغناطیس دائم دارد، سیگنال ولتاژ القایی به سرعت از تغییرات مغناطیسی مغناطیس‌های دائم ماشین تأثیر می‌پذیرد.

در گام بعدی، تعیین رویکرد شناسایی از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به اینکه سیم‌پیچی ماشین در هنگام عبور مغناطیس دائم معیوب، با تغییرات شار مواجه خواهد شد، بررسی تغییرات ولتاژ القایی در هر گام قطب رویکرد شناسایی مغناطیس دائم معیوب است؛ بنابراین، می‌توان با بررسی تغییرات ولتاژ القایی سیم‌پیچی هر فاز برای هر گام قطب در باند فرکانسی که بیشترین تغییرات در آن مشخص است، از محل قرارگیری مغناطیس دائم معیوب آگاه شد.

۵-۱- تعیین باند فرکانسی مطلوب

برای افزایش دقت در شناسایی و تعیین حساس‌ترین باند فرکانسی، تجزیه سیگنال با استفاده از تبدیل بسته‌ای موجک با اضافه شدن ۲ سطح تجزیه به رابطه (۳) ادامه می‌یابد. در ادامه با بررسی باندهای فرکانسی در یک گام قطب، باند فرکانسی مناسب برای شناسایی عیب مشخص می‌شود. طبق رابطه (۳) داریم:

فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر، سیگنال اصلی به دو قسمت تقسیم می‌شود. در سطح بعدی و با استفاده از فیلترهای یادشده، ۴ گره ایجاد می‌شود؛ بنابراین، با تجزیه سیگنال در باندهای فرکانسی برابر می‌توان درباره تغییرات جزئی در سیگنال‌های بررسی شده نظر داد. تعداد سطوح تجزیه سیگنال براساس رابطه (۳) است [۲۵].

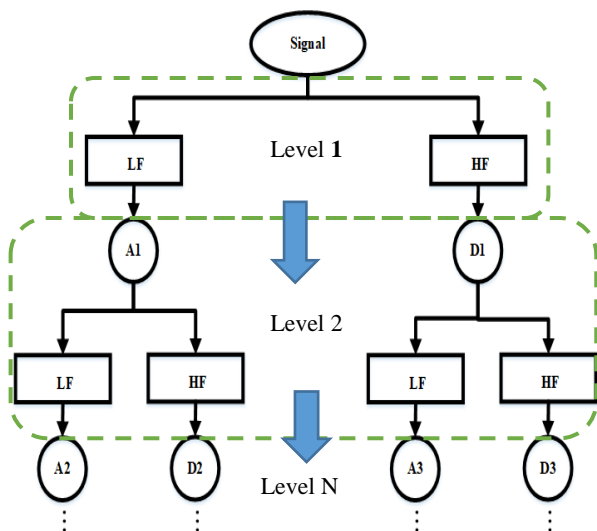
$$n_{ls} = \text{int} \left(\frac{\log f_s/f}{\log 2} \right) \quad (3)$$

در این رابطه f_s فرکانس نمونه‌برداری و f فرکانس کاری ماشین است. اگر سیگنال $x(t)$ تابع چگالی انتگرال‌پذیر باشد، آنگاه سیگنال مدنظر به صورت رابطه (۴) نوشته می‌شود [۲۶، ۲۷].

$$x(t) = \sum_k c_{j_0,k} \Phi_{j_0,k}(t) + \sum_{j \geq j_0} \sum_k d_{j,k} \Psi_{j,k}(t) \quad (4)$$

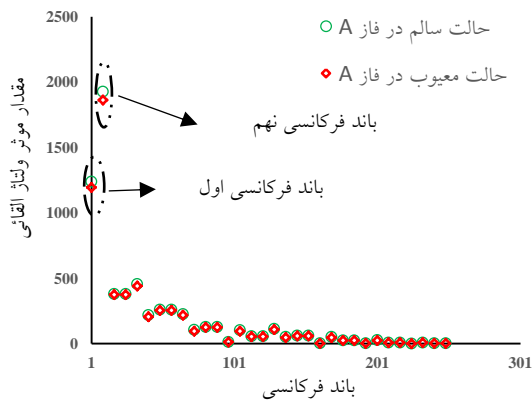
مقدار موثر سیگنال مدنظر با استفاده از رابطه (۴) به صورت رابطه (۵) نوشته می‌شود که در آن، n شماره گره و j سطح تجزیه سیگنال است.

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{n=1}^{2^j} \sum_k d_{n,k}^2} \quad (5)$$



شکل (۳): تجزیه سیگنال با استفاده از تبدیل بسته‌ای موجک

۶ تشخیص مغناطیس دائم معیوب در یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم با سیم پیچی دولایه با استفاده از تبدیل بسته‌ای موجک

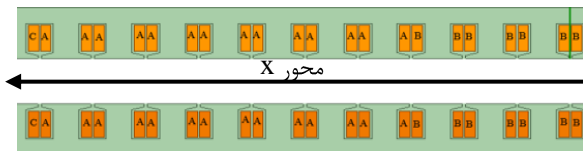


شکل (۵): تغییرات مقدار مؤثر ضرایب ولتاژ القایی فاز A در

باند فرکانسی نهم

بنابراین، با توجه به ساختار دوطرفه استاتور، نوع سیم پیچی ماشین و نیز نحوه قرارگیری بازوهای سیم پیچی در شکل ۶، رابطه زیر برای شناسایی مغناطیس دائم معیوب ارائه می‌شود.

$$N_F = \begin{matrix} N_A + N_B + N_C - (N_A \cap N_B) \\ - (N_B \cap N_C) - (N_A \cap N_C) \end{matrix} \quad (9)$$

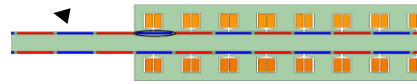


شکل (۶): نمایی از یک بخش استاتور برای بررسی نحوه قرارگیری

سیم پیچی در ژنراتور سنکرون خطی مغناطیس دائم

مقدار محاسبه شده از رابطه (۳) = سطح تجزیه سیگنال

$$+2 = \text{int} \left(\frac{\log 1000 / 13.525}{\log 2} \right) + 2 = 8 \quad (8)$$



شکل (۸): نمایی از ژنراتور طراحی شده با

مغناطیس دائم مغناطیس زدایی شده شماره ۲۰ از

راست محور X

بنابراین، $2^8 = 256$ باند فرکانسی در سطح ۸ داریم. شکل ۵ تغییرات ولتاژ القایی فاز A را برای باندهای فرکانسی مختلف در یک گام قطب در حالت سالم و ۶۰ درصد مغناطیس زدایی برای مغناطیس دائم شماره ۲۰ نشان می‌دهد که در شکل ۴ مشخص است.

با توجه به شکل ۵، برای اولین گام قطب، باندهای فرکانسی اول و نهم در مقایسه با دیگر باندهای فرکانسی، تغییرات را بیشتر نشان می‌دهند که باند فرکانسی نهم به دلیل حساسیت بیشتر به عیب در مقایسه با باند فرکانسی اول، به عنوان باند فرکانسی مطلوب انتخاب شده است.

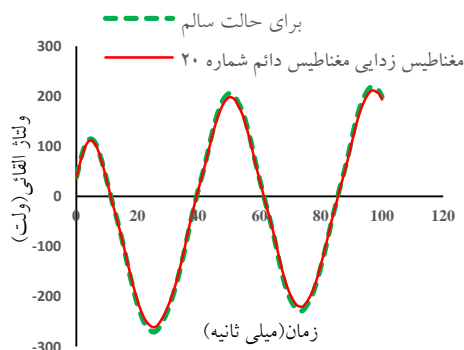
۵-۲- الگوریتم تشخیص مغناطیس دائم معیوب

با استفاده از نمودار تغییرات ولتاژ القایی هر فاز در باند فرکانسی نهم برای ۲۰ گام قطب، شناسایی مغناطیس دائم معیوب انجام می‌شود. باید توجه داشت با توجه به اینکه سیم پیچی از نوع دولایه در هر شیار است، ممکن است در یک لحظه و در یک گام قطب، تغییرات شار در دو سیم پیچی فاز با همدیگر دیده شوند.

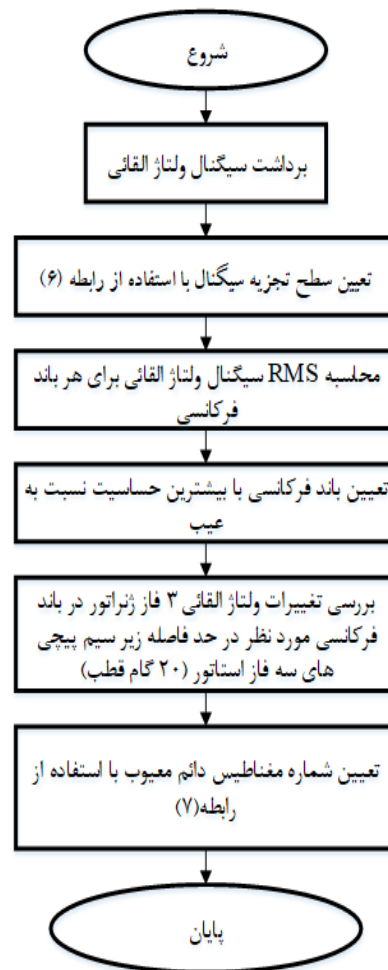
چنانکه از شکل ۸ دیده می‌شود، ولتاژ القایی در حالت سالم و مغناطیس‌زدایی به صورت تقریبی روی هم قرار دارند و امکان برداشت اطلاعات زیادی از این اشکال موج وجود ندارد. بهتر است برای بررسی دقیق‌تر، مطالعه‌ای روی طیف فرکانسی ولتاژ القایی ماشین نیز انجام شود. شکل ۹ طیف فرکانسی ولتاژ القایی را برای حالت سالم و معیوب نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۹، طیف ولتاژ القایی برای دو حالت سالم و معیوب نیز حاوی اطلاعات مفیدی برای شناسایی نیست؛ زیرا مغناطیس‌زدایی با شدت بسیار کمی اتفاق افتاده است و امکان تشخیص در این شکل موج نیز وجود ندارد.

در گام بعدی، برای مشخص شدن این موضوع که تبدیل بسته‌ای موجک تا چه حد مؤثر است، ضرایب اول در لایه دوم (۱-۲) برای حالت سالم و معیوب در شکل ۱۰ ارائه شده‌اند.

با توجه به شکل ۱۰، مغناطیس‌زدایی، تغییراتی را در ضریب حالت معیوب نسبت به سالم ایجاد کرده است و در صورتی که این نحوه تجزیه ادامه یابد، با تغییرات بیشتری همراه است و امکان جداسازی بهتری را برای تشخیص عیب می‌دهد. در ادامه، توانایی تشخیص مغناطیس‌زدایی مغناطیس دائم معیوب در سه مکان (ابتدا، انتها و خارج استاتور) بررسی می‌شود. ابتدا برای مغناطیس دائم شماره ۲۰ با ۴۰ درصد مغناطیس‌زدایی - که در شکل ۴ نشان داده شده است - تشخیص مکان عیب بررسی می‌شود. تغییرات برای سیم‌پیچی سه‌فاز به صورت شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۱، تعداد نقاط منحرف‌شده از حالت عادی برای فازهای A، B و C به ترتیب ۷، ۸، ۸ عدد است. همچنین، تعداد نقاط مشترک برای فازهای A، B و فازهای C، B نیز به ترتیب ۱ و ۱ عدد است.



شکل (۸): تغییرات ولتاژ القایی برای حالت سالم و مغناطیس‌زدایی مغناطیس دائم شماره ۲۰



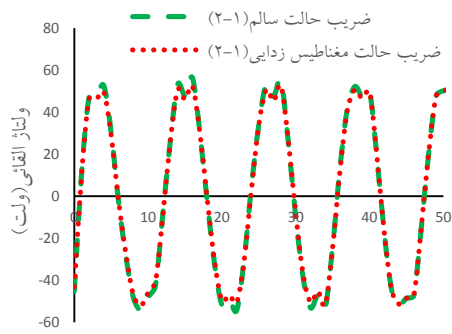
شکل (۷): الگوریتم شناسایی مغناطیس دائم معیوب

در این رابطه، به ترتیب N_C, N_B, N_A تعداد نقاط منحرف‌شده برای سیم‌پیچی فازهای A، B، C و $N_A \cap N_B$ تعداد نقاط مشترک فازهای A، B، C و $N_B \cap N_C$ تعداد نقاط مشترک فازهای A، B و $N_A \cap N_C$ تعداد نقاط مشترک فازهای A، B، C است. با توجه به شکل ۶، در صورتی که تغییرات ولتاژ القایی از ابتدای نمودار مقدار مؤثر ولتاژ القایی گام قطب شروع شود، می‌باید شمارش از سمت راست استاتور صورت گیرد؛ بنابراین، الگوریتم مدنظر برای شناسایی مغناطیس دائم معیوب به صورت شکل ۷ طراحی می‌شود.

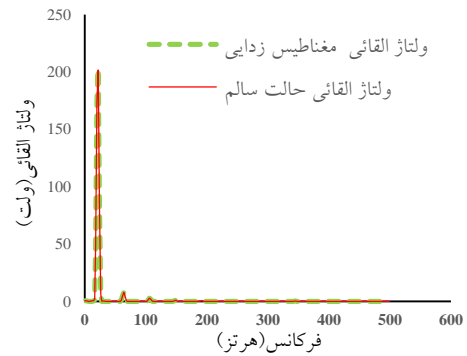
۶- شبیه سازی

در این قسمت، ابتدا ولتاژ القایی برای حالت سالم و حالت مغناطیس‌زدایی مغناطیس دائم شماره ۲۰، بررسی، سپس روش ارائه‌شده، مطالعه و توانایی آن سنجیده می‌شود.

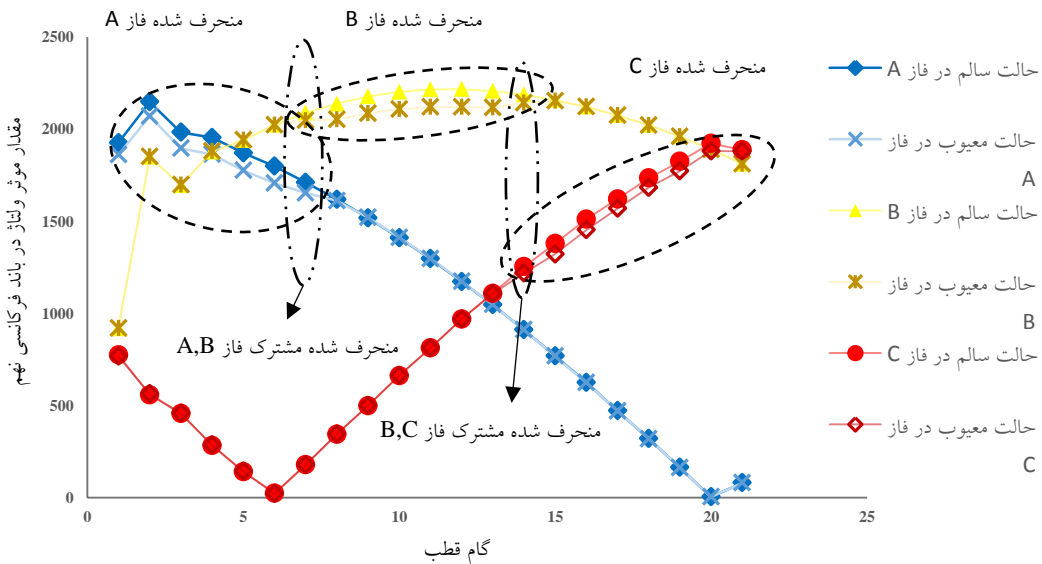
۸ تشخیص مغناطیس دائم معیوب در یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم با سیم پیچی دولایه با استفاده از تبدیل بسته‌ای موجک



شکل (۱۰): شکل موج ضرایب تبدیل بسته‌ای موجک مربوط به سطح دوم ضریب اول (۲-۱)



شکل (۹): طیف فرکانسی ولتاژ القایی برای حالت سالم و مغناطیس زدایی مغناطیس دائم شماره ۲۰

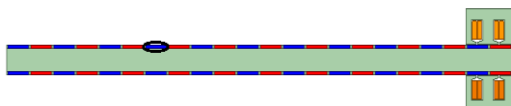


شکل (۱۱): بررسی تغییرات ولتاژ القایی در باند فرکانسی نهم برای مغناطیس دائم شماره ۲۰ از راست

$$N_F = \left(\begin{array}{l} N_A + N_B + N_C - (N_A \cap N_B) \\ - (N_B \cap N_C) - (N_A \cap N_C) \\ = 7 \end{array} \right) \quad (10)$$

طبق رابطه (۸) داریم:

$$N_F = \left(\begin{array}{l} N_A + N_B + N_C - (N_A \cap N_B) \\ - (N_B \cap N_C) - (N_A \cap N_C) \end{array} \right) = 20 \quad (9)$$



شکل (۱۲): نمایی از ژنراتور طراحی شده با مغناطیس دائم مغناطیس زدایی شده شماره ۷ از چپ (خارج استاتور)

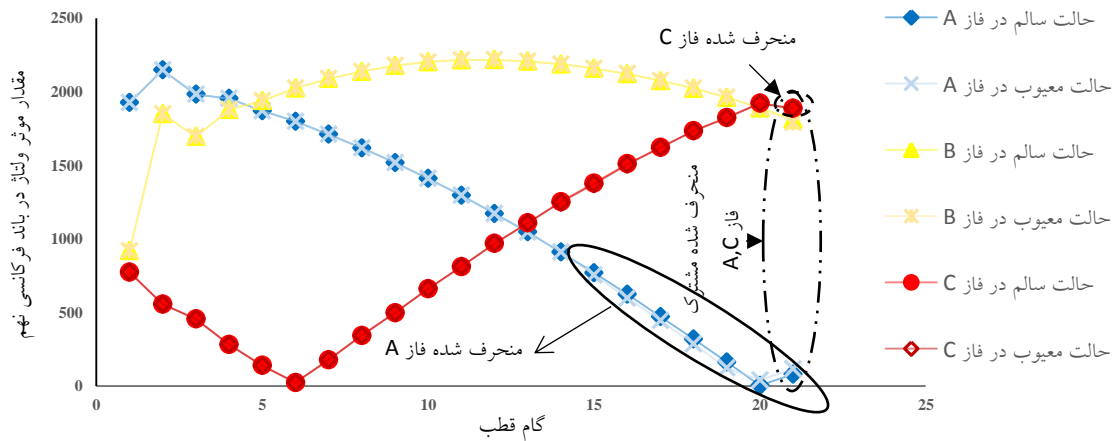
بنابراین، ۲۰ گام از سیم پیچی در حالت غیرعادی است. این تعداد گام قطب نشان‌دهنده شماره مغناطیس دائم مدنظر است. با توجه به شکل ۱۱، با توجه به اینکه تغییرات ولتاژ القایی از ابتدای نمودار شروع شده است، شماره مغناطیس دائم، ۲۰ از سمت راست محور X است.

شکل ۱۲، اعمال مغناطیس زدایی روی مغناطیس دائم

نمودار شکل ۱۳ پایان پذیرفته است، شماره مغناطیس دائم معیوب ۷ از چپ است؛ بنابراین، روش ارائه شده توانست عملکرد مناسبی از خود در تشخیص مغناطیس دائم معیوب در این حالت نشان دهد. در ادامه، مغناطیس دائم شماره ۱ از راست با ۵۰ درصد مغناطیس زدایی بررسی می شود که در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

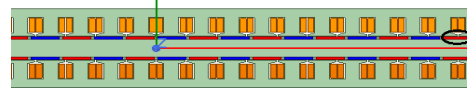
شماره ۷ از چپ با ۶۰ درصد مغناطیس زدایی خارج از استاتور را نشان می دهد. با توجه به نمودار شکل ۱۳ که تغییرات ولتاژ القایی سیم پیچی سه فاز را نشان می دهد، برای فاز A, B, C به ترتیب ۰، ۷، ۱ عدد نقطه منحرف شده داریم که البته ۱ عدد مشترک برای فازهای A, C نیز وجود دارد؛ بنابراین، با استفاده از رابطه (۸) داریم:

همچنین، با توجه به اینکه مغناطیس زدایی از راست



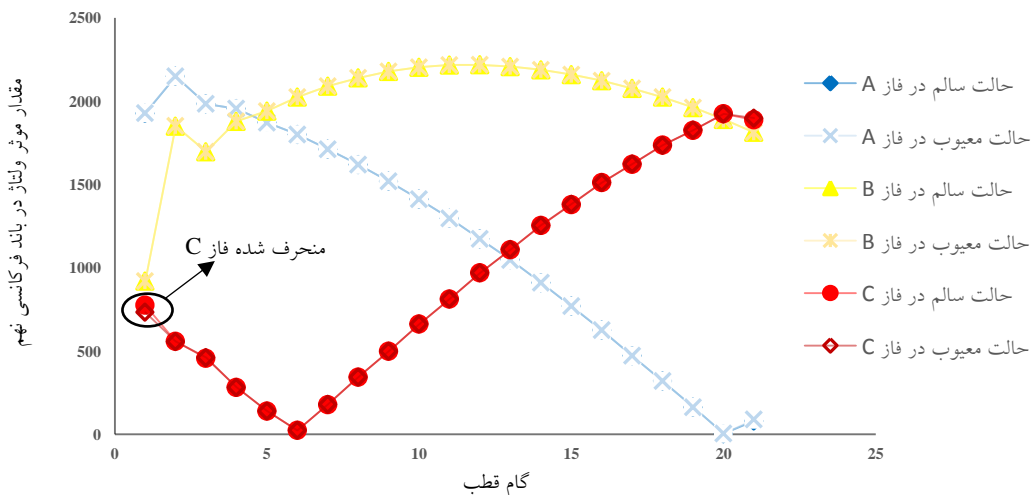
شکل (۱۳): بررسی تغییرات ولتاژ القایی در باند فرکانسی نهم برای مغناطیس دائم شماره ۷ از چپ

فاز A, B, C به ترتیب ۰، ۷ و ۱ است و تعداد نقاط مشترک وجود ندارد. همچنین، با توجه به اینکه مغناطیس زدایی از ابتدای نمودار شروع شده است، شماره مغناطیس دائم معیوب ۱ از راست است.



شکل (۱۴): نمایی از ژنراتور طراحی شده با مغناطیس دائم مغناطیس زدایی شده شماره ۱ از راست

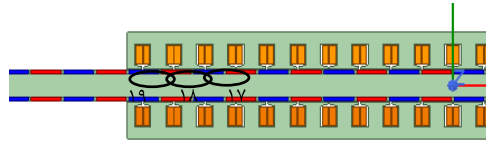
شکل ۱۵ نمودار تغییرات ولتاژ القایی را برای این حالت نشان می دهد. تعداد نقاط منحرف شده از حالت عادی برای



۱۰ تشخیص مغناطیس دائم معیوب در یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم با سیم پیچی دولایه با استفاده از تبدیل بسته‌ای موجک

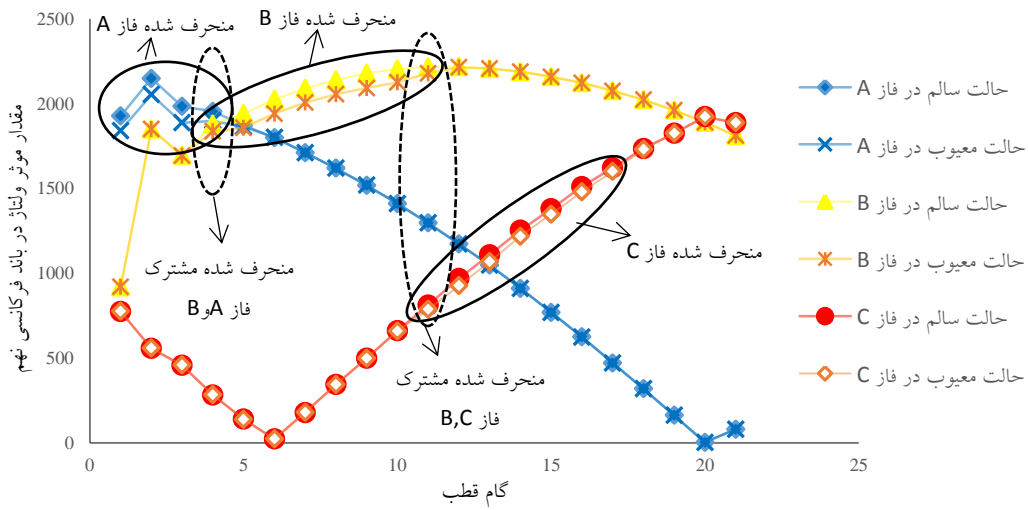
شکل (۱۵): بررسی تغییرات ولتاژ القایی در باند فرکانسی نهم برای مغناطیس دائم شماره ۱ از راست

مغناطیس زدایی روی مغناطیس دائم شماره ۱۷ اعمال می‌شود. با توجه به باند فرکانسی نهم ولتاژ القایی در شکل ۱۷، نخست مغناطیس زدایی از سمت چپ نمودار شروع شده است؛ این موضوع نشان می‌دهد شماره مغناطیس دائم از سمت راست می‌باید شمرده شود. دوم، برای فازهای A, B و C به ترتیب ۴، ۸ و ۷ گام منحرف شده وجود دارد و سوم، برای فازهای B و A، ۱ گام و برای فازهای C و B، ۱ گام منحرف شده مشترک وجود دارد؛ بنابراین، طبق رابطه (۸)، شماره ۱۷ از سمت راست محاسبه می‌شود که کاملاً صحیح است.

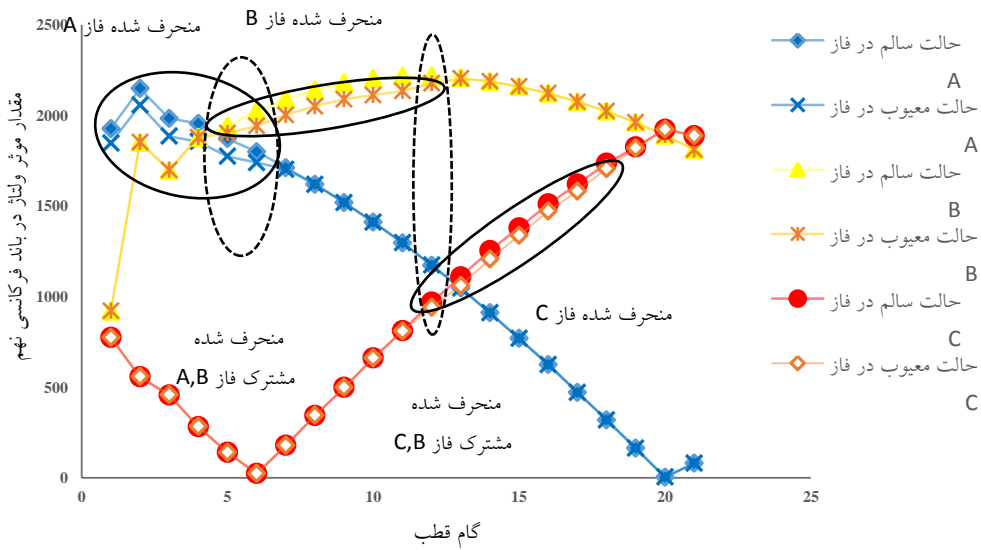


شکل (۱۶): نمایی از ژنراتور طراحی شده با مغناطیس‌های دائم مغناطیس زدایی شده شماره ۱۷، ۱۸ و ۱۹ از راست

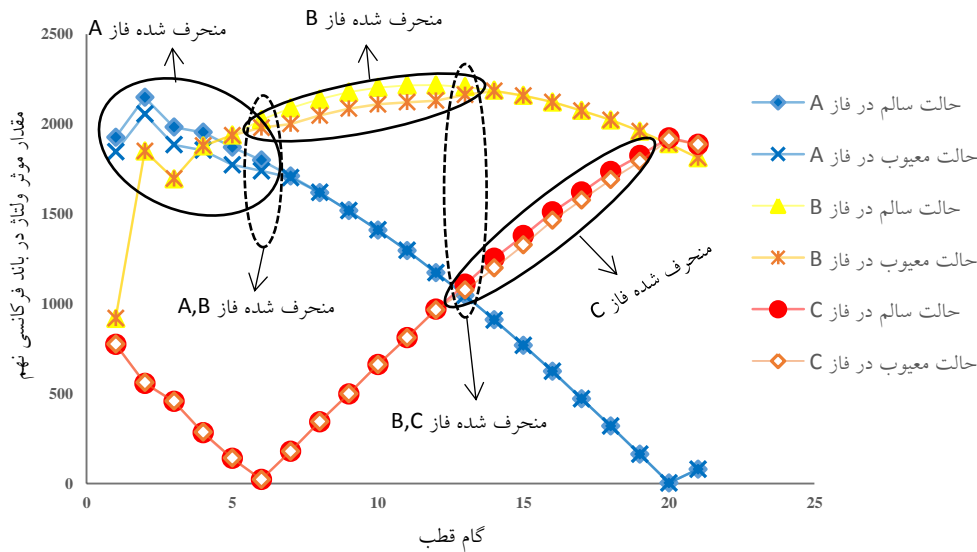
همان‌گونه که تا کنون دیده شد این روش در تعیین مکان عیب از توانایی پذیرفتنی برخوردار است. نکته مهم دیگر در ارزیابی این روش، دقت تشخیص این روش است. این موضوع با بررسی سه مغناطیس دائم معیوب متوالی درخور بررسی است. سه مغناطیس دائم معیوب متوالی با شماره‌های ۱۷، ۱۸ و ۱۹ در شکل ۱۶ بررسی می‌شود. ابتدا



شکل (۱۷): بررسی تغییرات ولتاژ القایی در باند فرکانسی نهم برای مغناطیس دائم شماره ۱۷ از راست



شکل (۱۸): بررسی تغییرات ولتاژ القایی در باند فرکانسی نهم برای مغناطیس دائم شماره ۱۸ از راست



شکل (۱۹): بررسی تغییرات ولتاژ القایی در باند فرکانسی نهم برای مغناطیس دائم شماره ۱۹ از راست

۷- نتیجه گیری

در این مقاله، یک راهکار جدید برای تشخیص مغناطیس زدایی با تمرکز بر تشخیص مکان عیب با استفاده از تبدیل موجک بسته‌ای در یک ژنراتور سنکرون خطی مغناطیس دائم مسطح دوطرفه با سیم پیچی دولایه ارائه شد. در این روش، با استفاده از تجزیه سیگنال به باندهای فرکانسی مختلف، باند فرکانسی مؤثر در تشخیص عیب، شناسایی و تشخیص عیب با استفاده از آن انجام می‌شود. باند فرکانسی نهم در سطح هشتم تجزیه سیگنال ولتاژ القایی، به دلیل حساسیت بالا نسبت به وقوع مغناطیس زدایی به عنوان معیار تشخیص عیب مشخص شد. با توجه به نوع سیم پیچی ماشین، یک الگوریتم شناسایی برای تشخیص مغناطیس دائم معیوب، ارائه و توانایی این الگوریتم برای درصدهای مختلف و مکان‌های مختلف عیب در ماشین (زیر و خارج استاتور) ارزیابی شد. همچنین، دقت این روش برای تشخیص دقیق مکان عیب برای سه مغناطیس دائم متوالی بررسی و توانایی آن تأیید شد.

مراجع

- [1] Y. Du, M. Cheng, K. T. Chau, X. Liu, F. Xiao, and W. Zhao, "Linear primary permanent magnet vernier machine for wave energy conversion," *IET*

در شکل ۱۸، نمودار ولتاژ القایی باند فرکانسی نهم مغناطیس دائم شماره ۱۸ نشان داده شده است. درستی نمودار این مغناطیس دائم نیز مانند حالت‌های قبلی با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود. با توجه به شکل مذکور، برای فازهای A, B و C به ترتیب ۶، ۸ و ۷ تعداد نقاط مشترک برای فازهای A, B, ۲ گام و برای فازهای C, B, ۱ گام منحرف شده است. همچنین، با توجه به اینکه مغناطیس زدایی از سمت چپ نمودار شروع شده است، شماره مغناطیس دائم معیوب به درستی ۱۸ از سمت راست است

در آخرین گام، مغناطیس زدایی برای مغناطیس دائم شماره ۱۹ بررسی می‌شود. با توجه به شکل ۱۹، مغناطیس زدایی از سمت چپ نمودار شروع شده و این به معنی شمارش از سمت راست است. برای فازهای A, B و C به ترتیب ۶، ۸ و ۷، تعداد نقاط مشترک برای فازهای A, B, ۱ گام و برای فازهای C, B, ۱ نیز گام منحرف شده است. با توجه به رابطه (۸)، شماره مغناطیس دائم معیوب به درستی ۱۹ از سمت راست است؛ بنابراین، با توجه به این ۳ نمونه پایانی و نیز مثال‌های قبلی، دقت تشخیص این روش نیز تأیید می‌شود.

- in PM synchronous machines with static eccentricity and partial demagnetization using field reconstruction method," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 2, pp. 934-944, 2012.
- [14] B. Kim, K. Lee, J. Yang, S. B. Lee, E. J. Wiedenbrug, and M. R. Shah, "Automated detection of rotor faults for inverter-fed induction machines under standstill conditions," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 47, No. 1, pp. 55-64, 2010.
- [15] 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.
- [16] G. Kliman and J. Stein, "Methods of motor current signature analysis," *Electric Machines and power systems*, Vol. 20, No. 5, pp. 463-474, 1992.
- [17] T. Goktas, M. Zafarani, and B. Akin, "Discernment of broken magnet and static eccentricity faults in permanent magnet synchronous motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 31, No. 2, pp. 578-587, 2016.
- [18] 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.
- [19] B. M. Ebrahimi and J. Faiz, "Demagnetization fault diagnosis in surface mounted permanent magnet synchronous motors," *IEEE transactions on Magnetics*, Vol. 49, No. 3, pp. 1185-1192, 2012.
- [20] 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.
- [21] K. Butler and S. Dey, "Using Discrete Wavelet Transforms to Characterize Equipment Failures for Maintaining Distribution System Reliability," in *Proc. 4th Int. Conf. Power Syst. Oper. Planning*, 2001, pp. 104-110.
- [22] 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.
- [23] J. Rosero, L. Romeral, E. Rosero, and J. Urresty, "Fault Detection in dynamic conditions by means of Discrete Wavelet Decomposition for PMSM running under Bearing Damage," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE*, 2009, pp. 951-956: IEEE.
- [24] V. Pham and K. Wong, "Wavelet-transform-based algorithm for harmonic analysis of power system waveforms," *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 146, No. 3, pp. 249-254, 1999.
- [25] Z. Ye, B. Wu, and A. Sadeghian, "Current *Electric Power Applications*, Vol. 9, No. 3, pp. 203-212, 2015.
- [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] 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. 2772-2785, 2017.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Y. Park *et al.*, "On-line Detection and Classification of Rotor and Load Defects in PMSMs based on Hall Sensor Measurements," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019.
- [8] D. Reigosa, D. Fernández, Y. Park, A. B. Diez, S. B. Lee, and F. Briz, "Detection of demagnetization in permanent magnet synchronous machines using hall-effect sensors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 54, No. 4, pp. 3338-3349, 2018.
- [9] M. Brela, M. Michalski, H.-J. Gebhardt, and J. Franke, "Hall measurement method for the detection of material defects in plastic-embedded permanent magnets of rotors," in *IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2013, pp. 3928-3934: IEEE.
- [10] J. Hong, D. Hyun, S. B. Lee, J.-Y. Yoo, and K.-W. Lee, "Automated monitoring of magnet quality for permanent-magnet synchronous motors at standstill," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 46, No. 4, pp. 1397-1405, 2010.
- [11] K. Alameh, N. Cité, G. Hoblos, and G. Barakat, "Vibration-based fault diagnosis approach for permanent magnet synchronous motors," *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 48, No. 21, pp. 1444-1450, 2015.
- [12] Z. Yang, X. Shi, and M. Krishnamurthy, "Vibration monitoring of PM synchronous machine with partial demagnetization and interturn short circuit faults," in *2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2014, pp. 1-6: IEEE.
- [13] D. Torregrossa, A. Khoobroo, and B. Fahimi, "Prediction of acoustic noise and torque pulsation

- Exposition, 2008. APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE, 2008, pp. 111-116: IEEE.*
- [27] J. Rosero, J. Cusido, J. Ortega, L. Romeral, and A. Garcia, "PMSM Bearing Fault Detection by means of Fourier and Wavelet transform," in *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE, 2007, pp. 1163-1168: IEEE.*
- signature analysis of induction motor mechanical faults by wavelet packet decomposition," *IEEE transactions on industrial electronics*, Vol. 50, No. 6, pp. 1217-1228, 2003.
- [26] J. Rosero, J. Romeral, J. Cusido, J. Ortega, and A. Garcia, "Fault detection of eccentricity and bearing damage in a PMSM by means of wavelet transforms decomposition of the stator current," in *Applied Power Electronics Conference and*

¹ Partial Demagnetization
² Complete(Uniform) Demagnetization
³ Reversible Demagnetization
⁴ Irreversible Demagnetization