ICEMG ۲۰۲۳-XXXXX شناسایی خطای ناهممرکزی استاتیکی به روش فوریه سریع و تبدیل موجک در ماشین القایی

سید جلال حسینی'، جلال نظرزاده

seyyedjalal.hoseini@shahed.ac.ir ٬ دانشجوی دکتری، دانشگاه شاهد تهران ۲دانشیار، دانشگاه شاهد تهران، ۲

چکیدہ

از جمله خطا های رایج در موتور های القایی، خطای ناهم محوری است که تشخیص به موقع خطا به منظور پیشگیری از گسترش آن از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از رایجترین روشها برای تشخیص ناهممرکزی، تحلیل طیف جریان استاتور موتور (MCSA^۱) می باشد که تحلیل فوریه (FFT) از ساده ترین روشها برای پیاده سازی سالم و معیوب با نرم افزار MAXWELL ارائه شده است. با استفاده از روش آنالیز فوریه و روش موجک جریان استاتور در شرایط حالت خطای مذکور در ماشین بررسی شده است. در ادامه روشهای پردازش سیگنال فوریه سریع و تبدیل موجک در مقام تشخیص خطای ناهم مرکزی استاتیکی ماشین القایی مقایسه و نقاط قوت و ضعف آنها مورد ارزیابی قرار میگیرد. برای این منظور از پارامترهای یک موتور القایی قفس سنجابی ۱۸ داوقیی استفاده شده است.

واژه های کلیدی

تشخیص خطای ناهممرکزی استاتیکی، تبدیل فوریه سریع، تبدیل موجک، ماشین القایی قفس سنجابی.

مقدمه

کاربرد موتورهای القایی در صنعت به دلیل ویژگیهای منحصر به فرد آنها، به عنوان مثال، ساخت ساده، قابلیت اطمینان بالا و تعمیر و نگهداری کم که به آنها نیاز دارند، بسیار مهم است. با این حال، موتورهای القایی در معرض انواع مختلفی از خطاهای الکتریکی و مکانیکی هستند. تشخیص فوری عیب می تواند موتور القایی را از آسیب های فاجعه بار نجات دهد. حتی تشخیص زودهنگام عیب می تواند زمان تعمیر و نگهداری مورد نیاز را کاهش دهد. عیوب موتورهای القایی را می توان با استخراج ویژگی ها از سیگنال جریان موتور القایی مانند تبدیل فوریه گسسته (DFT) و تبدیل فوریه سریع (FFT) استفاده می شود. همه این تکنیک ها برای تجزیه و تحلیل سیگنال در شرایط حالت دائم مفید هستند اما برای تشخیص خطا در شرایط گذرا و همچنین شناسایی زمان وقوع خطا در یک سیستم غیر

خطی مانند موتور القایی از تکنیک های جدید تشخیص و طبقه بندی خطا استفاده کرد [۱]. از جمله این روشها می توان به تکنیک تبدیل فوريه زمان كوتاه (STFT) و تبديل موجك (WT) اشاره كرد. اين روشها مشکل شناسایی زمان وقوع یک جزء فرکانس را به اندازه پنجره STFT محدود می کند و اطلاعاتی در مورد اجزای فرکانس سیگنال در شکاف زمانی پنجره STFT ارائه می دهد. بنابراین، اگر نمونه برداری از یک خطا طولانیتر یا کوتاهتر از اندازه پنجره STFT صورت پذیرد، دقت روش تشخیص خطا مبتنی بر STFT به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می گیرد. تبدیل موجک (WT) می تواند برای کاهش محدودیت زمانی STFT با استفاده از مقیاسهای موجک مختلف، دلالت بر اندازههای پنجره، که در آن مقیاس موجک با محتوای فرکانس سیگنال نسبت معکوس دارد، استفاده شود. از این رو، WT اطلاعات محلی فرکانس زمانی بیشتری در مورد سیگنال ارائه می دهد [۲،۳]. بنابراین در سالهای اخیر تحقیقاتی مانند [۳,٤,٥] جهت تشخیص خطاهای مکانیکی رتور در ماشن القایی انجام شده است. در [٦,٧,٨,٩] با استفاده از تبدیل گسسته موجک[†] (DWT) سیگنالهای لرزش و جریان سیم پیچهای استاتور انواع خطاهای مکانیکی مثل عدم تقارن در فاصله هوایی و خرابی یاتاقان و همچنین خطاهای الکتریکی مثل شکستگی میله های رتور و نامتعادلی ولتاژ تغذیه مطالعه شده است. در سالهای اخیر تحقیقات گسترده ایی در زمینه شناسایی خطا در موتور القایی قفس سنجابی با تحليل جريان استاتور به روش DWT انجام شده است [۱۰٫۱۱٫۱۲]. سیگنالهای دیگری نظیرصوت [۱۳]، توان ظاهری [^۱٤] و شار سرگردان (stray flux) [^٥] به روش DWT برای شناسایی خطا در ماشین القایی مورد استفاده شده است.

اگر چه تحقیقات گسترده ای در زمینه شناسایی خطای ناهم-مرکزی استاتیکی توسط تبدیل موجک انجام شده است، ولی کمتر به این امر با وجود نویز در سیستم توجه شده است [^۱٦]. بنابراین برای درک کارآیی روش DWT در شناسایی خطای ماشین الکتریکی

Motor Current Signature Analysis'

Short Time Fourier Transform

Wavelet Transform "

Discrete Wavelet Transform

نسبت به FFT، مخصوصا در شرایط پر نویز، لازم است این دو روش را برای یک ماشین نمونه مورد ارزیابی و مقایسه قرار داد.

در این مقاله یک ماشین القایی قفس سنجابی به روش المان محدود شبیه سازی شده و سپس جریان سیم پیچ استاتور آن در دو حالت گذرا (dynamic state) و پایدار (steady state) با شرایط سالم و خطای ناهم مرکزی استاتیکی با درصدهای مختلف مورد ارزیابی قرار میگیرد. در این تحلیل روشهای فوریه سریع و DWT برای تجزیه و تحلیل سیگنال جریان به کارگیری شد و مشخص شد روش DWT عملکرد بهتری نسبت به روش FFT در هر دو حالت گذرا و پایدار را نشان می دهد. در این مقاله سیگنال جریان استاتور با تبدیل موجک به سیگنالهای تقریبی و جزئی تجزیه میشود و سپس با استفاده از تبدیل فوریه سریع و یا برآورد انرژی سیگنالهای تجزیه شده مجددا مورد تحلیل قرار میگیرد و خطای مورد نظر شناسایی میشود.

تبديل موجك گسسته

استفاده از ابزارهای پردازش سیگنال کارآمد (SPT) برای استخراج شاخص های مناسب برای تشخیص عیب در موتورهای القایی (IMs) بخش اساسی هر روش تشخیص عیب است [۱۷]. هدف از پردازش سیگنال، بدست آوردن اطلاعات اضافه ای است که در سیگنال خام اولیه در دسترس نمی باشد. تبدیل فوریه احتمالا پرکاربردترین روش تبدیل سیگنال در فناوری و علم اندازه گیری می باشد اگر چه این تبدیل زمانی بکار می آید که خواص آماری یک سیگنال در شرایط پایدار باشد چرا که توابع پایه ی که در تبدیل فوریه بکار می روند در طول یک بازه زمانی بی نهایت بسط داده می شوند و برای سیگنال هایی که محتوای فرکانسی آنها با زمان تغییر می کند مناسب نیستند در حالی که اغلب سیگنال هایی که در دنیای واقعی با آنها روبرو هستیم دارای دینامیک گذرا هستند [۱۸].

بررسی پیشینه تبدیل موجک را میتوان از سال ۱۹۰۹ با توابع پایه هار که اولین سیستم توابع متعامد فشرده بود شروع کرد. در سال ۱۹۷۸ تحقیقات آقای استفان مالت روی ارزیابی چند مقیاسه به تبدیل موجک گسسته منجر شد و در سال ۱۹۸۸ یک خانواده از موجک های متعامد و پشتیبان فشرده توسط آقای دابیشیز ^۵ ابداع شد

دلیل استفاده از واژه موجک، محدود و کوچک بودن تابع پنجره و ماهیت نوسانی این تابع است. موجک دارای سه مشخصه تعداد نوسان محدود، بازگشت سریع به صفر در هر دو جهت مثبت و منفی در دامنه خود و میانگین صفر است . این سه ویژگی شرط لازم برای این است که تابعی بتواند به عنوان تبدیل موجکی عمل کند. تبدیل موجک پیوسته ² از کانولوشن سیگنال اندازه پذیر f(t) با مردوج موجک مقیاس شده $\psi(t)$ مطابق رابطه زیر بدست می آید [۱۹]

ISME^T· ¹¹, ¹·-¹^T May, ^T· ¹¹

$$W_f(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^*(\frac{t-b}{a}) dt \tag{1}$$

در این رابطه (t) تابع موجک مادر، $a \ ed \ bdot ed$ پارامترهای تبدیل با نام های Dilation و Translation هستند فاکتور \sqrt{a} برای واحد نگه داشتن نرم موجک به ازای تمام a ها می باشد. این رابطه نشان می دهد که آنالیز موجک یک آنالیز حوزه زمان- فرکانس است. از آنجا که انتخاب مقادیر $a \ ed$ بصورت پیوسته باعث افزایش حجم محاسبات می شود بنابراین معمولا $a \ ed$ بصورت گسسته در نظر گرفت و می شود بنابراین معمولا $a \ ed$ بصورت گسسته در نظر گرفت و آر مقادیر صحیح می باشند . در این صورت رابطه تبدیل موجک که به تبدیل موجک باشند . در این صورت رابطه تبدیل موجک را معروت رابطه زیر در می آید:

$$W_{f}(j,k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) 2^{\frac{j}{2}} \psi^{*}(2^{j}t - k) dt$$
 (7)

با استفاده از ساختار بانک فیلتری ، تبدیل موجک گسسته با فیلتر مقیاس (n) که یک فیلتر پایین گذر مربوط به تابع مقیاس فیلتر موجک H(n) که یک فیلتر بالا گذر مربوط به است و فیلتر موجک H(n) ، که یک فیلتر بالا گذر مربوط به تابع موجک $\psi(t)$ است ، مطابق روابط زیر پیاده می شود: $A_1(m) = \sum L(n-2m)f(n)$ m = 0,1,...,N-1

$$D_{1}(m) = \sum_{n} H(n - 2m)f(n)$$
 (f)

که در آن ۸۱، D۱ ضرایب تقریبی و جزئیات در سطح ۱ هستند. ضرایب تقریبی و جزئیات در سطح بعدی را می توان با استفاده از A۱ و D۱ از معادلات زیر بدست آورد.

$$A_{2}(m) = \sum_{n} L(n - 2m)A_{1}(n)$$
 (Δ)

$$D_{2}(m) = \sum_{n} H(n - 2m) D_{1}(n)$$
(7)

به طور مشابه ضرایب سطح j را می توان از ضرایب سطح j-۱ بـه صورت زیر بدست آورد.

$$A_{j}(m) = \sum_{n} L(n-2m)A_{j-1}(n)$$
 (Y)

$$D_{j}(m) = \sum_{n} H(n - 2m) D_{j-1}(n)$$
 (A)

با کانولوشن شدن فیلترهای پائین گذر مقیاس و بالا گذر موجک با سیگنال مورد نظر، دو بردار با نام های ضرایب جزئی و تقریبی بدست میآید که ضرایب جزئی حاوی اطلاعات فرکانس بالای سیگنال و ضرایب تقریبی حاوی اطلاعات فرکانس پائین و بدنه اصلی سیگنال هستند. ضرایب موجک حاصل ضرب اسکالر بین سیگنال مورد مطالعه و تابع موجک مادر است.

تشخیص خطای ناهم مرکزی استاتیکی توسط جریان استاتور خطاهای مرتبط با ماشینهای الکتریکی را می توان در دو دسته خطاهای الکتریکی و خطاهای مکانیکی تقسیم بندی کرد. حدود ۶۰ ٪

Daubechies ^a

Continuous Wavelet Transform⁹

خطاهای موتورهای القایی از نوع مکانیکی و ۸۰ ٪ خطاهای مکانیکی از نوع عدم توزیع یکنواخت فاصله هوایی در اثر خطای ناهممحوری است [۲۰].

خطای ناهم محوری به سه دسته استاتیکی (SEF)، دینامیکی (DEF) و ترکیبی (MEF) تقسیم بندی می شود. در حالت استاتیکی محور رتور در فاصله ثابتی از محور استاتور قرار دارد و به دور خود می چرخد ولی در حالت دینامیکی محور رتور در فاصله ثابتی از محور استاتور قرار دارد و علاوه بر آنکه به دور خود می چرخد به دور محور استاتور نیز می چرخد و در ناهم مرکزی ترکیبی رتور دور مرکزی غیر از مراکز استاتور و رتور می چرخد [۲۱]. بنابراین شناسایی این نوع خطاها در ماشین القایی که کاربرد وسیعی در صنعت دارد از اهمیت بالایی برخوردار است.

به منظورارزیابی روشهای تشخیص معرفی شده، از پارامترهای درج شده در جدول (۳) که متعلق به یک ماشین سه فاز ۱.۱ کیلو واتی می باشد، استفاده شده است.

جدول ۱:مشخصات موتور مورد مطالعه							
٣	تعداد فاز	۱.۱	قدرت خروجی (KW)				
•.•••	ممان اينرسي	$\texttt{TA} \boldsymbol{\cdot} Y / \Delta \texttt{TT} \boldsymbol{\cdot}$	ولتاژ نامى				
۱۸	تعداد شيار رتور	ч.92Y/Д4.9	جريان نامي				
٢۴	تعداد شيار استاتور	YY	راندمان (./)				
۵۰	فرکانس (Hz)	2777	سرعت در بار نامی (RPM)				
٢	تعداد قطب	۳.۷۲	گشتاور نامی (N.M)				
۵. •	فاصله هوایی (mm)	۲۸. ۰	ضريب قدرت				

ماشین الکتریکی با مشخصات مدرج در جدول ۱ را به روش المان محدود، شبیه سازی و سپس سیگنال جریان آن را به دو روش FFT و DWT مورد ارزیابی قرار داده شد.



شکل ۱:خطوط میدان و مش بندی ماشین القایی مورد مطالعه شکل ۱ شبیه سازی ماشین القایی مورد مطالعه در نرمافرار را نمایش میدهد.

تشخیص SEF در طیف FFT جریان استاتور:

با استفاده از طیف فرکانسی جریان موتور القایی در فرکانسهای عبور شیار رتور (^vPSH) میتوان خطای ناهممرکزی استاتیکی را تشخیص

داد. بدین صورت که با افزایش این نوع ناهم مرکزی مقدار دامنه جریان در بعضی از فرکانسهای عبور شیار افزایش مییابد. فرکانسهای تشخیص خطا در این روش از رابطه زیر به حاصل می شود [۲۲]

$$f_{ec} = f_1[kR\frac{(1-s)}{p} \pm n_{ws} \pm 2n_{sa}] \pm n_d f_1\frac{(1-s)}{p}$$
(9)

در رابطه فوق f¹ فرکانس منبع تغذیه، s لغزش، R تعداد میله های رتور، p تعداد جفت قطب، k هر عدد صحیحی،

مولفه اشباع هسته مغناطیسی و n_{sa} ، $n_{ws} = 1, r, \circ, \dots$ یا یک میباشد که صفر و یک به ترتیب برای ناهم مرکزی استاتیکی و دینامیکی میباشند.

ماشین مورد مطالعه را در سه شرایط ۱۰، ۴۰ و ۷۰ درصد خطای ناهم مرکزی استاتیکی (نسبت درصد فاصله محورهای رتور و استاتور به فاصله هوایی در شرایط متقارن) با شرایط سلامت فاصله هوایی مقایسه شدهاند. طبق شکل ۲ واضح است که با افزایش درصد ناهم-مرکزی، اندازه جریان فاز A موتور در side band های فرکانسهای اصلی شیار (۸۹۲.۵ و ۹۹۲.۵ هرتز) یعنی فرکانسهای ۶۹۲.۵ و ۹۹۲.۵ هرتز نیز افزایش می یابد.



SE (آبی فرکانسی جریان حالت دائم در چهار شرایط سالم (قرمز)، ۱۰٪ SE (آبی پر رنگ) (آبی پر رنگ)

لازم به ذکر است که تشخیص فرکانسهای مذکور به وسیله تحلیل *لگاریتمی* فوریه جریان فاز A موتور صورت گرفته است و همانطور که مشخص است تشخیص خطای ناهممرکزی استاتیکی ۱۰ درصد به سختی انجام میشود و دقت بالایی را نیاز دارد. در ادامه تحلیل فرکانسی سیگنال جریان در شرایط گذرا مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۳: طیف فرکانسی جریان گذرا در چهار شرایط سالم (قرمز)، ۱۰٪ SE (آبی کم-رنگ)، ۴۰٪/SE (سبز)، ۷۰٪ SE (آبی پر رنگ) با بررسی دقیقتر شکل ۳ مشخص میگردد که تشخیص درصد خطا SE در شرایط گذرا مخصوصا وقتی که محیط پر نویز باشد به

راحتی انجام نمی پذیرد. این حالت در شرایطی رخ میدهد که تغذیه ماشین الکتریکی توسط یک مبدل صورت پذیرد. در این شرایط نویزهای ناشی از کلید زنی مبدل تداخلل بزرگی را در سیگنالهای اندازه گیری بوجود می آورد.

تشخیص SEF در طیف DWT جریان استاتور:

با توجه به مطالبی که ذکر شد، مدل ماشین سالم و تحت خطا (SEF) توسط نرم افزار MAXWELL شبیه سازی شده و شکل موجهای جریان استاتور در حالت دائمی و گذرا حاصل شده است. سپس این موجهای جریان تحت تبدیل موجک گسته (DWT) قرار می گیرند. با اعمال تبدیل موجک گسسته از خانواده دابیشیز (db_{1}) به دلیل مزایایی که نسبت به سایر موجک ها دارند برای این کاربرد استفاده شده است [77]، ۶ سطح جزئیات $(D)^{*}$ و تقريبها (A) از آنها استخراج می شود . شکل * کلی این سطوح را نشان ميدهد .. دليل استفاده از تبديل موجك DWT ، محاسبات بسیار وقت گیر CWT می باشد و همچنین معمولا CWT برای آنالیز داده های با سایز بزرگ و تشخیص خطای on-line مناسب نیستند، در حالی که DWT یک محاسبه سریعی را از تبدیل موجک ایجاد می کند، که در کاهش زمان محاسبات که اهمیت ویژه ای دارد را باعث می شود. مزیت این روش نسبت به روشهای مشابهی که از روشهای فوریه استفاده کرده اند، سرعت بیشتر آن است. زیرا در تبديل فوريه براى جدا كردن مولفه اصلى سيگنال، حداقل به يک پریود کامل از سیگنال اصلی احتیاج داریم، ولی در تبدیل موجک استخراج ویژگیهای مورد نظر به هیچ پریود خاصی از موج احتیاج ندارد، و فقط به دلیل ماهیت تقارن نیم موجی سیگنال، نمونه برداری و تشخیص نوع خطا در هر نیم سیکل از سیگنال انجام می شود. مزیت دیگر این روش سرعت بیشتر در یافتن ضرایب WT یک سیگنال نسبت به ضرایب سری فوریه آن می باشد.



شکل ۴: جزئیات (D) و تقریبها (A) از یک سیگنال به روش DWT سیگنال (signal) در شیکل ۴ بیا رابطیه زیر بیه جزئییات و تقریبهای آن مرتبط می گردد.

$$Signal = D1 + D2 + D3 + D4 + D5 + A5$$
 (1.)

یکی از روش تشخیص خطای ناهممرکزی، استفاده از مقدار انرژی موجود در سیگنالهای تجزیه شده به وسیله تبدیل موجک میباشد. تبدیل موجک گسسته (DWT) و تبدیل موجک ثابت

(SWT) نمونه هایی از تجزیه و تحلیل بر اساس موجک هستند. هر دو تجزیه و تحلیل بر اساس تکنیک تجزیه و تقسیم سیگنال ها به

Details^

Approximation⁴

ISME⁷·¹¹, ¹·-¹⁷ May, ⁷·¹¹

چند باند فرکانسی است. تفاوت این است که DWT وضوح نمونه را در هر سطح تجزیه به نصف کاهش می دهد، در حالی که در SWT اینطور نیست.

در شکل ۵ ضرایب موجک سیگنال جریان ماشین القایی مورد شبیه سازی در شرایط پایدار نمایش داده شده



در این بخش با تبدیل SWT انرژیهای مذکور طبق جدول ۲ و جدول ۳ به ترتیب در شرایط پایدار و گذرا استخراج شده است. جدول ۲: انرژی موجود در سیگنالهای تجزیه شده در شرایط پایدار سالم و خطای ناهم مرکزی با درصدهای مختلف

سیگنال شرایط	D١	D۲	D٣	D٤	D٥	A٥
سالم	۰.۱۲	۰.۱۷	۳۷.۰	۲. ۰	۰.۴۶	140
١٠٪.	۱.۳۹	۰.۷۷	۳.۵۶	۴۷.	۴۷.	147
۴۰٪	1.47	۸۷. ۰	۳.۶۱	۵۳. ۰	۰۵۱	۱۴۰.۸۶
٧٠٪.	١.٧٧	۹۳. ۰	4.49	۶۶. ۰	1.17	۱۳۸

در جدول ۲ در شرایط پایدار انرژی مولفه های ^{(D} الی ^D با افزایش درصد ناهم مرکزی استاتیکی نیز افزایش مییابد و انرژی سیگنال ^A کاهش یافته است. همچنین روش استخراج انرژی سیگنالها در تبدیل موجک برای شرایط گذرا ماشین الکتریکی هم کاربردی است و میتواند خطای ماشین را در شروع کار آن تشخیص دهد که نتایج جدول ۳ موید این مطلب است.

جدول ۳: انرژی موجود در سیگنالهای تجزیه شده در شرایط گذرا سالم و خطای ناهممرکزی با درصدهای مختلف

سیگنال شرایط	D١	D۲	D٣	D٤	D٥	A٥
سالم	۲۸. ۰	۰.۹۹	۱.۸۰	7.74	۴.۵۵	۲۰۵.۸۳
١٠٪.	1.11	۱.۱۳	۳.۰۴	۳.۲۹	۴.۰۸	198.60
۴۰٪.	1.10	١.١٩	۳.۰۵	۳.۲۴	4.74	197.49
٧٠٪.	1.71	1.71	۳.۴۴	۳.۵۳	۴.۵۶	197.04
	_					

در جدول ۳ انرژی سیگنالهای D۱ الی D۳ با افزایش درصد ناهممرکزی استاتیکی نیز افزایش مییابد و انرژی سیگنال A⁰ کاهش یافته است. همانطور که مشخص است تشخیص خطای ناهممرکزی

Stationary Wavelet Transform'

استاتیکی به راحتی توسط انرژیهای سیگنالهای تجزیه شده قابل شناسایی است.

کاربرد تبدیل موجک در حذف نویز از سیگنال

تشخیص خطای ناهم مرکزی در محیطهای صنعتی که نویز فراوانی دارد یکی از چالشهای اساسی است . بنابراین حذف نویز می-تواند گام موثری در تشخیص دقیق و سریع انواع خطاهای ماشین الکترکی باشد که روش تبدیل موجک در این زمینه راهگشا است.

شکل سیگنال جریان در حالت گذرا برای ماشین تحت مطالعه به صورت شکل ۶ میباشد. اگر نویز سفید گوسی با دامنه ۵.۰ و متوسط صفر ناشی از اندازه گیری و تداخل تغذیه به آن افزوده شود و سیگنال جریان در اختیار مطابقشکل ۷ حاصل گردد، آنگاه FFT شکل این موج به صورت شکل ۸ می گردد که نشان میدهد تشخیص خطا در لحظه راهاندازی را و تقریبا غیر ممکن می سازد.



شکل ۶: شکل موج جریان در حالت سالم و گذرا و بدون نویز ترکیب با شکل ۷







دیدگاه اصلی در نویز زدایی موجک بدان معناست که تبدیل موجک ویژگی های سیگنال را در چند ضریب موجک بزرگ متمرکز می کند[٤].

با استفاده از ابزار تبدیل موجک به راحتی میتوان نویز را از سیگنال پایه تفکیک نمود و سپس، شناسایی خطا را در آن بررسی نمود. بنابراین در ادامه شکل موج جریان با خطای ۷۰ درصدی که شبیه شکل ۷ است پس از تفکیک نویز از آن مجدداً انرژی سیگنالهای جزئی و تقریبی بررسی شده است.



شکل ۹: شکل موج تجزیه شده جریان در حالت خطای ۲۰٪ و گذرا به وسیله تبدیل موجک در دو سطح

جدول ۴، انرژی موج جریان به همراه نویز را با تبدیل موجک در شرایط خطای ناهممرکزی استاتیکی مشخص می نماید. جدول ۴: انرژی موجود در سیگنالهای تجزیه شده در شرایط گذرا سالم و خطای ناهممرکزی با درصدهای مختلف به همراه نویز

سیگنال شرایط	D١	D۲	D٣	D٤	D٥	A٥
سالم	١.٩٩	4.07	4.4	۸.۰۴	۲۰.۶۱	۲۱۵.۹۳
١٠٪	۲.۱	۳.۹۳	۴.۸۵	۸.۳۵	70.94	۸۸.۸۰۲
۴۰٪	۲.۱۸	۳.۹۸	۵.۰۱	٨.٢٩	۲۰.۸۱	۲۰۷.۹۷
٧٠٪	۲.۱۵	۳.۸۸	4.97	۸.۴۲	۲۳.۰۲	۲۰۷.۵۹

با توجه به جـدول ۴، در شـرایط وجـود نـویز در سـیگنال مـورد مطالعه، ضرایب بالاگذر (Dj) به نویز آلوده می شوند، فلذا با استفاده از ضرایب تقریب (Aj) که در اینجا ^A می می اشد می توان خطای نـاهم-مرکزی استاتیکی و شدت آن را به خوبی تشخیص داد.

نتيجه گيري و جمع بندي

اگر چه روش FFT در تحلیل سیگنال جریان برای شناسایی خطای ناهم مرکزی استاتیکی در شرایط پایدار (steady state) مناسب است ولی این روش در مقادیر کوچک ناهم مرکزی استاتیکی و شرایط گذرا و مخصوصاً در محیطهای پر از نویز مثل کلیدزنی، موفق نشان نمی دهد. در این مقاله نشان داد شد روش تبدیل موجک در تحلیل سیگنال پایدار و گذرا و همچنین شرایط وجود نویز برای شناسایی خطای مذکور در ماشین القایی کارا و قابل اعتماد است.

مراجع و منابع

[1] Hussein, A. M., Obed, A. A., Zubo, R. H., Al-Yasir, Y. I., Saleh, A. L., Fadhel, H., ... & Abd-Alhameed, R. A. (^Y · ^YY). Detection and Diagnosis of Stator and Rotor Electrical Faults for Three-Phase Induction Motor via Wavelet Energy Approach. *Electronics*, 11(^A), ^YY°^T.

- [17] Hemamalini, S. (Y ·)A). Rational-dilation wavelet transform based torque estimation from acoustic signals for fault diagnosis in a threephase induction motor. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 15(1), YÉGY-YO·).
- [12] Yahia, K., Cardoso, A. J. M., Ghoggal, A., & Zouzou, S. E. (7,12). Induction motors airgapeccentricity detection through the discrete wavelet transform of the apparent power signal under non-stationary operating conditions. *ISA transactions*, 53(7), 7, 7, 711.
- [1°]Ramirez-Nunez, J. A., Antonino-Daviu, J. A., Climente-Alarcón, V., Quijano-López, A., Razik, H., Osornio-Rios, R. A., & Romero-Troncoso, R. D. J. (^Y · ¹^A). Evaluation of the detectability of electromechanical faults in induction motors via transient analysis of the stray flux. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(°), ^{£YYY}:-^{£YYY}.
- [11] Gen-Yuan, Z. (****, March). Abnormal Noise Detection Method Based on Wavelet Filter and KL Information. In 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering (Vol. *, pp. * ٤-٢٩). IEEE.
- [17] Faiz, J., Takbash, A. M., & Mazaheri-Tehrani, E. (Y · 17). A review of application of signal processing techniques for fault diagnosis of induction motors–Part I. AUT Journal of Electrical Engineering, 49(Y), 1.9-1YY.
- [1^]J Faiz, J., Takbash, A. M., & Mazaheri-Tehrani, E. (^Y · ¹A). Application of signal processing tools for fault diagnosis in induction motors-A Review-Part II. AUT Journal of Electrical Engineering, 50(¹), ^Y-¹Y.
- [19] Thorsen, o.v., and Dalva, M., "Condition Monitoring Methods, Failure Identification and Analysis for High Voltage motors in Petrochemical Industry" Electrical Machines and Drives, Eight International Conference 1999
- [Y•] Mathew, L., & Sharma, A. (Y•14, March). Various Indices for Diagnosis of Air-gap Eccentricity Fault in Induction Motor-A Review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. YT1, No. 1, p. •1Y•TY). IOP Publishing.
- سيد جلال الدين حسيني , ۱۳۹۹ , ارزيابي شاخصهاي تشخيص [٢١] خطاي ناهممركزي در ماشينهاي القايي به روش المان محدود با وجود اثر اشباع , اولين كنفرانس بين المللي موتور ها و ژنراتور هاي الكتريكي
- [YY] Thomson, W. T., & Culbert, I. (Y · YY). Current signature analysis for condition monitoring of cage induction motors: Industrial application and case histories. John Wiley & Sons.
- [YY] Siddiqui, K. M., Ahmad, R., & Bakhsh, F. I. (Y·YY). Intelligent Technique for Eccentricity Fault Diagnosis of Power Apparatus Using Signal Processing Method. In *Intelligent Data Analytics for Power and Energy Systems* (pp. YY9-Y£9). Springer, Singapore.
- [Y1] https://ch.mathworks.com/help/wavelet/ug/waveletdenoising.html

- [Y] Roshanfekr, R., & Jalilian, A. (Υ·Υ٦). Wavelet-based index to discriminate between minor inter-turn short-circuit and resistive asymmetrical faults in stator windings of doubly fed induction generators: a simulation study. *IET Generation, Transmission & Distribution, 10*(Υ), ΥΥ٤-ΥΔΥ.
- [٣] Yahia, K., Cardoso, A. J. M., Ghoggal, A., & Zouzou, S. E. (^Y • ^Y [£]). Induction motors airgapeccentricity detection through the discrete wavelet transform of the apparent power signal under non-stationary operating conditions. *ISA transactions*, 53(^Y), ^T • ^T - ^Y).
- [٤] Kechida, R., Menacer, A., & Talhaoui, H. (^(,)). Approach signal for rotor fault detection in induction motors. *Journal of failure* analysis and prevention, 13(⁽⁾), ^(c)-^(o).
- [°] Bouzida, A., Touhami, O., Ibtiouen, R., Belouchrani, A., Fadel, M., & Rezzoug, A. (^Υ· ^γ·). Fault diagnosis in industrial induction machines through discrete wavelet transform. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(^η), [£]^ΥΛο-[£]^Υ^ηο.
- [1] Ali, M. Z., Shabbir, M. N. S. K., Liang, X., Zhang, Y., & Hu, T. (^Y · ^Y ^A). Machine learningbased fault diagnosis for single-and multi-faults in induction motors using measured stator currents and vibration signals. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(^r), YTYA-YTAY.
- [Y] Ali, M. Z., Shabbir, M. N. S. K., Zaman, S. M. K., & Liang, X. (Y · Y ·). Single-and multi-fault diagnosis using machine learning for variable frequency drivefed induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(Y), YYY £-YYYY.
- [^] Rahman, M. M., & Uddin, M. N. (Y, YY). Online unbalanced rotor fault detection of an IM drive based on both time and frequency domain analyses. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(1), 1, XY-1, 97.
- [9] Zaman, S. M. K., Liang, X., & Zhang, L. (Y · Y ·). Greedy-gradient max cut-based fault diagnosis for direct online induction motors. *IEEE Access*, 8, 1997A01-1997ATY.
- [1] Zaman, S. M. K., & Liang, X. ((1). An effective induction motor fault diagnosis approach using graph-based semi-supervised learning. *IEEE Access*, 9, VEV1-VEAT.
- [1] Malekpour, M., Phung, B. T., & Ambikairajah, E. (^Y, ^Y). Online technique for insulation assessment of induction motor stator windings under different load conditions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(1), ^{YE9_YoA}.
- [17] Bouzida, A., Touhami, O., Ibtiouen, R., Belouchrani, A., Fadel, M., & Rezzoug, A. (⁽⁽⁾). Fault diagnosis in industrial induction machines through discrete wavelet transform. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(⁽⁾), ⁽⁽⁾/₍₎, ⁽⁾/₍₎).