



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Asenkron motorlarda paralel hizalama hatalarının entropi analizi ile incelenmesi

Investigation of parallel misalignment faults of induction motor by using entropy analysis

Yazar(lar) (Author(s)): Abdurrahman ÜNSAL

ORCID: 0000-0002-7053-517X

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Ünsal A., “Asenkron motorlarda paralel hizalama hatalarının entropi analizi ile incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1037-1050, (2020).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.551490

Asenkron Motorlarda Paralel Hizalama Hatalarının Entropi Analizi ile İncelenmesi

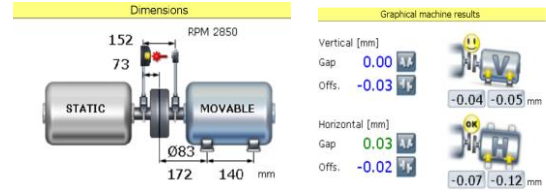
Investigation of Parallel Misalignment Faults of Induction Motor by Using Entropy Analysis

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Asenkron motor – yük paralel hizalama hataları. / Parallel misalignment of induction motor –load.
- ❖ Stator akımı sinyali entropi analizi. / Entropy analysis of stator current signals.
- ❖ 3-eksen titreşim sinyali entropi analiz. / Entropy analysis of 3-axis vibration signals.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Laboratuvar ortamında, motor-yük paralel hizalama hataları kaplin ayar cihazı kullanılarak kademeli olarak ayarlandı. Her kademe motor yüklenerek akım ve titreşim sinyallerinin entropi değerleri hesaplandı. / In the laboratory, parallel misalignment between motor-load were adjusted gradually by using a coupling adjusting device. At each stage the motor was loaded and the entropy values of the current and vibration signals were calculated.



Şekil. Hizalama hatalarının ayarlanması / Figure. Adjustment of misalignment

Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı asenkron motor ve yük arasındaki paralel hizasızlık problemlerinin etkilerini stator akımı sinyalleri ve 3-eksen titreşim sinyallerini kullanarak analiz etmektir. / The aim of this study is to analyze the effects of parallel misalignment problems between induction motors and load by using stator current signals and 3-axis vibration signals.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Asenkron motor ve yük arasındaki hizasızlıklar bir lazer kaplin ayar cihazı ile üç farklı kademede ayarlandı. Her kademede asenkron motor kademeli olarak yüklenerek stator akım sinyalleri ve titreşim sinyalleri kaydedilerek analiz edildi. / The misalignments between the induction motor and load were adjusted at three different stages with a laser coupling adjustment device. At each stage, the induction motor was loaded gradually and stator current signals and vibration signals were recorded and analyzed.

Özgünlük (Originality)

Asenkron motorlar ile yük arasında, montaj sırasında veya sonrasında meydana gelen paralel hizasızlık problemleri laboratuvar ortamında oluşturuldu. Hizasızlık etkileri stator akım sinyalleri ve 3-eksen titreşim sinyallerinin entropi değerleriyle incelendi. / Parallel misalignment problems that occurred between induction motors and load, during or after assembly were created in the laboratory. The misalignment effects were analyzed by using the entropy of the stator current signals and entropy of 3-axis vibration signals.

Bulgular (Findings)

Stator akımı entropi değerleri yük artışıyla düzenli artmaktadır. Hizasızlık hatası artıkça x-eksen ve z-eksen titreşim sinyali entropi değerleri artmaktadır. y-eksen titreşim sinyali entropi değerleri azalmaktadır. / Entropy of stator current increase with increasing load. As the misalignment increases, the entropy of x-axis and z-axis vibration signal increase and the entropy of y-axis vibration signal decreases.

Sonuç (Conclusion)

Stator akımı ve titreşim sinyali entropi değerlerindeki değişimlerin, hizasızlık sonucu asenkron motorun gövdesinde indüklenen kuvvet ve momentlerin bir sonucudur. Entropi analizi ile motor-yük hizasızlık problemlerinin motor üzerine etkileri tespit edilebilir. / The changes in entropy of the stator current and vibration signals are caused by the forces and torques induced in the body of the induction motor as a result of misalignment. The effects of motor-load misalignment problems on the motor can be determined by using entropy analysis.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Asenkron Motorlarda Paralel Hizalama Hatalarının Entropi Analizi ile İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Abdurrahman ÜNSAL*

Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 09.04.2019 ; Kabul/Accepted : 01.10.2019)

ÖZ

Asenkron motorlar elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesinde yaygın olarak kullanılan elektrik makinalarıdır. Asenkron motorlarda meydana gelen yaygın arızalar elektriksel ve mekaniksel arızalar olarak iki gruba ayrılır. Elektriksel arızalar stator arızaları ve rotor arızalarından oluşmaktadır. Mekaniksel arızalar ise rulman arızaları, eksenal kaçıklık arızaları ve motorun mekanik aksamı ile ilgili olan diğer arızalardan oluşmaktadır. Mekanik arızaların önemli bir kısmını rulman arızaları oluşturmaktadır. Rulman arızalarının ana sebeplerinden bir tanesi kaplin ayarının iyi yapılmaması ve/veya motor-yük arasındaki hizasızlık sonucu meydana gelen mekanik problemlerdir. Bu makalede bir asenkron motor ile yük arasında meydana gelen hizasızlık probleminin motora etkileri incelendi. Asenkron motor ile yük arasında bir adet yıldız-esnek kaplin kullanıldı. Kendinden uyarımlı bir senkron generatör ile yüklendi. Motor-yük (senkron generatör) arasındaki hizasızlıklar bir lazer kaplin ayar cihazı ile kademeli olarak ayarlandı. Her kademede motor stator akımı ve titreşim sinyalleri kaydedildi. Akım ve titreşim sinyalleri frekans domaininde analiz edildi. Daha sonra entropi değerleri hesaplandı. Hizasızlık problemleriye akım ve titreşim sinyalleri entropi değerinin değişimi deneysel olarak incelendi. Entropi değerindeki değişim ile hizasızlık problemlerinin analiz edilebileceği ispat edildi.

Anahtar Kelimeler: Asenkron motorlar, arıza analizi, kaplin hizalama hataları, entropi analizi.

Investigation of Parallel Misalignment Faults of Induction Motor by Using Entropy Analysis

ABSTRACT

Induction motors are widely used electrical machines in converting electrical energy into mechanical energy. Common faults of induction motors are divided into two groups as electrical and mechanical faults. Electrical faults consist of stator faults and rotor faults. Mechanical faults include bearing failures, axial misalignment and other faults related to the mechanical components of the motor. Bearing failures has significant share in mechanical faults. One of the main causes of bearing failures is the misalignment between the motor and the load. In this paper, the effects of the misalignment problems between an induction motor and a load are investigated. A star-flexible coupling was used between the induction motor and the load. The motor was loaded with a self-excited synchronous generator. Motor-load (synchronous generator) misalignments were gradually adjusted by a laser coupling alignment tool. At each alignment level the stator current and vibration signals were recorded. Current and vibration signals were analyzed in the frequency domain. Then entropies of current and vibration signals were calculated. The change in the entropy of current and vibration signals due to misalignment were investigated experimentally. It has been shown that the misalignment problems can be analyzed with the change in entropy of stator current and vibration signals.

Keywords: Induction motors, fault analysis, coupling misalignment faults, entropy analysis.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Asenkron motorlar sanayide kullanılan en yaygın elektrik motorlarıdır. Asenkron motorlarda meydana gelebilecek herhangi bir arıza üretim süreçlerinin önemli ölçüde kesintiye uğramasına ve üretim kayıplarına sebep olabilmektedir. Bundan dolayı Asenkron motorların durumlarının sürekli olarak izlenmesi ve olası arızalarının zamanında tespit edilmesi ve gerekli önlemlerin alınması son derece önemlidir. Bundan dolayı son yıllarda asenkron motorların arızaları alanında yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Asenkron motorların izlenmesi ve arızalarının tespit edilmesi alanında yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak, stator akım sinyalleri ve titreşim

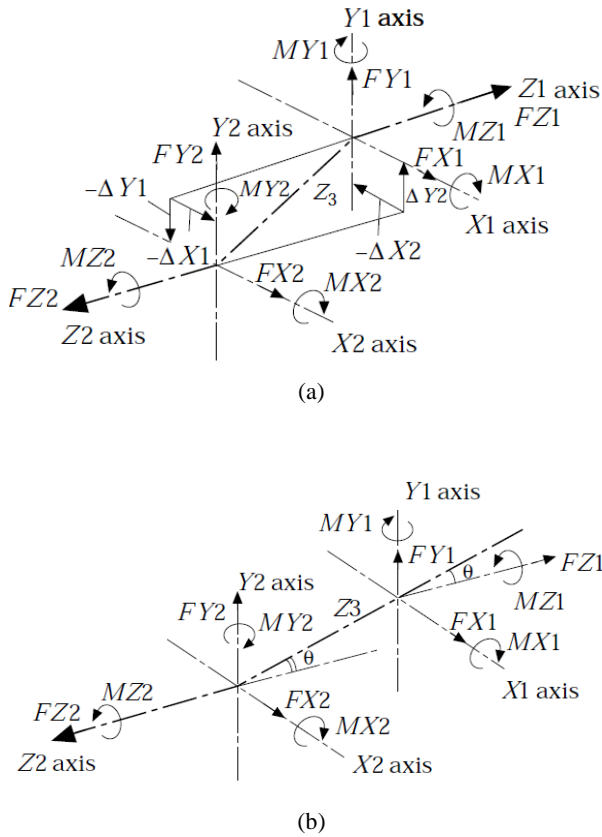
sinyallerinin çeşitli sinyal işleme metotları ile analiz edilmesiyle gerçekleştirilmektedir.

Mekanik arızalar asenkron motorlarda meydana gelen arızaların %50'den daha fazlasını oluşturmaktadır [1, 2]. Mekanik arızalar rulman arızaları, eksenal kaçıklık, motor kapağı, aktarma organları, motor mili vb. çeşitli arızalardan oluşmaktadır [3]. Mekanik arızaların ana sebeplerinden bir tanesi motor ile yükün doğru bir şekilde hizalanmamasıdır. Hizalama problemi, iki (veya daha fazla) makine milinin merkez dönme çizgilerinin birbiriyle aynı yönde hizalanmadığı durumlarda meydana gelir. Hizasızlık, mekanik sistemlerde dengelessizlikten sonra en sık görülen ikinci arıza çeşididir [4]. Motor ile yükün doğru bir şekilde hizalanmaması durumunda motor eksenal ve radyal yönde çeşitli kuvvetlere maruz kalır. Şekil 1'de verilen koordinat

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : unsal@dpu.edu.tr

sisteminde motorun hizasızlık sonucu maruz kaldığı kuvvetler F_x , F_y , ve F_z ile, momentler de M_x , M_y , M_z ile gösterilmektedir [5]. Bu kuvvet ve momentlerden dolayı motorda mekanik titreşimler meydana gelerek motorun mekaniksel olarak arızalanmasına sebep olmaktadır [3, 4, 6-8].

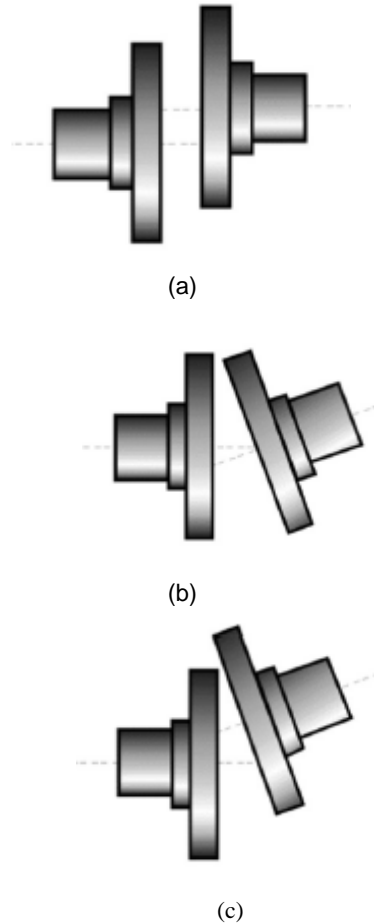
Mekanik arızalarının önemli bir kısmı rulman arızalarından oluşmaktadır. Bu konuda literatürde çok sayıda çalışma yayınlanmıştır. Yapılan literatür çalışmalarında motor arızalarının %51'den fazlasının doğrudan veya dolaylı olarak rulmanlardan kaynaklandığı bildirilmektedir [9, 10]. Büyük güçlü motorlarda rulman arızalarının mekanik arızalar içindeki oranı %90'a kadar çıkabilmektedir [11].



Şekil 1. Kaplin koordinat sistemi (a) Paralel hizasızlık (b) açısal hizasızlık (Coupling co-ordinate system: (a) parallel misalignment (b) angular misalignment)

Rulman arızaları genellikle rulman bakımlarının zamanında yapılmaması, ağır mekanik şartlar altında çalışma, hatalı montaj ve motor-yük arasındaki kaplin hizasızlık problemleri gibi çeşitli sebeplerden kaynaklanmaktadır. Dönen makinalarda titreşim arızaların %70'ten fazlası mil hizasızlığından kaynaklanmaktadır [12]. Millerinin yanlış hizalanması makineleri etkileyen ve çoğu zaman makine titreşiminin temel bir nedeni olan reaksiyon kuvvet ve momentlere neden olur. Yanlış hizalanmış miller 2X (dönüş hızının iki katı) karakteristik titreşim frekans bileşenleri üretmektedir [13].

Hizalama hatalarının rotor dinamik davranışı üzerine etkileri alanında birçok çalışma yapılmıştır. Rotor dönüş hızının iki katı dönme hızındaki 2X titreşimler ve karakteristik harmonikleri bir yanlış hizalama sonucu ve belirtisi olarak bildirilmiştir. Buna karşın paralel hizalama hataları sonucu 1X titreşimlerinin de meydana geldiği bildirilmektedir [4]. Hatalı hizalanmış rotor sistemleri üzerinde yapılan deneysel araştırmalarda çalışma hızının harmonik serisine sahip frekans spektrumunu bildirmiştir. Aynı zamanda farklı esnek bağlantı tiplerinin aynı hizalama koşulu altında titreşim tepkisinde farklı frekans bileşenlerinin (harmoniklerin) meydana geldiği de bildirilmiştir. Araştırmacılar tarafından önerilen farklı titreşim harmonikleri arasında, güçlü 2X harmonikli titreşimin kullanımı hatalı hizalamanın tespit edilmesi için yaygın olarak kabul edilmektedir [4]. Bununla birlikte güçlü 2X titreşimleri sadece hatalı hizalamadan kaynaklanmayıp çatlak ve sertlik asimetrisi gibi başka hatalardan da kaynaklanabilir. Bazı çalışmalarda hatalı hizalama ile ilgili önemli frekanslar 1X, 2X, 3X ve 4X olarak verilmektedir [14]. Hatalı hizalama problemi detaylı olarak [15]'te matematiksel olarak modellenmiştir.



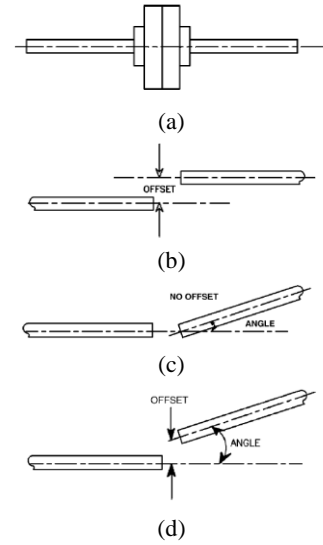
Şekil 2. Kaplin hizasızlık problemi: (a) paralel hizasızlık (b) açısal hizasızlık (c) karma hizasızlık [12] (Coupling misalignment problem: (a) offset (b) angular (c) mixed)

Rotor sistemlerinin bozulmasında hizasızlık problemi ikinci sırada gelmektedir. İki çeşit hizasızlık problemi

yaygın olarak görülür: paralel ve açısal hizasızlık. İleri-teknoloji kaplin ayar cihazları kullanılsa dahi motor-yük arasında bir miktar hizasızlık gözlemlenebilir. Bu hizasızlık durumu kaplin merkezinde ölçülür. Açısal hizasızlık bazen “gap” olarak, paralel hizasızlık da “offset” olarak isimlendirilir. Açısal ve paralel hizasızlık hem yatay ekseninde hem de dikey ekseninde görülebilir. Pratik uygulamalarda genelde hem açısal hem de paralel hizasızlık durumu aynı anda görülebilir. Buna karma hizasızlık denir. (Şekil 2 ve Şekil 3) [16, 17]. Bu hizasızlıklar montaj sırasında meydana gelebilir veya motorun uzun süre çalışması sonucu motor ile yükün farklı termal streslere maruz kalması sonucu da meydana gelebilir. Dolayısıyla motor yük arasında paralel, açısal veya karma olmak üzere mutlaka bir hizasızlık mevcuttur. Ancak bu hizasızlığın kabul edilebilir sınırlarda olması gerekir [7].

Uygun hizalamanın yapılması ile paralel hizasızlık ve açısal hizasızlık sonucu meydana gelen kuvvet ve momentler azalacağından dolayı motorun harcadığı enerjiyi ve gürültüyü azaltır, kaplin, rulman ve contaların ömrünü uzatır [18]. Makinalarda görülen mil bükülmesi, titreşimde artış (radyal ve eksenel yönde), rulmanlarda aşırı ısınma, gürültü, rulman ve kaplinlerde aşınma kaplinlerde hizasızlık olduğunu göstermektedir. Buna göre hem açısal hem de paralel hatalı hizalama sisteme statik bir yüklemeye veya ön yüklemeye yapar. Sistemde sadece açısal hatalı hizalama varsa bu durum statik sistem yer değiştirmelerine neden olur. Hizalama hataları sonucu ortaya çıkan momentler hizasızlık açısını azaltarak sistemin daha büyük statik kuvvetlere maruz kalmasına sebep olur. Elektrik motorlarında hizasızlık derecesi arttıkça motorun verimi düşecektir [19]. Hizasızlık durumunda kaplin ve rulmanlar da ekstra güç tüketimine sebep olduklarından motorun toplam verimi azalmaktadır. Bu güç tüketimi sadece kayıp güç olmayıp motorda hizasızlık sonucunda ortaya çıkan kuvvet ve momentlere karşı tüketilen güçtür. Hizalama hatalarının motor tarafından tüketilen aktif gücün izlenmesine dayanan bir çalışma [20]'da verilmektedir. Bu çalışmada hizasızlık ile ilgili frekansları belirleyen bir model de sunulmaktadır ve deneysel sonuçlarla önerilen yöntemin uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Hizasızlık problemi rulmanlarda ciddi seviyede titreşimler üretir. Hizasızlık sonucu meydana gelen titreşimler doğrudan makinanın hızıyla ve kaplinin esnekliğiyle de ilişkilidir. Esnek kaplinler daha düşük seviyede titreşim üretir. Bir makinada paralel hizasızlık olduğu halde bazen 2X titreşimleri görülmeyebilir [21]. Hizasızlık sonucu meydana gelen titreşimler genel olarak eksenel yönde ve 2X motor hızında titreşimlere sebep olur. Hizasızlık sonucu meydana gelen 2X frekans tepkileri sistemin doğal frekansına yakın değilse bu tepkiler net olarak görülmeyebilir. Bu durumlarda hizasızlık probleminin 2X tepkisinden tespit edilmesi son derece zordur. Bununla birlikte 2X tepkisi sistemin doğal frekansına yakın veya doğal frekansında ise 2X tepkisinin genliği artarak daha net bir şekilde frekans spektrumunda görülebilir.



Şekil 3. Kaplin Ayarı (a) mükemmel ayar (b) paralel hizasızlık (offset) (c) açısal hizasızlık (d) karma hizasızlık (Coupling alignment (a) excellent (b) offset (c) angular (d) mixed)

Hatalı hizalama elektrik motorlarında (motorun dinamik davranışın etkilediği için) stator akımına da harmonik olarak yansır. Bu durum statik ve dinamik eksenel kaçıklıkla ilgili harmoniklerin genliğinde artışa sebep olmaktadır [20]. Hem eksenel kaçıklık arızaları hem hizasızlık problemleri stator akımında

$$f_{hiz} = (f \pm nf_r) \quad (1)$$

frekanslarında harmonikler üretir (f şebeke frekansını, f_r rotor dönme frekansını göstermektedir. Bundan dolayı bu arızaların birbirinden ayrı olarak tespit edilmesi oldukça zordur. Bu zorluğu aşmak için hizasızlık probleminin motor akımına etkisinin öncelikli olarak tanımlanıp tespit edilmesi gerekir. Bu tespit edildikten sonra eksenel kaçıklık arızalarından ayrılabilir. Açısal hizasızlık arızaları sadece statik ve dinamik eksenel kaçıklık sonucu oluşan $(f+f_r)$ ve $(f-f_r)$ frekans bileşenlerinin genliğinde değil aynı zamanda $(f+2f_r)$ ve $(f-2f_r)$ frekanslarındaki yan-band harmoniklerin genliğinde de artışa sebep olur [20].

Açısal hizasızlık şiddeti arttıkça stator akımında meydana gelen $(f\pm f_r)$ frekans bileşenlerinin genliklerinde artış meydana gelir. Buna karşın motorun yük seviyesi arttıkça da $(f\pm f_r)$ frekans bileşeninin genliğinde azalma meydana gelir. Benzer şekilde paralel dengesizlik şiddeti arttıkça stator akımında meydana gelen $(f\pm f_r)$ frekans bileşenlerinin genliklerinde artış meydana gelir ancak yük seviyesi arttıkça da $(f\pm f_r)$ frekans bileşeninin genliğinde azalma meydana gelir [22]. Deneysel çalışmalarda bu durumun göz önünde bulundurulması gerekir.

2. ENTROPI ANALİZİ (ENTROPY ANALYSIS)

Entropi bir sistemdeki belirsizlik miktarını belirlemek için kullanılan bir kavramdır. Entropi kavramı bilgi

kuramında ilk kez 1948 yılında Claude Shannon tarafından kullanılmaya başlandı [23]. Shannon entropisi başlangıçta bilgi kaynağının belirsizliğini ve düzensizliğini ifade etmek için kullanılmaya başlandı. Daha sonra Shannon entropisi bilgi kuramı dışında diğer alanlarda belirsizliğin veya düzensizliğin ölçüsü olarak kullanılmaya başlandı. Düzensizlik bir sistemin bileşenleri arasındaki enerji akışıyla ilgilidir. Sistem düzensizliği arttıkça sistemi oluşturan bileşenler arasındaki enerji alış verişi azalır ve entropi değerinde de artış meydana gelir. Buna göre en düzensiz bir sistem maksimum entropi değerine sahip sistemdir [24-27] [23, 28] [29, 30]. Bir sistemdeki belirsizlik veya düzensizlik miktarı arttıkça entropi değeri yükselir. Birçok entropi metodu olmasına rağmen Shannon entropi metodu probabilistik metotlar kullanılarak bir sinyaldeki bilgi miktarını ortaya çıkarmak için kullanılır. Bundan dolayı bu çalışmada Shannon entropisi kullanılmıştır. Shannon entropi aşağıdaki şekilde hesaplanır [31].

Rastgele $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ gibi n değerli bir x olayının Shannon entropi değeri aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır [23, 24].

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2[p(x_i)] \quad (2)$$

Burada $p(x_i)$ her bir x_i değerinin X olayı içindeki olasılığını vermektedir. Bu çalışmada da Shannon entropisi asenkron motorların hatalı hizalama arızalarının analizinde kullanılmaktadır. Hatalı hizalama arızaları asenkron motorun kararlı durumda çalışmasını olumsuz etkileyip motorun düzensiz olarak çalışmasına sebep olur. Bu düzensizlik durumu elektriksel olarak motorun stator akımına harmonik olarak yansımaktadır. Bu durum ayrıca asenkron motorun çalışmasını mekanik olarak etkileyip motor titreşiminde artış meydana getirmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada hem stator akımı entropi değerleri hem de motorun 3-eksen titreşim sinyallerinin entropi değerleri incelenmiştir.

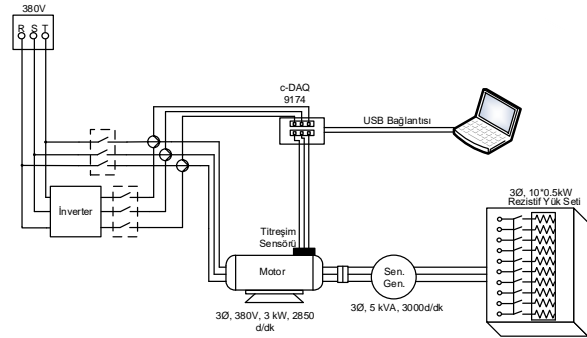
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL WORK)

Çalışmada 3 fazlı, 3 kW, 2850 d/dk etiket değerlerine sahip bir asenkron motor kullanıldı. Yük olarak 5 kVA gücünde kendinden uyartımlı bir senkron generatör kullanıldı. Senkron generatörün çıkışına da 5 kW gücünde resistif bir yük bağlandı. Şekil 4'te deney düzeneği görülmektedir.

Motor-yük arasında aksel (paralel) yönde üç kademe hizasızlıklar meydana getirildi. Hizasızlık derecesi Şekil 5'te verilen lazer kaplin ayar cihazı ile ölçülerek ayarlandı. Aksel yönde hizasızlık meydana geldiğinde kaçınılmaz olarak radyal yönde de hizasızlık hataları meydana gelir [16]. Kaplinlerde kabul edilebilir hizalama toleransları kaplin yapısına, ebatlarına ve kaplinin kullanıldığı sistemin hızına bağlıdır. Kaplin hizalama tolerans değerleri kaplin üreticileri tarafından verilmektedir. Çizelge 1'de kısa ve esnek kaplinler için literatürde verilen standart toleranslar değerleri

görülmektedir [10]. Bu çalışmada asenkron motor ile yük arasında bir adet yıldız-esnek kaplin kullanıldı.

Motor yük arasında üç farklı kademe yatay ve dikey ekseninde hatalı hizalama yapılarak testler gerçekleştirildi. Her hizalama kademesinde motor %25, %50, %75 ve %100 oranında yüklenerek stator akımı ve titreşim sinyalleri kaydedildi. Stator akım sinyalinin kaydedilmesinde NI donanımı kullanıldı. Titreşim sinyallerinin kaydedilmesinde bir adet 3-eksen ivmeölçer cihazı kullanıldı. İvmeölçer cihazının çıkış sinyalleri sinyal şartlandırıcı ile yükselttilerek National Instrument (NI) donanım üzerinden bilgisayara aktarıldı. İvmeölçerin kayıt eksenleri Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 4. Deney düzeneği (Experimental set-up)

Çizelge 1. Standart paralel hizasızlık toleransları (Standard shaft alignment tolerances)

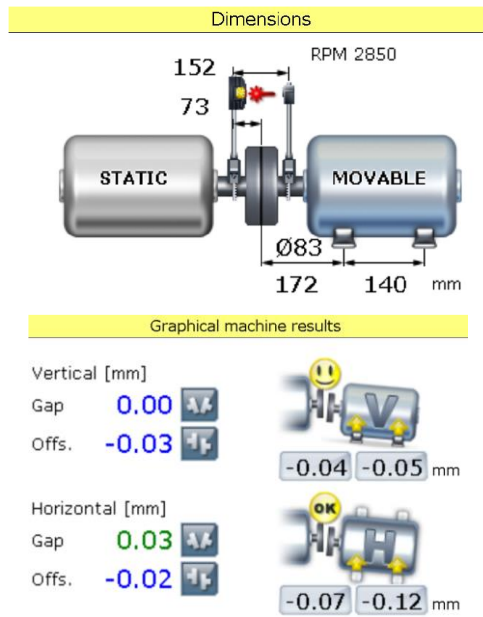
SHAFT ALIGNMENT TOLERANCES (SHORT COUPLINGS)				
RPM	EXCELLENT		ACCEPTABLE	
	Offset (mils)	Angularity (mils/inch)	Offset (mils)	Angularity (mils/inch)
600	5.0	1.0	9.0	1.5
900	3.0	0.7	6.0	1.0
1200	2.5	0.5	4.0	0.8
1800	2.0	0.3	3.0	0.5
3600	1.0	0.2	1.5	0.3
7200	0.5	0.1	1.0	0.2



Şekil 5. Kaplin ayar cihazı (Coupling alignment tool)



Şekil 6. İvmeölçer sinyal kayıt eksenleri (Accelerometer signal recording axes)



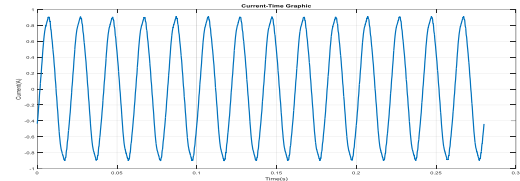
Şekil 7. Hizalı yük motor-yük boyutları ve hizalama kademeleri (Alignment load motor-load dimensions and alignment stages)

4. SONUÇLAR (RESULTS)

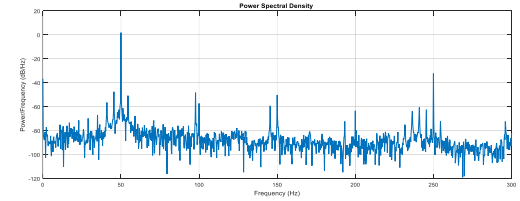
DeneySEL çalışmada 3-faz stator akımı ve 3-eksen titreşim sinyalleri kaydedildi. Üç faz stator akımlarından sadece bir faz akımı burada gösterilmektedir. Sadece bir faz akımı %100 yükleme durumu için verilmektedir. Hem stator akımları hem de titreşim sinyallerinin güç spektrum yoğunlukları hesaplandı. Sonuçlar hem zaman domeninde hem de frekans domeninde birlikte verilmektedir.

4.1 Hizalı Yük (Aligned Load)

Motor-yük arasındaki paralel hizasızlık hem dikey hem de yatay eksende 0,055 mm'den daha az ise sistem dengeli (normal hizalı) olarak kabul edildi. Hizalı veya normal hizalı kaplin ayar değerleri Şekil 7'de verilmektedir. Normal hizalı çalışma durumunda stator akımı ve stator akımının güç spektral yoğunluğu Şekil 8'de verilmektedir. Motor gövdesinde kaydedilen 3-eksen (x, y z) titreşim sinyalleri ve bu sinyallerin güç spektral yoğunlukları sırasıyla Şekil 9 (x-eksen), Şekil 10 (y-eksen), ve Şekil 11'de (z-eksen) verilmektedir.

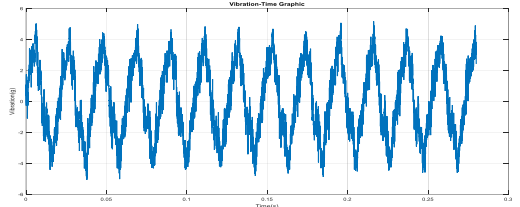


(a) Stator akımı

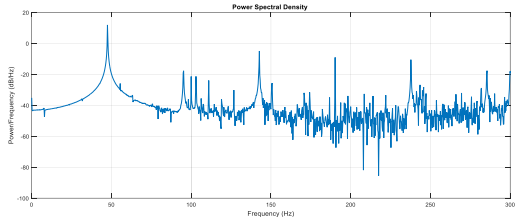


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 8. Normal hizalı yük stator akımı (Normally aligned load stator current)

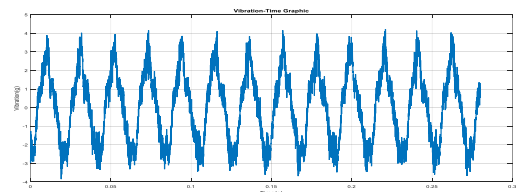


(a) Titreşim sinyali

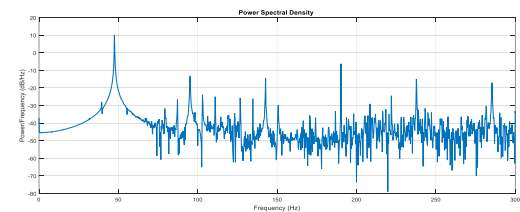


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 9. Normal hizalı yük x-ekseni titreşim sinyalleri (Aligned load x-axis vibration signals)

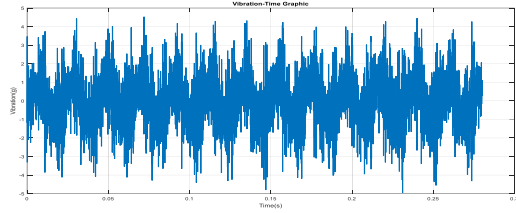


(a) Titreşim sinyali

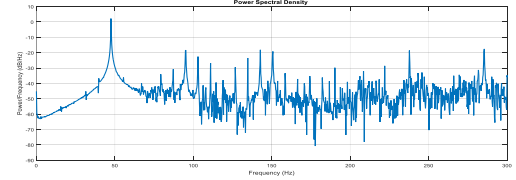


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 10. Normal hizalı yük y-ekseni titreşim sinyalleri (Aligned load y-axis vibration signals)

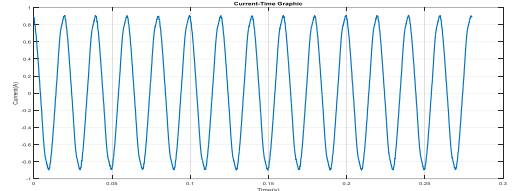


(a) Titreşim sinyali

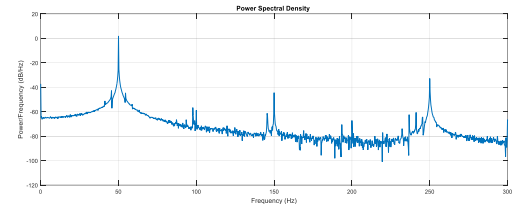


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 11. Normal hizalı yük z-ekseni titreşim sinyalleri (Aligned load z-axis vibration signals)

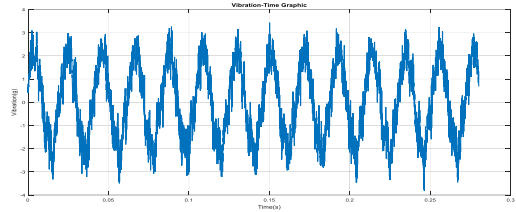


(a) Stator akımı

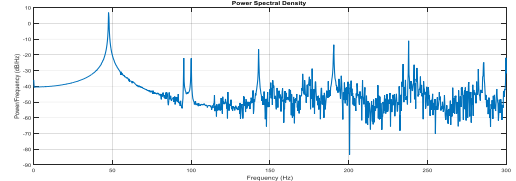


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 12. Birinci kademe dikey hizasız yük stator akımı (First level vertical misaligned load stator current)



(a) Titreşim sinyali

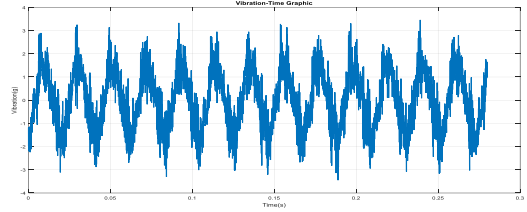


(b) Güç spektral yoğunluğu

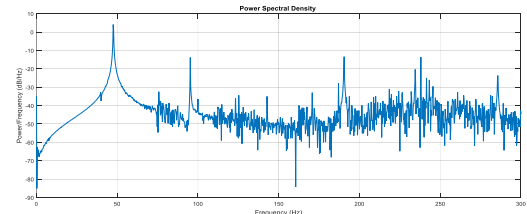
Şekil 13. Birinci kademe dikey hizasız yük x-ekseni titreşim sinyalleri (First level vertical misaligned load x-axis vibration signals)

4.2 Birinci Kademe Dikey Hizasızlık (First Level Vertical Misalignment)

Motor-yük arasındaki hizasızlık dikey ekseninde 0.52 mm olarak ayarlandı. Bu hizasızlık ayar kademesinde kaydedilen stator akımı ve stator akımının güç spektral yoğunluğu Şekil 12'de verilmektedir. Motor gövdesinde kaydedilen 3-eksen titreşim sinyalleri ve bu sinyallerin güç spektral yoğunlukları sırasıyla Şekil 13 (x-eksen), Şekil 14 (y-eksen), ve Şekil 15'te (z-eksen) verilmektedir.

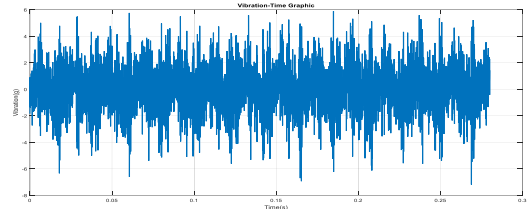


(a) Titreşim sinyali

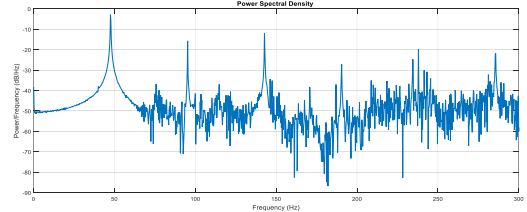


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 14. Birinci kademe dikey hizasız yük y-ekseni titreşim sinyalleri (First level vertical misaligned load y-axis vibration signals)



(a) Titreşim sinyali



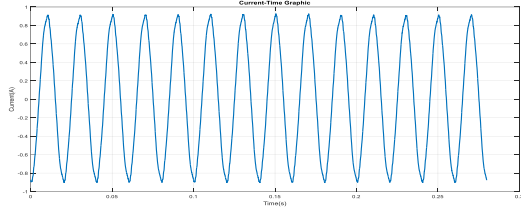
(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 15. Birinci kademe dikey hizasız yük z-ekseni titreşim sinyalleri (First level vertical misaligned load z-axis vibration signals)

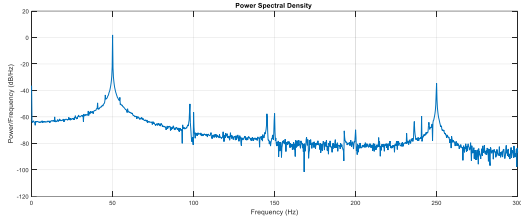
4.3 Birinci Kademe Yatay Hizasızlık (First Level Horizontal Misalignment)

Motor-yük arasındaki hizasızlık yatay ekseninde 0.51 mm olarak ayarlandı. Bu hizasızlık ayar kademesinde

kaydedilen stator akımı ve güç spektral yoğunluğu Şekil 16'da verilmektedir. Motor gövdesinde kaydedilen 3-eksen titreşim sinyalleri ve bu sinyallerin güç spektral yoğunlukları sırasıyla Şekil 17 (x-eksen), Şekil 18 (y-eksen), ve Şekil 19'da (z-eksen) verilmektedir.

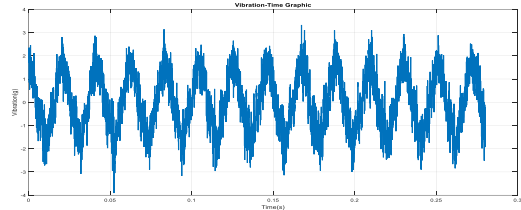


(a) Stator akımı

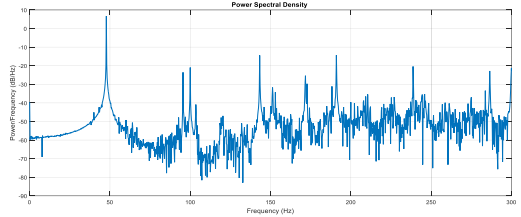


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 16. Birinci kademe yatay hizasız yük stator akımı (First level horizontal misaligned load stator current)

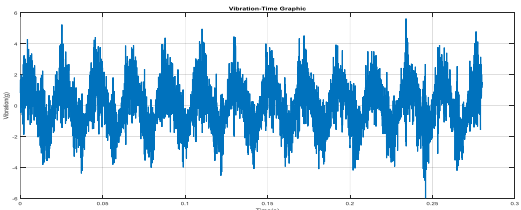


(a) Titreşim sinyali

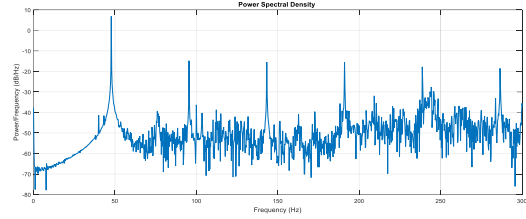


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 17. Birinci kademe yatay hizasız yük x-ekseni titreşim sinyalleri (First level horizontal misaligned load x-axis vibration signals)

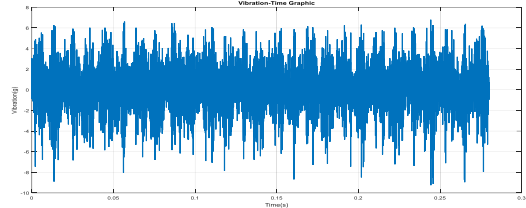


(a) Titreşim sinyali

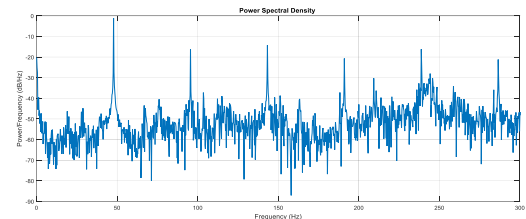


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 18. Birinci kademe yatay hizasız yük y-ekseni titreşim sinyalleri (First level horizontal misaligned load y-axis vibration signals)

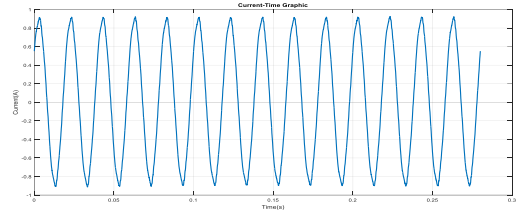


(a) Titreşim sinyali

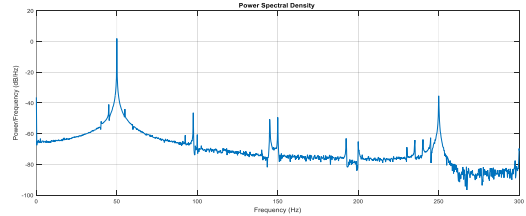


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 19. Birinci kademe yatay hizasız yük z-ekseni titreşim sinyalleri (First level horizontal misaligned load z-axis vibration signals)

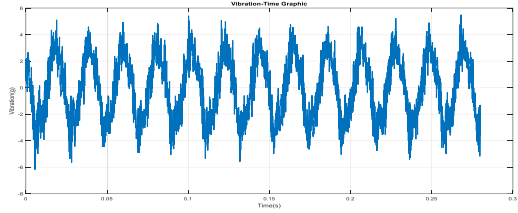


(a) Stator akımı

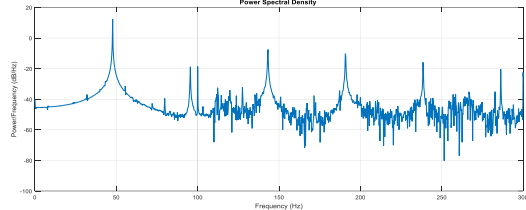


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 20. İkinci kademe dikey hizasız yük stator akımı (Second level vertical misaligned load stator current)



(a) Titreşim sinyali

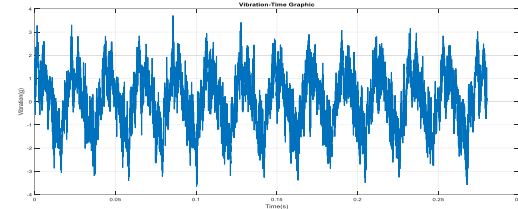


(b) Güç spektral yoğunluğu

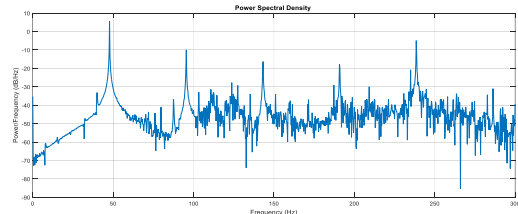
Şekil 21. İkinci kademe dikey hizasız yük x-ekseni titreşim sinyalleri (Second level vertical misaligned load x-axis vibration signals)

4.4 İkinci Kademe Dikey Hizasızlık (Second Level Vertical Misalignment)

Motor-yük arasındaki hizasızlık dikey ekseninde 1.14 mm olarak ayarlandı. Bu hizasızlık ayar kademesinde kaydedilen stator akımı ve stator akımının güç spektral yoğunluğu Şekil 20’de verilmektedir. Motor gövdesinde kaydedilen 3-eksen titreşim sinyalleri ve bu sinyallerin güç spektral yoğunlukları sırasıyla Şekil 21 (x-eksen), Şekil 22 (y-eksen), ve Şekil 23’te (z-eksen) verilmektedir.

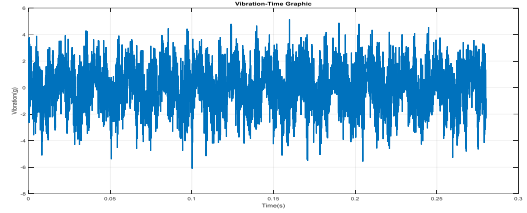


(a) Titreşim sinyali

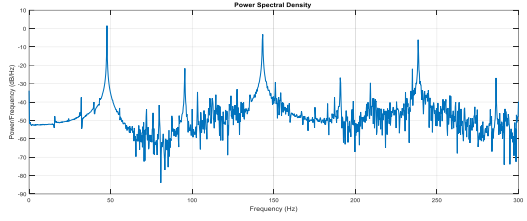


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 22. İkinci kademe dikey hizasız yük y-ekseni titreşim sinyalleri (Second level vertical misaligned load y-axis vibration signals)



(a) Titreşim sinyali

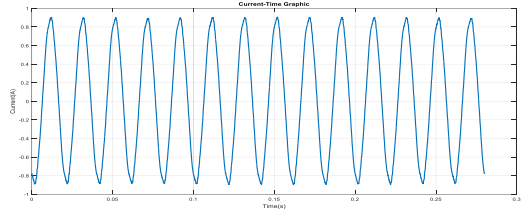


(b) Güç spektral yoğunluğu

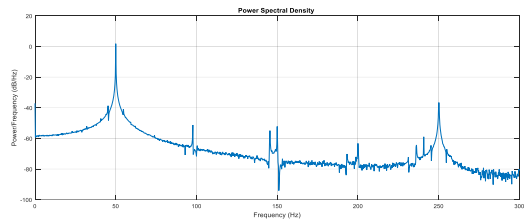
Şekil 23. İkinci kademe dikey hizasız yük z-ekseni titreşim sinyalleri (Second level vertical misaligned load z-axis vibration signals)

4.5 İkinci Kademe Yatay Hizasızlık (Second Level Horizontal Misalignment)

Motor-yük arasındaki hizasızlık yatay ekseninde 1.13 mm olarak ayarlandı. Bu hizasızlık ayar kademesinde kaydedilen stator akımı ve stator akımının güç spektral yoğunluğu Şekil 24’te verilmektedir. Motor gövdesinde kaydedilen 3-eksen titreşim sinyalleri ve bu sinyallerin güç spektral yoğunlukları sırasıyla Şekil 25 (x-eksen), Şekil 26 (y-eksen), ve Şekil 27’de (z-eksen) verilmektedir.

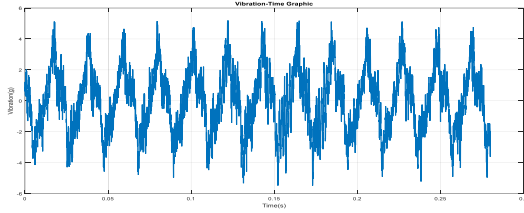


(a) Stator akımı

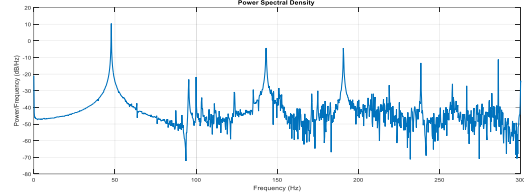


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 24. İkinci kademe yatay hizasız yük stator akımı (Second level horizontal misaligned load stator current)

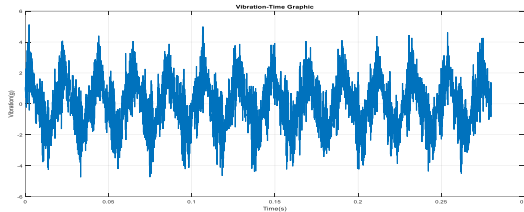


(a) Titreşim sinyali

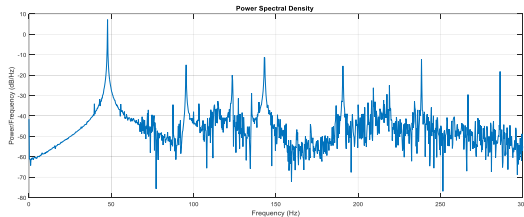


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 25. İkinci kademe yatay hizasız yük x-ekseni titreşim sinyalleri (Second level horizontal misaligned load x-axis vibration signals)

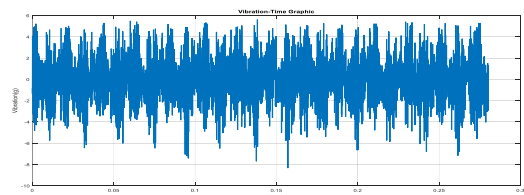


(a) Titreşim sinyali

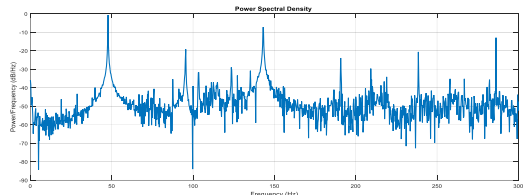


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 26. İkinci kademe yatay hizasız yük y-ekseni titreşim sinyalleri (Second level horizontal misaligned load y-axis vibration signals)



(a) Titreşim sinyali

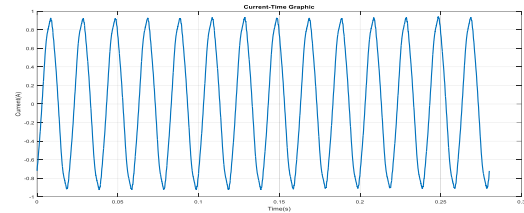


(b) Güç spektral yoğunluğu

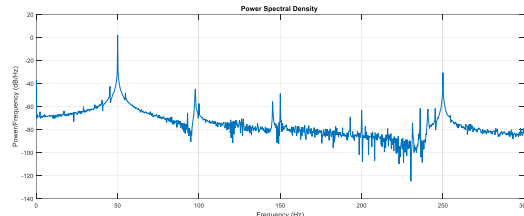
Şekil 27. İkinci kademe yatay hizasız yük z-ekseni titreşim sinyalleri (Second level horizontal misaligned load z-axis vibration signals)

4.6 Üçüncü Kademe Dikey Hizasızlık (Third Level Vertical Misalignment)

Motor-yük arasındaki hizasızlık dikey ekseninde 1.54 mm olarak ayarlandı. Bu hizasızlık ayar kademesinde kaydedilen stator akımı ve stator akımının güç spektral yoğunluğu Şekil 28'de verilmektedir. Motor gövdesinde kaydedilen 3-eksen titreşim sinyalleri ve bu sinyallerin güç spektral yoğunlukları sırasıyla Şekil 29 (x-eksen), Şekil 30 (y-eksen), ve Şekil 31'de (z-eksen) verilmektedir

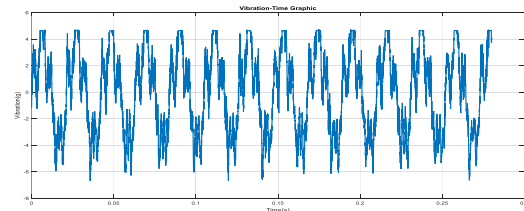


(a) Stator akımı

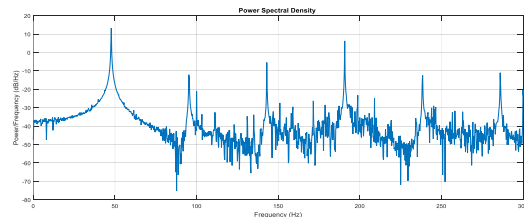


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 28. Üçüncü kademe dikey hizasız yük stator akımı (Third level vertical misaligned load stator current)

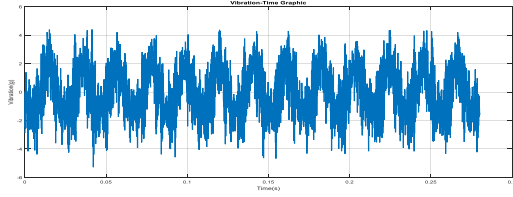


(a) Titreşim sinyali

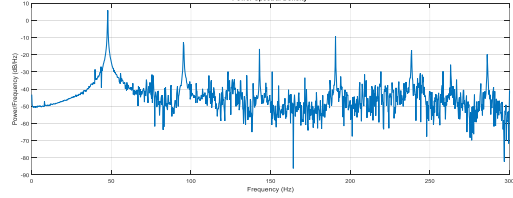


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 29. Üçüncü kademe dikey hizasız yük x-ekseni titreşim sinyalleri (Third level vertical misaligned load x-axis vibration signals)

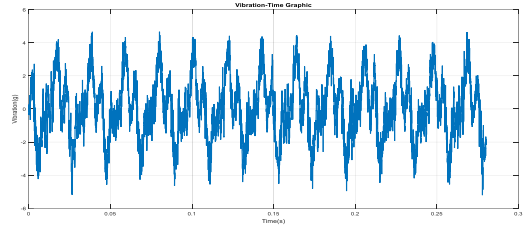


(a) Titreşim sinyali

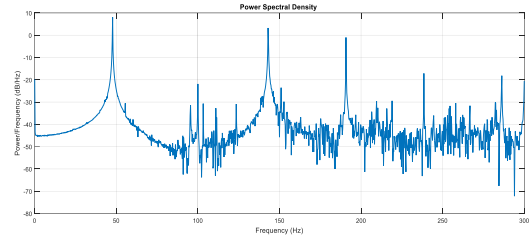


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 30. Üçüncü kademe dikey hizasız yük y-ekseni titreşim sinyalleri (Third level vertical misaligned load y-axis vibration signals)

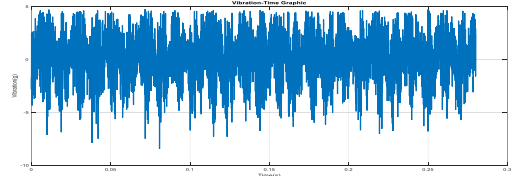


(a) Titreşim sinyali

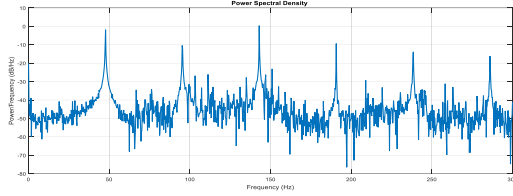


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 33. Üçüncü kademe yatay hizasız yük x-ekseni titreşim sinyalleri (Third level horizontal misaligned load x-axis vibration signals)

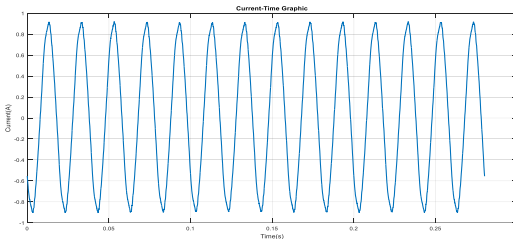


(a) Titreşim sinyali

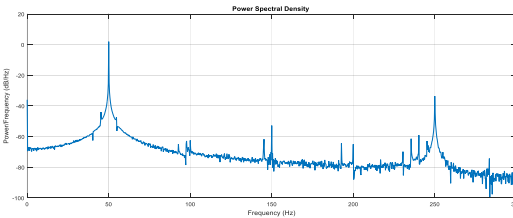


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 31. Üçüncü kademe dikey hizasız yük z-ekseni titreşim sinyalleri (Third level vertical misaligned load z-axis vibration signals)



(a) Stator akımı

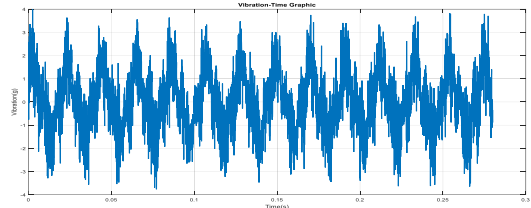


(b) Akım güç spektral yoğunluğu

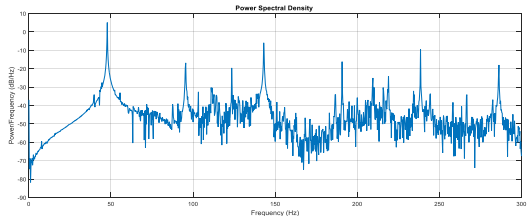
Şekil 32. Üçüncü kademe yatay hizasız yük stator akımı (Third level horizontal misaligned load stator current)

4.7 Üçüncü Kademe Yatay Hizasızlık (Third Level Horizontal Misalignment)

Motor-yük arasındaki dengesizlik yatay ekseninde 1.52 mm olarak ayarlandı. Bu hizasızlık ayar kademesinde kaydedilen stator akımı ve stator akımının güç spektral yoğunluğu Şekil 32’de verilmektedir. Motor gövdesinde kaydedilen 3-eksen titreşim sinyalleri ve bu sinyallerin güç spektral yoğunlukları sırasıyla Şekil 33 (x-eksen), Şekil 34 (y-eksen), ve Şekil 35’te (z-eksen) verilmektedir.

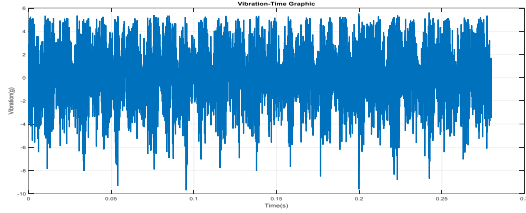


(a) Titreşim sinyali

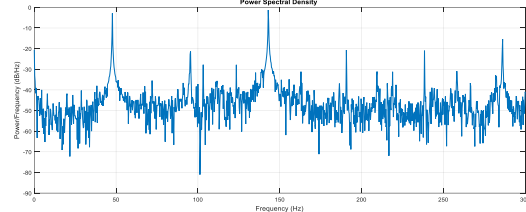


(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 34. Üçüncü kademe yatay hizasız yük y-ekseni titreşim sinyalleri (Third level horizontal misaligned load y-axis vibration signals)



(a) Titreşim sinyali



(b) Güç spektral yoğunluğu

Şekil 35. Üçüncü kademe yatay hizasız yük z-ekseni titreşim sinyalleri (Third level horizontal misaligned load z-axis vibration signals)

5. ENTROPI ANALİZ SONUÇLARI (RESULTS of ENTROPY ANALYSIS)

Motor-yük hizasızlıklarının motor performansına etkilerini değerlendirmek üzere testler gerçekleştirilmiştir. Her test için stator akımı ve 3-eksen titreşim sinyalleri kaydedildi. Sonuçlar hem zaman domeninde hem de frekans domeninde analiz edilerek Şekil 8 - Şekil 35'te sunulmuştur. Elde edilen stator akımı ve titreşim sinyallerinin entropi değerleri hesaplandı. Deneysel çalışmaların yapıldığı laboratuvarındaki şebeke gerilimi genelde dengesiz olduğu için stator akımında istenmeyen harmonikler de oluşabiliyor. Bu harmoniklerin varlığı stator akımı değerlerinin değişmesine sebep olmaktadır. Bundan dolayı test edilen asenkron motor inverter ile beslenerek deneysel çalışmalar tekrarlandı. İnverter ile motor hem 50 Hz'de hem de 55 Hz'de çalıştırıldı.

Motor dört farklı yük kademesinde (%25, %50, %75, %100) çalıştırıldı. Her yük kademesinde; normal hizalama, üç adet dikey hizalama kademesi ve üç adet de

Çizelge 2: Titreşim Sinyalleri Entropi Değerleri (Şebeke beslemeli) (Entropy values of vibration singals (mains fed))

		Entropi Değerleri						
		Normal hizalama	Birinci kademe dikey hizalama	İkinci kademe dikey hizalama	Üçüncü kademe dikey hizalama	Birinci kademe yatay hizalama	İkinci kademe yatay hizalama	Üçüncü kademe yatay hizalama
% 25 Yüklenme	x-ekseni	9.2282	9.2666	9.1999	9.0594	9.2520	9.4348	9.4291
	y-ekseni	8.6954	8.8245	8.6672	8.9695	8.5503	8.6000	8.5168
	z-ekseni	8.6617	8.6808	8.8781	9.0386	8.9277	8.8422	8.9483
% 50 Yüklenme	x-ekseni	9.4243	9.3857	9.3472	9.0843	9.1572	9.3959	9.4291
	y-ekseni	8.8658	8.8820	8.9357	8.9533	8.7547	8.7033	8.7287
	z-ekseni	8.6171	8.7576	8.7800	8.9991	8.9415	8.8252	8.8413
% 75 Yüklenme	x-ekseni	9.4746	9.3313	9.3649	9.1380	9.0974	9.4165	9.3787
	y-ekseni	9.1616	8.9890	9.0227	9.0406	8.7927	8.8968	8.9696
	z-ekseni	8.6372	8.6669	8.9247	8.9884	8.9106	8.7901	8.8469
% 100 Yüklenme	x-ekseni	9.3632	9.3100	9.3316	9.2327	9.0162	9.2491	9.2139
	y-ekseni	9.3306	9.0946	9.0686	9.1356	8.8263	9.0206	9.0141
	z-ekseni	8.6788	8.7432	8.7780	8.8416	8.8341	8.7634	8.8422

Çizelge 3: Titreşim Sinyalleri Entropi Değerleri (50 Hz inverter beslemeli) (Entropy values of vibration singals (inverter fed))

		Entropi Değerleri						
		Normal hizalama	Birinci kademe dikey hizalama	İkinci kademe dikey hizalama	Üçüncü kademe dikey hizalama	Birinci kademe yatay hizalama	İkinci kademe yatay hizalama	Üçüncü kademe yatay hizalama
% 25 Yüklenme	x-ekseni	9.1749	9.2354	9.2418	9.1447	9.3005	9.5150	9.5084
	y-ekseni	9.0193	8.8599	8.7337	9.0197	8.7043	8.6045	8.6834
	z-ekseni	8.5691	8.7562	8.8652	9.0683	8.8439	8.8027	8.8849
% 50 Yüklenme	x-ekseni	9.3340	9.4151	9.3317	8.9643	9.3372	9.5034	9.4377
	y-ekseni	8.8897	8.8318	8.7456	8.9019	8.8397	8.5581	8.6385
	z-ekseni	8.6057	8.8190	8.7987	8.9726	8.7772	8.6520	8.8807
% 75 Yüklenme	x-ekseni	9.4758	9.4527	9.3666	9.1225	9.2678	9.5286	9.3484
	y-ekseni	9.0606	8.9705	8.7961	9.0167	9.0373	8.9066	8.9072
	z-ekseni	8.6506	8.8077	8.8953	8.8643	8.8054	8.8012	8.9053
% 100 Yüklenme	x-ekseni	9.4058	9.3274	9.4205	9.1734	9.1398	9.3997	9.3213
	y-ekseni	9.3072	9.0747	8.9317	9.0954	8.9508	9.0122	9.0446
	z-ekseni	8.6689	8.7052	8.8004	8.8703	8.8852	8.7240	8.8830

Çizelge 4: Stator akımı entropi değerleri (Entropy values of stator current)

Entropi Değerleri		Şebeke Besleme			50 Hz İnverter Besleme			55 Hz İnverter Besleme		
Faz		R	S	T	R	S	T	R	S	T
Stator akımı % 25 Yüklenme	Normal	9.5708	9.6201	9.6196	9.5747	9.5541	9.5822	9.5584	9.5653	9.5530
	Dikey 0,52 mm	9.5867	9.5720	9.5781	9.5989	9.5665	9.5825	9.5246	9.5535	9.5513
	Dikey 1,14 mm	9.5302	9.6318	9.6103	9.5750	9.5325	9.5405	9.5608	9.5791	9.5724
	Dikey 1,54 mm	9.6179	9.6728	9.6548	9.5351	9.5035	9.5066	9.5594	9.5699	9.5768
	Yatay 0,51 mm	9.5441	9.6285	9.6062	9.5333	9.4935	9.5300	9.5601	9.5732	9.5679
	Yatay 1,13 mm	9.5555	9.6055	9.6169	9.5505	9.5443	9.5545	9.5624	9.5652	9.5723
	Yatay 1,52 mm	9.5535	9.5974	9.5929	9.5807	9.5673	9.5709	9.5629	9.5541	9.5595
Stator akımı % 50 Yüklenme	Normal	9.6624	9.6737	9.6682	9.5989	9.6424	9.5970	9.6721	9.6779	9.6738
	Dikey 0,52 mm	9.6445	9.6429	9.6400	9.5763	9.6374	9.6133	9.6769	9.6780	9.6711
	Dikey 1,14 mm	9.6739	9.6883	9.6747	9.5958	9.6475	9.6180	9.6768	9.6746	9.6674
	Dikey 1,54 mm	9.6800	9.6894	9.6795	9.6069	9.6579	9.6291	9.6714	9.6772	9.6707
	Yatay 0,51 mm	9.6655	9.6842	9.6670	9.6051	9.6462	9.6055	9.6741	9.6766	9.6745
	Yatay 1,13 mm	9.6569	9.6687	9.6631	9.6124	9.6340	9.6221	9.6722	9.6795	9.6793
	Yatay 1,52 mm	9.6459	9.6572	9.6438	9.6068	9.6316	9.6174	9.6713	9.6826	9.6787
Stator akımı % 75 Yüklenme	Normal	9.6476	9.6589	9.6491	9.6789	9.6924	9.6828	9.6872	9.6878	9.6839
	Dikey 0,52 mm	9.6291	9.6136	9.6144	9.6779	9.6928	9.6729	9.6898	9.6897	9.6854
	Dikey 1,14 mm	9.6701	9.6764	9.6595	9.6814	9.6902	9.6714	9.6866	9.6826	9.6903
	Dikey 1,54 mm	9.6656	9.6689	9.6527	9.6864	9.6935	9.6807	9.6870	9.6841	9.6823
	Yatay 0,51 mm	9.6523	9.6691	9.6488	9.6788	9.6928	9.6835	9.6885	9.6884	9.6893
	Yatay 1,13 mm	9.6323	9.6588	9.6460	9.6872	9.7006	9.6849	9.6597	9.6401	9.6648
	Yatay 1,52 mm	9.6328	9.6444	9.6200	9.6815	9.6936	9.6802	9.6887	9.6886	9.6877
Stator akımı % 100 Yüklenme	Normal	9.6187	9.6226	9.6206	9.6851	9.6893	9.6845	9.6985	9.7003	9.6998
	Dikey 0,52 mm	9.6006	9.5853	9.4084	9.6826	9.6936	9.6830	9.7007	9.7001	9.7011
	Dikey 1,14 mm	9.6448	9.6398	9.6228	9.6843	9.6899	9.6773	9.7029	9.6961	9.6964
	Dikey 1,54 mm	9.6464	9.6344	9.6195	9.6868	9.6824	9.6828	9.7028	9.7001	9.7029
	Yatay 0,51 mm	9.6257	9.6309	9.6171	9.6819	9.6840	9.6825	9.7009	9.7012	9.7006
	Yatay 1,13 mm	9.6040	9.6318	9.6106	9.6826	9.6922	9.6826	9.7028	9.7008	9.6925
	Yatay 1,52 mm	9.6195	9.6340	9.6041	9.6871	9.6913	9.6881	9.7006	9.7027	9.7012

yatay hizalama kademesi olmak üzere toplam yedi adet hizalama kademesi için deneysel çalışmalar yapıldı. Çizelge 2’de şebekeden beslemeli motorun test sonuçlarına ait 3-eksen titreşim sinyallerinin entropi değerleri verilmektedir. Çizelge 3’te motorun inverter (50 Hz) ile beslenerek kaydedilen 3-eksen titreşim sinyallerinin entropi değerleri verilmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan hizalı ve altı adet hizasızlık kademesinde ve dört farklı yüklenme kademesinde

kaydedilen stator akımı entropi değerleri normal hizalama durumu ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 4’te verilmektedir.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makalede asenkron motorlarda meydana gelen motor-yük arasındaki paralel hizasızlık problemlerinin motor üzerine etkilerinin incelemek için deneysel çalışmalar yapıldı. Motor-yük paralel hizasızlık durumu için

dengeli, yatay ve dikey ekseninde üç farklı paralel hizasızlık durumu olmak üzere toplam yedi farklı hizalama durumu için deneyler yapıldı. Her hizalama durumunda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda motor hem şebekeden beslendi hem de inverter ile beslendi. Her deneyde motor dört farklı yük kademesinde (%25, %50, %75 ve %100) çalıştırıldı. Her deneyde asenkron motorun 3-faz stator akımı ve 3-eksen titreşim sinyalleri kaydedildi. Akım ve titreşim sinyallerinin, hizasızlık sonucu meydana gelen karakteristik harmonikleri frekans domeninin analiz edildi. Elde edilen sonuçların literatürde verilen değerlerle uyumlu olduğu tespit edildi. Her test durumu için akım ve titreşim sinyallerinin güç spektral yoğunlukları hesaplanarak grafiksel olarak da gösterildi. Her test durumu için stator akımı ve titreşim sinyallerinin entropi değerleri hesaplandı. Stator akımı güç spektral yoğunluğu hesaplamalarında elde edilen karakteristik frekansların genliklerinin aynı yük durumu için entropi değerleriyle karşılaştırıldığında anlamlı sonuçlar verdiği görülmektedir.

Stator akımı entropi değerleri göz önüne alındığında, normal hizalama çalışma durumunda stator akımı entropi değerlerinin yük artışıyla düzenli ve beklentiler doğrultusunda (inverter-50 Hz besleme ile) arttığı görülmektedir. Şebekeden besleme durumunda şebeke geriliminin dengesiz olmasından kaynaklanan ekstra harmoniklerin entropi değerlerini etkilediği görülmektedir.

Dikey ekseninde hizalama hatası artıkça (%25 yükleme) entropi değerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Benzer şekilde yatay ekseninde hizalama hatası artıkça (%25 yükleme) entropi değerinin arttığı gözlemlenmektedir. Yarı yükte (%50 yük) dikey ve dikey ekseninde hizalama hatası artıkça entropi değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Entropi değerindeki değişim %75 ve %100 yükleme durumlarında da benzer şekilde hatasızlık derecesi artıkça artmaktadır. Entropi değerlerindeki bu değişim hizasızlık sonucu asenkron motorun maruz kaldığı x, y, ve z, eksenlerinde motor gövdesinde indüklenen kuvvet ve momentlerin bir sonucudur.

Titreşim sinyalleri x-y eksenlerinde benzer şekilde çıkmıştır. Ancak z-ekseninde daha osilasyonlu bir şekilde çıkmıştır. Şekil 6'da görüldüğü gibi z-ekseni dikey eksen olup bu ekseninde meydana gelen titreşim sinyalinin şekli motorun deney setine bağlantısının bir sonucudur.

Titreşim sinyalleri entropi değerleri incelendiğinde en mantıklı entropi değişiminin, stator akımı entropi değerlerinde olduğu gibi motorun 50 Hz inverter ile besleme durumunda elde edildiği görülmektedir. Yatay ve dikey ekseninde hizasızlık hatası artıkça x-eksen (radyal yatay eksen, Şekil 6) titreşim sinyali entropi değerlerinde artış meydana gelmektedir. Yatay ve dikey ekseninde hizasızlık hatası artıkça y-eksen (yatay eksen, Şekil 6) titreşim sinyali entropi değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Yatay ve dikey ekseninde hizasızlık hatası artıkça z-eksen (radyal dikey eksen, Şekil 6) titreşim sinyali entropi değerlerinde artış meydana

gelmektedir. Üçüncü kademe yatay ve dikey hizasızlık durumunda x, y, z eksenleri titreşim sinyalleri entropi değerleri diğer kademelerine göre daha az değişmektedir. Bu durum motorun hizasızlık sonucu ortaya çıkan kuvvet ve momentlere karşı reaksiyon moment ve kuvvetler üretmesinden kaynaklanmaktadır. Motorun %100 yüklenme ve 50 Hz inverter besleme durumu için entropi değerlerinden aşağıdaki sonuçlar çıkarılmaktadır: Yatay ve dikey ekseninde hizasızlık hatası artıkça x-eksen titreşim sinyali entropi değerlerinde artış meydana gelmektedir. Yatay ve dikey ekseninde hizasızlık hatası artıkça y-eksen titreşim sinyali entropi değerlerinde artış meydana gelmektedir. Yatay ve dikey ekseninde hizasızlık hatası artıkça z-eksen titreşim sinyali entropi değerlerinde artış meydana gelmektedir.

Motor yüküyle birlikte ve hizasızlık derecesi artıkça x-eksen, y-eksen ve z-eksen titreşim sinyalleri entropi değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Elde edilen değerler göz önüne alındığında entropi analizi ile motor-yük hizasızlık problemlerinin motor üzerine etkileri tespit edilebilir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucundan elde edilen entropi değerindeki değişimler kullanılarak sürekli olarak izlenen asenkron motorlarda meydana gelen hizasızlık problemlerine erken müdahale edilerek motor-yük hizalama hataları sonucu ortaya çıkacak olumsuz durumlar önlenabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri 2018-05 nolu ve **TÜBİTAK 116E302** nolu projeler ile desteklenmiştir. Kütahya Dumlupınar Üniversitesine ve TÜBİTAK Başkanlığına teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Nandi, S., and Toliyat H. A., "Fault diagnosis of electrical machines-a review." *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. Seattle (USA), 219-221 (1999).
- [2] Nandi, S., Toliyat, H. A., and Li, X., "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(4): 719-729, (2005).
- [3] Verucchi, C., Bossio, J., Bossio, G., and Acosta, G., "Misalignment detection in induction motors with flexible coupling by means of estimated torque analysis and MCSA," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 80: 570-581, (2016).
- [4] Patel, T. H., and Darpe, A. K., "Experimental investigations on vibration response of misaligned rotors," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(7): 2236-2252, (2009).

- [5] Sekhar, A. A., and Prabhu, B. S., "Effects of coupling misalignment on vibrations of rotating machinery." *Journal of Sound and vibration* 185(4): 655-671, (1995).
- [6] Wang, N., and Jiang, D., "Vibration response characteristics of a dual-rotor with unbalance-misalignment coupling faults: Theoretical analysis and experimental study," *Mechanism and Machine Theory*, 125: 207-219, (2018).
- [7] T. H. Patel and A. K. Darpe, "Vibration response of misaligned rotors," *Journal of Sound and Vibration*, 325(3): 609-628, (2009).
- [8] Li, S., Li, Y., & Sarlioglu, B., "Rotor Unbalanced Magnetic Force in Flux-switching Permanent Magnet Machines Due to Static and Dynamic Eccentricity," *Electric Power Components and Systems*, 44(3): 336-342, (2016).
- [9] Bonnett A. and Yung, C. "Increased Efficiency Versus Increased Reliability," *IEEE Industry Applications Magazine*, 14(1): 29-36, (2008).
- [10] Luedeking A., "*Shaft Versus Foot Alignment Tolerances: A Critique of the Various Approaches*", Ludeca Inc, (2008).
- [11] Immovilli, F., Bellini, A., Rubini, R., & Tassoni, C., "Diagnosis of Bearing Faults in Induction Machines by Vibration or Current Signals: A Critical Comparison," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(4): 1350-1359, (2010).
- [12] Simm, A., Wang, Q., Huang, S., & Zhao, W., "Laser based measurement for the monitoring of shaft misalignment," *Measurement*, 87: 104-116, (2016).
- [13] Lee, Y. S., and Lee, C. W., "Modeling and Vibration Analysis of Misaligned Rotor-Ball Bearing Systems," *Journal of Sound and Vibration*, 224(1): 17-32, (1999).
- [14] Lin, J. L., Liu, J. Y. C., Li, C. W., Tsai, L. F., and Chung, H. Y., "Motor shaft misalignment detection using multiscale entropy with wavelet denoising," *Expert Systems with Applications*, 37(10): 200-7204, (2010).
- [15] Redmond, I. "Shaft Misalignment and Vibration: A Model", *Saudi Aramco J. Technol*, 4: 41-51, (2007).
- [16] Verma, A. K., Sarangi, S., and Kolekar, M. H.. "Shaft misalignment detection using stator current monitoring", *International Journal of Advanced Computer Research*, 3(1): 305, (2013)
- [17] Mobley, R. K. "*Maintenance fundamentals*". Elsevier Butterworth-Heinemann, (2004).
- [18] Mobley, R. K. "*Maintenance fundamentals*". Elsevier., (2011).
- [19] Hines, J. W., Jesse, S., Edmondson, A., and Nower, D., "Effects of Motor Misalignment on Rotating Machinery", *Proceedings of the Maintenance and Reliability Conference*. (1998).
- [20] Bossio, J. M., Bossio, G. R., and De Angelo, C. H., "Angular misalignment in induction motors with flexible coupling". *35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 1033-1038, (2009).
- [21] Hariharan, V. and Srinivasan, P. S. S., "Vibration analysis of misaligned shaft –ball bearing system," *Indian Journal of Science and Technology*, 2(9): (2009).
- [22] Obaid, R. R., and Habetler, T. G. "Current-based algorithm for mechanical fault detection in induction motors with arbitrary load conditions", *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference*, 2: 1347-1351, (2003).
- [23] Camarena-Martinez, D., Valtierra-Rodriguez, M., Amezcua-Sanchez, J. P., Granados-Lieberman, D., Romero-Troncoso, R. J., and Garcia-Perez, A., "Shannon Entropy and-Means Method for Automatic Diagnosis of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using Vibration Signals", *Shock and Vibration*, 2016: (2016).
- [24] Ojaghi, M., & Mohammadi, M., "Unified Modeling Technique for Axially Uniform and Nonuniform Eccentricity Faults in Three-Phase Squirrel Cage Induction Motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(7): 5292-5301, (2017).
- [25] Faiz, J., & Moosavi, S. M. M., "Eccentricity fault detection – From induction machines to DFIG—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55: 169-179, (2016).
- [26] Benbouzid, M. E. H., "A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(5): 984-993, (2000).
- [27] Cabal-Yepez, E., Romero-Troncoso, R. J., Garcia-Perez, A., & Osornio-Rios, R. A., "Single-parameter fault identification through information entropy analysis at the startup-transient current in induction motors", *Electric Power Systems Research*, 89: 64-69, (2012).
- [28] Dinçer G., "Entropi Kavramının İstatistiksel Bazı Uygulamaları," *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi*, Ocak (2015).
- [29] R Cabal-Yepez, E., Romero-Troncoso, R. J., Garcia-Perez, A., Osornio-Rios, R. A., & Alvarez-Salas, R., "Multiple Fault Detection through Information Entropy Analysis in ASD-fed Induction Motors", *8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives*, (2011).
- [30] Pan, S., Han, T., Tan, A. C., and Lin, T. R., "Fault Diagnosis System of Induction Motors Based on Multiscale Entropy and Support Vector Machine with Mutual Information Algorithm," *Shock and Vibration*, 2016: 1-12, (2016).
- [31] Bromiley, P. A., Thacker, N. A., & Bouhova-Thacker, E., "Shannon Entropy, Renyi Entropy, and Information" *Statistics and Inf. Series* 2004(004), (2004).