

بررسی روشهای تشخیص عیب یاتاقانها در راستای تعمیرات پیشگویانه

سیدمسعود شمس موسوی^(۱)، جواد پشتمان^(۲)

آزمایشگاه ANVC/FDI، ساختمان شماره ۲ دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

M_smosavi@ee.iust.ac.ir

چکیده

بی تردید یاتاقانها یکی از اجزاء بسیار پر کاربرد در صنعت هستند. بدلیل کار پیوسته و مداوم، این اجزاء استعداد زیادی در جهت خرابی دارند. در این مقاله سعی شده است که انواع روشهای تشخیص عیب یاتاقانها به صورت کلی مورد بررسی قرار بگیرند. روشهایی چون آنالیز ارتعاشات بدنه، سیگنالهای صوتی، و سیگنالهای الکتریکی منبع تغذیه موتورها بررسی شده است. با استفاده از اینگونه روشها می توان امکان برنامه ریزی دقیق تعمیرات پیشگویانه را برای بخش نت مهیا کرد. مخصوصاً روش آنالیز سیگنالهای الکتریکی منبع تغذیه می تواند با هزینه و صرف وقت کمتر نسبت به سایر روشها کمک شایان توجهی را به تعمیرات پیشگویانه بخش نگهداری و تعمیرات (نت) نماید. هدف این مقاله ارائه روشهای پایه ای برنامه ریزی تعمیرات پیشگویانه در یک مورد خاص همچون یاتاقانها است.

واژه های کلیدی: تشخیص عیب- یاتاقان- تعمیرات پیشگویانه.

۱- مقدمه

در بیشتر مواقع اتفاق می افتد که دستگاهها به صورت تکراری دچار خرابی می شوند، مثلاً یاتاقانهای دستگاهی هر شش ماه یک بار خراب می شود و این وضعیت همیشگی بوده و مورد پذیرش کارخانه واقع شده، و طبیعی تلقی می شود. چنین مسائلی که مکرراً اتفاق می افتد مانند کوتاهی عمر یاتاقانها، خرابی مکرر واشرها، وجود ترکهای سازه ای و ... معمولاً نشانگر وجود مسائل جدی تری است. اما در عمل بخش تعمیرات اقدام به تعمیر دستگاه مورد نظر کرده و برخورد جدی با علل و ریشه های خرابی نمی کند. آنالیز منابع و علل خرابی عبارتند از کاربرد مجموعه ای از ابزارهای تحلیلی پیشرفته و مجهز به منطق مهندسی برای شناسایی و اصلاح ریشه ها و علل خرابی دستگاهها. اجرای کامل این تکنولوژی موجب صرفه جویی قابل ملاحظه ای برای کارخانه ها خواهد شد [۱].

یاتاقانها استعداد زیادی در جهت خرابی دارند، این امر به خاطر کار پیوسته و مداوم این المانها است. این استعداد تا حدی است که به یاتاقانها بعنوان اجزاء مصرفی یک دستگاه نگریسته می شود. برای دستگاههای کوچک و غیر کلیدی تا حدی خرابی متناوب یاتاقانها در زمانهای مشخص از طرف بخش نت یک کارخانه پذیرفتنی است، ولی در دستگاهها و ماشین آلات بزرگ و

کلیدی، جاییکه که امکان دارد خرابی یک موتور باعث از کارافتادگی خط یک محصول یا یک بخش از نیروگاه و عواقب دیگر شود، به دلایلی چون جلوگیری از هزینه بالای تعویض غیر ضروری، از کارافتادن غیر ضروری یا اتفاقی یک قسمت، و همچنین امکان برنامه ریزی برای تعمیرات پیشگويانه، تشخیص عیب یاتاقانها به صورت بهنگام یا دوره‌ای می‌تواند در صرفه‌جویی در وقت و هزینه نقش بسزایی را ایفا کند.

کارکرد مناسب بیشتر ماشینها و دستگاههای صنعتی به طور قابل ملاحظه‌ای به حرکت هموار و یکنواخت یاتاقانها بستگی دارد. در کاربردهای صنعتی یاتاقانها به عنوان اجزاء مکانیکی بحرانی شناخته می‌شوند و یک عیب اولیه در این اجزاء اگر به موقع تشخیص داده نشود به از کارافتادگی کلی دستگاه منجر می‌شود و امکان دارد بعضی مواقع باعث یک خرابی فاجعه‌بار در ماشین شود. عیوب یاتاقانها امکان دارد در هنگام استفاده با در هنگام فرآیند ساخت آنها ایجاد شود و تشخیص این عیوب برای مانیتورینگ وضعیت و نیز برای بالا بردن کیفیت بازرسی یاتاقانها بسیار مهم است [۲].

در این مقاله سعی شده است که انواع روشهای تشخیص عیب یاتاقانها به صورت کلی مورد بررسی قرار بگیرند. در بخش دو این مقاله انواع اندازه‌گیریهای که حاوی اطلاعاتی در رابطه عیوب هستند معرفی می‌شوند. این اندازه‌گیریها نیازمند پردازشهایی در حوزه زمان و فرکانس هستند، این روشهای پردازش سیگنال در بخش ۳ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در بخش ۴ هم نتیجه گرفته شده از مطالب ارائه شده است.

۲- انواع اندازه‌گیریهای حاوی اطلاعات درباره عیوب یاتاقانها

سیگنالهای مختلفی برای تشخیص و آشکارسازی استفاده می‌شود. به طور کلی می‌توان آنها را بصورت زیر بیان کرد:

اندازه‌گیری ارتعاشات

اندازه‌گیری صوتی

اندازه‌گیری سیگنالهای الکتریکی منبع تغذیه در موتورها

اندازه‌گیری خورده‌ریزهای فرسایشی

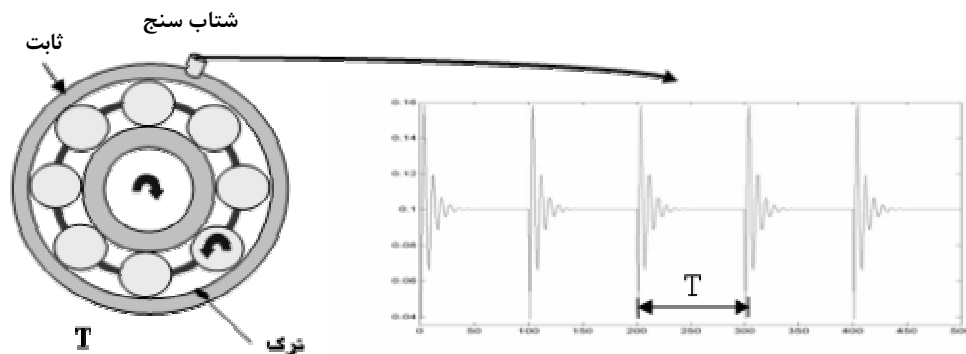
اندازه‌گیری حرارتی

در این میان اندازه‌گیری ارتعاشات به طور گسترده‌تری مورد استفاده قرار می‌گیرد. از لحاظ ارزانی و سادگی نصب سنسور اندازه‌گیری جریان نسبت به روشهای دیگر برتری دارد. اندازه‌گیریهای حرارتی و خورده‌ریزهای فرسایشی به علت هزینه زیاد نسبت به عملکردشان مورد بررسی این مقاله قرار نگرفته‌است.

۲-۱- اندازه‌گیری ارتعاشی

یاتاقانها در دستگاههای مختلف به عنوان تولید کننده نویز عمل می‌کنند، خواه سالم باشند، خواه در آنها عیب وجود داشته باشد. یاتاقانهای غلظتی که بار آنها به صورت شعاعی است حتی اگر از لحاظ هندسی دارای عیب خاصی نباشند تولید ارتعاشات می‌کنند. علت این امر آنست که برای حمل بار از تعداد المانهای محدودی استفاده می‌کند. تعداد المانهای غلظتی و موقعیت آنها در ناحیه بار با چرخش یاتاقانها تغییر می‌کند و این امر منجر به تغییرات پریودیکی در سفتی اجزاء یاتاقانها می‌شود، و این تغییرات سفتی موجب تولید ارتعاشات می‌شود، که با نام ارتعاشات تغییرات مطلوبیت^۱ از آن یاد می‌شود [۲].

¹ Varying compliance vibrations



شکل ۱: رزنانسهای تولید شده در یاتاقان

تقابل عیوب در یاتاقانهای غلتشی وقتی که عیوب با المان مجاور خود اصابت می کنند به تولید پالسهای ارتعاشی با مدت زمان کوتاه می انجامد (شکل ۱). این پالسها فرکانس طبیعی المانهای یاتاقان و ساختار محفظه را تحریک می کند، و موجب افزایش انرژی ارتعاشی در این فرکانسها می شود. فرکانس رزنانس هر المان یاتاقان به تنهایی قابل محاسبه است، در حالیکه ارزیابی اینکه چطور رزنانس اجزاء روی یاتاقان و نصب آن روی محفظه تأثیر می گذارد مشکل است. نشان داده شده است که رزنانس اجزاء تأثیر کمی از این مسئله می گیرند. فرکانسهای طبیعی این اجزاء معمولاً بالاتر از 5 kHz هستند [۲].

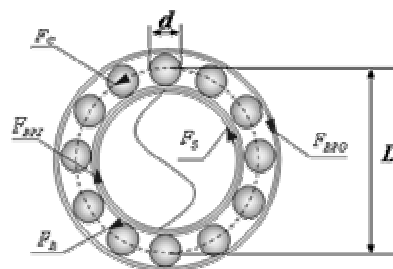
از طرف دیگر هر المان یاتاقان دارای یک مشخصه فرکانسی چرخشی است، که در صورت وجود یک عیب روی این المان یک افزایش انرژی ارتعاشات در مشخصه فرکانسی چرخشی آن خواهیم داشت. این مشخصه فرکانسی عیب از طریق ملاحظات سینماتیک یعنی هندسه یاتاقان و سرعت چرخش آن قابل محاسبه است. برای یک یاتاقان با رینگ خارجی ثابت و رینگ داخلی در حال گردش با فرکانس F_s این مشخصه های فرکانسی از رابطه های نشان داده شده در شکل ۲ قابل محاسبه هستند [۲]، [۳]:

$$F_C = \text{فرکانس کج نگهدارنده} = \frac{F_s}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

$$F_B = \text{فرکانس چرخش توپها} = \frac{DF_s}{2d} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2 \alpha \right)$$

$$F_{BPO} = \text{فرکانس عیب روی رینگ خارجی} = NF_C = \frac{NF_s}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

$$F_{BPI} = \text{فرکانس عیب روی رینگ داخلی} = N(F_s - F_C) = \frac{NF_s}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$



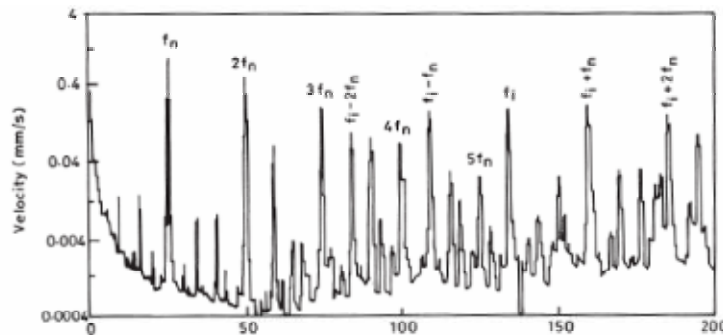
شکل ۲: فرکانسهای اصلی در یاتاقانهای با المان غلتشی

d قطر المانهای غلتشی، D قطر گام، N تعداد المانهای غلتشی و α زاویه تماس است. همانطور که مشاهده می شود برای محاسبه دقیق فرکانسهای عیوب مختلف احتیاج به اطلاعات دقیقی از ساختار موتور داریم. در بعضی مراجع روابط زیر برای محاسبه فرکانسهای عیب رینگ داخلی و خارجی یاتاقانهای با ۶ و ۱۲ عدد المان غلتشی آورده شده است که احتیاجی به ابعاد هندسی یاتاقان ندارد [۴]:

$$\begin{aligned} F_{BPO} &= 0.4 \cdot n \cdot F_s \\ F_{BPI} &= 0.6 \cdot n \cdot F_s \end{aligned} \quad (1)$$

برای سرعتهای معمولی فرکانسهای عیوب در رنج فرکانسهای پایین ظاهر می شوند، این فرکانسها معمولاً پایین تر از 500 Hz است و در عمل این فرکانسها امکان دارد به دلیل لغزش در المانهای غلتشی کمی از مقدار محاسبه شده آنها متفاوت باشد. بسیاری از پژوهشگران گزارشاتی مبنی بر موفقیت تشخیص عیب یاتاقانها به کمک شناسایی این فرکانسها ارائه کرده اند.

از نکات قابل بحث در این مورد می‌توان به وجود باندهای کناری^۱ فرکانسهای مشخصه عیب اشاره کرد. این باندهای کناری فرکانسهایی در اطراف مشخصه فرکانسی عیوب هستند که در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

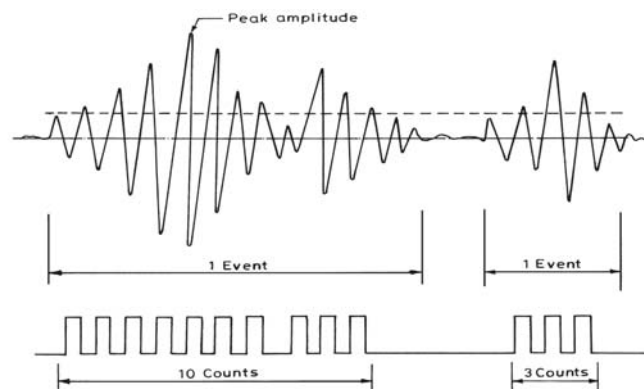


شکل ۳: یک طیف نمونه بدست آمده از یک یاتاقان با المان غلتشی و وجود عیب در رینگ داخلی

باندهای کناری به خاطر تغییرات زمانی موقعیت عیب نسبت به سنسور اندازه‌گیر ارتعاشات به وجود می‌آیند. گذشته از این باندهای کناری که کار تشخیص عیب را با مشکل مواجه می‌کند، وجود نویز و ارتعاشات منابع دیگر نیز این کار را با مشکل مواجه می‌کند، مگر مواقعی که عیب به اندازه کافی بزرگ باشد [۱]. سنسورهای مختلفی برای اندازه‌گیری ارتعاشات موجود است، مرجع [۵] انواع این سنسورها را بررسی کرده‌است.

۲-۲- اندازه‌گیری صوتی

انتشار صوتی^۲ (AE) پدیده تولید موج گذرای ارتجاعی ناشی از تخلیه سریع انرژی به دلیل دگرگونی ساختار یک فلز جامد تحت فشارهای مکانیکی یا حرارتی است. تولید و گسترش یک ترک ناشی از تغییر شکل یکی از عمده منابع نشر صوتی است. به همین دلیل نشر صوتی یکی از ابزار مهم برای کنترل وضعیت از طریق آزمایشهای غیر مخرب است. تجهیزات اندازه‌گیری نشر صوتی شامل یک مبدل، معمولاً پیزو الکتریک، یک پیش تقویت کننده و یک بخش پردازش سیگنال است. از مبدلهایی برای اندازه‌گیری این سیگنالها استفاده می‌شود که دارای فرکانس طبیعی خیلی بالا و پاسخ رزونانسی هستند. پهنای باند این سیگنال نیز بوسیله استفاده از یک فیلتر مناسب در پیش تقویت کننده کنترل می‌شود. یکی از عمومی‌ترین پارامترهای قابل اندازه‌گیری از سیگنال نشر آکوستیکی تعداد نوسانات، رویدادها و بالاترین دامنه سیگنال است. این پارامترها در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۴: یک نمونه سیگنال قطاری نشر آکوستیکی

¹ SideBands

² Acoustic Emission

تعداد پالسها شامل شمارش تعداد دفعاتی است که دامنه سیگنال از یک سطح تعریف شده ولتاژ بالاتر می‌رود. یک رویداد شامل یک گروه از پالسها می‌شود و بر یک موج گذرا دلالت دارد. اندازه‌گیری بالاترین دامنه و تعداد پالسها برای تشخیص عیوب بلبرینگهای زیر بار شعاعی با سرعت پایین یا متوسط استفاده می‌شود. توزیع رویدادها و بالاترین دامنه برای بازرسی کیفیت یاتاقان و تشخیص یاتاقان نو از کهنه مورد استفاده قرار می‌گیرد. از اندازه‌گیری ناحیه زیر نمودار زمانی نیز برای تشخیص عیب یاتاقانهای با المان غلشی استفاده شده است [۱].

۲-۳- اندازه‌گیری سیگنالهای الکتریکی منبع تغذیه در موتورهای

اندازه‌گیری جریان: ماشینهای القایی به صورت گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. اعتماد زیاد صنعت به این ماشینها و استفاده از آنها در کاربردهای بحرانی باعث شده است که خرابی فاجعه‌بار اینگونه موتورها اثرات گرانقیمت و پرخرجی را به دنبال داشته باشد. بهمین دلیل قسمت عمده‌ای از مطالعات عیب یابی بر روی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه این موتورها متمرکز شده است. آنالیز مشخصه‌های سیگنال جریان موتور^۱ MCSA یک راه غیرمخرب را برای تشخیص سلامت موتور ارائه می‌کند [۶].

روش کار به این صورت که سیگنال حالت گذرا یا ماندگار جریان موتور توسط تکنیکهایی مانند تبدیل موجک [۶]، تبدیل فوری سریع [۴]، و روشهای دیگر [۸] مورد بررسی قرار می‌گیرد. این تکنیکها مشخصه‌ها مربوط به عیوب مختلف که به روشهای تجربی یا تحلیلی قابل شناسایی است را از سیگنال جریان استخراج می‌کنند [۷]، [۹].

ارتباط میان عیب موجود در یاتاقانها با سیگنال جریان از ارتباط بین ارتعاشات و فاصله هوایی ناشی می‌شود. به این صورت که ارتعاشات ناشی از عیوب مختلف موجود در یاتاقانها بر روی فاصله هوایی تأثیر می‌گذارد و آن را از حالت یکنواختی خارج می‌سازد. همین امر موجب غیر یکنواختی شار عبور کننده از فاصله هوایی می‌شود [۴]، [۶]، و این امر نیز جریان موتور را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

با توجه به مطالب گفته‌شده بخش ۲-۲ فرکانسهای ارتعاشی ناشی از عیوب مختلف براساس ابعاد هندسی یاتاقانها قابل محاسبه است. اگر مشخصه‌های ارتعاشی عیوب را با f_v نمایش دهیم، فرکانسهای مشخصه جریان ناشی از این عیوب به صورت زیر آشکار می‌شوند. در حالیکه $m = 1, 2, \Lambda$ و f_s فرکانس منبع تغذیه موتور است.

$$f_{bng} = |f_s \pm m \cdot f_v| \quad (2)$$

اندازه‌گیری توان لحظه‌ای: در این روش بجای سیگنال جریان، سیگنال توان لحظه‌ای موتور بعنوان یک واسط برای آنالیز مشخصه‌های موتور در جهت تشخیص عیبهای مکانیکی استفاده می‌شود. نشان داده شده است مقدار اطلاعات موجود در سیگنال توان، که حاصل ضرب سیگنال جریان در سیگنال ولتاژ استاتور است، بیشتر از اطلاعاتی است که از سیگنال جریان قابل استنباط است. در واقع، علاوه بر هارمونیک اصلی و دو باند کناری آن، طیف توان لحظه‌ای شامل یک جزء اضافه در فرکانس مدوله کننده سیگنال ناشی از عیوب است، به صورت زیر:

$$p(t) = p_0(t) + \frac{MV_{LL} I_L}{2} \left\{ \cos \left[(2\omega + \omega_{osc})t - \varphi - \frac{\pi}{6} \right] + \cos \left[(2\omega - \omega_{osc})t - \varphi - \frac{\pi}{6} \right] + 2 \cos \left(\varphi + \frac{\pi}{6} \right) \cos(\omega_{osc} t) \right\} \quad (3)$$

¹ Motor Current Signature Analysis

در حالیکه p توان لحظه‌ای، M شاخص مدولاسیون، V_{LL} مقدار مؤثر ولتاژ خط به خط، I_L جریان خط، ω فرکانس منبع و ω_{osc} فرکانس مدوله کننده یا همان فرکانس مشخصه عیب است [۷]. همانطور که ملاحظه می‌شود برای اندازه گیری سیگنال جریان به یک سنسور ولتاژ علاوه بر آن چیزی که در روش اندازه گیری جریان استفاده می‌کردیم احتیاج است، ولی در عوض تشخیص عیب با دقت بیشتری انجام می‌شود.

۳- انواع تکنیکهای پردازش سیگنال برای تشخیص عیب یاتاقانها

چندین روش مختلف برای آنالیز سیگنالهای ارتعاشی، آکوستیکی و جریان وجود دارد که این تکنیکها خیلی از هم مستقل نیستند و بعضاً در بسیاری از موارد تکمیل کننده یکدیگر هستند [۲]. در حالت کلی این روشها را می‌توان به روشهای زمانی و فرکانسی تقسیم کرد. روشهای زمانی همکنون در صنعت در مواردی که احتیاج به جایابی عیب به صورت دقیق نیست استفاده عمومی دارند. در عوض از روشهای فرکانسی بیشتر در مواردی استفاده می‌شود که به دقت و حساسیت بیشتر نیاز است.

۳-۱- دیدگاه حوزه زمان

ریشه میانگین مربعات (RMS): ساده‌ترین روشی که در حوزه زمان مطرح می‌شود اندازه‌گیری کلی سطح (RMS) ریشه میانگین مربعات و یا بدست آوردن فاکتوری با نام کرسٹ فکتور است، که این فاکتور نسبت پیک مقدار سیگنال شتاب به مقدار RMS شتاب است. این روش با موفقیت‌های محدود برای تشخیص عیبهایی محلی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین بعضی پارامترهای ایستا از قبیل چگالی احتمال و کورتسیس برای تشخیص عیب یاتاقانها استفاده شده است. بدین صورت که چگالی احتمالات شتاب یک یاتاقان در شرایط سلامت دارای توزیع گوسی است، در صورتی که یک یاتاقان آسیب دیده یک توزیع غیرگوسی با دنباله برجسته دارد، که این امر به واسطه افزایش نسبی در تعداد سطوح بالای شتاب است. ولی در این مورد باید ذکر شود که برای بعضی از عیوب یاتاقانها توزیع شبه گوسی نیز گزارش شده است [۲].

گشتاورهای ایستا: به جای مطالعه نمودارهای چگالی احتمالات اغلب به کارگیری گشتاورهای ایستا اطلاعات بیشتری را در اختیار ما قرار می‌دهد. گشتاورهای ایستا به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$M_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x^n P(x) dx \quad n = 1, 2, 3, K, m \quad (4)$$

که $P(x)$ تابع چگالی احتمال دامنه لحظه‌ای x است. گشتاورهای اول و دوم به عنوان مقادیر میانگین و واریانس شناخته می‌شوند. گشتاور نرمالیزه شده نسبت به مکعب انحراف استاندارد بعنوان ضریب عدم تقارن^۱ شناخته می‌شود. گشتاور نرمالیزه شده نسبت به توان چهارم انحراف استاندارد بسیار مفید است و گشتاور کورتسیس نامیده می‌شود و با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\beta_2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^4 P(x) dx}{\sigma^4} \quad (5)$$

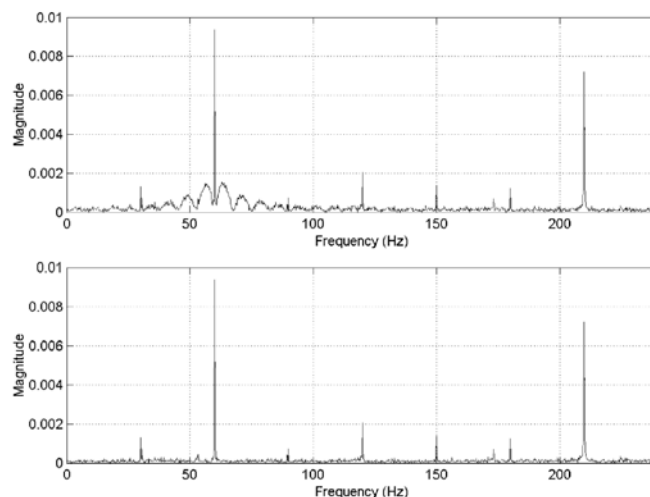
که $\bar{x}$ مقدار میانگین سیگنال است. برای سیگنال دریافتی از یک یاتاقان آسیب ندیده و سالم با توزیع گوسی این مقدار به عدد ۳ محدود می‌شود، و مقدار بالاتر از ۳ به تنهایی می‌تواند نشان‌دهنده وقوع عیب در یاتاقان باشد. این در حالی است که اعمال این روش نیازی به اطلاعاتی درباره سابقه و پیشینه یاتاقان ندارد، و این یک مزیت استفاده از این روش است. یک عیب این روش آنست که مقدار کورتسیس سیگنال دریافتی از یک یاتاقان با پیشرفت زیاد عیب دوباره به سمت عدد ۳ نزدیک می‌شود. روش استفاده از کورتسیس یک روش خیلی عمومی در صنعت است [۱].

¹ Skewness

۳-۲- دیدگاه حوزه فرکانس

تحلیل حوزه فرکانس یا آنالیز طیف سیگنال روشی است که بیشترین استفاده را در تشخیص عیب یاتاقانها دارد. روش تبدیل فوریه سریع: نخستین و سنتی‌ترین روش پردازش سیگنال در حوزه فرکانس، استفاده از تبدیل فوریه گسسته برای محاسبه طیف فرکانسی سیگنال است. این تبدیل در نرم‌افزارهای مختلفی مانند MATLAB به صورت یک دستور ساده موجود می‌باشد. بعد از محاسبه طیف، فرکانسهای مشخصه عیب شناسایی می‌شوند و دامنه آنها با مقدار اولیه دامنه این فرکانسها در طیف سیگنال بدست آمده از یاتاقان مقایسه می‌شود و از روی آن وقوع عیب را تشخیص می‌دهند. البته بدست آوردن یک پیک مشخص در فرکانسهای عیب در طیف مستقیم از سیگنال بدست آمده از یاتاقان معیوب مشکل است، و این به خاطر واقعیت وجود نویز و ازتغاشات منابع دیگر بجز یاتاقان است مگر اینکه عیب به اندازه کافی بزرگ باشد. در نتیجه این روش فقط در مواقعی که عیب به اندازه کافی بزرگ باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲].

مشکل دیگر در این روش عدم توانایی تبدیل فوریه سریع در محاسبه طیف فرکانسی سیگنالهای غیر ایستا است، چون در واقع این تبدیل فقط برای سیگنالهای ایستا کاربرد دارد، حال آنکه بیشتر سیگنالهای دریافتی از یاتاقانها غیر ایستا هستند و به عواملی چون بار، دما، ولتاژ منبع تغذیه (در موتورهای القایی)، و غیره بستگی دارند. در شکل ۵ مقایسه‌ای میان تبدیل فوریه سیگنال جریان یک موتور القایی دارای یاتاقانهای سالم در حالت ایستا و غیر ایستا انجام شده است. نمودار بالایی طیف سیگنال غیر ایستا ناشی از تغییرات سرعت موتور است، در حالیکه نمودار پایینی حاصل سیگنال ایستا است. با مقایسه این دو نمودار متوجه باندهای کناری حول فرکانس منبع تغذیه می‌شویم که این باندها کناری امکان دارد معیوب بودن یاتاقانها یا قسمتی از موتور نتیجه بدهد که نتیجه اشتباهی است.

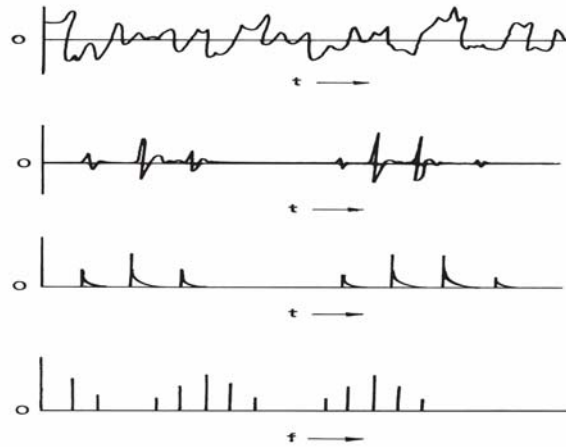


شکل ۵: طیف فوریه سیگنال غیر ایستا و ایستا

همین مقایسه ضعف تبدیل فوریه سریع را برای سیگنالهای غیر ایستا نشان می‌دهد. در نتیجه تبدیل فوریه سریع در مواردی که یاتاقانها در شرایط غیر متغیر و ایستا کار می‌کنند و تغییراتی در شرایط کاری دما، سرعت و غیره وجود ندارد دارای استفاده مفید است و در بقیه موارد باید از روشهای دیگر که با سیگنالهای غیر ایستا هم کاربرد دارند مانند تبدیل موجک استفاده شود.

آشکارساز پوش: هنگامیکه یک عیب با المان مجاور خود برخورد می‌کند، یک پالس کوتاه مدت تولید می‌شود که مشخصه فرکانسی مربوط به محل وقوع عیب را به صورت پریودیک برانگیخته می‌کند. در نتیجه این رزنانس با فرکانس مشخصه عیب مدولاسیون دامنه می‌شود. با دمدولاسیون یکی از این رزنانسها سیگنالی بدست می‌آید که مشخص کننده

وضعیت یاتاقان است. در عمل سیگنال بدست آمده از یک فیلتر میان گذر در نزدیکی فرکانس رزونانس عبور می کند و نوسانات ناخواسته سیگنال از منابع دیگر محدود می شود. سپس این سیگنال بدست آمده از فیلتر میانگذر بوسیله یک آشکارساز با یکسو و هموار کردن سیگنال دمدولاسیون می شود. طیف پوش سیگنال در رنج فرکانس پایین برای کسب مشخصه های فرکانسی عیوب یاتاقان مورد تحلیل قرار می گیرد.



شکل 6: فرآیند استخراج طیف دمدولاسیون شده بوسیله

فرآیند استخراج طیف رزونانسی بوسیله تکنیک رزونانس فرکانس بالا HFRT در شکل ۶ نشان داده شده است. این روش به طور گسترده ای مورد استفاده قرار گرفته است و بوسیله چندین مقاله توضیح داده شده است. محدودیت این روش در آن است که با پیشرفت خرابی امکان دارد فرکانسهای عیب به وسیله بالا آمدن سطح پس زمینه طیف سیگنال مخفی شوند.

روش بردار پارک^۱: بردار پارک یک ارائه دو بعدی برای توصیف پدیده های سه فاز موتورهای القایی است. اگر جریانهای سه فاز موتور را با (i_a, i_b, i_c) ، اجزاء بردار پارک جریان (i_d, i_q) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\begin{cases} i_d = \sqrt{\frac{2}{3}}i_a - \frac{1}{\sqrt{6}}i_b - \frac{1}{\sqrt{6}}i_c \\ i_q = \frac{1}{\sqrt{2}}i_b - \frac{1}{\sqrt{2}}i_c \end{cases} \quad (۶)$$

در شرایط ایده آل، جریان سه فاز منجر به بردار پارک با درایه های زیر می شود:

$$\begin{cases} i_d = \frac{\sqrt{6}}{2}i_M \sin \omega t \\ i_q = \frac{\sqrt{6}}{2}i_M \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad (۷)$$

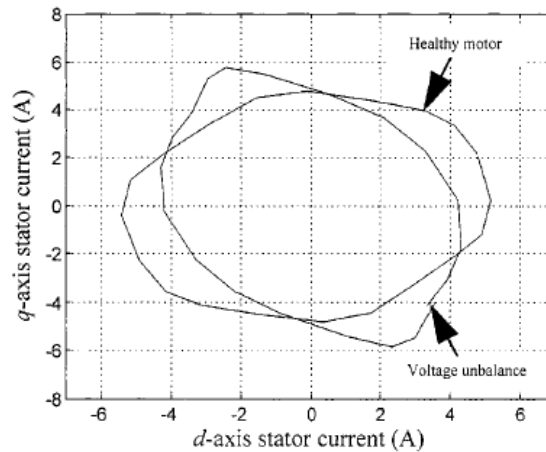
i_M ماکزیمم مقدار جریان سه فاز و ω_s فرکانس تغذیه است [۷].

با دو روش می توان از بردار پارک برای آشکارسازی عیب استفاده کرد، یک روش استفاده از منحنی لیسازور i_d بر حسب i_q است و روش دیگر استفاده از طیف اندازه بردار پارک است.

در روش اول ابتدا منحنی لیسازور مؤلفه های بردار پارک را بر حسب همدیگر رسم می کنیم. باتوجه به رابطه (۷) چون در حالت ایده آل و سالم موتور دو مؤلفه بردار پارک سیگنالهای سینوسی هستند که اختلاف ۹۰ درجه نسبت به هم دارند، در نتیجه منحنی لیسازور آنها باید یک دایره کامل باشد. در حالیکه در حالت وجود عیب در موتور هارمونیکهایی به این مؤلفه ها

اضافه می‌شود، که دایره لیسازور آنها را مخدوش می‌کند. با همین استدلال می‌توان با مقایسه منحنی لیسازور مؤلفه‌های موتور با منحنی لیسازور موتور در حالت سالم به تشخیص عیب در آن پرداخت.

مشکلی که در این روش وجود دارد اینست که منحنی لیسازور مؤلفه‌های بردار پارک در حالت سالم بودن موتور همچنان دایره کامل نیست و تحت تأثیر عواملی چون نویز، عدم توازن ولتاژ فازها، هامونیک‌های تولید شده توسط مبدل‌های ولتاژ منبع تغذیه و عدم ایده‌آل بودن شرایط کاری موتور، منحنی لیسازور مخدوش می‌شود. در نتیجه این روش برای عیوبی که وقوع آنها تأثیر آشکار روی منحنی لیسازور دارد مانند عیب عدم توازن فازها کاربرد دارد. شکل ۷ تشخیص عیب عدم توازن فازها را از روی سیگنال جریان استاتور و روش منحنی لیسازور بردار پارک نشان داده است.



شکل ۷: منحنی لیسازور مؤلفه‌های بردار پارک جریان موتور القایی در دو حالت سالم و عدم توازن ولتاژ

اشکال دیگر این روش اینست که تشخیص عیب به صورت کیفی (از روی تغییرات منحنی) انجام می‌شود و تشخیص عیب در مراحل اولیه وقوع کار ساده‌ای نیست. مرجع [۱۰] عدم توانایی این روش را برای تشخیص عیب یاتاقانهای موتور القایی گزارش داده است و استفاده از روش دوم طیف جریان پارک را که در زیر توضیح داده می‌شود را مؤثرتر بیان کرده است. در روش دوم ابتدا اندازه بردار پارک محاسبه می‌شود و با توجه به این واقعیت که این اندازه برای موتور با وجود عیب یاتاقانها به صورت :

$$\begin{aligned} |i_d + ji_q|^2 &= \frac{2}{3}(i_f^2 + i_{dl}^2 + i_{dr}^2) + 3i_f i_{dl} \cos(2\pi[f_v - f_e]t - \alpha + \beta_l) \\ &\quad + 3i_f i_{dr} \cos(2\pi f_v t - \alpha + \beta_r) + 3i_{dl} i_{dr} \cos(4\pi f_v t + \beta_l + \beta_r) \end{aligned} \quad (8)$$

است، به تشخیص عیب پرداخته می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود فرکانس عیوب به صورت مستقیم در اندازه بردار پارک ظاهر می‌شود و همچنین هامونیک اصلی جریان در این اندازه وجود ندارد. موفقیت این روش برای تشخیص عیوب دیگر مانند شکستگی میله‌های روتور نیز گزارش شده است [۱۰].

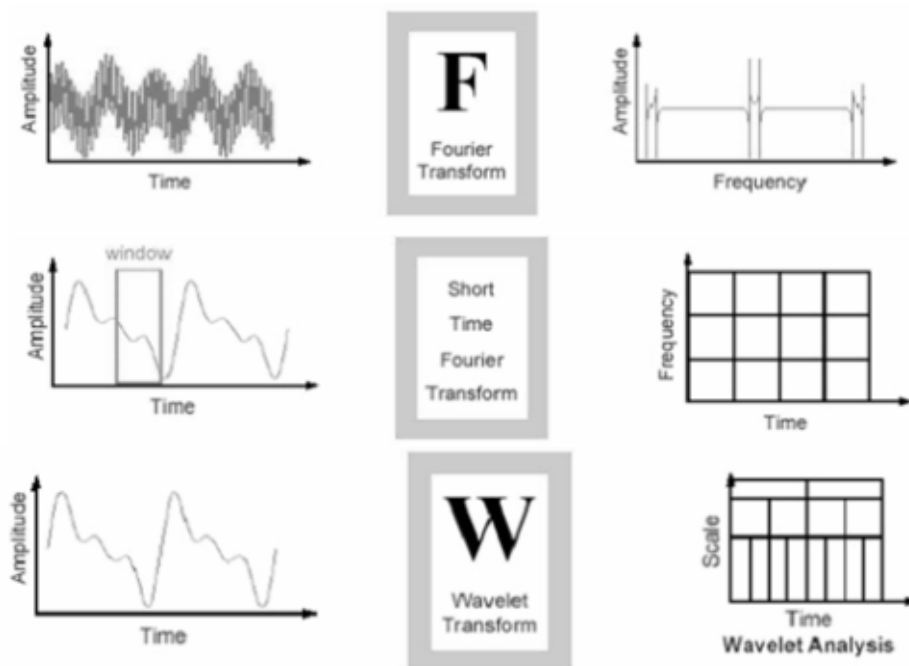
تبدیل موجک^۱: همانطور که قبلاً گفته شد تبدیل فوری یک روش بسیار مناسب برای کاربردهایست که سیگنال اندازه‌گیری شده ایستا است و برای آنالیز سیگنالهای دارای حالت گذرا از قبیل Drift، تغییر ناگهانی، و انحرافات فرکانسی مناسب نیست. برای غلبه بر این مسئله، در برخی مراجع پیشنهاد شده است که در هر لحظه یک قسمت از سیگنال اندازه‌گیری شده را در حوزه زمان برای آنالیز استفاده بشود. این تکنیک با عنوان تبدیل فوری زمان کوتاه^۲ STFT یا پنجره‌ای معروف

¹ Wavelet Transform
² Short-Time Fourier Transform

است. این تبدیل سیگنال را به یک تابع دو بعدی زمان فرکانس نگاشت می‌کند. تبدیل فوریه زمان کوتاه یک جور مقایسه‌ای بین دو نمای فرکانسی و زمانی یک سیگنال ارائه می‌کند و اطلاعاتی درباره هر کدام از آنها می‌دهد. البته فقط می‌توانیم اطلاعات را با دقت محدودی داشته باشیم، این محدودیت دقت را اندازه پنجره انتخابی تعیین می‌کند. اندازه ثابت پنجره در این روش اصلی‌ترین مشکل این روش است [۷].

تبدیل موجک WT با این ایده بوجود آمده است تا این مشکل را برطرف کند. در این روش پنجره‌ای با اندازه متغیر برای بهبود آنالیز سیگنال استفاده شده است. تبدیل موجک این امکان را در اختیار ما قرار می‌دهد تا بتوانیم جایگاه اطلاعات فرکانس پایین را احتیاج داریم از پنجره‌های عریض استفاده کنیم و جایگاه اطلاعات فرکانس بالا را نیاز داریم از پنجره‌های باریکتر استفاده کنیم. توانایی بهبود آنالیز محلی یکی از مشخصه‌های جالب تبدیل موجک است [۷].

مزیت استفاده از تبدیل موجک برای مانیتورینگ وضعیت و تشخیص عیب در موتورهای القایی به دلیل بهبود آنالیز سیگنال جریان در حالت گذرای سیستم بیشتر خود را نشان می‌دهد. شکل ۸ در یک نگاه سه روش FFT، STFT، و WT را باهم مقایسه کرده است.



شکل ۸: مقایسه روشهای FFT، STFT، و WT

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب بررسی شده در این مقاله مشاهده می‌شود که روشهای مختلفی چه از نظر سیگنال اندازه‌گیری شده و چه از نظر پردازش انجام شده، برای تشخیص عیب المان ساده‌ای مثل یاتاقان وجود دارد. این مسئله برای دستگاهها و ماشین‌آلات پیچیده سخت‌تر خواهد شد و احتیاج به مطالعه و بررسی بیشتری دارد. در کشور ما مسئله تعمیرات پیشگويانه بخوبی جا افتاده است، ولی بنظر می‌رسد تفهیم جایگاه روشهای تشخیص عیب علمی میان صنعتکاران و کاخانه‌دارها هنوز جای کار بیشتر دارد.

مراجع

- [۱] سیامک اسماعیل‌زاده، محمدرضا نسرین، و غلامحسین لیاقت، مانیتورینگ وضعیت ماشین‌آلات. انتشارات دانشگاه گیلان، ۱۳۸۰.
- [2] N. Tandon and A. Choudhury, "A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings," *Tribology Int.*, 32 pp.469–480, 1999
- [3] Bo Li, MoYuen Chow, Yodyium Tipsuwan and James C. Hung, "Neural-Network-Based Motor Rolling Bearing Fault Diagnosis," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, pp.1060-1069, Oct. 2000
- [4] R. R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran, and R. G. Bartheld, "Motor bearing damage detection using stator current monitoring," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 31, pp. 1274-1279, Nov./Dec. 1995.
- [۵] امیر اختری راد، آشکارسازی عیب بر اساس آنالیز ارتعاشات، سمینار کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش کنترل، دانشگاه علم و صنعت ایران، آذرماه ۱۳۸۲.
- [6] Levent Eren and Michael J. Devaney, "Bearing Damage Detection via Wavelet Packet Decomposition of the Stator Current," *IEEE Trans Instr. Measur.*, Vol. 53, pp 431-436, April 2004
- [7] 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. 2000.
- [8] Jason R. Stack, Thomas G. Habetler and Ronald G. Harley "Bearing Fault detection via Autoregressive Stator Current Modeling," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 40, May/June 2004
- [9] G.K. Singh and Sa'ad Ahmed Saleh Al Kazzaz, "Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research -a survey," *Electric Power Systems Research*, 64 pp.145_/158, 2003
- [۱۰] جعفر زارعی دودجی، "عیب‌یابی بلبرینگ‌های موتور القایی با استفاده از آنالیز جریان استاتور و مقایسه با آنالیز ارتعاشات، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش کنترل، دانشگاه علم و صنعت ایران، اسفند ۱۳۸۳.