



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



FİRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARINDA OPTİMAL HALL SENSÖR KONUMUNUN MOTOR PARAMETRELERİNE ETKİSİ

KEMAL HASANUSTA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Anabilim Dalı

Elektrik Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Necibe Füsün Oyman SERTELLER

İSTANBUL, 2016



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



FİRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARINDA OPTİMAL HALL SENSÖR KONUMUNUN MOTOR PARAMETRELERİNE ETKİSİ

KEMAL HASANUSTA
(522310004)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik Anabilim Dalı
Elektrik Programı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Necibe Füsün Oyman SERTELLER

İSTANBUL, 2016

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi
Kemal HASANUSTA'nın “**FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARINDA
OPTİMAL HALL SENSÖR KONUMUNUN MOTOR
PARAMETRELERİNE ETKİSİ**” başlıklı tez çalışması, **29.02.2016** tarihinde
savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Necibe Füsün Oyman SERTELLER (Danışman)

Marmara Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Ümit Kemalettin TERZİ

(Üye)

Marmara Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ

(Üye)

İstanbul Teknik Üniversitesi

.....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih
ve sayılı kararı ile Kemal HASANUSTA'nın Elektrik Anabilim Dalı Elektrik
Programında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Uğur YAHŞİ

MARMARA UNIVERSITY
INSTITUTE FOR GRADUATE STUDIES
IN PURE AND APPLIED SCIENCES

Kemal HASANUSTA, a **Master of Science** student of Marmara University Institute for Graduate Studies in Pure and Applied Sciences, defended Kemal HASANUSTA's thesis entitled "**EFFECT OF OPTIMAL HALL SENSOR'S POSITION ON PARAMETERS OF BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTORS (BLDCM)**" on February **29, 2016** and has been found to be satisfactory by the jury members.

Jury Members

Prof. Dr. Necibe Füsün Oyman SERTELLER (Advisor)

Marmara University

.....

Assist. Prof. Ümit Kemalettin TERZİ (Jury Member)

Marmara University

.....

Assist. Prof. Güven KÖMÜRGÖZ (Jury Member)

Istanbul Technical University

.....

APPROVAL

Marmara University Institute for Graduate Studies in Pure and Applied Sciences Executive Committee approves that Kemal HASANUSTA be granted the degree of **Master of Science** in **Department of Electric, Electric Program** on,2016.
(Resolution no:).

Director of the Institute

Prof. Dr. Uğur YAHŞİ

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmam süresince her türlü destek ve katkıyı veren, yol gösteren, tamamlanmasında büyük emeği olan değerli hocam ve danışmanım olan Prof. Dr. N.Fusun OYMAN SERTELLER'e; çalışmama katkı sağlayan Nefer Elektronik firmasının sahipleri Ferhat ŞİRİN ve Nermin Şirin'e, İTÜ Elektrik Elektronik Mühendisliği Fakültesi Öğretim Üyesi Yard. Doç. Dr. Derya A. Kocabaş'a teşekkür ederim. Benim yetişmemde emeği geçen, benden maddi ve manevi hiçbir desteği esirgemeyen aileme şükranlarımı sunarım. Bu çalışmam boyunca bana hep destek ve yanımda olan, cesaretlendiren eşim ve kızım İpek'e de teşekkür ederim.

Şubat, 2016

Kemal HASANUSTA

İÇİNDEKİLER

	SAYFA
ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
SEMBOLLER	vii
KISALTMALAR	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Fırçasız doğru akım motorları (FSDAM)	1
1.1.1. Tanım ve Özelliği	1
1.1.2. Kullanılan Alanlar	3
1.1.3. FSDAM ve Sürücü Sisteminin Yapısı	4
1.1.4. Stator Yapısı	4
1.1.5. Rotor Yapısı	5
1.1.6. Geri Besleme Ünitesi	7
1.1.6.1. Alan Etkili Sensörlerin (Hall Effect Sensor) Kullanımları	7
1.1.6.2. Optik Sensörlerin (Encoder) Kullanımları	10
1.1.6.3. Sıfır Geçiş Dedektörlerinin Kullanımları	12
1.1.7. Motorun Sürücü Devreleri	14
1.1.7.1. Mosfet Yapısı	15
1.1.7.2. Transistörler Yapısı	15
1.1.7.3. Tristörler Yapısı	16
1.1.7.4. IGBT Yapısı	16
1.1.7.5. PWM Çalışması	17
1.1.8. Denetleyiciler (Kontrolörler)	18
1.2. Fırçasız DA Motorlarının Çeşitleri	18
1.2.1. Fırçasız DA Motorları (Dış Rotorlu)	18
1.2.2. Fırçasız DA Motorları (Disk Tipi)	19

1.2.3. Fırçasız DA Motorları (İç Rotorlu)	20
1.2.3.1. Fırçasız DA motorları (Yüzey mıknatıslı, iç rotorlu)	21
1.2.3.2. Fırçasız DA motorları (Gömülü mıknatıslı, iç rotorlu)	21
1.2.3.3. Fırçasız DA motorları (Kanal mıknatıslı, iç rotorlu)	22
1.3. Fırçasız DA Motorların Avantaj ve Dezavantajları	22
1.4. FSDAM'ların Çalışma Prensipleri	23
1.5. FSDAM'ların Matematiksel Modelleri	26
1.6. FSDAM'ların Kontrolleri	27
1.6.1. Kontrol Nedir?	27
1.6.2. FSDAM'larda Kontrol Yöntemi	28
1.6.2.1. Klasik Kontrol Yöntemleri	28
1.6.2.2. Modern Kontrol Yöntemleri	29
1.6.2.2.1. Bulanık Mantık	29
1.6.2.2.2. Genetik Algoritma	30
1.6.2.2.3. Yapay Sinir Ağları	32
1.6.2.2.4. Sinirsel Bulanık Denetleyiciler	33
1.6.2.2.5. Dalgacık Tekniği	33
2. MATERYAL VE YÖNTEM	34
2.1. FSDAM Uyartım Şekilleri	34
2.1.1. Unipolar Uyartımlı FSDAM	34
2.1.2. Bipolar Uyartımlı FSDAM	40
2.2. FSDAM Faz Sayısı	44
2.2.1. Bir Fazlı FSDAM	45
2.2.2. İki Fazlı FSDAM	46
2.2.3. Üç Fazlı FSDAM	48
2.3. Fırçasız Doğru Akım Motorun Hız Ve Konum Denetimi	55
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	60
3.1. Fırçasız Doğru Akım Motorunun Bipolar Ve Unipolar Çalıştırılması	60
3.1.1. Bipolar- Unipolar Sürücüde Bipolar Çalışma	61
3.2. Bipolar Sürücüde Bipolar Çalışma Deneyi Test Verileri	64

4. SONUÇLAR	80
KAYNAKLAR	82
EKLER	81
ÖZGEÇMİŞ	85



ÖZET

FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARINDA OPTİMAL HALL SENSÖR KONUMUNUN MOTOR PARAMETRELERİNE ETKİSİ

Bu çalışmada bipolar sürücülü hall sensörlü fırçasız doğru akım motoru (FSDAM)'nın sensörlerinin, optimal çalışma aralığı deneysel olarak araştırılmıştır. Klasik doğru akım makinalarında teori ve deneylerle ispatlanmış, motoru en verimli haliyle çalıştıran rotor ve stator magnetik eksenleri arasındaki elektriksel açı olan 90° 'ye karşılık gelen açı, FSDAM'da teorik olarak 60° ile 120° olarak belirlenmiştir. Bu değerlerden 120° lik elektriksel açı ile çalışan (hall sensörler arasındaki açı değeri) FSDAM üzerinde deneyler yapılmıştır. Bu çalışmada hall sensörler 0° (referans) ila 20° (açı kaydırılmış) elektriki açı arası ayarlama imkanı bulunan yerleri değiştirilerek, optimal çalışma parametreleri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışma; klasik doğru akım makinalarında endüvi reaksiyonunu ve dolayısıyla komutasyonu iyileştirmeye yardımcı olan fırça kaydırma olayına denktir. FSDAM'ın referans (normal) ve açı kaydırılmış durumdaki moment, akım ve harmonik değerleri (THD) ölçülmüş ve karşılaştırmalı bir sonuç şeklinde verilmiştir. Bu araştırmada, çalışma sonuçları teorik bilgilerle de desteklenmiştir. FSDAM'da rotor pozisyonun tam ve doğru bir şekilde belirlenmesi, başka bir deyişle; hall sensörlerin motorun çalışma parametrelerine etkisinin en verimli olacak şekilde yerleştirilmesi oldukça zor bir iştir. Teorik çalışmalarının yanında titizlikle yapılması gereken deneysel çalışmalar da gereklidir. Bu çalışmada FSDAM'ın verimli çalışması için gerekli olan moment ve akım değerlerinin yanında, akım harmonik değerleri (THD) de ölçülmüştür ve karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Bu araştırma çalışması sonuçları teorik bilgilerle de desteklenmiştir.

Şubat , 2016

Kemal HASANUSTA

ABSTRACT

EFFECT OF OPTIMAL HALL SENSOR'S POSITION ON PARAMETERS OF BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTORS (BLDCM)

In this study, hall sensor's location for optimal operating range of bipolar brushless direct current (dc) motor was researched experimentally. In conventional dc machines, the angle corresponding to 90° (which is the electrical angle between rotor and stator magnetic axes that operates the motor most efficiently as proven by theory and experiments) is theoretically determined to be 60° and 120° in BLDCM. Here, experiments were made on electrical angle of 120° between hall sensors of BLDCM. In this study, hall sensors are attempted to get optimal operating parameters by changing the locations adjusting the geometrical angles from 0° (reference) to 20° (shifted angle). This study is equivalent to the brush shift event that helps improving commutation and armature reaction of conventional dc machines. Torque, current and harmonic values of (THD) BLDCM in reference (normal) and shifted position is given as a comparative result in detail. In this research, studied results are supported by theoretical knowledge. In BLDCM determination of rotor position accurately, in other words location of hall sensors so as to have most efficient effect on operation parameters of the motor is a very difficult task. A part from theoretical studies, experimental studies should be conducted thoroughly. In this study, beside the torque and current values for optimal motor parameters operation of BLDCM, THDs are also considered and measured. Results of this study are supported by theoretical information, as well.

February, 2016

Kemal HASANUSTA

SEMBOLLER

f	:Frekans(Hz)
θ	:Konum açısı(rad)
ω	:Açısal hız(rad/sn)
N	:Bir faz sargısının sarım sayısı
D	:Oran/görev periyodu
t	:Zaman(sn)
V_g	:Giriş gerilimi(V)
V_ç	:Çıkış gerilimi(V)
V_{a,b,c}	:Faz gerilimi(V)
C	:Kondansatör(F)
R	:Direnç(Ω)
i	: Akım(A)
e	:Faz zıt emk(V)
p	:Rotor kutupları sayısı
L	: Endüktans(H)
J	:Eylemsizlik(kg m ²)
M	:Ortak endüktans(H)
B	:Sürtünme katsayısı
T_e	:Elektromanyetik dönme momenti(Nm)
ω_m	:Rotorun mekanik hızı(d/dk)
T_L	: Yük dönme momenti(Nm)
T_H	: Hall gerilimi(V)
W_{1,2}	: Üç fazlı Unipolar Sürücülü FSDAMSargısıe ω
ω^*	:Referans hız(rad/sn)
eω	:Hata sinyali
i_q[*]	:Referans akım(A)
i_d[*]	:Mıknatıslanma akımı(A)

KISALTMALAR

FSDAM	:Fırçasız doğru akım motoru
H	:Alan(Hall)
SMSM	:Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar
DA/DA	:Doğru Akım
EMK	:Elektro Motor Kuvvet
MOS	:Metal oksit semikondüktör
C	:Kollektör
D	:Diyot
W	:Watt
cw	:Saat yönünde
E	:Emiter
B	:Baz
S.C.R.	:Silikon Kontrollü Redresör
A	:Anot
K	:Katod
G	:Kapı(Gate)
IGBT	: Transistör (Kapı İzoleli Bipolar) (Transistor Insulate Gate Bipolar)
PWM	:Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
PI	:Oransal- integral kontrolü tipindeki denetleyici
PD	:Oransal-türev kontrolü tipindeki denetleyici
PID	:Oransal-integral ve türev kontrolü tipindeki denetleyici
GA	: Genel algoritma
ÇKP	:Çok katlı perseptron
Nm	:Newtonmetre
P_{1,2,3}	:Optik sensör(Foto transistör)

ŞEKİL LİSTESİ

	SAYFA
Şekil 1. Fırçasız DA motoruna ait örnekler	1
Şekil 2. FSDAM yapısı ve sürücü sistemi	4
Şekil 3. FSDAM statoru ve sargıları	4
Şekil 4. Kutup sayıları farklı statorların yapıları	5
Şekil 5. Alan(Hall) etkili sensörlerin yapısı	8
Şekil 6. 2 kutuplu ve 4 kutuplu motorlar için alan etkili sensörlerin durumu	9
Şekil 7. Alan(hall) etkili sensörlerin stator üzerindeki yerleşim şekilleri	10
Şekil 8. Artımlı (incremental) encoderler	11
Şekil 9. Mutlak encoderler	11
Şekil 10. Sıfır geçiş dedektörlerine ait yapı ve bağlantı	13
Şekil 11. Mosfetler ile yapılan sürücü devresi	14
Şekil 12. Mosfetin iç yapısı ile sembolü	15
Şekil 13. Tristörlerin sembolü, yapıları ve eşdeğer devreleri	16
Şekil 14. FSDAM ile sürücü devre bağlantısı	17
Şekil 15. PWM yönteminde anahtarın basit yapısı	17
Şekil 16. Dış rotorlu FSDAM yapısı	18
Şekil 17. Disk tipi FSDAM	19
Şekil 18. İç rotorlu FSDAM'ların yapısı	20
Şekil 19. FSDAM'larda rotor çeşitleri	21
Şekil 20. Pozisyon Geri Beslemeli Bir FSDAM Sürücü Sistemi Devresinin Şeması	24
Şekil 21. Sürücüye anahtarların bağlantısı	24
Şekil 22. 120° Faz Açılı Hall Sensör Grafiği	25
Şekil 23. Bulanıklaştırılmış bir denetleyicinin genel yapısı	30
Şekil 24. Genetik algoritmada işlem sıraları	31
Şekil 25. Çok Katlı Bir Perseptron Modeli	32
Şekil 26. Pozisyon Sensör Fototransistörlerin Rotor Milinde Yerleşimi	34
Şekil 27. Üç fazlı Unipolar Sürücülü FSDAM	35
Şekil 28. Anahtarlama Sırası ve Stator Manyetik Alanı Dönüşü	36
Şekil 29. Üç Faz FSDAM için Basit Unipolar Konverter	37

Şekil 30. Dört Kontrollü Anahtar ve Diyot ile Oluşturulan Konverter	38
Şekil 31. Her Bir Faz Sargısının Eşdeğer Devresi (a) İletim Anında (b) Komütasyon Anında	39
Şekil 32. Uyartım Şekilleri için Faz Akımı, Zıt EMK ve Çıkış Momenti Dalga Şekilleri	39
Şekil 33. Üç Fazlı FSDAM Bipolar Sürücü Devresi	41
Şekil 34. Kapak Konumuna Göre Stator Manyetik Alanı ve Momentin Yönü	41
Şekil 35. Stator Manyetik Alanının ve Rotorun Saat Yönünde Dönüşü	42
Şekil 36. Stator Manyetik Alanının ve Rotorun Saat Yönünün Tersine Dönüşü	44
Şekil 37. Tek Faz Geleneksel FSDAM Görünümü	45
Şekil 38. Tek Faz Sürücü Devresi	45
Şekil 39. Vantilatör Uygulamaları için 12 V 1W 'lık FSDAM Yapısı	46
Şekil 40. İki Fazlı FSDAM Devresi ve Faz Akımları Dalga Şekilleri	48
Şekil 41. Üç Fazlı FSDAM Genel Yapısı	49
Şekil 42. 20 ⁰ İletim Komütasyonu	50
Şekil 43. Üç Fazlı FSDAM Sürücü Devresi	50
Şekil 44. Pozisyon Moment Karakteristiği	51
Şekil 45. İdeal Akım Dalga Formları	53
Şekil 46. Ayarlı DA-Hat Gerilim Hız Kontrolünde Yüksüz Durumda Faz Akımları	54
Şekil 47. FSDAM'ın Sürücü Devresi ve Denetim Yapıları	55
Şekil 48. Ölçü ve yükleme devresi ile birlikte deneyin elektriksel ve mekanik bağlantı şeması	56
Şekil 49. FSDAM sürücü devresi ve kontrol ünitesi	57
Şekil 50. FSDAM Test Düzeneği	57
Şekil 51. FSDAM'ın Sürücü Devresi ve Denetim Yapıları Blok Şeması	58
Şekil 52. FSDAM'ın Fabrikada Elde Edilen Hız, Verim, Moment ve Güç Eğrileri	59
Şekil 53. FSDAM hall sensörlerinin ve rotor ile stator magnetik eksen vektörleri	59
Şekil 54. Bipolar Uyartımlı FSDAM	61
Şekil 55. Bipolar Uyartımlı FSDAM Dalga Formu	62
Şekil 56. FSDAM Bipolar Çalışma Sürücü Devresi	63
Şekil 57. Bipolar 33V Boşta Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği	64
Şekil 58. Bipolar 33V Boşta Komütasyon Açısı 20 ⁰ Değiştirilmiş Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği	64

Şekil 59. Bipolar 33V Yükte Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği	65
Şekil 60. Bipolar 66V Boşta Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği	65
Şekil 61. Bipolar 66V Boşta Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği	65
Şekil 62. Bipolar 66V Yükte Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği	66
Şekil 63. Bipolar 100V Boşta Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği	66
Şekil 64. Bipolar 100V Boşta Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği	66
Şekil 65. Bipolar 100V Yükte Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği	67
Şekil 66. Bipolar 33V Yükte Akım Grafiği	67
Şekil 67. Bipolar 33V Yükte Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Akım Grafiği	68
Şekil 68. Bipolar 66V Yükte Akım Grafiği	68
Şekil 69. Bipolar 66V Yükte Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Akım Grafiği	68
Şekil 70. Bipolar 100V Yükte Akım Grafiği	69
Şekil 71. Bipolar 100V Yükte Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Akım Grafiği	69
Şekil 72. Bipolar 33V Yükte Harmonik Değerleri	70
Şekil 73. Bipolar 33V Yükte Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Harmonik Değerleri	70
Şekil 74. Bipolar 66V Yükte Harmonik Değerleri	71
Şekil 75. Bipolar 66V Yükte Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Harmonik Değerleri	71
Şekil 76. Bipolar 100V Yükte Harmonik Değerleri	72
Şekil 77. Bipolar 100V Yükte Yükte Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Harmonik Değerleri	72
Şekil 78. Bipolar Yüklü Çalışma Devir – Moment Grafiği	73
Şekil 79. Bipolar Yüklü Çalışma Yükte Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Devir – Moment Grafiği	74
Şekil 80. Bipolar Yüklü Çalışma Gerilim-Harmonik Grafiği	75
Şekil 81. Bipolar Yüklü Çalışma Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Gerilim-Harmonik Grafiği	75

Şekil 82. 33V Bipolar Çalışma Faz Açısına Göre Moment- Devir Sayısı	
Grafiği,Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş/Değiştirilmemiş Durum	76
Şekil 83. 66V Bipolar Çalışma Faz Açısına Göre Moment- Devir Sayısı	
Grafiği,Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş/Değiştirilmemiş Durum	76
Şekil 84. 100V Bipolar Çalışma Faz Açısına Göre Moment- Devir Sayısı	
Grafiği,Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş/Değiştirilmemiş Durum	77
Şekil 85. 33V Bipolar Çalışmada 20^0 Komütasyon Açısı Değişiminde Harmonik (THD)	
Değerleri	78
Şekil 86. 66V Bipolar Çalışmada 20^0 Komütasyon Açısı Değişiminde Harmonik (THD)	
Değerleri	78
Şekil 87. 100V Bipolar Çalışmada 20^0 Komütasyon Açısı Değişiminde Harmonik	
(THD) Değerleri	79
Şekil 88. Herbir Gerilim Değerinde Bipolar Çalışmada 20^0 Komütasyon Açısı	
Değişiminde Harmonik (THD) Değerleri	79

TABLO LİSTESİ

	SAYFA
Tablo1. Sensör bilgisi ve rotor konumuna denk gelen anahtar durumu	25
Tablo 2. Anahtarlama Elemanlarının Pozisyonları (İleri Yönde)	42
Tablo 3. Anahtarlama Elemanlarının Pozisyonları(Geri Yönde)	43
Tablo 4. Motor Karekteristikleri	58



1. GİRİŞ

1.1. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI (FSDAM)

Günümüzde küçük güçlerde çok yaygın olarak kullanılan FSDAM'lar gelişen teknoloji sayesinde, orta ve büyük güçlerde de verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Kullanım alanı çok geniştir; küçük yazıcılardan tıbbi cihazlara, elektrikli taşıt sistemlerinden küçük güçlü enerji sistemlerine kadar çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Son on yıl içinde FSDAM ile ilgili literatürde birçok teorik ve deneysel çalışmalara rastlamak mümkündür[1].

1.1.1. Tanım ve Özelliği

FSDAM'ın sabit mıknatıslı bir rotoru vardır. Rotorda komütasyon elektronik olarak gerçekleşir. Komütasyonun oluşması için rotor pozisyonu tespit edilmelidir[2]. FSDAM'lar bir çeşit senkron motordur[3]. Bir DA makinasında, endüvide bulunan bir bobinde, akımın yön değiştirmesine komütasyon denir. Sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarında statorda trapezoidal hava aralığı akısı oluşur. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM)'da oluşan hava aralığı akısı sinüzoidal olmasına rağmen oluşan magneto motor kuvvet (MMK) sabit bir hızla dönmez. Burada sürekli mıknatıslı FSDAM'lar ile SMSM arasındaki temel farklardan bahsedilmiştir[4,5]. Şekil 1'de FSDAM'a ait örnekler gösterilmiştir.



Şekil 1. Fırçasız DA motoruna ait örnekler[2]

FSDAM'ların çalışması ile fırçalı DA motorlarının çalışması karakteristik olarak aynıdır. FSDAM'larda, rotor yapısı sabit mıknatıslıdır ve fırça ve kollektör düzenekleri olmadığı için uyarımda bu düzeneklerin görevi yoktur[6]. FSDAM'larda yüksek

enerjili formasyonlu mıknatısların kullanılması ile birlikte FSDAM'lar daha çok tercih edilmeye başlanmıştır[7]. FSDAM'ların stator ve rotoru bir AA makinasına benzer ve aynı zamanda yarı iletken malzemelerden oluşan bir inverter ve rotor pozisyon sensörlerinin bir araya gelmesiyle oluşur[4].

FSDAM'larda işletme hızı aralığı; motorun boyutları ve motorun hız/yük kapasitesine göre değişiklik gösterir. Kaynak gerilimi olarak 42 V'tan daha küçük bir doğru gerilimine sahiptir. Kaynak geriliminin bu değerinin alt ve üst seviyelerinde de çalışabilir. Ancak en fazla 24 V gerilim değeri kullanılmaktadır. FSDAM'ların tercih edilme sebebi; yüksek bir maksimum momente ve yüksek bir verime, uzun bir ömüre sahip olmaları ve hassas bir şekilde hızının kontrol edilebilmesidir[8]. Sessiz çalışmaları ve yüksek hızlara erişebilme özellikleri bulunmaktadır. Gerilim çeşiti olarak alternatif akım ile beslenmemelerinden dolayı alternatif akım kaynağındaki gerilim değişimlerinden etkilenme durumları yoktur. İhtiyaç duyulduğunda seyyar bir DA kaynağı ile düşük gerilim değerlerinde de çalışabilmektedirler. FSDAM'ların kontrolü programlanabilmektedir. Bu sayede hız ve devir yönü değişimi, görev çevrilmesi ve frenlenme yapılması gereken ev aletlerinde kullanılırlar. Patlama ihtimali olan yerlerde veya tehlikeli ortamlarda, FSDAM'ın çalışması sırasında, ark oluşmaması ve düşük bir doğru gerilimle çalışması sebebiyle en çok tercih edilen motor çeşidinden bir tanesi olmuştur[4].

FSDAM'larda, komütasyon için fırçalara gerek duyulmaz. Fırçaların yaptığı iş elektronik olarak gerçekleşmektedir. FSDAM'lar, fırçalı DA motorlara göre daha çok verimlidir. Yani her iki motora da elektriki güç olarak aynı değerler uygulandığında, FSDAM'dan fırçalı DA motora göre daha büyük değerde bir mekanik güç alınır. FSDAM'larda stator üzerine yerleştirilmiş sargılar, soğutulmanın daha kolay yapılmasını sağlar. Bu sayede motora daha fazla miktarda yük bindirilebilir. Fırçaların olmaması sayesinde fırçalarda kayıp oluşmaz. Kıvılcım(ark) olayı da görülmez. Rotor geometrisi silindirik olarak yapıldığı için, FSDAM'larda titreşim problemlerine daha az rastlanır. İvmelenme süresinin azalması için rotor çapının düşürülmesi gerekir. Bunu sağlamak için de daha güçlü mıknatıslar kullanılmalıdır. FSDAM'lar, bir çok makine ve cihazlarda tercih edilmektedir. Örnek olarak bilgisayarların soğutma fanları ve CD/DVD oynatıcıları verilebilir[2].

FSDAM'lar; lineer hız-moment ilişkisini sağlar, fırça ve kolektörü bulunmadığı için bakımları azalır, bu sayede tehlikeli ortamlarda kullanılabilirler. Sessiz çalışırlar. Yüksek moment-hacim oranına sahiptir. Böylece küçük hacimle yüksek bir moment üretimini sağlarlar. Bu sayede bakır kullanımı azalır, elektriksel gürültü azalır. Daha büyük tork oluşur ve daha uzun ömürlü çalışabilirler. FSDAM'ların bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Bunlar ise; dahili olmayan bir güç elektroniği, istenen çalışma için rotor konum bilgisi gerekliliği ve alan (Hall) etkili pozisyon sensörlerine ihtiyaç duyulmasıdır. Pozisyon sensörü kullanılmayan çalışmaya sensörsüz çalışma durumu denilmektedir. FSDAM'ın sensörsüz olarak çalışması için bazı ek düzeneklerin kullanılması gereklidir. Bu yöntem ise diğerine göre biraz daha pahalı bir yöntem olarak ortaya çıkar[9].

FSDAM'lar, hız aralığı olarak 5000 d/dk'yı aşan geniş bir aralığa sahiptirler. Motorun çalışma hızını, motorun boyutları ve motorun yüklediği yük miktarı etkiler. Daha çok 24V gerilim ile beslenirler. Şebekede oluşan frekans dalgalanması veya frekans kayıplarından etkilenmez. Bunun sebebi doğru gerilim ile çalışmalarıdır. Boyutları 2,5 cm ile 14 cm arasında değişir. Açık veya kapalı olmak üzere iki farklı şekilde yapılabilmektedirler. Yapısında mekanik bir kontak yoktur. Bu sayede verimi çok yüksektir. Verimleri %70 ilâ %90'lar gibi yüksek değerlerdedir. Gerekli izolasyon şartları sağlanması durumunda su altında da çalıştırılabilir[9].

1.1.2. Kullanılan Alanlar

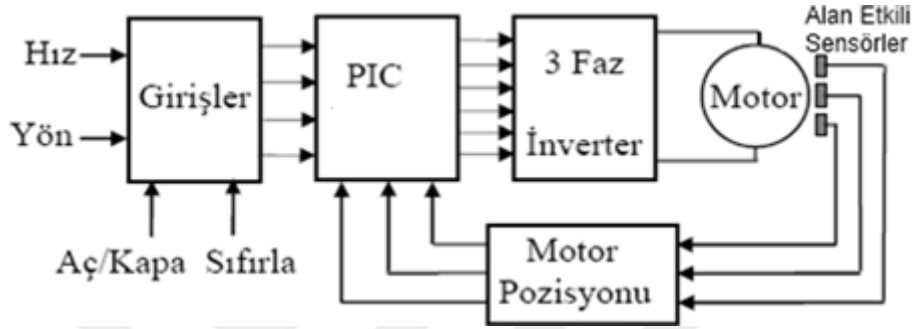
FSDAM'ların kullanıldığı alanlar; sağlık sektörü, robot teknolojisi, uzay endüstrisi, ısıtma, soğutma ve havalandırma sistemleri, yürüyen bant sistemleri, pompa ve fan motorları uygulamaları, teklike riski (parlama ve yanma) olan ortamlarda, CD/DVD-ROM sürücü, bilgisayar yazıcısı, yüksek güç ve hızın gerekli olduğu uygulamalardır[5].

Bulaşık makinası üretiminde de son zamanlarda FSDAM'lar tercih edilmektedir. Bu tercih sayesinde şebeke gerilimindeki değişimlerden etkilenme ortadan kalkmaktadır. Birim enerjideki yoğunluklar daha iyi olduğu için otomobil ve helikopterlerde de FSDAM'lar tercih edilmektedir[4].

1.1.3. FSDAM ve Sürücü Sisteminin Yapısı

FSDAM'ların yapısı ve sürücü sistemi beş bölümden oluşmaktadır. Bölümler; rotor (sabit mıknatıslı), stator (üç fazlı ve sargıları elektronik olarak enerjilendirilen), geri besleme üniteleri, evirici ve sürücü bölümü, denetleyici bölüm (yazılım ve donanım bölümleri)'dür[7].

Şekil 2'de FSDAM yapısını gösteren bir örnek gösterilmiştir.

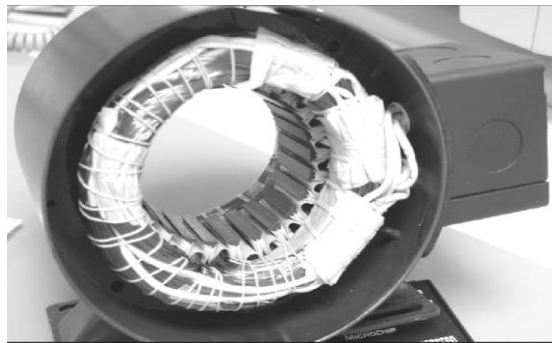


Şekil 2. FSDAM yapısı ve sürücü sistemi [11]

Şekil 2.'de, Alan (Hall) etkili pozisyon sensörleri tarafından rotorun pozisyonu denetleyiciye bildirilir. Bu sayede motor istenilen parametrelere uygun olarak çalışır. Şekil 2'de gösterilen motor, üç faz sargılı stator ve rotordan oluşmaktadır. Evirici ve sürücü bölümünde ise üç faz inverter kullanılmıştır.

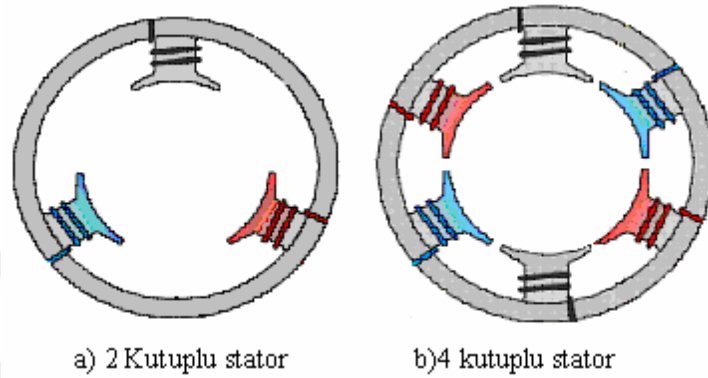
1.1.4. Stator Yapısı

FSDAM'ın statoru, bir AA motoruna benzemektedir. Stator, FSDAM'ın duran kısmını oluşturmaktadır. Üç fazlı sargılardan oluşur ve bu sargılar nüve ve içindeki oyuklara yerleştirilir. Şekil 3'de bir FSDAM stator örneği gösterilmiştir[12].



Şekil 3. FSDAM statoru ve sargıları [12]

Statoru asenkron motorun statoruna benzer fakat statorun içerisindeki sargıların dizilişi asenkron motordan biraz farklıdır. FSDAM'ın sargıları aynı asenkron motorlardaki gibi, yıldız veya üçgen bağlanabilir. FSDAM'larda, rotor oluk sayısı; rotorun kutup sayısına, faz sayısına ve stator sargı şekline bağlı olarak belirlenir. Statorun demir kayıplarını azaltmak için silisli saclardan yapılmaktadır[4,13].



Şekil 4. Kutup Sayıları Farklı Statorların Yapıları[2]

Stator sargılarının sarıldığı çıkık sayısı, statordaki çift kutup sayısının üç katı kadardır. Örneğin, kutup sayısı $2p=2$ olan statorda bir adet çift kutup olduğu için çıkık sayısı 3 adet olur. Şekil 4(a) da 2 kutuplu stator, şekil 4(b) de 4 kutuplu stator gösterilmiştir. Bu yapılar daha detaylı olarak şekil 6'da verilmiştir. Motorun gücünün artmasıyla, stator boyutları da artmaktadır. Gücün artması motordan geçen akımı artırır. Böyle olunca da kablo kesitlerinin artırılmasını gerekmektedir. Kablo kesitlerinin artması da stator boyutlarının büyümesine neden olmaktadır[2].

1.1.5. Rotor Yapısı

Rotor FSDAM'ın dönen kısmıdır ve kalıcı mıknatıstan yapılmaktadır. FSDAM'larda bir veya birden fazla mıknatıstan oluşan daimi mıknatıslı rotorlar bulunmaktadır. Kolektör ve fırça düzenekleri daimi mıknatıstan oluşan rotorda bulunmazlar. Kollektör ve fırçalar olmadığı için ark oluşmaz. Bakıma ihtiyaç duymazlar. Sürtünmeden nedeniyle oluşan kayıplar da azalmış olur. Rotorun üretimi sırasında daha çok ferrit maddesinden yapılan mıknatıslar tercih edilerek daimi mıknatıs elde edilir. Ferrit mıknatısların maliyeti ucuzdur. Bu yüzden tercih edilirler. Fakat olumsuz olarak da mevcut akı yoğunluğu düşüktür ve daha az manyetik yoğunluk sağlarlar[12].

Rotorun manyetik alanının uzun ömürlü olmasını sağlayan durum rotora yerleştirilen sabit mıknatıslardır. Rotorda kullanılacak manyetik malzeme belirlenirken sertlik değerlerine dikkat edilir. Bu değerler belirlenirken dikkat edilen faktörler; birim hacme düşen moment miktarı, motorun işletme sıcaklığı aralığı ve mıknatısın fonksiyonel olma durumudur[14]. Bunun yanında rotorda pahalı malzemeler kullanılmakta ve bu malzemeler zamanla özelliklerini yitirmektedir[2].

Rotorda sabit mıknatıs kullanılan mıknatıslar şunlardır: ferrit, seramik, alnico (Alüminyum-Nikel-Kobalt), samaryum-kobalt (SmCo)[4]. Şu anda rotorda bu mıknatıslara ek olarak neodmiyum-ferrit-boron (NdFeB), neodmiyum (Nd), samaryum-kobalt alaşımı ile yapılmış sabit mıknatısların üretimi yapılmaktadır[9].

Alnico (Alüminyum-Nikel-Kobalt) mıknatısların akı yoğunlukları yüksektir. Bununla beraber zorlayıcı kuvvetleri de düşüktür. Bu yüzden de mıknatisiyetlerini kısa zaman içinde kaybedebilme sıkıntısı vardır. Bu sebeplerden dolayı son zamanlarda kullanımı oldukça azalmıştır [6].

Ferrit ya da seramik mıknatısların, hem zorlayıcı kuvvetleri, hem de akı yoğunlukları yüksek değerdedir. Sahip oldukları mıknatisiyeti kaybedebilme sıkıntısı da söz konusu değildir. Ferritin doğada çok bulunması ve ucuz oluşu sebebiyle günümüzde kullanımı yaygındır[4].

Samaryum-kobalt (SmCo) mıknatısların, sahip olduğu manyetik yoğunluğu yüksek olup aynı zamanda da düzgün bir B-H karakterine sahiptir. Bu üstünlükleri dolayısıyla rağbet gören bir malzemedir. Fakat bu alaşımı oluşturan malzemelerin doğada az bulunuşu ve bu yüzden de pahalı olması nedeniyle, konuyla ilgilenenler farklı bir arayış içerisine girmişlerdir[2].

Samaryum-kobalt malzemesine göre daha ucuz olan daha düzgün B-H karakteristiğine sahip olan Neodmiyum-ferrit-boron mıknatısları neodmiyum, demir ve bor maddelerinin alaşımından oluşmaktadır[2].

1.1.6. Geri Besleme Ünitesi

Stator sargılarının rotor pozisyonuna göre enerjilendirilmesi gerekmektedir. Rotor pozisyonları sensörler kullanılarak belirlenmektedir. Geri besleme ünitelerinde sürücü fonksiyonları için gereken akım ve gerilim değerleri ölçülerek, ölçülen değerlere göre kullanılmalıdır. FSDAM'larda hız ve konumu kontrol etmek için, rotorun konumunu algılayabilen sensörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu algılama işlemi için genellikle alan (Hall) etkili sensörler ya da optik sensörler kullanılmaktadır. Bu sensörler stator üzerine veya motorun miline yerleştirilmektedir. Bu sensör ile sürülme teknolojisinden başka, FSDAM'ın sensörlerin kullanılmadığı şekilde sürülen teknolojileri de günümüzde oldukça fazla kullanılmaya başlanmıştır[7]. Fakat sensörlerin kullanılmadığı sürme tekniklerinde ilave olarak çeşitli düzeneklerin kullanılması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Bunun yanında sensör olmadan kullanılan motorlar, sensörlü olarak kullanılan motorlara göre daha düşük hız ve ivme değerlerine ulaşabilirler[9].

Sensörler: Belirli bir kaynaktan gelen uyarı veya işaretleri alarak, aldığı bu işaretlere uygun olarak sinyal üretebilen elektronik kontrol elemanlarıdır. Sensörler motor denetimi (kontrolü) için denetlenen (kontrol edilen) elektriksel ya da mekanik bir büyüklükten geri besleme sağlayarak, denetleyen birime gönderen optik veya elektromanyetik elemanlardır. Kontrol devrelerinde sensörlerden alınan geri besleme sinyalleri işlenecek büyüklüğe dönüştürülmektedir[8].

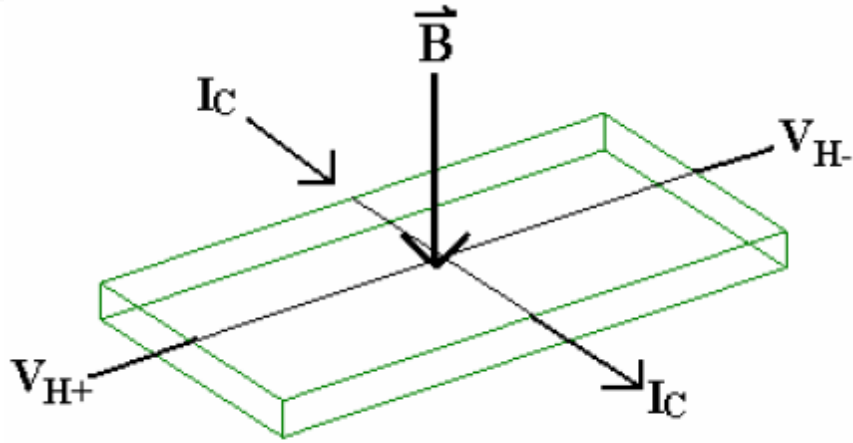
Birçok çeşit rotor konumu algılayan sensörler bulunmaktadır. Alan etkili sensörler (hall effect sensors) sensörler içinde en çok kullanılan sensör tipidir. Bu sensörlerden başka kullanılan diğer sensörler: optik sensörler (encoder) ve sıfır geçiş dedektörleri (zero crossing dedectors) dir. Motorun kontrolü sırasında rotor pozisyonun algılanması için, hangi algılama elemanın kullanılacağına karar vermek için bazı ölçütlerin değerlendirilmeden geçmesi gerekir. Değerlendirilecek ölçütler; çevre şartları, rotorda açısal olarak gerçekleşen yer değiştirmenin büyüklük derecesi, sensör için belirlenen mesafe, kontrol için beklenen hassaslık veya doğruluk derecesi, sensörün çekebileceği en büyük güç ve sensörün seri bir şekilde üretilebilme durumu olarak söylenebilir[15].

1.1.6.1. Alan Etkili Sensörlerin (Hall Effect Sensor) Kullanımları

Manyetik alanın algılanmasında alan etkili sensörler kullanılmaktadır. İlk defa 1879 yılında Dr. Edwin Hall tarafından alan etkisinin varlığı keşfedilmiştir. Dr. Edwin Hall

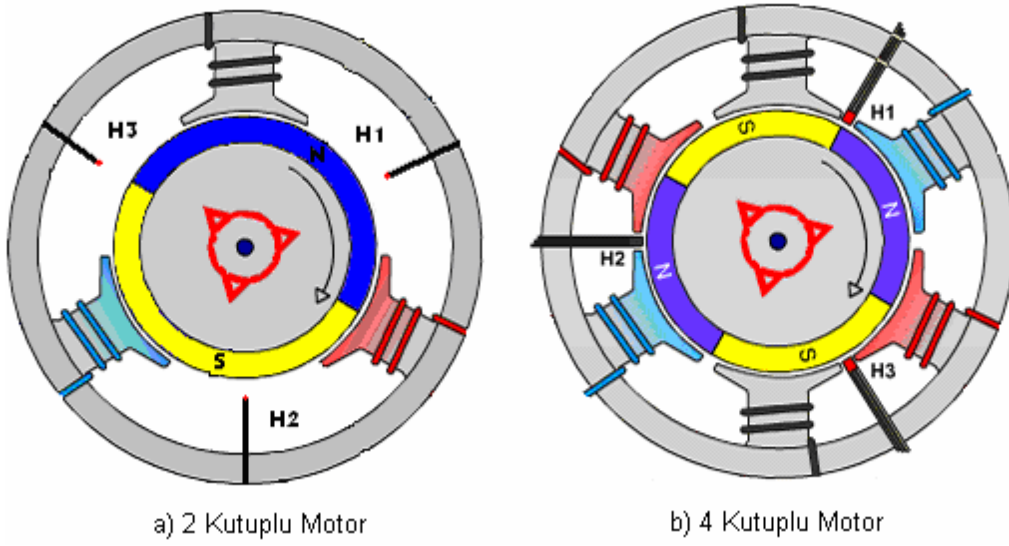
altından bir plaka hazırlamış ve içinden geçen ince bir altın plakanın bir yüzeyine, manyetik alanı dik olacak şekilde bir mıknatıs yerleştirmiş ve altın plakanın öteki tarafında bir potansiyel fark oluştuğunu keşfetmiştir. İletkenden geçebilecek akım ve o iletkende oluşabilecek manyetik akı ile orantılı bir değerde oluşan bir gerilim (potansiyel fark) (Hall Gerilimi)dir. Elde edilen bu sonuç alan (hall) etkisinin varlığını ortaya koymaktadır. İnce plakanın çıkışındaki uçlardan akım geçmektedir ve mevcut olan manyetik alana dik bir biçimde bağlanmış durumdadır. Bir manyetik alanın oluşmadığı durumlarda bir hall gerilimi (V_H) oluşmaz[16]. Oluşacak gerilimin yönü ve şiddetini geçen akım ve oluşan manyetik alanın yönü ve şiddeti belirler. Akım, kontrolün büyüklüğü olarak söylenir ve çıkışta oluşacak gerilimle doğru orantılı olur[4]. Şekil 5’de alan(hall) etkili bir sensörün yapısı gösterilmiştir.

Bu sensörler ilk defa 1960 larda motorların kontrolünde, hava aralığını ölçmek maksatıyla kullanıma geçmiştir. Stator sargılarına bir sıra halinde güç uygulanarak FSDAM rotorunun döndürülebilmesi sağlanır. Rotorun pozisyonu stator içerisine gömülen alan(hall) sensörleri tatfindan algılanır[4].



Şekil 5. Alan(Hall) etkili sensörlerin yapısı[2].

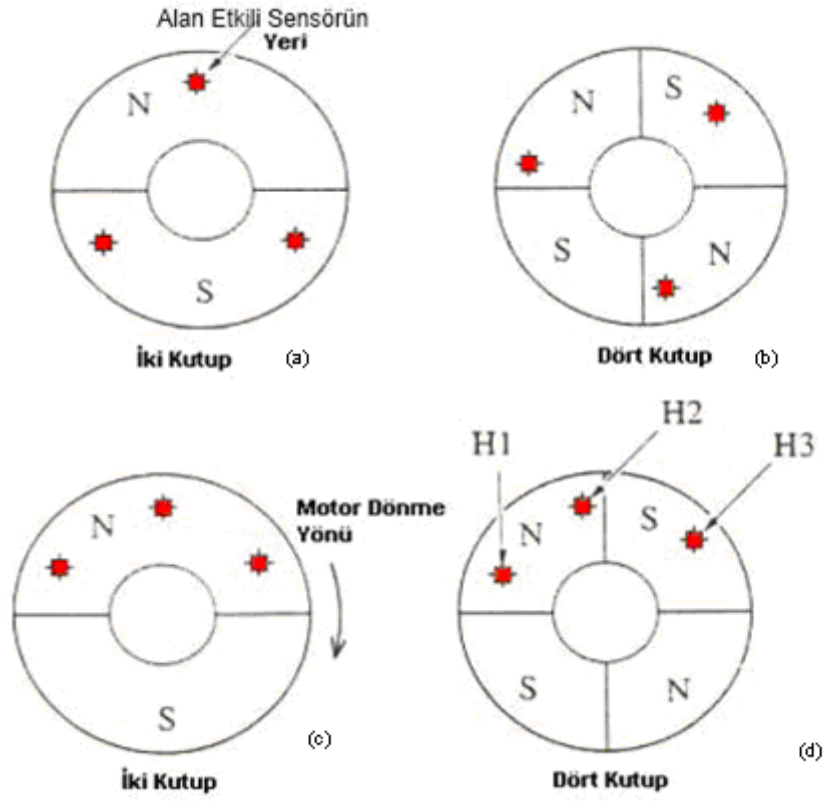
Stator üzerinde bulunan alan sensörlerinin konumları kutup sayısına göre değişiklik gösterir. Alan etkili sensörlerinin nerelere yerleştirildiği Şekil 6(a)’da iki kutuplu motorlar için, şekil 6(b)’de 4 kutuplu motorlar için gösterilmiştir. (H1, H2, H3 olarak isimlendirilen harfler, alan (Hall) etkili sensörleri simgelemektedir.)



Şekil 6. 2 kutuplu ve 4 kutuplu motorlar için alan etkili sensörlerin durumu[47]

Alan etkili sensörler için rotorun mıknatısı sayesinde bir manyetik akı oluşur. Nadiren ise motorun miline bağlı bulunan yardımcı bir mıknatıs tarafından manyetik akı elde edilir. 30mV seviyelerinde küçük bir değere sahip olan hall gerilimi bir yükselteç kullanılarak yükseltilmektedir.

Alan etkili sensörler seri üretim için uygun değildir. Olumsuz olan tarafları; motorun içerisinde gömülmesi gerekliliği, sıcaklığa olan duyarlılığı ve çözünürlüğünün olmasıdır. Bunun yanında yapısının basit olması ve fiyatının ucuz olması sebebiyle günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır[17].



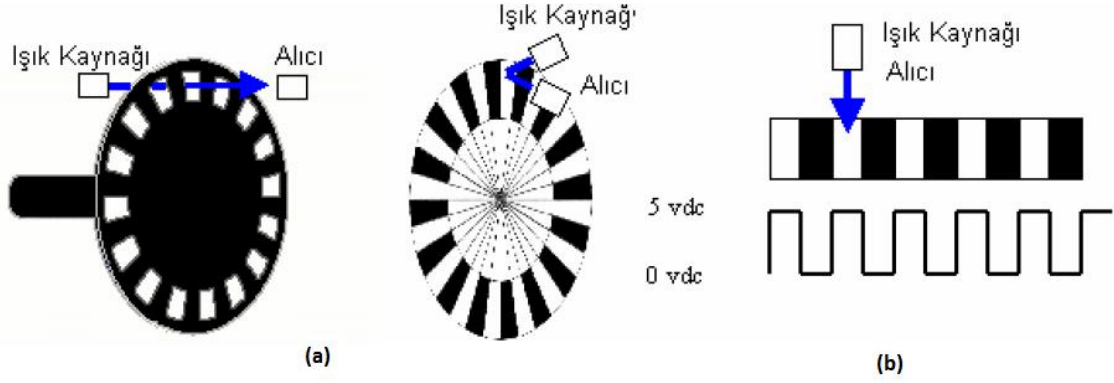
Şekil 7. Alan(hall) etkili sensörlerin stator üzerindeki yerleşim şekilleri[18]

Şekil 7(a) ve (c)'de alan etkili sensörlerin 120° aralıklarla,(b) ve (d)'de alan etkili sensörlerin 60° aralıklarla motorların statorlarına yerleştirilişi gösterilmiştir[18].

1.1.6.2. Optik Sensörlerin(Encoder) Kullanımları

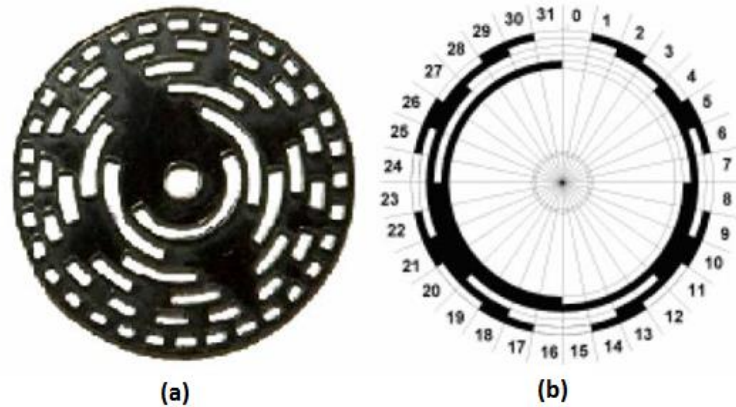
Rotor konumu açısal olarak optik sensörler kullanılarak hassas bir şekilde belirlenmektedir[2]. Optik sensörlerin çalışma şekli şu şekildedir. İki diskten biri sabit, diğeri hareketlidir. Bir ışık kaynağı tarafından ulaştırılan ışığı diskin geçirip geçirmediği ile doğrusal veya açısal bir şekilde yer değiştirmesinin algılanması esasına göre dir. Yüzde 50 geçirgenliği bulunan durgun bir diskten ulaştırılan ışın bir demet halinde geçip, hareketli olan diğ er diske ulaşır. Hareketli olan diskten geçen ışık demeti, ışığa hassas bir yüzeye sahip optik sensörün yüzeyine odaklanır ve bunun sonucunda elektriksel olan bir işaret haline gelmiş olur. Hareketli olan disk üzerinde bulunan aralıkların darlık seviyesinin artması, hareketin algılanma duyarlılığını da arttırmış olur[4]. Encoder tipi iki çeşittir. Bunlardan biri artırımsal veya artımlı (incremental) sensördür, öteki ise mutlak sensördür. Artımlı sensörlerin sayısal çıkışları 1 bittir.

Artımlı sensörlerin çıkışları, bir elektronik devre kullanılarak sayılmakta ve bu durum da motorun hız ve konumu hakkında bilgi vermektedir[4]. Şekil 8 (a)'da artımlı bir optik sensörün ışık kaynağı ile alıcıdaki konum değişikliği, (b)'de ise sensörlerin sayısal çıkışları gösterilmiştir.



Şekil 8. Artımlı (incremental) encoderler [18].

Belirlenmiş bir noktaya göre motorun konum ve hızını algılayan sensörlere mutlak sensörler denmektedir[4]. Bu sensörlerde, mil konumu ile ilgili tek bir dijital sinyal üretilmektedir(şekil 8a). Milde bulunan her bir konum bir dijital desene sahip olmaktadır(şekil 8b). Bu dijital desen ikilik sayı düzenindedir. Çözünürlüğünü ise içerisindeki bitlerden oluşur. Disk üzerinde bulunan dijital desenlerin herbiri dairesel iz ya da sıradır. Bu desenler diskin üzerinde $2^8 = 256$ adet farklı konumda belirtilir. Örnek olarak, 10 tane ize sahip olan bir dijital desenin $2^{10} = 1024$ konum belirtmektedir[18]. Şekil 9'da mutlak encoderın şekli gösterilmektedir.



Şekil 9. Mutlak encoderler[16]

Açısal hızın büyüklüğü optik sensörlerde, dijital değerlerdeki çıkış bilgisinden iki farklı şekilde elde edilmektedir.

İlk yöntem olarak, şekil 9(a)'daki çıkış darbelerinin sayılması: Dijital denetleyicilerde örnekleme periyodunun esas alınması ile, örnekleme süreci içindeki, dijital denetleyicilerde sensörlerin darbeleri sayılarak belirlenmeleri gösterilmektedir. Bu yöntem, hızın düşük değerlerde olduğu zamanlarda tespiti yapılan bir hız değerinin aşağısında kesin sonuç vermemesi, üzerinde durulması gereken bir durumdur[19].

İkinci yöntem olarak, şekil 9 (b)'de gösterilen düşük hız değerlerinde doğru bir şekilde ölçme yapmayı sağlamak için uygun olan darbe zamanlandırma yöntemini söyleyebiliriz. Bu yöntemde kodlayıcıların süresi, yüksek frekanslı saat sinyallerinin kullanılması ile ölçülmesiyle belirlenir.

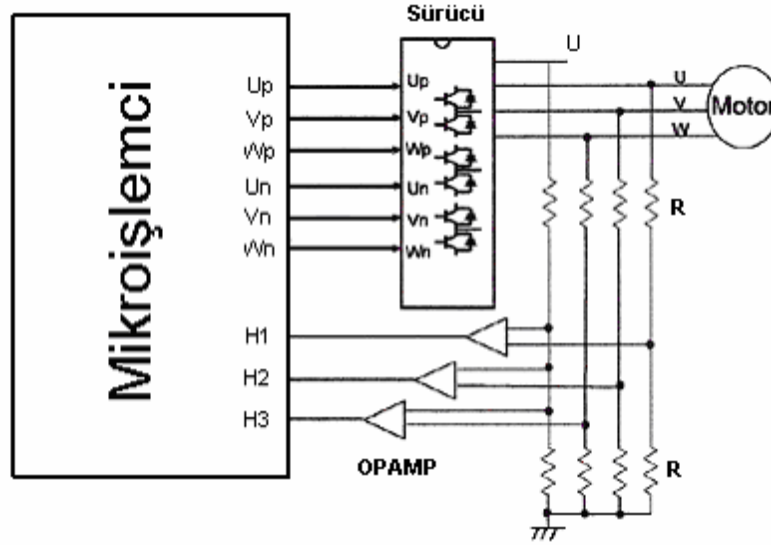
Kısa mesafelerde encoderlerden gelen bilgiler, denetleme birimine paralel olarak gönderilmektedir ve her bir bite karşı bir kablo olarak gönderilmektedir. Çözünürlüğün düşük olduğu ve mesafenin kısa olduğu durumlarda veri aktarımının paralel olması en iyi yöntem olur. Fakat robot sistemlerinde 1 den fazla encoder kullanılmışsa ve çözünürlük yüksek ise maliyeti artmaktadır. SCADA sisteminin kullandığı uygulamalarda uzak mesafelerden veriler toplanması gerekiyorsa verilerin seri olarak aktarılması zorunlu olarak seçilmelidir[18].

Artırımsal sensörler, mutlak sensörlere göre biraz daha fazla tercih edilmektedir. Bunun sebebi, ucuz, basit ve yapısının kolay kullanılabilir olmasıdır[4].

Uygulamaların hassas olması durumunda encoder kullanılır. Fakat ucuz olmaması ve karmaşık yapısı nedeniyle uygun bir tercih olmamaktadır[2].

1.1.6.3. Sıfır Geçiş Dedektörlerinin Kullanımları

Rotor pozisyonunu belirlerken stator sargılarında indüklenen zıt emk'ya göre bu dedektörlerden faydalanmak mümkün olmaktadır. Sıfır geçiş dedektörü motor sürücüsüne bağlıdır ve rotorun konumunu belirlemek için, besleme gerilim değerinin yarısı ile statordaki faz sargılarına uygulanan gerilimi karşılaştırmak gerekir. Bu sensörlerin avantajı, hareket eden parçasının olmaması ve motordaki hareket eden diğer parçalarla bağlantısının olmamasıdır. Şekil.10'da bu dedektöre ait yapısı ile bağlantısı gösterilmiştir[2]



Şekil 10. Sıfır geçiş dedektörlerine ait yapı ve bağlantı [2].

Faz sargılarına 120° genişlikli akım uygulandığında, 3 fazlı FSDAM'da, fazlardan birinde pozitif, diğerinde negatif akım seçmesine sebep olmaktadır. Diğer üçüncü faz ise aktif olmayan durumda olmaktadır. Aktif olmayan faz, sıfır geçiş metodunda zıt emk'yı bulmak için bu aktif olmayan faz kullanılmaktadır. Sıfır geçiş noktası zıt emk'nın sıfır noktasından geçtiği yerdir ve bu yer komütasyon noktalarını orta noktasıdır. Bu nokta, sonra gelen sargı çiftinin enerjilenmesi için referans oluşturur. Sıfır geçişi olduğu zaman, bir öndeki sıfır geçişe yarım periyotluk zaman eklenmesi ile bir sondaki komütasyon anı tahmin edilebilir. Hızın yüksek olduğu FSDAM uygulamasında, fazlardan birinin pasif olma zamanı çok kısa olmasından dolayı sıfır geçiş noktası belirlenmesi zorlaşacaktır. Bu sebepten dolayı bu yöntem bu tip uygulamalar için uygun olmamaktadır[5].

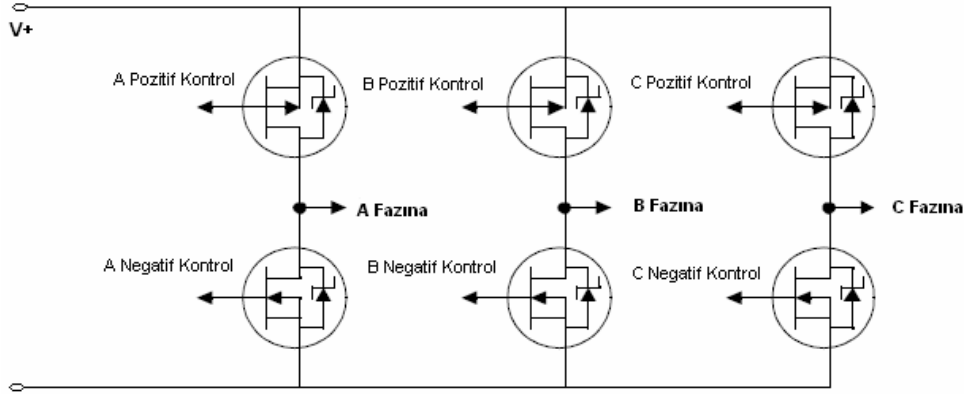
Bu yöntemden başka, daha iyi bir yöntem olan Kalman Filtre Teorisi sensörsüz çalışmalarda kullanılmaktadır. Bu teoride, motora ait hız, motorun konumu ve oluşan zıt emk değerleri kullanılmaktadır. Bu modelde, ileriki zamanlarda motorun durumundaki değişimleri için tahminde bulunmaktadır. Pasif olan fazda zıt emk ölçülerek, tahmin edilen fazdaki zıt emk ile kıyaslanır. İki durum arasındaki oluşmuş fark, motorun çalışmasındaki performansı daha iyi duruma getirmek için kullanılmaktadır. Kalman Teorisi ile sıfır geçiş tahmini ile beraber, motorun hızı ve konum bilgisinin tahminleri her bir zaman dilimi için yapılmaktadır. Böyle olunca, komütasyondaki doğruluk

derecesinin artırılmasıyla verimin daha yüksek değerlere çıkarılması mümkün olmaktadır[5].

1.1.7.Motorun Sürücü Devreleri

Bu bölümde, motorun kontrolünü sağlayacak gerilim değerleri elde edilmektedir. AA/DA dönüştürücü (redresör) (şebekeye bağlı sistemler), frenleme kısıyıcı, filtreleme ve yarı iletken anahtarların (mosfet, transistör gibi) bir araya getirilmesiyle oluşmuş eviren sistemlerdir. Denetleyen elemanlar, yarı iletken anahtarı, belirlenen zamanlarda ilettime ya da kesime sokarlar. Yarı iletkendен oluşmuş ara birime, anahtar sürücü bloğu denmektedir[7].

Bu bölüm, statorun sargıları üzerinden geçmekte olan akımın yönünü değiştirir. Bunu rotorun pozisyon bilgilerini kullanarak yapar. Bu sayede rotorun dönme işlemi gerçekleşir. Denetleyiciler, pozisyon sensörlerinden gelen bilgiye bağlı olarak eviricideki 6 adet yarı iletken anahtarlara açma işlemi veya kapama işlemi için işaret göndermektedir[2]. Şekil 11’de mosfetlerden yapılmış anahtar sürücü bloğunu görmekteyiz.



Şekil 11. Mosfetler ile yapılan sürücü devresi[2]

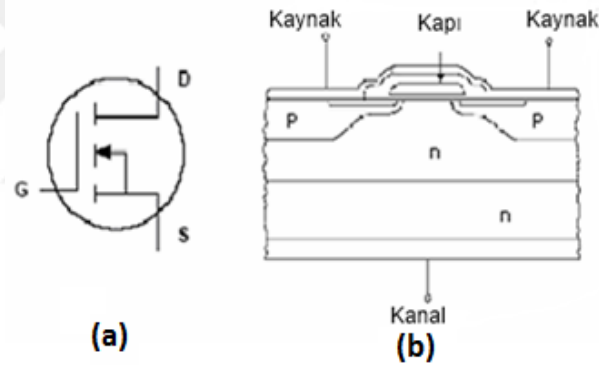
Rotorun pozisyonu göz önünde bulundurularak yarı iletken anahtarlar bir sıra halinde tetiklenirler. İşlemciler, sürücülerin tetiklenmesini sağlarlar ve konum sensörlerinden gelen bilgilere göre fazın birine pozitif, diğerine negatif gerilim uygular. Üçüncü faza da herhangi bir gerilim uygulamazlar. Sistemli bir şekilde bu gerilimler sırasıyla her bir faza ayrı ayrı uygulanır. İşlemciler bu sürücülerle bu şekilde motorlarda bir dönme momenti oluştururlar. Sürücüler, motor performanslarını belirlemekte olan en önemli

elemanlardır. İşlemciler ve anahtarlar sürücünün performans seviyesini belirlerler. Sürücülerin en önemli elemanları anahtarlardır. Anahtarların seçiminde anahtarlama işleminin hızı ile kayıpları göz önünde bulundurulur. Transistör, IGBT, tristör gibi yarı iletken elemanların yanında en çok kullanılan eleman mosfetlerdir[2]

1.1.7.1.Mosfet Yapısı

Mosfet transistörler (fet: field effect transistor); geyti, kanal maddesi olan silisyumdioksit maddesi ile (SiO_2) yalıtımı yapılmış alan etkili transistörlerdir. MOS:metal oksit semikondüktör kelimelerindeki ilk harflerden meydana getirilmiştir. Özellik olarak çoğaltan kanallı mosfet (enhensment tipi) ve azaltan kanallı mosfet (deplasyon tipi) olmak üzere 2 şekilde yapılırlar[20].

Bu anahtarlama elemanları yüksek hızlara sahiptirler. Mosfetin içyapısı ve Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Mosfetin içyapısı (b) sembolü (a) [2]

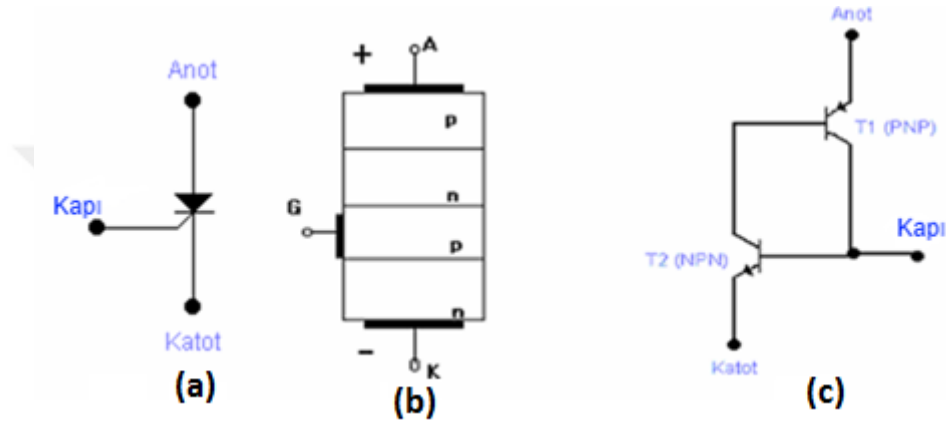
1.1.7.2.Transistörler Yapısı

Transistör, transfer ve rezistör kelimelerinin türetilmesiyle oluşmuş bir sözcüktür. Transistör, emiter ve kolektör uçları arasındaki direnç değerinin, ortadaki baz (beyz) ucuna uygulanan akım ile azaltılması ve yükseltilmesinin yapıldığı elektronik devre elemanıdır. Yüzey temaslı transistörler, alaşım yöntemi ile yapılan transistörler, nokta temaslı transistörler ve alaşımlı yayılma yöntemi ile yapılan transistörler olmak üzere dört farklı şekilde yapılırlar[20].

1.1.7.3. Tristörler Yapısı

Tristörler, tek yönde akım geçirirler ve bu sayede redresör olarak kullanılabilirler. Küçük akımlar ile büyük değerdeki akımların kontrolü yapılabilir. Tristörlerin diğer adı da silikon kontrollü redresör (SCR) dır [20].

Tristörler farklı dozadaki dört adet silisyum kristalinin biraraya getirilmesinden oluşmuştur. Tristörün tabakaları anottan-katota doğru, pnpn sırasını izlerler. Şekil 19(b)[21]. Tristör sembolü ve eşdeğer devresi Şekil 13'(a) ve (c) de görülmektedir.

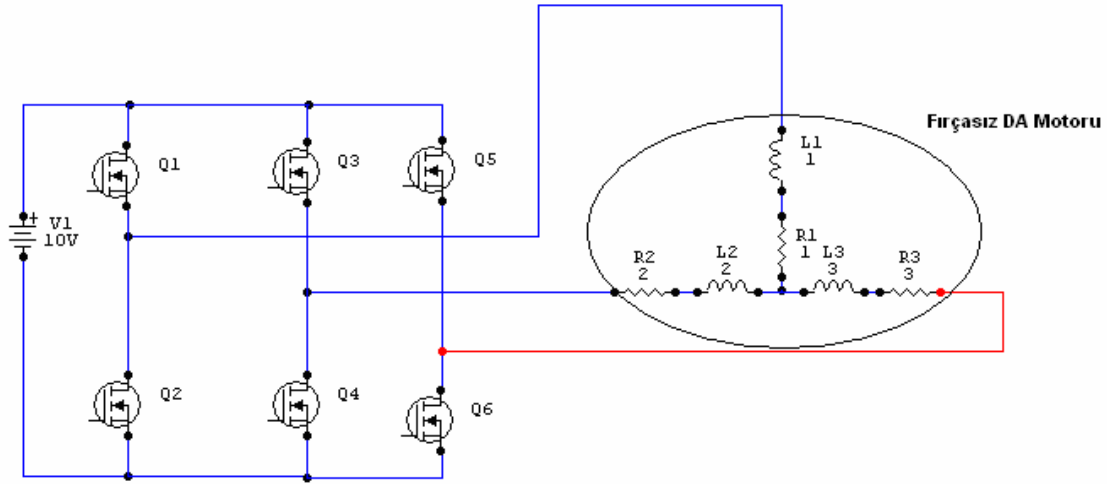


Şekil 113. Tristörlerin sembolü (a), yapıları (b) tristörün eşdeğer devreleri (c) Anot-Katot yönü tristörün geçiş yönü [2]

, Katot-Anot yönü ise kapatma yönüdür. Kapı (Gate)'dan dan Katot'a doğru bir kontrol akımı geçirilmesiyle tristör iletken hale getirilir. Tristörler farklı tetikleme devreleri kullanılarak, kullanılan elemanların değerlerinin değiştirilmesiyle tetikleme açıları değiştirilir ve gerilim ve akım ayarları yapılır[21].

1.1.7.4. IGBT Yapısı

İngilizcesi Insulate Gate Bipolar Transistor'dür. Mosfetler ve bipolar transistörler ile aynı karakteristiğe sahiptir. Anahtarlama hızı ile iletimdeki kayıplar transistörlerde düşüktür. Mosfet transistörlerde ise, iletimdeki kayıplar fazla, anahtarlama hızı yüksektir. IGBT'ler bu transistör ve mosfet iki yarı iletken anahtardaki dezavantajları azaltmak için geliştirilen anahtarlama elemanıdır. IGBT'lerin anahtarlama hızı mosfetlere çok yakındır ve bununla beraber bir transistör karakteristiğine de sahiptir. IGBT'ler de öteki yarı iletken anahtarlar gibi, kapı ucuna uygulanan tetikleme (ateşleme) gerilimiyle iletim durumuna geçmektedirler[2].

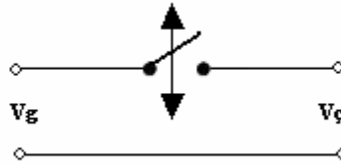


Şekil 14. FSDAM ile sürücü devre bağlantısı[2]

Küçük güçlü FSDAM’lar için mosfetli sürücü sistemi seçimi en uygun olanıdır[2].

1.1.7.5. PWM Çalışması

Anahtarlama işlemleri darbe genişlik modülasyonu (Pulse Width Modulation PWM) ile yüksek bir hızda yapılır. Elektrik enerjisinin kullanımı sırasında verimliliği artırır[22]. Gerilimim çıkıştaki ortalama değeri, devreye bağlanan basit bir anahtarla değiştirilebilir. Bu durum Şekil 15’de gösterilmektedir.



Şekil 15. PWM yönteminde anahtarın basit yapısı[2]

1.1.8. Denetleyiciler (Kontrolörler)

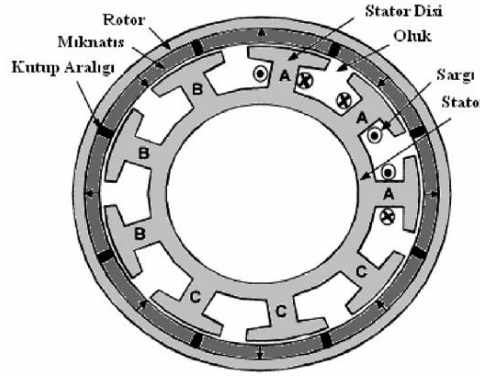
Denetleyiciler motordan istenen çalışma şartlarını oluşturan bir birimdir. Bu referans girişinden pozisyon sensörü üzerinden aldığı bilgileri kullanarak üretilen kontrol sinyalleri ile yapar. PWM sinyalinin durumu, denetleyiciler tarafından üretilen kontrol sinyalleri ile belirlenen kontrol düzeneğine göre kontrol edilmektedir. Denetleyiciler hız, akım, pozisyon döngülerinin kontrolü yapar. Denetleyicilerin donanım ve yazılım yapıları vardır[7].

1.2. FIRÇASIZ DA MOTORLARININ ÇEŞİTLERİ

FSDAM'lar rotor yapısı olarak; dış rotorlu motorlar, disk tipi motorlar ve iç rotorlu motorlar olmak üzere FSDAM'lar, bu sınıflandırmanın dışında sensörlü motorlar ve sensörsüz motorlar olmak üzere de ikiye ayrılırlar.

1.2.1. Fırçasız DA Motorları (Dış Rotorlu)

Bu tip motorlarda rotorun yuvarlağı stator sargısının dışındadır. Mıknatıslar bu yuvarlağın içerisine yerleştirilmektedir. Motorun iç kısmında bulunan statorda endüvi sargıları bulunmaktadır. Dönen rotor üzerinde ise daimi mıknatıslar bulunmaktadır. Bu yapı Şekil 16'da görülmektedir. Fırçasız DA motor ile fırçalı DA motorun stator ve rotor yapısı birbirine benzemektedir. Bu tip DA motorlarında mıknatıslar rotor içine gömülmüş olarak bulunur.



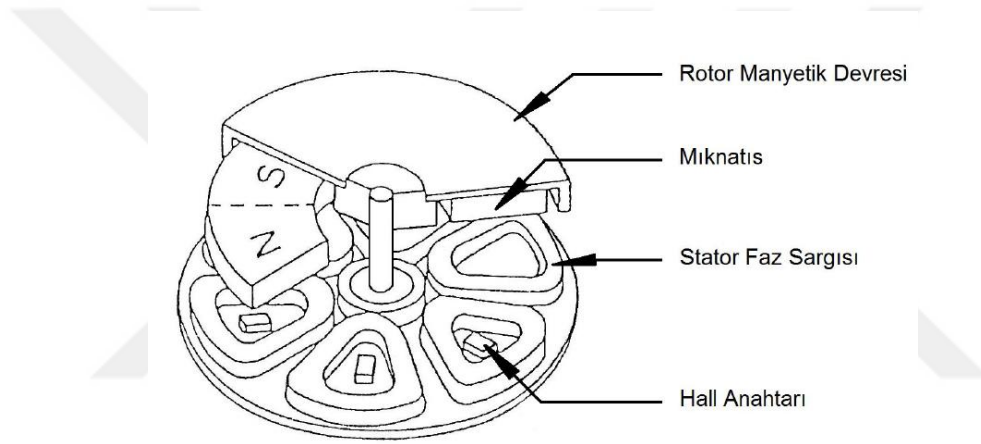
Şekil 16. Dış Rotorlu FSDAM Yapısı[15]

Böyle olunca savrulmaya karşı rotor oldukça dayanıklı olmaktadır. Seri olarak üretim yapılırken, stator sargılarının dış yüzeyde olması sarım işleminin biraz daha kolay olmasını sağlar. Rotor büyük bir kütleye sahiptir ve dışta bulunur. Bu yüzden mıknatıslar rotora yerleştirilirken bir denge sorunu oluşabilir. Üretim sırasında maliyeti azaltan iki durum bulunmaktadır. Bu durumlar; diğer motor tiplerinin aksine tek bir rulman ve yatak kullanılması ve rotorun dışta olması nedeniyle mıknatıs alanı büyütme, böylece aynı manyetik alanın etkisi maliyeti daha düşük mıknatıslarla elde sağlanmaktadır. Eylemsizlik olarak yüksek değerlere sahiptirler. Bu nedenle mevcut olan hızlarını yüklerin ani değişmesinde de korurlar. Çamaşır makinası ve fanlarda bu özelliklerinden dolayı daha çok tercih edilirler[15].

Bobin sargıları merkezde olduğu için bu tip motorlarda soğutulma işlemini daha zordur. Outrunner FSDAM ya da outline FSDAM olarak da bilinmektedir. Torkları yüksek, hızının düşük değerlerde olması sebebiyle uçak, helikopter gibi uçan araçlarda bu tip motorlar tercih edilmektedirler[40].

1.2.2. Fırçasız DA Motorları (Disk Tipi)

Çelikten yapılırlar ve iki yüzeyden birisine mıknatıs yerleştirilmiş bir disk rotoruna sahiptirler. Rotordaki mıknatıslara karşılık olarak da statorda uyarım sargıları bulunur. Sargıları baskı devre şeklinde de imal edilebilirler[15]. Disk tipi bir FSDAM'ın yapısı Şekil 17'de gösterilmiştir.

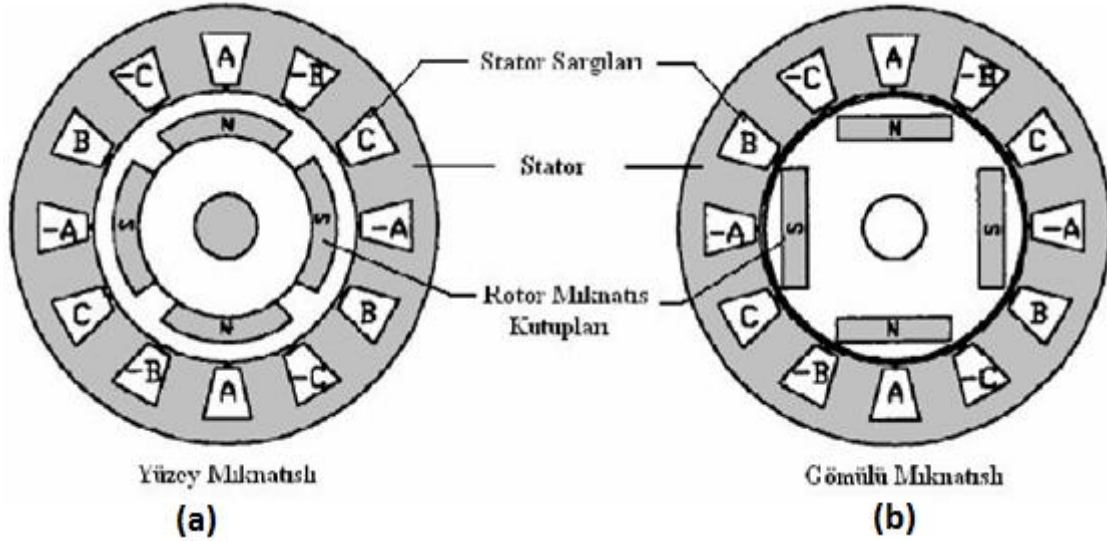


Şekil 17. Disk Tipi FSDAM[7]

Düşük değerdeki hız uygulamasında, hız geri beslemeye ve kapalı çevrim kontrolüne sahip olan bir sistem kullanarak daha yumuşak bir performans elde edilebilmektedir. 1000 rpm değerinin üzerinde bir hızda kullanıldığında, yapısında bulunan rotor ve statorun disk çelikleri üzerinde bir ısınma sorunuyla karşılaşmaktadır. Bunu önlemek için yüksek hız değerlerine ulaşıldığında bazı ilave tedbirler alınmalıdır. Bunların yapılması da maliyetleri arttırmaktadır. Sonuç olarak, disk rotorlu FSDAM'ları düşük hızda ve düşük güç değerlerindeki uygulamalarda tercih etmek daha uygun olacaktır. İstenen düşük bir hız, bunun yanında büyük bir güce ihtiyaç duyuluyorsa kutup sayısı yüksek olan iç rotorlu bir FSDAM tercih edilmelidir[15].

1.2.3. Fırçasız DA Motorları (İç Rotorlu)

Yapı olarak asenkron ve senkron motorlara çok benzeyen iç rotorlu FSDAM’larda, aynı asenkron motorlardaki gibi endüvi sargıları dıştaki statorda bulunur[19]. Şekil 18’de ayrı ayrı yüzey mıknatıslı iç rotorlu(a) ve gömülü mıknatıslı iç rotorlu (b) bir FSDAM’ın yapıları verilmektedir.



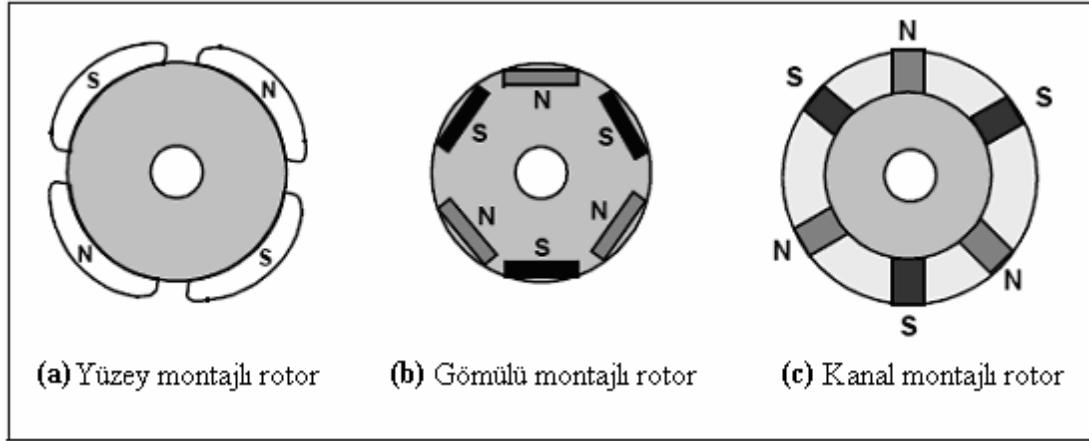
Şekil18. İç Rotorlu FSDAM’ların Yapısı[19]

İç rotorlu FSDAM’lar, dış rotorlu FSDAM ile kıyaslandığında şu iki dezavantajı bulunmaktadır. Bu dezavantajları; hızları yüksek değerlere çıktığında rotorda bulunan mıknatısların stabilizasyonunu korumak için rotorda bulunan montajlara dikkat edilmelidir. Montajların sağlamlığı sağlanırken, rotorlar elektriksel direnci yüksek olan metal şeritlerle sarılırlar. İkincisi ise stator sarımı, seri üretim yapılırken işçilik daha zor ve pahalıdır. Bu dezavantajların yanında, sargının dışarıda olması sayesinde dış rotorlu FSDAM’lara göre daha kolay soğumaktadır. Kompresör ve servo motor uygulamalarında yüksek performans ve hız, iyi bir konum kontrolü gerekmektedir. Bu uygulamalarda iç rotorlu FSDAM’lar tercih edilmektedirler[19]

Geniş bir uygulama alanına sahip olan iç rotorlu FSDAM’lara, inline ya da inrunner FSDAM’lar da denmektedir. Dış rotorlu FSDAM’lardan daha yüksek hıza sahiptirler. . Fakat dış rotorluya göre, volt başına düşen tork üretimi daha düşüktür. Dıştan görüntüsü

ise, fırçalı DA motorlarına benzemektedir. Rotoru içte yer aldığı için kullanımı kolaydır[40].

Mıknatısların rotorun yapısına monte edilmiş biçimine göre sınıflandırılan İç rotorlu FSDAM'ların, şekil 19(a)'da dışta yüzey montajlı rotorlar, Şekil 19 (b) ve (c)'de ise içe gömülü rotorlar gösterilmiştir.



Şekil 19. FSDAM'larda rotor çeşitleri[12]

1.2.3.1. Yüzey mıknatıslı, iç rotorlu fırçasız DA motorlar

Daimi mıknatısları rotorun dış yüzeyine yerleştirilebilir. Bu tip de, stator kutuplarına daha yakın bir mıknatıs grubunun vardır ve yüksüz durumdayken daha küçük bir momente sahiptirler. Daimi mıknatıslar rotorlarda dış yüzeylere tutturulduğu için, motor yüksek hızlara ulaştığında parçalanma riski bulunmaktadır. Rotorun pozisyonuyla etkin hava boşluğunun değişmesinden dolayı endüktans değerinde bir miktar değişim söz konusu olmaktadır[4].

1.2.3.2. Fırçasız DA motorları (Gömülü mıknatıslı, iç rotorlu)

Dikdörtgen kesitli daimi mıknatısların, rotor iç tarafına yerleştirilmesiyle oluşan motor tipidir. Çok tercih edilen bir tip değildir. Yapısından dolayı motorların yüksek hızlarda çalıştığı uygulamalarda daha uygundur. Rotorun pozisyonlarına bağlı olan endüktanstaki değişiklik dikkate alınmayacak kadar küçük olduğu yapısıdır[4].

1.2.3.3. Kanal mıknatıslı, iç rotorlu fırçasız DA motorlar

Bu motorlar, en iyi bir rotor tipi olan bir türdür. Daimi mıknatısları dikdörtgen kesitlere sahiptir ve rotor yüzeyine açılan kanallara yerleştirilmektedir[4].

1.3. Fırçasız DA Motorların Avantaj ve Dezavantajları

FSDAM'ların avantajları şunlardır:

- Motorun uzunluğu, FSDAM'larda kollektör ve fırçaların olmaması sebebiyle DA ve asenkron motorlara göre daha kısadır ve böylece aynı değerdeki moment, daha da küçük bir endüvi yüzeyi ile elde edilir. Kazancın aynı değerde olduğu anlarda, hızları daha yüksek değerlere ulaşarak, bu hızlardaki uygulamalarda kullanılma imkanı olur. Aynı zamanda atalet (eylemsizlik) momenti de azalmış olmaktadır.
- FSDAM'ların hızı kontrol imkanları çok iyidir. Kontrol edilebilen hız aralığı asenkron motorlara göre daha geniş olmaktadır.
- Küçük boyutlu olmasına rağmen moment üretimleri yüksektir. FSDAM'ların akım/döndürme momentleri DA ve asenkron motorlara göre daha yüksek oranda ağırlık/güç oranlarına sahiptirler.
- FSDAM'lar fırçalı DA motorunun ihtiyacı olan uyarma akımına ihtiyaç duymazlar.
- Güvenli çalışma ortamı hazırlarlar.
- Soğutulmaları kolay yapılabilirler.
- Gürültü yapmadan sessiz olarak çalışırlar.
- Verimleri çok yüksektir. Soğutması ve boyutu aynı olan FSDAM'lar ile asenkron ve DA motorlar karşılaştırıldığında FSDAM'larının güç faktörleri ve verimleri daha iyidir. Çıkış güçleri diğer motorlara göre % 20 ile % 50 arasındaki değerlerde daha büyük çıkış gücüne sahiptirler.
- FSDAM'larda fırça sistemi bulunmadığından, diğer motorlarda oluşan karbon tozları bu motorlarda ortaya çıkmaz[8].
- Moment hacim oranları yüksektir. Yüksek momentlere küçük hacimlerle ulaşabilirler. Bu durumda da bakır kullanımı azalmış olmaktadır. Kollektör ve fırça düzenekleri

olmadığı için bakım onarım ihtiyaçları azalmakta ve tehlikeli ortamlarda çalışma imkanı bulmaktadırlar[9].

- Çıkış momentleri motor akımı ile doğrudan orantılı olduğu için diğer motorlara göre kontrolü çok daha kolaydır[15].

Yukarıda sıralanan olumlu özelliklerinin yanında aşağıdaki olumsuz özellikleri de bulunmaktadır:

- İstenilen çalışma için rotorun konum bilgisine yani alan etkili pozisyon sensörüne ve bir harici güç elektroniğine ihtiyaç duyulması. Bu pozisyon sensörler kullanılmayan durumlara sensörsüz çalışma durumu denmektedir. FSDAM'ların sensörsüz olarak çalışmaları için bazı ilave düzenekler gerekmektedir. Bu düzeneklerin eklenmesi de sistemleri pahalı hale getirmektedir[9].

- Daimi mıknatıslar uzun süreler kullanıldıklarında termik ve atmosferel etkilerden dolayı mıknatısiyet özellikleri bozulabilmektedir.

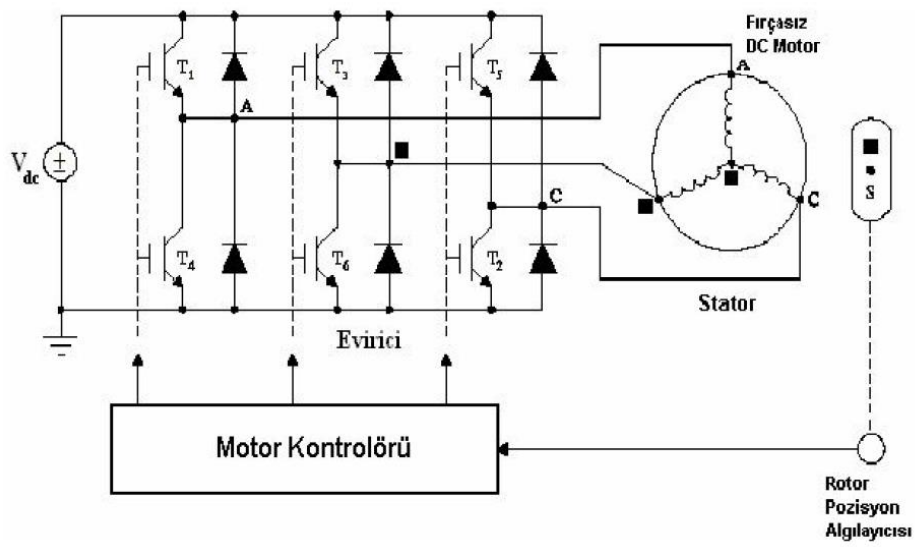
- FSDAM'lar sabit bir uyarma sağladıklarından ve mıknatıslar arasındaki mekanik gerilim sınırlandırılmasına neden olan montaj yüzünden bu motorların hızları yüksek değrlere çıkmaz.

- FSDAM'ların sürücüsünde inverter hataları oluşabilmektedir. İnverterde rotor üzerindeki daimi mıknatıs yüzünden kısa devre olursa bu durum FSDAM'lar için önemli bir risk oluşturur. Bu riskin sebebi, dönen rotorun her zaman enerji vermesidir ve sürekli olarak kısa devre oluşan sargılar üzerinde bir emk'ya neden olmasıdır. Bu durum, emk oluşan sargılar üzerinde çok büyük değerli bir akımın dolaşmasına neden olur. Bu akımla meydana gelen büyük bir moment motorun durmasına sebep olacaktır[15].

- Son zamanlarda teknoloji ve kontrol düzeneklerinin gelişmesi ile FSDAM'lar daha çok kullanılmaya başlamış ve olumsuz yönlerini iyileştirmek için çalışmalar yapılmaktadır[4].

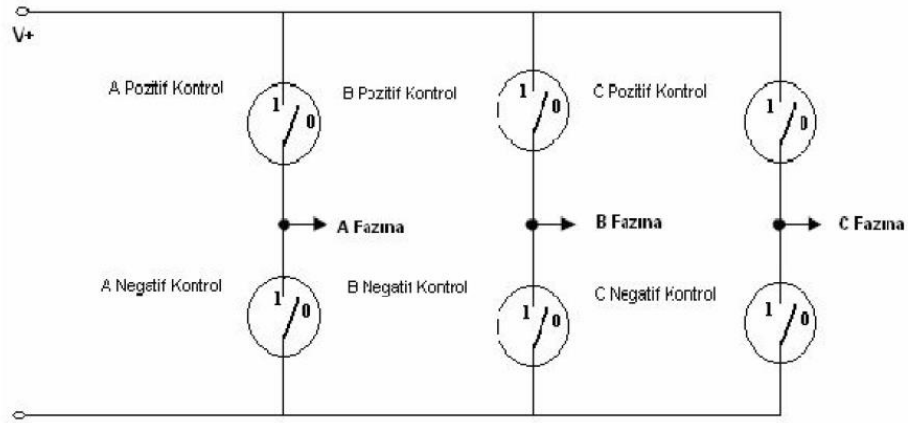
1.4. FSDAM'ların Çalışma Prensipleri

FSDAM, sabit mıknatıslı bir rotora sahip bir çeşit senkron motordur. Motorda elektronik olarak gerçekleşen komütasyon için rotorun pozisyonunu belirlemek gerekir. Stator sargıları bir evirici üzerinden beslenirler. Eviricileri bir akım kaynağı besler. Evirici üzerindeki güç anahtarları rotor konumu ile senkron bir şekilde sırasıyla anahtarlama işlemini yaparlar. Rotora yerleştirilmiş bir konum sensör ile veya konum sensör kullanılmaksızın yani sensörsüz bir kontrol algoritmasıyla, hangi güç anahtarının açma veya kapama yapması gerektiği belirlenir[4]. Şekil 20'de FSDAM sürücü sisteminin devre şeması gösterilmektedir.



Şekil 20. Pozisyon Geri Beslemeli Bir FSDAM Sürücü Sistemi Devresinin Şeması[6].

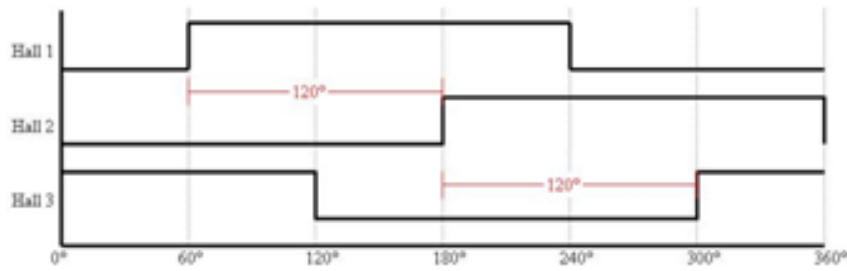
Rotorun konum bilgisi göz önünde tutulup, statorun sargılarından geçen akımın yönü değiştirilmektedir. Bu işlemi yaparken şekil 21'deki anahtarlar kullanılır.



Şekil 21. Sürücüye Anahtarların Bağlantısı[2]

Rotorlardaki dönme hareketi, stator sargılarına uygulanan gerilimin ve akımın yönü ile rotorda meydana gelen dönüş hareketleri, anahtarların kontrolüyle sağlanmaktadır. Stator sargılarında oluşan manyetik alan kutupları böylece oluşmuş olmaktadır. Stator ve rotor üzerinde oluşan manyetik alan kutupları, ters işaretli kutupların birbirini çekmesi ve aynı işaretli kutupların birbirini itmesi prensibine göre oluşmuş etkileşme sonucunda bir dönme momenti meydana gelir. Meydana gelen dönme momentinin büyüklüğü, stator ile rotorda oluşan manyetik alanın şiddetine bağlı bir şekilde değişir. Rotordaki döngü ile rotorun konumu da değişmektedir. Sensörler konum değişimlerini algılayarak işlemciye gönderirler.

Şekil 22 de 120° faz açısıyla konum değiştiren hall sensörlerin grafiği gösterilmiştir.



Şekil 22. Sürücü Anahtarların Bağlanması [2]

Tablo 1.Sensör bilgisi ve rotor konumuna denk gelen anahtar durumu[2]

		Hall Sensörleri			Anahtar Konumları					
Konum	Konum açısı Φ	H1	H2	H3	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
1	$0 \leq \Phi < 60$	1	0	0	1	0	0	1	0	0
2	$60 \leq \Phi < 120$	1	1	0	1	0	0	0	1	0
3	$120 \leq \Phi < 180$	0	1	0	0	0	1	0	0	1
4	$180 \leq \Phi < 240$	0	1	1	0	1	1	0	0	0
5	$240 \leq \Phi < 300$	0	0	1	0	1	0	0	0	1
6	$300 \leq \Phi < 360$	1	0	1	0	0	0	1	1	0

Rotorun yeni konumu işlemci tarafından değerlendirilir ve anahtarlardaki yeni konumlar belirlenir. Rotorun yeni durumuna göre bir itme ve çekme etkisi altında kalır. Bu anahtarlama hızla bir şekilde devam ederken, rotorun dönme hareketindeki devamlılık devamlılığı sağlanır[4]. Tablo 1 de rotorun dönme hareketiyle oluşan sensörlerdeki ve anahtarlardaki değişen konum değerleri verilmiştir.

1.5. FSDAM'ların Matematiksel Modelleri

FSDAM denetleyicisinin tasarımını gerçekleştirmek için, tespit edilmesi gereken bir çalıştırılma modeli vardır. Sistemin modeli belirlenirken, sistemdeki bütün elemanların belirlenmesi gerekir. Sistemin de bütün bunları kapsamaması gerekir. Sistemin kapsadığı aksamalar: motor, motor sürücüsü, konum ve hızı algılayan birimler, yük ve dişli kayış kasnak sistemidir. Kontrol sistemleri tasarlanırken, doğrusal bir sistem gerekir. Doğrusal sistemlerin yaklaşımları, diferansiyel denklemlerdeki katsayılar sabit olmalıdır. Yani, bu katsayıların, gerilim, hız gibi parametrelere bağlı olmaması gerekir. Doğrusal karaktere sahip olmayan sistem bazı kabulleri yaparak sistemi doğrusal forma dönüştürülür[18].

Makine eşitlikleri dönüştürülürken, akımın dalga şekilleri ve yapısı sinisoidal olmayan zıt emk dan dolayı, modelleme ve simülasyon için, d-q modelinin yerine daha kolay olan faz-değişken yaklaşımı kullanılır. Zıt emk, parçalı lineer eğriler kullanılarak ve bir fourier serisi olarak açıklanabilir. Faz değişkenlerinde üç sargının akım denklemleri aşağıdaki gibi olabilir[25].

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & -M & 0 & 0 \\ 0 & L & -M & 0 \\ 0 & 0 & L & -M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ea \\ eb \\ ec \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada i_a , i_b , i_c faz akımlarını, V_a , V_b , V_c faz gerilimlerini, e_a , e_b , e_c faz zıt emk gerilimlerini, R faz direncini, L her fazın öz endüktansını ve M her iki faz arasındaki karşılıklı (ortak) endüktansı simgelemektedir.

Elektromanyetik dönme momenti aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$T_e = \frac{(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)}{\omega_m} \quad (\text{Nm}) \quad (2)$$

Burada, ω_m rotor mekanik hızıdır ve hareketin denklemi aşağıdaki gibi olur;

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_e - T_L - B\omega_m}{J} \quad (\text{rad/s}) \quad (3)$$

Burada T_L yük dönme momentini(Nm), B sürtünme katsayısını ve J (kg m^2) eylemsizlik (atalet) momentini ifade eder.

Aşağıdaki denklemde mekanik hız ile elektriksel frekansın ilişkisi gösterilmiştir.

$$\omega_e = \frac{p}{2} \omega_m \quad (4)$$

Formülde, P : Rotor kutupları sayısıdır.

1.6. FSDAM'ların Kontrolleri

Klasik doğru akım motorlarının kullanımları kolay olması ve özelliklerinden dolayı yaygın bir kullanım alanı vardır. Bunun yanında, bu motorların yapısında fırça ve kollektör düzenekleri bulunduğu için bazı uygulamalarda ve yerlerde bazı riskler olduğundan kullanımları azalma göstermektedir. Bu sebepten dolayı sık sık bakım yapmak zorunluluktur. Sabit devir sayısı gerektiren bir uygulama olan CD veya disket sürücü için fırçalı doğru akım motoru kullanıldığında bazı sıkıntılar olacaktır. Uzun süre kullanıldığında devir sayılarında bir düşüş olacaktır. FSDAM, bu olumsuz durumlar için çözüm olarak sunulmuştur. FSDAM'larda, fırça ve komütatörlerin yerine yarı iletkenlerden yapılmış bir düzenek kullanılır. FSDAM'ların hızı ve sahip oldukları tork fırçalı motorlardan daha büyüktür. Elektriksel gürültü içermezler. Sessiz bir şekilde

alışırlar. Bunlar daha uzun ömürlüdürler ve bakım aralıkları daha uzundur. Bu olumlu özelliklerinden dolayı son zamanlarda kullanım alanları çoğalmıştır[9].

1.6.1. Kontrol Nedir?

FSDAM’larda çıkışta istenilen değerleri elde etmek için kullanılan kontrol sistemlerinde, sistemde girişe uygulanmasına ihtiyaç duyulan değerleri tespit etmek gerekir. Sistemde hata değeri; hedeflenen referans çıkış değerleri ile sistemdeki mevcut çıkış değerleri arasındaki farkı ifade etmektedir. Hata sinyalinin minimuma indirmek için gerekli giriş sinyali üretilip, sisteme uygulanmalıdır. Bu işlem sistemin çıkış değeri ile referans çıkış değeri karşılaştırılarak yapılır. Algılama elemanları kullanarak gerekli sistem çıkışının bilinmesi sağlanır[26].

1.6.2. FSDAM’larda Kontrol Yöntemi

FSDAM’larda kontrol yöntemleri kullanılarak, rotor konumu, rotor hızı, motor akımı, motorun torku (dönme momenti) gibi parametreler kontrol edilmektedir.

şu anda kullanılan birçok çeşit kontrol yöntemi bulunmaktadır. DA motorlarında hassas hız kontrolü yapabilmek için kullanılan yöntemler şunlardır: yapay sinir ağları, bulanık mantık, dalgacık tekniği, genetik algoritma yöntemleridir. Bunların yanında PID kontrolü de kullanılmaktadır[28].

1.6.2.1. Klasik Kontrol Yöntemleri

Klasik kontrol yöntemlerinde klasik denetleyiciler kullanılmaktadır. Bu yöntemler FSDAM’larının parametrik kontrolleri olarak tanımlanır. Klasik denetleyiciler; PI(oransal- integral kontrolü), PD(oransal-türev kontrolü) ve PID(oransal-integral ve türev kontrolü) tipindeki denetleyiciler olarak karşımıza çıkar. Diğer denetleyicilere göre daha ucuz ve daha basit yapıda olan klasik denetleyiciler, yeterli verimliliği sağladığı için sanayide birçok alanda tercih edilmektedir. İstenilen alışma performansları elde edilirken; PI tipi denetleyicilerde oransal ve integral katsayıları, PD tipi denetleyicilerde oransal ve türev katsayıları, PID tipi denetleyicilerde oransal, integral ve türev katsayıları ayarlanır. Bu yöntemlerin olumsuz tarafları; tip denetleyicilerde denetlenecek sistem modeline ihtiyaç duyulması ve ideal kazanç

değerlerinin deneme yanılma metoduyla bulunmasıdır. Klasik denetleyicilerin performansları ani değişen ve sinüsoidal özellikli yüklerde düşüktür[28].

Endüstride ve sanayideki uygulamalarda FSDAM'lar kontrol edilirken, çok hassas kontrol istenmiyorsa, bu durumda klasik denetleyicilerin kullanılması daha doğru bir seçim olacaktır. Bunun sebebi klasik denetleyicilerin maliyetlerinin düşük olması ve yapılarının basit olmasıdır. Hassas bir kontrole ihtiyaç duyulan uygulamalarda ise modern kontrol yöntemlerini kullanmak daha doğru olacaktır. Bu tekniklerden daha iyi sonuçlar alınmaktadır. Günümüzde tercih edilmekte olan modern kontrol teknikleri olarak; bulanık mantık yöntemi, genetik algoritma yöntemi, yapay sinir ağları yöntemi ile sinirsel bulanık denetleyicilerinin kullanıldığı yöntemleri örnek olarak sıralayabiliriz[28].

1.6.2.2. Modern Kontrol Yöntemleri

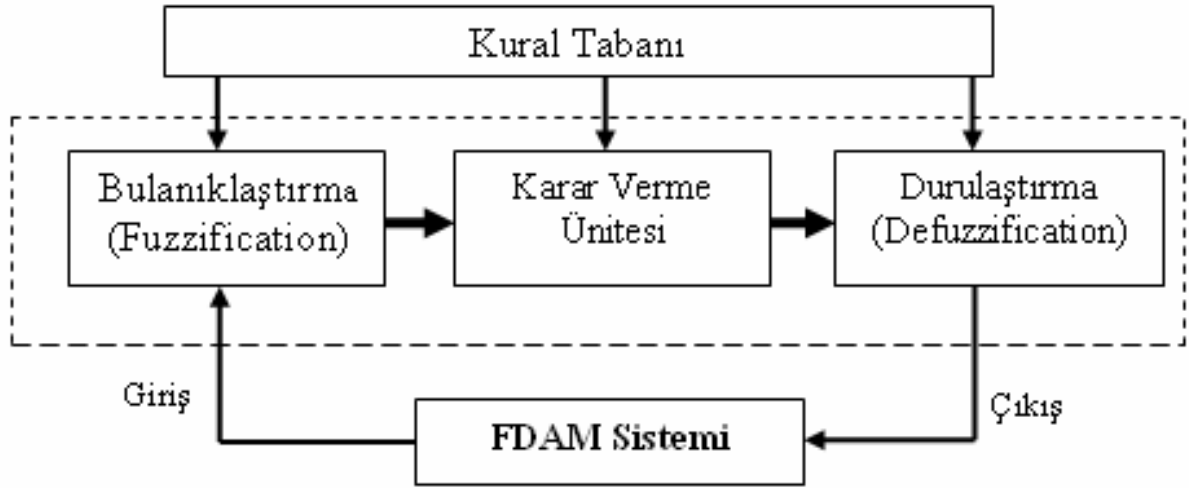
1.6.2.2.1. Bulanık Mantık

Klasik denetleyiciler tarafından yeterli hassasiyette sonuç alınamadığı durumlarda tercih edilebilecek en mantıklı kontrol yöntemidir. Bulanık mantık yöntemi, matematiksel model oluşturulamadığında veya matematiksel model oluşturulurken zorluklar yaşanıldığında tercih edilmektedir. Kişilerin tecrübeleri ve fikirlerine ihtiyaç duyulduğunda, doğrusal olmayan sistemlerde daha olumlu sonuçlara ulaşılmaktadır. Bulanık denetleyicilerde dilsel ifadeler kullanılırlar. Bulanık denetleyiciler işlemi üç ana basamakta oluşturur:

1. Bulanıklaştırma basamağı: Üyelik fonksiyonlarının elde edilmesi işlemidir. Burada, dışarıdan gelen kesin bilgiler, üyelik fonksiyonları cinsinden ifade edilir, yani bulanıklaştırılır.

2. Kural tabanı basamağı: Uygun kurallar elde edileni işlem basamağıdır. Bu kurallar, sistem hakkındaki bilgi, fikir ve tecrübelerle dayanarak oluşturulur.

3. Durulaştırma basamağı: Bulanıklaştırılmış sonuç değerleri, durulaştırma yöntemlerinden birini kullanılarak tekrar kesin değerler cinsinden ifade edilir ve sistemin ayarlanması yapılır[28]. Şekil 23'de bir bulanıklaştırılmış denetleyicinin genel yapısı gösterilmiştir.



Şekil 23. Bulanıklaştırılmış bir denetleyicinin genel yapısı[15]

1.6.2.2.2. Genetik Algoritma

Fonksiyonun optimizasyonun, biyolojik süreç modellemesi tarafından gerçekleştirilen işlem genetik algoritmadır. Popülasyonların her biri kromozom olarak temsil edilmektedir. Belirlenen kurallara göre popülasyonların uygunluğu için minimizasyon ve maksimizasyon yapılmaktadır. Uzun süreli çalışmalar sonucunda bu metod ilk defa John Holland tarafından 1975 yılında uygulanmaya başlamıştır. Genetik algoritmaların üstünlük özellikleri:

- Ayrı ve sürekli parametrelerde optimizasyonun sağlanması
- Türev türü bilgiler gerekli değildir.
- Çalışmalarda kullanılan parametrelerin sayısını arttırmak mümkün olmaktadır.
- Bilgisayarları paralel olarak kullanarak çalıştırabilmek mümkündür.
- Küresel ideal değerlerin bulunması mümkün olmaktadır.
- Parametre sayıları çok olsa da çözümlerin en uygununun bulunması mümkün olmaktadır. Sistemlere ait bir amaç fonksiyonu ile bu fonksiyona bağlı olan sınır şartları, genetik algoritmalarda belirlenmeleri gerekli ilk işlemdir. Buna ait matematiksel ifadeler oluşturulduktan sonra, bu ifadeler ile sınır sınır şartlarının algoritmaya göre uyarlanması gerçekleştirilmelidir[28].

Çalışma sırasında genetik algoritmaların işlem sırası şekil 24’de gösterilmiştir.



Şekil 24. Genetik alitmada işlem sıraları[28]

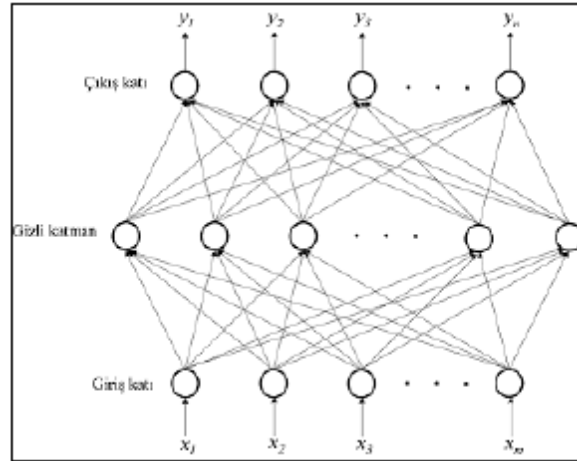
Biyolojide genler, genetik algoritma parametrelerini temsil ederler. Parametreleri toplu şekilde oluşturulan kümeler kromozomlardır. Oluşturulan yeni nesiller, bilgi değişiminin rastgele yapılması ve dizi içinde hayatta kalanların birleştirilmesiyle oluşturulur[28].

Genetik algoritmalarda üç temel operatör bulunmaktadır. Bu operatörler: seçme operatörü, çaprazlama operatörü ile mutasyon operatörüdür. Genel olarak ilk nüfus rastgele şekilde oluşturulur. Bir nesildeki dizilerden bir bölümü bir sonraki nesle aktarılır, bir bölümü de aktarılmadan yok olmaktadır. Seçim düzenekleri, dizilerden hangilerinin bir sonraki nesle aktarılacağını belirler. En önemli genetik operatör çaprazlamadır ve yapı bloklarının yeniden birleştirilerek, karıştırılmasından sorumludur.

Çaprazlama, iki kromozomda belirli noktadaki yer değiştirmedir. Bu, yeni çözümleri bulmada önemli roller oynar. Yani bir çözümün bazı bölümlerini, başka bir çözümle değiştirebilir. Yeni tohumlar bu şekilde meydana gelmektedir. Mutasyon, genetik değişiklik sağlayan bir operatördür. Bir nesilden bir sonraki nesle kopyalama sırasında, rastgele değişimler genlere aktarılır. Mutasyon, nadiren de olsa iyi bireylerin yok olmasına sebep olabilir. Genetik algoritma içerisine elitizasyon yapısı yerleştirilmiştir. Bu yapı, en iyi bireylerin bir sonraki nesle taşınmasını sağlar[28].

1.6.2.2.3. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları, matematiksel modelleri tanımlanmamış veya çok zor tanımlanabilen sistemlerin çözümünde kullanılabilir. Ayrıca belirli olmayan, verileri eksik olan, gürültülü sistemlerin çözümünde de kullanılabilir[28]. Literatürde birçok yapay sinir açı yapısı mevcuttur. Fakat en çok kullanılan çok katlı perseptron (ÇKP) modelidir[28]. şekil 25’de gösterilen birçok katlı perseptron yapısıdır.



şekil 25. Çok Katlı Bir Perseptron Modeli[28]

Bir ÇKP, bir adet giriş ve çıkış katmanı ve bir veya birden fazla ara katmandan oluşur. Katlardaki elemanlar nöronlardır. Ara katta bulunan her bir nöronun çıkış değeri, kendine bağlı olan girişler ile o girişlerin bağlantılı ağırlıklarının çarpım sonuçlarının toplamlarına eşittir. Bu toplam elde edilirken, çıkışın toplam bir fonksiyonu olarak hesaplanır[28].

Burada bir eşik, sigmoid ya da hiperbolik tanjant fonksiyonu oluşur. Öteki katlarda bulunan nöronların çıkış değerleri de aynı şekilde hesaplanmaktadır. Ağın çıkışı ve istenilen çıkış arasında ortaya çıkan fark hata olup; önceden belirlenen kabul edilebilir minimum seviyeye ininceye kadar ağın ağırlıkları değiştirilir. Tekrar geriye doğru yayılır. Bu olay, kullanılan eğitime algoritmasına göre yapılır. Yapay sinir ağlarında kullanılan çok sayıda eğitime algoritması mevcuttur[28].

1.6.2.2.4. Sinirsel Bulanık Denetleyiciler

Lineer olmayan fonksiyonlara belirlenen bir eğitim işlemlerinden sonra öğrenme ve genelleme yetenekleri katması ile paralel bilgi işleyebilmesi yapay sinir ağlarının üstünlüklerindendir. Alışılmış lojik işlemler dışındaki ara değişkenler kullanılarak uzman bilgisi sistemlere katılarak çıkarım yapılabilmesi gibi özellikler de bulanık mantığın üstünlüklerindendir. Bu iki yöntemin üstünlükleri birleştirilerek sinirsel bulanık ağ veya bulanık sinirsel ağ yapıları meydana getirilmiştir. Bu iki ağ yapısına, literatürde bazı çalışmalarda aynı anlam verilmektedir. Fakat genel olarak farklılık taşırlar. Bulanık sinirsel ağ yapılarının fonksiyonları, yapay sinir ağları fonksiyonlarının bulanık mantık fonksiyonları tarafından yürütülmesi prensibiyle gerçekleşir. Sinirsel bulanık ağ yapılarının fonksiyonları ise, bulanık mantık fonksiyonlarının yapay sinir ağları fonksiyonları tarafından yürütülmesi prensibiyle gerçekleşir. Günümüzde ise, genel olarak, içerisinde sinirsel bulanık ağ yapılarını barındıran sinirsel bulanık denetleyiciler kullanılmaktadır. Bulanık mantık ile yapay sinir ağlarının kullanıldığı tüm sahalarda, bilhassa lineer olmayan sistemlerin kontrolünde sinirsel bulanık denetleyiciler kullanılabilir. Bu doğrultuda, parametre değişimlerinin belirlenmesi, moment ve akının kestirimi, konum ve hız kontrolünde sinirsel bulanık denetleyicilerin kullanımı mümkündür[28].

1.6.2.2.5. Dalgacık Tekniği

Zaman domenini ile frekans domeninde durağan nitelikli olmayan işaretlerin analizlerini yapabilmek dalgacık teorisi ile mümkün olur. Dalgacık teorisinin bu özelliği nedeniyle görüntü işleme alanında pek yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. FSDAM'larındaki kullanımında ise, dalgacık konusunda yararlanılan fourier dönüşümünün kullanılması ile parametrelerin frekans domenindeki dönüşümleri gerçekleştirilir. Yine dalgacık

konusundaki alçak, yüksek geçiren filtre işlemleri, daubechies filtreleme gibi işlemler kullanılarak FSDAM'larının komütasyon anı tespit edilerek, rotor pozisyonu belirlenir[15].

2. MATERYAL VE YÖNTEM

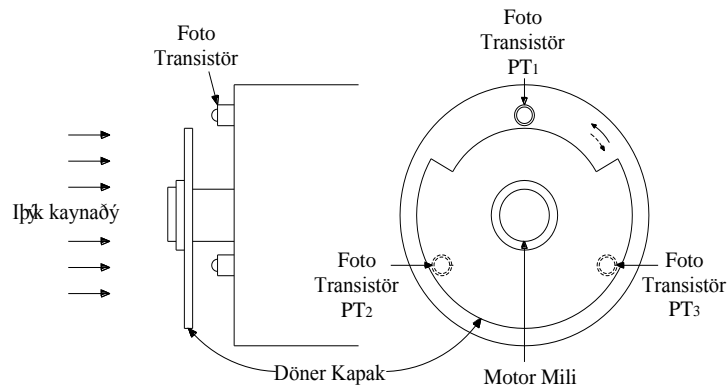
2.1. FSDAM UYARTIM ŞEKİLLERİ

2.1.1 Unipolar Uyarımlı FSDAM

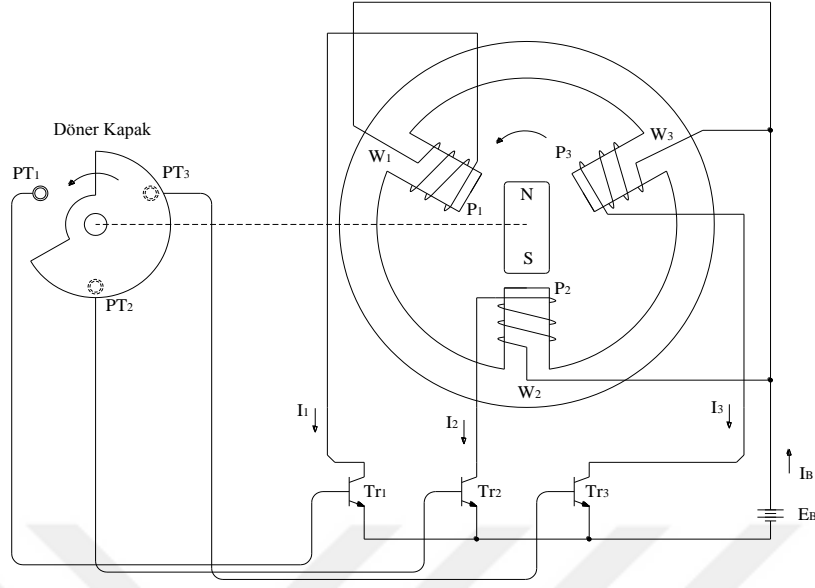
FSDAM'ın Unipolar çalıştırılmasında anahtarlama elemanları her bir faza seri bağlanır. Tüm anahtarlar toprakla referanslıdır. Bu sayede 6 kapı(gate) sürümü işlemi basitleştirilir. Mevcut giriş gerilimi, daha iyi akım regülasyonu için yükseltilir. Bu durum, düşük gerilim uygulamalarında bir avantajdır. Gerilim ya da akım sensörü kullanmadan düşük mertebeli harmoniklerde azalma, güç faktöründe iyileşme elde edilir. Bu çalışma modu basittir. Kullanılan parça sayısının azlığı ve düşük maliyeti pekçok değişken hızlı sürücü uygulamalarında tercih edilmesini sağlar. Maliyetin azaltılması büyük hacimli üreticiler ve değişken hızlı FSDAM uygulamaları için son derece önemlidir.

Şekil 26 optik pozisyon sensörlerinin kullanıldığı üç fazlı basit unipolar çalışan motoru göstermektedir[44].

Üç optik sensör PT_1 , PT_2 ve PT_3 120° 'lik aralıklarla yerleştirilir. Motor mili ile birleştirilen, dönebilen kapaktan gelen ışığa sırayla maruz bırakılırlar.



Şekil 26. Pozisyon Sensör Fototransistörlerin Rotor Milinde Yerleşimi

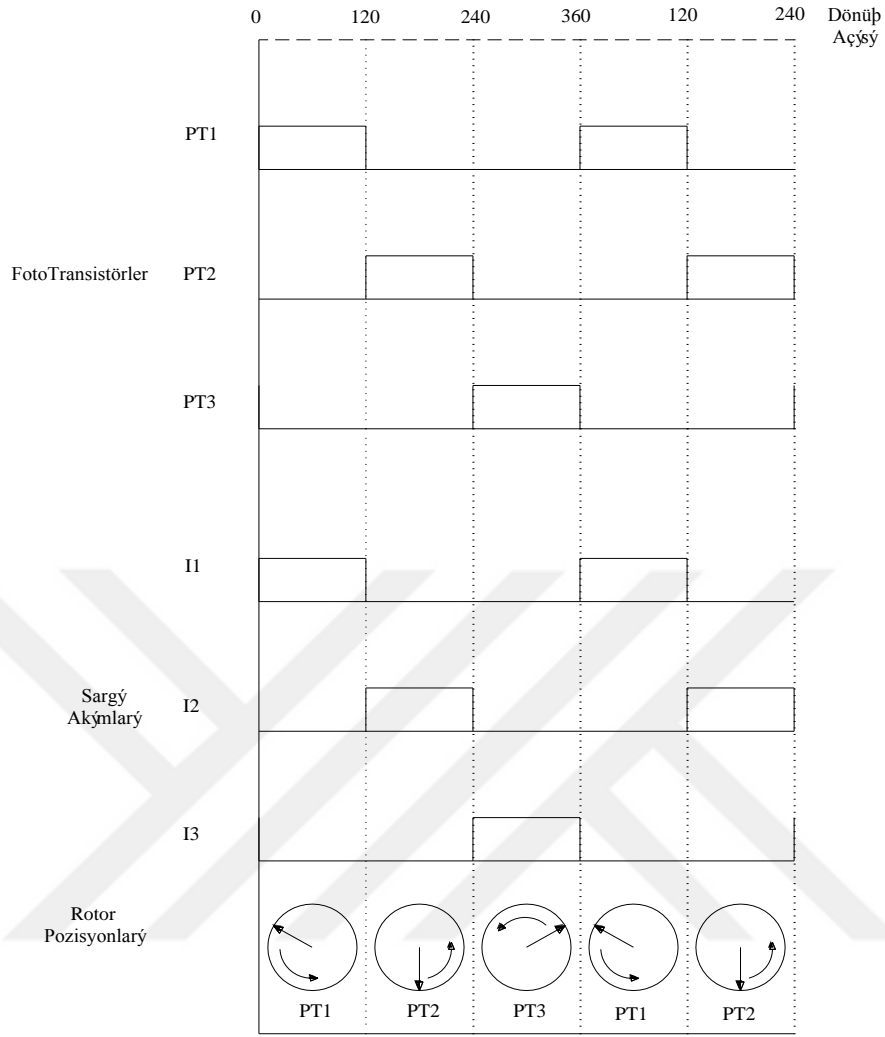


Şekil 27. Üç fazlı Unipolar Sürücülü FSDAM

Şekil 27’de görüldüğü gibi rotorun N kutbu statorun çıkıntılı P₂ kutbu karşısındadır. P_{T1} fototransistör ışığı algılar ve Tr₁ transistörünü ilettime geçirir. Bu durumda W₁ sargısından akan elektrik akımının oluşturduğu çıkıntılı P₁ kutbunda oluşan S kutup alanı, rotorun N kutbu ile etkileşime girer. Ortaya çıkan kuvvet çifti ok yönünde harekete sebep olur.

N kutbu, P₁ çıkıntılı kutbunun karşısına geldiğinde, motor miliyle birleştirilmiş olan kapak P_{T1}’i gölgede bırakır ve P_{T2} ışık almaya başlar. Akım, Tr₁ transistörü üzerinden akmaya başlar. Akım, W₂ sargısından aktığında ve çıkıntılı P₂ kutbunda S kutbunu oluşturduğunda rotordaki N kutbu ok yönünde dönecektir. Çıkıntılı P₂ kutbu ile karşı karşıya gelecektir. Bu anda kapak P_{T2} yi gölgelendirecek ve fototransistör P_{T2} ışık almaya başlayacaktır.

Bu olay, akımın W₁ sargısından W₂ sargısına geçişini sağlar. Böylece çıkıntılı P₂ kutbu enerjisiz kalırken, çıkıntılı P₂ kutbu enerjilenir ve S kutbunu oluşturur. Bu şekilde anahtarlama hareketi sırasıyla tekrar edilirse, sabit mıknatıslı rotor Şekil 28’de gösterilen anahtalamalar ve meydana gelen stator manyetik alanları nedeniyle sürekli olarak dönmeye devam eder[26].



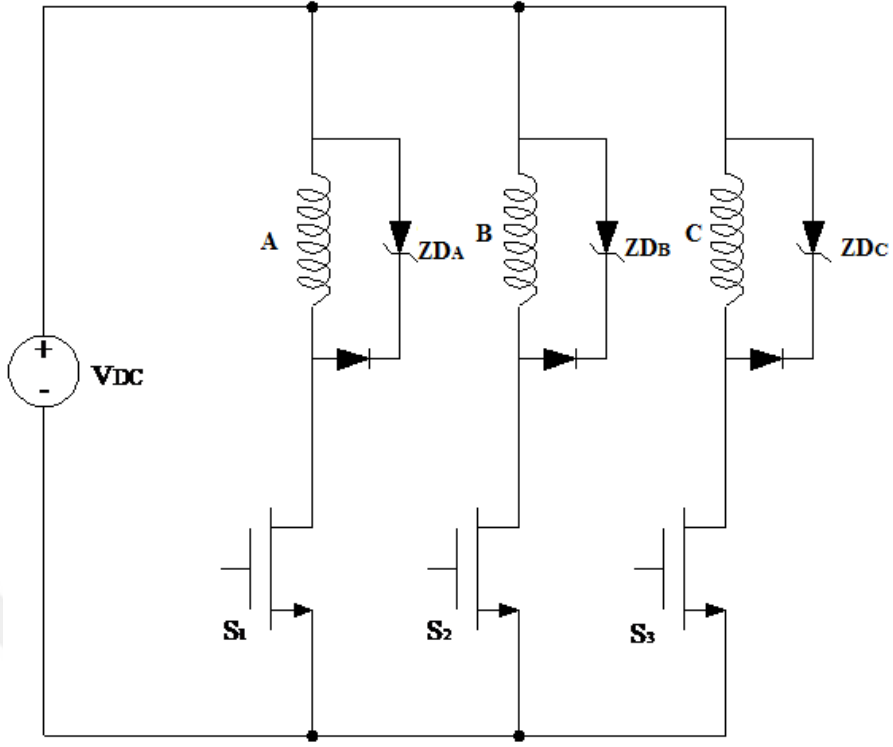
Şekil 28. Anahtarlama Sırası ve Stator Manyetik Alanı Dönüşü

Genel olarak bipolar akımla çalıştırılan Fırçasız Doğru Akım Motorları altı anahtarlama elemanlı inverter gerektirirler.

Unipolar motorlar, daha az elektronik parça gerektirirler. Bipolar motorlardan daha basit devreler için kullanılırlar. Bu sebeplerden dolayı, unipolar sürülen motorlar yaygın olarak düşük maliyetli uygulamalarda kullanılırlar.

Konverter maliyetinin düşmesiyle, sabit hızlı çalışmanın hâkim olduğu pek çok uygulama alanında değişken hızdan faydalanma olanağı ortaya çıkmıştır.

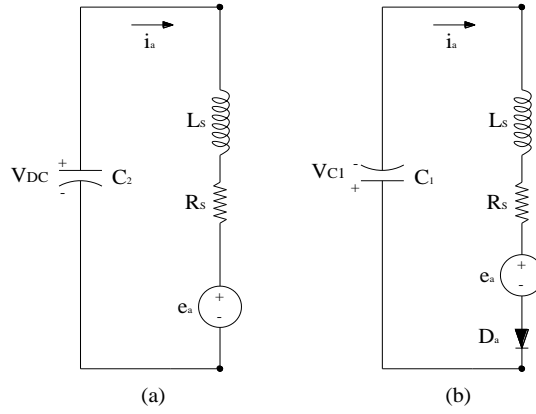
Basitleştirilmiş unipolar sürücü, herbir faz sargısına seri bağlı tek anahtardan ve Şekil 29’da gösterilen serbest salınım yolunda zener diyot ya da darbe rezistöründen oluşur.



Şekil 29. Üç Faz FSDAM için Basit Unipolar Konverter

Fırçasız Doğru Akım Motorunda daha iyi performans değişik sürücü devreleri ile elde edilebilir. Fırçasız Doğru Akım Motoru Unipolar uyarım ile üç anahtarlı konverterle çalıştırılmak istendiğinde makina sargılarında düzenleme yapılması gereklidir.

Unipolar uyarım seçmeden önce diğer bir önemli etken de, motorun nötrünün mevcut olmasıdır. Şekil 30 Fırçasız Doğru Akım Motoru sürücüsü için konverterin şemasını verir[26].

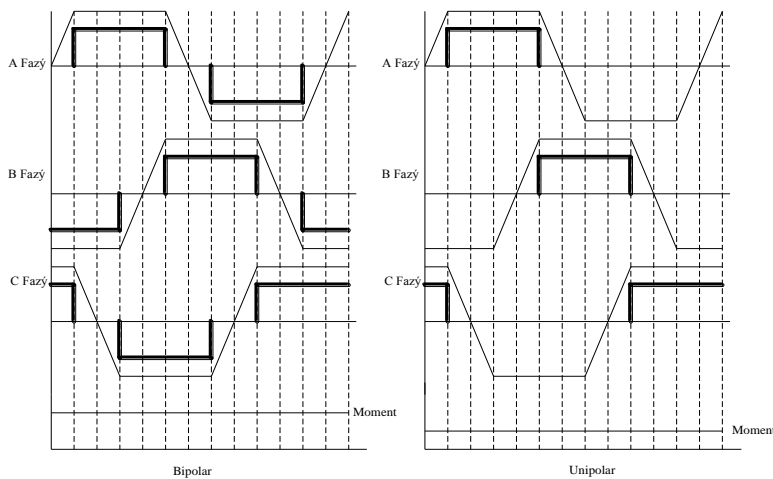


Şekil 31. Her Bir Faz Sargısının Eşdeğer Devresi

(a) İletim Anında (b) Komütasyon Anında

Bu şekilde, makine sargı uçlarına V_{C1} gerilimi uygulanır. Böylece, faz akımının hızlı bir şekilde azalması sağlanır. Her bir iletim aralığından sonra fazın uygun şekilde demagnetizasyonu oluşur. Negatif zıt elektro motor kuvvet (emk) periyodu esnasındaki iletimi önlemek için V_{C1} anlık değeri, zıt emk E 'nin tepe değerinden büyük olmalıdır.

Çalışma esnasında düzgün moment üretimi için zıt emk gerilimi tepe değerinde iken, her bir fazdan geçen akımın sabit tutulması gerekir. Zıt emk gerilimi yön değiştirirken doğru akımın kesilmesi gerekir. Bipolar uyartım için her bir 120° iletim periyodu sonunda zıt emk pozitifken pozitif, negatifken negatif akım verilir. Bunun sonucunda her fazdan iki yönde akım akar. Şekil 32'de gösterilen dalga şeklinde zamanın herhangi bir anı için moment üretilir.



Şekil 32. Uyartım Şekilleri için Faz Akımı, Zıt Emk ve Çıkış Momenti Dalga Şekilleri

Unipolar uyartımda akım geçişleri, Şekil 32’de gösterildiği gibi zıt emk geriliminin sadece bir yönünde gerçekleşir. Sabit moment üretimi yinede mümkündür. Çünkü her an, bir faz iletim halinde bulunmaktadır. Motor sargıları bipolar duruma göre daha verimsiz bir biçimde kullanılır. Bu unipolar motorun aynı tepe değerinde faz akımı için düşük çıkış momenti üretmesine sebep olur. Fakat unipolar uyartım toplam sürücü maliyetini düşürür. Düşük güç uygulamaları için maliyet hesaba katıldığında en uygun tercihtir. Güç kademesi arttıkça, bipolar uyartımın uygulanması daha doğru tercih olmaktadır.

Ek olarak, düşük maliyeti ile unipolar uyartım aşağıdaki avantajları sağlar. Her faza seri olan, sadece bir yarı iletken anahtarlama elemanı vardır. Bu da iletim kayıplarını en aza indirir. Bu anahtarlama elemanları toprak ile referanslı olduklarından sürülmeleri bipolara göre oldukça kolaydır. Kapı (gate) sürme ve tetikleme devresinde basitlik sağlanır. Toplam sürücü maliyetinde azalma sağlayan kompakt bir yapı ortaya çıkar.

Sürücünün akım regülasyonu çalışması maksimize edilir.

- ✓ Kısa devre hataları riski ortadan kalkar.
- ✓ Düşük mertebeli harmonik oluşumunda azalma görülür. Sonuç olarak güç faktöründe düzelme gerçekleşir[26].

2.1.2 Bipolar Uyartımlı FSDAM

Üç Fazlı FSDAM üç faz köprü devre ile çalıştırılırken, her bir sargıda AA aktığı için, mekanik çıkış gücünün elektriksel giriş gücüne oranı olan, verim yüksektir.

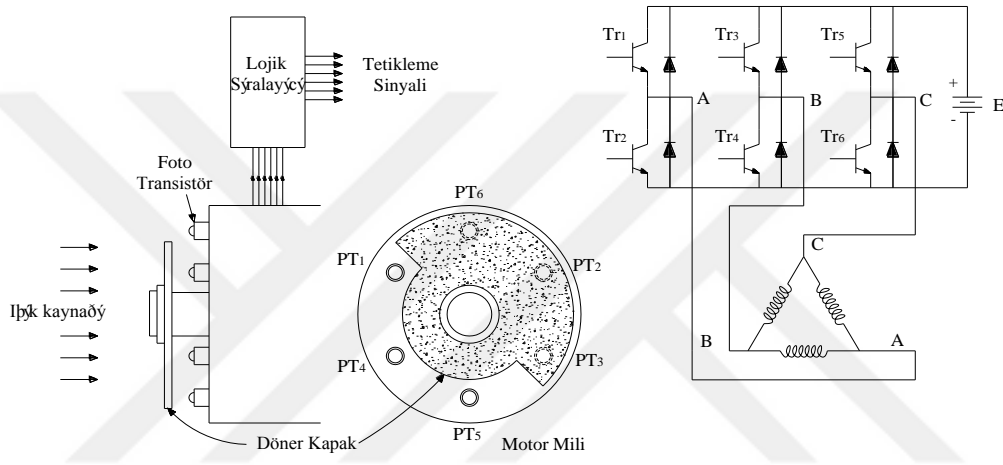
Bu çalışma sıklıkla bipolar çalışma olarak adlandırılır. Buradaki bipolar ifadesi, sargıların dönüşümlü olarak S ve N kutbu oluşturacak şekilde enerjilendirildiğini belirtir. Şekil 41 deki şekilde üç faz köprü devresinde rotorun pozisyonunun algılanması için optik sensörler kullanılmıştır. 6 adet fototransistör eşit aralarla tabaka üzerine yerleştirilmiştir.

Motor mili ile bu tabaka motor mili birleştirilmiştir. Optik sensörler ışık kaynağından sırayla ışık almaktadırlar. Bu aşamada transistörlerin iletim ve kesim konumları ve fototransistörlerin ışığı algılamaları arasındaki ilişki bir sorun olarak göze çarpar. Lojik sıralayıcı kullanarak bu sorun çözümlenebilir.

Motorda stator sargıları, yıldız veya üçgen bağlanarak enerjilendirilebilir.

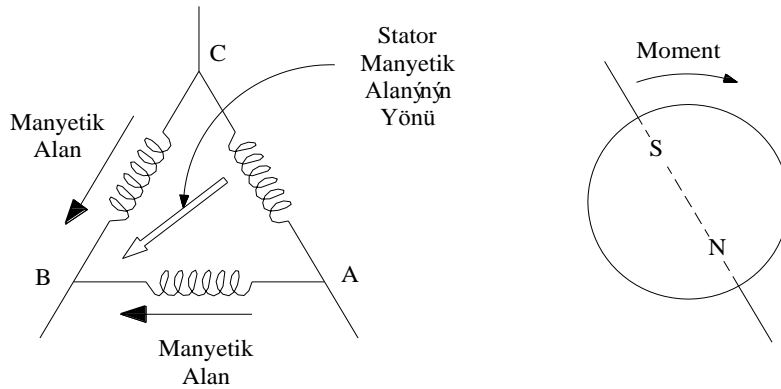
Fototransistörler, üçgen bağlı olan motor sargıları ile istenilen yönde moment üretebilecek şekilde uygun biçimde numaralandırılır. Her bir optik eleman bu transistörleri tetikleme de kullanılır. Fototransistörlere ışık geldiğinde aynı numaralı transistörler de ilettime geçerler.

Şekil 33’de verilen devrede, elektrik akımının Tr_1 , Tr_4 ve Tr_5 ten akışı ve B terminali sıfır iken A ve C terminallerinin batarya gerilimine sahip oldukları gösterilmektedir[26].



Şekil 33. Üç Fazlı FSDAM Bipolar Sürücü Devresi

Bu durumda, Şekil 34’de gösterildiği gibi bir akım A terminalinden B terminaline doğru akar. Diğer akımda C terminalinden B terminaline doğru akar.



Şekil 34. Kapak Konumuna Göre Stator Manyetik Alanı ve Momentin Yönü

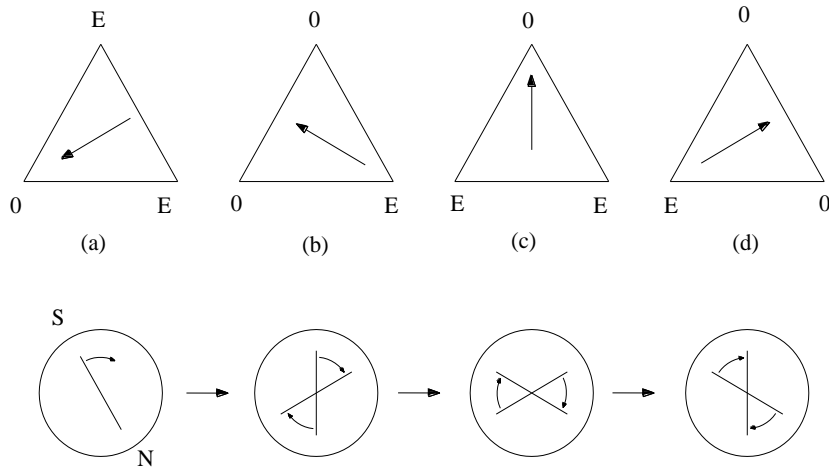
Şekil 34’de her bir fazın akımları ile üretilen manyetik alanların yönleri oklarla belirtilmiştir. Ortada yer alan içi boş büyük ok, statordaki artık manyetik alanı temsil eder.

Rotor alan akısı, Şekil 34’de gösterilen stator manyetik alanına göre klasik motorlarda 90° ’lik açı pozisyonuna karşılık gelecek şekilde yerleştirilir. Böylece rotorda saat yönünde moment üretimi gerçekleşir. Sonrasında 30° civarında bir dönüş gerçekleşir. P_{T5} kesime giderken P_{T6} stator manyetik kutbunda 60° saat yönünde dönüş yapmak için ilettime gider. Böylece rotorun S kutbu yakına geldiğinde, statorun S kutbu saat yönünde sürekli dönüş meydana getirmek için uzaklaşır.

Transistörlerin iletim-kesim sırası Tablo 2’de ve rotorun dönüşü Şekil 35’de gösterilmektedir.

Tablo 2 Anahtarlama Elemanlarının Pozisyonları (İleri Yönde)

Tr_1	1	1	1	0	0	0
Tr_2	0	0	0	1	1	1
Tr_3	0	0	1	1	1	0
Tr_4	1	1	0	0	0	1
Tr_5	1	0	0	0	1	1
Tr_6	0	1	1	1	0	0



Şekil 35. Stator Manyetik Alanının ve Rotorun Saat Yönünde Dönüşü

Dönüş yönü, lojik sıralayıcının düzenlenmesiyle terslenebilir. Işık alma sırasına göre numaralandırılmış fototransistörler ve aynı numaraya sahip transistörler kesime götürülerek bu işlem gerçekleştirilir. Diğer yandan, fototransistörler ışık almadığında aynı numaraya sahip transistörler ilettime geçirilir.

Şekil 33'deki pozisyon sırası Tr_2 , Tr_3 ve Tr_6 iletim konumundadır. A ve C terminalleri sıfır potansiyele sahipken, batarya gerilimi E, B terminali ucunda görülür.

Şekil 36'de görüldüğü gibi, stator manyetik alanı terslenir ve rotorun momenti saat yönünün ters yönüne olur.

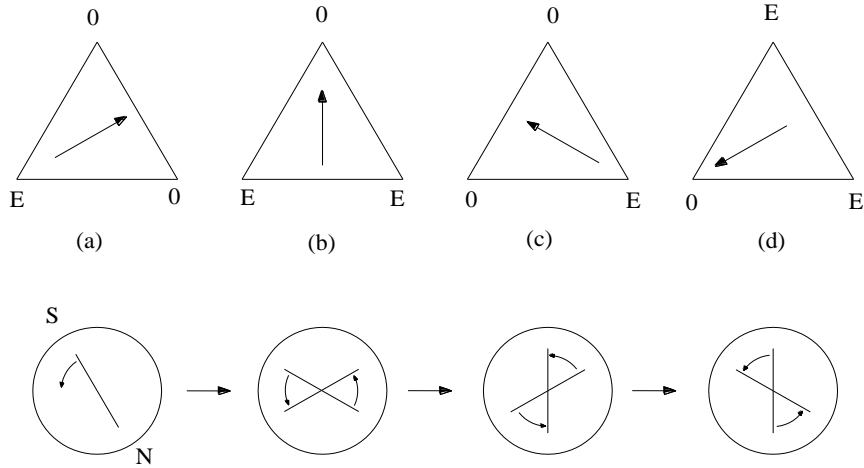
Sonrasında, motor 30° kadar döner. Tr_2 kesime giderken Tr_1 iletime gider. Bu noktada alan 60° dönmüş olur. Bu durum Şekil 36 (b) de gösterilmektedir. Rotor saat yönü tersine moment üretirken, saat yönünün aksine olan hareket devam eder (Şekil 36(c)).

Bu hareket şekildeki a-b-c-d-.... durumları sürekli hareket elde etmek için bir sıraya koyularak sağlanmaktadır.

Transistörlerin geri yönde çalışmada iletim-kesim sırası Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 3 Anahtarlama Elemanlarının Pozisyonları(Geri Yönde)

İletim Kesim Sırası	1	2	3	4	5	6
Tr_1	0	1	1	1	0	0
Tr_2	1	0	0	0	1	1
Tr_3	1	1	0	0	0	1
Tr_4	0	0	1	1	1	0
Tr_5	0	0	0	1	1	1
Tr_6	1	1	1	0	0	0



Şekil 36. Stator Manyetik Alanının ve Rotorun Saat Yönünün Tersine Dönüşü

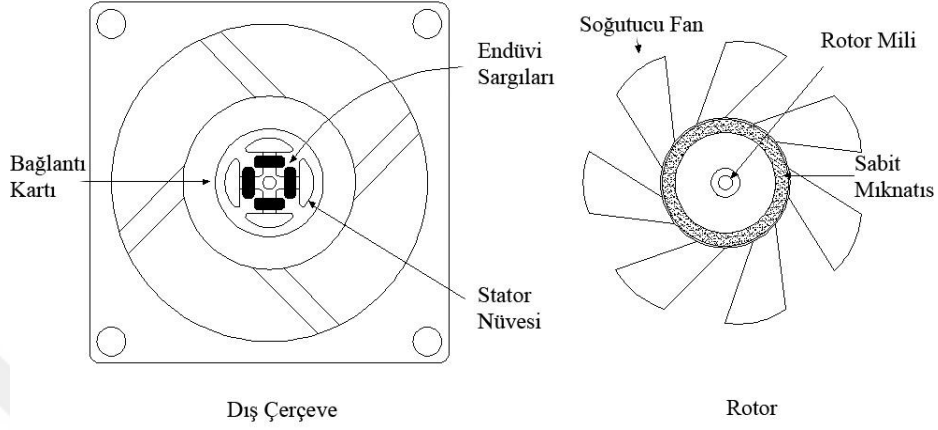
Bipolar uyarım ile FSDAM çalıştırıldığında, her faz için iki yarı iletken anahtarlama elemanına ihtiyaç olmaktadır. Bu da iletim kayıplarını unipolar uyarıma göre iki katına çıkartır. Bu anahtarlama elemanlarının sürülmeleri unipolar uyarıma göre daha zordur. Motor sargıları, bipolar uyarımda unipolar uyarıma göre daha verimli bir biçimde kullanılır. Bipolar uyarımlı motor, aynı tepe değerinde faz akımı için unipolar uyarımlı motordan daha yüksek çıkış momenti üretir. Düşük güç, düşük performans uygulamaları için (maliyette hesaba katıldığında) en uygun tercih unipolar uyarım olarak göze çarpsada, güç kademesi arttıkça bipolar uyarım etkili tercih edilmektedir[26].

2.2 FSDAM FAZ SAYISI

FSDAM'ları yüksek momentleri, yüksek verimleri ve kontrol edilebilirlikleri sayesinde geniş uygulama alanlarına sahiptir. Genel olarak, Üç Fazlı Fırçasız DA motorlarının kullanımı yaygındır. Sürücülerinin ve algılama devrelerinin maliyeti bazı uygulamalarda bir ve iki fazlı motorların tercih edilmesine sebep olur. Bir fazlı ve iki fazlı fırçasız DA motorları düşük maliyetli basit yapılı ürünlerde kullanılırlar.

2.2.1. Bir Fazlı FSDAM

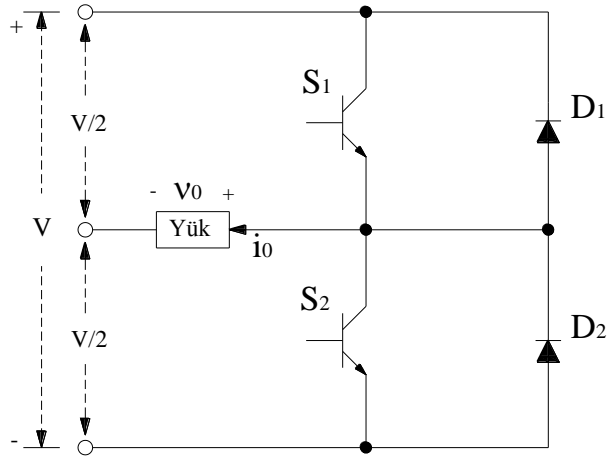
Aşağıda geleneksel tek fazlı fırçasız doğru akım motoru Şekil 37 ile açıklanmıştır.



Şekil 37. Tek Faz Geleneksel FSDAM Görünümü

Şekil 37’de görüldüğü gibi, bir fazlı FSDAM, elektrik enerjisi uygulandığında döner moment üretmek için tek faz çekirdeksiz stator ve statorun ürettiği moment ile dönen rotordan oluşur.

Rotorun alt kısmında sabit olan çekirdeksiz stator, stator nüvesi ve endüvi sargılarından oluşmaktadır. Sürücü devresini bulunduran bağlantı kartı statora eklenir.



Şekil 38. Tek Faz Sürücü Devresi

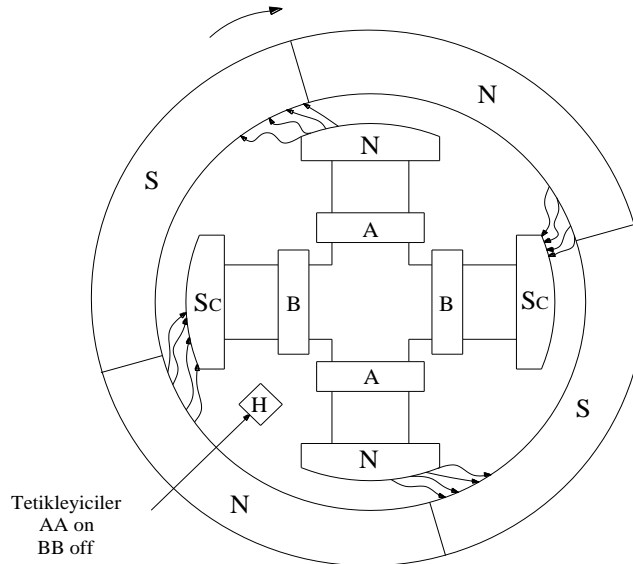
Şekil 38'deki sürücü devresi endüvi sargılarını enerjilendirmek için kullanılır. Hall sensörü gibi manyetik kutup algılama elemanı, rotorun sabit halka mıknatısının manyetik kutuplarını algılamak için kullanılır. Rotor merkezinde sabitlenmiş milden ve rotorun alt kısmına yerleştirilmiş halka mıknatıslardan meydana gelir. Halka mıknatıs N ve S olmak üzere iki kutba sahiptir. Ayrıca, rotorun dış kısmına soğutucu fan pervanesi de eklenmiştir. Elektrik akımı döner moment üretmek ve rotoru döndürebilmek için bağlantı kartı üzerinden endüvi sargılarına uygulanır.

Motorun çalışmasında başlangıç durumunda, rotor halka mıknatısının durmakta olan N ya da S kutuplarından biri sensör tarafından algılanır. Algılama sonucunda sinyal bağlantı kartına gönderilir. Alınan bu pozisyon bilgisi, sürücü devresinde bulunan inverterin yarı iletken S_1 ve S_2 anahtarlama elemanlarını tetiklemede kullanılır. Anahtarlama elemanları uygun zamanlarda tetiklenerek, sargıların döner alan oluşturması sağlanır. Oluşan döner manyetik alan halka mıknatıs manyetik alanı ile etkileşime girer ve rotor dönmeye başlar[26].

2.2.2. İki Fazlı FSDAM

Motor, kalıcı mıknatıslı olup endüvi sabittir. Alan döner durumdadır. Endüvisi 4 çıkıntılı kutba ve A – AB – B gibi iki özdeş sargı setine sahiptir[42].

A-A sargıları enerjilendiğinde N kutbu oluşturmak için bağlanmıştır.



Şekil 39. Vantilatör Uygulamaları için 12 V 1W 'lık FSDAM Yapısı

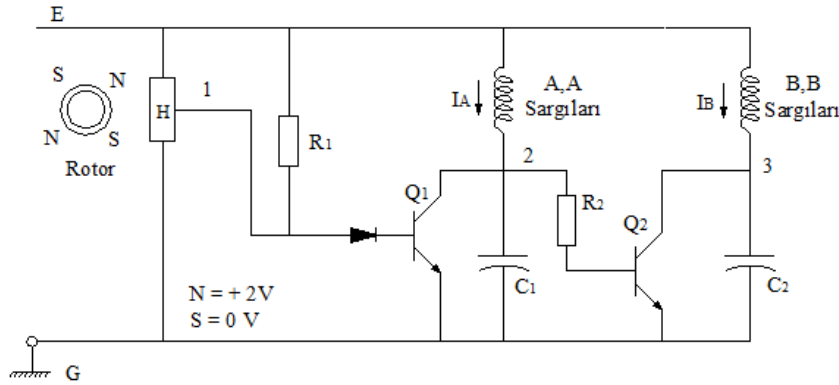
Sargı yapısı sabittir. Hall sensörü (H), A sargısını iletim B sargısını kesim modunda tutacak şekilde tetikler. Sonuçta birbiri ile uyumlu iki S kutbu üretilir.

Aynı durum B – B sargıları için de geçerlidir. Daha önceden var olan iki uyumlu S_c kutbu enerjilendiklerinde iki N kutbu oluşturur. Sabit durumda olan sargı setleri A-A ve B-B eşit zaman aralıkları için, iki elektronik anahtar ile ardışık olarak uyarılır. Rotor dört sabit mıknatıs kutbuna sahiptir ve saat yönünde döndüğü varsayılır.

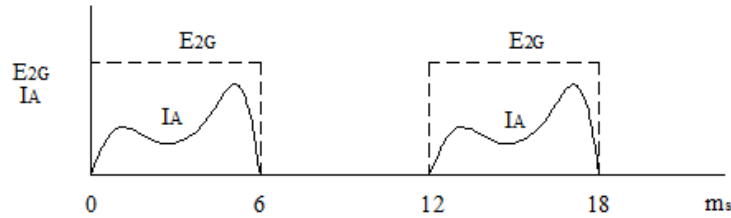
Sabit bir H sensörü N ve S kutuplarının sıralarını algılar. Eğer eleman dönen N kutbu etkisi altında kalırsa (Şekil 39) elektronik anahtarlardan birini A – A sargılarını uyarması için tetikleme sinyali üretir. Bu durumda, rotor ve stator kutupları arasında saat yönünde (cw) manyetik moment oluşturulur. Böylece saat yönü dönüş devamlı olur. Bu esnada gerçekleşen kutuplar arası akı örneği şekilde gösterilmiştir.

Diğer bir yandan, H sensörü S kutbu altına yöneldiği anda diğer anahtarın kapanmasına böylece B – B sargılarının enerjilenmesine neden olur. Aynı zamanda A-A sargılarının enerjilerinin kesilmesini sağlar. Bu durumda da saat yönünde (cw) moment üretilir.

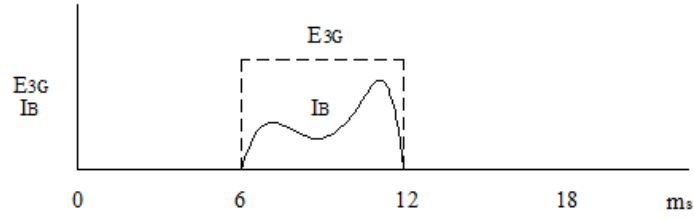
Bir bobin setinden diğerine sıralı anahtarlama hareketi rotoru hareketli tutar.



(a)



(b)



(c)

Şekil 40. İki Fazlı FSDAM Devresi ve Faz Akımları Dalga Şekilleri

İki faz güç üreten konverterde anahtar gibi davranan ve H algılama elemanından aldığı sinyal ile aktif olan Q_1 ve Q_2 transistörleri bulunmaktadır.

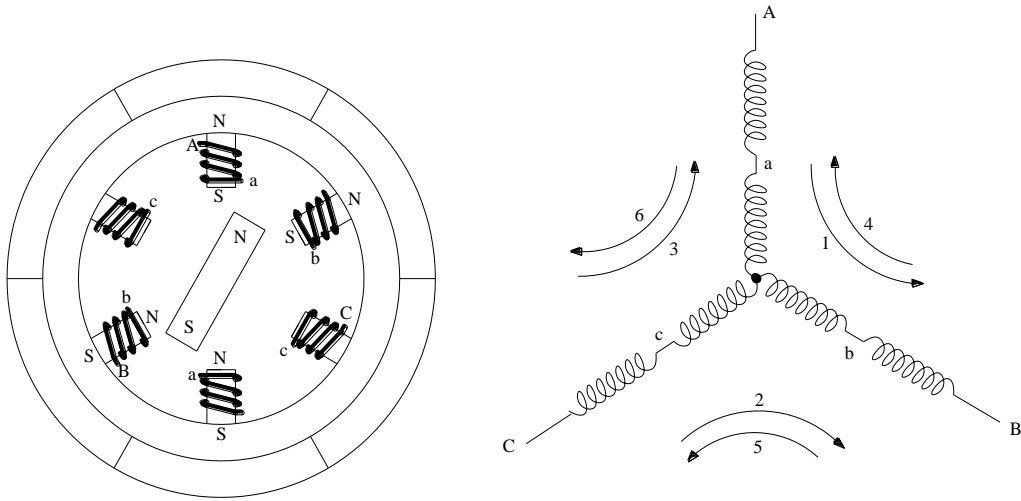
Hall etkili sensör N kutbu etkisi altına girdiğinde, 2V civarında gerilim üretir. S kutbu etkisindeki gerilim sinyali de sıfırdır.

Kapasitörler, bobinlerin enerjisi her kesildiğinde serbest kalan indüktif enerjiyi emer. Şekil 40(a) da iki fazlı FSDAM devresi, Şekil 40(b) ve Şekil 40(c) de ise aynı zamanda bobin setlerindeki akımın dalga şekli gösterilmektedir. Küçük fan kullanıldığı ortamda yüzeye soğuk hava sağlar.

Fırçasız motor çeşitli avantajlar sunar. Bu avantajlar binlerce saatlik çalışma sonunda bile bakım gerektirmemeleri, fırça olmadığı için fırçaların yıpranmasından dolayı açığa çıkan toz parçacıkları yoktur. Dolayısıyla kirlenmeler ortaya çıkmaz. Fırçalı doğru akım motorlarından daha sessiz çalışırlar. Fırçalar, mekanik ve elektriksel açıdan gürültülüdür. Sürtünme kıvılcımı oluştururlar. Kıvılcıma duyarlı tehlikeli ortamlarda kullanılmaları sakıncalı olduğunda Fırçasız Doğru Akım Motorları öne çıkmaktadır.

2.2.3 Üç Fazlı FSDAM

Fırçasız Doğru Akım Motorlarının en yaygın kullanılan türü olarak karşımıza çıkan üç fazlı çeşidi, Şekil 41'deki gibi genellikle yıldız bağlı ve simetrik bir biçimde statora yerleştirilen 3 sargı grubundan meydana gelir.

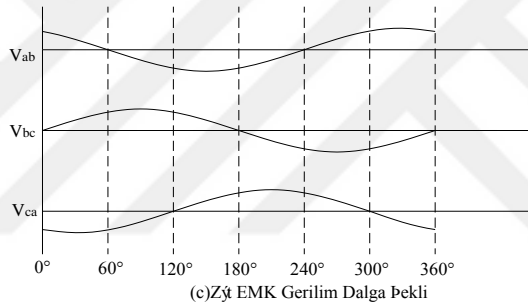
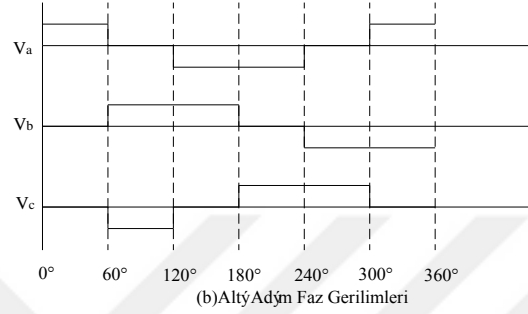
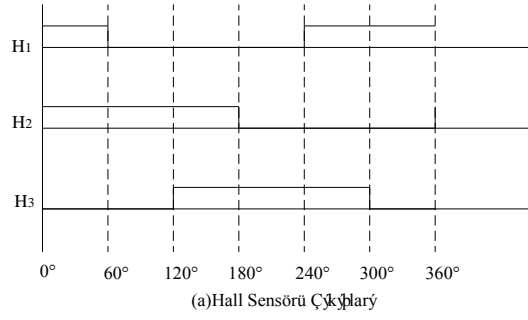


Şekil 41. Üç Fazlı FSDAM Genel Yapısı

En basit haliyle Fırçasız Doğru Akım Motoru, dönen bir kalıcı mıknatıstan ve simetrik dağıtılmış üç faz sargılı sabit statordan meydana gelir. Her bir sargıdan akan akım, diğer sargıların oluşturduğu alanlarla toplanacak olan manyetik alan vektörü oluşturur.

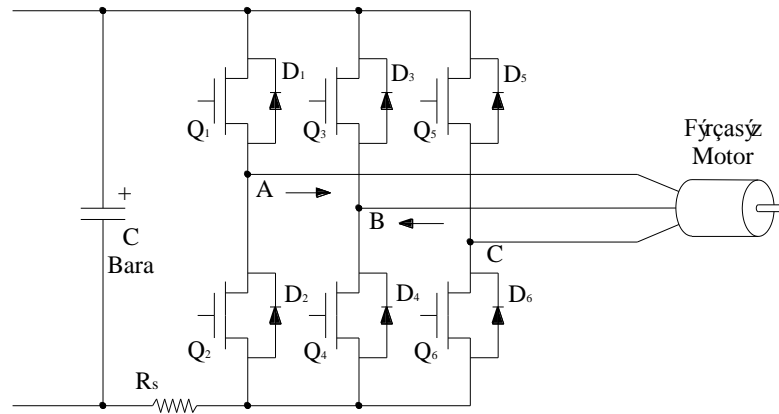
Stator manyetik alanı, sargılardan akan akımların kontrol edilmesiyle keyfi yön ve genlikte geliştirilebilir. Moment, net stator alanı ve rotor manyetik alanı arasındaki etkileşimle üretilir.

Üç fazlı Fırçasız Doğru Akım Motorunun çalıştırılması için en basit metotlardan biri altı adım sürücü olarak bilinir. Bu metotta, her bir faz gerilimi 120° 'lik elektriksel aralıkta gösterilen rotor elektriksel açısına göre enerjilendirilir. Şekil 42(a)'da hall sensör çıkışları, şekil 42(b)' altı adım faz gerilimleri gösterilmiştir. Zıt emk gerilim dalga şekilleri ve sargılardan akan akım sırası şekil 42(c)'görüldüğü gibi gerçekleşir[29].



Şekil 42. 120° İletim Komütasyonu

Bu işlem, Şekil 43'deki gibi yarı iletken anahtarlama elemanları bulunduran sürücü konfigürasyonu ile gerçekleştirilir.



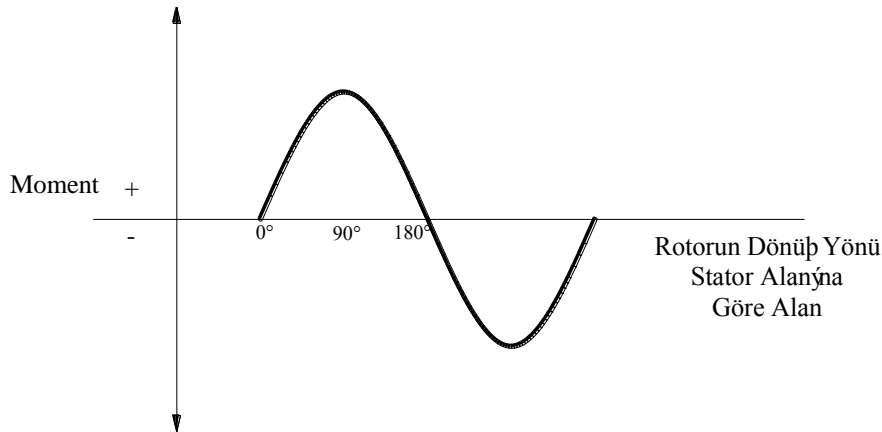
Şekil 43. Üç Fazlı FSDAM Sürücü Devresi

Şekil 42(a)'da gösterilen üç hall sensörü çıkışı genellikle rotor pozisyonunu algılamak için kullanılır. Hall sensörünün sıralanma süreci uygun gerçekleştirilirse,

herbir sensör çıkışı rotorun döndüğü andaki hat-hat zıt emk gerilimi dalga şeklinin karşılığıdır. Rotor pozisyonunun bilinmesi önemlidir. Rotorun herhangi bir pozisyonu için net stator alanının, momenti maksimize eden optimal bir yönü vardır. Ayrıca moment üretimini engelleyen, moment üretmeyen bir yönü de vardır. Sabit mıknatıslı rotor alanı, statorun ürettiği alan ile aynı yönde ise moment üretilmez. Alanlar güç üretimi için kesişir. Sadece motor miline ve yataklarına baskı uygular, dönmeye sebep olmaz. Bu durumda bir titreşim hareketi açığa çıkar.

Şekil 43’de her faz gerilimi, üstteki anahtar iletim, alttaki anahtar kesim durumunda olduğu zaman pozitifdir. Üstteki anahtar kesim, alttaki anahtar iletim durumunda olduğu zaman ise negatiftir. Her iki anahtarın da kesim durumunda olduğu zaman ise sargıdan akım akmaz. Bu esnada, sargı uçları gerilimi motorun zıt emk’nın değeri kadardır. Diğer bir deyişle, her bir faz gerilimi bir an için iletim, kesim ve bekleme olarak üç farklı konum alabilir. Her bir sektörde akım yolunu elde etmek için sadece bir faz pozitif, diğeri negatif olarak enerjilendirilir. Uygun şekilde komütasyon için 60° ’lik aralıkta rotor pozisyonunun kontrolör tarafından bilinmesi gerekir.

Şekil 44’de görüldüğü gibi stator alanı, rotor tarafından üretilen alan ile dikey olduğunda, açığa çıkan manyetik güç rotoru döndürmek için çalışır. Moment maksimize edilir. Stator alanı ve rotor tarafından üretilen alan bileşenlere ayrıştırılabilir. Bu durumda sadece dikey (Quadrature) bileşen faydalı moment üretirken, paralel (Direct) bileşen ise kullanışsız basınç gücü üretir. Bu sebepten, verimli bir alan Direct (paralel) bileşenini minimize eden ve Quadrature (dikey) bileşeni maksimize eden bir fonksiyonla çalışmalıdır.



Şekil 44. Pozisyon Moment Karakteristiği

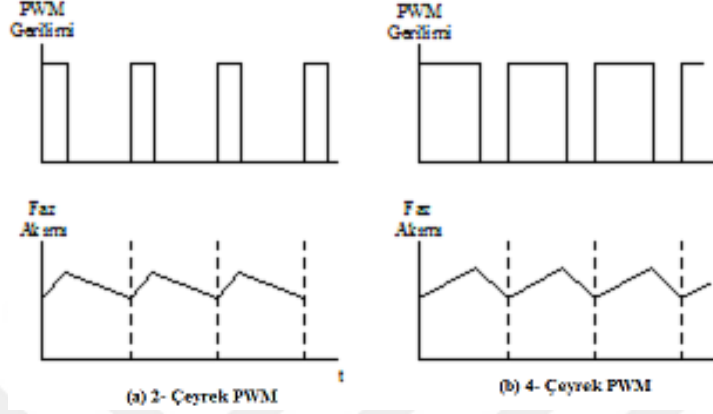
Fırçasız Motorlarda momenti ve dolaylı olarak verimi artırmak için, ortaya çıkan aşırı akımların ve komütasyon peryodu sonunda açığa çıkan zıt emk'nın başarılı olarak kontrol edilmesi gerekir. Bu durum, bileşen maliyetini ve mekanik gürültüyü azaltır. Komütasyon saykılının başında, akım sargılara ilk olarak gönderildiğinde stator ve rotor aynı polaritededir. Bu sayede, birbirlerini istenen dönüş yönünde iterler. Sargıdaki akım hızla artar, komütasyon saykılının ilk çeyreğinde yaklaşık olarak tepe değerine ulaşır. Daha sonra yavaşça azalmaya başlar ve üçüncü çeyrekte %90 civarına gelir[27]. Bu düşüşten sonra komütasyon gerçekleşir. Akımda, ilk tepe noktasını da aşan keskin bir yükseliş meydana gelir. Durumu kritik yapan olgu, akımın bu anda tepe değerinde olmasıdır. Sargıların anahtarlanması sonucunda, açık sargı uçlarındaki büyük değerdeki zıt emk motoru ve elektronik aksamı olumsuz etkiler. Bu etkileri kompanze etmek için çeşitli metotlar kullanılır. Bu metotlardan biri, kullanılan yarı iletken elemanları çalışma değerlerinden büyük değerde belirlemektir. Bu durumda oluşabilecek yüksek gerilim değerlerinden dolayı oluşacak arıza önlenir. Ancak bu önlemede maliyet de artar. Diğer bir metot, hall sensörleriyle komütasyon gecikmesi uygulamaktır. Bu metoda göre akım değerinin düşük olduğu anda komütasyon gerçekleştirilir.

Momentin en yüksek değeri saykılın ilk aşamasında üretilir. Ancak komütasyon saykılının sonuna doğru, zıt kutupların birbirine yönelmesi sırasında gerçekleştiğinden beklenenden daha az moment üretilir. Sargıdan akan akım sınır değeri aşmaya başladığında, aşırı akım verimliliği artırmak için kontrol altında tutulmalıdır. Fırçasız DA motorların hız kontrolü PWM (Darbe Genilik Modülasyonu) ile gerçekleştirilir ki; bu yöntem, sargılardaki enerjiyi değiştirerek, tepe akımını kontrol eder.

Bu devre PWM devresi, hız düzenlemesi için bir kontrolörle birleştirilir. Komütasyon saykılı sonunda sargılarda akan akımı kontrol etmek için kullanılır. Sargılara uygulanacak hat gerilimini kontrol etmek, motor hızında ayarlama yapabilmek ve sargılardan geçecek akımı sınırlandırmak için PWM kontrol uygulanır. PWM kontrol, anahtarlama elemanlarından her ikisine ya da sadece alt kenardaki anahtarlara uygulanabilir. Sadece alt kenardaki anahtarlara uygulandığında (Q_2 , Q_4 , Q_6), kısa devre akım yolu PWM kesim süresi boyunca üstteki anahtarın serbest geçiş diyodu üzerinden belirlenir. Örneğin, komütasyon için Q_1 ve Q_4 anahtarları iletimdeyken, akım Şekil

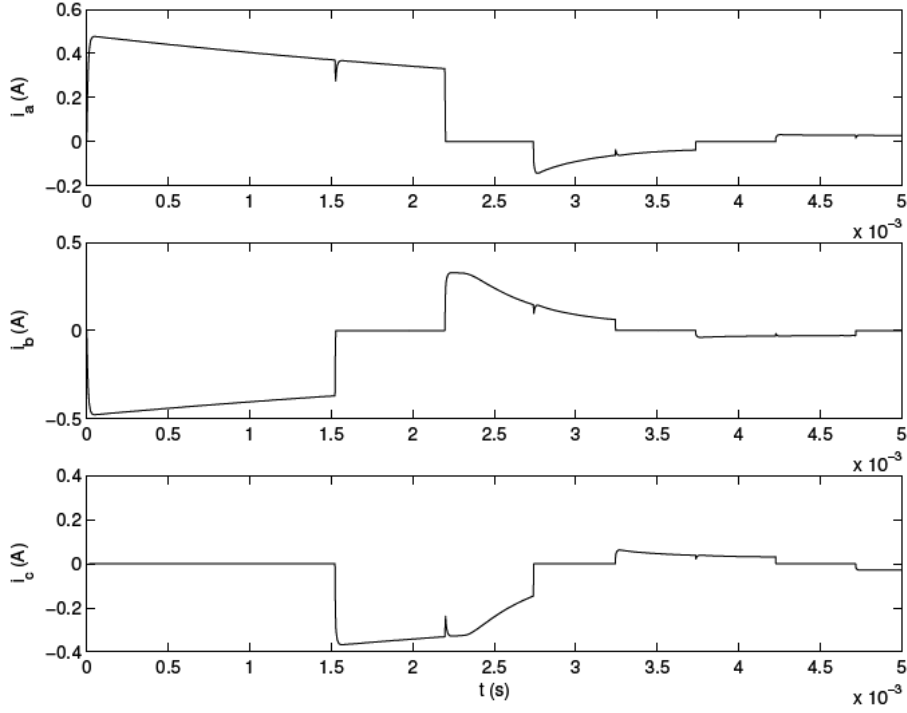
43’de okla gösterilen, A ve B sargısı üzerinden akar. Q_4 PWM yaptığından (Q_4 kesimde olduğundan) akım yolu Q_1 , A sargısı, C sargısı, D_3 yolu üzerinden belirlenir.

Bu andaki ideal akım dalga formu Şekil 45(a)’da yer almaktadır. 4 Çeyrek (Quadrant) PWM’deki akım dalga formu ise Şekil 45(b)’de gösterilmiştir.



Şekil 45. İdeal Akım Dalga Formları

Altı adımlı sürücü, hızlı moment değişimlerinde akım kontrolü sağlayamaz. Sadece moment ve hızın yönü her zaman aynı olduğunda, 1 Çeyrek (Quadrant) ve 2 Çeyrek (Quadrant) kontrolde kullanılır. PWM, hem üst hem alt anahtarlara uygulandığında, PWM kesim esnasındaki akım bozulmaları hızlıdır. Q_1 ve Q_4 anahtarları PWM yaptığından akım yolu; D_2 , A sargısı, C sargısı, D_3 üzerinden gerçekleşir. Bu durum, sargılara uygulanan ters bara gerilimine benzer ve akım bozulmaları hızlanır. 4 Çeyrek (Quadrant) çalışma bu konfigürasyonda mümkündür. Bu durumda, moment ve hızın yönü isteğe bağlıdır. Bu konfigürasyon, servo uygulamalardaki gibi çabuk hız terslemesi gerektiğinde tercih edilir. 4 Çeyrek (Quadrant) anahtarlama uygulamada, ilave PWM anahtarlama kayıpları meydana getirir. Bu durumda, hızlı bozulan akım bara kapasitansı üzerinden akmalıdır. Şekil 46’da Ayarlı DA-Hat Gerilim Hız Kontrolünde Yüksüz Durumda Faz Akımları grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 46. Ayarlı DA-Hat Gerilim Hız Kontrolünde Yüksüz Durumda Faz Akımları
($\alpha_\omega = 0.01\alpha_e$)

Kapasitör, yüksek kapasitans ve yüksek salınım akımı oranı ile seçilmelidir. Hızlı moment tersleme şartları, anahtarlama geçiş sürecinde üst ve alt anahtarların aynı anda iletimde olduğu kısa devre şartı oluşabilir. Bu yüzden, güvenli çalışma için iletim zamanından sonra birkaç “ μ_s ” ölü zaman uygulanır. 2 Çeyrek (Quadrant) anahtarlama ölü zaman uygulanmasına normalde gerek yoktur.

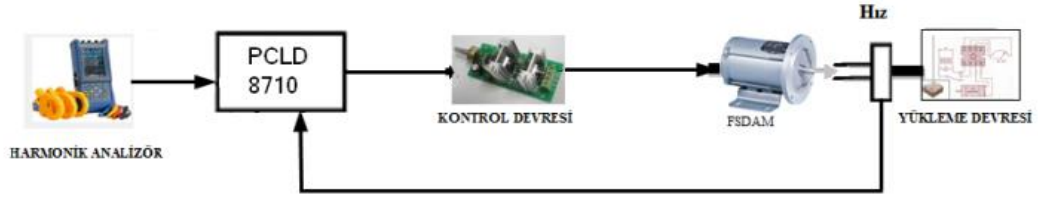
Altı adımlı sürücü, özellikle komütasyon geçişleri esnasında yüksek moment titreşimleri üretir. Bu da toplam sistem verimini düşürür. Ek olarak, yüksek güç motorları için mekanik gürültüye sebep olur. Fakat yüksek dinamik performans ve mutlak hız düzenlemesi gerekmeyen, küçük boyut uygulamaları için oldukça kullanışlıdır.

Klasik denetleyicilerin kullanım alanları, FSDAM’lardan hız ve konum denetimlerindeki yapıları basit olduğu ve birçok endüstri uygulamasında yüksek verimi alındığı için oldukça fazladır. Bu denetleyiciler ucuz maliyetli olduğu için de yaygın şekilde kullanılmaktadır. Klasik bir denetleyici tipi olan oransal-integral (PI) denetleyicide, oransal ve integral katsayılarını ayarlayarak istenen performans sağlanabilir. PI ve oransal türev (PD) denetleyiciler, yapılarının basit olması ve düşük

2.3. FIRÇASIZ DA MOTORUN HIZ VE KONUM DENETİMİ

Karşılaştırıcının girişler referans ve gerçek konum değerleri şekil 47’de gösterilmiştir. İki büyüklük arasındaki farktan e_0 hata sinyali elde edilmiştir. Elde edilen konum hatası e_0 PD denetleyicinin girişine uygulanır. PD’nin çıkışı referans hız ω^* olarak belirlenir. Referans hız ω^* ve gerçek hız ω bir karşılaştırıcıdan geçirilerek e_ω hata sinyali elde edilir. Elde edilen hız hatası e_ω PI denetleyicinin girişine uygulanır. Denetleyici çıkışı bir integral denetleyiciden geçirilerek referans i_q^* akımı elde edilir. FSDAM’ın rotoru kalıcı mıknatıstan yapıldığı için akımın mıknatıslama bileşeni i_d^* sıfır olarak alınır. Gerçek motor akımlarına abc-dq dönüşümü uygulayarak q ve d akımları hesaplanır. Referans ve gerçek motor akımları bir karşılaştırıcıdan geçirilip, her iki büyüklük arasındaki farktan bir akım hata sinyali elde edilir. Bu sinyaller daha sonra bir akım denetleyiciye uygulanır. Akım denetiminde parametreleri kutup yok etme yöntemi

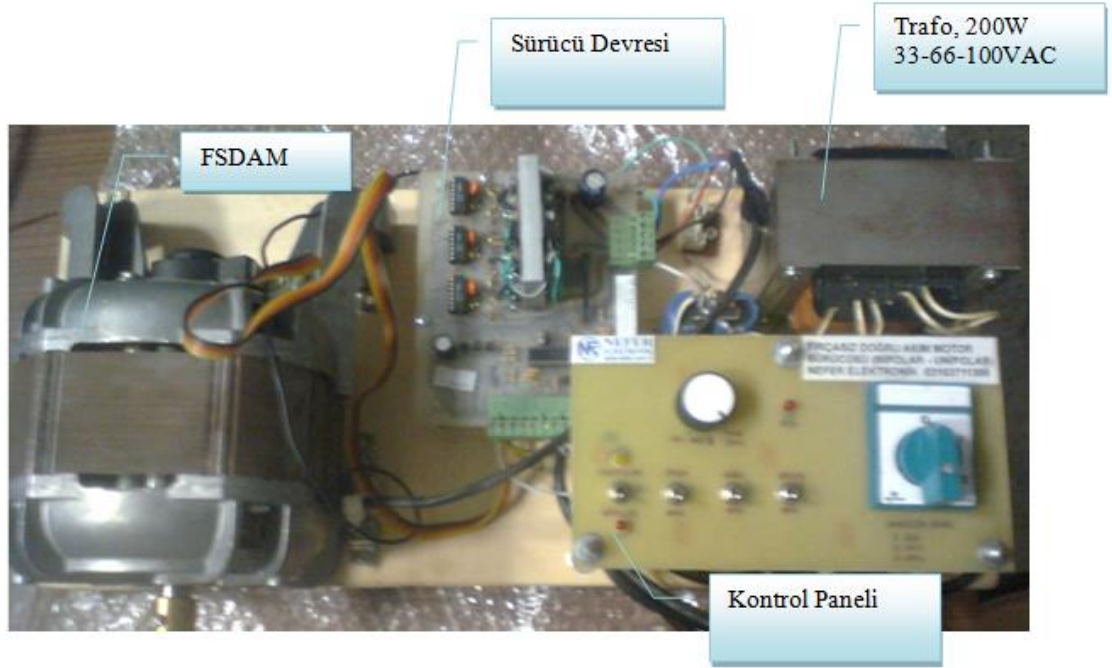
ile 500 rad/s'lik bant genişliğine göre tasarlanan PI akım denetleyicisi kullanılmıştır. PI akım denetleyiciler, referans akım ile gerçek akımın karşılaştırılması ile elde edilen akım hatalarını işleyerek referans q ve deksen gerilimlerini üretir[42]. Akım denetleyicinin çıkışındaki referans q ve d-eksen gerilimlerine dq-abc dönüşümü uygulanarak referans faz gerilimleri elde edilir. Elde edilen faz gerilimleri eviricinin sürülmesinde kullanılır. Evirici çıkışları, FSDAM'ın stator faz sargılarını kontrollü bir şekilde besleyerek, hız ve konum denetiminin gerçekleştirilmesini sağlar[26].



Şekil 48. Ölçü ve yükleme devresi ile birlikte deneyin elektriksel ve mekanik bağlantı şeması

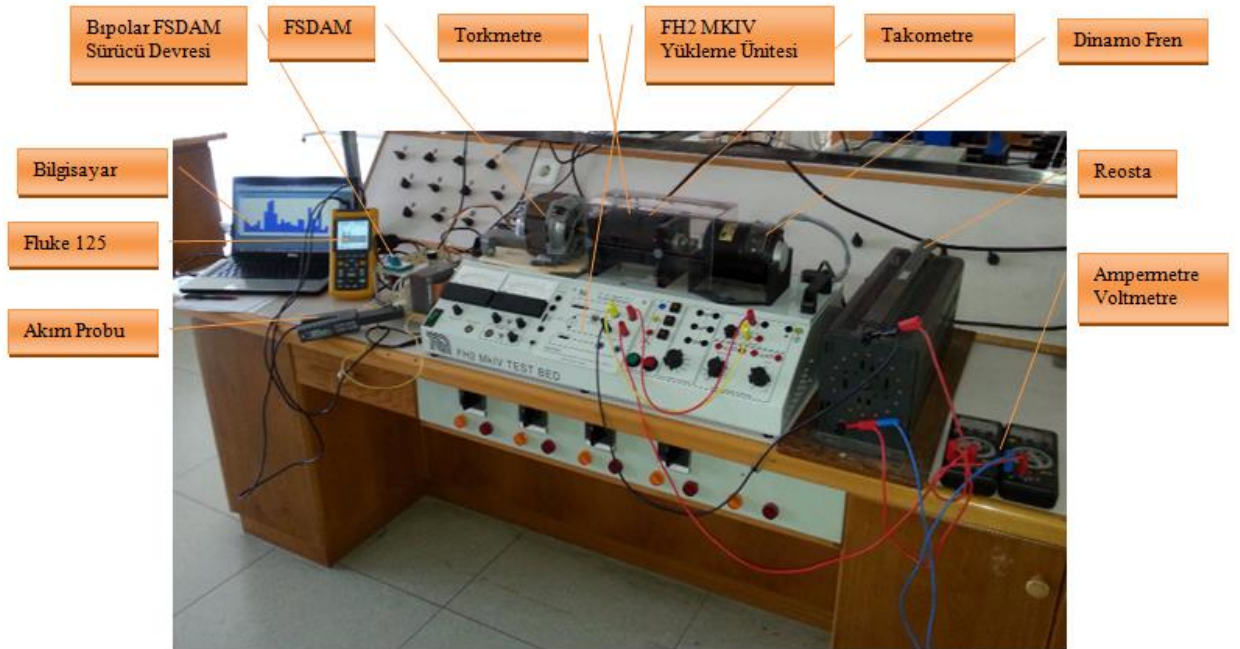
Şekil 48 de deneyin elektriksel ve mekanik bağlantı şeması gösterilmiştir. Bu çalışmada FSDAM kontrol devresi bipolar olarak çalıştırılmış ve deneyler bu sürücü devresinin sonuçlarına göre elde edilmiştir. FSDAM'ları bipolar veya unipolar çalıştırmak mümkündür. Bu sürücü devrelerinin dışında geleneksel olarak da başarıyla çalıştırılabilmektedirler. Ancak bu çalışmada bipolar çalıştırılmasının sebebi daha önce yapılan ünipolar çalışmalara göre bipolar sürücülü FSDAM'ın yüklü kalkış ve çalışma sonuçlarının unipolar sürücü devresine sahip FSDAM'larından daha verimli olmasıdır[30].

Şekil.49'da deneyler sırasında bipolar olarak çalıştırılan FSDAM Bipolar-Unipolar sürücü devresi ve kontrol ünitesi gösterilmiştir.



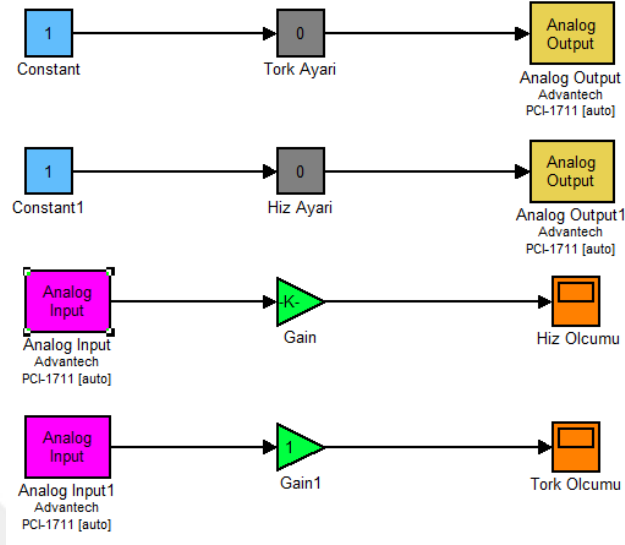
Şekil 49. FSDAM sürücü devresi ve kontrol ünitesi

Şekil 50’de FSDAM’ın gerçek zamanlı hız ve konum denetimi için oluşturulmuş deney düzeneği gösterilmiştir. Şekilde görüleceği gibi FSDAM sürücü sistemi, güç devresi, denetleyici kart, motor ve bilgisayardan oluşmaktadır.



Şekil 50. FSDAM Test Düzeneği

Şekil 51’de FSDAM sürme devresi ve denetim yapısını blok şeması gösterilmiştir.



Şekil 51. FSDAM’ın Sürücü Devresi ve Denetim Yapıları Blok Şeması[26]

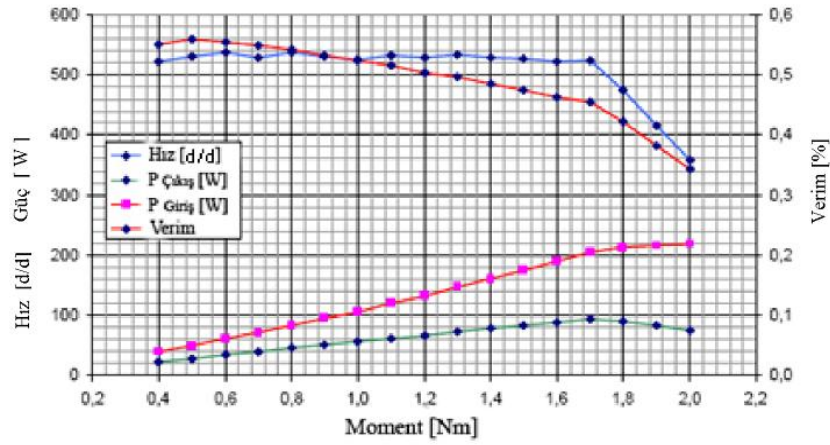
Çalışmada kullanılan FSDAM’ın etiket değerleri aşağıdaki gibidir.

Tablo 4 Motor Karekteristikleri

Çalışma Gerilimi	220	VDA
Güç	550	W
Çalışma Akımı	2	A
Faz Sayısı	3	-
İzalasyon Sınıfı	F	-
Dönüş Yönü	Saat yönü/Saat yönü tersi	-
Stator	3 Fazlı Yıldız bağlı 4 kutup sargılı	-
Rotor	4 Parçalı 4 Kutuplu Ferit mıknatıs	-
Ağırlık	6.5	Kg



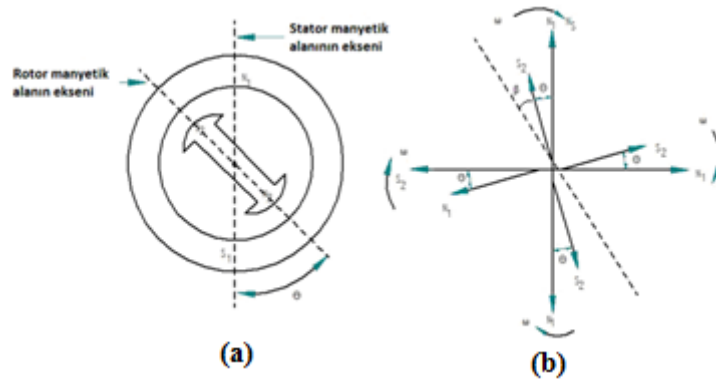
(a)



(b)

Şekil 52. Deneylerde kullanılan FSDAM(a), FSDAM'ın Fabrikada Elde Edilen Hız, Verim, Moment ve Güç Eğrileri(b)

Fırçasız Doğru Akım Motoruna ait karakteristik eğrileri Şekil 52'de yer alan grafikte gösterilmiştir. Grafik momentindeki artışa karşı motor hızı, motor giriş/çıkış gücü ve motor verimini göstermektedir.



Şekil 53. (a)FSDAM hall sensörlerinin vektörleri

(b) Rotor ile stator magnetik eksen vektörleri

Şekil 53’de hall sensörlerin, rotor ve stator magnetik eksenlerinin etkileşiminin rotor pozisyonuna bağlı etkisi (θ açısına) verilmiştir. Rotor manyetik alanının değişimiyle oluşan vektör diyagramı da gösterilmiştir. Ek1’de özellikleri verilen FSDAM matematiksel ifadeleri klasik doğru akım motorunun matematiksel ifadeleri ile benzerdir. Bu motorlar sürücü devreleri (kontrol devresi) ile çalıştığından harmonik momentler ve harmonik değerler de işlemlere dahil edilmelidir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1.FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNUN BİPOLAR VE UNİPOLAR ÇALIŞTIRILMASI

FSDAM’lar, yüksek verimli ve geniş hız aralıklarını kontrol edilebildikleri için birçok uygulamalarda tercih edilmektedirler. Hızı, uygulanan gerilim ile doğrusal orantılı olarak değişmektedir. Bu motorların mevcut gerilim kademelerinde yüksek hızlarda çalışabilmeleri için, zıt emk sebebiyle oluşan gerilim düşümünün azaltılması gerekir. Zıt emkdan dolayı oluşan gerilim düşümünü azaltmak için ise, zıt emk sabitinin küçük değerlerde tasarlanmış olması gerekir. Zıt emk sabitinin azalması, kalkış momentinde de azalmasına sebep olur.

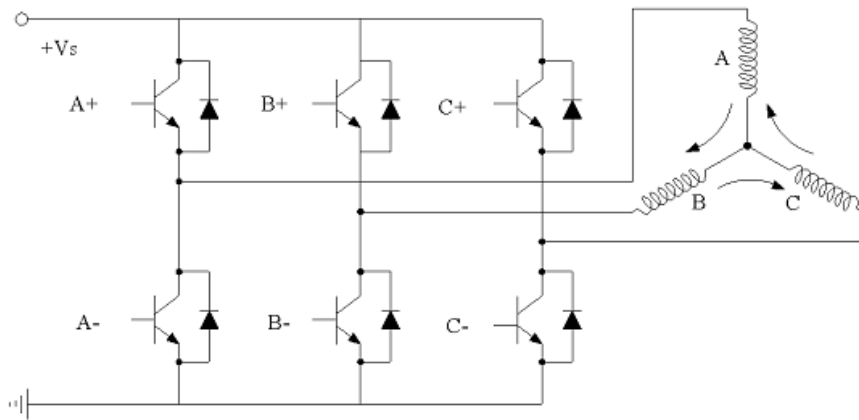
Momentteki bu azalmayı engellemek için ve yüksek hızlarda çalışma sağlamak için bazı yöntemler denenmiştir. Bu yöntemler; sürücü devresini düzenlemek ve sargı yapısını değiştirmek şeklinde genellenebilir. Kalkış momentini artırmak için değişik sarım şekilleri düşünülmüştür. Bunlardan biri kalkış anında seri sargı, normal çalışma esnasında paralel sargı kullanılmasıdır. Ancak, bu düzenleme ilave anahtarlama elemanları ve karmaşık kontrol birimleri gerektirir. Yüksek kalkış momenti ile yüksek hızlara ulaşmak için, aynı motor yapısı içinde seri ve paralel sargılar birlikte yerleştirilmiştir. Kalkış anında seri sargı kullanılıp, yüksek moment ile çalışmaya başlanır. Çalışma esnasında paralel sargı ile yüksek hızlara ulaşılır. Bu düzenleme düzgünce bir hızlanma sağlar. Ancak bu düzenleme motor içine iki farklı sargı yerleştirilmesi sebebiyle maliyeti artırır. Sargı yapısı üzerinde yapılan bu çalışmaların yanı sıra, sürücü devreleri üzerinde de çalışmalar yapılmış ve motor bipolar olarak çalışmaya başlatılıp, unipolar olarak devam ettirilmiştir[26].

Fırçasız DA motorlarında en yaygın kullanılan 3 fazlı, yıldız bağlı, tek sargılı yapıdır. Bu yapıya sahip motorlar, bipolar ya da unipolar olarak değişik metodlarda

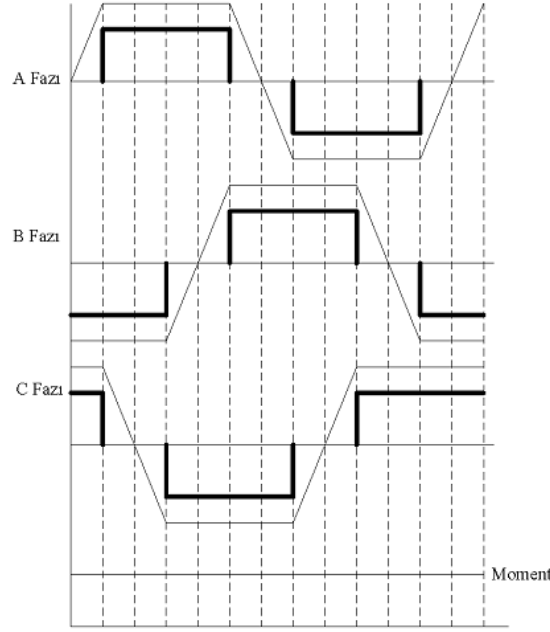
çalıştırılabilir. Bipolar çalıştırılmalarında, bir peryot boyunca her bir sargı üzerinden iki yönde akım akışı olur ve bipolar uyartım daha doğrusal bir çalışma sergiler. Unipolar uyartımda her bir faz sargısı, kendisine seri bağlı anahtarlama elemanları ve motor yıldız noktası üzerinden enerjilendirilir. Unipolar çalışmada, her bir motor faz sargısından tek yönde akım akmaktadır. Her sargı üzerinde tek kutup oluşur. Faz sargıları, kendilerine seri bağlı anahtarlama elemanları üzerinden enerjilendirilir. Unipolar çalışmada, bir faz sargısı bir anahtarlama elemanı ile kontrol edilir. Daha az elektronik parça gerektirir. Yapısı bipolar sürücüye göre daha basittir. Motor yıldız noktası kullanılarak, kaynak gerilimi her bir motor sargısı üzerine uygulanır. Motorun her bir faz sargısı üzerindeki gerilim değeri, bipolar çalışma moduna göre daha yüksektir. Bu da motor hızının gerilimle orantılı olduğu FSDAM'ların daha yüksek hızlara ulaşılmasını sağlar. Kalkış anında, motorun çekeceği akımın yüksek olması sebebiyle devre bileşenlerinde ısı artışı görülür. Bu ısı, gerekli düzenleme ile kontrol altında tutulmalıdır. Akımın tek yönde akması, yüksek güç ve yüksek hız uygulamalarında momentte salınımlara sebep olabilir. Maksimum moment üretimi için, bipolar ve unipolar sürücüde komütasyon peryotları 60° 'dir[26].

3.1.1.Bipolar- Unipolar Sürücüde Bipolar Çalışma

Bipolar çalışma sırasında motorun faz sargılarından geçen akım belirli peryotlarla yön değiştirirerek, sargılar tarafından dönüşümlü olarak N - S kutupları oluşturulur. Bipolar çalışmada, rotor dönmesine bağlı şekilde değişen komütasyon anında, sargılardan geçmekte olan akım yön değiştirmektedir. Şekil 54'de gösterildiği gibi iki anahtarlama elemanı ile her bir faz sargısı kontrol edilmektedir.



Şekil 54. Bipolar Uyartımlı FSDAM



Şekil 55. Bipolar Uyartımlı FSDAM Dalga Formu

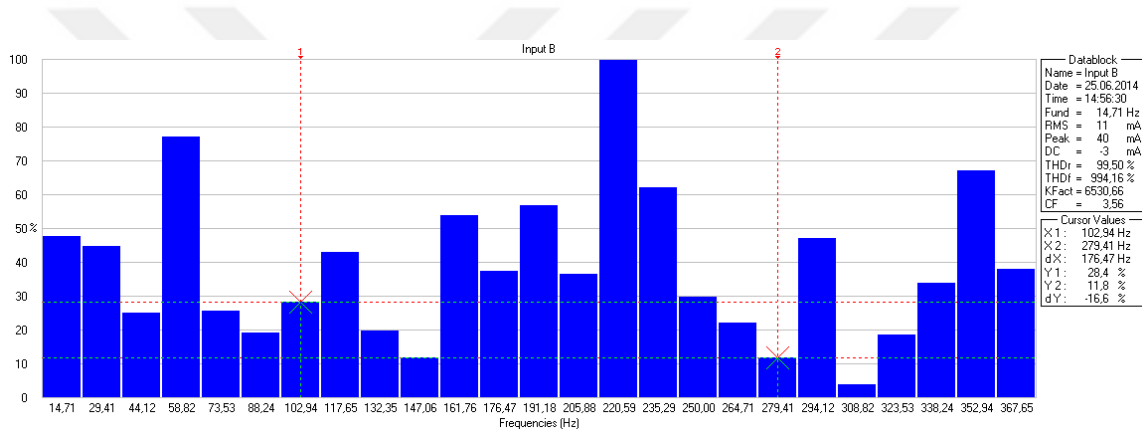
Şekil 54'de görüldüğü gibi A, B sargı ikilisinin enerjilendirildiği düşünülürse, A+ ve B- anahtarları iletimdedir. Rotor dönüş gerçekleştirdiğinde B, C sargılarını enerjilendirmek için B+ ve C- anahtarları iletime geçer. Bu durumda B sargısı üzerinden akmakta olan akım, Şekil 55'de olduğu gibi bir önceki anahtarlama konumuna göre yön değiştirir. Aynı şekilde C, A sargılarının enerjilendirilmesi, C+ ve A- anahtarlarının iletime alınmasıyla gerçekleşir. C sargısında akmakta olan akım yön değiştirir. Bipolar çalışma kalkış sırasında düşük akım çekilmesine neden olur.

Moment sabiti ve zıt emk sabitinin, unipolar duruma göre yüksek olması sebebiyle yüksek moment elde edilir. Şekil 56'da verilen Fırçasız Doğru Akım Motoru için bipolar sürücü devre şeması genel olarak üç bölümde incelenir. İlk bölümde, motorun çalışması için sensörlerden gelen konum bilgisini işleyen kontrolör (MC33035) yer alır. Kontrolörün işlediği konum bilgisi, ikinci bölüm olarak adlandırılabilen bipolar çalışma modu için altı anahtarlama elemanını (IRF740) tetiklemek için kullanılır. Devrede üçüncü bölüm, yüksek kaynak geriliminin bulunduğu, anahtarlama elemanlarına ait bölüm ile düşük gerilimin bulunduğu, kontrolöre ait bölüm arasında elektriksel izolasyon sağlamak için kullanılan MOSFET sürücü devre elemanlarından (IR2113) oluşur. Terminal gerilimi motora, kontrolörün rotor konumuna göre belirleyip tetiklediği anahtarlama elemanları üzerinden verilir[26].

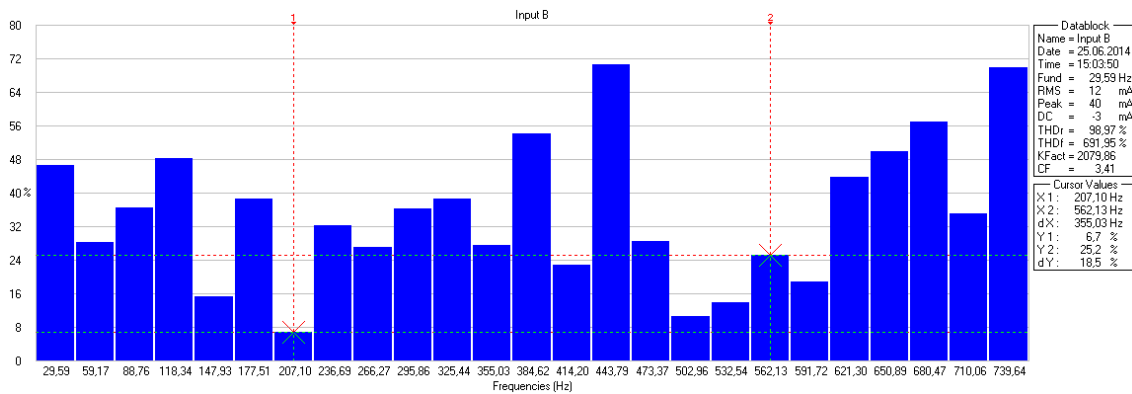
3.2.Bipolar Sürücüde Bipolar Çalışma Deneyi Test Verileri

Kademeli gerilim değerlerinden 33V, 66V, 100V kademelerinde gerçekleştirilen test sonuçlarında, aşağıdaki grafiklerde yer alan değerler elde edilmiştir. Bu değerlere göre motora uygulanan gerilimin arttığında devir sayısı, moment ve çektiği akım artış göstermiştir. Bipolar çalışma; doğrusal bir çalışma sergiler ve akım sınımları ile moment titreşimleri az olur.

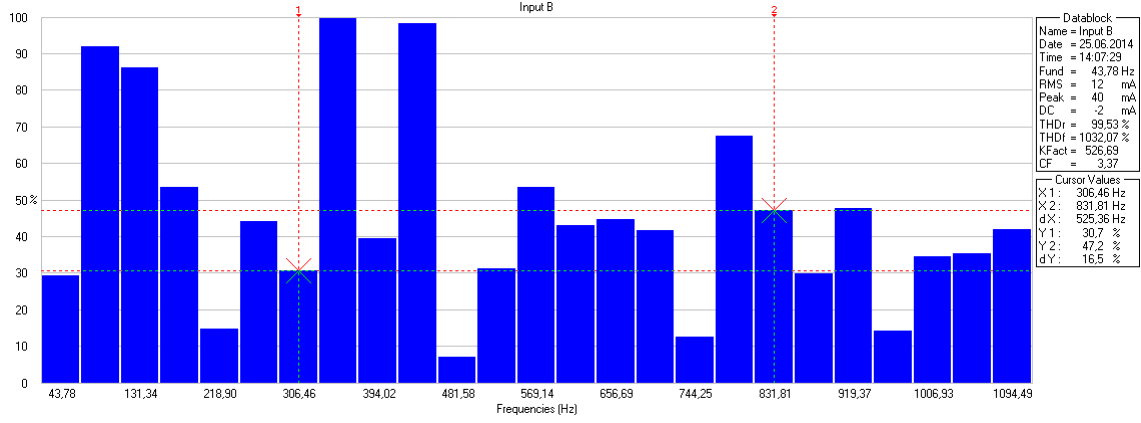
Deney sırasında kademe kademe gerilim değerleri artırılarak, her bir değerdeki devir sayısı, moment, akım, gerilim ve harmonik değerleri incelenmiş ve aşağıdaki veriler elde edilmiştir. Aynı sonuçlar komütasyon açısını 20° değiştirildiğinde de alınmıştır. Bu açı değeri FSDAM'dan düzgün değerler alabildiğimiz andaki açı değeridir.



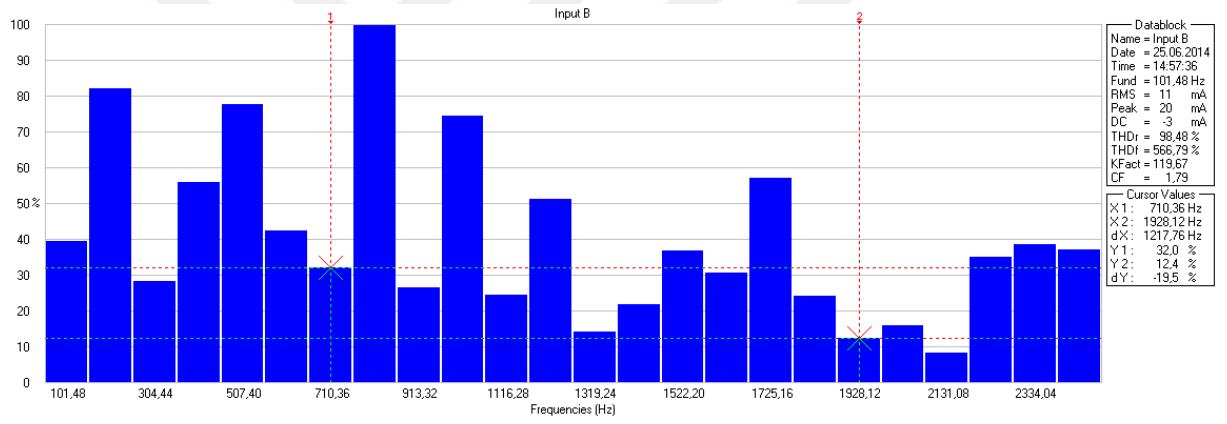
Şekil 57. Bipolar 33V Boşta Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği



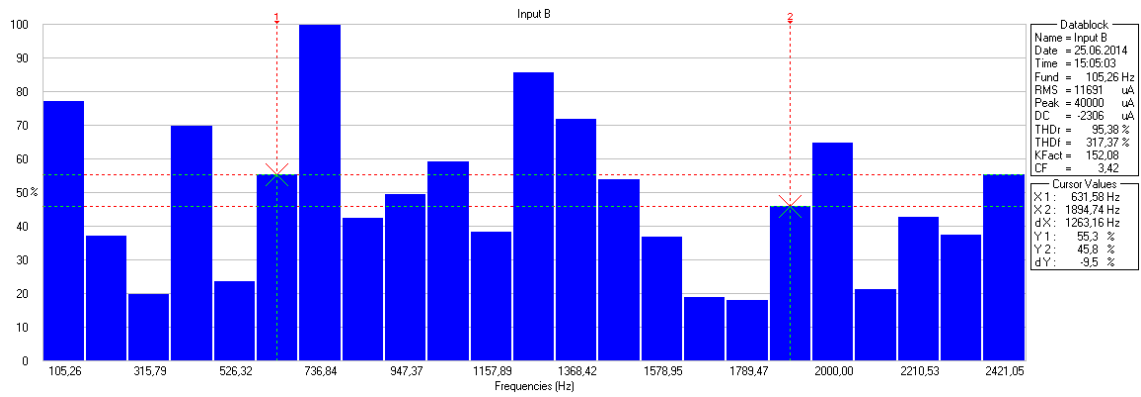
Şekil 58. Bipolar 33V Boşta Komütasyon Açısı 20° Değiştirilmiş Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği



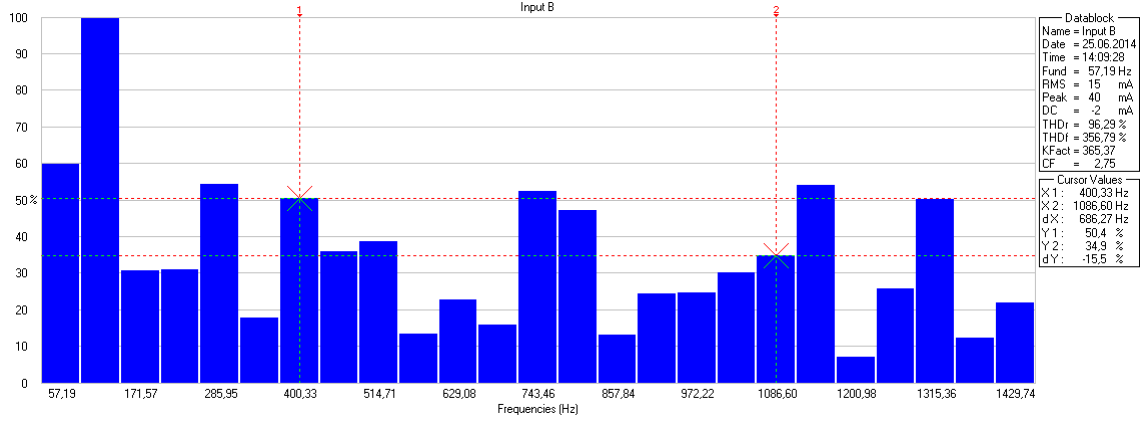
Şekil 59. Bipolar 33V Yükte Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği



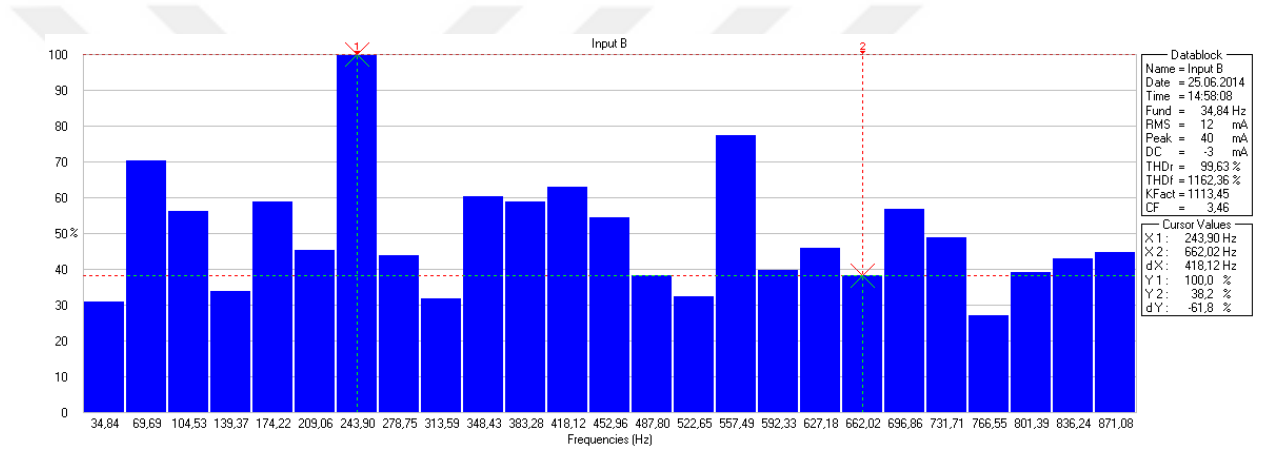
Şekil 60. Bipolar 66V Boşta Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği



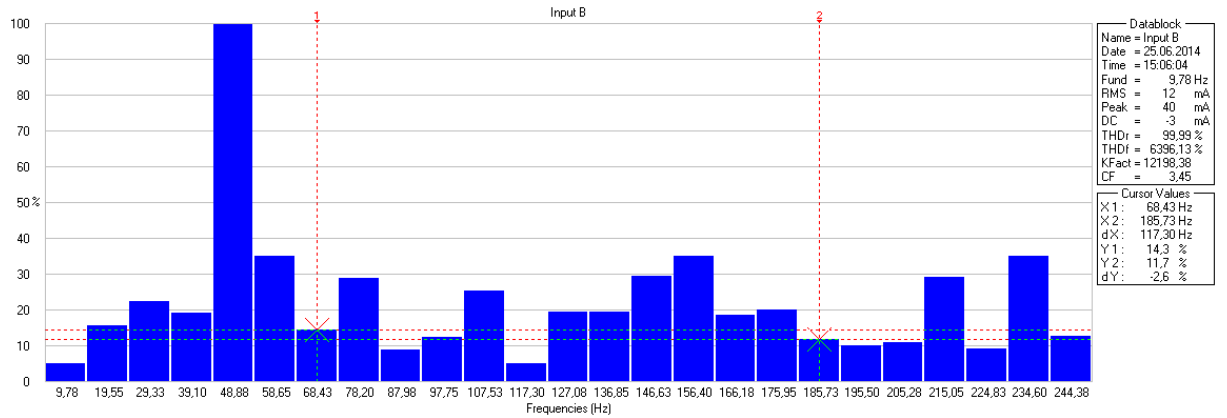
Şekil 61. Bipolar 66V Boşta Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği



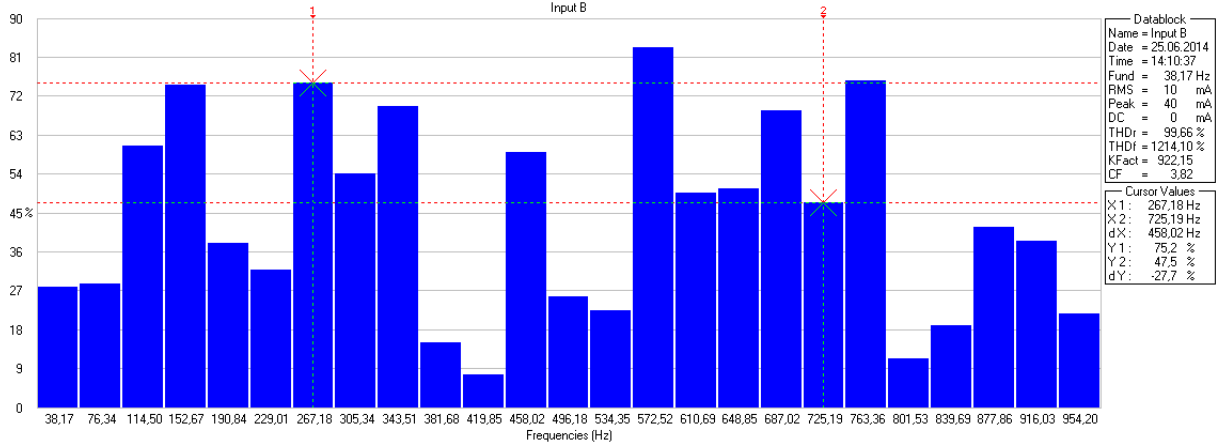
Şekil 62. Bipolar 66V Yükte Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği



Şekil 63. Bipolar 100V Boşta Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği

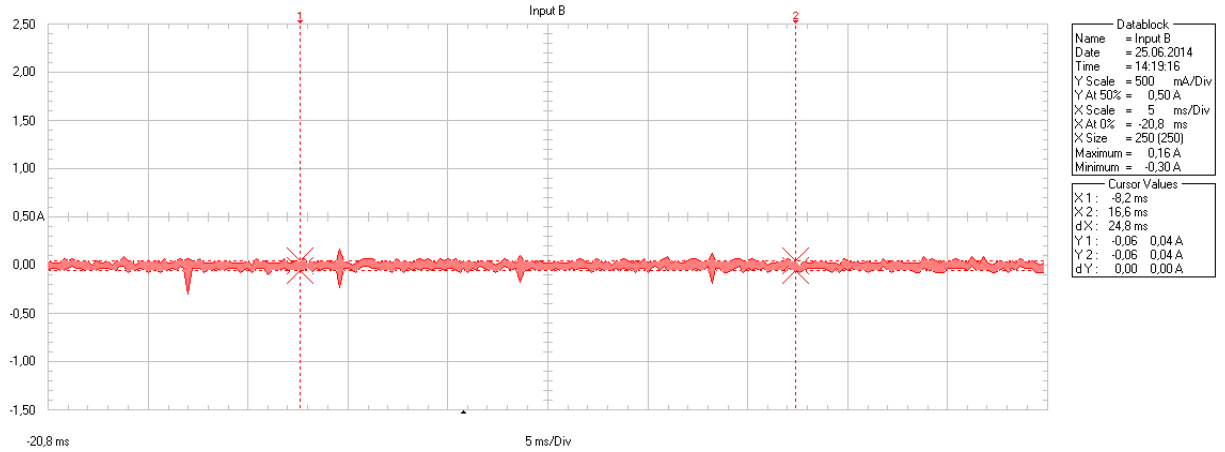


Şekil 64. Bipolar 100V Boşta Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği

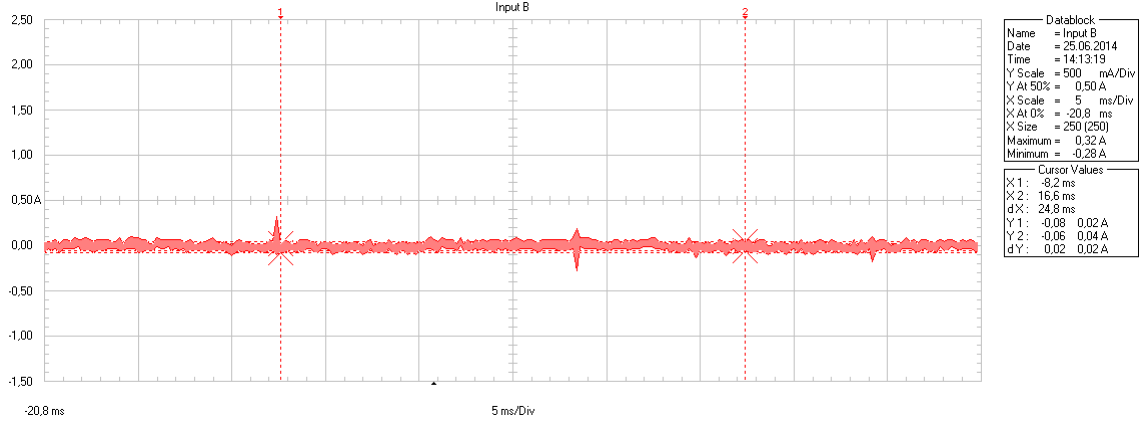


Şekil 65. Bipolar 100V Yükte Komütasyon Açısı 20° Değiştirilmiş Çalışma Frekansı Spektrum Grafiği

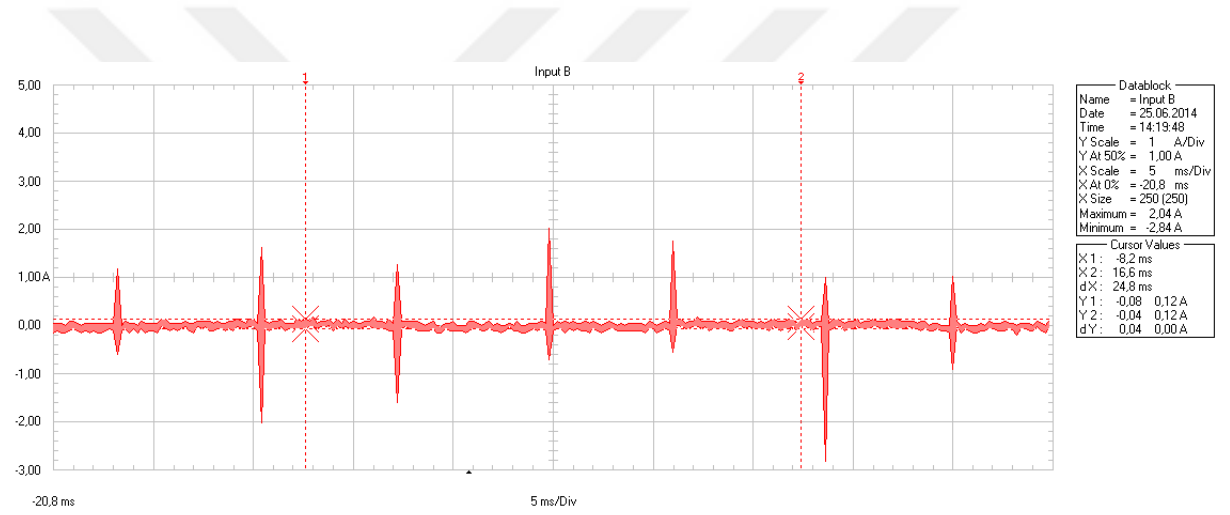
Şekil 57-65’de FSDAM bipolar konumda çalışırken 33V, 66V ve 100V kademelerinde komutasyon açısı 0° (referans) ve 20° komutasyon açısı değiştirildiğinde güç analizöründe elde ettiğimiz spektrum grafikleri gösterilmiştir. Ölçümler motorun hem boşta çalışmasında hem de yüklü çalışmasında yapılmıştır. 20° motordan düzgün değerler alabildiğimiz andaki açı değeridir.



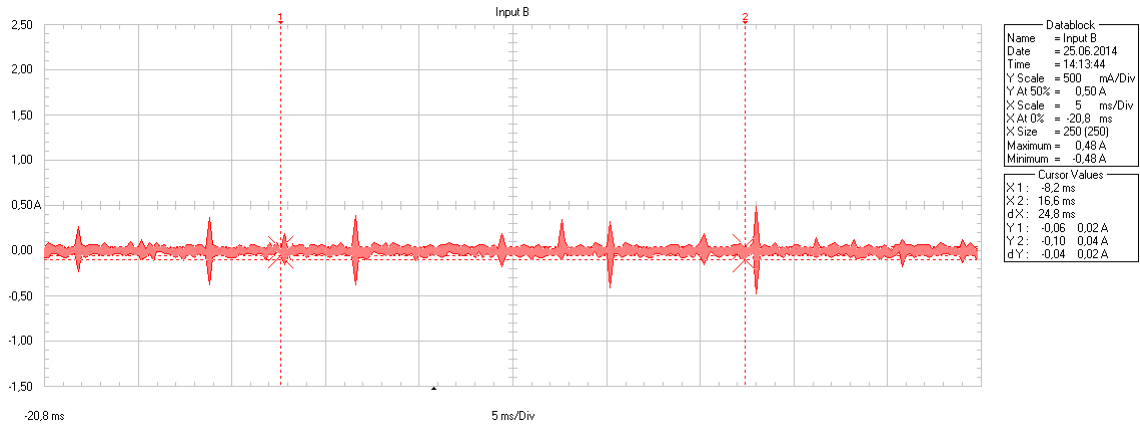
Şekil 66. Bipolar 33V Yükte Akım Grafiği



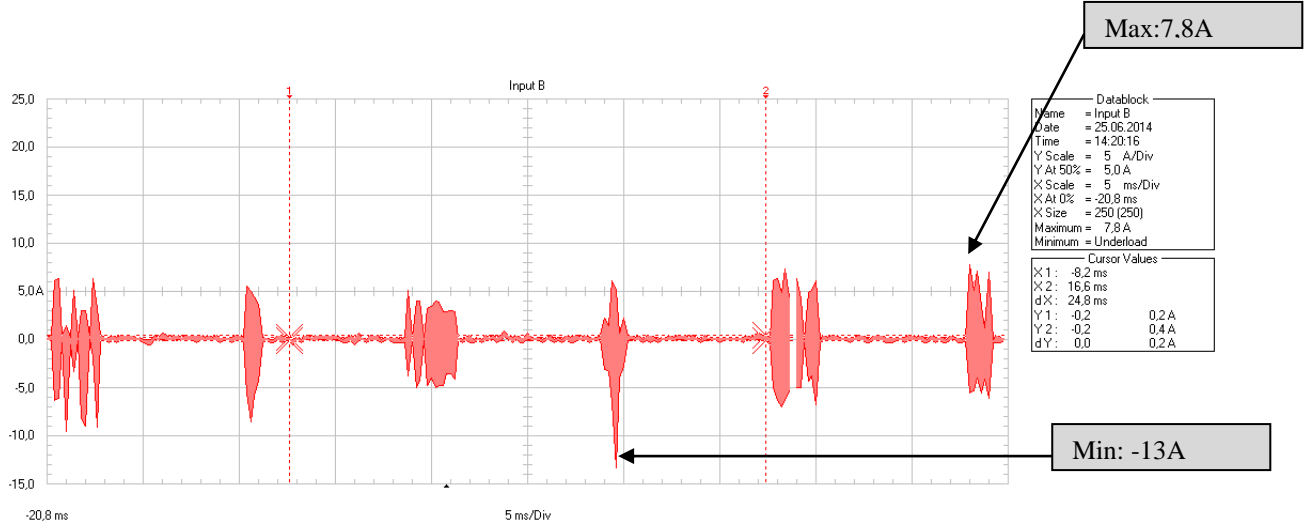
Şekil 67. Bipolar 33V Yükte Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Akım Grafiği



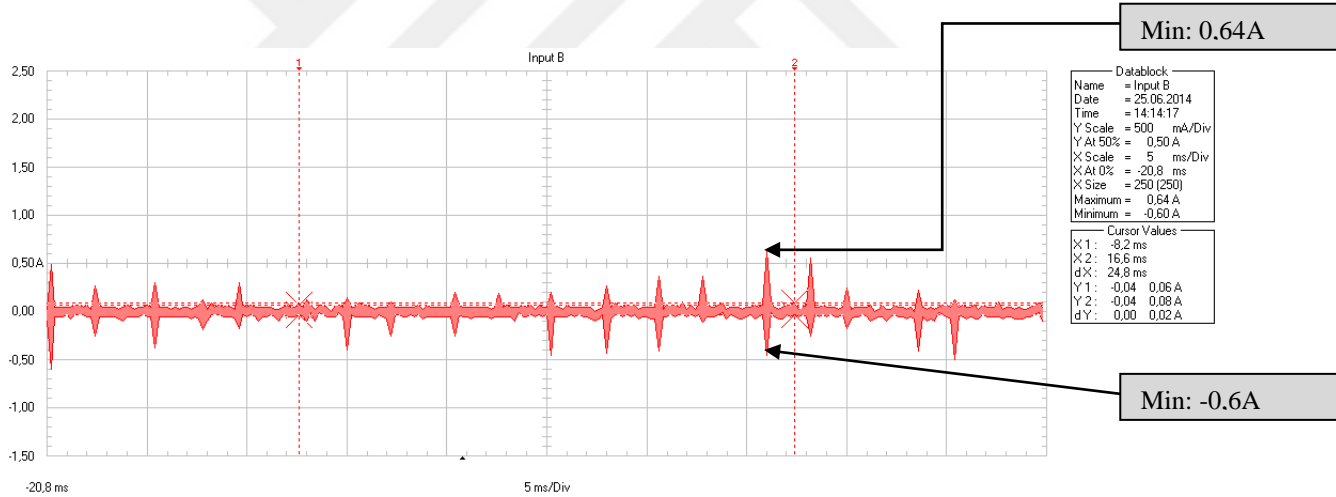
Şekil 68. Bipolar 66V Yükte Akım Grafiği



Şekil 69. Bipolar 66V Yükte Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Akım Grafiği

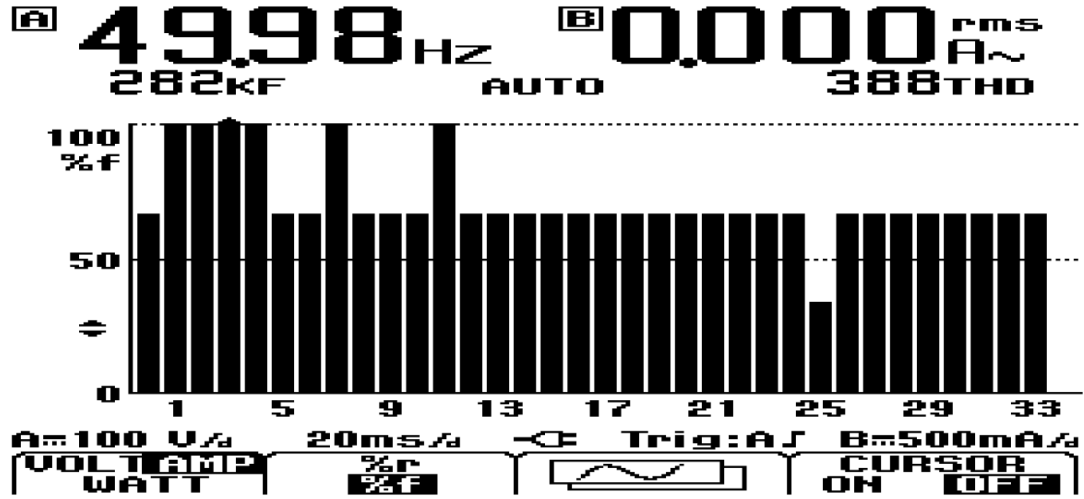


Şekil 70. Bipolar 100V Yükte Akım Grafiği

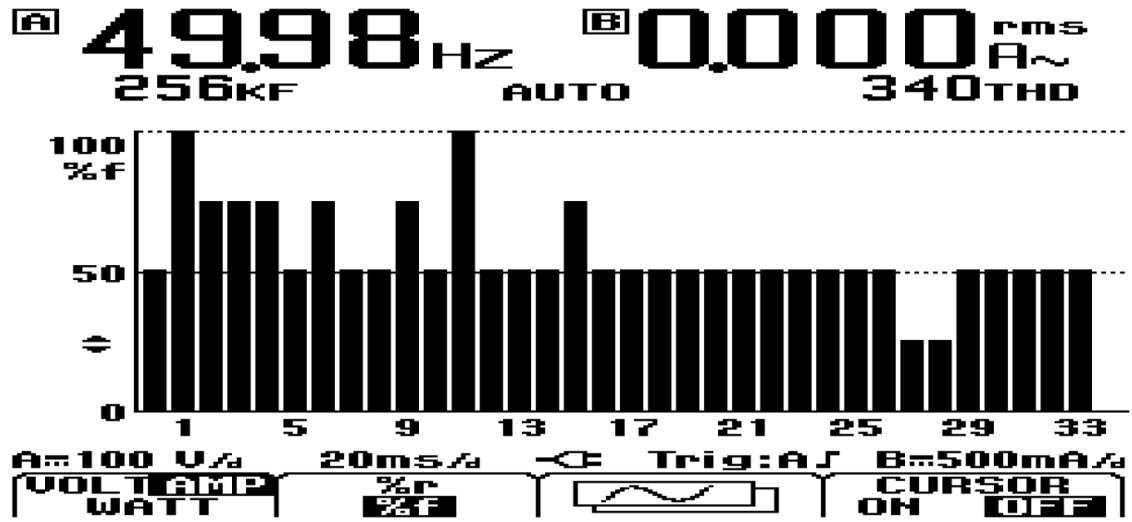


Şekil 71. Bipolar 100V Yükte Komütasyon Açısı 20° Değiştirilmiş Akım Grafiği

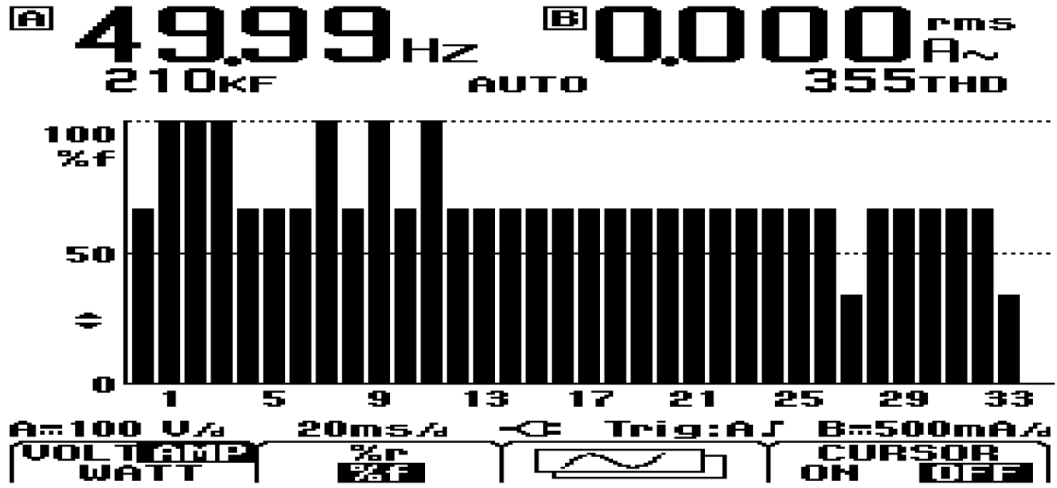
Şekil 66-71’de FSDAM bipolar konumda çalışırken 33V, 66V ve 100V kademelerinde komütasyon açısı 0° (referans) ve 20° komütasyon açısı değiştirildiğinde güç analizöründe elde ettiğimiz akım grafikleri gösterilmiştir. Ölçümler motorun hem boşta çalışmasında hem de yüklü çalışmasında yapılmıştır. Motorun en kararlı çalıştığı 100V yüklü çalışmada açı değişiminde akım değerinin her iki yönde de daha küçük değerde olduğu görülmektedir.



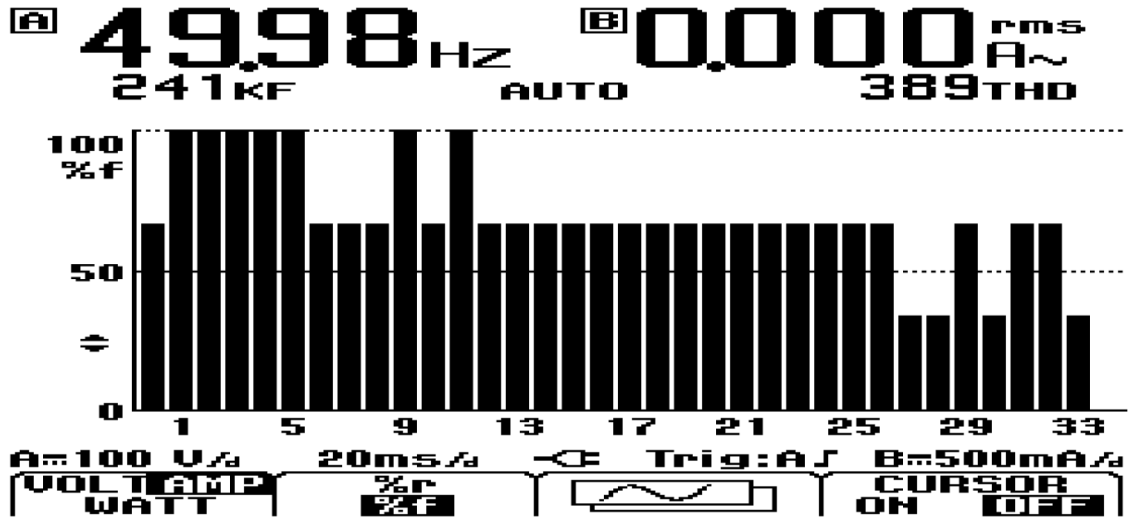
Şekil 72. Bipolar 33V Yükte Harmonik Değerleri



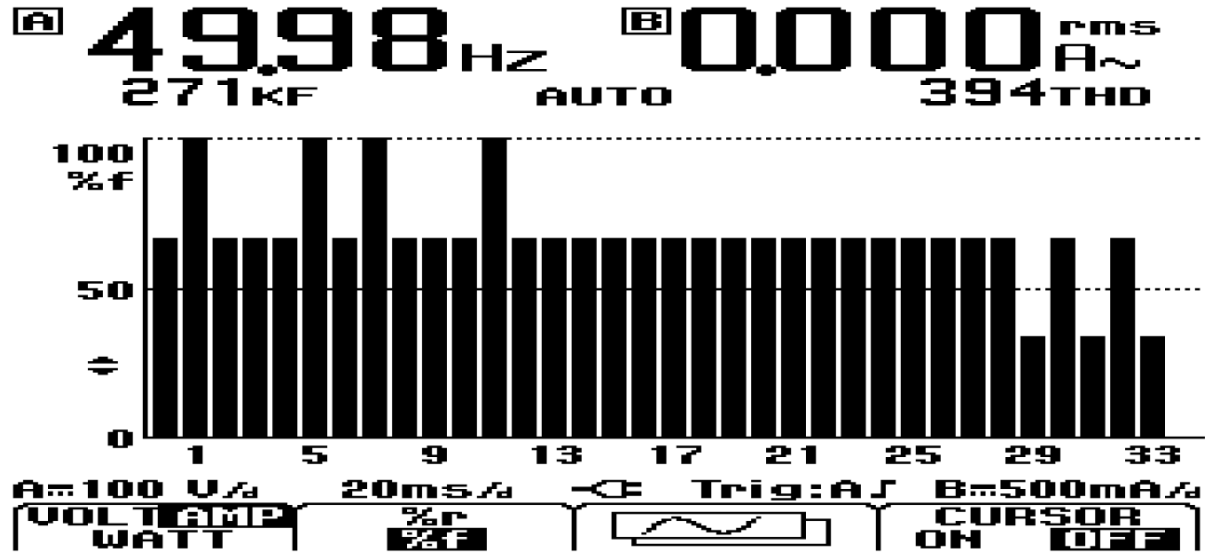
Şekil 73. Bipolar 33V Yükte Komütasyon Açısı 20⁰ Değiştirilmiş Harmonik Değerleri



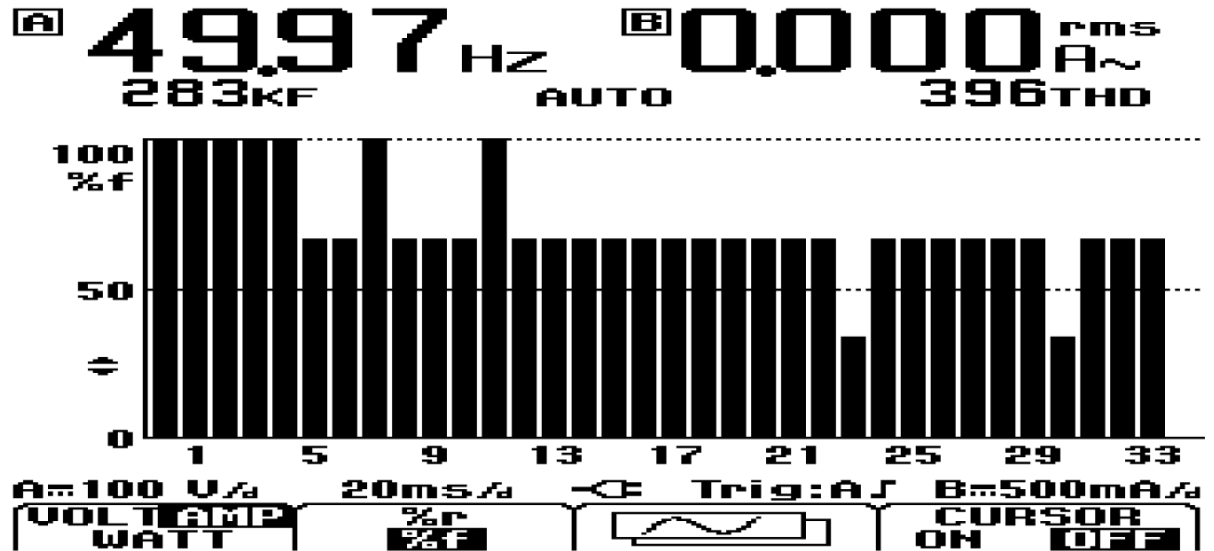
Şekil 74. Bipolar 66V Yükte Harmonik Değerleri



Şekil 75. Bipolar 66V Yükte Komütasyon Açısı 20° Değiştirilmiş Harmonik Değerleri

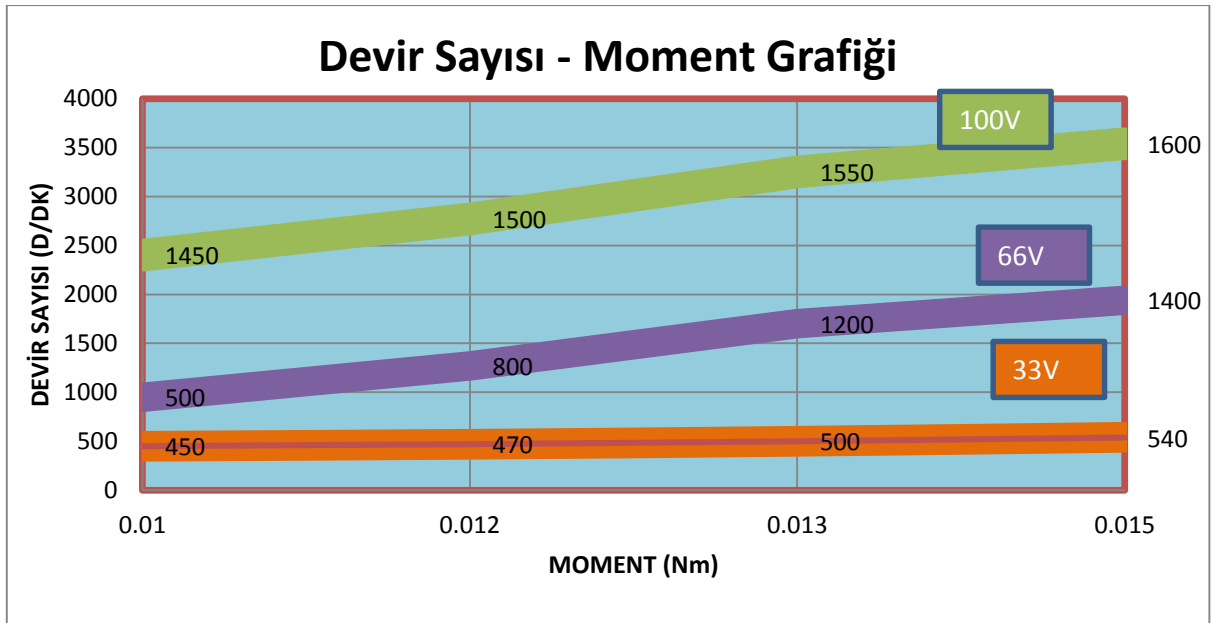


Şekil 76. Bipolar 100V Yükte Harmonik Değerleri

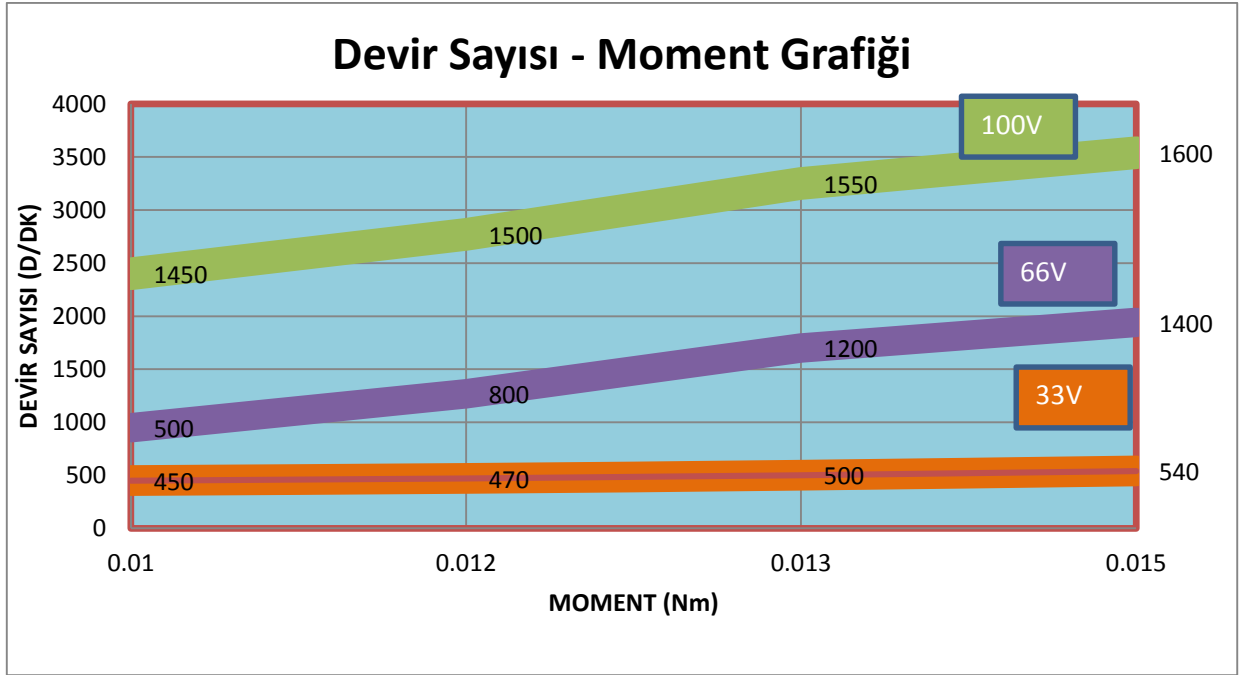


Şekil 77. Bipolar 100V Yükte Komütasyon Açısı 20° Değiştirilmiş Harmonik Değerleri

Şekil 72-77’de 33V, 66V ve 100V için yüklü çalışma durumunda faz kaydırılmış ve faz kaydırılmamış değerler için akım harmonik değerlerini (THD) göstermektedir. Bu gerilim değerlerinin dışında matematiğin yardımı ile yani regrasyon analizi ile THD değerlerini nasıl seyredeceği belirlenebilir[29]. 100V için bulunan değerler harmonikli değerler içinde en iyi değerdir. Şekil 72’de verilen değerlerde faz kaydırılmamış durumda harmonik değerler daha az çıkmıştır. Ancak bu çalışmada üç gerilim değeri için veri alınabildiğinden, daha fazla değerlerle ve daha farklı yüklerle yapılan çalışmalar daha detaylı ilgilere ışık tutacaktır. Daha verimli motor parametreleri çalışmasının ipuçları verilerek ileri çalışmalar başka araştırmalar için bırakılmıştır. Faz kaydırılmış (hall sensör kaydırılmış) 66V için harmonik değerler artmıştır. Bu durum sürücü devresinde bulunan elektronik elemanlardan (yarı iletkenler) kaynaklanmaktadır[19]. Ancak yine gerilim değeri yükseldikçe hem devir hızı artmakta hem de harmonik değerlerin yüzdesi azalmaktadır. Bu değerde devir hızı %1,5 artarken harmonik yüzde değeri %1,005 artmış durumdaki değerleri için devir hızının arttığı görülmektedir. Bu sonuç FSDAM için daha verimli motor dizaynının hall sensörlerin yerlerinin optimal çalışmasının gerekliliğini göstermektedir[30].

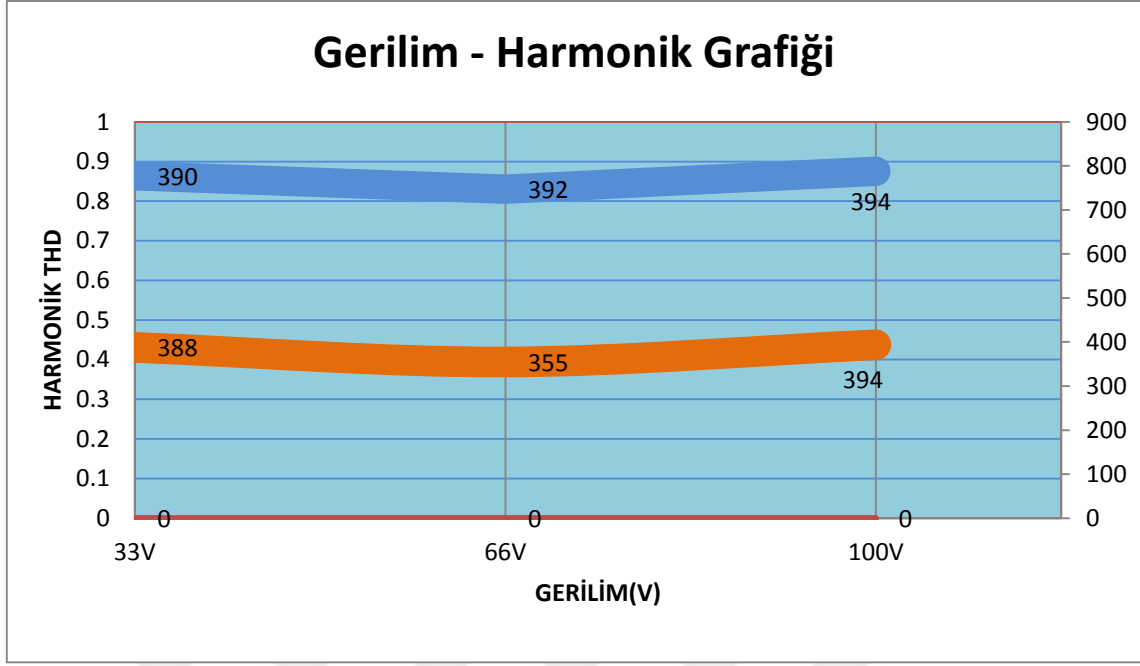


Şekil 78. Bipolar yüklü çalışma devir – moment grafiği

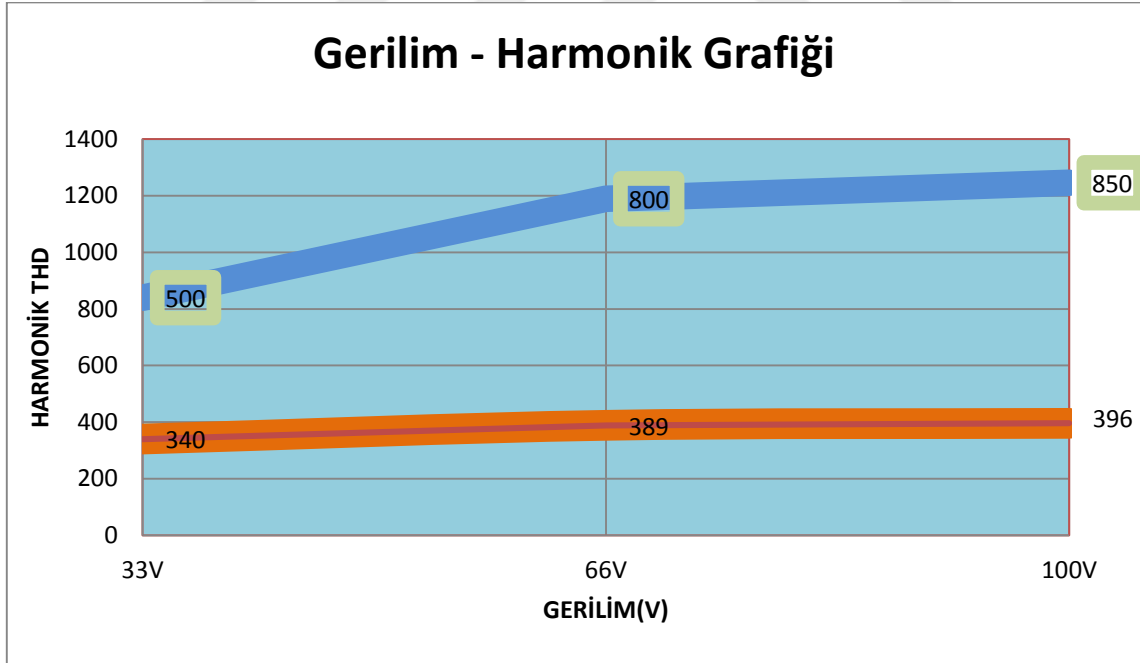


Şekil 79. Bipolar yüklü çalışma Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş devir – moment grafiği

Şekil 78-79’da gösterilen devir-moment grafiklerinde 100V kademesinde ve komütasyon açısı değiştirilmiş durumda motorun kararlı çalışma durumuna geldiği görülmektedir.

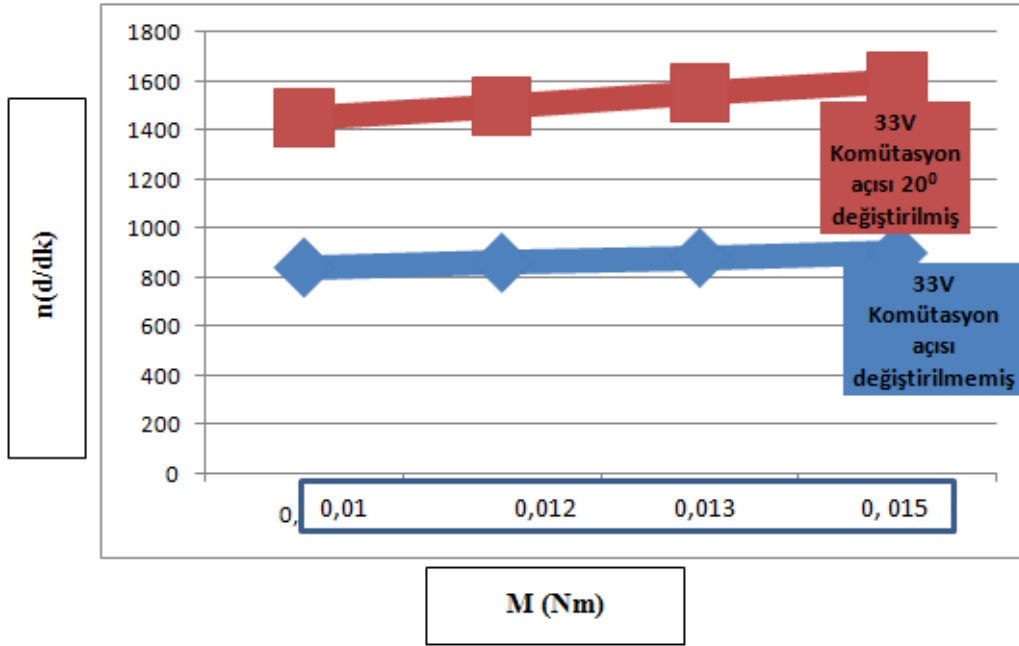


Şekil 80. Bipolar yüklü çalışma gerilim-harmonik grafiği

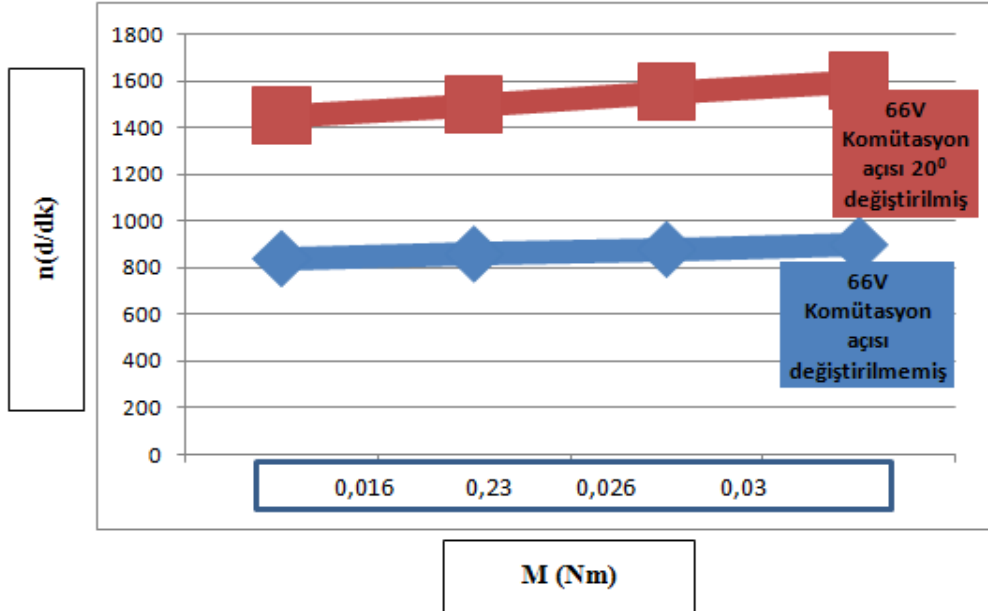


Şekil 81. Bipolar yüklü çalışma Komütasyon açısı değiştirilmiş gerilim-harmonik grafiği

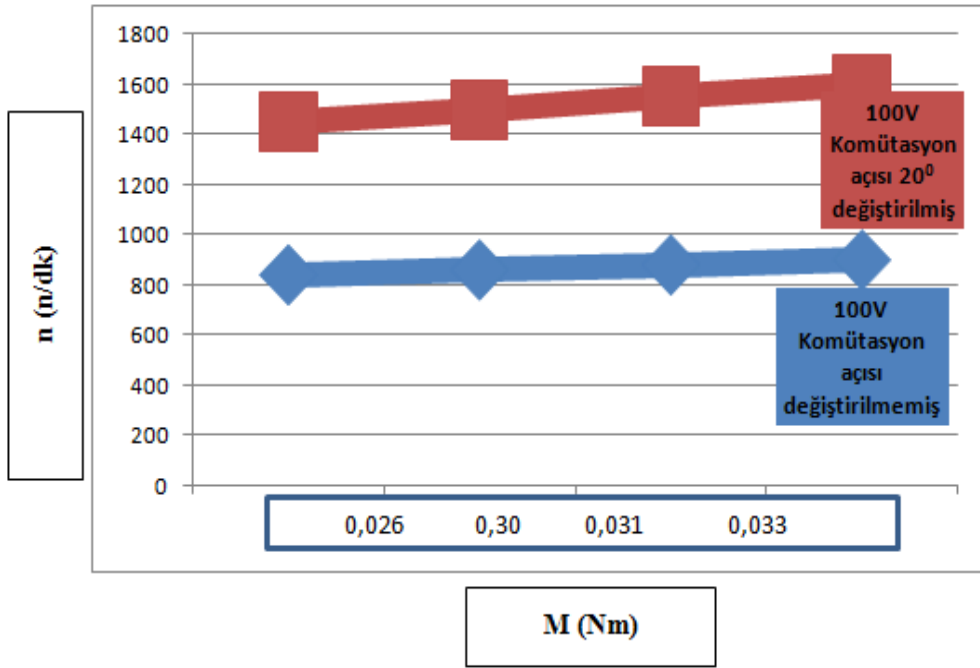
Şekil 80-81'de gösterilen gerilim-harmonik grafiklerinde görüldüğü gibi komütasyon açısı değiştirilmiş ve yüklü çalışmada motor daha kararlı çalışmaktadır.



Şekil 82. 33V Bipolar Çalışma Komütasyon Açısı 20° Değişime Göre Moment- Devir Sayısı Grafiği, Komütasyon Açısı Değişmiş/Değişmemiş Durum[30]



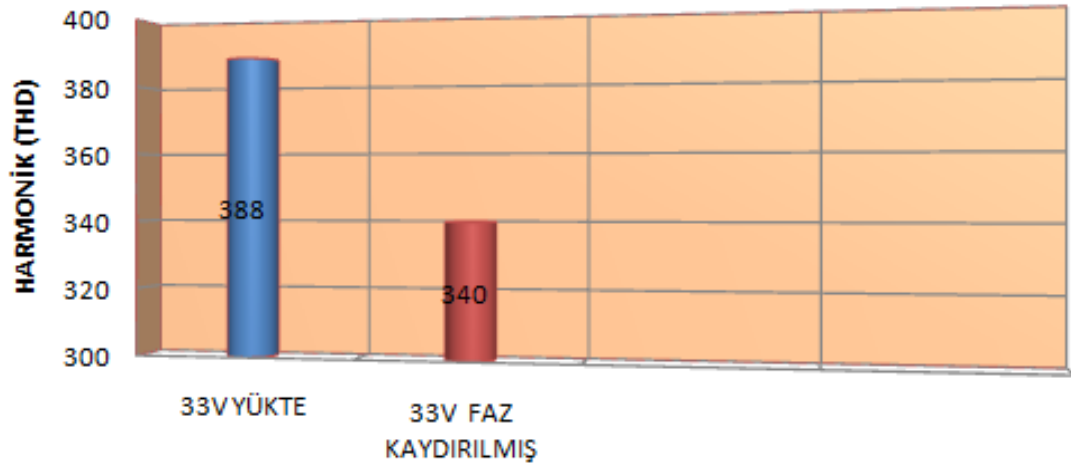
Şekil 83. 66V Bipolar Çalışma Komütasyon Açısı 20° Değişime Göre Moment- Devir Sayısı Grafiği, Komütasyon Açısı Değişmiş/Değişmemiş Durum[30]



Şekil 84. 100V Bipolar Çalışma Komütasyon Açısı Değişimine Göre Moment- Devir Sayısı Grafiği, Komütasyon Açısı Değişmiş/Değişmemiş Durum[30]

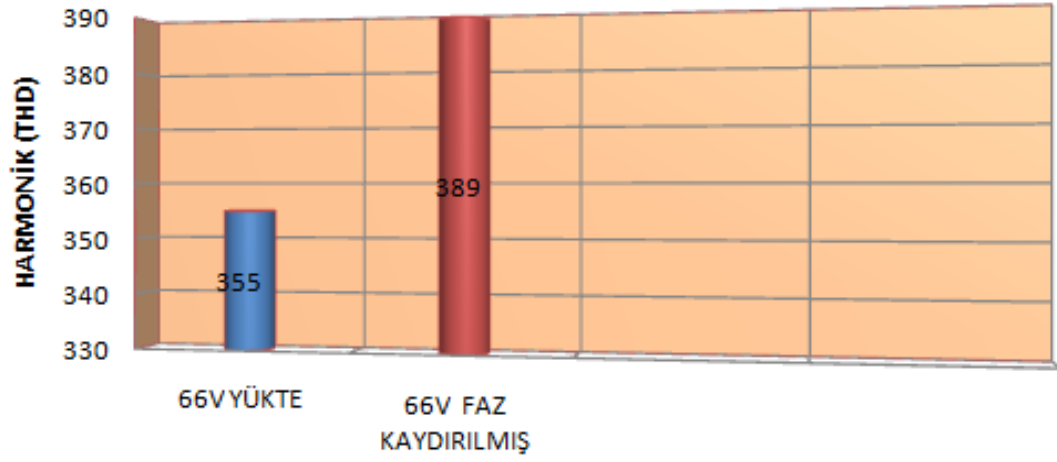
Şekil 82-84 de motora uygulanan farklı gerilim değerleri için moment devir sayısı değişimini vermektedir. Faz kaydırılmış (Hall sensör kaydırılmış) durumda aynı moment değerleri için devir hızının arttığı görülmektedir. Bu da bize gücün arttığını göstermektedir. Güç arttığı zaman moment dalgalanmasındaki değerler azalacaktır. Şekil 84’de harmonik değerlerin birbirine çok yakın olduğunu buna karşılık devir hızının arttığını görmekteyiz. Bu sonuç FSDAM için daha verimli motor dizaynının Hall sensörlerin yerlerinin optimal çalışmasının gerekliliğini göstermektedir[30].

Dikkat edilmelidir ki; belli bir aralıkta ölçülen hız sanki momentle birlikte artıyor gözükse de, momentteki artış dikkate alınırsa bu değerlerin neredeyse sabit kaldığı, belirlenen bu aralığın dışında da, moment değerleri arttırıldığı zaman, hız değerinin düşmeğe başlayacağı görülecektir. Bu değerleri tek tek veri olarak elde etme imkanı olmadığı için regresyon analizi çalışmalarıyla değerlerin nasıl olacağı standartlarca belli bir hata dahilinde belirlenebildiği için bu yorumlar yapılmıştır[29].



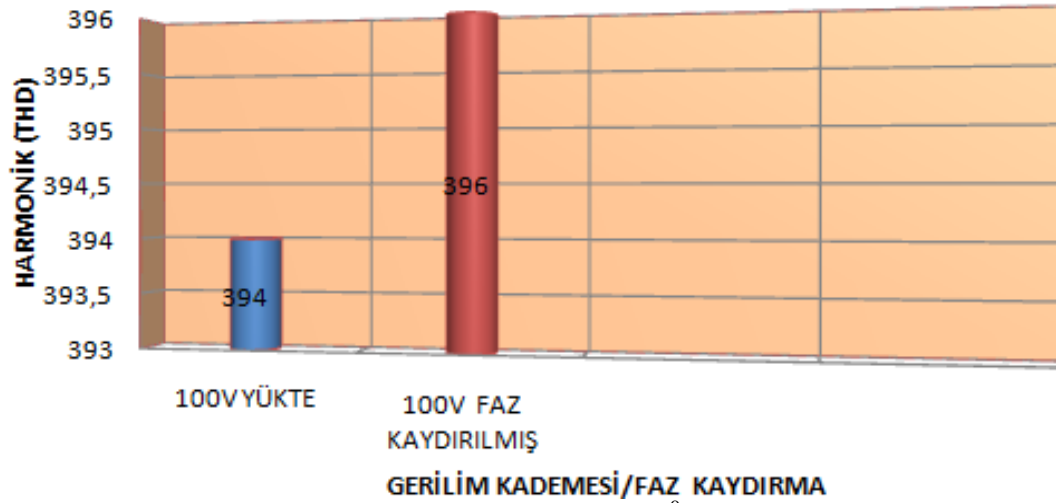
GERİLİM KADEMESİ/FAZ KAYDIRMA

Şekil 85. 33V Bipolar Çalışmada Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Harmonik (THD) Değerleri[30]

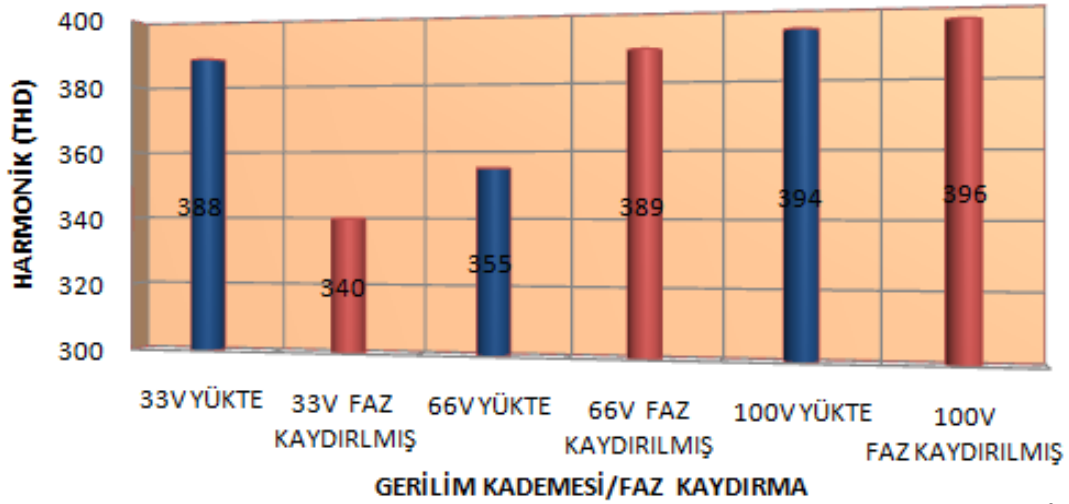


GERİLİM KADEMESİ/FAZ KAYDIRMA

Şekil 86. 66V Bipolar Çalışmada Komütasyon Açısı 20^0 Değiştirilmiş Harmonik (THD) Değerleri[30]



Şekil 87. 100V Bipolar Çalışmada Komütasyon Açısı 20° Değiştirilmiş Harmonik (THD) Değerleri[30]



Şekil 88. Herbir Gerilim Değerinde Bipolar Çalışmada Komütasyon Açısı 20° Değiştirilmiş Harmonik (THD) Değerleri[30]

Şekil85-88’de 33V, 66V ve 100V için yüklü çalışma durumunda faz kaydırılmış ve faz kaydırılmamış değerler için akım harmonik değerleri (THD) verilmiştir ve 100V için bulunan değerler harmonikli değerler içinde en iyi değerler olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum motorun nominal değerlerine yaklaşıldıkça teoride olduğu gibi harmonik kayıplarının da azalmasını gösterir. Şekil 86’da verilen değerlerde faz kaydırılmamış durumda harmonik değerler daha az çıkmıştır. Ancak motorun nominal çalışma değerleri gözönüne alınırsa bu değer sadece başka araştırmalara ipucu verecek bir bilgi olarak bırakılmaktadır. Müsade edilen belli bir aralıkta hall sensör yerinin ayarlanarak optimal bir çalışma modunun elde edilebileceğini görmek açısından önemli bir çalışma olmuştur. Şekillerdeki çizilen grafiklerde görüldüğü gibi makinanın gerilimi arttıkça

nominal gerilim değerlerine yaklaşıncı sensör pozisyonu kaydırılmış, dolayısıyla fazı kaydırılmış değerlerin faz kaydırılmamış değerlere göre daha avantajlı olduğu görölmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada FSDAM’da 120^0 aralıklarla yerleştirilmiş hall sensörlerin mücade edilen aralık içinde motor dönüş yönünde kaydırılmış yüklü çalışma durumundaki değişim sonucunun FSDAM’ın parametrelerine etkisi incelenmiştir. 0^0 , hall sensörlerin bulunduğu referans konum, 20^0 , hall sensörlerin motor dönüş yönünde kaydırılarak ötelenmiş pozisyonudur. Hall sensörlerin kaydırılma açısının 20^0 olmasının sebebi, motorun devir sayısı, moment, sessiz çalışma ve yüklenme durumundaki istenen verilerin alındığı en uygun konum olmasıdır. Bu çalışmada bipolar sürücölü hall sensörlü fırçasız doğru akım motoru (FSDAM)’nın sensörlerinin, optimal çalışma aralığı deneysel olarak araştırılmıştır. Günümüzde küçük güçlerde çok yaygın olarak kullanılan FSDAM gelişen teknoloji sayesinde, orta ve büyük güçlerde de verimli bir şekilde kullanılmaktadır. FSDAM ‘ın daha verimli çalışması ile ilgili literatürde birçok teorik ve deneysel çalışmalara rastlamak mümkündür. Ancak bu çalışmalardan hiçbirisi optimal hall sensör yerinin bulunması ile ilgili değildir. FSDAM’da rotor pozisyonunun tam ve doğru bir şekilde belirlenmesi, başka bir deyişle; hall sensörlerin motorun çalışma parametrelerine etkisinin en verimli olacak şekilde yerleştirilmesi oldukça zor bir iştir. Teorik çalışmaların yanında titizlikle yapılması gereken deneysel çalışmalar da gereklidir. Bu çalışmada 0^0 (referans) ila 20^0 (açı kaydırılmış) elektriki açı arası ayarlama imkanı bulunan hall sensörlerin yerleri değiştirilerek, optimal çalışma parametreleri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışma; klasik doğru akım makinalarında endüvi reaksiyonunu ve dolayısıyla komutasyonu iyileştirmeye yardımcı olan fırça kaydırma olayına denktir. FSDAM’ın referans (normal) ve açı kaydırılmış durumdaki moment, akım ve harmonik değerleri (THD) ölçölmüş ve karşılaştırmalı bir sonuç şeklinde verilmiştir. Bu araştırmada, çalışma sonuçları teorik bilgilerle de desteklenmiştir.

Yapılan deneyler sonucu makinanın verimli çalışması için gerekli datalar elde edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada düşük gerilim değerlerinde fazı kaydırılmış motor parametrelerinin diğeri parametrelerden daha iyi performans gösterdiği görölmüştür.

Motora uygulanan gerilimin maksimum değerine yaklaşıkça, (bu çalışma için 100V değerinde) fazı kaydırılmış durumda motor parametrelerinin diğer parametrelerle aynı olduğu grlmştr. Genel olarak fazı kaydırılmış parametreler daha iyi performans göstermiştir. Bu çalışmanın farklı sürücü devreleri ve motora uygulanan farklı gerilim değerleri ile daha detaylı çalışmalara ışık tutacaktır.

Ek A

Motor Parametreleri:

Eviriciye uygulanan doğru gerilim değeri maksimum 100V

İzolasyon sınıfı F

Dönüş yönü saat yönü/ saat yönünün tersi

Stator 3 fazlı yıldız bağlı

Rotor 4 parçalı 4 kutuplu ferit mıknatıs

KAYNAKLAR

- [1] EROL, Y., [2004], “Fırçasız DA Motorlarının Çalışma Karakteristikleri”, Tübitak Yayınları.
- [2] ATAN, Ö., [2007], “Fırçasız DA Motorunun Modellenmesi ve PWM Yöntemiyle Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van.
- [3] <http://www.mugul.com>
- [4] ULU, B., [2011], “Fırçasız Doğru Akım Motor (BLDA) Hız Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- [5] www.baldorturkiye.com
- [6] DEMİRBAŞ, Ş., [1995], “Fırçasız DA Motorlarının Simülasyonu ve Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Tez No:36077, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [7] ÖZTURA, H., BAYINDIR, S.H., [1995], “Fırçasız DA Motorlarının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi”, Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi.
- [8] ORMAN, K., [2008], “Daimi Mıknatıslı Senkron Motorlar için Akım Gözetleyici ve Hız Kestirimi”, Yüksek Lisans Tezi, Tez No:177024, Erzurum.
- [9] www.elektrikrehberiniz.com/elektrik-motorlari/fircasiz-DA-motorlar
- [10] www.3eelectrotech.com.tr/arsiv/yazi/firçasız-DA-motorun-lineer-karesel-kontrol-lqr-yontemi-ile-konum-denetimi
- [11] Microchip, [2003], “Brushless DA (BLDA) Motor Fundamentals, Application Note AN885, USA.
- [12] www.emo.org.tr
- [13] AYDOĞDU, Ö., [2006], “Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Genetik Tabanlı Bulanık Denetleyici ile Sensörsüz Kontrolü”, Doktora Tezi, Tez No:183326, Konya.
- [14] MILLER, T., [1989], “Brushless PM and Reluctance Motor Drives”, Clarendon Press, Oxford.
- [15] YILMAZ, M., [2005], “Fırçasız Doğru Akım Motorunun Sensörsüz Kontrolünde Dalgacık Tekniğinin Uygulanması”, Doktora Tezi, Tez No:223536, İTÜ.
- [16] elektro.teknoloji.com
- [17] HENDERSHOT, J.R., MILLER, T., [1994], “Design of Brushless Permanent Magnet Motors”, Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford.
- [18] electronics.ege.edu.tr
- [19] WATANABE, H., KATSU ISHIMA, H., FUJII, T., [1991], “An Improved Measuring System of Rotor Position Angles of the Sensorless Direct Drive Servo Motor”.
- [20] GÜLGÜN, R., [1990], “Güç Elektronikğine Giriş”, Sayfa 35-37, Beta Basım Yayın Dağ. A.Ş. 4. baskı, İstanbul.49

- [21] TÜRKMEN, Y., GEÇTAN, C., [1993], “Kumanda Devreleri 2”, Sayfa 132-265, Yeniyol Matbaası, İzmir.
- [22] BOSE , B.K., [1997], Power Electronics and Variable Frequency Drives, IEEE Press, New York 640.
- [23] GDEKOLU, H., [2007], “Fırçasız Doğru Akım Motoru Konum Kontrolü Tasarımı”, İTÜ.
- [24] KARAKULAK, O., YAZ, O. [2012], “PIC Tabanlı Fırçasız DA Motor Sürücü Tasarımı”, 3.Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir.
- [25] SAIROLU , Ş., BEŞDOK, E ., ERLER, M., [2003], “Mühendislikte Yapay Zeka Uygulamaları-I Yapay Sinir Ağları”, Ufuk Yayınevi, Kayseri.
- [26] BEKTAŞ Y., SERTELLER N.F.O., [2011], “Fırçasız Doğru Akım Motoru (FSDAM) ve Sürücü Devresi Eğitim Seti Analizi Geliştirilmesi ve Motorun Bilgisayar Ortamında İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [27] HASANUSTA K., SERTELLER N.F.O, [2015], “Fırçasız Doğru Akım Motorlarında (FSDAM) Optimal Hall Sensör Yerinin İncelenmesi ve Motora Etkisi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, 15(2015) 035201 (1-7) DOI: 10.5578/fmbd.10173
- [28] BAYRAKTAR H.C., [2014], “Fırçasız Doğru Doğru Akım Motorlarının Kontrolü”, Seminer Tezi, İstanbul.
- [29] SERTELLER OYMAN N.F..Nümerik Analiz Ders Notları,2015.
- [30] HASANUSTA K., SERTELLER N.F.O, [2015], “Fırçasız Doğru Akım Makinalarında Optimal Hall Sensör Yerinin Bulunması Çalışmaları, Umas 2015 Ulusal Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu, Düzce Üniversitesi
- [31] NASAR, S.A., BOLDEA, I., and UNNEWEHR, L.E., [1993], “Permanent Magnet, Reluctance and Self-Synchronous Motors”, CRC Press, USA
- [32] HASANUSTA K., SERTELLER N.F.O, [2015], “Fırçasız Doğru Akım Makinalarında Optimal Hall Sensör Yerinin Bulunması Çalışmaları, Dzce Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4 (2016) 801-811
- [33] ACARNLEY, P.P., WATSON, J.F., [2006], “Review of Position-Sensorless Operation of Brushless Permanent-Magnet Machines”,
- [34] LAI, Y.S., LIN, Y.K., [2007], “A New Cost Effective Sensorless Commutation Method for Brushless DA Motors Without Using Phase Shift Circuit and Neutral Voltage”
- [35] GUMASTE, A.V. and SLEMON, G.R., [1981], “Steady-State Analysis of a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive with Voltage-Source Inverter”,
- [36] LE-HAY, H., DESSAINT, L.A., [1989], “An Adaptive Current Control Scheme for PWM Synchronous Motor Drives: Analysis and Simulation”,
- [37] BOSE, B.K., [1990], “An Adaptive Hysteresis-Band Current Control Technique of a Voltage-Fed PWM Inverter for Machine Drive System”,

- [38] KARTHIKEYAN, J., DHANA SEKARAN, R., [2011], “Current Control of Brushless DA Motor Based on a Common DA Signal for Space Operated Vehicles”, *Electrical Power and Energy Systems* 33 (2011) 1721-1727.
- [39] WU, Q., TIAN W., [2012], “Design of Permanent Magnet Brushless DA Motor Control System Based on dsPIC30F4012”, *Procedia Engineering* 29 (2012) 4223-4227.
- [40] WANG, H., [2012], “Design and Implementation of Brushless DA Motor Drive and Control System”, *Procedia Engineering* 29 (2012) 2219-2224.48 [17] JANPAN, I. et al. [2012], “
- [41] CHOWDHURY, D., CHATTOPADHYAY, M., ROY, P., [2013], “Modelling and Simulation of Cost Effective Sensorless Drive for Brushless DA Motor”,
- [42] YEDEMALE, P., [2003], “Brushless DA(BLDA)Motor Fundamentals”, Microchip Technology Inc. App. Note, USA
- [43] [www .metu.edu.tr](http://www.metu.edu.tr)
- [44] KARACA, H., [2004], “PIC Mikrodenetleyici Kullanılarak Fırçasız DA Motorun Sensörsüz Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, Tez No:154012, Konya
- [45] GÜNDOĞDU, A., [2012] , “Asenkron Motorlarda Moment Dalgalanmalarının Sinirsel Bulanık Ağlar ile Azaltılması”, Doktora Tezi, Elazığ
- [46] NASAR, S.A., BOLDEA, I., and UNNEWEHR, L.E., [1993], “Permanent Magnet, Reluctance and Self-Synchronous Motors”, CRC Press, USA
- [47] BAYRAKTAR H.C., [2014], “Fırçasız Doğru Doğru Akım Motorlarının Kontrolü”, Seminer Tezi, İstanbul.
- [48] Leonard N.E. , 3-Phase BLDC Motor Control with Hall SensorsUsing 56800/E Digital SignalControllers, Freescale SemiconductorApplication Note, AN1916, Rev. 2.0, 11/2005, 2005.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Kemal HASANUSTA
Doğum Yeri ve Tarihi : KASTAMONU / 08.04.1979
Yabancı Dili : İNGİLİZCE
E-Posta : khusta@hotmail.com

Öğrenim Durumu

Derece	Bölüm/Program	Üniversite/Lise	Mezuniyet Yılı
Lise	ELEKTRİK	KASTAMONU ANADOLU MESLEK LİSESİ	1997
Üniversite	ELEKTRİK ÖĞRETMENLİĞİ	MARMARA ÜNİVERSİTESİ	2002

İş Deneyimi

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2003-2007	GECEM AYDINLATMA SAN. ve TİC. LTD. ŞTİ.	Kalite Kontrol ve Kalite Yönetim Sorumlusu Üretim Planlama
2007-2010	GEDİK KAYNAK A.Ş	Üretim Planlama Şefi
2010 –2013	ŞIRNAK TEKNİK ve ENDÜSTRİ MESLEK LİSESİ	Elektrik Öğretmeni
2013 - 2014	İNEBOLU TEKNİK ve ENDÜSTRİ MESLEK LİSESİ	Elektrik Öğretmeni
2014-.....	İNEBOLU MELEKİ VE TEKNİK ANADOLU LİSESİ	Müdür Yardımcısı