

İndiksiyon Motorun Mekanik Arıza Teşhisinde Makine Öğrenme Yöntemlerinin Kullanılması

Mehmet Recep Minaz^{1*}, Kadriye Yıldız²

¹ Siirt Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye (ORCID: 0000-0001-8046-6465)

² Siirt Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye (ORCID: 0000-0000-0000-0000)

(İlk Geliş Tarihi 25 Temmuz 2019 ve Kabul Tarihi 25 Ağustos 2019)

(DOI: 10.31590/ejosat.596898)

ATIF/REFERENCE: Minaz, M. R. & Yıldız, K. (2019). İndiksiyon Motorun Mekanik Arıza Teşhisinde Makine Öğrenme Yöntemlerinin Kullanılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (16), 881-904.

Özet

Elektrik makinalarında erken arıza tespiti, arızanın büyüp hasarı yaymadan önüne geçilmesi açısından oldukça önemlidir. Arızaların büyümeden öngörülü, motorun ömrünü artırılabildiğinden araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir. Bu yönde çalışan araştırmacılar endüstriyel düzeyde hızlı, yorumlaması kolay ve işletme açısından uygulanabilirlik olan teknikler üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmada induksiyon motorlarda oluşan kırık rotor çubuğu ve eksenden kaçıklık arızalarının sonuçlarını sunmaktadır. Sağlıklı ve hatalı koşullar için bir induksiyon motorun sonlu elemanlar modeli (FEM) geliştirilmiş ve analiz edilmiştir. Arızalı bir makinenin modeli, sağlıklı motorun fiziksel durum ve mekanik pozisyonları değiştirilip farklı arıza şiddetleri oluşturularak akım, gerilim, akı ve tork sinyalleri incelenmiştir. Bu farklı arıza şiddetlerine ait elektriksel sinyallerin verdiği tepkiler karşılaştırılmıştır. Elde edilen akım sinyaline ait ham verilere hızlı fourier yöntemi (FFT) uygulanarak işlenmiş veriler elde edilmiştir. Öz nitelik çıkarımı olarak kNN, MLP, RT gibi farklı sınıflandırma metotları ile arıza teşhisinde eğitim amaçlı kullanılmıştır. Kırık rotor çubugu ait farklı arıza şiddetleri ile ilgilenirken, eksantriklik arızasında ise statik eksantriklik, dinamik eksantriklik ve karışık eksantriklik arızaları üzerinde durulmuştur. Ayrıca, farklı sınıflandırmalar kullanarak karşılaştırma yapılmıştır. k-NN, MLP ve RF algoritması sınıflandırma da doğruluğunun oldukça belirgin olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İndiksiyon motor, veri madenciliği, öz nitelik çıkarımı, arıza tespiti.

The Use of Machine Learning Methods For Induction Motor Mechanical Fault Diagnosis

Abstract

Early fault detection in electrical machines, grow and damage is quite important in terms of preventing the fault from spreading. Predictions of fault from growth have become the focus of attention of researchers as they can increase the life of the motor. Researchers working in this field have focused on techniques that are fast on the industrial level, easy to interpret and applicable to the enterprise. In this study, it presents the results of broken rotor bar and eccentric faults in induction motor. The finite element model (FEM) of an induction motor was developed and analyzed for healthy and defective conditions. The model of a fault machine, the physical state of the healthy motor and the mechanical positions are changed and the current, voltage, flux and torque signals are examined by creating different fault intensities. The responses of electrical signals of these different fault intensities were compared. The processed data were obtained by applying the fast fourier method (FFT) to the raw data of the obtained current signal. As a feature extraction, kNN, MLP, RT with different classification methods are used for training purposes in diagnostics. While dealing with the different fault intensities of the broken rotor bar, static eccentricity, dynamic eccentricity and mixed eccentricity faults are emphasized in the case of eccentricity fault. In addition, comparisons were made using different classifications. The accuracy of k-NN, MLP and RF algorithm classification was found to be quite significant.

Keywords: Induction motor, data mining, feature extraction, fault detection.

* Sorumlu Yazar: Siirt Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye, ORCID: 0000-0001-8046-6465, recminaz@gmail.com

1. Giriş

İndüksiyon motorları gelişmiş ülkelerde üretilen toplam enerjinin azımsamayacak kadar tüketmektedir. Bu, bu indüksiyon motorlarının hem endüstride hem de evsel amaçlı yaygın şekilde kullanıldığını göstermektedir. Düşük bakım, düşük maliyet, basit yapı ve yüksek güvenilirlik, geniş kullanımıların arkasındaki ana nedenleridir. Tüm bu özelliklerden dolayı, endüksiyon makineleri enerji santrallerinde ve evlerde pompalar, fanlar, kompresör gibi birçok alanda kullanmaktadır (Subramaniam, Sahoo, Manohar, & Panda, 11-14 Aug. 2017). Endüstriyel uygulamaların çoğunda, AC motorları, indüksiyon makinesinin rotor, stator ve yatak hasarına neden olabilecek elektrikli makine elemanlarının aşınmasına ve çatlamasına neden olan sık çalışma-durdurma döngülerine maruz kalmıştır (Puche-Panadero, et al., 13 January 2009) (Granda, Aguilar, Arcos-Aviles, & Sotomayor, 2017). Herhangi bir güvenilir teshis yönteminin temeli, sabit durum ve hata koşulları altında motorun elektriksel, manyetik ve mekanik davranışının analizidir (Faiz & Sharifian, 05 May 2006). Motor durum izlemesi, giderek daha fazla dikkat uyandırın yaklaşımakta olan bir arıza durumunun erken uyarısını vererek güvenilirliği artırmaya yardımcı olabilir. Mühendislik uygulamalarında dört aşamaya ayrılır: sinyal ölçümü, özellik çıkarımı, durum tespiti ve durum analizi (Desheng, Beibei, Yu, & Jinping, 25-27 May 2012).

Bu çalışmada, motorda oluşan arızaları etkin bir şekilde tespit etmek için motor akım imza analizi (MCSA) kullanılmıştır. Akım sinyaline ait öznitelikleri elde etmek için hızlı fourier yöntemi kullanılmıştır. Çevrimiçi tespitinde indüksiyon motorda kırık rotor çubuğu ve eksantriklik durumları ele alınarak toplam on dört tür motor arızası oluşturulmuş ve spektral analiz ile MCSA kullanarak bir indüksiyon motorunun arıza işleminin durumunu tanımlaması incelenmiştir. Makina arızaları, sağlıklı motor ile arızalı motor çıkış karakteristikleri karşılaştırılarak tespit edilmektedir. Elektriksel sinyallerdeki değişim arıza frekanslarında kendini gösterirken, karakteristik işaretler ile arıza nedeni ile oluşan sinyaller, birbirinden karşılaştırma ile ayırlabilmektedir. Karşılaştırma FFT spektrum ve dalga formu grafikleri kullanılarak yapılır. Makinanın çalışma durumuna bağlı olarak alınan giriş sinyallere hızlı bir şekilde FFT uygulanarak arıza nedeni ile artış gösteren frekansların ayırt edilmesini sağlanmıştır. Bu frekanslardaki artışın gözlemlenmesi ve buna uygun sınıflandırma metodları uygulayarak Kestirimci Bakım stratejisi oluşturulabilir. Bu çalışmada 30 kW üç fazlı sincap kafesli asenkron motorda oluşturulan arızalara ve sağlam motora ait elde edilen deneyel sonuçlar tartışılmıştır.

Ayrıca bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemini ile tasarlanmış asenkron motorun oluşturulan sağlam motor referans tutularak farklı arıza şiddetleri simüle edilmiştir. Bu program motorun akı, gerilim, tork ve akım gibi çıkış sinyallerini izlemeye izin verirken makinede çok yönlü bir arıza analizi yapılmasına olanak tanır. Makine tasarım aşamasındayken simülasyon ile farklı arıza şiddetleri oluşturma; hassas ve yoğun veri toplama, zaman ve iş gücünden kazanç açısından oldukça etkilidir.

2. Oluşturulan Arızalara Genel Bir Bakış ve Test Motorunun Modellenmesi

2.1. Kırık Rotor Çubuğu Arızaları

Havalanılmayan ortamlarda motor çalışması motor veriminin düşmesine neden olur ve endüksiyon makinesi rotorundaki kırık çubuklardan kaynaklanan arıza riskini artırır, çünkü rotordaki sıcaklık artışı çubukları kırmaya neden olabilir (Ceban, Pusca, & Romary, 29 July 2011). Uzun süre aralıklarla motor aşırı yükünün gerekliliği olduğu endüstriyel uygulamalarda, motor aşırı yükü, motorun dâhilî bileşenlerinde termal baskın üretir, çünkü makine orijinal tasarımından öngörülenlerden farklı çalışma koşullarında çalışmaya zorlanır (Mustafa, Nikolakopoulos, & Gustafsson, February 2015) (Danilo Granda, Aguilar, Arcos-Aviles, & Sotomayor, 11 April 2017). Rotor arızaları asenkron motor arızalarının %8-9 kadarını teşkil etmektedir. Rotorda meydana gelen arızalar rotor çubuklarının çatlaması veya kırılması ve rotor kısa devre halkasının çatlaması veya kırılması olarak sıralanabilir. Rotorda meydana gelen arızalar motorun stator akımında, besleme frekansının sağında ve solunda olmak üzere yan bant frekans bileşenleri olarak gözlemlenir.

2.2. Eksenden Kaçılık Arızası

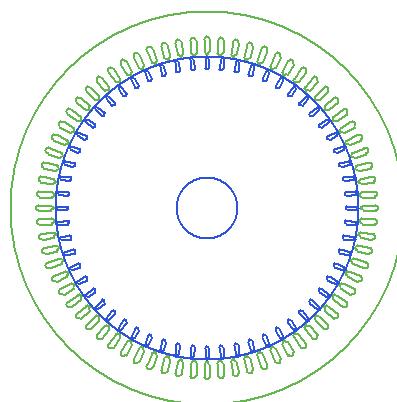
Eksenden kaçılık arızası; stator ve rotor arasındaki eşit olmayan hava boşluğu sonucu oluşan bir durumdur. Üreticiler tarafından müsaade edilebilir eksenden kaçılık oranı %5' i geçmemektedir. Sağlam bir motorda stator, rotor ve dönüş merkezi aynı eksen üzerindedir. Rotor ekseninin merkezi aynı zamanda dönüş ekseninin de merkezi ise bu durum statik eksenden kaçılık arızasıdır. Statik eksenden kaçılığa stator nüvesinin ovallığı veya rotor konumunun yanlış konumlandırılması sebep olabilmektedir. (Elif, Goşenay, & Mehmet, 2014) Hava boşluğu eksantrikliği, statik ve dinamik eksantrikliği içerir. Ek olarak, rotor merkezi rotasyon merkezinde bulunmadığında dinamik dış merkezlilik ortaya çıkar. Statik eksantriklikte hava boşluğu uzunluğu stator tarafının bakış açısından sabitlenir. (Jee-Hoon, Jong-Jae, & Bong-Hwan, 30 November 2006) Rotor mili tertibi yeterince sertse, statik dış merkezlilik seviyesi değişmez. Dinamik eksantriklik gerçekleştiğinde, rotorun merkezi dönme merkezinde değildir ve minimum hava boşluğu pozisyonu rotorla birlikte döndürülür (Ishkova & Vitek, 20 July 2015).

2.3. Asenkron Motorun Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Modellenmesi

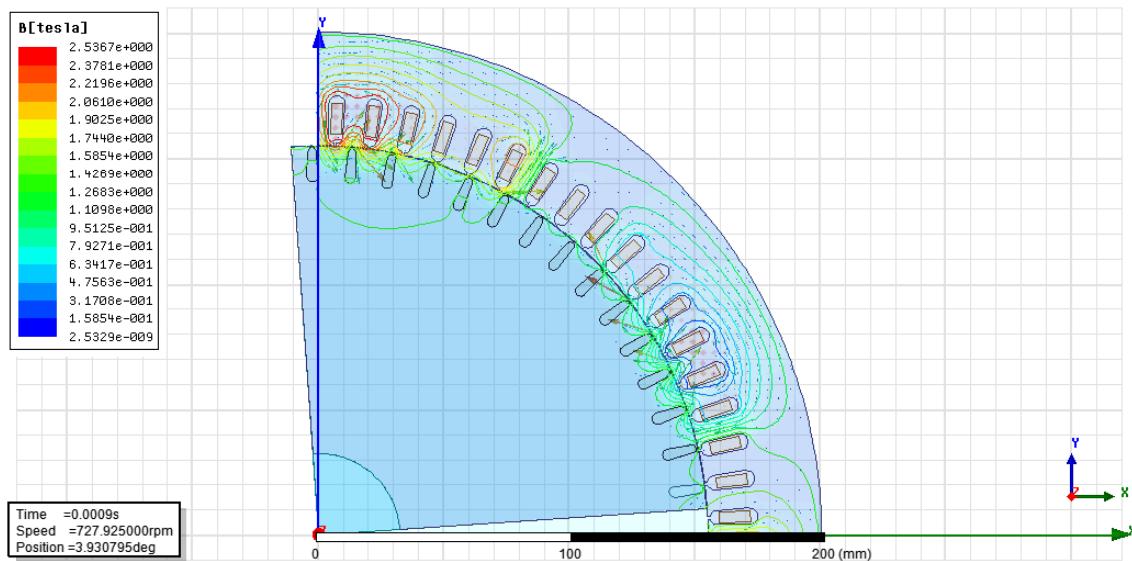
Sonlu Elemanlar Yöntemi ile 30 kW, 3 fazlı, 8 kutuplu 50 Hz de çalışan bir asenkron motor arıza analizi yapmak üzere tasarlanmıştır. Motor tasarım ve giriş-çıkış parametreleri belirlendikten sonra tasarlanan motor sonlu elemanlar yöntemiyle analizi yapılır. Aşağıda verilen Şekil 2.1'de asenkron motorun RMXprt modeli verilmiştir. Asenkron motorun 2D modelinin gösterimi Şekil 2.2 verilmiştir. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4 verilen eğrilerde stator akım-zaman grafiği ve moment grafiği verilmiştir.

Tablo 0.1. Asenkron motorun tasarım parametreleri

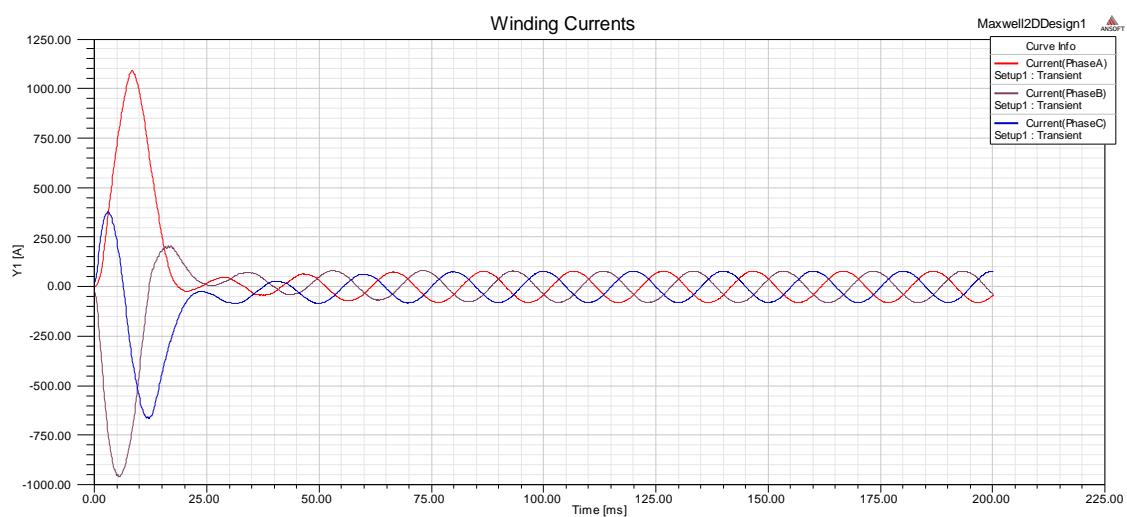
Kutup sayısı	8	
Stator Dış Çapı	401.5	mm
Stator İç Çapı	309.55	mm
Rotor Dış Çapı	309	mm
Rotor İç Çapı	65	mm
Stator oluk Sayısı	72	
Anma Gerilimi	400	V
Giriş Gücü	33.448	kW
Çıkış Gücü	30	kW
Verim	89.7	%
Anma Hızı	727.92	rpm
Anma Torku	393.557	Nm
Anma Akımı	54.78	A
Atalet Momenti	1.273	Kgm ²



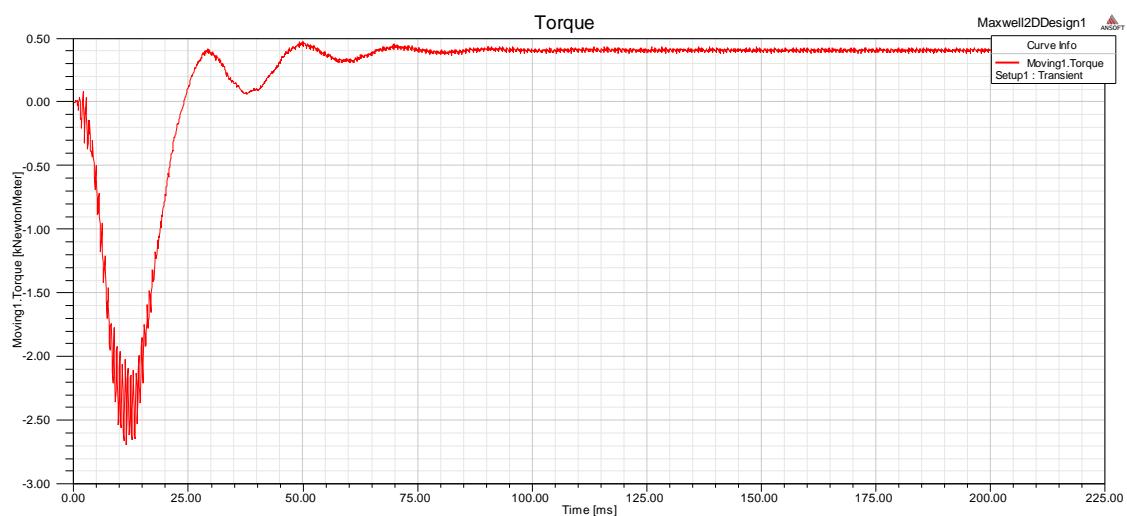
Şekil 2.1 Asenkron motor RMXprt modeli



Şekil 2.2. Asenkron motor 2D modeli



Şekil 2.3. Asenkron motorun Akım-Zaman stator çıkış sinyali



Şekil 2.4. Asenkron motorun Moment çıkış sinyali

3. Asenkron Motorlarda Arıza Oluşturma ve Özelliğ Çıkarımı

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, gerçek bir sincap kafesli asenkron motorun özelliklerine dayanarak tasarlanan bu sağlam motor üzerinden on dört arızalı motor modeli oluşturuldu. Tüm simülasyonlar 0.0001 sn. adım aralıklarıyla 0.2 sn. boyunca gerçekleştirılmıştır. Bu adım aralığında elde edilen akım sinyallerinin 105-125 sn. aralığı boyunca tam bir periyot için FFT uygulanarak eğitilme üzere öz nitelik çıkarımı elde edilmiştir.

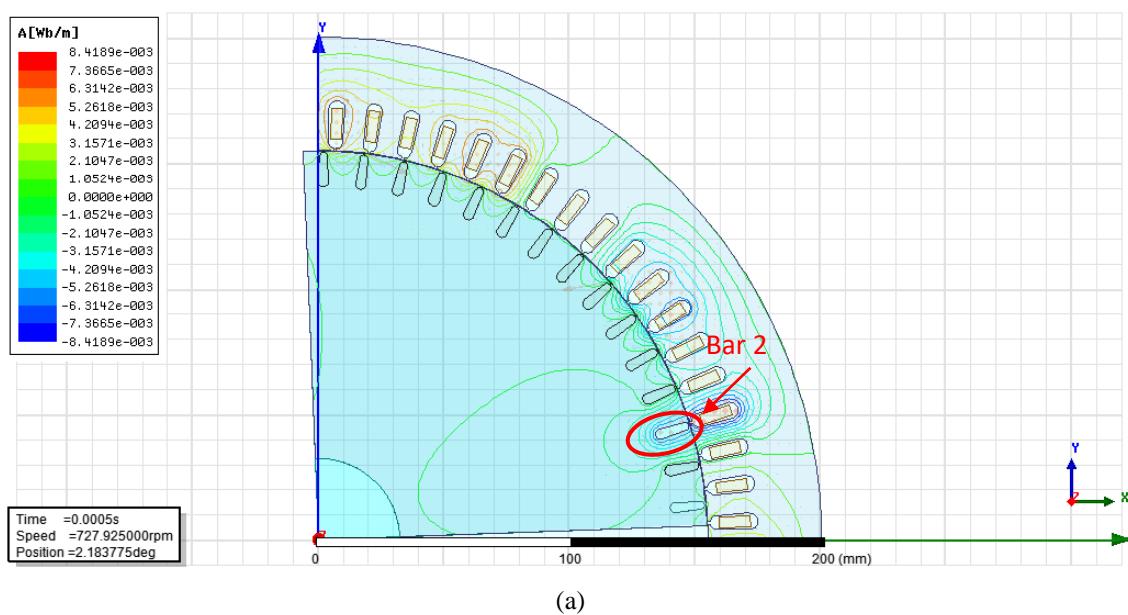
3.1. Kırık Rotor Çubuğu Arızası Modelleme

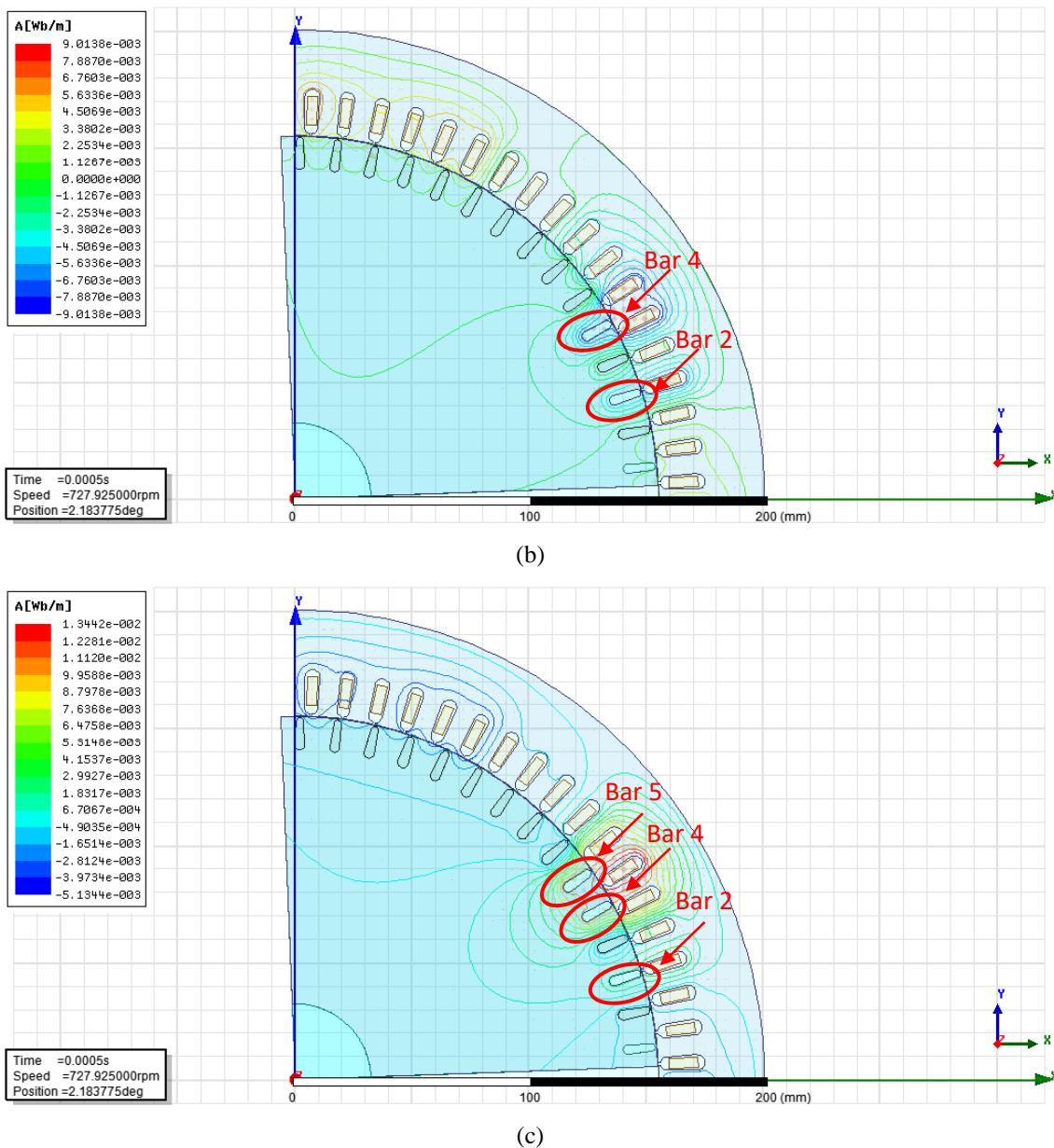
Rotor arızaları kırık çubuklarla ilgilidir. Bunlar, harekete geçen çeşitli streslerin bir kombinasyonundan kaynaklanır. Rotor üzerinde elektromanyetik, termal, dinamik, çevresel ve mekanik gerilmeler olarak tanımlanabilir. Bu nedenle bunlar düşük frekans torkuna yol açar. Gürültü ve titreşimi artıran harmonikler arıza tespitinde özelik çıkarımı olarak kullanılabilir (Yemna Bensalem, 2015). Bu bağlamda, FEM başarılı bir şekilde kullanılabilir, çünkü manyetik malzemenin lineer olmayışını, Asenkron Motor davranışının hatalarla ilgili ayrıntılı bir incelemesi için uygun olduğunu ve bu durumda kırık rotor çubuk hata tipinin dikkate değer olduğunu doğrular (Wiem, Yemna, & Hafedh, 16-19 March 2015).

Bu çalışma için simüle edilen endüksiyon motoru FEM modeli 60 rotor oluk sayısı mevcuttur. Transiyet analizde motorun dörtte biri alındığında görünürde 15 rotor çubuğu vardır. Rotor çubuğunun gevşetilmesi veya sökülmesi, asenkron motorda çok önemli bir mekanik hata olarak kabul edilir. Bu bölümde de motora ait A fazının frekans bölgesi analizinin karşılaştırılması, bir bar, iki bar ve üç bar gibi üç farklı kırık rotor çubuğu arızası oluşturulmuştur. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile oluşturulan kırık çubuklar ve benzetim sonuçları Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Asenkron motorunun rotor çubuğu ve rotor halkası 2D gösterimi

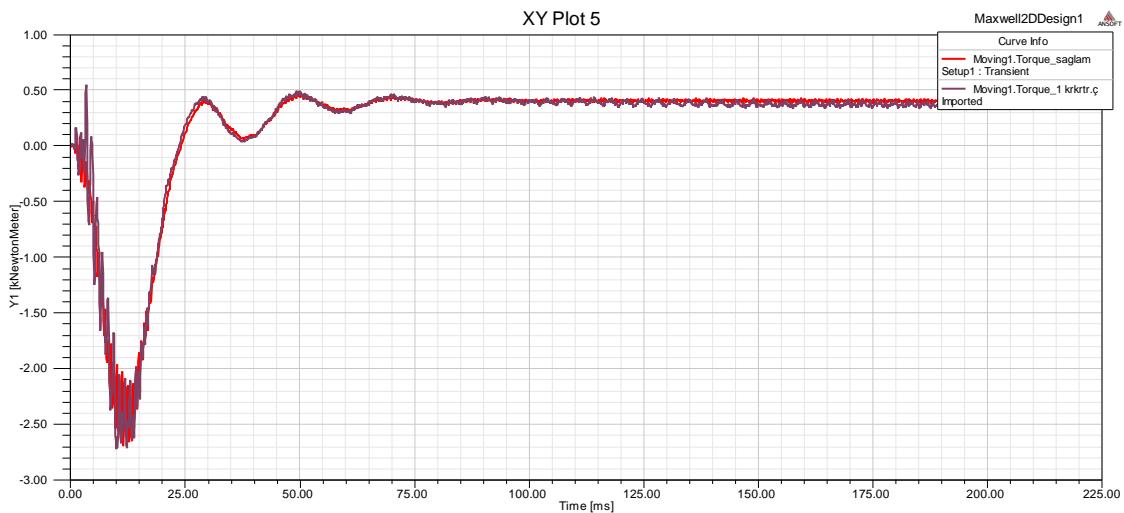




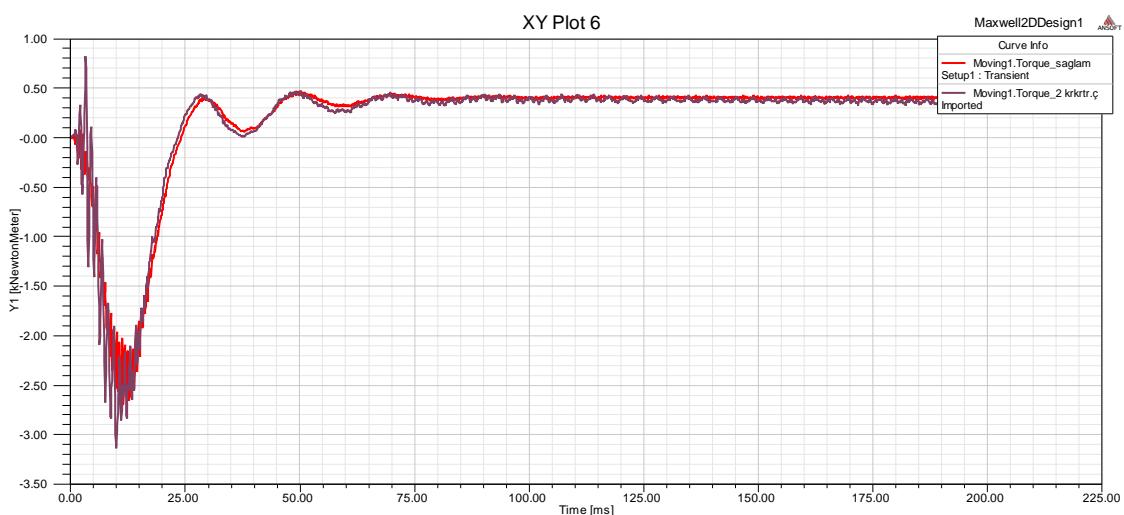
Şekil 0.2. Asenkron motor kırık rotor çubuğu ariza modellemesi a) 1 kırık b) 2 kırık c) 3 kırık

Oluşturulan bu arıza durumlarında, kırılan çubugun akımı sıfır alınır, dolayısıyla kırılan çubugun direncinin yeterince büyük olduğu çubugun yüksek empedansla açık devre olduğu kabul edilir. Ashında, bu gerçek duruma yakındır, çünkü kırık çubuklar devresini tamamlamadığından üzerinde akım geçişine izin vermezler. Kırık çubuk endüksiyon motorunda gürültü, dengesiz manyetik çekmeye neden olur.

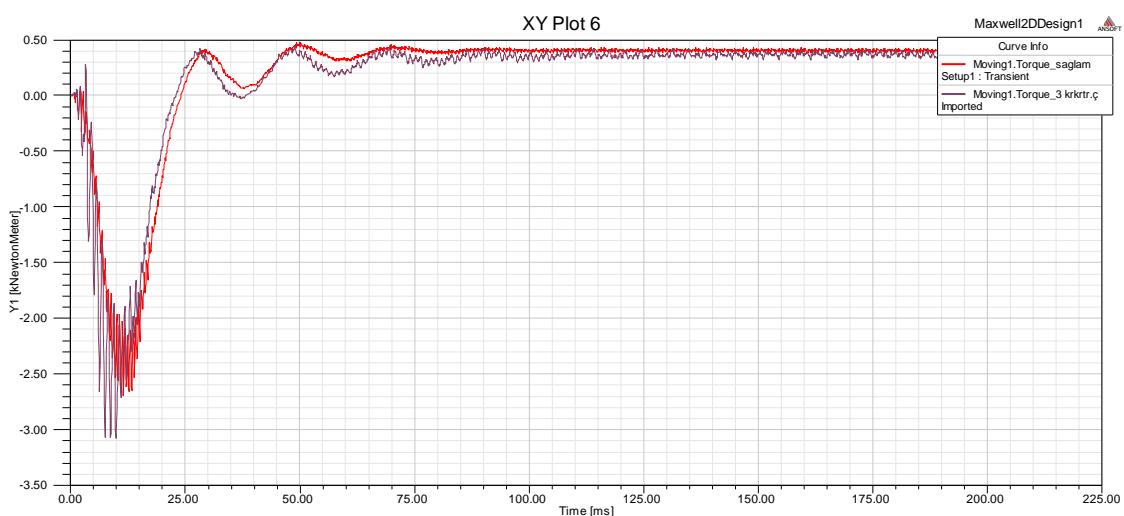
Bir elektrikli makinenin elektromanyetik torku elektrik gücünü mekanik güçe dönüştürmek için kullanıldığı için çok önemlidir (Dorrell, Chindurza, & Cossar, Effects of rotor eccentricity on torque in switched reluctance Machines, 17 October 2005). Kırık rotor çöguna ait farklı şiddeteteki arızaların sağlam motor ile arızalı motor karşılaştırması aşağıda sunulmuştur. Her bir arıza şiddeti in sağlam durum ve arızalı durum tork çıkış sinyalleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 0.3. Asenkron motorun sağlıklı motor ile 1 kırık rotor çubuğu ait torklaştırılması



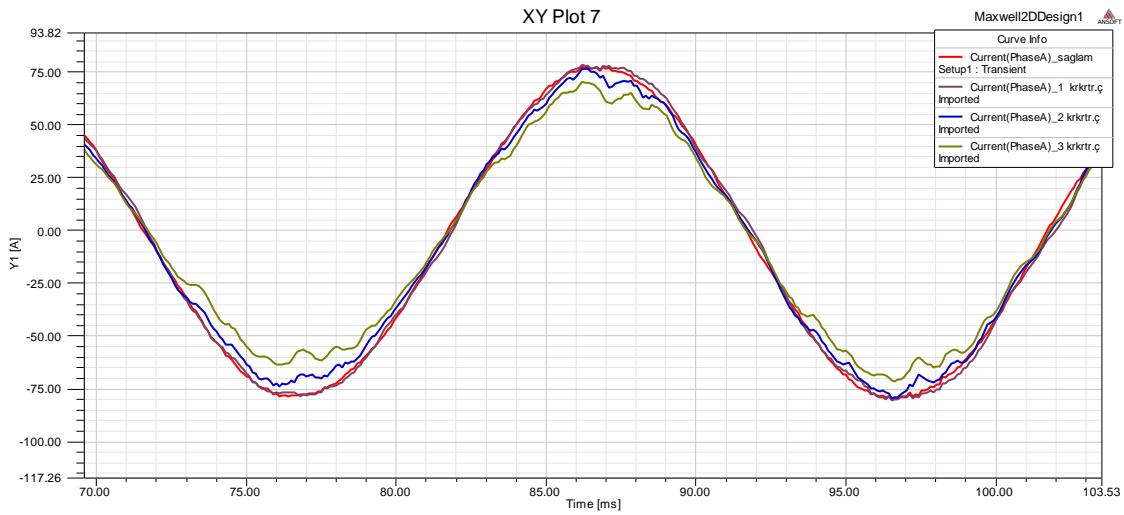
Şekil 0.4. Asenkron motorun sağlıklı motor ile 2 kırık rotor çubuğu ait torklaştırılması



Şekil 0.5. Asenkron motorun sağlıklı motor ile 3 kırık rotor çubuğu ait torklaştırılması

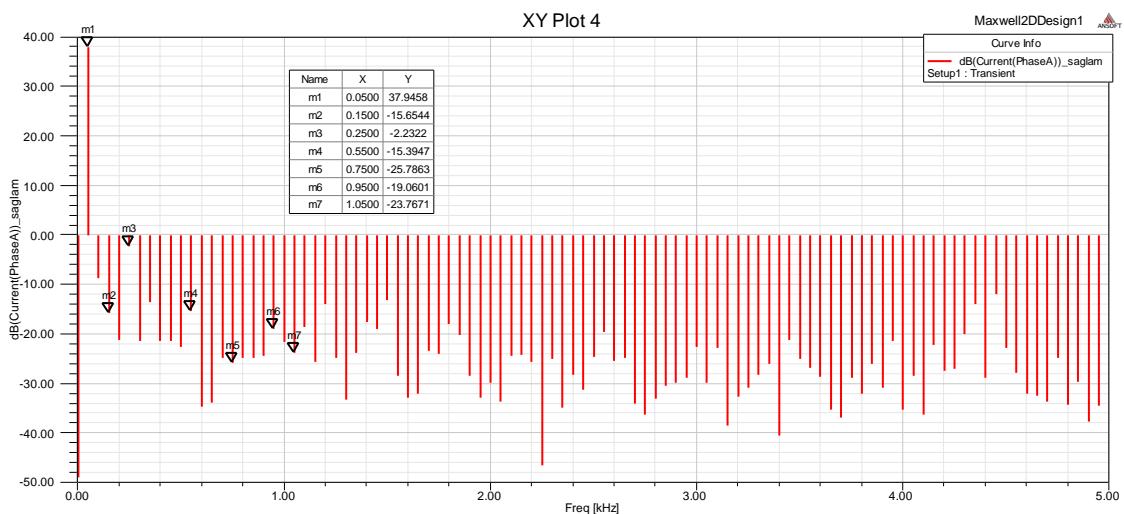
Stator akımındaki dengesizlik ve hatanın neden olduğu ilave harmoniklerin varlığı Makine tarafından oluşturulan tork üzerinde bir etkiye sahiptir. Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 da 3 arızalı durumun elektromanyetik tork simülasyon sonucunun sağlam motor ile karşılaştırılması göstermektedir. Kırılan çubukların sayısını arttırırken, torkun daha fazla etkilendiğini not ediyoruz. Aslında,

çubukların yüksek empedans durumu dolayısıyla kırılması ya da olmaması ortalama değeri azaltır ve salınımları arttırmır. Bunlar, mekanik titreşimler üreten ve böylece makinenin anomal bir şekilde çalışmasını sağlayan dönme hızının salınımlarına neden olur.

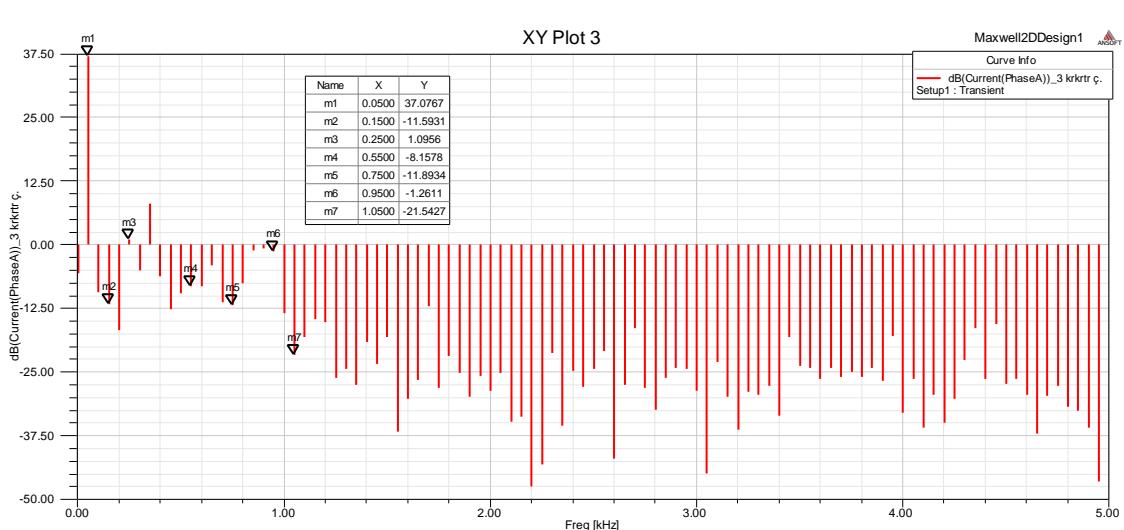
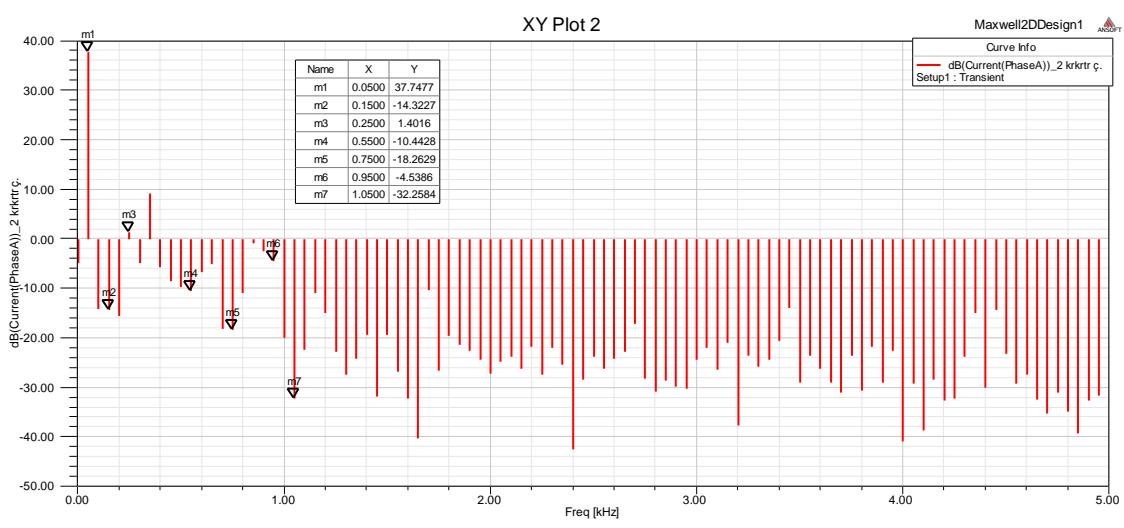
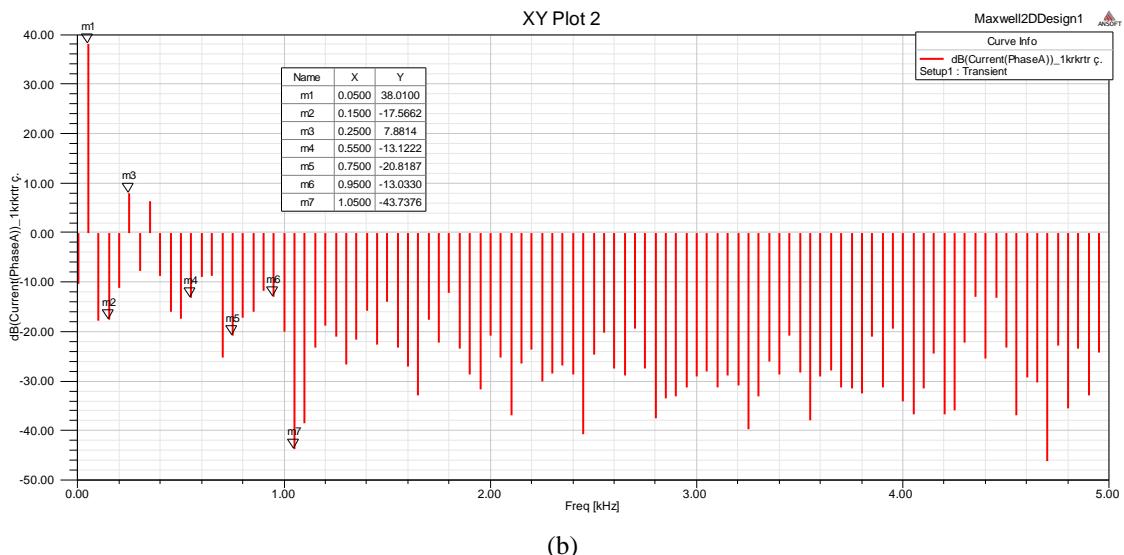


Şekil 0.6. Asenkron motorda kırık rotor çubuğu ait farklı arıza şiddetlerinin çözünürlüğü artırılmış akım dalga formları

Motorun stator akımları sağlam, 1, 2 ve 3 kırık rotor durumundaki çıkış sinyalleri Şekil 3.6'da karşılaştırılmak üzere çözünürlüğü artırılmış bir şekilde gösterilmektedir. Simülasyona göre, stator akımlarının iki kırık ve üç kırık çubuğu göreceli konumlarından önemli ölçüde etkilendiği gözlemlenebilir. Ancak bir kırık rotor çubuğu arızalı sinyal durumu için aynı şey söylemenemez. Bu durumda özellik çıkarımı için zaman domeninde analizi zordur. Hata şiddeti artıkça akım zamanla diğerlerinden daha şiddetli bir şekilde dalgalanır, yani hatalı özellik 3 kırık rotor koşulda maksimumdur. Kırık çubuklar 2 konumundayken hatalı özellik belirgin şekilde fark edilir ve kırılan çubuklar 3 konumundayken hatalı özellik durumu maksimumdur. Böylece aşağıdaki sonuç elde edilebilir: kırık çubuk sayısı artıkça motorun asimetrisi, çalışma performansı üzerindeki etki, stator akımının hatalı özelliği lineer olarak artar.



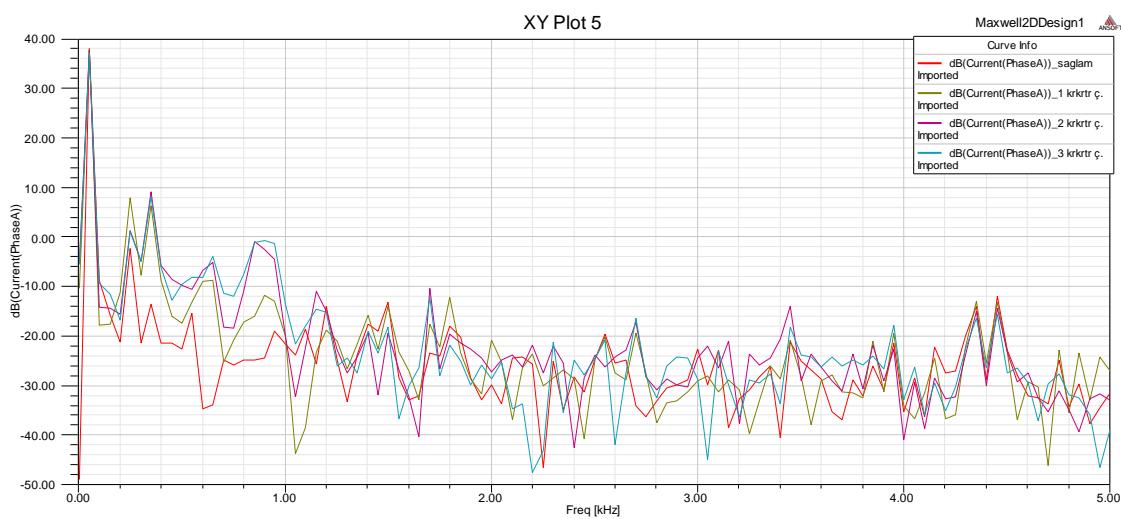
(a)



Şekil 0.7. Asenkron motor kırık rotor çubuğu arızasına ait FFT spektrumu a)sağlam motor b)1 kırık c)2 kırık d)3 kırık

Tablo 0.2. Asenkron motor kırık rotor çubuğu arızası öz nitelik çıkarımı için tespit edilmiş bazı önemli harmonikler

Harmonik (fs)	Sağlam	1 Kırık Rotor Ç.	2 Kırık Rotor Ç.	3 Kırık Rotor Ç.
	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)
1	37.94582	38.01003	37.74774	37.07669
3	-15.65441	-17.56619	-14.32272	-11.59311
5	-2.23220	7.88142	1.40156	1.09560
11	-15.39469	-13.12221	-10.44284	-8.15776
15	-25.78633	-20.81865	-18.26286	-11.89344
19	-19.06010	-13.03301	-4.53858	-1.26108
21	-23.76710	-43.73763	-32.25839	-21.54267



Şekil 0.8. Asenkron motorun kırık rotor çubuğu arızasının farklı şiddetlerine ait sürekli FFT sinyalleri

Bu gibi bir arıza kombinasyonu meydana geldiğinde, FFT çalışmasının kırık çubuk fayındaki frekans bileşenlerinin, hata şiddetlerinden herhangi birinin ortaya çıkması durumunda ortaya çıktıkları gibi benzersiz imzalarına sahip oldukları görülmüştür. Şekil 3.8'de akım harmonik analizinde bobin arası dönüş hatası için tepe noktaları rotorun kırık çubuk arızaların farklı olduğu açıkça görülebilir.

3.2. Eksantriklik Arızasının Modellenmesi

Bir ideal endüksiyon motorunda, stator ve rotor arasındaki hava boşluğu, tam dairesel yol için aynıdır. Ama gerçekte yeni üretilen bir makinede bile hava boşluğu tamamen tekdüze değildir. Rotor ve stator arasında eşit olmayan hava aralığı dolayısıyla asimetrik bir hava boşluğu motorda eksantriklik arızası olarak bilinmektedir. (Khalid & Galina, 10-13 May 2015) (Yassa, Racheck, & Houassine, April 2019) Eksantriklik, sapmanın stator ve rotorun yanlış yerleştirilmesi, rulmanların yanlış yerleştirilmesi, rulmanların aşınması, yanlış hizalanmış yük ve rotor milleri, mekanik yük dengesizliği, mekanik rezonans gibi nedenlerden kaynaklanabileceği herhangi bir eksen sapması ile olur. (A.Ghoggala, S.E.Zouzoua, H.Razikb, M.Sahraoui, & A.Khezzarc, May 2009). Bu bölümde Asenkron motorun farklı derecelerde statik eksantrik(SE), dinamik eksantriklik(DE) ve bu ikisinin birleşimi olan karışık eksantriklik(KE) durumları simülle edildi. FEM kullanarak sağlıklı bir motorun sonuçları ile bu motora ait oluşturulan farklı arıza şiddetlerinin sonuçları karşılaştırıldı ve özellik çıkarımı için geleneksel olan spektral analiz yöntemi olan FFT analizi gerçekleştirildi.

Yüksek seviyede statik eksantriklik, rotorun merkezinin dönmeye merkezinde olmadığı ve minimum hava boşluğunun pozisyonu rotorla birlikte döndüğü yerlerde dinamik dış merkezliliğe yol açabilir. Hava aralığı eksantrikliği, spesifik yüksek ve düşük frekanslarda stator akımı harmonilerini indükler. (Dorrell, Thomson, & Roach, Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors, Jan/Feb 1997) İlginilen yüksek frekanslı bileşenler,

$$f_{HE} = \frac{1-S}{P}(kR \mp n_d v)f_s \quad (1)$$

k bir tam sayı ve n_d statik eksantriklik için $= 0$ ve $n_d =$ Dinamik durumlar için 1, 2 veya 3. Ayrıca, hem statik hem de dinamik eksantriklikler bir arada mevcutsa, hava boşluğu ile ilgili başarısızlıkların yanında, temel frekansın yanında düşük frekanslı bileşenler olacaktır.

$$f_{LE} = f_s \mp kf_r \quad (2)$$

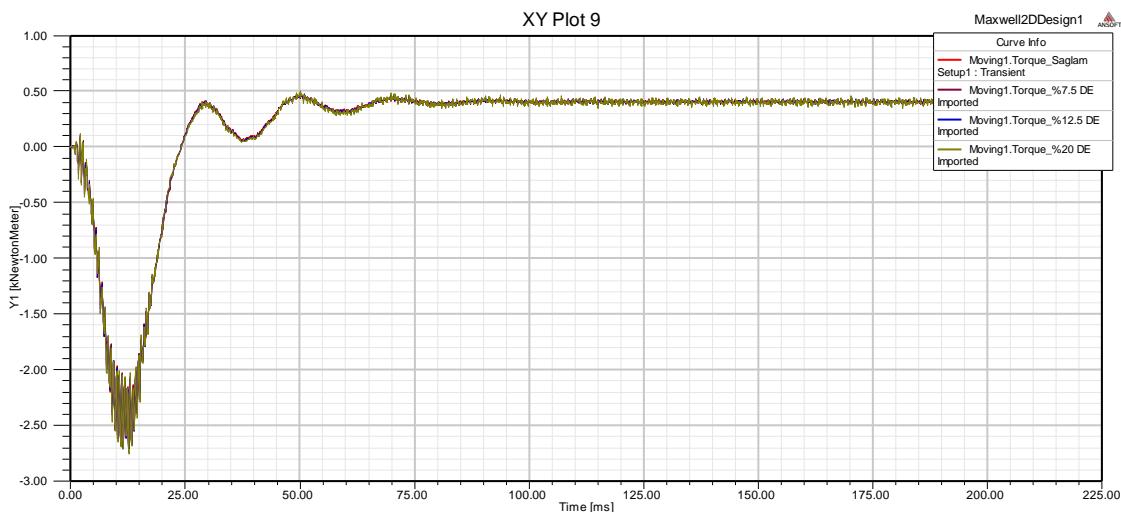
Karışık eksantriklik durumunda, stator titreşim sinyalinde düşük frekanslı bileşen de tespit edilebilir. (Esfahani, Wang, & Sundararajan, 17 May 2013)

$$f_{VE} = 2f_s \mp f_r \quad (3)$$

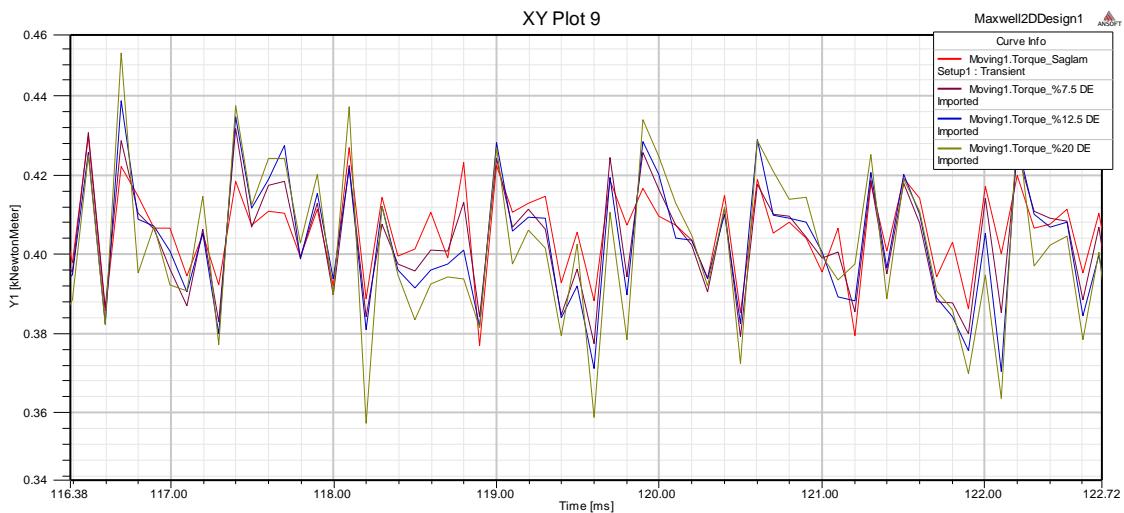
Bir makinenin uzun süre dengesiz bir yükle kritik bir hızda çalıştırılması, özellikle büyük makinelerde dinamik eksantriklige (DE) yol açar (Joksimovic, Durovic, Penman, & Arthur, June 2000). Dinamik eksantriklik, statorun merkezi ve dönme merkezinin aynı olduğu ancak stator merkezi ile rotor merkezinin farklı olduğu durumlarda ortaya çıkan dengesiz manyetik çekmeye neden olan istenmeyen bir durumdur. Arıza şiddetinin büyümesi makine üzerinde verimin düşmesine, makinanın ilk durum çıkış performansını korumaması ve zamanla tamamen durmasına yol açar. Bu durum işletme açısından hem kesintili iş gücüne hem de yerine getirilecek makine için ek bir maliyete sebep olacaktır. Bunun yanında arıza henüz başlama durumunda olsa da o arızanın teşhis teknik bir birikim gerektirdiğinden makinanın bakımı yine ek bir maliyet gerektirir. Keza bu arıza sürecinde zaman kaybı da en önemli sonuçlardan biridir.

3.2.1. Dinamik Eksantriklik Arızası

Bu bölümde dinamik eksantriklik sonlu elemanlar yöntemi ile simüle edildi. Bu motor DE'gin farklı arıza şiddetleri altındaki çıkış sinyalleri ile sağlıklı motor çıkış sinyalleri karşılaştırıldı. Rotor x ve y yönünde kaydırılarak stator ve rotor arasında değişken hava aralığı oluşturulurken şaftın stator merkezinde tutulması, dolayısıyla rotorun dengesiz bir hava aralığı ile stator merkezinin etrafında dönmesi ile DE arızası elde edildi. DE arızası için rotor stator ekseninden 0.08mm, 0.05mm ve 0.03mm kaydırılarak sırasıyla %20, %12.5 ve %7.5 şiddetinde farklı arıza durumları oluşturulmuştur. Asenkron motorun hava aralığı 0.4mm olarak ve bu %100 eksantriklik arızası olarak referans alındığında yukarıda belirlenen arıza yüzdeleri oluşturulan kaymalara oransal bir işlem uygulanarak belirlendi. FEM'in izin verdiği Geometri Eksantrik durumun en yüksek derecesinin %22 olduğu tespit edildi. Bundan dolayı oluşturulabilecek maksimum eksantriklik durumu için %20 lik kayma seçilmiştir.

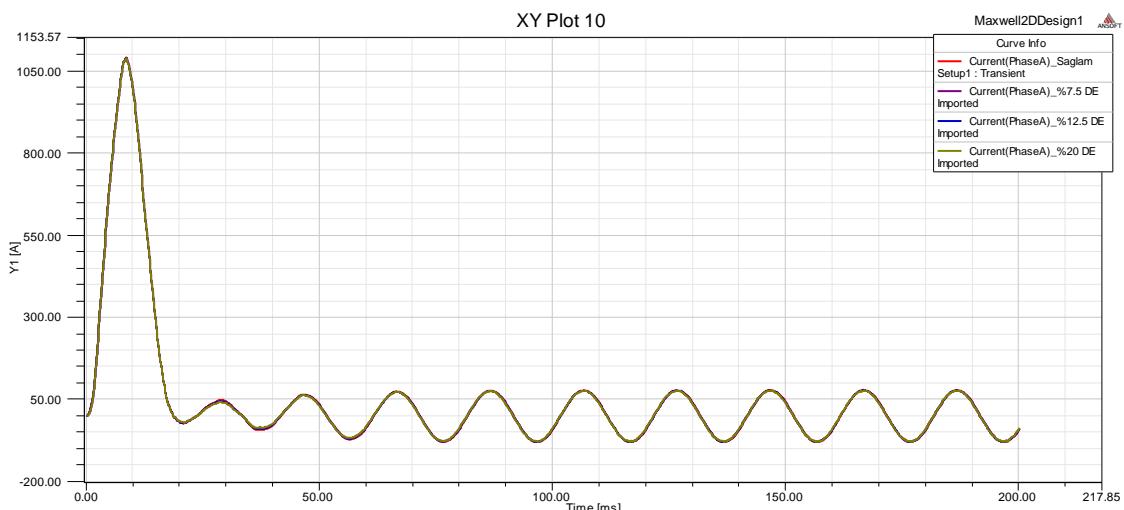


Sekil 0.5. Asenkron motorun farklı DE arıza şiddetlerine ait üst üste bindirilmiş tork dalga formları

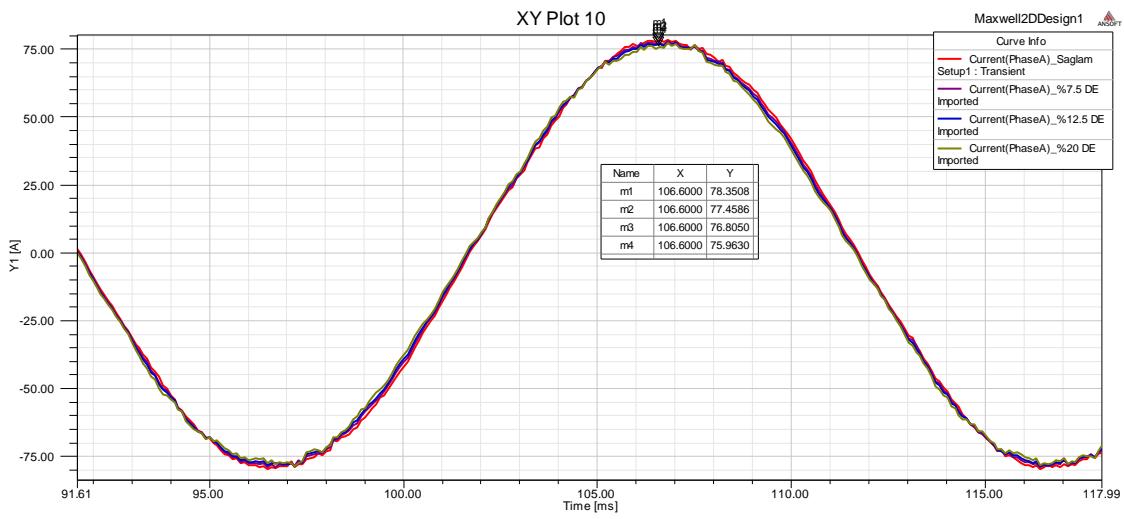


Şekil 0.6. Asenkron motorun farklı DE arıza şiddetlerine ait çözünürlüğü artırılmış tork dalga formları

Akı dağılımı ve asenkron motorun akımları hava boşluğu torkunu üretir. Eksantriklik hatalar dengesiz bir manyetik çekme oluşturur ve bu durumun hava boşluğu torkuna etkisi olacaktır. Stator dönen alanı sabit bir tork üretir, manyetik alanların rotasyonel etkisi göz önüne alındığında kuvvetin döndürme etkisi ile rotorda da döndürülme ile oluşan bir tork meydana gelir. Rotor ve stator alanlarını toplamı net manyetik alanı oluşturdugunda rotor alanındaki bir değişim doğrudan çıkış torku üzerinde salınımlara neden olacaktır. Yukarıdaki çözünürlüğü artırılmış tork sinyalinden de görüldüğü gibi DE şiddetinin artmasıyla torktaki salınım artı gözlemlenebilir. Kırmızı renkteki eğri sağlam motora ait iken yeşil renkteki eğri bu bölümde alınan %20 DE (Max) arıza şiddetine aittir. Ve %20 DE arızasına ait sinyalin torktaki salınımı ve kararsızlığı ortadadır. Ancak bu üst üste bindirilmiş sinyal formundan torktaki artış veya azalıştan söz etmek yanlış olacaktır. Arızaya ait tork sinyallerinden bahsederken salınım ve titreşimlerden bahsetmek ve dolayısı ile sinyal üzerindeki parazitlenmelerden bahsetmek daha doğru olacaktır. Bu çıkarımlardan yola çıkarak ve daha önceki diğer çalışmalar göz önüne alındığında uygun sinyal işleme tekniği ile özellik çıkarımı arıza teşhisinden oldukça önemlidir.

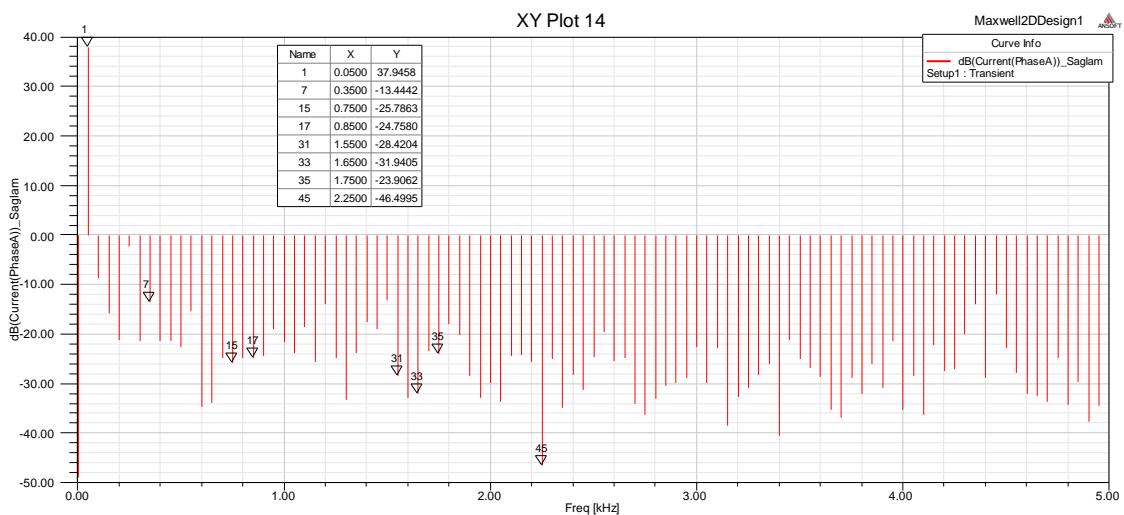


Şekil 0.7. Asenkron motorda dinamik eksantriklik (DE) arıza şiddetlerinin üst üste bindirilmiş akım dalga formları

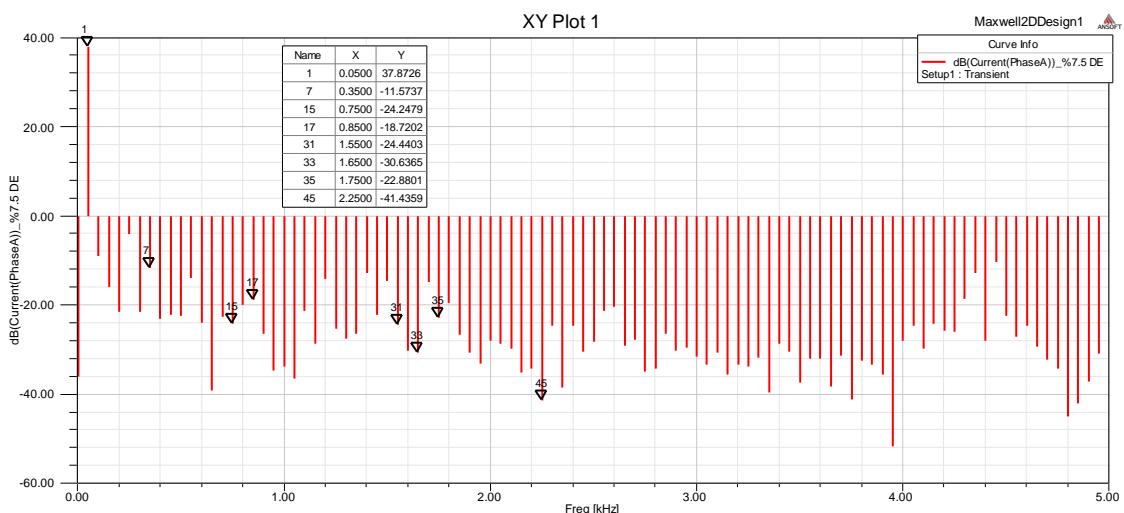


Şekil 0.8. Asenkron motorun farklı DE arıza şiddetleri için A fazına ait çözünürlüğü artırılmış akım dalga formları

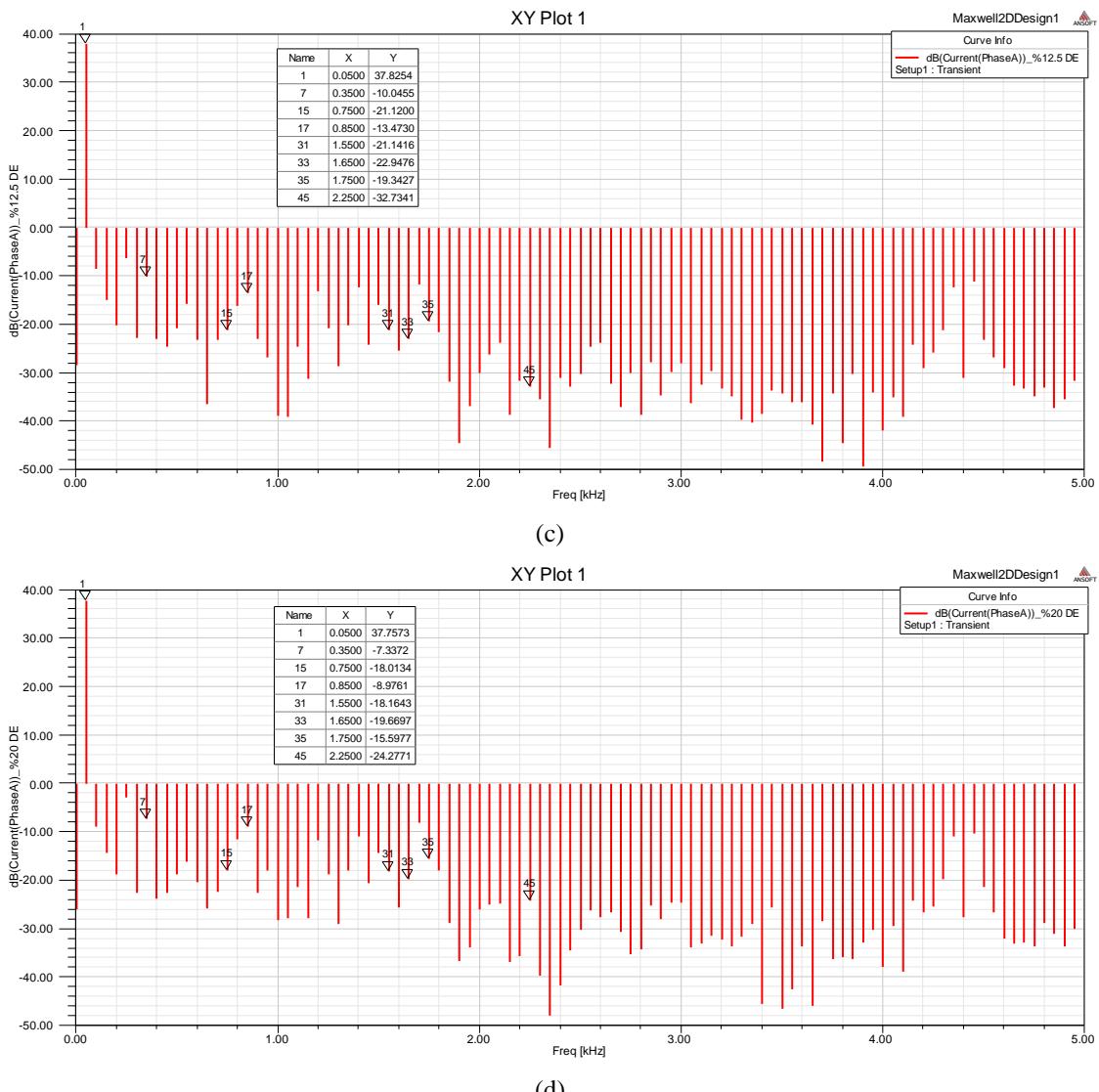
Akım sinyal formunda da yine aynı şekilde salınımlar mevcuttur. Arıza şiddeti artıkça motorun çektiği maksimum akımda azalma görülrürken akım sinyalinde parazitler artmaktadır. Ancak bu değişimler özellik çıkarımı için yeterli değildir. Bu bozulma, stator akımı spektrumunda, özellik çalışma ve desen tanıma için kullanılabilen özellik çıkarımı için hızlı bir sinyal işleme tekniğinden sonra sınırlandırma için işlenmiş verilerimiz hazır olacaktır. Farklı DE arıza şiddetlerine ait stator akım sinyallerine uygulanan FFT sonuçları aşağıda verilmiştir.



(a)



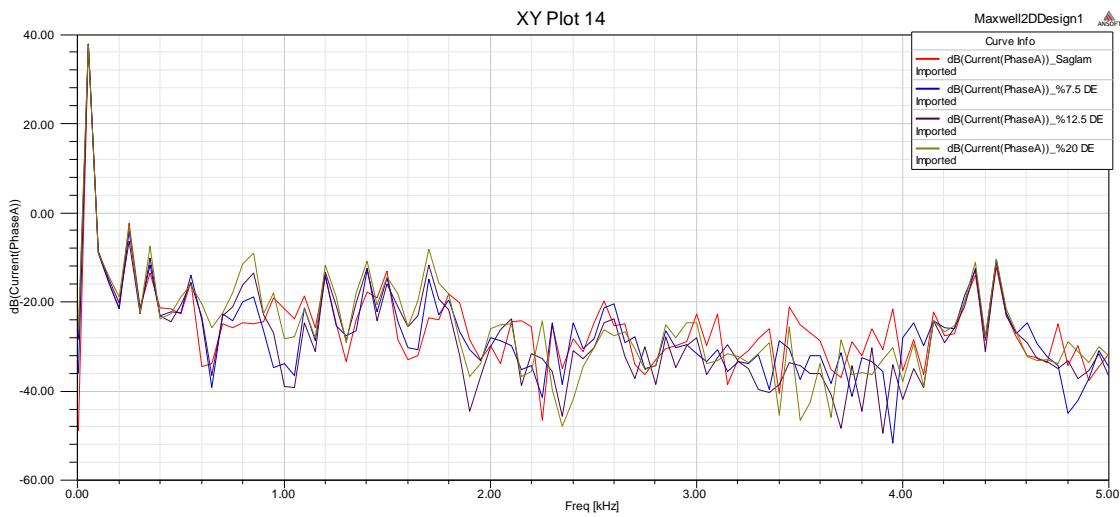
(b)



Şekil 0.9. Asenkron motor dinamik eksantriklik (DE) arızasına ait FFT spektrumu a)sağlam motor b)%7.5 DE c)%12.5 DE d)%20 DE

Tablo 0.3. Asenkron motor DE arızası öz nitelik çıkarımı için tespit edilmiş bazı önemli harmonikler

Harmonik (fs)	Sağlam	%7.5 DE	%12.5 DE	%20 DE
	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)
1	37.94582	37.87257	37.82535	37.75730
7	-13.44420	-11.57374	-10.04547	-7.33722
15	-25.78633	-24.24786	-21.11998	-18.01339
17	-24.75795	-18.72016	-13.47301	-8.97608
31	-28.42038	-24.44034	-21.14159	-18.16426
33	-31.94051	-30.63646	-22.94764	-19.66971
35	-23.90621	-22.88012	-19.34266	-15.59770
45	-46.49955	-41.43592	-32.73406	-24.27707

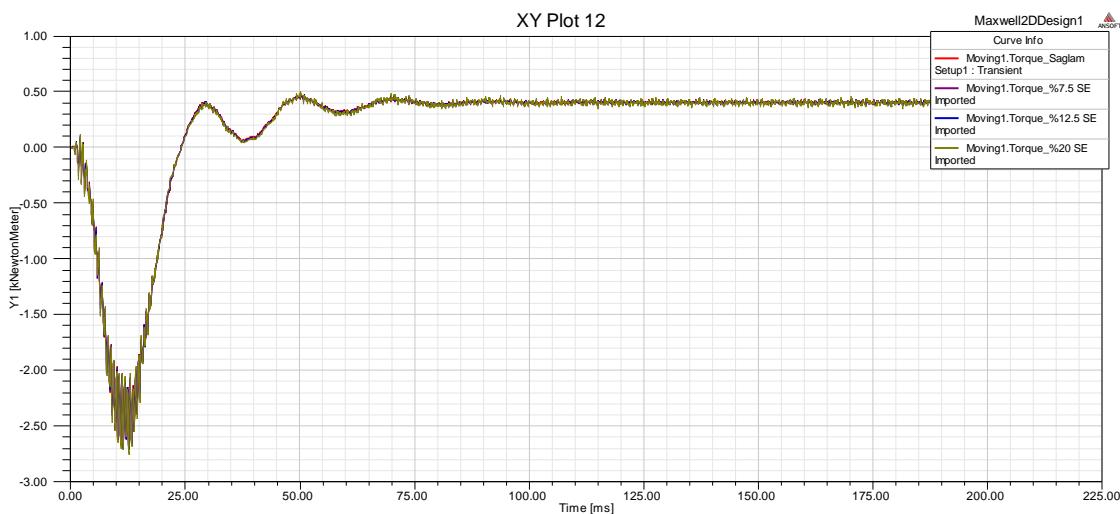


Şekil 0.10. Asenkron motorun DE arızasının farklı şiddetlerine ait sürekli FFT sinyalleri

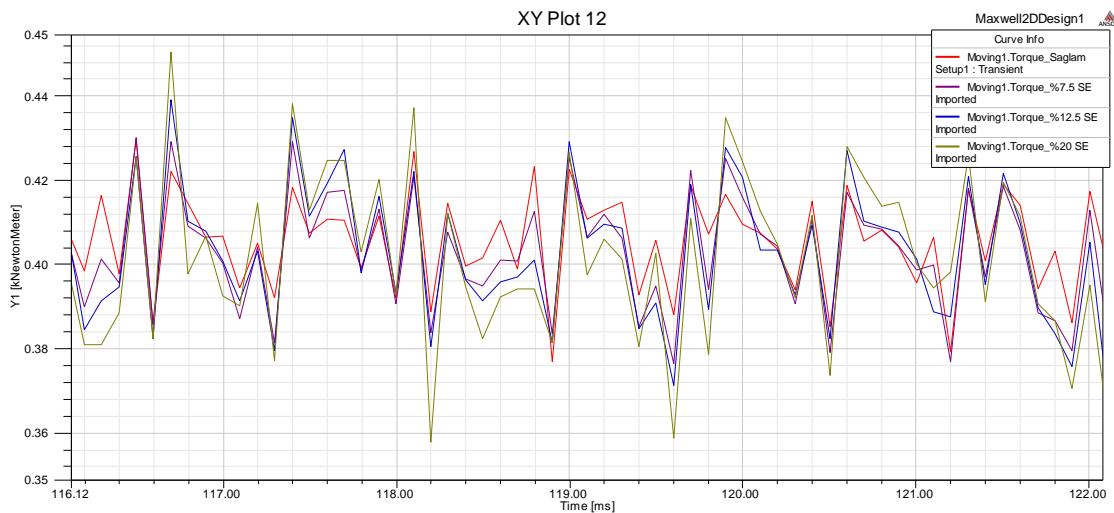
Motorun tam yüklenme durumu için simüle edilmiş DE arızasına ait stator çıkış sinyallerine uygulanmış FFT sonuçları yukarıda verilmiştir. Yukarıdaki tabloda bazı önemli harmonikler belirtilmiştir. Tespit edilen harmoniklerde genel olarak arıza şiddeti artıkça temel frekans dahil olmak üzere harmonik genliklerinde azalmalar olmuştur. Bu azalmalardaki değişimler arıza sınıflandırma açısından oldukça iç açıcıdır.

3.2.2. Statik Eksantriklik Arızası

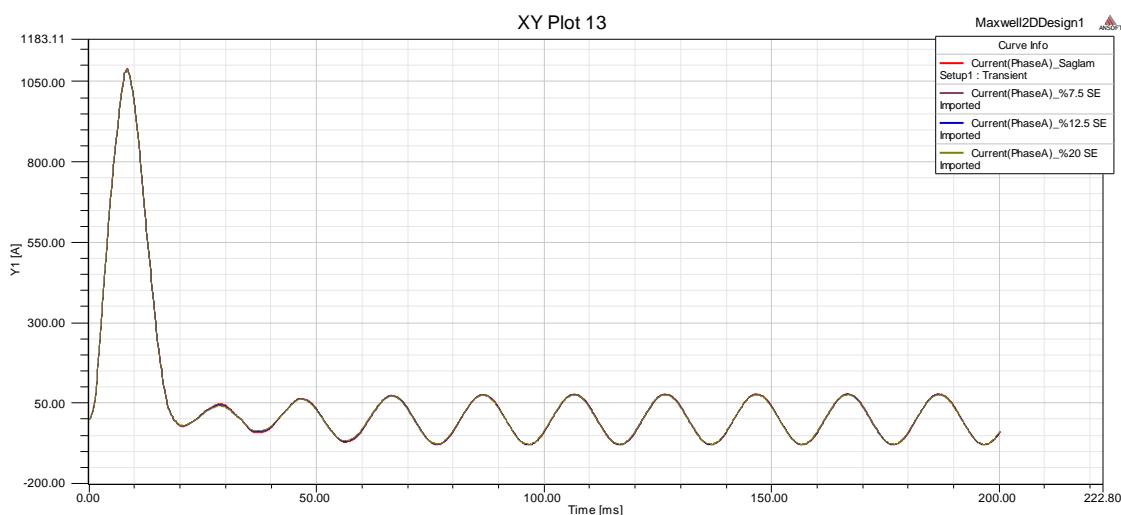
Statik eksenden kaçıklık arızası hava aralığındaki dengeli akı dağılımını bozarak motor içerisinde asimetrik akı dağılımına neden olur. Bu durum hava aralığı manyetik akı dağılımında ek harmonik bileşenlere ve tork sinyallerinde salınımlar beklenmektedir. SE arızası için rotor eksenin stator ekseninden 0.08mm, 0.05mm ve 0.03mm kaydırılarak sırasıyla %20, %12.5 ve %7.5 şiddetinde farklı arıza durumları oluşturulmuştur. SE arızası durumunda rotorun merkezi stator merkezinden ayrılmış ve kendi etrafında dönmesi ile oluşturulan dengesiz manyetik kuvvetler incelenmiştir.



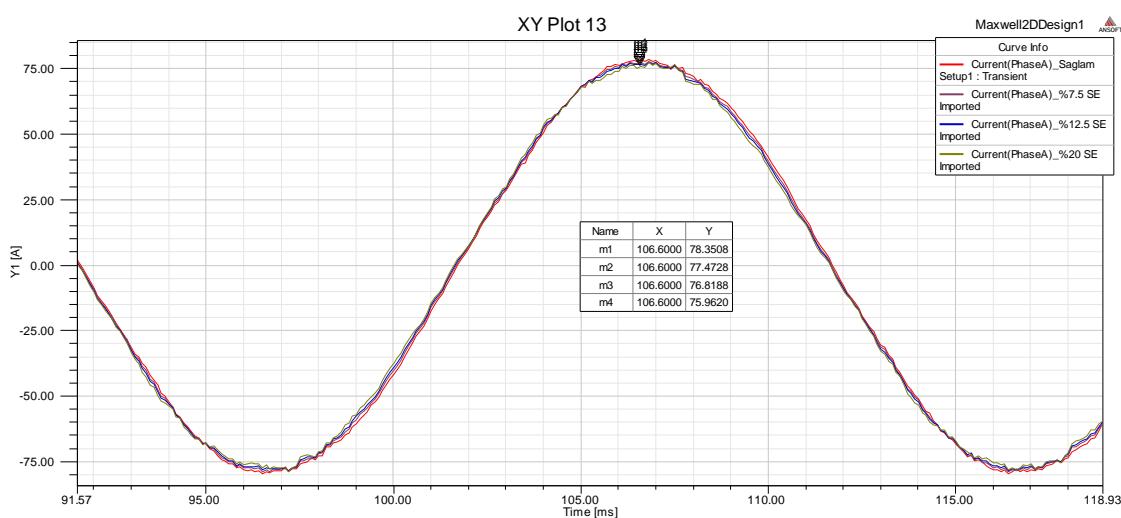
Şekil 0.11. Asenkron motorun Farklı SE arıza şiddeterine ait üst türde bindirilmiş tork dalga formları



Şekil 0.12. Asenkron motorun farklı SE arıza şiddetlerine ait tork dalga sinyallerinin çözünürlüğü artırılmış formları



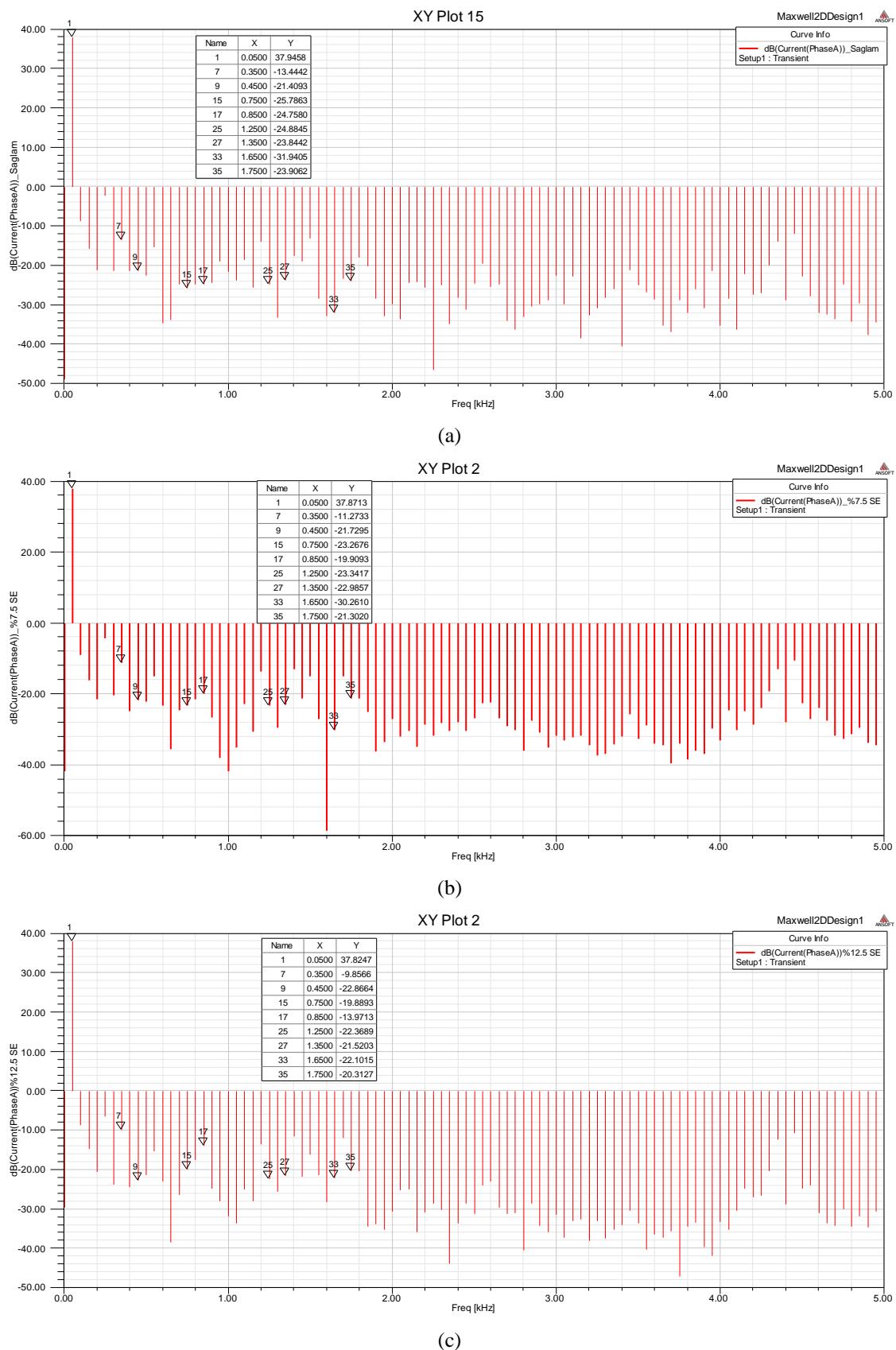
Şekil 0.13. Asenkron motorda SE arıza şiddetlerinin üst üste bindirilmiş akım dalga formları

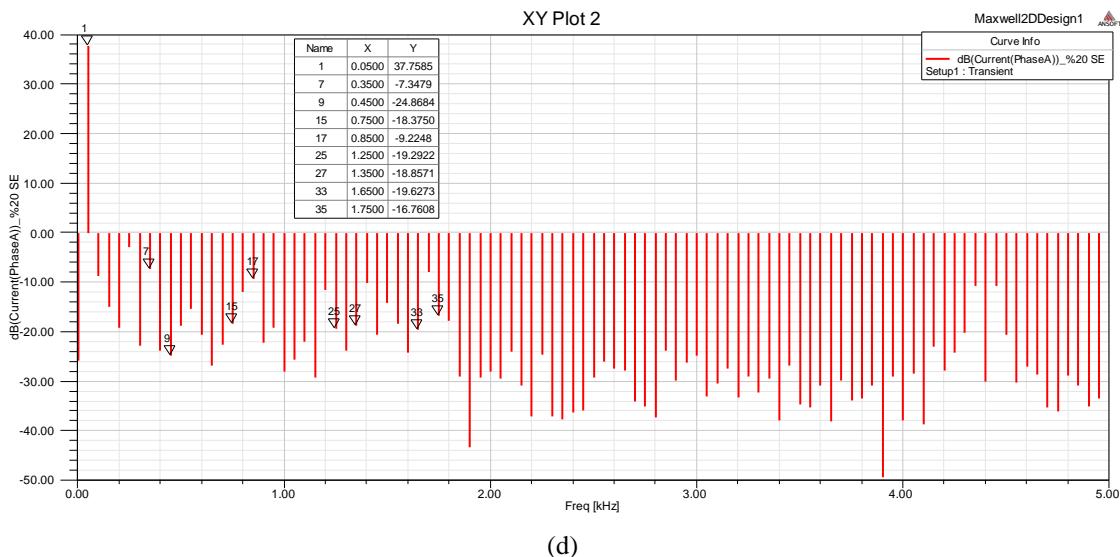


Şekil 0.14. Asenkron motorun farklı SE arıza şiddetleri için A fazına ait çözünürlüğü artırılmış akım dalga formları

Yapılan karşılaştırmalar sonucu akım ve tork sinyallerinin genlik değerlerinde arıza şiddetinin büyümesi ile birlikte belirgin bir değişme olmadığı görülmüştür. Ancak tork sinyallerinde salınımlar ortaya çıkmakta ve bu salınım tepe değerleri arıza miktarı ile birlikte artmaktadır. Şekil 3.16'da tork sinyalinin çözünürlüğü artırılarak arıza şiddetinin artışı ile sinyallerdeki bozulmalar

gösterilmiştir. Arıza bilgisini taşıyan ilgili özellikler, SEY ile simüle edilen arıza şiddetlerine ait stator çıkış sinyallerindeki spektral analiz sonuçlarına bağlıdır. Hata bilgisini çıkarmak için, özellik çıkarma yöntemi motorun sağlıklı durumu ile arızalı durumları arasındaki hata karakteristik frekanslarındaki değişimine dayanır. Arıza teşhisinde arızanın başlangıç aşamasındayken dolayısıyla çok küçük arıza şiddetlerinin doğru tespiti kestirimci bakımın önemini artıracağını söyleyebiliriz. SE arıza şiddetlerine ait statorun A fazına uygulanmış FFT analiz sonuçları aşağıda verilmektedir.



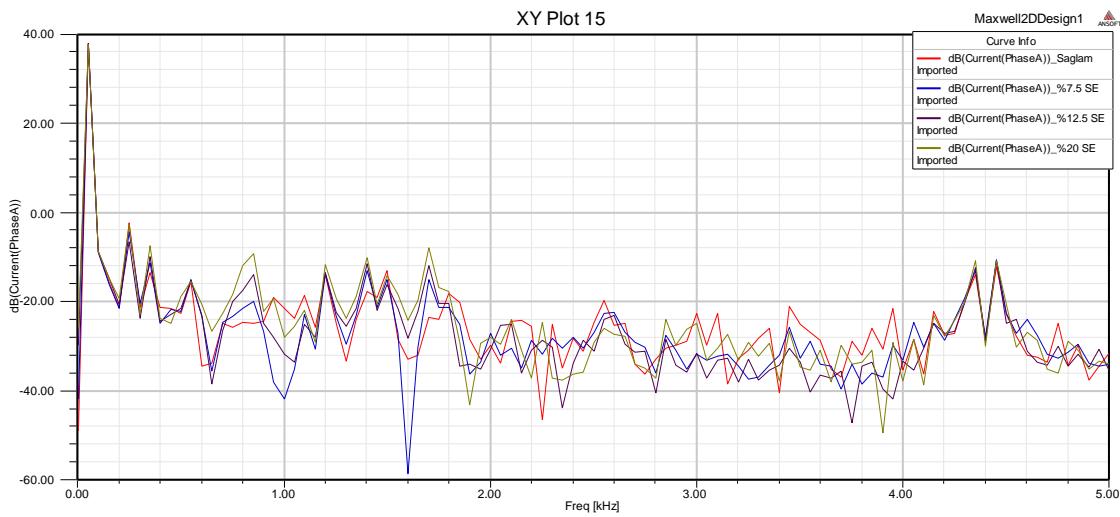


(d)

Şekil 0.15. Asenkron motor dinamik statik(SE) arızasına ait FFT spektrumu a)sağlam motor b)%7.5SE c)%12.5SE d)%20SE

Tablo 0.4. Asenkron motor SE arızası öz nitelik çıkarımı için tespit edilmiş bazı önemli harmonikler

Harmonik (fs)	Sağlam	%7.5 SE	%12.5 SE	%20 SE
	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)
1	37.94582	37.87131	37.82465	37.75845
7	-13.44420	-11.27332	-9.85656	-7.34794
9	-21.40932	-21.72947	-22.86643	-24.86835
15	-25.78633	-23.26761	-19.88928	-18.37500
17	-24.75795	-19.90927	-13.97132	-9.22476
25	-24.88449	-23.34171	-22.36890	-19.29222
27	-23.84419	-22.98573	-21.52027	-18.85715
33	-31.94051	-30.26101	-22.10148	-19.62734
35	-23.90621	-21.30201	-20.31275	-16.76076



Şekil 0.16. Asenkron motorun statik eksantriklik (SE) arızasının farklı şiddetlerine ait sürekli FFT sinyalleri.

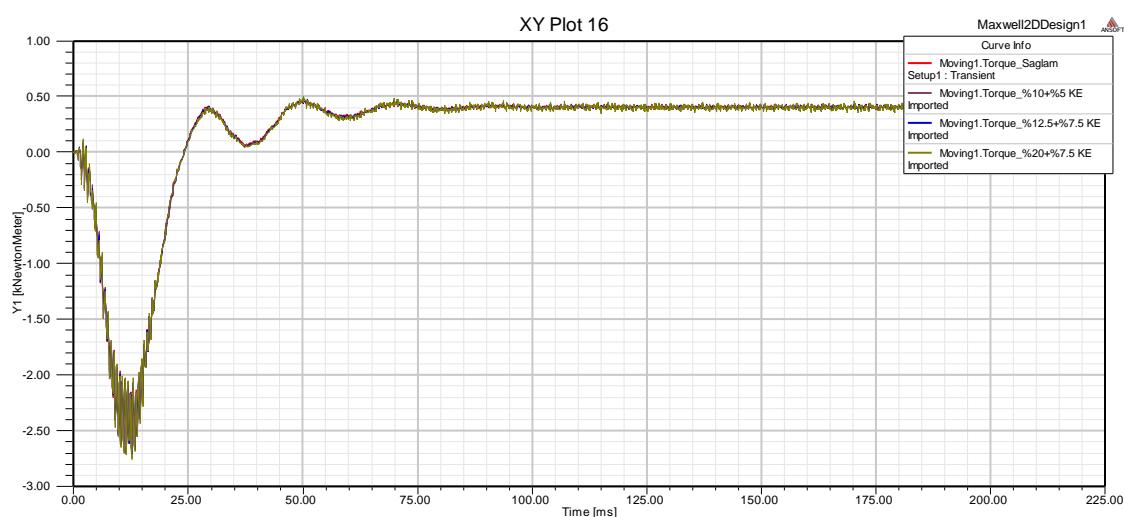
Bu grafiklerde, temel frekanslar ile beraber bu frekansın katlarındaki karakteristik frekansların, farklı genliklere sahip olduğu açıkça görülmektedir. Bu değişimler motorda SE arızasının teşhisine izin verir. Yukardaki karşılaştırmak amaçlı oluşturulan bazı önemli harmonikler arıza tespiti için tablo şeklinde gösterilmiştir. Ve görüldüğü gibi sadece dokuzuncu harmonik dışındaki harmonilerde arıza şiddetinin artması ile harmonik genliklerinin azaldığı tespit edilmiştir. Özellikle çıkışını için harmonilerdeki

değişimin yeterli bilgiye sahip oldukları açıklar. Bu durumda zaman domenindeki anlamsız verilerin spektral analizdeki karşılıklarının arıza teşhis kısmında yani veri madenciliği bölümünde oldukça etkili sonuçlar verdiği göreceğiz.

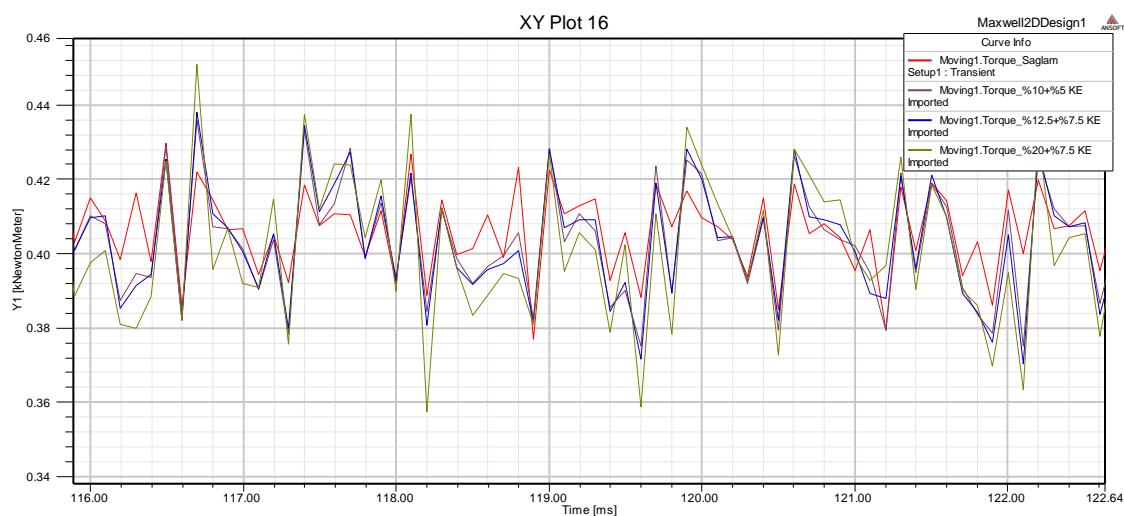
3.2.3. Karışık Eksantriklik Arızası

Hem statik hem de dinamik eksantriklikler varsa, eksantrikliğe karışık bir eksantriklik denir. Rotorun dönme ekseni hem stator ekseninden hem de kendi ekseninden ayrılarak Karışık eksantriklik durumu oluşturulmuştur. Sincap kafesi asenkron motorun rotoru orijinden x ve y yönünde kaydırılırken şaftın ekseni stator ile rotor merkezinin arasında bir yerde konumlandırılarak KE arızası modellendi. Bu durumda rotor kendi ekseni etrafında dönmediği gibi stator merkezinde de dönmüyordur. Bu bölümde farklı üç arıza şiddeti oluşturulmuştur. En düşük arıza şiddeti; rotor ekseni x-y yönünde hava aralığının %10 kadar kaydırılırken şaft x-y yönünde hava aralığının %5 kadar kaydırılarak oluşturulmuştur.(KE=%10+%5) Diğer iki arızada şiddeti artırılmış bir şekilde modüle edilmiştir. Döner alanlı elektrik makinalarında izin verilen maksimum eksantriklik derecesi %5 olduğundan en düşük eksantriklik derecesi olarak KE=%10+%5 seçilmiştir.

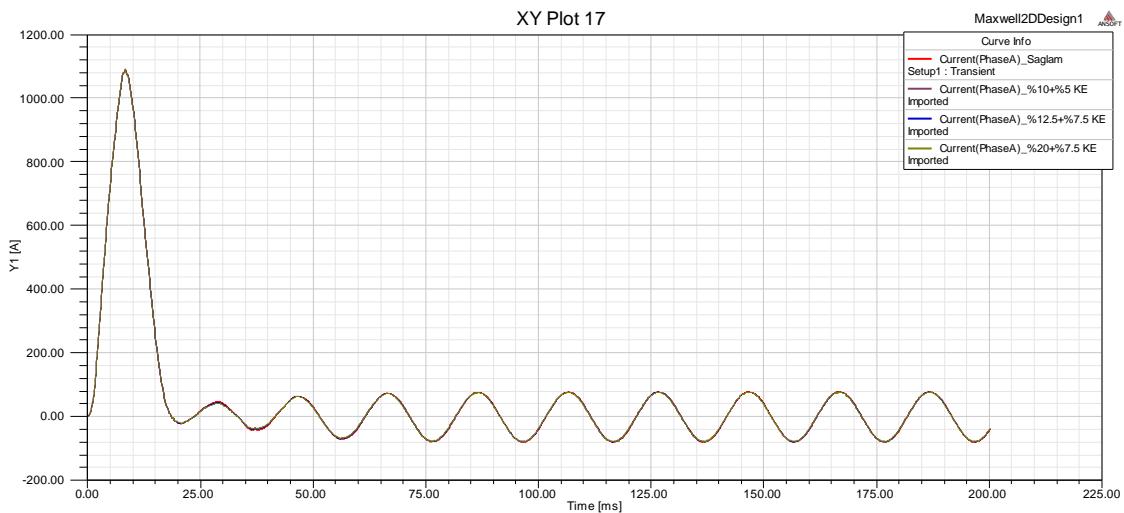
Bu yaklaşım ele alınarak farklı şiddetlerde oluşturulmuş eksantriklik arızaları Aşağıda akım ve tork sinyallerinin zaman domeninde analizi gerçekleştirilmiştir.



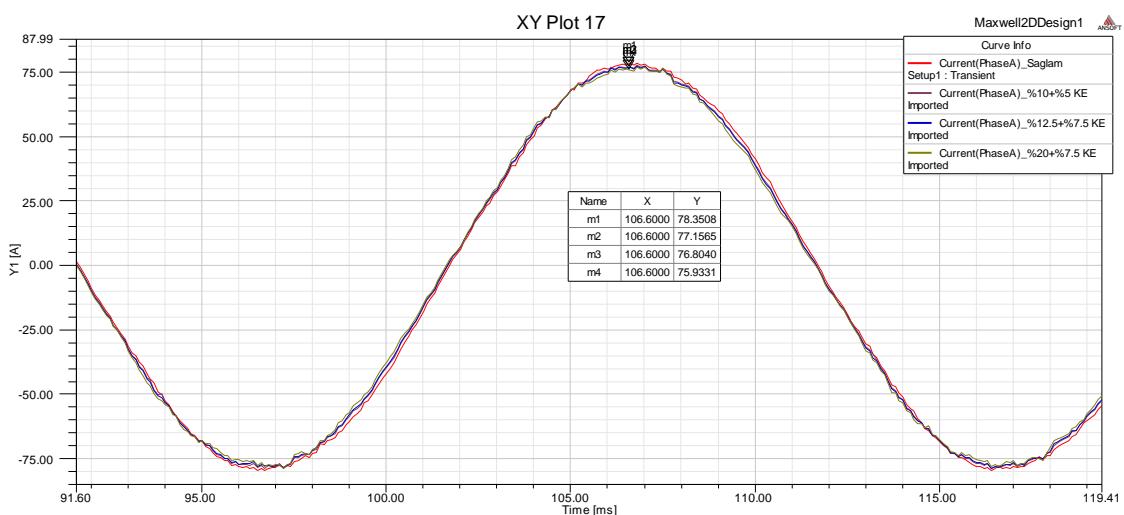
Şekil 0.17. Asenkron motorun Farklı KE arıza şiddetlerine ait üst tiste bindirilmiş tork dalga formları



Şekil 0.18. Asenkron motorun farklı KE arıza şiddetlerine ait çözünürlüğü artırılmış tork dalga formları

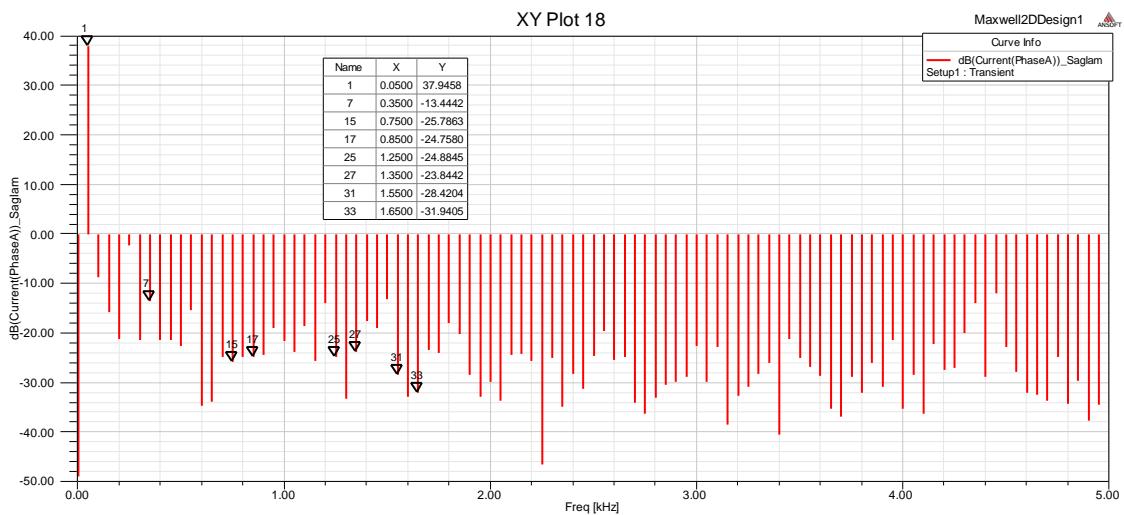


Şekil 0.19. Asenkron motorda KE arıza şiddetlerinin üst üste bindirilmiş akım dalga formları

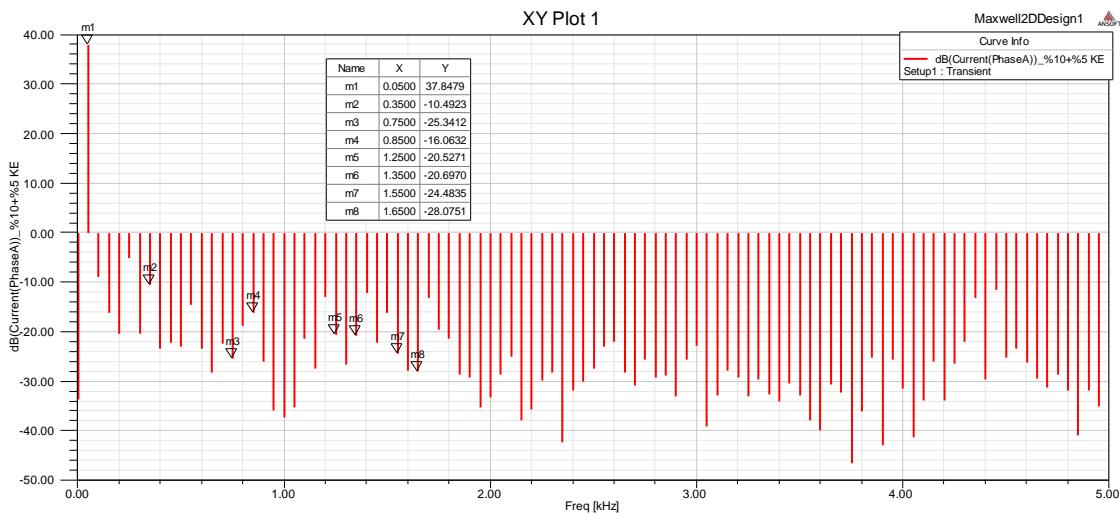


Şekil 0.20. Asenkron motorun farklı KE arıza şiddetleri için A fazına ait çözünürlüğü artırılmış akım dalga formları

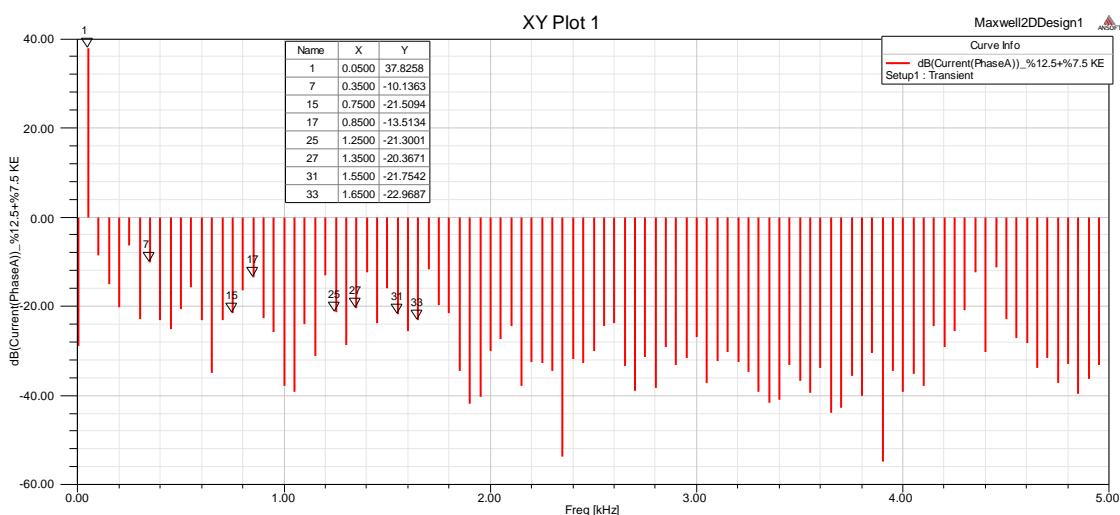
KE arıza şiddetlerine ait statorun A fazına uygulanmış FFT analiz sonuçları aşağıda verilmektedir.



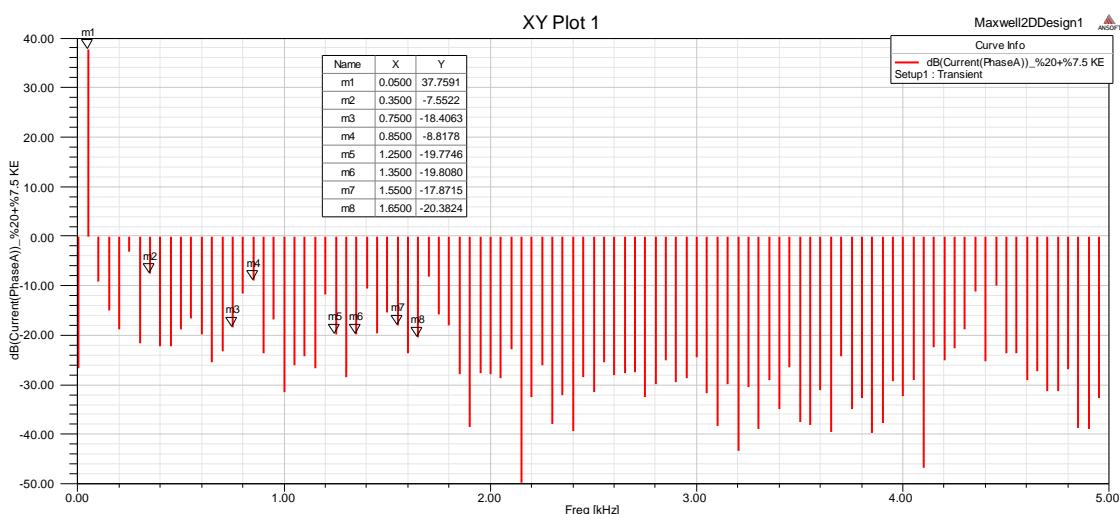
(a)



(b)



(c)

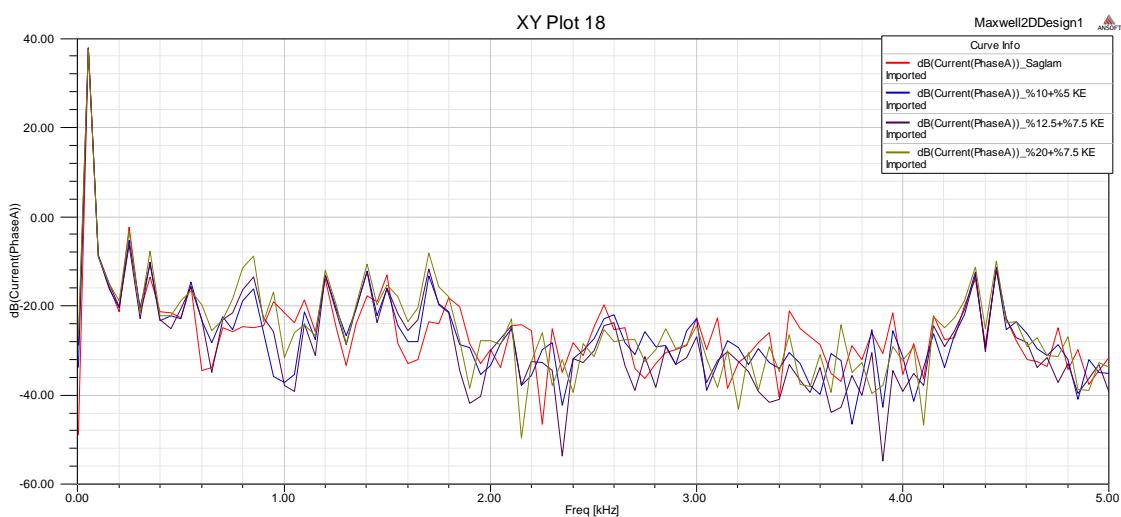


(d)

Şekil 0.21. Asenkron motor karışık eksantriklik(SE) arızasına ait FFT spektrumu a)sağlam motor a)sağlam b)%7.5SE c)%12.5SE d)%20SE

Tablo 0.5. Asenkron motor KE arızası öz nitelik çıkarımı için tespit edilmiş bazı önemli harmonikler

Harmonik (fs)	Sağlam	%10 +%5 KE	%12.5+%7.5 KE	%20 +%7.5 KE
	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)	dB(PhaseA)
1	37.94582	37.84789	37.82580	37.75906
7	-13.44420	-10.49231	-10.13633	-7.55215
15	-25.78633	-25.34124	-21.50937	-18.40633
17	-24.75795	-16.06320	-13.51344	-8.81781
25	-24.88449	-20.52711	-21.30010	-19.77456
27	-23.84419	-20.69703	-20.36713	-19.80803
31	-28.42038	-24.48353	-21.75417	-17.87146
33	-31.94051	-28.07512	-22.96870	-20.38240



Şekil 0.22. Asenkron motorun KE arızasının farklı şiddetlerine ait sürekli FFT sinyalleri

SEY’inde rotorun hareketi hareketli bandın gösterdiği davranışla değişmektedir. KE arızasında rotorun merkez konumu, rotor merkezi ile stator merkezi arasında modele sabit bir hızda dairesel bir yol boyunca hareket etmeye zorlanır. Eksantriklik nedeniyle motorun özellikleri üzerindeki bazı olumsuz etkiler şunlardır; verimlilik azaldığı için güç kayıpları artar, Sargıların sıcaklığı artar, Hız ve torktaki değişiklikler artar.

4. Oluşturulan Arızalara Genel Bir Bakış ve Test Motorunun Modellenmesi

Weka, Waikato Üniversitesinin ürünüdür ve ilk olarak 1997 yılında modern haliyle uygulanmıştır. Bu makine öğrenme (ML) paketi, halka açıktır ve gerçek dünyadaki veri madenciliği sorunlarını çözmek için algoritmalar koleksiyonu sunar. Yazılım tamamen Java ile yazılmış ve standart ML tekniklerinin bir dizi standart bir arayüz içerir. Weka’da birincil öğrenme yöntemleri “sınıflandırıcılar”dır ve verileri modelleyen bir kural kümesi veya karar ağacı oluştururlar. Weka ayrıca kurallarını ve kümelenme verilerini öğrenmek için algoritmalar da içerir. Tüm uygulamalarda tek biçimli bir komut satırı arayüzü vardır. Ortak bir değerlendirme modülü ile belirli bir veri setine göre birkaç öğrenme algoritmasının göreceli performansını ölçer (FeyzaGürbüz, October 2018). Geleneksel yöntemler kullanılarak çözülmesi çok zaman olan problemlere veri madenciliği süreci kullanılarak daha hızlı bir şekilde çözüm bulunabilir. Veri madenciliğinin temel amacı elimizde bulunan veriden gizli kalmış örüntülerin çıkarmak, verinin değerini artırmak ve veriyi bilgiye dönüştürmektedir (Adem, 2 - 4 Şubat 2011). WEKA, ham verinin işlenmesi, öğrenme metodlarının veri üzerinde istatistiksel olarak değerlendirilmesi, ham verinin ve ham veriden öğrenilerek çıkarılan modelin görsel olarak izlenmesi gibi veri madenciliğinin tüm basamaklarını destekler. Geniş bir öğrenme algoritmaları yelpazesine sahip olduğu gibi pek çok veri önişleme filtreleri içerir.

Bu çalışmada Weka programı ile arızaların şiddetini test etmede yapay sinir ağları kNN, MLP ve RT sınıflandırma yöntemleri olarak seçilmiştir ve doğruluk yüzdesi açısından uygun görülmüştür. Tüm sınıflandırıcı algoritmalar doğruluk oranları ve işlem süreleri farklılık gösterse bile benzer mantıkla çalışmaktadır. Çalışmada farklı arıza şiddetlerine bağlı akımların spectral analizi sonucu ile elde edilen harmonik genlikleri giriş verileri olarak arıza tespiti eğitiminde kullanılmıştır.

Motor arıza teşhisini eğitimde giriş verileri olarak spektral analiz sonucu elde edilen 100 harmonik değeri giriş değer kabul edilmiştir. Oluşturulan on dört arıza şiddeti ve sağlam lam durum ile beraber on beş çıkış durumu vardır. Bu durumda 100×15 ’lik bir matris oluşturularak sınıflandırma metodları uygulanmak üzere hazırlanır. Aynı arıza imzası eğitim, test ve doğrulama verisi olarak

kullanılarak eğitilen makina öğrenme algoritmalarının doğruluk tahmininde uygun görülen üç tekniğin sonucu Tablo 4.1 de verilmiştir.

Tablo 0.6. Asenkron motorda oluşturulan tüm arızaların sınıflandırma yöntemlerinin karşılaştırılması.

Asenkron Motor Arıza Sınıflandırma Özeti	k	M	R
	N	L	T
	N	P	
Doğruluk Yüzdesi (%)	100	100	100
Kappa İstatistiği	1	1	1
Ortalama Mutlak Hata	0.07	0.01	0
Kök Ort. Kare Hatası	0.13	0.027	0
Göreceli Mutlak Hata(%)	50	10.06	0
Kök Bağ. Kare Hatası(%)	50	10.5	0
Doğu Sınıflandırılmış Örnekler	14	14	14

5. Sonuç

Bu çalışmada motor arıza teşhis sistemi; arıza oluşturacak motorun FEM ile tasarımlı, test motoru üzerinden arızalı motor modeli oluşturma, veri toplama sistemi, sinyal işleme, öznitelik çıkarma ve arıza bilgi tabanına makine dili ile arızaya teşhis koyma adımlarından oluşmaktadır. Klasik bir zaman serisi analizi ya da anlamsız verileri filtrelemek üzere alınan hızlı bir veri işleme teknikleri ile elde edilen veriler incelenmektedir. Makine performansının arıza başlangıç aşamasında iken arıza durumunu tespit edebilmesine olanak tanımaktadır. Bu çalışma kırık rotor çubuğu ve eksantrik arızası tespit etmede induksiyon motorları için yararlı olduğunu göstermiştir. Kestirimci bakım yöntemleri, farklı arıza şiddetlerine karşılık tepki verebilmek için büyük miktarda veri tabanına ihtiyaç duyar. Kapsamlı bir motor akımı imza analizi yapmak için genellikle motorun yakından ilgili bilgisi gereklidir. Ancak, mevcut imza analiz tekniği ile arıza yaklaşımında bulunan araştırmacıların çoğu, veri modülleri ile analiz edilecek motorlar hakkında kesin bilgiye sahip değildir. Bu çalışmada, motorun tasarımı sırasında oluşturulan arızalar ve bu arızaların değerlendirilmesi, motorun bütün değişken durumları incelenmesi açısından yüksek doğrulukta arıza teşhisini yaklaşımlarına olanak verir. Ayrıca makine tasarım aşamasındayken simülasyon ile farklı arıza şiddetleri oluşturma; hassas ve yoğun veri toplama, zaman ve iş gücünden kazanç açısından oldukça önemlidir. Ayrıca, k-NN, MLP ve RT kullanılarak hataların sınıflandırma oldukça kayda değer olduğu bulunmuştur. Sağlıklı ve arızalı indiksiyon motorlarının birbirlerinden ayırmada %100 başarı oranına ulaşılmıştır.

Kaynakça

- A.Ghoggala, S.E.Zouzoua, H.Razikb, M.Sahraoui, & A.Khezzarc. (May 2009). An improved model of induction motors for diagnosis purposes – Slot skewing effect and air-gap eccentricity faults. *ELSEVIER*, 50(5), 1336-1347.
- Adem, T. (2 - 4 Şubat 2011). Veri Madenciliği Süreçleri Veçük Kaynak Kodlu Veri Madenciliği Araçları. *Akademik Bilişim*. Malatya.
- Ceban, A., Pusca, R., & Romary, R. (29 July 2011). Study of Rotor Faults in Induction Motors Using External Magnetic Field Analysis. *IEEE*, 59(5), 2082 - 2093.
- Danilo Granda, I. G., Aguilar, W. G., Arcos-Aviles, D., & Sotomayor, D. (11 April 2017). Broken Bar Diagnosis for Squirrel Cage Induction Motors Using Frequency Analysis Based on MCSA and Continuous Wavelet Transform. *MCA*, 22(2).
- Desheng, L., Beibei, Y., Yu, Z., & Jinping, S. (25-27 May 2012). Time-frequency analysis based on BLDC motor fault detection using Hermite S-method. *IEEE*. Zhangjiajie, China.
- Dorrell, D., Chindurza, I., & Cossar, C. (17 October 2005). Effects of rotor eccentricity on torque in switched reluctance Machines. *IEEE*, 41(10), 3961 - 3963.
- Dorrell, D., Thomson, W., & Roach, S. (Jan/Feb 1997). Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors. *IEEE*, 33(1), 24 - 34.
- Elif, A., Göşenay, İ., & Mehmet, H. (2014). *Asenkron Motorda Statik Eksenden Kaçılık Arızasının İncelenmesi*. Tokat ,TÜRKİYE: Akademik platform.
- Esfahani, E. T., Wang, S., & Sundararajan, V. (17 May 2013). Multisensor Wireless System for Eccentricity and Bearing Fault Detection in Induction Motors. *IEEE*, 19(3), 818 - 826.
- Faiz, J., & Sharifian, B. M. (05 May 2006). Different Faults and Their Diagnosis Techniques in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors—A Review. *Electromagnetic*, 26(7), 543-569.
- FeyzaGürbüz, F. (October 2018). Rule extraction for tram faults via data mining for safe transportation. *ELSEVIER*, 568-579.

- Granda, D., Aguilar, W. G., Arcos-Aviles, D., & Sotomayor, D. (2017). Broken Bar Diagnosis for Squirrel Cage Induction Motors Using Frequency Analysis Based on MCSA and Continuous Wavelet Transform. *MCA*, 22(2).
- Ishkova, I., & Vítek, O. (20 July 2015). Diagnosis of eccentricity and broken rotor bar related faults of induction motor by means of motor current signature analysis. *IEEE*. Kouty nad Desnou, Czech Republic.
- Jee-Hoon, J., Jong-Jae, L., & Bong-Hwan, K. (30 November 2006). Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA. *IEEE*, 53(6), 1842 - 1852.
- Joksimovic, G., Durovic, M., Penman, J., & Arthur, N. (June 2000). Dynamic simulation of dynamic eccentricity in induction machines-winding function approach. *IEEE*, 15(2), 143 - 148.
- Khalid, S., & Galina, M. (10-13 May 2015). Space-time representation of the main air gap flux of a three phase squirrel cage induction motor and its application to detect eccentricity. *IEEE*. Coeur d'Alene, ID, USA.
- Mustafa, M., Nikolakopoulos, G., & Gustafsson. (February 2015). Broken bars fault diagnosis based on uncertainty bounds violation for three-phase induction motors. *Electrical Energi Systems*, 25(2), 304-325.
- Puche-Panadero, R., Pineda-Sanchez, M., Riera-Guasp, M., Roger-Folch, J., Hurtado-Perez, E., & Perez-Cru, J. (13 January 2009). Improved Resolution of the MCSA Method Via Hilbert Transform, Enabling the Diagnosis of Rotor Asymmetries at Very Low Slip. *IEEE*, 24(1), 52 - 59.
- Subramaniam, A., Sahoo, A., Manohar, S. S., & Panda, S. K. (11-14 Aug. 2017). Fault diagnostic techniques for induction machines through finite element analysis. *IEEE*. Sydney, NSW, Australia.
- Wiem, Z., Yemna, B., & Hafedh, T. (16-19 March 2015). Co-simulation of induction motor fed by PWM inverter under a broken bar fault. *IEEE*. Mahdia, Tunisia.
- Yassa, N., Rachek, M., & Houassine, H. (April 2019). Motor Current Signature Analysis for The Air Gap Eccentricity Detection In The Squirrel Cage Induction Machines. *ELSEVIER*, 251-262.
- Yemna Bensalem, H. T. (2015). Analysis of Induction Motor with Stator Winding Short-circuit Fault by Finite Element Model. *IJSET*, 53(58), 2356-5608.