

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

رضا آخوندی^۱، کارشناس ارشد؛ منصور اوجاچی^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. به همین دلیل، 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. بر این اساس 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 مدل‌سازی و شبیه‌سازی می‌گردد. سپس جریان استاتور در حالت‌های سالم و معیوب به منظور 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. در نهایت کارایی شاخص پیشنهادی با اعمال آن بر روی 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, MSc¹; 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 اوجاچی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - زنجان - بلوار دانشگاه - دانشگاه زنجان - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق.

۱- مقدمه

ماشین‌آلات دوار از قبیل کمپرسورها، پمپ‌ها، پنکه‌ها، موتورها و ... ستون فقرات صنایع نفت و گاز و پتروشیمی، صنایع شیمیایی، کارخانجات صنعتی و صنعت حمل‌ونقل را تشکیل می‌دهند. به دلیل قابلیت اعتماد بالا، راندمان خوب و سادگی ساختمان، موتورهای القایی متداول‌ترین نوع محرک‌های اولیه برای ماشین‌آلات دوار به‌شمار می‌آیند. عوامل زیادی وجود دارند که می‌توانند باعث خرابی این موتورها شوند. خرابی یاتاقان و افزایش ارتعاش ناشی از آن یکی از این عوامل است که بسیار متداول است. اگرچه هزینه یک یاتاقان کسر کوچکی از کل قیمت موتور القایی است، اما معیوب شدن آن می‌تواند موجب بروز خسارت سنگین و حتی از کار افتادن موتور شود.

اغلب موتورهای القایی بزرگ که کمپرسورهای پرسرعت را به حرکت درمی‌آورند، مجهز به یاتاقان‌های لغزشی روانکاری شده با روغن هستند. بعضی اوقات ساختار یاتاقان لغزشی به دلیل یک «ناپایداری خود تحریک» که «گردش روغن» نامیده می‌شود، مستعد ارتعاشات جانبی با دامنه بزرگ می‌شود. پدیده گردش روغن مستقل از نامتعادلی روتور یا ناهم‌ترازی آن بوده و یک ناپایداری خودتحریک است که به وسیله نیروهای تولید شده در لایه روغن روان‌کننده در اثر کنش‌های هیدرودینامیکی به وجود 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 می‌شود. در صورت عدم کنترل این پدیده، دامنه ارتعاش چرخشی حاصله بدون کران افزایش یافته و به عیب اساسی یاتاقان و موتور منتهی می‌شود. در خلال پدیده گردش روغن، رفتار روتور متفاوت از رفتار آن در پدیده تشدید در سرعت بحرانی است. به این صورت که با نزدیک شدن روتور به سرعت بحرانی، دامنه ارتعاش آن افزایش می‌یابد و با عبور از سرعت بحرانی دامنه ارتعاش به کاهش می‌گذارد. اما با شروع پدیده گردش روغن، دامنه ارتعاش روتور با افزایش سرعت آن به طرز فزاینده‌ای افزایش می‌یابد و همچنان بالا می‌ماند [۱]. لذا تشخیص عیب گردش روغن در مراحل اولیه وقوع آن ضروری است تا با کنترل آن از بروز خرابی اساسی در موتور پیش‌گیری شود. اگرچه مفاهیم نظری مربوط به پدیده گردش روغن به‌طور مبسوط در مراجع هیدرودینامیکی مطرح شده‌است، اما کمتر مرجعی یافت می‌شود که به پایش وضعیت موتور جهت تشخیص و آشکار سازی 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 لغزشی موتور القایی شدند [۲-۴]. به این ترتیب که ابتدا یک معادله دینامیکی برای توزیع فاصله هوایی در یک موتور القایی با عیب گردش روغن در یاتاقان به دست آوردند. سپس مدل سازی و شبیه سازی موتور معیوب را با استفاده از

روش تابع سیم‌پیچ به انجام رساندند. ایشان همچنین هارمونیک‌های مرتبط با عیب گردش روغن را در سیگنال‌های جریان استاتور و توان لحظه‌ای موتور القایی مشخص کردند. فرکانس این هارمونیک‌ها در جریان استاتور از رابطه زیر به دست می‌آید [۲]:

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

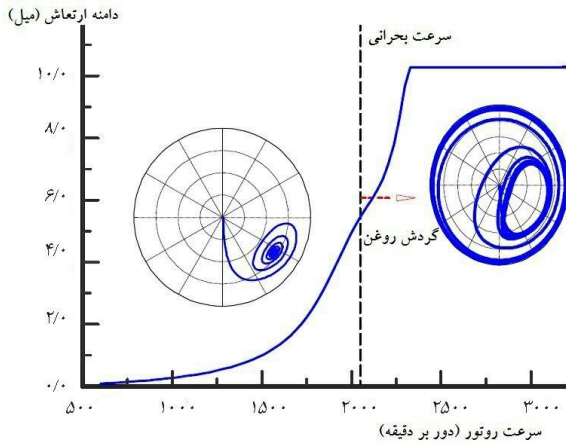
که در آن f_s فرکانس اصلی منبع تغذیه استاتور، s لغزش، p تعداد جفت قطب و k_{ow} نسبت فرکانس عیب گردش روغن است که مقداری بین ۰/۴۲ تا ۰/۴۸ دارد. در نهایت نیز بهترین هارمونیک‌ها را از نظر حساسیت نسبت به شدت عیب و عدم حساسیت نسبت به پارامترهای بهره‌برداری موتور نظیر سطح بار آن و میزان نامتعادلی ولتاژ منبع تغذیه، به عنوان بهترین شاخص عیب معرفی کردند [۲-۴]. یونگ و همکاران نیز با انجام آزمایش عملی بر روی یک موتور پمپ سوخت و نیز یک موتور سفارشی دارای یاتاقان لغزشی، از روش آنالیز امضای جریان موتور برای تشخیص پدیده گردش روغن در یاتاقان لغزشی استفاده کردند [۵].

کار مدل سازی و شبیه سازی در مراجع [۲-۴] با این فرض انجام شده که موتور القایی در هر دو یاتاقان لغزشی خود دچار عیب گردش روغن با شرایط یکسان شده است. این فرض اگرچه کار مدل سازی و شبیه سازی را ساده تر می‌کند اما وقوع آن در عمل بسیار بعید است. در عمل ابتدا یکی از یاتاقان‌های موتور معیوب می‌شود و ممکن یاتاقان دیگر تا مدت‌ها پس از این اتفاق به‌طور سالم کار کند. به علاوه بررسی‌های انجام شده توسط مولفین نشان می‌دهد که فرض معیوب بودن هر دو یاتاقان لغزشی باعث تقویت قابل توجه دامنه هارمونیک‌های ایجاد شده در جریان استاتور نسبت حالتی می‌شود که فقط یکی از یاتاقان‌ها دچار عیب است. بنابراین اگر سیستم پایش وضعیت بر اساس مدل سازی با دو یاتاقان معیوب طراحی شود، شدت عیب با یک یاتاقان معیوب به میزان قابل توجهی کمتر از میزان واقعی آن تشخیص داده خواهد شد. از طرف دیگر تحلیل فوریه به کاررفته برای تشخیص عیب در مراجع [۲-۵] برای سیگنال‌های ایستا مناسب است در حالیکه گردش روغن در عمل ماهیتی ناپایدار دارد. همچنین نوسان بار و نوسان دامنه و فرکانس ولتاژ تغذیه باعث غیرایستاشدن جریان موتور می‌شود.

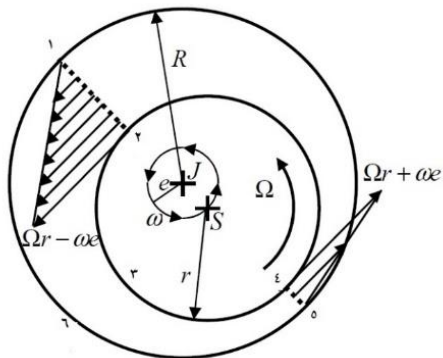
در مرجع [۶] برای آشکار سازی خطاهای یاتاقان غلتشی در مراحل اولیه، یک روش ریخت‌شناسی مبتنی بر تبدیل هیلبرت-هانگ ارائه شده است. همچنین به منظور تشخیص خطاهای یاتاقان‌های غلتشی در ماشین‌های القایی بر اساس روش آنالیز امضای جریان موتور، در مرجع [۷] تبدیل هیلبرت-هانگ مورد استفاده قرار گرفت. مزیت اصلی این تبدیل 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 مشکل گردش روغن در یک یاتاقان لغزشی آن ارائه می‌شود. سپس سیگنال جریان استاتور با استفاده از تبدیل هیلبرت-هانگ پردازش

محور به منظور افزایش بار ماشین از طریق گرم کردن یا سرد کردن پایه های نگهدارنده و نیز تغییر فشار روغن است. اقدامات اصلاحی دائمی شامل نصب یک پوسته جدید با لقی مناسب، بارگذاری اولیه یاتاقان به وسیله یک سد فشار روغن داخلی و تعویض کامل یاتاقان به وسیله انواعی از یاتاقان است که کمتر مستعد عیب گردش روغن هستند [۹].



شکل ۱: داده های ارتعاش موتور دارای گردش روغن [۱]



شکل ۲: دینامیک روغن در یاتاقان لغزشی [۱]

۳- مقدار عددی فرکانس گردش روغن

سطح مقطع یک یاتاقان لغزشی در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل مرکز یاتاقان به شعاع R با J و مرکز محور به شعاع r با S نشان داده می شود. اگر برای سادگی، تغییرات فشار در یاتاقان نادیده گرفته شود، پروفیل شتاب لایه روان کننده تقریباً خطی است و از $v = 0$ بر روی سطح داخلی یاتاقان تا $v \cong \Omega r$ بر روی سطح خارجی محور تغییر می کند. بنابراین پیوستگی شار تراکم ناپذیر در حجم کنترلی ۱-۲-۳-۴-۵-۶-۱ ایجاب می کند که [۱]:

$$\frac{1}{4} \Omega r (C + e) - \frac{1}{4} \Omega r (C - e) = 2rv \quad (2)$$

که در آن v سرعت چرخش مرکز محور به دور مرکز یاتاقان است. سرعت ثابت گردش، چرخش دایره ای با $v = \omega e$ را ایجاب می کند. بنابراین به پیروی از رابطه (۲) خواهیم داشت:

$$\Omega r e = 2rv e \quad (3)$$

که نتیجه می دهد:

شده و شاخصی مناسب برای آشکارسازی عیب گردش روغن ارائه می گردد. در نهایت کارایی شاخص پیشنهادی با اعمال آن بر روی سیگنال جریان استاتور بدست آمده از چند موتور القایی واقعی مورد ارزیابی قرار گرفته و در عمل به اثبات می رسد. مطالعات مولفین نشان می دهد که شاخص حاصل از تبدیل هیلبرت-هانگ برخلاف تبدیل فوریه در شرایط گذارای راه اندازی و نیز در شرایط نوسان بار موتور نیز کارایی دارد، اگرچه به دلیل محدودیت صفحات مقاله امکان ارائه این نتایج در مقاله حاضر فراهم نیست.

۲- پدیده گردش روغن

نیوکرک^۴ و تیلور^۵ در سال ۱۹۲۵ میلادی براساس مشاهدات تجربی خود نوع جدیدی از ناپایداری دینامیکی خودتحرک مرتبط با یاتاقان های لغزشی هیدرودینامیکی را گزارش کردند. آن ها مشاهده کردند که در خلال این ناپایداری، مرکز ژورنال در داخل لقی یاتاقان با فرکانسی کمتر از نصف سرعت روتور می چرخد. آن ها همچنین متوجه شدند که این ارتعاش جانبی می تواند با خاموش کردن منبع پمپاژکننده روغن به داخل یاتاقان کنترل شود، لذا نتیجه گرفتند که این نوع ارتعاش جانبی با لایه روغن روان کننده و گردش آن مرتبط است. ایشان همچنین دریافتند که با اندکی ناهم تراز کردن یاتاقان ها، استفاده از یاتاقان های میراشونده با اصطکاک و یا پرهیز از قراردادن بارهای سبک بر روی محور، می توان از این ارتعاشات زیر سنکرون جلوگیری نمود. از زمان کشف این پدیده توسط نیوکرک، تحقیقات تئوری و تجربی بسیاری انجام گرفت تا بروز این چرخش غیرسنکرون را توجیه و پیش بینی کنند. اطلاعات بیشتری در مورد پدیده گردش روغن توسط هگ^۶ فراهم شد. او اظهار داشت که در خلال حرکت پایدار یا حالت ماندگار روتور در یک یاتاقان، نیروی هیدرودینامیکی لایه روغن معادل بار خارجی است اما در خلال حرکت گردش محور روتور، نیروی هیدرودینامیکی بر بار خارجی غلبه می کند و به صورت یک منبع انرژی عمل می کند که چرخش دایروی محور در جهت چرخش روتور را شتاب می بخشد. گردش روغن مستقل از نامتعادلی روتور است و نمی تواند توسط بالانس کردن روتور کنترل شود [۱].

شکل ۱ نمودار سرعت موتور نسبت به دامنه ارتعاش را برای یک موتور القایی که دچار ارتعاش گردش روغن است، نشان می دهد. در خلال گردش روغن رفتار روتور برخلاف تشدید در سرعت بحرانی است. در خلال گردش روغن، دامنه ارتعاش با افزایش سرعت افزایش می یابد و هرگز میران شده و از بین نمی رود. اگرچه روتور حول مرکز یاتاقان می چرخد، چرخش روتور ناپایدار است و ارتعاش آن بی کران افزایش می یابد و اگر رفع نشود منجر به آسیب به موتور می شود [۱].

عیب گردش روغن هنگامی مشکل ساز می شود که دامنه ارتعاشات به ۴۰ الی ۵۰ درصد لقی مجاز یاتاقان برسد. در این صورت اقدامات اصلاحی باید صورت گیرد. اقدامات اصلاحی موقتی شامل تغییر دما و ویسکوزیته روغن، ایجاد یک نامتعادلی یا ناهم ترازوی خفیف بر روی

توزیع فاصله هوایی در طول محوری ماشین ثابت است. اما اگر طول فاصله هوایی در راستای محوری ماشین ثابت نباشد، اندوکتانس متقابل سیم پیچ های A و B از رابطه زیر باید محاسبه شود:

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

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

۵- تابع فاصله هوایی در شرایط عیب گردش روغن

قبل از استفاده از روش تابع سیم پیچ برای شبیه سازی موتور القایی که در یاتاقان لغزشی خود دچار عیب گردش روغن است، باید تابع فاصله هوایی در شرایط مزبور به طرز مناسبی تعریف شود. برای عیب گردش روغن متقارن محوری که مستلزم بروز عیب با شرایط یکسان در هر دو یاتاقان موتور به طور هم زمان است، این تعریف در مراجع [۲-۴] با استفاده از داده های عملی انجام شده است. وقتی که فقط یکی از یاتاقان های موتور دچار عیب گردش روغن می شود، تابع فاصله هوایی در طول محور موتور غیر یکنواخت خواهد شد. برای انطباق با این وضعیت می توان تابع فاصله هوایی معرفی شده در مراجع مذکور را به صورت زیر اصلاح کرد:

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

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

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

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

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

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

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

که در آن SE_x و SE_y در جات ناهم محوری استاتیکی ذاتی در راستای محورهای x و y ، DE درجه ناهم محوری دینامیکی ذاتی و $OW_x(z)$ و $OW_y(z)$ دامنه ارتعاش محور در راستای محورهای x و y در اثر گردش روغن هستند که در شرایط معیوب بودن فقط یکی از یاتاقان ها، در طول محور موتور متغیر بوده و با توجه به حالت صلب روتور از روابط زیر محاسبه می شوند:

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

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

$$\omega = \frac{\Omega}{2} \quad (۴)$$

بنابراین هنگامی که از تغییر فشار چشم پوشی می شود، فرکانس گردش روغن معادل نصف سرعت کار ژورنال است. اما هنگامی که فشار تغییر می کند، سرعت گردش آن کمتر از نصف سرعت ژورنال خواهد بود [۱]. در عمل به دلیل تلفات ناشی از اصطکاک، معمولاً فرکانس گردش روغن بین ۰/۴۲ تا ۰/۴۸ برابر فرکانس چرخش روتور است [۸].

۴- مدل سازی موتور القایی با عیب گردش روغن

چون ماشین الکتریکی یک وسیله الکترومغناطیسی است، بهترین روش برای تحلیل آن از طریق محاسبه توزیع میدان مغناطیسی در آن حاصل می شود. اما این امر مستلزم حل معادله پواسون و یا لاپلاس است که برای بهترین کامپیوترهای موجود و ساده ترین ساختار ماشین نیز کاری پیچیده و زمان بر است [۱۰]. آشکار سازی عیوب ماشین اغلب نیازمند تحلیل تغییرات ایجاد شده در شکل موج جریان خط، شار، گشتاور و یا سرعت است. بنابراین تحلیل ماشین ها با حل کننده های میدانی عددی برای شناسایی نشانه های خطا بی اندازه زمان بر خواهد بود [۱۰].

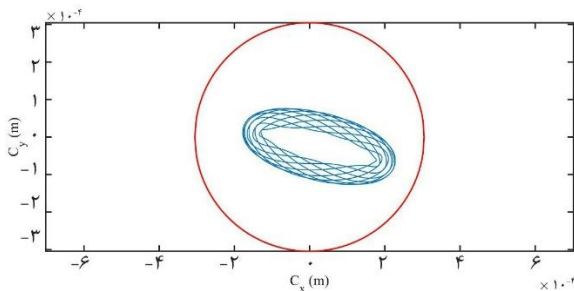
توصیف ماشین های الکتریکی به صورت مدارهای مغناطیسی ترویج شده، راه دیگری برای دستیابی به مشخصه های عمل کردی آن ها است. عناصر این مدارها معمولاً مقاومت ها و اندوکتانس ها هستند. از بین این دو، محاسبه اندوکتانس ها مشکل تر است زیرا اندوکتانس ها با چرخش روتور و نیز اشباع مغناطیسی تغییر می کنند. روش تابع سیم پیچ^۷ و تابع سیم پیچ اصلاح شده^۸، ابزاری موثر برای محاسبه این اندوکتانس ها فراهم می کند. در این روش ها محاسبه اندوکتانس ها با استفاده از اطلاعات فاصله هوایی و توزیع مکانی سیم پیچ های میسر می شود. چون ساختار هر سیم پیچ یک نیرو محرکه مغناطیسی در داخل ماشین و فاصله هوایی ایجاد می کند، محاسبه شار، شار پیوندی و در نتیجه اندوکتانس ها با استفاده از این روش آسان است. حتی اثر اشباع و اثر شیارها با تعریف مناسب فاصله هوایی قابل مدل سازی است. آثار سه بعدی از قبیل تورب میله های روتور و ناهم محوری کج هم قابل اعمال در این روش هستند [۱۰].

با استفاده از تئوری تابع سیم پیچ، اندوکتانس متقابل دو سیم پیچ اختیاری A و B بر روی موتور به صورت زیر قابل محاسبه است [۱۰]:

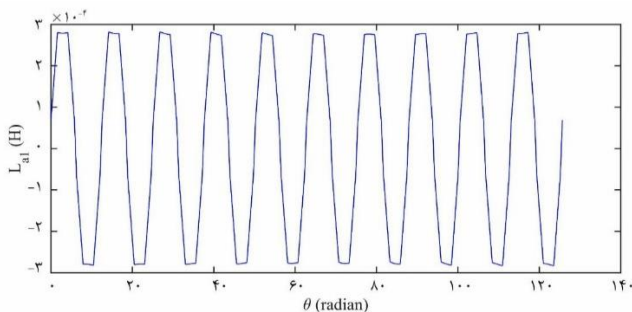
$$L_{BA}(\theta) = \mu_0 r l \int_0^{2\pi} n_B(\varphi, \theta) M_A(\varphi, \theta) g^{-1}(\varphi, \theta) d\varphi \quad (۵)$$

که در آن l طول محوری ماشین، r شعاع داخلی استاتور، μ_0 تراوایی مغناطیسی فضای آزاد، θ موقعیت زاویه ای روتور نسبت به مرجع استاتور، φ زاویه نقاط نسبت به مرجع استاتور، n_B تابع دور سیم پیچ B ، M_A تابع سیم پیچ اصلاح شده سیم پیچ A و g^{-1} عکس تابع فاصله هوایی (تابع معکوس فاصله هوایی) است. با قراردادن $A = B$ در فرمول فوق می توان اندوکتانس مغناطیس کنندگی (خودی) سیم پیچ A را محاسبه نمود. رابطه ۵ وقتی صادق است که

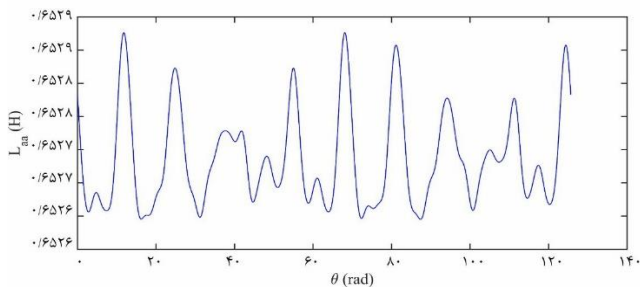
و اعمال بار معادل با ۹۰ درصد توان نامی موتور، شبیه‌سازی رفتار موتور معیوب در شرایط راه‌اندازی از حالت سکون تا رسیدن به حالت ماندگار انجام می‌شود. لازم به ذکر است که به‌ازای $k_{ow} = 0/45$ ، دوره تناوب توابع C_x ، C_y ، R_c و θ_c معادل 40π است.



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



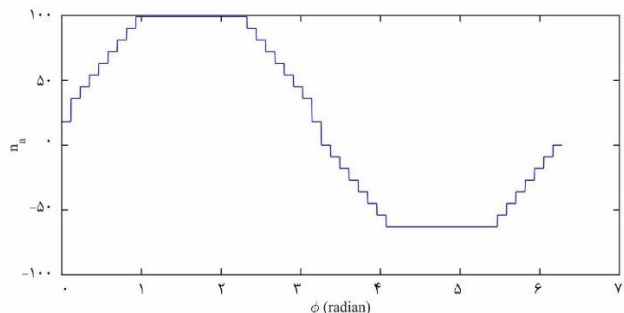
شکل ۷: اندوکتانس خودی فاز a استاتور

شکل ۵ مسیر چرخش مرکز محور روتور به دور مرکز یاتاقان (منحنی آبی رنگ) را داخل محدوده لقی مجاز (دایره قرمز) نشان می‌دهد. همان‌طور که 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 $k_{ow} = 0/45$ معادل بیست دور است. تغییرات

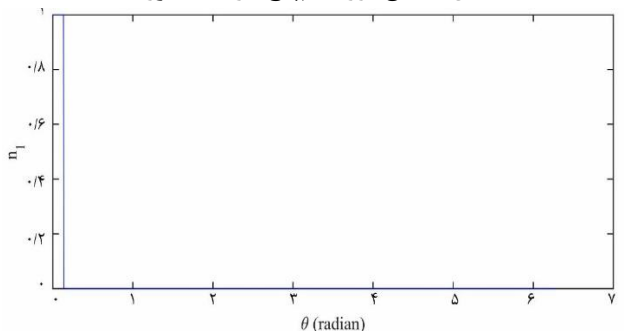
که در آن، OW_x و OW_y به ترتیب دامنه ارتعاش محور روتور در جهت محورهای x و y در محل یاتاقان معیوب و L فاصله دو یاتاقان موتور از یکدیگر است.

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 شبیه‌سازی شده و نتایج حاصله بررسی و تحلیل می‌شوند. مشخصات فنی این موتور در جدول پیوست مقاله ارائه شده است. 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 به ترتیب 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. به عبارت 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):

$$SE_x = 1 \text{ mil}, SE_y = -1 \text{ mil}, DE = 1 \text{ mil},$$

$$OW_x = 7 \text{ mils}, OW_y = 3 \text{ mils}, k_{ow} = 0/45$$

۷- فرکانس لحظه‌ای

فرکانس لحظه‌ای یکی از پیچیده‌ترین مفاهیم پردازش سیگنال است. دو مشکل اساسی بر سر راه ارائه مفهوم فرکانس لحظه‌ای وجود دارد. اولین مشکل این است که روش آنالیز طیفی فوری به شدت جا افتاده است. در این آنالیز، فرکانس برای توابع سینوسی تعریف می‌شود 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 نوسان کامل از شکل موج سینوسی نیاز است تا مقدار فرکانس محلی تعیین شود. اما یک چنین تعریفی برای سیگنال‌های غیرایستا^۹ که فرکانس‌شان از لحظه‌ای به لحظه‌ای دیگر تغییر می‌کند، منطقی نیست. مشکل دوم ناشی از این است که در تعریف فرکانس لحظه‌ای روش یکتا و منحصر به فردی وجود ندارد. با این وجود، این مشکل دیگر حاد و جدی نیست زیرا با استفاده از تبدیل هیلبرت می‌توان داده‌ها را به شکل تحلیلی درآورد [۱۱].

برای یک سری زمانی اختیاری مانند $X(t)$ ، همیشه می‌توان تبدیل هیلبرت آن را به صورت زیر نوشت:

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{X(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (14)$$

با این تعریف، $X(t)$ و $Y(t)$ یک جفت مختلط مزدوج خواهند بود. بنابراین می‌توان سیگنال تحلیلی $Z(t)$ را به صورت زیر فراهم آورد [۱۱]:

$$Z(t) = X(t) + jY(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (15)$$

$$a(t) = \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \quad (16)$$

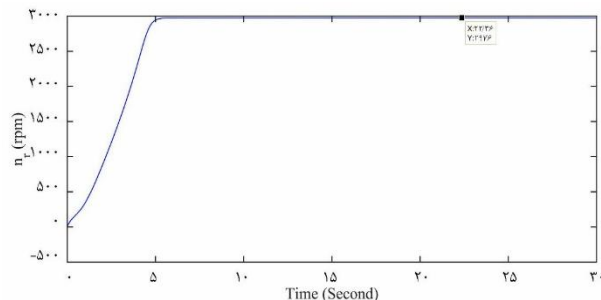
$$\theta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{Y(t)}{X(t)} \right) \quad (17)$$

به لحاظ تئوری روش‌های زیادی برای تعریف قسمت موهومی رابطه (۱۵) وجود دارد اما تبدیل هیلبرت روش یکتایی برای این تعریف فراهم می‌آورد به گونه‌ای که 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]:

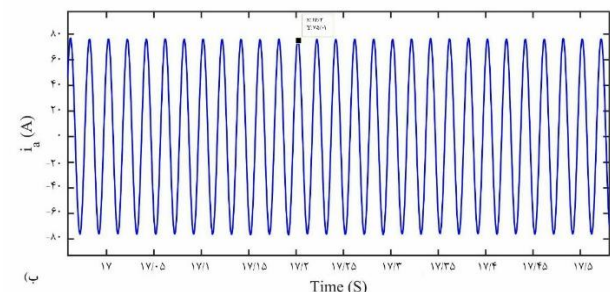
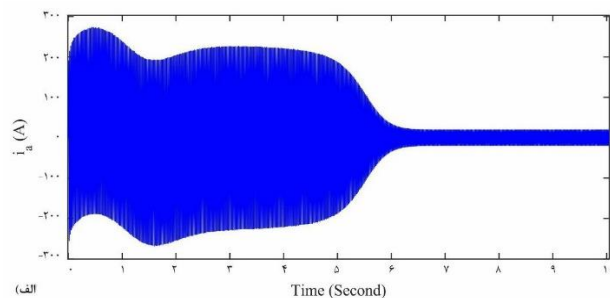
$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (18)$$

این تعریف کوهن^{۱۰} (۱۹۹۵) را بر آن داشت که لفظ «تابع تک‌مولفه‌ای» را معرفی کند. در اصل چون فرکانس لحظه‌ای، یک تابع تک‌مقداری از زمان است، یعنی در هر لحظه از زمان فقط یک مقدار برای فرکانس وجود دارد، یک سری محدودیت‌ها بر روی داده‌ها ضروری است. متأسفانه هیچ تعریف واضحی از سیگنال «تک‌مولفه‌ای»^{۱۱} ارائه نشده است تا بتوان براساس آن قضاوت کرد که آیا یک تابع تک‌مولفه‌ای هست یا خیر. به همین دلیل به جای مفهوم «تک‌مولفه‌ای»، مفهوم «باند باریک»^{۱۲} به عنوان یک محدودیت بر روی داده‌ها اعمال می‌شود تا فرکانس لحظه‌ای بامعنی باشد [۱۱].

اندوکتانس متقابل فاز a استاتور با مش ۱ روتور و تغییرات اندوکتانس خودی فاز a با تغییر موقعیت روتور به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. این اندوکتانس‌ها نیز به تبعیت از فاصله هوایی دچار اعوجاج و نوسان با دوره تناوب 40π رادیان هستند. از آنجایی که عمل کرده‌های 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 تحت تاثیر قرار دهد. شکل ۸ سرعت روتور را طی راهاندازی از حالت سکون تا حالت ماندگار نشان می‌دهد. اگرچه موتور در حالت ماندگار به سرعت مورد انتظار می‌رسد اما مدت زمانی که طول می‌کشد به این سرعت برسد، به طرز قابل ملاحظه‌ای بیش از حالت سالم است. شکل ۹ نیز شکل موج جریان فاز a استاتور را نشان می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که استاتور درحالتی که موتور دچار عیب گردش روغن است، هم در حالت گذرا و هم در حالت ماندگار جریان بیشتری از شبکه می‌کشد که به وضوح نشان‌گر تاثیر مخرب عیب گردش روغن بر روی 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

۸- طیف هیلبرت

بعدا؛ اینکه 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 نخواهد داشت. بعد از انجام تبدیل هیلبرت بر روی هر کدام از آی‌ام‌اف‌ها، می‌توان سیگنال را به‌صورت زیر بیان نمود [۱۱]:

$$X(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} \quad (19)$$

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 خواهد بود:

$$X(t) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i e^{j \omega_i t} \quad (20)$$

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 عمومی‌یافته 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 می‌سازد 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 داده شود. 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:

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (21)$$

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 $p=1$ 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:

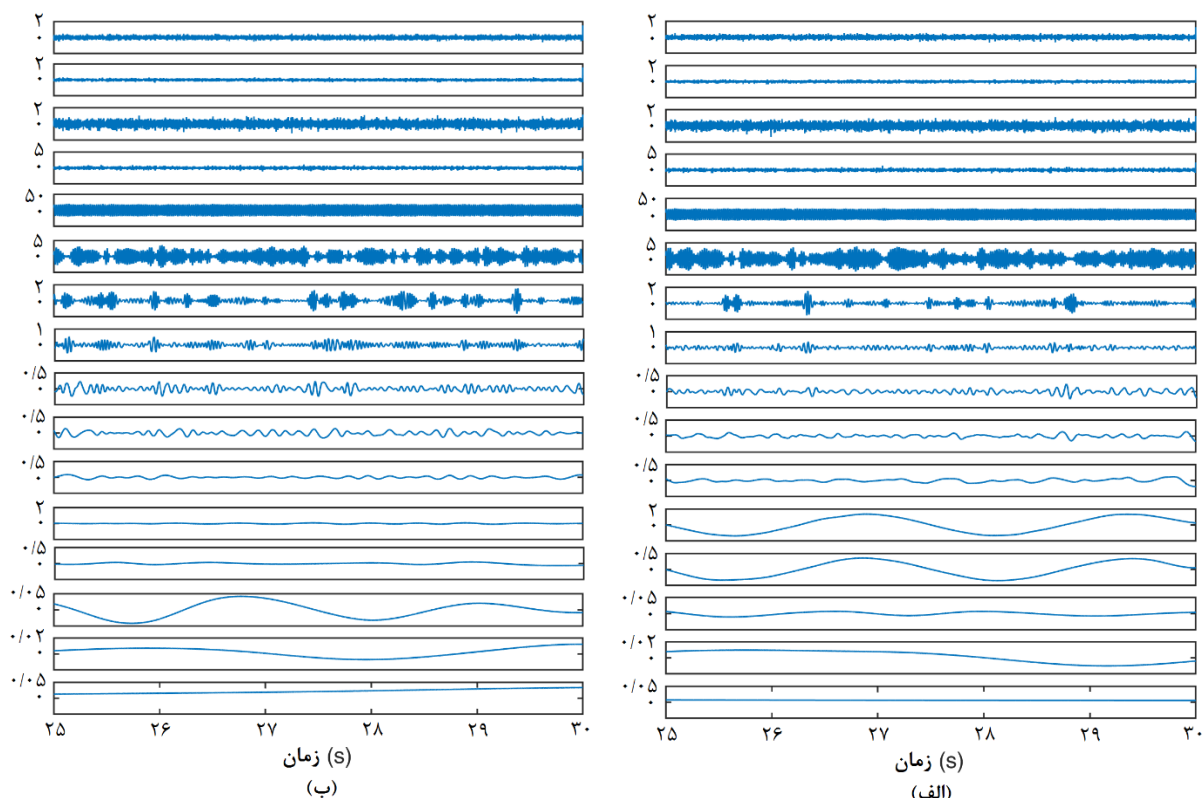
$$f_{ow} = f_s \left| 1 + k \cdot k_{ow} (1 - s) \right|; \quad k = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (22)$$

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 (مثلاً 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 به‌زای 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 به‌زای آن فرکانس در آی‌ام‌اف تعیین شده 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 اولاً برای افزایش دقت، رزولوشن طیف فرکانس بالا برده می‌شود (معادل ۰/۱ هرتز) و ثانیاً 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، از روی طیف هیلبرت مقدار طیف حاشیه‌ای یا ام‌اس به‌زای آن فرکانس برای تمامی آی‌ام‌اف‌ها تعیین می‌شود. هر کدام که بزرگ‌تر بود، آی‌ام‌اف مربوط به آن 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 آی‌ام‌اف‌های سازنده‌اش تجزیه می‌شود. در گام دوم طیف هیلبرت هر کدام از آی‌ام‌اف‌ها محاسبه می‌شود. در گام سوم در تمامی طیف‌های هیلبرت رسم شده، مقدار ام‌اس به‌زای فرکانس موردنظر (یا به‌زای مقدار k موردنظر) به‌دست می‌آید. در گام چهارم مقادیر ام‌اس به‌دست آمده با هم مقایسه شده، هر کدام که بزرگ‌تر بود، شماره آی‌ام‌اف متناظر با آن به‌عنوان شماره آی‌ام‌اف مطلوب که بیش از سایر آی‌ام‌اف‌ها حاوی فرکانس موردنظر است، ثبت می‌گردد. همچنین مقدار ام‌اس 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



شکل ۱۰: 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:

$$SE_x = 1 \text{ mil}, SE_y = -1 \text{ mil}, DE = 1 \text{ mil}, OW_x = 7 \text{ mils}, OW_y = 3 \text{ mils}, k_{ow} = 0/45$$

مقادیر اماس به دست آمده از روی طیف هیلبرت را با استفاده از این آیاماف‌های 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. همان‌طور که از این جدول برمی‌آید، مقدار RSD به‌ازای ضریب $k = -3$ در مقایسه با ضرایب دیگر حداقل بوده و در حد قابل‌قبولی قرار دارد. جدول ۷ شماره آیاماف‌های مطلوب را به‌ازای مقادیر مختلف ولتاژ تغذیه در k ‌های مختلف و در ۹۰ درصد بار نامی با همان پارامترهای عیب نشان می‌دهد. جدول ۸ نیز مقادیر اماس به دست آمده از روی طیف هیلبرت این آیاماف‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این جدول هم RSD به‌ازای ضریب $k = -3$ کم‌ترین مقدار را دارد. بنابراین مولفه فرکانسی متناظر با $k = -3$ کم‌ترین حساسیت را نسبت به تغییر سطح بار و تغییر درجه نامتعادلی ولتاژهای شبکه سه‌فاز دارد. لذا با توجه به حساسیت مناسب آن در مقابل شدت عیب، این مولفه فرکانسی مناسب‌ترین شاخص برای آشکارسازی عیب گردش روغن با استفاده از تبدیل هیلبرت-هانگ است.

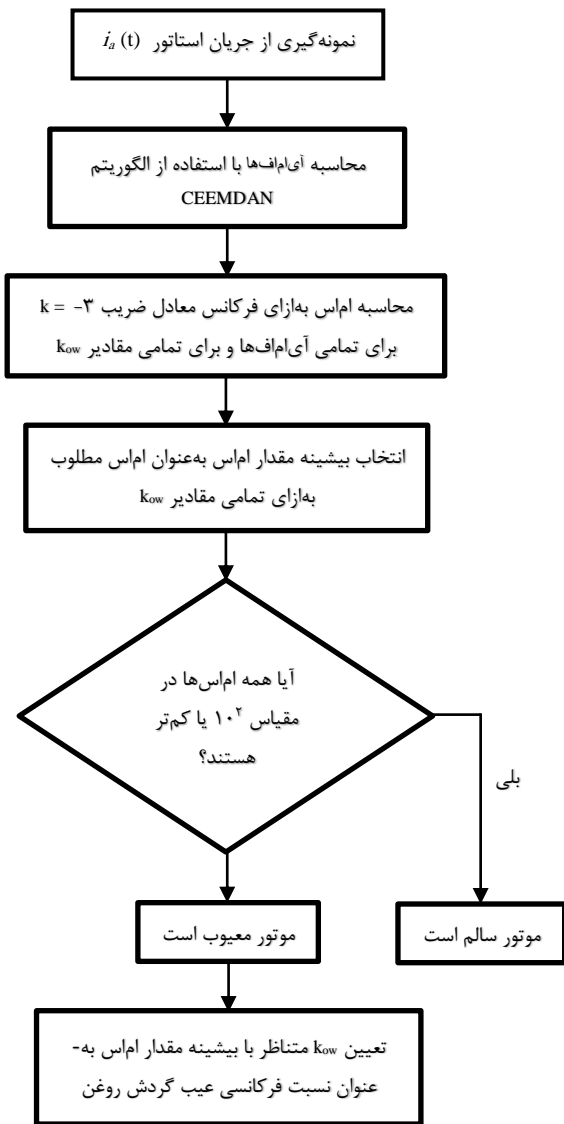
۱۰- اعتبارسنجی تجربی نتایج

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

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 به دست آمده از روی طیف هیلبرت را با استفاده از شماره‌های آیاماف‌های مطلوب در شدت‌های مختلف عیب و به‌ازای مقادیر مختلف k نشان می‌دهند. همان‌طور که از جدول‌های ۳ و ۴ برمی‌آید، در ستون‌های مربوط به ضریب $k = -3$ که در مورد این موتور و در این حالت بهره‌برداری خاص معادل $f_{ow} = 14/86 \text{ Hz}$ است، اماس‌های ثبت شده، اولاً در تمامی حالات معیوب از حالت سالم بزرگ‌تر هستند و در ثانی با افزایش شدت عیب (OW_x و OW_y) روند افزایشی دارند.

یک شاخص خوب برای آشکارسازی عیب باید اولاً با شدت عیب نسبت مستقیم داشته‌باشد، یعنی با افزایش شدت عیب افزایش یابد. ثانیاً نسبت به شرایط بهره‌برداری موتور حساس نباشد، یعنی با تغییر این شرایط، تغییر قابل توجهی نکند. بنابراین مولفه فرکانسی متناظر با $k = -3$ حاوی ویژگی اول است. اما برای بررسی ویژگی دوم مطالعات و شبیه‌سازی‌های پیش‌تری لازم است. جدول ۵ 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



شکل ۱۱: فرآیند پردازش سیگنال جریان الکتروموتورها و تعیین وضعیت سالم یا معیوب آنها و تخمین مقدار k_{ow}

۱۱- نتیجه

عیب گردش روغن مهم‌ترین عیب تشدید شونده 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 ماشین‌آلات تحمیل نماید. این عیب را می‌توان با استفاده از پردازش سیگنال جریان استاتور به وسیله 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 $k = -3$ است، مناسب‌ترین هارمونیک برای مقاصد عیب‌یابی است. زیرا اولاً دامنه آن نسبت به شدت عیب حساس است و با افزایش شدت عیب افزایش می‌یابد، ثانیاً نسبت به پارامترهای بهره‌بردار ماشین از قبیل سطح بار ماشین و نامتعادلی ولتاژ تغذیه حساسیت کمتری دارد. کارایی این روش در عمل هم به اثبات می‌رسد.

جدول ۱: 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:

$$SE_x = 1 \text{ mil}, SE_y = -1 \text{ mil}, DE = 1 \text{ mil}, OW_y = 3 \text{ mils}, k_{ow} = 0/45$$

ضریب k	۱	۲	۳	۴	۵	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵
حالت سالم	۶	۶	۴	۴	۴	۷	۱۰	۸	۶	۶
$OW_x=5$	۶	۶	۴	۴	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
$OW_x=6$	۶	۶	۴	۴	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
$OW_x=7$	۶	۴	۴	۳	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
$OW_x=8$	۶	۶	۴	۴	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
$OW_x=9$	۶	۶	۴	۴	۴	۸	۱۱	۹	۶	۶

جدول ۲: 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:

$$SE_x = 1 \text{ mil}, SE_y = -1 \text{ mil}, DE = 1 \text{ mil}, OW_x = 7 \text{ mils}, k_{ow} = 0.45$$

ضریب k	۱	۲	۳	۴	۵	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵
حالت سالم	۶	۶	۴	۴	۴	۷	۱۰	۸	۶	۶
$OW_y=1$	۶	۶	۶	۴	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
$OW_y=2$	۶	۶	۶	۴	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
$OW_y=3$	۶	۴	۴	۳	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
$OW_y=4$	۶	۶	۴	۴	۴	۸	۱۰	۹	۶	۶
$OW_y=5$	۶	۶	۴	۴	۳	۸	۱۱	۹	۶	۶

جدول ۳: مقادیر اماس به‌دست‌آمده از روی 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:

$$SE_x = 1 \text{ mil}, SE_y = -1 \text{ mil}, DE = 1 \text{ mil}, OW_x = 7 \text{ mils}, k_{ow} = 0.45$$

ضریب k	۱	۲	۳	۴	۵	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵
حالت سالم	۴۶۱	۱۴۸	۶۴	۷۷	۱۱۰	۱۶۱۱	۲۹۱۷	۷۵۴	۵۰۷۶	۶۲۸۶
$OW_x=5$	۶۰۶۳۴	۱۸۲۰۹	۱۰۱۷۱	۱۵۰۳۳	۹۵۱۵	۲۳۲۳۴۹	۱۸۱۴۰۰	۱۳۰۳۳۱	۵۶۶۷۳۱	۴۰۶۹۹۵
$OW_x=6$	۱۰۷۹۶۸	۲۳۱۸۹	۱۴۷۸۸	۶۳۰۹	۹۸۵۰	۱۸۱۰۹۱	۲۴۵۱۴۷	۱۴۰۲۹۹	۷۴۸۹۰۷	۴۸۹۹۵۴
$OW_x=7$	۶۹۷۶۲	۲۳۷۹	۳۶۸۸	۳۸۸۱	۲۰۲۵۱	۲۲۶۱۵۶	۱۹۶۴۵۶	۱۵۲۸۰۵	۷۰۸۳۳۵	۴۱۱۴۷۴
$OW_x=8$	۸۶۱۱۴	۱۰۳۵۲	۱۲۳۲۶	۴۲۶۴	۱۴۹۹۴	۲۳۷۵۱۱	۲۹۳۶۹۲	۱۵۳۶۲۷	۴۷۶۶۳۱	۶۶۱۵۹۰
$OW_x=9$	۱۴۰۶۴۰	۹۵۰۸	۸۷۷۴	۲۴۷۹۴	۲۳۰۹	۲۰۲۵۸۸	۲۸۵۴۲۵	۱۶۹۴۳۹	۴۹۳۷۵۳	۴۷۸۳۵۵

جدول ۴: مقادیر اماس به‌دست‌آمده از روی 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:

$$SE_x = 1 \text{ mil}, SE_y = -1 \text{ mil}, DE = 1 \text{ mil}, OW_x = 7 \text{ mils}, k_{ow} = 0.45$$

ضریب k	۱	۲	۳	۴	۵	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵
حالت سالم	۴۶۱	۱۴۸	۶۴	۷۷	۱۱۰	۱۶۱۱	۲۹۱۷	۷۵۴	۵۰۷۶	۶۲۸۶
$OW_y=1$	۱۳۳۲۸۹	۳۶۰۸۹	۲۶۷۳۵	۱۲۱۲۹	۴۵۹۱	۲۴۸۶۷۶	۳۲۵۶۰۴	۱۱۳۹۴۱	۵۰۹۷۰۰	۶۲۴۶۸۰
$OW_y=2$	۱۲۲۱۸۵	۱۰۶۵۲	۱۳۹۸۲	۸۶۰۰	۲۰۸۹۰	۲۴۴۳۹۲	۲۲۰۹۶۳	۱۲۷۸۵۸	۴۱۰۹۳۶	۴۰۳۴۲۹
$OW_y=3$	۶۹۷۶۲	۲۳۷۹	۳۶۸۸	۳۸۸۱	۲۰۲۵۱	۲۲۶۱۵۶	۱۹۶۴۵۶	۱۵۲۸۰۵	۷۰۸۳۳۵	۴۱۱۴۷۴
$OW_y=4$	۶۹۸۷۵	۱۹۳۲۸	۱۸۱۷۶	۹۶۳۳	۱۳۶۷۸	۱۶۸۹۷۷	۲۳۵۱۳۹	۱۶۹۶۴۹	۴۵۸۱۷۰	۵۵۶۹۸۷
$OW_y=5$	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:

$$SE_x = 1 \text{ mil}, SE_y = -1 \text{ mil}, DE = 1 \text{ mil}, OW_x = 7 \text{ mils}, OW_y = 3 \text{ mils}, k_{ow} = 0.45$$

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

جدول ۶: مقادیر اماس به‌دست‌آمده از روی 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:

$$SE_x = 1 \text{ mil}, SE_y = -1 \text{ mil}, DE = 1 \text{ mil}, OW_x = 7 \text{ mils}, OW_y = 3 \text{ mils}, k_{ow} = 0.45$$

ضریب k	۱	۲	۳	۴	۵	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵
بار = ۰	۴۰۱۷	۱۰۹۸۴	۴۸۸۷	۴۸۸۸	۱۰۵۴۹	۹۰۹۶۳	۲۳۸۳۴۶	۱۳۲۷۹۰	۲۶۲۹۰۱	۸۲۳۷۹
بار = ۳۰ %	۱۹۴۵۳	۸۹۹۱	۸۳۱۶	۱۴۹۱۸	۲۳۸۰۰	۸۱۰۹۸	۱۲۷۰۴۲	۱۵۰۸۷۶	۲۳۳۳۵۹	۳۴۵۱۱
بار = ۶۰ %	۱۳۶۰۳	۹۲۴۸	۹۷۵۶	۲۰۵۹۹	۲۵۲۱۲	۷۲۳۴۰	۱۹۰۴۷۸	۱۴۷۶۰۹	۲۴۸۶۱۹	۲۸۶۳۰۷
بار = ۹۰ %	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 آیامافهای مطلوب بهازای مقادیر مختلف نامتعادلی ولتاژ تغذیه (برحسب درصد) و بهازای k های مختلف در ۹۰ درصد بار نامی و

همچنین پارامترهای خطای زیر:

$$SE_x = 1 \text{ mil}, SE_y = -1 \text{ mil}, DE = 1 \text{ mil}, OW_x = 7 \text{ mils}, OW_y = 3 \text{ mils}, k_{ow} = 0.45$$

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

جدول ۸: مقادیر اماس به دست آمده از روی طیف هیلبرت با استفاده از شماره‌های آیامافهای مطلوب بهازای مقادیر مختلف نامتعادلی ولتاژ تغذیه

(برحسب درصد) و بهازای k های مختلف در ۹۰ درصد بار نامی و همچنین پارامترهای خطای زیر:

$$SE_x = 1 \text{ mil}, SE_y = -1 \text{ mil}, DE = 1 \text{ mil}, OW_x = 7 \text{ mils}, OW_y = 3 \text{ mils}, k_{ow} = 0.45$$

ضریب k	۱	۲	۳	۴	۵	-۱	-۲	-۳	-۴	-۵
نامتعادلی = ۰	۶۹۷۶۲	۲۳۷۹	۳۶۸۸	۳۸۸۱	۲۰۲۵۱	۲۲۶۱۵۶	۱۹۶۴۵۶	۱۵۲۸۰۵	۷۰۸۳۳۵	۴۱۱۴۷۴
نامتعادلی = ۱ %	۸۵۶۷۵	۱۷۱۶۹	۲۱۳۴۱	۱۷۱۹۷	۱۴۳۵۷	۳۲۸۲۷۲	۱۹۱۲۹۹	۱۴۸۵۰۹	۱۶۷۴۳۸	۲۷۱۰۷۸
نامتعادلی = ۲ %	۵۳۲۹۵	۲۹۱۹۹	۲۲۵۱۱	۳۲۳۸۴	۳۲۸۸۲	۳۰۲۲۷۲	۴۸۸۸۸۲	۱۴۰۷۹۵	۲۶۱۵۶۸	۱۵۳۴۶۹
نامتعادلی = ۳ %	۳۹۰۹۰	۳۹۶۴۶	۶۴۶۵۵	۵۴۲۹۲	۳۲۵۹۲	۲۲۲۴۱۶	۴۴۶۰۱۷	۱۴۵۶۸۹	۲۲۲۸۶۹	۱۶۹۱۱۹
نامتعادلی = ۴ %	۶۲۵۴۱	۱۵۸۸۶۵	۱۱۴۰۶۳	۱۵۳۳۸	۳۱۵۷۰	۲۲۲۸۰۴	۲۳۸۲۳۸	۱۴۷۱۹۳	۲۲۸۸۹۷	۱۲۰۸۰۲
نامتعادلی = ۵ %	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 آیامافهای منتجه از تجزیه جریان الکتروموتور M13 بهازای $k = -3$ 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 $k = -3$ 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 آیامافهای منتجه از تجزیه جریان الکتروموتور M14 بهازای $k = -3$ 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	۲۷۱۴۹	۶	۰	۰
۰/۴۳	۰	۰	۳	۵	۱۳۷	۱۱۰۷	۱۸۸۵۹	۳۲۵۰۷۲	۲۳۲۰۶	۳۷۹۴	۰	۱۷۴۷۴	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۴۴	۰	۰	۳	۱۰	۱۶۷	۱۳۱۳	۲۵۴۲۶	۲۸۴۲۷۳	۱۶۵۳۴	۳۱۷۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۴۵	۰	۰	۵	۲۳	۱۳	۱۸۶۴	۳۴۶۳۹	۱۴۷۴۶۵	۲۳۲۳۹	۶۹۳۰	۴۳۲۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۴۶	۰	۰	۳	۲۰	۹۶	۱۰۲۷	۴۷۲۶۹	۱۱۶۹۹۳	۵۵۸۷	۰	۰	۰	۰	۰	۹۶۷۹	۰	۰
۰/۴۷	۰	۰	۷	۴۴	۲۱۲	۱۶۹۰	۵۳۵۰۰	۶۹۷۷۰	۲۵۷۷	۰	۱۹۸۴	۰	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 $k = -3$ 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 آیامافهای منتجه از تجزیه جریان الکتروموتور M15 بهازای $k = -3$ و کلیه 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	۶	۱۰	۷۰	۵۹۰	۱۱۵۴۱	۱۷۹۵۴۳	۲۰۹۹۹	۱۶۳۱	۰	۰	۱۳۸۲	۰	۰	۰	۰
۰/۴۴	۰	۰	۲	۹	۱۸۲	۸۸۳	۱۳۳۹۷	۱۳۸۷۳۶	۲۲۲۶۹	۸۱۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۴۵	۰	۰	۷	۹	۸۷	۱۰۶۳	۱۹۸۳۶	۱۲۵۱۴۸	۹۹۶۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۴۱۴۲	۰
۰/۴۶	۰	۰	۰	۱۰	۱۰۱	۱۶۲۶	۱۸۳۸۰	۵۵۲۶۲	۴۱۰۷	۷۳۵	۰	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 به ازای $k = -3$ 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

- [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 اوجاچی، ناصر یزدان دوست، « تشخیص عیب گردش روغن در یاتاقان لغزشی موتور القایی 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.

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

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

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.

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)

زیر نویس‌ها

¹ Oil Whirl

² Motor Current Signature Analysis (MCSA)

³ Hilbert-Huang Transform (HHT)

⁴ Newkirk

⁵ Taylor

⁶ Hagg