



Gaziosmanpaşa Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi

Dergiye Geliş Tarihi: 14.11.2016
Yayına Kabul Tarihi: 08.12.2016

Baş Editör: Ebubekir ALTUNTAŞ
Alan Editörü: Levent GÖKREM

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Eksenden Kaçıklık Arızasının Titreşim Sinyali ile Tespiti

Mustafa EKER^{a,1} (mustafa.eker@gop.edu.tr)
Mehmet AKAR^b (mehmet.akar@gop.edu.tr)

^{a,b}Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, 60250Tokat

Özet –Motorlar da meydana gelen arızalara anlık müdahalelerle ve periyodik bakımlarla önlem alınmaya çalışılmaktadır. Periyodik bakımlar motorun arıza yapma sürecini uzatsada arızaların meydana gelmesini engelleyememektedir. Sunulan çalışmada, yüksek verim ve güç faktörü, yüksek moment-eylemsizlik oranı ve yüksek güç-ağırlık oranı gibi üstünlüklerinden dolayı endüstriyel otomasyon sistemlerinde oldukça yaygın kullanılan Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM) kullanılmıştır. Motor dinamik titreşim sinyalleri durağan ve durağan olmayan hız ve farklı yük durumlarında izlenmiş, eksenden kaçıklık arızasının tespiti Mertebe Takip Analiz Yöntemi (MTA) ile gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntem durağan ve dinamik çalışma koşullarında eksenden kaçıklık arızasının tespitinde başarılı olmuştur.

Anahtar Kelimeler–
SMSM, Eksenden
kaçıklık, Hata teşhisi,
Titreşim analizi

Gaziosmanpaşa Journal of Scientific Research 13 (2016) 87-102

Eccentricity Fault Diagnosis in Permanent Magnet Synchronous Motors via Vibration Signal

Abstract –Instantaneous interventions and periodic maintenance are used to prevent motor faults. Even if the periodic maintenance extended the motor life, it cannot prevent the occurrence of fault. Therefore, monitoring and fault detection in motors are among important topics that scientists have focused on in recent years. In the present study, Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) is used because of they are recently preferred in the industry especially for servo systems due to their superiorities such as high power density, high power-speed interval, high efficiency, high air gap-flux density and high moment-inertia ratio. The motor dynamic vibration signal was monitored under stationary and non-stationary speed and different load conditions after which the eccentricity fault detection was carried out via Angular Domain - Order Tracking method (AD-OT). The proposed method has successfully diagnosed the eccentricity faults at both stationary and non-stationary conditions.

Keywords–
PMSM, Eccentricity,
Fault diagnosis,
Vibration analysis.

Received: 14.11.2016

Accepted: 08.12.2016

¹Sorumlu Yazar Mustafa EKER

1. Giriş

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM) yüksek ve farklı hızlarda çalışabilmeleri, asenkron motorlardan daha yüksek verime sahip olmaları, hacim-ağırlık oranı, şekilsel uyumlulukları, hız kontrolüne uygun olmaları gibi üstünlüklerinden dolayı endüstriyel uygulamalarda daha sık kullanılmaya başlamıştır. SMSM'lerin kullanım oranı arttıkça, bu motorlarda meydana gelen arıza çeşitleri de artmaktadır. Bu arızaların meydana gelmesi periyodik bakımlarla engellenmeye çalışılmasına rağmen yetersiz kalmaktadır [1]. Son zamanlarda periyodik bakımlar yerini kestirimci bakımlara bırakmaktadır.

SMSM' de genellikle; sürücü ve sargı arızaları, rulman ve eksenden kaçıklık arızaları ve mıknatıs ile ilgili arızalar oluşmaktadır. Stator ile rotor arasında yer alan hava boşluğunun eşit dağılmamasından dolayı oluşan arıza eksenden kaçıklık arızası olarak adlandırılmaktadır [2]. Müsaade edilebilir eksenden kaçıklık oranı % 5-10 arasındadır. Bu oran motorda meydana gelen titreşim ve gürültü seviyesi ile doğrudan ilişkili olduğu için minimum seviyede tutulmaya çalışılmaktadır. Eksenden kaçıklık seviyesinin artması motorda daha büyük problemlerin ortaya çıkmasını tetikler.

Motor gövdesinde oluşan titreşim problemleri motorun yol almasında veya yüklenmesinde meydana gelebilir. Bu problemlerin, motora zarar vermemesi için çözülmesi gerekmektedir. Bir titreşim probleminin çözülmesi için, arızanın neden ve etkisi arasındaki farkın bilinmesi gerekmektedir. Bunun için ilk olarak, titreşim arızasının neden kaynaklandığı saptanmalıdır. [3]. Arızalara bağlı ortaya çıkan titreşim ve gürültü seviyeleri elektrik motorlarının çalışmasını doğrudan etkilemektedir. Sabit mıknatıslı motorlarda da titreşim seviyelerini en aza indirmek için literatür de yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır.

Bu makale 4 bölümden oluşmaktadır. İlk olarak Giriş bölümü yer almaktadır. Bölüm 2'de Eksenden kaçıklık arızalı SMSM'ler ve tespit yöntem hakkında bilgi verilmiştir. Deneysel çalışma, veri toplama işlemi ve deneysel sonuçlar Bölüm 3'te yer almaktadır. Sonuç bölümünde elde edilen bulgular tartışılmıştır.

2. SMSM' de Eksenden Kaçıklık Arızası

SMSM' de rotor ile stator arasındaki hava boşluğunun homojen olarak dağılmaması eksenden kaçıklık arızası olarak adlandırılır. Eksenden kaçıklık arızası farklı şekillerde meydana gelmektedir. Statik Eksenden Kaçıklık (SE) arızası; dönüş ekseninin merkezi aynı zamanda rotor ekseninin merkezi olması durumu iken, Dinamik Eksenden Kaçıklık (DE) arızası ise dönüş merkezi ile stator merkezinin aynı olması durumudur [4]. Gerçek uygulamalarda her iki arıza türü de birlikte görülmekte ve Karışık Eksenden Kaçıklık (KE) arızası olarak adlandırılır. Eksenden kaçıklık arızası sebebiyle oluşan düzensiz manyetik çekimler hava aralığının homojenliğini dolayısıyla meydana gelen akı dağılımını bozar ve indüklenen gerilim ve akımda harmonikler oluşturur. İlâveten motorda meydana gelen düzensiz manyetik çekimler motor gövdesinde de rotor hızı ve katlarında titreşimlere neden olmaktadır[5].

SMSM'de durağan veya durağan olmayan şartlarda izlenen akım, gerilim, elektromanyetik tork vb. elektrik sinyalleri eksenden kaçıklık arızasının tespitinde kullanılmaktadır. İlâveten arızalı motorun akustik davranışlarını incelendiğinde, her bir harmonik kuvvet için SMSM'de yayılan ses güçlerinin farklı değerler gösterdiği belirlenmiştir[6].

Döner makinelerin dinamik titreşim sinyallerini ve rotor hızını kullanarak izlenmesinde ve hata teşhisinde Mertebe Takip Analiz Yöntemi (MTA) kullanılmaktadır. Bu metot sürücü ile beslenen ve dinamik çalışma koşullarında elde edilen motor faz akımı ve rotor hız

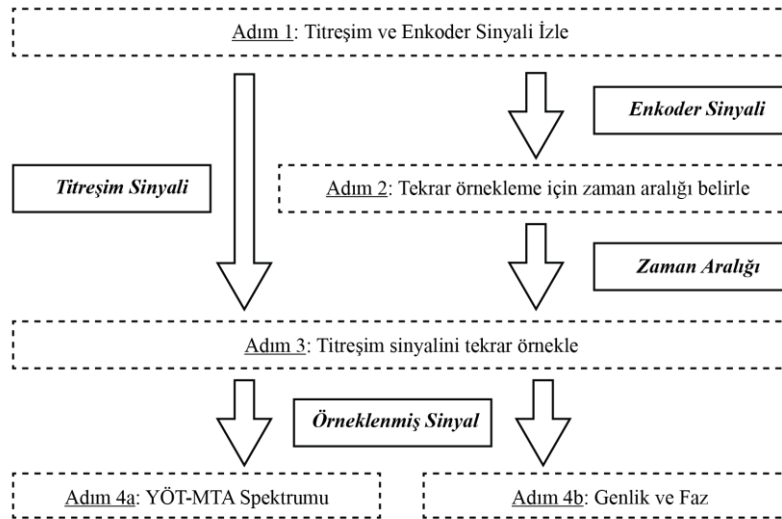
sinyaline uygulanarak SMSM' de demagnatizasyon ve eksenden kaçıklık arızaları tespit edilebilmektedir [7]. Bir diğer çalışmada SMSM'de oluşan eksenden kaçıklık arızasının, stator oluklarında meydana getirdiği doyum ve buna bağlı olarak oluşan etkiler 2D ve 3D zaman adımli sonlu elamanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen manyetik alan ve titreşim sinyali analizlerinin arızaya dair bilgiler içerdiği tespit edilmiştir.[8].Eksenden kaçıklık arızasının teşhisinde stator oluk yapısının ve doyum etkilerinin hesaba katılması ile manyetik alan analizleri hataya ait frekans bileşenleri Eşitlik 1' de hesaplanmaktadır. Ayrıca dengesiz manyetik çekme gibi eksenden kaçıklık arızalarının sebep olduğu diğer problemler de formülde yer almaktadır. SE ve DE'den kaynaklanan balansızlık da hataya ait titreşim frekanslarına neden olmaktadır[8].

$$f_{titresim} = (A' \pm \frac{B'}{p})f_e \quad (1)$$

Eşitlikte kullanılan $f_{titresim}$ titreşime ait arıza frekansını, A' ve B' $0,1,\dots,n$ gibi sabit sayıyı, p motor kutup çifti sayısını ve f_e ise elektriksel kaynak frekansını temsil etmektedir.

2.1 Yeniden Örnekleme Tabanlı Mertebe Takip Analiz Yöntemi (YÖT-MTA)

Yeniden Örnekleme Tabanlı - Mertebe Takip Analiz Yöntemi (YÖT-MTA) ile Hızlı Fourier Dönüşüm Tabanlı - Mertebe Takip Analiz Yöntemi gibi yöntemler çoğu problemin çözülmesinde önemli rol oynamaktadırlar. YÖT-MTA zaman boyutundan açısal boyuta geçişi içermektedir. Temelde sabit Δt zaman örnekleri ile sabit açısal aralıklar örneklenmektedir. İnterpolasyon algoritması ile sabit Δt örnekleme aralıklarıyla örneklenmiş zaman değeri, eşit açısal aralıklara dönüşmektedir. Bu dönüşümde motor hız bilgisi önemli yer tutmaktadır. Açısal aralıkların oluşum zamanı enkoder sinyali işlenerek elde edilir. Böylece verinin zaman boyutundaki aralıklarının açısal boyutta ne olacağı belirlenir [9]. Şekil 1' de döner makinaların YÖT-MTA sürecini gösteren akış diyagramı yer almaktadır [10].



Şekil.1. YÖT-MTA işaret akış diyagramı

Şekil 1’de görüldüğü gibi açısız boyuta veri Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) kullanılarak ilgili mertebe bileşeninin genlik ve fazı çıkartılır[9]. Zaman boyutunda HFD için kullanılan eşitlikler açısız boyutta tekrar revize edildiğinde Eşitlik 2 elde edilir.

$$\begin{aligned}\Delta_0 &= \frac{1}{R} = \frac{1}{N * \Delta\theta} \\ O_{nyquist} &= O_{max} = \frac{O_{sample}}{2} \\ O_{sample} &= \frac{1}{\Delta\theta}\end{aligned}\quad (2)$$

Eşitlik 2’de, Δ_0 çıkış mertebe spektrumunun mertebe çözünürlüğünü, R analiz edilen değerlerin toplam sayısını, $\Delta\theta$ tekrar örneklenen örneklerin açısız aralığını, N gerçekleştirilen dönüşümler üzerindeki zaman noktalarının toplam sayısını, O_{sample} verinin örneklendiği andaki açısız örneği, $O_{nyquist}$ Nyquist örneğini ve O_{max} analiz edilebilen maksimum örneği göstermektedir. Eşitlik 2’den mertebe çözünürlüğü dönüşüm sırasındaki dönüş sayısına bağlıdır. Mertebe çözünürlüğü, Δ_0 , analiz edilen dönüşümlerin sayısının tersidir. Mertebe çözünürlüğünün iyi olması analiz ne kadar çözünürlük üzerinde uygulandığı ile doğru orantılıdır. Çevrim başına düşen örnek sayısı veya açısız örnekleme oranı analiz edilebilecek en fazla mertebeyi bulmada kullanılabilir. Eşitlik 3’de dönüşümlerin açısız boyuttaki karşılıkları yer almaktadır[9].

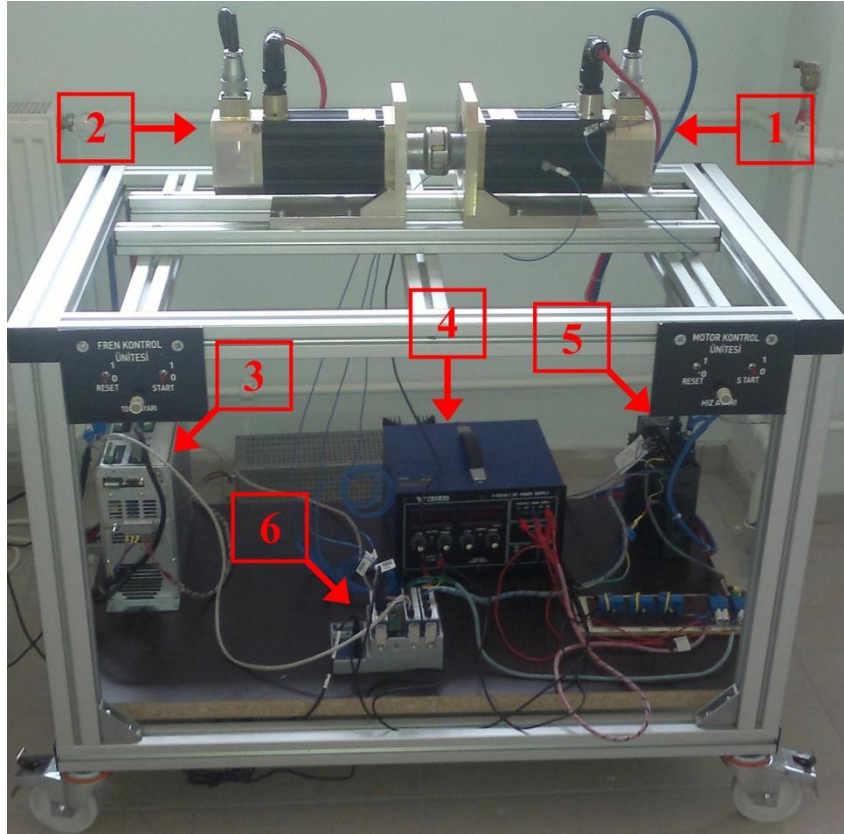
$$\begin{aligned}a_m &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n\Delta\theta) \cos(2\pi o_m n\Delta\theta) \\ b_m &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n\Delta\theta) \sin(2\pi o_m n\Delta\theta)\end{aligned}\quad (3)$$

Eşitlikte verilen o_m ; analiz edilen mertebeyi, a_m ; o_m için Kosinüslü terime ait Fourier katsayısını ve b_m ; o_m için Sinüslü terime ait Fourier katsayısını göstermektedir. Frekans değerlerini gösteren x eksenini bu dönüşümler sonucunda, ilgili frekansa ait mertebe değerlerini göstermektedir. Mertebe değerlerinin yeri Eşitlik 4 ile hesaplanır Burada n_r rotor hızını temsil etmektedir.

$$Order = \frac{Frequency * 60}{n_r}\quad (4)$$

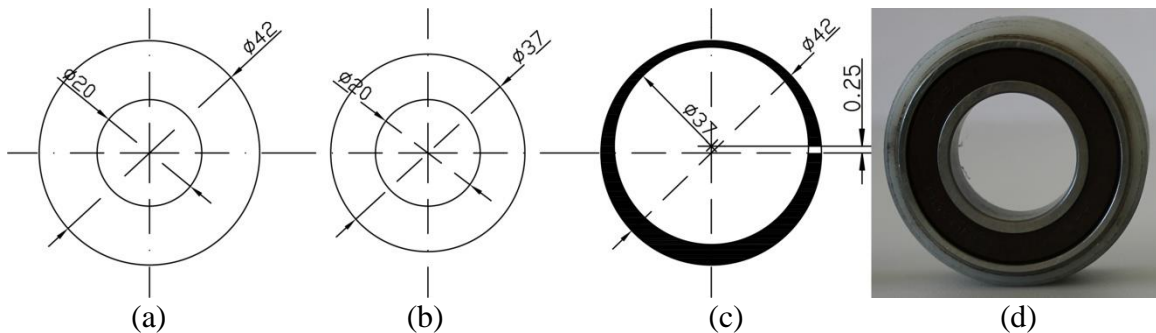
3. Deneysel Çalışma ve Veri Toplama

Eksenden kaçıklık arızasının tespiti için oluşturulan deney düzeneğinde özdeş 2 motor (1.2 kW, 4Nm, 3000d/d, 2p=8) kullanılmıştır. Bu motorlardan biri tork kontrol modunda çalıştırılarak frenleme yaparken diğeri test motorudur. Deneysel çalışmaların yapıldığı deney düzeneği Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Test Düzenegi (1:SMSM, 2:Fren, 3:Fren Kontrolör, 4:Güç Kaynağı, 5:Motor kontrolör, 6: Veri toplama düzeneği)

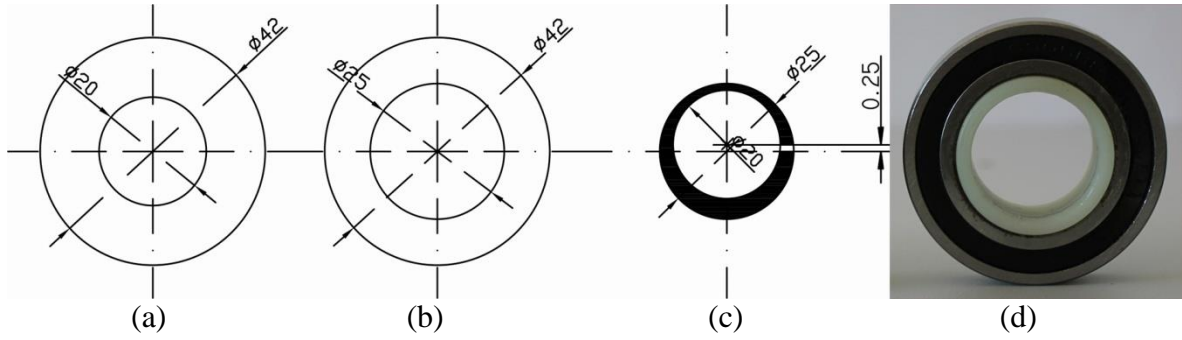
Test motorunda eksenden kaçıklık arızası motorun rulmanı sökölerek yerine arıza oluşmasınaneden olacak yeni rulmanların takılması ile gerçekleştirilmiştir. Sağlam motorda dış ve iç çap ölçüleri sırasıyla 42 mm ve 20 mm olan rulman kullanılmıştır. SE arızası oluşturulurken bu rulmanın yerine çap ölçüleri 37mm ve 20 mm olan rulman takılmıştır. Bu rulman ile beraber kullanılmak üzere 42x37mm ölçülerinde ayrıca bir baga (özel halka) yaptırılmıştır. Yeni rulman ve baganın motora takılması ile %50'lik bir SE arızası oluşturulmuştur.



Şekil 3. SE arızasının meydana gelmesinde kullanılan malzemeler (a-Orijinal rulman, b-6904 kodlu rulman, c-Baga, d- Modifiye edilmiş rulman)

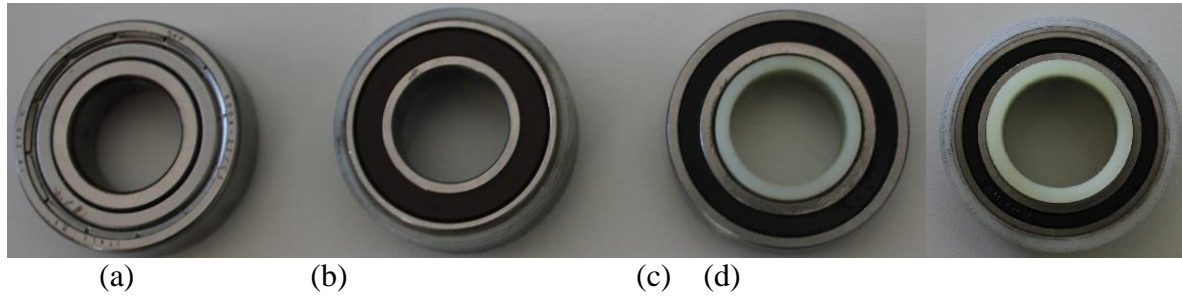
SE arızasının oluşturulmasında takip edilen süreç DE arızası için tekrarlanmıştır. Bu arıza da ise sağlam rulman yerine çap ölçüleri 42mm -25 mm olan 6905-2RS kodlu bir rulman kullanılmıştır. DE arızası için de ayrı bir baga yaptırılarak rulman iç yuvası ve rotor mili

arasına yerleştirilmiştir. Bu arıza çeşidinde ise iç çap merkezden 0.25mm kaydırılarak %50 DE arızası oluşturulmuştur.



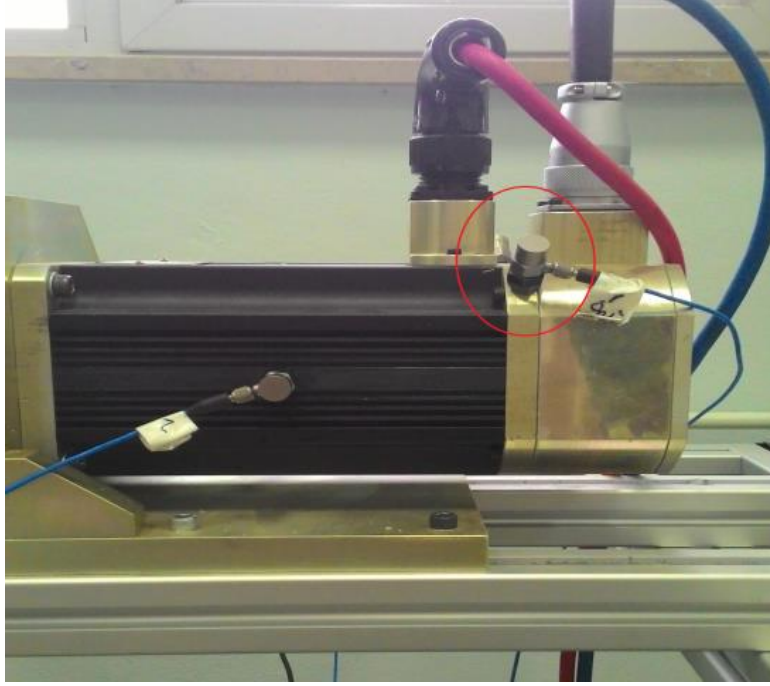
Şekil 4. DE arızasının meydana gelmesinde kullanılan malzemeler (a-Orijinal rulman, b-6904 kodlu rulman, c-Baga, d- Modifiye edilmiş rulman)

Bu iki arızanın kombinasyonu olan KE ise; çap ölçüleri 37mm ve 25 mm olan 6805-RS kodlu rulman ve özel olarak üretilen iki baganın birlikte kullanılmasıyla oluşturulmuştur. Kullanılan rulman ve bagalara ait fotoğraflar Şekil. 5’ de yer almaktadır.



Şekil 5. Eksenden kaçıklık için kullanılan rulmanlar (a-Sağlam, b-SE, c-DE, d-KE)

Deneysel çalışmada sağlam ve arızalı SMSM’lerin çalışma hızları 750 d/d (50 Hz), 1500 d/d (100 Hz), 3000 d/d (200 Hz) 'dır. Her çalışma koşulu ve hız değeri için SMSM %0, %25,..., %125 yük altında çalıştırılarak rotor hızı ve motor titreşim sinyalleri izlenmiştir. Veri toplama işlemi 10 sn süresince 12.8 kHz örnekleme frekansı ile gerçekleştirilmiştir. Titreşim sinyalleri motor gövdesine yerleştirilen ölçüm aralığı ± 50 g, frekans aralığı 0,5-10 kHz ve hassasiyeti 100 mV/g olan PCB markaivme ölçerlerkullanılarak elde edilmiştir. Bu sensörlerin motor gövdesine yerleştirilme konumu Şekil 6 ‘da gösterilmiştir. Veri toplam işleminde CDAQ-9174 kabini ve NI9234 titreşim ölçüm modülü kullanılmıştır. Hızı bilgisi motor sürücü üzerinde yer alan enkoder çıkış soketinden TTL sinyali olarak alınmıştır. Verilerin izlenmesi, bilgisayar ortamına aktarılması ve analizinde LabVIEW Sound and Vibration Assistant Toolkit 2011 programı kullanılmıştır.



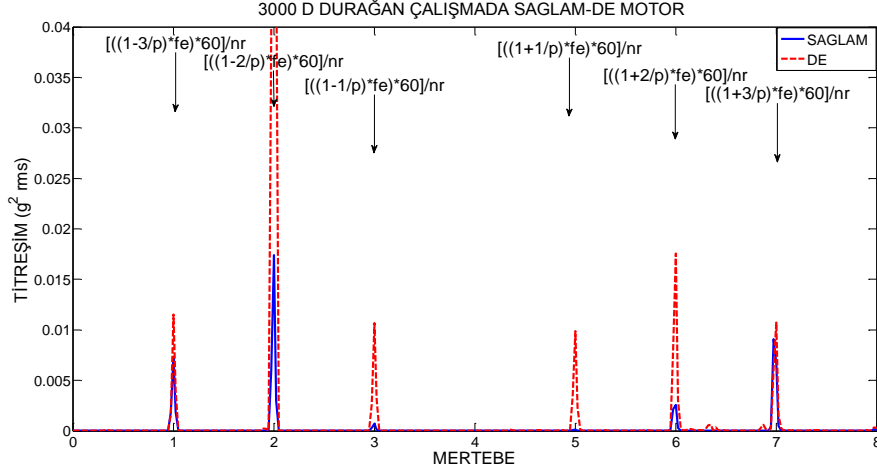
Şekil.6. Titreşim sinyallerinin konumlandırıldığı eksen

3.1 Analiz Sonuçları

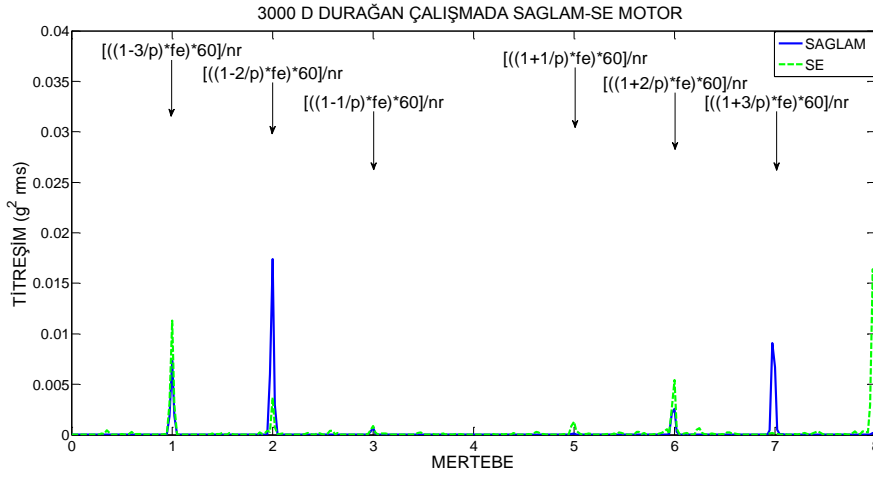
Bu bölümde SMSM'de meydana gelen SE, DE ve KE arızalarının tespiti için durağan ve durağan olmayan çalışma şartlarında motor da meydana gelen titreşimler ölçülmüş, izlenen sinyallerin HFD ve YÖT-MTA yöntemleri ile analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

Durağan Çalışma

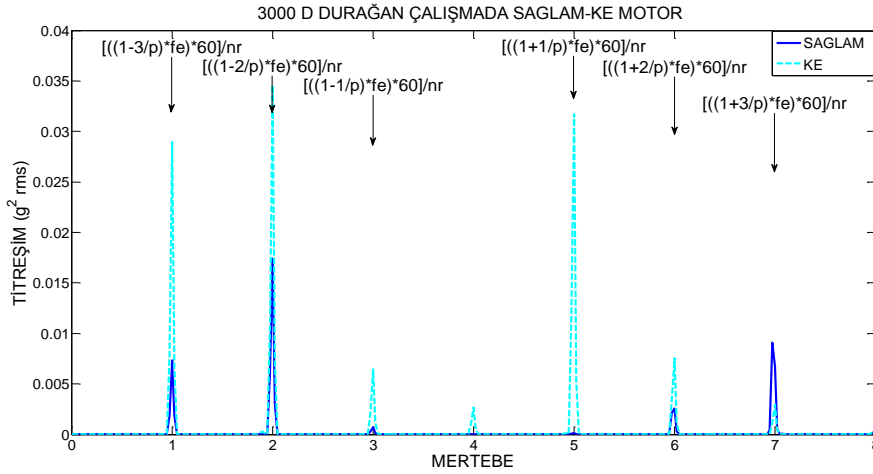
Yapılan deneysel çalışmada SMSM'de yaklaşık %50 SE, %50 DE ve %50 oranında KE arızaları oluşturulmuştur. SMSM, 10 sn süresince 3000 d/d hızında çalıştırılarak motor verileri 12.8 kHz örnekleme frekansı ile toplanmıştır. Sırası ile sağlam motor, DE arızalı motor, SE arızalı motor ve KE arızalı motora ait veriler toplanarak arızalı duruma ait veriler sağlam motor verileri ile sırasıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 7'de 3000 d/d çalıştırılan motorların mertbe bileşenleri sağlam motora göre karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Arızaya ait oluşan mertbe bileşenlerinin net olarak görülebilmesi için temel bileşen mertbesi (4. mertbe) filtrelenmiştir.



(a)



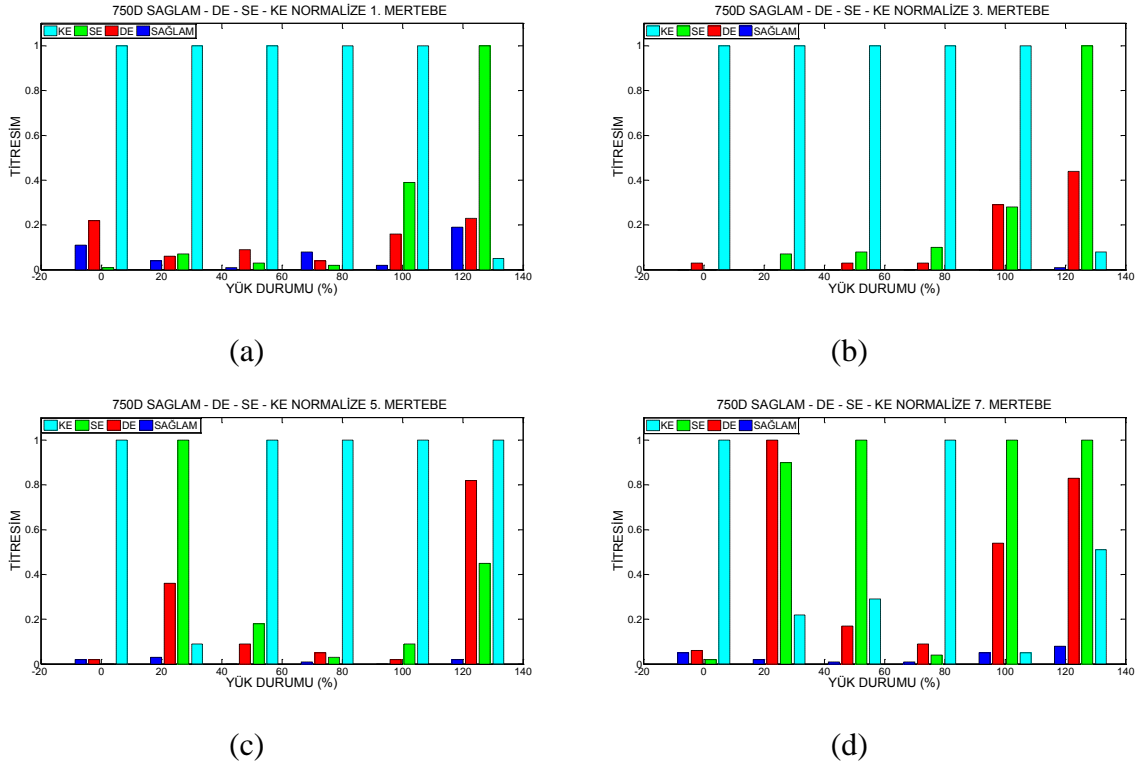
(b)



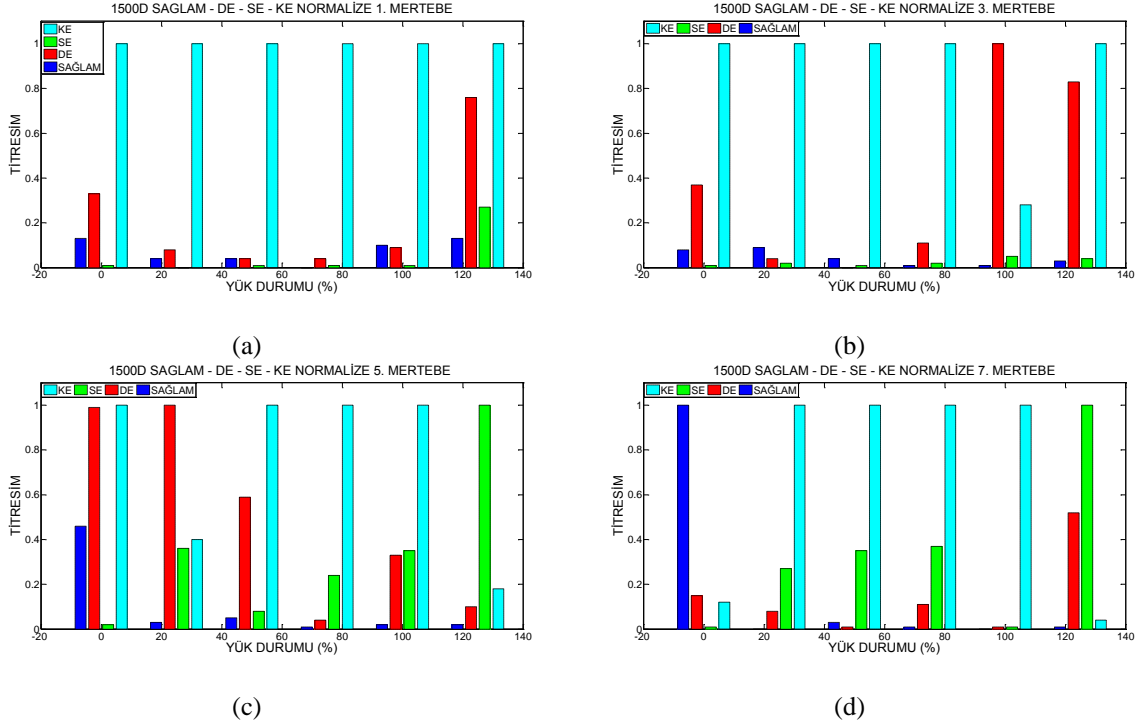
(c)

Şekil7. %100 yükte 3000 d/d için durağan çalışma da sağlam motora göre arıza durumlarının titreşim seviyeleri (a) Sağlam Motor - DE, b) Sağlam Motor - SE, c) Sağlam Motor - KE)

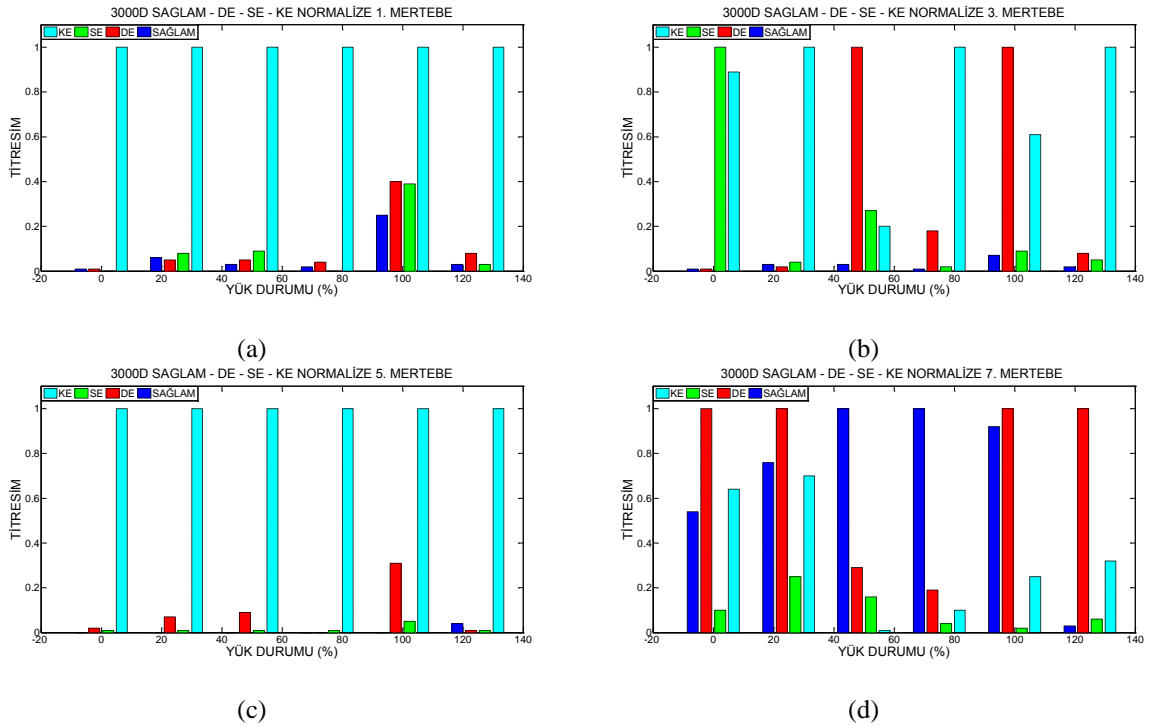
Eşitlik 1 gereğince 3000 d/d tam yük altında çalışmada temel frekans 4. mertebeye yerleşmektedir. Şekil 7 incelendiğinde, arızaya ait bileşenler temel frekansın alt ve üst bandında belirli mertebelere yerleşmektedirler. Şekiller incelendiğinde eksenden kaçıklık arızalarına ait mertebe bileşenlerinden farklı arıza bileşenleri de yer almaktadır. Bu bileşenler yük ve motor millerinin bağlantısı sırasında yanlış hizalanmadan kaynaklanan arıza bileşenleridir. Bu arızaya ait bileşenler temel frekansın alt bandında 2. Mertebede üst bandında ise 6. mertebede oluşmaktadır. Eksenden kaçıklık arızasına ait bileşenler alt bantta 1. ve 3. mertebe oluşurken üst bantta 5. ve 7. mertebe oluşmaktadır. Bu mertebelere oluşan değişimler normalize edilerek Şekil 8 – 10’da verilmiştir.



Şekil.8. 750 d/d Durağan çalışmada Sağlam-DE-SE-KE durumlarının normalize edilmesi (a) 1.Mertebe, b) 3. Mertebe, c) 5. Mertebe, d) 7. Mertebe)



Şekil 9. 1500 d/d Durağan çalışmada Sağlam-DE-SE-KE durumlarının normalize edilmesi (a) 1.Mertebe, b) 3. Mertebe, c) 5. Mertebe, d) 7. Mertebe)



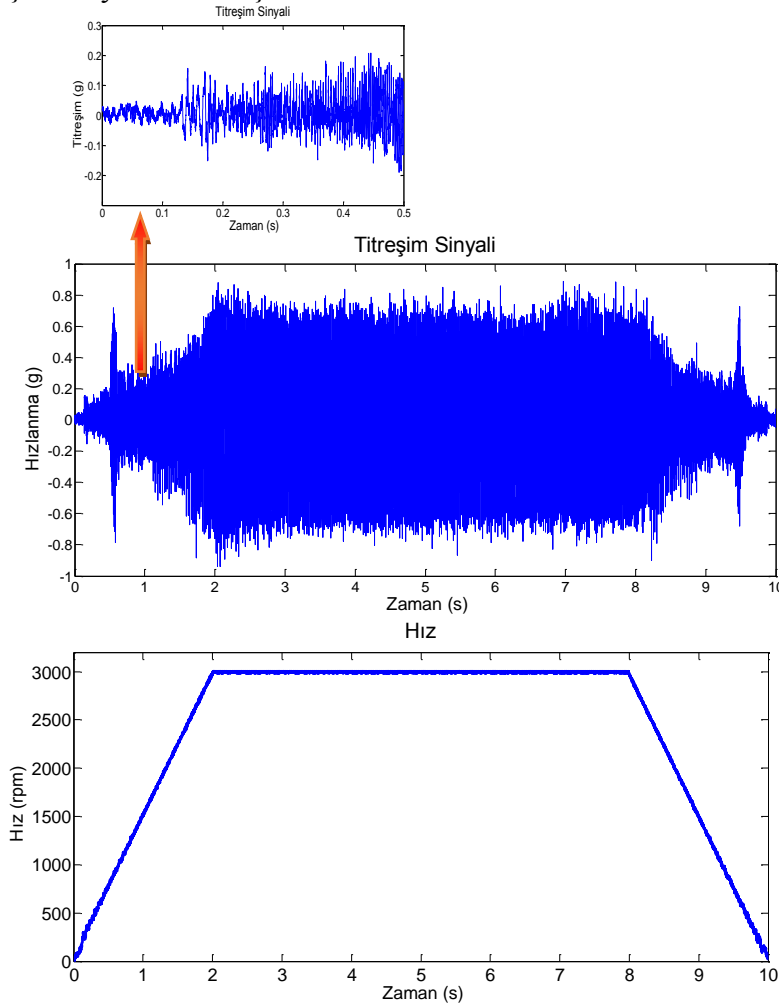
Şekil 10.3000 d/d Durağan çalışmada Sağlam-DE-SE-KE durumlarının normalize edilmesi (a) 1.Mertebe, b) 3. Mertebe, c) 5. Mertebe, d) 7. Mertebe)

Normalize edilen grafikler incelendiğinde arızadan kaynaklanan genlik değişimlerin çalışma hızlarının genelinde ve farklı yük durumlarında belirgin olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Genlik değişimleri 1., 3. ve 5. mertebe seviyelerinde daha fazladır. Arıza çeşitlerinde ise KE arızasına ait genlik değişimlerinin diğer arızalara ait genlik değişimlerinden daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır.

Gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre, titreşim sinyalleri eksenden kaçıklık arıza kaynaklı ek frekanslar oluşmaktadır. Bu frekansların yerleri; analitik olarak hesaplanan mertebeleri (1. 3. 5. ve 7. mertebeler) deneysel olarak da desteklemektedir. Ayrıca deneysel sonuçlara göre arıza sebebiyle oluşan 3. ve 5. mertebe daha net görülmektedir.

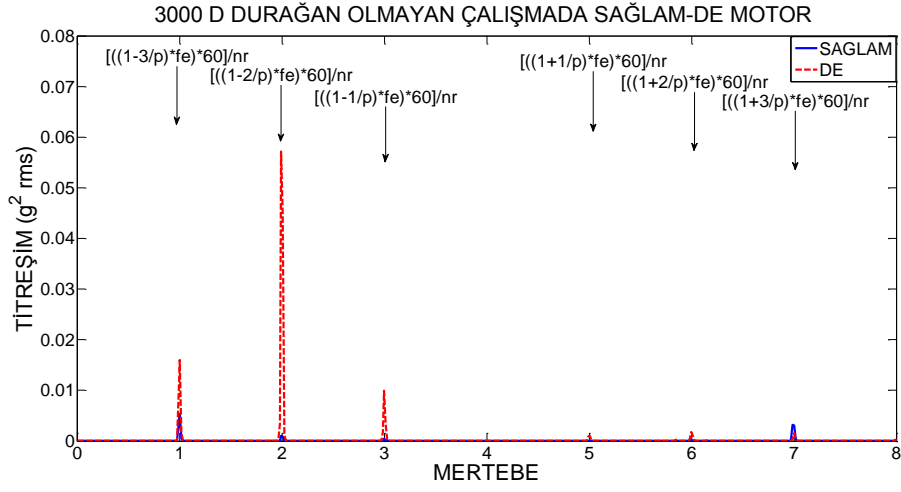
Durağan Olmayan Çalışma

SMSM'ler buldukları sistem içerisinde durağan çalışmadan ziyade dinamik koşullarda çalıştırılırlar. Bu çalışma koşulları sadece durağan bir hız seviyesi değil hızlanma ve yavaşlama rampalarında bulundurulur. Durağan çalışmada gerçekleştirilen veri alma süreci durağan olmayan çalışmada da gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada 0-2.sn arası hızlanma, 2-8.sn arası durağan ve 8-10.sn arası da yavaşlama bölgesi olmak üzere 10 sn boyunca motor titreşim sinyali izlenmiştir.

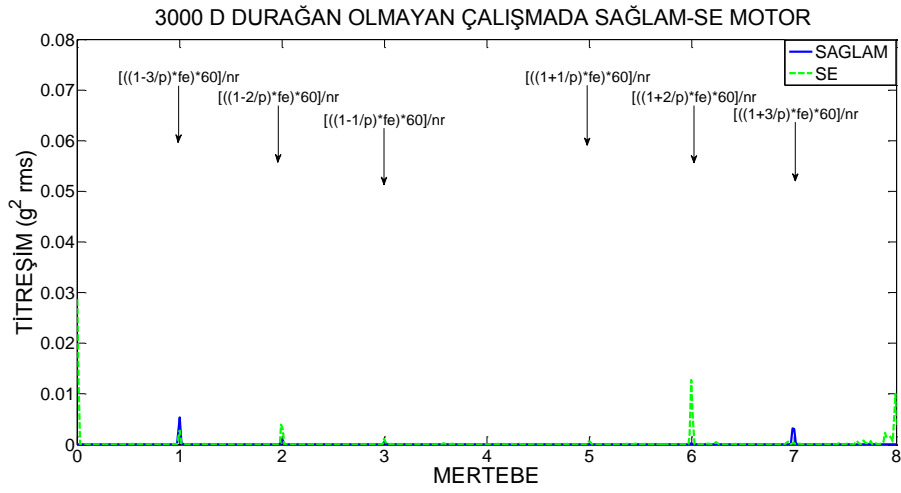


Şekil 11. Motorun zamana bağlı hız ve titreşim grafikleri

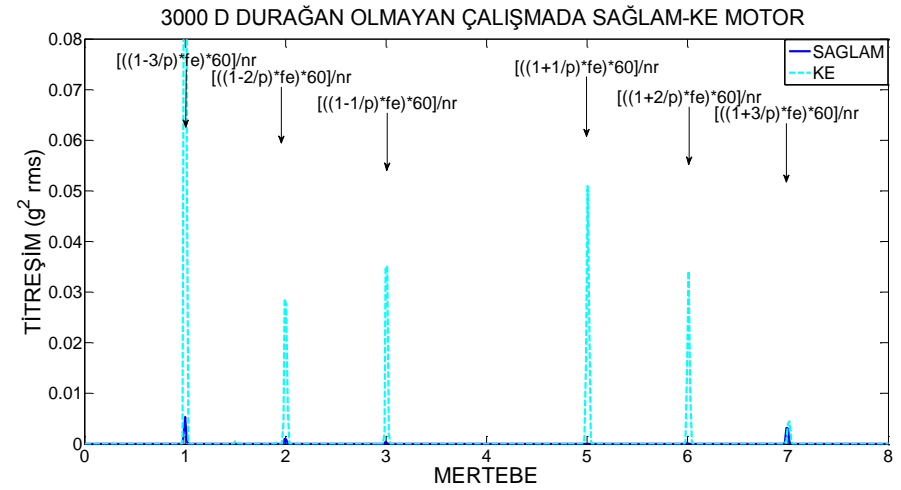
Şekil 11'de %100 yüklü dinamik çalışma da motora ait titreşim-zaman ve hız-zaman grafiği yer almaktadır. Kullanılan yöntem HFD sinyallerinin durağan olmayan çalışma koşullarındaki eksikliğini ortadan kaldırarak avantajını ortaya koymaktadır. Motordan alınan dinamik titreşim sinyalini hız sinyali ile tekrardan örnekleyerek mertebe boyutunda durağan hale dönüştürmektedir. Şekil.12 'de dinamik titreşim sinyallerinin mertebe boyutundaki grafikleri yer almaktadır.



(a)



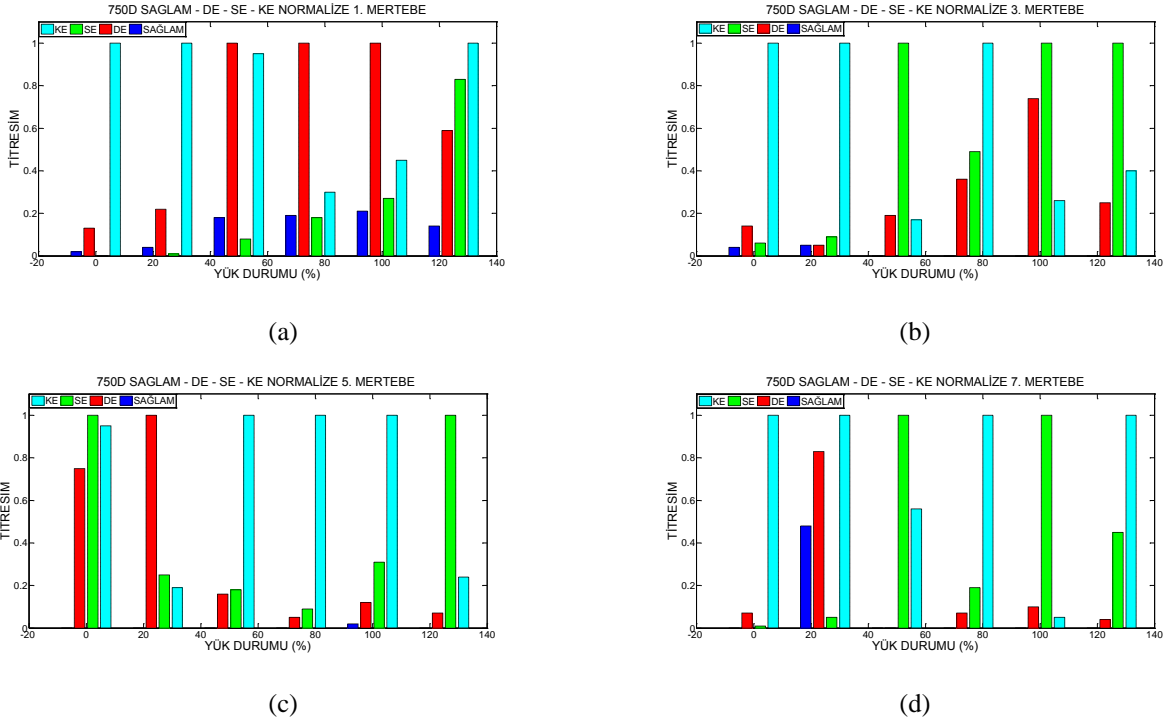
(b)



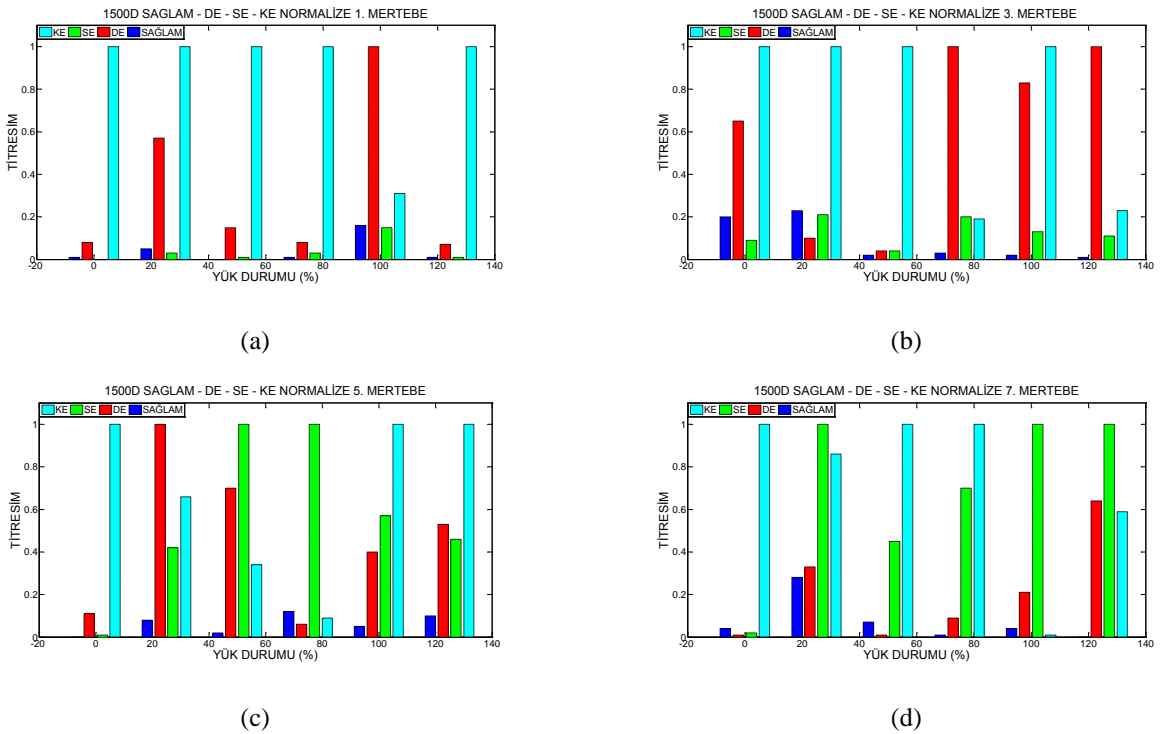
(c)

Şekil 12. % 100 Yükte 3000 d/d Durağan olmayan çalışma da sağlam motora göre arıza durumlarının titreşim seviyeleri (a) Sağlam Motor - DE, b) Sağlam Motor - SE, c) Sağlam Motor - KE)

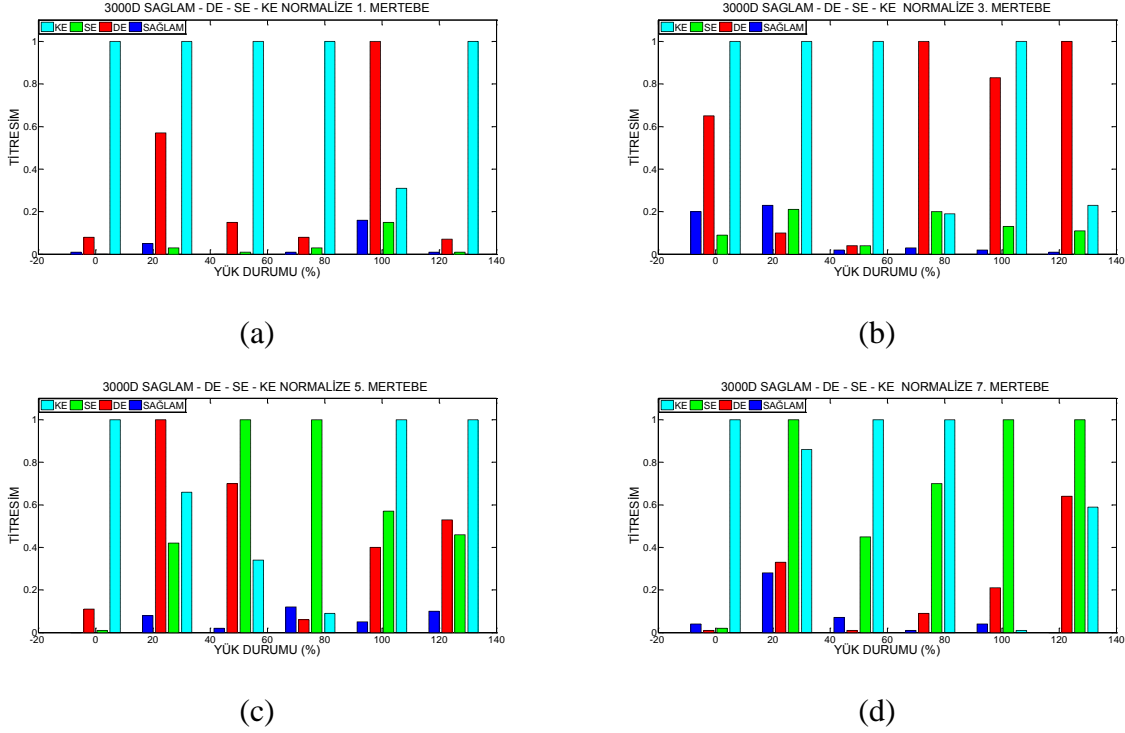
Sağlam ve arızalı motorlara ait grafikler normalize edilerek Şekil 13-15 da verilmiştir. Şekil 13-15 incelendiğinde, durağan çalışma koşullarında değişik hız ve yük durumlarında elde edilen sonuçlarla tutarlı sonuçlar elde edildiği görülmektedir.



Şekil 13. 750 d/d Durağan olmayan çalışmada sağlam motora göre titreşim seviyeleri (a) Sağlam-DE, b) Sağlam-SE, c) Sağlam-KE)



Şekil 14. 1500 d/d Durağan olmayan çalışmada sağlam motora göre titreşim seviyeleri (a) Sağlam-DE, b) Sağlam-SE, c) Sağlam-KE)



Şekil 15. 3000 d/d Durağan olmayan çalışmada sağlam motora göre titreşim seviyeleri (a) Sağlam-DE, b) Sağlam-SE, c) Sağlam-KE)

SE ve KE eksenden kaçıklık arızaları motorda oluşan titreşim seviyesinin genel olarak arttığı sonucuna ulaşılmaktadır. Bu değerler, genlik değerlerinde meydana gelen değişimlerin yüzdelere bakılarak sonuçlar daha iyi analiz edilebilir.

Tablo 2. 750 d/d ve 1500 d/d Durağan çalışmada arızalara ait mertebelerim sağlam motora göre dB cinsinden yüzde genlik değişimleri

750 d/d Sağlam Motora Göre DE, SE ve KE Arızalı Motorun % Genlik Değişimi (MUTLAK)												
Yük Durumu (%)	1. MERTEBE			3. MERTEBE			5. MERTEBE			7. MERTEBE		
	DE	SE	KE	DE	SE	KE	DE	SE	KE	DE	SE	KE
0	15,98	16,26	35,42	10,25	1,73	25,00	15,47	17,42	17,13	20,95	3,21	39,96
25	16,32	16,95	30,88	1,60	4,96	21,73	27,84	18,55	16,21	12,23	4,19	22,61
50	16,06	8,52	15,56	20,87	24,98	20,30	33,74	32,43	45,50	2,19	25,83	21,84
75	15,82	1,34	4,16	34,33	36,22	40,74	19,08	24,30	4,14	26,39	32,57	7,05
100	15,27	0,11	7,36	41,41	45,55	35,80	12,64	27,11	28,73	21,34	37,18	17,13
125	14,53	17,91	19,79	32,75	36,10	35,91	12,19	26,60	21,45	6,46	28,65	2,15

1500 d/d Sağlam Motora Göre DE, SE ve KE Arızalı Motorun % Genlik Değişimi (MUTLAK)												
Yük Durumu (%)	1. MERTEBE			3. MERTEBE			5. MERTEBE			7. MERTEBE		
	DE	SE	KE	DE	SE	KE	DE	SE	KE	DE	SE	KE
0	28,42	12,79	56,03	16,03	10,86	20,02	25,14	2,51	45,38	10,76	7,57	28,50
25	26,24	13,00	35,85	12,43	6,96	18,33	21,92	12,94	25,20	1,16	15,28	12,84
50	23,76	17,15	43,32	4,98	7,80	41,84	31,35	28,08	29,03	7,87	14,07	23,92
75	22,35	16,62	51,50	33,63	11,12	19,58	11,98	9,34	10,92	14,53	26,23	34,73
100	21,24	11,32	8,96	37,67	3,85	39,53	17,02	13,11	27,47	16,91	15,22	6,51
125	19,97	2,19	51,00	38,97	10,89	19,32	17,41	7,15	22,35	39,38	33,99	37,45

Yapılan analizlerin sonuçlarına göre diğer yük durumlarında 3. mertebe ve 5. mertebe seviyelerindeki yüzde değişimin diğer seviyelere göre belirgin olduğu görülmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada SMSM' de meydana gelen eksenden kaçıklık arızalarının tespiti titreşim sinyallerinin incelenmesi ile durağan ve durağan olmayan çalışma koşullarında gerçekleştirilmiştir. Çalışma farklı hız ve yük koşullarında motordan alınan titreşim sinyalleri ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, HFD' nin dinamik sinyallerdeki yetersizliğini YÖT-MTA ile giderebileceği sonucunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar arızaya ait titreşim seviyelerinin temel mertebenin alt bandında 1. ve 3.mertebede, üst bantta ise 5. ve 7. mertebede oluştuğunu doğrulamıştır. Sunulan yöntem ayrıca eksenden kaçıklık arızasının tespitini motor hızından bağımsız olarak durağan ve durağan olmayan çalışma koşullarında mümkün kılmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 1002 Hızlı Destek Projeleri kapsamında 111E164 numaralı "Sabit Miknatıslı Senkron Motorda Mertebe Takip Analiz Yöntemi ile Arıza Tespiti" isimli proje tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Eker, M. ve Akar, M., "A novel approach demagnetization fault diagnosis in permanent magnet synchronous motors", *Journal of New Engineering and Natural Science*, No:1, 1-13, 2013.
- [2] Vas, P., "Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines, Oxford, U.K.: Clarendon, 3-20, 2013.
- [3] Finley, W., Loutfi, M. ve Souer, B.J., "Motor Vibration Problems – Understanding and Identifying", *Cement Industry Technical Conference (CIC), 2013 IEEE-IAS/PCA*, 2013, 1-20.

- [4] Nandi, S., Toliyat, H.A. ve Li, X., "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines-A Review", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.20 (4), 719-729, 2005.
- [5] Eker, M. ve Akar, M. "Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlarda Titreşim Sinyaline Dayalı Eksenden Kaçıklık Arızasının Tespiti" *EEB 2016 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, TOKAT*, 270-279,2016.
- [6] Torregrossa, D., Khoobro, A. ve Fahimi, B., "Prediction of Acoustic Noise and Torque Pulsation in PM Synchronous Machines with Static Eccentricity and Partial Demagnetization using Field Reconstruction Method", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 59 (2), 934-944, 2012.
- [7] Eker, M., "Sabit mıknatıslı senkron motorda demagnetizasyon ve eksenden kaçıklık arızalarının tespiti". Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat, Türkiye, 2013.
- [8] Ebrahimi, M. B. ve Faiz, M.J., "Configuration Impacts on Eccentricity Fault Detection in Permanent Magnet Synchronous Motors", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol:48 (2),903-906,2012.
- [9] Blough, J.R., " Adaptive resampling – transforming from the time to the angle domain. *IMAC-XXIV: Conference & Exposition on Structural Dynamics*, 2006.
- [10] National Instruments. Sound and vibration measurement suite 2009 help manual. Part Number 372416C-01, 2009.