

## تشخیص شکستگی روتور بارها در الکتروموتور فید پمپ 5.5 MW با آنالیز ارتعاشات و آنالیز مشخصه جریان موتورهای الکتریکی

علی پاسداری کیا<sup>\*</sup>، حمید غویان نژاد<sup>\*</sup>، حمیدرضا زاهدی<sup>\*</sup>

ایران، بندرعباس، شرکت مدیریت تولید برق هرمزگان، گروه پایش وضعیت، کد پستی: ۷۹۱۷۱۶۴۹۱۷

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [Pasdari22932@gmail.com](mailto:Pasdari22932@gmail.com)

### چکیده

شکستگی روتور بارها یکی از مشکلات شایع و مهم در الکتروموتورهای قفس سنجابی بوده که می تواند منجر به کاهش کارایی و توقف خط تولید در صنایع گردد. نتایج تجربی نشان می دهد که ترکیب آنالیز ارتعاشات و آنالیز مشخصه جریان الکتریکی می تواند به صورت موثری شکستگی روتور بارها را در مراحل اولیه تشخیص دهد و از افزایش میزان خرابی و هزینه تعمیرات گسترده جلوگیری نماید. در این مقاله به تشریح بررسی ارتعاشات الکتروموتورهای القایی (روتور قفسه سنجابی) با استفاده از پایش وضعیت مبتنی بر آنالیز مشخصه جریان الکتریکی و آنالیز ارتعاشات به صورت همزمان جهت تشخیص شکستگی روتور بارها و میزان شدت آسیب آنها پرداخته می شود. در آنالیز ارتعاشات، وجود ساییداندهای فرکانس گذر قطب در اطراف فرکانس دور و هارمونیک های آن مشاهده گردید که نشان دهنده آسیب در میله های روتور بارها است. پس از تایید تشخیص، الکتروموتور متوقف و بازرسی فیزیکی شد که شکستگی چندین میله روتور بار به طور عینی تأیید گردید. پس از ترمیم اولیه، اگرچه ارتعاشات کاهش یافت، اما علائم فرکانس گذر قطب در طیف ارتعاشی باقی ماند که نشان از ترمیم ناقص روتور بارها بود که پس از تعمیرات اساسی و ترمیم کامل میله های شکسته شده، مشکلات باقی مانده مرتفع گردید.

**کلمات کلیدی:** آنالیز ارتعاشات؛ آنالیز مشخصه جریان الکتریکی؛ روتور بار

### ۱- مقدمه

صنایع مدرن، به ویژه صنایع سنگین مانند نیروگاه های برق، پالایشگاه ها، پتروشیمی ها و صنایع فولاد، به صورت جدایی ناپذیری به سلامت و قابلیت اطمینان ماشین آلات دوار وابسته هستند. موتورهای الکتریکی به عنوان محرک اولیه تجهیزات دوار و رفت و برگشتی (پمپ، فن، دمنده، کمپرسور، سیستم های جابجایی مواد و ...) نقش مهمی در این صنایع دارند. در این مقاله بررسی و تشخیص شکستگی میله های روتور الکتروموتور (Boiler Feed Water Pump) نیروگاه بخار 320 مگاواتی بندرعباس با استفاده از آنالیز مشخصه جریان الکتریکی و آنالیز ارتعاشات ارائه شده است. تشخیص زود هنگام این عیوب، پیش از آنکه به یک توقف اضطراری و تعمیرات پرهزینه منجر شوند، هدف نهایی هر برنامه نگهداری و تعمیرات پیشگویانه است.

## ۲- معرفی تجهیز و تعریف مسئله

فید واتر پمپ بویلر (Boiler Feed Water Pump) (شکل (۱)) یکی از حیاتی‌ترین و حساس‌ترین تجهیزات در یک سیکل قدرت بخار محسوب می‌شود. وظیفه اصلی این پمپ، انتقال آب فشار بالا به دیگ‌های بخار (بویلرها) است تا بخار مورد نیاز برای چرخش توربین‌ها و در نهایت تولید برق فراهم آید. هرگونه اختلال در عملکرد فید پمپ، نه تنها می‌تواند منجر به توقف کامل واحد تولیدی شود، بلکه ممکن است خسارات مالی هنگفت، کاهش شدید بهره‌وری و حتی وقوع حوادث ایمنی جدی را به دنبال داشته باشد. فید پمپ بویلر از چهار بخش اصلی تشکیل شده است: بوستر پمپ و گیربکس بوستر پمپ، الکتروموتور (به عنوان محرک اولیه)، هیدرولیک کاپلینگ (اتصال‌دهنده) و پمپ اصلی (تأمین‌کننده انرژی سیال). خرابی‌های متداولی که این مجموعه را تهدید می‌کند عبارتند از [۱]:

- عدم توازن (Unbalance): توزیع ناهمگن جرم در روتور که منجر به ارتعاشات شدید در فرکانس دورهای کاری می‌شود.
- ناهم‌محوری (Misalignment): عدم همراستایی مجموعه ادوات فید واتر پمپ که باعث ایجاد ارتعاشات شعاعی در فرکانس‌های  $1x, 2x$  دور می‌گردد.
- شل بودن اتصالات (Looseness): شل بودن بلبرینگ‌ها، پایه‌ها یا اتصالات مکانیکی که الگوهای ارتعاشی پیچیده‌ای ایجاد می‌کند.
- خرابی‌های یاتاقان (Bearing Failures): شامل خوردگی، سایش، پیتینگ و خرابی cage که علائم آن در محدوده فرکانس‌های بالا (High-Frequency) ظاهر می‌شود.
- خرابی‌های الکتریکی موتور (Electrical Faults): مانند شکستگی میله‌های قفسه روتور (Broken Rotor Bar)، سیم‌بندی نادرست استاتور و حفره‌های هوایی غیریکنواخت (Eccentricity) که هم بر عملکرد الکتریکی و هم مکانیکی سیستم تأثیر می‌گذارند.

نیروگاه بخار بندرعباس شامل چهار واحد بخار با توان نامی 320 مگاوات می‌باشد که هر واحد بخار نیروگاه بندرعباس شامل سه بویلر فید واتر پمپ است که در شرایط نرمال بهره‌برداری دو پمپ در مدار و یک پمپ در حالت رزرو قرار دارد (توان هر پمپ 50 درصد)

توان مصرفی الکتروموتور فید واتر پمپها 5.5 مگاوات و ولتاژ نامی آن 6 کیلو ولت با برند آنسالدو (ANSALDO) است. انتقال گشتاور در این موتور از دو سمت می‌باشد که از یک سمت به بوستر پمپ و از سمت دیگر به پمپ اصلی کوپل می‌باشد. آب ورودی بوستر پمپ از مخزن دی‌آریتور (هیتر باز سیکل) می‌باشد که فشار خروجی آن 16 بار است و آب ورودی به پمپ اصلی را تأمین می‌کند. پمپ اصلی شامل ۵ مرحله بوده که فشار متغیر تا 200 بار را تأمین می‌کند. دور نامی الکتروموتور 1500 دور بر دقیقه می‌باشد که توسط مولتی‌پلایر و هیدرولیک کاپلینگ متصل به موتور دور پمپ اصلی را تا 6000 دور بر دقیقه افزایش می‌دهد. این الکتروموتور از نوع روتور قفسه‌سنجایی با یاتاقان‌های ژورنال و اتصال ستاره می‌باشد.



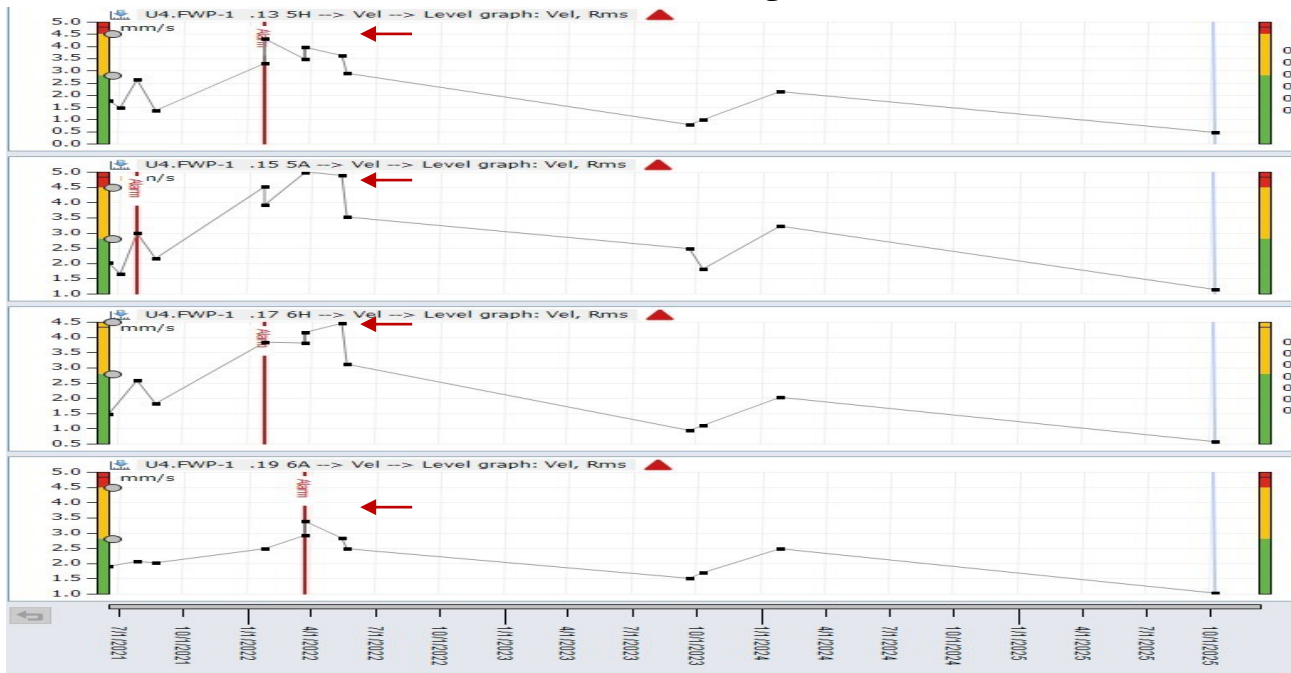
شکل ۱. تصویر مجموعه فیدواتر پمپ (Feed Water Pump)

### ۳- آنالیز ارتعاشات و آنالیز جریان در عیب یابی میله های روتور

استفاده از آنالیز ارتعاشات و آنالیز جریان جهت بررسی سلامت روتور بارها مکمل یکدیگر بوده و اطمینان از صحت نتیجه گیری در آنالیز خرابی را به شکل قابل توجهی افزایش می دهد. در این روش مشخصه های عیوب در هر دو طیف فرکانسی قابل مشاهده و محاسبه می باشد ولی میزان شدت آسیب دیدگی و شکستگی روتور بارها در آنالیز طیف فرکانسی جریان بدست می آید [۲].

#### ۳-۱ مشخصه های شکستگی میله های روتور در آنالیز ارتعاشات

با انجام تست ارتعاشات از فید واتر پمپ مشخص گردید دامنه ارتعاشات موتور همراه با صدای ضربان (Beat)، نسبت به داده برداری های قبلی و فید واتر پمپ های واحد های دیگر افزایش یافته است (شکل (۲)). ارتعاشات با فرکانس دور به همراه هارمونیک های آن، در طیف فرکانسی مشاهده شد. همچنین در اطراف هارمونیک های دور، ساید باندهای گذر قطب (PPF) رویت گردید که نشان دهنده وجود عیب در روتور بارهای الکتروموتور می باشد (شکل (۳)).



شکل ۲. روند افزایش ارتعاشات در زمان بروز شکستگی روتور بارها

جهت انجام محاسبه و تفکیک بهتر فرکانس های گذر قطب ، داده برداری ارتعاشی با رزولوشن بالا گرفته شد . همانگونه که در شکل (۳) مشاهده می شود سایید باند های فرکانس گذر قطب های مدوله شده (PPF) در اطراف فرکانس 1X و هارمونیک های آن با فاصله 0.53HZ قرار گرفته است . محدوده معمول این فرکانس بین 0.3 HZ تا 2 HZ قرار دارد. رابطه محاسبه فرکانس های گذر قطب ( PPF ) [۳]:

$$PPF = P \times \text{Slip Frequency} \quad (۱)$$

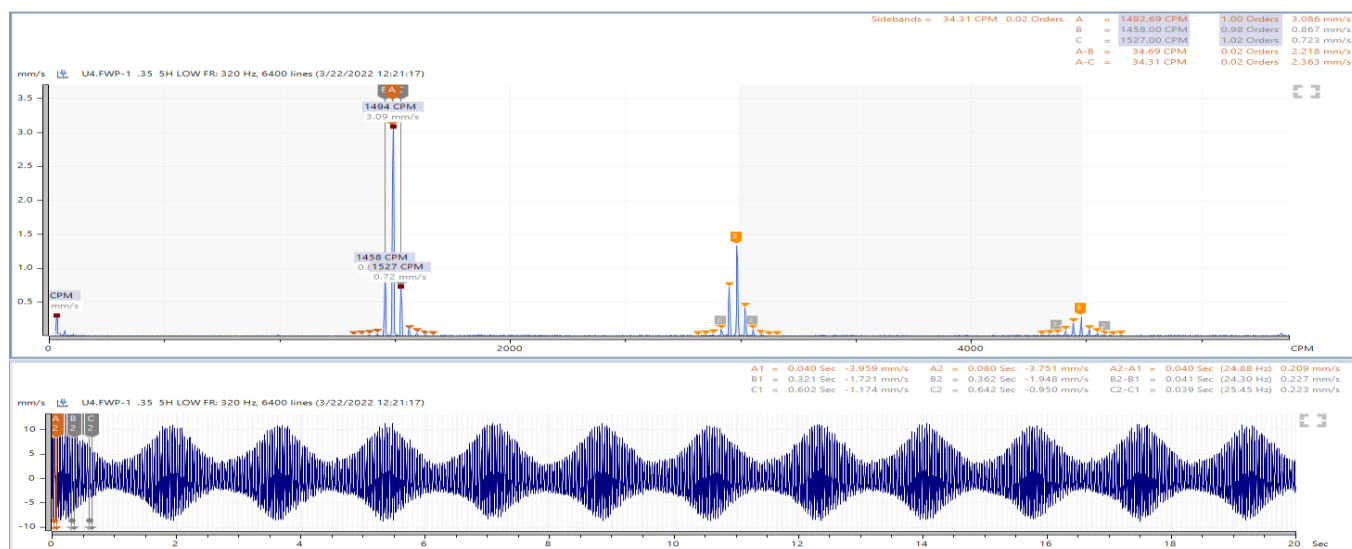
$$\text{Slip Frequency} = \text{Synchronous Speed} - \text{Real Speed} \quad (۲)$$

$$\text{Synchronous Speed} = (2 \times F) / P \quad (۳)$$

P = تعداد قطب های الکتروموتور

F = 50 HZ (فرکانس شبکه)

$$PPF = (1500 - 1492) \times 4 = 32$$



شکل ۳. سایید باندهای فرکانس های گذر قطب ها در اطراف 1x و هارمونیک های آن

### ۲-۳ تشخیص میله های روتور در آنالیز جریان

با توجه به افزایش دامنه ارتعاشات به همراه سایید باند های فرکانس گذر قطب های موتور (PPF) در اطراف هارمونیک های دور، جهت اطمینان و میزان آسیب دیدگی روتور بارها تصمیم به آنالیز جریان گرفته شد . تشخیص عیوب مربوط به میله های روتور در آنالیز جریان با بررسی محتوای ناحیه فرکانس پایین صورت می پذیرد . در این طیف فرکانسی همانگونه که در شکل (۴) مشاهده می شود، سایید باندهای کناری که نشانگر عیب در میله های روتور است ، معادل  $\pm 2SF$  در اطراف فرکانس شبکه  $F=50\text{HZ}$  می باشد. رابطه محاسبه فرکانس های لغزش ( $f_s$ ) [۴]:

$$2SF = 2 \times \text{Slip} \times F \quad (۴)$$

$$\text{Slip} = S = N_s - N_r / N_s \quad (۵)$$

$$N_s = (120 \times F) / P \quad (۶)$$

$N_s =$  (سرعت سنکرون)

$N_r =$  Real Speed (سرعت کارکرد)

$P =$  تعداد قطب های الکتروموتور

$$\text{Slip} = S = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{1500 - 1491}{1500} = 0.006 \quad (7)$$

$$2SF = 2 \times \text{Slip} \times F = 0.6 \quad (8)$$

$$f_{s+} = f + 2sf = f(1 + 2s) = 50 + 0.6 = 50.6 \text{ Hz} \quad (9)$$

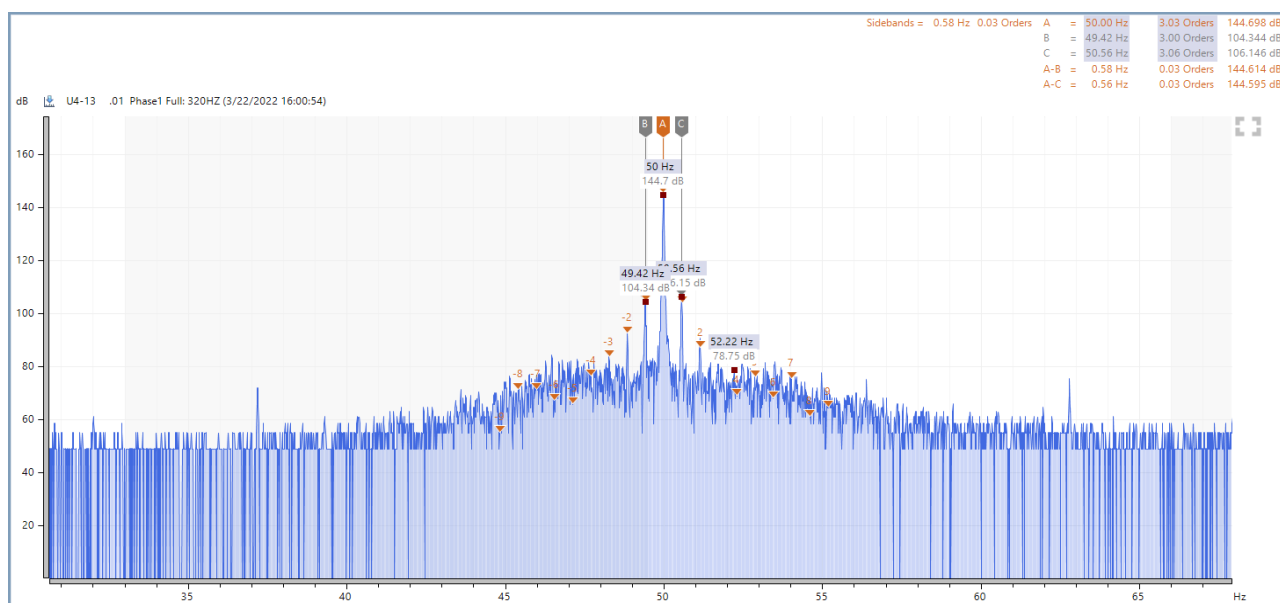
$$f_{s-} = f - 2sf = f(1 - 2s) = 50 - 0.6 = 49.4 \text{ Hz} \quad (10)$$

فرکانس لغزش ( $f_s$ ) یک مفهوم الکتریکی است و ارتباطی با سرعت ندارد و برابر است با فرکانس جریان الکتریکی جاری در میله های روتور که توسط میدان مغناطیسی دوار و جریان داخل میله های قفسه ایجاد می شود و همچنین مفهوم لغزش (Slip) تابع بار موتور بوده و از رابطه  $\text{Slip} = S = \frac{N_s - N_r}{N_s}$  بدست می آید. لغزشی که بدین شکل محاسبه می شود یک پارامتر بدون بعد است و مقدار آن همیشه از صفر بیشتر بوده و تا حدود 0.5 امکان پذیر می باشد.

پس از تطبیق نتایج محاسبه شده سایید باند های مدوله شده ( $f_s$ ) با فرکانس شبکه ( $F$ )، به بررسی میزان شدت خرابی می پردازیم. معیار شدت عیب، نسبت دامنه سایید باندها با پیک اصلی ( $F$  (50HZ) است که بر حسب (db) دسی بل بیان می شود (مقادیر دامنه در شکل (۴)).

$$\text{اختلاف دامنه} = \text{دامنه سایید باند} - \text{دامنه پیک اصلی} = 144.7 - 106.15 = 38.5 \text{ db} \quad (11)$$

این نسبت دامنه (38.5) نشانگر عیب پیشرفته (شکستگی چندین میله روتوربار) است که در جدول شماره (۱) مشخص می باشد.



شکل ۴. پیک 50HZ و سایید باند های آن ( $f_s$ ) در طیف جریان

جدول ۱. میزان آسیب دیدگی میله های روتور با توجه به اختلاف سایه باند ها با پیک اصلی بر اساس دسی بل

چارت میزان آسیب دیدگی میله روتور					
سطح آسیب	دسی بل FL/FP	FL/FP	نسبت درصد FP/FL	وضعیت روتور	توصیه ها
1	60<	1000<	0.1>	عالی	--
2	54-60	501-1000	0.1-0.2	خوب	--
3	48-54	251-501	0.2-0.4	متوسط	داده برداری پرودیگ
4	42-48	126-251	0.4-0.79	وجود آمدن ترک در میله های روتور و یا مقاومت زیاد در اتصالات میله ها یا حلقه انتهایی	کاهش پرپود داده برداری
5	36-42	63-126	0.79-1.58	ترک و یا شکستگی در یک یا دو میله روتور	انجام تست ارتعاش به منظور یافتن منشا عیب
6	30-36	32-63	1.58-3.16	ترک و یا شکستگی در چند میله روتور	تعمیر هرچه سریعتر
7	30>	32>	3.16<	ترک و یا شکستگی در چند میله روتور و حلقه انتهایی	تعمیر و جایگزینی هر چه سریعتر

جدول ۲. پارامترهای مهم در آنالیز جریان و سایه باندهای فرکانس اصلی بر اساس مشخصات اصلی موتور

محاسبه تعداد میله های معیوب روتور	تعداد شیارهای استاتور	تعداد میله های روتور	Motor Current	Speed	Slip	p	Left side band	Right side band
1.67	84	68	605(A)	1491(rpm)	0.006	4	38.5(db)	40.2(db)

#### ۴- ارائه نتایج و نتیجه گیری

وجود فرکانس های گذر قطب و فرکانس لغزش در طیف فرکانسی ارتعاشی و جریان و همچنین اختلاف دامنه 38.5db با پیک اصلی و سایه باندها، نشان دهنده شکستگی چندین عدد از روتور بارها بوده، از همین رو تصمیم به توقف فعالیت تجهیز و انجام تعمیرات گرفته شد. همانگونه که در شکل (۵)، (۶) و (۷) مشاهده می شود شکستگی تعدادی از روتور بارها صحت این روش را تایید می کند. باید توجه داشت عواملی غیر از شکستگی روتور بارها که موجب ایجاد مقاومت بالا در روتور شود می تواند سایه باندهای گذر قطب ها (PPF) را با شدت کمتری ایجاد نماید و در صورت نتیجه گیری اشتباه منجر به هزینه اضافی گردد.

پس از ترمیم روتور بارهای معیوب، روتور در محل نصب و راه اندازی شد. در نتیجه انجام مجدد تست ارتعاشی، ارتعاشات کاهش یافت اما سایه باندهای فرکانس گذر قطب با فرکانس 1x و هارمونیک های دور همچنان با توجه به شکل (۸) وجود داشت. در نتیجه تصمیم به توقف و تعمیر مجدد تجهیز گرفته شد.

در این مرحله با انجام تعمیرات مجدد و ترمیم روتور بارهای شکسته شده، تجهیز مجدداً نصب و راه اندازی گردید. مطابق با شکل (۹) در تست ارتعاشی، ارتعاشات کاهش یافته و سایه باندهای (PPF) و صدای ضربان (بیت) الکتروموتور برطرف گردید. همچنین مطابق با شکل (۱۰) با آنالیز مشخصه های الکتریکی نهایی سایه باندهای مدوله شده با فرکانس شبکه به شکل قابل توجهی کاهش یافت.



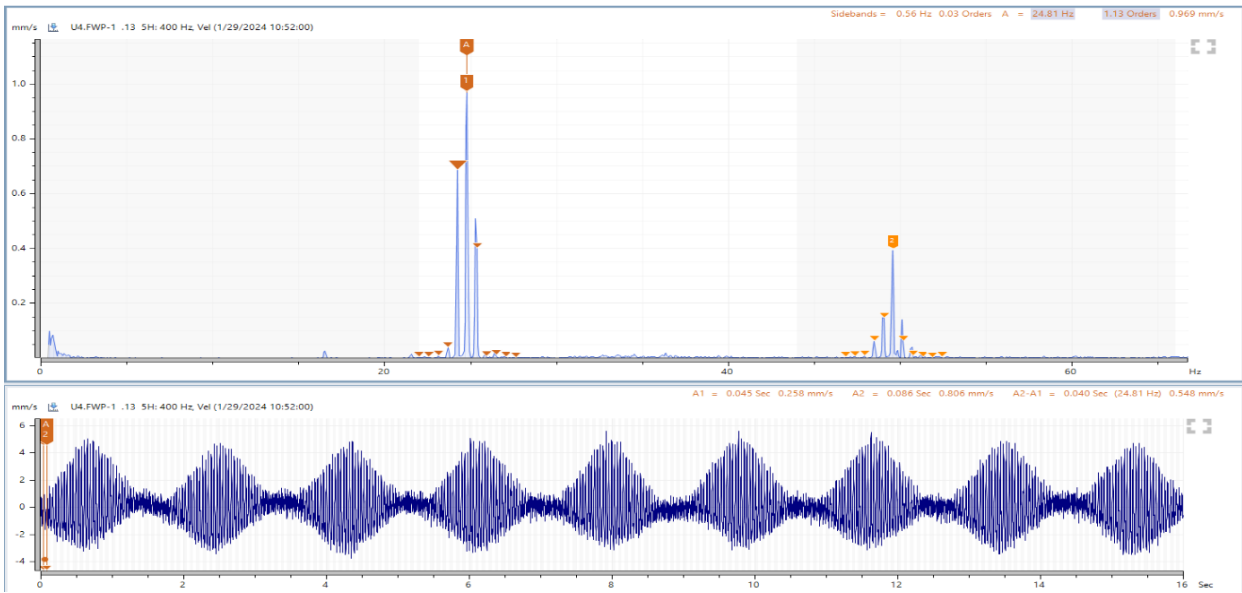
شکل ۵. تصویر شکستگی روتور بار



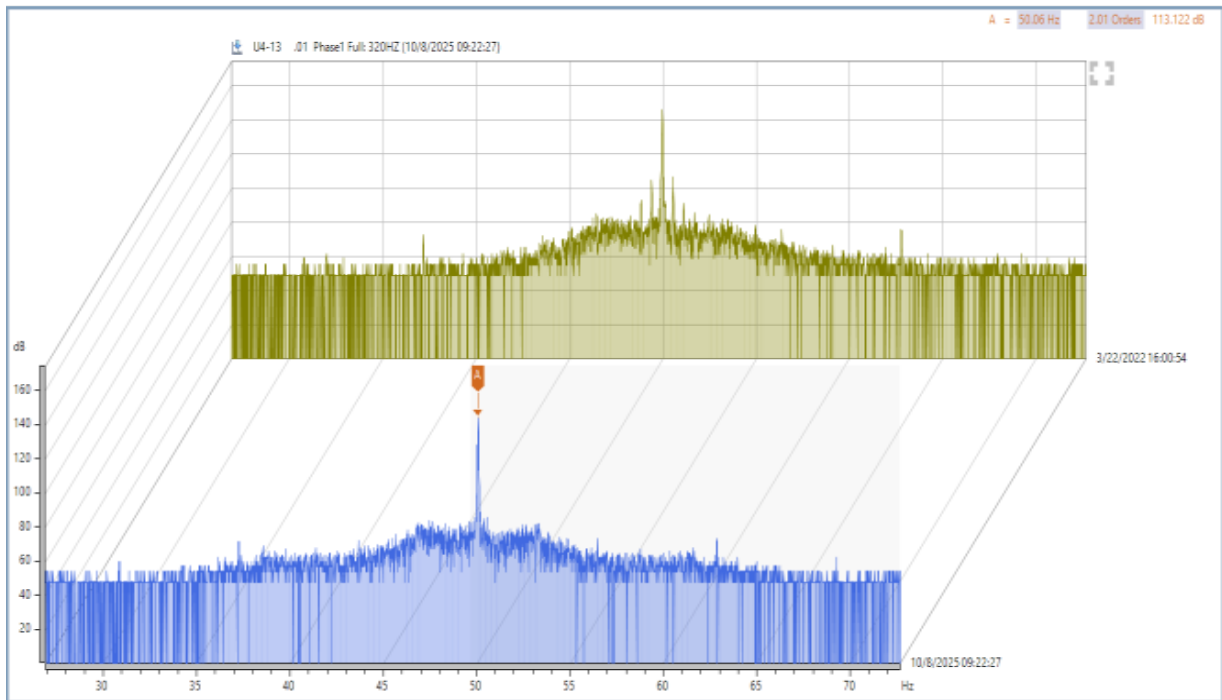
شکل ۶. تصویر شکستگی روتور بار



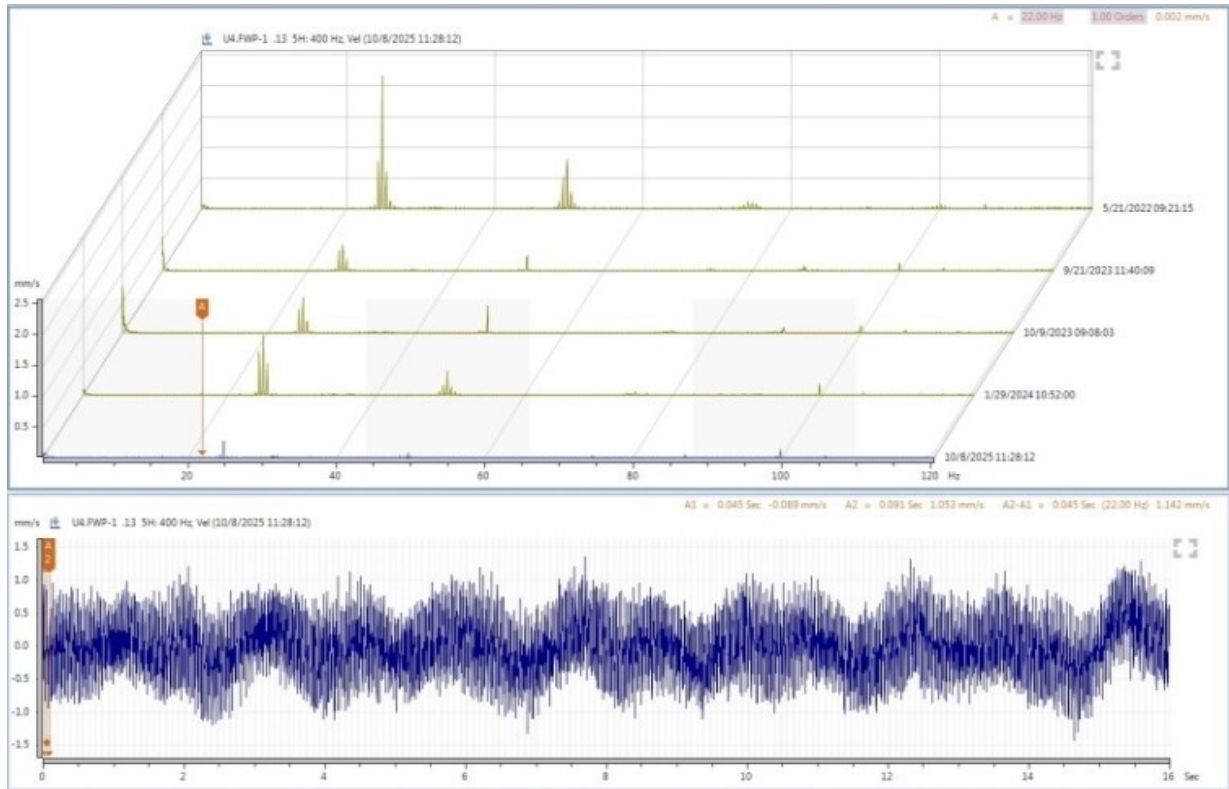
شکل ۷. تصویر شکستگی روتور بار



شکل ۸. کاهش دامنه ارتعاشات به همراه فرکانس گذر قطب در مرحله اول ترمیم میله های روتور



شکل ۹. کاهش سایه باندهای (2sf) در اطراف فرکانس شبکه (50Hz) در منحنی مشخصه جریان الکتریکی بعد از ترمیم میله های روتور بار



شکل ۱۰. کاهش ارتعاشات به همراه سایید باند (PPF) در اطراف فرکانس 1x و هارمونیک های آن بعد از ترمیم میله های روتور بار

## مراجع

1. Dr. Howard W. Penrose, Practical Motor Current Signature Analysis, Taking the Mystery out of MCSA, All Test Pro Corporation – 2003.
2. Dr. Howard W. Penrose, Academic Press, Applications for Motor Current Signature Analysis, All Test Pro Corporation – 2004.
3. James Taylor, The Vibration Analysis Handbook, a *Practical guide for solving rotating machinery problems*, 1994.
4. مهندس عباس صفری، مهندس محمد صالح غلامی، بکارگیری آنالیز اثر جریان در عیب یابی موتورهای قفس سنجابی نیروگاه شازند، پنجمین کنفرانس پایش وضعیت دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۹۸.