

تشخیص عیب گیربکس در موتورهای القایی با استفاده از روش آنالیز سیگنال جریان

حامد الماسی^۱، سید محمد جواد رستگار فاطمی^۲

^۱ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات ساوه، hamed.alma30@yahoo.com

^۲ هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات ساوه، rastegar.fatemi@gmail.com

چکیده - به دلیل اهمیت و کاربرد گسترده موتورهای القایی در صنعت، تحقیقات گسترده‌ای جهت بهره‌گیری بهینه از موتورها انجام شده است. بخشی از این تحقیقات، تشخیص خطای موتورهای القایی را مد نظر قرار داده است. به منظور بالا بردن قابلیت اطمینان، تکنیک‌های مختلف پایش وضعیت (CM) ارائه و گسترش یافته است، از جمله این تکنیک‌ها می‌توان به آنالیز سیگنال جریان موتور (MCSA) اشاره کرد، که به دلیل ارزان بودن هزینه‌های اولیه و سنسورهای اندازه‌گیری جریان بسیار کاربردی می‌باشد. در این روش ابتدا از سیگنال جریان توسط حسگرها، اندازه‌گیری به عمل می‌آید، سپس توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال از سیگنال مربوطه نمونه برداری شده و در نهایت با استفاده از نرم افزار متلب از سیگنال حاصل شده، تبدیل فوری سریع FFT گرفته می‌شود. نتایج تجربی و عملی نشان می‌دهد که روش انتخابی، خطا را با دقت زیاد و قابلیت اعتماد بالا و نیز بدون نیاز به محاسبات پیچیده در مدت زمان کم مشخص می‌کند، که در نتیجه قابلیت استفاده از آن در کاربردهای عملی را فراهم می‌سازد.

کلید واژه - آنالیز سیگنال جریان، تشخیص خطا، خطای گیربکس، ماشین القایی.

۱- مقدمه

شده است [۳]. روش‌های غیر مخرب روش‌هایی هستند که بر پایه اندازه‌گیری‌های ساده و ارزان بنا شده‌اند و نیازی به تغییر ساختار موتور ندارند [۴]. به طور کلی دو منطق پایه جهت تشخیص عیوب در ماشین‌های الکتریکی وجود دارد: ۱- تشخیص خطا (رخداد خطا) ۲- شناسایی خطا (نوع خطا). شناخته شده ترین روش تشخیص خطا، بر اساس نظارت و پردازش سیگنال های جریان و ارتعاش، شناسایی باندهای کناری در اطراف فرکانس پایه^۱ است که به آن روش آنالیز سیگنال جریان موتور^۲ (MCSA) گفته می‌شود و یکی از مناسبترین روش‌ها جهت تشخیص خطاهای متداول در موتورهای القایی قفس سنجابی، هم از لحاظ فنی و هم از لحاظ اقتصادی می‌باشد [۵].

در این مقاله، روش آنالیز سیگنال جریان (MCSA) برای شناسایی خطای گیربکس در مسئله تشخیص عیب ماشین‌های الکتریکی ارائه می‌گردد. روش ارائه شده تنها نیاز به استفاده از یک مجموعه سنسور (اندازه‌گیر جریان) را دارد و از لحاظ

ماشین‌های الکتریکی یکی از مهمترین و شاید گران قیمت ترین تجهیزات الکتریکی در مراکز صنعتی به شمار می‌روند، بنابراین هرگونه توقف در کارکرد این تجهیزات منجر به صدمات اقتصادی فراوانی می‌گردد. برای جلوگیری از توقفات ناخواسته، کاهش زمان صرف شده جهت تعمیرات و به عبارت دیگر کاهش هزینه و افزایش بهره‌وری، انجام مراقبت وضعیت موتورها امری ضروری است [۱]. با انجام مراقبت وضعیت موتورها، علاوه بر تعیین شرایط موتور و یا تشخیص خطای داخل موتور تصمیم گیری‌های متناسب با نوع عیب اتخاذ می‌گردد، به گونه‌ای که موتور در حداقل زمان ممکن و با کمترین هزینه، مطابق با برنامه‌ریزی‌های انجام شده متوقف و تعمیر گردد [۲].

در سال‌های اخیر تشخیص خطا و نگهداری پیشگیرانه که هدف آن جلوگیری از وقوع خطاهای بزرگ در موتورهاست، مورد توجه بسیاری از محققان و مهندسان قرار گرفته است. در این زمینه تا کنون روش‌های مخرب و غیرمخرب زیادی پیشنهاد

¹ - Fundamental

² - Motor Current signature Analysis

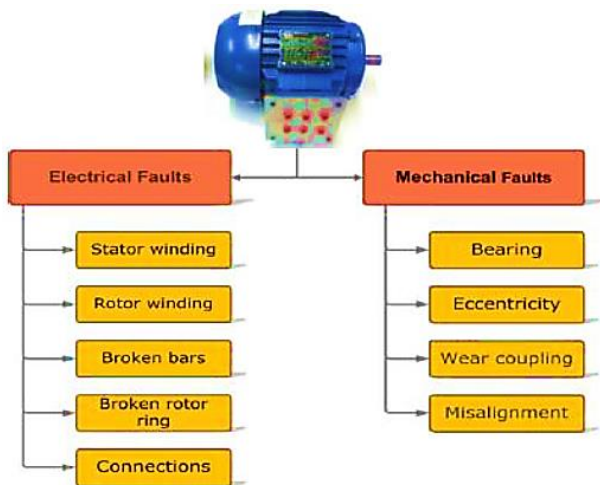
۳- زمینه های پیدایش عیوب مختلف در ماشین های الکتریکی

به طور قطع موتورهای القایی بیشترین کاربرد را در حوزه صنعت ایفا می کنند، با این حال مستعد ابتلا به بسیاری از انواع عیوب در این زمینه می باشند. این عیوب را می توان به دو گروه عمده تقسیم بندی نمود:

۱. عیوب الکتریکی

۲. عیوب مکانیکی

شکل ۲ این عیوب را به صورت نمودار نمایش می دهد [۸].



شکل ۲: دسته بندی انواع عیوب در موتورهای الکتریکی

۱-۳- خطای گیربکس

گیربکس یکی از اجزای بسیار مهم در ماشین های الکتریکی می باشد. وجود هرگونه عیب در گیربکس می تواند به توقف ماشین منجر شود که در نهایت به از دست دادن تولید خواهد انجامید. به همین جهت همواره پایش و تشخیص عیوب مربوط به آن یکی از مسائل پر اهمیت در صنعت به شمار می رود. به همین منظور روش های زیادی برای تشخیص عیب و پایش گیربکس ارائه شده است [۹-۱۱]. بیش از ۹۰٪ تمامی موتورهای مورد استفاده در صنعت موتورهای القایی AC می باشند. بیشترین علت شکست موتور در حین کار مربوط به عیوب گیربکس، عیوب عایق بندی و عیوب روتور می باشد. تشخیص سریع عیوب

اقتصادی مقرون به صرفه تر است. نتایج شبیه سازی بر روی داده های واقعی دریافت شده از موتور القایی دارای عیب گیربکس نشان دهنده مولفه های جدید فرکانسی می باشد و همچنین نشان دهنده کارآمدی روش پیشنهادی است.

۲- پایش وضعیت ماشین های الکتریکی به صورت لحظه ای

آشکارسازی و پایش وضعیت موتور به صورت لحظه ای به خصوصیات عملکردی موتور در حال راه اندازی بستگی دارد. عمده مزیت پایش وضعیت به صورت لحظه ای در این است که به عنوان یک عامل بالقوه می تواند قبل از صدمه دیدن جدی و از کار افتادن تجهیزات، خطا را تشخیص و شناسایی نماید [۶]. بنابراین اخیراً تکنیک های پایش وضعیت موتور به صورت لحظه ای برای تجهیزات مکانیکی و وسایل مخصوص الکتریکی، همچنین موتورهای القایی، ترانسفورماتورها، ژنراتورها، در کارخانه ها و نیروگاه ها توسعه یافته است. سیستم پایش وضعیت لحظه ای را می توان به چهار قسمت اصلی تقسیم بندی نمود، شکل ۱ این سیستم را که از مراحل سنسورها، جمع آوری اطلاعات، شناسایی خطا و تشخیص خطا تشکیل شده است را نشان می دهد.

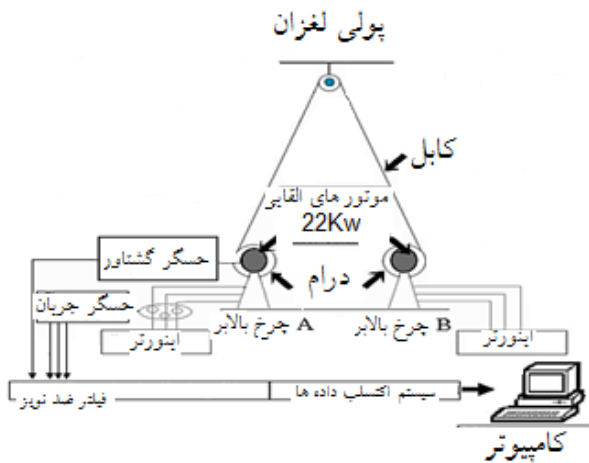


شکل ۱: قسمت های مختلف سیستم پایش وضعیت

سنسورها می توانند یک کمیت فیزیکی را به سیگنال الکتریکی یا ارتعاش تبدیل کنند و آن را به قسمت جمع آوری اطلاعات انتقال دهند که پس از پردازش سیگنال های دریافتی از سنسور صورت می پذیرد. به عنوان مثال می توان به تبدیل آنالوگ به دیجیتال اشاره نمود. پیدا کردن وجود خطا در ماشین های الکتریکی در بخش شناسایی خطا صورت می پذیرد که با تجزیه و تحلیل سیگنال ها با روش های مختلف برای استخراج ویژگی ها از مدل مرجع به دست می آید. تشخیص خطا با مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی ریاضی یا تحلیل سیگنال در حوزه زمان یا فرکانس امکان پذیر می شود. در نهایت تشخیص سیگنال های غیر طبیعی از طبیعی در واحد تشخیص خطا صورت می گیرد [۷].

۴- تنظیمات سیستم آزمایشی

در شرایط عملی مجموعه‌ای از دو جرثقیل که هر یک از موتور القایی قفس سنجابی سه فاز با توان ۲۲ کیلو وات، جفت قطب و ولتاژ ۲۳۴/۴۴ ولت مورد استفاده قرار گرفته است. طرح کلی از نحوه اتصالات این سیستم آزمایشی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: طرح کلی سیستم آزمایشی شده

در شکل فوق، جرثقیل A به منظور بالا بردن و جرثقیل B جهت شبیه سازی شرایط عملکردی مورد استفاده قرار گرفته است. جرثقیل A توسط موتور به گیربکس خورشیدی با نسبت کاهش ۱:۷۷ برای کاهش سرعت و افزایش گشتاور خروجی متصل است. آزمایش انجام شده توسط اینورتر با فرکانس ۴۵,۰۵ هرتز در دو سطح بار ۳۰۰ و ۱۰۰۰ دکانیوتن در حالت خطادار در نظر گرفته شده است. جریان استاتور خروجی ۲۴ آمپری در یک بازه زمانی ثابت $T = 90s$ و فرکانس نمونه برداری $f_s = 25kHz$ اندازه گیری شده است. الگوریتم پردازش سیگنال در این پژوهش توسط نرم افزار متلب انجام می گردد.

۵- روش آنالیز سیگنال جریان موتور (MCSA)

یکی از روش های مورد استفاده برای تشخیص خطا در ماشین های القایی روش آنالیز سیگنال جریان موتور (MCSA) است. که می توان با استفاده از آن عیوبی نظیر شکستگی میله های روتور، ناهمگنی فاصله هوایی (خروج از مرکزیت)، خطای گیربکس، خرابی بلبرینگ و ناهم محوری را تشخیص داد. در این

گیربکس این اجازه را می دهد تا به جای تعویض موتور، گیربکس را تعویض نماییم. در هر صورت جایگزینی و تعویض گیربکس معیوب، مقرون به صرفه تر از تعمیر موتور می باشد. از طرفی موتوری که پیوسته در حال کار است نمی تواند متوقف شود، بنابراین باید روش های پایش وضعیت آن ها را بهبود بخشید [۱۲].

عواملی که می تواند منجر به بروز عیب در گیربکس می شوند

عبارتند از:

- ۱- شکستن یکی از دنده های چرخ دنده ها
- ۲- آلودگی و عدم روغن کاری صحیح
- ۳- خرد شدن چرخ دنده ها
- ۴- سائیدگی سر دنده ها در اثر برخورد دو چرخ دنده و کارکرد آن ها
- ۵- کج شدن دنده ها در اثر فشار بار اضافی
- ۶- افزایش بیش از حد درجه حرارت و تاثیر منفی روی چرخ دنده ها

حتی در شرایط نرمال کارکرد یک ماشین، اصطکاک یک

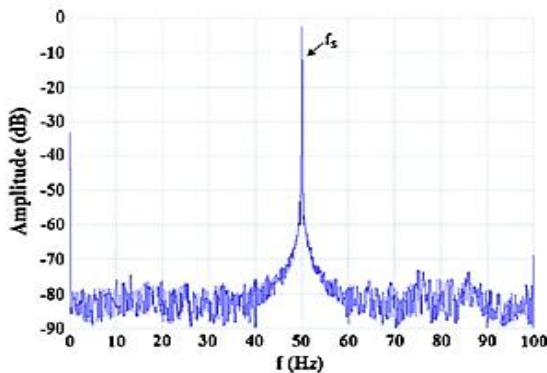
گیربکس یا خراشیدگی کوچک روی سطوح دوار، شروع به رشد می کند و با پیشرفت این عمل گیربکس شروع به تولید یک سری سیگنال ارتعاشی قابل تشخیص می کند. سر منشا خارجی خرابی گیربکس می تواند از عدم روغن کاری صحیح، گریس کاری یا خوردگی به دلیل وجود آب یا اسید در روغن (گریس) باشد.

طبق آمار به دست آمده از پژوهش های انجام شده نشان می دهد که بیش از ۱۰ درصد از خطاها، مربوط به عیوب گیربکس می باشد [۱۳]. در جدول (۱) سهم عیوب هر قسمت از ماشین الکتریکی بر حسب درصد بیان شده است.

جدول (۱): درصد عیوب قسمت های مختلف ماشین الکتریکی

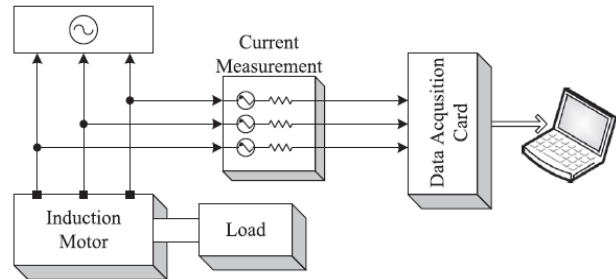
درصد	عیوب
۴۱٪	بلبرینگ
۳۷٪	استاتور
۱۰٪	روتور
۱۲٪	سایر عیوب (گیربکس)

۲۰۲۰ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)



شکل ۵: طیف جریان استاتور برای موتور سالم در شرایط ایده‌آل

روش با نصب سنسور جریان در مدار اولیه، می‌توان سیگنال جریان را مشاهده نمود [۱۴]. سیستم پایش جریان استاتور در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: طرح کلی از سیستم پایش سیگنال جریان موتور

تبدیل سیگنال جریان از حوزه زمان به فرکانس با استفاده از الگوریتم تبدیل فوریه سریع^۳ FFT انجام می‌گیرد. در طول کار عملی، هارمونیک‌های زیادی در سیگنال موتور الکتریکی مشاهده می‌شود بنابراین در سیگنال واقعی پیک‌هایی را علاوه بر فرکانس خط و هارمونیک‌های مشاهده می‌کنیم. این طیف فرکانسی جریان به عنوان مشخصه جریان الکتریکی موتور شناخته می‌شود. با تحلیل این هارمونیک‌ها بعد از تقویت سیگنال، توانایی تشخیص عیوب گوناگون در ماشین‌های الکتریکی فراهم می‌شود [۱۶-۱۵]. از طریق تجزیه و تحلیل سیگنال جریان می‌توان وقوع خطای گیربکس را شناسایی کرد و همچنین می‌توان این شرایط را با استفاده از طیف سیگنال جریان استاتور توسط مولفه‌های فرکانسی به دست آورد [۱۸-۱۷].

سیگنال جریان موتور در حالت ایده‌آل به صورت یک موج سینوسی با فرکانس برق شهر می‌باشد. ما می‌توانیم جریان را برحسب زمان یا بر حسب فرکانس نمایش دهیم. دامنه پیک فرکانسی برابر با مقدار موثر دامنه موج فرکانسی می‌باشد. از آنجا که این حالت یک حالت تئوری بدون هارمونیک است ما فقط یک پیک در طیف فرکانسی مشاهده می‌کنیم.

۵-۱- بررسی موتور سالم در شرایط ایده‌آل توسط روش MCSA

با توجه به شرایط ایده‌آل برای موتور سالم و ولتاژ منبع تغذیه، جریان خط ورودی (فاز 'a') از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$i_a(t) = I_{max} \cos(\omega t) \quad (1)$$

در این رابطه:

$$i_a(t) \quad \text{جریان فاز 'a' استاتور}$$

$$I_{max} \quad \text{مقدار موثر جریان فاز 'a' استاتور}$$

۵-۲- تشخیص خطای گیربکس توسط روش MCSA

در صورت به وجود آمدن خطای گیربکس، مولفه‌های فرکانسی جدیدی بر روی سیگنال جریان مشخص خواهند شد. متغیرهایی که در آنالیز جریان مورد بررسی قرار می‌گیرند شامل، f_r فرکانس گردش موتور، f_{mesh} فرکانس مش و در نهایت f_{dr} فرکانس هارمونیک سوم که مطابق با فرکانس چرخش سه حلقه از گیربکس خورشیدی می‌باشد. این مولفه‌ها خود را توسط روابط زیر در سیگنال جریان نمایش می‌دهند.

$$f_{G1} = f_s \pm u f_r \quad (2)$$

$$f_{G2} = f_s \pm v f_{dr} \quad (3)$$

$$f_{G3} = f_s \pm w f_{mesh1} \quad (4)$$

طیف جریان فاز 'a' تنها یک مولفه اصلی در فرکانس $f_s = \omega / (2\pi)$ ارائه می‌دهد. در روش MCSA برای یک موتور سالم مطابق شکل ۵ تنها یک مولفه اصلی در فرکانس وجود دارد.

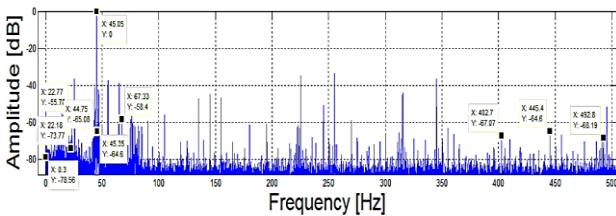
³ - Fast Fourier Transform

۴-۵- بررسی خطای گیربکس با بار ۱۰۰۰ دکانیوتن توسط روش MCSA

که در این روابط:

توسط روش پیشنهادی، طیف فرکانسی جریان استاتور موتور در حالت خطای گیربکس با بار ۱۰۰۰ دکانیوتن مورد بررسی قرار گرفته و در این حالت مشخصه فرکانسی مورد نظر به دست آمده است، که در شکل ۷ قابل مشاهده می‌باشد.

f_{G2} فرکانس تولید شده توسط چرخ دنده اول، f_{G3} فرکانس تولید شده توسط چرخ دنده دوم، f_s فرکانس تغذیه و w, v, u اعداد صحیح می‌باشند.

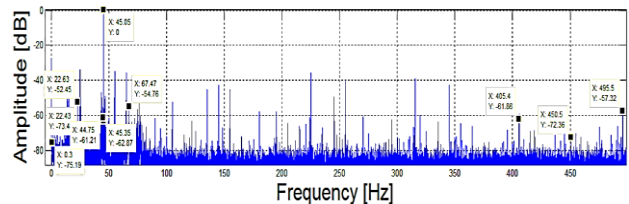


شکل ۷: طیف فرکانسی به دست آمده از موتور با بار ۱۰۰۰ دکانیوتن در حالت خطای گیربکس توسط روش MCSA

در این شرایط، دامنه مولفه‌های فرکانسی باندهای جانبی جریان استاتور برای موتور دارای خطای گیربکس در فرکانس‌های $f_s \pm w f_{mesh}$, $f_s \pm v f_{dr}$, $f_s \pm u f_r$, f_r , f_s مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و نتایج به دست آمده در جدول (۳) نشان داده شده است. مقدار w, v, u برابر با یک در نظر گرفته شده است.

۳-۵- بررسی خطای گیربکس با بار ۳۰۰ دکانیوتن توسط روش MCSA

توسط روش پیشنهادی، طیف فرکانسی جریان استاتور موتور در حالت خطای گیربکس با بار ۳۰۰ دکانیوتن مورد بررسی قرار گرفته و در این حالت مشخصه فرکانسی مورد نظر به دست آمده است، که در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۶: طیف فرکانسی به دست آمده از موتور با بار ۳۰۰ دکانیوتن در حالت خطای گیربکس توسط روش MCSA

جدول (۳): نتایج آزمایش موتور القایی در حالت خطای گیربکس با بار ۱۰۰۰ دکانیوتن توسط روش MCSA

موتور القایی در شرایط خطای گیربکس		
	فرکانس [HZ]	دسیبل [dB]
f_s	45.05	0
f_r	22.18	-73.77
$f_s - u f_r$	22.77	-55.74
$f_s + u f_r$	67.33	-58.4
$f_s - v f_{dr}$	44.75	-65.08
$f_s + v f_{dr}$	45.35	-64.6
$f_s - w f_{mesh1}$	402.7	-67.07
$f_s + w f_{mesh1}$	492.8	-68.19

برای بررسی موتور القایی در حالت خطای گیربکس، دامنه مولفه‌های فرکانسی باندهای جانبی جریان استاتور در فرکانس‌های $f_s \pm w f_{mesh}$, $f_s \pm v f_{dr}$, $f_s \pm u f_r$, f_r , f_s مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و نتایج به دست آمده در جدول (۲) نشان داده شده است. مقدار w, v, u برابر با یک در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): نتایج آزمایش موتور القایی در حالت خطای گیربکس با بار ۳۰۰ دکانیوتن توسط روش MCSA

موتور القایی در شرایط خطای گیربکس		
	فرکانس [HZ]	دسیبل [dB]
f_s	45.05	0
f_r	22.43	-73.4
$f_s - u f_r$	22.63	-52.45
$f_s + u f_r$	67.47	-54.76
$f_s - v f_{dr}$	44.75	-61.21
$f_s + v f_{dr}$	45.35	-62.87
$f_s - w f_{mesh1}$	405.4	-61.86
$f_s + w f_{mesh1}$	495.5	-57.32

۶- نتیجه‌گیری

یک روش تشخیص خطای کار آمد، روشی است که خطای مورد نظر باعث تغییر منحصر به فردی در آن شود و به وقوع آن حساس باشد. روش آنالیز سیگنال جریان استاتور (MCSA) برای

- [13] Giri, Fouad "AC Electric Motors Control: Advanced Design Techniques and Application" 2013 John willy & sons, Ltd.
- [14] Peter Tavner, Li Ran, Jim Penma and Howard Sedding. Condition Monitoring Of Rotating Electrical Machines. London: The Institution Of Engineering And Technology: 2008.
- [15] Adkins, Bernard. The General Theory of Electrical Machines. Chapman & Hall, 1957.
- [16] Luo X., Liao Y., Toliyat HA, El-Antably A. And Lipo TA, Multiple Eoupled Eireuit Modelling Of Induction Maehines, IEEE Transaction On Industry Applications, Vol. 31, N° 2, Pp 311-318, March! April 1995.
- [17] H. A. Toliyat and S. Nandi, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis Of Electrical Machines-A Review," "In Proc. IEEEIAS 1999 Anna. Meeting, Phoenix, AZ, Oct. 3- 7, Pp. 197-204, 1999.
- [18] M. J. Devaney & L.Eren, "Detection Motor Bearing Fault", IEEE Instrumentation & Measurment Magazine, Volume 7, Issue: 4 , Pages 30-50, Dec 2004.

تشخیص خطای گیربکس در موتورهای القایی سه فاز دارای این دو خاصیت می‌باشد. این خطا با مولفه‌های اضافی که در طیف جریان استاتور ایجاد می‌کند باعث تغییر منحصر به فردی در آن می‌شود که امکان تشخیص این خطاها را با بررسی این طیف فراهم می‌سازد. در این مقاله، گیربکس خورشیدی دارای نقص، با بار ۳۰۰ و ۱۰۰۰ دکانیوتن مورد آزمایش قرار گرفت، و نتایج حاصل از آزمایش ارائه گردید. نتایج تجربی ارائه شده حاکی از آن است که روش آنالیز سیگنال جریان (MCSA) با دقت خوب و با قابلیت اطمینان بالا، توانایی تشخیص انواع عیوب را در موتورهای القایی دارا می‌باشد.

مراجع

- [1] G.K. Singh, S. A. S. Alkazzaz "Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research--a survey," Electric Power Systems Research, vol. 64, pp. 145-/158, 2013.
- [2] M. E. H. Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 47, pp. 984-993, Oct. 2009.
- [3] Benbouzid M. E. H., "Bibliography on induction motors faults detection and diagnosis," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 14, No. 4, pp. 1065-1074, Dec. 1999.
- [4] Kliman G. B., Koegl R. A., Stein J., Endicott R. D., Madden M. W., "Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. EC- 3, No. 4, pp. 873-879, Dec. 1988.
- [5] W. T. Thomson And R.J. Gilmore, "Motor Current Signature Analysis To Detect Faults In Induction Motor Derives-Fundamentals, Data Interpretation, And Industrial Case Histories", Proceedings Of 32nd Turbomachinery Symposium, Texas, A&M University, USA, 2003.
- [6] K. Wang, Intelligent Condition Monitoring And Diagnosis Systems A Computational Intelligence Approach. Ios Press, 2003, Ch.3.
- [7] Singh, G. K., and Ahmed Saleh Al Kazzaz. "Induction Machine Drive Condition Monitoring and Diagnostic Research—A Survey." *Electric Power Systems Research* 64.2 (2003): 145-158.
- [8] Nandi S, Toliyat HA, Li X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—a review. *IEEE Trans Energy Convers*;20(4):719-29,2005.
- [9] B. Li, P.L. Zhang, H. Tian, Et Al., A New Feature Extraction and Selection Scheme for Hybrid Fault Diagnosis of Gearbox, *Expert Systems with Applications* 38, 10000-10009, 2011.
- [10] C. Kara, A.R. Mohanty, Vibration And Current Transient Monitoring For Gearbox Fault Detection Using Multiresolution Fourier Transform, *Journal Of Sound And Vibration* 311, 109-132, 2008.
- [11] N. Baydar, A. Ball, Detection Of Gear Failures Via Vibration And Acoustic Signals Using Wavelet Transform, *Mechanical Systems And Signal Processing* 17 (4), 787-804, 2003.
- [12] M.H.Sadeghi, J.Rafiee, F.Arvani, and A. Harifi. "A Fault Detection and Identification System for Gearboxes using Neural Networks". 0-7803-9422-2005 IEEE.