



Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda meydana gelen arızaların incelenmesi

Analysis of faults in permanent magnet synchronous motors

Ferhat Çıra

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Geliş Tarihi: 29 Mart 2017
Kabul Tarihi: 10 Mayıs 2017
Elektronik Yayın Tarihi: 30 Haziran 2017
Basım: 31 Temmuz 2017

ÖZET

Motor arızaları, tümleşik bir sistemin performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Arızalı motorun arızasının henüz başlangıç aşamasında tespit edilip önlem alınması, sistemlerin devamlılığı açısından büyük önem arz etmektedir. Geç kalınmış bir müdahale sonucu telafisi mümkün olmayan ekonomik kayıplar ortaya çıkabileceği gibi sistemin çalışamaz hale gelmesi de söz konusu olabilmektedir. Erken arıza teşhisi ile ortaya çıkabilecek sonuçların önceden kestirilip tedbir alınması, ekonomik kayıpların da önüne geçilmesini sağlamaktadır. Bu nedenlerden ötürü sürekli mıknatıslı senkron motorlarda meydana gelen arızaların türlerini ve oluş biçimlerini bilmek erken müdahalede en önemli faktör olabilecektir.

Anahtar sözcükler: Sürekli mıknatıslı senkron motor, Arıza tespiti, Arıza türleri

ABSTRACT

Motor faults are one of the most important factors affecting the performance of an integrated system. It is great importance that the faulty motor is detected at the initial stage and taking precautions is in terms of the continuity of the systems. As a result of late intervention, it can be said that the system can become inoperable as well as the economic losses that can not be compensated. Prediction of the consequences that may occur with the diagnosis of early faults ensures that economic losses are prevented. For these reasons, knowing the types and forms of faults that occur in permanent magnet synchronous motors may be the most important factor in early intervention.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor, Fault detection, Types of faults

Giriş

Elektrik motorları hareketli kontrol ve robotik gibi endüstriyel uygulamalarda en önemli rol oynayan bileşenlerden biridir. Endüstride daha hızlı ve daha güvenilir makinalar ile üretime devam edilmesi oldukça önemlidir. Son 10 yılda yüksek güç yoğunluğu, hassas ve kesin dinamik performans ve yüksek verimlilik talep edildiğinden değişik elektrik motor teknolojileri ve adaptif motor kontrol yöntemleri popüler hale gelmiştir (1-3).

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM), yüksek verim kabiliyeti, hacim ve ağırlığına göre yüksek güç sağlaması, hassas ve kararlı kontrol imkanı, yüksek

moment gibi pek çok avantajlarından ötürü endüstri, tıp, uzay araçları ve silah sistemlerinde en fazla tercih edilen motor türlerinden biridir. Döner hareket yapan tüm motorlarda olduğu gibi SMSM'lerin de çalışma ömrü sağlıklı çalışmalarına bağlıdır. Sağlıklı olmayan yani arızalı olan motorun çalışma ömrü de kısadır. Arızanın henüz başlangıç aşamasında iken tespit edilmesi ve buna müdahale edilmesi sistemin devamlılığı açısından ve motor çalışma ömrü açısından büyük öneme sahiptir.

Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar ayarlanabilir hızlarda sürülebilir ve yukarıda belirtilen özellikleri ile birçok işin üstesinden gelebilmesi nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahip olduğu için üzerine yoğun

çalışılan bir konu haline gelmiştir (4). Yüksek hızlarda sürülebilmesi, düşük hızlarda bile hassas moment kontrol kabiliyeti, yüksek güç ağırlık oranı, kompakt yapısı ve yüksek verimi gibi özellikleri SMSM'leri çekici hale getirmiştir (5). Sm-Co ve Hd-Fe-B gibi nadir toprak elementli doğal mıknatıslardaki gelişmeler SMSM'lerin daha kompakt ve verimli hale gelmesini sağlayan gelişmelerdir. Üstelik SMSM'lerde asenkron motorların aksine güç faktörü ve motor verimi, kutup sayısına ve motor hızına bağlı değildir. Tüm bu üstün özellikleri sayesinde SMSM'ler otomotiv, robotik ve havacılık endüstrilerinde en fazla kullanılmaya başlanan motorlar haline gelmiştir (6).

Diğer yandan güvenli çalışmanın kritik öneme sahip olduğu sistemlerde, sistemin bir bileşenindeki küçük bir arıza, büyük felakete yol açabilecek seviyeye ulaşabilmektedir (7). Bu nedenle güvenilir çalışma, güvenlik ve arıza toleransı gibi kavramların bu tür sistemlerde önemi büyüktür. Sistemin güvenilirliğini geliştirmek için meydana gelebilecek potansiyel arızaları tespit ve tolere edebilen kontrol sistemlerini de tasarlamak gereklidir (8).

Elektrik makinalarının arıza tespitinde sıcaklık ölçümü, radyo frekans emisyonu görüntüleme tekniği, ses ve titreşim izleme, akustik ses ölçümü, motor momenti, rotor hızı ve stator akım harmonik analizinin de yapıldığı çok sayıda farklı yöntem bulunmaktadır (9). Bu yöntemlerden en sık ve yaygın kullanılanı benzersiz arıza örüntüsü sağlaması nedeniyle stator akım izleme yöntemidir (10). Stator akım izleme yöntemi ile ekstra her hangi bir ekipmana ihtiyaç duyulmaksızın stator faz sargılarından elde edilen stator akımları kullanılır.

Stator akım izleme yöntemi çok sayıda matematiksel işlem tekniğine dayanır. Bunlardan Fourier dönüşüm temelli yöntemler motorun sürekli durum çalışma koşullarındaki uygulamalarda geniş kullanım alanı bulmaktadır (11). Bununla birlikte sürekli olmayan

çalışma koşullarındaki uygulamalarda zaman-frekans analizi temelli yöntemler halen tercih edilmektedir (5).

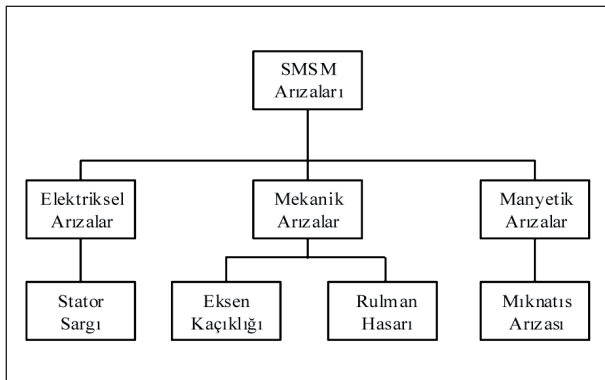
1. SMSM Arızaları

SMSM'lerde meydana gelen arızalar manyetik, elektriksel ve mekanik arızalar olarak sınıflandırılabilir. Manyetik arızalar genellikle mıknatıs kırıklığını ve demagnetizasyonu kapsamaktadır. Elektriksel arızalar ise sargılardaki bağlantı hataları, stator açık-devre, sarımlar arası kısa devre, faz-faz kısa devre ve faz-toprak arası kısa devre gibi arıza durumlarını kapsamaktadır. Mekanik arızalar, statik ve dinamik hava aralığı düzensizliği, bükülmüş şaft veya dinamik eksen kaçıklığı ve hasarlı rulman arızaları gibi anormalliklerden meydana gelmektedir (12).

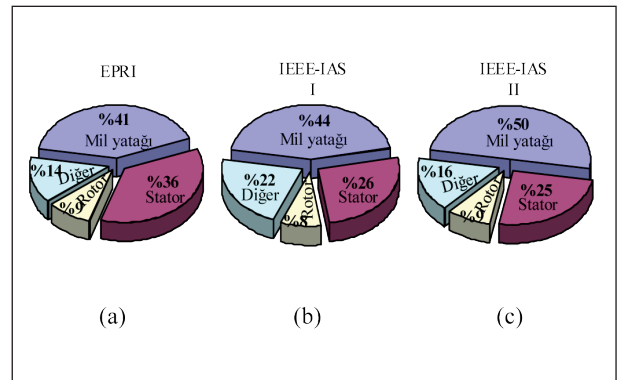
Mekanik arızalar daha çok motorun dönen mekanik parçalarından kaynaklanan arızalarken elektriksel arızalar motordaki elektriksel kısımlarından dolayı meydana gelen arızalardır. Stator sargı arızaları, kırık rotor arızası, eksen kaçıklığı ve mil yatağı arızası gibi arızalar genel olarak tüm motorlarda meydana gelen başlıca arızalardandır. Şekil 2'de EPRI (2) ve IEEE (3) tarafından yapılan anket ve araştırmalara göre büyük motorlarda meydana gelen arızaların yüzdeleri gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre mil yatağı ve stator arızaları baskın arıza tiplerindedir. Stator arızalarının tüm arızalar içerisindeki oranı %30 civarındadır.

1.1. Sarımlar Arası Kısa Devre Arızası

Elektriksel arızalara en çok neden olan problem sargı yalıtımının bozulmasıdır. Kısa devre arızası henüz çok küçük boyutlarda yani sarımlar arası kısa devre arızası durumunda iken birkaç sarımda meydana gelen yalıtım bozulması giderek yayılarak daha şiddetli yalıtım arızalarına sebebiyet vermektedir (13). Bu tür sarımlar arası kısa devre arızaları kısa devre olan sarım üzerinde kilitlenmiş rotor akımının iki katına kadar büyüklükte,



Şekil 1: SMSM'nin arıza türleri (12).



Şekil 2: Büyük motorlar için motor arızaları anketi (2, 3).

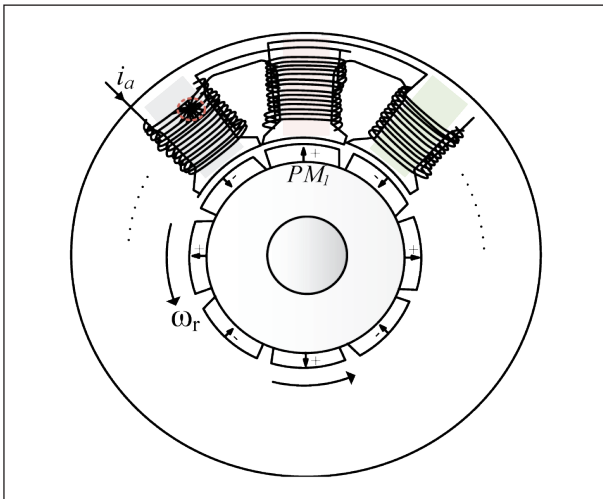
sargıların aşırı ısınmasına neden olan bir kısa devre akımı meydana getirir (14). Sarımlar arası meydana gelen kısa devre yayılarak önce aynı fazdaki tüm sargıların kısa devre olmasına ve zamanla da faz-faz arası kısa devre arızasına yol açmaktadır.

Elektriksel arızalar stator sargılarının bağlantı anormallikleri, stator sarımlarının açık-devresi ve stator sarımlarının kısa devresi ile ilişkilidir. Stator sargı yalıtımının bozulmasına bağlı olarak gelişen sarımlar arası kısa devre arızası üç fazlı motorlarda en sık rastlanan arıza türlerinden biridir (15).

SMSM'nin stator sarımlar arası kısa devre arızası, statorda aşırı bir akımın indüklenmesine ve rotor mıknatıslarının nötr akısına zıt bir manyetik akı oluşmasına bu da rotor mıknatıslarının hızlı biçimde demagnetize olmasına sebep olabilmektedir (16). Şekil 3'te bir sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM)'nin bir fazında meydana gelen sarımlar arası kısa devre arızası gösterilmektedir.

Sarımlar arası kısa devre olayı SMSM'lerde en sık karşılaşılan arızalardan biridir. Şematik olarak Şekil 4'te gösterilen kısa devre olayı tespit edilmediğinde, makinada mıknatısların demagnetize olması gibi bir takım önemli problemlere neden olmaktadır (16).

Stator sarımlar arası kısa devre olayında oluşan i_f kısa devre akımı, hava aralığındaki stator MMF dağılımını etkilemektedir. Stator faz sargısındaki kısa devre arızası, makina akısını üç yönden etkilemektedir. Bunlardan ilki kısa devreye sahip olan faz sargısı daha az MMF üreteceğinden etkinliği azalır. Üstelik kısa devre olayı özellikle oluklardaki sızıntı akısının artmasına



Şekil 3: Bir SMSM'de stator sarımlar arası kısa devre arızası gösterimi.

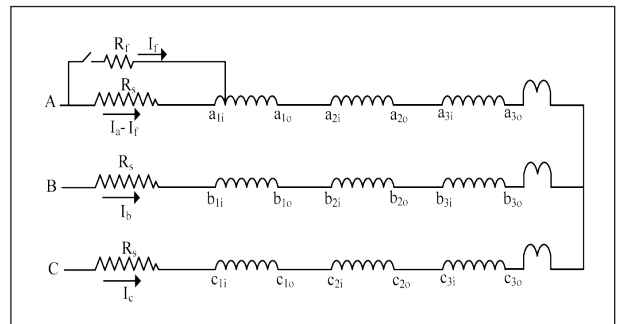
yol açacağından bu durum saturasyon (doyunluk) koşullarının değişmesine neden olur.

Böylece stator devresinin etrafındaki akı yoğunluğu değişmiş olur. İkincisi kısa devre olan sarımlar bağımsız bir faz gibi hareket ederek kısa devreli faz sargılarına zıt etkili kendi MMF'ini oluştururlar. Daha sonra kısa devreli sargılarda oluşan akım, temel hava aralığı akısının meydana gelmesine engel olacaktır (12). Üçüncüsü, kısa devre akımları sargılardaki sıcaklığın artmasına sebep olduğundan sargı yalıtımı bozulabilmektedir.

Sarımlar arası kısa devre olayı sonucu stator simetrisinin bozulması ile bazı harmoniklerin genliklerinin ciddi değişimler göstermesi, sarımlar arası kısa devre olayının ciddi sonuçları arasında sayılabilir. Harmonik genliklerinin kısa devre olayına bağlı değişimleri sarımlar arası kısa devre arızasının tespitinde kullanılabileceği fikrinin temelinin oluşturmaktadır.

Sarımlar arası kısa devre arızaları başlangıçta küçük boyutta olsa bile, motora ciddi hasarlar verebilecek faz-toprak kısa devre arızasına yol açabilmektedir (13). Faz-toprak kısa devre arıza akımı motorun çekirdeğinde (nüvesinde) çok ciddi bir hasara ve motorun sistemden çıkarılıp kullanım dışı kalmasına yol açabilmektedir (17). Ayrıca sarımlar arası kısa devre arızasından dolayı oluşan aşırı stator akımları, rotor mıknatıslarının nötr akısına zıt bir manyetik akım oluşmasına ve rotor mıknatıslarının hızlı biçimde demagnetize olmasına neden olabilmektedir (16).

Diğer taraftan, üç fazlı bir motorun faz dirençleri mümkün olduğunca dengelidir. Endüstride genellikle paslanma veya çalışma ortamının kirliliği bağlantılarda dengesizlik meydana getirmektedir. Üstelik titreşimli çalışma ve ısıl döngü işlemleri bağlantıların bozulmasına neden olabilmektedir (18). Bağlantı gevşekliği, hem lokal aşırı ısınmaya, dengesiz gerilim ve akımlara hem de kısa devre ve açık devre gibi elektriksel arızalara sebebiyet



Şekil 4: Statorunun bir fazındaki sarımlar arasında kısa devre olayı.

verebilmektedir (19). Akım veya gerilim dengesizliği durumu, motor sıcaklığının aşırı yükselmesine neden olduğu gibi motor verimine ve performansına olumsuz etkisi olan negatif gerilim ve akım bileşenlerinin oluşmasına yol açabilmektedir. Ayrıca, gerilim dengesizliği, kendi genliğinin birkaç katı büyüklüğünde bir akım dengesizliği meydana getirebilmektedir. Stator sargılarının sarımlar arası kısa devre arızasına bağlı olarak zamanla ısınmasından dolayı empedans dengesizliği de bununla birlikte artış gösterebilmektedir (20).

1.2. Rotor Mıknatıslarının Demagnetizasyonu Arızası

Mıknatısta meydana gelen kısmi demagnetizasyon arızası, dengesiz manyetik çekme, manyetik harmonikler, akustik gürültü ve titreşim gibi birçok olumsuz mekanik etkilere neden olmaktadır (21). Bu arıza dolaylı olarak SMSM'nin mekanik mil momentinin azalmasına ve motor performansının da olumsuz etkilenmesine neden olmaktadır (16). Kısmi demagnetizasyon arızasından dolayı, SMSM, arızasız durum ile aynı mil momentini üretebilmek için daha yüksek bir stator akımına ihtiyaç duymaktadır. Bu akım artışı SMSM'nin stator sarımlarındaki sıcaklığı arttırmakta ve bu da daha büyük bir demagnetizasyona ve stator akım artışına neden olmaktadır (22). Buna ek olarak sarımlar arası kısa devre arızası da aşırı akımlara neden olacağından buna bağlı demagnetizasyon arızasını meydana getirebilmektedir (16). Yaşanabilecek en kötü durum, armatür reaksiyonu en yüksek seviyede olduğunda, yani motor aşırı yüklerle sürüldüğünde statorun tüm sargılarının tamamen kısa devre olması durumudur (21). Stator sargılarının kısa devre olan miktarının artması arıza etkilerini de artırır ve sürekli mıknatısın çalışma noktasının geri dönülemez demagnetizasyon bölgesi noktasına kadar düşmesine neden olabilir (23).

Sürekli mıknatıslı makineler, normal çalışma koşulları altında çalıştırıldığı sürece, rotor mıknatıslığı devam edebilecek şekilde tasarlanmışlardır. Stator sargılarında meydana gelen kısa devre arızasından dolayı oluşan kısa devre akımından veya aşırı yüklenmeden dolayı, motorun aşırı ısınması rotor mıknatıslarının çalışma noktasının demagnetizasyon bölgesinin altına düşmesine neden olabilir. Şekil 5'te SMSM'nin sağlıklı, 4 ve 8 sarımın kısa devre olması durumları için 120 °C'lik çalışma sıcaklığındaki demagnetizasyon eğrisi ile çalışma noktaları görülmektedir. Çalışma noktası, demagnetizasyon eğrisi ile dış manyetik devrenin geçirgenliğini ifade eden lineer doğrunun kesiştiği nokta olarak tanımlanır. Burada dikkat edilmesi gereken

husus, sıcaklık artışı demagnetizasyon eğrisini sağa doğru yavaşmasına neden olabilmektedir. Böylece k demagnetizasyon noktası lineer bölgeye yaklaştıkça, mıknatısların kalıcı ve geri dönülemez biçimde demagnetize olma riski ortaya çıkmaktadır (24).

Eğer arıza, çalışma noktasının altındaki lineer bölgeye kadar düşmesine sebebiyet verirse o zaman geri dönüşü olmayan bir akı kaybı da meydana gelecektir (25). Demagnetizasyonun bir sonucu olarak dağıtılmış manyeto motor kuvvet (MMF) sinüzoidal değildir. Eğer demagnetizasyon var ise demagnetizasyon frekans harmonikleri gözükür (5).

$$f_{dmg} = f_s |1 \pm k/p| \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

Burada k herhangi bir tam sayıyı, p kutup çifti sayısını ve f_s kaynağın temel frekansını ifade etmektedir.

1.3. Eksen Kaçıklığı

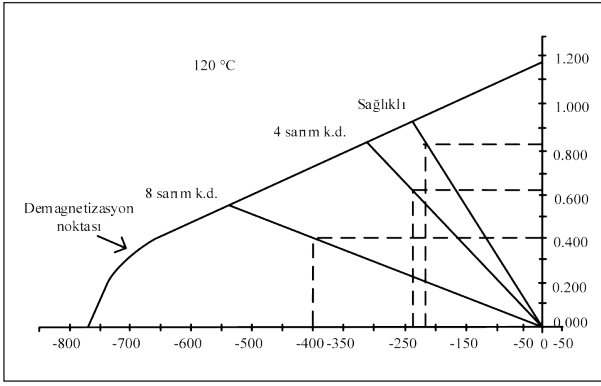
Eksen kaçıklığı arızaları, mekanik arızalar sınıfında incelenmektedir. Eksen kaçıklığı arızası statik, dinamik ve karışık eksen kaçıklığı arızalarını kapsamaktadır. Bu arızalar dengesiz kütle, shaft burulması ve rulman toleransı gibi imalat hatalarından dolayı meydana gelmektedir. Eksen kaçıklığı, moment vuruntusu, gürültü ve titreşimli çalışma gibi problemlere neden olabilir (12).

Eksen Kaçıklığı arızaları, elektrik motorlarında meydana gelen arızaların içerisinde kayda değer bir oranı oluşturmaktadır. Dönen makinalardaki eksen kaçıklığı, stator ile rotor arasındaki hava aralığının düzensiz olması şeklinde tanımlanır (26). İki çeşit hava aralığı eksen kaçıklığı arızası vardır bunlar; statik ve dinamik eksen kaçıklığıdır. Statik eksen kaçıklığı durumunda hava aralığı boşluğu düzensizdir, ancak minimum olan radyal uzunluk sabittir. Rotor shaftının merkezi tam ortada olmadığı ve minimum radyal uzunluk rotora bağlı değiştiği durumda dinamik eksen kaçıklığı meydana gelmektedir (27). Statik ve dinamik eksen kaçıklığı genellikle aynı anda var olma eğilimindedir. İmalatı gereği sağlıklı motorlarda da küçük ve kabul edilebilir seviyede statik eksen kaçıklığı bulunmaktadır.

Dinamik eksen kaçıklığından ötürü oluşan arıza harmonikleri aşağıdaki eşitlikte ifade edilmiştir (28).

$$f_e = f_s \left(1 \pm \frac{2k-1}{p} \right) \quad (2)$$

Burada f_e stator akımlarındaki arıza harmoniklerini (frekanslarını) ifade etmektedir.



Şekil 5: SSM'nin sürekli mıknatıslarının çalışma noktaları (24).

1.4. Rulman Arızaları

Elektrik makinalarının büyük çoğunluğunda rulman ve rulman içerisinde bilyeler kullanılmaktadır. Her rulman içte ve dışta olmak üzere iki adet bilezikten oluşmaktadır. Dönüşü sağlayan bir set bilye bu halka bileziklerin içerisinde bulunmaktadır. Elektrik makinaları dengeli yüklemeye, iyi hizalama vb. gibi normal çalışma koşulları altında çalıştırılırsa bile rulmanlarda metal yorulması nedeniyle arızalar meydana gelebilir. Metal yorulması, rulmanların zamanla pullanma ile dökülmesine ve küçük çatlaklarla kırılmaya başlamasına neden olabilmektedir. Bunlar dışında titreşim, doğal eksen kaçıklığı ve rulman akımları da rulman hasarlarının sebebi olabilmektedir (29).

Rulman arızaları bazen eksen kaçıklığı arızası olarak kabul edilen rotor asimetrisi olarak ortaya çıkabilmektedir (26). Rulman bilyeleri ile ilişkili hasarlar dış rulman hasarları, iç rulman hasarları, bilye hasarları ve takım hasarları olarak sınıflandırılabilir. Tüm bu mekanik hasarlar, sarımlarındaki stator akımlarında yeni harmoniklerin oluşmasına ve makina içerisindeki akı dağılımının bozulmasına yol açar. Arıza frekanslarının (harmoniklerinin) karakteristiği makinanın mutlak hareketinin (titreşiminin) sonucudur (30). Stator akımı stator ile rotor arasındaki hava aralığı miktarının değişmesinden daha ziyade makinanın mutlak hareketinden etkilenmektedir. Rulman arızası meydana geldiğinde arıza frekansları esas olarak elektriksel kaynak frekansı tarafından modüle edilmektedir.

Rulman arızalarından kaynaklanan mekanik yer değiştirme, eksen kaçıklığının her iki yöne hareketi şeklinde tanımlanabilen makina hava aralığının değişimine neden olmaktadır. Rulman arızaları aşağıda verilen frekanslarda stator akım harmonikleri

üretmektedir (31–33).

$$f_{i,o} = \frac{n_b}{2} f_r \left(1 \pm \frac{b_d}{p_d} \cos \beta \right) \quad (3)$$

$$f_{bng} = |f_s \pm k f_{i,o}| \quad (4)$$

Burada n_b rulman bilyelerinin sayısını, $f_{i,o}$ karakteristik titreşim frekanslarını, f_r rotor mekanik hızını, b_d bilye çapını, p_d rulman aralığı çapını, β yuvadaki bilyelerin dokunma açısını ifade etmektedir.

2. Sonuçlar ve Tartışma

Sürekli mıknatıslı senkron motorlardaki arızalar genel olarak elektriksel sinyallerin ölçülmesi ve analiz edilmesi ile tespit edilebilmektedir. Bu arızaların tespiti akım ve gerilim sinyallerinin ölçülmesi ile yapılabileceği gibi makinanın akı bilgisinin ölçülmesi ile de yapılabilmektedir. Özellikle akım sinyallerinin ölçülmesi ile yapılan arıza tespitinde belirli örnekleme frekansı ile kayıt altına alınan akım sinyallerine hızlı Fourier dönüşümü gibi spektral analiz yöntemleri uygulanarak sinyalin içeriğindeki harmonik bileşenlerinin değişimi izlenmektedir. Özellikle bazı karakteristik harmoniklerin arızalara bağlı olarak değişimleri bize o makinanın arıza durumu ile ilgili bilgiler verebilmektedir. Arıza meydana geldiği andan itibaren ne kadar hızlı ve erken tespit edilebilirse arızaya müdahale şansı o kadar artmaktadır.

Kaynaklar

1. C. Ortega, A. Arias, C. Caruana, J. Balcells, and G. M. Asher, "Improved waveform quality in the direct torque control of matrix-converter-fed PMSM drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 6, pp. 2101–2110, 2010.
2. J. Beerten, J. Verdeccken, and J. Driesen, "Predictive Direct Torque Control for Flux and Torque Ripple Reduction," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 1, pp. 404–412, 2010.
3. R. . Errouissi, M. . Ouhrouche, W.-H. . Chen, and A. M. Trzynadlowski, "Robust cascaded nonlinear predictive control of a permanent magnet synchronous motor with antiwindup compensator," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 8, pp. 3078–3088, 2012.
4. K. Raggl, B. Warberger, T. Nussbaumer, S. Burger, and J. W. Kolar, "Robust angle-sensorless control of a PMSM bearingless pump," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 6, pp. 2076–2085, 2009.
5. J. R. Riba Ruiz, J. A. Rosero, A. Garcia Espinosa, and L. Romeral, "Detection of demagnetization faults in permanent-magnet synchronous motors under nonstationary conditions," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 7, pp. 2961–2969, 2009.

6. S. Rajagopalan, W. le Roux, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Dynamic Eccentricity and Demagnetized Rotor Magnet Detection in Trapezoidal Flux (Brushless DC) Motors Operating Under Different Load Conditions," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 5, pp. 2061–2069, Sep. 2007.
7. Y. Zhang and J. Jiang, "Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems," *Annu. Rev. Control*, vol. 32, no. 2, pp. 229–252, Dec. 2008.
8. P. Poure, P. Weber, D. Theilliol, and S. Saadate, "Fault tolerant control of a three-phase three-wire shunt active filter system based on reliability analysis," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 2, pp. 325–334, Feb. 2009.
9. W. T. Thomson and M. Fenger, "Current signature analysis to detect induction motor faults," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 7, no. 4, pp. 26–34, 2001.
10. L. Frosini and E. Bassi, "Stator Current and Motor Efficiency as Indicators for Different Types of Bearing Faults in Induction Motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 1, pp. 244–251, Jan. 2010.
11. R. N. Andriamalala, H. Razik, L. Baghli, and F.-M. Sargos, "Eccentricity Fault Diagnosis of a Dual-Stator Winding Induction Machine Drive Considering the Slotting Effects," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4238–4251, Dec. 2008.
12. B. M. Ebrahimi, J. Faiz, and M. J. Roshtkhari, "Static-, Dynamic-, and Mixed-Eccentricity Fault Diagnoses in Permanent-Magnet Synchronous Motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, 2009.
13. S. Grubic, J. M. Aller, and T. G. Habetler, "A Survey on Testing and Monitoring Methods for Stator Insulation Systems of Low-Voltage Induction Machines Focusing on Turn Insulation Problems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 12, pp. 4127–4136, Dec. 2008.
14. R. M. Tallam, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Transient model for induction machines with stator winding turn faults," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 3, pp. 632–637, 2002.
15. K.-H. Kim, B.-G. Gu, and I.-S. Jung, "Online fault-detecting scheme of an inverter-fed permanent magnet synchronous motor under stator winding shorted turn and inverter switch open," *IET Electr. POWER Appl.*, vol. 5, no. 6, pp. 529–539, 2011.
16. K. C. Kim, S. B. Lim, D. H. Koo, and J. Lee, "The shape design of permanent magnet for permanent magnet synchronous motor considering partial demagnetization," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 10, pp. 3485–3487, 2006.
17. R. M. Tallam, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Transient model for induction machines with stator winding turn faults," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 3, pp. 632–637, 2002.
18. J. Bockstette, E. Stolz, and E. Wiedenbrug, "Upstream Impedance Diagnostic for Three-Phase Induction Motors," in *2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, 2007, pp. 411–414.
19. J. Yun, J. Cho, S. Bin Lee, and J. Y. Yoo, "Online detection of high-resistance connections in the incoming electrical circuit for induction motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 2, pp. 694–702, 2009.
20. A. von Jouanne and B. Banerjee, "Assessment of voltage unbalance," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 16, no. 4, pp. 782–790, 2001.
21. S. Yu and R. Tang, "Electromagnetic and mechanical characterizations of noise and vibration in permanent magnet synchronous machines," in *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, vol. 42, no. 4, pp. 1335–1338.
22. S. Ruoho, J. Kolehmainen, J. Ikaheimo, and A. Arkkio, "Interdependence of Demagnetization, Loading, and Temperature Rise in a Permanent-Magnet Synchronous Motor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 3, pp. 949–953, Mar. 2010.
23. P. Zheng, J. Zhao, R. Liu, C. Tong, and Q. Wu, "Magnetic characteristics investigation of an axial-axial flux compound-structure PMSM used for HEVs," in *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, vol. 46, no. 6, pp. 2191–2194.
24. Z. Guoxin, T. Lijian, S. Qiping, and T. Renyuan, "Demagnetization Analysis of Permanent Magnet Synchronous Machines under Short Circuit Fault," *Power Energy Eng. Conf. (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*, pp. 1–4, 2010.
25. G. H. Kang, J. Hur, H. Nam, J. P. Hong, and G. T. Kim, "Analysis of irreversible magnet demagnetization in line-start motors based on the finite-element method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, no. 3, pp. 1488–1491, 2003.
26. S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review," *IEEE Trans. ENERGY Convers.*, vol. 20, no. 4, 2005.
27. B. M. Ebrahimi and J. Faiz, "Diagnosis and performance analysis of three-phase permanent magnet synchronous motors with static, dynamic and mixed eccentricity," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 4, no. 1, pp. 53–65, 2010.
28. J. Hong, S. Bin Lee, C. Kral, and A. Haumer, "Detection of airgap eccentricity for permanent magnet synchronous motors based on the d-axis inductance," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 5, pp. 2605–2612, 2012.
29. J. Rosero, L. Romeral, E. Rosero, and J. Urresty, "Fault Detection in dynamic conditions by means of Discrete Wavelet Decomposition for PMSM running under Bearing Damage," in *2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2009, pp. 951–956.
30. J. R. Stack, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Fault classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines," in *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2003 - Proceedings*, 2003, pp. 172–176.
31. J. R. Stack, R. G. Harley, and T. G. Habetler, "An amplitude Modulation detector for fault diagnosis in rolling element bearings," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 5, pp. 1097–1102, 2004.
32. J. C. Urresty Betancourt, "Electrical and magnetic faults diagnosis in permanent magnet synchronous motors." *Universitat Politècnica de Catalunya*.
33. M. Arkan, H. Çaliş, and M. E. Tağluk, "Bearing and misalignment fault detection in induction motors by using the space vector angular fluctuation signal," *Electr. Eng.*, vol. 87, no. 4, pp. 197–206, 2005.