

تشخیص خطای میله شکسته روتور در موتور القایی قفس سنجابی با استفاده از روش تبدیل موجک پیوسته

امید عبدی منفرد^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ عارف درودی^۲، استادیار؛ امین درویشی^۳، دانشجوی کارشناسی ارشد

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شاهد - تهران - ایران - omid.abdi@shahed.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شاهد - تهران - ایران - doroudi@shahed.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شاهد - تهران - ایران - a.darvishi@shahed.ac.ir

چکیده: به دلیل کاربرد فراوان موتورهای القایی در صنایع مختلف، تشخیص خطای سریع و به موقع در این نوع موتورها به منظور پیشگیری از معیوب شدن پروسه های صنعتی یک امر ضروری تلقی می شود. در این مقاله روشی جدید برای تشخیص خطای میله شکسته روتور که از جمله خطاهای رایج در موتورهای القایی قفس سنجابی است، ارائه شده است. روش ارائه شده بر مبنای تحلیل جریان استاتور و پردازش سیگنال به کمک روش تبدیل موجک پیوسته (CWT) است. مزیت روش، تشخیص خطای میله شکسته روتور در حالت کار عادی موتور و در بارهای مختلف است. برای استفاده از این روش تشخیص خطا ابتدا بایستی داده های جریان استاتور موتور را در شرایط سالم و معیوب بدست آورده و سپس با تحلیل این داده ها و استفاده از یک شاخص مناسب خطای مورد نظر را تشخیص داد. از روش عناصر محدود (FEM) برای تحلیل موتور در دو حالت سالم و معیوب استفاده خواهد شد.

واژه های کلیدی: موتور القایی قفس سنجابی، تحلیل جریان استاتور، تبدیل موجک پیوسته، تشخیص خطای میله شکسته

Detection of broken rotor bars fault in squirrel cage induction motors using continuous wavelet transform

O. Abdi Monfared¹, MSc Student; A. Doroudi², Assistant Professor; A. Darvishi³, MSc Student

1- Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, Email: omid.abdi@shahed.ac.ir

2- Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, Email: doroudi@shahed.ac.ir

3- Faculty of Engineering, Shahed University, Tehran, Iran, Email: a.darvishi@shahed.ac.ir

Abstract: Induction motors have numerous applications in various industries. In order to avoid industrial processes failures, fast and timely fault detection of motors is essential. In this paper, a novel method is presented for on-line detection of broken rotor bars which is a common rotor faults in induction motors. The method is based on the stator current analysis and signal processing using continuous wavelet transform (CWT). The most advantage of the method is that it detects the broken rotor bars in normal operations and at different loading conditions. In this method, the stator current signal should first be analyzed in the healthy and faulty conditions and then the broken bar can be diagnosed using a proposed index. Finite element method (FEM) is applied to simulate the motor under healthy and faulty conditions.

Keywords: Squirrel cage induction motors, stator current analysis, continuous wavelet transform, detection of broken bars fault

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۱۱، ۱۳۹۶/۰۴/۰۲، ۱۳۹۶/۰۶/۰۸ و ۱۳۹۶/۰۸/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۹

نام نویسنده مسئول: عارف درودی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - روبروی حرم امام خمینی (ره) - آزادراه خلیج فارس - دانشگاه شاهد - دانشکده فنی و مهندسی.

۱- مقدمه

موتورهای القایی قفس سنجابی نقش مهمی در صنایع مختلف ایفا کرده و در فرآیندهای صنعتی بسیاری مورد استفاده قرار می گیرند [۱-۲]. این موتورها به دلیل استحکام و قابلیت اطمینان بالا اغلب در محیط های سخت به کار گرفته می شوند. این شرایط نامطلوب سبب می شود که موتور القایی در معرض صدمه دیدگی قرار گیرد و در این حالت اگر شناسایی عیب صورت نگیرد، رشد تدریجی خطا و معیوب شدن کامل موتور دور از انتظار نخواهد بود. به عبارت دیگر اگر تشخیص خطا به سرعت انجام گیرد می توان از وارد شدن آسیب جدی به موتور جلوگیری نمود. لذا توجهات ویژه ای به سیستم های نظارت بر وضعیت^۱ موتور در چند سال گذشته صورت گرفته است [۳-۴]. حدود ۱۰٪ از خطاهای موتورهای القایی مربوط به خطای روتور بوده و از جمله خطاهای رایج روتور، شکست میله های آن است.

شکست میله روتور می تواند موجب کاهش گشتاور راه اندازی، کاهش متوسط گشتاور در حالت بارداری، افزایش رپل گشتاور، افزایش تلفات هسته، تغییر در توزیع دمایی موتور و ایجاد نقطه داغ و همچنین افزایش جریان راه اندازی گردد.

خطای میله شکسته روتور می تواند ناشی از عواملی مانند نوسان سرعت و گشتاور، تنش حرارتی و معیوب شدن ورقه های روتور باشد [۵-۶]. ترک خوردگی در ساختار روتور موتورهای القایی قفس سنجابی می تواند منجر به تنش های متالورژی غیریکنواخت در قفسه شود. این نوع عیوب که عمدتاً در پروسه ساخت روتور و به خصوص در مرحله لحیم کاری و پرسینگ ایجاد می گردند، می توانند در هنگام گردش روتور به خرابی آن منجر شوند. همچنین حلقه های انتهایی سنگین وزن نیز با ایجاد نیروهای سانتریفوژ بزرگ می توانند تنش های اضافی روی میله های روتور بوجود آورند. در هر حال و به هر دلیلی که میله های روتور آسیب ببینند نتیجه آن ایجاد جریان نامتقارن خواهد بود. جریان های نامتقارن در کارکردهای طولانی موتور موجب افزایش بیش از حد دما در نقطه آسیب دیده خواهد شد که این امر می تواند منجر به شکست کامل میله گردد. به محض شکست یک میله، جریان در میله های اطراف میله افزایش یافته و میزان نامتقارنی را بالا می برد که خود منجر به افزایش تنش های مکانیکی و حرارتی بیشتر در میله های اطراف نقطه خطا می گردد. خطا به همین شکل گسترش یافته و میله های بیشتری دچار شکست می گردند. ترک خوردگی ها می توانند در هر نقطه روتور مثلاً روی میله، روی حلقه های انتهایی یا در محل اتصال این دو به وجود آیند (این اتصال به صورت پرچ، پیچ و جوش است). عبور جریان بیشتر از میله های اطراف یک میله آسیب دیده همچنین می تواند موجب افزایش تلفات و در نتیجه ازدیاد حرارت در آن میله ها و سبب بروز مشکلات عایقی در روتور گردد (مثلاً نقطه سوز شدن و یا تخریب کامل

عایق شیارهای روتور). هرچه زمان راه اندازی موتور بالاتر بوده و یا تعداد دفعات قطع و وصل موتور افزایش یابد احتمال خرابی هم بیشتر می شود.

تشخیص سریع خطای میله شکسته روتور مانع از ادامه خرابی و شکسته شدن میله های بیشتر می شود. با توجه به تعداد بسیار زیاد موتورهای القایی در صنایع بحث پایش یا مانیتورینگ تشخیص خطا من جمله خطای شکست میله های روتور برای این گونه موتورها ضروری به نظر می رسد. بالاترین جریان از میله های روتور در زمان راه اندازی از آن عبور می کند. با شکست چند میله، جریان عبوری باید از تعداد میله های کمتری عبور کرده و این امر می تواند موجب آسیب دیدگی میله های سالم گردد. تاکنون روش های مختلفی جهت تشخیص و شناسایی این نوع از خطا ارائه شده است. برخی از این روش ها بر اساس تحلیل فرکانس سیگنال جریان های استاتور توسط روش تبدیل فوریه سریع^۲ (FFT) و تبدیل فوریه زمان کوتاه^۳ (STFT) است [۷-۸]. در روش FFT تنها دامنه هر فرکانس تعیین می گردد اما روش STFT علاوه بر دامنه، زمان وقوع فرکانس را هم نشان می دهد. اگرچه روش STFT مشکل زمان وقوع را حل می کند اما مشکل تغییرات شدید در سیگنال با این روش پردازش سیگنال^۴ مرتفع نخواهد شد [۸]. برای برطرف کردن این مشکل از روش تبدیل موجک^۵ (WT) استفاده می شود. روش تبدیل موجک به دلیل ایجاد یک تحلیل مولتی رزولوشن^۶، مشکلات FFT و STFT را ندارد و به همین دلیل روشی مناسب برای پردازش سیگنال است [۱۰-۱۵]. تبدیل موجک پیوسته (CWT) و تبدیل موجک گسسته (DWT) از انواع موجک های مورد استفاده هستند که در زمینه های مختلفی از این روش ها استفاده شده است [۱۱]. تاکنون مقالات فراوانی در زمینه تشخیص خطای میله شکسته روتور به روش تبدیل موجک گسسته ارائه شده است [۱۴-۱۲]. عمده این مقالات به دلیل عدم تشخیص مناسب خطای میله شکسته روتور در حالت کار دائم موتور، از داده های زمان راه اندازی موتور بهره می گیرند. اگرچه این داده ها برای موتورهای بزرگ با توجه به زمان راه اندازی بالا قابل استفاده است اما در خصوص موتورهای کوچک و دائم کار به دلیل تعداد کم داده ها کارایی نخواهد داشت.

در این مقاله از روش تبدیل موجک پیوسته گوسی در نرم افزار متلب جهت تحلیل طیف فرکانسی سیگنال جریان استاتور و در نتیجه تشخیص خطای میله شکسته روتور، استفاده شده است. دلیل استفاده از این روش، تشخیص دقیق مولفه های فرکانسی جریان استاتور در اثر خطای میله شکسته روتور و در حالت کار دائم موتور است. همچنین شاخصی برای تشخیص خطای میله شکسته معرفی خواهد شد که در شرایط کار نرمال ماشین و تغییرات بار کارایی بالایی نشان می دهد.

ساختار مقاله بدین شرح است: در بخش دوم تأثیر خطای میله شکسته روتور در سیگنال جریان استاتور و تحلیل فیزیکی آن ارائه

$$3sf_1 + (1-s)f_1 = (1+2s)f_1 \quad (۴)$$

$$-3sf_1 + (1-s)f_1 = (1-4s)f_1 \quad (۵)$$

بنابراین، زمانی که خطای میله شکسته در روتور رخ می‌دهد مولفه‌های هارمونیک با الگوی $(1 \pm 2qs)f_1$ در سیم‌پیچ‌های استاتور القا می‌شوند و درحالتی که تعداد میله‌های شکسته افزایش یابد موجب افزایش دامنه مولفه‌های هارمونیک می‌شود $q=(1,2,3,...)$ [۷، ۱۵]. با پردازش مناسب سیگنال در طیف جریان استاتور این مشخصه‌ها قابل تشخیص خواهد بود. نسبت دامنه فرکانس اصلی (f_1) به دامنه فرکانس $(1 \pm 2s)f_1$ از رابطه (۶) به دست می‌آید، که این رابطه بیانگر بزرگ‌تر بودن مولفه هارمونیک در $q=1$ از دیگر مولفه‌ها است [۱۶].

$$R_s = \frac{\sin \alpha}{2p(2\pi - \alpha)} \quad (۶)$$

$$\alpha = \frac{2\pi n_b p}{R} \quad (۷)$$

در معادلات (۶) و (۷)، n_b بیانگر تعداد میله‌های شکسته روتور، p بیانگر تعداد جفت قطب‌ها و R نشان‌دهنده تعداد میله‌های روتور است.

۳- تبدیل موجک پیوسته

تبدیل موجک پیوسته (CWT) تابع $X(t)$ با ضرب داخلی آن تابع که یک سیگنال زمان پیوسته است و نسخه انتقال یافته و مقیاس شده تابع $\varphi(t)$ ، که موجک نامیده می‌شود به دست می‌آید.

$$CWT(b,a) = \left| a \right|^{\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \varphi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (۸)$$

تابع موجک گوسی مطابق رابطه (۹) است:

$$f(t) = \exp(j2\pi F_0 t - 0.5t^2) \quad (۹)$$

که در آن F_0 فرکانس نوسان موجک است. فرکانس F_0 با توجه به سیگنال $x(t)$ و مؤلفه‌های فرکانسی آن انتخاب می‌گردد. در این مقاله مقدار دقیق فرکانس نوسان موجک براساس سعی و خطا که مطلوب‌ترین نتایج را می‌دهد برابر 15π در نظر گرفته شده است.

تبدیل موجک پیوسته تابع دو متغیر a و b است که به ترتیب پارامترهای انتقال^۷ و مقیاس^۸ نامیده می‌شوند. تابع $\varphi(t)$ ، تابع موجک بوده و $\varphi^*(t)$ مزدوج $\varphi(t)$ است. در این مقاله از موجک گوسی جهت تشخیص فرکانس استفاده می‌شود. موجک گوسی حالت نمایی داشته و حول صفر متقارن است. این موجک برای تشخیص فرکانس‌های مختلف یک سیگنال اعطاف‌پذیر بوده و از این رو برای تحلیل سیگنال دارای نوسان بسیار مناسب خواهد بود [۱۷].

می‌شود. در بخش سوم روش پردازش سیگنال استفاده شده در مقاله معرفی می‌شود. در بخش چهارم روش شبیه‌سازی موتور القایی قفس سنجایی و تحلیل موتور با روش عناصر محدود در حالت‌های سالم و معیوب و روش تشخیص خطای میله شکسته روتور انجام گرفته و در بخش پنجم شاخص تشخیص خطا معرفی می‌شود. در بخش ششم تأثیر وجود نویز در داده‌های اندازه‌گیری بر روی عملکرد الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌شود و در بخش هفتم تغییرات بار بر عملکرد تبدیل موجک صورت گرفته است و در بخش آخر بحث و نتیجه‌گیری ارائه می‌گردد.

۲- تأثیر میله شکسته روتور بر روی سیگنال جریان استاتور

هنگامی که موتور القایی در شرایط ماندگار کار می‌کند، سرعت روتور به سرعت $(1-s)n_s$ می‌رسد و لذا در این حالت سرعت میدان دوار استاتور نسبت به هادی‌های روتور sn_s خواهد بود. در این شرایط جریانی با فرکانس sf_1 در میله‌های روتور ایجاد شده و این جریان، میدان دواری هم‌جهت با سرعت روتور ایجاد می‌کند. اگر خطای میله شکسته در موتور رخ دهد، در این حالت به دلیل وجود عدم تعادل (هرگونه عدم تعادل را می‌توان با دو سری جریان‌های توألی منفی و مثبت مدل نمود. جریان‌های توألی مثبت میدان هم‌جهت با سرعت روتور و جریان‌های توألی منفی میدانی در عکس جهت آن تولید می‌کنند) یک میدان گردان هم‌جهت با سرعت روتور و با فرکانس sf_1 (میدان راست‌گرد) و یک میدان گردان در جهت عکس نسبت به سرعت روتور با همان فرکانس (میدان چپ‌گرد) در روتور ایجاد می‌شود. حاصل جمع این دو میدان $(\pm sf_1)$ و سرعت روتور باعث ایجاد میدان‌های گردان f_1 و $(1-2s)f_1$ در فاصله هوایی می‌شود:

$$sf_1 + (1-s)f_1 = f_1 \quad (۱)$$

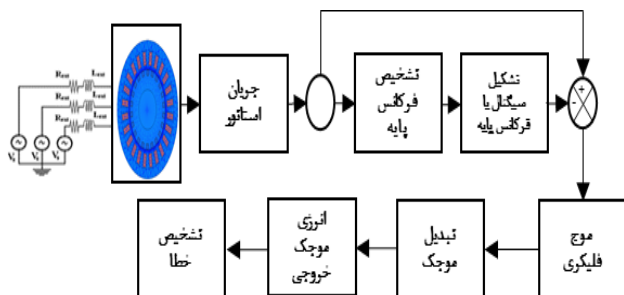
$$-sf_1 + (1-s)f_1 = (1-2s)f_1 \quad (۲)$$

بنابراین، دو مؤلفه جریان با فرکانس‌های f_1 و $(1-2s)f_1$ در استاتور، القا می‌گردد. تقابل بین میدان گردان چپ‌گرد روتور و میدان استاتور گشتاور الکترومغناطیس را دارای ریبیل کرده و سرعت روتور را نوسانی می‌سازد. سرعت نسبی بین دو میدان فوق‌الذکر برابر با رابطه (۳) است:

$$f_1 - (1-2s)f_1 = 2sf_1 \quad (۳)$$

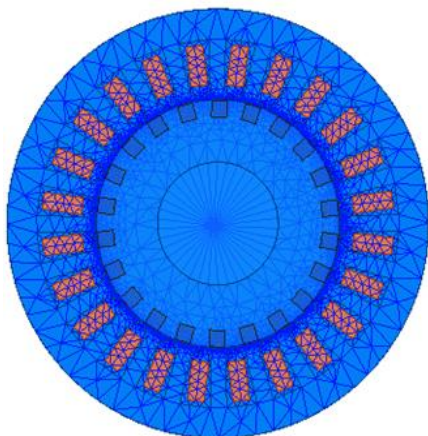
به همین ترتیب این نوسان در سرعت روتور، جریانی با فرکانس $3sf_1$ در روتور تولید می‌کند و این جریان نیز به نوبه خود باعث ایجاد مولفه‌های فرکانسی $(1+2s)f_1$ و $(1-4s)f_1$ در جریان سیم‌پیچ استاتور می‌شود [۷].

حالت خطا از روی ابعاد هندسی و پارامترهای مغناطیسی موتور محاسبه کند. با اطلاع از توزیع میدان می توان سایر کمیت های موتور، نظیر شکل موج ولتاژ القایی، چگالی شار مغناطیسی درون فاصله هوایی و اندوکتانس سیم پیچ های مختلف را به دست آورد. [۱۹].



شکل ۱: بلوک دیاگرام تشخیص خطای میله شکسته روتور در موتور القایی قفس سنجابی

در شکل ۲ نمای دوبعدی موتور القایی قفس سنجابی شبیه سازی شده نشان داده شده است. زمانی که هدف تحلیل موتور القایی با روتور میله شکسته شده باشد، توزیع میدان مغناطیسی نامتقارن خواهد شد و بایستی تمام ساختار موتور مدل شود. در این حالت زمان تحلیل به طور قابل توجهی افزایش می یابد. در این مقاله از افزایش مقاومت میله های روتور برای مدل سازی خطای میله شکسته روتور استفاده شده است. با توجه به میزان شکست میله روتور می توان مقدار مقاومت میله مورد نظر را تغییر داد. در مدل سازی خطای میله شکسته، جریان میله شکسته شده در حالت شکست کامل باید صفر در نظر گرفته شود. جریان صفر در میله موجب افزایش جریان در دیگر میله های روتور می شود. از طرف دیگر توزیع شار در اطراف میله شکسته شده نامتقارن شده و چگالی شار در یک طرف میله شکسته افزایش و در طرف دیگر کاهش می یابد. البته میله شکسته شده جریان غیر صفر هم می تواند داشته باشد، که به نحوه شکست میله بستگی دارد [۲۰، ۲۱]. در این مقاله مقدار جریان میله شکسته شده غیر صفر در نظر گرفته شده است. مشخصات موتور القایی شبیه سازی شده در جدول ۱ آمده است.



شکل ۲: نمای دوبعدی موتور القایی قفس سنجابی

شکل گسسته تبدیل موجک در رابطه (۱۰) آمده است:

$$CWT(a, iT_s) = T_s \cdot \sum_{n=1}^{N_a} i(nT_s) \cdot \phi\left[\frac{nT_s}{a} - \frac{N_{dw} \cdot T_s}{2}\right] \quad (10)$$

اگر یک سیگنال با پنجره تحلیل T_{ds} با دوره T_s نمونه برداری^۹ شود، آنگاه تعداد نمونه ها برابر با $N_{ds} = T_{ds} / T_s$ بوده و فرکانس نمونه برداری برابر با $f_s = 1/T_s$ خواهد بود. حال اگر تابع موجک نیز با فرکانس f_s نمونه برداری شود آنگاه $N_{dw} = T_{dw} / T_s$ است که T_{dw} و N_{dw} به ترتیب طول پنجره تحلیل و تعداد نمونه های تابع موجک را نشان می دهند. با توجه به متغیر بودن مقیاس تابع موجک، تعداد نمونه ها بایستی برابر با $N_a = N_{dw} a$ باشد. $i(nT_s)$ و $\phi(nT_s)$ شکل موج نمونه برداری شده سیگنال تحلیل و موجک را نشان می دهد در این مقاله $T_s = 0.01$ و $T_{dw} = T_{ds} = 6/4$ در نظر گرفته شده است.

از طریق تغییر مقیاس و انتقال زمانی تابع موجک مادر، موجک قادر به استخراج مولفه های مهم از داخل سیگنال می شود. در رابطه (۸) هرچه مقدار مقیاس a کوچک تر باشد دقت تحلیل بالاتر می رود یعنی سیگنال در یک پنجره تبدیل موجک باریک تر و در یک مقیاس کوچک تر آنالیز شده است. با تنظیم صحیح مقیاس می توان مولفه های فرکانسی مورد نظر را از سیگنال اصلی استخراج نمود [۱۸].

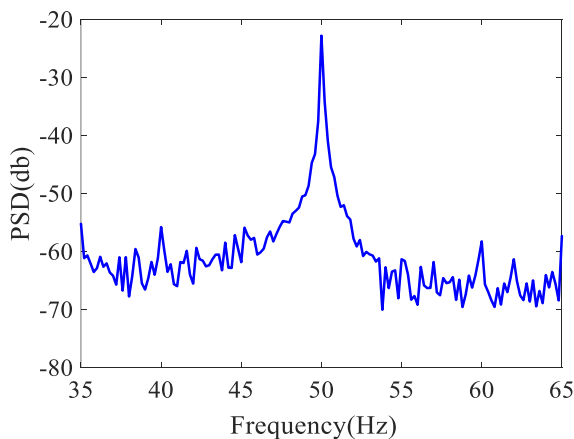
ضرب داخلی درواقع شباهت بین سیگنال اصلی و تابع الگو را توصیف می کند. این یکی از ویژگی های روش تبدیل موجک پیوسته در مقایسه با روش های دیگر است که همبستگی بین دو تابع هم گفته می شود. همبستگی عاملی مهم برای تطبیق بین دو سیگنال است. در این مقاله ضرب داخلی بین سیگنال جریان استاتور و تابع موجک صورت می گیرد. این امر باعث بوجود آمدن ضرایب همبستگی یا ضرایب تبدیل موجک پیوسته می شود. هرچه این ضرایب بزرگ تر باشند یعنی شباهت بیشتری بین تابع موجک و تابع ناشناخته وجود دارد. در حوزه فرکانسی این امر به این معناست که اگر یک مولفه فرکانسی در یک سیگنال، در یک مقیاس خاصی قرار گیرد، ضریب موجک در آن مقیاس، اندازه نسبتاً بزرگی خواهد داشت. بنابراین، با تغییر مقیاس می توان به بزرگ ترین مقدار $CWT(a, b)$ دست پیدا کرد.

۴- روش تشخیص خطای میله شکسته روتور

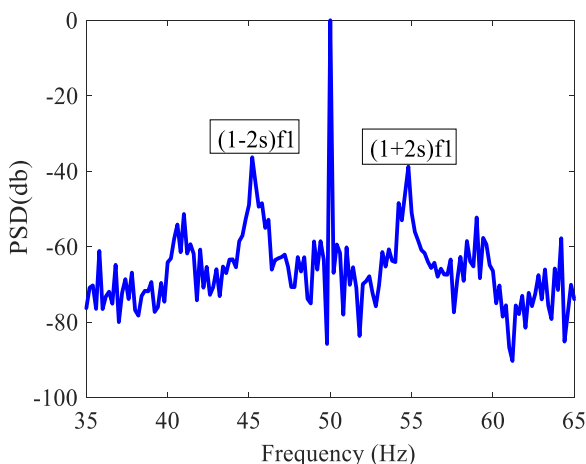
شکل ۱ بلوک دیاگرام روش تشخیص خطای میله شکسته روتور را نشان می دهد. پس از شبیه سازی موتور مورد نظر و استخراج سیگنال های جریان استاتور، نوبت به تشخیص فرکانس پایه و تشکیل سیگنال جریان با این فرکانس می رسد و سپس با مشخص شدن موج فلیکری و اعمال روش تبدیل موجک پیوسته بر روی این موج و بدست آوردن انرژی موجک خروجی، می توان خطای میله شکسته روتور را تشخیص داد. در این مقاله از روش عناصر محدود^{۱۰} با استفاده از نرم افزار ماکسول^{۱۱} برای شبیه سازی موتور القایی قفس سنجابی در حالت های سالم و معیوب استفاده شده است. روش عناصر محدود قادر است توزیع میدان مغناطیسی درون موتور را در حالت سالم و حتی در

جدول ۱: مشخصات موتور القایی قفس سنجابی

مقدار	کمیت
۳	تعداد فازها
۲/۲	توان موتور (KW)
۴	تعداد قطب
۴۰۰	اندازه ولتاژ (V)
۱۸۱	قطر خارجی استاتور (mm)
۱۰۵	قطر داخلی استاتور (mm)
۰/۳	طول فاصله‌هوایی (mm)
۱۴۳۲	سرعت موتور (rpm)
۲۲	تعداد میله‌های روتور
۲۴	تعداد شیارهای استاتور
۵۰	فرکانس پایه (HZ)
۰/۸۶	ضریب توان



شکل ۳: FFT سیگنال جریان استاتور در حالت سالم



شکل ۴: FFT سیگنال جریان استاتور در حالت یک میله شکسته

شکل‌های ۵ و ۶ جریان استاتور در حالت سالم و میله شکسته را نشان می‌دهند که موتور در بار نامی و لغزش $S=0/045$ کار می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود جریان استاتور در حالت شکست میله روتور دارای مولفه‌های فرکانسی اضافی است که فرکانس آن‌ها کمتر از فرکانس پایه است.

مطالعات قبلی نشان می‌دهند که شکل موج حاصله را می‌توان به شکل ترکیبی از یک موج مدوله‌شده با فرکانس $f_m = (1 \pm 2ks)f_1$ روی موج با فرکانس پایه فرض نمود. نظر به شباهت سیگنال مدوله‌شده با سیگنال ولتاژ در حالت نوسان شبکه در مبحث کیفیت توان (فرکانس‌های مدوله‌شده در گستره ۰/۵ تا ۳۰ هرتز) این سیگنال، موج فلیکری نامیده شده است.

$$i(t) = I_m \sin \omega_1 t (1 + K_m \cos \omega_m t) \quad (11)$$

که در آن ω_1 فرکانس زاویه‌ای پایه و ω_m فرکانس زاویه‌ای موج مدوله شده است. اگر از بسط سینوسی استفاده کنیم خواهیم داشت:

$$i(t) = I_m \sin \omega_1 t + \frac{K_m I_m}{2} \sin(\omega_1 + \omega_m) t + \frac{K_m I_m}{2} \sin(\omega_1 - \omega_m) t \quad (12)$$

با پردازش سیگنال جریان و یافتن این فرکانس‌های اضافی می‌توان به معیوب بودن میله‌های روتور پی برد.

با در نظر گرفتن فرکانس پایه و مقدار لغزش موتور، مولفه‌های فرکانسی در دو گستره کمتر از ۵۰ Hz و بالاتر از ۵۰ Hz ایجاد می‌شوند. به دلیل تقارن می‌توان تبدیل موجک را به هر بازه به تنهایی و به دلخواه اعمال نمود. در مقاله حاضر با اعمال تابع موجک به مولفه‌های فرکانسی بیش از فرکانس ۵۰ Hz و نهایت کمتر از ۱۰۰ Hz شاخص مورد نظر محاسبه گردید. مولفه‌های با فرکانس بالاتر دارای دامنه کوچکی بوده و تأثیر چندانی بر محاسبات ندارند. هارمونیک‌های مکانی و زمانی موجود در موتورهای القایی معمولاً فرکانس‌های بالایی را دارا هستند و در این گستره فرکانسی قرار نمی‌گیرند. بنابراین با توجه به الگوی فرکانسی بوجود آمده در اثر خطای میله شکسته و هارمونیک‌های زمانی و مکانی که در موتور القایی وجود دارد، مشکلی در تشخیص این مولفه‌ها که در اثر خطای میله شکسته به وجود می‌آیند، رخ نمی‌دهد. ضمن اینکه مولفه‌های کمتر از فرکانس ۵۰ هرتز نیز می‌توانند جهت بازبینی پاسخ‌ها لحاظ گردند.

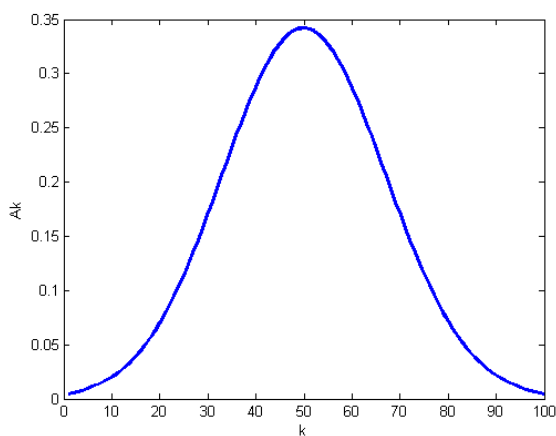
شکل‌های ۳ و ۴، نتیجه اعمال FFT بر سیگنال جریان استاتور در حالت یک میله شکسته روتور است. همانطور که مشاهده می‌شود مشکل استفاده از FFT، فرکانس‌های اضافی و ناخواسته ایجاد شده در زمان استخراج فرکانس‌های یک سیگنال است که خطای بالایی را به همراه دارد (به خصوص در بارهای سبک).

اکنون با داشتن مقادیر مختلفی از a_k می توان $CWT(a_k)$ و A_k را به دست آورد. پس از اینکه تمام مقادیر برای A_k محاسبه شد، بیشینه مقدار A_k مربوط به فرکانس پایه جریان استاتور موتور القایی است. شکل ۷ مقدار A_k را برای k های مختلف برای تعیین فرکانس پایه موتور نشان داده است. بزرگ ترین دامنه موجک مربوط به فرکانس پایه بوده که در این مرحله همان فرکانس 50 Hz است. همانطور که انتظار می رفت بیشترین مقدار A_k در $k=50$ (با توجه به f_l و f_{ru} این k معادل فرکانس فلیکری 50 Hz است) دیده می شود و در هر دو طرف از مقدار بیشینه A_k دوباره به صفر نزدیک می شود.

با توجه به اینکه نتایج CWT اعداد مختلط است، زاویه فاز سیگنال پایه را نیز می توان از رابطه (۱۵) به دست آورد.

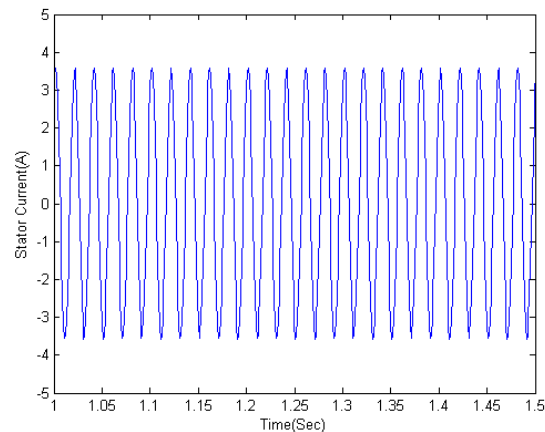
$$\alpha = \tan^{-1} \frac{Im[CWT(a_k(\max))]}{Re[CWT(a_k(\max))]} \quad (15)$$

پس از اینکه فرکانس پایه و زاویه فاز موتور القایی مشخص شد، حالا نوبت به تعیین مولفه های فرکانسی مدوله شده می رسد. همانطور که بیان شد شکل موج جریان استاتور در حالت میله شکسته دارای یک موج فلیکری است و برای مشخص کردن این مولفه های فلیکری ابتدا بایستی سیگنال فلیکری را به دست آورد.

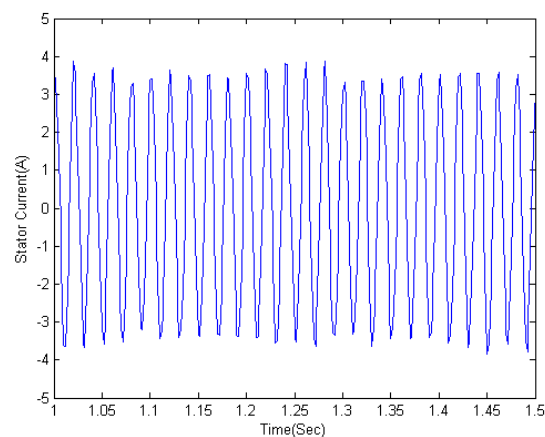


شکل ۷: تعیین دامنه A_k در k های مختلف برای یافتن فرکانس پایه جریان استاتور

روند انجام کار برای به دست آوردن شکل موج فلیکری بدین صورت است که، پس از به دست آوردن فرکانس و زاویه فاز سیگنال پایه از سیگنال اندازه گیری شده (سیگنال معیوب)، سیگنالی با همان فرکانس و زاویه فاز سیگنال پایه ایجاد می گردد. در مرحله بعد سیگنال ساخته شده از سیگنال اصلی (سیگنال معیوب) کم شده و موج فلیکری تشکیل می شود تا بتوان از روی آن فرکانس های مدوله شده را محاسبه نمود. شکل موج فلیکری شامل تمامی مولفه های فرکانسی به غیر از فرکانس پایه بوده که در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۵: شکل موج جریان استاتور در حالت سالم روتور



شکل ۶: شکل موج جریان استاتور در حالت یک میله شکسته روتور

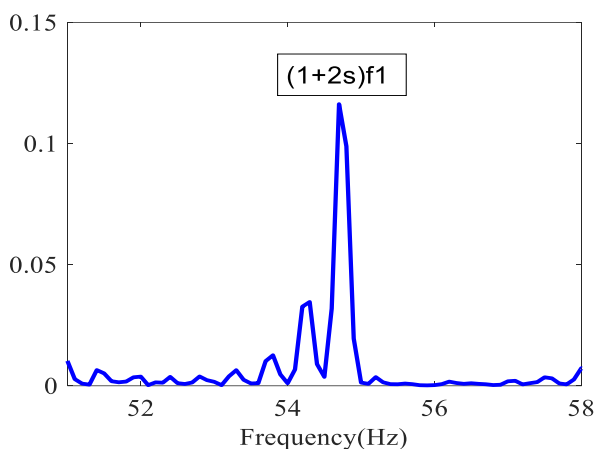
جهت تعیین مولفه های فرکانسی با استفاده از تبدیل موجک پیوسته ابتدا بایستی فرکانس پایه جریان استاتور مشخص شود. نخست وسیع ترین محدوده فرکانسی ممکن برای فرکانس ماشین محاسبه می شود. برای این منظور مقادیر a_k از رابطه (۱۳) محاسبه شده که k عددی صحیح از یک تا $\frac{f_h - f_l}{f_{ru}}$ است. f_l و f_h کمترین و بیشترین فرکانس ممکن جریان استاتور و f_{ru} رزولوشن فرکانسی است. برای فرکانس پایه ماشین، $f_l=49/5\text{ Hz}$ ، $f_h=50/5\text{ Hz}$ ، $f_{ru}=0/01$ در نظر گرفته شده است ($k=1-100$).

$$a_k = \frac{F_0}{f_l + kf_{ru}} \quad (13)$$

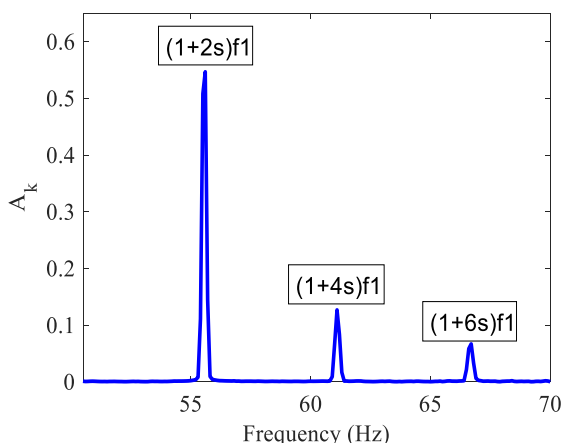
اکنون با داشتن مقادیر a_k CWT برای a_k های مختلف محاسبه شده و از آنجا طبق رابطه (۱۴) مقادیر A_k به دست خواهند آمد.

$$A_k = \frac{\left(a_k\right)^2 \left|CWT\left(a_k\right)\right|}{T_{dw}} \quad (14)$$

متناظر با این مقادیر بیشینه (مؤلفه‌های فلیکری) محاسبه می‌شوند. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود یک مقدار بیشینه در فرکانس ۵۴/۵Hz اتفاق افتاده است که بیانگر یک میله شکسته در روتور است. همانطور که اثبات شد اگر لغزش موتور القایی $S=0/045$ باشد، بایستی یک پیک در فرکانس ۵۴/۵Hz مشاهده گردد که در شکل ۹ این پیک فرکانسی مشخص شده است و دیگر مولفه‌های هارمونیکی در مقایسه با این پیک فرکانسی مقدار ناچیزی دارد. در شکل ۱۰، تابع موج خروجی برای شرایطی که سه میله روتور در موتور القایی شکسته شده باشد را نشان می‌دهد که در این حالت $S=0/055$ است. همانطور که مشاهده می‌شود تابع در فرکانس‌های ۵۵/۵Hz، ۶۱Hz و ۶۶/۵Hz ماکزیمم شده است که در این شرایط نسبت به حالت یک میله شکسته دامنه‌ها بیشتر است.



شکل ۹: تعیین دامنه A_k در k های مختلف برای فرکانس فلیکر در حالت یک میله شکسته روتور

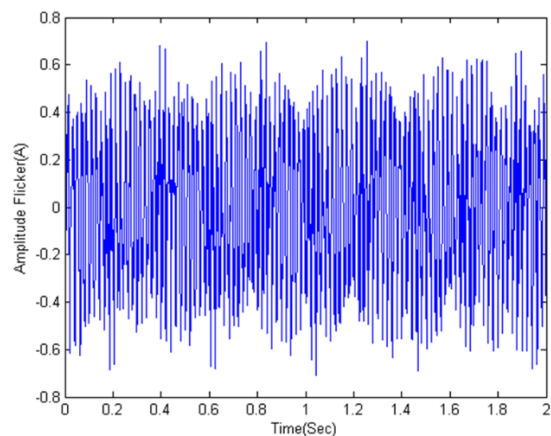


شکل ۱۰: تعیین دامنه A_k در k های مختلف برای فرکانس فلیکر در حالت سه میله شکسته روتور

۵- معرفی شاخصی برای تشخیص خطا و میله شکسته شده در موتور القایی

در این قسمت شاخصی برای تشخیص خطای میله شکسته معرفی می‌شود که می‌توان براساس آن به خوبی و با دقت بالا خطای میله

همان‌طور که انتظار می‌رود در حالت سالم مولفه‌های فرکانسی اضافی وجود ندارد. بنابراین اگر تبدیل موجک برای سیگنال جریان استاتور در حالت موتور سالم اعمال شود جزء فرکانس ۵۰Hz فرکانس دیگری وجود نخواهد داشت (منهای نویز ناشی از سیستم و دستگاه‌های اندازه‌گیری که ممکن است روی سیگنال جریان بنشینند).



شکل ۸: شکل موج فلیکری جریان استاتور در حالت یک میله شکسته روتور

پس از بدست آوردن موج فلیکری نوبت به اعمال تبدیل موجک

جدول ۲: مساحت زیر شکل موج خروجی تابع موجک

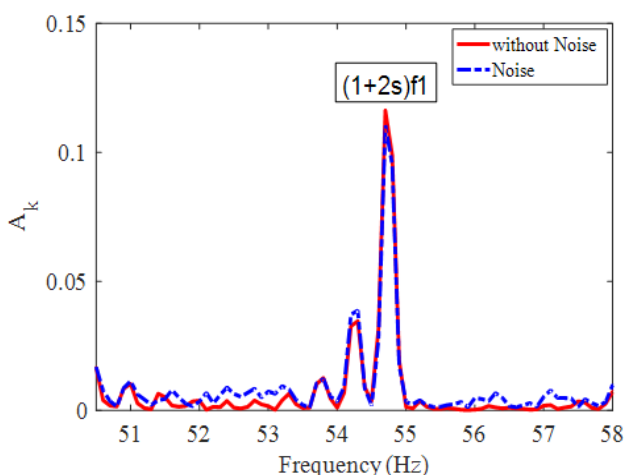
بر حسب تعداد میله‌های شکسته روتور	
تعداد میله شکسته	مساحت زیر شکل موج خروجی
۰	۰/۰۷۴۳۹
۱	۰/۰۶۷۸۵
۲	۰/۰۹۱۳۶
۳	۰/۱۳۷۳۶

پیوسته گوسی جهت استخراج فرکانس‌های اضافی خواهد بود. با توجه به رابطه (۱۲) و وجود تقارن، جستجوی فرکانس‌های موج مدوله شده می‌تواند در دو سوی فرکانس پایه (به دلخواه) انجام گیرد. برای موج فلیکری A_k ‌های مرتبط با رابطه (۱۴) برای فرکانس‌های بالای فرکانس پایه محاسبه می‌شوند با این تفاوت که در این قسمت a_k ‌های جدید از رابطه (۱۶) به دست می‌آیند:

$$a_k = \frac{F_0}{f_l + kf_{ru}} \quad (16)$$

که در رابطه (۱۶)، f_l فرکانس پایه بوده و f_{ru} رزولشن فرکانسی فلیکر است و k مقدار ثابتی است که مقدار آن براساس شرایط مورد نیاز تعیین می‌شود. در این مقاله مقدار رزولشن فرکانس فلیکر ۰/۱ در نظر گرفته شده است. در شکل ۹ شکل موج خروجی موجک برای شکل موج جریان فلیکری استاتور نشان داده شده است.

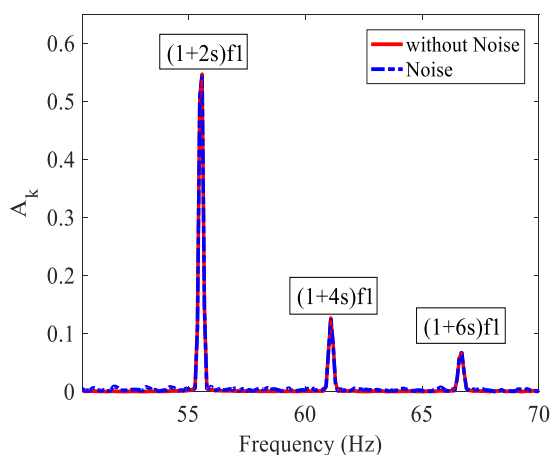
بعد از محاسبه a_k ‌ها می‌توان از معادله (۱۴) A_k ‌ها را برای مقادیر مختلف k به دست آورد. در نهایت مقادیر بیشینه A_k و فرکانس‌های



شکل ۱۱: تعیین دامنه‌های A_k در k های مختلف برای فرکانس‌های فلیکری در حالت یک میله شکسته روتور با وجود نویز و بدون وجود نویز

جدول ۳: مساحت زیر شکل موج خروجی تابع موجک بر حسب تعداد میله‌های شکسته روتور با وجود نویز

تعداد میله شکسته	مساحت زیر شکل موج خروجی
۰	۰/۰۰۸۲۱
۱	۰/۰۷۲۸۵
۲	۰/۱۰۲۸
۳	۰/۱۴۶۷



شکل ۱۲: تعیین دامنه‌های A_k در k های مختلف برای فرکانس‌های فلیکری در حالت سه میله شکسته روتور با وجود نویز و بدون وجود نویز

بنابراین به راحتی نمی‌توان دامنه‌های فرکانسی را مشاهده کرد. در این حالات بایستی از جریان‌های راه‌اندازی موتور برای تشخیص عیب استفاده کرد. اما با توجه به زمان کم راه‌اندازی به‌ویژه در موتورهای کوچک به علت تعداد کم داده‌ها، تشخیص با خطا همراه خواهد بود.

شکسته در روتور را تشخیص داد. از شاخص‌های مختلفی برای تشخیص خطا می‌توان استفاده کرد، به عنوان مثال می‌توان از دامنه مؤلفه‌های فرکانسی به عنوان شاخص تشخیص بهره برد. اما ایجاد برخی مؤلفه‌های اضافی ناشی از به کار بردن روش‌های پردازش مانند FFT و ... و همچنین تغییرات بارگذاری روی موتور امکان بروز خطا را افزایش می‌دهد. شاخص انتخابی این مقاله با بدست آوردن میزان انرژی تابع موجک خروجی در شرایط مختلف و مقایسه آن‌ها با حالت سالم وجود میله شکسته در روتور را حتی در بارگذاری‌های مختلف آشکار می‌سازد.

با بدست آوردن مساحت زیر شکل موج خروجی تابع موجک در شرایط سالم (به عنوان حد آستانه) و مقایسه آن با حالت‌های میله شکسته، می‌توان به وجود میله شکسته پی برد. جدول ۲ این شاخص را برای موتورالقای شبیه‌سازی شده در بارنامی و برای حالت سالم و با تعداد میله‌های شکسته مختلف نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود مساحت در حالت‌های مختلف میله شکسته روتور در مقایسه با حالت سالم حدود ۱۰ تا ۲۰ برابر افزایش یافته است لذا از این شاخص می‌توان برای تشخیص میله شکسته روتور استفاده نمود.

۶- تأثیر نویز بر عملکرد تبدیل موجک و تشخیص خطا

هنگامی که موتور در شرایط واقعی کار می‌کند، سیگنال‌های اندازه‌گیری شده دارای نویز می‌باشند. برای بررسی تأثیر نویز در عملکرد تابع موجک انتخابی، به سیگنال‌های جریان استاتور در دو حالت سالم و یک میله شکسته نویز سفید اضافه می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود با وجود کمی اعوجاجی شدن خروجی موجک، مشکلی در تشخیص خطای میله شکسته رخ نخواهد داد. همچنین در شرایطی که سیگنال‌ها نویزدار می‌باشند، اگر مساحت زیر شکل موج خروجی تابع موجک در شرایط سالم و حالت‌های میله شکسته محاسبه شوند و سپس مقایسه صورت گیرد، باز هم می‌توان به وجود میله شکسته پی برد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ خروجی تابع موجک را در دو حالت سیگنال‌های نویزی و بدون نویز مقایسه می‌کند. جدول ۳ شاخص معرفی شده در مقاله را در شرایطی که سیگنال دارای نویز است، نشان می‌دهد.

۷- تأثیرات بار موتور بر عملکرد تبدیل موجک و تشخیص خطا

در این قسمت موتور در بارهای مختلف راه‌اندازی شده است و تأثیر بار در تشخیص خطای میله شکسته مورد بررسی قرار می‌گیرد. در گذشته تشخیص خطا به روش تبدیل فوری در بار ثابت صورت گرفته است، اما زمانی که موتور در بارهای کم راه‌اندازی می‌شود، لغزش موتور بسیار کوچک است (نزدیک به صفر) در نتیجه فرکانس‌های شاخص خطا در مجاورت فرکانس پایه قرار می‌گیرند.

جدول ۴: مساحت زیر شکل موج خروجی تابع موجک
بر حسب تعداد میله‌های شکسته روتور در بار داری ۵۰٪

موتور	مساحت زیر شکل موج خروجی
تعداد میله شکسته	
۰	۰/۰۰۳۸۵
۱	۰/۰۳۰۸
۲	۰/۰۷۱۱
۳	۰/۱۱۳۴

۸- نتیجه‌گیری

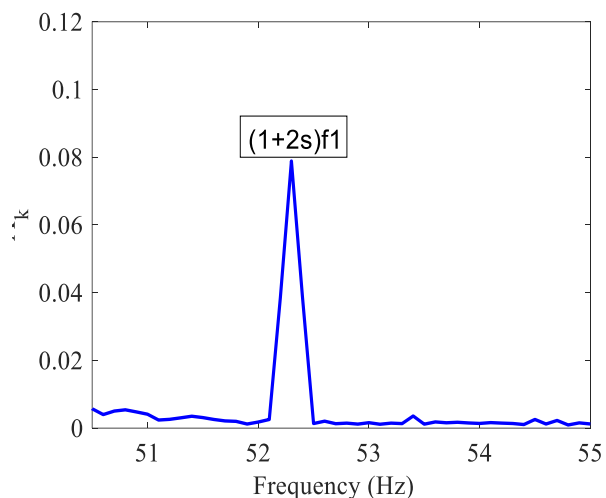
در این مقاله یک روش تشخیص خطای میله شکسته روتور برای موتورهای القایی ارائه شد. این روش بر مبنای پردازش سیگنال جریان استاتور بوده که برای پردازش این سیگنال از روش CWT برای اولین بار استفاده شد. با در نظر گرفتن شاخص معرفی شده و تابع موجک خروجی و مقایسه با حالت سالم می‌توان به وجود خطای میله شکسته در روتور پی برد. موتور القایی در سه حالت بار کامل، نصف بار کامل و ده درصد بار کامل و در حالت کار نرمال موتور توسط FEM شبیه‌سازی شد و در هر سه حالت تشخیص خطا به شکل مناسبی صورت پذیرفت. همانطور که از نتایج شبیه‌سازی مشخص شد، تشخیص خطای میله شکسته هنگامی که بارگذاری روی موتور قرار دارد، به راحتی قابل انجام خواهد بود. همچنین در مواقعی که موتور در شرایط کم‌باری کار می‌کند، اگر خطای میله شکسته رخ دهد، این روش باز هم قادر به تشخیص خطا خواهد بود در حالی که روش‌های قدیمی مانند FFT در شرایط کم‌باری قادر به انجام تشخیص خطا نیستند. همچنین مشاهده شد که روش پیشنهادی در مقابل نویز در داده‌های ورودی نیز مقاوم است.

مراجع

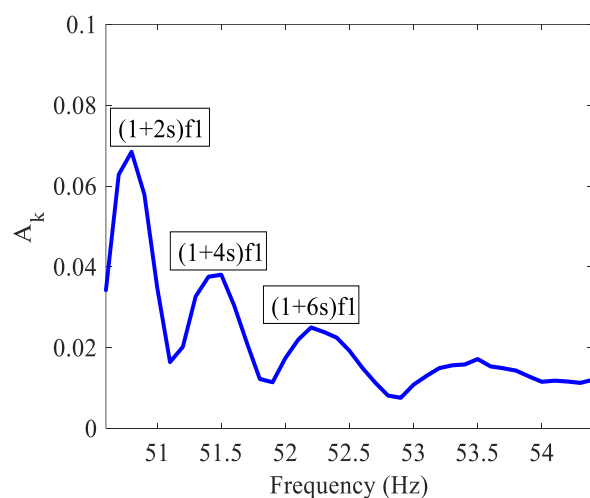
- [1] B. Ayhan, "Linguistic Rule Generation for Broken Rotor Bar Detection in Squirrel-Cage Induction Motors", North Carolina State University, December 2005.
- [2] Kim YH, Youn YW, Hwang DH, Sun JH, Kang DS. High-resolution parameter estimation method to identify broken rotor bar faults in induction motors. IEEE Trans Ind Electron, Vol. 60, Pages 4103–4117, 2013.
- [3] P. Vas, "Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines", Clarendon Press, Oxford, 1993.

[۴] منصور اوجاقی، ناصر یزدان دوست، شهریار گل محمد زاده، «تشخیص عیب گردش روغن در یاتاقان لغزشی موتور القایی با استفاده از هارمونیک‌های توان لحظه‌ای»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دروه ۴۶، شماره ۴، صفحات ۱۷-۷، ۱۳۹۵.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ اعمال روش پیشنهادی این مقاله را در ۵۰٪ بار کامل و ۱۰٪ بار کامل نشان می‌دهند. مقدار لغزش در نصف بار کامل $S=0/02$ و در ۱۰٪ بار کامل $S=0/08$ است. همانطور که در شکل ۱۳ مشخص است، در فرکانس $52/2\text{ Hz}$ هرگز یک مقدار بیشینه مشاهده می‌شود. موجک خروجی برای ۱۰٪ بار کامل در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. در این مرحله به دلیل اینکه لغزش بسیار کوچک است دامنه‌های هارمونیک در مجاورت یکدیگر می‌باشند. جدول ۴ شاخص معرفی شده در این مقاله را در نصف بار کامل نشان می‌دهد. همان‌طور که اشکال ۱۳ و ۱۴ نشان می‌دهند روش پیشنهادی حتی در بارهای کم نیز به خوبی قادر به تشخیص خطا است.



شکل ۱۳: تعیین دامنه A_k در k های مختلف برای
فرکانس‌های فلیکری در نصف بار کامل در حالت یک میله شکسته
روتور



شکل ۱۴: تعیین دامنه A_k در k های مختلف برای فرکانس‌های فلیکری
در ۱۰٪ بار کامل در حالت یک میله شکسته روتور

- [13] R. Salehi Arashloo and A. Jalilian, "Design, Implementation and Comparison of Two Wavelet Based Methods for the Detection of Broken Rotor Bars in Three Phase Induction Motors", 1st Power Electronic & Drive Systems & Technology Conference, PEDSTC, Pages 345 – 355, 2010.
- [14] C. Costa, M. Kashiwagi, M. Mathias, Rotor failure detection of induction motors by wavelet transform and Fourier transform in non-stationary condition, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 1, Pages 15-26, July 2015.
- [15] Kaikaa MY, Hadjani M. Effects of the simultaneous of static eccentricity and broken rotor bars on the stator current of induction machine. IEEE Trans Ind Electron. Vol. 61, Pages 2452–63, 2014.
- [16] Szabo L. , Toth F. , Fekete G. , An Overview on Induction Machine's Diagnosis Methods, Vol.1, Pages 1844-6043, May 2008.
- [17] G. Strang and T. Nguyen, "Wavelets and Filter Banks", Cambridge, MA: Wellesley Cambridge, 1997.
- [18] H. Moghadam, A. Doroudi, M. P. Azimi, "Flicker Source Tracing by Wavelet Transform" Vol. 43, Pages 412-421, 09 Feb 2015.
- [19] S. Williamson, L.H. Lim, A.C. Smith, Transient analysis of cage-induction motors using finite-elements, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 26 Pages 941–944 1990.
- [20] R. Fiser, Application of a finite element method to predict damage induction motor performance, IEEE Transactions on Magnetics Vol. 37, Pages 3635–3639, 2001.
- [۲۱] امین درویشی - امید عبدی منفرد - عارف درودی، «تشخیص خطای میله شکسته در ماشین القایی با استفاده از روش المان محدود و آنالیز طیف فرکانسی»، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۴
- [5] Khadim Moin Siddiqui and V.K.Giri. "Broken Rotor Bar Fault Detection in Induction Motors using Wavelet Transform", Int. Conf Proc, IEEE, Computing, Electronics and Electrical Technologies [ICCEET], pp. 1-6, Chennai, India, March, 2012.
- [6] J. Siau, A. Graff, W. L. Soong, and N. Ertugrul, "Broken Bar Detection in Induction Motors using Current and Flux Spectral Analysis", Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Christchurch, New Zealand Oct. Vol. 1, Pages 171-178, 2004.
- [7] Ebrahimi BM, Faiz J, Lotfi-fard S, Pillay P. Novel indices for broken rotor bars fault detection in induction motors using wavelet transform. Mech Syst Signal Process Vol 30, page 131–145, 2012.
- [8] Z. Ye, B. Wu, and A. Sadeghian, "Current Signature Analysis of Induction Motor Mechanical Faults by Wavelet Packet Decomposition", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol.50, No. 6, Dec. 2003.
- [9] Ph.D. Thesis of Neelam Mehala, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motor using Motor Current Signature Analysis", Electrical Engineering Department, NIT Kurukshetra, Oct. 2010.
- [10] Turkmenoglu, M. A, "Wavelet-Based Switching Faults Detection", IET Science, Measurement and Technology, Vol. 4, No. 6, pp. 303 – 331, 2010.
- [۱۱] فرشته صادقی، ابوالفضل جلیوند، سیده‌ادی حسینی، منیژه صفاری «ارائه یک روش ترکیبی مبتنی بر تبدیل موجک گسسته برای پیش‌بینی بار الکتریکی با استفاده از یک مدل دوبعدی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۵، شماره ۳، صفحات ۱۱۳-۱۰۳، ۱۳۹۴.
- [12] S. Nandi, S. Ahmed and H.A. Toliyat, "Detection of Rotor Slot and Other Eccentricity Related Harmonics in a Three Phase Induction Motor with Different Rotor Cages", IEEE Trans. Vol. 16, No. 3, Pages. 253-260, Sept. 2001.

زیرنویس‌ها

¹ Condition Monitoring

² Fast Fourier Transform

³ Short Term Fourier Transform

⁴ Signal Processing

⁵ Wavelet Transform

⁶ Resolution

⁷ Translation

⁸ Scale

⁹ Sampling

¹⁰ Finite Element Method

¹¹ Maxwell