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: به‌دلیل کاربرد فراوان موتورهای القایی در صنایع مختلف، تشخیص خطای سریع و به‌موقع در این نوع موتورها به‌منظور پیشگیری از معیوب‌شدن پروسه‌های صنعتی یک امر ضروری تلقی می‌شود. در این مقاله روشی جدید برای تشخیص خطای میله شکسته روتور که ازجمله خطاهای رایج در موتورهای القایی قفس سنجابی است، ارائه شده است. روش ارائه‌شده برمبنای 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 داده‌های جریان استاتور موتور را در شرایط سالم و معیوب بدست‌آورده و سپس با تحلیل این داده‌ها و استفاده از یک شاخص مناسب خطای موردنظر را تشخیص داد. از روش عناصر محدود (FEM) برای تحلیل موتور در دو حالت سالم و معیوب استفاده خواهد شد.

واژه‌های 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 Monfared[1], MSc Student; A. Doroudi[2], Assistant Professor; A. Darvishi[3], 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 مورداستفاده قرار می‌گیرند [۱-۲]. این موتورها به‌دلیل استحکام و قابلیت اطمینان بالا اغلب در محیط‌های سخت به‌کار گرفته می‌شوند. این شرایط نامطلوب سبب می‌شود که موتور القایی در معرض صدمه دیدگی قرار گیرد و در این حالت اگر شناسایی عیب صورت نگیرد، رشد تدریجی خطا و معیوب‌شدن کامل موتور دور از انتظار نخواهد بود. به عبارت‌دیگر اگر تشخیص خطا به‌سرعت انجام گیرد می‌توان از واردشدن آسیب جدی به موتور جلوگیری نمود. لذا توجهات ویژه‌ای به سیستم‌های 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 ازجمله خطاهای رایج روتور، شکست میله‌های آن است.

شکست میله روتور می‌تواند موجب کاهش گشتاور راه‌اندازی، کاهش متوسط گشتاور در حالت بارداری، افزایش ریپل گشتاور، افزایش تلفات هسته، تغییر در توزیع دمایی موتور و ایجاد نقطه داغ و همچنین افزایش جریان راه‌اندازی گردد.

خطای میله شکسته روتور می‌تواند ناشی از عواملی مانند نوسان سرعت و گشتاور، تنش حرارتی و معیوب‌شدن ورقه‌های روتور باشد [۵-۶]. ترک‌خوردگی در ساختار روتور موتورهای القایی قفس سنجابی می‌تواند منجر به تنش‌های متالورژی غیریکنواخت در قفسه شود. این نوع عیوب که عمدتاً در پروسه ساخت روتور و به‌خصوص در مرحله لحیم‌کاری و پرسینگ ایجاد می‌گردند، می‌توانند درهنگام گردش روتور به خرابی آن منجر شوند. همچنین حلقه‌های انتهایی سنگین وزن نیز با ایجاد نیروهای سانتریفوژ بزرگ می‌توانند تنش‌های اضافی روی میله‌های روتور بوجودآورند. درهرحال و به هر دلیلی که میله‌های روتور آسیب ببیند نتیجه آن ایجاد جریان نامتقارن خواهد بود. جریان‌های نامتقارن در کارکردهای طولانی موتور موجب افزایش بیش‌ازحد دما در نقطه آسیب‌دیده خواهد شد که این امر می‌تواند منجر به شکست کامل میله گردد. به‌محض شکست یک میله، جریان در میله‌های اطراف میله افزایش یافته و میزان نامتقارنی را بالا می‌برد که خود منجر به افزایش تنش‌های مکانیکی و حرارتی بیشتر در میله‌های اطراف نقطه خطا می‌گردد. خطا به همین شکل گسترش یافته و میله‌های بیشتری دچار شکست می‌گردند. ترک‌خوردگی‌ها می‌توانند در هر نقطه روتور مثلاً روی میله، روی حلقه‌های انتهایی یا در محل اتصال این دو به‌وجود آیند (این اتصال به‌صورت پرچ، پیچ و جوش است). عبور جریان بیشتر از میله‌های اطراف یک میله آسیب‌دیده همچنین می‌تواند موجب افزایش تلفات و درنتیجه ازدیاد حرارت در آن میله‌ها و سبب بروز مشکلات عایقی در روتور گردد (مثلاً نقطه‌سوزشدن و یا تخریب کامل عایق شیارهای روتور). هرچه زمان راه‌اندازی موتور بالاتر بوده و یا تعداد دفعات قطع و وصل موتور افزایش یابد احتمال خرابی هم بیشتر می‌شود.

تشخیص سریع خطای میله شکسته روتور مانع از ادامه خرابی و شکسته شدن میله‌های بیشتر می‌شود. با توجه به تعداد بسیار زیاد موتورهای القایی در صنایع بحث پایش یا مانیتورینگ تشخیص خطا من‌جمله خطای شکست میله‌های روتور برای این‌گونه موتورها ضروری به نظر می‌رسد. بالاترین جریان از میله‌های روتور در زمان راه‌اندازی از آن عبور می‌کند. با شکست چند میله، جریان عبوری باید از تعداد میله‌های کمتری عبور کرده و این امر می‌تواند موجب آسیب‌دیدگی میله‌های سالم گردد. تاکنون روش‌های مختلفی جهت تشخیص و شناسایی این نوع از خطا ارائه شده است. برخی از این روش‌ها براساس تحلیل فرکانس سیگنال جریان‌های استاتور توسط روش تبدیل فوریه سریع[۲] (FFT) و تبدیل فوریه زمان کوتاه[۳] (STFT) است [۳،۷-۸]. در روش FFT تنها دامنه هر فرکانس تعیین می‌گردد اما روش STFT علاوه بر دامنه، زمان وقوع فرکانس را هم نشان می‌دهد. اگرچه روش STFT مشکل زمان وقوع را حل می‌کند اما مشکل تغییرات شدید در سیگنال با این روش پردازش سیگنال[۴] مرتفع نخواهد شد [۸]. برای برطرف‌کردن این مشکل از روش تبدیل موجک[۵] (WT) استفاده می‌شود. روش تبدیل موجک به‌دلیل ایجاد یک تحلیل مولتی رزولوشن[۶]، مشکلات FFT و STFT را ندارد و به همین دلیل روشی مناسب برای پردازش سیگنال است [۵،۸-۱۰]. تبدیل موجک پیوسته (CWT) و تبدیل موجک گسسته (DWT) از انواع موجک‌های مورداستفاده هستند که در زمینه‌های مختلفی از این روش‌ها استفاده شده است [۱۱]. تاکنون مقالات فراوانی در زمینه تشخیص خطای میله شکسته روتور به روش تبدیل موجک گسسته ارائه شده است [۱۲-۱۴]. عمده این مقالات به‌دلیل عدم‌تشخیص مناسب خطای میله شکسته روتور در حالت کار دائم موتور، از داده‌های زمان راه‌اندازی موتور بهره می‌گیرند. اگرچه این داده‌ها برای موتورهای بزرگ با توجه به زمان راه‌اندازی بالا قابل استفاده است اما درخصوص موتورهای کوچک و دائم‌کار به‌دلیل تعداد کم داده‌ها کارایی نخواهد داشت.

در این مقاله از روش تبدیل موجک پیوسته گوسی در نرم‌افزار متلب جهت تحلیل طیف فرکانسی سیگنال جریان استاتور و درنتیجه تشخیص خطای میله شکسته روتور، استفاده شده است. دلیل استفاده از این روش، تشخیص دقیق مولفه‌های 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 می‌دهد.

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

می‌شود. در بخش سوم روش پردازش‌سیگنال استفاده شده در مقاله معرفی می‌شود. در بخش چهارم روش شبیه‌سازی موتور القایی قفس سنجابی 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 برروی 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 برروی سیگنال جریان استاتور

هنگامی‌که 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 ایجادشده و این جریان، میدان دواری هم‌جهت با سرعت روتور ایجاد می‌کند. اگر خطای میله شکسته در موتور رخ دهد، در این حالت به‌دلیل وجود عدم‌تعادل (هرگونه عدم‌تعادل را می‌توان با دو سری جریان‌های توالی منفی و مثبت مدل نمود. جریان‌های توالی مثبت میدان هم‌جهت با سرعت روتور و جریان‌های توالی منفی میدانی در عکس‌جهت آن تولید می‌کنند) یک میدان گردان هم‌جهت با سرعت روتور و با فرکانس sf_1 (میدان راست‌گرد) و یک میدان گردان درجهت 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 ریپل 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 همین‌ترتیب 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 $(1-4s)f_1$ درجریان سیم‌پیچ استاتور می‌شود [۷].

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

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

بنابراین، زمانی‌که خطای میله شکسته در روتور رخ می‌دهد مولفه‌های هارمونیکی با الگوی $(1\pm 2qs)f_1$ در سیم‌پیچ‌های استاتور القا می‌شوند و درحالتی که تعداد میله‌های شکسته افزایش یابد موجب افزایش دامنه مولفه‌های هارمونیکی می‌شود (q=۱,۲,۳,...) [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) به‌دست می‌آید، که این رابطه بیانگر بزرگ‌تربودن مولفه هارمونیکی در q=۱ از دیگر مولفه‌ها است [۱۶].

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

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

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 انتقال‌یافته و مقیاس‌شده تابع φ(t)، که موجک نامیده می‌شود به‌دست می‌آید.

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

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 ۱۵π در نظر گرفته شده است.

تبدیل موجک پیوسته تابع دو متغیر b و a است که به‌ترتیب پارامترهای انتقال[۷] و مقیاس[۸] نامیده می‌شوند. تابع φ(t)، تابع موجک بوده و $\varphi^*(t)$ مزدوج φ(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 انعطاف‌پذیر بوده و ازاین‌رو برای تحلیل سیگنال دارای نوسان بسیار مناسب خواهد بود [۱۷].

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

$$CWT(a,iT_s) = T_s \cdot \sum_{n=1}^{N_a} i(nT_s).\varphi^*\left[\frac{nT_s}{a} - \frac{N_{dw}.T_s}{2}\right] \quad (۱۰)$$

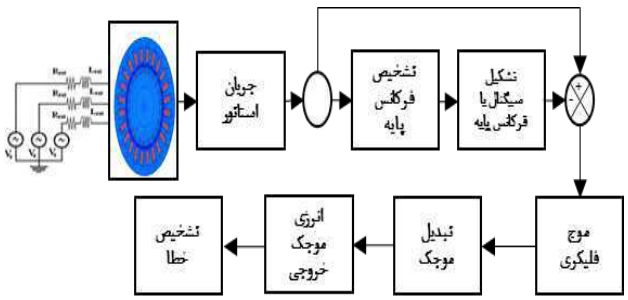
اگر یک سیگنال با پنجره تحلیل T_{ds} با دوره T_s نمونه‌برداری[۹] شود، آنگاه تعداد نمونه‌ها برابر با $N_{ds} = T_{ds}/T_s$ بوده و فرکانس نمونه‌برداری برابر با $f_s = 1/T_s$ خواهد بود. حال اگر تابع موجک نیز با فرکانس f_s نمونه‌برداری شود آنگاه $N_{dw} = T_{dw}/T_s$ است که T_{dw} و N_{dw} به‌ترتیب طول پنجره تحلیل و تعداد نمونه‌های تابع موجک را نشان می‌دهند. با توجه به متغیر بودن مقیاس تابع موجک، تعداد نمونه‌ها بایستی برابر با $N_a = N_{dw}\,a$ باشد. $i(nT_s)$ و $\varphi(nT_s)$ شکل موج نمونه‌برداری‌شده سیگنال تحلیل و موجک را نشان می‌دهد در این مقاله T_s=۰/۰۰۱ و T_{dw}=T_{ds}=۶/۴ در نظر گرفته شده است.

از طریق تغییر مقیاس و انتقال زمانی تابع موجک مادر، موجک قادر به استخراج مولفه‌های مهم از داخل سیگنال می‌شود. در رابطه (۸) هرچه مقدار مقیاس a کوچک‌تر باشد دقت تحلیل بالاتر می‌رود یعنی سیگنال در یک پنجره تبدیل موجک باریک‌تر و در یک مقیاس کوچک‌تر آنالیز شده است. با تنظیم صحیح مقیاس می‌توان مولفه‌های فرکانسی موردنظر را از سیگنال اصلی استخراج نمود[۱۸].

ضرب داخلی درواقع شباهت بین سیگنال اصلی و تابع الگو را توصیف می‌کند. این یکی از ویژگی‌های روش تبدیل موجک پیوسته در مقایسه با روش‌های دیگر است که همبستگی بین دو تابع هم گفته می‌شود. همبستگی عاملی مهم برای تطبیق بین دو سیگنال است. در این مقاله ضرب داخلی بین سیگنال جریان استاتور و تابع موجک صورت می‌گیرد. این امر باعث بوجودآمدن ضرایب همبستگی یا ضرایب تبدیل موجک پیوسته می‌شود. هرچه این ضرایب بزرگ‌تر 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 می‌توان به بزرگ‌ترین مقدار CWT(a,b) دست‌پیدا کرد.

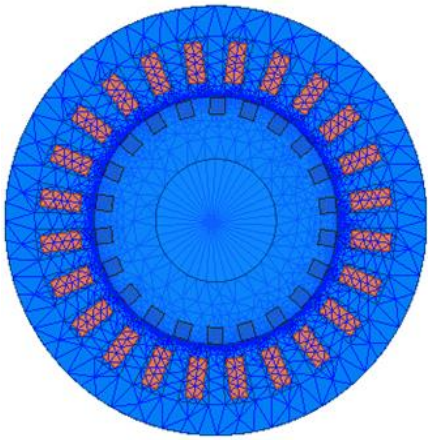
۴- روش تشخیص خطای میله شکسته روتور

شکل ۱ بلوک دیاگرام روش تشخیص خطای میله شکسته روتور را نشان می‌دهد. پس از شبیه‌سازی موتور موردنظر و استخراج سیگنال‌های جریان استاتور، نوبت به تشخیص فرکانس پایه و تشکیل سیگنال جریان با این فرکانس می‌رسد و سپس با مشخص‌شدن موج فلیکری و اعمال روش تبدیل موجک پیوسته برروی این موج و بدست‌آوردن انرژی موجک خروجی، می‌توان خطای میله شکسته روتور را تشخیص داد. در این مقاله از روش عناصر محدود[۱۰] با استفاده از نرم‌افزار ماکسول[۱۱] برای شبیه‌سازی موتور القایی قفس سنجابی در حالت‌های سالم و معیوب استفاده شده است. روش عناصر محدود قادر است توزیع میدان مغناطیسی درون موتور را در حالت سالم و حتی در حالت خطا از روی ابعاد هندسی و پارامترهای مغناطیسی موتور محاسبه کند. با اطلاع از توزیع میدان می‌توان سایر کمیت‌های موتور، نظیر شکل موج ولتاژ القایی، چگالی شار مغناطیسی درون فاصله‌هوایی و اندوکتانس سیم‌پیچ‌های مختلف را به‌دست 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 شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. زمانی که هدف تحلیل موتور القایی با روتور میله شکسته‌شده باشد، توزیع میدان مغناطیسی نامتقارن خواهد شد و بایستی تمام ساختار موتور مدل شود. در این حالت زمان تحلیل به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. در این مقاله از افزایش مقاومت میله‌های روتور برای مدل‌سازی خطای میله شکسته روتور استفاده شده است. با توجه به میزان شکست میله روتور می‌توان مقدار مقاومت میله موردنظر را تغییر داد. در مدل‌سازی خطای میله شکسته، جریان میله شکسته‌شده در حالت شکست کامل باید صفر در نظر گرفته‌شود. جریان صفر در میله موجب افزایش جریان در دیگر میله‌های روتور می‌شود. از طرف دیگر توزیع شار در اطراف میله شکسته‌شده نامتقارن شده و چگالی شار در یک طرف میله شکسته افزایش و در طرف دیگر کاهش می‌یابد. البته میله شکسته‌شده جریان غیرصفر هم می‌تواند داشته باشد، که به نحوه شکست میله بستگی دارد [۱۴،۲۰-۲۱]. در این مقاله مقدار جریان میله شکسته‌شده غیرصفر در نظر گرفته شده است. مشخصات موتور القایی شبیه‌سازی‌شده در جدول ۱ آمده است.



شکل ۲: نمای دوبعدی موتور القایی قفس سنجابی

شکل‌های ۵ و ۶ جریان استاتور در حالت سالم و میله شکسته را نشان می‌دهند که موتور در بار نامی و لغزش S=۰/۰۴۵ کار می‌کند. همانطورکه 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.

$$i(t) = I_m \sin\omega_1 t(1 + K_m \cos\omega_m t) \qquad (۱۱)$$

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

$$i(t) = I_m \sin\omega_1 t + \frac{K_m I_m}{2}\sin(\omega_1 + \omega_m)t + \frac{K_m I_m}{2}\sin(\omega_1 - \omega_m)t \qquad (۱۲)$$

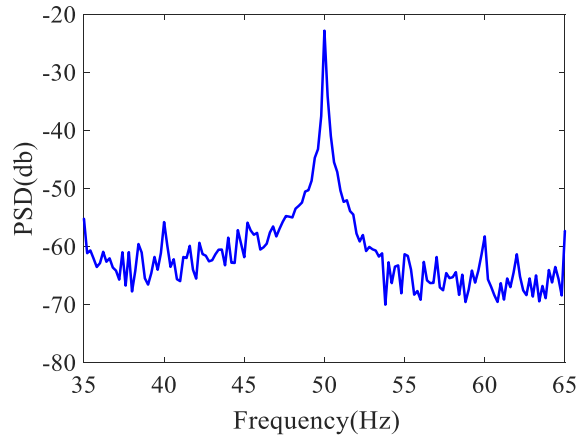
با پردازش سیگنال جریان و یافتن این فرکانس‌های اضافی می‌توان به معیوب‌بودن میله‌های روتور پی‌برد.

با درنظرگرفتن فرکانس پایه و مقدار لغزش موتور، مولفه‌های فرکانسی در دو گستره کمتر از ۵۰Hz و بالاتر از ۵۰Hz ایجاد می‌شوند. به‌دلیل تقارن می‌توان تبدیل موجک را به هر بازه به‌تنهایی و به‌دلخواه اعمال نمود. در مقاله حاضر با اعمال تابع موجک به مولفه‌های فرکانسی بیش از فرکانس ۵۰Hz و نهایت کمتر از ۱۰۰Hz شاخص موردنظر 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 بوجودآمده 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.

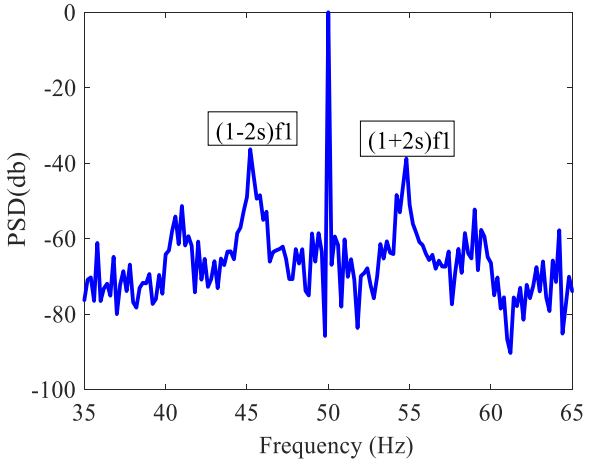
شکل‌های ۳ و ۴، نتیجه اعمال FFT بر سیگنال جریان استاتور در حالت یک میله شکسته روتور است. همانطورکه مشاهده می‌شود مشکل استفاده از FFT، فرکانس‌های اضافی و ناخواسته ایجادشده در زمان استخراج فرکانس‌های یک سیگنال است که خطای بالایی را به‌همراه دارد (به‌خصوص در بارهای سبک).

جدول ۱: مشخصات موتور القایی قفس سنجابی

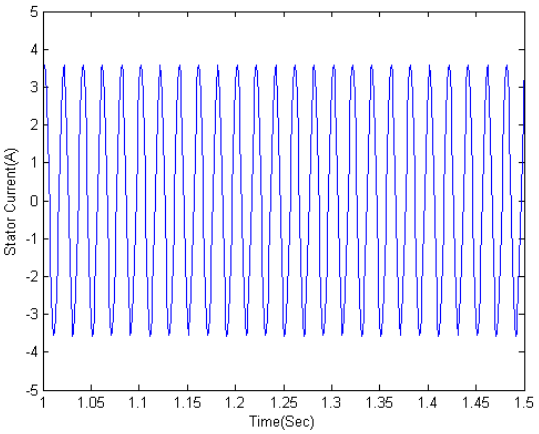
کمیت	مقدار
تعداد فازها	۳
توان موتور (KW)	۲/۲
تعداد قطب	۴
اندازه ولتاژ (V)	۴۰۰
قطر خارجی استاتور (mm)	۱۸۱
قطر داخلی استاتور (mm)	۱۰۵
طول فاصله‌هوایی (mm)	۰/۳
سرعت موتور (rpm)	۱۴۳۲
تعداد میله‌های روتور	۲۲
تعداد شیارهای استاتور	۲۴
فرکانس پایه (HZ)	۵۰
ضریب توان	۰/۸۶



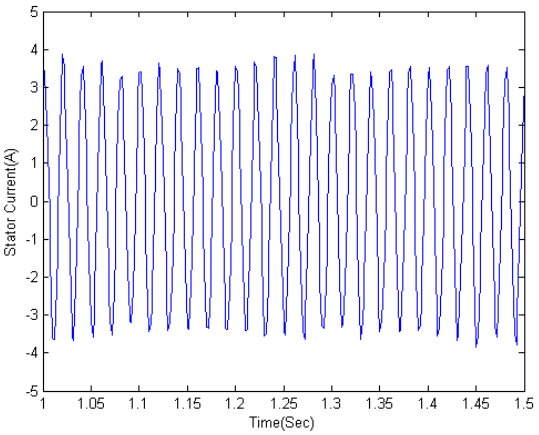
شکل ۳: FFT سیگنال جریان استاتور در حالت سالم



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



شکل۵: شکل موج جریان استاتور در حالت سالم روتور



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

جهت تعیین مولفه‌های فرکانسی با استفاده از تبدیل موجک پیوسته ابتدا بایستی فرکانس پایه جریان استاتور مشخص شود. نخست وسیع‌ترین محدوده فرکانسی ممکن برای فرکانس ماشین محاسبه می‌شود. برای این منظور مقادیر a_k از رابطه (۱۳) محاسبه‌شده 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_{ru}=۰/۰۱، f_h=۵۰/۵Hz، f_l=۴۹/۵Hz در نظر گرفته شده است (k=۱-۱۰۰).

$$a_k = \frac{F_0}{f_l + k f_{ru}} \qquad (۱۳)$$

اکنون با داشتن مقادیر a_k، CWT برای a_kهای مختلف محاسبه‌شده و از آنجا طبق رابطه (۱۴) مقادیر A_k به‌دست خواهند آمد.

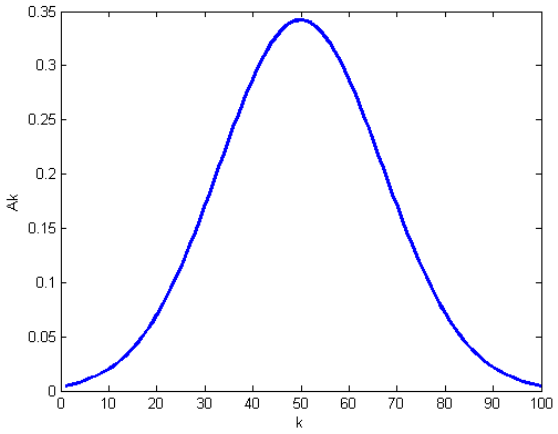
$$A_k = \frac{\left(a_k\right)^{\frac{1}{2}} \left|CWT\left(a_k\right)\right|}{T_{dw}} \qquad (۱۴)$$

اکنون با داشتن مقادیر مختلفی از a_k، می‌توان $CWT(a_k)$ و A_k را به‌دست آورد. پس از اینکه تمام مقادیر برای A_k محاسبه شد، بیشینه مقدار A_k مربوط به فرکانس پایه جریان استاتور موتورالقایی است. شکل ۷ مقدار A_k را برای kهای مختلف برای تعیین فرکانس پایه موتور نشان داده است. بزرگ‌ترین دامنه موجک مربوط به فرکانس پایه بوده که در این مرحله همان فرکانس ۵۰Hz است. همانطورکه انتظار می‌رفت بیشترین مقدار A_k در k=۵۰ (با توجه به f_{ru} و f_l، این k معادل فرکانس فلیکر۵۰Hz است) دیده می‌شود و در هر دو طرف از مقدار بیشینه A_k دوباره به صفر نزدیک می‌شود.

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

$$\alpha = tg^{-1} \frac{Im\left[CWT\left(a_k(\max)\right)\right]}{Re\left[CWT\left(a_k(\max)\right)\right]} \qquad (۱۵)$$

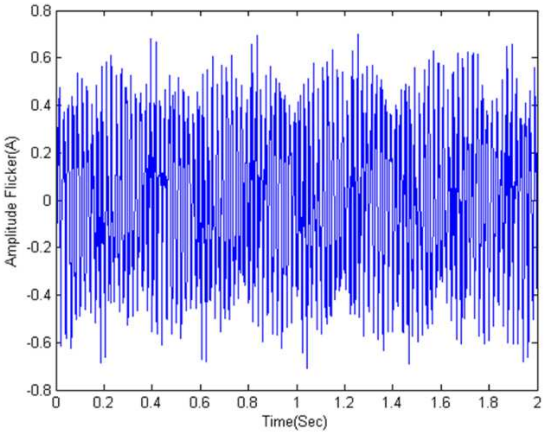
پس از اینکه فرکانس پایه و زاویه فاز موتور القایی مشخص شد، حالا نوبت به تعیین مولفه‌های فرکانسی مدوله‌شده می‌رسد. همانطورکه بیان شد شکل موج جریان استاتور در حالت میله شکسته دارای یک موج فلیکری است و برای مشخص‌کردن این مولفه‌های فلیکری ابتدا بایستی سیگنال فلیکری را به‌دست آورد.



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

روند انجام کار برای به‌دست‌آوردن شکل موج فلیکری بدین‌صورت است که، پس از به‌دست‌آوردن فرکانس و زاویه فاز سیگنال پایه از سیگنال اندازه‌گیری‌شده (سیگنال معیوب)، سیگنالی با همان فرکانس و زاویه فاز سیگنال پایه ایجاد می‌گردد. در مرحله بعد سیگنال ساخته‌شده از سیگنال اصلی (سیگنال معیوب) کم شده و موج فلیکری تشکیل می‌شود تا بتوان ازروی آن فرکانس‌های مدوله‌شده را محاسبه نمود. شکل موج فلیکری شامل تمامی مولفه‌های فرکانسی به‌غیراز فرکانس پایه بوده که در شکل ۸ نشان داده شده است.

همان‌طورکه 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 بنشیند).



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

پس از بدست‌آوردن موج فلیکری نوبت به اعمال تبدیل موجک

جدول ۲: مساحت زیر شکل موج خروجی تابع موجک برحسب تعداد میله‌های شکسته روتور

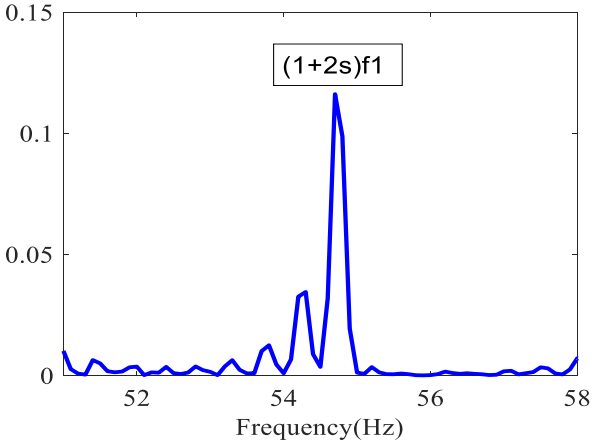
مساحت زیر شکل موج خروجی	تعداد میله شکسته
۰/۰۰۷۴۳۹	۰
۰/۰۶۷۸۵	۱
۰/۰۹۱۳۶	۲
۰/۱۳۷۳۶	۳

پیوسته گوسی جهت استخراج فرکانس‌های اضافی خواهد بود. با توجه به رابطه (۱۲) و وجود تقارن، جستجوی فرکانس‌های موج مدوله‌شده می‌تواند در دو سوی فرکانس پایه (به‌دلخواه) انجام گیرد. برای موج فلیکری A_kهای مرتبط با رابطه (۱۴) برای فرکانس‌های بالای فرکانس پایه محاسبه می‌شوند با این تفاوت که در این قسمت a_kهای جدید از رابطه (۱۶) به‌دست می‌آیند:

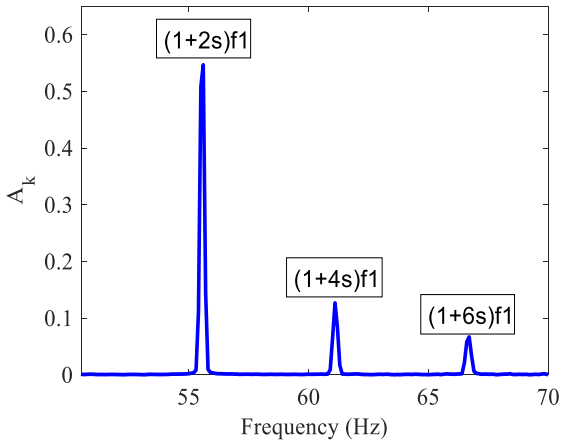
$$a_k = \frac{F_0}{f_1 + kf_{ru}} \qquad (۱۶)$$

که در رابطه (۱۶)، f_1 فرکانس پایه بوده و f_{ru} رزولشن فرکانسی فلیکر است و k مقدار ثابتی است که مقدار آن براساس شرایط موردنیاز تعیین می‌شود. در این مقاله مقدار رزولوشن 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_kها می‌توان از معادله (۱۴) A_k ها را برای مقادیر مختلف k به‌دست آورد. درنهایت مقادیر بیشینه A_k و فرکانس‌های متناظر با این مقادیر بیشینه (مؤلفه‌های فلیکری) محاسبه می‌شوند. همانطورکه در شکل ۹ مشاهده می‌شود یک مقدار بیشینه در فرکانس ۵۴/۵Hz اتفاق افتاده است که بیانگر یک میله شکسته در روتور است. همانطورکه اثبات شد اگر لغزش موتور القایی S=۰/۰۴۵ 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 موجک خروجی برای شرایطی که سه میله روتور در موتور القایی شکسته‌شده باشد را نشان می‌دهد که در این حالت S=۰/۰۵۵ است. همانطورکه 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 درkهای مختلف برای فرکانس فلیکر در حالت یک میله شکسته روتور



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

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

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

شکسته در روتور را تشخیص داد. از شاخص‌های مختلفی برای تشخیص خطا می‌توان استفاده کرد، به‌عنوان مثال می‌توان از دامنه مؤلفه‌های فرکانسی به‌عنوان شاخص تشخیص بهره برد. اما ایجاد برخی مولفه‌های اضافی ناشی از به‌کاربردن روش‌های پردازش مانند FFT و ... و همچنین تغییرات بارگذاری روی موتور امکان بروز خطا را افزایش می‌دهد. شاخص انتخابی این مقاله با بدست‌آوردن 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 بدست‌آوردن مساحت زیر شکل موج خروجی تابع موجک در شرایط سالم (به‌عنوان حد آستانه) و مقایسه آن با حالت‌های میله شکسته، می‌توان به وجود میله شکسته پی‌برد. جدول ۲ این شاخص را برای موتورالقایی شبیه‌سازی‌شده در بارنامی و برای حالت سالم و با تعداد میله‌های شکسته مختلف نشان می‌دهد.

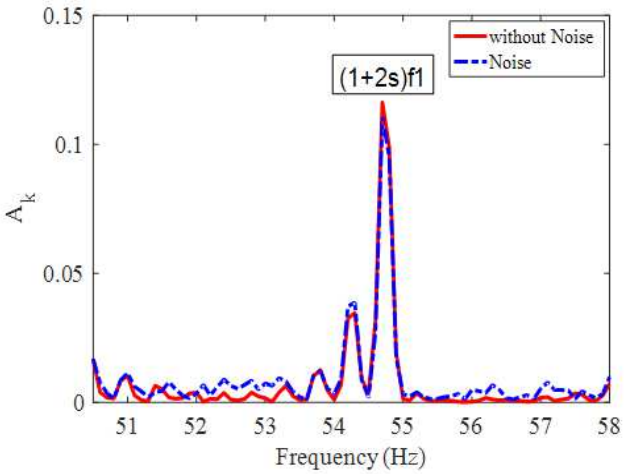
همان‌طورکه در جدول ۲ مشاهده می‌شود مساحت در حالت‌های مختلف میله شکسته روتور در مقایسه با حالت سالم حدود ۱۰ تا ۲۰ برابر افزایش یافته است لذا از این شاخص می‌توان برای تشخیص میله شکسته روتوراستفاده نمود.

۶- تأثیر نویز بر عملکرد تبدیل موجک و تشخیص خطا

هنگامی‌که موتور در شرایط واقعی کار می‌کند، سیگنال‌های اندازه‌گیری‌شده 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. همانطورکه مشاهده می‌شود با وجود کمی اعوجاجی‌شدن 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 به‌وجود میله شکسته پی‌برد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ خروجی تابع موجک را در دو حالت سیگنال‌های نویزی و بدون نویز مقایسه می‌کند. جدول ۳ شاخص معرفی‌شده در مقاله را در شرایطی که سیگنال دارای نویز است، نشان می‌دهد.

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

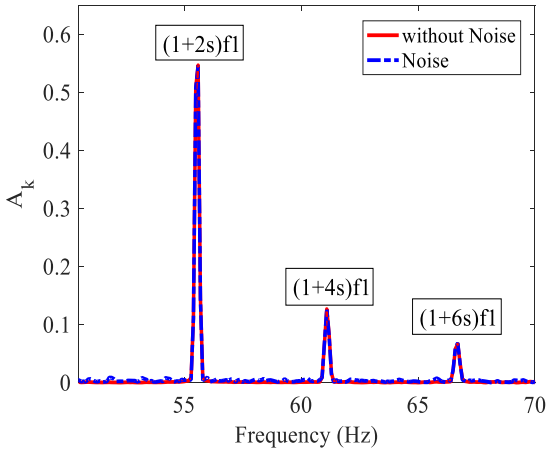
در این قسمت موتور در بارهای مختلف راه‌اندازی شده است و تأثیر بار در تشخیص خطای میله شکسته موردبررسی قرار می‌گیرد. درگذشته تشخیص خطا به روش تبدیل فوریه در بار ثابت صورت گرفته است، اما زمانی‌که موتور در بارهای کم راه‌اندازی می‌شود، لغزش موتور بسیار کوچک است (نزدیک به صفر) درنتیجه فرکانس‌های شاخص خطا در مجاورت فرکانس پایه قرار می‌گیرند.



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

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

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

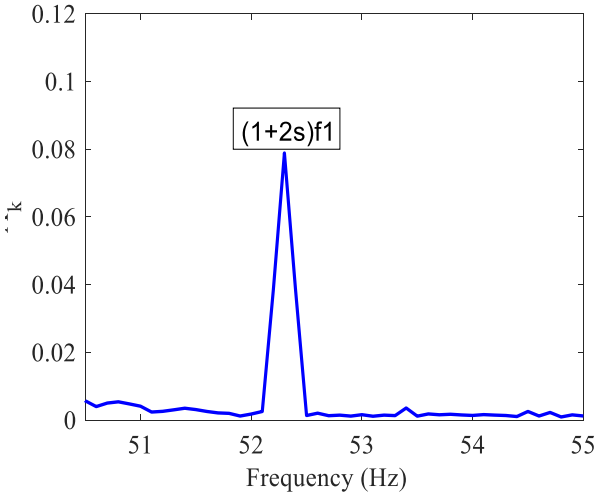


شکل ۱۲: تعیین دامنه‌های A_kدرkهای مختلف برای فرکانس‌های فلیکری در حالت سه میله شکسته روتور با وجود نویز و بدون وجود نویز

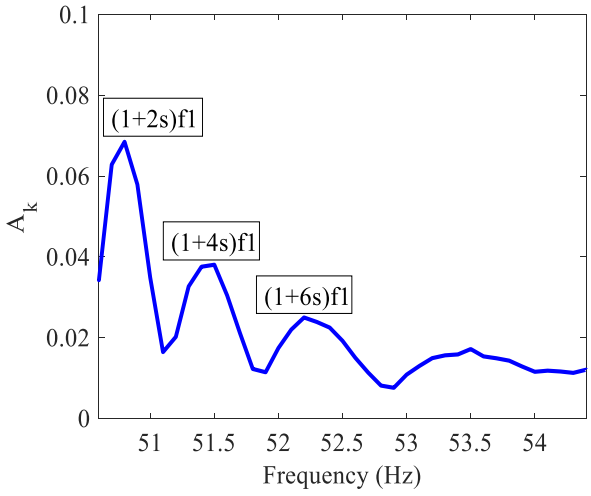
بنابراین به‌راحتی نمی‌توان دامنه‌های فرکانسی را مشاهده کرد. در این حالات بایستی از جریان‌های راه‌اندازی موتور برای تشخیص عیب استفاده کرد. اما با توجه به زمان کم راه‌اندازی به‌ویژه در موتورهای کوچک به‌علت تعداد کم داده‌ها، تشخیص با خطا همراه خواهد بود.

شکل‌های ۱۳ و ۱۴ اعمال روش پیشنهادی ایـن مقالـه را در ۵۰٪ بارکامل و ۱۰٪ بار کامل نشان می‌دهند. مقدار لغزش در نصف بار کامل S=۰/۰۲ و در ۱۰٪ بار کامل S=۰/۰۰۸ است. همانطورکه در شکل ۱۳ مشخص است، در فرکانس ۵۲/۲HZ هرتز یک مقدار بیشـینه مشـاهده می‌شود. موجک خروجی برای ۱۰٪ بار کامل در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. در این مرحله بـه‌دلیل اینکـه لغـزش بسـیار کوچـک اسـت دامنه‌های هارمونیکی در مجاورت یکدیگر می‌باشند. جدول ۴ شـاخص معرفی‌شده در این مقاله را در نصف بار کامل نشان می‌دهد.

همان‌طورکـه اشـکال ۱۳ و ۱۴ نشـان می‌دهنـد روش پیشـنهادی حتی در بارهای کم نیز به‌خوبی قادر به تشخیص خطا است.



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



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

جدول۴: مساحت زیر شکل موج خروجی تابع موجک برحسب تعداد میله‌های شکسته روتور در بارداری ۵۰٪ موتور

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

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 درنظرگرفتن شاخص معرفی‌شده و تابع موجک خروجی و مقایسه با حالت سالم می‌توان به‌وجود 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.

همانطورکه از نتایج شبیه‌سازی مشخص شد، تشخیص خطای میله شکسته هنگامی‌که بارگذاری روی موتور قرار دارد، به‌راحتی قابل انجام خواهد بود. همچنین در مـواقعی کـه موتـور در شـرایط کم‌بـاری کـار می‌کند، اگر خطای میله شکسته رخ دهد، این روش بـاز هـم قـادر بـه تشخیص خطا خواهد بود درحالی‌که روش‌های قـدیمی ماننـد FFT در شرایط کم‌باری قادر به انجام تشخیص خطا نیستند. همچنین مشـاهده شد که روش پیشنهادی در مقابل نویز در داده‌های ورودی نیـز مقـاوم 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.

[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] Ebrahami 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 جلیلوند، 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، دروه 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.

[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 & Technologie 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, Hadjami 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

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