

## تشخیص عیب لنگی رتور موتور BLDC در شرایط کاری غیر ایستا با استفاده از روش تحلیل مرتبه

شاهو قانعی<sup>۱\*</sup>، عبدالرضا رحمتی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق- الکترونیک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران  
۲- دانشیار گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

shahoghane@yahoo.com

(دریافت مقاله: تیر ۱۳۸۹، پذیرش مقاله: آبان ۱۳۸۹)

**چکیده-** با توجه به کاربردهای مهم و در حال گسترش موتورهای BLDC، پایش وضعیت آن‌ها روز به روز اهمیت بیشتری می‌یابد. لنگی رتور یکی از منابع مهم ایجاد اشکال در کارکرد این موتورها است. تشخیص این عیب در شرایطی که سرعت و گشتاور موتور در حال تغییر است با استفاده از الگوریتم‌های پیچیده‌ای مانند موجک و کلاس کوهن امکان‌پذیر بوده و البته در پیاده‌سازی عملی به علت نیاز به حجم بالای محاسباتی با مشکل روبه‌رو شده است. در این مقاله روش جدید و به‌صرفه‌ای بر اساس روش تغییر یافته تحلیل علائم جریان موتور برای تشخیص عیب لنگی رتور موتوری که در شرایط کاری غیر ایستا کار می‌کند، ارائه شده است. جریان استاتور موتور سالم و معیوب به روش اجزای محدود دویبعی محاسبه و سیگنال جریان بر اساس زاویه چرخش رتور نمونه‌برداری شده است. با این کار سیگنال جریان در شرایط کاری غیر ایستا نیز ایستا شده و لذا به استفاده از الگوریتم‌های ویولت و کلاس کوهن نیاز نیست. در ادامه، تحلیل مرتبه بر روی سیگنال‌های جریان موتور سالم و معیوب اعمال و نتایج با هم مقایسه می‌شود. با این کار عیب لنگی رتور آشکار و تشخیص داده می‌شود.

**کلیدواژه‌گان:** روش تحلیل علائم جریان موتور، روش اجزای محدود، روش تحلیل مرتبه.

### ۱- مقدمه

موتورهای BLDC، مزایای بسیاری نسبت به موتورهای DC و القایی دارند که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از: مشخصه‌های بهتر سرعت-گشتاور، پاسخ دینامیک سریع، بازدهی بالا، عمر طولانی، عملکرد بدون نویز و گستره وسیعتر سرعت. هم‌چنین با توجه به این‌که نسبت

گشتاور تحویلی این موتور به اندازه آن از بسیاری موتورهای دیگر بالاتر است، بنابراین از آن در کاربردهایی که محدودیت فضا و وزن وجود دارد استفاده می‌شود [۱].

عیب‌های بالقوه در موتورهای BLDC به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: عیب‌های استاتور، عیب‌های

اینورتر، عیب‌های رتور و عیب‌های یاتاقان. عیب‌های رتور عبارتند از لنگی رتور، مغناطیس‌های آسیب‌دیده و سنسورهای هال آسیب‌دیده. تمامی این عیب‌ها مشکلاتی مانند تولید نویز و ارتعاش و افزایش ضریب گشتاور را ایجاد می‌کنند. لنگی رتور وضعیتی است که فاصله هوایی بین رتور و استاتور نایک‌نواخت باشد. در ماشین ایدئال، مرکز رتور و مرکز چرخش بر مرکز استاتور منطبق است. لنگی می‌تواند به دو شکل استاتیک و دینامیک ظاهر شود. در لنگی استاتیک، موقعیت و طول شعاعی فاصله هوایی کمینه، در فضا ثابت است. یکی از عوامل ایجاد لنگی استاتیک جاسازی نادرست رتور یا استاتور در مرحله ساخت است. لنگی دینامیک هنگامی اتفاق می‌افتد که مرکز رتور بر مرکز چرخش منطبق نباشد و فاصله هوایی کمینه، همراه با چرخش رتور بچرخد؛ لذا لنگی دینامیک تابعی از زمان و مکان است. در میان عوامل ایجاد لنگی دینامیکی می‌توان به محور خمیده، رزونانس مکانیکی در سرعت‌های مهم و ساییدگی یاتاقان اشاره کرد. در این‌باره در [۲] بحث شده است.

تشخیص لنگی رتور سایر موتورها - از جمله موتورهای القایی که در سرعت ثابت کار می‌کنند - مورد توجه بسیاری از فعالیت‌های تحقیقاتی بوده است [۳] تا [۵]. در این تحقیق‌ها از روشهای MCSA و تحلیل ارتعاشی استفاده شده است. اما در زمینه تشخیص عیب‌های موتور BLDC بیشتر تحقیق‌ها به تشخیص سایر عیوب مانند عیب استاتور پرداخته‌اند [۶] تا [۹]. در واقع تعداد کمی تحقیق مهم و اثرگذار در زمینه تشخیص عیب لنگی رتور وجود دارد. در [۱۰] نشان داده شده که از روش MCSA که بر تحلیل طیفی جریان موتور استوار است، می‌توان برای تشخیص لنگی رتور موتور BLDC که در شرایط کاری ثابت کار می‌کند استفاده کرد. در آنجا

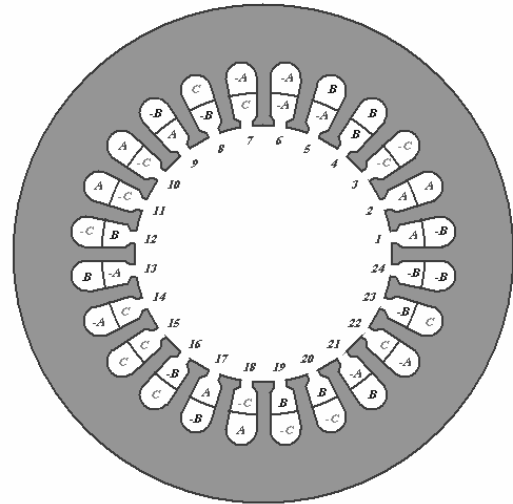
نشان داده شده که با پایش برخی از فرکانس‌های جریان استاتور که با فرکانس اصلی موتور متناسب هستند می‌توان عیب لنگی رتور را تشخیص داد. البته این روش را فقط برای وضعیتی که شرایط کاری موتور ثابت است می‌توان به‌کار برد در حالت کاری بار غیر ثابت، جریان موتور BLDC غیرایستا است و لذا به‌سادگی نمی‌توان حالت کاری ثابت تحلیل طیفی را بر روی آن اجرا کرد. در [۱۱] تا [۱۳] برای تشخیص عیب‌های رتور موتور BLDC که در شرایط کاری غیرایستا کار می‌کند، از روشهای تحلیل موجک و نمایش‌های زمانی-فرکانسی مانند کلاس کوهن استفاده شده است. در این تحقیق‌ها فرض بر این است که فرکانس تغییر بار بیشتر از ۱۰ هرتز نباشد؛ در کاربردهایی که بار با فرکانسی بیشتر از ۱۰ هرتز تغییر می‌کند راهکاری ارائه نشده است. در این تحقیق‌ها هم‌چنین به محدودیت‌های صنعتی‌سازی این روشها، مانند نیاز به حجم بالای محاسبات و پیچیدگی الگوریتم‌ها و در نتیجه نیاز به حافظه زیاد و پردازنده‌های قوی اشاره شده است. در این تحقیق برای اولین بار برای پایش وضعیت موتورهای الکتریکی در شرایط کاری غیر ایستا از تبدیل سیگنال جریان بر اساس زمان به جریان بر اساس زاویه - که می‌توان آن را با نام MCSA تغییر یافته معرفی کرد - استفاده شده است. بنابراین بدون نیاز به الگوریتم‌های بسیار حجیم که در پیاده‌سازی با مشکل روبه‌رو می‌شوند، می‌توان عیب موتور را تشخیص داد.

## ۲- مدل‌سازی موتور BLDC

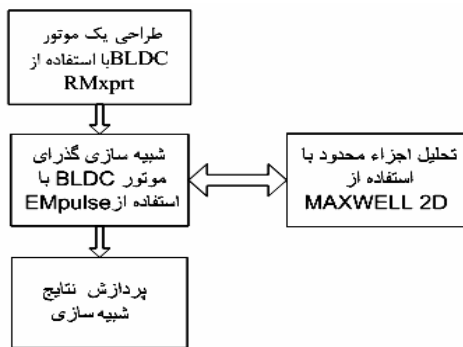
در این تحقیق نوعی موتور BLDC ۵۵۰ وات، ۲۲۰ ولت، شش قطبی سه‌فاز، با سرعت نامی برابر ۱۵۰۰ دور در دقیقه، دارای ۲۴ شیار استاتور، با قطر خارجی استاتور برابر ۱۴۰ میلی‌متر و قطر رتور برابر ۸۹ میلی‌متر و طول محوری

برابر ۷۲۹۲ است. سپس تحلیل اجزای محدود در نرم افزار MAXWELL2D انجام و هم زمان، مدار درایو موتور در آن طراحی می شود. در پایان روش اجزای محدود پله-پله زمانی<sup>۱</sup> در EMPulse که بخشی از بسته نرم افزاری است اجرا و نتایج شبیه سازی به دست می آید. لازم است ذکر شود که استاتور و رتور از جنس steel با شماره M19\_24G و قطب ها از جنس XG196\_96 انتخاب شده است.

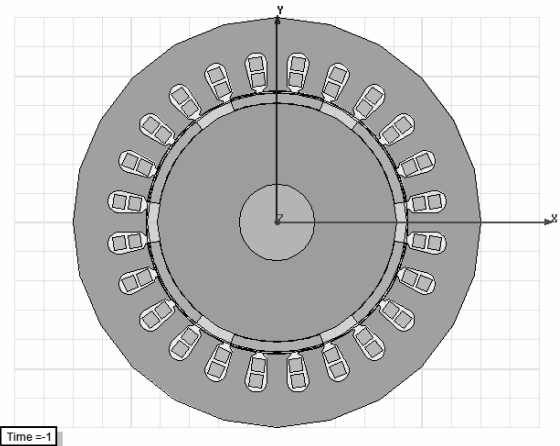
موتور برابر ۶۵ میلی متر با استفاده از نرم افزار RMxprt طراحی شده است. روش سیم پیچی موتور در شکل (۱) و مدل دوبعدی موتور در شکل (۲) نشان داده شده است.



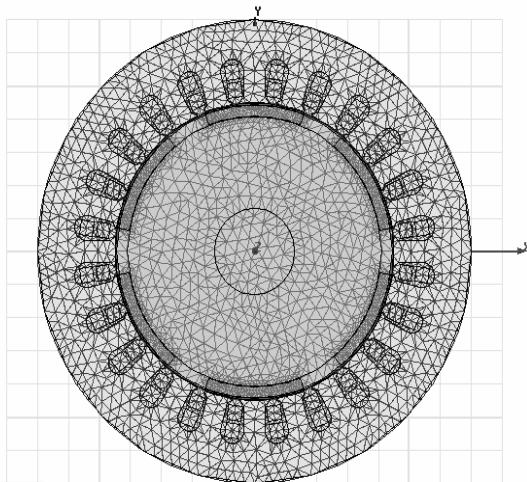
شکل ۱ سیم پیچی موتور



شکل ۳ روند نمای شبیه سازی موتور BLDC



شکل ۲ مدل دوبعدی موتور



شکل ۴ مش مدل دوبعدی موتور

هنگامی که موتور طراحی و مدل هندسی آن آماده شد، مراحل نشان داده شده در شکل (۳) در نرم افزار MAXWELL انجام می شود. ابتدا مش مدل دوبعدی تولید می شود (شکل ۴). در اینجا تعداد اجزای مدل

جدول ۱ مقایسه دامنه هارمونیک‌های طیف جریان استاتور موتور سالم و موتور با لنگی استاتیک در شرایط کاری ثابت

هارمونیک	موتور سالم (mA)	لنگی رتور استاتیک (mA)	درصد تغییرات
$\frac{1}{3}f_e$	۳۰	۴۰	٪۳۳
$\frac{2}{3}f_e$	۸۰	۸۷	٪۸
$\frac{4}{3}f_e$	۵۰	۶۳	٪۲۶
$\frac{5}{3}f_e$	۳۲	۳۴	٪۶

### ۲-۳- تشخیص عیب لنگی رتور مخلوط در شرایط کاری غیرایستا

#### ۲-۳-۱ تبدیل نمونه برداری بر اساس زمان به نمونه برداری بر اساس زاویه چرخش رتور

در شکل (۵) سیگنالی با فرکانس ثابت که هر  $\Delta t$  ثانیه یک بار نمونه برداری شده نشان داده شده است. در شکل (۶) از داده‌ای که فرکانس متغیر دارد در هر  $\Delta t$  ثانیه یک بار نمونه برداری شده و داده نمونه برداری شده شبیه کرنل تبدیل فوریه بر اساس زمان نیست. یادآوری می‌شود که هنگامی از تبدیل، نتایج دقیق به دست می‌آید که داده شبیه کرنل تبدیل باشد. در شکل مزبور دیده می‌شود که نرخ نمونه برداری با  $\Delta t$  ثابت برابر با نرخ نمونه برداری با  $\Delta\theta$  ثابت نیست. بنابراین رابطه بین زمان و زاویه با آنچه در شکل (۵) بود متفاوت است. این سیگنال سینوسی با فرکانس متغیر را با یک سیگنال مرجع با نرخ نمونه زاویه‌ای ثابت می‌توان نمونه برداری کرد. نتایج در شکل (۷) نشان داده شده است. در اینجا آشکارا دیده می‌شود که سیگنال با  $\Delta t$  ثابت نمونه برداری نشده است. در قسمت پایین شکل مشخص است که سیگنال نمونه برداری شده دوباره شبیه سینوس و کسینوس و کرنل تبدیل شده است.

موتور مدل سازی شده با درصد خطای بسیار بسیار کمی شبیه به موتور واقعی رفتار می‌کند. اثبات این ادعا، با مقایسه مقادیر متغیرهای به دست آمده با مقادیر آنها در مراجع معتبر و همچنین ادعای شرکت ANSYS که سابقه‌ای بسیار طولانی و شهرت بسیاری در مدل سازی بر اساس روش اجزای محدود دارد، امکان پذیر است. نمونه جریان استاتور موتور واقعی در [۱۴] آورده شده که اگر با شکل جریان موتور مدل سازی شده مقایسه شود، شباهت بسیار زیاد آنها مشخص می‌شود.

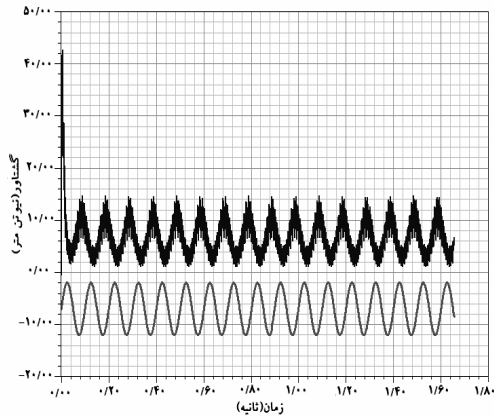
### ۳- تشخیص عیب لنگی رتور

#### ۳-۱- تشخیص عیب لنگی رتور استاتیک

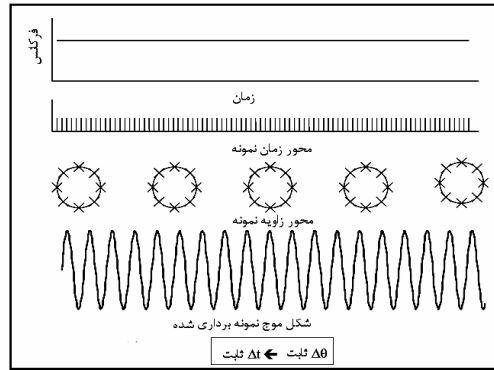
در این شبیه سازی، رتوری با عیب لنگی استاتیک با جابه‌جا کردن رتور به سمت چپ به اندازه ٪۲۰ فاصله هوایی عادی و جابه‌جا کردن مرکز چرخش رتور به سمت چپ به اندازه ٪۲۰ فاصله هوایی عادی به دست می‌آید. موتور در شرایط کاری ثابت کار می‌کند. بنابراین برای تشخیص این عیب از روش MCSA به کار رفته در [۱۰] استفاده می‌شود. در جدول (۱) نشان داده شده که لنگی استاتیک به تنهایی تأثیر محسوسی بر هارمونیک‌های جریان استاتور نمی‌گذارد. البته در عمل لنگی استاتیک به تنهایی در موتور به وجود نمی‌آید، بلکه به صورت مخلوط استاتیک و دینامیک در دنیای واقعی اتفاق می‌افتد. بنابراین در ادامه تحقیق، بر روی تشخیص لنگی مخلوط تأکید می‌شود.

### ۳-۲-۲- تحلیل مرتبه سیگنال جریان

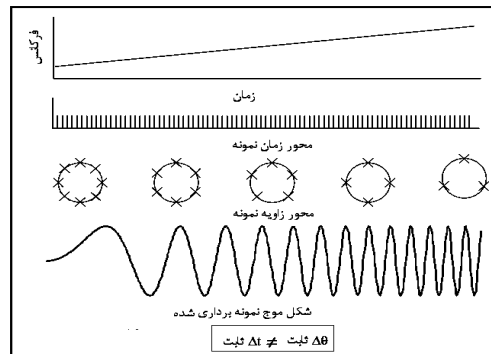
تا اینجا فرض بر آن بود که موتور در شرایط کاری ثابت (سرعت ثابت) کار می‌کند. با این فرض، تبدیل فوریه و تحلیل در حوزه فرکانسی برای جریان موتور، عملکرد بسیار خوبی در تشخیص عیب موتور دارد. اما کاربردهای بسیاری هستند که موتور هرگز در سرعت یا بار ثابت کار نمی‌کند؛ برای مثال در صنایع هوافضا و خودروسازی. عیب‌یابی موتور در این کاربردها بسیار حیاتی و حائز اهمیت است. در اینجا به‌عنوان مثال، باری سینوسی با فرکانس ۱۰ هرتز به موتور اعمال می‌شود. گشتاور و سرعت موتور سالم در این شرایط در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. در شکل (۱۱) جریان استاتور موتور سالم و در شکل (۱۱) جریان استاتور موتور با عیب لنگی مخلوط رتور در حالت کاری غیر ایستا نشان داده شده است. تحلیل فرکانسی چنین سیگنال غیرایستایی دقت کافی ندارد و حاوی اطلاعات مفیدی نیست.



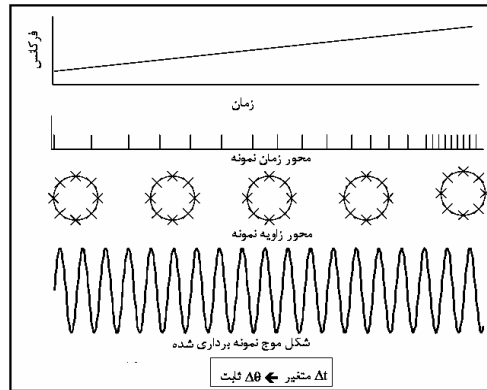
شکل ۸ گشتاور موتور سالم در حالت بار متغیر



شکل ۵ داده نمونه‌برداری شده در حوزه زمان با فرکانس ثابت



شکل ۶ سیگنال سینوسی با فرکانس متغیر که با  $\Delta t$  ثابت نمونه‌برداری شده است



شکل ۷ سیگنال سینوسی با فرکانس متغیر که با  $\Delta \theta$  ثابت نمونه‌برداری شده است

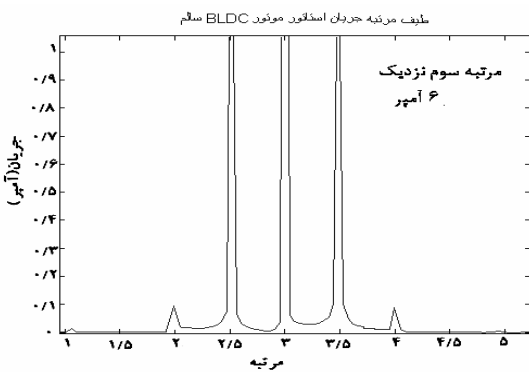
از جریان استاتور موتور تبدیل مرتبه گرفته می‌شود. مرتبه سوم نشان‌دهنده هارمونیک اصلی است که در شرایط غیرایستا با زمان تغییر می‌کند. اما به علت اینکه مرتبه، نسبت فرکانس الکتریکی به فرکانس مکانیکی است (برای موتور شش قطبی برابر سه) مرتبه سه برای این موتور در تحلیل مرتبه جریان، مقداری ثابت است.

همان‌طور که در جدول (۳) و در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) دیده می‌شود، دامنه مرتبه‌های دوم و سوم تغییراتی برابر ۴۰٪ و ۱۵۰٪ داشته است. بنابراین در شرایط کاری غیرایستا، با پایش دامنه مرتبه‌های دوم و سوم برای موتور شش قطبی یا مرتبه‌های اول و سوم برای موتور چهارقطبی می‌توان به وجود عیب لنگی رتور مخلوط پی برد.

جدول ۳ مقایسه دامنه مرتبه‌های طیف مرتبه جریان استاتور در

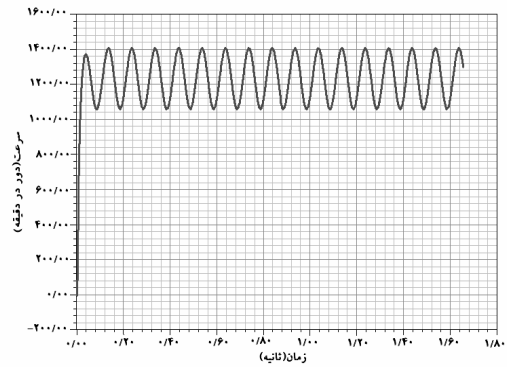
شرایط کاری غیرایستا

مرتبه	موتور سالم (mA)	لنگی رتور مخلوط (mA)	درصد تغییرات
اول	۲۰	۱۸	-۱۰٪
دوم	۱۰۰	۵۰۰	۴۰۰٪
چهارم	۸۰	۲۰۰	۱۵۰٪
پنجم	۱۰	۹	-۱۰٪

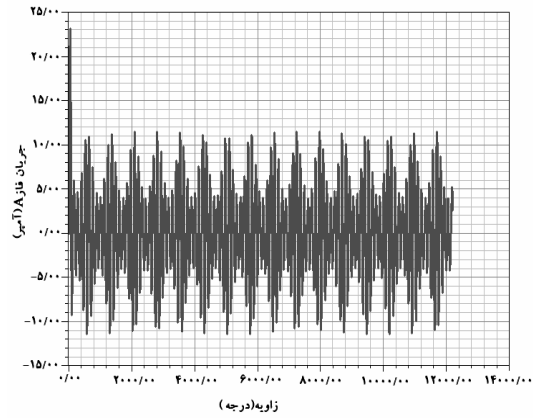


شکل ۱۲ طیف مرتبه جریان استاتور موتور BLDC سالم در

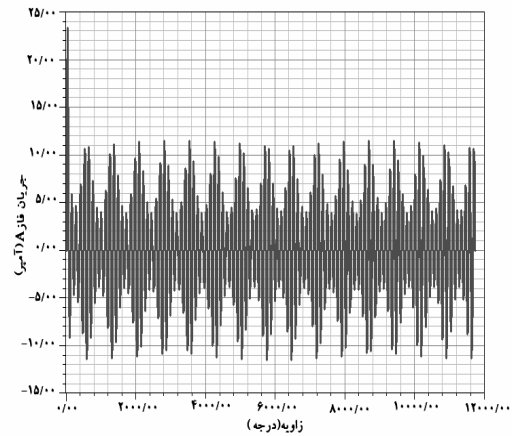
شرایط کاری غیرایستا



شکل ۹ سرعت موتور سالم در حالت بار متغیر



شکل ۱۰ جریان موتور سالم در حالت بار متغیر



شکل ۱۱ جریان موتور با رتور دارای عیب لنگی در حالت بار متغیر

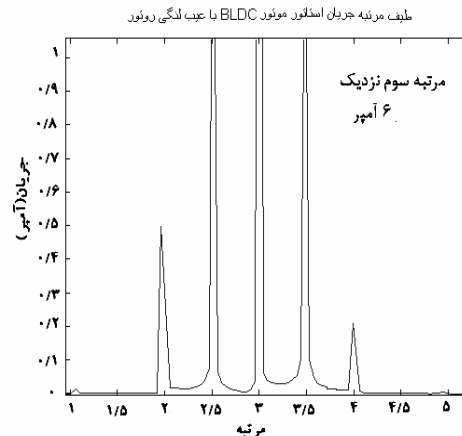
نیز تحلیل مرتبه انجام و مشاهده شد که تغییرات مرتبه دوم بسیار کمتر و رشدی در حدود ۷۰ درصد داشت (جدول ۴). بنابراین با تعیین یک حد آستانه برای تغییرات مرتبه‌های مورد نظر موتور سالم و معیوب و دسته‌بندی به صورت باینری می‌توان موتور سالم و معیوب را از هم تشخیص داد. در نتیجه روش به کار رفته در این تحقیق، قابلیت تفکیک لنگی رتوری را که در حین ساخت ایجاد شده با لنگی رتوری که در طول عمر کاری موتور به وجود آمده دارد. می‌توان این نتیجه را نیز گرفت که این روش، حساسیت زیادی نسبت به خطاهای ناچیز در اندازه‌گیری جریان ندارد، زیرا موتوری را معیوب تشخیص می‌دهد که مرتبه‌های مورد نظر جریان آن به حد کافی تغییر کرده باشد (حداقل دوبرابر شده باشند).

جدول ۴ مقایسه دامنه مرتبه‌های طیف مرتبه جریان استاتور در شرایط کاری بار غیر ثابت برای لنگی ۵ درصد

مرتبه	موتور سالم (mA)	لنگی رتور مخلوط (mA)	درصد تغییرات
اول	۱۵	۱۳	-۱۳٪
دوم	۸۰	۱۳۶	۷۰٪
چهارم	۹۰	۱۲۰	۳۳٪
پنجم	۸	۷	-۱۲٪

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای اولین بار برای پایش وضعیت موتورهای الکتریکی در شرایط کاری غیر ایستا از تبدیل سیگنال جریان بر اساس زمان به جریان بر اساس زاویه استفاده شده است. این کار در عمل با استفاده از دورسنج یا انکودر انجام می‌شود. هم‌چنان که گفته شد، به جای تحلیل فرکانسی، از تحلیل مرتبه استفاده و دیده شد که در طیف مرتبه سیگنال جریان موتور معیوب،



شکل ۱۳ طیف مرتبه جریان استاتور موتور BLDC با عیب لنگی رتور مخلوط در شرایط کاری غیر ایستا

با تکرار این آزمایش برای موتورهایی با تعداد قطب‌های مختلف می‌توان رابطه‌ای را برای پایش مرتبه‌های حاوی اطلاعات مفید در شرایط کاری غیر ایستا ارائه کرد:

$$O_{me} = O_e \pm 1 \quad (2)$$

که  $O_{me}$  مرتبه لنگی رتور مخلوط و  $O_e$  مرتبه اصلی

$$\text{جریان موتور است } (O_e = \frac{p}{2}).$$

به بیانی دیگر برای تشخیص لنگی رتور مخلوط موتور BLDC شش قطبی که در شرایط کاری غیر ایستا کار می‌کند، باید مرتبه‌های دو و سه، برای موتور چهار قطبی مرتبه‌های یک و سه و برای موتور هشت قطبی مرتبه‌های سه و پنج پایش شود.

البته باید توجه داشت که ابعاد موتور در حین ساخت تلرانس داشته و ممکن است اندکی لنگی ذاتی در موتور نو نیز وجود داشته باشد. بنابراین بر روی جریان موتور BLDC نو شبیه‌سازی شده که لنگی حدود ۵ درصد دارد

- drives for electric and hybrid electric vehicles,” IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 55, no. 6, pp. 2246-2257, June 2008.
- [2] J. M. Cameron, W. T. Thomson, and A. B. Dow, “Vibration and current monitoring for detecting eccentricity in large induction motors,” IEE Proceedings, vol.133, pt. B, no.3, pp.155-163, 1986.
- [3] Cameron J. M., Thomson W.T. and Dow A.B., “Vibration and current monitoring for detecting eccentricity in large induction motors,” IEE Proceedings, vol.133, pt.B, no.3, pp.155-163, 1986.
- [4] Mehala N., Dahiya R., “Motor Current Signature Analysis and its Applications in Induction Motor Fault Diagnosis.” International Journal of Systems Applications, Engineering & Development Vol. 2, Issue 1, 2007.
- [5] Obaid R. R., “Detection of rotating mechanical asymmetries in small induction machines,” Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, Ph.D. Thesis, PP.28-29, 2003.
- [6] Kliman G. B. and Stein J., “Methods of motor current signature analysis,” Electric Machines and Power Systems, vol. 20, no.5, pp.463-474, 1992.

برخی از مرتبه‌ها تغییرات محسوسی را نسبت به مرتبه‌های متناظر موتور سالم از خود نشان دادند. بنابراین بدون نیاز به الگوریتم‌های پردازش سیگنالی مانند TFR نوع کلاس کوهن که از نظر پیاده‌سازی به علت نیاز به حجم محاسباتی بسیار زیاد با مشکل روبه‌رو می‌شوند، می‌توان عیب موتور را تشخیص داد. بنابراین فقط با اضافه کردن انکودر و نمونه‌برداری از جریان بر اساس زاویه رتور و انجام تحلیل مرتبه بر روی سیگنال نمونه‌برداری شده می‌توان در شرایط کاری غیرایستا عیب موتور را تشخیص داد. با استفاده از این روش می‌توان برای تشخیص تمامی عیب‌ها در شرایط کاری غیرایستا، از روش MCSA تغییر یافته که در این تحقیق شرح داده شد استفاده کرد تا از نظر غیرایستا بودن سیگنال جریان، نگرانی وجود نداشته باشد.

## ۵- پیشنهادها

برای پیاده‌سازی تجاری سیستم عیب‌یاب موتور می‌توان از انکودر برای تبدیل دقیق مبنای زمان به زاویه استفاده کرد. بر روی برخی از موتورهای BLDC که برای محیط‌های کاری سخت ساخته شده‌اند یک انکودر نصب شده است. از DSP ها می‌توان هم به‌عنوان راه‌انداز و کنترل موتور و هم برای اجرای برنامه تحلیل طیفی برای شرایط کاری ثابت و برنامه تحلیل مرتبه برای شرایط کاری غیرایستا و تشخیص عیب به صورت یکجا بر روی یک پردازنده استفاده کرد. برای دسته‌بندی و خامت عیب می‌توان از طبقه‌کننده‌های فازی استفاده کرد.

## ۶- منابع

- [1] Chau K.T., Chan C. C. and Chunhua L., “Overview of permanent-magnet brushless



- Operating Under Different Load Conditions” IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 22, Issue 5, pp 2061-2069, 2007.
- [13] Rajagopalan, S. Aller, J. M. Restrepo, J.A. Habetler, T.G. Harley, R.G., “Analytic-Wavelet-Ridge-Based Detection of Dynamic Eccentricity in Brushless Direct Current (BLDC) Motors Functioning Under Dynamic Operating Conditions” IEEE Trans. on Ind. Electronics, Vol. 54, Issue 3, pp 1410-1419, 2007.
- [14] Zhou P., Fu W. N., Lin D., Stanton S., Cendes Z. J. and Xu Longya, “Numerical Modeling of Electrical Machines and Its Application,” www.ansoft.com
- [7] Kyung-Tae Kim, Jin Hur, Byeong-Woo Kim, Young-Kook Lee, "Fault analysis of IPM type BLDC motor using nonlinear modeling of stator inter turn faults",14th CEFC, Chicago IL,2010,pp 1-1.
- [8] [8]Taehyung Kim, Hyung-Woo Lee, Sangshin Kwak, "The Internal Fault Analysis of Brushless DC Motors Based on the Winding Function Theory" IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 45, Issue 5, pp 2090-2096, 2009.
- [9] M. Dai, A. Keyhani, T. Sebastian, “Fault analysis of PM brushless DC motor using finite element method,” IEEE Trans. on Energy Convers. Vol 20, No.1, 2005.
- [10] Roux W. I., Harley R. G., Habetler T. G., “Detecting Rotor Faults in Low Power Permanent Magnet Synchronous Machines,” IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 22, No. 1, January 2007
- [11] Rajagopalan S., Aller J. M., Restrepo J. A., Habetler T. G., Harley R. G., “Detection of Rotor Faults in Brushless DC Motors Operating Under nonstationary Conditions,” IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 42, Issue 6, pp.1464 – 1477, 2006
- [12] Rajagopalan, S. Roux, W. Habetler, T.G. Harley, R.G., “Dynamic Eccentricity and Demagnetized Rotor Magnet Detection in Trapezoidal Flux (Brushless DC) Motors