



Asenkron Motorlarda Stator Sarım-Sarım Arası Kısa Devre Arızasının Elektriksel, Mekaniksel ve Manyetiksel Motor Parametrelerine Dinamik Etkileri

The Dynamic Effects of Stator Turn-to-Turn Short Circuit Fault on the Electrical, Mechanical and Magnetical Motor Parameters in Induction Motors

Kürşad Akbayır¹, Taner Göktas^{2*}, Müslüm Arkan³

^{1,3} İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Malatya, TÜRKİYE

^{2*} Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: taner.goktas@deu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 31.03.2022

Kabul Tarihi / Accepted: 01.06.2022

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2022247211

Atıf şekli/How to cite: Akbayır, K., Göktas, T., Arkan, M.(2022). Asenkron Motorlarda Stator Sarım-Sarım Arası Kısa Devre Arızasının Elektriksel, Mekaniksel ve Manyetiksel Motor Parametrelerine Dinamik Etkileri. DEÜ FMD 24(72), 815-824.

Öz

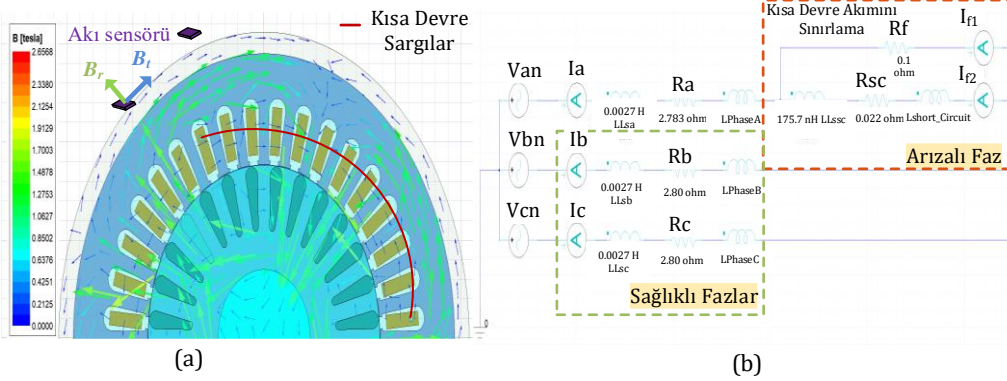
Bu çalışmada asenkron motorlarda yaygın olarak görülen stator sarım-sarım arası kısa devre arızasının elektriksel, mekaniksel ve manyetiksel motor parametrelerine dinamik etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Bu amaçla kalıcı ve geçici durum analizlerinin yapılabilmesine imkan sağlayan Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method-FEM) tabanlı ANSYS@Maxwell-2D programından yararlanılmıştır. Arızalı durumda Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform-FFT) aracılığıyla elektriksel parametrelerden stator akımı ve indüklenen ters elektromotor kuvvet gerilimi, mekaniksel büyüklüklerden çıkış momenti ve manyetiksel parametrelerden kaçak akıdaki değişimler hem zaman hemde frekans domeninde detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca stator sarım sarım arızasını tespit etmek için kaçak akı analizi yapılmış ve karakteristik arıza sinyalleri belirlenmiştir. Elde edilen bulgular laboratuvar ortamında oluşturulan devre düzeneği ile doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Asenkron Motor, Arıza Tespiti, Kaçak Akı Analizi, Stator Sarım-Sarım Kısa Devre Arızası, Sonlu Elemanlar Yöntemi

Abstract

In this study, the dynamic effect of stator turn-to-turn short-circuit fault on electrical, mechanical and magnetic motor parameters is investigated in detail. For this purpose, the Finite Element Method (FEM) based ANSYS@Maxwell-2D program is used, which enables steady state and transient analysis. The changes in stator current and induced back electromotive force voltage from electrical parameters, output torque from mechanical variables and leakage flux from magnetic parameters are examined in detail in both time and frequency axis by means of Fast Fourier Transform (FFT) for the faulty state. Moreover, in order to detect stator turn-to-turn fault, stray flux analysis is carried out and characteristics fault signatures are defined. The obtained results and findings have been proven through the developed experimental setup in laboratory.

Keywords: Induction Motor, Fault Detection, Stray Flux Analysis, Stator Turn-to-Turn- Short Circuit Fault, Finite Element Method



Şekil 2. a) Asenkron motorun Ansys@Maxwell-2D modeli b) Sarım-sarım arası stator kısa devresi devre modeli

2. Asenkron Motorun Modellenmesi ve Kısa Devre Arızasının Oluşturulması

Stator sarımlar arası kısa devre arızasının motor performansı üzerine etkilerini inceleyebilmek için sonlu elemanlar yöntemi (Finite element Method-FEM) tabanlı ANSYS@Maxwell-2D paket programı aracılığıyla 2.2 kW gücünde 1420 d/dk nominal hızda çalışan asenkron motorun iki boyutlu modeli oluşturulmuştur.

Geçici durum analizi ile ANSYS@Maxwell programı manyetik alanları, gücü, momentini, hızı ve akı dağılımlarını belirli bir zaman diliminde belirlenen zaman adımları ile çözebilir. Bahsedilen değişkenler zamana bağlı z-yönündeki hareket denklemleri ile her zaman adımında güncellenir:

$$\nabla \times \nu \nabla \times A = J_s - \sigma \frac{dA}{dt} - \sigma \nabla V + \nabla \times H_c \quad (1)$$

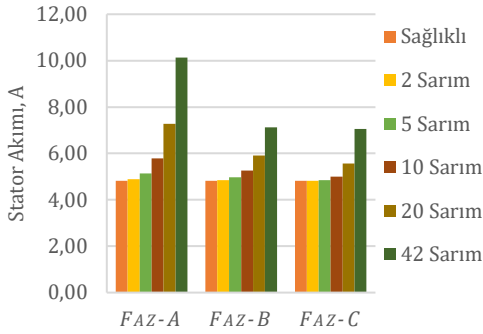
burada H_c mıknatıslık özelliğini giderme katsayısı, A manyetik vektör potansiyeli, V elektrik potansiyeli, ν manyetik direnci ve J_s akım yoğunluğunu göstermektedir. Denklem (1) oluşturulan modelde her düğüm için geçerlidir. Şekil 2'de asenkron motorun ANSYS@Maxwell-2D modeli görülmektedir. Motor parametreleri Tablo 1.'de verilmiştir.

Bu model oluşturulurken motorun iç ve dış geometrisi, kullanılan malzemenin yapısı, stator iletken kalınlığı, stator bağlantı şekli, akım ve

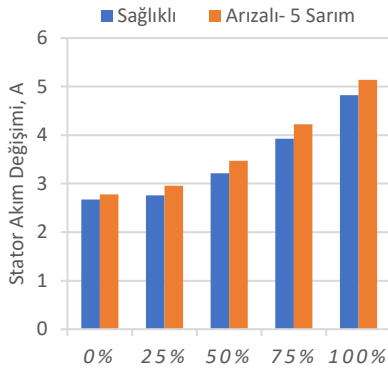
Tablo 1. Asenkron motor parametreleri

Nominal Gerilim, V	380
Nominal Güç, kW	2.2
Nominal Hız, d/dk	1420
Nominal Akım, A	4.7
Stator Dış Çapı, mm	145
Rotor Dış Çapı, mm	88
Tam Yük Momenti, Nm	15
Kutup Sayısı	4
Stator Slot / Rotor Çubuk Sayısı	36 / 28
Faz/Slot Başı Sarım Sayısı	252/42

moment gibi elektriksel, geometrisel ve manyetiksel bütüklükler göz önüne alınmıştır. Stator kısa devre arızasını oluşturabilmek için ilgili faza ait sarımda belirli oranda sarımlar (2-sarım, 5-sarım, 10-sarım, 20-sarım ve 42-sarım) ANSYS@External Circuit Editor arayüzü aracılığıyla kısa devre edilmiştir. Şekil 2b.'de kısa devre arızası oluşturulmuş faz sarımları görülmektedir. Kısa devre akımı kısa devre sarım sayısına ve kısa devre direncine bağlıdır. Başlangıçta büyük olan kısa devre direnci arıza ilerledikçe azalır. Kısa devre arızasının kısa devre akımı küçük iken tespit edilebilmesi önemlidir. Bu nedenle kısa devre arızası durumunda akımı sınırlamak için bir direnç (R_f) kullanılmıştır [19]. Bu direncin değerini ayarlayarak kısa devre olan sargıdan geçen akımın miktarı belirlenebilmektedir. Böylece arızanın şiddetine göre arızalı sargıdan geçecek kısa devre akımı ayarlanabilmektedir.



Şekil 3. %100 yük altında çalışan bir asenkron motorun arıza büyüklüğü ile stator akım efektif değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4. Farklı yüklerde (0%-100%) Faz-A akımı efektif değer değişimi

Oluşturulan sağlıklı ve arızalı modeller farklı yüklenme koşullarında çalıştırılarak stator akımı, kaçak akı, indüklenen gerilim ve hız değerleri incelenmiş ve etkin karakteristik sinyaller belirlenmiştir.

3. Kısa Devre Arızasının Motor Parametrelerine Etkisi

3.1. Stator akımının analizi

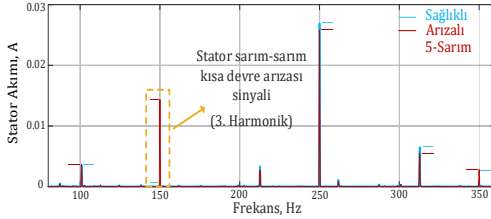
Daha öncede belirtildiği gibi asenkron motorlarda olası arızaların tespiti için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri stator akım sinyallerinin analizi (Motor current signature analysis-MCSA) yöntemidir. Stator sarım-sarım arası kısa devre arızası durumunda stator akım sinyallerinde elektriksel ve manyetiksel asimetriden kaynaklanan bozulmalar meydana gelmektedir. Özellikle bu dengesizlik stator akımında 3. harmonikte görülmektedir [20].

Kısa devre arızasının stator akımlarına etkisini incelemek için sabit yükte (%100 yük) çalışan asenkron motorda farklı arıza seviyelerinde motor çalıştırılmıştır. Şekil 3. sağlıklı ve farklı

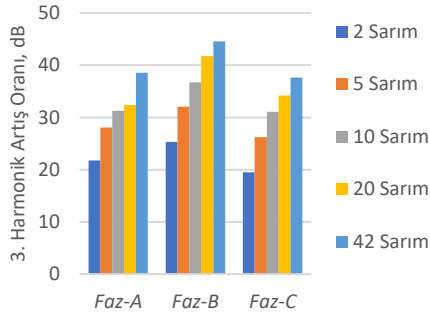
sayıda kısa devre arızası durumunda %100 yük altında her üç faz akımındaki efektif değerlerindeki değişimi göstermektedir. Arıza durumunda statorun her üç fazında da akan akımın efektif değerinin genliği arıza miktarı ile doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Bunun yanısıra arızanın gerçekleştiği A-fazındaki artış miktarı diğer iki fazda oluşan artış miktarından daha fazla olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.'de ise sabit arıza seviyesinde (5 sarım) motor farklı yüklenme koşullarında iken çalıştırılmış ve stator Faz-A akımının efektif değerleri gözlenmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi motor yüklendikçe stator akımlarının efektif değeri bir önceki yüklenme koşuluna göre yükselmektedir. Bu durumda arıza şiddetinin ve motor yükünün artması stator akımının efektif değerinde artmaya sebep olmaktadır. Bu artış sargı sıcaklığını ve motor çalışma sıcaklığını arttırmakta ve sargı izolasyonun zarar görmesine sebep olmaktadır. Zaman domeninde stator akımının analizi stator kısa devre arızası hakkında ön bir bilgi verse de yalnızca zaman domeni ile arızanın türü ve şiddeti hakkında bilgi edinilmesi zordur. Bu yüzden stator kısa devre arızasını doğru tespit etmek için hızlı Fourier dönüşümü (FFT) kullanılarak frekans domeni analizler yapılır. Stator kısa devre arızası ile birlikte akımdaki üçüncü harmonik ve katlarının değerinin artışı daha önceki yapılan çalışmalarda gösterilmiştir [21]. Ayrıca, stator kısa devre arızası durumunda denklem (2)'deki karakteristik arıza sinyalleri de tanımlanmıştır [22]:

$$f_{sc} = \left(nZ \frac{(1-s)}{p} \pm k \right) f_s \quad (2)$$

Burada p çift kutup sayısı, $n=1,2,3,..$, $k=1,3,5,..$, f_s besleme gerilimi frekansı ve Z rotor çubuk sayısıdır. Şekil 5.'te stator sarım-sarım arası kısa devre arızası var iken tam yük altında çalışan asenkron motorun stator akım spektrumu



Şekil 5. Kısa devre arızası durumunda stator akım frekans spektrumu, tam yükte

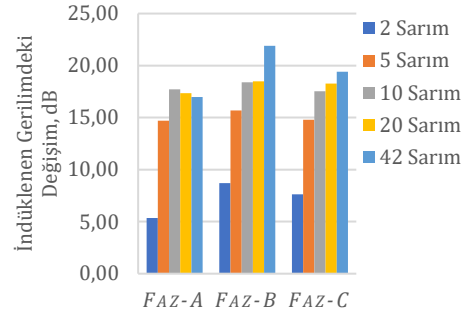


Şekil 6. Stator kısa devre arızası durumunda tam yük çalışmada 3. Harmonik artış oranları (Arızalı değer/Sağlıklı değer oranı)

görülmektedir. Şekildende görüldüğü gibi denklem(2)'de tanımlanan karakteristik harmonikler stator akımında görülmektedir. Şekli dikkatlice incelenirse 3. Harmonik stator arızası durumunda belirgin bir şekilde artmaktadır. Bu durum kısa devre arızası durumunda kutuplar arası toplam sarım sayılarındaki dengesizliğin oluşturduğu manyetik asimetrisinin bir sonucudur. Şekil 6.'da görüldüğü gibi her üç faz akımında arıza şiddetiyle orantılı olarak üçüncü harmonik değeri sağlıklı duruma göre artmıştır. Artan yük ile birlikte üçüncü harmonik değeri değişse de sağlıklı ve arızalı durum arasındaki fark belirgindir.

3.2. İndüklenen gerilimin analizi

Stator sarım-sarım kısa devre arızası durumunda motor fazlarında indüklenen ters elektromotor gerilimi farklı arıza seviyelerinde ve farklı yüklerde analiz edilmiştir. ANSYS@Maxwell-2D paket programında geçici durum analizi ile indüklenen gerilim her zaman



Şekil 7. %100 yük altında çalışan bir asenkron Motorda farklı arıza şiddetlerinde indüklenen gerilimdeki 7. harmonik (350 Hz) artış oranları adımı(time step) için hesaplanabilir. Oluşturulan modelde eddy akım etkilerini azaltmak için bükülü tel yapısı farklı stator slotlarına seri ve/veya paralel bağlanmıştır. Her iletken teldeki akım aynı olmakta ve denklem (3)'deki gibi tanımlanmaktadır.

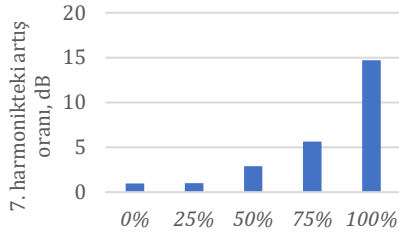
$$\nabla \times \nu \nabla \times A = J_s \quad (3)$$

Böylece sargı terminallerindeki gerilim denklem (4)'deki ifade edilmektedir.

$$u_s = J_s \iint \frac{dA}{dt} d\Omega + R i_f + L \frac{di_f}{dt} \quad (4)$$

burada R , L ve i_f sırasıyla sargı direncini, sargı indüktansını ve sargı akımını temsil etmektedir. Denklem (4)'te de görüldüğü gibi motor fazlarında indüklenen gerilim stator akımına ve manyetik alana bağlıdır. Stator kısa devre arızası durumunda motor manyetik simetrisi bozulmakta ve bu etki hem stator akımında hem de indüklenen ters elektromotor gerilimde görülmektedir.

Sağlıklı ve arızalı durumlar için frekans analizi yapıldığında indüklenen gerilimde karakteristik sinyallerden 7. harmoniğin (350 Hz) genliğinde kayda değer artışlar olduğu görülmüştür. Şekil 7.'de tam yük altında çalışan asenkron motorda farklı arıza seviyelerinde indüklenen gerilimdeki 7. harmoniğin değişimleri her faz için görülmektedir. Arızanın olmadığı diğer iki fazda da bu artışların daha belirgin ve arıza şiddeti ile orantılı olduğu görülmektedir. Ancak arızanın olduğu fazdaki artışın diğer iki fazdan daha

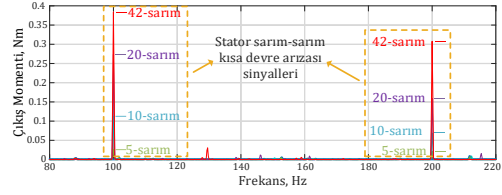


Şekil 8. Stator 5-sarım kısa devre arızası durumunda farklı yüklerde (0%-100%) indüklenen gerilimdeki 7. harmonik artış oranları (Arızalı değer/Sağlıklı değer oranı)

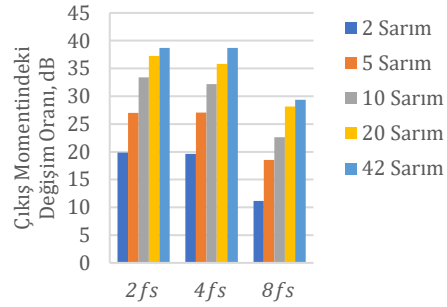
düşük olduğu ve arıza şiddeti ile doğru orantılı olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca indüklenen gerilimin etkin değeri arızanın olduğu fazda arıza şiddeti ile doğru orantılı olarak azalmaktadır. Bu durum ilgili fazdaki sarım sayısının azalmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 8'de ise sabit arıza seviyesinde (5-sarım) farklı yüklerde 7. harmoniğin sağlıklı duruma göre artış oranının motor yükü ile orantılı olduğu net bir şekilde görülmektedir.

3.3. Çıkış momentinin analizi

Asenkron motorda mekaniksel parametrelerden çıkış momenti motorun dinamik performansı hakkında detaylı bilgi vermektedir. Bu tip motorlarda oluşabilecek herhangi bir arıza çıkış momentinde salınma sebep olmakta ve dolayısıyla sabit yük momenti gerektiren uygulamalarda sistemin toplam verimini düşürmektedir. Momentteki bu salınımlar arızanın çeşidine ve şiddetine göre değişmektedir. Dengesiz hava aralığı akı dağılımı motor momentinde karakteristik arıza sinyallerinin görülmesine sebep olacaktır. Stator kısa devre arızasında da açılma hız besleme kaynağı frekansının iki katı frekansında bileşenler içermekte [10] ve çıkış momentinde hızın bir fonksiyonu olduğundan aynı harmonikler çıkış momentinde de görülmektedir. Aynı zamanda stator sarım-sarım kısa devre arızası faz başına indüklenen gerilim ve sarım sayısının azalmasından dolayı motor çıkış momentinin ortalama değeri de azalabilmektedir. Yapılan analizler sonucunda



Şekil 9. Çıkış momenti spektrumu, tam yükte, stator sarım-sarım arası kısa devre arızası durumunda



Şekil 10. Tam yük altında çalışan bir asenkron motorda farklı arıza seviyelerinde çıkış momentindeki harmoniklerin değişim oranı (Arızalı değer/Sağlıklı değer)

stator sarım sarım arası kısa devre arızası durumunda çıkış momentinde görülen harmonikler:

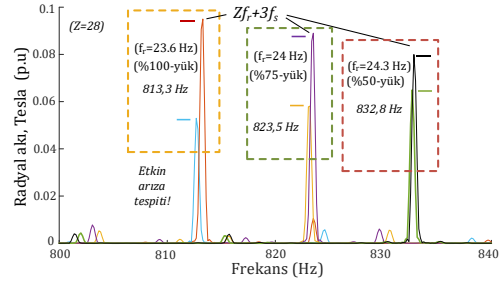
$$f_{sc_torque} = 2kf_s \quad (5)$$

Burada $k=1,2,4...$ olarak tanımlanır. k katsayısı değeri arttıkça buna karşılık gelen harmonik değeri azalmaktadır. Ancak özellikle çıkış momentinde 2., 4. ve 8. harmonikte etkin arıza sinyalleri mevcuttur. Şekil 9.'da tam yük altında çalışan asenkron motorda stator sarım-sarım arası kısa devre arızası durumunda çıkış momentinde $2f_s$ (100 Hz) ve $4f_s$ (200 Hz) sinyallerindeki artışlar net bir şekilde görülmektedir. Şekil 10'da ise $2f_s$, $4f_s$ ve $8f_s$ sinyallerindeki değişim oranı farklı arıza seviyeleri için verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi arıza miktarı arttıkça belirlenen harmoniklerin genliğinin arttığı ve bu durumun çıkış momentinde salınımlara sebep olacağı bilinmektedir. Yapılan analizler sonucunda sarımlar arası kısa devre arızasında çıkış

momentindeki $2f_s$, $4f_s$ ve $8f_s$ harmoniklerinin stator sarım-sarım kısa devre arızasının tespiti için tüm yük koşullarında kullanılabilceği tespit edilmiştir.

3.3. Kaçak akının analizi

Elektrik makinelerinde moment üretimine bir katkısı olmamasına rağmen motorun dinamik davranışı hakkında detaylı bilgi sağlama ve kaçak akı ölçümü yapabilen sensörlerinde gelişmesiyle birlikte kaçak akı tabanlı analizler son yıllarda elektrik makinelerinde arıza tespitinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaçak akı motorun hava aralığındaki akının bir fonksiyonu olduğundan bu yöntem ile motorun birçok parametresinden bağımsız, güvenilir ve etkin bir arıza tespiti sağlamak mümkündür. Ölçümlerinin invazif olmaması, kullanılan sensörlerin küçük ve ucuz olması, MCSA yönteminden daha hassas ve güvenilir olması ve mevcut motorlara da uygulanabilir olması gibi nedenlerden dolayı son yıllarda stator arızalarının teşhisinde kaçak akı ölçüm yöntemine dayanan çalışmalar yoğunluk kazanmıştır [23, 24]. Bir motorda harici kaçak akı radyal ve eksenel olmak üzere kaynağı farklı iki ayrı bileşenden oluşur. Kaçak akıya dayanan stator sarımlar arası kısa devre arızasının bu iki ayrı bileşenden yararlanılarak tespit edilebileceği araştırmacılar tarafından gösterilmiştir. İlk olarak Penman çalışmasında shaft etrafına yerleştirdiği 4 adet arama bobini (search coil) sayesinde eksenel yönde yapılacak kaçak akı ölçümüyle hem arızanın tespitinin hem de yerinin tespit edilebileceğini göstermiştir [14]. Buna göre eksenel akı frekans spektrumunda arızanın aranacağı frekans değerleri [25] denklem (2)'de belirtilmiştir. Bunun dışında eksenel akıda üçüncü harmonikteki artışların arıza durumunda arttığına dair çalışmalar da mevcuttur [26]. Ayrıca radyal yönde ölçülen kaçak akıya dayanan stator kısa devre arıza teşhis yöntemleri üzerine de çalışmalar vardır [16-18]. Bu metotta ise birbirlerine 180° açıyla yerleştirilmiş iki adet akı sensörünün yüklü ve yüksüz durumunda ölçüm sonuçlarına dayanır. Her iki yönden ölçülen



Şekil 11. Farklı yüklenme koşullarında çalıştırılan asenkron motorda stator arızası durumunda kaçak akı spektrumunda karakteristik sinyaller (5 sarım kısa devre)

değerlerde değişim aynı yönde ise arıza olmadığı, değişim zıt yönlerde ise arıza olabileceği yorumlanır [18].

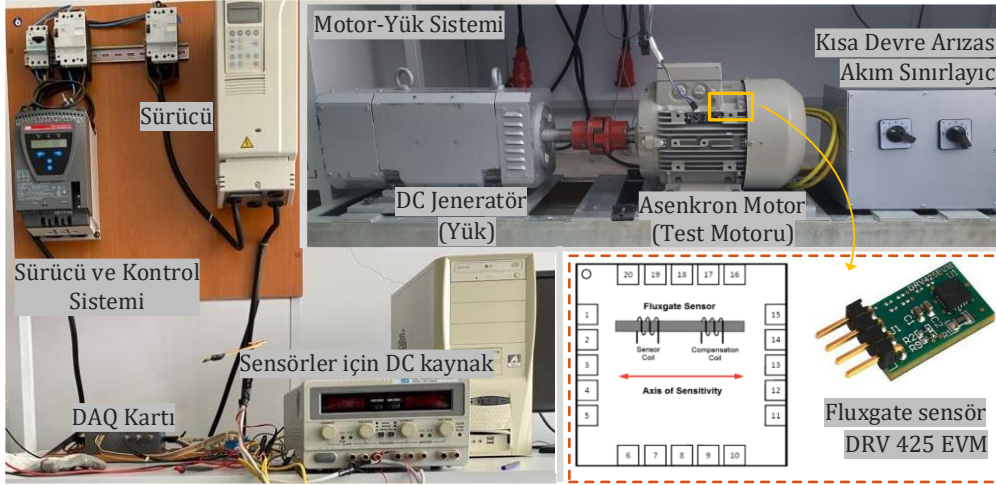
Bu çalışmada ise stator etrafına yerleştirilen bir veya birkaç akı sensörleriyle sağlıklı ve arızalı durumda kaçak akı bilgisi Ansys@Maxwell programında farklı yüklenme koşullarında elde edilmiştir (Bkz. Şekil. 2a).

Şekil 11'de farklı yükler altında çalışan bir asenkron motorda radyal akı spektrumu hem arızalı hemde sağlıklı durumda analiz edilmiştir. Şekil dikkatlice incelenirse üç farklı yüklenme koşulunda (%100-yük, %75-yük, %50-yük) arızalı durumda (5 sarım kısa devre) görülen sinyaller sağlıklı duruma göre belirgin bir şekilde artmıştır. Şekildende görüldüğü gibi kaçak akıda karakteristik arıza sinyalleri şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$f_{sf_flux} = Zf_r + 3f_s \quad (6)$$

burada f_r ise rotor dönme frekansını temsil etmektedir. Test edilen motorda rotor çubuk(bar) sayısı $Z = 28$ olduğundan arıza sinyalleri $28f_r + 3f_s$ sinyalinde görülmektedir.

Stator etrafına farklı açılarda yerleştirilen akı sensörlerinden alınan sonuçlar üzerinde yapılan analizlerde, belirlenen bu karakteristik sinyallerin genliğinin konuma göre etkilendiği görülmüştür. Özellikle stator sarım-sarım arası kısa devre arızasının olduğu bölgelerde bu sinyaller oldukça belirgin iken arıza

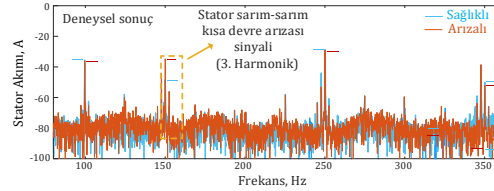


Şekil 12. Deneysel devre düzeneği

konumundan farklı bir bölgede elde edilen kaçak akı spektrumunda bu sinyallerin etkinliği azalabilmektedir. Bu durum ileriki çalışmalarda stator sarım-sarım kısa devre arızasının yerini tespit etmek içinde kullanılabilir.

4. Deneysel Devre Düzeneği ve Deneysel Sonuçlar

Elde edilen analiz sonuçlarını deneysel olarak test etmek için laboratuvar ortamında bir motor-yük sistemi kurulmuştur. Bu sistemde test edilecek asenkron motorda (5.5 kW) stator sarım-sarım arası kısa devre arızası üretim aşamasında farklı seviyelerde oluşturulmuştur. Stator sargılarına bağlı bir anahtar vasıtasıyla test edilen motoru sağlıklı ve arızalı olarak çalıştırabilmek mümkündür. Şekil 12'de deneysel devre düzeneği görülmektedir. Test edilen motoru yüklemek için bir dc jeneratörden yararlanılmıştır. Motor ile dc jeneratör arasında oluşabilecek gürültü seviyesindeki titreşimleri sönmüleyebilecek bir kuplaj (coupling) kullanılmıştır. Ayrıca bir laser ayarlama cihazı ile motor ve yük arasındaki bağlantı mekaniksel gürültüleri önlemek için simetrik ve aynı eksen üzerinde yapılmıştır. Stator akımlarını ölçebilmek için alan etkili sensörler (Hall Effect Sensors) ve kaçak akıları ölçebilmek için Texas Instruments firmasının geliştirdiği DRV 425 Akı sensörü kullanılmıştır. Bu tip akı sensörleri

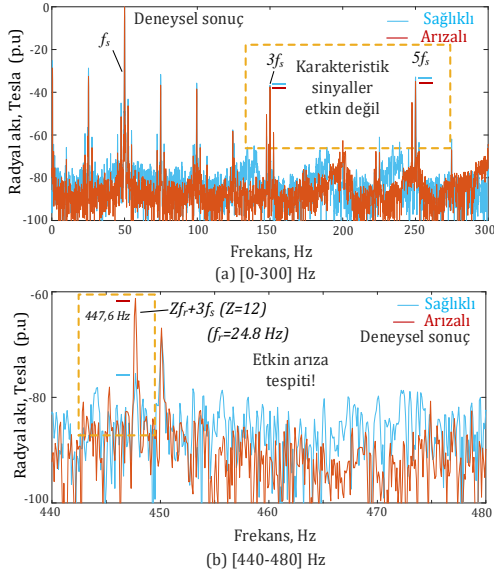


Şekil 13. Deneysel sonuç, stator sarım sarım arası kısa devre arızası durumunda stator akım spektrumu, %25 Yükte

direkt olarak akı bilgisini vermekle birlikte yüksek ölçüm aralığına, yüksek doğruluğa ve sıcaklığa karşı dayanımı oldukça yüksek bir donanıma sahiptir. Deneysel ortamdan alınan analog bilgilerin örneklenecek dijital bilgiye dönüştürülmesi için NI 6341-USB DAQ kartı kullanılmıştır. İstenilen örnekleme frekansında ve sürede verileri toplamak için LabVIEW'de yazılmış arayüz programı kullanılmıştır.

Elde edilen stator akımı ve kaçak akı bilgileri (data) 2.5 kHz örnekleme frekansında 16 sn boyunca toplanmıştır. Sağlıklı ve arızalı sonuçları etkin olarak karşılaştırmak için tüm sonuçlar per-unit olarak sunulmuştur.

Asenkron motor düşük kayma bölgesinde, %25 yükte çalıştırılarak olabilecek en zorlu arıza tespit senaryosu test edilmiştir. İlk olarak sağlıklı ve arızalı durumda stator akım spektrumu incelenmiştir. Şekil 13.'te görüldüğü gibi stator akım spektrumunda stator sarım-



Şekil 14. Deneysel sonuç, stator sarım-sarım arası kısa devre arızası durumunda kaçak akı spektrumu, %25 Yükte a) [0-300] Hz aralığı b) [440-480] Hz aralığı

sarım kısa devre arızası durumunda 3. harmoniğin ($3f_s$) genliğinde belirgin bir artış görülürken diğer harmoniklerin genliklerinde ($2f_s$, $5f_s$ ve $7f_s$) net bir yükselme görülmemektedir. Bu durum simülasyon sonuçları ile örtüşmektedir.

Şekil 14'de ise stator sarım-sarım arası kısa devre arızası durumunda kaçak akı spektrumu incelenmiştir. Şekil 14a'da görüldüğü gibi ana sinyallere bakılarak ($3f_s$, $5f_s$) arıza tespiti imkansızdır. Ancak Şekil 14b'de görüldüğü gibi 447.6 Hz (Zf_r+3f_s ($Z=12$, $f_r=24.8$ Hz))'de arıza tespiti net olarak sağlanmaktadır. Bu sonuçta simülasyon sonuçları ile uyumaktadır.

5. Tartışma ve Sonuç

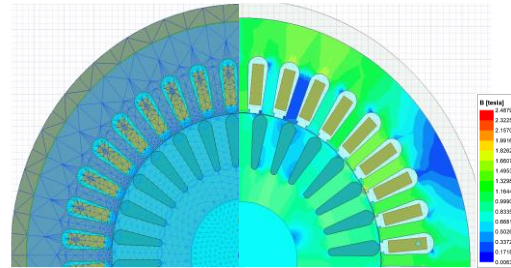
Bu çalışmada stator sarım-sarım arası kısa devre arızası durumunda motordaki elektriksel, meknaiksel ve manyetiksel büyüklükler incelenmiştir. ANSYS@Maxwell paket programı aracılığıyla stator akımı, indüklenen gerilim, çıkış momenti ve kaçak akı farklı yüklenme koşullarında ve farklı arıza seviyelerinde analiz edilmiştir. Elde edilen tüm veriler deneysel olarak da test edilmiş ve doğruluğu

ispatlanmıştır. Benzetim ve deneysel sonuçlara göre bu çalışmada elde edilen etkin sonuçları şöyle sıralayabiliriz:

- Elde edilen sonuçlara göre arıza seviyesi ve motor yükü arttıkça belirlenen karakteristik arıza sinyallerinin genliğinin arttığı görülmüştür.
- Bunun yanı sıra çıkış momentinin ortalama değerinin ve arızalı fazlarda arıza şiddetine bağlı olarak indüklenen gerilimin ortalama değerinin düştüğü görülmüştür.
- Özellikle kaçak akıda Zf_r+3f_s sinyalinin stator sarım-sarım kısa devre arızası durumunda farklı yüklerde etkin arıza tespiti sağlaması bu çalışmanın özgün yönlerinden biridir. Kullanılacak düşük maliyetli bir kaçak akı sensörü ile doğru, güvenilir ve düşük maliyetli arıza tespiti sağlanmaktadır.
- Tanımlanan karakteristik arıza sinyalleri uygulanabilir, etkin ve güvenilir olmasından dolayı sanayi ve endüstride ayrıca diğer elektrik makinelerinde de yaygın olarak kullanılabilir.

Bir sonraki çalışmalarda birden fazla kaçak akı sensörü kullanılarak motorun etrafındaki manyetik alanın sağlıklı ve arızalı durumlarda analiz edilmesi, böylece farklı tipteki arızaların bu bilgiler ile sınıflandırılması planlanmıştır.

Ekler



Şekil Ek1. Modellenen asenkron motorda Mesh ve manyetik alan dağılımı, Tam yük altında

Kaynakça

- [1] Doğan, Z. 2012. Ayırıklaştırma Yöntemleri ve Yapay Sinir Ağı Kullanarak Asenkron Motorlarda Arıza Teşhisi. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 169s, İstanbul.
- [2] Miljković, D. 2015. Brief Review of Motor Current Signature Analysis. HDKBR INF. Mag., cilt. 5, s. 14–26.
- [3] Alsaedi, M. A. 2015. Fault Diagnosis of Three-Phase Induction Motor: A Review. Optics, cilt. 4, s. 1-8, doi: 10.11648/j.optics.s.2015040101.11.
- [4] Darie, E., Darie Eleonora. 2007. About modeling of induction motor faults. 6th Int. Conf. Electromechanical Power Syst., 4-6 Kasım, Chişinau, Rep.Moldova, s. 172–175,
- [5] Nandi, S., Toliyat, H. A., Li, X. 2005, Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors - A review. IEEE Trans. Energy Convers., cilt. 20, no. 4, s. 719–729, doi: 10.1109/TEC.2005.847955.
- [6] Eftekhari, M., Moallem, M., Sadri, S., Shojaei, A. 2013. Review of induction motor testing and monitoring methods for inter-turn stator winding faults. 21st Iran. Conf. Electr. Eng. ICEE 2013, s. 13–18.
- [7] Negrea, M. D. 2006. Electromagnetic Flux Monitoring for Detecting Faults in Electrical Machines. Helsinki Üniversitesi, Doktora Tezi, 142s, Helsinki
- [8] Özelgin, İ. 2006. Asenkron Motor Arızalarının Dinamik Parametrelere Etkisi ve Frekans Analizi İle Tanısı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 100s, İstanbul.
- [9] Doğan, Z. 2012. Asenkron Motorlarda Akım ve Titreşim Verisine Dayalı Kestirimci Bakım, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Bilimsel Araştırmalar Komisyonu Sonuç Raporu 2011/04, 41s, Tokat
- [10] Siddique, A., Yadava, G. S., Singh, B. 2005. A review of stator fault monitoring techniques of induction motors, IEEE Trans. Energy Convers., cilt. 20, no. 1, s. 106–114, doi: 10.1109/TEC.2004.837304.
- [11] Karmakar, S., Chattopadhyay, S., Mitra, M., Sengupta, S. 2016. Induction Motor Fault Diagnosis Approach Through Current Signature Analysis. Power Systems doi: 10.1007/978-981-10-0624-1
- [12] Uçar, H. M. 2008. Asenkron Motorlarda İşaret Tabanlı Stator Yalıtım Arıza Tanısı, İstanbul Teknik Üni., Fen Bil. Enstitüsü, Doktora Tezi, 84 s, İstanbul.
- [13] Çeven, S., Bayır, R. 2020. Bir Asenkron Motorun Mekanik Titreşim Sinyallerinin Ölçülerek Arıza Analizinin Yapılması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, s. 312-322. DOI: 10.31590/ejosat.780063
- [14] Penman, J., Sedding, H. G., Lloyd, B. A. 1994. Detection and Location of Interturn Short Circuits, IEEE Trans. Energy Convers., cilt. 9, no. 4, s. 652–658.
- [15] Surya, G. N., Khan, Z. J., Ballal M. S., Suryawanshi H. M. 2017. A simplified frequency-domain detection of stator turn fault in squirrel-cage induction motors using an observer coil technique. IEEE Transactions on Industrial Electronics, cilt. 64, no.2, s. 1495-1506. DOI: 10.1109/TIE.2016.2611585
- [16] Ceban, A., Pusca, R., Romary, R., Lecoite, P. 2011. Diagnosis of Inter-turn Short Circuit Fault in Induction Machine, Annals of the University of Craiova, Electr. Eng. series, no. 35, s. 103–110.
- [17] Irhoumah, M., Pusca, R., Lefevre, E., Mercier, D., Romary, R., Demian, C. 2018. Information Fusion with Belief Functions for Detection of Interturn Short-Circuit Faults in Electrical Machines Using External Flux Sensors, IEEE Trans. Ind. Elect., cilt. 65, no. 3, s. 2642–2652.
- [18] Pusca, R., Romary, R., Ceban, A., Brudny, J. F. 2010. An online universal diagnosis procedure using two external flux sensors applied to the AC electrical rotating machines, Sensors (Switzerland), cilt. 10, no. 11, s. 10448–10466, doi: 10.3390/s101110448.
- [19] Arkan, M. 2000. Stator fault diagnosis in induction motors, University of Sussex, Phd Thesis, 215s, Brighton.
- [20] Joksimovic G. M., Penman, J. 2000. The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors, IEEE Trans. Ind. Electron., cilt. 47, no. 5, s. 1078–1084, doi: 10.1109/41.873216.
- [21] Nandi, S. 2005. Detection of stator faults in induction machines using residual saturation harmonics. IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, s. 256-263
- [22] Jung, J. H., Lee, J. H., Kwon, B. H. 2006. Online diagnosis of induction motors using MCSA, IEEE Trans. Ind. Electron., cilt. 53, no. 6, s. 1842–1852.
- [23] Cherif, H., Menacer, A., Romary, R., Pusca, R. 2017. Dispersion field analysis using discrete wavelet transform for inter-turn stator fault detection in induction motors. 2017 IEEE 11th Int. Symp. Diagnostics Electr. Mach. Power Electron. Drives, Ağustos 2017, Sdemped, s. 104–109, doi: 10.1109/DEMPED.2017.8062341.
- [24] Heno, H., Demian, C., Capolino, G. A. 2003. A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor, IEEE Trans. Ind. Appl., cilt. 39, no. 5, s. 1272–1279, doi: 10.1109/TIA.2003.816531.
- [25] Wolkiewicz, M., Skowron, M. 2017. Diagnostic System for Induction Motor Stator Winding Faults Based on Axial Flux, Power Electron. Drives, cilt. 2, no. 2, s. 137–150, doi: 10.5277/ped170204.
- [26] Küçükler A., Bayrak, M. 2015. Detection of stator winding fault in induction motor using instantaneous power signature analysis, Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci., cilt. 23, no. 5, s. 1263–1271, doi: 10.3906/elk-1304-72.