



Deniz Araçlarında Kullanılan Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor ve Sürücülerinde Kayıpların Azaltılması

Fuat Kılıç¹, Feriha Erfan Kuyumcu²

¹Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, fuat.kilic1@kocaeli.edu.tr

²Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, erfan@kocaeli.edu.tr

Özet

Bu çalışmada deniz araçlarında elektrikle tahrik, sürekli mıknatıslı senkron makineler kullanımına dair bilgiler verilmekte ve yük karakteristikleri bakımından inceleme yapılmaktadır. Bununla birlikte sürekli mıknatıslı senkron motorlarda kayıpları oluşturan konular ele alınmaktadır. Makine kayıplarını azaltmada kullanılan amper başına maksimum moment ve kayıp minimizasyon algoritmaları benzeşim sonuçları karşılaştırılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Verimlilik, Enerji Tasarrufu, Kayıplar, Bakır kayıpları, Rotor kayıpları, SMSM, Deniz araçları.

The Losses Reduction of Permanent Magnet Synchronous Motor and Their Drives Used in Sea Vehicles

Abstract

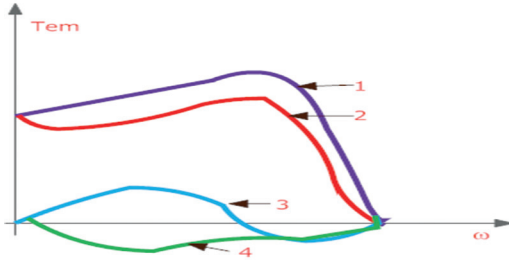
In this study is given information related to sea vehicles electrical propulsion systems, permanent magnet synchronous machine and their load characteristics are examined. Furthermore, permanent magnet synchronous machine losses issues are handled. Simulation results of maximum torque per ampere and loss minimization control algorithms that are used to reduce losses are compared.

Keywords: Efficiency, Energy saving, Losses, Copper losses, Rotor losses, PMSM, Sea vehicles.

1. Giriş

Elektrikle tahrik sistemleri, günümüzde pek çok alanda artan bir ivme ile uygulamalarda yerini almaktadır. Elektrikle tahrik sistemlerinin kullanıldığı etkin alanlardan birisi de gemilerde, ana pervane tahrik sistemleridir ve bu sistemlerin dizel makinelerle tahrik sistemlerine göre önemli üstünlükleri bulunmaktadır. Bunlar arasında emniyet, enerji tasarrufu, daha az bakım maliyetleri, titreşim, gürültü, emisyon ve geniş hız aralıklarında istenilen momenti elde etme sayılabilir.

Gemiler için kullanılan elektrikli tahrik sistemleri, doğrudan geminin ana pervanelerini sürdüğü sistemlerdir. Tahrik sistemlerigenellikle pervane, motor, generatör, ana makine ve kontrol koşullandırıcıları ve diğer parçalardan oluşur. Elektrikli tahrik, daha düşük gürültü seviyesi, iyi hareket kabiliyeti ve esneklik sağlar. Güç elektroniği teknolojisinin ve manyetik malzeme teknolojisinin gelişmesi ile elektrikle tahrik sistemlerinde sürekli mıknatıslı senkron motorlar daha çok kullanılmaya başlanmıştır. Sürekli mıknatıslı senkron motorlar, klasik tip motorlarla karşılaştırıldığında yüksek güç yoğunluğu, moment yoğunluğu, verimlilik, güç faktörü ve diğer özellikleri bakımından elektrikle tahrik sistemlerinde öncü olmaya



Şekil 1. SMSM Moment Grafiği

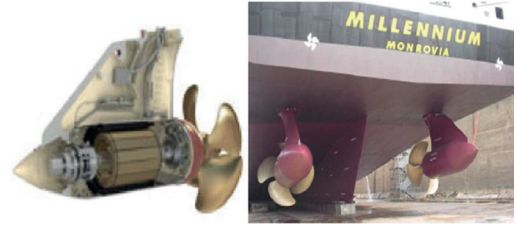
devam etmektedirler.

Sürekli mıknatıslı senkron motorları, asenkron motorlar ve elektrik uyarımlı senkron makinelerden ayıran özelliklerden bir tanesi kalkış koşullarıdır. Senkron motorlar, sürekli çalışma koşulları altında ortalama elektromagnetik moment koşullarını sağlarlar. Başlangıç durumu, motor durma konumundan belli bir açığa kilitlenme işlemi ile gerçekleştirilir. Senkronizasyon işleminin gerçekleştirilebilmesi için stator sargılarına

belli bir enerjinin verilerek rotorun belirli kutupların altına çekilmesi sağlanır. Bu durumda ortalama elektromagnetik moment sifıra denk gelir. Klasik sargı ile uyarılan senkron motorlar, başarılı ve güvenli bir başlangıç sağlamak için ve asenkron motor çalışmaprensibiile hareketebaşlatıldıklarında akım sınırlama kademeleri devrededir ve sonrasında senkronizasyon gerçekleştiğinde uyarma işlemi başlatılır. Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda(SMSM) uyarma işlemi ayarlanabilir olmadığından tüm çalışma koşulları altında belli bir uyarma gerçekleşir. Bu sebepten dolayı SMSM'lerin başlangıç koşulları asenkron motor ve elektrik uyarımlı senkron makinelerden daha karmaşıktır. Sürekli mıknatıslardan dolayı sabit bir magnetik alan ve stator akımları tarafından üretilen döner magnetik alan asenkron başlangıç şartlarını oluştururlar [1].

2. Gemilerin Pervane Yük Karakteristikleri

Şekilde görülen moment-hız grafiğine göre sırası ile asenkron moment, birleşik veya sentez moment, relüktans momenti ve generatör fren momentinden oluşur. Asenkron moment, alternatif akım sargıları tarafından üretilen momenttir. Birleşik moment ise süperpozisyon teorisi göz önüne alındığında alternatif akım sargıları tarafından



üretilen moment ve onun oluşturduğu hava aralığında oluşturulan harmonik içerikleri ile rotor mıknatıslarının oluşturduğu momentin bileşkesinden meydana gelir ve harmonik içeriklere sahiptir. Relüktans momenti ise, rotorunda çıkıntılı etkisi gösteren mıknatıs malzemelerden dolayı meydana gelen momenttir. Generatör fren momenti rotor ve stator alanı tarafından oluşturulan magnetik alandır.

Geminin sudaki itme gücü pervanesinin

dönmesi ile elde edilir. Dönme yönü gemi ile aynı yönde ise ileri yönde, dönme yönü gemi yönü ile ters yönde ise geri yönde hareket gerçekleşir yani negatif itme gücü açığa çıkar. Pervanenin direnç momenti, pervanenin dönüş yönünün tersinedir, bu nedenle oluşan direnci yenmek için tahrik motoru veya makinesi uygun moment değerini sağlamalıdır ve ω hızında dönen bir pervane hareketi oluşturmak için P itme gücünü üretmelidir. Pervane çalışma prensibine göre, itme gücü ve moment aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$P = K_p \rho \omega^2 D_p^4$$

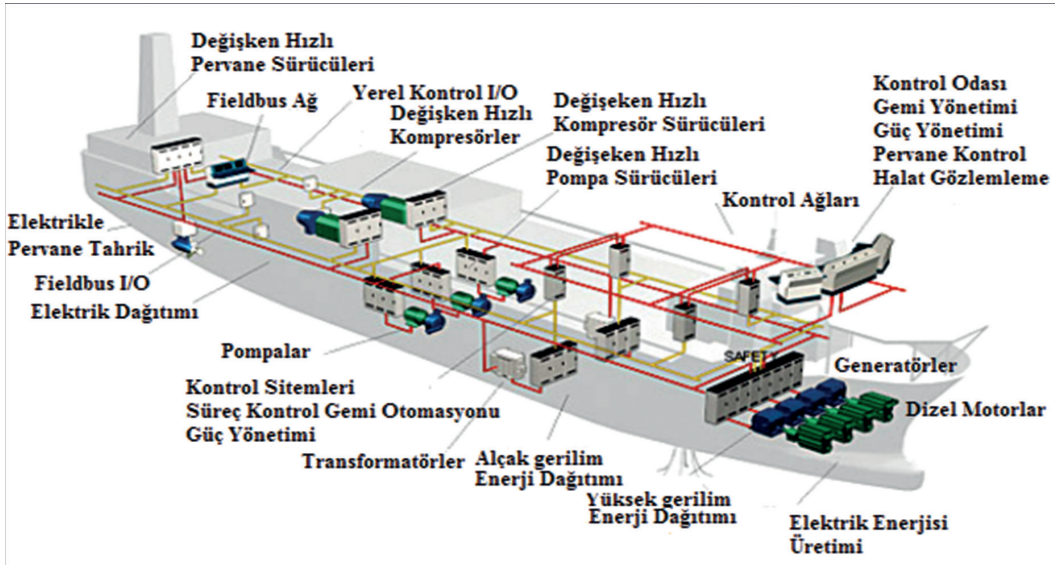
$$T = K_t \rho \omega^2 D_p^5$$

Burada sırası ile ρ, ω, D_p deniz suyu yoğunluğu, pervane hızı ve pervane çapıdır. K_p, K_t ise itme gücü sabiti ve moment sabitleridir. Bu tip sistemlerde üç tip karakteristik hareket vardır bunlar serbest seyir, halat veya demirleme ve ters karakteristiklerden oluşur. Serbest seyir karakteristiği, geminin herhangi bir dış güç sınırlaması olmaksızın durağan sudaki tam yük ve sürekli durum davranışına ulaştığında, pervane direnç momenti, hız veya güç ile hız arasındaki ilişkiyi ifade eder. Bu karakteristiğe göre, moment yaklaşık olarak pervane hızının karesi ile orantılıdır [2].

3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinelerde Verimlilik ve Kayıp Azaltma Yöntemleri

Yüksek verimli elektrik makinelerinin üretimi, enerji tasarrufu ve çevreyi koruma amaçlı olarak Türkiye ve birçok ülkede teşvik edilmekte ve bu teşvik, yasalarla da desteklenmektedir. Bu yazıda sürekli mıknatıslı makinelerin ve sürücülerinin kayıplarının azaltılması verimliliklerinin artırılması kapsamında genel bir inceleme yapılmakta ve geleneksel vektör kontrol, amper başına maksimum moment ve kayıp minimizasyon algoritmalarının benzeşim sonuçları karşılaştırılmaktadır. Literatürde ve uygulamada kayıplar ve verimlilik ile ilgili başlıklar genel olarak güç faktörü, harmonik etkileri, yarı iletken kayıpları, evirici yapıları, darbe genişlik modülasyonu yöntemleri, elektromanyetik ve akustik gürültü, rotor kayıpları, vuruş momenti etkisi (cogging torque), hız ve moment dalgalanması olarak sıralanır. Literatürde kullanılan tanımları hatırlamak konuyu kavramak açısından önemlidir.

Harmonikler, sistem temel dalga şekli frekansının tam veya tam sayı olmayan katlardaki frekanslardan oluşan dalga şekilleridir ve temel olarak zaman ve uzay harmonikleri olarak ikiye ayrılırlar. Zaman harmonikleri stator akımlarının etkisi ile uzay harmonikleri ise stator sargıları

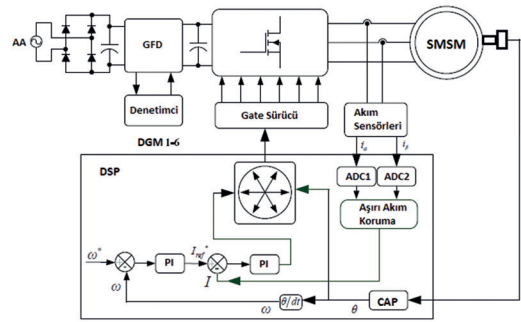


Şekil 2. Gemi Genel Elektrik ve Elektrikle Tahrik Sistemleri [ABB Marine]

manyeto motor kuvvetinin ve rotor sabit mıknatıslarında üretilen harmoniklerin etkileşiminin sonucu ortaya çıkarlar. Zaman harmonikleri rotorda girdap akımlarını endüklerler. Bu dalga şekilleri temel dalga şekline eklenir, sonuç olarak temel dalga şekli bozulur ve sistemde istenmeyen etkiler oluşturarak kayıplara ayrıca hız ve moment dalgalanmasına neden olurlar. Harmonikler, toplam harmonik bozulma ile ifade edilirler. Toplam harmonik bozulma (THB), harmonik bileşenlerin etkin değerleri toplamının temel dalgaya oranı olarak tanımlanır. Güç faktörü (GF) bir sistemden çekilen aktif gücün reaktif güce oranı olarak tanımlanır. Saf sinüs dalga şeklinin bulunduğu durumda temel güç faktörü elde edilir. Akım ve gerilim harmoniklerin etkisinde ise güç faktörü temel güç faktöründen daha küçük olur.

Histerisiz kaybı, manyetik malzemelerde zamanla değişen akının her yön değiştirmesinde manyetik alanın yön değiştirmesinde enerjinin dağılmasından dolayı oluşur. Girdap akımları, elektromanyetik endüksiyondan dolayı malzemedeki manyetik akının değişimiyle bu malzemede sirkülasyon akımları oluşur. Vuruntu momenti (Cogging Torque), sürekli mıknatıslardan kaynaklanan EMK harmonikleri ile statordaki oluklardan kaynaklanan manyetik iletkenlik harmoniklerinin etkileşiminden ortaya çıkar. Bu moment bileşeni, SM motorlarda ortaya çıkan doğal bir özelliktir ve rotor yüzeyine ya da içine monte edilen mıknatıslarla stator olukları arasındaki etkileşimin ortaya çıkardığı bir bileşendir [7].

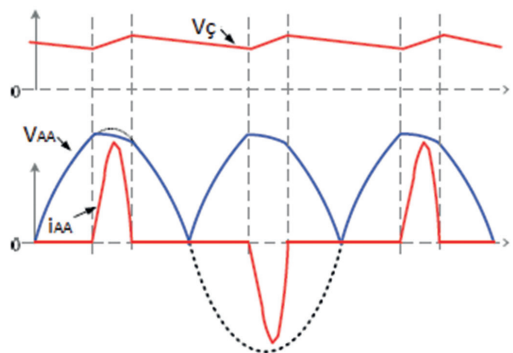
Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM) moment akım oranı, yüksek güç ağırlık oranı, yüksek verimlilik, yüksek güç faktörü düşük gürültü ve dayanıklılık açısından oldukça gündemde olan makinelerdir. Güç elektroniği ve SMSM karakteristiklerinin birleştirilmesiyle SMSM' lar değişken hızlı alternatif akım sürücülerinde giderek daha çok yaygınlaşmaktadırlar. SMSM sürücülerinde akım ara devreli ve gerilim ara devreli eviriciler yaygın olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda kayıpları azaltmak, sürücü ve makine verimini arttırmak için çok seviyeli eviriciler üzerine oldukça yoğun çalışmalar yapılmaktadır [1].



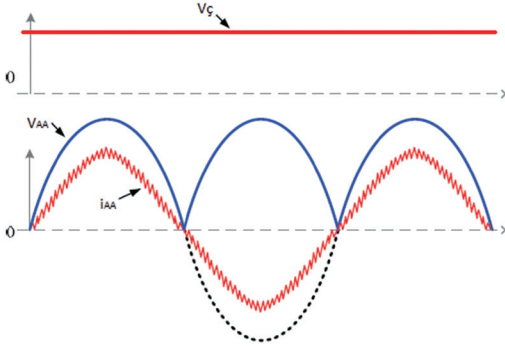
Şekil 3. SMSM Sürücü Devresi

3.1. Güç Faktörü

SMSM' lerde yüksek giriş harmonikleri, güç diyotları ve eviricilerin anahtarlamasından dolayı oluşur. Sürücü girişinde elektrik enerjisi AA-DA şekline dönüştürülür, ancak bu durum düşük güç faktörü ve akım harmoniklerine neden olur. Genellikle sürücüler, DA barasının kararlılığı için büyük değerli kondansatörlere ihtiyaç duyarlar fakat bu kondansatörler akımın bozulmasına neden olurlar. Bu durumda güç faktörü düzeltme yöntemi giriş akım harmoniklerini azaltmak, verimliliği ve motor sürücü kapasitesini arttırmak için iyi bir aday olarak karşımıza çıkar. LC tipi ve π tipi filtreler güç faktörünü düzeltmek için kullanılırlar fakat büyük bobin ve kondansatör boyutları karşımıza bir sorun olarak çıkar. Güç faktörü düzeltme yöntemlerinden bir tanesi de aktif güç faktörü düzeltmedir. Bu yöntemde alçak geçiren filtre devresi (AGFD), doğrultucu ve DA barası arasına konulan enerji depolama elemanı, anahtar ve kontrol modülünden oluşur [6].



Şekil 4. a) Diyot Çıkışlı DA Bara Gerilimi



Şekil 4. b) Güç Faktörü Düzeltilmiş DA Bara Gerilimi Değişimleri

3.2. Zaman Harmonikleri

Gerilim ara devreli eviriciler, makinenin hızını ve akısını kontrol etmek için bir DA kaynağından değişken frekans ve gerilim üretirler. Bu frekans ve gerilimi elde etmek için kullanılan modülasyon teknikleri çıkış sinyallerinde harmoniklerin istenmeyen etkilerinin oluşmasına neden olurlar, sonuç olarak sistem performansı azalır. Evirici performansı, DGM tekniği, iletim ve anahtarlama kayıpları, çıkış akımı dalgacıkları ve DA barası akım dalgacıkları ile doğrudan bağlantılıdır [4].

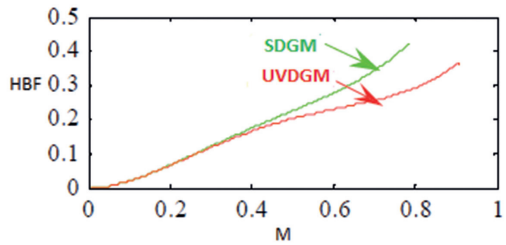
DGM taşıyıcı dalga frekansından dolayı oluşan motorlardaki harmonik kayıplarının çoğu evirici anahtarlama frekansının artırılmasıyla azaltılabilir fakat aynı zamanda evirici anahtarlama kayıpları artar. Bu yüzden sistemin genel optimizasyonunu sağlamak, harmonik kayıpları ve anahtarlama kayıplarını azaltmak için optimum frekans değeri belirlenmelidir [9].

Modülasyon stratejileri, bazı sınırlamaları ve harmonik içeriğinin, güç kayıplarının en aza indirilmesi, gürültünün azaltılması ve uygulama kolaylığı gibi ek fonksiyon gereksinimlerini de sağlamak zorundadırlar. Modülasyon teknikleri çok çeşitli yollarla sınıflandırılırlar. Bir sınıflandırma yöntemi de modülasyon tipi, taşıyıcı dalga frekansı ve örnekleme frekanslarına göre. Modülasyon tipleri, sinüsoidal DGM, uzay vektör DGM, histerisiz DGM ve diğerleri taşıyıcı dalga tipleri, sabit, rastgele ve senkron dalga şekilleri ve diğerleri, örnekleme ise doğal, simetrik, asimetrik ve diğerleri olarak sayılabilir.

DGM Modülasyonu, sürekli DGM ve süreksiz DGM olarak ikiye ayrılır. Modülasyon teknikleri, temel frekansı ve harmonikleri içeren çıkış sinyalleri oluştururlar. Harmonik içeriklerinin analizindeki ana sorun, temel dalga periyodu ve taşıyıcı dalga periyotlarının dikkate alınmak zorunda olmasıdır.

Alternatif akım sürücü uygulamalarında modülasyon metodu; çevirici, evirici ve makinede kayıplar oluşturduğundan, sinyalin(işaret) dalga şeklinin kalitesini azalttığından, ilave gürültü ve titreşimlere neden olduğundan büyük öneme sahiptir. En çok bilinen DGM(Darbe genişlik modülasyonu) ve anahtarlama frekansının seçimi dönüştürücüler (rectifier, inverter), makine kayıpları, harmonik etkileri ve uygulama sorunlarında etkilidir [1].

Modülasyon çeşitlerinin karşılaştırmalı sonuçları yüksüz ve tam yük durumları için güç faktörü ve toplam harmonik bozulması düşük hızlar ve nominal hızlarda incelendiğinde, sabit band histerisiz DGM'nin en yüksek güç faktörüne sahip olduğu, karışık band histerisiz DGM ve sinüsoidal DGM'nin düşük hızlarda yüksüz ve tam yüklü durumda en yüksek güç faktörüne sahip olduğu ve Uzay vektör DGM'nin nominal hız yüklü durumda en düşük Toplam Harmonik Bozulmaya (THB) sahip olduğu ve sabit band histerisiz DGM' nin nominal hız ve yüksüz durumda ayrıca düşük hız ve yüklü durumda en düşük THB' ye sahip olduğu kaydedilmiştir [2].



Şekil 5. Modülasyon Katsayısı ile Sinüsoidal Dgm ve Uzay Vektör DGM Arasındaki Harmonik Bozulma Faktörü[4]

3.3. Bakır Kayıpları

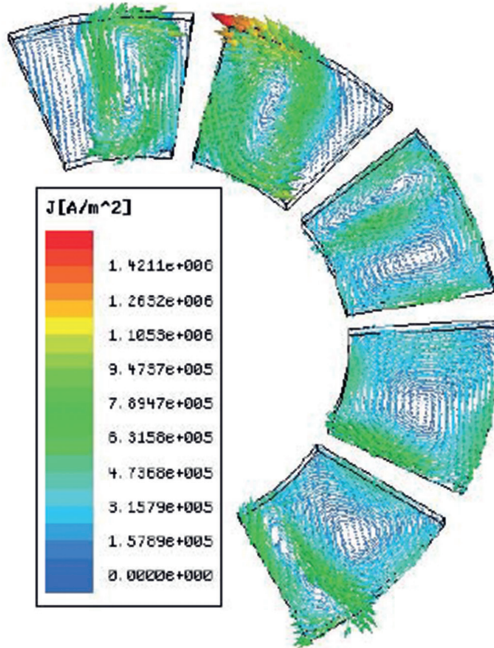
Modülasyon işleminde meydana gelen harmonik içerikleri sistemde ek kayıplar meydana getirirler. Bunlar makine, doğrultucu ve evirici kayıpları olarak incelenebilir. Makinedeki meydana gelen kayıplar temel

olarak demir ve bakır kayıplarıdır. Bakır kayıpları, eşdeğer devredeki direnç tarafından oluşturulan bakır kayıpları nominal bakır kayıpları ve harmonik bakır kayıpları olarak ikiye ayrılır.

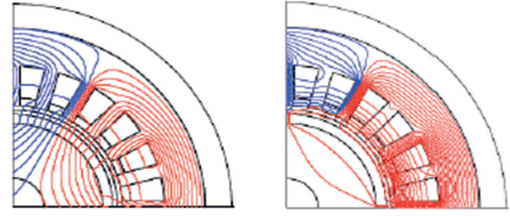
Bakır kayıpları hesaplanırken nominal akımın temel dalga şeklinin etkin değeri ve harmonik içeriklerinin etkin değeri dikkate alınır. SMSM' nin eşdeğer devre direnci yaklaşık olarak stator sargı direncine eşittir. Harmonik bakır kayıplarını elde edebilmek için harmonik akımlarının bilinmesi zorunludur. SMSM'nin eşdeğer devresi saf endüktif olarak veya filtre gibi düşünülebilir ve bu yüzden harmonik akımlar filtrelenmiş gerilim harmoniklerinden bulunabilir.

3.4. Rotor Kayıpları

Gömülü mıknatıslı motorlar genellikle kayıpların en az olduğu motorlar olarak bilinirler. Çünkü, rotor hava aralığındaki ana harmonik bileşeni ile senkronizedir fakat senkronize olmamış harmonik alanların varlığından dolayı rotor demir yapısında kayıplar meydana gelir. Rotor kayıpları, diğer kayıplarla karşılaştırıldığında az olmasına rağmen, rotorda ısı dönüşümünün iyi olmamasından dolayı mıknatıs özelliğinin



Şekil 6. a) Girdap Akımları Etkileri



Şekil 6. b) 1500 ve 15000 Hz' de Girdap Akımları

bozulmasına neden olur.

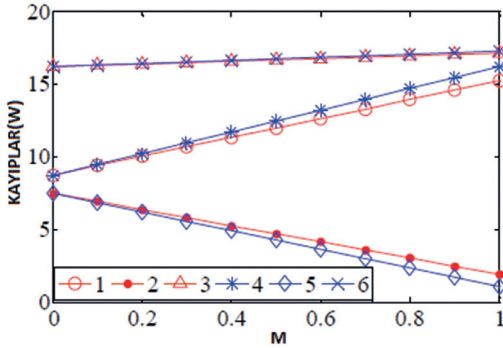
SMSM' de rotor kayıpları aşırı ısıya neden olarak makinenin nominal momentinin düşmesine ve toplam verimliliğin azalmasına neden olurlar. Manyetik malzemede ki çekirdek kayıpları bu malzemelerin zamanla değişken manyetik akı yoğunluğuna maruz kalmasından kaynaklanır. Bu kayıplar, histerisiz ve girdap (fuko) akımları kayıpları olarak sınıflandırılırlar. Histerisiz kayıpları frekans ve manyetik akı yoğunluğu karesi ile orantılı iken girdap akımları frekansın karesi ve manyetik akı yoğunluğunun karesi ile orantılıdır [11].

3.5. Anahtarlama Kayıpları

Dönüştürücü kayıpları ise iletim kayıpları ve anahtarlama kayıpları olarak karşımıza tanımlanmaktadır. İletim kayıpları hesabında yarı iletkenin iletim anındaki direnci ve üzerindeki gerilim düşümü dikkate alınır. Yarı iletken direnci ve gerilim düşümü karakteristiği ısı ile değişir. Özet olarak bir yarı iletken iletim kaybı direnç, üzerindeki gerilim düşümü, ortalama ve etkin akım değerine bağlı olarak değişir. Bu akımlar modülasyon katsayısı ve yük açısı ile değişir. Anahtarlama kayıpları anahtarlama frekansı, DA bara gerilimi ve akıma bağlı iken iletim kayıpları modülasyon fonksiyonu ve akıma bağlıdır.[9] IGBT'lerde anahtarlama kayıpları kollektör-emiter gerilimi ve kollektör akımı yardımıyla hesaplanabilir. Fakat bu metod farklı IGBT çeşitleri ve anahtarlama tiplerinden dolayı kesin bir metod değildir. Daha güçlü ve etkili bir metod, yarıiletken anahtarlama enerjilerinden kayıpların bulunmasıdır [4].

Anahtarlama kaybı hesapları, yarı iletkenin durumunu değiştirirken kullandığı enerji vasıtasıyla yapılır. Bir yarı iletken iletime girme enerjisi ve iletimden çıkma enerjisine ihtiyaç duyar. Kullanılan elemana göre bu

enerjiler farklılık gösterir. IGBT için iletme girme ve çıkma enerjileri dikkate alınırken bir diyot için yalnızca iletimden çıkarken ters toparlanma etkisi dikkate alınır [1].



Şekil 7. Sinüsoidal DGM için 1. IGBT, 2. Diyot, 3. Toplam Kayıplar; Uzak Vektör DGM için 4. IGBT 5. Diyot 6. Toplam Kayıplar

3.6. Akustik ve Elektromagnetik Gürültü

SMSM'lerde elektromanyetik gürültü, DGM anahtarlama frekanslarının katları sonucu ortaya çıkan akım harmoniklerinin oluşturduğu etkilerdir, istenmeyen bir sonuç olmakla birlikte insan yaşamı çevresinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Elektromanyetik gürültünün azaltılması modülasyon tipine bağlı olarak değişir. Elektrik makinelerinde akustik gürültünün üç temel kaynağı vardır. Bunlar aerodinamik, mekanik ve elektromanyettir. Vuruntu momenti, moment dalgalanması ve manyetik radyal kuvvetler elektromagnetik gürültü kaynaklarıdır [12]. SMSM'lerde akustik gürültünün ana parçası, elektromanyetik güç tarafından oluşturulan elektromanyetik gürültüdür. Düşük frekanslı elektromanyetik gürültü, uygun kutup ve boşlukların bir araya getirilmesi, dişlerin azaltılması gibi stator ve rotorun optimal tasarımı ile azaltılabilir. Yüksek frekanslı elektromanyetik gürültüleri motorun optimal tasarımıyla azaltmak zordur ve bu tip gürültüler DGM anahtarlama frekansı ile ilgilidir. Elektromanyetik gürültüleri azaltmak için periyodik taşıyıcı dalga frekans modülasyonu ve rastgele taşıyıcı dalga frekans modülasyonu önerilmektedir [3]. Gürültü ve titreşimleri azaltmak için tasarımı çok fazlı motor yapısı, kesirli oluk yapısı, stator diş genişliği optimizasyonu dikkate alınabilir [10].

SMSM'de ana moment bileşenleri karşılıklı moment, relüktans momenti ve vuruntu momentidir. Yüzey mıknatıslı makinelerde d eksen ve q eksen arasında reaktans farkı olmadığından hesaplamalarda dikkate alınmaz [15].

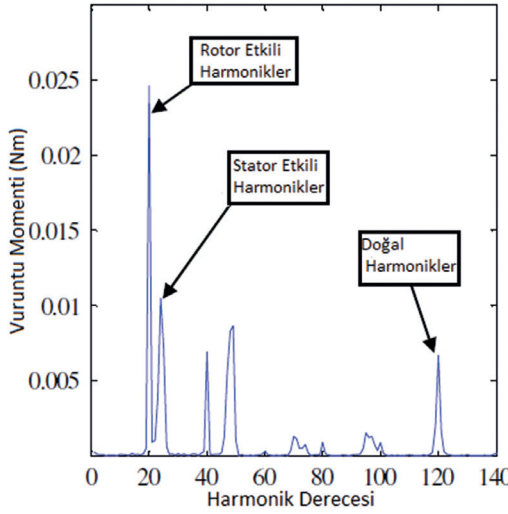
3.7. Moment Dalgalanması

Çıkış momentinde karşılıklı momentin içinde bulunan zıt EMK harmonikleri ile ilgili moment dalgalanması azaltılarak geliştirilir [15]. SMSM'lerde moment dalgalanmasının ana nedenleri stator manyeto motor kuvveti ve manyetik alan harmonik dağılımıdır. Moment dalgalanmasının diğer sebepleri arasında vuruntu momenti, sabit mıknatıslardaki manyetik doymadan dolayı manyetik iletkenliğin değişimi, uzay harmonikleri, zaman harmonikleri ve motorda istenmeyen şekil bozuklukları sayılabilir. Yüksek hızlarda moment dalgalanması sistem ataletinden dolayı ihmal edilebilir fakat düşük hızlarda moment dalgalanması titreşim ve gürültüye neden olabilir. Moment dalgacıkları, vuruntu momenti ve moment komütasyon bileşenlerini içerir [10].

3.8. Vuruntu Momenti

Sabit mıknatıslı makinelerde yüksüz koşullardaki moment (cogging torque), rotor sabit mıknatısları ile stator olukları arasındaki etkileşimden dolayı meydana gelir. Motor çalışma durumunda istenmeyen bir bileşen olarak ortaya çıkar. Stator dişlerini belli açı ile yerleştirme (skewing) ve rotor mıknatıslarını belli açı ile yerleştirme vuruntu momentini azaltabilir, fakat bu durum motorun konstrüksiyon karmaşıklığını ve komütasyon moment dalgalanmasını arttırabilir. Bu işlem kaçak akıları arttırabilir ve çıkış momentini azaltabilir. Bir diğer vuruntu momenti kompanzasyonu tipleri ise stator dişlerinin çentiklenmesi ve stator veya rotor diş eşleşmesidir [14]. Bu çentiklerin optimal sayısı ve şekli sayısal ve analitik metodlarla belirlenir.

Moment dalgalanması ve vuruntu momenti iki ayrı başlık altında incelenir. Sabit mıknatıslı motorlarda düşük moment dalgalanması motorun düzgün çalışmasını sağlar ve daha az titreşim veya gürültü olmasını garanti etmez.

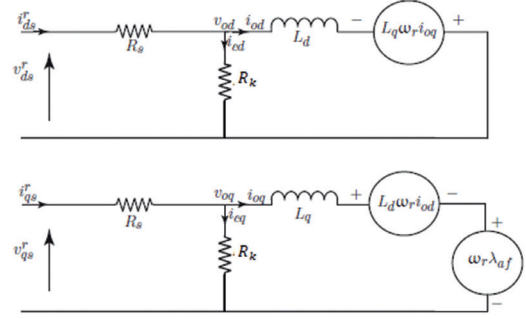


Şekil 8. Vuruntu Momenti Harmonikleri

4. Verimlilik Optimizasyonu ve Enerji Tasarrufu

Verimlilik optimizasyonu, değişken hızlı makinelerin yüksek verimliliğini sağlama amacına hizmet eder. Kayıpları minimize etmek için kullanılan kontrol stratejileri

analiz de uygun bir yöntem olmakla beraber gerçek zamanlı uygulamalarda parametrelere bağlı ve hesaplama karmaşıklığı fazladır. Arama kontrolü algoritmaları bulanık mantık, genetik algoritmalar ve yapay sinir ağları gibi yöntemler olabilir [13].



Şekil 9. Çekirdek Kayıp Dirençlerini de İçeren SMSM Eşdeğer Devre Modeli

Çekirdek kayıplarını için SMSM eşdeğer modeli durum uzayı şeklinde yukarıdaki şekilde ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & \omega_r L_d (1 + \frac{R_s}{R_c}) \\ -\omega_r L_q (1 + \frac{R_s}{R_c}) & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0q} \\ i_{0d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_r \lambda_m (1 + \frac{R_s}{R_c}) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_q & 0 \\ 0 & L_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{0q}}{dt} \\ \frac{di_{0d}}{dt} \end{bmatrix}$$

$$i_d = i_{0d} + i_{cd}$$

$$i_q = i_{0q} + i_{cq}$$

$$i_{cd} = \frac{-\omega_r L_q i_{0q}}{R_c}$$

$$i_{cq} = \frac{\omega_r (L_q i_{0q} + \lambda_m)}{R_c}$$

iki ana sınıfa ayrılır. Bunlar kayıpları içeren makine modeli ve arama kontrolü algoritmalarıdır. Kayıpları içeren makine modeli, motor enerji kayıplarını hesaplamaya izin verirken araştırma kontrol algoritması maksimum verimlilik çalışma noktasını arama temeline dayanır. İkinci yöntemin avantajı makinenin matematiksel modeline ihtiyaç duymamasıdır. Temel dezavantajı ise, DA bara üzerinde sürücünün soğurduğu gücü ölçmek için akım gerilim sensörü gibi karmaşıklığı ve maliyeti arttıran ilave araçlara ihtiyaç duymasıdır [8]. Birinci metod, teorik

Çekirdek kayıpları,

$$P_{ir} = \frac{3\omega_r^2 (L_q i_{0q})^2}{2R_c} + \frac{3\omega_r^2 (\lambda_m + L_d i_{0d})^2}{2R_c} = \frac{1.5}{R_c} \omega_r^2 \lambda_m^2 = R_c (i_{cd}^2 + i_{cq}^2)$$

ve bakır kayıpları,

$$P_{cu} = \frac{3}{2} R_s (i_{0q}^2 + i_{0d}^2)$$

olarak elde edilir. Mekanik güç, elektriksel kayıplar ve mekanik kayıpların toplanması

sonucu giriş gücü aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P = T_m \omega_r$$

$$P_e = P_{cu} + P_{ir}$$

$$P_t = P_e + P_m$$

SMSM verimi aşağıdaki denklemle elde edilebilir.

$$\eta = \frac{P}{P + P_t} \cdot \%100$$

4.1. Smsm'nin Kayıp Kontrol Yöntemleri

4.1.1. id=0 Kontrol

d Ekseni kontrol yöntemi endüstride en çok kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde d eksen referans akım girişi sürekli sıfırda tutularak kontrol gerçekleştirilir. Bu sebepten dolayı kontrol basitleştirilir. Moment ve akım arasındaki bağıntı doğrusal hale getirilir. Bu durum id=0 yönteminin ana avantajıdır. Bu şekilde DA motoruna benzer bir kontrol yapısı gerçekleştirilir.

$$T_e = \frac{3}{2} P i_{sq} \lambda_m$$

4.1.2. Amper Başına Maksimum Moment(MTPA)

Bu yöntemde stator akımını minimize etme metodu da denir. Buradaki amaç moment referansına göre en büyük momenti elde etmek için akımın minimize edilmesidir. Sabit bir momentte stator akımının minimum noktası hiperbol eğrisine en yakın uzaklık olarak belirlenir.

$$T = \frac{3}{2} P (\lambda_m i_{sq} - L_q i_{sd} i_{sq} + L_d i_{sd} i_{sq})$$

Yukarıdaki eşitlikte mil momenti denklemi iki parçaya ayrılmaktadır. İlk kısım mıknatıs momenti ikinci kısım ise endüktans farkından oluşan relüktans momentidir. Yüzey mıknatıslı makinelerde endüktans farkının minimum olmasından dolayı relüktans momenti önemsiz hale gelir. Stator akımı d ve q eksen bileşenlerine ayrılırsa,

$$I_d = I_s \cos \delta$$

$$I_q = I_s \sin \delta$$

elde edilir. Burada δ stator akımı ve rotor referans çerçevesi arasındaki yük açısıdır. Mil momenti denklemi,

$$T = \frac{3}{2} P (\lambda_m i_s \sin \delta - \frac{(L_d - L_q)}{2} i_s \cos \delta)$$

olarak yazılabilir. Bundan sonraki amaç moment denklemi yük açısına göre türevlenip sıfıra eşitlenirse minimum noktası elde edilir.

$$\frac{dT}{d\delta} = \frac{3}{2} P \lambda_m i_s \sin \delta + \frac{3}{2} P (L_d - L_q) i_s^2 \cos 2\delta = 0$$

Gerekli düzenlemeler yapılırsa, d eksen referans denklemi,

$$i_{d-ABMM} = \frac{\lambda_m - \sqrt{\lambda_m^2 + 8(L_d - L_q)^2 |i_s|^2}}{4(L_d - L_q)}$$

elde edilir. Bu durumda akım kısıtlaması aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$i_{q-ABMM} = \sqrt{i_s^2 - i_{sd}^2}$$

Bu kontrol metodu alan zayıflatma bölgesinde moment dalgalılığı bölgesinde verimsiz hale gelir. Bu durumda akım minimize edilmez. Alan zayıflatma bölgesinde gerilim yükselir ve sınır değerlere ulaşır.

4.1.3. Kayıp Minimizasyon Kontrolü(LMC)

Mekanik kayıplar kontrol edilemez fakat elektriksel kayıplar akım vektörü yoluyla kontrol edilebilir. Kayıp minimizasyon kontrol yönteminde elektriksel kayıplar optimal kayıp yöntemiyle minimize edilirse verimlilik maksimum olur. Toplam kayıplar, akım vektörü yoluyla türevlenirse,

$$\frac{\partial P_t}{\partial i_{od}} = 0$$

$$\frac{\partial P_{ir}}{\partial i_{od}} = - \frac{\partial P_{cu}}{\partial i_{oq}}$$

Yukarıdaki denklemde minimum toplam kayıp çekirdek kayıpları değişiminin bakır kaybı değişimine eşit olduğu noktada meydana gelir. Kayıpların minimizasyonu için analitik yolla oluşturulan eğri denklemi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$Ai_{0d}^2 + Bi_{0d} + Ci_{0q}^2 + D = 0$$

Burada,

$$A = (L_d - L_q)[R_s + \frac{\omega^2 L_d^2}{R_c^2}(R_s + R_c)]$$

$$B = \lambda_m R_s + (2L_d - L_q) \frac{\omega^2 L_q^2}{R_c^2}(R_s + R_c)$$

$$C = -(L_d - L_q)[R_s + \frac{\omega^2 L_q^2}{R_c^2}(R_s + R_c)]$$

$$D = \frac{\omega^2 L_d \lambda_m^2}{R_c^2}(R_s + R_c)$$

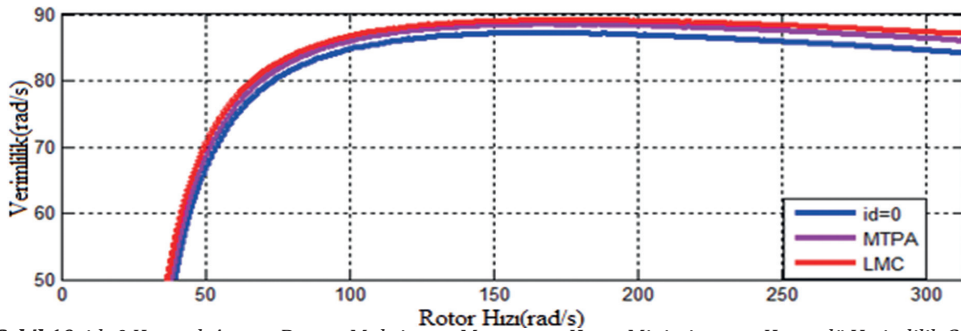
Sonuç olarak karesel referans vektörü,

$$i_{0d} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4A(Ci_{0q}^2 + D)}}{2A}$$

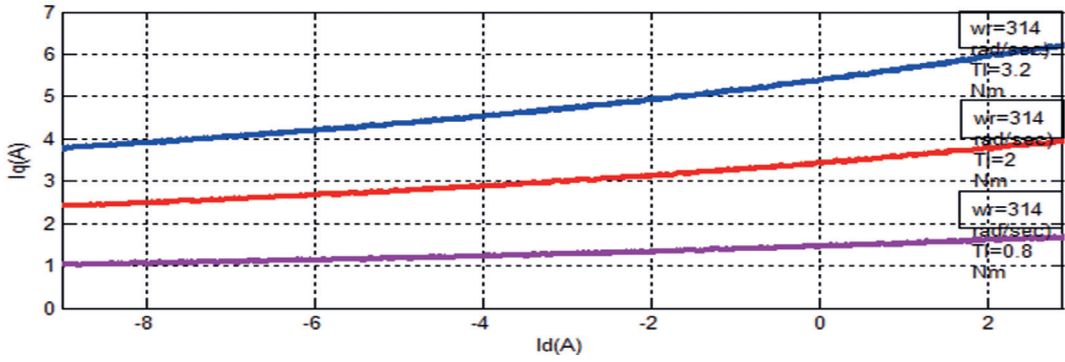
olarak elde edilir.

SMSM Parametreleri	
Güç(W)	1000
Stator Faz Direnci(Ohm)	0.8
d Eksen Endüktansı(H)	3.e-3
q Eksen Endüktansı(H)	6.e-3
Mıknatsılanma Akısı(Wb)	0.102
Atalet Momenti(kg.m ²)	1.74.e-4
Kutup Sayısı	8
Kayıp Modeli Direnci(Ohm)	350

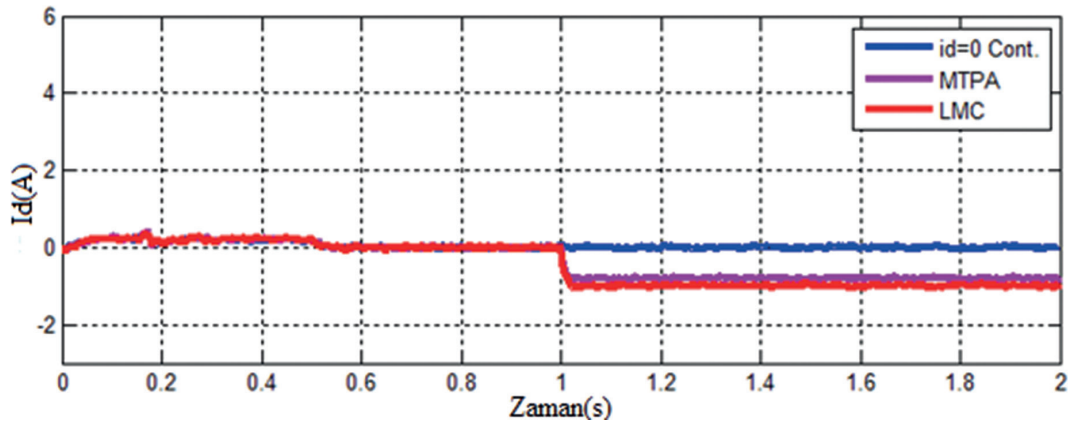
Benzeşim Sonuçları



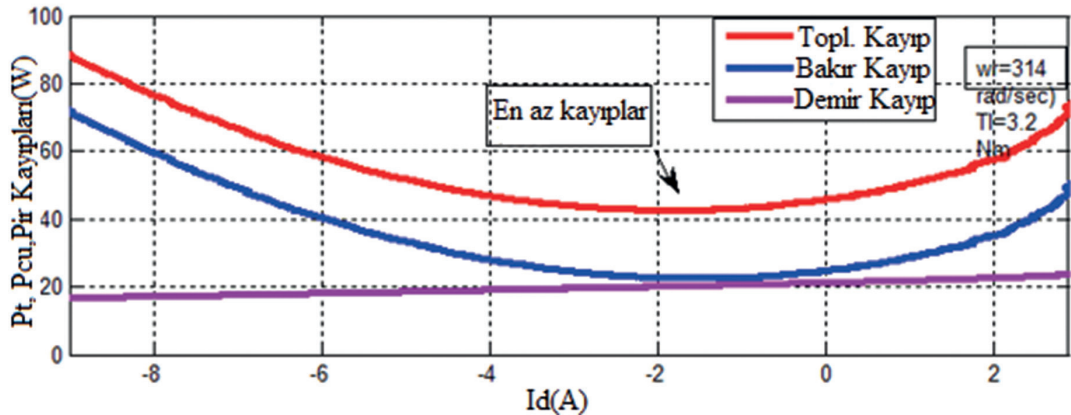
Şekil 10. id=0 Kontrol, Amper Başına Maksimum Moment ve Kayıp Minimizasyon Kontrolü Verimlilik Grafikleri



Şekil 11. d ve q Eksenli Akımlarının Değişik Yük Momentlerinde Birbirlerine Göre Değişimleri



Şekil 12. id=0 Kontrol, Amper Başına Maksimum Moment ve Kayıp Minimizasyon Kontrol d Eksenli Akımları Değişimleri



Şekil 13. Toplam Kayıp, Bakır Kaybı ve Demir Kaybı Grafikleri

5. Sonuç

SMSM'lerin kontrolü amacı ile kullanılan klasik d eksenli akımının sıfıra eşitlenmesi, amper başına maksimum moment ve kayıp

minimizasyon kontrolü yöntemlerine göre benzeşim sonuçları sunulmuştur. Verim grafikleri incelendiğinde kayıp minimizasyon kontrolünün en yüksek verimi sağladığı görülmektedir. Anma hızında değişik yük

momenti değerlerinde q eksen akımının azaldığı ve matematiksel eşitliklere göre en az değerlerine ulaştığı anlaşılmaktadır. Kayıpların minimizasyonu d eksen akımının negatife inmesi dolayısı ile bir miktar akı zayıflaması ile eş anlamlı kullanıldığından kayıp minimizasyon kontrolünün negatif değerinin diğer yöntemlere göre daha az olduğu saptanmaktadır.

Kaynakça

- [1] Analysis and Comparison of PWM Modulation Methods in VSI-Fed PMSM Drive Systems, Maitane Aguirre, Patxi Madina, Javier Poza, Aitor Aranburu, Txomin Niev, International Electrical Machine Control Conference, 2012.
- [2] Performance Analysis and Optimization of Digital PWM Controllers for Surface-Mounted PMSM Drives, M. Abdesh Khan, M. Nasir Uddin, IEEE, 2012.
- [3] Analysis of Triangular Periodic Carrier Frequency Modulation on Reducing Electromagnetic Noise of Permanent Magnet Synchronous Motor, Yongxiang Xu, Qingbing Yuan, Jibin Zou, and Yong Li, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 48, No. 11, November 20.
- [4] Analysis of Modulation Pattern and Losses in Inverter for PMSM Drives YU Yan-jun, CHAI Feng and CHENG Shu-kang, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), September 3-5, 2008.
- [5] Reduction of the Acoustic Noise in PMSM Drives by the Periodic Frequency Modulation Yongxiang Xu, Yanmei Yao, Qingbing Yuan, Jibin Zou, Jing Shang, Electrical Machines and Systems (ICEMS), International Conference on, 2011.
- [6] The Design of a PMSM Motor Drive with Active Power Factor Correction, Tze-Yee Ho Mu-Song Chen Li-Yuan Chen Lung-Hsian Yang, IEEE, 2011.
- [7] Sabit Miknatıslı Disk Motorlarda Miknatıslı Kayk Etkisi, Metin AYDIN, EMO.
- [8] Study on Efficiency Optimizing of PMSM for Pump Applications, Guang-xu Zhou, Hui-jun Wang, Dong-Hee Lee, Jin-Woo Ahn, The 7 th international Conference on Power Electronics, 2007.
- [9] Modeling and Comparison of Machine and Converter Losses for PWM and PAM in High Speed Drives, Lukas Schwager, Arda Tüysüz, Ch ristof Zwyssig, Johann W. Kolar, Proceedings of the International Conference on Electrical Machines (ICEM) 2012.
- [10] Reduction of vibration and noise in low speed Direct-driven PMSMs, Jiang Xintong¹, Li Yong, Zhao Bo, Lu Yongping, Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2010.
- [11] Efficiency Comparison between Brushless DC Motor and Brushless AC Motor Considering Driving Method and Machine Design, Masataka Miyamasu, Kan Akatsu, 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IECON, 2011.
- [12] Noise and Vibration Reduction in Permanent Magnet Synchronous Motors –A Review, International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2012.
- [13] Efficiency-Optimized Vector Control of PMSM Drive for Hybrid Electric Vehicle, Xianqing Cao, Liping Fan, International Conference on Mechatronics and Automation, 2009.
- [14] Cogging torque optimization in surface-mounted permanent-magnet motors by using design of experiment, K. Abbaszadeh, F. Rezaee Alam, S.A. Saied, Energy Conversion and Management 52 (2011).
- [15] Permanent-Magnet Synchronous Motor Magnet Designs With Skewing for Torque Ripple and Cogging Torque Reduction, Rakib Islam, Iqbal Husain, Abbas Fardoun, Kevin McLaughlin, IEEE Transactions On Industry Applications, January/February 2009.
- [16] Ji Q, Liu G, A Starting Method of Ship Electric Propulsion Permanent Magnet Synchronous Motor, Advanced in Control Engineering and Information Science, pp 655-659, 2011.
- [17] Shang, G, Liu Y, Sun F, Zhang H, Study on DTC-SVM of PMSM Based on Propeller Load Characteristic, Proceeding of the /th World Congress on Intelligent Control and Automation, China, pp 6445-6449, 2008.