KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜREKLİ MIKNATISLI EKSENEL AKILI DİSK MOTORLARDA HIZ KONTROLÜ VE MOMENT KALİTESİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS

Erdem ÖZYURT

Anabilim Dalı: Mekatronik Mühendisliği

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Metin AYDIN

KOCAELİ, 2009

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ*FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜREKLİ MIKNATISLI EKSENEL AKILI DİSK MOTORLARDA HIZ KONTROLÜ VE MOMENT KALİTESİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erdem ÖZYURT

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 29/05/2009

Tezin Savunulduğu Tarih: 15/09/2009

Tez Danışmanı

Yrd.Doç.Dr. Metin AYDIN

(.....)

Üye

Doç.Dr. Zafer BİNGÜL

.....

Üye

Yrd. Doç.Dr. Deniz YILDIRIM

(.....)

KOCAELİ, 2009

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Dünyada son yıllarda sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarının kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bu çalışma, ülkemizde birçok uygulamada sıkça kullanılmaya başlayan yüksek verimli bu motorların yapısı, özellikleri, kontrolü hakkında daha fazla bilgi edinmek ve bu motorların moment kalitesini attırmak için yapılabilecek değişiklikleri inceleme amaçlı bir çalışmadır.

Çalışmam sırasında bana yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Metin Aydın'a, proje desteğinden dolayı TÜBİTAK'a ve Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, her zaman bana destek olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER ve KISALTMALAR viii
ÖZET x
İNGİLİZCE ÖZET xi
1. GİRİŞ 1
2. SÜREKLİ MIKNATISLI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI 3
2.1. Giriş 3
2.2. SMFDA Motorlarının Yapısı 4
2.2.1. Yüzey mıknatıslı SMFDA motorları 5
2.2.2. Yüzeye gömülü SMFDA motorları 6
2.2.3. Dahili mıknatıslı SMFDA motorları 7
2.2.4. Hava boşluklu SMFDA motorları 8
2.3. SMFDA Motorlarının Çalışması 9
2.4. SMFDA Motorlarının Kontrolü 10
2.4.1. Konum geri beslemeli SMFDA motor kontrolü 10
2.4.1.1. Manyetik algılayıcılı kontrol 11
2.4.1.2. Optik algılayıcılı kontrol 11
2.4.2. Zıt EMK demodülasyonlu SMFDA motor kontrolü 13
2.5. SMFDA Motoru Matematik Modeli 14
3. EKSENEL AKILI ALAN KONTROLLÜ SÜREKLİ MIKNATISLI (EAAKSM) DİSK MOTOR HIZ KONTROLÜ 19
3.1. Giriş 19
3.2. Eksenel Akılı Alan Kontrollü Sürekli Mıknatıslı (EAAKSM) Motor ve Deney Düzeneği 19
3.3. Stator Rotor Senkronizasyonu 20
3.4. Hız Kontrol Sistemi 22
3.3.1. Sinyal genlik modülasyonu 23
3.3.2. PI kontrol modeli 24
3.3.3. Kontrol sistemi elemanları 25
3.3.3.1. DSP kontrol kartı TMS320F2812 27
3.3.3.2. Sürücü kartı CS-IIB 27
3.3.3.3. Optokuplörlü izolason devresi 31
3.3.3.4. SGM girişi lojik devresi 31
3.5. Hız Kontrol Sistemi Ölçümleri 31
4. EKSENEL AKILI SMFDA MOTORU VURUNTU MOMENTİ İNCELENMESİ VE MİNİMİZASYONU 35
4.1. Giriş 35
4.2.Vuruntu Analizi İçin Kullanılan Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Rotor Yapısı 36

4.3. Vuruntu Momentinin Hesaplanması 40
4.4. Vuruntu Momenti Minimizasyonu..... 40
4.5. Vuruntu Momentinin Ölçülmesi 43
4.6. Deneysel Sonuçlar..... 46
4.6.1. Fan tipi (140/180) derecelik mıknatıs ile vuruntu momentinin deneysel yolla incelenmesi..... 47
4.6.2. Yuvarlak (140/180) derecelik mıknatıs ile vuruntu momentinin deneysel yolla incelenmesi..... 49
4.6.3. Fan tipi (120/180) derecelik mıknatıs ile vuruntu momentinin deneysel yolla incelenmesi..... 51
4.6.4. Üçgen (140/180) derecelik mıknatıs ile vuruntu momentinin deneysel yolla incelenmesi..... 52
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... 54
KAYNAKLAR 56
EKLER..... 59
ÖZGEÇMİŞ 62

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Sürekli mıknatıs malzemelerin tarihsel gelişimi 2
Şekil 2.1: SMFDA motoru 3
Şekil 2.2: Yüzey mıknatıslı SMFDA motoru 6
Şekil 2.3: Yüzeye gömülü SMFDA motoru 7
Şekil 2.4: Akı yoğunlaşmalı SMFDA motoru 7
Şekil 2.5: Dahili SMFDA motoru 8
Şekil 2.6: Oluksuz hava sargılı SMFDA motoru 8
Şekil 2.7: SMFDA motoru algılayıcılı çalışma şeması 9
Şekil 2.8: Altı adımlı komütasyon düzeni 10
Şekil 2.9: SMFDA motoru faz akımları ve EMK'ları 10
Şekil 2.10: Konum geri beslemeli kontrol 12
Şekil 2.11: Alan etkili algılayıcılı SMFDA motoru 12
Şekil 2.12: Optik algılayıcılı SMFDA motor ve sembolik sürücü devresi 12
Şekil 2.13: Zıt EMK'nın algılanması 14
Şekil 2.14: SMFDA motorunun bir fazının elektriksel eşdeğer devresi 14
Şekil 2.15: SMFDA motoru basitleştirilmiş eşdeğer devresi 15
Şekil 2.16: SMFDA motoru eşdeğer devresi 18
Şekil 3.1: EAAKSM motoru 21
Şekil 3.2: EAAKSM motor stator ve rotoru 20
Şekil 3.3: EAAKSM motoru deney düzeneği 21
Şekil 3.4: DRBK50-n moment transduseri 21
Şekil 3.5: %50 çevrim zamanlı SGM sinyali 24
Şekil 3.6: EAAKSM motoru modeli 25
Şekil 3.7: SMFDA motoru eşdeğer devresi 26
Şekil 3.8: Klasik bir DA motoru PI kontrol modeli 26
Şekil 3.9: EAAKSM motoru SIMULINK PI kontrol modeli 26
Şekil 3.10: TMS320F2812 DSP kontrol kartı 28
Şekil 3.11: CS-IIB sürücü kartı 29
Şekil 3.12: CS-IIB sürücüsü X28 portu 29
Şekil 3.13: CS-IIB sürücüsü X18 portu 30
Şekil 3.14: CS-IIB sürücüsü X4, X10 ve X19 portları 30
Şekil 3.15: Optokuplör devresi 32
Şekil 3.16: FOD8001 Optokuplör devresi 32
Şekil 3.17: SGM giriş-çıkış lojik yapısı 32
Şekil 3.18: SGM giriş-çıkış lojik devresi 33
Şekil 3.19: 500 rpm hızlanma grafiği 33
Şekil 3.20: 1000 rpm hızlanma grafiği 33
Şekil 3.21: V_{as}, V_{bs}, V_{cs} sargı faz gerilimleri (gerilim probu 50V, osiloskop 200mV/div ve 10ms time/div kademesindedir) 34
Şekil 3.22: V_{as} sargı gerilimi ve i_a, i_b sargı akımları (gerilim probu 50V, akım probu 100mV ve osiloskop gerilim için 200mV/div, akım için 1V ve 10ms time/div kademesindedir) 34
Şekil 4.1: SMFDA disk motorun tüm parçalarının resmi 36

Şekil 4.2: Türkiye'nin ilk sürekli mıknatıslı fırçasız disk motoru 37
Şekil 4.3: SMFDA motoru açık görünümü 37
Şekil 4.4: Vuruntu analizinde kullanılan iki-rotor-tek-statorlu EASM motorun stator ve ilk rotor yapısı 38
Şekil 4.5: SMFDA motoru rotor montajı 38
Şekil 4.6: SMFDA motoru sargı düzeni 39
Şekil 4.7: SMFDA motoru sargı düzeni detayları 39
Şekil 4.8: SMFDA motorlarda vuruntu momenti minimizasyon teknikleri 41
Şekil 4.9: (a) kaykısız mıknatıslar, (b) klasik kaykılı mıknatıslar, (c) üçgen şekilli kaykı (d) paralel kenarlı mıknatıs, (e) yamuk biçimli kaykı, (f) dairesel kaykılı mıknatıs, (g) çift kaykılı mıknatıs 42
Şekil 4.10: Birbirine göre ötelenmiş iki farklı EASM motor rotor şeması 42
Şekil 4.11: a) kaykısız fan tipi 140/180 rotor, (b) kaykısız fan tipi 120/180 derecelik rotor, (c) yuvarlak mıknatıslı rotor, (d) üçgen mıknatıslı rotor 43
Şekil 4.12: Birbirine göre ötelenebilen EASM motor rotoru 44
Şekil 4.13: Moment transduseri ile milleri eksenlenmiş ölçüm düzeneği 44
Şekil 4.14: SM motorunun tahrik motoruna kayışla bağlandığı ölçüm düzeneği 45
Şekil 4.15: Ağırlık ile serbest düşme yaptırılarak vuruntu momentinin ölçülmesi ... 45
Şekil 4.16: SMFDA motoru deney düzeneği 45
Şekil 4.17: SMFDA motoru vuruntu momenti değişimi (140/180 derecelik fan tipi mıknatıslı rotor yapısı) 47
Şekil 4.18: Fan tipi 140/180 derecelik rotorun (a) SEA vuruntu momenti-rotor pozisyonu grafiği (b) test verisi vuruntu momenti-zaman grafiği 47
Şekil 4.19: EASM motorun 500 rpm'de açık devre faz geriliminin fan tipi (140°) mıknatıs için görünümü (a) seri bağlantı (prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (b) paralel bağlantı (prob 20V, osiloskop 0.5V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (rotor = 0 derece) 48
Şekil 4.20: EASM motorun 500 rpm'de açık devre faz arası geriliminin fan tipi (140°) mıknatıs için görünümü (a) seri bağlantı (prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5 ms time/div kademesindedir), (b) paralel bağlantı (prob 20V, osiloskop 0.5V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (rotor = 0 derece) 48
Şekil 4.21: EASM motorun 500 rpm de açık devre faz geriliminin yuvarlak mıknatıs için görünümü (a) seri bağlantı (prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (b) paralel bağlantı (prob 20V, osiloskop 0.5V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (rotor konumu = 0 derece) 49
Şekil 4.22: EASM motorun 500 rpm'de açık devre faz arası geriliminin yuvarlak mıknatıs için görünümü (a) seri bağlantı (prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (b) paralel bağlantı (prob 20V, osiloskop 0.5V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (rotor konumu = 0 derece) 49
Şekil 4.23: Yuvarlak mıknatıslı rotorun (a) SEA vuruntu momenti-rotor pozisyonu grafiği (b) test verisi vuruntu momenti-zaman grafiği 50
Şekil 4.24: Yuvarlak mıknatıslı rotorun (a) SEA vuruntu momenti-rotor pozisyonu grafiği (b) test verisi vuruntu momenti-zaman grafiği 50
Şekil 4.25: EASM motorun 500 rpm'de açık devre faz geriliminin fan tipi (120°) mıknatıs için görünümü (a) seri bağlantı (prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (b) paralel bağlantı (prob 20V, osiloskop 0.5V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (rotor konumu 0 derece) 51

Şekil 4.26: EASM motorun 500 rpm'de açık devre faz arası geriliminin fan tipi (120°) mıknatıs için görünümü (a) seri bağlantı (prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (b) paralel bağlantı (prob 20V, osiloskop 0.5V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (rotor konumu 0 derece)..... 51
Şekil 4.27: EASM motorun 500 rpm'de açık devre faz geriliminin üçgen mıknatıs için görünümü (a) seri bağlantı (prob 20 V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (b) paralel (prob 20V, osiloskop 0.5V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (rotor konumu 0 derece)..... 52
Şekil 4.28: EASM motorun 500 rpm'de açık devre faz arası geriliminin üçgen mıknatıs için görünümü (a) seri bağlantı (prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (b) paralel bağlantı (prob 20V, osiloskop 0.5V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (rotor = 0 derece) 52
Şekil 4.29: Üçgen şekle sahip mıknatıslı rotorun farklı kenar açıları için vuruntu momentinin değişimi (SEA) 53
Şekil 4.30: Üçgen şekle sahip mıknatıslı rotorun vuruntu momenti-zaman grafiği (test verisi) 53

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1: SMFDA ve DA motorunun karşılaştırılması..... 5
Tablo 3.1: Sargıların altı adımlı komütasyonu..... 22
Tablo 3.2: Sekiz kutuplu EAAKSM motoru sargıları altı adımlı komütasyonu..... 25
Tablo 3.3: TMS320F2812 DSP port sekiz, pin konfigürasyonu 28
Tablo 4.1: EASM motorun ayrı ayrı seri ve paralel bağlanan stator sargıları için 500 ve 1000 rpm'deki gerilim değerleri 46

SİMGELER ve KISALTMALAR

B	:	Sürtünme katsayısı, (N/rad/s)
E	:	Elektromotor kuvveti, (V)
e_a	:	A fazı elektromotor kuvveti, (V)
e_b	:	B fazı elektromotor kuvveti, (V)
e_c	:	C fazı elektromotor kuvveti, (V)
f	:	Frekans, (Hz)
I	:	Akım, (A)
I_d	:	Doğru akım, (A)
i_a	:	Stator a faz akımı, (A)
i_b	:	Stator b faz akımı, (A)
i_c	:	Stator c faz akımı, (A)
J	:	Atalet momenti, ($kg.m^2$)
K	:	Katsayı sabiti,
K_E	:	Elektriksel katsayı sabiti,
K_L	:	Yük katsayı sabiti,
K_T	:	Mekanik katsayı sabiti,
L	:	Endüktans, (H)
L_a	:	Stator a fazı sargı öz endüktansı, (H)
L_b	:	Stator b fazı sargı öz endüktansı, (H)
L_c	:	Stator c fazı sargı öz endüktansı, (H)
L_{ab}	:	Stator a-b fazları karşılıklı endüktansları
L_{bc}	:	Stator b-c fazları karşılıklı endüktansları
L_{ca}	:	Stator c-a fazları karşılıklı endüktansları, (H)
L_s	:	Stator endüktansı, (H)
M	:	Karşılıklı endüktansı, (H)
N	:	Rotor kutup sayısı,
P_{in}	:	Giriş gücü, (W)
P	:	Kutup sayısı
R	:	Direnç, (ohm)
R_a	:	Stator a fazı direnci, (ohm)
R_b	:	Stator b fazı direnci, (ohm)
R_c	:	Stator c fazı direnci, (ohm)
R_s	:	Stator direnci, (ohm)
t	:	Zaman, (s)
T_{cog}	:	Vuruntu moment, (Nm)
T_e	:	Elektromanyetik moment, (Nm)
T_{eb}	:	Anma momenti, (Nm)
T_k	:	Vuruntu moment k'inci harmoniği, (Nm)
T_L	:	Yük, (Nm)
V	:	Gerilim, (V)
V_{as}	:	Stator a fazı gerilimi,
V_{bs}	:	Stator b fazı gerilimi,
V_{cs}	:	Stator c fazı gerilimi, (V)

V_d	:	Doğru akım devresi gerilimi, (V)
V_z	:	Faz zıt elektromotor kuvveti, (V)
X	:	Reaktans, (ohms)
θ_m	:	Rotor mekanik açısı, (rad)
ω	:	Açısal hız (rad/s)
ω_m, Ω_m	:	Rotor mekanik hızı, (rad/s)
ω_r	:	Rotor elektriksel hızı, (rad/s)
φ_k	:	K'inci harmoniğin faz açısı
AA	:	Alternatif akım, (A)
DA	:	Doğru akım, (A)
EMK	:	Elektro motor kuvveti, (V)
rpm	:	Dakikadaki devir sayısı
DSP	:	Digital signal processor
EAAKSM	:	Eksenel akılı alan kontrollü sürekli mıknatıslı
EASM	:	Eksenel akılı sürekli mıknatıslı
IGBT	:	Insulated gate bipolar transistor
PI	:	Proportional, integral
SEA	:	Sonlu elemanlar analizi
SGM	:	Sinyal genlik modülasyonu
SM	:	Sürekli mıknatıslı
SMFDA	:	Sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım

SÜREKLİ MIKNATISLI EKSENEL AKILI DİSK MOTORLARDA HIZ KONTROLÜ VE MOMENT KALİTESİNİN İNCELENMESİ

Erdem ÖZYURT

Anahtar Kelimeler: Sürekli Mıknatıslı Motor, Sürekli Mıknatıslı Eksenel Akılı Disk Motor, DSP, PI Hız Kontrol, Vuruntu Momenti, Mıknatıs Kaykı.

Özet: Bu çalışmada, Sürekli Mıknatıslı Eksenel Akılı Disk motorunun hız kontrolü yapılmış ve moment kalitesi incelenmiştir. İki aşamadan oluşan çalışmada, öncelikle hız kontrolü deney düzeneği oluşturulmuş ve hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sonraki aşamada ise TUBİTAK destekli proje ile özel olarak üretilen farklı bir Sürekli Mıknatıslı Eksenel Akılı Disk motorda kaykı yöntemi kullanılarak moment kalitesi incelenmiştir.

İlk kısımda, PI yönteminden faydalanılarak konum geri beslemeli hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde TMS320F2812 DSP kontrol kartı ve CS-IIB sürücüsü kullanılmıştır. MATLAB/SIMULINK ortamında tasarlanan kontrol programı CODE COMPOSER STUDIO yazılımında derlenmiştir. Farklı PI katsayıları denenerek bozucu bir etkiyle karşılaşılmadan doğrusal hız kontrolü başarıyla gerçekleştirilmiştir.

İkinci kısımda ise sürekli mıknatıslı motorlarda moment kalitesine etkisi büyük olan vuruntu momenti detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sürekli mıknatıslardan kaynaklanan EMK ile stator oluklarındaki manyetik harmoniklerin etkileşiminden ortaya çıkan bu bozucu etki, üretilen toplam momentte dalgalanmalara neden olmakta, özellikle düşük hızlarda hız ve konum kontrolünü güçleştirmektedir. Bu etkiyi minimuma indirebilmek amacıyla kaykısız, üçgen mıknatıslı ve yuvarlak mıknatıslı rotor tipleri incelenmiştir ve rotorlar üretilmiştir. Elde edilen laboratuvar ölçümleri ile üç boyutlu sonlu elemanlar analizlerinin uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Kaykısız mıknatıslı yapıya göre üçgen mıknatıslı rotorda %87.5 oranında vuruntu momentinin azaltılabileceği gösterilmiştir.

SPEED CONTROL OF AN AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET DISC MOTOR AND TORQUE QUALITY INVESTIGATION

Erdem ÖZYURT

Keywords: Permanent Magnet Motor, Axial Flux Permanent Magnet Disc Type Motor, DSP, PI Speed Control, Cogging Torque, Magnet Skew.

Abstract: In this work, speed control of an Axial Flux Permanent Magnet Disc Type motor is accomplished and the torque quality of the motor is investigated. Firstly, experimental system is set up and speed control of the motor is carried out. Then, torque quality of a different axial gap permanent magnet motor is investigated using various magnet skewing techniques.

In the first section, PI control is utilized for position feedback speed control. TMS320F2812 DSP board and CS-IIB driver is used in experimental system setup. Control program is generated on MATLAB/SIMULINK environment, and then compiled with CODE COMPOSER STUDIO. Linear speed control of the motor is successfully completed by experimenting different PI gains.

In the second section, cogging torque which has a big influence on torque quality of permanent magnet motors is investigated in detail. This torque component, which is created by the interaction between the rotor MMF and stator slot harmonics, causes torque ripples on the output torque and this makes position control difficult at especially at low speeds. To reduce this detrimental effect, four different rotor structures with fan shaped, triangular shaped and round magnets are produced. The laboratory results are in good agreement with the finite element simulations. It was found out that the rotor with triangular skewed magnets have 87.5% less cogging torque component than the fan shaped unskewed structure.

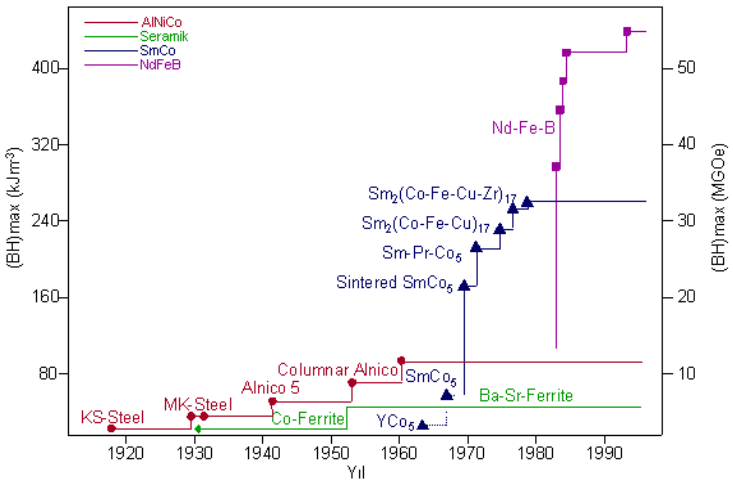
BÖLÜM 1. GİRİŞ

Elektrik motorları, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren aygıtlar olarak tanımlanırlar. Hayatımızın her alanına girmiş olan bu cihazlar, endüstriyel kullanımdan evsel kullanıma kadar mekanik enerjinin ihtiyaç olduğu birçok alanda yüzyılı aşkın zamandır kullanılmaktadırlar.

Çalışma alanlarına ve gereksinimlere göre elektrik motorları doğru akım (DA) ve alternatif akım (AA) olarak iki ana gurupta sınıflandırılırlar. DA makinaları fırçalı-fırçasız, alan sargılı-sabit mıknatıslı olarak guruplara ayrılmakta ve üretilmektedir. AA makinalar ise asenkron ve senkron olarak iki temel alana ayrılırlar. Bunlar arasında senkron makinalar çok geniş bir motor ailesi olmakla birlikte günümüzde en fazla çalışmanın yapıldığı motorlardır. Sürekli mıknatıslı motorlar bu guruba ait motorlardır. Şekil 1.1'de gösterildiği gibi sürekli mıknatıslı motorlar 1900'lü yılların ortalarından itibaren hayatımıza girmiş, özelliklede 1980'li yılların başlarında nadir topraklı (NdFeB ve SmCo) mıknatısların keşfedilmesi ile daha çok yaygınlaşmıştır.

Sürekli mıknatıslı motorlar, ev aletleri, otomotiv, havacılık, medikal endüstrisi ve robot-otomasyon endüstrisinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bunu da göstermiş oldukları karakteristik özelliklerle sağlamaktadırlar. Bu özellikler ana hatlarıyla aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Sahip olduğu moment-hız karakteristiği.
- Yüksek verimlilikte çalışmaları.
- Uzun çalışma ömürlerine sahip olmaları.
- DA ve asenkron motorlara göre moment yoğunluklarının yüksek olması.
- Bakım gerektirmemeleri.



Şekil 1.1: Sürekli mıknatıs malzemelerin tarihsel gelişimi [1]

Sürekli mıknatıslı makinalar yapı olarak alternatif akım makinalarına benzemektedirler. Bilindiği gibi alternatif akım motorlarında endüvi ve uyarma sargıları olmak üzere iki ana sargı bulunur. Bu sargılar farklı şekillerde beslenerek, motorda dönme hareketi için gereken akıyı oluştururlar. Sürekli mıknatıslı makinalarda gerekli akı sargı yerine rotordaki sürekli mıknatıs malzeme üretilir. Sürekli Mıknatıslı Makinalar trepozoidal ve sinüzoidal olarak iki alt guruba ayrılırlar. Trapezoidal tip olarak ifade edilen makinalar Sürekli Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım (SMFDA) makinaları olarak adlandırılır. Sinüzoidal olanlar ise Sürekli Mıknatıslı Sinüzoidal Alternatif Akım motorları olarak isimlendirilirler. Yapılan çalışmada odaklanılan motor türü SMFDA motorudur.

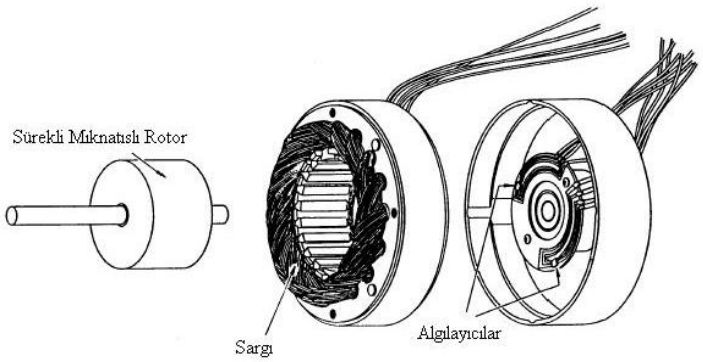
Çalışmayı içerik olarak özetlersek, giriş bölümünde sürekli mıknatıslı makinalar ve öne çıkan özelliklerinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde SMFDA motorlarının tanımı, özellikleri ve çeşitleri yer almaktadır. Bunlarla birlikte SMFDA motorlarının çalışması ve kontrolü hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, disk şekilli SMFDA motoru PI hız kontrolünün gerçekleştirildiği sistem ve sonuçları yer almaktadır. Dördüncü bölümde, 108E051 no.'lu TÜBİTAK projesi kapsamında tasarlanarak üretilmiş iki rotor tek statorlu SMFDA disk motorunun farklı kaykı yöntemleri ile vuruntu momentinin incelenmesi ve minimizasyonu çalışması, bulunmaktadır. Son bölümde yapılan çalışmaların özeti, çıkarılan sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2. SÜREKLİ MIKNATISLI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI

2.1. Giriş

SMFDA motoru ilk olarak 1962'de T.G. Wilson ve P.H. Trickey' in " DC Machine with Solid State Commutation" adlı çalışmalarında ortaya çıkmıştır. Ancak o günün teknoloji şartları altında 5 beygirden büyük endüstriyel motorlar bir süre sadece pratikte var olmaktaydılar. 80'li yılların başlarında yüksek güçteki sürekli mıknatıs malzemeleri ve yüksek gerilim transistörleri alanında yapılan çalışmalar ve buluşlar sonrası bu tip motorlar ve kontrolü çok daha geniş bir şekilde incelenmeye başlanmış ve birçok alanda hayatımıza girmiştir [2].

SMFDA motoru yapı olarak, statoru birbirine ard arda yerleştirilmiş silisli lamineler, oluklara yerleştirilmiş sargılardan ve sürekli mıknatıslara sahip bir ya da daha çok rotordan oluşmaktadır (Şekil 2.1). Genel olarak statorları asenkron motorların statoruna benzemekle beraber sargılar farklı şekillerde sarılabilmektedir. Stator gövdesindeki boşluklardan geçen bobinler bir araya gelerek stator sargısını meydana getirmekte ve stator etrafında kutup çiftleri halinde dağılmaktadır.



Şekil 2.1: SMFDA motoru

Çoğu SMFDA motoru yıldız şeklinde bağlanmış üç adet stator sargısına sahiptir. Sürekli Mıknatıslı Alternatif Akım motorlarda sargılar stator boyunca sinüzoidal olarak dağılırlar ve sinüzoidal formda EMK üretirler. SMFDA motorlar ise stator sargıları trapezoidal biçimde dağılır ve endüklenen EMK trapezoidal formdadır. Bu amaçla SMFDA motoru stator sargıları kutup ayaklarının altına yığılmış biçimde yer alır [3].

Rotorda ise sürekli mıknatıs olarak çoğunlukla Neodmiyum Demir Bor (NdFeB) tip nadir toprak mıknatıslar kullanılmaktadır. Ayrıca Samaryum Kobalt (SmCo) gibi az bulunur ve pahalı mıknatıslar da küçük boyutlarda yüksek manyetik alan yoğunluklarına ulaşılabilmektedir. Bu tip mıknatıslar özellikle uzay ve havacılık uygulamalarında kullanılmaktadır. Kullanılan kutup sayısı ve mıknatısın cinsi, elde edilmek istenen manyetik alan yoğunluğuna göre değişmektedir.

SMFDA motorlarının öne çıkan özellikleri; asenkron ve klasik DA motorlara göre yüksek moment-güç yoğunluğuna sahip olmaları, yüksek verimlilikte çalışmaları, güvenilirliklerinin yüksek olması ve fırçasız olmalarının getirdiği bazı üstünlükler olarak sıralanabilirler. SMFDA motorlarının sahip olduğu özellikler klasik DA motorlarına göre karşılaştırılarak daha iyi anlaşılabilmektedir (Tablo 2.1).

2.2. SMFDA Motorlarının Yapısı

Sürekli mıknatıslı motorlar kendi aralarında da rotor yapısına ve kullanım alanına göre sınıflandırılmaktadırlar. SMFDA motorlarını yapı olarak dört grupta tanımlanabilir:

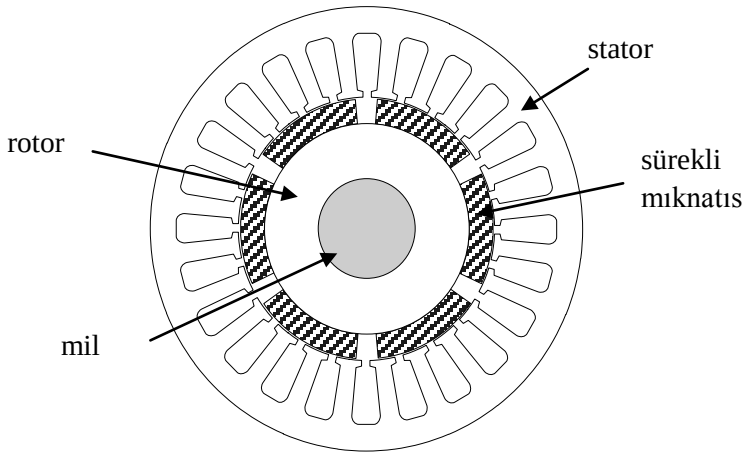
- Yüzey mıknatıslı (Surface magnet)
- Yüzeye gömülü mıknatıslı (Inset magnet)
- Dahili mıknatıslı (Interior magnet)
- Hava boşluklu sargılı (Air gap winding)

Tablo 2.1: SMFDA ve DA motorunun karşılaştırılması [3]

	SMFDA Motoru	**DA Motoru**
Komütasyon	Elektronik komütasyon.	Mekanik komütasyon.
Bakım	Fırça olmaması nedeniyle daha düşük bakım ihtiyacı gerektirir.	Fırça kayıpları nedeniyle periyodik bakım gerekir.
Hız-Moment Karakteristiği	Her hızda nominal yük altında çalışabilir.	Yüksek hızlarda fırça sürtünmesi artarak istenen momente ulaşılamaz.
Verimlilik	Fırça ve rotor sargısı olmadığından demir ve bakır kaybı daha az olduğundan verimlilik yüksektir.	Orta seviyede verimlidir.
Boyut-Elde Edilen Güç	Sargıların statorda olmasıyla soğutma daha iyi olmakta ve DA motorlara göre daha küçük boyutlarda aynı güç elde edilmektedir.	Sargıların rotorda olması ve hava boşluğunun da etkisiyle ve de fırçalar nedeniyle SMFDA motorlarına göre daha çok ısı aşığa çıktığından, boyut-güç performansı daha kötüdür.
Atalet	Daha düşüktür. Rotordaki sürekli mıknatıslar daha iyi bir dinamik yapı sağlar.	Rotor sargılarından dolayı daha yüksektir.
Çalışma Hız Aralığı	Mekanik bir temas olmadığından daha yüksektir.	Fırçalar nedeniyle sınırlıdır.
Çalışma Gürültüsü	Düşüktür.	Fırça teması sırasında arklar oluşur ve daha gürültülüdür.
Üretim Maliyeti	Sürekli mıknatısların maliyetinin yüksek olması ve elektronik kontrol sistemi gereksinimi üretim maliyetlerini arttırmaktadır.	Daha basit yapıda olduğundan ucuzdur.
Kontrol Gereksinimleri	Motorun çalışması için sürücü sistemine ihtiyaç vardır. Aynı kontrol sistemi farklı hızlarda çalışması için de kullanılabilir.	Sürekli bir hızda çalışması için bir sürücü sistemine ihtiyaç olmadan çalışır. Ancak farklı hızlarda çalıştırılırken kontrol sistemine ihtiyaç duyulur.
Moment Yoğunluğu	Yüksektir.	Düşüktür.

2.2.1. Yüzey mıknatıslı SMFDA motorları

Şekil 2.2'de 4 kutuplu yüzey mıknatıslı SMFDA motorunun kesiti görülmektedir. Görüldüğü gibi mıknatıslar rotor yüzeyi üzerinde yer almaktadır. Sürekli mıknatıslar rotora yapıştırılarak ya da yüksek hızlardaki çalışmalarda mıknatıs savrulmalarını engellemek amacıyla bir bilezikle rotora tutturularak sabitlenirler. Yapılan hız kontrolü sisteminde de yüzey mıknatıslı SMFDA motoru kullanılmıştır.



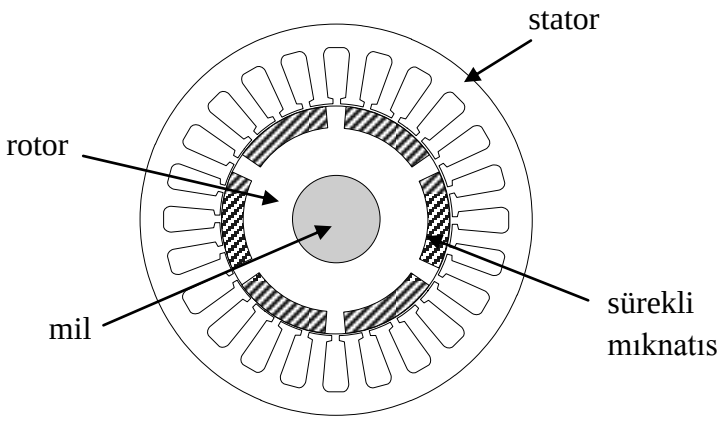
Şekil 2.2: Yüzey mıknatıslı SMFDA motoru

Yüzey mıknatıslı SMFDA motorları stator olukları ve sargı yapısı olarak klasik asenkron motorlarına bezerler. Motorun stator gövdesini oluşturan ferromanyetik yaprakların malzeme cinsi ve kalınlığı çalışma frekansı ve istenen verimliliğe göre değişmektedir. Ayrıca kullanılan sürekli mıknatıs malzemenin kalitesi attıkça daha yüksek verimlilik ve güç yoğunlu elde edilmektedir. Yapılan çalışmada kullanılan motordaki mıknatıs türü NdFeB'dir.

Bu tip motorlarda sürekli mıknatıslar hava boşluğuyla çevrelenmiştir ve stator akısının oluşturduğu manyetomotor kuvvetinin harmoniklerine maruz kalmaktadırlar. Dolayısıyla yüzey mıknatıslı motorlarda bir miktar mıknatıs kayıpları meydana gelmektedir.

2.2.2. Yüzeye gömülü SMFDA motorları

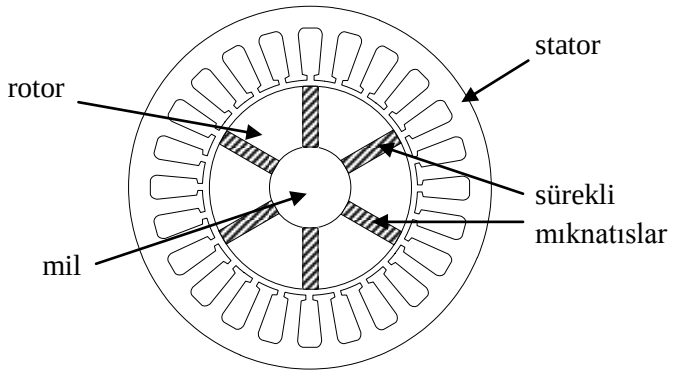
Bu tip motorlar Yüzey Mıknatıslı SMFDA motorlarına göre tek farkı mıknatıslarının rotor yüzeyi üzerindeki oluklara gömülü olmasıdır (Şekil 2.3). Böylece mıknatıs kutupları havayla daha az temas halinde olarak, yüzey mıknatıslı motorlara göre mıknatıs kayıpları biraz daha azalmaktadır. Ayrıca d ve q eksen endüktansları arasında yaratılan küçük fark sayesinde yüzey mıknatıslı motora göre daha yüksek hızlara çıkmak mümkündür.



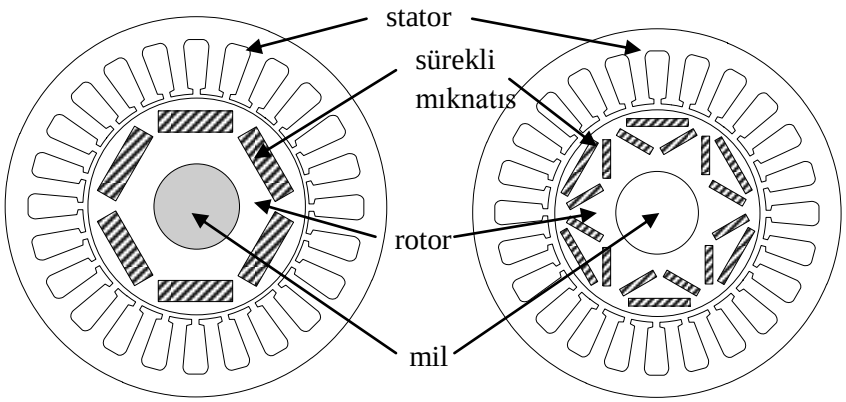
Şekil 2.3: Yüzeye gömülü SMFDA motoru

2.2.3. Dahili mıknatıslı SMFDA motorları

Dahili tip mıknatıslar, yüzey mıknatıslı ve yüzeye gömülü mıknatıslı motorların bazı eksikliklerini gidermek amacı ile yapılmışlardır. Rotorlarındaki dahili mıknatıs dizaynı sayesinde mıknatıslar stator harmoniklerinden büyük derecede korunmuş olurlar. Bu tip motorların akı yoğunlaşmalı ve gömülü tip olmak üzere çeşitleri mevcuttur. Şekil 2.4'de akı yoğunlaşmalı SMFDA motoru görülmektedir. Bu tip motorlarda motorda oluşan akı hava boşluklarından mıknatıslara radyal biçimde geçerler. Rotorun merkez noktası ise kısa devreyi engellemek amacıyla mıknatıslanmaz malzemeden olmaktadır. Kutup sayısı tipik olarak yüzey mıknatıslılara göre fazladır. Yüzey mıknatıslı motorlardaki kadar mıknatıs alanı elde etme ihtiyacı, rotor içine çok sayıda mıknatıs kutup çifti yerleştirilerek giderilmiştir. Gömülü mıknatıslı motorlar (Şekil 2.5) ise rotorlardaki sürekli mıknatıslara doldurulmasından elde edilmektedir.



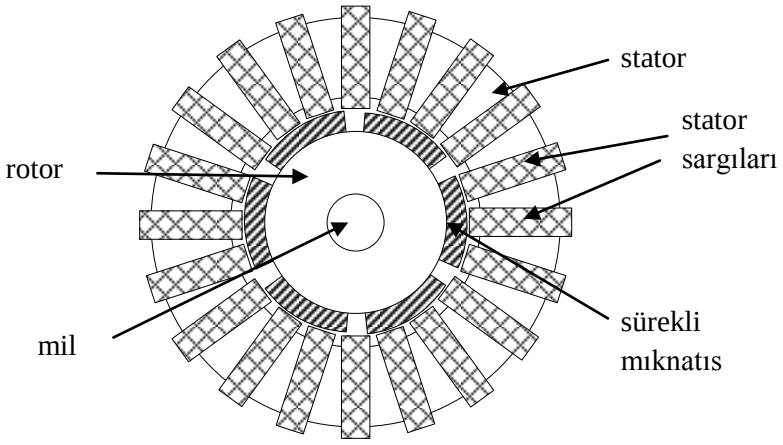
Şekil 2.4: Akı yoğunlaşmalı SMFDA motoru



Şekil 2.5: Dahili SMFDA motoru

2.2.4. Hava boşluklu SMFDA motorları

Hava boşluklu stator sargılılarına sahip motor kesiti Şekil 2.6'da görülmektedir. Yüzey mıknatıslı bu motorlarda, modern mıknatıs türlerinin hava ile çok az derecede etkileşime girmesi özelliğinden yararlanılmıştır. Bu sayede stator olukları hava boşluğu ve bu nedenle ortaya çıkan harmonikler ortadan kaldırılmış olur. Hava boşluklu sargılı SMFDA motorları bahsedilen diğer motorların statorlarına göre de daha basit bir yapıya sahiptir. Bu tip motorlarda tipik SMFDA motorlarından farklı olarak sargıların kullanılmasına olanak sağlanır. Ayrıca, yapısı dolayısıyla, vuruntu momenti denen sürekli mıknatıslar ile stator oluklarının etkileşiminden doğan istenmeyen etki bu motor türünde yoktur.



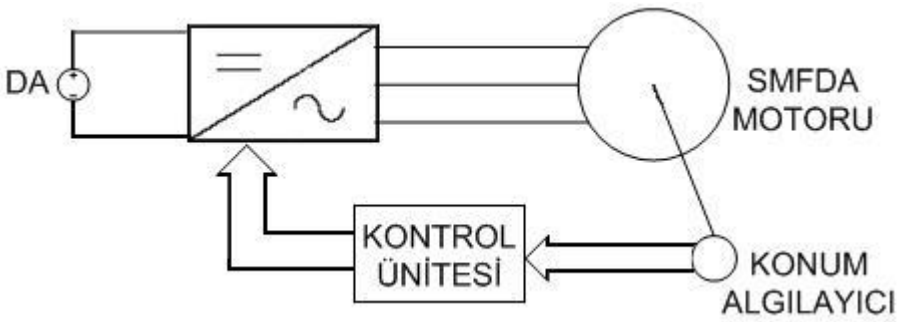
Şekil 2.6: Oluksuz hava sargılı SMFDA motoru

2.3. SMFDA Motorlarının Çalışması

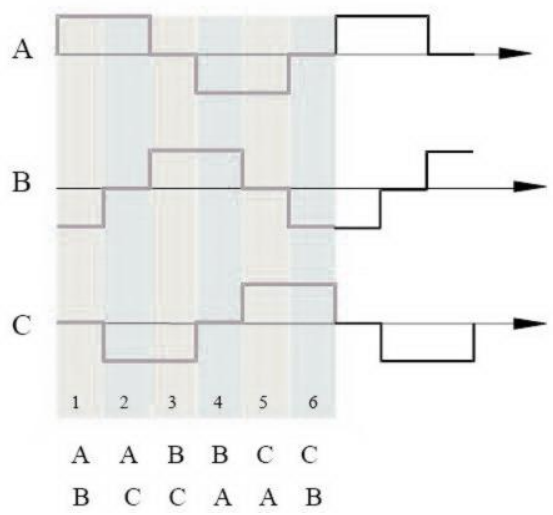
SMFDA motorları klasik doğru akım motorları ya da asenkron motorlar gibi doğrudan güç kaynağına bağlanarak çalıştırılamazlar. Bunun için bir sürücü sistemine ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 2.7). İki ve daha çok fazlı çeşitleri bulunan bu motorların, üç fazlı tipleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

SMFDA motoru bir DA güç kaynağının stator faz sargılarının mikrodenetleyici kontrolünde bir güç elektroniği devresi üzerinden tetiklenmesiyle çalışmaktadır. Sürekli mıknatıslar rotor akısını oluştururlar. Enerjilenen stator sargıları da oluşturduğu elektromanyetik alan ile rotor mıknatıslarını çekerek rotorun dönme hareketini sağlarlar. Uygun sırayla stator fazları enerjilenerek döner alanın sürekliliği sağlanır. Döner alanın rotor tarafından takip edilmesiyle motorun çalışması gerçekleşmiş olur.

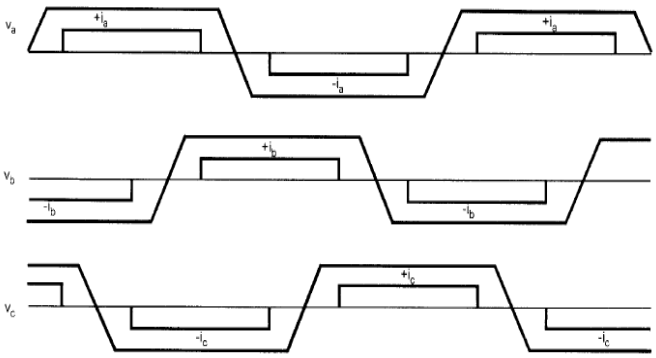
SMFDA motorunun çalışmasını açıklamak için, 3 fazlı bir SMFDA motorunun 6 adımdan oluşan bir komütasyon düzeni ile sürülmesi örnek verilebilir (Şekil 2.8). A, B ve C, SMFDA motorunun sargı fazları olmak üzere, komütasyon faz enerjilenme sırası AB – AC – BC – BA – CA – CB şeklinde olur. Her bir adımda iki faz aktif olmaktadır. Maksimum moment elde etmek amacıyla evirici her 60°'de bir tetiklenir ve böylece zıt EMK ile aynı fazda olması sağlanır. Rotor pozisyonu algılayıcılar ile elde edilerek ya da zıt EMK geçişlerinden faydalanarak tetikleme senkronizasyonu sağlanır. Şekil 2.9'da ise idealdeki i_a, i_b, i_c faz akımları ve sargılarda oluşan e_a, e_b, e_c trapezoidal EMK'lar görülmektedir.



Şekil 2.7: SMFDA motoru algılayıcılı çalışma şeması



Şekil 2.8: Altı adımlı komütasyon düzeni [5]



Şekil 2.9: SMFDA motoru faz akımları ve EMK'ları [5]

2.4. SMFDA Motorlarının Kontrolü

SMFDA motorlarının kontrolü iki aşamadan oluşmaktadır. Öncelikle motorun çalışır hale gelmesi için stator ve rotor akı senkronizasyonu sağlanmalıdır. Sonrasında ise hız ya da moment kontrölü gerçekleştirilir. Stator rotor akı senkronizasyonu konum geri beslemeli ve zıt EMK demodülasyonu yöntemleri ile gerçekleştirilir.

2.4.1. Konum geri beslemeli SMFDA motor kontrolü

Daha önce bahsedildiği gibi SMFDA motor kontrolü için rotor konum bilgisinden yararlanılmaktadır. Algılayıcılar stator sargılarının rotor kutuplarının hareketine göre doğru bir şekilde komütasyonun gerçekleştirilmesi için kontrol birimine gereken

rotor konum bilgisini sağlarlar (Şekil 2.10). SMFDA motor kontrolünde konum algılayıcılarından alan etkili (hall effect) algılayıcılar sıklıkla kullanılmaktadır. Düşük maliyetli alan etkili algılayıcılar oldukça az yer kaplarlar ve motorun içine kolayca yerleştirilebilirler. Ayrıca bu iş için optik (enkoder) ve manyetik bobin tipi (resolver) algılayıcılar da yaygın olarak kullanılmaktadır. Algılayıcı eleman seçiminde maliyet ve motorun çalışma koşulları gibi etkenler göz önünde bulundurulur.

2.4.1.1. Manyetik algılayıcılı kontrol

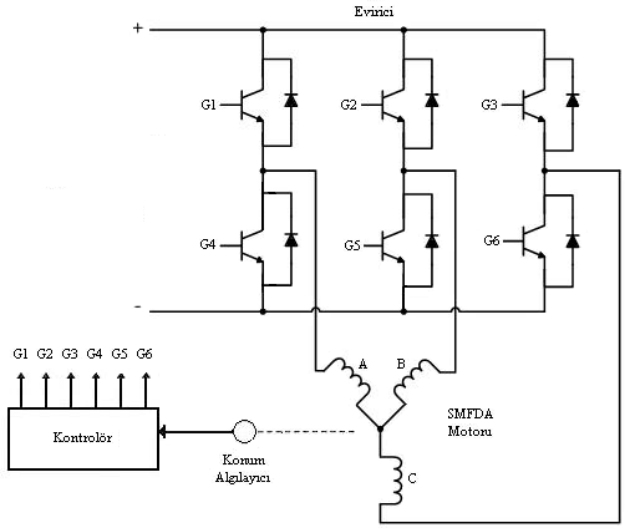
Manyetik algılayıcılar bobin tipinde ya da yarı iletken malzeme tipinde yapılırlar. Yarı iletken malzeme tipinde olan algılayıcılar transistöre benzerler. Pozitif ve negatif faz besleme geçişlerinde lojik '0' ve lojik '1' çıkış verirler. Bu algılayıcılara (Şekil 2.11) enerji verildikten sonra yanına bir manyetik parça yaklaştırıldığında çıkış uçlarında '1' ve '0' dijital bilgisi alınır.

Resolver algılayıcı ise üç adet sargıdan meydana gelmektedir. Bunlardan biri rotorda yer almaktadır, kalan iki bobin ise dikey olarak statora bağlıdır. Rotorda dönen bobin ile zıt EMK diğer bobinlere endüklenir. Endüklenen bu iki sargıdan cos(θ) ve sin(θ) olmak üzere 'θ' rotor pozisyonu elde edilir. Elde edilen rotor pozisyonuna göre de stator sargıları enerjilenerek rotor hareketi sağlanır.

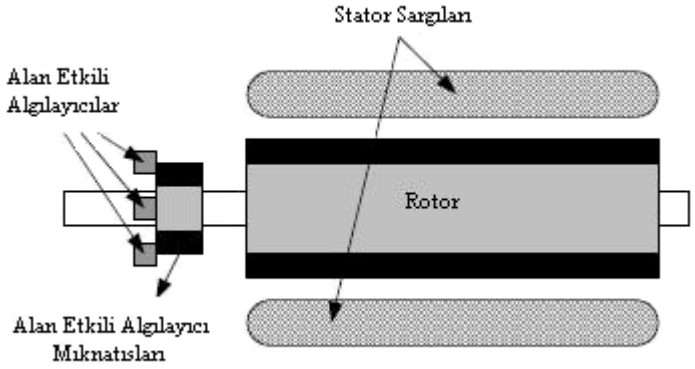
2.4.1.2. Optik algılayıcılı kontrol

Optik algılayıcılı (enkoderli) kontrol sisteminde, foto diyot veya foto transistör algılayıcısı ile kızılötesi led ışık kaynağı kullanılır. Optik algılayıcılar; küçük, hafif, dayanıklı ve yüksek hassasiyettedirler.

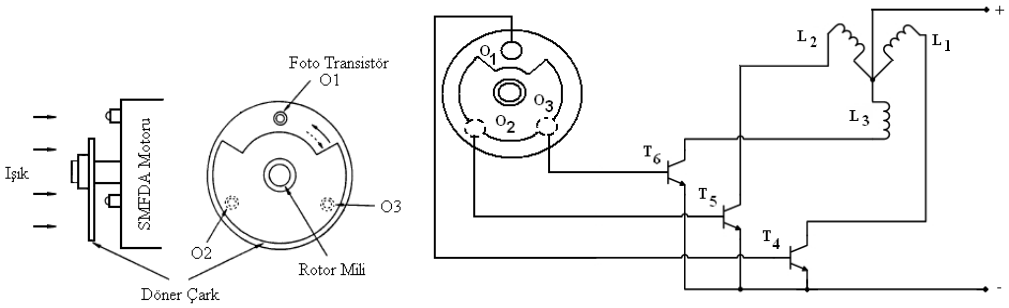
Optik algılayıcılar yardımı ile bir SMFDA motorun kontrolünü yapan devrenin sembolik sürücü devresi görülmektedir (Şekil 2.12). Bu devrede, rotor miline takılan ve stator üzerinde 120°'lik aralıklar ile yerleştirilen foto transistörlerin sadece bir tanesini gören bir boşluk açılmış çark bulunmaktadır.



Şekil 2.10: Konum geri beslemeli kontrol



Şekil 2.11: Alan etkili algılayıcılı SMFDA motoru [3]



Şekil 2.12: Optik algılayıcılı SMFDA motor ve sembolik sürücü devresi

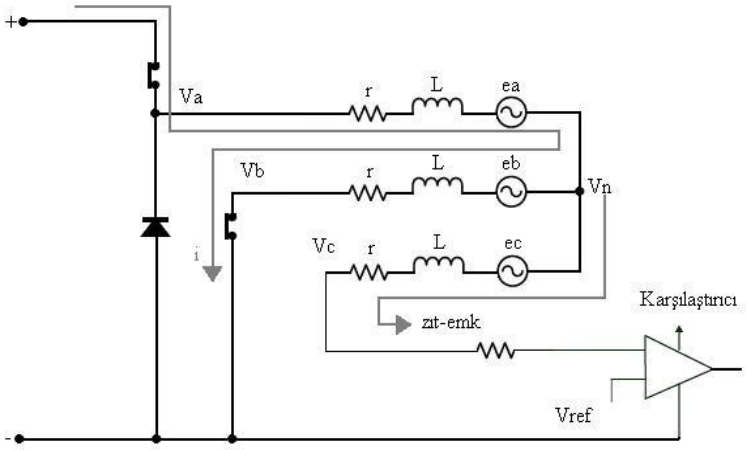
Devrede ilk durumda ışık ilk önce O1 fototransistörü üzerine düşer. Diğer transistörler ve T5, T6 yalıtkandırlar. Ancak O1 sayesinde tetiklemeyi alan T4 iletken olur ve L1 sargısını enerjiler. Böylece L1 sargısının oluşturduğu manyetik alan sürekli mıknatıslı rotoru kendine çeker ve dönen rotor çarkı hareketlendirir.

Çarkın hareket etmesiyle ışık O2'ye düşer. Sonrasında T4 ve T6 yalıtkan, tetikleme alan T5 iletken olur ve L2 sargısını enerjiler. Oluşan yeni manyetik alan sürekli mıknatıslı rotoru kendine çeker. Çark tekrar hareket eder ve ışık O3'e düşer. Bu durumda tetikleme alan T6 iletken olur ve L3 sargısını enerjiler. Bu kez yeni manyetik alan sürekli mıknatıslı rotoru kendine çeker ve bu işlemler çark hareketine bağlı olarak aynı şekilde devam eder.

2.4.2. Zıt EMK demodülasyonlu SMFDA motor kontrolü

Bir diğer kontrol yöntemi ise motorda oluşan zıt EMK'dan faydalanarak gerçekleştirilen motor kontrolüdür. Bu kontrol yöntemi sıfırdan geçiş yöntemi ve Kalman teorisi kullanılmak üzere iki şekilde yapılır. Özellikle son yıllarda bu tip kontrol yöntemleri üzerine çalışmalar yapılmakta ve bu çalışmalarla daha düşük maliyetli, bütünleşik bir kontrol sistemi elde edilmesi amaçlanmaktadır. Üç fazlı bir motorda, her komütasyon periyodunda fazlardan biri pozitif diğeri negatif akım akıtır ve üçüncü faz pasif durumda (sıfır durumunda) kalmaktadır. Motor çalışması sırasında zıt EMK bu pasif olan faz üzerine düşmektedir. Buradan yola çıkarak pasif durumdaki faz zıt EMK'yı ölçmek için kullanılır (Şekil 2.12). Zıt EMK'nın sıfırdan geçtiği nokta, iki komütasyon noktasının tam ortasıdır. Buna göre, sıfır noktasından geçiş gerçekleştiğinde, önceki sıfırdan geçiş noktasına yarı periyot süresi ekleyerek, bir sonraki komütasyonun gerçekleşeceği zaman hesaplanabilir. Bu yöntemin bazı zayıf noktaları vardır. Yüksek hızlarda fazın pasif durumda kaldığı süre kısalacağından, uygun zamanlamayı yapmak zorlaşmaktadır. Yüklü çalışma durumunda aktif fazlardan yüksek değerli akımlar akar. Stator sargıları endüktif karakterli olduğundan, komütasyon zamanlarında evirici devresindeki serbest geçiş diyotlarından geçecek akımlar nedeniyle pasif faz, zıt EMK'yı ölçmek için kullanılamamaktadır. Bundan dolayı, yüksek hızlı ve yüklü çalışma durumlarında sıfırdan geçişi izlemek mümkün olmamaktadır. Kalman filtre teorisinin kullanıldığı çalışmalarda ise motora ait konum, hız ve zıt EMK bilgilerini içeren bir matematik model oluşturulur. Bu model yardımıyla her bir zaman adımında motorun durumunun nasıl değişeceği hesaplanır. Hesaplanan zıt EMK, ölçülen değerle karşılaştırılır ve farka göre motor kontrol değişkenleri ayarlanır. Bu yöntemde sadece sıfır geçişlerinde değil, her zaman adımında motorun konum ve hız hesaplamaları

gerçekleştirilir. Bu sayede daha doğru komütasyon ve dolayısıyla yüksek verim elde edilebilir. Ancak bu yöntemde kontrolün doğru yapılması için motor dinamik modeli çok iyi bir şekilde oluşturulmalıdır.



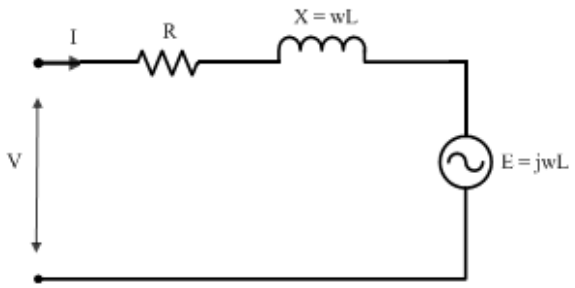
Şekil 2.13: Zıt EMK'nın algılanması

2.5. SMFDA Motoru Matematik Modeli

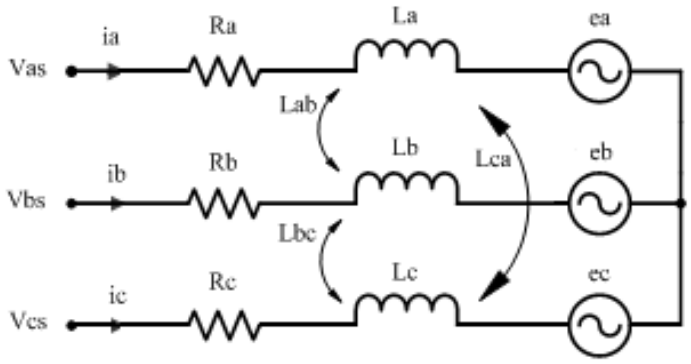
Bu bölümde SMFDA motorlarına ait matematik model yeralmaktadır. Devre Eşitliği 2.1'e göre, Şekil 2.14'de olduğu gibi, elektromotor kuvveti 'E' , açısal frekans 'ω', stator gerilimi 'V', stator direnci 'R' ve 'I' stator akımıdır.

$$V = (R + j\omega L)I + E \tag{2.1}$$

$$\omega = 2\pi f \tag{2.2}$$



Şekil 2.14: SMFDA motorunun bir fazının elektriksel eşdeğer devresi



Şekil 2.15: SMFDA motoru basitleştirilmiş eşdeğer devresi

SMFDA motorunun elektriksel büyüklükler cinsinden (Şekil 2.15) ifadesi [6]:

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

V_{as}, V_{bs}, V_{cs} : Stator faz gerilimleri (V). R_a, R_b, R_c : Faz dirençleri (ohm). i_a, i_b, i_c : Faz akımları (A), L_a, L_b, L_c : Sargı öz endüktansları (H). L_{ab}, L_{bc}, L_{ca} : Stator karşılıklı endüktansları (H). Stator dirençleri R_a, R_b, R_c eşittir ve e_a, e_b, e_c EMK'ları trapezoidal şekildedir. Rotor relüktansının değişmediği düşünülürse;

$$L_a = L_b = L_c = L, \tag{2.4}$$

$$L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} = M, \tag{2.5}$$

M : Karşılıklı endüktanstır. Buradan da ;

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

Faz akımları toplamı sıfır olacaktır.

$$i_a + i_b + i_c = 0, \tag{2.7}$$

$$Mi_b + Mi_c = -Mi_a, \tag{2.8}$$

Olduğundan;

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

Elektromanyetik moment ve mekanik eşitlik aşağıda belirtildiği gibidir :

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_r} \tag{2.10}$$

$$J\left(\frac{2}{P}\right) \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_L \tag{2.11}$$

veya

$$J\left(\frac{d\omega_r}{dt}\right) + B\omega_r = T_e - T_L \tag{2.12}$$

Rotor pozisyonu:

$$\theta_m = \int_0^t \omega_m dt \tag{2.13}$$

Burada T_e elektromanyetik moment (Nm), P kutup sayısı, ω_r rotor elektriksel açısal hızı, J atalet momenti (kg.m^2), T_L yük (Nm), B sürtünme katsayısı (N/rad/s), ω_m rotor mekanik hızı (rad/s), θ_m rotor mekanik açısıdır (rad).

Kararlı durumdaki SMFDA motorunun $2\pi/3$ açılı çalışma modunda, kayıplar gözardı edilerek, giriş gücü ve üretilen moment ifadesi [6]:

$$P_{in} = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c = 2I_d V_z = T_e \omega_m \tag{2.14}$$

Yukarıdaki eşitlikte de P_{in} giriş gücü, I_d doğru akım, V_z Faz zıt EMK'sıdır.

$$T_e = \frac{2I_d V_z}{\omega_m} = \frac{PI_d V_z}{\omega_r} \tag{2.15}$$

Burada P kutup sayısıdır.

$$\omega_m = \omega_r(2/P) \tag{2.16}$$

Şeklinde mekanik ve elektriksel açısal hız ilişkisi vardır.

Zıt EMK'nın hız ile ilişkisi ise:

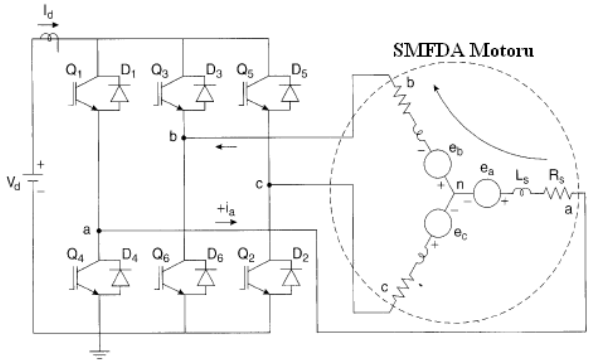
$$V_z = K\omega_r \tag{2.17}$$

K Katsayı sabitidir. Oluşan DA devre eşitliği (Şekil 2.16):

$$V_d = 2R_s I_d + 2V_z \tag{2.18}$$

3.16 ve 3.18 eşitliklerinden:

$$T_e = K_L I_d \tag{2.19}$$



Şekil 2.16: SMFDA motoru eşdeğer devresi [5]

Ve anma momenti T_{eb}:

$T_{eb}=K_l I_d$ ve burada $I_d = I_{sc} = \dfrac{K_l V_d}{2R_s}$ (2.20)

şeklindedir.

BÖLÜM 3. EKSENEL AKILI ALAN KONTROLLÜ SÜREKLİ MIKNATISLI (EAAKSM) DİSK MOTOR HIZ KONTROLÜ

3.1. Giriş

Bu bölümde gerçekleştirilen çalışmalarda 3 fazlı 8 kutuplu (L = 65µH, R = 0,3Ω, 1800 rpm nominal hız ve 1kW gücünde) disk şekilli alan kontrollü eksenel akılı yüzey mıknatıslı elektrik motorunun (Şekil 3.1) hız kontrolü, enkoder ile konum geri beslemesi uygulanarak, PI hız kontrolü gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3). Bu bölümde deney düzeneği tanıtılmış, öncelikle kontrol sisteminin bir basamağı olan stator rotor senkronizasyonu ve diğer basamağı hız kontrol sistemine yerverilmiş, kontrol sistemi elemanları açıklanmış, motor gerilim ve hız ölçümleri gösterilmiştir.

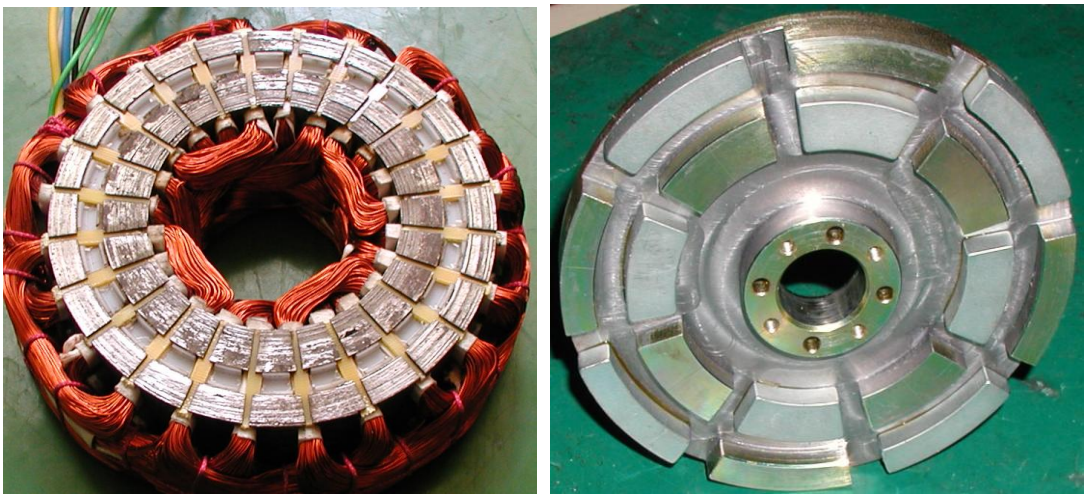
3.2. Eksenel Akılı Alan Kontrollü Sürekli Mıknatıslı (EAAKSM) Motor ve Deney Düzeneği

Eksenel akılı alan kontrollü sürekli mıknatıslı motora (EAAKSM) ait stator ve rotor yapısı Şekil 3.2'de görülmektedir. Statorda DA alan sargısı ve iki set üç faz sargılar yeralmaktadır. DA alan sargıları iki stator halkası arasında bulunmakta ve bu sayede hava boşluğundaki net akının değiştirilebilmesini sağlamaktadır. Stator gövdesinde ise her iki tarafındaki oluklarda üç faz sargılar, aynı mil üzerinde birbirine bakan iki disk yeralmaktadır. Ark şeklinde demir parçaları ve NdFeB mıknatıslar rotor iç yüzeyine yerleştirilmiştir. Rotorda yer alan kutuplar ise bir adet mıknatıs ve DA sargısının mıknatıslayacağı bir adet demir nüveden oluşur.

Şekil 3.3'de görüldüğü gibi soldan sağa olmak üzere, DSP kontrol kartı ve sürücü kartı, EAAKSM motoru, moment transduseri (Şekil 3.4) ve fırçalı DA motoru bulunmaktadır. Bu sistem ile EAAKSM motoru yüksüz durumda iken farklı hızlarda kontrolü gerçekleştirilmiş, hız bilgisi ve EAAKSM motoru sargı faz gerilimleri ölçülmüştür.



Şekil 3.1: EAAKSM motoru

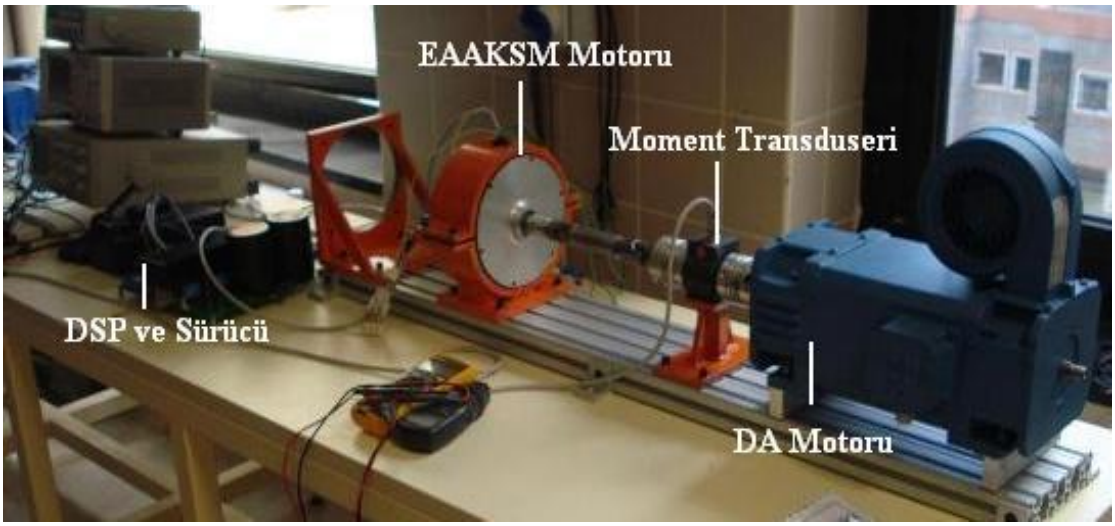


Şekil 3.2: EAAKSM motor stator ve rotoru

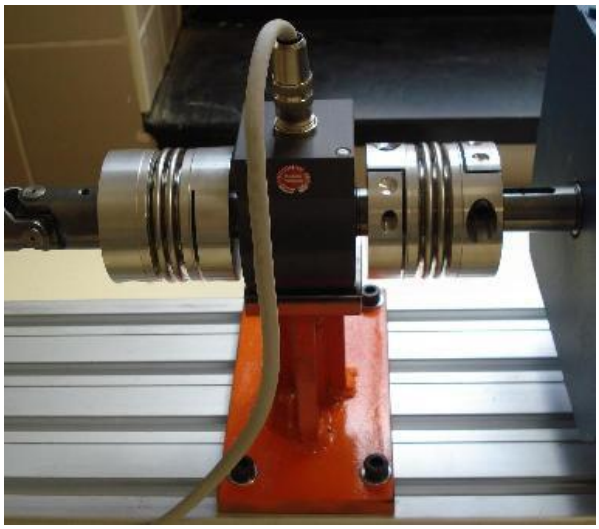
3.3. Stator Rotor Senkronizasyonu

Senkron bir makina olan EAAKSM motorunun stator rotor senkronizasyonunun bölüm 2.4'de çeşitli yöntemlerle sağlandığından bahsedilmişti. Yapılan çalışmada konum geri beslemesi kullanılarak stator rotor senkronizasyonu sağlanmıştır. Enkoder ile rotor pozisyon bilgisi elde edilerek, motor fazları IGBT'ler üzerinden altı adımlı komütasyon düzenine göre senkron bir şekilde sürülmüştür (Tablo 3.1). İki kutuplu bir EAAKSM motoruna göre örnek verilirse, altı adım komütasyonunda rotor pozisyonu 0º başlangıç noktası alınarak gerçekleştirilir. A fazı (+) ve B fazı (-)

enerjilenerek komütasyonun ilk adımı sağlanır. Bu uyarım ile birlikte statorda oluşan manyetik alan rotorun istenen yönde 60º'lik bir pozisyon değiştirmesini sağlar. Sonrasında C fazı (-) enerjilenir ve A fazı (+) durumdadır. Rotor böylece 120º'lik pozisyona ulaştırılır. Bu noktada B fazı (+) duruma getirilir ve C fazı (-) durumdadır. Bu iki fazın uyarımı ile aynı yönde moment üretimi devam etmektedir. Rotor 180º'lik pozisyona geldiğinde A fazı (-) duruma alınır ve B fazı (+) durumundadır.



Şekil 3.3: EAAKSM motoru deney düzeneği



Şekil 3.4: DRBK50-n moment transduseri

Tablo 3.1 Sargıların altı adımlı komütasyonu

	A	B	C
1.	+	-	0
2.	+	0	-
3.	0	+	-
4.	-	+	0
5.	-	0	+
6.	0	-	+

240º'de ise C fazı (+) ve A fazı (-)'dir. 300º'de B fazı (-) ve C fazı (+) durumdadır. Son olarak 360º'de rotor dönüşünü tamamlar ve başlangıçta olduğu gibi A fazı (+) ve B fazı (-) enerjilenerek dönme işlemi sağlanır. Yapılan komütasyon düzeniyle her seferinde iki faz enerjilenir ve her seferde bir fazın konumu değiştirilir. altı adım komütasyon düzeni bu şekilde gerçekleşmektedir.

Yalıpan çalışmada, EAAKSM motoru 8 kutuplu olması dolayısıyla 24 tane komütasyon adımı olacaktır. IGBT girişleri de bu düzene göre aktif edilmiştir. SIMULINK'de kullanılan kontrol fonksiyonu ile IGBT'ler Tablo 3.2'deki komütasyon düzenine göre aktif edilmiştir.

3.4. Hız Kontrol Sistemi

Hız kontrol sistemi özetle, EAAKSM motorunun tam kapasitede çalıştırıldığı düşünülerek açıklanabilir. EAAKSM motoru sargılarına altı adım komütasyonuyla 3 fazlı evirici üzerinden tam kapasite gerilim uygulandığında, motor maksimum hızda çalışacaktır. Sargılardaki akımı azaltmak amacı ile uygulanan sargı gerilimi sinyal genlik modülasyonu ile modüle edilir ve böylece istenen miktarda hız değişimi sağlanmış olur.

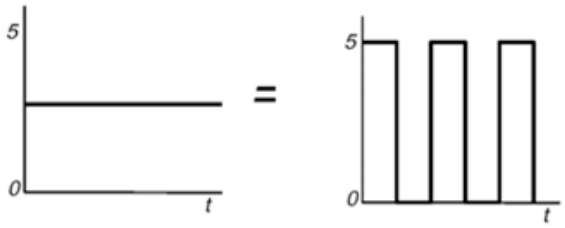
Tablo 3.2: Sekiz kutuplu EAAKSM motoru sargıları altı adımlı komütasyonu

	IGBT Giriş Bit Değerleri							
	Faz C		Faz B		Faz A			Komütasyon Çıkışı
	Q6	Q5	Q4	Q3	Q2	Q1		
1. 6 adımlı komütasyon	00	00	11	00	00	01	=	000011000001
	11	00	00	00	00	01	=	110000000001
	11	00	00	01	00	00	=	110000010000
	00	00	00	01	11	00	=	000000011100
	00	01	00	00	11	00	=	000100001100
	00	01	11	00	00	00	=	000111000000
2. 6 adımlı komütasyon	00	00	11	00	00	01	=	000011000001
	11	00	00	00	00	01	=	110000000001
	11	00	00	01	00	00	=	110000010000
	00	00	00	01	11	00	=	000000011100
	00	01	00	00	11	00	=	000100001100
	00	01	11	00	00	00	=	000111000000
3. 6 adımlı komütasyon	00	00	11	00	00	01	=	000011000001
	11	00	00	00	00	01	=	110000000001
	11	00	00	01	00	00	=	110000010000
	00	00	00	01	11	00	=	000000011100
	00	01	00	00	11	00	=	000100001100
	00	01	11	00	00	00	=	000111000000
4. 6 adımlı komütasyon	00	00	11	00	00	01	=	000011000001
	11	00	00	00	00	01	=	110000000001
	11	00	00	01	00	00	=	110000010000
	00	00	00	01	11	00	=	000000011100
	00	01	00	00	11	00	=	000100001100
	00	01	11	00	00	00	=	000111000000

3.3.1 Sinyal genlik modülasyonu

Sinyal Genlik Modülasyonu (SGM), bir sinyalin frekansının sabit tutularak çevrim zamanın değiştirilmesi esasına dayanır. Kısaca, SGM sinyali sabit periyotlarda dizilmiş değişken genlikli palsler düzenidir. Şekil 3.5'de %50 çevrim zamanına sahip SGM sinyal örneği görülmektedir.,

SGM'de modüle edilen sinyalden daha yüksek frekansta bir taşıyıcı sinyal bulunmaktadır. Taşıyıcı frekans referans alınarak, her periyotta istenen çevrim zamanına göre bir pals üretilir. Burada palslerin genliği her periyotta belli değerler dizisine göre oluşturularak SGM'li sinyal elde edilir. Bu yolla SGM sinyalinden



Şekil 3.5: %50 çevrim zamanlı SGM sinyali

yararlanılarak IGBT'lerin '0' ve '1' konum süreleri kontrol edilir. Uygun çevrim zamanına göre açılıp kapanan IGBT'ler ile stator sargıları üzerine düşen gerilim miktarını değiştirilerek istenen hıza ulaşılır.

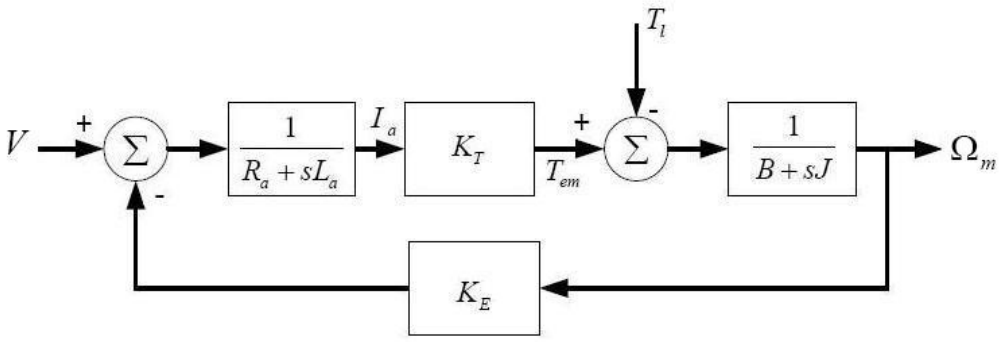
SGM metodunda çevrim zamanı ve taşıyıcı frekansı değerlerine ihtiyaç duyulur. Kullanılacak taşıyıcı frekansı isteğe göre seçilebilir. Esas olan, istenen hızı elde etmek için gerekli çevrim zamanı değeridir. Burada tekrar konum algılayıcılardan yararlanılır. Daha öncesinde bahsedildiği üzere optik algılayıcı ile konum bilgisi elde edildiği gibi buradan hız kontrolünü sağlamak üzere gereken hız bilgisi hesaplanır. Ölçülen hız yüksekse çevrim zamanı düşürlür, ölçülen hız düşükse çevrim zamanı arttırılırılarak SGM kullanılarak hız kontrolü gerçekleştirilir.

3.3.2 PI kontrol modeli

Yapılan çalışmada 8 kutuplu EAAKSM motorunun doğrusal (PI) kapalı çevrim hız kontrolü yapılmıştır. EAAKSM motoru modeli Şekil 3.6'da yeralmaktadır. Buna göre EAAKSM motoru transfer fonsiyonu [7]:

$$\frac{\Omega_m(s)}{V(s)} = \frac{\dfrac{K}{JL_a}}{s^2 + (\dfrac{JR_a + BL_a}{JL_a})s + (\dfrac{BR_a + K_T K_E}{JL_a})} \tag{3.1}$$

Şekil 3.7'deki yer-kök fonksiyonuna göre [8] sistem kararlılık göstermektedir. Yer-kök eğri kutupları ($-R_a/L_a$) ve ($-B/J$) gerçek eksen üzerinde bulunmakta ve K_TK_E değişiminde de kararlı bölgede kalmayı sürdürmektedir. Yapılan çalışmada Şekil 3.8'deki modele göre Şekil 3.9'da görüldüğü gibi SIMULINK kontrol sistemi oluşturulmuştur.

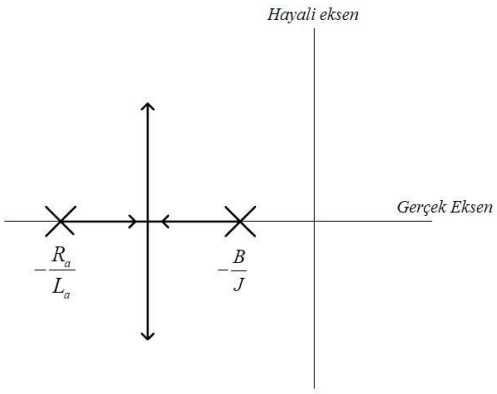


Şekil 3.6: EAAKSM motoru modeli

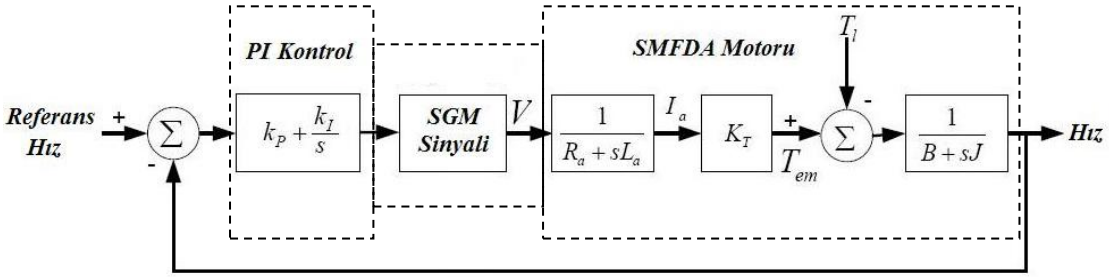
Sistem yapısını açıklamak gerekirse, başlangıç konumunda Tablo 3.2'de görülen düzene göre IGBT komütasyon fonksiyon bloğundan gelen bilgiye göre IGBT çiftleri aktif edilmiştir. 3 faz 8 kutuplu motorda bir mekanik dönüş için 24 adet komütasyon durumu vardır. Buna göre aktif edilen IGBT çiftinden biri 'active low' diğeri 'forced high' durumuna getirilerek PI kontrol bloğundan gelen çevrim zamanına (duty) göre değişen 20 kHz'lik SGM sinyalini uygulanır. Hız hesaplama bloğundan enkoder bilgisi sayıcı okunarak IGBT komütasyon bloğuna gönderilerek uygun komütasyon sağlanır ve buradaki zamanlayıcı ile rotor hızı hesaplanarak PI kontrol bloğuna gönderilir. Bu yolla motor hız kontrolü gerçekleştirilmiştir.

3.3.3 Kontrol sistemi elemanları

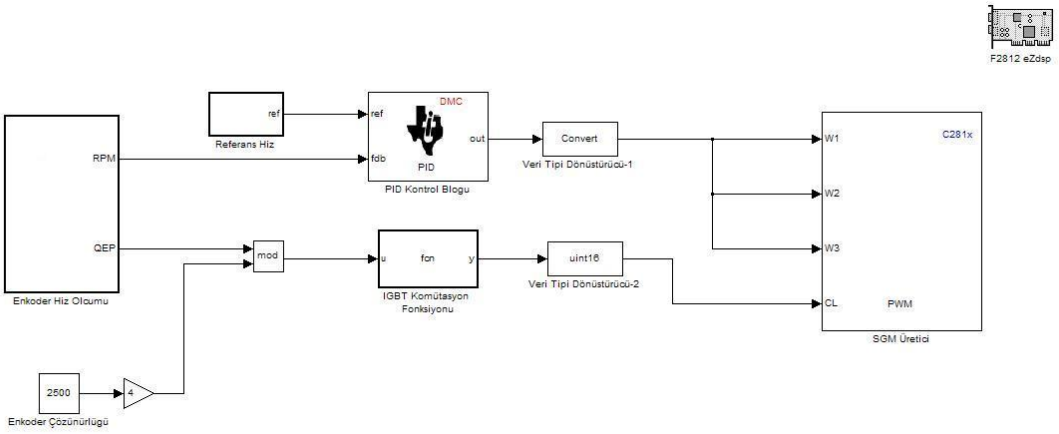
Girişi bölümünde de bahsedildiği gibi yapılan çalışmada EAAKSM motoru hız kontrolü DSP ile sürücü üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte DSP ve Sürücü kartı güç katını izole etmek için optokuplör devresi kullanılmış ve ayırca kömütasyon sırasında oluşabilecek hatalara karşı bir de kurulan lojik devreden faydalanılmıştır.



Şekil 3.7: Klasik bir DA motorun yer-kök ekseni [8]



Şekil 3.8: Klasik bir DA motoru PI kontrol modeli



Şekil 3.9: EAAKSM motoru SIMULINK PI kontrol modeli

3.3.3.1. DSP kontrol kartı TMS320F2812

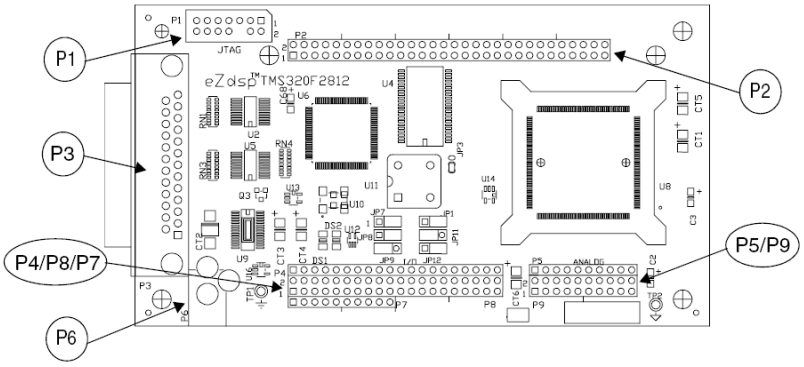
Yapılan çalışmada Texas Instruments'a ait işlemcili TMS320F2812 DSP kontrol kartı kullanılmıştır. Şekil 3.10'da görülen , saniyede 150 milyon işlem kapasiteli bu kart aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- 18K RAM
- 128K flaş RAM
- 64K SRAM
- 30 MHz saat frekansı
- 1'er adet paralel port (P3) ve USB bağlantı için JTAG port (P1)
- 3 adet genel amaçlı giriş çıkış portu (P4, P7, P8)
- 2 adet analog giriş portu (P5, P9)
- 1 adet genişleme portu (P2, birden fazla kontrol kartı birlikte kullanımı için)
- 1 adet güç kaynağı girişi (P6)

SGM çıkışı ve enkoder girşileri P8, analog giriş P9 portundan sağlanmıştır. Tablo 3.3'de P8 için pin konfigürasyonu görüldüğü üzere 6 adet SGM sinyali çıkışı için için 9-14 numaraları arası pinler kullanılmıştır.

3.3.3.2. Sürücü kartı CS-IIB

Gerçekleştirilen kontrol sisteminde sürücü olarak Creative Power'ın CS-IIB modeli kullanılmıştır. Sürücü 15A ve 400V DA seviyelerine kadar çalışmaktadır. 8 adet optik izoleli SGM sürücüsüne ve 4 faz konfigüre edilebilir IGBT tabanlı çıkışa sahiptir Şekil 3.11'de görülen CS-IIB sürücüsünde yer alan X28, X18 ve X23 portları ile DSP bağlantısı yapılmıştır. X28 (Şekil 3.12) portundan DSP'den gelen 6 adet SGM sinyali girişi yapılarak IGBT'ler sürülmüştür.

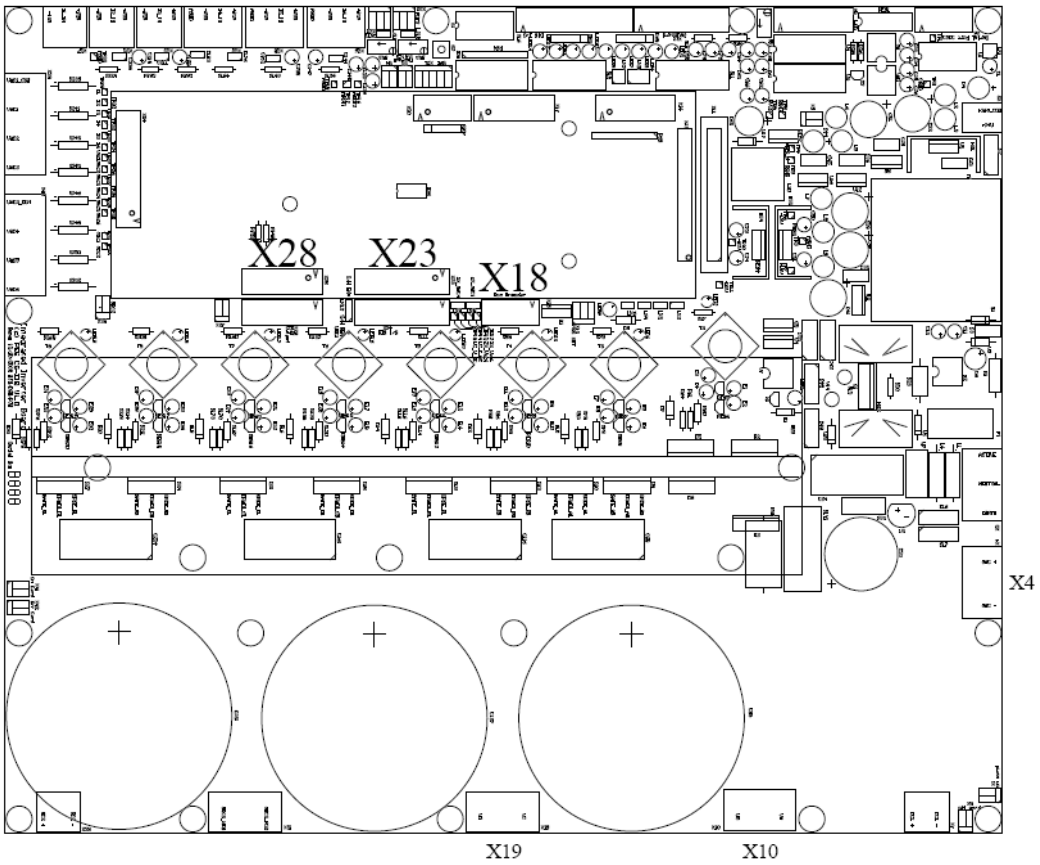


Şekil 3.10: TMS320F2812 DSP kontrol kartı [9]

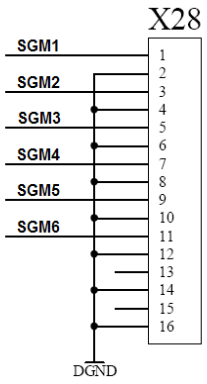
Tablo 3.3: TMS320F2812 DSP port sekiz, pin konfigürasyonu [9]

P8 Pin #	P8 Sinyali	P8 Pin #	P8 Sinyali
1	+3.3V/+5V/NC *	2	+3.3V/+5V/NC *
3	SCITXDA	4	SCIRXDA
5	XINT1n/XBIOn	6	CAP1/QEP1
7	CAP2/QEP2	8	CAP3/QEPI1
9	PWM1	10	PWM2
11	PWM3	12	PWM4
13	PWM5	14	PWM6
15	T1PWM/T1CMP	16	T2PWM/T2CMP
17	TDIRA	18	TCLKINA
19	GND	20	GND
21	—	22	XINT1N/XBIOn
23	SPISIMOA	24	SPISOMIA
25	SPICLKA	26	SPISTEA
27	CANTXA	28	CANRXA
29	XCLKOUT	30	PWM7
31	PWM8	32	PWM9
33	PWM10	34	PWM11
35	PWM12	36	CAP4/QEP3
37	T1CTRIP/PDPINTAn	38	T3CTRIP/PDPINTBn
39	GND	40	GND

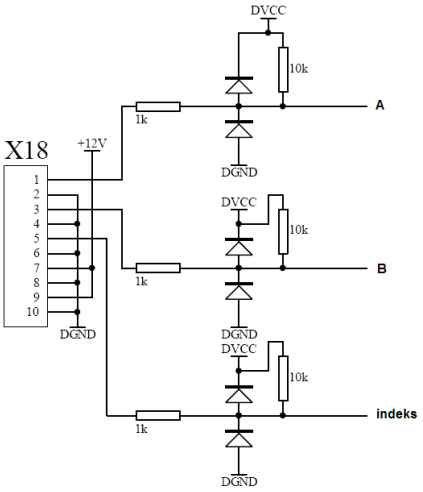
X18 (Şekil 3.13) portundan 5V sinyal seviyeli enkoder sinyali alınarak X23 portu ile DSP'ye iletilmiştir. Doğrultucu girişi X4 portu üzerinden sağlanan sürücüde X10 ve X19 portları (Şekil 3.14) ile EAAKSM motoru faz girişleri alınmıştır.



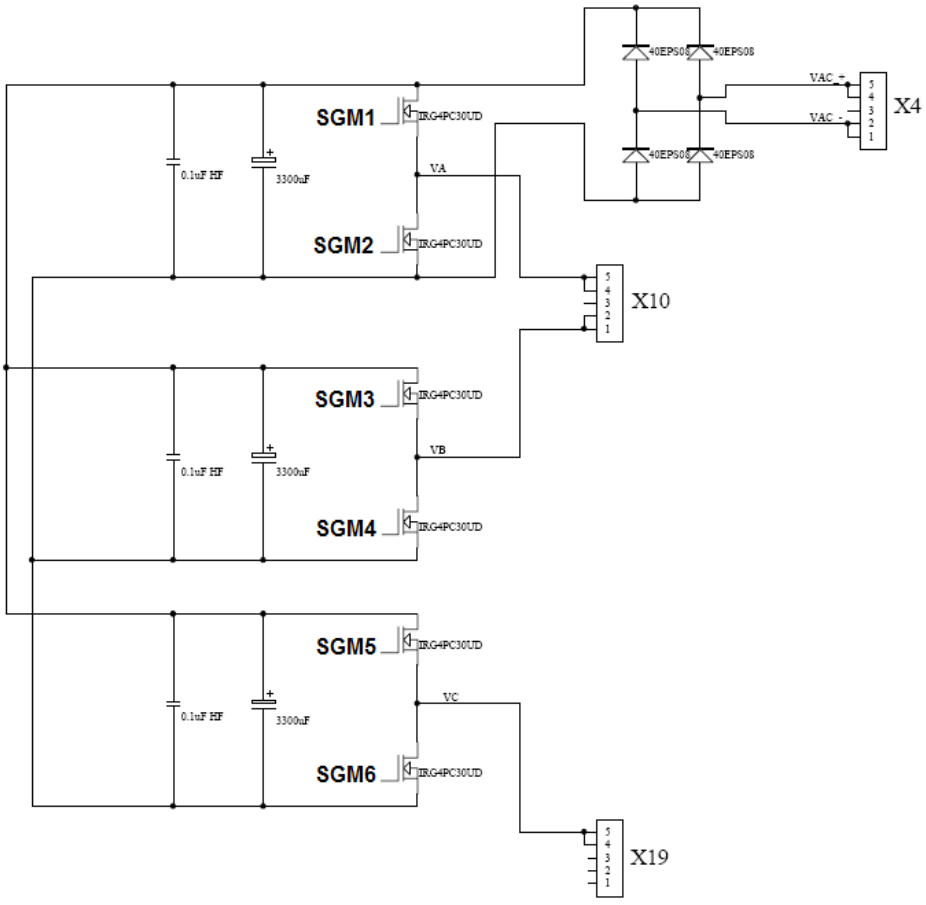
Şekil 3.11: CS-IIB sürücü kartı [10]



Şekil 3.12: CS-IIB sürücüsü X28 portu [10]



Şekil 3.13: CS-IIB sürücüsü X18 portu [10]



Şekil 3.14: CS-IIB sürücüsü X4, X10 ve X19 portları [10]

3.3.3.3. Optokuplörlü izolason devresi

DSP kontrol kartı ile CS-IIB sürücü devresi izoleli olarak kontrol edilmiştir. FOD8001 optokupörleri ile yüksek hızda veri transferi (25 Mbit/sn) izoleli olarak sağlanmıştır (Şekil 3.15). Şekil 3.16'da görülen devre her bir DSP giriş-çıkış pinine uygulanmıştır.

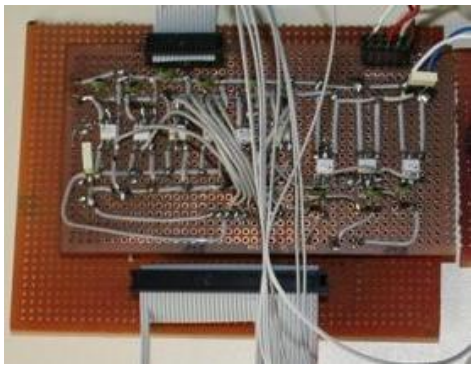
3.3.3.4. SGM girişi lojik devresi

CS-IIB sürücüsü IGBT'leri Şekil 3.14'de görüldüğü gibi ikişerli olarak seri bağlıdır. Çalışma sırasında her bir çiftten sadece biri iletimde olmalıdır, her iki IGBT'nin de iletime geçmesi durumunda kısadevre olacak ve elemanlar zarar görecektir. Bu durumu engellemek amacıyla lojik yapı kurulmuştur (Şekil 3.17). Buna göre sinyal çiftlerinden her ikisi de aktif olması durumunda çıkışlar pasif olmaktadır. DSP'den gelen sinyaller optokuplör devresinden lojik devreye geldikten sonra CS-IIB sürücüsüne uygulanmıştır. Böylece herhangi bir kullanım hatasına karşı koruma sağlammıştır. Lojik devrede 'XOR' lojik kapısı için 74HC86 ve 'AND' için 74HC08 entegreleri kullanılmıştır (Şekil 3.18).

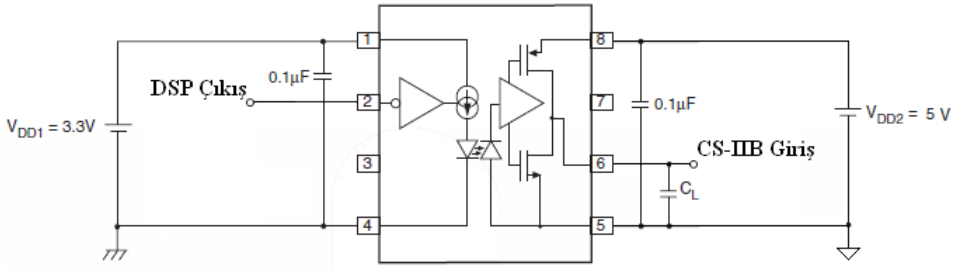
3.5. Hız Kontrol Sistemi Ölçümleri

Yapılan çalışmadaki ölçümlerde 4 kanallı Tektronix DPO 3054 dijital osiloskop, Fluke 80i110s AA/DA akım probu , Pintek DP-25 gerilim probu, denemeler sırasında anlık hız ölçümü için Technic DT-2236B optik takometre ve rotor hız grafiğini elde etmek üzere National Instruments NI-USB6009 veri toplama kartı ile DBRK50-n moment transduserinden hız bilgisi elde eilmiştir. Yapılan denemelerle, istenen hız değerlerine K_p=0.0925 ve K_i=5e-6 ile ulaşılmıştır. Bu sonuca göre sistem kontrolünün büyük oranda K_p ile gerçekleştirilebildiği ve K_i değerinin çok küçük bir etkisinin olduğu görülmüştür. İstenen hızlara Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de 500 rpm ve 1000 rpm referans hızlarına göre çıkış grafiği yeralmaktadır, görüldüğü gibi 3 sn ve 6 sn'de istenen hızlara ulaşılmıştır.

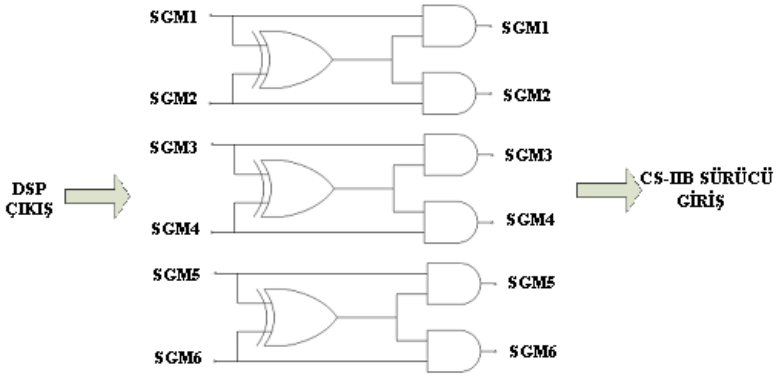
Şekil 3.21'de 1000 rpm'deki V_{as}, V_{bs}, V_{cs} sargı faz gerilimleri görülmektedir. 1000 rpm'de V_{as}, V_{bs}, V_{cs} gerilimleri 25V tepe değerinde ve i_a, i_b, i_c akımları 2,5A değerlerinde ölçülmüştür.ölçülmüştür (Şekil 3.22).



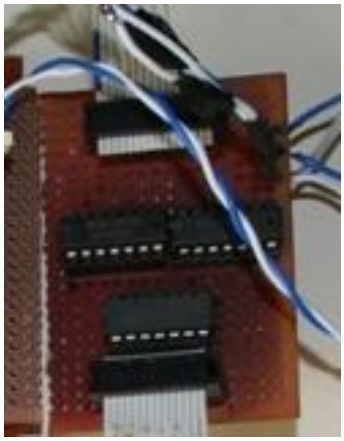
Şekil 3.15: Optokuplör devresi



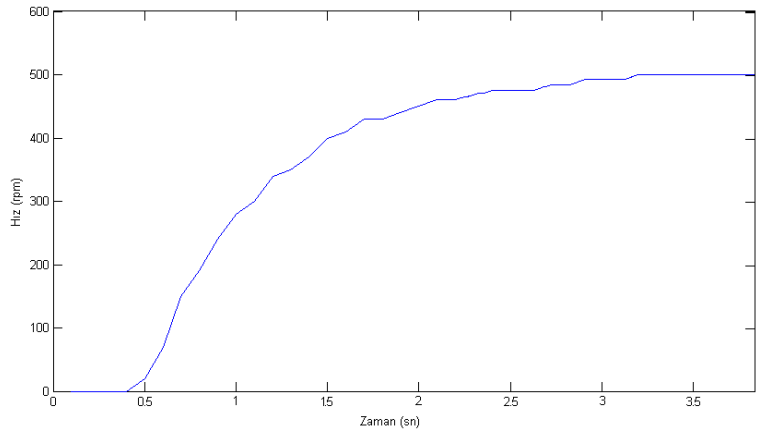
Şekil 3.16: FOD8001 Optokuplör devresi



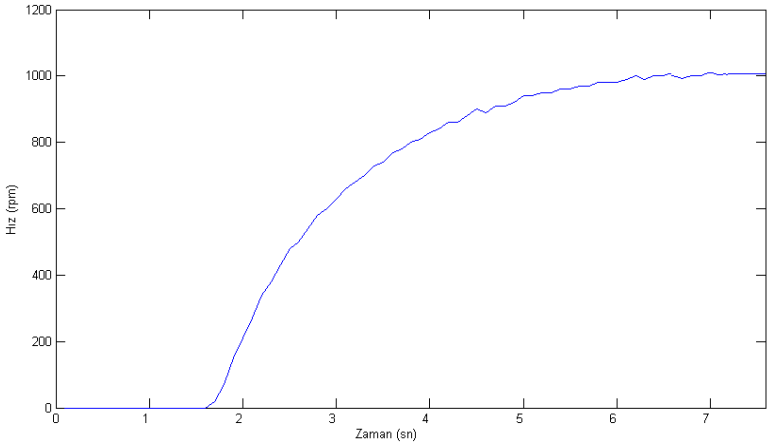
Şekil 3.17: SGM giriş-çıkış lojik yapısı



Şekil 3.18: SGM giriş-çıkış lojik devresi

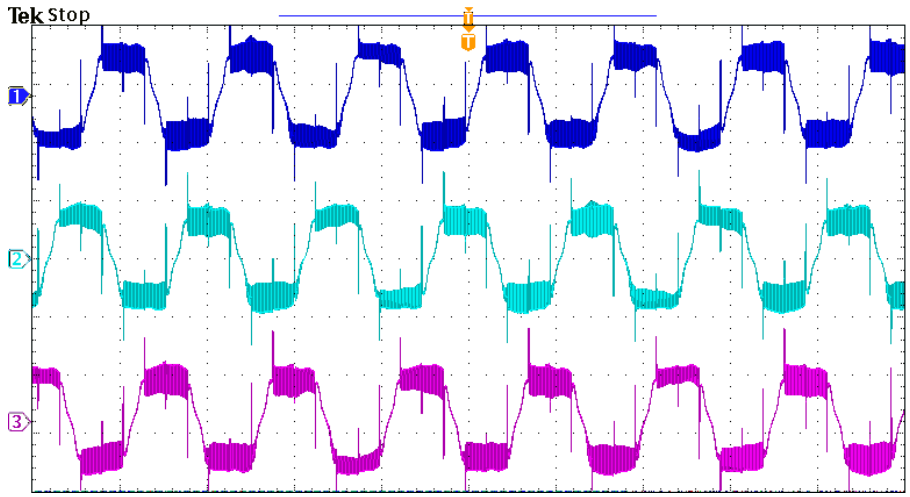


Şekil 3.19: 500 rpm hızlanma grafiği

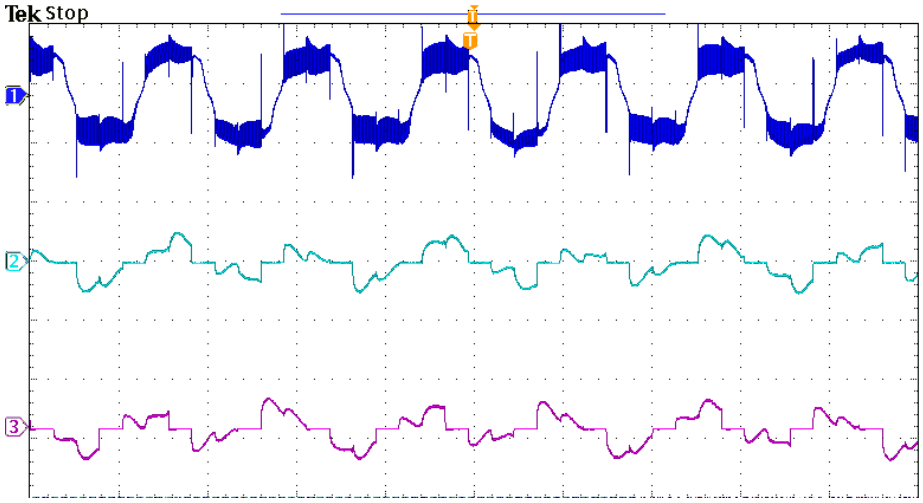


Şekil 3.20: 1000 rpm hızlanma grafiği

Şekil 3.21 ve Şekil 3.22'den de görüldüğü gibi motor ve tüm sistemin çok düşük edüktansa sahip olması akım dalga şeklini bozmaktadır. İstenen trapezoidal akım dalga şekli için sistem endüktansının artırılması gerektiği görülmektedir. Ancak istenen hız kontrolü akım dalga şeklindeki bozulmaya rağmen gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.21: V_{as}, V_{bs}, V_{cs} sargı faz gerilimleri (gerilim probu 50V, osiloskop 200mV/div ve 10ms time/div kademesindedir)



Şekil 3.22: V_{as} sargı gerilimi ve i_a, i_b sargı akımları (gerilim probu 50V, akım probu 100 mV ve osiloskop gerilim için 200mV/div, akım için 1V ve 10ms time/div kademesindedir)

BÖLÜM 4. EKSENEL AKILI SMFDA MOTORU VURUNTU MOMENTİ İNCELENMESİ VE MİNİMİZASYONU

4.1. Giriş

Sürekli mıknatıslı motorların birçok üstünlüğü olması yanı sıra çıkış moment kalitesinde sorunlar yaşanabilmektedir. Sistem eylemsizliğinin büyük olduğu uygulamalarda bu önemsiz olabilmekte fakat diğer uygulamalarda momentteki dalgalanmalar motor performansına etki etmektedir. Bu dalgalanmaların [19-20] birden fazla nedeni vardır. Bunlar, vuruntu momenti, SGM harmonikleri, ideal olmayan zıt EMK, faz komutasyonunda ve DA baradaki dalgalanmalar olarak sıralanabilir. Bu çalışmada moment kalitesine etki eden en önemli faktörlerden vuruntu momenti incelenmiş ve farklı rotor tipleri denenerek vuruntu momentinin azaltılması yönünde çalışmalar yapılmıştır.

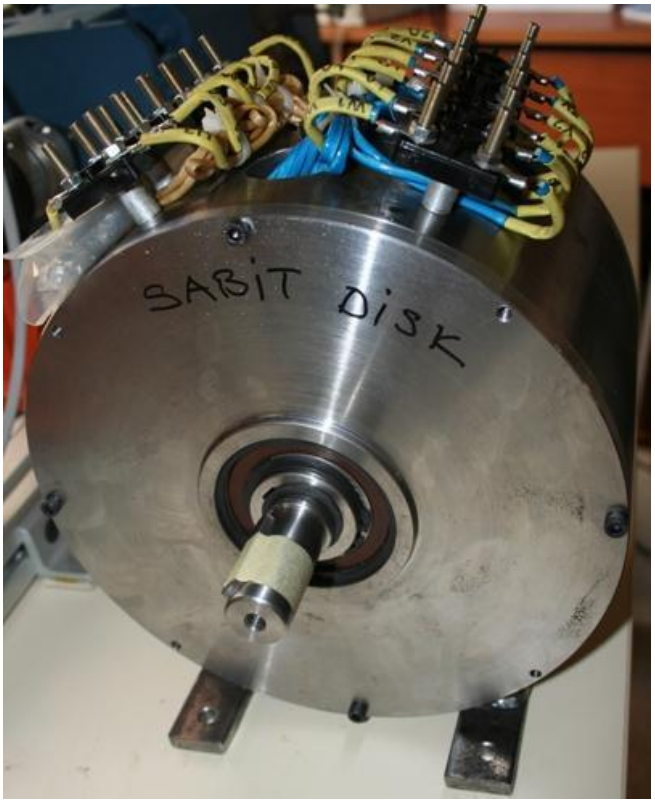
Vuruntu momenti basitçe yüksüz durumdaki motorun mıknatıslarının oluşturduğu moment olarak tanımlanabilir. Bu sürekli mıknatıslardan kaynaklanan EMK ile statordaki oluklardan kaynaklanan relüktans değişiminden ortaya çıkmaktadır. SM motorlarda vuruntu momentini azaltmak amacı ile stator oluklarına veya mıknatıslara eğim verilmesi (kaykı), mıknatıslara özel şekiller verilmesi ve kaydırılması, yardımcı olukların ve dişlilerin kullanılması, mıknatıs kutuplarının optimizasyonu, kesirli sargıların kullanılması gibi teknikler uygulanmaktadır [21-22]. Fakat, bu tekniklerin SM motorlara maliyet yönünden etkisi büyük olabilir. Bu tip motorlarda en önemli maliyet stator yapısından gelmektedir. Pahalı, üretimi zor ve karmaşık bu yapıyı vuruntu momentini azaltıcı teknikler kullanarak dahada karmaşık ve pahalı hale getirmek tercih edilmez. Bu nedenle yapılan çalışmada mıknatıs kaykı ve kaydırma yöntemi, eksenel akılı yüzey mıknatıslı SMFDA motoruna uygulanarak etkisi incelenmiştir.

4.2. Vuruntu Analizi İçin Kullanılan Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Motor Yapısı

Yapılan çalışmada özel olarak üretilen iki rotor tek statorlu oluklu disk tipi motor kullanılmıştır. Bu disk motorun üretim parçaları Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.2'de ise üretim aşaması tamamlanmış Türkiye'nin ilk sürekli mıknatıslı disk motorunun resmi gösterilmektedir.. 24 adet stator oluklu ve 8 kutuplu bu motorda her bir rotor için oluklardan birer sargı çifti geçmektedir. Motor sargı yapısı Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilen şemalarda gösterilmiştir. Motor sargıları statorun her iki yakasında iki farklı set olarak sarılmış, her bir sargı seti iki adet seri ya da paralel bağlanabilen bobinden oluşturulmuştur. Seri ya da paralel bağlanabilme olanağı taşıyan sargılar çalışma esnasında motorun hızını arttırıp azaltmaya yaramaktadır. Ayrıca statorun her iki tarafına yerleştirilen bu sargılar kendi aralarında da seri ya da paralel olarak bağlanabilirler. Bu sayede motor anma akım ve gerilim değerleri ile oynamak mümkün hale gelmektedir. Rotor montajı ve demontajını kolay hale getirmek için oluşturulmuş motor gövdesinde (Şekil 4.5) aynı stator ile dört farklı rotor tipi (Şekil 4.11) denenerek moment kalitesi incelenmesi çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu sayede dört ayrı motor üretmek yerine tek motor gövdesi ile bütün ölçümler gerçekleştirilebilmiştir.



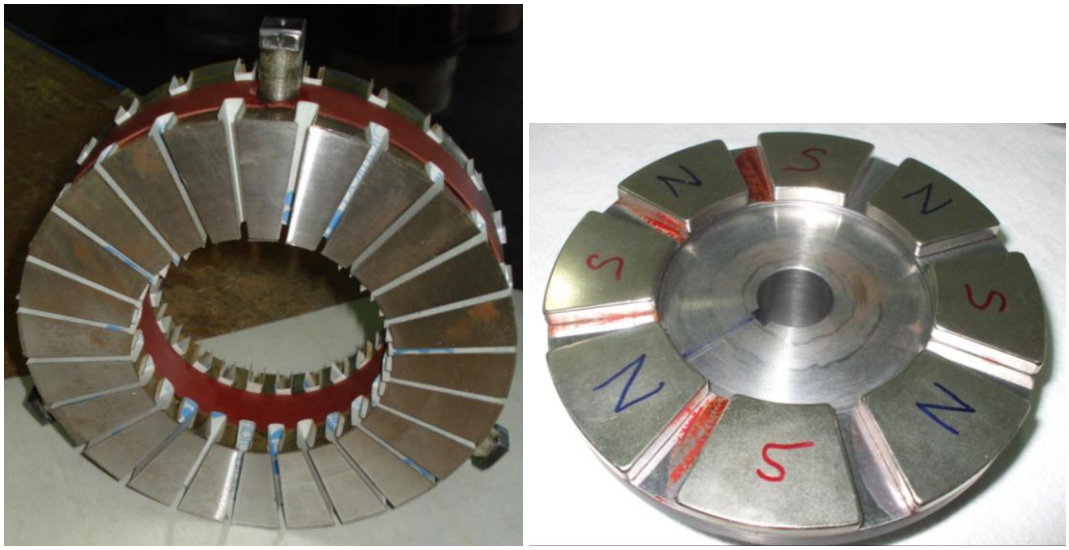
Şekil 4.1: SMFDA disk motorun tüm parçalarının resmi



Şekil 4.2: Türkiye'nin ilk sürekli mıknatıslı fırçasız disk motoru



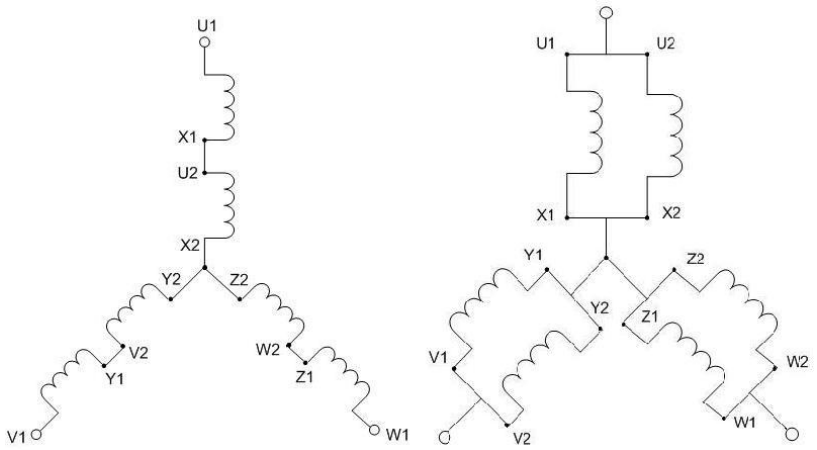
Şekil 4.3: SMFDA motoru açık görünümü



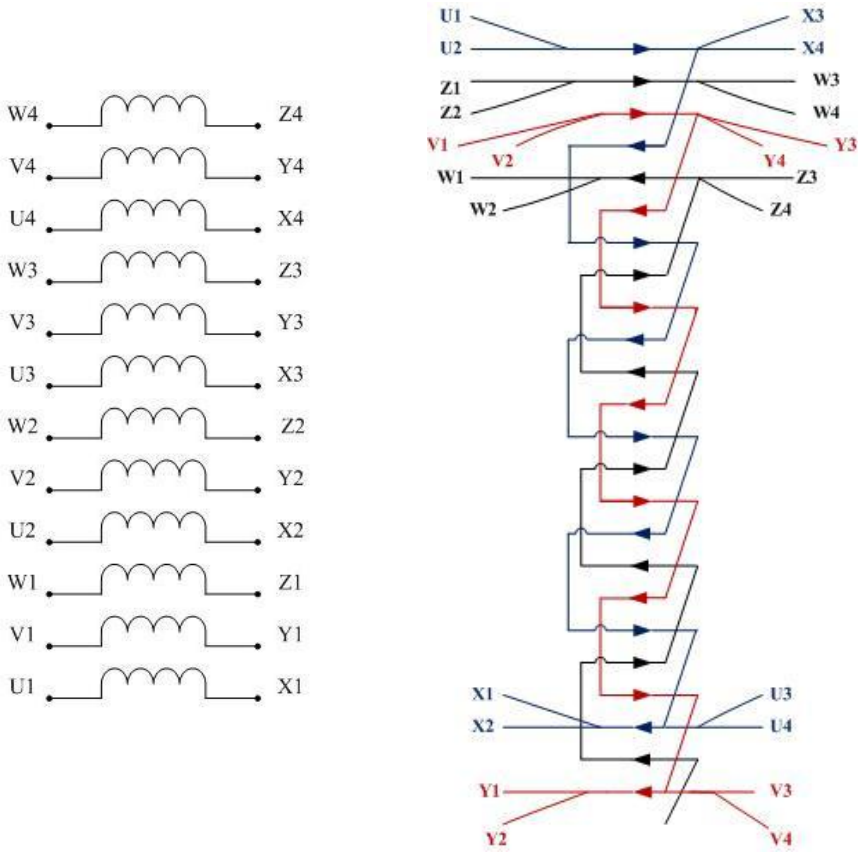
Şekil 4.4: Vuruntu analizinde kullanılan iki-rotor-tek-statorlu EASM motorun stator ve ilk rotor yapısı



Şekil 4.5: SMFDA motoru rotor montajı



Şekil 4.6: SMFDA motoru sargı düzeni



Şekil 4.7: SMFDA motoru sargı düzeni detayları

4.3. Vuruntu Momentinin Hesaplanması

Vuruntu momenti Maxwell gerilme tensörü veya sanal iş tekniği metotları kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabilir [23-24]. Maxwell gerilme tensörü yönteminin avantajı vuruntu momenti hesabının tek bir alan hesabı gerektirmesidir. Ancak, hassasiyet eleman yoğunluğuna ve integralin derecesine bağlıdır. Sanal iş tekniğinin ise uygulaması daha kolaydır. Fakat, iki farklı rotor konumu için alan hesabı gerektirir ve nümerik hatadan dolayı hassasiyetten taviz vermek gerekebilir [25]. Vuruntu momenti 5.1 eşitliği ile tanımlanır [26]:

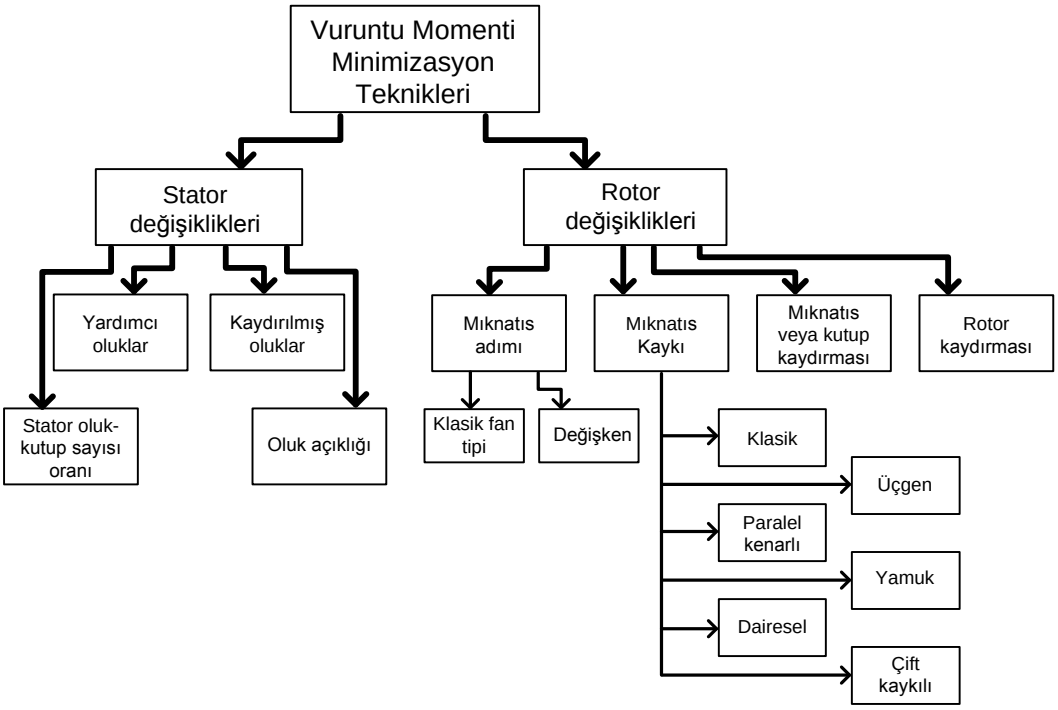
$$T_{cog}(\theta_m) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k \sin(kN\theta_m + \varphi_k) \tag{5.1}$$

θ_m rotorun pozisyonunu, T_k k'inci harmoniğin genliğini, φ_k k'inci harmoniğin faz açısını, N_c rotor kutup sayısı ile stator oluk sayısının (N_s) en küçük ortak katını göstermektedir. Kutup başına düşen oluk sayısı bir tamsayı ise N_c=N_s olur.

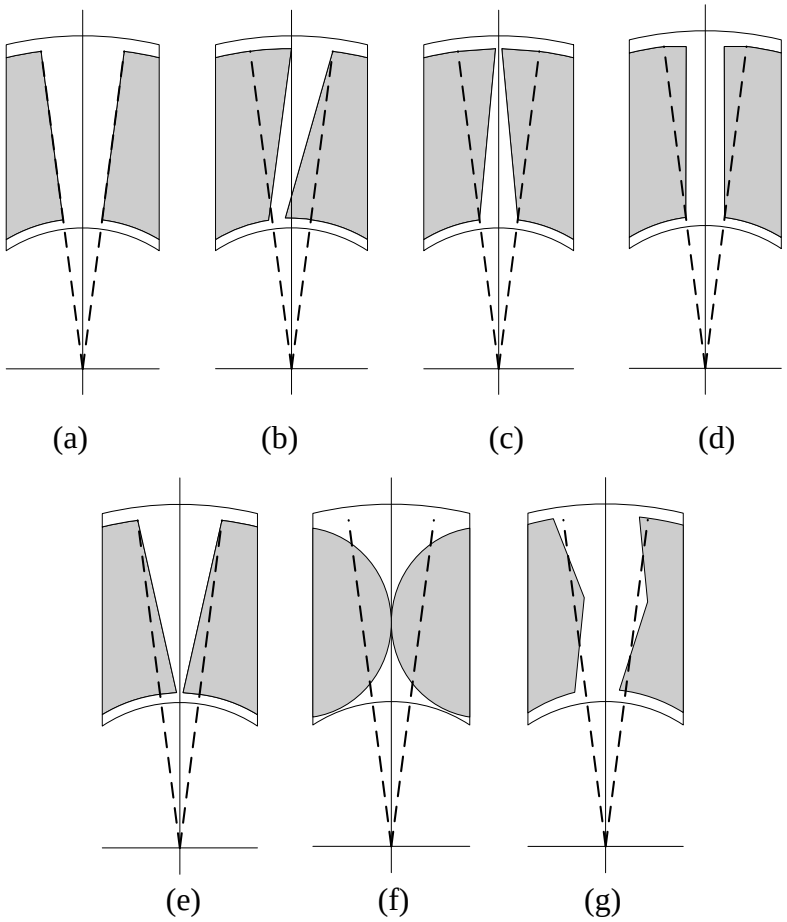
4.4. Vuruntu Momenti Minimizasyonu

Vuruntu momenti minimizasyon teknikleri SM motorlarda stator ve rotor tarafından yapılan değişiklikler olmak üzere iki ana grupta özetlenebilir. Giriş bölümünde bahsedildiği gibi statorda yapılabilecek değişiklikler maliyette getireceği ciddi artışlar nedeniyle tercih edilmez. Rotor tarafından yapılabilecek değişiklikler ise 4 ana başlıkta toplanabilir (Şekil 4.8) Eksenel akılı disk tipi SMFDA motorları için farklı kaykı teknikleri mevcuttur. Bu teknikler Şekil 4.9'dan da görüldüğü gibi kaykısız mıknatıs, klasik kaykılı mıknatıs, üçgen kaykılı mıknatıs, paralel kenarlı mıknatıs, yamuk şekilli mıknatıs, kare mıknatıs, dairesel mıknatıs ve çift kaykılı mıknatıstır. Bu teknikler SM disk motorlar için maliyeti azdır ve rotor tarafından kolayca uygulanabilecek tekniklerdendir. Yapılan çalışmada paralel kenarlı, üçgen ve yuvarlak mıknatsılı kaykı teknikleri uygulanarak referans rotora göre moment kaliteleri incelenmiş, deneysel çalışmalarla sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen vuruntu değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca çift rotorlu bu yapıda, karşılıklı rotorlardan, biri diğer rotora göre dairesel olarak ötelenerek ulaşılabilecek minimum

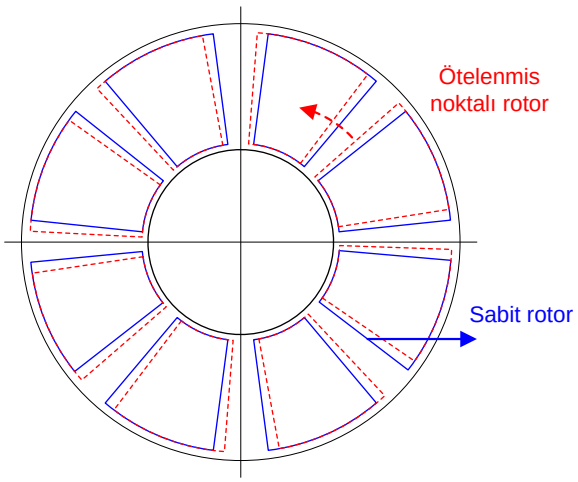
vuruntu momenti noktası aranmıştır (Şekil 4.9). Çift hava aralıklı bu motorlarda vuruntu momenti, her bir hava aralığındaki vuruntu momentlerin toplamına eşittir. Bundan dolayı rotorların biri diğerine göre ötelenirse her bir hava aralığındaki vuruntu momentlerinin toplamı, toplam vuruntu momentini vereceğinden, toplam vuruntunun tepe değeri aşağıya çekilebilir (Şekil 4.11) Bunu da gerçekleştirebilmek için Şekil 4.12'deki rotor yapısı kullanılmıştır. Böylece her bir rotor tipi için, rotorda 7°30', 15° ve 22°30' öteleme yaparak dört farklı konumda moment değerleri incelenmiştir. Bu çalışmanın detayları 108E051 no.'lu TÜBİTAK projesi son raporunda ayrıntıları ile sunulmuştur.



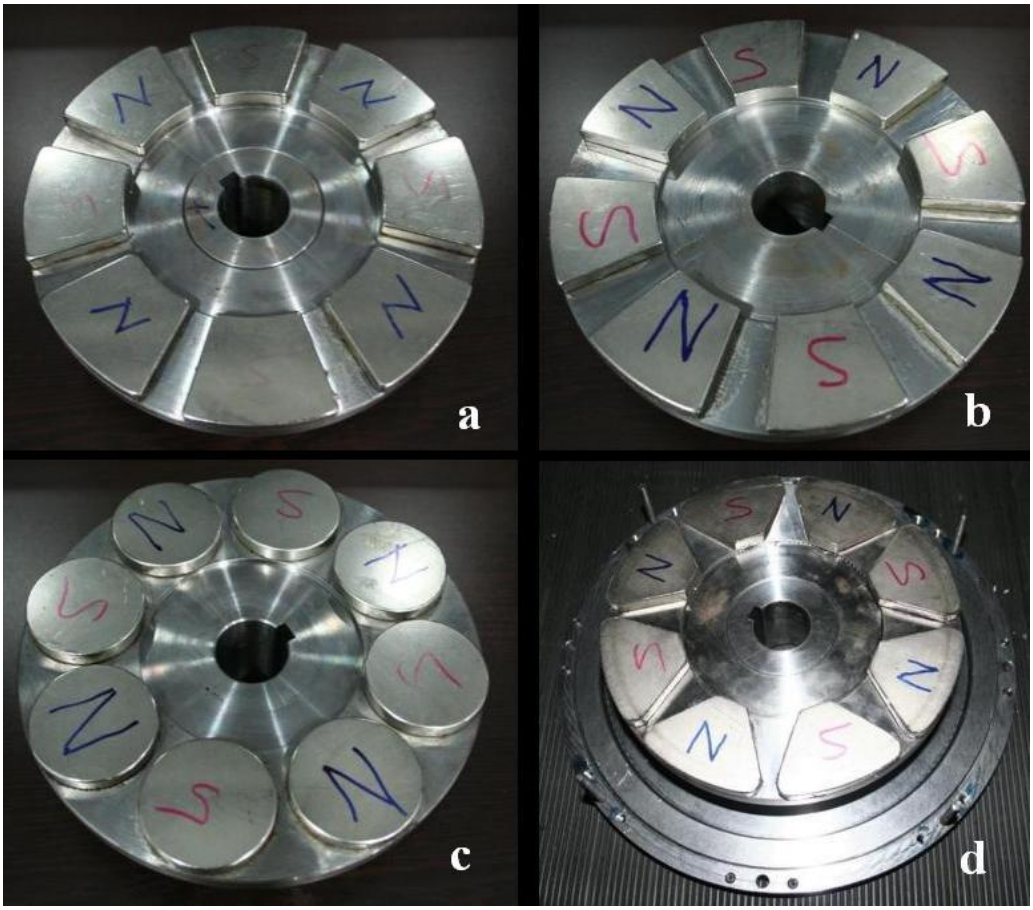
Şekil 4.8: SMFDA motorlarda vuruntu momenti minimizasyon teknikleri



Şekil 4.9: (a) kaykısız mıknatıslar, (b) klasik kaykılı mıknatıslar, (c) üçgen şekilli kaykı (d) paralel kenarlı mıknatıs, (e) yamuk biçimli kaykı, (f) dairesel kaykılı mıknatıs, (g) çift kaykılı mıknatıs [27]



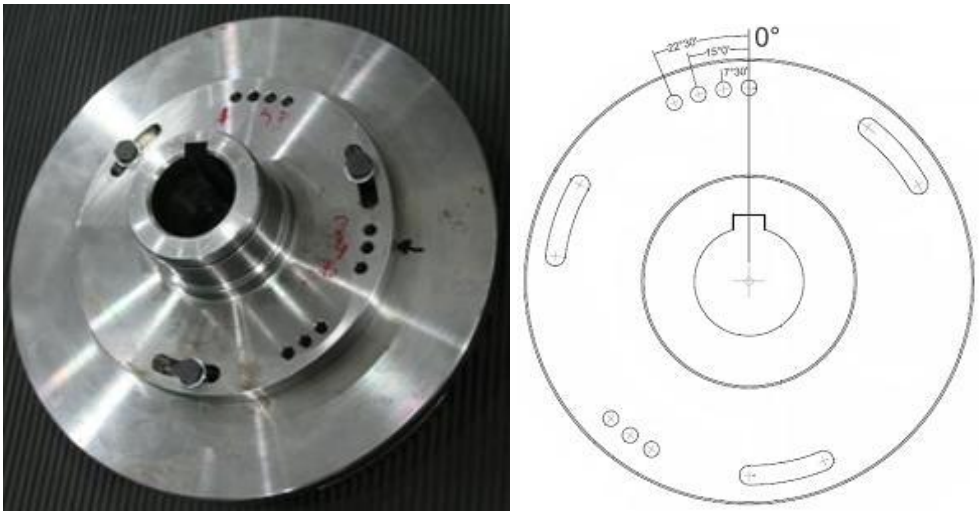
Şekil 4.10: Birbirine göre ötelenmiş iki farklı EASM motor rotor şeması [27]



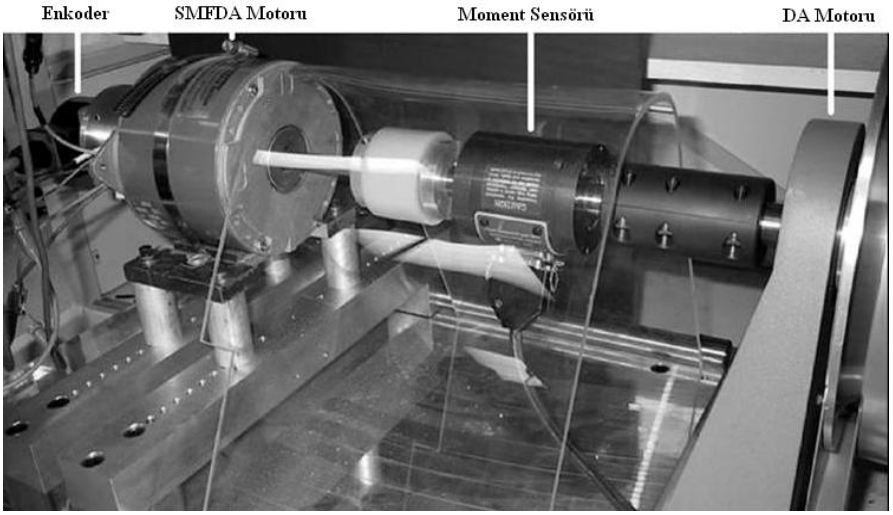
Şekil 4.11: (a) kaykısız fan tipi 140/180 rotor, (b) kaykısız fan tipi 120/180 derecelik rotor, (c) yuvarlak mıknatıslı rotor, (d) üçgen mıknatıslı rotor

4.5. Vuruntu Momentinin Ölçülmesi

Vuruntu momentini deneysel olarak ölçebilmek için statik, yarı statik ve dinamik metodlarla ölçülebilir [28]. Yapılan çalışmada dinamik vuruntu momenti ölçümü metodu uygulanmıştır. Bu metodda SM motoru çeşitli yöntemlerle düşük hızlarda dışarıdan tahrik edilerek vuruntu momenti elde edilmektedir. Şekil 4.13'de birbirine moment transduseri ile eksenlenmiş sistemle vuruntu momenti ölçüm yöntemi görülmektedir. Bir diğer yöntemde ise SM motorunun tahrik motorunun miline kayışla bağlanmasıdır (Şekil 4.14). PM motoru rotoruna ağırlık bağlanarak serbest düşme yaptırılması ile vuruntu momentinin tepe değeri ölçülebilmektedir (Şekil 4.15).

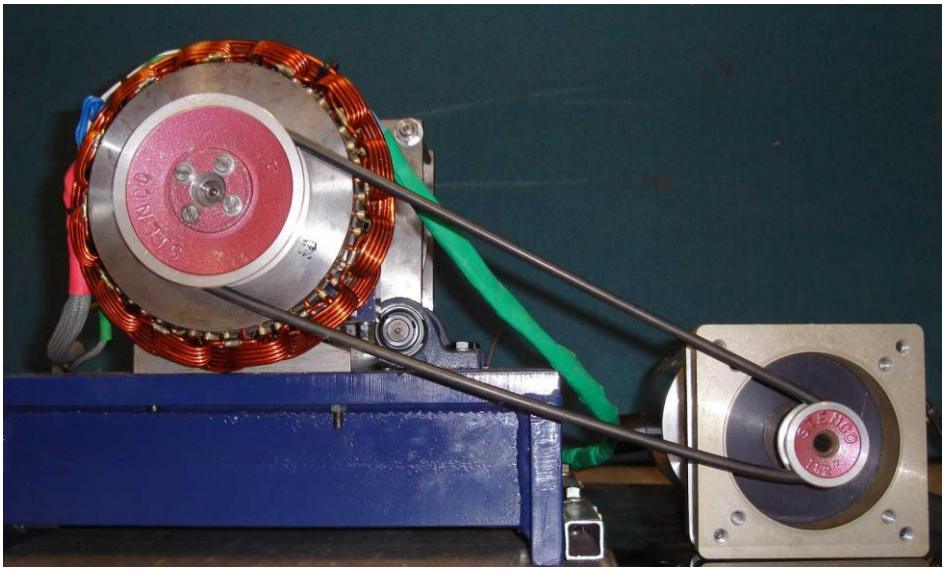


Şekil 4.12: Birbirine göre ötelenebilen EASM motor rotoru [29]

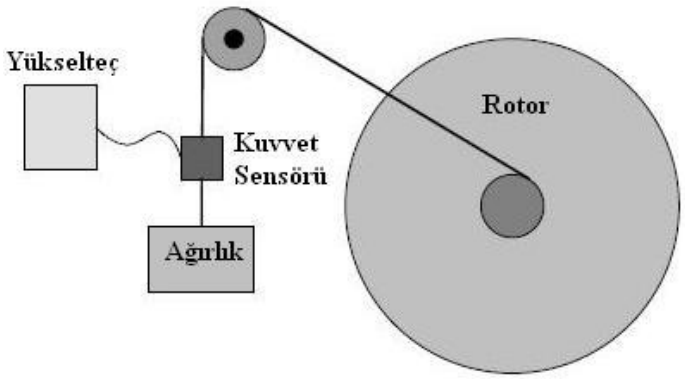


Şekil 4.13: Moment transduseri ile milleri eksenlenmiş ölçüm düzeneği [30]

Yapılan çalışmada Şekil 4.13'degörülen test düzeneğine benzer yapı kullanılmıştır. SMFDA motoru bir mil ve kaplin üzerinden moment transdusere oradan da yine bir kaplin vasıtasıyla Doğru akım motoruna akuple edilmiştir. Deney düzeneği Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Veri toplama kartı (National Instruments NI-USB6009) ile moment transduserinden (DBRK50-n) alınan veriler SIMULINK'te işlenerek SEA analizi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.14: SM motorunun tahrik motoruna kayışla bağlandığı ölçüm düzeneği [31]



Şekil 4.15: Ağırlık ile serbest düşme yaptırılarak vuruntu momentinin ölçülmesi [32]



Şekil 4.16: SMFDA motoru deney düzeneği

4.6. Deneysel Sonuçlar

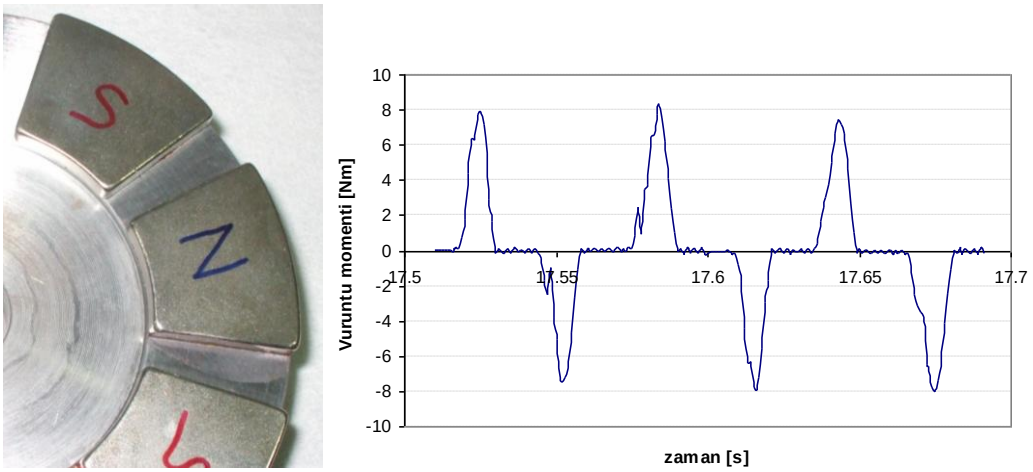
Yapılan çalışmada daha önce de bahsedildiği gibi dört farklı rotor tipi için vuruntu moment ölçümleri yapılmış ve SEA sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu kısımda, bahsedilen moment ölçümlerinin yanı sıra EASM motorunun DA motoru ile tahrik edilerek (generatör olarak çalıştırılarak) ölçülen sargı gerilimleri de yer almaktadır. Şekil 4.6'daki seri ve paralel bağlı sargı düzenine göre Tablo 4.1'deki ölçüm sonuçlarına ulaşılmıştır.

Tablo 4.1: EASM motorun ayrı ayrı seri ve paralel bağlanan stator sargıları için 500 ve 1000 rpm'deki gerilim tepe değerleri

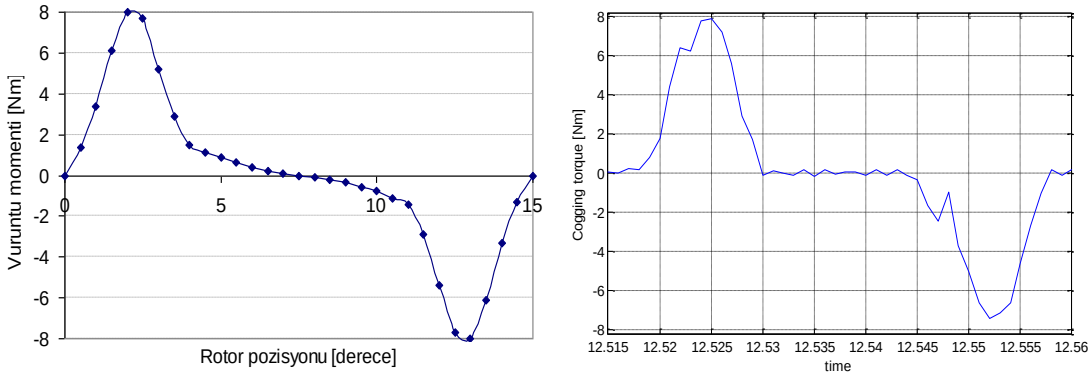
		SERİ BAĞLANTI				**PARALEL BAĞLANTI**			
Fan 140°		**500 rpm**		**1000 rpm**		**500 rpm**		**1000 rpm**	
		$V_{Faz-Faz}$	**$V_{Faz-Nötr}$**	**$V_{Faz-Faz}$**	**$V_{Faz-Nötr}$**	**$V_{Faz-Faz}$**	**$V_{Faz-Nötr}$**	**$V_{Faz-Faz}$**	**$V_{Faz-Nötr}$**
Pozisyon	**0°**	44	22	88	44	22	11	44	22
	7°30'	44	22	88	44	22	11	44	22
	15°	44	22	88	44	22	11	44	22
	22°30'	44	22	88	44	22	11	44	22
Yuvarlak 140°		**500 rpm**		**1000 rpm**		**500 rpm**		**1000 rpm**	
		$V_{Faz-Faz}$	**$V_{Faz-Nötr}$**	**$V_{Faz-Faz}$**	**$V_{Faz-Nötr}$**	**$V_{Faz-Faz}$**	**$V_{Faz-Nötr}$**	**$V_{Faz-Faz}$**	**$V_{Faz-Nötr}$**
Pozisyon	**0°**	40	20	80	40	20	10	40	20
	7°30'	40	20	80	40	20	10	40	20
	15°	40	20	80	40	20	10	40	20
	22°30'	40	20	80	40	20	10	40	20
Fan 120°		**500 rpm**		**1000 rpm**		**500 rpm**		**1000 rpm**	
		$V_{Faz-Faz}$	**$V_{Faz-Nötr}$**	**$V_{Faz-Faz}$**	**$V_{Faz-Nötr}$**	**$V_{Faz-Faz}$**	**$V_{Faz-Nötr}$**	**$V_{Faz-Faz}$**	**$V_{Faz-Nötr}$**
Pozisyon	**0°**	44	22	88	44	22	11	44	22
	7°30'	44	22	88	44	22	11	44	22
	15°	44	22	88	44	22	11	44	22
	22°30'	44	22	88	44	22	11	44	22
Üçgen 140°		**500 rpm**		**1000 rpm**		**500 rpm**		**1000 rpm**	
		$V_{Faz-Faz}$	**$V_{Faz-Nötr}$**	**$V_{Faz-Faz}$**	**$V_{Faz-Nötr}$**	**$V_{Faz-Faz}$**	**$V_{Faz-Nötr}$**	**$V_{Faz-Faz}$**	**$V_{Faz-Nötr}$**
Pozisyon	**0°**	44	22	88	44	22	11	44	22
	7°30'	44	22	88	44	22	11	44	22
	15°	44	22	88	44	22	11	44	22
	22°30'	44	22	88	44	22	11	44	22

4.6.1. Fan tipi (140/180) derecelik mıknatıs ile vuruntu momentinin deneysel yolla incelenmesi

Şekil 4.17'de fan tipi 140 derecelik yapı ve vuruntu momenti gösterilmiştir. Şekil 4.18'de verilen karşılaştırmalı grafiklerden de görüldüğü gibi deneysel yolla elde edilen vuruntu momenti grafiği ile SEA simülasyonu ile elde edilen grafik hem tepe değeri hem de şekil itibariyle uyum içerisindedir. 8Nm tepe değerine sahip vuruntu momenti bu yapı için deneysel olarak da laboratuvar ortamında gözlenmiştir.



Şekil 4.17: SMFDA motoru vuruntu momenti değişimi (140/180 derecelik fan tipi mıknatıslı rotor yapısı)

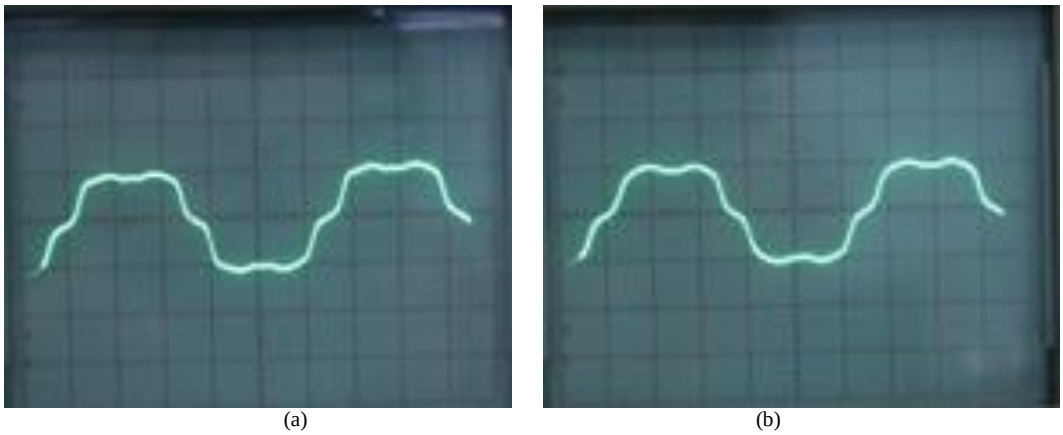


(a) (b)

Şekil 4.18: Fan tipi 140/180 derecelik rotorun (a) SEA vuruntu momenti-rotor pozisyonu grafiği [27] (b) test verisi vuruntu momenti-zaman grafiği

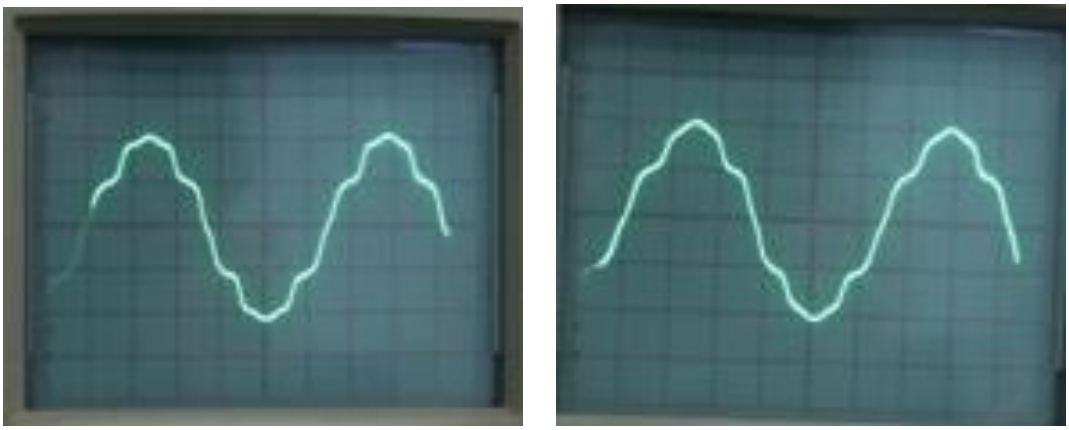
Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de EASM motorun 500 rpm'de seri ve paralel bağlanmış, stator sargıları faz ve fazlar arası gerilimleri sinyal şekilleri yer almaktadır. Bu hızda faz gerilimi tepe değerleri, stator sargıları seri bağlı iken 22V, paralel bağlı 11V, faz arası gerilimleri ise seri bağlı ilken 44V, paralel 22V ölçülmüştür. Yapılan bütün

ölçümlerde osiloskop time/div katsaysı 5msn tutulmuştur. Osiloskop V/div katsayıları seri bağlı sargı ölçümlerinde iki katına çıkarıldığından daha büyük ölçüm değerleri yine aynı sinyal şekliyle ekrana yansımıştır.



(a) (b)

Şekil 4.19: EASM motorun 500 rpm'de açık devre faz geriliminin fan tipi (140°) mıknatıs için görünümü (a) seri bağlantı (prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (b) paralel bağlantı (prob 20V, osiloskop 0.5V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (rotor = 0 derece),

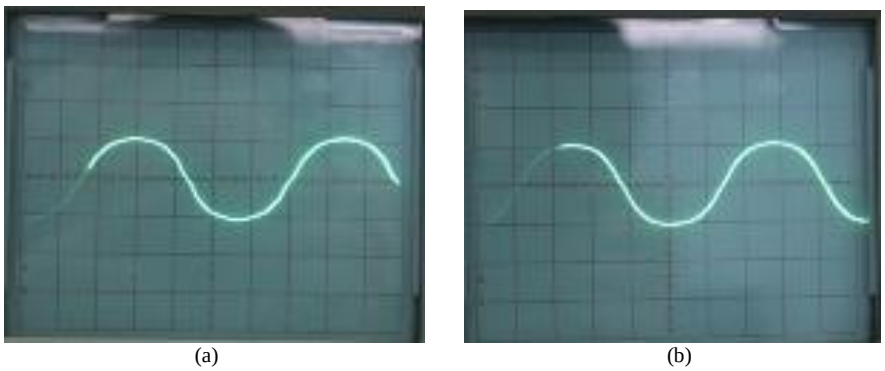


(a) (b)

Şekil 4.20: EASM motorun 500 rpm'de açık devre faz arası geriliminin fan tipi (140°) mıknatıs için görünümü (a) seri bağlantı (prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5 ms time/div kademesindedir), (b) paralel bağlantı (prob 20V, osiloskop 0.5V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (rotor = 0 derece)

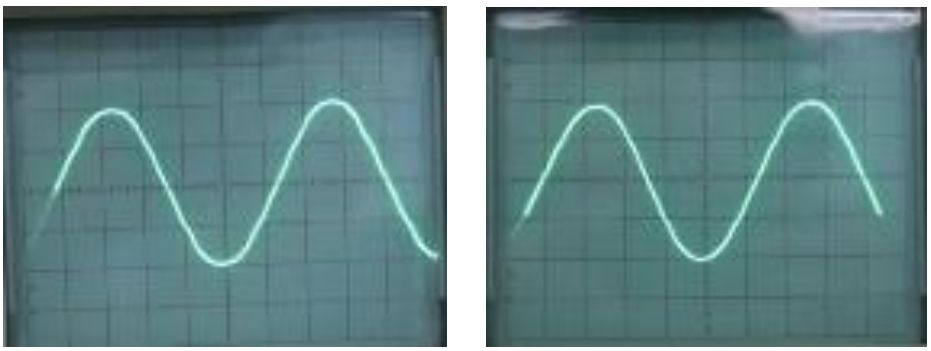
4.6.2. Yuvarlak (140/180) derecelik mıknatıs ile vuruntu momentinin deneysel yolla incelenmesi

Şekil 4.21Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de EASM motorun 500 rpm'de seri ve paralel bağlanmış, stator sargıları faz ve fazlar arası gerilimleri sinyal şekilleri yer almaktadır. Faz gerilimi tepe değerleri, stator sargıları seri bağlı iken 20V, paralel bağlı 10V, faz arası gerilimleri ise seri bağlı iken 40V, paralel 20V olarak ölçülmüştür. Diğer yapılara göre elde edilen endüklenen gerilim dalga şekli daha sinüzoidaldır ve generator çalışmaya daha uygun olduğu söylenebilir. Şekil 4.25'de gösterildiği gibi yuvarlak mıknatıslı yapının vuruntu momenti beklenildiği gibi maksimum 3Nm seviyelerinde bulunmuştur. Bu da referans motora göre vuruntu momentinin %62.5 oranında azaltılabileceğinin deneysel olarak kanıtlandığı anlamını taşımaktadır.



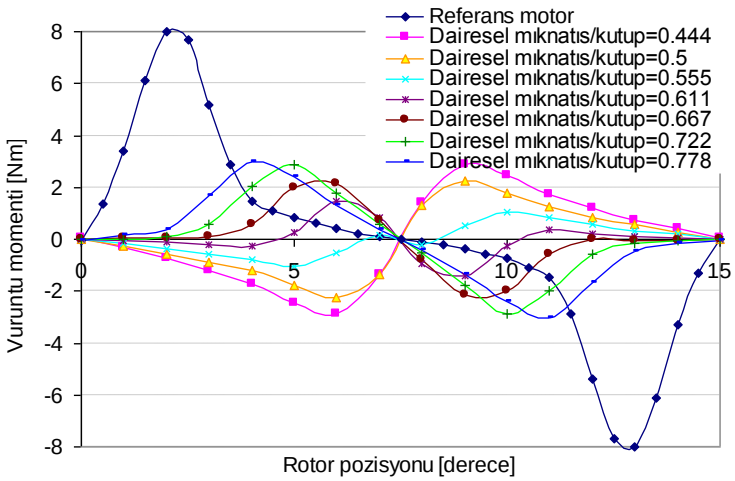
(a) (b)

Şekil 4.21: EASM motorun 500 rpm de açık devre faz geriliminin yuvarlak mıknatıs için görünümü (a) seri bağlantı (prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (b) paralel bağlantı (prob 20V, osiloskop 0.5V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (rotor konumu = 0 derece)

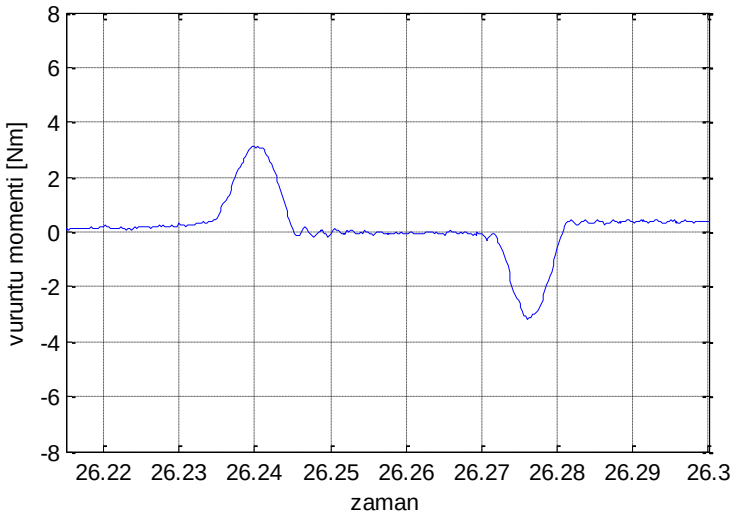


(a) (b)

Şekil 4.22: EASM motorun 500 rpm'de açık devre faz arası geriliminin yuvarlak mıknatıs için görünümü (a) seri bağlantı (prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (b) paralel bağlantı (prob 20V, osiloskop 0.5V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (rotor konumu = 0 derece)



Şekil 4.23: Yuvarlak mıknatıslı rotorun (a) SEA vuruntu momenti-rotor pozisyonu grafiği (b) test verisi vuruntu momenti-zaman grafiği [27]

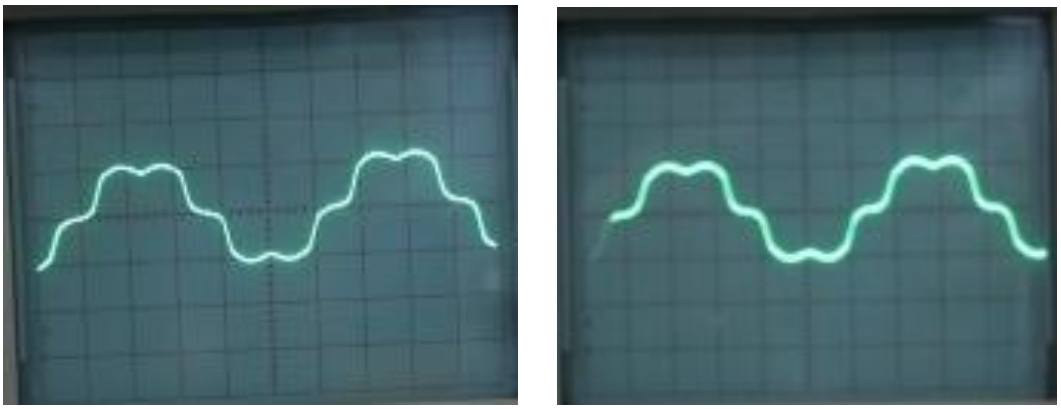


Şekil 4.24: Yuvarlak mıknatıslı rotorun (a) SEA vuruntu momenti-rotor pozisyonu grafiği (b) test verisi vuruntu momenti-zaman grafiği

Deneysel yolla elde edilen vuruntu momenti verilerinde unutulmaması gereken önemli bir nokta da 1Nm den düşük moment değerlerinde moment ölçerin hassasiyetinin azalmasıdır. Moment ölçer özellikle sıfıra yakın moment değerlerinde şekillerden de görüldüğü gibi ölçümleri çok düşük seviyelerde göstermektedir.

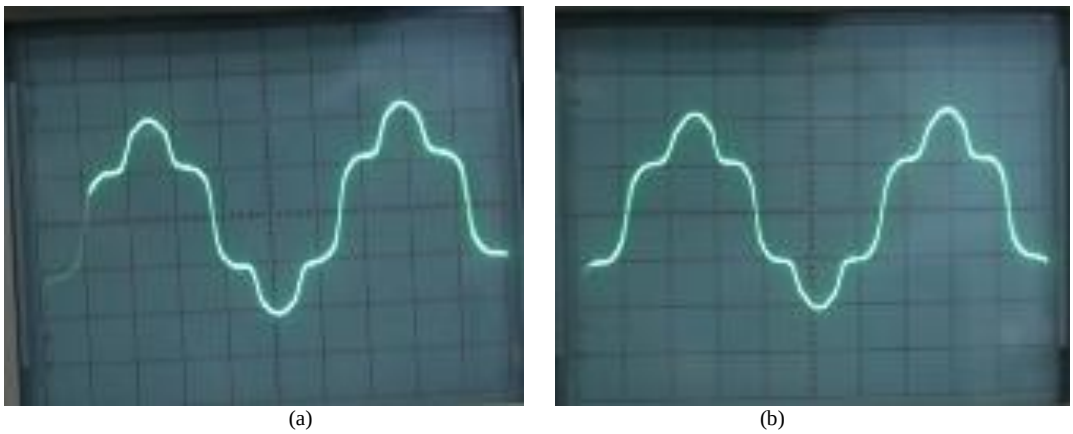
4.6.3. Fan tipi (120/180) derecelik mıknatıs ile vuruntu momentinin deneysel yolla incelenmesi

Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da EASM motorun 500 rpm'de seri ve paralel bağlanmış, stator sargıları faz ve fazlar arası gerilimleri sinyal şekilleri yer almaktadır. Faz gerilimi tepe değerleri, stator sargıları seri bağlı iken 22V, paralel bağlı 11V, faz arası gerilimleri ise seri bağlı iken 44V, paralel 22V ölçülmüştür.



(a) (b)

Şekil 4.25: EASM motorun 500 rpm'de açık devre faz geriliminin fan tipi (120°) mıknatıs için görünümü (a) seri bağlantı (prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (b) paralel bağlantı (prob 20V, osiloskop 0.5V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (rotor konumu 0 derece)

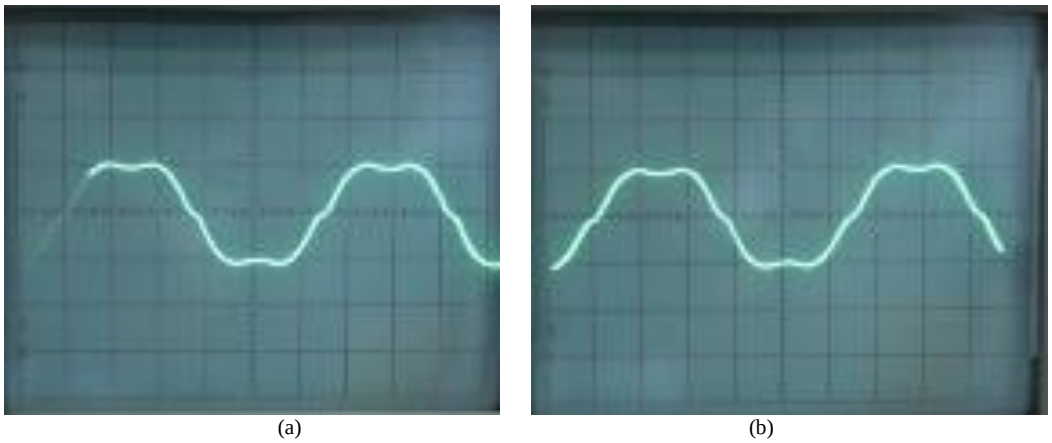


(a) (b)

Şekil 4.26: EASM motorun 500 rpm'de açık devre faz arası geriliminin fan tipi (120°) mıknatıs için görünümü (a) seri bağlantı (prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (b) paralel bağlantı (prob 20V, osiloskop 0.5V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (rotor konumu 0 derece)

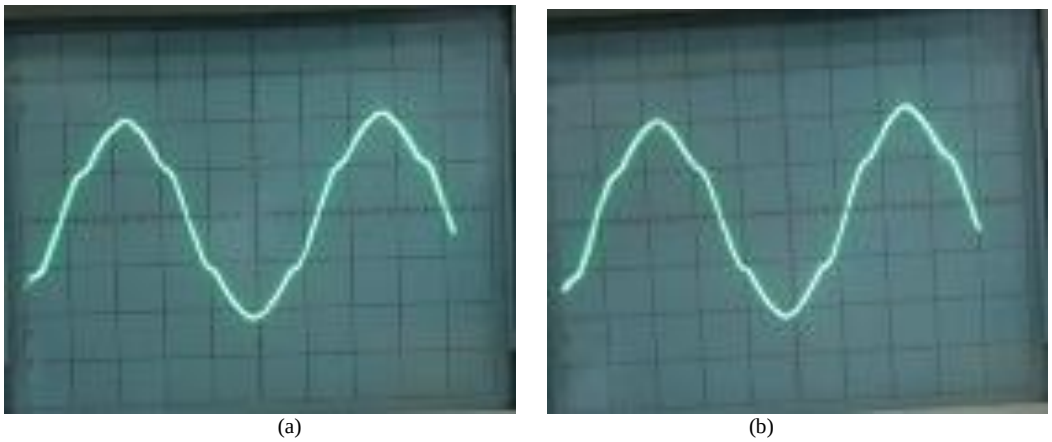
4.6.4. Üçgen (140/180) derecelik mıknatıs ile vuruntu momentinin deneysel yolla incelenmesi

Üçgen şekilli mıknatıs yapısı uzun çalışmalar sonucunda ortaya çıkarılmış ve kenar açıları detaylı sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilmiştir. Bu mıknatıs yapısı daha sonra üretilip laboratuvarda denenmiştir. Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de bu motorun 500 rpm'de seri ve paralel bağlanmış, stator sargıları faz ve fazlar arası gerilimleri sinyal şekilleri yer almaktadır. Bu yapı için faz gerilimi tepe değerleri, stator sargıları seri bağlı iken 22V, paralel bağlı 11V, faz arası gerilimleri ise seri bağlı iken 44V, paralel 22V ölçülmüştür.



(a) (b)

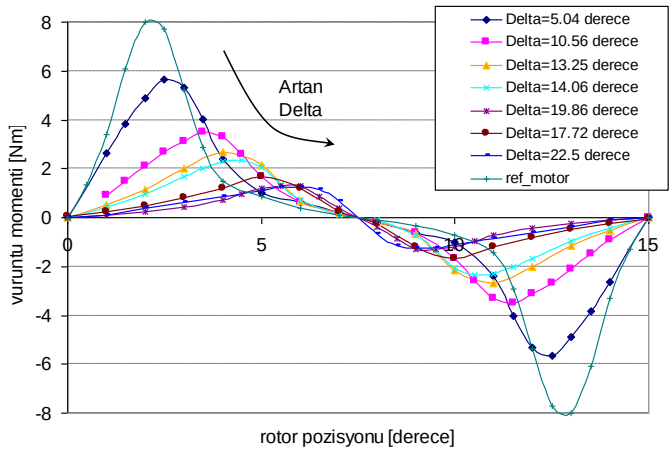
Şekil 4.27: EASM motorun 500 rpm'de açık devre faz geriliminin üçgen mıknatıs için görünümü (a) seri bağlantı (prob 20 V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (b) paralel (prob 20V, osiloskop 0.5V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (rotor konumu 0 derece)



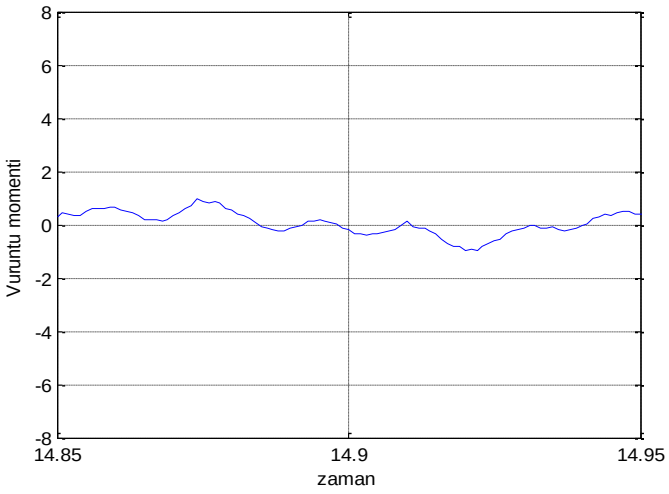
(a) (b)

Şekil 4.28: EASM motorun 500 rpm'de açık devre faz arası geriliminin üçgen mıknatıs için görünümü (a) seri bağlantı (prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (b) paralel bağlantı (prob 20V, osiloskop 0.5V/div ve 5ms time/div kademesindedir), (rotor = 0 derece)

Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da ise üçgen mıknatıslı yapının sonlu elemanlar analizi ile yapılan vuruntu momenti incelemesi ve deneysel yollarla elde edilen 22.5 derece kenar açılı üçgen mıknatısın vuruntu momenti gösterilmiştir. Çalışmalardan da görüldüğü gibi deneysel olarak bulunan 1.0Nm maksimum vuruntu momenti ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen 1.1Nm moment değerleri uyum içerisindedir.



Şekil 4.29: Üçgen şekle sahip mıknatıslı rotorun farklı kenar açıları için vuruntu momentinin değişimi (SEA) [27]



Şekil 4.30: Üçgen şekle sahip mıknatıslı rotorun vuruntu momenti-zaman grafiği (test verisi)

BÖLÜM 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan çalışmada, kullanım alanları gittikçe genişleyen sürekli mıknatıslı makina ailesinden SMFDA motoru tanıtılmış, eksenel akılı disk tipi SMFDA motoru açıklanarak hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada PI hız kontrolü gerçekleştirildikten sonra, üretilen farklı tip EASM motorda mıknatıs kaykı yöntemleri denenerek moment kalitesi hakkında incelemeler yapılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında Sürekli Mıknatıslı Eksenel Akılı Disk tipi motorun hız kontrolü deney düzeneği oluşturulmuştur. Hız kontrolü için TMS320F2812 kontrol kartı ve CS-IIB sürücüsü kullanılmış, özellikleri açıklanmıştır. PI hız kontrolü programı MATLAB/SIMULINK'te tasarlanarak CODE COMPOSER STUDIO programında derlenmiştir. Yapılan denemelerle sistemin gösterdiği tepkiye en uygun PI katsayılarına ulaşılmıştır (K_p=0.0925 ve K_i=5e-6). Bu düzene göre motor istenen referans hızlarda çalıştırılmıştır (500 rpm için 3sn, 1000 rpm için 6sn oturma süresi). Kullanılan hız transduserinden veri toplama kartı aracılığı ile sistem hızlanma cevabı grafiksel olarak aktarılmıştır. Bu sonuçlara göre PI hız kontrolü doğrusallığı bozucu bir etki ile karşılaşılmadan başarıyla gerçekleştirilmiştir.

İkinci aşamada Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Disk motorlarda moment kalitesine büyük etkisi olan vuruntu momenti açıklanmış, moment kalitesini düşüren bu bileşeni azaltıcı yöntemlerden bahsedilmiştir. Bu yöntemlerden mıknatıs kaykı tekniği uygulanmıştır. Üretilmiş olan dört farklı mıknatıs rotor yapısı için laboratuvar ortamında vuruntu momenti ölçümleri yapılmıştır. Fan tipi 140° (kaykısız), fan tipi 120°, yuvarlak ve üçgen mıknatıslı rotorlar kullanılarak vuruntu momenti ölçümleri daha önceden yapılmış SEA'leri ile karşılaştırılmıştır. SEA değerleri ile elde edilen ölçüm değerlerinin örtüştüğü görülmüştür.

Bu sonuçlar ışığında üçgen şekilli ve dairesel mıknatıs kaykılı yapıların diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında vuruntuyu azaltmada etkili olduğu görülmüştür. Referans alınan kaykısız rotora göre yuvarlak mıknatıslı rotor yapısında vuruntu momentinde %62.5 ve üçgen mıknatıslı yapıda %87.5 oranında vuruntu momentinin azaldığı elde edilen verilerle sunulmuştur. Buna göre üçgen mıknatıslı rotor yapısının en etkili kaykı yöntemi olduğu görülmüştür.

Bu tez ve ilgili TÜBİTAK projesi kapsamında tasarlanan, üretilen ve kontrol edilen motor Türkiye'nin ilk disk motoru olma özelliğini taşımaktadır. Ayrıca farklı disk rotorlar kullanılarak moment kalitesi üzerine yapılan çalışmalar içinde dünyada bir ilk olma özelliği göstermektedir. Laboratuvar çalışmaları ve elde edilen sonuçlar sayesinde Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Disk motorlarda gelecekte yapılacak çalışmalar için kapsamlı bir alt yapı sunulmaktadır.

Yapılan bu çalışmalara ek olarak, üretilen eksenel akılı makina, motor olarak her bir rotor yapısı için yüklenip çıkış moment dalgalanması incelenebilir. Ve farklı rotorların vuruntu-moment dalgalanması karşılaştırılabilir. Ayrıca, çıkış momentinin frekans analizi yapılarak vuruntu momenti ve moment dalgalanmasından gelen harmonikler karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

[1] http://www.magnets.bham.ac.uk, (**Ziyaret Tarihi: 14 Kasım 2008**).

[2] Lee, E.C., "Application Of Brushless DC Drives In Blow Molding", ***Powertec Industrial Corporation***, (2001).

[3] Yedamale, P., "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals", ***Microchip Technology Inc.***, (2003).

[4] Kirtley , J.L., "Permanent Magnet Brushless DC Motors", ***Massachusetts Institute of Technology Department of Electrical Engineering and Computer Science***, Ders Notları:7, (2004).

[5] Bose, B.K., "Modern Power Electronics and AC Drives", ***Prentice Hall PTR***, (2002).

[6] Pillay, P. ve Krishnan, R., "Modelling, Simulation and Analysis of a Permanent Magnet Brushless DC Motor Drive.", ***Conference Record of IEEE/IAS Meeting***, (1987).

[7] Chern, T.L., Chang, J. ve Chang, G.K., "DSP Based Integral Variable Structure Model Following Control For Brushless DC Motor Drivers", ***IEEE Trans. on Power Electronics,*** Vol:12, No:1**,** 53–63, (1997).

[8] Toliyat, H.A., "Motor Drive Dynamics (ELEN 632)", ***College Station TX: Texas A&M University***, (1999).

[9] Spectrum Digital Inc., "eZdspTMS320F2812 Technical Reference", 5-10-12, (2003).

[10] Creative Power Technologies, "CS-IIB Integrated Inverter Technical Manual", 47, (2001).

[11] Heins, G., "Control Methods for Smooth Operation of Permanent Magnet Synchronous AC Motors", Doktora Tezi, ***School of Engineering and Logistics Charles Darwin University***, (2007).

[12] Lee, E.C., "Brushless D.C. a Modern Approach to Variable Speed Drives", ***IEEE Trans. on Power Electronics***, (1990).

[13] Pillay, P. ve Krishnan, R., "Modeling, Simulation, and Analysis of Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent Magnet Motor Drives, Part 11: The Brushless DC Motor Drive", ***IEEE Transactions on Industry Applications***, Vol:25, No:2, (1989).

[14] Texas Instruments Application Report "Using the ePWM Module for 0%-100% Duty Cycle Control", Literatür Numarası: SPRAAI1, (2006).

[15] Texas Instruments Digital Control Systems Group Application Report"Digital Motor Control Software Library", Literatür Numarası: SPRU485A, (2003).

[16] Texas Instruments Europe Application Report, "DSP Solutions for BLDC Motors", Literatür Numarası: BPRA055, (1997).

[17] Texas Instruments Application Report, "TMS320x281x DSP Event Manager (EV) Reference Guide", Literatür Numarası: SPRU065D, (2004).

[19] Ree, J.D. ve Boules, N., "Torque Production in Permanent Magnet Synchronous Motors", ***IEEE Trans. Industry Applications***, Vol:25, No:1, 107-122, (1989).

[20] Studer, C., Keyhani, A., Sebastian, T., ve Murthy, S.K., "Study in Cogging Torque in Permanent Magnet Machines", ***IEEE Industry Applications Society Annual Meeting***, New Orleans,42-49, (1997).

[21] Hanselman, D.C., "Effect of Skew, Pole Count and Slot Count on Beushless Motor Radil Force, Cogging Torque and Back EMF", ***IEEE Proc. Electric Power Applications***, Vol:144, No:5, 325-330, (1997).

[22] Zhu, Z.Q., Ruangsinchaiwanich, S., Ishak, D. ve Howe, D., "Analysis of Cogging Torque in Brushless Machines Having Non-uniformly Distributed Stator Slots and Stepped Rotor Magnets", ***IEEE Trans. Magnetics***, Vol:41, No:10, 3910-3912, (2005).

[23] Salon, S.J., "Finite Element Analysis of Electric Machines", ***Norwell, MA: Kluwer***, (1995).

[24] Kawase, Y., Yamaguchi, T. ve Hayashi, Y., "Analysis of Cogging Torque of Permanent Magnet Machine by 3-D Finite Element Method", ***IEEE Trans. Magnetics***, Vol:31, No:3, 2044-2047, (1995).

[25] Aydın, M., "Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Elektrik Motorlarında Vuruntu Minimizasyonu", ***12. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi ve Fuarı***, 1, (2007).

[26] Zhu, Z.Q. ve Howe, D., "Influence of design parameters on cogging torque in permanent machines" IEEE Trans. Energy Conversion, Vol:15, No:4, 407-412, (2000).

[27] Aydın, M., "Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Elektrik Motorlarında Vuruntu Moment Minimizasyonu", ***TUBITAK Proje No: 108E051, Rapor 1,*** (2008).

[28] Heins, G., "Control Methods for Smooth Operation of Permanent Magnet Synchronous AC Motors", Doktora Tezi, ***School of Engineering and Logistics Charles Darwin University***, (2007).

[29] Aydın, M., "Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Elektrik Motorlarında Vuruntu Moment Minimizasyonu", ***TUBİTAK Proje No: 108E051, Proje Sonuç Raporu,*** (2009).

[30] Wu, A.P. ve Chapman, P.L., "Simple Expressions for Optimal Current Waveforms for Permanent Magnet Synchronous Machine Drives", 155, (2003).

[31] Poels, P.W., "Cogging Torque Measurement, Moment of Inertia Determination and Sensitivity Analysis of an Axial Flux Permanent Magnet AC motor", ***Technische Universiteit Eindhoven***, 20, (2008).

[32] Kurronen, P., "Torque Vibration Model of Axıal-Flux Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Machine", Doktora Tezi, ***Lappeenranta University of Technology***, 108, (2003).

EKLER

EK–A

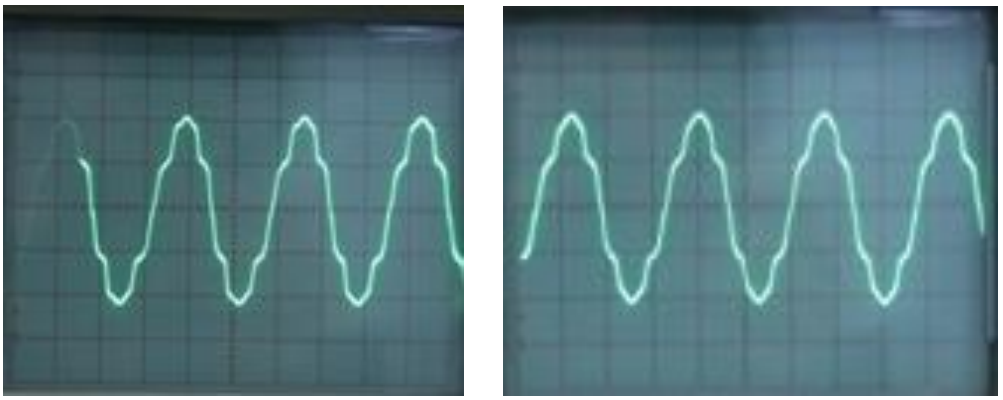
Tanım: Aşağıda EASM motorun 1000 rpm'de seri ve paralel bağlanmış, stator sargıları faz ve fazlar arası gerilimleri sinyal şekilleri yer almaktadır. Tablo 4.1'de sargı gerilimleri ölçümleri yer almaktadır.

Fan tipi (140°) EASM motorun 1000 rpm'de seri ve paralel bağlanmış, stator sargıları faz gerilimleri sinyal şekilleri yer almaktadır:



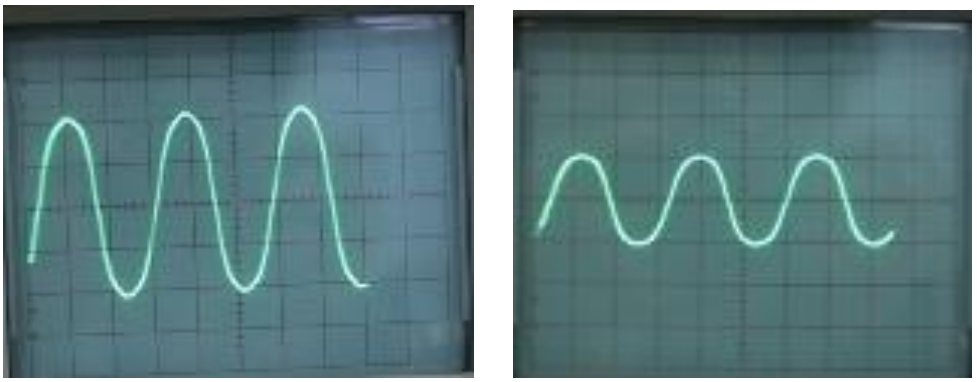
Şekil A1: (seri) (paralel)
(seri: prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir,
paralel: prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir)

Fan tipi (140°) EASM motorun 1000 rpm'de seri ve paralel bağlanmış, stator sargıları fazlar arası gerilimleri sinyal şekilleri yer almaktadır:



Şekil A2: (seri) (paralel)
(seri: prob 20V, osiloskop 2V/div ve 5ms time/div kademesindedir,
paralel: prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir)

Yuvarlak (140°) mıknatıslı EASM motorun 1000 rpm'de seri ve paralel bağlanmış, stator sargıları faz gerilimleri sinyal şekilleri yer almaktadır:



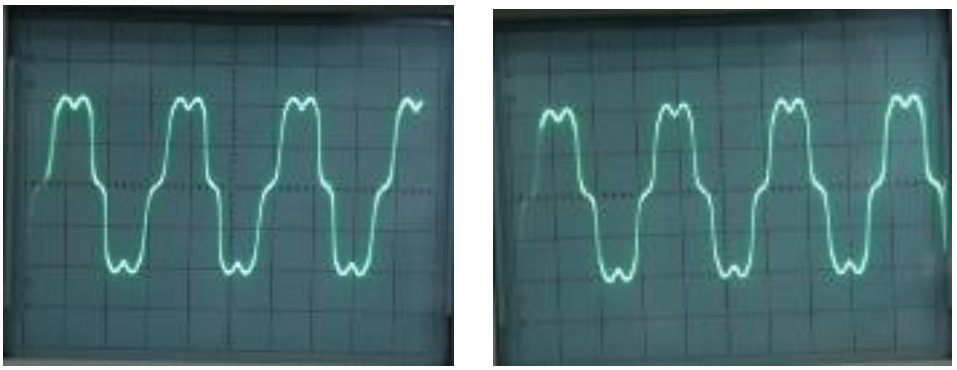
Şekil A3: (seri) (paralel)
(seri: prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir,
paralel: prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir)

Yuvarlak (140°) mıknatıslı EASM motorun 1000 rpm'de seri ve paralel bağlanmış, stator sargıları fazlar arası gerilimleri sinyal şekilleri yer almaktadır:



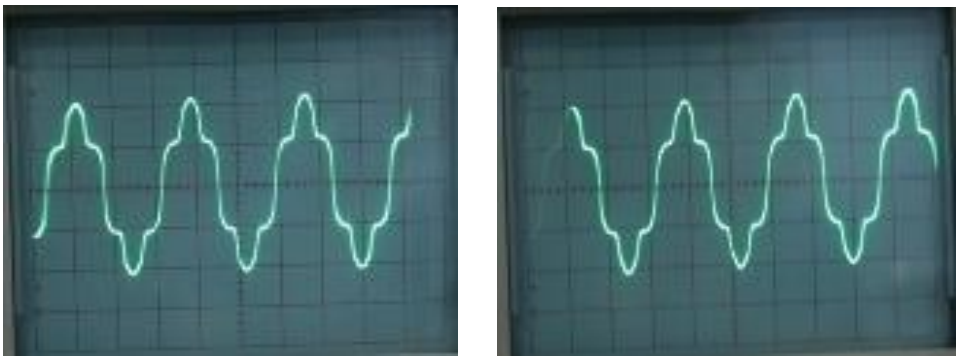
Şekil A4: (seri) (paralel)
(seri: prob 20V, osiloskop 2V/div ve 5ms time/div kademesindedir,
paralel: prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir)

Fan Tipi (120°) mıknatıslı EASM motorun 1000 rpm'de seri ve paralel bağlanmış, stator sargıları faz gerilimleri sinyal şekilleri yer almaktadır:



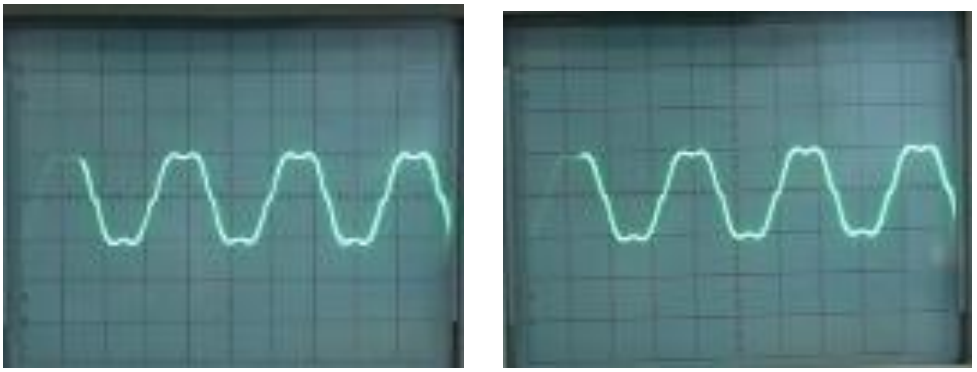
Şekil A5: (seri) (paralel)
(seri: prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir,
paralel: prob 20V, osiloskop 0.5V/div ve 5ms time/div kademesindedir)

Fan Tipi (120°) mıknatıslı EASM motorun 1000 rpm'de seri ve paralel bağlanmış, stator sargıları fazlar arası gerilimleri sinyal şekilleri yer almaktadır:



Şekil A6: (seri) (paralel)
(seri: prob 20V, osiloskop 2V/div ve 5ms time/div kademesindedir,
paralel: prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir)

Üçgen (140°) mıknatıslı EASM motorun 1000 rpm'de seri ve paralel bağlanmış, stator sargıları faz gerilimleri sinyal şekilleri yer almaktadır:



Şekil A7: (seri) (paralel)
(seri: prob 20V, osiloskop 2V/div ve 5ms time/div kademesindedir,
paralel: prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir)

Üçgen (140°) mıknatıslı EASM motorun 1000 rpm'de seri ve paralel bağlanmış, stator sargıları fazlar arası gerilimleri sinyal şekilleri yer almaktadır:



Şekil A8: (seri) (paralel)
(seri: prob 20V, osiloskop 2V/div ve 5ms time/div kademesindedir,
paralel: prob 20V, osiloskop 1V/div ve 5ms time/div kademesindedir)

ÖZGEÇMİŞ

Erdem Özyurt 1982 yılı Bursa doğumludur. İlk, orta ve lise öğrenimini Bursa'da tamamlamıştır. 2001 yılında girdiği Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Öğretmenliği Bölümü'nden 2006'da mezun olmuştur. 2006 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrencisidir.