

ASENKRON ELEKTRİK MAKİNALARINDA SÜRÜCÜ DEVRELERE BAĞLI RULMAN ARIZALARININ OLUŞUMU

Zeki AKÇALI

Serhat ŞEKER

R. Nejat TUNÇAY

Elektrik Mühendisliği Bölümü

Elektrik-Elektronik Fakültesi

İstanbul Teknik Üniversitesi, 80626, Maslak, İstanbul

akcali@elk.itu.edu.tr

seker@elk.itu.edu.tr

tuncay@elk.itu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Rulman, Ortak Uç Gerilimi, Rulman Elektriksel Modeli, Sürücüler, Kapasitif Değişimler

ÖZET

Bu çalışmada endüstrinin itici gücü olarak en çok kullanılan makine tipi olan asenkron elektrik makinelerinde rulman arızaları ile arızaların oluşum mekanizmaları incelenmiştir. Ayrıca rulmanların sürücü devre kaynaklı elektriksel boşalmalar neticesinde bozulmaları ve rulman-motor ikilisinin elektriksel modelleride verilmiştir. Bu kapsamda asenkron motor gücüne bağlı olarak kapasitif elemanların değerlerinin değişimleri gösterilerek motor ve rulmanın birleşik elektriksel modeli tanımlanmıştır. Son kısımda ise rulman arızalarının asgari seviyeye indirerek asenkron makinelerin bakım periyotlarını uzatmaya yönelik alınması gerekli tedbirler tavsiye edilmiştir.

I. GİRİŞ

Her ölçekli sanayi kolunda üretimin planlanan bakım ve onarım dönemleri dışında beklenmedik zamanlarda tamamen ya da kısmen durması işletmelerin büyük bakım ve onarım maliyetleri altına girmesine sebep olmakta ve sorunların ivedilikle çözülmesini gerektirmektedir.

Bu sebepledir ki son yıllarda sanayinin itici gücü durumundaki asenkron elektrik makinelerinde ömür tayini ile bakım öngörüsü büyük önem kazanmıştır. Bu yöndeki çalışmalar gerek elektrik makinelerinin bakımlarının bir düzene oturtulması, gerekse elektriki, mekaniki veya kimyevi proseslerin aksaması sebebiyle üretim kayıplarının engellenmesi yönünde ilgi çeken bir konu haline gelmiştir.

Sanayide yapılan araştırmalarda saptanan elektrik makineleri arızalarının %50'sini rulmanlar ve yağ dengersizliklerinden kaynaklanan arızalar olduğu bulunmuştur [1-3]. Bu nedenle konuyla ilgili literatür ve sanayideki çalışma ile araştırmaların çoğunluğu, rulman arızalarının ve kaynaklarının bulunmasına yönelik olmuştur. Buna paralel olarak yeni birçok

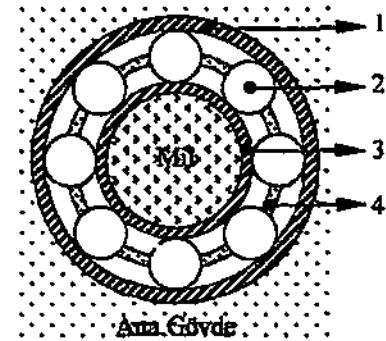
çalışmada ise rulman arızalarının mekaniki olduğu kadar, kullanılan sürücülerden kaynaklanan elektriki problemler olduğu gözlemlenmiştir [4-13].

II. RULMANLARIN GENEL YAPISI ve RULMAN ARIZALARININ OLUŞUMU

A. Rulmanların Genel Yapısı

Genel olarak rulmanlar mekanik yatakları bir alt sınıfı olup bir makinede birbirine göre farklı hızlarda dönme hareketi yapan parçaların olduğu yerlerde kullanılırlar. Dönme hareketi yapan kısımların arasındaki sürtünme kuvvetini en aza indirmek veya ortadan kaldırmak rulmanların kullanılmasında temel amaçtır. Genel olarak rulmanlar iç ve dış halka ile yuvarlanan elemanlar ve bu elemanları tutan bir kafesten oluşurlar.

Yuvarlanan elemanlar itibari ile de yuvarlak, küresel, silindirik veya iğne gibi değişik tiplerde rulmanlar mevcuttur. Burada konumuz gereği ve genel bir bilgilendirme mahiyetinde küresel yuvarlanma elemanlı rulmanlar ele alınacaktır. Şekil 1'de bu tip bir rulmanın genel yapısı verilmiştir.



Şekil 1. Bir Rulmanın genel yapısı (1-dış bilezik, 2-yuvarlanma elemanları, 3-iç bilezik, 4-kafes)

Rulmanların genellikle iki tarafı koruyucu kapaklarla kapatılmış olup içi elektriksel olarak iletken olmayan bir gresle doldurulmuştur. Dönme hareketi başlamadan evvel iç bilezik taşmakta olduğu yükü yuvarlanma elemanları vasıtası ile dış bileziğe ve dolayısıyla ana gövdeye aktarır. Bu durumda bütün elemanlar birbirlerine temas etmektedir.

Hareketin başlaması ve dönen elemanın genel olarak anma hızının %10'una çıkması ile süz konusu temas kaybolur ve elemanlar arasında 0,1 ile 2 μm kalınlığında bir gres film tabakası oluşur [14]. Bu halde bilezikler ile yuvarlanan elemanlar arasındaki sürtünme kuvveti minimum düzeye düşmüş bulunmaktadır.

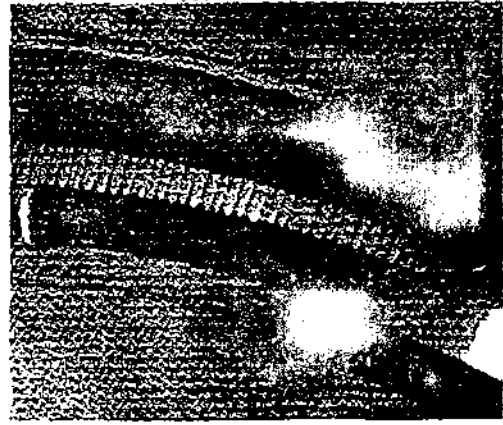
B. Rulman Arızalarının Oluşumu

Bu dönme hareketi esnasında elektromagnetik, elektrostatik, rotor üzerindeki gerilimler ile sargılardaki ve hava aralığındaki magnetik dengesizliklerden dolayı "şaft gerilimleri" oluşur [15,16]. Bu gerilimler yüksek hızlardaki dönme esnasında yağ delinme gerilimi olan eşik gerilimine ulaşırlarsa, yağ tabakasını delip kıvılcımlar halinde elektriksel atlamalara sebep olurlar [9,10]. Bu tip atlamalara "boşalma modu"nda atlamalar da denir. Alçak hızlarda ise bu gerilimler temas halinde bulunan rulman bileşenleri üzerinden "iletim modu"nda akımların akmasına sebep olur.

Böylece rulmanlar üzerinden akan akımlar her ne kaynaklı olursa olsun iki değişik moda meydana gelir. İletim modunda oluşan endüktif akımlar rulman içerisinde bir süreklilik gösterdiğinden, diğerine nazaran rulmanda kısa bir zaman diliminde ortaya çıkabilecek bir arızaya sebep olmamaktadır. Bir başka kaynakta ise hareket halinde olmayan rulmanlardan yüksek akımların bileziklere hiç zarar vermeden aktığı rapor edilmiştir [17]. Ancak iletim modunun aksine boşalma modundaki kapasitif akımlar ise rastlantısal boşalmalar halinde gerçekleşir. Şaft gerilimi ne kadar büyük ise akan akımın değeri de o kadar büyük olmaktadır.

Bu atlamalar zaman içerisinde rulman bileziklerinin yapısal şekillerinde gözle görülmür düzeyde bozulma ve aşınmalar oluşturur. Yüksek rulman akımları her seferinde atlama noktasını belli bir derecede eriterek mikron düzeyinde parçacıklar kopartır. Zaman içerisinde de yağ tabakasındaki bu delinmeler yağın özelliklerinin bozulmasına ve yağlama işlevini yerine getirememesine sebep olur [18].

Bu bozukluklar sonucu yuvarlanma elemanları ile bilezikler arasındaki yağ filmi kalınlığı çevre boyunca bir dalgalılık ve pürüzlülük gösterir. Böylece rulmandaki yıpranma, makine için belirlenen titreşim, gürültü ve boşluk gibi toleranslar kabul edilemeyecek seviyeye gelinceye -kısaca rulman bozuluncaya- kadar hızlanarak büyüyen bir trend içerisinde artar. Boşalma modunda akan akımların oluşturduğu tipik bir dış bilezik eskimesi Şekil 2'de gösterilmiştir [19].



Şekil.2 Boşalma modunda akan akımların oluşturduğu tipik rulman eskimesi

III. RULMAN İLE MOTORUN ELEKTRİKSEL MODELLERİ

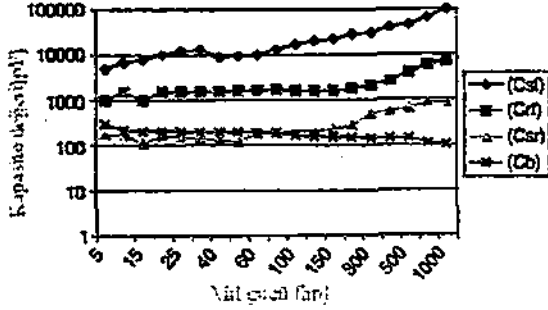
Rulmanların değişik hızlarda ve yük durumlarındaki halleri için bir kaç değişik model ortaya atılmıştır [7,11]. Her ne kadar belli noktalarda birbirlerinden farklılık gösterse de genel olarak modeller inceleme bakımından düşük ve yüksek hızlarda olmak üzere iki şekilde kurulabilir.

İlk modelde rotor çok yavaş döndüğünden yuvarlanma elemanı ve bilezikler arasında yaklaşık 10^{-10}m kalınlığında bir yağ filmi bulunmakta ve bu temas noktasındaki direnç 0.5Ω 'dan küçük değerler almaktadır [7]. Bu sebeple düşük hızlarda rulmanlar en basit şekilde bir direnç ile modellenebilir.

Daha önce belirtildiği üzere hız artmasıyla yuvarlanma elemanları ile bilezikler arasında düşük hızlardakine nazaran oldukça kalın (0,1-2 μm) bir yağ filmi oluşur. Böylece düşük hızlardaki omik karakterdeki temas ortadan kalkar. Zaten elektriksel olarak yalıtılan bir özellik taşıyan yağ ile (yağ bir dielektrik malzeme olarak düşünülürse) yuvarlanan elemanlar ve bilezikler kapasitif bir eleman (C_b) oluştururlar. Genel bir fikir vermesi açısından mineral bazlı greslerin yaklaşık 10^6V/m mertebesinde bir delinme gerilimine sahip olduğu ve tipik bir yağ filminin 0,2 μm kalınlığında olduğu kabul edilirse, bu kapasitif elemanın dayanma ya da eşik gerilimi (V_m) 0,4V olarak bulunabilir [7].

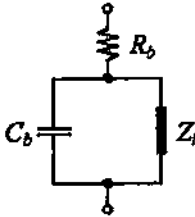
Asenkron motor modelinde rulman kapasitesi (C_b) hariçinde üç tane daha kapasite elemanı bulunmaktadır. Bunlardan stator-gövde arasındaki kapasitif eleman (C_{σ}), stator iletkenleri ile gövde arasında bulunan hava aralığı çevresi ve boyunca dağıtılmış kapasitelerin bir eşdeğeridir. Yine aynı şekilde hava aralığı çevresi ve boyunca dağıtılmış olan stator-rotor (C_{σ}) ve rotor-gövde (C_{σ}) kapasitif elemanlarının da eşdeğerleri modelde yer almaktadır. Bu üç eşdeğer eleman ile rulman modelinde yer alan rulman kapasitesinin makinenin anma gücüne göre değişimleri Şekil 3'te verilmiştir [20]. Genel olarak

modellerde C_{sf} yalnız başma kullanılabilir olsa da sürücü devrelerin bulunduğu durumlarda oluşan yüksek dV/dt oranları diğer kapasitif elemanlarda modele dahil edilmesini gerekli kılmaktadır.



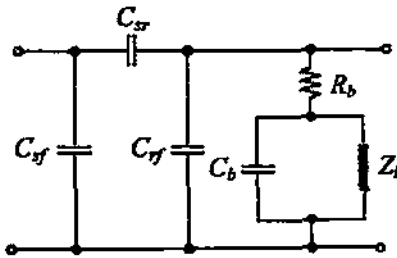
Şekil.3 Asenkron motor gücüne bağlı olarak kapasitif elemanların değerlerinin değişimi

Genel olarak bir rulman modeli, kapasitif, omik ve lineer olmayan bir empedans (Z_l) kullanılarak en basit biçimde üç eleman ile Şekil 4'teki gibi kurulabilir [8]. Rulman modelinde kullanılan direnç (R_b), iç ve dış bilezik iç dirençleri ile, "n" tane paralel yuvarlanma elemanının iç dirençlerinin eşdeğerinin seri toplamı olarak tanımlanabilir.



Şekil.4 Bir rulmanın en genel elektriksel modeli

Bu bilgiler ışığında gerçekçi bir elektriksel model olarak asenkron motor ve rulman modelleri Şekil 5'teki gibi birleştirilebilir [8].



Şekil.5 Motor ve rulmanın birleştirilmiş elektriksel modeli

IV. SÜRÜCÜ DEVRE KAYNAKLI BOŞALMALAR

Yakın zamandaki çalışmalar göstermiştir ki 1920'de Alger'in belirttiği magnetik asimetriyle oluşan shaft gerilimleri ile kaynağı sürücü sistemler olan shaft gerilimleri birbirlerinden farklıdır [21]. Rulman teknolojisindeki ilerlemeler ışığında, rulman ömrünün uzatılabilmesi için yuvarlanma elemanları optimum hidrodinamik formlarda tasarlanmıştır. Ancak sürücü devrelerin elektrik makinaları ile birlikte sıklıkla kullanıldığı günümüzde, en iyi performans için optimize edilmiş rulmanlarda dahi hiç beklenmeyen arızalar ortaya çıkmıştır.

Yine aynı çalışmalar yuvarlanma elemanlarının hidrodinamik tasarımlarının shaft gerilimlerinin oluşmasına sebep olacak bir mekanizmaya sahip olduğu ve sonucunda da boşalma akımlarına yol açtığı görülmüştür [8]. Boşalma akımlarının darbe genişlik modülasyonlu sürücü devreler ile oluşabilmesi için shaft gerilimlerinin (V_{sp}) oluşması, stator ile rotor arasında kapasitif bir eleman (C_r) bulunması ve rulman kapasitesinin (C_b) üzerinde yeterli miktarda gerilimin birikmesi gereklidir.

Herhangi tipik bir eviricide yük uçları bazen hiç istenmediği halde anahtarların frekansından ve anahtar karakteristiklerinden dolayı aynı anda eş potansiyele çekilmekte ve sargılar üzerinde toprağa nazaran gerilimler oluşmaktadır. Bu gerilimlere ortak uç gerilimleri ve dolayısıyla oluşturacağı akımlara da ortak uç akımları denir. Bu gerilimlerin oluşma sebebi genellikle sargıların toprakla arasında bulunan ve hava aralığı çevresi ve boyunca dağılmış olan kapasitenin yüklenmesi sonucudur.

Bu yüklenme yüksek potansiyeldeki doğru gerilim barasına bağlı anahtarların yeteri kadar kısa bir süre de olsa aynı anda iletimde kalmaları sayılmaktadır. Örnek olarak, herhangi bir ateşleme serisinden sonra pozitif baraya bağlı anahtarların aynı anda belli bir süre iletimde kaldıklarını varsayalım. Bu süre zarfında asenkron makinenin herhangi bir fazının iki ucu da eş potansiyele çıkacak ve toprağa karşı belli bir gerilim değerine ulaşacaktır. Bu gerilim değeri zaman içerisinde her iki anahtar da devrede olduğu sürece kapasite elemanlarını yükleyecek ve yağ filminin eşik gerilimi aşıldığında da ortak uç akımı (rulman akımı) olarak rulman üzerinden toprağa enerji akacaktır [11].

İletime girme ve kesime girme süreleri uzun ve birbirleri arasında farklılık gösteren anahtarların bulunduğu ve taşıyıcı frekansı belli limitlerin üzerinde olan sürücülerin sürdüğü makinalarda ortak uç geriliminin delinme geriliminin üstüne çıkması daha sık olmaktadır. Bu ise doğal olarak rulmanların ömürlerini kısaltmakta ve makina güvenilirliğini de azaltmaktadır.

Kapasite elemanlarının yüklenerek, yağın delinme dayanımı üzerine ulaşacak gerilim değerlerine çıkma sıklığı yukarıda belirtilenlerin haricinde başka birçok

parametreye bağlıdır. Bu parametreler makinanın yüklenmesi, hızlampa yavaşlaması, doğru gerilim barasının ve sürücü devrenin kararlılığı sayılabilir. İşte bu sebeptendir ki rulman akımları bir çok parametrenin etkisi altında rastlantısal bir şekilde boşalmakta ve yine rulman bilezikleri çevresinde belli aralıklardan ziyade rastlantısal şekilde bütün yüzeyde tahribat oluşturmaktadır. Ayrıca zamanla tahribattan dolayı oluşan oyuklara yuvarlanma elemanlarının "düşmesi" sonucu bu oyuklar boşalmalar ile daha da derinleşmekte ve elektrik makinası mekanik olarak daha fazla tehlikeye maruz kalmaktadır.

V. RULMAN AKIMLARININ ÖNLENMESİNE YÖNELİK ALINMASI GEREKLİ TEDBİRLER

IEEE Standart 112'ye göre test edilmiş motorlarda 300mV'u aşan şaft gerilimlerinin oluşturduğu rulman akımlarının rulman bileziklerinde oyuklar oluşturarak eskimesine ve hatta bozulmasına yol açtığı gözlemlenmiştir [22]. Şaft gerilimi 300mV'u aşan durumlarda makinanın rulmanlarına zarar gelmemesi için rulmanlardan en az biri kapasitif karakterli dolaşım akımlarını engellemek amacıyla yalıtılmalıdır.

Bu yalıtma işleminde yalıtılması gereken rulman yükün bağlanmadığı mil ucu olmalıdır. Böylece sürülen yük dolaşım akımları için akım yolu teşkil etmez. Ancak pratikte iki rulmanın birden yalıtılması tercih edilmelidir. Bu tip bir rulman yalıtma işlemi NEMA ve IEC standartlarına göre gövde numarası sırasıyla 504 ve 315'ten büyük makinalar için yapılmalıdır [19,22,23]. Bununla beraber, şaft topraklama bileziklerinin elektrik makinası, dişli kutusu ve takogeneratör ile yük millerine bağlanması da rulman akımlarının en düşük seviyelerde tutulmasına yardımcı olacaktır.

Ayrıca sürücü devrenin taşıyıcı frekansını 800-3500 Hz arasında seçmek (bu aralıktaki düşük frekanslarda rulman içindeki modelde bulunan kapasitelerin çok yüksek empedans göstermesinden dolayı) statordan rotora enerji transferi en düşük seviyeye indirecektir [19,23]. Böylece taşıyıcı frekansının azaltılmasına bağlı olarak motor performansının düşmesine rağmen şaft gerilimleri ile oluşan rulman akımlarındaki boşalma sayısı azaltılmış olur. Ayrıca sürücü devrenin yıldız noktası uygun değerlikli bir filtre kullanılarak doğru gerilim barasının "0" (sıfır) noktaya bağlanması gereklidir. Bu suretle şaft gerilimlerinden dolayı akabilecek akımlar için motor ve rulmanlar yerine düşük empedanslı bir yol temin edilmiş olur.

Bu tedbirlerin yanı sıra motor gövdesi, yüksek frekanslı akımların gövdeden toprağa kolayca akmasını sağlayacak şekilde topraklanmalı ve her motor için standartlarda belirtilen enerji kabloları ile bağlama elemanları kullanılmalıdır. Bu önlemlerin yanı sıra sürücüler ile motorlar mümkün olan en kısa kablo ile birbirlerine bağlanmalıdır.

Bu makalede sanayinin itici gücü olarak çalışan asenkron motorlardaki sürücü devrelere bağlı oluşan rulman arızaları gözden geçirilmiştir. Rulman arızaları, sebepleri, elektriksel modeller en basit şekli ile sunulmuştur. Ayrıca rulmanlardaki arızaların oluşma mekanizması ile sürücü devrelerin bu mekanizmaya nasıl etki ettiği de anlatılmıştır.

Sürücü devre elemanlarının karakteristik özellikleri ile makina, rulmanlar ve sürülen yükün etkileşimi somucunda sürekli değişen parametrelere bağlı olarak boşalma akımlarının düzenli periyotlardan çok niçin rastlantısal olduğu da aydınlatılmıştır.

En son bölümde ise sanayide pratik bir şekilde rulman ömürlerini uzatmak için nasıl bir yol izlenmesi ve ne çeşit tedbirlerin alınması gerektiği anlatılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] R. Schoen, T.G. Habetler, F. Kamran, R.G. Burtheld, "Motor Bearing Damage Detection Using Sator Current Monitoring", 1994 IEEE Industrial Application Meeting 1994, v.1, pp.110-116.
- [2] S.V. Bowers, K.R. Piety, "Proactive Motor Monitoring Through Temperature Shaft Current and Magnetic Flux Measurements", CSI 1993 Users Conference, September 20-24, pp.2-3.
- [3] S. Şeker, B.P. Upadhyaya, A.S. Erbay, J.P. McClanahan, A.A. DaSilva, "Rotating Machinery Monitoring and Degradation Trending Using Wavelet Transforms", MARCON '98 Maintenance and Reliability Conference, Knoxville, TN, 12-14 May 1998, v.1, pp.23.01-23.11.
- [4] F. Punga, W. Hess, "Bearing Currents", Elektrotech Maschinen, August 1907, v.25, pp.615-618.
- [5] J. Boyd, H.N. Kaufman, "The Cause and Control of Electrical Currents in Bearings", Lubrication Engineering, January 1958, pp.28-35.
- [6] L. Kerszenbaum, "Shaft Currents in Electrical Machines Fed by Solid State Drives", Proc. IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference 1992, pp.71-79.
- [7] J.M. Erdman, R.J. Keakman, D.W. Schelegel, G.L. Skibinski, "Effect of PWM Inverters on AC Motor Bearing Currents and Shaft Voltages", Proc. IEEE 10th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC '95), Dallas, TX, 1995, v.1, pp.24-33.
- [8] D.F. Busse, J.M. Erdman, R.J. Kerkman, D.W. Schlegel, G.L. Skibinski, "The Effects of PWM Voltage Source Inverters on the Mechanical Performance of Rolling Bearings", IEEE Trans. on Industrial Applications, March/April 1997, v.33, n.2, pp.567-576.

- S.P. Verma, R.S. Gilgis, R.J. Fleming, "The Problems and Failures Caused by Shaft Potentials and Bearing Currents in Turbogenerators", Int. Conf. On Large High Voltage Electric System, CIGRE Session, 1980, paper 11-10.
- 1) J. Boyd, H.N. Kaufman, "The Conduction of Current in Bearings", ASLE Trans. , October 1958, pp.67-77.
 - 1] S. Chen, T.A. Lipo, D. Fitzgerald, "Source of Induction Motor Bearing Currents Caused by PWM Inverters", IEEE Trans. on Energy Conversion, March 1997, v.11, n.1, pp.25-32.
 - 2] S. Chen, T.A. Lipo, D. Fitzgerald, "Modeling of Motor Bearing Current in PWM Inverter Drives", IEEE Trans. on Industrial Applications, November/December 1996, v.32, n.6, pp.1365-1370.
 - 3] S. Chen, T.A. Lipo, D.W. Novotny, "Circulating Type Motor Bearing Current in Inverter Drives", Conference Record IEEE-IAS Annual Meeting, 1996, v.1, pp.162-167.
 - 4] A. Binder, A. Schrepfer, "Bearing Currents in Induction Machines due to Inverter Supply", ICEM '98, International Conference on Electrical Machines, September 2-4 1998, Istanbul, v.1, pp.586-591.
 - 5] M.J. Costello, "Shaft Voltages and Rotating Machinery", IEEE Trans. on Industrial Applications, March/April 1993, v.29, n.2, pp.419-425.
 - [16] Z. Krzemieni, "Bearing Current in Induction Motors Supplied with Power from PWM Inverters", ICEM '98, International Conference on Electrical Machines, September 2-4 1998, Istanbul, v.1, pp.592-596.
 - [17] S. Andreason, "Passage of Electrical Currents thru Rolling Bearings", SKF Gothenburg.
 - [18] S. Şeker, E. Ayaz, E. Türkcan, A.S. Erbay, "Dalgacık Analizi Tekniği ile Elektrik Makinalarında Hızlandırılmış Eskimeye Bağlı Rulman Arıza Tanısı", SİU'99, Sinyal İşleme Uygulamaları, 1999, Bilkent, Ankara.
 - [19] D. MacDonald, W. Gray, "PWM Drive Related Bearing Failures", IEEE Industry Applications Magazine, July/August 1999, pp.41-47.
 - [20] D.F. Busse, J.M. Erdman, R.J. Kerkman, D.W. Schlegel, G.L. Skibinski, "Bearing Current and Their Relationship to PWM Drives", IEEE Trans. on Power Electronics, March 1997, v.12, n.2, pp.243-252.
 - [21] P. Alger, H. Samson, "Shaft Currents in Electric Machines", presented at the A.I.R.E. Conference in Philadelphia, PA, February 1924.
 - [22] NEMA Standards Publication No. MG 1-1993, Motors and Generators
 - [23] P.J. Link, "Minimizing Electric Bearing Currents in ASD Systems", IEEE Industry Applications Magazine, July/August 1999, pp.55-66.