



Alınış tarihi (Received): 08.12.2017
Kabul tarihi (Accepted): 30.01.2018

Baş editor/Editors-in-Chief: **Ebubekir ALTUNTAŞ**
Alan editörü/Area Editor: **Zafer DOĞAN / Bülent TURAN**

Asenkron Motorlarda Gerçek Zamanlı Durum İzleme ve Arıza Tespiti

Ferhat Çıra^a

^aDicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü/çıra@dicle.edu.tr

ÖZET: Asenkron makineler, endüstride çok yaygın kullanılmakta ve önemli bir rol oynamaktadır bu nedenle güvenilir ve emniyetli çalışması kullanıcılar açısından çok önemlidir. Genellikle güvenilirler ancak zamanla yıpranmaktadır. Asenkron makinelerin arızaları sistemde aşırı kesintilere neden olabilir ve bu kesintiler sonucu büyük ekonomik kayıplara neden olabilirler. Bu durum asenkron makine durumunun sürekli olarak izlenmesine ve incelemesine motive etmektedir. Gerçek zamanlı durum izleme, beklenmedik arızaları ve bakım maliyetlerini azaltmak amacıyla arızaları tespit etmek için bir makina çalışırken ölçümler yapmayı ifade etmektedir. Bu çalışmada, asenkron makinelerin gerçek zamanlı arıza tespiti ve teşhisinde kullanılan yöntemler incelenmekte ve gelecekteki araştırma alanları tanımlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler – Asenkron motorlar, Gerçek Zamanlı Arıza Tespiti, Sinyal İşleme, Sinir Ağları

Real Time Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors

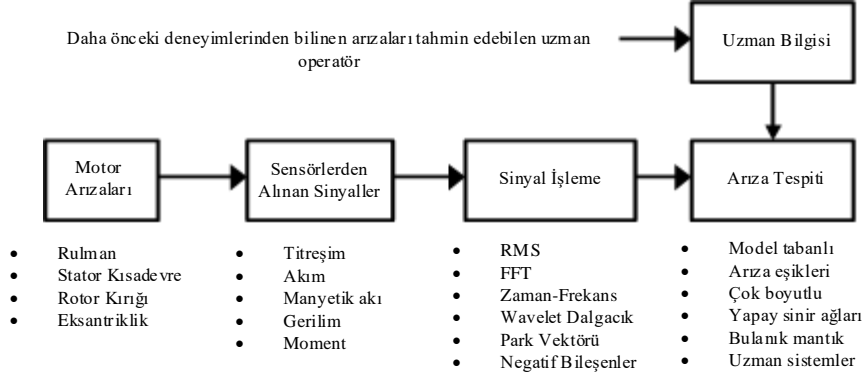
ABSTRACT: Induction machines are wide range used in the industry. Therefore, reliable and safe operation is quite important. These are generally safe, but wear out in time. Induction machines faults may cause extreme interruptions in the overall system, and these interruptions may cause major economic losses. This, motivates online and continuous monitoring and examination of the induction machine. Instantaneous condition monitoring refers to performing measurements while a machine is operating to detect unexpected fault and to reduce maintenance costs. In this study, methods used in instantaneous fault detection and diagnosis of induction machines are examined and future research areas are defined.

Keywords – Induction Motors, Real Time Fault Diagnosis, Signal Processing, Neural Networks

1. Giriş

Elektrikli makinelerinin durumunun izlenmesi, olası felaket arızalarının erken tespit edilmesine olanak sağlayarak bakım maliyetini ve beklenmeyen arıza riskini önemli ölçüde azaltabilmektedir. Koşullara dayalı bakım stratejisi, daha önceki kayıtlara veya makina arızasının istatistiksel tahminlerine dayanarak bakım veya makina değiştirme programını yapmaz. Bunun yerine, makinanın durumunu değerlendiren durum izleme sistemleri tarafından sağlanan bilgilere güvenilir. Bu nedenle, koşullara dayalı bakım stratejisinin başarısının anahtarı, doğru bir durum izleme ve arıza teşhisi aracına sahip olmaktır. Gerçek zamanlı durum izleme, bir makina çalışırken alınan ölçümleri, makinada herhangi bir arızanın mevcut olup olmadığını belirlemek için kullanır. Şekil-1’de genel durum

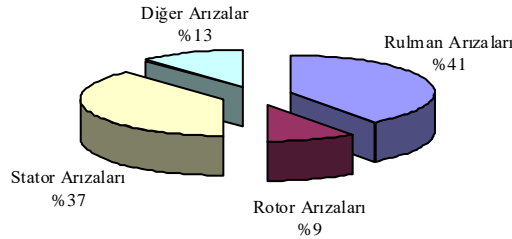
izleme yaklaşımı blok diyagram olarak gösterilmektedir. Burada gösterilen her basamak bloğu bu makalede sırayla tartışılacaktır. Soldan başlayarak, genel motor arızaları gösterilmektedir. Bu arızaları tespit etmede sinyalleri ölçmek için farklı sensör tipleri kullanılabilir. Çeşitli sinyaller işleme teknikleri, arızaların varlığına duyarlı belirli özellikleri çıkarmak için bu sensörlerden alınan sinyalleri uygulanabilir. Son olarak, arıza tespit aşamasında, bir arızanın var olup olmadığı konusunda bir karar verilmesi gerekmektedir.



Şekil 1. Gerçek zamanlı durum izleme süreci
Figure 1. Process of real time condition monitoring

2. Asenkron Motor Arızaları

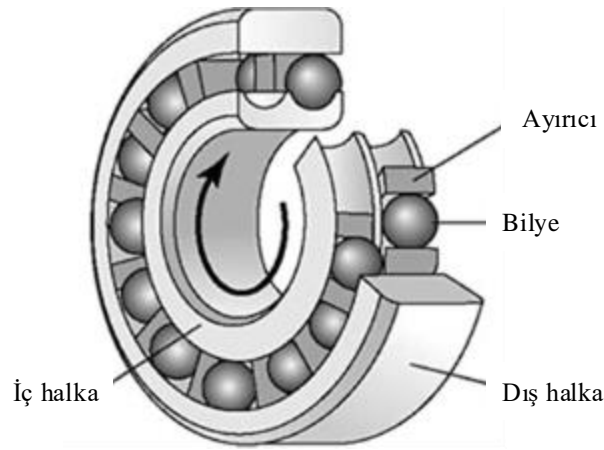
Asenkron makina arızaları üzerine yapılan çok sayıda bilimsel çalışmada asenkron makinalarda en sık görülen arıza türleri bulunmuştur (Donnell et al. 1987; Martin 2003; McCormick and Nandi 1998; S. Nandi, Toliyat, and Li 2005; Wu and Nandi 2010; Payne, Ball, and Gu 2002; Riley et al. 1999; Schoen and Habetler 1995; Gaeid et al. 2011; Stavrou, Sedding, and Penman 2001; Stone and Kapler 1998; Styvaktakis, Bollen, and Gu 2001; Thorsen and Dalva 1999). Bunlar, stator arızaları, rotorla ilgili arızalar, rulmanla ilgili arızalar ve diğer arızaların ana bileşenlerine göre kategorize edilmiştir (bkz. Şekil 2).



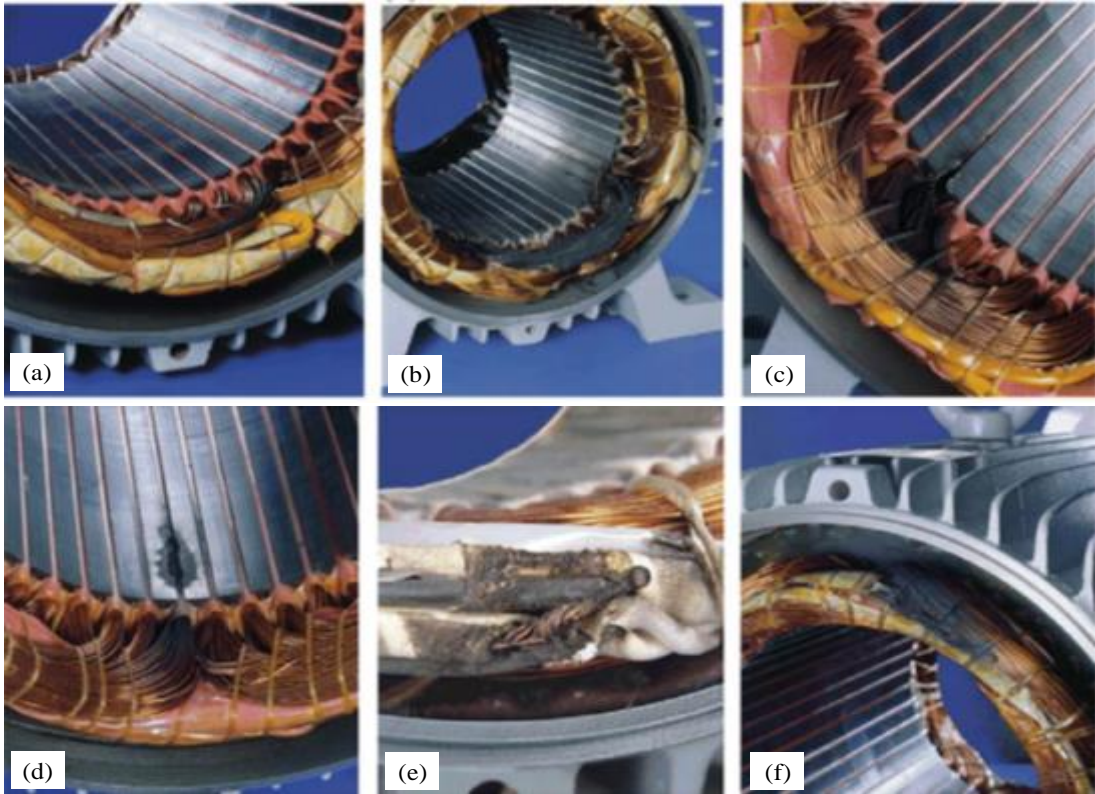
Şekil 2. Asenkron makinalardaki arıza tipleri
Figure 2. Fault types of induction motors

2.1 Rulman Arızaları

Elektrik makinalarının çoğunda bilyeli rulman veya rulman yatakları kullanılır ve bunlar arızaların en yaygın nedenlerinden biridir. Bu rulmanlar, halkalar içerisinde dönen oluklara yerleştirilmiş bir dizi bilye veya yuvarlanan elemanlı bir iç ve dış halkadan oluşur. İç halka, dış halka veya yuvarlanma elemanlarındaki arızalar, makinadan ölçülen titreşimde ve diğer sensörlerle ölçülen sinyallerinde karakteristik frekans bileşenleri üretecektir. Rulman ve yatak arıza frekansları, yatak geometrisinin ve dönüş hızının bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır (Vas 1993). Ayrıca rulman arızaları rotor eksantrikliğine neden olabilmektedir (Subhasis Nandi and Toliyat 1999).



Şekil 3. Rulmanın iç yapısı
Figure 3. Interior of bearing



Şekil 4.

- (a) Aynı fazdaki sarımlar arasındaki kısa devre
- (b) Sargılar arasındaki kısa devre
- (c) Stator oluk bitimindeki stator nüvesi ile sargı arasındaki kısa devre
- (d) Stator oluk ortasındaki stator nüvesi ile sargı arasındaki kısa devre
- (e) Uçlardaki kısa devre
- (f) Fazlar arasındaki kısa devre

Figure 4.

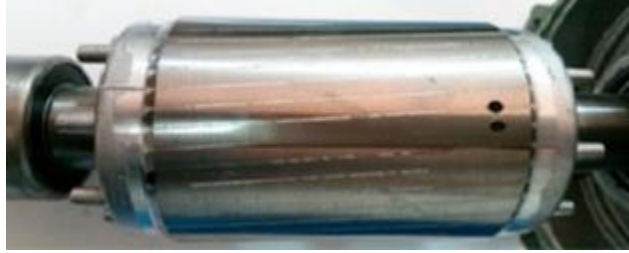
- (a) Stator interturn fault
- (b) Stator coil-to-coil fault
- (c) Stator phase-to-core fault
- (d) Stator middle point winding-to-core-fault
- (e) Stator end point winding fault
- (f) Stator phase-to-phase fault

2.2 Stator Arızaları

Bilinen tüm asenkron makina arızalarının yaklaşık % 37'si bu kategoriye girmektedir. Stator bobini, stator oluklarına yerleştirilmiş yalıtılmış bakır iletken tellerden oluşur. Stator sargı arızaları genellikle bir bobinde iki bitişik sarım arasındaki yalıtım hatasından kaynaklanır. Buna sarım arızası ya da sarım kısa devresi denir. Kısa devreden kaynaklı indüklenen akımlara kısa devre akımı denir. Kısa devre akımı sargı sıcaklıklarının aşırı artışına ve makinenin manyetik alanında dengesizliğe neden olur. Dengesiz manyetik alan, rulman ve yatak arızalarına neden olabilecek aşırı titreşime neden olabilir. Tespit edilmemesi durumunda, kısa devreli sargılardan başlayarak tüm sargılara yayılır ve felakete varan stator yalıtım hasarlarına neden olur. Stator sarımlarındaki yalıtım arızaları, üç fazlı asenkron motorlardaki stator sargılarının sarımları arasında kısa devreye neden olur. Başlangıçta kısa devre yalnızca birkaç sarım sarasındayken o bölgedeki sıcaklığın çok hızlı artması nedeniyle çevresindeki sargıların izolasyon malzemelerinin erimesine ve böylece kısa devrenin hızla yayılmasına neden olmaktadır. Şekil 4.'de asenkron motor stator sargılarının yalıtım arızasına bağlı olarak gelişen farklı kısa devre arızaları görülmektedir.

2.3 Rotor Arızaları

Rotor arızaları toplam asenkron makina arızalarının yaklaşık % 10'unu oluşturur. Normal arıza mekanizması, motorun çalışması sırasında rotorun termik veya mekanik döngüsünden kaynaklanabilen rotor çubuklarının kırılması veya çatlaması şeklindedir.



Şekil 5. Kırık rotor çubuğu arızası

Figure 5. Rotor broken bar fault

Bu tip bir arıza, mevcut spektrumda besleme gerilimi sinyali frekansı etrafındaki iki kat kayma frekansı yan bantlarının oluşmasına neden olmaktadır (Haji and Toliyat 2001; Hatzipantelis and Penman 1993).

$$f_{kırık_rotor} = f_s(1 \pm 2ks) \quad (1)$$

Burada f_s , besleme gerilimi frekansını, s , kayma yüzdesini ve k , 0,1,2...n gibi herhangi bir sayıyı ifade etmektedir.

2.4 Diğer Arızalar

Eksantriklik arızası, rotorun statorun tam merkezine yerleştirilmediğinde ortaya çıkar ve rotor ile stator arasında dengesiz bir hava boşluğu oluşturur. Buna arızalı rulmanlar veya üretim hataları da neden olabilir. Hava boşluğundaki değişim, motorun içindeki en küçük hava boşluğu yönünde net bir manyetik kuvvet oluşturan manyetik alan dağılımını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum "dengesiz manyetik çekme" denilen mekanik titreşime neden olmaktadır.

3. Sensor Sinyalleri

Asenkron makinanın yapısı son derece simetrik olduğundan, içindeki herhangi bir arızanın varlığı onun simetrisini olumsuz etkiler. Bu durum, stator ve rotor arasındaki akının etkileşiminde bir değişime yol açar ve buna karşılık stator akımlarında, gerilimlerinde, manyetik alan ve makina titreşiminde değişikliğe neden olur. Böylece, bu sinyaller gerçek zamanlı durum izlemede kullanılabilir. Tablo 1, arızaları tespit etmek için farklı sensör sinyallerinin kullanımını inceleyen bazı bilimsel araştırmaları özetlemektedir.

Çizelge 1. Belirli arıza tiplerini tespit etmek için sensör sinyallerini kullanan çalışmalar.

Table 1. Studies using sensor signals to detect specific fault types

	Rulman Arızaları	Stator Arızaları	Rotor Arızaları	Eksantriklik Arızaları
Titreşim	(Finley, Hodowanec, and Holter 2000; Martin 2003; McCormick and Nandi 1998; Riley et al. 1999; Gaeid et al. 2011; Vas 1993)	(Arthur and Penman 1998; Finley, Hodowanec, and Holter 2000)	(Arthur and Penman 1998; Finley, Hodowanec, and Holter 2000; Payne, Ball, and Gu 2002)	(Arthur and Penman 1998; Dorrell, Thomson, and Roach n.d.; Finley, Hodowanec, and Holter 2000; Martin 2003; Payne, Ball, and Gu 2002)
Akım	(El and Benbouzid 2000; F. Filippetti et al. 2000; Kim, Gu, and Jung 2011; Kliman and Stein 1992; S. Nandi, Toliyat, and Li 2005; Riley et al. 1999; Schoen and Habetler 1995; Thomson and Fenger 2001; Yazici and Kliman 1999)	(El and Benbouzid 2000; Cruz and Marques Cardoso 2001; F. Filippetti et al. 2000; Hatzipantelis and Penman 1993; Joksimovic and Penman 2000; Kliman and Stein 1992; S. Nandi, Toliyat, and Li 2005; Stavrou, Sedding, and Penman 2001; Thomson and Fenger 2001; Thomson 1994)	(Bellini et al. 2001; El and Benbouzid 2000; Dorrell, Thomson, and Roach n.d.; F. Filippetti et al. 1992, 2000; Haji and Toliyat 2001; Kim, Gu, and Jung 2011; Kliman and Stein 1992; S. Nandi, Toliyat, and Li 2005; Subhasis Nandi, Ahmed, and Toliyat 2001; Payne, Ball, and Gu 2002; Thomson and Fenger 2001; Thomson 1994; Yazici and Kliman 1999)	(El and Benbouzid 2000; Marques Cardoso and Saraiva 1992; Dorrell, Thomson, and Roach n.d.; F. Filippetti et al. 2000; Kim, Gu, and Jung 2011; S. Nandi, Toliyat, and Li 2005; Subhasis Nandi, Ahmed, and Toliyat 2001; Payne, Ball, and Gu 2002; Thomson 1994; Thomson and Fenger 2001; Frederick C. Trutt, Sottile, and Kohler 2002; Vas 1993)
Akı	(Cabanas et al. 2011)	(Cabanas et al. 2011; Hatzipantelis and Penman 1993)	(Cabanas et al. 2011; Shi et al. 2014; Vas 1993; Wieser et al. 1999)	(Cabanas et al. 2011; Dorrell, Thomson, and Roach n.d.)
Gerilim & Akım		(El and Benbouzid 2000; F. Filippetti et al. 2000; Kim, Gu, and Jung 2011; Kliman et al. 1996; F.C. Trutt, Sottile, and Kohler 2002)	(Bellini et al. 2001; El and Benbouzid 2000; Trzynadlowski and Ritchie 2000)	(F. Filippetti et al. 2000)

3.1. Titreşim

Titreşim temelli durum izleme, en eski durum izleme tekniklerinden biridir ve rulman arızaları veya mekanik dengesizlik gibi mekanik arızaları saptamak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Martin 2003). Genellikle hızlanma ile orantılı bir gerilim sinyali sağlayan bir piezoelektrik sensörü kullanılır. Bu hızlanma sinyali, hızı veya konumu vermek üzere de entegre edilebilir.

3.2 Stator Akımı

Stator akımı genellikle bir klipsli hall etkili akım transdüseri kullanılarak ölçülür. Mekanik ve manyetik asimetriler, kırık rotor çubukları ve stator sargılarındaki kısa devreler gibi

çeşitli arızalarla ilişkili frekans bileşenlerini içerir. Son yıllarda yayımlanan bilimsel çalışmaların çoğu, özellikle spektrum analizi kullanılan durum izleme (bkz. Tablo 1) sistemlerinde stator akımının kullanımını incelemiştir.

3.3 Eksenel Manyetik Akı

Bir asenkron makinada, eksenel manyetik kaçak akısı, shaft ile ortak merkezli olarak makinanın tahriksiz (arka) tarafına yerleştirilen dairesel bir arama bobinini kullanarak kolayca ölçülür. Arama bobini, eksenel kaçak akısının değişim oranı ile orantılı olan bir çıkış gerilimi üretir. Bu sinyal, stator akımında bulunanlarla aynı frekans bileşenlerini içerir. Özellikle kayma frekansındaki güçlü bileşenleri içerdiğinden hızı tahmin etmek için oldukça yararlıdır.

3.4 Stator Gerilimi

Stator gerilimi, yüksek frekanslı diferansiyel gerilim transdüseri veya izolasyon yükseltici kullanarak güvenle ölçülebilmektedir. Anlık güç, anlık moment ve negatif bileşen empedansını hesaplamak için kullanılmaktadır.

3.5 Diğer Sinyaller

Rulmanları ve stator sargılarını izleyen sıcaklık sensörleri, durum izleme için kullanılan en geleneksel sinyallerdir. Makinanın aşırı ısınmasına ilişkin faydalı bir gösterge sağlarlar ancak sınırlı arıza teşhis kabiliyeti sunmaktadır. Kısmi boşalma analizi ve yüksek gerilimli motorlarda stator yalıtım arızalarını tespit etmek için kullanılır. Yalıtımdaki küçük boşluklarda elektrik deşarjlarıyla üretilen düşük genlikli, çok hızlı ve ani darbelerin tespit edilmesinde kullanılabilir. Kısmi boşalmalar sağlıklı makinalarda bile gerçekleşir, ancak kısmi boşalma aktivitesindeki artış yalıtım bozulması ile ilişkilendirilebilmektedir (Stone and Kapler 1998).

4. Sinyal İşleme Teknikleri

Sinyal işleme teknikleri, arızanın varlığı veya yokluğuna hassas bağlı karakteristik özellikleri ve parametreleri (arıza ile ilişkili genlik ve frekans bileşenleri v.b. gibi) ortaya çıkarmak için sensörlerden ölçülen sinyallere uygulanmaktadır.

4.1. RMS (Root Mean Square)

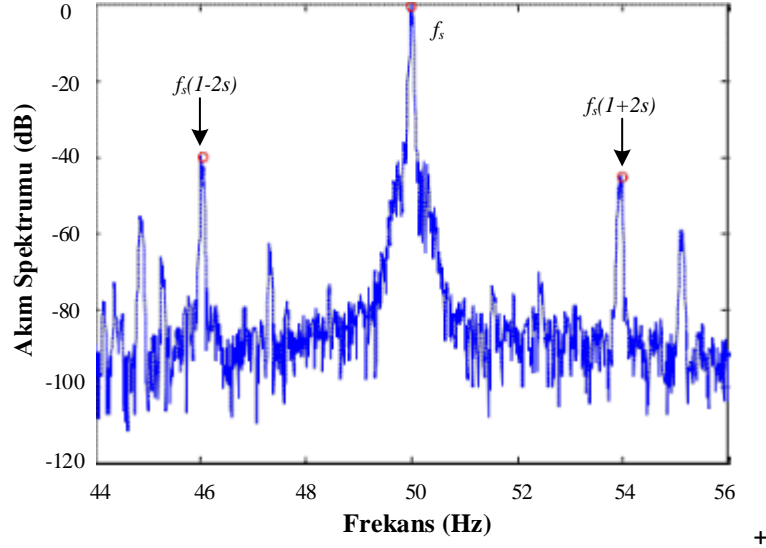
Bir sinyalin genel ortalama karekök (RMS) değeri gibi basit ama faydalı bilgiler verebilir içeren istatistiksel parametrelerin hesaplanmasıdır. Örneğin, titreşim hızının RMS değeri, toplam titreşim şiddetinin kullanışlı bir ölçüsüdür (Riley et al. 1999). Aynı şekilde, stator akımının RMS değeri, motor yüklenmesinin bir göstergesidir.

4.2. Frekans Analizi

Fourier dönüşümü kullanılarak frekans analizi gerçek zamanlı durum izleme için kullanılan en yaygın ve kullanımı kolay sinyal işleme yöntemidir. Bunun nedeni, birçok mekanik ve elektriksel arıza, kutup sayısı gibi motor parametrelerinin bilgisinden tespit edilebilen frekanslardaki sinyaller üretmesidir. Bu arıza sinyalleri, titreşim, akım ve akı da dâhil olmak üzere çeşitli sensörler ile alınan sinyallerde görülür (Bellini et al. 2001; El and Benbouzid 2000; S. Nandi, Toliyat, and Li 2005; Wieser et al. 1999). Bazı arızalar benzer arıza frekansları üretmesine rağmen frekans analizi kullanılarak, arıza hakkında bilgi sağlanabilir. Bu yüzden benzer arıza frekansı üreten arızaları ayırt etmek için ekstra bilgilere ihtiyaç

duyulmaktadır. Aynı zamanda, sinyal içeriğinde büyük "gürültü" frekanslarının varlığı durumunda da düşük seviyeli arıza sinyallerinin algılanması mümkün olmaktadır.

Rulman, stator, rotor ve eksantriklik arızalarının tespitinde titreşim ve akım sinyallerinin frekans analizinin kullanımı tablo-1'den görüldüğü üzere oldukça araştırılmıştır. Şekil 6, bir kırık çubuklu asenkron motor akım spektrumunu, temel frekansı (besleme gerilimi frekansı) 50 Hz çevresinde karakteristik $1\pm 2s$ kırık çubuk yan bantlarını göstermektedir (Gaeid et al. 2011).



Şekil 6. Bir kırık çubuk arızalı bir asenkron motorun yan bantlarını gösteren akım spektrumu
Figure 6. Current spectrum side bands for one broken bar fault in rotor of an induction motor

Frekans analizi, ölçülen gerilim ve akım sinyallerinden hesaplanabilen anlık "kısmi" güç ve anlık moment (El and Benbouzid 2000; Trzynadlowski and Ritchie 2000) gibi niceliklere de uygulanmıştır.

4.3. Diğer Frekans Analizi Teknikleri

Klasik frekans analizi için kullanılan Fourier dönüşümü, frekans spektrumunun örnekleme süresi boyunca zamana göre değişmediğini varsayar. Bu varsayım, özellikle zamanla önemli değişiklikler gösteren mekanik yüklerde her zaman geçerli değildir. Zaman-frekans analizi teknikleri, sinyalin nispeten sabit olduğu kısa zaman dilimlerine bölünmesi ve her bir segmentin Fourier dönüşümü hesaplanmasıyla bu sorunun üstesinden gelir. Bu, zamanla sinyalin frekans içeriğindeki değişikliklerin gözlenmesine izin verir (El and Benbouzid 2000; Yazici and Kliman 1999). Frekans çözünürlüğünün, bölümlerin boyutu ile sınırlı olduğu gözardı edilmemesi gereken bir gerçektir.

Dalgacık dönüşümü (WD) de bir başka frekans analiz yöntemidir (El and Benbouzid 2000; Kim, Gu, and Jung 2011). Klasik Fourier dönüşümü, ölçülen sinyalin farklı frekanslara sahip sinüzoidlere ayrıştırılmasına dayanır. Dalgacık dönüşümü ise dalga tipi sinüs olmayan bir referans dalga formlarının kümesine ayrıştırır. Genel olarak sinüzoidal bileşenlerin toplamı olarak klasik bir şekilde temsil edilmeyen, darbe tipi dalga formlarına uygulanmaktadır.

4.4. Yüksek Seviyeli İstatistik

Zamanla değişen bir sinyalin olasılık yoğunluk fonksiyonunu tanımlamak için ortalama veya varyans gibi yaygın istatistiksel ölççekler kullanılabilir. Ayrıca, kurtosis gibi daha

yüksek dereceli istatistiksel ölçekler de vardır; Bunlar, örnekten büyük bir değere sapanlara kıyasla, küçük bir değerle sapma gösteren örneklerin oranını gösterir. Yüksek dereceli istatistiksel ölçekler, Gaussian gürültüsüne duyarlı olmaması gibi yararlı bazı özelliklere sahiptir. Bunlar da makina arızalarının tespit edilmesinde bazı çalışmalarda kullanılmıştır (McCormick and Nandi 1998; Payne, Ball, and Gu 2002).

Yüksek dereceli spektrumlar elde etmek için yüksek dereceli istatistiksel ölçeklerin frekans analizini (Fourier dönüşümü) gerçekleştirmek mümkündür. Bu spektrumlar, sabit bir faz ilişkisine sahip olan ve dolayısıyla aynı kaynaktan çıkan bir sinyaldeki bileşenlerin teşhisine izin verir (McCormick and Nandi 1998).

4.5. Stator Akımı Park Vektörü

Stator akımı Park vektörü, üç fazlı stator akımlarının anlık uzaysal vektör toplamının yerini temel alır (Marques Cardoso and Saraiva 1992; Cruz and Marques Cardoso 2001). Bu yer, stator sarım arızaları ve hava boşluğu eksantrikliğinden etkilenir. Park vektörü grafiksel olarak veya frekans spektrumlarını inceleyerek analiz edilebilir (Cruz and Marques Cardoso 2001).

4.6. Negatif Akım Bileşenleri

Mükemmel simetriklikteki bir üç fazlı makinaya ideal üç fazlı gerilimler uygulandığında, makina akımları genlik bakımından tam eşittir. Kısa devre veya eksantriklik gibi bir arıza, fazlar arasında bir dengesizlik oluşturarak dengesiz faz akımlarına neden olur. Bu dengesizlik arıza şiddeti ile birlikte artar ve negatif bir dizi akım bileşeninin kullanılarak matematiksel olarak tanımlanabilir (F. Filippetti et al. 2000). Bununla birlikte, besleme gerilimindeki dengesizlikler faz akımlarında dengesizliklere neden olabilir. Dolayısıyla, besleme geriliminin bu şekilde hesaba katılması için ölçülmesi gerekir (F.C. Trutt, Sottile, and Kohler 2002).

5. Arıza Tespit Yöntemleri

Gerçek zamanlı durum izleme sürecindeki son ve en zor adım, bir önceki bölümde çıkartılan özellikleri ve arıza parametrelerini incelemek ve herhangi bir arızanın mevcut olup olmadığını ve eğer arıza var ise, ne tür bir arıza olduğuna karar vermektir. Halen arıza tespiti genellikle uzman bir kullanıcının bilgi ve deneyimlerine dayanarak yapılmaktadır. Bununla birlikte, yapay zeka ve örüntü tanıma gibi sınıflandırma teknikleri kullanılarak bu işlemi otomatik hale getirme amacı ile önemli araştırmalar ve çalışmalar yapılmaktadır (F. Cira, Arkan, and Gumus 2016).

Bu adımdaki en büyük zorluk, ölçülen arıza parametrelerinin boyut, güç, imalat tipi ve yük gibi makina detaylarına duyarlılığıdır. Bu nedenle, güvenilir bir arıza tespit ve sınıflandırma algoritması geliştirilmesi için, kapsamlı bir "sağlıklı" ve "arızalı" referans veri seti gereklidir (Ferhat Cira et al. 2016). Arıza tespit algoritmasının doğruluk oranı, onu geliştirmek için kullanılan referans veri setinin boyutu, genişliği ve kalitesiyle doğrudan ilişkilidir.

5.1. Model Tabanlı Yaklaşımlar

Belli arızaların makina çıkış akımı gibi parametreler üzerindeki etkisi, analitik veya sonlu elemanlar modelleme yaklaşımları kullanılarak öngörülebilmektedir (F. Filippetti et al. 1992; Fiser and Ferkolj 2001). Bu modeller, detaylı makina tasarım bilgileri mevcutsa, belirli bir makina için doğru arıza teşhisine izin verebilmektedir. Ancak belirli bir motor

için elde edilen sonuçların, genel arıza tespit eşiklerini ayarlamak için kullanılmasının zor olabileceği unutulmamalıdır.

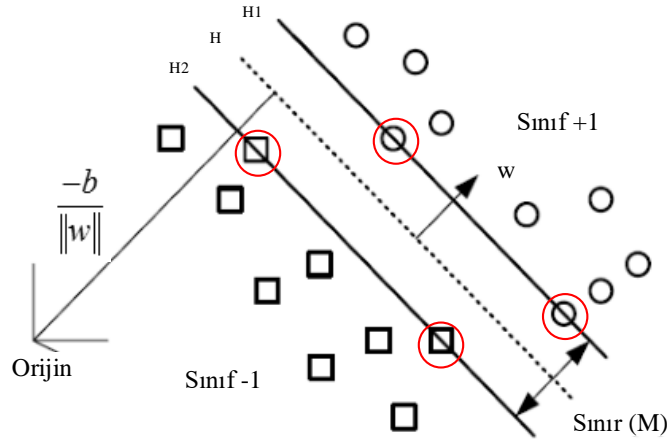
5.2. Arıza Eşikleri

En basit arıza tespit algoritması, belirli bir parametre için bir eşik kullanmaktır. Örneğin, makinanın ebatına bağlı olarak kabul edilebilir mekanik titreşim seviyelerini gösteren tablolar vardır (Martin 2003)[22]. Bir başka örnek, akım spektrumundaki kırık çubuk yan bantları için "kural" dir. Eğer bu yan bantlar, ana tepe genliğine göre -54 dB'den daha düşükse genliktelerse motorun sağlıklı olduğu, eğer -45 dB'den daha büyükse motor arızalı yada marjinal olduğu ortaya konmaktadır.

5.3. Çok Boyutlu Uzay Tekniği

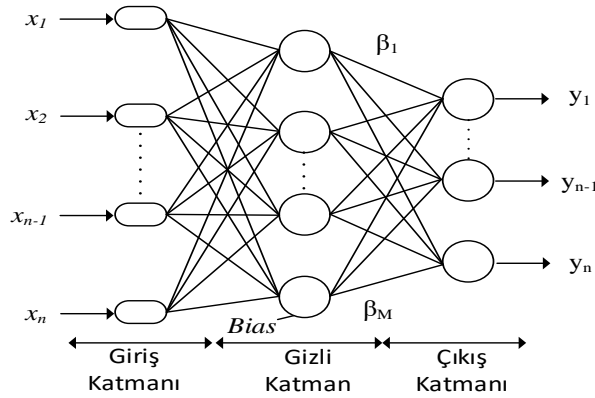
Çoklu arıza parametreleri, her arıza parametresini çok boyutlu bir uzayın bir boyutu olarak temsil ederek dikkate alınabilir. Belli bir parametre seti bu alandaki bir noktaya karşılık gelir. Sağlıklı ve arızalı çalışma noktaları, bu uzayın farklı bölgelerinde bulunur.

Destek vektör makinası sınıflandırma yaklaşımında arızalı veriden sağlıklı verileri ayıran (doğrusal olarak bir hiper-düzlem ile temsil edilen) parametrelerin doğrusal bir kombinasyonu bulunmaya çalışılır (Burges 1998).



Şekil 7. Sağlıklı ve arızalı makina verilerini ayırmak kullanılan destek vektör makinası sınıflandırma düzlemi
Figure 7. A hyperplan is chosen to separate the data for healthy and faulty machines

5.4. Yapay Sinir Ağları



Şekil 8. Yapay sinir ağlarının şematik gösterilişi
Figure 8. Schem of neural network

Yapay sinir ağları, insan beynindeki sinir bağlantıları ilham alınarak modellenmiştir. Her yapay nöron birkaç veriyi giriş olarak kabul eder, her bir girişe önceden ayarlanmış ağırlıklar uygulanır ve sonuca dayalı doğrusal olmayan bir çıktı üretir (Chow, Sharpe, and Hung 1993; Fiorenzo Filippetti et al. 2000). Nöronlar girişler ve çıkışlar arasındaki katmanlar halinde bağlanır.

Yapay sinir ağının eğitimi, sağlıklı ve arızalı olduğu bilinen makinalardan elde edilen parametrelerin seçilmiş veri seti ile beslenerek ve her durumda gerekli çıktıyı verecek şekilde nöronların giriş ağırlıklarının ayarlanmasıyla gerçekleştirilir.

6.1. Bulanık Mantık

Bu yöntem, sinyalleri tek bir eşige dayalı olarak basitçe sağlıklı veya arızalı olarak sınıflandırmaktan ziyade bir grup bant (bulanık değerler) halinde sınıflandırmaya dönük kararlar vermeye dayanır. Örneğin kırık çubuk yan bant genişliğine dayanarak bir motoru sağlıklı, marjinal veya arızalı olarak sınıflandırılabilir. Bulanık mantık, motorun sağlığı ile ilgili daha doğru bir karar vermek için farklı sinyallerdeki bulanık bilginin bir araya getirilmesini sağlar (Chow, Sharpe, and Hung 1993; Fiorenzo Filippetti et al. 2000).

6.2. Uzman Sistemler

Uzman sistemler, sonuçların çizilebileceği bir dizi kurallar tanımlayarak uzman bir insan bilgisini sunmaya çalışır. Bir kural örneği olarak: kırık çubuk yan bantları -45 dB'den büyükse ve akım Park vektörü tam olarak dairesel ise, muhtemelen kırık bir çubuk arızası mevcuttur (F. Filippetti et al. 1992; Styvaktakis, Bollen, and Gu 2001).

7. Gelecekteki Çalışmalar

7.1. Çoklu Sensörlerin Kullanımı

Mevcut araştırmaların büyük çoğunluğu, verilen bir arızayı saptamak için belirli bir sinyal işleme tekniği (örn., Frekans spektrumu) ile kombine edilmiş tek bir sensör tipi (örn., Motor akımı) kullanmıştır. Birden fazla sensörden ve işleme tekniklerinden gelen bilgilerin bir araya getirilerek, arıza tespitinin doğruluğunun geliştirilmesi

7.2. Çoklu Arızaların Tespiti ve Teşhisi

Makinalarda birden fazla arızanın tespiti ve teşhisi üzerine yapılan çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bir makine içerisinde birden fazla arıza türü varsa arıza sinyallerinin birbirine bağımlılıkları nedeniyle tespiti karmaşık olabilir. Burada çoklu sensör tipleri ve işleme teknikleri kullanılması da yararlı olabilir.

7.3. Değişken Yük Koşullarında Arıza Tespiti

Araştırmacılar genelde tam yükte çalışan makinaların arıza tespiti üzerine çalışmalar yapmaktadırlar, ancak uygulamada, makina test edildiğinde gerçek yük kontrol edilemez. Kısmi yük işletmesi, arıza sinyallerini önemli ölçüde değiştirebilir. Örneğin, akım spektrumunun kırık çubuk yan bantlarının makinanın yüklenmesine duyarlı olduğu gösterilmiştir (Palácios et al. 2016).

8. Sonuç

Durum izleme için doğru araçların kullanımı, asenkron motorların güvenilirliğini artırabilir ve bakım maliyetlerini düşürebilir. Durum izleme, sensör sinyallerinin örneklenmesini, bu sinyallerin arızaların varlığına duyarlı özelliklerin çıkartılması için işlenmesini, bir arızanın mevcut olup olmadığına karar verilmesini ve tipinin tanımlanmasını kapsar. Bu makalede, durum izleme üzerine yapılan araştırmalar hakkında bir genel bir inceleme yapılmış ve gelecekteki araştırmalar için kilit alanlar belirlenmiştir.

Kaynaklar

- Arthur, N., and J. Penman. 1998. "Condition Monitoring with Non-Linear Signal Processing." In *IEE Colloquium on Non-Linear Signal and Image Processing*, 1998:4–4. IEE. <https://doi.org/10.1049/ic:19980439>.
- Bellini, Alberto, Fiorenzo Filippetti, Giovanni Franceschini, Carla Tassoni, and Gerald B. Kliman. 2001. "Quantitative Evaluation of Induction Motor Broken Bars by Means of Electrical Signature Analysis." *IEEE Transactions on Industry Applications* 37 (5):1248–55. <https://doi.org/10.1109/28.952499>.
- Burges, CJC Christopher J C. 1998. "A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition." *Data Mining and Knowledge Discovery* 2 (2):121–67. <https://doi.org/10.1023/A:1009715923555>.
- Cabanas, M. F., F. Pedrayes, M. G. Melero, C. H. Rojas G. A. Orcajo, J. M. Cano, and J. G. Norriella. 2011. "Insulation Fault Diagnosis in High Voltage Power Transformers By Means of Leakage Flux Analysis." *Progress In Electromagnetics Research* 114 (January):211–34. <https://doi.org/10.2528/PIER11010302>.
- Chow, M.-Y., R.N. Sharpe, and J.C. Hung. 1993. "On the Application and Design of Artificial Neural Networks for Motor Fault Detection. II." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 40 (2):189–96. <https://doi.org/10.1109/41.222640>.
- Cira, F., M. Arkan, and B. Gumus. 2016. "Detection of Stator Winding Inter-Turn Short Circuit Faults in Permanent Magnet Synchronous Motors and Automatic Classification of Fault Severity via a Pattern Recognition System." *Journal of Electrical Engineering and Technology* 11 (2). <https://doi.org/10.5370/JEET.2016.11.2.416>.
- Cira, Ferhat, Muslum Arkan, Bilal Gumus, and Taner Goktas. 2016. "Analysis of Stator Inter-Turn Short-Circuit Fault Signatures for Inverter-Fed Permanent Magnet Synchronous Motors." In *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 1453–57. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793717>.
- Cruz, Sergio M A, and A. J. Marques Cardoso. 2001. "Stator Winding Fault Diagnosis in Three-Phase Synchronous and Asynchronous Motors, by the Extended Park's Vector Approach." *IEEE Transactions on Industry Applications* 37 (5):1227–33. <https://doi.org/10.1109/28.952496>.
- Donnell, P. O., C. Heising, C. Singh, and S. J. Wells. 1987. "Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations: Part 3." *IEEE Transactions on Industry Applications* IA-23 (1):153–58. <https://doi.org/10.1109/TIA.1987.4504880>.
- Dorrell, D.G., W.T. Thomson, and S. Roach. n.d. "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." In *IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting*, 1:563–70. IEEE. Accessed October 29, 2017. <https://doi.org/10.1109/IAS.1995.530349>.
- El, Mohamed, and Hachemi Benbouzid. 2000. "A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection." *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS* 47 (5).
- Filippetti, F., G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas. 2000. "Recent Developments of Induction Motor Drives Fault Diagnosis Using AI Techniques." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 47 (5):994–1004. <https://doi.org/10.1109/41.873207>.
- Filippetti, F., M. Martelli, G. Franceschini, and C. Tassoni. 1992. "Development of Expert System Knowledge Base to on-Line Diagnosis of Rotor Electrical Faults of Induction Motors." In *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 1992–Janua:92–99. <https://doi.org/10.1109/IAS.1992.244459>.
- Filippetti, Fiorenzo, Giovanni Franceschini, Carla Tassoni, and Peter Vas. 2000. "Recent Developments of Induction Motor Drives Fault Diagnosis Using AI Techniques." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 47 (5):994–1004. <https://doi.org/10.1109/41.873207>.
- Finley, W.R., M.M. Hodowanec, and W.G. Holter. 2000. "An Analytical Approach to Solving Motor

- Vibration Problems.” *IEEE Transactions on Industry Applications* 36 (5):217–32. <https://doi.org/10.1109/28.871297>.
- Fiser, R., and S. Ferkoj. 2001. “Application of a Finite Element Method to Predict Damaged Induction Motor Performance.” *IEEE Transactions on Magnetics* 37 (5):3635–39. <https://doi.org/10.1109/20.952679>.
- Gaeid, Khalaf Salloum, Hew Wooi Ping, Mustafa Khalid, and Lauy Salih. 2011. “Fault Diagnosis, Induction Motor, Unbalance Voltage, Broken Rotor Bar, MCSA, FFT, Vector Control; Fault Diagnosis, Induction Motor, Unbalance Voltage, Broken Rotor Bar, MCSA, FFT, Vector Control.” *Electrical and Electronic Engineering* 1 (2):85–92. <https://doi.org/10.5923/j.eee.20110102.14>.
- Haji, M., and H. Toliyat. 2001. “Pattern Recognition—A Technique for Induction Machines Rotor Broken Bar Detection.” *IEEE Power Engineering Review*. <https://doi.org/10.1109/MPER.2001.4311225>.
- Hatzipantelis, E., and J. Penman. 1993. “The Use of Hidden Markov Models for Condition Monitoring Electrical Machines.” In *Electrical Machines and Drives, 1993. Sixth International Conference on (Conf. Publ. No. 376)*, 91–96.
- Joksimovic, G.M., and J. Penman. 2000. “The Detection of Inter-Turn Short Circuits in the Stator Windings of Operating Motors.” *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 47 (5):1078–84. <https://doi.org/10.1109/41.873216>.
- Kim, K -H., B -G. Gu, and I -S. Jung. 2011. “Online Fault-Detecting Scheme of an Inverter-Fed Permanent Magnet Synchronous Motor under Stator Winding Shorted Turn and Inverter Switch Open.” *IET ELECTRIC POWER APPLICATIONS* 5 (6):529–39. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2010.0272>.
- Kliman, G. B., and J. Stein. 1992. “Methods of Motor Current Signature Analysis.” *Electric Machines and Power Systems* 20 (5):463–74. <https://doi.org/10.1080/07313569208909609>.
- Kliman, G.B., W.J. Premerlani, R.A. Koegl, and D. Hoeweler. 1996. “A New Approach to on-Line Turn Fault Detection in AC Motors.” *IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting* 1:687–93. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=557113>.
- Marques Cardoso, A. J., and E. S. Saraiva. 1992. “Predicting the Level of Air Gap Eccentricity in Operating Three-Phase Induction Motors, by Park’s Vector Approach.” In *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 1992–Janua:132–35. <https://doi.org/10.1109/IAS.1992.244454>.
- Martin, B. 2003. *Mechanical Signature Analysis*. Adelaide: School of Mechanical Engineering Lecture Notes.
- McCormick, a.C., and a.K. Nandi. 1998. “Cyclostationarity in Rotating Machine Vibrations.” *Mechanical Systems and Signal Processing* 12 (2):225–42. <https://doi.org/10.1006/mssp.1997.0148>.
- Nandi, S., H.A. Toliyat, and X. Li. 2005. “Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review.” *IEEE Transactions on Energy Conversion* 20 (4):719–29. <https://doi.org/10.1109/TEC.2005.847955>.
- Nandi, Subhasis, Shehab Ahmed, and Hamid A. Toliyat. 2001. “Detection of Rotor Slot and Other Eccentricity Related Harmonics in a Three Phase Induction Motor with Different Rotor Cages.” *IEEE Transactions on Energy Conversion* 16 (3):253–60. <https://doi.org/10.1109/60.937205>.
- Nandi, Subhasis, and Hamid A Toliyat. 1999. “Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines -A Review.” *{IEEE} Ind. Appl. Society Annual Meeting*.
- Palácios, Rodrigo H. Cunha, Ivan N. da Silva, Alessandro Goedel, and Wagner F. Godoy. 2016. “A Novel Multi-Agent Approach to Identify Faults in Line Connected Three-Phase Induction Motors.” *Applied Soft Computing* 45:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.04.018>.
- Payne, B, A Ball, and F Gu. 2002. “Detection and Diagnosis of Induction Motor Faults Using Statistical Measures.” *International Journal of COMADEM* 5 (2):5–19.
- Riley, Caryn M., Brian K. Lin, Thomas G. Habetier, and Gerald B. Kliman. 1999. “Stator Current Harmonics and Their Causal Vibrations: A Preliminary Investigation of Sensorless Vibration Monitoring Applications.” *IEEE Transactions on Industry Applications* 35 (1):94–99. <https://doi.org/10.1109/28.740850>.
- Schoen, R.R., and T.G. Habetler. 1995. “Effects of Time-Varying Loads on Rotor Fault Detection in Induction Machines.” *IEEE Transactions on Industry Applications* 31 (4):900–906. <https://doi.org/10.1109/28.395302>.
- Shi, Pu, Zheng Chen, Yuriy Vagapov, and Zoubir Zouaoui. 2014. “A New Diagnosis of Broken Rotor Bar Fault Extent in Three Phase Squirrel Cage Induction Motor.” *Mechanical Systems and Signal Processing* 42 (1):388–403. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2013.09.002>.
- Stavrou, Andreas, Howard G. Sedding, and James Penman. 2001. “Current Monitoring for Detecting Inter-Turn Short Circuits in Induction Motors.” *IEEE Transactions on Energy Conversion* 16 (1):32–37. <https://doi.org/10.1109/60.911400>.
- Stone, G., and J. Kapler. 1998. “Stator Winding Monitoring.” *IEEE Industry Applications Magazine* 4 (5):15–20. <https://doi.org/10.1109/2943.715501>.

- Styvaktakis, E., M.H.J. Bollen, and I.Y.H. Gu. 2001. "Expert System for Voltage Dip Classification and Analysis." In *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)*, 671–76 vol.1. <https://doi.org/10.1109/PESS.2001.970122>.
- Thomson, W.T. 1994. "On-Line Current Monitoring to Detect Electrical and Mechanical Faults in Three-Phase Induction Motor Drives." In *International Conference on Life Management of Power Plants*, 1994:66–73. IEE. <https://doi.org/10.1049/cp:19941096>.
- Thomson, W.T., and M. Fenger. 2001. "Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults." *IEEE Industry Applications Magazine* 7 (4):26–34. <https://doi.org/10.1109/2943.930988>.
- Thorsen, Olav Vaag, and Magnus Dalva. 1999. "Failure Identification and Analysis for High-Voltage Induction Motors in the Petrochemical Industry." *IEEE Transactions on Industry Applications* 35 (4):810–18. <https://doi.org/10.1109/28.777188>.
- Trutt, F.C., J. Sottile, and J.L. Kohler. 2002. "Online Condition Monitoring of Induction Motors." *IEEE Transactions on Industry Applications* 38 (6):1627–32. <https://doi.org/10.1109/TIA.2002.804758>.
- Trutt, Frederick C., Joseph Sottile, and Jeffery L. Kohler. 2002. "Online Condition Monitoring of Induction Motors." *IEEE Transactions on Industry Applications* 38 (6):1627–32. <https://doi.org/10.1109/TIA.2002.804758>.
- Trzynadlowski, Andrzej M., and Ewen Ritchie. 2000. "Comparative Investigation of Diagnostic Media for Induction Motors: A Case of Rotor Cage Faults." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 47 (5):1092–99. <https://doi.org/10.1109/41.873218>.
- Vas, Peter. 1993. *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*. Oxford: Clarendon Press.
- Wieser, Rudolf, Christian Kral, Franz Pirker, and Matthias Schagginger. 1999. "On-Line Rotor Cage Monitoring of Inverter-Fed Induction Machines by Means of an Improved Method." *IEEE Transactions on Power Electronics* 14 (5):858–65. <https://doi.org/10.1109/63.788482>.
- Wu, Qing, and Subhasis Nandi. 2010. "Fast Single-Turn Sensitive Stator Interturn Fault Detection of Induction Machines Based on Positive- and Negative-Sequence Third Harmonic Components of Line Currents." In *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46:974–83. <https://doi.org/10.1109/TIA.2010.2045329>.
- Yazici, Birsan, and Gerald B. Kliman. 1999. "An Adaptive Statistical Time-Frequency Method for Detection of Broken Bars and Bearing Faults in Motors Using Stator Current." *IEEE Transactions on Industry Applications* 35 (2):442–52. <https://doi.org/10.1109/28.753640>.