آشکارسازی عیب گردش روغن در یاتاقان لغزشی موتور القایی سه‌فاز با استفاده از تبدیل هیلبرت - هانگ

رضا آخوندی[۱]، کارشناس ارشد؛ منصور اوجاقی[۲] ، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران –rakhondi@znu.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران – mojaghi@znu.ac.ir

چکیده: موتورهای القایی نقشی بی‌بدیل در راه‌اندازی چرخ صنعت و چرخه تولید ایفا می‌کنند. به‌همین‌دلیل، هم در زمینه بهبود فرآیند ساخت و تولید و هم در زمینه پایش وضعیت آن‌ها تحقیقات زیادی انجام می‌شود. این مقاله به یکی از عیوب رایج مربوط به این نوع موتورها، یعنی عیب گردش روغن در یاتاقان لغزشی می‌پردازد و سعی بر این دارد که برای آشکارسازی عیب مزبور راه‌کاری مفید و موثر ارائه دهد. براین‌اساس ابتدا موتور القایی که در یکی از یاتاقان‌های خود دچار عیب گردش روغن است، با تعریف تابع فاصله هوایی مناسب و با استفاده از تئوری تابع سیم‌پیچ اصلاح شده مدل سازی و شبیه سازی می‌گردد. سپس جریان استاتور در حالت‌های سالم و معیوب به‌منظور کشف روشی موثر و غیرتهاجمی برای تشخیص عیب اخذ و ذخیره می‌شود. سیگنال جریان استاتور با استفاده از ترکیبی از روش تجزیه مود تجربی و تبدیل هیلبرت پردازش شده و سپس شاخصی مناسب جهت آشکارسازی عیب گردش روغن ارائه می‌گردد. درنهایت کارایی شاخص پیشنهادی با اعمال آن برروی سیگنال جریان استاتور بدست‌آمده از چند موتور القایی واقعی، مورد ارزیابی قرار گرفته و در عمل به اثبات می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: پایش وضعیت، تئوری تابع سیم‌پیچ، تبدیل هیلبرت-هانگ، عیب گردش روغن، موتور القایی، یاتاقان لغزشی.

Sleeve Bearing Oil Whirl Fault Diagnosis In Three Phase Induction Motor using Hilbert - Huang Transform

Reza Akhondi, MSc[1]; Mansour Ojaghi, Associate Professor [2]

1- Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: mojaghi@znu.ac.ir
2- Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: rakhondi@znu.ac.ir

Abstract: Induction motors play an indispensable role in setting up the industry's wheel and production cycle. Therefore, much research is being done to improve their construction and production and to monitor their condition. This paper aims to study and investigate a common fault related to these motors, i.e. the oil whirl fault within their sleeve bearing, and try to provide a useful and effective solution in order to diagnose this fault. For this purpose, firstly, an induction motor that has one of its bearings with oil whirl fault, is modeled and simulated by appropriate definition of the air gap function and using the modified winding function approach. Then, the stator current is obtained under both the healthy and faulty conditions to detect an effective and non-invasive method for the fault diagnosis. The stator current signal is processed using a combination of the empirical mode decomposition and Hilbert transform, called Hilbert-Huang transform and a suitable index for detecting oil whirl fault is proposed. Then, the efficiency of the proposed index is evaluated by applying it to the stator current signal obtained from the practical induction motor and its efficiency is proved in practice.

Keywords: Condition monitoring, winding function approach, hilbert-huang transform, oil whirl fault, induction motor, sleeve bearing.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۳
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۱۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۱
نام نویسنده مسئول: منصور اوجاقی
نشانی نویسنده مسئول: ایران - زنجان - بلوار دانشگاه - دانشگاه زنجان - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق.

۱- مقدمه

ماشـــین‌آلات دوار ازقبیل کمپرســـورها، پمپ‌ها، پنکه‌ها، موتورها و ... ســـتون فقرات صـــنایع نفت و گاز و پتروشـــیمی، صـــنایع شـــیمیایی، کارخانجات صـــنعتی و صـــنعت حمل‌ونقل را تشـــکیل می‌دهند. به‌دلیل قابلیت اعتماد بالا، راندمان خوب و سادگی ساختمان، موتورهای القایی متداول‌ترین نوع محرک‌های اولیه برای ماشـــین‌آلات دوار به‌شـــمار می آیند. عوامل زیادی وجود دارند که می‌توانند باعث خرابی این موتورها شـــوند. خرابی یاتاقان و افزایش ارتعاش ناشـــی از آن یکی از این عوامل است که بسیار متداول است. اگرچه هزینه یک یاتاقان کسر کوچکی از کل قیمت موتور القایی ا ست، اما معیوب شدن آن می‌تواند موجب بروز خسارت سنگین و حتی ازکارافتادن موتور شود.

اغلب موتورهای القایی بزرگ که کمپرســـورهای پرســـرعت را به حرکت درمی‌آورند، مجهز به یاتاقان‌های لغز شی روانکاری شده با روغن هســـتند. بعضـــی اوقات ســـاختار یاتاقان لغزشـــی به‌دلیل یک «ناپایداری خود تحریک» که «گردش روغن [1]» نامیده می شود، مستعد ارتعاشات جانبی با دامنه بزرگ می‌شود. پدیده گردش روغن مستقل از نامتعادلی روتور یا ناهم‌ترازی آن بوده و یک ناپایداری خودتحریک اســـت که به‌وسیله نیروهای تولیدشده در لایه روغن روان‌کننده در اثر کنش‌های هیدرودینامیکی به‌وجود می‌آید [۱].

در اثر پدیده گردش روغن، محور روتور داخل لقی یاتاقان با فرکانسی کمتر از نصف سرعت زاویه‌ای روتور و در همان جهت چرخش روتور دچار ارتعاش چرخشی می شود. در صورت عدم‌کنترل این پدیده، دامنه ارتعاش چرخشـــی حاصـــله بدون کران افزایش یافته و به عیب اساسی یاتاقان و موتور منتهی می شود. در خلال پدیده گردش روغن، رفتار روتور متفاوت از رفتار آن در پدیده تشـــدید در ســـرعت بحرانی است. به این صورت که با نزدیک شدن روتور به سرعت بحرانی، دامنه ارتعاش آن افزایش می‌یابد و با عبور از ســـرعت بحرانی دامنه ارتعاش رو به کاهش می‌گذارد. اما با شـــروع پدیده گردش روغن، دامنه ارتعاش روتور با افزایش ســـرعت آن به‌طرز فزاینده‌ای افزایش می‌یابد و همچنان بالا می‌ماند [۱]. لذا تشـــخیص عیب گردش روغن در مراحل اولیه وقوع آن ضـــروری اســـت تا با کنترل آن از بروز خرابی اســـاســـی در موتور پیش‌گیری شـــود. اگرچه مفاهیم نظری مربوط به پدیده گردش روغن به‌طور مبســـوط در مراجع هیدرودینامیکی مطرح شـــده‌اســـت، اما کمتر مرجعی یافت می‌شـــود که به پایش وضـــعیت موتور جهت تشـــخیص و آشکارسازی این پدیده در مراحل اولیه بروز آن پرداخته باشد.

با تحلیل طیف فرکانسی سیگنال ارتعاش روتور در دو جهت افقی و عمودی که در کارهای قبلی وجود داشت، اوجاقی و یزداندوست موفق به مدل سازی عیب گردش روغن در یاتاقان لغز شی موتور القایی شدند [۲-۴] . به‌این‌ترتیب که ابتدا یک معادله دینامیکی برای توزیع فاصـــله هوایی در یک موتور القایی با عیب گردش روغن در یاتاقان به‌دســـت آوردند. سپس مدل سازی و شبیه سازی موتور معیوب را با استفاده از روش تابع ســـیم‌پیچ به انجام رســـاندند. ایشـــان همچنین هارمونیک‌های مرتبط با عیب گردش روغن را در ســـیگنال‌های جریان اســـتاتور و توان لحظه‌ای موتور القایی مشـــخص کردند. فرکانس این هارمونیک‌ها در جریان استاتور از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۲]:

$$f_{ow} = f_s \left| 1 + \frac{k \cdot k_{ow}(1-s)}{p} \right|; \quad k = \pm 1, \pm 2, \cdots \qquad (1)$$

که در آن f_s فرکانس اصـــلی منبع تغذیه اســـتاتور، s لغزش، p تعداد جفت قطب و k_{ow} نســـبت فرکانس عیب گردش روغن اســـت که مقداری بین ۰/۴۲ تا ۰/۴۸ دارد. درنهایت نیز بهترین هارمونیک‌ها را از نظر حســـاســـیت نســـبت به شـــدت عیب و عدم حســـاســـیت نســـبت به پارامترهای بهره‌برداری موتور نظیر سطح بار آن و میزان نامتعادلی ولتاژ منبع تغذیه، به‌عنوان بهترین شاخص عیب معرفی کردند[۲-۴]. یونگ و همکاران نیز با انجام آزمایش عملی بر روی یک موتور پمپ ســـوخت و نیز یک موتور ســـفارشـــی دارای یاتاقان لغزشـــی، از روش آنالیز امضـــای جریان موتور برای تشـــخیص پدیده گردش روغن در یاتاقان لغزشـــی استفاده کردند [۵].

کار مدل‌ســـازی و شـــبیه‌ســـازی در مراجع [۲-۴] با این فرض انجام شده که موتور القایی در هر دو یاتاقان لغز شی خود دچار عیب گردش روغن با شرایط یکسان شده‌است. این فرض اگرچه کار مدل سازی و شبیه‌سازی را ساده‌تر می‌کند اما وقوع آن در عمل بسیار بعید است. در عمل ابتدا یکی از یاتاقان‌های موتور معیوب می‌شـــود و ممکن یاتاقان دیگر تا مدت‌ها پس از این اتفاق به‌طور ســـالم کار کند. به‌علاوه بررســـی‌های انجام‌شـــده توســـط مولفین نشـــان می‌دهد که فرض معیوب‌بودن هر دو یاتاقان لغزشـــی باعث تقویت قابل‌توجه دامنه هارمونیک‌های ایجاد شده در جریان استاتور نسبت حالتی می شود که فقط یکی از یاتاقان‌ها دچار عیب اســـت. بنابراین اگر ســـیســـتم پایش وضعیت براساس مدل سازی با دو یاتاقان معیوب طراحی شود، شدت عیب با یک یاتاقان معیوب به میزان قابل‌توجهی کمتر از میزان واقعی آن تشخیص داده خواهد شد. ازطرف‌دیگر تحلیل فوریه به‌کاررفته برای تشخیص عیب در مراجع [۲-۵] برای سیگنال‌های ایستا مناسب است درحالیکه گردش روغن در عمل ماهیتی ناپایدار دارد. همچنین نوســـان بار و نوســـان دامنه و فرکانس ولتاژ تغذیه باعث غیرایســـتاشـــدن جریان موتور می‌شود.

در مرجع [۶] برای آشکارسازی خطاهای یاتاقان غلتشی در مراحل اولیه، یک روش ریخت‌شـــناســـی مبتنی‌بر تبدیل هیلبرت-هانگ ارائه شده‌است. همچنین به‌منظور تشخیص خطاهای یاتاقان‌های غلتشی در ماشین‌های القایی براساس روش آنالیز امضای جریان موتور[2]، در مرجع [۷] تبدیل هیلبرت-هانگ [3]مورداســـتفاده قرار گرفت. مزیت اصـــلی این تبدیل قابلیت استفاده از آن برای همه سیگنال‌ها شامل سیگنال‌های ایستا و غیرایستا است.

در این مقاله روشی برای مدل سازی و شبیه سازی موتور القایی با مشـــکل گردش روغن در یک یاتاقان لغزشـــی آن ارائه می‌شـــود. ســـپس ســـیگنال جریان اســـتاتور با اســـتفاده از تبدیل هیلبرت-هانگ پردازش

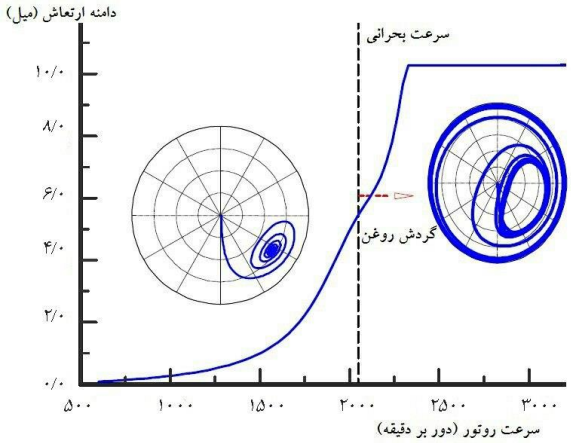
شده و شاخ صی منا سب برای آ شکار سازی عیب گردش روغن ارائه می‌گردد. درنهایت کارایی شـــاخص پیشـــنهادی با اعمال آن برروی سـیگنال جریان اسـتاتور بدسـت‌آمده از چند موتور القایی واقعی مورد ارزیابی قرار گرفته و در عمل به اثبات می‌ر سد. مطالعات مولفین ن شان می‌دهد که شـــاخص حاصـــل از تبدیل هیلبرت-هانگ برخلاف تبدیل فوریه در شرایط گذرای راه‌اندازی و نیز در شرایط نو سان بار موتور نیز کارآیی دارد، اگرچه به‌دلیل محدودیت صـــفحات مقاله امکان ارائه این نتایج در مقاله حاضر فراهم نیست.

۲- پدیده گردش روغن

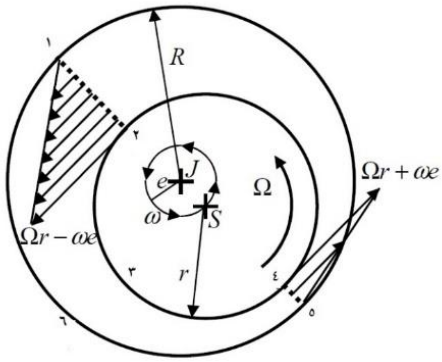
نیوکرک[۴] و تیلور[۵] در سـال ۱۹۲۵ میلادی براسـاس مشـاهدات تجربی خود نوع جد یدی از نا پا یداری دی نامیکی خودتحر یک مرتبط با یاتاقان‌های لغزشـــی هیدرودینامیکی را گزارش کردند. آن‌ها مشـــاهده کردند که در خلال این ناپایداری، مرکز ژورنال در داخل لقی یاتاقان با فرکانسی کمتر از نصف سرعت روتور می‌چرخد. آن‌ها همچنین متوجه شدند که این ارتعاش جانبی می‌تواند با خاموش‌کردن منبع پمپاژکننده روغن به داخل یاتاقان کنترل شـــود، لذا نتیجه گرفتند که این نوع ارتعاش جانبی با لایه روغن روان‌کننده و گردش آن مرتبط است. ایشان همچنین دریافتند که با اندکی ناهم‌ترازکردن یاتاقان‌ها، اســـتفاده از یاتاقان‌های میرا شونده با اصطکاک و یا پرهیز از قراردادن بارهای سبک برروی محور، می‌توان از این ارتعا شات زیر سنکرون جلوگیری نمود. از زمان کشـــف این پدیده توســـط نیوکرک، تحقیقات تئوری و تجربی بســـیاری انجام گرفت تا بروز این چرخش غیرســـنکرون را توجیه و پیش‌بینی کنند. اطلاعات بی شتری در مورد پدیده گردش روغن تو سط هگ[۶] فراهم شـــد. او اظهار داشـــت که در خلال حرکت پایدار یا حالت ماندگار روتور در یک یاتاقان، نیروی هیدرودینامیکی لایه روغن معادل بار خارجی اســـت اما در خلال حرکت گردشـــی محور روتور، نیروی هیدرودینامیکی بر بار خارجی غلبه می‌کند و به صورت یک منبع انرژی ع مل می‌ک ند که چرخش دایروی محور در ج هت چرخش روتور را شتاب می‌بخ شد. گردش روغن م ستقل از نامتعادلی روتور ا ست و نمی تواند توسط بالانس‌کردن روتور کنترل شود [۱].

شـکل۱ نمودار سـرعت موتور نسـبت به دامنه ارتعاش را برای یک موتور القایی که دچار ارتعاش گردش روغن اســـت، نشـــان می‌دهد. در خلال گردش روغن رفتار روتور برخلاف تشدید در سرعت بحرانی است. در خلال گردش روغن، دامنه ارتعاش با افزایش سرعت افزایش می‌یابد و هرگز میرا نشده و از بین نمی‌رود. اگرچه روتور حول مرکز یاتاقان می چر خد، چرخش روتور نا پا یدار اســـت و ارتعاش آن بی‌کران افزایش می‌یابد و اگر رفع نشود منجربه آسیب به موتور می‌شود [۱].

عیب گردش روغن هنگامی مشکل‌ساز می شود که دامنه ارتعاشات به ۴۰ الی ۵۰ درصـد لقی مجاز یاتاقان برسـد. در این صـورت اقدامات ا صلاحی باید صورت گیرد. اقدامات ا صلاحی موقتی شامل تغییر دما و ویســـکوزیته روغن، ایجاد یک نامتعادلی یا ناهم‌ترازی خفیف برروی محور به‌منظور افزایش بار ماشـین ازطریق گرم‌کردن یا سـردکردن پایه های نگهدارنده و نیز تغییر ف شار روغن ا ست. اقدامات ا صلاحی دائمی شامل ن صب یک پو سته جدید با لقی منا سب، بارگذاری اولیه یاتاقان به‌و سیله یک سد ف شار روغن داخلی و تعویض کامل یاتاقان به‌و سیله انواعی از یاتاقان است که کمتر مستعد عیب گردش روغن هستند [۹].



شکل ۱: داده‌های ارتعاش موتور دارای گردش روغن [۱]



شکل ۲: دینامیک روغن در یاتاقان لغزشی [۱]

۳- مقدار عددی فرکانس گردش روغن

سطح مقطع یک یاتاقان لغز شی در شکل ۲ ن شان داده شده‌ا ست. در این شکل مرکز یاتاقان به شعاع R با J و مرکز محور به شعاع r با S نشـان داده می‌شـود. اگر برای سـادگی، تغییرات فشـار در یاتاقان نادیده گرفته شود، پروفیل شتاب لایه روان‌کننده تقریبا خطی ا ست و از $v = 0$ برروی ســـطح داخلی یاتاقان تا $v \cong \Omega r$ برروی ســـطح خارجی محور تغییر می‌کند. بنابراین پیوســـتگی شـــار تراکم‌ناپذیر در حجم کنترلی ۱-۲-۳-۴-۵-۶-۱ ایجاب می‌کند که[۱]:

$$\frac{1}{2}\Omega r(C+e) - \frac{1}{2}\Omega r(C-e) = 2rv \qquad (۲)$$

که در آن v ســـرعت چرخش مرکز محور به دور مرکز یاتاقان اســـت. ســـرعت ثابت گردش، چرخش دایره‌ای با $v = \omega e$ را ایجاب می‌کند. بنابراین به پیروی از رابطه (۲) خواهیم‌داشت:

$$\Omega re = 2r\omega e \qquad (۳)$$

که نتیجه می‌دهد:

$$\omega = \frac{\Omega}{۲} \qquad (۴)$$

بنابراین هنگامی‌که از تغییر فشار چشم‌پوشی می‌شود، فرکانس گردش روغن معادل نصف سرعت کار ژورنال است. اما هنگامی‌که فشار تغییر می‌کند، سرعت گردش آن کمتراز نصف سرعت ژورنال خواهدبود [۱]. در عمل به‌دلیل تلفات نا شی از ا صطکاک، معمولا فرکانس گردش روغن بین ۰/۴۲ تا ۰/۴۸ برابر فرکانس چرخش روتور است [۸].

۴- مدل‌سازی موتور القایی با عیب گردش روغن

چون ماشین الکتریکی یک وسیله الکترومغناطیسی است، بهترین روش برای تحلیل آن ازطریق محاسبه توزیع میدان مغناطیسی در آن حاصل می شود. اما این امر م ستلزم حل معادله پوآ سون و یا لاپلاس ا ست که برای بهترین کامپیوترهای موجود و ساده‌ترین ساختار ماشین نیز کاری پیچیده و زمان‌بر ا ست [۱۰]. آ شکار سازی عیوب ما شین اغلب نیازمند تحلیل تغییرات ایجادشده در شکل موج جریان خط، شار، گشتاور و یا سرعت ا ست. بنابراین تحلیل ما شین‌ها با حل‌کننده‌های میدانی عددی برای شناسایی نشانه‌های خطا بی‌اندازه زمان‌بر خواهدبود [۱۰].

توصیف ماشین‌های الکتریکی به‌صورت مدارهای مغناطیسی تزویج‌شده، راه دیگری برای دست‌یابی به مشخصه‌های عمل‌کردی آن‌ها است. عناصر این مدارها معمولا مقاومت‌ها و اندوکتانس‌ها هستند. از بین این دو، محا سبه اندوکتانس‌ها م شکل‌تر ا ست زیرا اندوکتانس‌ها با چرخش روتور و نیز ا شباع مغناطی سی تغییر می‌کنند. روش تابع سیم پیچ [۷] و تابع سیم‌پیچ اصلاح‌شده[۸]، ابزاری موثر برای محاسبه این اندوکتانس‌ها فراهم می‌کند. در این روش‌ها محاسبه اندوکتانس‌ها با استفاده از اطلاعات فاصله هوایی و توزیع مکانی سیم‌پیچ‌های میسر می‌شود. چون ساختار هر سیم‌پیچ یک نیرو محرکه مغناطیسی در داخل ماشین و فاصله هوایی ایجاد می‌کند، محاسبه شار، شار پیوندی و درنتیجه اندوکتانس‌ها با استفاده از این روش آسان است. حتی اثر اشباع و اثر شیارها با تعریف مناسب فاصله هوایی قابل مدل‌سازی است. آثار سه‌بعدی ازقبیل تورب میله‌های روتور و ناهم‌محوری کج هم قابل اعمال در این روش هستند [۱۰].

با ا ستفاده از تئوری تابع سیم‌پیچ، اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچ اختیاری A و B بر روی موتور به‌صورت زیر قابل محاسبه است [۱۰]:

$$L_{BA}(\theta) = \mu_0 r l \int_0^{2\pi} n_B(\varphi,\theta) M_A(\varphi,\theta) g^{-1}(\varphi,\theta) d\varphi \qquad (۵)$$

که در آن l طول محوری ماشین، r شعاع داخلی استاتور، μ_0 تراوایی مغناطیسی فضای آزاد، θ موقعیت زاویه‌ای روتور نسبت به مرجع ا ستاتور، φ زاویه نقاط ن سبت به مرجع ا ستاتور، n_B تابع دور سیم‌پیچ B، M_A تابع سیم‌پیچ ا صلاح شده سیم‌پیچ A و g^{-1} عکس تابع فا صله هوایی (تابع معکوس فا صله هوایی) ا ست. با قراردادن $A = B$ در فرمول فوق می‌توان اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی (خودی) سیم پیچ A را محا سبه نمود. رابطه ۵ وقتی صادق ا ست که توزیع فاصله هوایی در طول محوری ماشین ثابت است. اما اگر طول فاصله هوایی در راستای محوری ماشین ثابت نباشد، اندوکتانس متقابل سیم‌پیچ‌های A و B از رابطه زیر باید محاسبه شود:

$$L_{BA}(\theta) = \mu_0 r \int_0^{2\pi}\int_{z_0}^{z_1} n_B(\varphi,\theta,z) M_A(\varphi,\theta,z) g^{-1}(\varphi,\theta,z) dz d\varphi \qquad (۶)$$

که در آن z_0 و z_1 به‌ترتیب مختصات ابتدا و انتهای هسته ماشین در محور طولی z هستند.

۵- تابع فاصله هوایی در شرایط عیب گردش روغن

قبل از ا ستفاده از روش تابع سیم‌پیچ برای شبیه‌سازی موتور القایی که در یاتاقان لغز شی خود دچار عیب گردش روغن ا ست، باید تابع فا صله هوایی در شرایط مزبور به‌طرز منا سبی تعریف شود. برای عیب گردش روغن متقارن محوری که م ستلزم بروز عیب با شرایط یکسان در هر دو یا تاقان موتور به‌طور هم‌زمان است، این تعریف در مراجع [۲-۴] با استفاده از داده‌های عملی انجام شده‌است. وقتی که فقط یکی از یاتاقان‌های موتور دچار عیب گردش روغن می‌شود، تابع فاصله هوایی در طول محور موتور غیریکنوا خت خوا هدشد. برای انط باق با این وضعیت می‌توان تابع فاصله هوایی معرفی‌شده در مراجع مذکور را به‌صورت زیر اصلاح کرد:

$$g(\varphi,\theta,z) = g_0 - R_c(\theta,z)\cos(\varphi - \theta_c(\theta,z)) \qquad (۷)$$

که در آن g_0 طول فاصله هوایی یک‌نواخت در موتور سالم است و :

$$R_c(\theta,z) = \sqrt{C_x(\theta,z)^2 + C_y(\theta,z)^2} \qquad (۸)$$

$$\theta_c(\theta,z) = \tan^{-1}[C_y(\theta,z)/C_x(\theta,z)] \qquad (۹)$$

در دو رابطه اخیر C_x و C_y نشان‌دهنده مختصات مرکز محور روتور نسبت به مرکز یاتاقان هستند که در شرایط عیب گردش روغن از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۲-۴] :

$$C_x(\theta,z) = SE_x + DE\cos(\theta) + OW_x(z)\cos(k_{ow}\theta + \frac{\pi}{6}) \qquad (۱۰)$$

$$C_y(\theta,z) = SE_y + DE\sin(\theta) + OW_y(z)\sin(k_{ow}\theta) \qquad (۱۱)$$

که در آن SE_x و SE_y در جات ناهم‌محوری استاتیکی ذاتی در را ستای محورهای x و y، DE درجه ناهم‌محوری دینامیکی ذاتی و $OW_x(z)$ و $OW_y(z)$ دامنه ارتعاش محور در راستای محورهای x و y در اثر گردش روغن ه ستند که در شرایط معیوب‌بودن فقط یکی از یاتاقان‌ها، در طول محور موتور متغیر بوده و با توجه به حالت صلب روتور از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

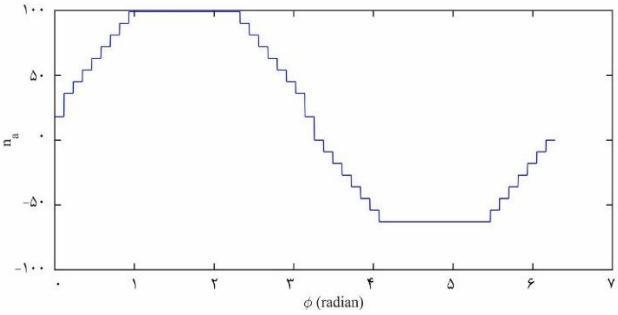
$$OW_x(z) = \frac{OW_x}{L} z \qquad (۱۲)$$

$$OW_y(z) = \frac{OW_y}{L} z \qquad (۱۳)$$

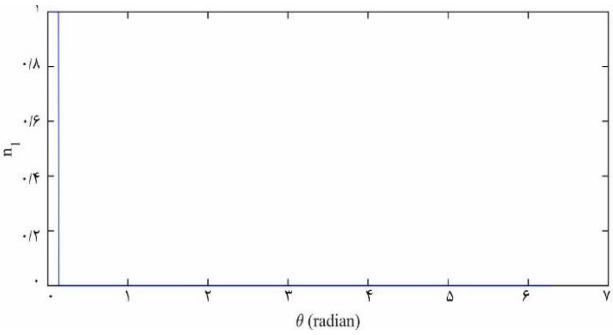
که در آن، OW_x و OW_y به‌ترتیب دامنه ارتعاش محور روتور در جهت محورهای x و y در محل یاتاقان معیوب و L فاصله دو یاتاقان موتور از یک‌دیگر است.

۶- شبیه‌سازی موتور القایی نمونه و بررسی نتایج

در این بخش یک موتور القایی سه‌فاز ۵۱۰ کیلووات، شش کیلوولت دو قطب که در مرکز انتقال نفت تبریز در حال بهره‌برداری است، در دو حالت سالم و معیوب شبیه سازی شده و نتایج حاصله بررسی و تحلیل می‌شوند. مشخصات فنی این موتور در جدول پیوست مقاله ارائه‌شده‌است. سیم‌پیچی هر فاز استاتور این موتور یک سیم‌پیچ دوطبقه با گام کلاف ۲۰ بوده و هر کلاف آن شامل ۹ دور سیم است. استاتور این موتور دارای ۵۴ شیار و روتور آن از نوع قفس سنجابی با ۴۶ میله و بدون تورب است. شکل های ۳ و ۴ به‌ترتیب تابع دور سیم‌پیچ فاز a استاتور و تابع دور مش اول روتور را نشان می‌دهند. تابع دور یک سیم‌پیچ در هر زاویه φ نشان‌دهنده تعداد حلقه‌های معادل از آن سیم‌پیچ است که این زاویه را لینک می‌کنند. به‌عبارت ساده‌تر تابع دور نشان‌دهنده تعداد حلقه‌هایی از سیم‌پیچ است که فقط یک ضلع طولی آن‌ها در فاصله بین صفر درجه تا φ قرار دارد. بنابراین تابع دور هر مش روتور فقط در فاصله بین میله‌های دو طرف مش معادل با یک و در سایر جاها معادل صفر است.



شکل ۳: تابع دور سیم‌پیچ فاز a استاتور



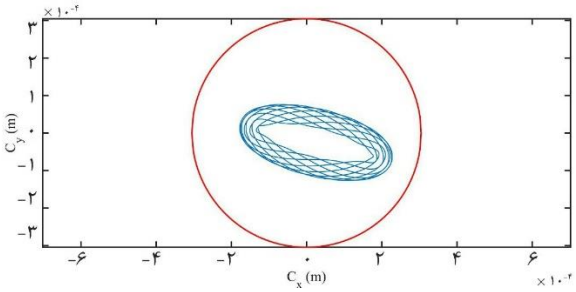
شکل ۴: تابع دور مش اول روتور

با اعمال پارامترهای عیب گردش روغن و ناهم‌محوری ذاتی به شرح زیر (هر میل معادل یک هزارم اینچ است):

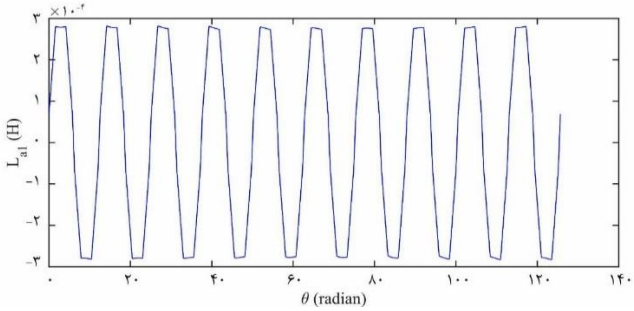
$SE_x = ۱\ mil$, $SE_y = -۱\ mil$, $DE = ۱\ mil$,

$OW_x = ۷\ mils$, $OW_y = ۳\ mils$, $k_{ow} = ۰/۴۵$

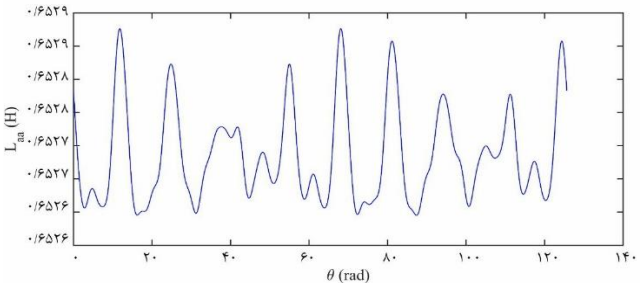
و اعمال بار معادل با ۹۰ درصد توان نامی موتور، شبیه‌سازی رفتار موتور معیوب در شرایط راه‌اندازی از حالت سکون تا رسیدن به حالت ماندگار انجام می‌شود. لازم به ذکر است که به‌ازای $k_{ow} = ۰/۴۵$، دوره تناوب توابع C_x، C_y ، R_c و θ_c معادل ۴۰π است.



شکل ۵: مسیر چرخش مرکز محور روتور به دور مرکز یاتاقان در طول یک دوره تناوب



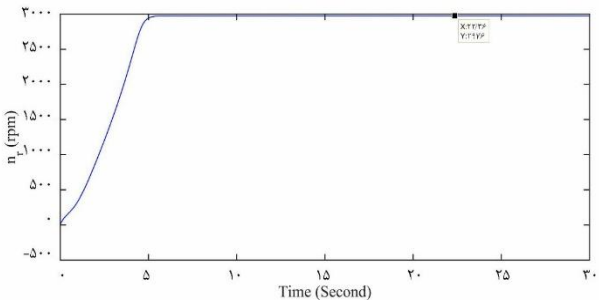
شکل ۶: اندوکتانس متقابل فاز a استاتور و مش شماره ۱ روتور



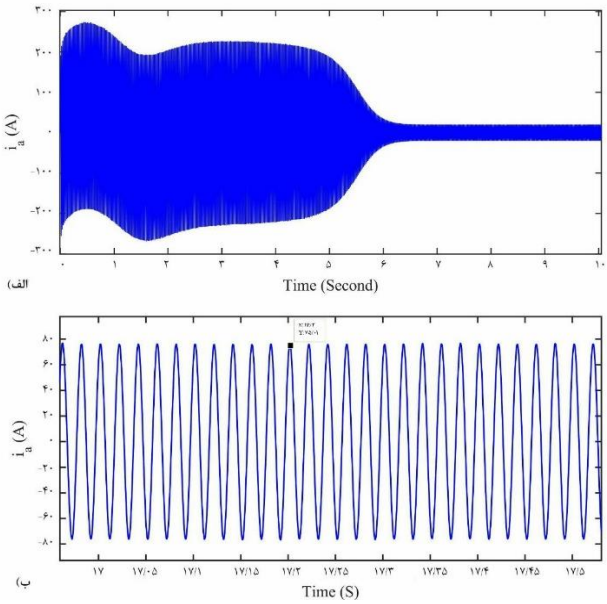
شکل ۷: اندوکتانس خودی فاز a استاتور

شکل ۵ مسیر چرخش مرکز محور روتور به دور مرکز یاتاقان (منحنی آبی‌رنگ) را داخل محدوده لقی مجاز (دایره قرمز) نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، در اثر عیب گردش روغن چرخش مرکز روتور به دور مرکز یاتاقان در یک دوره تناوب در مسیرهای بیضوی متفاوت انجام می‌شود. مادامی که مرکز روتور در داخل دایره لقی مجاز باقی بماند مشکلی پیش نمی‌آید، اما خارج شدن مرکز روتور از این دایره به معنی ساییده‌شدن سطح خارجی ژورنال (بخشی از انتهای محور روتور که در داخل یاتاقان می‌چرخد) به سطح داخلی یاتاقان است که باعث خرابی آن می‌شود. ویژگی دیگر عیب گردش روغن این است که مرکز روتور بعد از هر دور چرخش به مکان هندسی اولیه خود باز نمی‌گردد، بلکه بسته به دوره تناوب، چندین دور طول می‌کشد تا این اتفاق رخ دهد. تعداد این دورها به ضریب k_{ow} وابسته است و به‌ازای $k_{ow} = ۰/۴۵$ معادل بیست دور است. تغییرات

اندوکتانس متقابل فاز a اســـتاتور با مش ۱ روتور و تغییرات اندوکتانس خودی فاز a با تغییر موقعیت روتور به‌ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شـده‌اسـت. این اندوکتانس‌ها نیز به تبعیت از فاصـله هوایی دچار اعوجاج و نوســـان با دوره تناوب π ۴۰ رادیان هســـتند. از آن‌جایی‌که عمل‌کردهای حالت گذرا و حالت ماندگار موتور به اندوکتانس‌های آن وابسته است، انتظار می‌رود که این نوسانات اندوکتانس، عمل‌کرد موتور را در هر دو حالت مذکور تحت‌تاثیر قرار دهد. شکل ۸ سرعت روتور را طی راه‌اندازی از حالت ســکون تا حالت ماندگار نشــان می‌دهد. اگرچه موتور در حالت ماندگار به سـرعت مورد انتظار می‌رسـد اما مدت زمانی که طول می‌کشد به این سرعت بر سد، به طرز قابل‌ملاحظه‌ای بیش از حالت سالم است. شکل ۹ نیز شکل موج جریان فاز a استاتور را نشان می‌دهد. بررسـی‌ها نشـان می‌دهند که اسـتاتور درحالتی‌که موتور دچار عیب گردش روغن اســـت، هم در حالت گذرا و هم در حالت ماندگار جریان بیش‌تری از شبکه می‌کشد که به وضوح نشان‌گر تاثیر مخرب عیب گردش روغن برروی مشخصه‌های عمل‌کردی موتور است.



شکل ۸: سرعت روتور طی راه‌اندازی از حالت سکون تا حالت ماندگار در ۹۰ درصد بار نامی و در حالت معیوب



شکل ۹: شکل موج جریان فاز a استاتور در ۹۰ درصد بار نامی و در حالت معیوب : الف)حالت گذرا و ماندگار، ب)حالت ماندگار

۷- فرکانس لحظه‌ای

فرکانس لحظه‌ای یکی از پیچیده‌ترین مفاهیم پردازش ســیگنال اســت. دو مشکل اساسی بر سر راه ارائه مفهوم فرکانس لحظه‌ای وجود دارد. اولین مشکل این است که روش آنالیز طیفی فوریه به شدت جا افتاده است. در این آنالیز، فرکانس برای توابع سینوسی تعریف می شود که کل گستره داده‌ها را با دامنه ثابت در بر می‌گیرند. لذا تصور بر این است که فرکانس لحظه‌ای هم باید با یک تابع سینوسی مرتبط باشد که در آن حداقل به یک نوسـان کامل از شـکل موج سـینوسـی نیاز اسـت تا مقـدار فرکـانس محلی تعیین شـــود. امـا یـک چنین تعریفی برای سـیگنال‌های غیرایسـتا[۹] که فرکانس‌شـان از لحظه‌ای به لحظه‌ای دیگر تغییر می‌کند، منطقی نیسـت. مشـکل دوم ناشـی از این اسـت که در تعریف فرکانس لحظه‌ای روش یکتا و منحصربه‌فردی وجود ندارد. با این وجود، این مشـکل دیگر حاد و جدی نیسـت زیرا با اسـتفاده از تبدیل هیلبرت می‌توان داده‌ها را به شکل تحلیلی درآورد [۱۱].

برای یک ســری زمانی اختیاری مانند $X(t)$، همیشـــه می‌توان تبدیل هیلبرت آن را به‌صورت زیر نوشت:

$$Y(t)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{X(\tau)}{t-\tau}d\tau \qquad (۱۴)$$

با این تعریف، $X(t)$ و $Y(t)$ یک جفت مختلط مزدوج خواهندبود. بنابراین می‌توان ســیگنال تحلیلی $Z(t)$ را به‌صـــورت زیر فراهم آورد [۱۱]:

$$Z(t)=X(t)+jY(t)=a(t)e^{j\theta(t)} \qquad (۱۵)$$

$$a(t)=\sqrt{X^2(t)+Y^2(t)} \qquad (۱۶)$$

$$\theta(t)=\tan^{-1}\left(\frac{Y(t)}{X(t)}\right) \qquad (۱۷)$$

به لحاظ تئوری روش‌های زیادی برای تعریف قســـمت موهومی رابطه (۱۵) وجود دارد اما تبدیل هیلبرت روش یکتایی برای این تعریف فراهم می‌آورد به‌گونه‌ای‌که نتیجه حاصله یک سیگنال تحلیلی است. با استفاده از $\theta(t)$ فرکانس لحظه‌ای به صورت زیر قابل تعریف است، هر چند که هنوز بر سر این تعریف مناقشه وجود دارد [۱۱]:

$$\omega=\frac{d\theta}{dt} \qquad (۱۸)$$

این تعریف کوهن[۱۰] (۱۹۹۵) را بر آن داشت که لفظ «تابع تک‌مولفه‌ای» را معرفی کند. در اصـل چون فرکانس لحظه‌ای، یک تابع تک‌مقداری از زمان اســـت، یعنی در هر لحظه از زمان فقط یک مقدار برای فرکانس وجود دارد، یک ســـری محدودیت‌ها برروی داده‌ها ضـــروری اســـت. متاســـفانه هیچ تعریف واضـــحی از ســـیگنال «تک‌مولفه‌ای[۱۱]» ارائه نشده‌است تا بتوان براساس آن قضاوت کرد که آیا یک تابع تک‌مولفه‌ای هست یا خیر. به‌همین‌دلیل به‌جای مفهوم «تک‌مولفه‌ای»، مفهوم « باند باریک[۱۲]» به‌عنوان یک محدودیت برروی داده‌ها اعمال می‌شـــود تا فرکانس لحظه‌ای بامعنی باشد[۱۱].

۸- طیف هیلبرت

بعدازاینکه مولفه‌های توابع مود ذاتی (IMF-آی‌ام‌اف) به‌دست آمدند، دیگر مشکلی در اعمال تبدیل هیلبرت به هر کدام از مولفه‌ها و محاسبه فرکانس لحظه‌ای با استفاده از فرمول مربوطه وجود نخواهدداشت. بعد از انجام تبدیل هیلبرت برروی هر کدام از آی‌ام‌اف‌ها، می‌توان سیگنال را به‌صورت زیر بیان نمود [۱۱]:

$$X(t)=\sum_{i=1}^{n} a_i(t)e^{j\int \omega_i(t)dt} \qquad (۱۹)$$

که در آن باقی‌مانده r_n به عمد حذف شده‌است، زیرا این باقی‌مانده یا یک مقدار ثابت و یا یک تابع یک‌نواخت است. سیگنال $X(t)$ اگر به فرم فوریه نمایش داده شود، به‌صورت زیر خواهدبود:

$$X(t)=\sum_{i=1}^{\infty} a_i e^{j\omega_i t} \qquad (۲۰)$$

که در آن a_i و ω_i هر دو ثابت هستند. تفاوت بین دو رابطه (۱۹) و (۲۰) واضح و آشکار است: آی‌ام‌اف یک بسط فوریه عمومیت‌یافته را ارائه می‌کند که در آن دامنه و فرکانس لحظه‌ای متغیر نه تنها به مقدار زیادی راندمان بسط را بهبود می‌بخشد بلکه آن را قادر می سازد که با داده‌های غیر ایستا هم سازگار شود.

رابطه (۱۹) این امکان را فراهم می‌آورد که دامنه و فرکانس لحظه‌ای به‌صورت تابعی از زمان در یک رسم سه‌بعدی نشان داده‌شود. این نمایش زمان-فرکانس-دامنه، طیف دامنه هیلبرت یا به‌طور خلاصه طیف هیلبرت[۱۳] نامیده می‌شود و با $H(\omega,t)$ نشان داده می‌شود [۱۱].

بعد از تعریف تبدیل هیلبرت، طیف حاشیه‌ای[۱۴] هیلبرت (MS-ام اس) هم به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$h(\omega)=\int_0^T H(\omega,t)dt \qquad (۲۱)$$

که در آن، T کل گستره زمانی سیگنال $X(t)$ است. طیف حاشیه‌ای میزان سهم کلی دامنه در هر فرکانس را عرضه می‌نماید [۱۱].

۹- آشکارسازی عیب گردش روغن با تبدیل هیلبرت-هانگ

با جای‌گزینی $p=۱$ در رابطه (۱)، فرکانس‌های مربوط به خطای گردش روغن که در سیگنال جریان استاتور یک موتور دو قطب ظاهر می‌شوند، از فرمول زیر قابل محاسبه هستند:

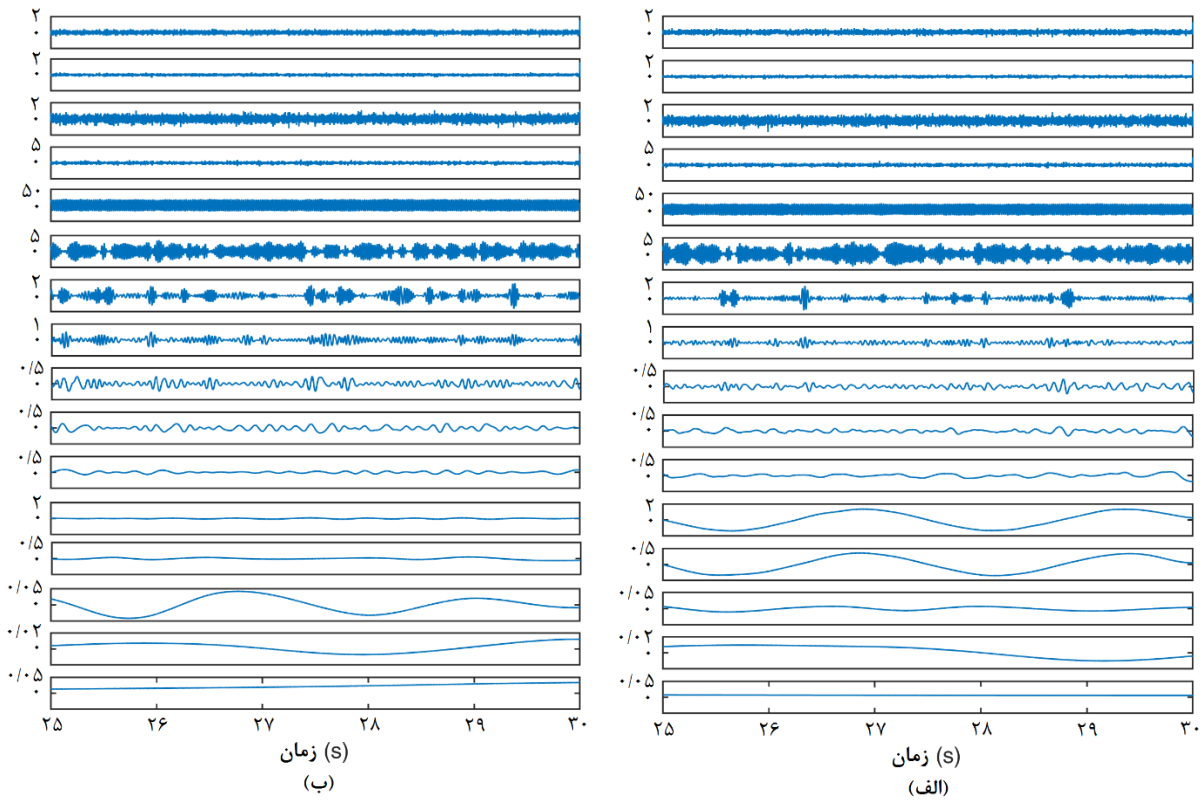
$$f_{ow}=f_s\left|۱+k\cdot k_{ow}(۱-s)\right|;\quad k=\pm۱,\pm۲,\cdots \qquad (۲۲)$$

از بین همه مقادیر ممکن برای ثابت k تعداد پنج مقدار مثبت (۱ تا ۵) و پنج مقدار منفی (۱- تا ۵-) در نظر گرفته می‌شود. متناظر با هر کدام از این مقادیر، یک فرکانس شاخص عیب در جریان استاتور وجود دارد. هدف از این بخش تعیین مناسب‌ترین فرکانس به‌عنوان شاخص برای آشکارسازی عیب گردش روغن با استفاده از تبدیل هیلبرت- هانگ است.

اغلب در مراجع قبلی برای تشخیص یک عیب مشخص با استفاده از تبدیل هیلبرت (مثلا تشخیص عیب بلبرینگ با استفاده از سیگنال ارتعاش)، بدین‌صورت عمل می‌شود که سیگنال موردنظر پس از اندازه‌گیری، به روش تجزیه مود تجربی به آی‌ام‌اف‌های سازنده‌اش تجزیه می‌شود. سپس مقدار طیف حاشیه‌ای هیلبرت به‌ازای فرکانس مشخصه عیب در هر کدام از آی‌ام‌اف‌ها تعیین می‌شود و آی‌ام‌اف حاوی بیش‌ترین مقدار طیف حاشیه‌ای هیلبرت تعیین می‌شود. در مرحله اجرا، مقدار طیف حاشیه‌ای به‌ازای آن فرکانس در آی‌ام‌اف تعیین‌شده با مقدار متناظر خود در حالت سالم مقایسه می‌شود و هرگونه افزایش نسبت به حالت سالم به معنی وقوع عیب تلقی می‌گردد [۱۲]. اشکال این روش این است که ممکن است تعداد آی‌ام‌اف‌های سیگنال جریان در حالت‌های سالم و معیوب یکسان نباشد و یا شماره آی‌ام‌اف حاوی فرکانس موردنظر در حالت‌های سالم و معیوب متفاوت باشد. بنابراین در این مقاله اولا برای افزایش دقت، رزولوشن طیف فرکانس بالا برده می‌شود (معادل ۰/۱ هرتز) و ثانیا برای رفع مشکل فوق، اجازه داده می‌شود شماره آی‌ام‌اف‌ها در دو حالت سالم و معیوب متفاوت باشد. برای نیل به این هدف، در هر حالت سالم یا معیوب ابتدا آن آی‌ام‌اف که فرکانس مشخصه عیب مدت زمان بیش‌تری در آن حضور دارد، تعیین می‌شود. برای اینکه معلوم شود که فرکانس خطای موردنظر در کدام آی‌ام‌اف بیش‌تر وجود دارد، ازروی طیف هیلبرت مقدار طیف حاشیه‌ای یا اماس به‌ازای آن فرکانس برای تمامی آی‌ام‌اف‌ها تعیین می‌شود. هر کدام که بزرگ‌تر بود، آی‌ام‌اف مربوط به‌آن انتخاب می‌شود، زیرا اماس بزرگ‌تر به این معنی است که فرکانس موردنظر در لحظات بیش‌تری در آن آی‌ام‌اف وجود داشته‌است. شاخص تشخیص خطا هم مقدار همین اماس در نظر گرفته می‌شود.

بنابراین در گام اول سیگنال جریان استاتور (جریان فاز a) به مدت ۱۰ ثانیه نمونه‌برداری شده و با استفاده از الگوریتم CEEMDAN [۱۳]، به آی‌ام‌اف های سازنده‌اش تجزیه می‌شود. در گام دوم طیف هیلبرت هر کدام از آی‌ام‌اف ها محاسبه می‌شود. در گام سوم در تمامی طیف‌های هیلبرت رسم شده، مقدار اماس به‌ازای فرکانس موردنظر (یا به‌ازای مقدار k موردنظر) به‌دست می‌آید. در گام چهارم مقادیر اماس به‌دست آمده با هم مقایسه شده، هر کدام که بزرگ‌تر بود، شماره آی‌ام اف متناظر با آن به‌عنوان شماره آی‌ام‌اف مطلوب که بیش از سایر آی‌ام اف‌ها حاوی فرکانس موردنظر است، ثبت می‌گردد. همچنین مقدار ام اس متناظر هم به‌عنوان مقدار شاخص خطای گردش روغن در جدولی جداگانه ثبت می‌شود.

گام‌های فوق هم در حالت سالم با ناهم‌محوری ذاتی و هم در شرایط معیوب تکرار می‌شوند. در شرایط معیوب دو حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد. یک بار OW_y در مقدار سه میل ثابت مانده، OW_x از پنج میل تا نه میل افزایش داده می‌شود. بار دیگر OW_x در مقدار هفت میل ثابت مانده، OW_y از یک میل تا پنج میل افزایش داده می‌شود. شکل ۱۰ آی‌ام‌اف‌های حاصل از تجزیه سیگنال جریان استاتور را در حالت سالم با ناهم‌محوری مرکب ذاتی و نیز در یک حالت معیوب نشان



شکل۱۰: از بالا به پایین آی‌ام‌اف‌های اول تا پانزدهم و باقیمانده حاصله از تجزیه سیگنال جریان استاتور: الف) در حالت سالم با ناهم‌محوری ذاتی و ب) در یک از حالت معیوب به‌ازای:

$SE_x = ۱mil$, $SE_y = -۱mil$, $DE = ۱mil$, $OW_x = ۷mils$, $OW_y = ۳mils$, $k_{ow} = ۰/۴۵$

می‌دهد. تفاوت در رفتار بعضی آی‌ام‌اف‌ها در حالت‌های سالم و معیوب به‌صورت چشمی قابل مشاهده است.

جدول‌های ۱ و ۲ شماره آی‌ام‌اف‌های مطلوب را به‌ازای مقادیر مختلف k و در شدت‌های مختلف عیب نشان می‌دهند. جدول‌های ۳ و ۴ نیز مقادیر اماس به‌دست‌آمده از روی طیف هیلبرت را با استفاده از شماره‌های آی‌ام‌اف‌های مطلوب در شدت‌های مختلف عیب و به‌ازای مقادیر مختلف k نشان می‌دهند. همان‌طورکه از جدول‌های۳ و ۴ برمی آید، در ستون‌های مربوط به ضریب $k = -۳$ که در مورد این موتور و در این حالت بهره‌برداری خاص معادل $f_{ow} = ۱۴/۸۶$ Hz است، اماس‌های ثبت‌شده، اولا در تمامی حالات معیوب از حالت سالم بزرگ‌تر هستند و در ثانی با افزایش شدت عیب (افزایش OW_x و OW_y) روند افزایشی دارند.

یک شاخص خوب برای آشکار سازی عیب باید اولا با شدت عیب نسبت مستقیم داشته‌باشد، یعنی با افزایش شدت عیب افزایش یابد. ثانیا نسبت به شرایط بهره‌برداری موتور حساس نباشد، یعنی با تغییر این شرایط، تغییر قابل‌توجهی نکند. بنابراین مولفه فرکانسی متناظر با $k = -۳$ حاوی ویژگی اول است. اما برای بررسی ویژگی دوم مطالعات و شبیه‌سازی‌های بیش‌تری لازم است. جدول۵ شماره آی‌ام‌اف‌های مطلوب را در سطوح مختلف بار و به‌ازای مقادیر مختلف k در نامتعادلی ولتاژ صفر و پارامترهای عیب مشخص نشان می‌دهد. جدول ۶ نیز مقادیر اماس به‌دست‌آمده ازروی طیف هیلبرت را با استفاده از این آی ام‌اف‌های مطلوب نشان می‌دهد. مقدار RSD در این جداول همان انحراف معیار نسبی است که حاصل تقسیم انحراف معیار داده‌ها بر میانگین آن‌ها در هر ستون است. همان‌طورکه از این جدول برمی‌آید، مقدار RSD به‌ازای ضریب $k = -۳$ در مقایسه با ضرایب دیگر حداقل بوده و در حد قابل‌قبولی قرار دارد. جدول۷ شماره آی‌ام‌اف‌های مطلوب را به‌ازای مقادیر مختلف نامتعادلی ولتاژ تغذیه در kهای مختلف و در ۹۰ درصد بار نامی با همان پارامترهای عیب نشان می‌دهد. جدول۸ نیز مقادیر اماس به‌دست‌آمده ازروی طیف هیلبرت این آی‌ام‌اف‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طورکه ملاحظه می‌شود در این جدول هم RSD به‌ازای ضریب $k = -۳$ کم‌ترین مقدار را دارد. بنابراین مولفه فرکانسی متناظر با $k = -۳$ کم‌ترین حساسیت را نسبت به تغییر سطح بار و تغییر درجه نامتعادلی ولتاژهای شبکه سه‌فاز دارد. لذا باتوجه‌به حساسیت مناسب آن در مقابل شدت عیب، این مولفه فرکانسی مناسب‌ترین شاخص برای آشکارسازی عیب گردش روغن با استفاده از تبدیل هیلبرت-هانگ است.

۱۰- اعتبارسنجی تجربی نتایج

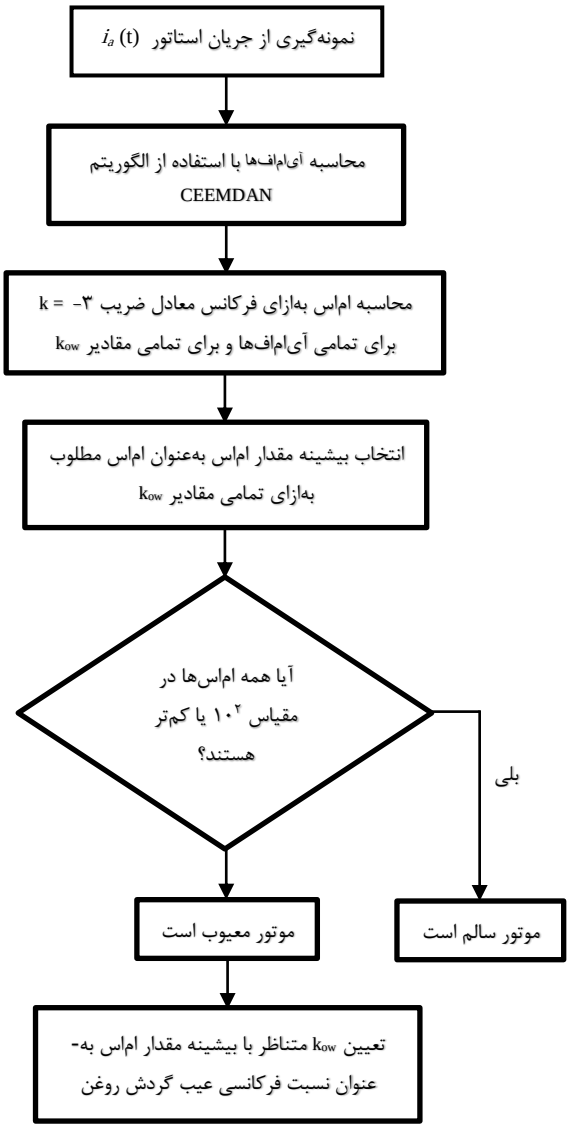
برای تحقیق در مورد کارایی شاخص اماس معرفی‌شده در عمل، از جریان‌های الکتروموتورهای M13، M14 و M15 موجود در مرکز انتقال

نفت تبریز در حالت بهره‌برداری عادی نمونه‌برداری شـــد و شـــاخص مذکور به آن‌ها اعمال گردید. نکته‌ای که باید در این‌جا به آن توجه شـود این اسـت که مقدار پارامتر k_{ow} در عمل مشـخص نیسـت. فقط براسـاس مراجع قبلی مشـخص اسـت که این پارامتر در بازه ۰/۴۲ تا ۰/۴۸ قرار دارد. جدول‌های ۹ ، ۱۱ و ۱۳ نتایج حاصل از اعمال شاخص اماس به جریان‌های نمونه‌گیری‌شده سه الکتروموتور را به‌ازای $k = -۳$ و مقادیر مختلف k_{ow} نشان می‌دهند (k_{ow} در پله‌های ۰/۰۱ افزایش داده شده‌است). در هر کدام از سطرهای این جدول‌ها بیشینه مقدار به‌عنوان اماس مطلوب در نظر گرفته می شود. این مقادیر بیشینه به‌ازای مقادیر مختلف k_{ow} به‌ترتیب در جدول‌های ۱۰ ، ۱۲ و ۱۴ ارائه شده‌اند.

مقادیر اماس در جدول ۱۰ به‌ازای همه مقادیر k_{ow} در حد مقدار اماس در حالت سالم، یعنی در محدوده مضارب $۱۰^{۲}$، هستند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که یاتاقان‌های لغزشی الکتروموتور M13 سالم است. این نتیجه با نتایج ارائه‌شـده در مرجع [۴] هم‌خوانی دارد. اما مقادیر اماس برای الکتروموتور M14 در جدول ۱۲ به‌ازای کلیه مقادیر k_{ow} در حد مقدار اماس در حالت معیوب، یعنی در محدوده مضارب $۱۰^{۵}$، هستند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که حداقل یکی از یاتاقان‌های الکتروموتور M14 دچار عیب گردش روغن اسـت که باز هم با نتایج مرجع [۴] هم خوانی دارد. به‌علاوه، چون بیشـینه مقدار شـاخص اماس به‌ازای ۰/۴۲ = k_{ow} رخ داده‌اسـت، می‌توان نتیجه‌گرفت که نسـبت فرکانسـی عیب گردش روغن در این الکتروموتور معادل ۰/۴۲ است. از جدول ۱۴ نتایج مشابهی برای الکتروموتور M15 گرفته می شود با این تفاوت که در این جدول بیشینه مقدار شاخص اماس به‌ازای k_{ow}= ۰/۴۳ رخ داده‌است، لذا نسبت فرکانسی عیب گردش روغن در الکتروموتور M15 معادل ۰/۴۳ تخمین زده می‌شـود. فرآیند پردازش سـیگنال جریان الکتروموتورها و تعیین وضـعیت سـالم یا معیوب‌بودن آن‌ها و نیز تخمین مقدار k_{ow} در فلوچارت شکل ۱۱ نشان داده شده‌است.

۱۱- نتیجه

عیب گردش روغن مهم‌ترین عیب تشدیدشونده در یاتاقان‌های لغزشی موتورهای القایی است که اگر در مراحل اولیه آشکارسازی و رفع نشود، می‌تواند خرابی‌های اساسی و خسارات هنگفتی را به صنایع بکارگیرنده این نوع ماشـین‌آلات تحمیل نماید. این عیب را می‌توان با اسـتفاده از پردازش سیگنال جریان استاتور به‌وسیله تبدیل هیلبرت-هانگ آشکار نمود. از میان انبوهی از هارمونیک‌های مربوط به عیب گردش روغن که در سیگنال جریان استاتور مستتر هستند، فرکانسی که معادل ضریب $k = -۳$ است، مناسب‌ترین هارمونیک برای مقاصد عیب‌یابی است. زیرا اولا دامنه آن نسبت به شدت عیب حساس است و با افزایش شدت عیب افزایش می‌یابد، ثانیا نسـبت به پارامترهای بهره برداری ماشـین ازقبیل سطح بار ماشین و نامتعادلی ولتاژ تغذیه حساسیت کمتری دارد. کارایی این روش در عمل هم به اثبات می‌رسد.



شکل۱۱: فرآیند پردازش سیگنال جریان الکتروموتورها و تعیین وضعیت سالم یا معیوب آن‌ها و تخمین مقدار k_{ow}

جدول ۱: شماره آی‌ام‌اف‌های مطلوب در شدت‌های مختلف عیب و به‌ازای kهای مختلف در ۹۰ درصد بار نامی و نامتعادلی ولتاژ صفر درصد و همچنین پارامترهای خطای زیر:

$SE_x = ۱\ mil$, $SE_y = -۱\ mil$, $DE = ۱\ mil$, $OW_y = ۳\ mils$, $k_{ow} = ۰/۴۵$

ضریب k	۱	۲	۳	۴	۵	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵
حالت سالم	۶	۶	۴	۴	۴	۷	۱۰	۸	۶	۶
OWx=۵	۶	۶	۶	۴	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
OWx=۶	۶	۶	۴	۶	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
OWx=۷	۶	۴	۴	۳	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
OWx=۸	۶	۶	۶	۶	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
OWx=۹	۶	۶	۴	۴	۴	۸	۱۱	۹	۶	۶

جدول۲: شماره آی‌ام‌اف‌های مطلوب در شدت‌های مختلف عیب و به‌ازای *k*های مختلف در ۹۰ درصد بار نامی و نامتعادلی ولتاژ صفر درصد و همچنین پارامترهای خطای زیر:

$SE_x =$ ۱ mil , $SE_y =$ −۱ mil , $DE =$ ۱ mil , $OW_x =$ ۷ mils , $k_{ow} =$ ۰/۴۵

ضریب k	۱	۲	۳	۴	۵	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵
حالت سالم	۶	۶	۴	۴	۴	۷	۱۰	۸	۶	۶
OWy=۱	۶	۶	۶	۴	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
Owy=۲	۶	۶	۶	۴	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
OWy=۳	۶	۴	۴	۳	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
OWy=۴	۶	۶	۴	۴	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
OWy=۵	۶	۶	۴	۴	۳	۸	۱۱	۹	۶	۶

جدول ۳: مقادیر اماس به‌دست‌آمده ازروی طیف هیلبرت با استفاده از شماره‌های آی‌ام‌اف‌های مطلوب در شدت‌های مختلف عیب و به‌ازای *k*های مختلف در ۹۰ درصد بار نامی و نامتعادلی ولتاژ صفر درصد و همچنین پارامترهای خطای زیر:

$SE_x =$ ۱ mil , $SE_y =$ −۱ mil , $DE =$ ۱ mil , $OW_y =$ ۳ mils , $k_{ow} =$ ۰/۴۵

ضریب k	۱	۲	۳	۴	۵	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵
حالت سالم	۴۶۱	۱۴۸	۶۴	۷۷	۱۱۰	۱۶۱۱	۲۹۱۷	۷۵۴	۵۰۷۶	۶۲۸۶
OWx=۵	۶۰۶۳۴	۱۸۲۰۹	۱۰۱۷۱	۱۵۰۳۳	۹۵۱۵	۲۳۲۳۴۹	۱۸۱۴۰۰	۱۳۰۳۳۱	۵۶۶۷۳۱	۴۰۶۹۹۵
Owx=۶	۱۰۷۹۶۸	۲۳۱۸۹	۱۴۷۸۸	۶۳۰۹	۹۸۵۰	۱۸۱۰۹۱	۲۴۵۱۴۷	۱۴۰۲۹۹	۷۴۸۹۰۷	۴۸۹۹۵۴
OWx=۷	۶۹۷۶۲	۲۳۷۹	۳۶۸۸	۳۸۸۱	۲۰۲۵۱	۲۲۶۱۵۶	۱۹۶۴۵۶	۱۵۲۸۰۵	۷۰۸۳۳۵	۴۱۱۴۷۴
OWx=۸	۸۶۱۱۴	۱۰۳۵۲	۱۲۳۲۶	۴۲۶۴	۱۴۹۹۴	۲۳۷۵۱۱	۲۹۳۶۹۲	۱۵۳۶۲۷	۴۷۶۶۳۱	۶۶۱۵۹۰
OWx=۹	۱۴۰۶۴۰	۹۵۰۸	۸۷۷۴	۲۴۷۹۴	۲۳۰۹	۲۰۲۵۸۸	۲۸۵۴۲۵	۱۶۹۴۳۹	۴۹۳۷۵۳	۴۷۸۳۵۵

جدول ۴: مقادیر اماس به‌دست‌آمده ازروی طیف هیلبرت با استفاده از شماره‌های آی‌ام‌اف‌های مطلوب در شدت‌های مختلف عیب و به‌ازای *k*های مختلف در ۹۰ درصد بار نامی و نامتعادلی ولتاژ صفر درصد و همچنین پارامترهای خطای زیر:

$SE_x =$ ۱ mil , $SE_y =$ −۱ mil , $DE =$ ۱ mil , $OW_x =$ ۷ mils , $k_{ow} =$ ۰/۴۵

ضریب k	۱	۲	۳	۴	۵	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵
حالت سالم	۴۶۱	۱۴۸	۶۴	۷۷	۱۱۰	۱۶۱۱	۲۹۱۷	۷۵۴	۵۰۷۶	۶۲۸۶
OWy=۱	۱۳۳۲۸۹	۳۶۰۸۹	۲۶۷۳۵	۱۲۱۲۹	۴۵۹۱	۲۴۸۶۷۶	۳۲۵۶۰۴	۱۱۳۹۴۱	۵۰۹۷۰۰	۶۲۴۶۸۰
OWy=۲	۱۲۲۱۸۵	۱۰۶۵۲	۱۳۹۸۲	۸۶۰۰	۲۰۸۹۰	۲۴۴۳۹۲	۲۲۰۹۶۳	۱۲۷۸۵۸	۴۱۰۹۳۶	۴۰۳۴۲۹
OWy=۳	۶۹۷۶۲	۲۳۷۹	۳۶۸۸	۳۸۸۱	۲۰۲۵۱	۲۲۶۱۵۶	۱۹۶۴۵۶	۱۵۲۸۰۵	۷۰۸۳۳۵	۴۱۱۴۷۴
OWy=۴	۶۹۸۷۵	۱۹۳۲۸	۱۸۱۷۶	۹۶۳۳	۱۳۶۷۸	۱۶۸۹۷۷	۲۳۵۱۳۹	۱۶۹۶۴۹	۴۵۸۱۷۰	۵۵۶۹۸۷
OWy=۵	۸۶۱۱۲	۸۸۶۲	۹۴۴۳	۱۶۸۹۹	۸۷۰۳	۲۴۰۲۴۳	۲۴۸۰۶۵	۲۰۳۲۳۲	۵۳۷۶۲۳	۶۰۶۱۸۳

جدول ۵: شماره آی‌ام‌اف‌های مطلوب در سطوح مختلف بار (برحسب درصد) و به‌ازای *k*های مختلف در نامتعادلی ولتاژ صفر درصد و همچنین پارامترهای خطای زیر:

$SE_x =$ ۱ mil , $SE_y =$ −۱ mil , $DE =$ ۱ mil , $OW_x =$ ۷ mils , $OW_y =$ ۳ mils , $k_{ow} =$ ۰/۴۵

ضریب k	۱	۲	۳	۴	۵	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵
۰ = بار	۷	۷	۴	۳	۴	۸	۱۱	۹	۵	۵
۳۰ % = بار	۷	۷	۴	۴	۴	۸	۱۱	۹	۶	۶
۶۰ % = بار	۷	۷	۴	۴	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
۹۰ % = بار	۶	۴	۴	۳	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶

جدول ۶: مقادیر اماس به‌دست‌آمده ازروی طیف هیلبرت با استفاده از شماره‌های آی‌ام‌اف‌های مطلوب در سطوح مختلف بار (برحسب درصد) و به‌ازای *k*های مختلف در نامتعادلی ولتاژ صفر درصد و همچنین پارامترهای خطای زیر:

$SE_x =$ ۱ mil , $SE_y =$ −۱ mil , $DE =$ ۱ mil , $OW_x =$ ۷ mils , $OW_y =$ ۳ mils , $k_{ow} =$ ۰/۴۵

ضریب k	۱	۲	۳	۴	۵	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵
۰ = بار	۴۰۰۱۷	۱۰۹۸۴	۴۸۸۷	۴۸۸۸	۱۰۵۴۹	۹۰۹۶۳	۲۳۸۳۴۶	۱۳۲۷۹۰	۲۶۲۹۰۱	۸۲۳۷۹
۳۰ % = بار	۱۹۴۵۳	۸۹۹۱	۸۳۱۶	۱۴۹۱۸	۲۳۸۰۰	۸۱۰۹۸	۱۲۷۰۴۲	۱۵۰۸۷۶	۲۳۳۳۵۹	۳۴۵۱۱
۶۰ % = بار	۱۳۶۰۳	۹۲۴۸	۹۷۵۶	۲۰۵۹۹	۲۵۲۱۲	۷۲۳۴۰	۱۹۰۴۷۸	۱۴۷۶۰۹	۲۴۸۶۱۹	۲۸۶۳۰۷
۹۰ % = بار	۶۹۷۶۲	۲۳۷۹	۳۶۸۸	۳۸۸۱	۲۰۲۵۱	۲۲۶۱۵۶	۱۹۶۴۵۶	۱۵۲۸۰۵	۷۰۸۳۳۵	۴۱۱۴۷۴
RSD(%)	۶۱/۵۳	۴۱/۵۵	۳۷/۰۵	۹۷/۷۵	۲۸/۶۹	۵۳/۵۵	۲۱/۱۴	۱۵/۳۸	۵۴/۸۹	۷۵/۰۰

جدول ۷: شماره آی‌اف‌های مطلوب به‌ازای مقادیر مختلف نامتعادلی ولتاژ تغذیه (برحسب درصد) و به‌ازای *k*های مختلف در ۹۰ درصد بار نامی و همچنین پارامترهای خطای زیر:

$SE_x = ۱\ mil\ ,\ SE_y = -۱\ mil\ ,\ DE = ۱\ mil\ ,\ OW_x = ۷\ mils\ ,\ OW_y = ۳\ mils\ ,\ k_{ow} = ۰/۴۵$

ضریب k	۱	۲	۳	۴	۵	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵
۰ = نامتعادلی	۶	۴	۴	۳	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
۱ % = نامتعادلی	۶	۶	۶	۶	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
۲ % = نامتعادلی	۶	۶	۴	۶	۴	۸	۱۰	۹	۷	۷
۳ % = نامتعادلی	۴	۴	۴	۶	۴	۸	۱۱	۹	۷	۷
۴ % = نامتعادلی	۴	۴	۴	۴	۶	۸	۱۰	۹	۷	۷
۵ % = نامتعادلی	۴	۴	۴	۶	۴	۸	۱۱	۹	۴	۴

جدول ۸: مقادیر اماس به‌دست‌آمده ازروی طیف هیلبرت با استفاده از شماره‌های آی‌اف‌های مطلوب به‌ازای مقادیر مختلف نامتعادلی ولتاژ تغذیه (برحسب درصد) و به‌ازای *k*های مختلف در ۹۰ درصد بار نامی و همچنین پارامترهای خطای زیر:

$SE_x = ۱\ mil\ ,\ SE_y = -۱\ mil\ ,\ DE = ۱\ mil\ ,\ OW_x = ۷\ mils\ ,\ OW_y = ۳\ mils\ ,\ k_{ow} = ۰/۴۵$

ضریب k	۱	۲	۳	۴	۵	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵
۰ = نامتعادلی	۶۹۷۶۲	۲۳۷۹	۳۶۸۸	۳۸۸۱	۲۰۲۵۱	۲۲۶۱۵۶	۱۹۶۴۵۶	**۱۵۲۸۰۵**	۷۰۸۳۳۵	۴۱۱۴۷۴
۱ % = نامتعادلی	۸۵۶۷۵	۱۷۱۶۹	۲۱۳۴۱	۱۷۱۹۷	۱۴۳۵۷	۳۲۸۲۷۲	۱۹۱۲۹۹	**۱۴۸۵۰۹**	۱۶۷۴۳۸	۲۷۱۰۷۸
۲ % = نامتعادلی	۵۳۲۹۵	۲۹۱۹۹	۲۲۵۱۱	۳۲۳۸۴	۳۲۸۸۲	۳۰۲۲۷۲	۴۸۸۸۸۲	**۱۴۰۷۹۵**	۲۶۱۵۶۸	۱۵۳۴۶۹
۳ % = نامتعادلی	۳۹۰۹۰	۳۹۶۴۶	۶۴۶۵۵	۵۴۲۹۲	۳۲۵۹۲	۲۲۲۴۱۶	۴۴۶۰۱۷	**۱۴۵۶۸۹**	۲۲۲۸۶۹	۱۶۹۱۱۹
۴ % = نامتعادلی	۶۲۵۴۱	۱۵۸۸۶۵	۱۱۴۰۶۳	۱۵۳۳۸	۳۱۵۷۰	۲۲۲۸۰۴	۲۳۸۲۳۸	**۱۴۷۱۹۳**	۲۲۸۸۹۷	۱۲۰۸۰۲
۵ % = نامتعادلی	۱۴۳۰۰۸	۲۳۹۲۷۴	۸۳۱۹۹	۴۱۵۱۷	۳۵۱۷۶	۱۹۱۵۷۶	۳۰۰۶۷۳	**۱۶۳۵۹۵**	۱۸۷۵۳۲	۱۸۶۱۳۱
RSD(%)	۴۴/۱۵	۸۷/۷۱	۷۵/۹۰	۶۲/۲۶	۲۷/۶۷	۱۹/۶۳	۳۷/۸۴	**۴/۷۶**	۶۳/۰۸	۴۵/۰۵

جدول ۹: مقادیر اماس برای کلیه آی‌اف‌های منتجه از تجزیه جریان الکتروموتور M13 به‌ازای $k = -۳$ و مقادیر مختلف k_{ow}

IMF	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷
۰/۴۲	۰/۳۹	۰	۰	۰	۰	۳/۷۹	۸/۵۲	۴۵/۹	۵۳۴	۶۷۶	۲۵/۲	۹/۴۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۴۳	۰	۰/۰۴	۰	۰/۵۵	۳/۳۴	۵/۰۲	۹/۸۹	۶۸/۵	۶۱۱	۱۱۴	۱۷/۵	۰/۶۴	۰/۳۹	۰	۰	۰	۰
۰/۴۴	۰/۱۳	۰	۰/۸۲	۱/۸۶	۰/۲۹	۳/۴۹	۲۵/۳	۶۵/۳	۸۶۱	۷۳/۰	۲۰/۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۴۵	۰	۰/۱۲	۰/۵۹	۱/۵۱	۱/۴۹	۵/۶۷	۱۵/۴	۹۲/۸	۶۷۷	۶۹/۶	۱/۲۶	۱۶/۳	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۴۶	۰	۰	۰/۱۹	۱/۰۶	۳/۴۲	۰/۹۳	۱۳/۶	۸۴/۰	۵۹۴	۳۳/۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۴۷	۰	۰	۰/۲۷	۱/۱۵	۲/۱۸	۲/۷۴	۱۶/۵	۱۳۴	۳۸۱	۱۷/۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۴۸	۰/۲۱	۰/۱۷	۰	۱/۲۲	۳/۲۲	۳/۲۱	۲۵/۲	۲۰۶	۲۹۷	۲۴/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۱۰: مقادیر شاخص اماس برای جریان الکتروموتور M13 به‌ازای $k = -۳$ و مقادیر مختلف k_{ow}

k_{ow}	۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۴۴	۰/۴۵	۰/۴۶	۰/۴۷	۰/۴۸
MS	۶۷۶	۶۱۱	۸۶۱	۶۷۷	۵۹۴	۳۸۱	۲۹۷

جدول ۱۱: مقادیر اماس برای کلیه آی‌اف‌های منتجه از تجزیه جریان الکتروموتور M14 به‌ازای $k = -۳$ و مقادیر مختلف k_{ow}

IMF	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷
۰/۴۲	۰	۰	۳	۷	۳۴	۲۷۷	۸۵۰	۱۵۸۷۹	**۳۹۲۰۰۱**	۴۶۴۴۷	۳۵۶۲	۷۶۵۱	۱۶۲۱۲	۲۷۱۴۹۶	۰	۰	۰
۰/۴۳	۰	۰	۰	۳	۵	۱۳۷	۱۱۰۷	۱۸۸۵۹	**۳۲۵۰۷۲**	۲۳۲۰۶	۳۷۹۴	۰	۱۷۴۷۴	۰	۰	۰	۰
۰/۴۴	۰	۰	۰	۳	۱۰	۱۶۷	۱۳۱۳	۲۵۴۲۶	**۲۸۴۲۷۳**	۱۶۵۳۴	۳۱۷۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۴۵	۰	۰	۰	۵	۲۳	۱۳	۱۸۶۴	۳۴۶۳۹	**۱۴۷۴۶۵**	۲۳۲۳۹	۶۹۳۰	۴۳۲۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۴۶	۰	۰	۰	۳	۲۰	۹۶	۱۰۲۷	۴۷۲۶۹	**۱۱۶۹۹۳**	۵۵۸۷	۰	۰	۰	۰	۹۶۷۹	۰	۰
۰/۴۷	۰	۰	۰	۷	۴۴	۲۱۲	۱۶۹۰	۵۳۵۰۰	**۶۹۷۷۰**	۲۵۷۷	۰	۱۹۸۴	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۴۸	۰	۰	۳	۳	۱۶	۱۷۲	۲۳۱۴	**۵۸۳۰۱**	۳۱۰۳۳	۵۰۰۵	۳۳۵۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۱۲: مقادیر شاخص اماس برای جریان الکتروموتور M14 به‌ازای $k = -۳$ و مقادیر مختلف k_{ow}

k_{ow}	۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۴۴	۰/۴۵	۰/۴۶	۰/۴۷	۰/۴۸
MS	۳۹۲۰۰۱	۳۲۵۰۷۲	۲۸۴۲۷۳	۱۴۷۴۶۵	۱۱۶۹۹۳	۶۹۷۷۰	۵۸۳۰۱

جدول ۱۳: مقادیر اماس برای کلیه آی‌اف‌های منتجه از تجزیه جریان الکتروموتور M15 به‌ازای $k = -۳$ وکلیه مقادیر k_{ow}

IMF	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷
۰/۴۲	۰	۰	۳	۱۳	۱۸	۱۲۲	۶۱۳	۶۸۰۰	۱۷۷۲۷۱	۴۹۴۶۹	۳۰۵۴	۱۲۰۵	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۴۳	۰	۰	۰	۶	۱۰	۷۰	۵۹۰	۱۱۵۴۱	**۱۷۹۵۴۳**	۲۰۹۹۹	۱۶۳۱	۰	۰	۱۳۸۲	۰	۰	۰
۰/۴۴	۰	۰	۰	۲	۹	۱۸۲	۸۸۳	۱۳۳۹۷	**۱۳۸۷۳۶**	۲۲۲۶۹	۸۱۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۴۵	۰	۰	۰	۷	۹	۸۷	۱۰۶۳	۱۹۸۳۶	**۱۲۵۱۴۸**	۹۹۶۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱۴۱۴۲	۰
۰/۴۶	۰	۰	۰	۰	۱۰	۱۰۱	۱۶۲۶	۱۸۳۸۰	**۵۵۲۶۲**	۴۱۰۷	۷۳۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۴۷	۰	۰	۱	۶	۵	۱۱۶	۸۲۱	۲۵۶۲۰	**۳۲۸۳۰**	۱۲۸۰	۷۹۲	۰	۰	۱۱۱۴	۰	۱۳۰۵۳	۰
۰/۴۸	۰	۰	۱	۴	۲۴	۱۳۹	۱۱۰۷	**۳۰۵۴۸**	۲۱۲۷۴	۱۳۵۸	۵۵۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۱۴: مقادیر شاخص اماس برای جریان الکتروموتور M15 به‌ازای $k = -۳$ و مقادیر مختلف k_{ow}

k_{ow}	۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۴۴	۰/۴۵	۰/۴۶	۰/۴۷	۰/۴۸
MS	۱۷۷۲۷۱	۱۷۹۵۴۳	۱۳۸۷۳۶	۱۲۵۱۴۸	۵۵۲۶۲	۳۲۸۳۰	۳۰۵۸۴

سپاس‌گزاری

این پژوهش با حمایت و پشتیبانی شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران به مرحله انجام رسیده‌است. لذا نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از همکاری و مساعدت این شرکت تقدیر و تشکر به عمل آورند.

پیوست

مشخصات فنی موتور القایی شبیه سازی شده

نام کمیت	مقدار کمیت
توان نامی	۵۱۰ kW
ولتاژ نامی	۶۰۰۰ V
فرکانس نامی	۵۰ Hz
تعداد فاز و نوع اتصال	سه فاز – ستاره
تعداد قطب	۲
جریان نامی	۵۹ A
جریان بی‌باری	۱۴ A
دور نامی	۲۹۷۳ rpm
طول فاصله هوایی مؤثر	۲ mm
تعداد دورهای سیم‌پیچ در هر کلاف	۹
تعداد کلاف ها در هر فاز	۹+۹
طرح سیم‌پیچی فاز **a**	
۱-۲۱-۲-۲۲-۳-۲۳-۴-۲۴-۵-۲۵-۶-۲۶-۷-۲۷-۸-۲۸-۹-۲۹-۲-۳۶-۱-۳۵-۵۴-۳۴-۵۳-۳۳-۵۲-۳۲-۵۱-۳۱-۵۰-۳۰-۴۹-۲۹-۴۸-۲۸	

مراجع

[1] S. Singhal and R. Mistry, "Oil whirl rotor dynamic instability phenomenon-diagnosis and cure in large induction motor," Proc. of IEEE IAS PCIC, pp. 1-8, Sep. 2009.

[2] M. Ojaghi and N. Yazdandoost, "Oil-whirl fault modeling, simulation, and detection in sleeve bearings of squirrel cage induction motors" IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 30, no. 4, December 2015.

[۳] منصور اوجاقی، ناصر یزدان دوست، « تشخیص عیب گردش روغن در یاتاقان لغزشی موتورالقایی با استفاده از هارمونیک‌های توان لحظه‌ای»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۴، صفحات ۷ تا ۱۷، زمستان ۱۳۹۵.

[4] M. Ojaghi, and N. Yazdandoost, "Winding function approach to simulate induction motors under sleeve bearing fault," in Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Technology, pp. 158–163, 2014.

[5] J. Jung, Y. Park, S. B. Lee, C. Cho, K. Kim, E. Wiedenbrug and M. Teska, "Monitoring journal bearing faults making use of motor current signature analysis for induction motors," IEEE Industry Applications Magazine, pp. 12-21, Jul./Aug. 2017.

[6] S. Osman and W. Wang, "A morphological Hilbert-Huang transform technique for bearing fault detection," IEEE Trans. Instrum. Meas, vol. 65, no. 11, pp. 2646-2656, Nov. 2016.

[7] E. Elbouchikhi, V. Choqueuse, Y. Amirat, M. Benbouzid and S. Turri, "An efficient Hilbert–Huang transform-based bearing faults detection in induction machines," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 32, no. 2, pp. 401-413, Jun. 2017.

[8] A. Verma1, S. Sarangi, M. Kolekar and S. Banerjee, "Oil whip detection using stator current monitoring," IEEE Symposium on Computers & Informatics, 2012.

[9] J. E. Berry, "Oil whirl and whip instabilities – within journal bearing," https://www.machinerylubrication.com/Read/754/oil-whirl-whip, May 2005.

[10] H. A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi and H. Meshgin-Kelk, *Electric Machines, Modeling, Condition Monitoring and Fault Diagnosis*, CRC Press, 2013.

[11] N.E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N. Yen, C. C. Tung and H. H. Liu, "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis," Proc. Roy. Soc. Lond. A, vol. 454, pp. 903-995, 1998.

[12] T.-Y. Wu, C.-C. Wang, and Y.-L. Chung, "The bearing fault diagnosis of rotating machinery by using Hilbert–Huang transform," in Proc. Int. Conf. Electric Inform. Control Eng. (ICEICE), pp. 6238–6241, 2011.

[13] C. Li, L. Zhan and L. Shen, "Friction signal denoising using complete ensemble EMD with adaptive noise and mutual information", Entropy, vol. 17, pp. 5965-5979, 2015.

زیرنویس‌ها

1 Oil Whirl
2 Motor Current Signature Analysis (MCSA)
3 Hilbert-Huang Transform (HHT)
4 Newkirk
5 Taylor
6 Hagg
7 Winding Function Approach (WFA)
8 Modified Winding Function Approach (MWFA)
9 Non-Stationary Signal
10 Cohen
11 Mono-Component Signal
12 Narrow Band
13 Hilbert Spectrum
14 Marginal Spectrum (MS)