

تشخیص خطای ناهمراستایی در سیستم‌های دوار مکانیکی به کمک موتور BLDC

علی بلوریان حداد¹، عباس احسانی سرشت¹، رضا روشن فکر²

1: گروه مهندسی مکانیک دانشکده فنی مهندسی دانشگاه حکیم سبزواری

2: گروه مهندسی برق دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه حکیم سبزواری
سبزوار، ایران

r.roshanfekr@hsu.ac.ir

چکیده

یکی از شایعترین مواردی که باعث ارتعاش در سیستم‌های دوار می‌شود خرابی ناهمراستایی می‌باشد. در نتیجه، این نوع خرابی باید مورد توجه قرار گیرد. در این مطالعه امکان سنجی استفاده از روش MCSA¹ بر روی سیستم‌های دوار فاقد جریان الکتریکی به کمک موتور BLDC برای تشخیص خرابی ناهمراستایی بررسی می‌شود. واضح است که تشخیص ناهمراستایی به روش MCSA فقط در سیستم‌های دواری ممکن است که با استفاده از جریان الکتریکی راه اندازی می‌شوند و یا سیگنال جریان به راحتی در دسترس است. این در حالیست که موتورهای چند مگاواتی با دامنه جریان بالا در صنایع بزرگ کاربرد دارند که استفاده از روش MCSA برای اینگونه موتورها هزینه بر بوده و یا موتورهای دیزلی با سوخت‌های فسیلی وجود دارند که عملاً امکان استفاده از روش MCSA برای اینگونه موتورها وجود ندارد. در این مقاله با کویل کردن موتور BLDC به سیستم دوار، سیگنال جریان موتور BLDC اندازه‌گیری می‌شود و در ادامه تحلیل فرکانسی این سیگنال ارائه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با تحلیل سیگنال دریافتی از موتور BLDC در حوزه فرکانس، می‌توان به خوبی ناهمراستایی بین سیستم دوار و بار مکانیکی را تشخیص داد.

واژه های کلیدی

تشخیص خرابی، خطای ناهمراستایی، سیستم

دوار مکانیکی، موتور MCSA، BLDC

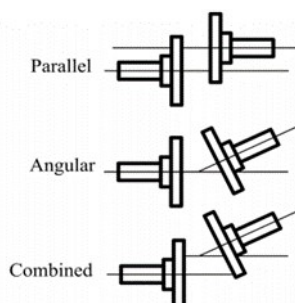
1- مقدمه

1-1- پیش زمینه

سیستم های دوار به دلیل کاربرد وسیع ، بهای ارزان و اتصال آسان در صنایع حساس، نیروگاه‌ها، کارخانه‌های فولاد و پتروشیمی به صورت مداوم و مستمر استفاده می‌شوند. به دلیل این که در بسیاری از موارد، عملکرد این صنایع بزرگ به عملکرد صحیح و مداوم این سیستم‌ها وابسته

است، خروج ناگهانی و بدون برنامه‌ریزی این نوع سیستم‌ها خسارت سنگین مالی به همراه خواهد داشت. لذا پایش وضعیت سیستم‌های دوار و شناسایی خرابی در مراحل اولیه از اهمیت زیادی برخوردار است. سیستم های دوار در معرض انواع خرابی‌های مکانیکی از جمله خرابی یاتاقان‌ها، خارج از مرکز بودن محور، خمیدگی محور، ترک در محور، عدم توازن و ناهمراستایی قرار می‌گیرند. در بین این خرابی‌ها ، خرابی ناهمراستایی دومین خرابی شایع در سیستم‌های دوار بعد از عدم توازن است، به طوری که بیش از 70 % از لرزش سیستم‌های دوار به علت ناهمراستایی است [1]. بنابراین این نوع خرابی باید مورد توجه قرار بگیرد.

در این مطالعه خرابی ناهمراستایی در سیستم های دوار مورد بررسی قرار می‌گیرد. ناهمراستای زمانی اتفاق می افتد که در یک محور بیش از دو یاتاقان وجود داشته باشد. مثل زمانی که دو سیستم از طریق یک کوپلینگ به هم متصل هستند. اگر دو محور نسبت به هم فاصله داشته باشند ناهمراستایی از نوع موازی است و اگر دو محور نسبت به هم زاویه داشته باشند ناهمراستایی از نوع زاویه‌ای است و یا ممکن است ترکیب این دو نوع خطا وجود داشته باشد [2]. شکل 1 شماتیک این سه حالت را نشان می‌دهد [3]. برای جلوگیری از اثرات مخرب ناهمراستایی بر روی یاتاقان‌ها از یلینگ های منعطف و یا یونیورسال استفاده می‌شود. در شکل 2 چهار نوع از کوپلینگ‌های منعطف که در در صنعت به کار می‌رود نشان داده شده است [4].



شکل 1: انواع ناهمراستایی

¹ Motor Current Signature Analysis

خطای مکانیک مانند ناهمراستایی هم کاربرد دارد.] 13

1-3- تحقیق حاضر

تشخیص ناهمراستایی به روش MCSA فقط در سیستم های دواری ممکن است که با استفاده از جریان الکتریکی کار می کنند. این در حالیست که سیستم های دواری در صنایع بزرگ کاربرد دارند که با سوخت های فسیلی و یا هر نوع سوخت دیگری به غیر از جریان الکتریکی راه اندازی می شوند و امکان استفاده از روش MCSA برای اینگونه سیستم ها وجود ندارد. در این مقاله امکان سنجی استفاده از روش MCSA بر روی سیستم های فاقد جریان الکتریکی به کمک موتور BLDC پرداخته می شود. برای این منظور با کوپل کردن یک موتور BLDC به سیستم دوار و اندازه گیری سیگنال جریان از موتور BLDC سعی در تشخیص خرابی ناهمراستایی با استفاده از سیگنال جریان موتور BLDC در سیستم دوار شده است. در مطالعه پیش رو، به منظور ارزیابی این روش موتور BLDC به یک مجموعه محرک با بار مکانیکی متصل شده و نتایج آن را مورد بررسی قرار گرفته است.

2- پیش زمینه تئوری

خرابی ناهمراستایی در موتورهای الکتریکی را می توان با استفاده از اندازه گیری پارامتر جریان استاتور تشخیص داد. این خرابی مشخصه های فرکانسی در اطراف فرکانس اصلی موتور ایجاد می کند. می توان این مشخصه های فرکانسی را برای موتورهای فاقد لغزش از طریق معادله زیر دنبال کرد:

$$(1) \quad f_{rf} = f_e \pm k \frac{f_e}{p}$$

در اینجا f_{rf} مشخصه فرکانس خرابی، f_e فرکانس اصلی، P تعداد قطب ها و k عدد صحیح می باشد [14]. مشخصه های فرکانس خرابی با توجه به عدد صحیح (k) مقادیر متفاوتی دارد که در طیف فرکانسی سیگنال قابل مشاهده است.

2-1- آنالیز فوریه

ریاضیدان فرانسوی ژوزف فوریه نشان داد که هر سیگنال متناوب می تواند از برهم نهی چند سیگنال سینوسی بدست آید. سالها بعد، ایده او به سیگنالهای غیرمتناوب نیز تعمیم داده شد. طرز کار تبدیل فوریه (FT) به این شکل است که هر سیگنال را به یک سری توابع نمایی مختلط با فرکانسهای متفاوت تجزیه می کند. می توان تبدیل فوریه و عکس تبدیل فوریه را به صورت معادله زیر تعریف کرد [15]



شکل 2: چهار نوع کوپلینگ کاربردی در صنعت

1-2- مرور منابع

روش هایی مانند، آنالیز دما، آنالیز ارتعاشات و آنالیز صوت² از جمله روش هایی هستند که برای تشخیص ناهمراستایی در سیستم های دوار به کار گرفته می شوند. میشل و همکاران در یک مطالعه آزمایشگاهی نشان دادند که وجود ناهمراستایی در کوپلینگ سبب می شود تا فرکانس هایی دو برابر و چهار برابر سرعت محور به وجود بیاید [5]. سینها و همکاران با در نظر گرفتن ناهمراستایی، که باعث ایجاد نیروی ثابت در کوپلینگ می شود، تلاش کردند هم عدم توازن و هم ناهمراستایی را با استفاده از سیگنال ارتعاشات در شرایط ناپایا تشخیص دهند [6]. فراندو و همکاران قابلیت تشخیص ناهمراستایی زاویه ای با استفاده از تکنیک آکوستیک امپرشو آنالیز ارتعاشات در شرایط غیر ایستا را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند تکنیک آکوستیک امپرشو همراه با تجزیه و تحلیل انولوپ به راحتی قادر به تشخیص ناهمراستایی زاویه ای است [7]. ژون و مارانگونی با استخراج معادلات حرکت سیستم مکانیکی در حالت ناهمراستایی و عدم توازن به این نتیجه رسیده اند که روش تجزیه اجزای مودی برای حل معادلات حرکت سیستم مکانیکی غیرهمگن، وابسته به سرعت است [8]. پایش وضعیت با استفاده از آنالیز جریان استاتور (MCSA) نیز به تازگی توسعه یافته است. سیگنال های جریان به دلیل دسترسی آسان، سنسورهای ارزان قیمت و تاثیر پذیری کم از شرایط محیطی مورد توجه محققان قرار گرفته اند. این تکنیک اجازه می دهد شرایط سیستم را از طریق سنسورهای جریان مورد بررسی قرار گیرد همچنین این روش نسبت به روش های دیگر بسیار سریع و مقرون به صرفه تر است [9]. نویسندگان زیادی تشخیص خرابی مکانیکی به روش MCSA را مورد مطالعه و بررسی قرار داده اند و نتایج قابل قبولی گرفته اند. [10-12]. داویو و همکاران با استفاده از سیگنال جریان گرفته شده از موتور و تحلیل زمان فرکانس به این نتیجه رسیده اند که تحلیل زمان فرکانس نه تنها برای خرابی الکتریکی مفید است بلکه برای

² Acoustic Emission

شکل 4: (a) سیگنال جریان موتور محرک، (b) سیگنال جریان موتور BLDC

4- تحلیل نتایج آزمایشگاهی

در شکل 4 حوزه زمان سیگنال جریان BLDC با حوزه زمان سیگنال جریان موتور القایی مقایسه شده است همانطور که واضح است که به دلیل بیشتر بودن تعداد قطب های موتور BLDC، در سرعت ثابت، فرکانس اصلی آن نیز بیشتر است. می توان فرکانس اصلی موتور BLDC را از معادله زیر بدست آورد:

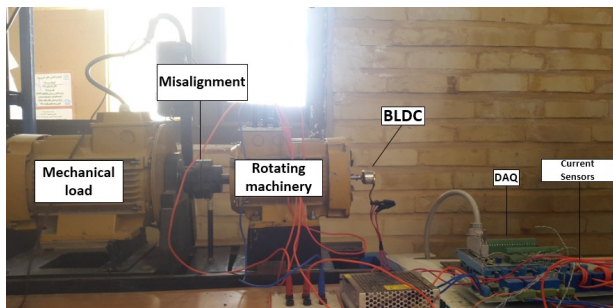
$$(4) \quad f_e(\text{HZ}) = \frac{P \times V}{120}$$

سرعت دوران موتور القایی $v = 2998 \text{ rpm}$ و همین سرعت به موتور BLDC منتقل می شود و با توجه به 14 قطبی بودن BLDC فرکانس اصلی موتور BLDC $f_e = 349.7$ می باشد. می توان مشخصه های فرکانسی خطای ناهمراستایی را با توجه به رابطه (1) در سیگنال BLDC در جدول 1 مشاهده کرد.

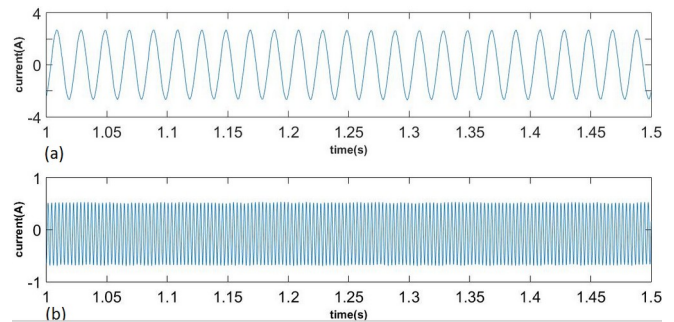
جدول 1: مشخصه های فرکانسی خراب

k	f_{rf}	k	f_{rf}
1-	298.4 5	1	397.9 4
2-	248.7 1	2	447.6 8
3-	198.9 7	3	497.4 2
4-	149.2 2	4	547.1 7

در شکل 5 حوزه فرکانس سیگنال موتور BLDC در حالت سالم نشان می دهد و می توان فرکانس اصلی موتور BLDC را مشاهده کرد. در شکل 6 و 7 نمودار حوزه فرکانس سیگنال جریان BLDC در حالت خرابی ناهمراستایی مشاهده می شود. هارمونیک های 4 تا 4- در شکل نشان داده شده اند اما در بین این هارمونیک ها در حالت خرابی سطح



یک، هارمونیک های $k=1,1$ به ترتیب با دامنه 55- و 47- و در خرابی سطح دو، هارمونیک های $k=1,1$ به ترتیب با دامنه 53- و 45- در بین مشخصه های



$$(2) \quad X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) * e^{-i\omega t} dt$$

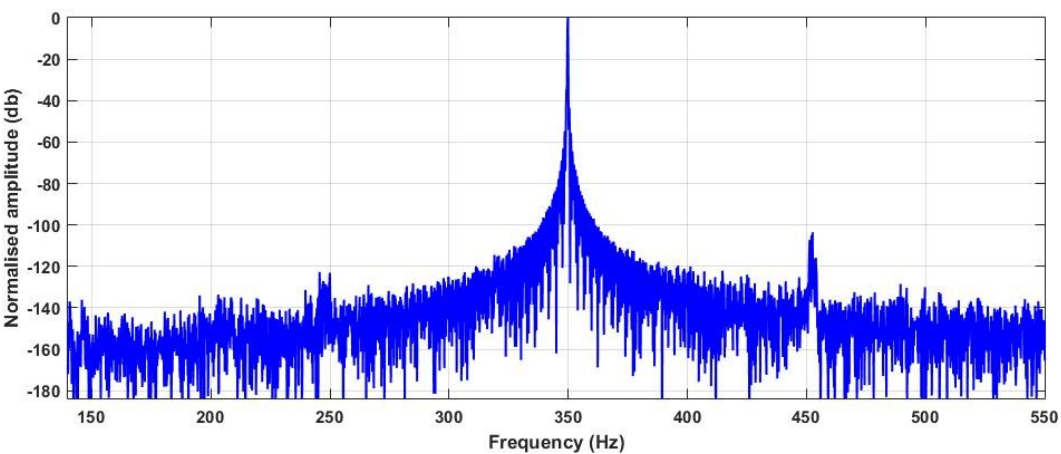
$$(3) \quad x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) * e^{i\omega t} df$$

در معادله فوق، t نشان دهنده زمان، f بیانگر فرکانس، x نشان دهنده سیگنال مورد نظر و X تبدیل یافته آن است. در این معادله x سیگنال در بعد زمان و X سیگنال در بعد فرکانس می باشد. همانطور که مشخص است انتگرال تبدیل فوریه، مربوط به تمام زمانها از منفی بینهایت تا مثبت بینهایت می باشد. در حقیقت FFT الگوریتمی برای حل تبدیل فوریه در کمترین زمان ممکن است.

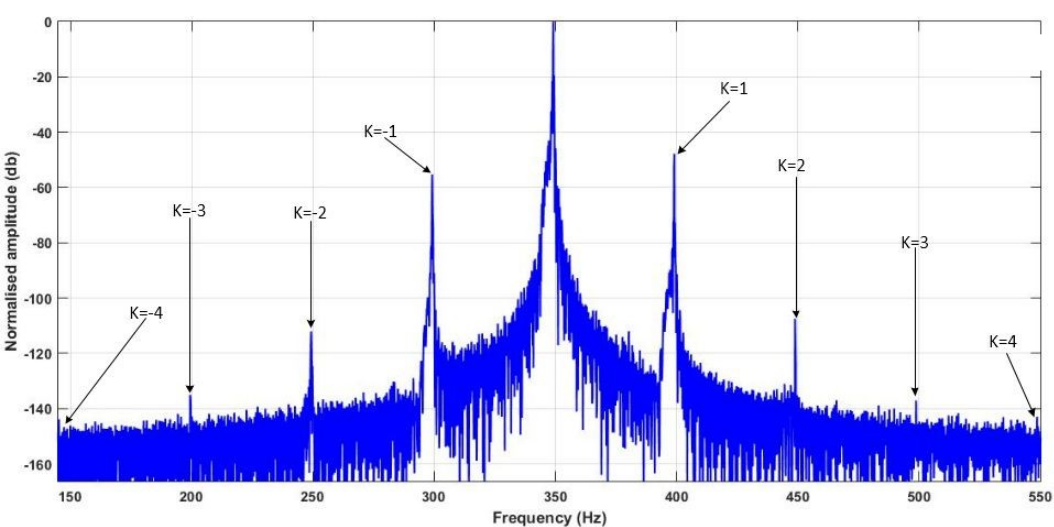
3- مجموعه آزمایشگاهی

میز آزمایشگاهی استفاده شده در این مطالعه در شکل 3 نشان داده شده است. مجموعه آزمایشگاهی شامل سیستم بار مکانیکی، موتور BLDC، موتور القایی، سنسورهای جریان و کارت نمونه برداری می باشد. با توجه به محدودیت های آزمایشگاهی، موتور القایی موجود در شکل 3، سیستم مکانیکی دوار فرض شده است. موتور القایی قفس سنجایی سه فاز با پارامترهای الکتریکی 1.1 وات، 50 هرتز، اتصال ستاره، جریان نامی 2.7A، 2 قطبی و 3000 دور بر دقیقه می باشد.

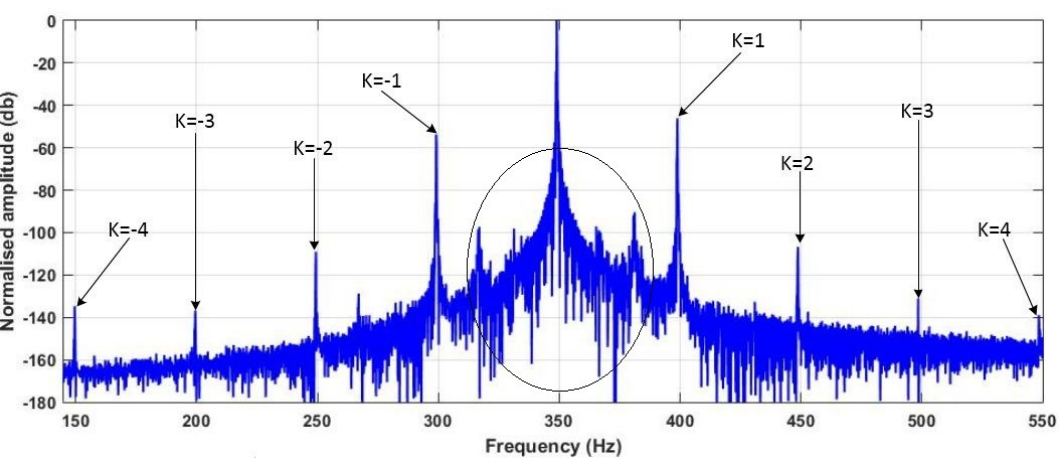
موتور القایی به سیستم بار مکانیکی به وسیله کوپلینگ پنجه ای متصل شده است. از طرف دیگر یک موتور 14 BLDC قطب با ابعاد کوچک به موتور القایی کوپل است و به طور همزمان به وسیله سنسور جریان از سه فاز موتور القایی و سه فاز موتور BLDC در دو حالت همراستایی و خرابی ناهمراستایی نمونه جریان اندازه گیری می شود و ناهمراستایی از نوع موازی انتخاب شده است. ناهمراستای ایجاد شده در دو سطح یک و دو ایجاد شده است با قرار دادن یک ورقه فلزی یک میلی متر در دو طرف موتور القایی برای سطح یک و با قرار دادن دو ورقه فلزی یک میلی متری در دو طرف پایه موتور القایی، سطح دو ناهمراستایی ایجاد می شود. واضح است که شدت ناهمراستایی لول دو بیشتر از لول یک است.



فرکانسی خطا، بیشترین
تفکیک پذیری نسبت به حالت
سالم دارا می باشند.



لایز شده سیگنال جریان BLDC در حالت سالم



شکل 7: طیف فرکانسی نرمالایز شده سیگنال جریان BLDC

theoretical model and analysis. Journal of sound and vibration, 176(5), pp.663-679.

- [9] Verucchi, C., Bossio, J., Bossio, G. and Acosta, G., 2016. Misalignment detection in induction motors with flexible coupling by means of estimated torque analysis and MCSA. Mechanical Systems and Signal Processing, 80, pp.570-581.
- [10] Chaudhury, S.B., Sengupta, M. and Mukherjee, K., 2013. Experimental study of induction motor misalignment and its online detection through data fusion. IET Electric Power Applications, 7(1), pp.58-67.
- [11] Schoen, R.R., Habetler, T.G., Kamran, F. and Bartfield, R.G., 1995. Motor bearing damage detection using stator current monitoring. *IEEE transactions on industry applications*, 31(6), pp.1274-1279.
- [12] Jung, J., Park, Y., Lee, S.B., Cho, C.H., Kim, K., Wiedenbrug, E.J. and Teska, M., 2017. Monitoring journal-bearing faults: making use of motor current signature analysis for induction motors. *IEEE Industry Applications Magazine*, 23(4), pp.12-21.
- [13] Antonino-Daviu J, Popaleny P. Detection of induction motor coupling unbalanced and misalignment via advanced transient current signature analysis. In 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM) 2018 Sep 3 (pp. 2359-2364). IEEE.
- [14] Rajagopalan, S., Aller, J.M., Restrepo, J.A., Habetler, T.G. and Harley, R.G., 2006. Detection of rotor faults in brushless DC motors operating under nonstationary conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42(6), pp.1464-1477.
- [15] Brigham, E.O. and Morrow, R.E., 1967. The fast Fourier transform. *IEEE spectrum*, 4(12), pp.63-70

[1]

[2]

[3]

4- نتیجه گیری

امروزه در بسیاری از صنایع و کارخانه ها سیستم های دواری وجود دارد که به صورت مداوم و مستمر در حال استفاده هستند و خرابی هر کدام از این سیستم ها می تواند خسارات جبران ناپذیری در پی داشته باشد. بنابراین پایش وضعیت اینگونه سیستم ها از اهمیت زیادی برخوردار است. مقرون به صرفه ترین روش برای پایش وضعیت سیستم های دوار، روش MCSA می باشد. اما این روش را نمی توان برای تمامی سیستم های دوار پیاده سازی کرد زیرا اولاً موتورهای با مقیاس بزرگ دارای دامنه جریان بسیار بالا هستند و نیازمند سنسورهای جریان مقاوم و گران قیمت می باشند ثانیاً سیستم های دواری در بعضی از صنایع کاربرد دارند که با جریان الکتریکی راه اندازی نمی شوند و عملاً استفاده از روش MCSA امکان پذیر نخواهد بود. در این آزمایش یک موتور BLDC با ابعاد کوچک را به سیستم دوار کوپل شد و جریان موتور BLDC اندازه گیری شد. همانطور که در شکل 6 و 7 نشان داده شده است می توان خرابی ناهمراستایی بین سیستم دوار و بار مکانیکی را از طریق حوزه فرکانس سیگنال موتور BLDC تشخیص داد.

5- مراجع

- [1] Verma, A.K., Sarangi, S. and Kolekar, M.H., 2013. Misalignment fault detection in induction motor using rotor shaft vibration and stator current signature analysis. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 6(5-6), pp.422-436.
- [2] Randall, R.B., 2011. Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications. John Wiley & Sons.
- [3] Bossio, J.M., Bossio, G.R. and De Angelo, C.H., 2009, November. Angular misalignment in induction motors with flexible coupling. In 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (pp. 1033-1038). IEEE.
- [4] Piotrowski, J., 2006. Shaft alignment handbook. Crc Press..
- [5] Dewell, D.L. and Mitchell, L.D., 1984. Detection of a misaligned disk coupling using spectrum analysis.
- [6] Sinha, J.K., Lees, A.W. and Friswell, M.I., 2004. Estimating unbalance and misalignment of a flexible rotating machine from a single run-down. *Journal of Sound and Vibration*, 272(3-5), pp.967-989.
- [7] Chacon, J.L.F., Andicoberry, E.A., Kappatos, V., Asfis, G., Gan, T.H. and Balachandran, W., 2014. Shaft angular misalignment detection using acoustic emission. *Applied acoustics*, 85, pp.12-22..
- [8] Xu, M. and Marangoni, R.D., 1994. Vibration analysis of a motor-flexible coupling-rotor system subject to misalignment and unbalance, part I: