

E-ÇEKİRDEK ÇAPRAZ AKI MAKİNASININ EGZERSİZ BİSİKLETİ UYGULAMASI İÇİN ANALİZİ

Çiğdem GÜNDOĞAN TÜRKER¹, Mehmet Aytaç ÇINAR², Feriha ERFAN KUYUMCU¹

¹Kocaeli Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Umuttepe Yerleşkesi, Kocaeli

²Kocaeli Üniversitesi, İzmit Meslek Yüksekokulu, Arslanbey Yerleşkesi, Kocaeli

cdemgun@kocaeli.edu.tr, aytac@kocaeli.edu.tr, erfan@kocaeli.edu.tr

(Geliş/Received: 19.09.2012; Kabul/Accepted: 14.11.2013)

ÖZET

Bu çalışmada, çapraz akı ve relüktans prensibini birleştiren farklı bir yapıya sahip E-Çekirdek Çapraz Akı Makinası ve egzersiz bisikleti uygulamasındaki çalışma şekli analiz edilmektedir. Öncelikle, sonlu elemanlar analizi ve deneysel yöntemlerle makinanın statik performans karakteristikleri elde edilmektedir. Ardından, E-Çekirdek Çapraz Akı Makinası ve sürücü düzeneği modellenmekte ve uygulamanın kontrol algoritmalarını da içeren tüm sistem düzeneğinin simülasyonu ile makinanın dinamik performans dalga şekilleri verilmektedir. Son olarak ise, oluşturulan egzersiz bisikleti uygulamasının laboratuvar ortamında oluşturulan deney düzeneği ile makinanın performans değerleri elde edilerek simülasyon sonuçları doğrulanmaktadır.

Anahtar kelimeler: E-Çekirdek çapraz akı makinası, egzersiz bisikleti, simülasyon, modelleme

ANALYSIS OF THE E-CORE TRANSVERSE FLUX MACHINE FOR INDOOR TRAINING BIKE APPLICATION

ABSTRACT

In this paper, the different working structure and unique design of the E-Core Transverse Flux Machine that is combined of transverse flux and reluctance principle is investigated for training bike application. Also, static magnetic characteristics of the machine are obtained with finite element analysis and experimental measurements. The modeling of the E-Core Transverse Flux Machine and its driver system are given. The whole system with all control algorithms for a training bike application is simulated and the performance curves are presented. Finally, the experimental tests done at the laboratory for the indoor training bike application are compared and verified with the results of the simulation.

Keywords: E-Core transverse flux machine, indoor training bike, simulation, modeling

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Döner elektrik makinaları manyetik akının nüve üzerindeki dolaşma yönüne göre radyal, aksel ve çapraz akı olmak üzere üç ana başlık altında gruplanmaktadır. Elektrik makinalarının en son yeniliklerinden olan çapraz akı makinaları yüksek moment ve güç yoğunluğu, güvenilirlik ve özellikle klasik makinalara oranla nüve kayıplarının daha düşük olması nedeni ile, yüksek performansa sahiptir. Çapraz akı makinaları diğer makinalara oranla çok küçük kutup adımları ile tasarlanabilmektedir. Ayrıca, verilen boyutlar ve akım değerleri değiştirilmeden kutup sayısı artırılarak moment yoğunluğu daha

yüksek değerlere çıkartılabilmektedir. Modern kontrol yöntemleri ve güç elektroniğinin gelişmesi ile Çapraz akı makinaları, yüksek moment yoğunluğu gerektiren uygulamalarda veya çok kutuplu makinaların kullanıldığı farklı alanlarda tercih edilmektedir. Bu alanlara örnek olarak rüzgar türbinleri, hibrid ve elektrikli araçlar, gemi sistemleri gibi alanlar ile servo sistemler gibi uygulamalarda, motor veya generatör işletme durumlarında kullanılabilmektedir.

Çapraz akı makinaları üzerine yapılan ilk çalışmalar, bu makina tipinin doğrusal uygulamalarda kullanımına yöneliktir [1-3]. Bunun ardından 1980'li yıllarda çapraz akı yapısı klasik döner elektrik

makinası tiplerine uygulanmaya başlanmıştır [4-7]. Bu yapı üzerine gerçekleştirilen çalışmaların günümüze kadar artarak sürmesinin ilk adımları ise, çapraz akı yapısının sürekli mıknatıslı elektrik motorlarına [8] ve lineer relüktans motorlarına [9,10] uygulandığı çalışmalardır. Bunun yanı sıra, servo sürücülü uygulamalar için farklı kutup sayıları ile çapraz akılı relüktans motorunun moment üretim performansını geliştirmek ve özellikle düşük hızlı uygulamalar için çapraz akılı relüktans makinası tiplerinin statik ve dinamik performansları ve sürücü sistemlerini iyileştirmek amacıyla gerçekleştirilen çalışmalar ilgili literatürlerde gözlenmektedir [11-15]. Literatürde rastlanan diğer yayınlar ve patentlere göre çapraz akılı elektrik makinaları üç farklı yapıda tasarlanmaktadır. Bunlar, sürekli mıknatısların rotora yerleştirildiği aktif rotorlu, sürekli mıknatısların statora yerleştirildiği pasif rotorlu ve sürekli mıknatısların bulunmadığı elektriksel uyarmalı relüktans motorları olarak sınıflandırılmaktadır.

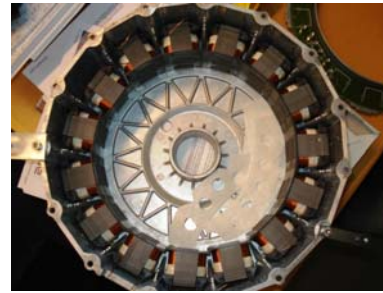
Bu çalışmada, relüktans motor yapısı ile çapraz akı prensibini birleştiren özgün bir tasarıma sahip E-çekirdek Çapraz Akı Makinası (E-Core Transverse Flux Machine-ETFM) ve bu makinanın özel bir kullanım alanı olan egzersiz bisikleti uygulaması incelenmektedir. Bu amaçla, ilk olarak ETFM'nin yapısı ve çalışma mantığı açıklanmaktadır. ETFM'nin modelinin doğru bir şekilde oluşturulabilmesi ve ayrıca makinanın elektriksel ve mekaniksel davranışlarının belirlenebilmesi için makinanın karakteristiklerinin doğru tanımlanması gerekmektedir. Bu amaçla üçüncü bölümde, makinanın statik manyetik karakteristikleri deneysel yöntemlerle bulunmakta ve manyetik akı dağılım eğrileri üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ile elde edilmektedir. Ardından, ETFM ve sürücü düzeneğinin modellenmesi ve egzersiz bisikleti uygulamasının kontrol algoritmalarını da içeren tüm sistem çalışmasının simülasyonu oluşturulmaktadır. Son olarak, deneysel çalışmalar ile makinanın performans dalga şekilleri elde edilerek simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması yapılmaktadır.

2. E-ÇEKİRDEK ÇAPRAZ AKI MAKİNASI (E-CORE TRANSVERSE FLUX MACHINE)

ETFM, çapraz akılı makinaların tasarım açısından en kolay topolojisidir. Çalışma prensibi bakımından relüktans makinaları ile benzer özelliklere sahiptir. Buna karşın iki yapı arasındaki en büyük farkı, akım ve manyetik akının makine üzerindeki dolaşım yönleri oluşturmaktadır. Anahtarlı relüktans makinasında akım aksiyel yönde akmakta iken, manyetik akı yolu ise hareket yönüne paralel olup radyal yöndedir. Çapraz akı makinasında ise, akım radyal hareket yönüyle çakışık olup akı aksiyel yönde akmaktadır. ETFM'nin stator ve rotor nüveleri parçalı yapıya sahiptir. Stator, tek fazlı küçük güçlü mantel tipi transformatör yapılarına benzerlik gösterir ve "E" şekilli lamine saçların paketlenmesiyle oluşturulan

nüve parçalarının bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Uyarma sargısı ise, her bir "E" şekilli nüve parçasının orta bacağı üzerine yerleştirilir [16].

Makinanın tasarım parametrelerine bağlı olarak belirlenen sayıda stator nüve parçası üzerindeki uyarma sargıları seri bağlanarak makinanın bir faz devresi oluşturulur. Rotor ise, "I" şekilli lamine saçların paketlenmesiyle oluşturulan nüve parçalarının birleştirilmesiyle meydana getirilir. Makinanın rotorunda sargı veya mıknatıs malzeme bulunmaz. Şekil 1'de stator ve rotor yapısı gösterilmektedir.



(a)



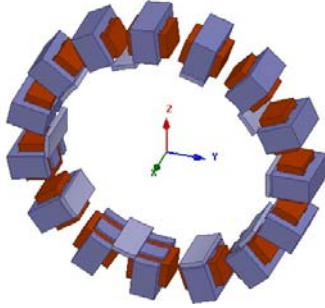
(b)

Şekil 1. ETFM'nin (a) stator, (b) rotor yapısının görüntüleri ((a) stator, (b) rotor structures of ETFM)

Parçalı nüve yapısı, makinanın kutup sayısını belirlemede serbestlik sağlamaktadır. Üç fazlı klasik bir anahtarlı relüktans makinasının 6/4, 8/6, 12/8 gibi standart kutup konfigürasyonlarına karşın ETFM, 15/10 gibi alışılmadık dışında tasarımlara olanak vermektedir.

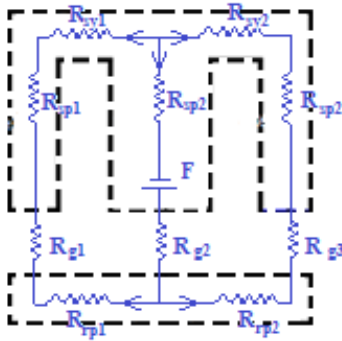
Her fazın manyetik devresi birbirinden bağımsızdır. Bu nedenle makinede karşılıklı kuplaj etkisi ortadan kalkmakta ve fazların kontrolü basitleşmektedir. Parçalı nüve yapısının sağladığı bir diğer üstünlük ise, her bir faza ait manyetik akı yollarının "E-I" şekilli nüve parçaları üzerinden tamamlanması nedeniyle ortak boyunduruk gereksiniminin ortadan kalkmasıdır. Böylece manyetik akı yolu, klasik bir anahtarlı relüktans makinasına kıyasla çok daha kısa olmakta ve dolayısıyla makinede ortaya çıkan çekirdek kayıpları oldukça azalmaktadır. Elektriksel devre ile manyetik devre geometrik olarak bağımsızdır.

Şekil 2’de 15/10 stator/rotor kutup sayısına sahip üç fazlı ETFM’nin önden ve aksenal yönden görüntüsü verilmektedir.



Şekil 2. ETFM’nin aksenal görüntüsü (ETFM’s axial view)

Makina relüktans prensibine göre çalışır. Buna göre, bir fazı oluşturan stator kutupları üzerine sarılmış olan bobinlerin oluşturduğu bir faz sargısı uyarıldığı zaman, uyarılan faza en yakın konumda bulunan rotor kutupları, devrenin manyetik relüktansını minimum yapacak şekilde enerjilenmiş stator kutuplarına doğru çekilir. Makinada rotorun bir tam dönüş yapabilmesi için, faz sargılarının bir defadan fazla uyarılması gerekmektedir. Her bir faz sargısı uyarıldığında rotor, bir adım açısı kadar dönme hareketi yapar. m faz sayısı ve N_r rotor kutup sayısı olmak üzere rotor ($m \cdot N_r$) adımda bir tam dönüşünü tamamlar. Şekil 3’de ETFM’nin bir kutbuna ait manyetik eşdeğer devresi verilmektedir.



Şekil 3. ETFM manyetik eşdeğer devresi (Magnetic equivalent circuit of the ETFM)

Uyarma sargısı enerjilendirildiğinde oluşan manyetik akı, yolunu “E” ve “I” şekilli nüve parçaları ile hava aralığı üzerinden tamamlar. Rotor konumuna bağlı olarak manyetik devrenin relüktansı değişmektedir. Manyetik direnç aynı zamanda devrenin endüktansı ile de ilişkilidir. Makinada moment oluşumu için endüktans değişimi önem taşımaktadır. Rotor ve stator kutuplarının çakışık konumunda endüktans en büyük değerini alır. Eşdeğer devre için endüktansın rotor konumuna göre doğrusal olarak değiştiği kabul edilirse moment ifadesinin;

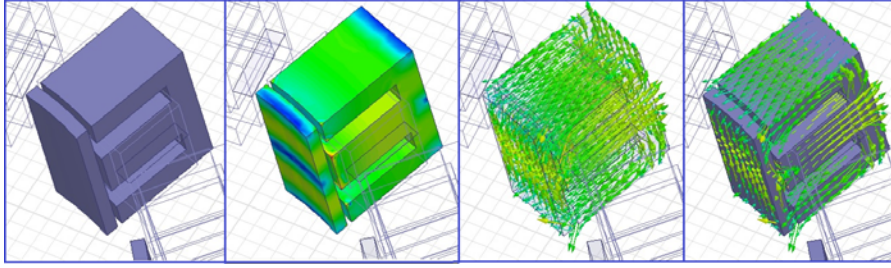
$$T_e(i, \theta) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{d}{d\theta} \left[\frac{N^2}{R} \right] \quad (1)$$

eşitliğinde verildiği gibi manyetik devre relüktansı ile ilişkisi bulunduğu açıktır.

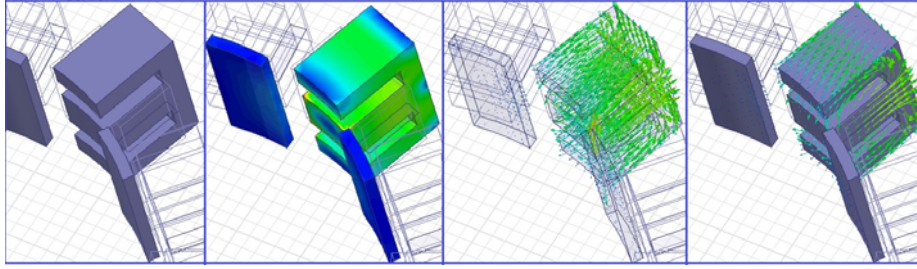
3. ETFM’İN STATİK KARAKTERİSTİKLERİ (STATIC CHARACTERISTICS OF THE ETFM)

ETFM modelinin oluşturulması, makinanın elektriksel ve mekaniksel davranışlarının belirlenebilmesi için makinanın performans karakteristiklerinin doğru elde edilmesi büyük önem taşımaktadır. Manyetik karakteristiklerinin elde edilebilmesi için kullanılan farklı yöntemler bulunmaktadır. Makina tasarımı ve performans tahminleri için en sıkça kullanılan yöntemlerin başında sonlu elemanlar analizi gelmektedir. Bu çalışmada, makinanın statik moment ve akı karakteristiklerinin elde edilmesi amacıyla sonlu elemanlar yönteminden faydalanılmaktadır. Bu amaçla, öncelikle makinanın üç boyutlu modeli oluşturulmakta ve makinanın bileşenleri ile bu bileşenleri oluşturan malzemeler tanımlanmaktadır. Ardından, gerilim ve akım kaynakları ile elektrik veya manyetik alanların etkileyeceği makina bileşenleri ve sınır değerler belirlenmektedir. Son olarak, oluşturulan sonlu elemanlar yüzeyinin kabul edilen referans enerji hata değeri dahilinde kalacak şekilde çözümü ve gerek duyulması durumunda iyileştirilmesi ile ETFM’in statik moment ve akı karakteristikleri elde edilmektedir.

ETFM’in analizi esnasında referans enerji hatası değeri ise %1 olarak belirlenmiş olup, motor manyetik devresindeki her bir “E” ve “I” şekilli nüve parçası 2150 adet, her bir uyarma sargısı 400 adet, hava boşluğu ise toplam 26850 adet sonlu elemana ayrılarak çözülmektedir. Şekil 4 ve 5’te sırasıyla, ETFM’nin iki farklı rotor konumu için oluşturulan üç boyutlu modeli, sonlu elemanlar analizi sonucunda elde edilen manyetik akı dağılımının yüzeysel ve vektörel gösterimi verilmektedir. Makinanın performans karakteristikleri, üç boyutlu sonlu elemanlar analizinin yanısıra deneysel olarak da elde edilmiştir [17,18]. Laboratuvar çalışmasında bilgisayar kontrollü bir test düzeneği kullanılarak ETFM’nin manyetik karakteristiklerinin elde edilmesi için ölçümler yapılmıştır. Makinanın rotor konum açısı, bilgisayardan kontrol edilen adım motoru ile değiştirilmektedir. Adım motoru ve test makinası arasında bir dişli ve bir moment dönüştürücüsü (strain gauge) yer almaktadır. Moment karakteristiğinin ölçülebilmesi için, ETFM’nin rotoru adım motoru ile istenilen pozisyona getirilerek kilitlenir. Bu konumda ETFM’nin ölçüm yapılacak sargısına güç kaynağı ile doğru gerilim uygulanarak statik moment değeri moment dönüştürücüsü yardımıyla ölçülmektedir.



Şekil 4. ETFM'nin bir stator kutbu ve tek bir rotor kutbunun çakışık olduğu pozisyondaki akı dağılımı (Flux linkage of the ETFM aligned position for one stator and one rotor pole)



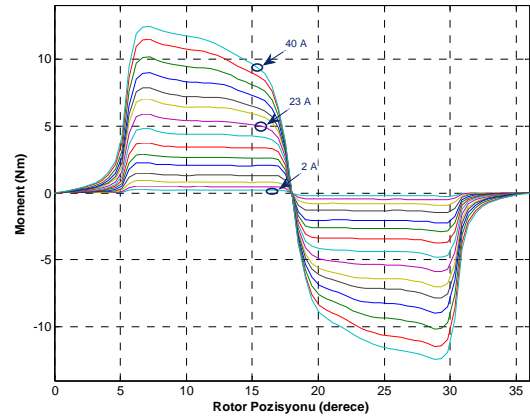
Şekil 5. ETFM'nin bir stator kutbu ve tek bir rotor kutbunun çakışık olmayan bir pozisyonundaki akı dağılımı (Flux linkage of the ETFM unaligned position for the one stator and one rotor pole)

Böylelikle, farklı rotor konumları için faz akımı, gerilimi ve moment değerleri elde edilerek kaydedilmektedir. Statik moment ölçümü için, sistemdeki sürtünme etkisi ve diğer mekanik kayıplar ihmal edilmektedir.

Makinada statora ait herhangi bir faz uyarıldığında rotor ekseninin stator üzerindeki belirli bir eksene göre hareket ettiği mesafe rotor konum açısı (θ) olarak tanımlanmaktadır. 15/10 stator/rotor kutuplu bir ETFM için elektriksel periyod 36° ($360^\circ/N_r$) olmaktadır. Dolayısıyla, θ açısı referans olarak çakışık olmayan pozisyonda 0° , çakışık pozisyonda ise 18° olarak kabul edildiğinde pozitif moment eğrileri 0° - 18° , negatif moment eğrileri ise 18° - 36° aralığında elde edilmektedir.

Makinanın bir fazına ait stator ve rotor kutuplarının konumu çakışık olmayan pozisyon ile çakışık pozisyon arasında birer derecelik adımlarla değiştirilerek ve faz sargısı ikişer amper aralıklarla 0-32A akım aralığında uyarılarak makinanın tüm statik moment değerleri ölçülmekte ve Şekil 6'da verilen moment karakteristikleri elde edilmektedir.

ETFM'nin akı karakteristiğini doğrudan ölçmek için öncelikle faz sargısının direnci ölçülmektedir. Deney düzeneğinde rotor kilitli haldeyken faz sargısına gerilim uygulanarak kısa devre akımı farklı zamanlarda ölçülür, eğri uydurma yöntemi ile sıcaklığa bağlı direnç değeri hesaplanır. İstenilen pozisyonlarda rotor sabitlenerek, diğer fazlar açık devre iken statorun ölçüm yapılacak fazına gerilim uygulanmakta ve o andaki faz sargısı uç gerilimi ve uç akım değerleri kaydedilmektedir.



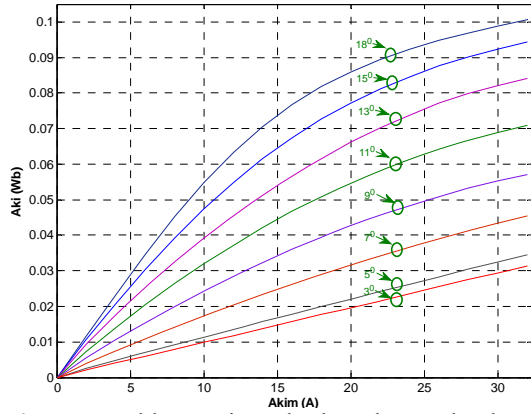
Şekil 6. Farklı akım değerleri için rotor pozisyonuna moment karakteristikleri (Torque characteristics for different current values according to rotor positions)

O andaki akı değeri, rotor pozisyonunun her bir konumu için anlık olarak kaydedilen değerlerden makinanın elektriksel eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır;

$$V = R_i + d\lambda(\theta, i)/dt \quad (2)$$

Şekil 7'de, rotorun çakışık olmayan pozisyonu ile çakışık pozisyonu arasında farklı akım değerleri için elde edilen akı karakteristikleri gösterilmektedir.

Uygulamada, sargı gerilimi kaynağın salınımından dolayı ölçüm boyunca sabit kalmadığından ötürü, akı değerleri için eğri uydurma (curve fitting) yöntemi uygulanmıştır.



Şekil 7. Farklı pozisyonlarda akıma bağlı akı karakteristikleri (Flux characteristics for the different rotor positions according to current values)

ETFM'nin çalışmasında momentin oluşumu için endüktans değişimi çok önemli olmaktadır. Rotor kutbu ile stator kutbunun çakışık olduğu durumda endüktans en yüksek değerini alır. Faz sargısının öz endüktansı, rotor pozisyonu ve faz akımı arasındaki ilişkiyi ifade eder. Analitik model rotor pozisyonuna göre değişen fourier serileri ile hesaplanmaktadır [19].

$$\lambda(i, \theta) = L(\theta, i) \quad (3)$$

Fourier serisindeki katsayılar rotorun çakışık, ayırık ve her iki pozisyonun ortasında alınan endüktans değerleri ile belirlenir. Faz endüktansı;

$$L(\theta, i) = L_0(i) + L_1(i) \cos N_r \theta + L_2(i) \cos 2N_r \theta \quad (4)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada eşitliğin sağ tarafındaki katsayılar ise;

$$L_0 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} (L_a + L_u) + L_m \right] \quad (5)$$

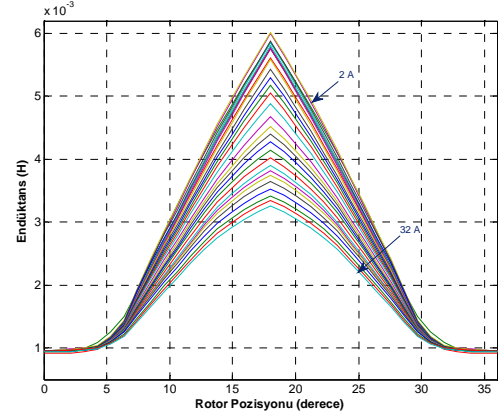
$$L_1 = \frac{1}{2} (L_a - L_u) \quad (6)$$

$$L_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} (L_a + L_u) - L_m \right] \quad (7)$$

olarak elde edilmektedir. Şekil 8'de ETFM'nin bir fazı için elde edilen öz endüktans profili gösterilmektedir.

4. EGZERSİZ BİSİKLETİ UYGULAMASI VE DENEYSEL ÇALIŞMA (APPLICATION OF INDOOR TRAINING BIKE AND EXPERIMENTAL STUDY)

ETFM'nin uygulama alanlarından biri, kişisel spor aktivitelerinde kullanılan egzersiz bisikleti uygulamasıdır. ETFM'in statorunun segmentli yapısı, kutup eksenel uzunluğunda akı yollarının tamamlanması ve kutup sayısının artırılabilmesi makinanın geniş çaplarda tasarlanmasına olanak sağlar. Ayrıca, ETFM'in relüktans çalışma şekli ile egzersiz bisikletinde istenen yüksek moment ve geniş hız aralığının da sağlanabilmesi makinanın bu uygulamada kullanılmasını ilgi çekici kılmaktadır.



Şekil 8. Bir faz sargısının öz endüktans profili (Self inductance profile for one phase)

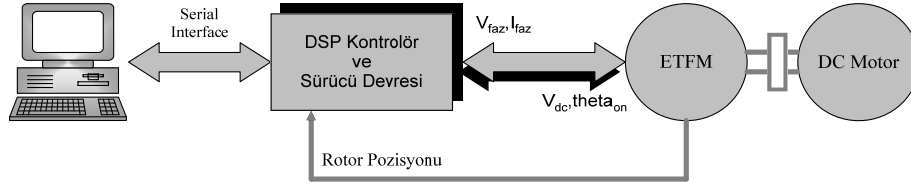
ETFM egzersiz bisikletinin pedalları arasına yerleştirilerek generatör modunda çalıştırılmaktadır. Generatör bir yandan cihazın elektronik sistemi için gerekli olan enerjiyi üretmekte, diğer taraftan ise generatörün ilk kalkış enerjisini sağladığı aküleri de şarj etmektedir. ETFM uygulamasında, bisikletin seçilen dişli ve seviye zorluk ayarına göre biniciye direnç uygulayan ve yüksek hızdan düşük hıza doğru yüksek moment sağlayarak zorluk derecesini sağlayan bir yük birimi gibi çalışmaktadır [20,21].



Şekil 9. Egzersiz bisikletinin dişli ve seviye ayarlarının yapıldığı simülör yazılımının arayüz görüntüsü (View of the IDE of the application simulator)

Laboratuvar ortamında ETFM'nin egzersiz bisikleti çalışmasını gerçekleştirebilmek için deney düzeneği oluşturulmaktadır. Bisikletin dişli (gear) ve seviye (level) ayarlarına göre istenilen moment değerinde ETFM'yi yükleyerek çalıştırabilmek için egzersiz bisikletinin kullanıcı paneline karşılık gelen bir simülör yazılımı kullanılarak PC üzerinden deney sistemi farklı yüklerde çalıştırılmaktadır. Şekil 9'da simülör yazılımının arayüz görüntüsü gösterilmektedir.

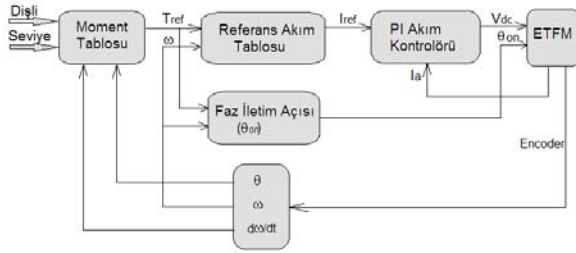
Gerçek uygulamadaki binicinin yerine bir doğru akım motoru ETFM'nin miline akuple edilerek makinanın istenilen hızda çalıştırılmasını sağlamaktadır. ETFM'nin uygun iletim açısından fazlarının sırasıyla enerjilendirilmesini sağlamak için güç elektroniği sürücü devresi bulunmaktadır. PI akım kontrolü ve sürücü devresinin tetiklemesini sağlamak için de DSP



Şekil 10. Deneysel sistemin şematik gösterimi (Schematic presentation of the experimental system)

(Dijital Sinyal İşlemcisi) kullanılmaktadır. ETFM'nin sürücü ve kontrol algoritmalarını da içeren program DSP kartına yüklenerek sistemin simülasyon arayüzü ile haberleşmesi PC üzerinden sağlanmaktadır. Deneysel sistemin şematik gösterimini Şekil 10'da verilmektedir.

PC üzerinden simütörden ayarlanan seviye ve dişli değerlerine göre DSP'de referans moment değeri belirlenmektedir. Referans moment ve hıza göre belirlenen akım referansı PI akım kontrolörüne iletilmektedir. Her yük durumu ve hız değeri için de iletim açısı değişmekte ve bu değerler de tablodaki giriş değerlerine göre sisteme iletilmektedir. Şekil 11'de sistemin kontrol yapısı görülmektedir.



Şekil 11. ETFM sisteminin kontrol algoritması (Control algorithm of the ETFM system)

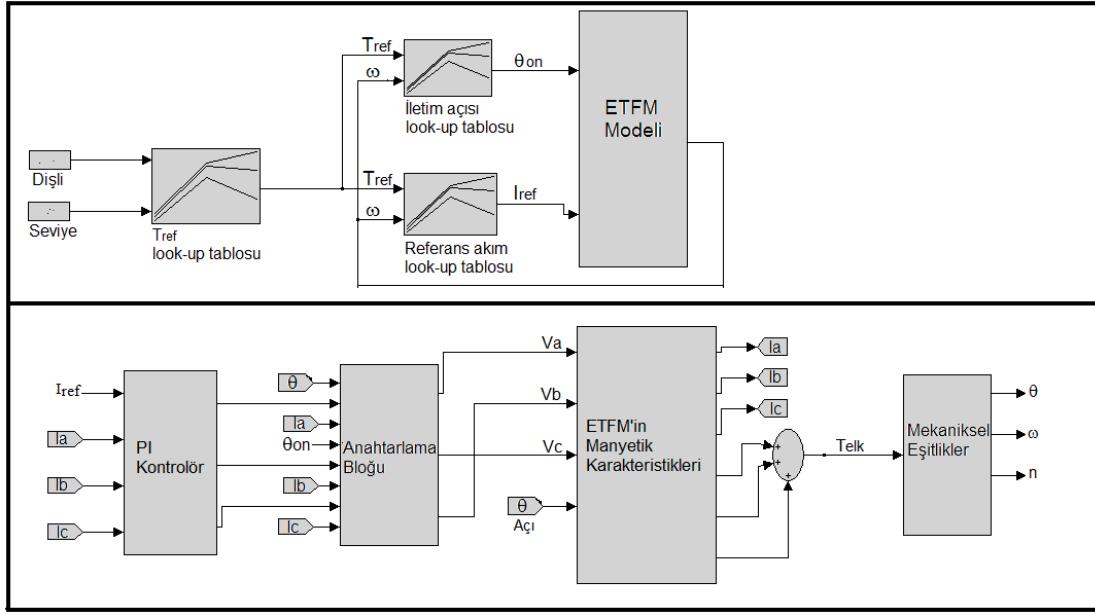
Şekil 12'de ETFM'nin egzersiz bisikleti uygulaması için tüm kontrol ve çalışma yapılarını içeren sistemin

Matlab/Simulink'te oluşturulan simülasyonu verilmektedir. PI kontrol bloğunda referans akım değeri ile faz akım değeri karşılaştırılmakta ve makinanın besleme gerilimi -24V-+24V aralığında kırılarak akım kontrolü sağlanmaktadır.

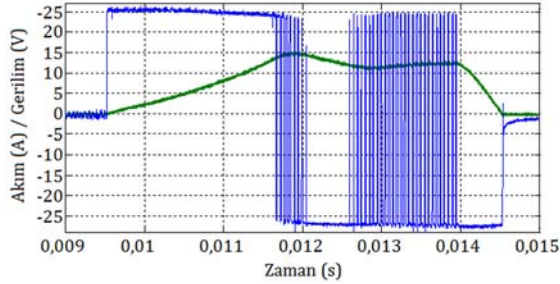
Makinanın rotor pozisyonuna göre uygun zamanda fazların enerjilendirilmesi için bir fazın iki anahtarlama elemanı ile kontrol edildiği bir sürücü devresi kullanılmaktadır. Bu anahtarlar aynı anda iletime girmekte ve aynı anda kesime sokulmaktadır. Rotor açısına göre anahtarların iletime geçme zamanı bilgisi kontrol algoritmalarından sağlanmaktadır.

Anahtarlama bloğunda sürücü devresi simüle edilmektedir. Makinanın elektriksel eşitliğinin oluşturulduğu blokta deneysel yöntemlerle elde edilen manyetik karakteristikler look-up tabloları ile kullanılmaktadır. 15/10 stator/rotor kutup sayılı ETFM için her bir fazın 36 derecelik bir elektriksel periyodu vardır. Rotor pozisyonu bilgisi mekaniksel eşitlikten çıkartılarak sisteme geri besleme ile verilmektedir.

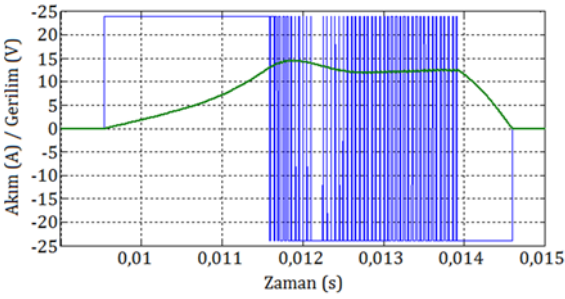
Şekil 13'te Dişli=4, Seviye=7, $\omega=52,81$ rad/s, Şekil 14'te ise Dişli=10, Seviye=6, $\omega=37,56$ rad/s yüklenme durumları için gerçek sistem ve simülasyondan elde edilen akım ve gerilim dalga şekilleri ile akım dalga şekillerinin karşılaştırılması verilmektedir.



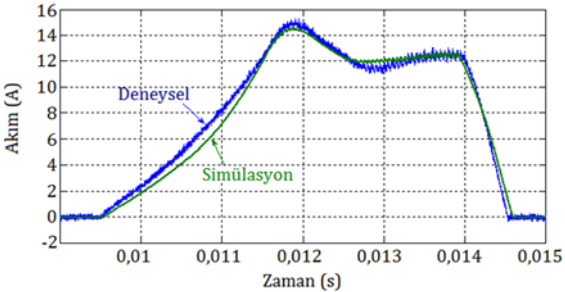
Şekil 12. ETFM egzersiz bisikleti uygulamasının simülasyonu (Simulation of the whole ETFM system)



(a)

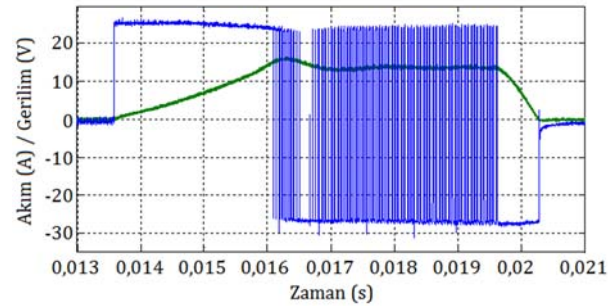


(b)

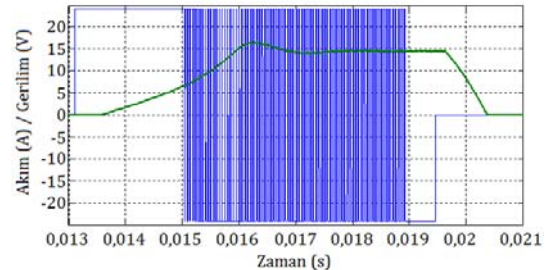


(c)

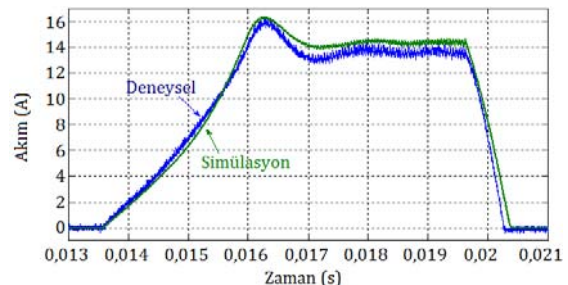
Şekil 13. Dişli=4, Seviye=7, $\omega=52,81$ rad/s değerlerinde a) deneysel sistem b) simülasyon akım ve gerilim dalga şekilleri c) gerçek sistem ve simülasyon akım dalga şekillerinin karşılaştırılması ((a) Experimental system, b) Simulation current and voltage waveforms, c) Comparison of the current waveform between experimental and simulation)



(a)



(b)



(c)

Şekil 14. Dişli=10, Seviye=6, $\omega=37,56$ rad/s, a) simülasyon, b) gerçek sistem bir faz akım ve gerilim dalga şekilleri, c) bir faz akım dalga şekillerinin karşılaştırılması ((a) Experimental system, b) Simulation current and voltage waveforms, c) Comparison of the current waveform between experimental and simulation)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

ETFM, eksenel yapıdaki tasarımı ile alışılmışın dışında kutup sayısına sahip, küçük hacimlerde, yüksek moment yoğunluğu, kısa akı yolları özellikleri ile elektrik makineleri içerisinde fark yaratmaktadır. ETFM'nin çapraz akı prensibi ile relüktans mantığını birleştiren çalışma şekli makalenin ilk bölümlerinde ayrıntılı olarak paylaşılmaktadır.

Makinanın elektriksel ve mekaniksel davranışlarının iyi belirlenmesi optimum noktada çalışmasını sağlamak için önemli olmaktadır. Bu amaçla, sonlu elemanlar analizi ve deneysel ölçüm yöntemleriyle makinanın statik manyetik karakteristikleri elde edilmektedir. Ayrıca, moment oluşumu için önemli olan endüktans profili de hesaplanarak çıkartılmaktadır.

Bu çalışmada, ETFM'nin bir egzersiz bisikleti uygulamasında generatör olarak çalışması, simülasyon ve deneysel çalışmalar ile analiz edilmektedir.

Öncelikle uygulamanın tüm kontrol ve sürücü algoritmalarını da içeren makina ve sistem modeli Matlab/Simulink'te kurularak farklı çalışma koşullarındaki performans değerleri elde edilmektedir.

Sistemin deneysel olarak incelenebilmesi için egzersiz bisikletini simüle eden test düzeneği kurulmakta ve bir uygulama simülatörü yardımı ile makina farklı durumlarda yüklenebilmektedir. Bu sayede makinanın dalga şekilleri farklı çalışma durumları için elde edilerek, yapılan simülasyon çalışmaları ve statik manyetik analiz sonuçları doğrulanmaktadır.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

R_{sp} , R_{sy} , R_{rp} , R_g ve F ; stator kutbu, stator boyunduruğu, rotor kutbu ve hava aralığı relüktansları ile stator sargısı magnetomotor kuvveti.

ϕ ; manyetik alan akısı,

H ; hava aralığındaki manyetik alan şiddeti,

l ; manyetik yolun uzunluğu,

B ; manyetik akı yoğunluğu,

S ; manyetik yolun kesit alanı,

μ ; manyetik malzemenin manyetik geçirgenliği

N ; akıyı oluşturan sargının kutup başına sarım sayısı,

L ; faz sargısının öz endüktansı,

i ; faz sargısından geçen akım

L_a ; çakışık pozisyondaki sargı endüktansı,

L_u ; ayırık pozisyondaki endüktans,

L_m ; çakışık ve ayırık pozisyonlar arasında ortada bir pozisyon için sargı endüktansı,

λ ; makinanın faz akısı,

N_r ; rotor kutup sayısı

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının çalışmalarında destek veren Aalborg Üniversitesine ve E-Power Technology, Danimarka firmasına teşekkür ederiz. Bu çalışma, 109E299 no'lu TÜBİTAK-1002 projesi kapsamında desteklenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Laithwaite E.R., Easham J.F., Bolton H.R., Fellows T.G., "Linear Motors with Transverse Flux", **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, 118, 1761-1767, 1971.
2. Bolton H.R., Fellows T., Laithwaite E.R., Needham E.F., "Linear Induction Motor", **US Patent**, US3585423, 1971.
3. Easham J.F., Laithwaite E.R., Fellows T.G., Bromilow D.J.E., "Linear Induction Motors", **US Patent**, US3958138, 1976.
4. Weh H., May H., "Electrical Machines", **US Patent**, US4663551, 1987.
5. Weh H., May H., "Permanent Magnet Synchronous Machine with Transverse Flux Paths", **German Patent**, DE3602687, 1987.
6. Hoffman H., Weh H., Landrath J., "New Permanent Magnet Excited Synchronous Machine with High Efficiency at Low Speeds", **Proceedings of the International Conf. on Electrical Machines**, Italy, 35-39, 1988.
7. Weh H., "Low-Vibration Configuration of Transverse Flux Machines", **German Patent**, DE3827450, 1990.
8. Henneberger G., Bork M., "Development of a New Transverse Flux Motor", **IEEE Colloquium on New Topologies for Permanent Magnet Machines**, 1-6, 1997.
9. Liu C.T., Kuo J.K., "Experimental Investigation and 3D Modeling of Linear Variable-Reluctance Machine with Magnetic Flux Decoupled Windings", **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol 30, No 6, 4937-4739, Nov.1994.
10. Liu C.T., Kuo J.K., "Improvements on Transient Characteristics of Transverse Flux Homopolar Linear Machines Using Artificial Knowledge Based Strategy", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol 10, No 2, 275-285, 1995.
11. Kruse R., Pfaff G., Pfeiffer C., "Transverse Flux Reluctance Motor for Direct Servo Drive Applications", **IEEE Industry Application Conference**, Vol 1, 655-662, 1998.
12. Viorel I.A., Crivii M., Lowenstein L., Szabo L., Gutman M., "Direct Drive Systems with Transverse Flux Reluctance Motors", **National Conference of Electrical Drives**, 2004.
13. Kaehler C., Verselen W., Groening I., "Transverse Flux Reluctance Machine and

- Method for Manufacturing Serve”, **US Patent**, No 2009/0026869, 29 January 2009.
14. Carlisle B.R., “Transverse Flux Switched Reluctance Motor and Control Methods”, **US Patent**, No 2006/0091755, May 4, 2006.
 15. Lange A., “Transverse Flux Motor with Magnetic Floor Gap”, **US Patent**, No:5777418, Jun 17, 1996.
 16. Rasmussen P.O., “Transverse Flux Machine with Stator Made of E-Shaped Laminations”, **US Patent**, US7312549, 2004.
 17. Gundogan Turker C., Erfan Kuyumcu F., “The Modeling of the E-Core Transverse Flux Machine Based on Neural Network”, **International Review of Electrical Engineering**, Vol 5(4),1477-1487, 2010.
 18. Gundogan Turker C., Erfan Kuyumcu F., Türker Tokan N., “Performance Of Support Vector Regression Machines On Determining The Magnetic Characteristics Of The E-Core Transverse Flux Machine”, **Turkish Journal of Electrical and Computer Engineering**, DOI:10.3906/elk-1301-84,2013,
 19. Gao, H., Salmasi, F.R., Ehsani, M., “Inductance Model-Based Sensorless Control of the Switched Reluctance Motor Drive at Low Speed”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, Vol 19, No 6, 1568-1573, 2004.
 20. Rasmussen, P.O., Madsen, T.F., Shajarati, O., “Advanced Exercise Bike with an E-Core Transverse Flux Machine”, **The Korean Institute of Power Electronics, KIPE**, Korea, 243-246, 2003.
 21. Andersen, T.O., Rasmussen, P.O., Pedersen H.C., “Design and Control of a Lat Pully Exercise Machine with an E-Core Transverse Flux Machine Being the Load”, **10th International Workshop on Research and Education in Mechatronics**, 2009.

