

Asenkron Motorlarda Titreşim Tabanlı Mekanik Arızaların Tespitinde Hızla İlişkili Frekansların Rolü

The Role of Speed-Related Frequencies in Vibration-Based Mechanical Faults Detection in Induction Motor

G. Nur Ayas¹, Taner Goktas¹, Muslum Arkan²

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
Dokuz Eylül Üniversitesi
gurcunur.ayas@ogr.edu.edu.tr, taner.goktas@deu.edu.tr

²Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
İnönü Üniversitesi
muslum.arkan@inonu.edu.tr

Özet

Asenkron motorlarda olası arızalar motorun hem dinamik performansını etkilemekte hem de bu motorların bağlı olduğu sistemlerde toplam verimi düşürebilmektedir. Bu yüzden olabilecek arızaların erken ve doğru bir şekilde tespit edilmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada asenkron motorlarda mekanik arızaların titreşim tabanlı analizler ile tespit edilmesinde mekanik hıza bağlı frekansların rolü detaylıca incelenmiştir. Bu amaçla bir test düzeneği kurulmuş ve farklı mekaniksel arızalar oluşturularak 3-eksende titreşim bilgilerinin frekans spektrumları farklı yüklenme koşullarında incelenmiştir. Deneyisel sonuçlara göre dönme hızı frekans ile ilişkili sinyallerde (f_r (1X) ve $2f_r$ (2X)) ve bu sinyallerin yan bantlarında ($2f_r+2sf_s$) etkin ve güvenilir arıza tespiti yapılabildiği görülmüştür.

Abstract

In induction motors, possible faults can affect the dynamic performance of the motor and reduce the overall efficiency of the motor-driven systems. Therefore, it is crucial to detect potential faults early and accurately. This study investigates the role of speed-related frequencies in vibration-based detection of mechanical faults in induction motors. For this purpose, a test setup is built, and different mechanical faults are created to analyze the frequency spectra of 3-axis vibration data under different torque profiles. According to the experimental results, effective and reliable fault detection can be provided through frequency-related signals (f_r (1X) and $2f_r$ (2X)) and their sidebands ($2f_r+2sf_s$).

1. Giriş

Asenkron motorlar sanayide dayanıklı ve az bakım gerektirdiği için sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle üretim ve operasyonel sanayide üreticiden son kullanıcıya kadar yoğun bir kullanım alanı vardır. Dolayısıyla bu tip motorların sürekli olarak çalışabiliyor olması ve dinamik performanslarının yüksek olması

oldukça önemlidir. Asenkron motorlar her ne kadar dayanıklı ve az bakım gerektiren bir yapıya sahip olsa da motorun çalışma koşulları, elektriksel zorlanmalar ve çalışma sürelerine bağlı olarak elektriksel ve mekaniksel arızalara maruz kalmaktadır [1]. Elektriksel arızalar temel olarak stator kısa devre arızası, kırık rotor çubuk arızası iken mekaniksel arızalar eksantriklik (eccentricity), hizasızlık (misalignment), gevşeklik (looseness) ve total ayak (soft foot) gibi arızalardır.

Meydana gelebilecek arızaların erkenden tespit edilememesi motorun dinamik performansını etkilemekte ve ayrıca olası bir duruş durumunda tüm sistemin üretim/tüketim verimini de düşürmektedir. Bu durum özellikle sanayide önemli maddi kayıplara da yol açmaktadır. Bu yüzden bu tip arızaların erken ve doğru bir şekilde tespit edilmesi oldukça önemlidir. Ayrıca hizasızlık ve total ayak gibi bazı arızaların erken bir şekilde tespit edilememesi, eksantriklik, bilye (bearing) ve dişli kutusu arızalarının da oluşumuna yol açabilmektedir. Yapılan araştırmalara göre asenkron motorlarda, mekaniksel arızalar toplam arızaların yaklaşık %53'ünü oluşturmaktadır [2], [3]. Bu arızalar genellikle stator kütlesinin veya rotor şaftının mekaniksel zorlanmasından dolayı meydana gelmektedir. Asenkron motorlarda arıza meydana gelirse yük momentinde dalgalanmalar oluşacaktır. Bu durum motorun verimini ve dinamik performansını etkilemekte ve aynı zamanda elektriksel tüketim değerlerini de artırmaktadır.

Mekanik arızaların tespit edilebilmesi için literatürde birçok çalışma ve uygulama bulunmaktadır. Kimyasal, sıcaklık analizleri, stator akımının analizi (MCSA-Motor current signature analysis), kamera tabanlı analizler ile yapısal titreşimlerin gözlenmesi, motor etrafındaki ve içerisindeki manyetik akı tabanlı analizler ve titreşim tabanlı analizler bunlardan başlıcalarıdır [4]. Araştırmacılar bu tip analizler ile hem elektriksel arızaları hem de mekaniksel arızaları güvenilir ve etkin bir biçimde tespit etmeye çalışmaktadır. Özellikle son yıllarda elektriksel arızaların tespitinde motor akım imza analizi ve kaçak akı tabanlı analizler tercih edilse de mekaniksel arızaların tespitinde titreşim tabanlı analizler sanayide oldukça yoğun kullanılmaktadır. Dünya genelinde birçok firmanın

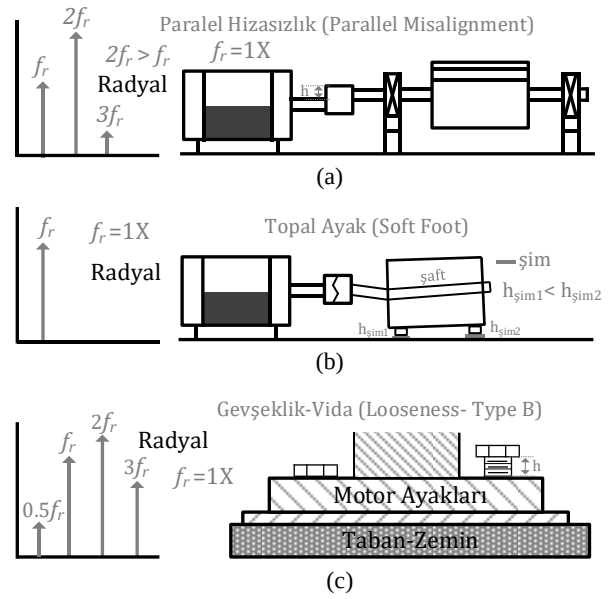
geliştirdiği içerisinde titreşim, akı, ultrasound ve sıcaklık gibi sensörlerin olduğu IoT tabanlı akıllı ürünler [4], [5] ve arayüzleri sayesinde olası arızalar erken ve doğru bir şekilde tespit edilmeye çalışılmakta ve böylece motorun sağlık durumunun gözlenmesi sağlanmaktadır. Yazarların tecrübesi ve yapılan sanayi araştırmaları mekanik arızaların tespiti için titreşim tabanlı yöntemlerin kolay ölçülebilir ve güvenilir olmaları sebebiyle sıklıkla kullanıldığını göstermektedir [6].

Titreşim tabanlı analizler genellikle motorun üzerine koyulan bir ivmeölçer ile yapılmaktadır. Son yıllarda MEMs tabanlı sensörlerin geliştirilmesi ile birlikte hem ucuz hem de detaylı titreşim verisi motor üzerinde farklı çalışma koşullarında alınabilmektedir. Özellikle 3-eksenli titreşim analizleri ile farklı tür arızaların her ekseninde davranışları hem zaman ekseninde hem de frekans ekseninde izlenebilmektedir [7], [8]. Literatürde uzun yıllar boyunca olası bir mekanik arıza dönme frekansı f_r (1X) ve/veya katları frekanslar kullanılarak tespit edilebilmektedir. Asenkron motorlarda paralel hizasızlık arızası durumunda üç eksende titreşim spektrumları incelenmiş ve özellikle $2f_r$, $3f_r$ ve $4f_r$ sinyallerinin daha etkin olduğu gözlemlenmiştir [9]. Ayrıca paralel hizasızlık arızası durumunda f_r sinyalinin de etkili olduğu görülmüştür [10]. Ayrıca dengesizlik, hizasızlık, gevşeklik ve eksantriklik arızalarını ayırt etmek için kapasitif tabanlı MEMs sensörler ile titreşim analizleri yapılmıştır [11]. Belirtilen arızalarda f_r (1X) sinyalinde artış gözlemlenirken, $2f_r$ (2X) sinyali artışının dengesizlik ve hizasızlık durumunda olduğu belirtilmiştir. Mekanik gevşeklik arızasının titreşim spektrumlarında $f_r/2$ ve $f_r/3$ gibi alt frekanslar kullanılarak tespit edilebildiği gözlemlenmiştir [12]. Gevşeklik arızası durumunda f_r , $2f_r$, $3f_r$ harmoniklerinin de arttığı belirtilmiştir [13], [14]. Çeşitli titreşim ölçer sensörleri [15], [16] kullanılarak da elektrik motorlarında olası birçok arıza çeşidi tespit edilebilmektedir.

Bu çalışmada ise asenkron motorlarda titreşim tabanlı mekaniksel arızaların tespitinde hız ile ilişkili frekansların rolü detaylıca incelenmiştir. Bu amaçla etkin bir deneysel devre düzeneği oluşturulmuş ve bu düzende 2.2 kW'lık bir asenkron motorda paralel hizasızlık (*parallel misalignment*), gevşeklik-vida (*looseness -Type B*), topal ayak (*soft foot*) arızaları yapısal olarak oluşturulmuştur. Ayrıca titreşim verilerinin motor üzerinden toplanması için ADXL335 (4 mm x 4 mm) 3-eksenli (eksenel-x, yatay-y ve düşey-z) MEMs sensör motorun üzerine yerleştirilmiş ve her arıza için farklı yüklenme profillerinde karakteristik sinyaller karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Farklı eksenlerde karakteristik sinyaller belirlenmiş ve mekaniksel arızaların tespiti etkin ve güvenilir olarak yapılmıştır.

2. Mekaniksel Arızalar ve Karakteristik Arıza Sinyalleri

Hizasızlık (*Misalignment*) arızası motor şaftı ile yük şaft eksenlerinin düzgün bir şekilde hizalanmaması, motor tabanının kayması ve sıcaklık artışları gibi durumlardan dolayı meydana gelmektedir. Temelde paralel ve açılmal olmak üzere iki çeşit hizasızlık arızası bulunmaktadır. Paralel hizasızlık, her bir şaftın bağlı olduğu uç kısımlarda hem kesme hem de bükülme momenti oluşmasına sebep olmaktadır. Paralel hizasızlık arızası durumunda f_r , $2f_r$, $3f_r$ gibi sinyaller yatay titreşim spektrumlarında görülür. Şekil 1a'da görüldüğü gibi bu tip bir arızada genellikle yatay ekseninde $2f_r$ sinyalinin genliği f_r sinyalinden büyüktür [17]. Diğer harmoniklerin varlığı kuplaj tipine ve arıza şiddetine bağlı olarak değişmektedir. Bu harmoniklerin varlığı ve genliği arıza şiddetine bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 1: Mekanik arızaların yapısı ve karakteristik sinyaller
a) Paralel Hizasızlık b) Topal Ayak c) Gevşeklik-Vida

Bu harmonikler arıza şiddetine bağlı olarak düşey ekseninde de görülebilmektedir.

$$f_{ariza_hizasizlik} = radyal \{f_r, 2f_r, baskin, 3f_r, \dots\} \\ = düşey \{f_r, 2f_r, 3f_r, \dots\} \quad (1)$$

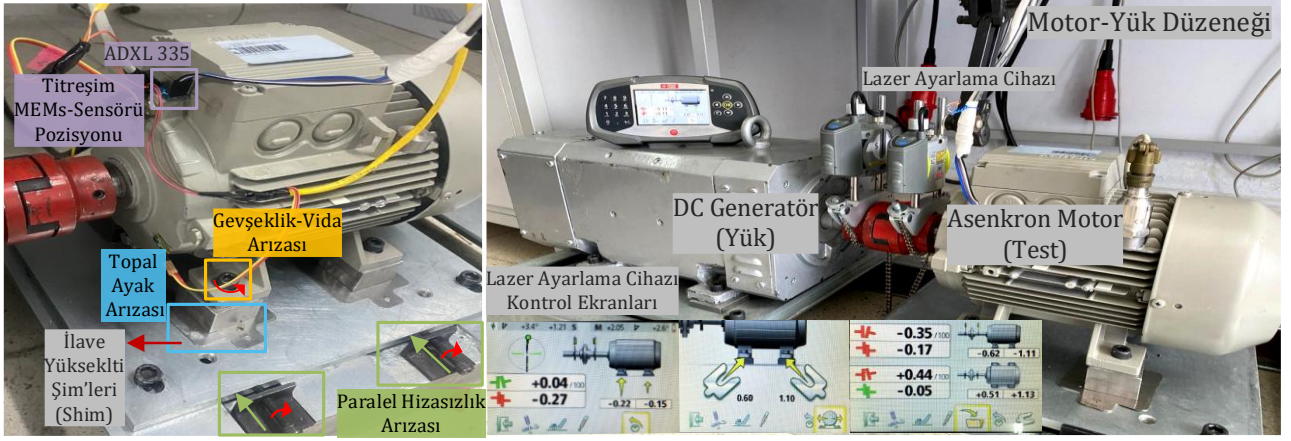
Topal ayak (*Soft Foot*) arızası temel olarak makinenin ayaklarının eşit bir şekilde zemine monte edilmemesinden dolayı kaynaklanmaktadır. Ayrıca zeminin yeterince düz olmaması, cıvata kaynaklı sorunlar, montaj ayaklarının üretim aşamasında farklı yükseklikte olması ve motor montaj ayaklarının altına koyulan şimlerin eksik olmasından dolayı meydana gelebilmektedir (Bkz. Şekil 1b). Bu arıza aynı zamanda şaft hizalama sorunlarına ve motor bileşimlerinin aşınmasına sebep olabilmektedir. Bu arızaları önlemek için lazer hizalama cihazları ile birlikte uygun ek yükselti blokları (şim-shim) kullanılmaktadır. Titreşim frekansı incelendiğinde genellikle f_r (1X) frekansında görülmektedir [18].

$$f_{ariza_topal_ayak} = radyal \{f_r, \dots\} \quad (2)$$

Gevşeklik (*Looseness*) arızaları makinenin bağlı olduğu zeminlerdeki harç sorunları, beton tabanlarında çatlaklar oluşması gibi sıkıntılardan dolayı meydana gelebilmektedir. Ayrıca, makinenin montajı sırasında kullanılan vidaların zamanla makine titreşimine bağlı olarak gevşemesi Gevşeklik-Vida (*Looseness-Type B*) arızasına sebep olmaktadır (Bkz. Şekil 1c). Eğer makinede gevşek vida arızası varsa makine arızanın meydana geldiği ayak bağlantı noktası yönünde (genellikle yatay) dönme hızında serbest bir titreşim meydana getirecektir. Eğer bir makinenin esnek montaj ayakları varsa, meydana gelebilecek titreşimlerin her zaman yatay ekseninde daha büyük olduğu bilinmektedir. Gevşeklik-Vida (*Looseness Type-B*) arızası gevşekliğin olduğu yönde titreşim spektrumunda $0.5f_r$, f_r , $2f_r$, $3f_r$ gibi sinyallerin görülmesine sebep olur [18].

$$f_{ariza_gevseklik} = radyal \{0.5f_r, f_r, 2f_r, 3f_r\} \quad (3)$$

Görüldüğü gibi asenkron motorlarda meydana gelen mekaniksel arızalar arızanın tipine ve şiddetine bağlı olarak titreşim spektrumlarında genellikle radyal (yatay) ekseninde f_r , $2f_r$ ve $3f_r$ gibi frekanslar kullanılarak tespit edilebilmektedir.



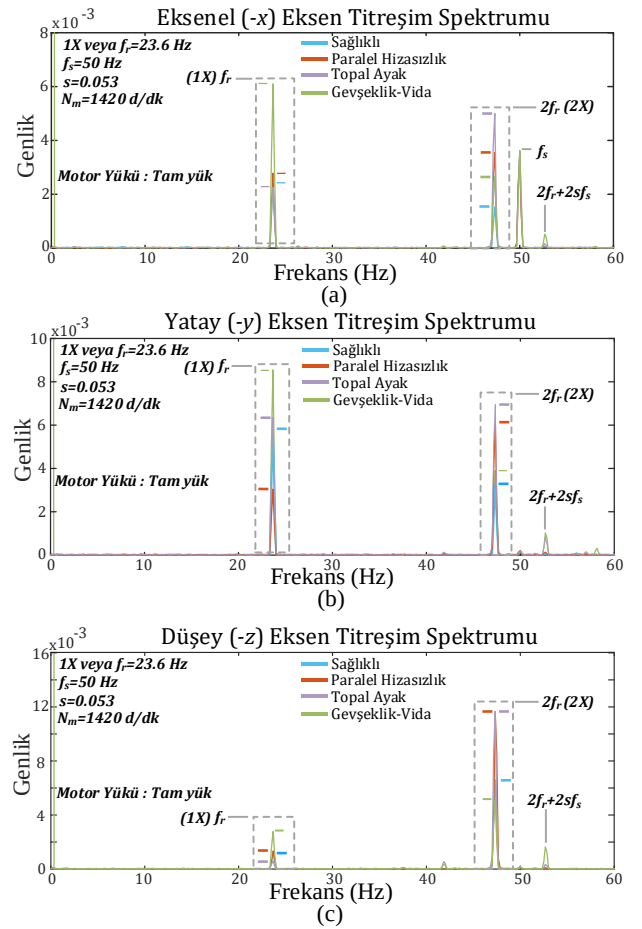
Şekil 2: Deneyel devre düzeneği ve mekaniksel arızaların oluşturulması

3. Deneyel Devre Düzeneği ve Sonuçlar

Asenkron motorlarda mekaniksel arızaların oluşturulması ve titreşim tabanlı arıza sinyallerinin rolünün belirlenmesi için asenkron motor ve DC jeneratörden oluşan bir deneyel devre düzeneği oluşturulmuştur. Test motoru olarak kullanılan asenkron motor 2.2 kW gücünde, 50 Hz, 4 kutuplu, 1420 d/dk hızındadır. Bu motorun farklı yük profillerinde yüklenmesi için bir adet DC jeneratör kullanılmıştır. DC jeneratörün akım ve gerilimi ayarlanarak istenilen yüklenme değeri elde edilmektedir. Şekil 2.'den de görüldüğü gibi asenkron motorun bilnye yataklarının tam üzerindeki motor çerçevesi alanına bir adet ADXL 335 MEMS sensörü koyulmuştur. Bu sensör aracılığıyla üç eksen de (yatay, eksenel ve düşey) titreşim verisi toplanmaktadır. Veri toplanması için ayrı bir DAQ kartı kullanılmış ve veriler 6.6 kHz örnekleme frekansında 16 sn boyunca toplanmıştır. Asenkron motor ile DC jeneratörü birbirine akuple etmek için esnek bir kuplaj kullanılmıştır. Ayrıca motor ve yük şaftını aynı hizaya ayarlamak için lazer ayarlama cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz ile aynı zamanda paralel hizasızlık ve topal ayak arızasının şiddeti gözlemlenebilmektedir.

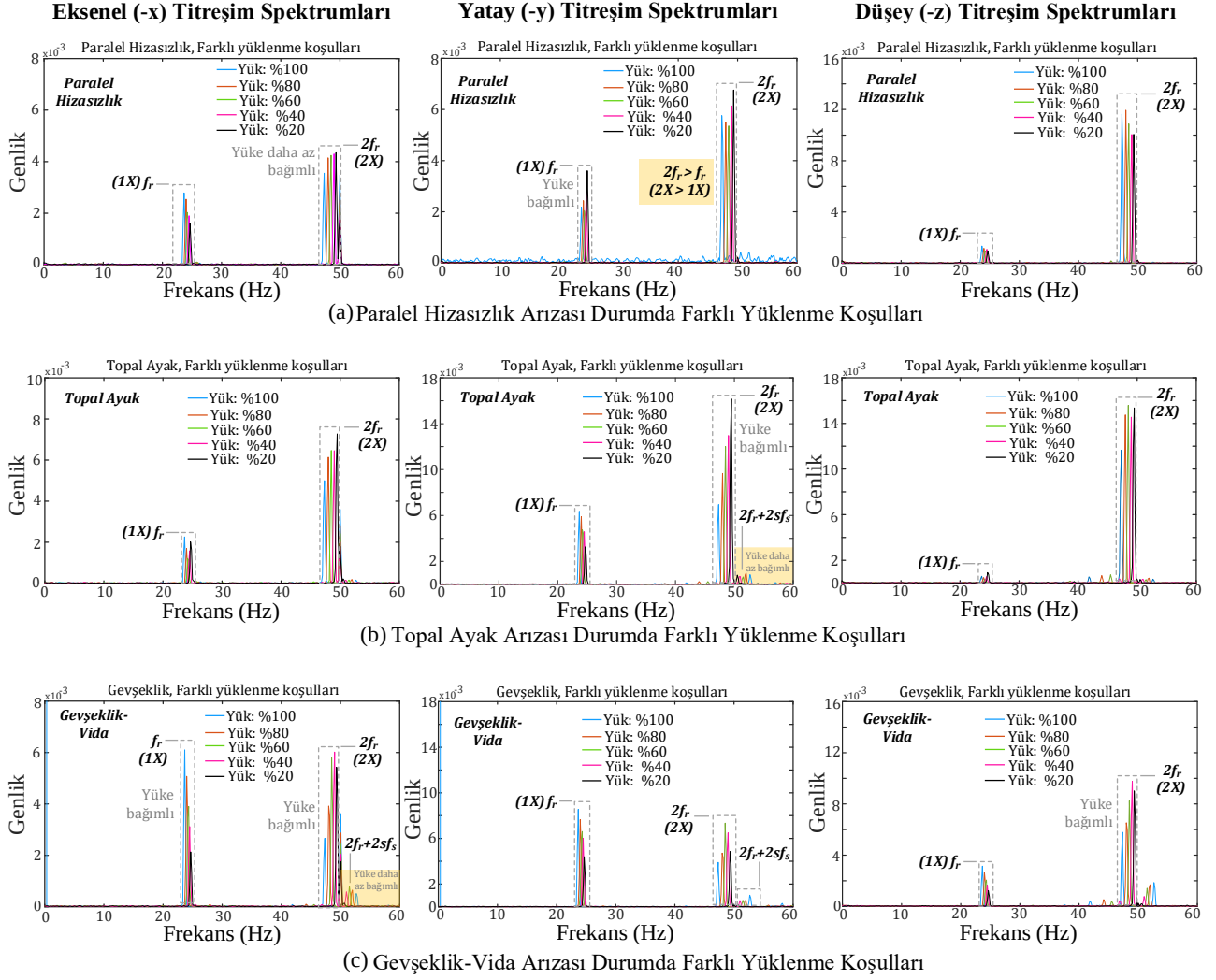
Şekil 2'de görüldüğü gibi üç farklı mekaniksel arıza oluşturulmuştur. Paralel hizasızlık arızasının oluşturulması için sağlıklı duruma göre arızalı durumda yatay eksenle hareket edebilen motor montaj plakası iki adet vida kullanılarak yatay eksenle kaydırılmıştır. Vidaların dönüş sayısı aynı tutularak paralel hizasızlık arızası şiddeti ayarlanmıştır. Gevşeklik-Vida (Type B) arızası için asenkron motorun bağlı bulunduğu sol ön ayak vidası belli tur sayısında gevşetilmiştir. Böylece sol ön ayak gevşek bir şekilde salınım yapacaktır. Topal ayak arızası ise sol ön ayakların altında bulunan şimler çıkartılarak sol ayak montaj vidası iyice sıkıştırılmıştır. Böylece sol ön ayak kısmında bir dengesizlik oluşmuştur.

İlk olarak asenkron motor tam yükte, 1420 d/dk hızında hem sağlıklı hem de arızalı durumlar için çalıştırılmış ve üç eksenle titreşim sinyalleri detaylı olarak incelenmiştir. Tam yük koşulunda f_r frekansı 23.6 Hz ve motor kayma değeri $s=0.053$ 'tür. Şekil 3a'da eksenel titreşim spektrumlarında görüldüğü gibi besleme gerilimi frekansı ($f_s=50\text{Hz}$) sağlıklı ve arızalı durumlarda görülmektedir. Ayrıca $2f_r$ frekansında arıza sinyalleri etkin olarak gözlemlenmektedir. Özellikle f_r sinyali gevşeklik arızasında baskın iken $2f_r$ sinyali de topal ayak arızası durumunda baskındır.



Şekil 3: Titreşim spektrumları, Tam yükte a) Eksenel, -x eksen, b) Yatay, -y eksen, c) Düşey, -z eksen

Şekil 3b'de yatay titreşim spektrumları incelendiğinde paralel hizasızlık arızasında $2f_r$ sinyalinin genliğinin f_r sinyalinin genliğinden büyük olduğu görülmektedir. f_r sinyali ile gevşeklik arızası net bir şekilde tespit edilebilirken, $2f_r$ sinyali kullanılarak etkin bir şekilde üç arızanın tespit edilebildiği görülmektedir. Düşey titreşim spektrumları incelendiğinde (Şekil 3c) topal ayak ve paralel hizasızlık arızasının $2f_r$ sinyali ile etkin bir şekilde



Şekil 4: Farklı yüklenme koşullarında arıza sinyallerinin davranışı a) Paralel Hizasızlık b) Topal Ayak c) Gevşeklik

tespit edildiği görülmektedir. Burada önemli bir noktayı da belirtmekte fayda vardır; eksenel ve yatay titreşim spektrumlarında $2f_r + 2s_{fs}$ harmoniği kullanılarak total ayak ve gevşeklik arızası tespit edilirken, düşey titreşim spektrumlarında $2f_r + 2s_{fs}$ sinyali ile gevşeklik arızası güvenilir bir şekilde tespit edilmektedir.

Farklı yüklenme koşullarında arıza sinyallerinin davranışını incelemek için asenkron motor [%20-%100] arasında farklı yük değerlerinde yüklenmiştir. Şekil 4a'da paralel hizasızlık arızası durumunda üç eksenle spektrumlar her yüklenme koşulunda incelenmiştir. Eksenel titreşim spektrumlarında f_r sinyalinin genliğinin yük değeri ile birlikte azaldığı ancak $2f_r$ sinyalinin genliğinin motor yükü arttıkça düştüğü görülmektedir. $2f_r$ sinyalinin genliğinin motor yük durumuna daha az bağımlı olduğu da görülmektedir. Paralel hizasızlık durumunda yatay spektrumlar incelendiğinde f_r ve $2f_r$ sinyalinin genliğinin motor yüküne oldukça bağımlı olduğu ve yük azaldıkça genliklerinin arttığı net bir şekilde görülmektedir. Şekil 4b'de ise total ayak arızası durumunda eksenel spektrumlar incelendiğinde f_r sinyalinin genliğinin $2f_r$ sinyaline göre oldukça düşük olduğu ve $2f_r$ sinyalinin genliğinin yük arttıkça azaldığı gözlenmektedir. Yatay titreşim spektrumunda ise $2f_r$ sinyalinin genliğinin yük

değişiminden oldukça etkilendiği net bir şekilde görülmektedir. Burada $2f_r + 2s_{fs}$ sinyalinin yük değişiminden az etkilendiğini de vurgulamak gerekmektedir. Düşey titreşim spektrumlarında f_r sinyali oldukça düşük bir değerde olduğu, $2f_r$ sinyali ile total ayak arızasının tespit edilebileceği net bir şekilde görülmektedir. Şekil 4c'de eksenel titreşim spektrumunda gevşeklik arızası durumunda motor yükü arttıkça f_r sinyalinin genliğinin arttığı ve yüke oldukça bağımlı olduğu, $2f_r$ sinyalinin ise motor yükü arttıkça düştüğü görülmektedir. Ayrıca $2f_r + 2s_{fs}$ sinyalinin genliğinin motor yüküne daha az bağımlı olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Gevşeklik arızası durumunda yatay titreşim spektrumunda f_r sinyalinin değerinin $2f_r$ sinyalinden büyük olduğu ve her iki sinyalin genliğinin de motor yüklenme durumundan etkilendiği görülmektedir. $2f_r + 2s_{fs}$ sinyalinin de özellikle tam yükte oldukça etkin olduğu açıktır. Düşey titreşim spektrumlarında ise $2f_r$ ve $2f_r + 2s_{fs}$ sinyallerinin motor yüküne oldukça bağımlı olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

Şekil 4'te eksenel ve düşey titreşim spektrumları her arıza için incelendiğinde $2f_r + 2s_{fs}$ sinyali sadece gevşeklik arızası durumunda, yatay titreşim spektrumlarında ise hem total ayak hem de gevşeklik arızası durumunda görülmektedir. Paralel hizasızlık arızası durumunda ise bu sinyal üç eksenle de bulunmamaktadır. Bu durumda farklı arızalarda f_r ve $2f_r$

sinyallerinin görülmesinden dolayı arıza türünün belirlenmesi zorluğu ortadan kalkmaktadır. $2f_r + 2sf_s$ sinyalinin belirtilen eksenlerde varlığı ile total ayak, gevşeklik ve paralel hizasızlık arızası birbirinden ayrıştırılabilir.

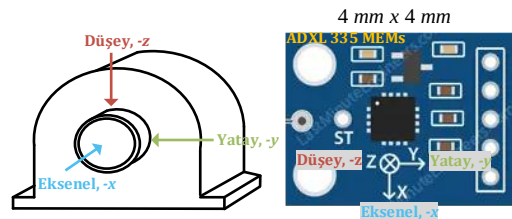
4. Sonuçlar

Bu çalışmada paralel hizasızlık (parallel misalignment), total ayak (soft foot) ve gevşeklik-vida (looseness-Type B) arızası durumunda hızla ilişkili karakteristik frekansların motor arıza tespitindeki rolü detaylıca incelenmiştir. Üç eksenle titreşim spektrumları farklı yüklenme koşullarında incelenerek arıza sinyallerinin davranışı detaylı olarak analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre paralel hizasızlık arızasının yatay titreşim spektrumunda f_r ve $2f_r$ sinyali kullanılarak ($2f_r > f_r$) etkin bir şekilde tespit edilebildiği, gevşeklik arızasında f_r ve $2f_r$ sinyallerinin yüke oldukça bağımlı olduğu ve eksenel titreşim spektrumunda $2f_r + 2sf_s$ sinyalinin bu arızanın tespitinde önemli bir rol oynadığı görülmüştür. Ayrıca total ayak arızası durumunda yatay titreşim spektrumlarında $2f_r + 2sf_s$ sinyalinin genliğinin yük değişimine karşı daha az değiştiği ve düşey titreşim spektrumlarında $2f_r$ sinyali kullanılarak da arıza tespitinin yapılabildiği görülmektedir. Deneysel sonuçlara göre ucuz, güvenilir ve etkin arıza tespiti sağlanmıştır. Sonraki çalışmalarda farklı mekaniksel arızaların titreşim analizleri yapılarak karakteristik sinyallerin motor yüklenme durumlarına göre davranışları incelenecektir.

5. Kaynaklar

- [1] P. Gangsar and R. Tiwari, "Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review," *Mechanical System and Signal Processing*, vol. 144, 2020, Art. no. 106908.
- [2] A. H. Bonnett, "Root cause failure analysis for AC Induction Motors in the petroleum and chemical industry," *Record of Conference Papers Industry Applications Society 57th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC)*, San Antonio, TX, USA, 2010, pp. 1-13, doi: 10.1109/PCIC.2010.5666831.
- [3] "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-21, no. 4, pp. 853-864, July 1985, doi: 10.1109/TIA.1985.349532.
- [4] T. Goktas, R. Er, F. Altunel and M. Arkan, "IoT based Multi-Environmental Sensing System: Monitoring of Rotor Fault in Induction Motors," *2023 IEEE 14th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Chania, Greece, 2023, pp. 285-290.
- [5] R. Er, F. Altunel, M. Can and T. Goktas, "The Effects of Bearing Lubrication on Vibration, Acoustic and Stray Flux Signals in Induction Motors," *2023 IEEE 14th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Chania, Greece, 2023, pp. 417-422.
- [6] S. Jokic, N. Cincar and B. Novakovic, "The analysis of vibration measurement and current signature in motor drive faults detection," *2018 17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, East Sarajevo, 2018, pp. 1-6.
- [7] Maruthi G. S. and V. Hegde, "Application of MEMS accelerometer for detection and diagnosis of multiple faults in the roller element bearings of three phase induction motor," *IEEE Sensors J.*, vol. 16, no. 1, pp. 145-152, Jan. 2016.
- [8] T. Goktas, "Evaluation and Classification of Double Bar Breakages Through Three-Axes Vibration Sensor in Induction Motors," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 13, pp. 13602-13611, 1 July 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3176059.
- [9] T. Goktas, M. Arkan and V. Gurusamy, "A Comparative Study of Current, Vibration and Stray Magnetic Flux Based Detection for Parallel Misalignment Fault in Induction Motors," *2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Dallas, TX, USA, 2021, pp. 11-16, doi: 10.1109/SDEMPED51010.2021.9605507.
- [10] P. Popaleny and J. Antonino-Daviu, "Electric Motors Condition Monitoring Using Currents and Vibrations Analyses," *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Alexandroupoli, Greece, 2018, pp. 1834-1840, doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8506709.
- [11] B. Battulga, M. F. Shaikh, J. W. Chun, S. B. Park, S. Shim and S. B. Lee, "MEMS Accelerometer and Hall Sensor based Identification of Electrical and Mechanical Defects in Induction Motors and Driven Systems," in *IEEE Sensors Journal*, doi: 10.1109/JSEN.2024.3447869.
- [12] J. Jung, S. B. Lee, C. Lim, C.-H. Cho and K. Kim, "Electrical Monitoring of Mechanical Looseness for Induction Motors With Sleeve Bearings," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 4, pp. 1377-1386, Dec. 2016, doi: 10.1109/TEC.2016.2583473.
- [13] J. E. Berry, *Analysis III: Introduction to special vibration diagnostic techniques and how to analysis low, high, and variable speed machines*, Tech. Associates Charlotte, Charlotte, NC, USA, 1998.
- [14] *Vibration Diagnostic Guide (CM 5003)*, SKF Condition Monitoring Inc., 2000.
- [15] L. Macedo, P. Louzada, L. Gustavo Villani, A. Frizera, C. Marques and A. Leal-Junior, "Machinery Fault Diagnosis in Electric Motors Through Mechanical Vibration Monitoring Using Fiber Bragg Grating-Based Accelerometers," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, no. 13, pp. 20655-20662, 1 July 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3400169.
- [16] O. Zandi and J. Poshtan, "Fault Diagnosis of Brushless DC Motors Using Built-In Hall Sensors," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 18, pp. 8183-8190, 15 Sept. 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2917847.
- [17] Shreyas Gawde, Shruti Patil, Satish Kumar, Pooja Kamat, Ketan Kotecha, Ajith Abraham, Multi-fault diagnosis of Industrial Rotating Machines using Data-driven approach : A review of two decades of research, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 123, Part A, 2023, 106139, ISSN 0952-1976.
- [18] Technical Associates of Charlotte, P.C. "Illustrated Vibration Diagnostic Chart," R-0894-4, 1996.

Ek-A



Şekil A: Ölçüm eksenlerinin gösterimi ve ADXL335 Sensörü