



**KTO KARATAY ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**FİRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNUN YAPAY SİNİR AĞI  
KULLANILARAK SENSÖRSÜZ HIZ KONTROLÜ**

**Ali TAŞKIRAN**

**Yüksek Lisans**

**KONYA  
Temmuz 2022**

FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNUN YAPAY SİNİR AĞI KULLANILARAK  
SENSÖRSÜZ HIZ KONTROLÜ

Ali TAŞKIRAN

KTO Karatay Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Tezli Yüksek Lisans Programı

Yüksek Lisans

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin ALP

Konya  
Temmuz 2022

## BİLDİRİM

Enstitü tarafından onaylanan Yüksek Lisans tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını basılı veya dijital biçimde arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullar dahilinde erişime açma iznini KTO Karatay Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle, Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak ve gelecekteki çalışmalar (makale, kitap, lisans, patent vb.) için tezimin tamamının veya bir bölümünün kullanım hakları yalnızca bana ait olacaktır.

Tezimin bütünüyle kendi çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izinle kullanılması zorunlu olan kaynakları, yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde izinlerin suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayımlanan “Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge” kapsamında, tezim, aşağıda belirtilen koşullar haricince, YÖK Ulusal Tez Merkezi ve KTO Karatay Üniversitesi Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

Enstitü / Fakülte Yönetim Kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.<sup>1</sup>

Enstitü / Fakülte Yönetim Kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ... ay ertelenmiştir.<sup>2</sup>

Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir.<sup>34</sup>

.../.../....

---

**Ali TAŞKIRAN**

---

<sup>1</sup> MADDE 6(1) Lisansüstü tezle ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.

<sup>2</sup> MADDE 6(2) Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internette paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkânı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.

<sup>3</sup> MADDE 7(1) Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir. Kurum ve kuruluşlarla yapılan iş birliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.

<sup>4</sup> MADDE 7(2) Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

## ETİK BEYAN

KTO Karatay Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Hazırlama ve Yazım Kurallarına uygun olarak Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin ALP danışmanlığında tarafımdan üretilen bu tez çalışmasında; sunduğum tüm veri, enformasyon, bilgi ve belgeleri bilimsel etik kuralları çerçevesinde elde ettiğimi, tüm değerlendirme, analiz, bulgu ve sonuçları bilimsel usullere uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım kaynakların tümüne bilimsel normlara uygun biçimde atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, tezimin kaynak gösterilen durumlar dışında özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarımı kabullendiğimi beyan ederim.

.../.../....

---

**Ali TAŞKIRAN**

*Kariyerim boyunca desteklerini esirgemeyen aileme.*

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca göstermiő olduğu ilgi ve desteklerinden dolayı tez danıőmanım Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin ALP'e, gerektiğinde arkadaşım, gerektiğinde akademik yol göstericim Arő. Gör. Sinan İLGEN'e ve maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teőekkürü bir borç bilirim. Tez çalıőmamda manevi desteklerini esirgemeyen iş yerim FEMSAN ELEKTRİK MOTORLARI'na teşekkür ederim.

.../.../....

Ali TAŞKIRAN

## ÖZET

Ali TAŞKIRAN

Fırçasız Doğru Akım Motorunun Yapay Sinir Ağı Kullanılarak Sensörsüz Hız Kontrolü

Yüksek Lisans

Konya, 2022

Fırçasız doğru akım motorları (FDAM), otomotiv, uzay, savunma sanayi, tıbbi, robotik, endüstriyel otomasyon teknolojileri gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Fırçalı Doğru Akım Motorları ile karşılaştırıldığında nadir bakım ihtiyacı, elektriksel gürültü üretme, düşük atalet, daha iyi tork-hız karakteristiği dolayısı ile motor verimi gibi konularda avantajları öne çıkmaktadır. FDAM rotoru manyetik alanı ile stator manyetik alanı aynı frekans değeri ile döndüğü için bir çeşit senkron motor türüdür. Bir, iki, üç ve beş fazlı örnekleri mevcuttur. Üç faz FDAM günümüzde en çok kullanılan türüdür. Bu tez çalışmasında yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak zıt elektromotor kuvveti gözlemcisi tasarımıyla sensörsüz hız kontrolü benzetimi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Oransal-integral-türev (PID) kontrolcüsü ile kalıcı durum hatalarının giderilmesi üzerine benzetim yapılmıştır. Tüm bunlara ek olarak, genetik algoritma (GA) ile PID katsayılarının optimizasyonu ile sistem kararlılığı artırılmıştır. Yukarıda belirtilen metotların simulink modeli geliştirilmiş ve motor performansı referans hız ve değişken yük altında MATLAB/Simulink platformunda sonuçlar analiz edilmiştir. GA optimizasyonu öncesi ve sonrası sonuçlar karşılaştırılmıştır.

### **Anahtar Kelimeler**

Fırçasız doğru akım motoru, sensörsüz kontrol, oransal-integral-türev, yapay sinir ağları, genetik algoritma

## **ABSTRACT**

Ali TAŞKIRAN

Brushless Direct Current (BLDC) Motor Sensorless Speed Control using Artificial  
Neural Networks

Master's Thesis

Konya, 2022

Brushless direct current motors (BLDC) are generally used in many industrial area such as automotive, defence, aerospace, robotics, medical, and industrial automation technologies. Compared to Brushed Direct Current Motors, it has advantages such as rare maintenance needs, electrical noise generation, low inertia, better torque-speed characteristics and therefore motor efficiency. Since BLDC rotor magnetic field and stator magnetic field rotate with the same frequency value, it is a kind of synchronous motor type. One, two, three and five phase types are available. 3-phase BLDC is the most widely used type today. In this thesis, the speed control of BLDC motor without sensor is designed with back electromotive force observer with Artificial Neural Network is studied. Proportional-integral-derivative (PID) control has been used to eliminate steady-state errors. In addition, the optimization of PID constants has been performed using genetic algorithms (GA) to enhance the stability of the system. The simulink model of the mentioned methods above has been developed and evaluated on the MATLAB/Simulink platform under reference speed and variable loads.

### **Keywords**

Brushless direct current motor, sensorless control, pid, artificial neural networks, genetic algorithm



## İÇİNDEKİLER

BİLDİRİM .....	i
ETİK BEYAN .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
TABLolar DİZİNİ .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER DİZİNİ.....	xiii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
2. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI .....	6
2.1. FDAM Stator Yapısı .....	6
2.1.1. Yoğun Sarım.....	7
2.1.2. Dağıtılmış Sarım.....	7
2.2. FDAM Rotor Yapısı.....	8
2.3. FDAM Uygulamalarında Kullanılan Sensörler.....	9
2.3.1. Alan (Hall) Etkili Sensörler.....	9
2.3.2. Optik (Enkoder) Sensörler.....	10
2.3.3. Resolver Sensörler.....	12
2.4. FDAM Çalışma Prensibi .....	13
2.5. FDAM Sınıflandırılması.....	15
2.5.1. Dış Rotorlu FDAM.....	15
2.5.2. İç Rotorlu FDAM .....	16
2.6. Tork Hız Karakteristiği .....	16
2.7. Test Metotları .....	17
2.8. FDAM Avantajları ve Dezavantajları .....	18
2.8.1. FDAM Avantajları.....	18
2.8.2. FDAM Dezavantajları .....	18
3. FDAM ve FDAM SENSÖRSÜZ SÜRÜCÜ MATEMATİKSEL MODELİ.....	19
3.1. FDAM Matematiksel Modeli .....	19
3.2. FDAM Sürücüsü ve Hız Kontrolcüsü .....	22

3.2.1. Zıt EMK Sıfır Geçiş Noktası Belirleme .....	25
3.2.2. Zıt EMK İntegrasyonu .....	26
3.3. Zıt EMK Elde Edilmesi ve Yapay Sinir Ağı Modeli .....	26
3.3.1. Aktivasyon Fonksiyonu Tipleri .....	29
3.3.2. YSA Modeli ve Performans Kriterleri.....	34
3.4. PID Hız Kontrolcüsü .....	38
3.5. Genetik Algoritma ile PID Parametrelerinin Optimizasyonu .....	41
4. SİSTEM MODELLEMESİ .....	47
5. SONUÇLAR .....	58
KAYNAKLAR .....	60
ÖZGEÇMİŞ .....	63
EK1. 1500 RPM HIZ REFERANSI SİSTEM CEVABI .....	64
EK2. 2500 RPM HIZ REFERANSI SİSTEM CEVABI .....	65
EK3. SENSÖRSÜZ FDAM HIZ KONTROL MODELİ.....	66
EK 4. ÜÇ FAZ EVİRİCİ DEVRE .....	67
EK 5. KAPI SİNYALİ MANTIK DEVRESİ .....	68
EK 6. YSA SIMULINK MODELİ .....	69

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1. Üç faz IGBT evirici anahtarlama sırası .....	3
Tablo 2. PID Parametre Değişim Etkileri .....	4
Tablo 3. Anahtarlama Sırası.....	24
Tablo 4. YSA Anahtarlama Sekansı .....	39
Tablo 5. Kontrolcü Karşılaştırma Tablosu.....	41
Tablo 6. Genetik Algoritma Parametreler .....	46
Tablo 7.GA Sonra PID Katsayıları .....	46
Tablo 8. FDAM Parametreleri .....	47
Tablo 9. PID Parametreleri .....	47
Tablo 10. İkinci GA Başlangıç- Sonuç Parametreleri.....	50
Tablo 11. 2000 rpm, 2 Nm Hız Kontrolcüsü .....	53
Tablo 12. 2000 rpm, 5 Nm Hız Kontrolcüsü .....	56

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Trapezoidal zıt elektromotor sinyali .....	2
Şekil 2. Üç faz IGBT evirici devre.....	3
Şekil 3. FDAM Stator Sargı .....	6
Şekil 4. Stator Sarım Teknikler .....	7
Şekil 5. Rotor Mıknatıs Yerleşimi .....	8
Şekil 6. Montajı Tamamlanmış Alan Etkili Sensör .....	10
Şekil 7. Optik Sensör Bileşenler .....	11
Şekil 8. Optik Sensör Çalışma Prensibi .....	11
Şekil 9. Örnek Optik Enkoder Sinyali.....	12
Şekil 10. Örnek Resolver .....	13
Şekil 11. Motorun Dönüş İlkesi .....	14
Şekil 12. Üç Faz Evirici Devre Şeması .....	14
Şekil 13. FDAM Sinyal Karakteristiği.....	15
Şekil 14. Dış Rotor FDAM- İç Rotorlu FDAM.....	16
Şekil 15. FDAM Tork-Hız Eğrisi.....	17
Şekil 16. Örnek Motor Test Sistemi.....	17
Şekil 17 Üç Faz FDAM Eşdeğer Elektrik Devresi .....	19
Şekil 18. Üç Faz Evirici Devre .....	22
Şekil 19. Hall Sensörü ve Zıt EMK Değerleri .....	23
Şekil 20. Sıfır Geçiş Noktası Belirleme, Suskun Faz.....	25
Şekil 21. Zıt EMK integrasyon ve sıfır geçiş noktası .....	26
Şekil 22. YSA Modeli .....	27
Şekil 23. FDAM Zıt EMK Formu.....	28
Şekil 24. Nöron Yapısı.....	28
Şekil 25. Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu.....	30
Şekil 26. Tanh Aktivasyon Fonksiyonu .....	30
Şekil 27. ReLU Aktivasyon Fonksiyonu .....	31
Şekil 28. Geri Yayılım Akış Diyagramı.....	33
Şekil 29. Zıt EMK YSA Sistem .....	33
Şekil 30. 3 Nöron Gizli Katman Performans .....	34
Şekil 31. 3 Nöron Gizli Katman Doğruluk/Başarım Yüzdesi.....	34
Şekil 32. 5 Nöron Gizli Katman Performans .....	35

Şekil 33. 5 Nöron Gizli Katman Doğruluk/Başarım Yüzdesi.....	35
Şekil 34. 10 Nöron Gizli Katman Performans .....	36
Şekil 35. 10 Nöron Gizli Katman Başarım/Doğruluk Yüzdesi.....	36
Şekil 36. Alan Etkili Sensör Kapı Sinyali.....	37
Şekil 37. Zıt EMK Kapı Sinyalleri.....	37
Şekil 38. Eğitim Verisi-Test Verisi.....	38
Şekil 39. Hız Kontrolü Sistem Şeması.....	38
Şekil 40. Başlangıç PID Katsayılarının Adım Cevabı .....	41
Şekil 41. Genetik Algoritma Prensibi .....	43
Şekil 42. Başlangıç Popülasyonu 30 .....	44
Şekil 43. Başlangıç Popülasyonu 50 .....	45
Şekil 44. Sensörsüz Hız Kontrol Şeması .....	46
Şekil 45. Sistem Cevabı- 2000rpm Sabit Referans GA Öncesi .....	48
Şekil 46. Stator Akımları GA Öncesi.....	48
Şekil 47. Elektromanyetik Tork Değeri GA Öncesi .....	49
Şekil 48. İlk GA Opt. – 2 Nm Yük Altında .....	49
Şekil 49. İkinci GA Opt.- 2000rpm Sabit Hız GA Sonrası- Yüksüz .....	50
Şekil 50. 2.GA Stator Akım Değerleri- Yüksüz .....	51
Şekil 51. FDAM Zıt EMK Değerleri .....	51
Şekil 52. 2.GA Opt. – 2000 rpm 2 Nm Karşı Yük Sistem Cevabı .....	52
Şekil 53. 2000 RPM Hız Kontrolü Hata .....	52
Şekil 54. 2000 RPM, FDAM Faz Gerilimleri .....	53
Şekil 55. 2.GA Opt. 2 Nm- Stator Akımları .....	54
Şekil 56. 2.GA Opt. 2 Nm- Elektromanyetik Tork .....	54
Şekil 57. 2.GA Opt. 5 Nm- Sistem Cevabı .....	55
Şekil 58. 2000 rpm, 5 Nm Sistem Hata.....	55
Şekil 59. 2.GA Opt. 5 Nm- Fazı Stator Akımı.....	56
Şekil 60. 2.GA Opt. 5 Nm- Elektromanyetik Tork .....	57
Şekil 61. 2.GA Opt. 10Nm- Sistem Cevabı .....	57
Şekil 62. 1500 rpm, 2 Nm Karşı Yük Altında .....	64
Şekil 63. 1500 rpm, 2 Nm, Hız Kontrolcüsü .....	64
Şekil 64. 2500 RPM, 2 Nm Yük Altında .....	65
Şekil 65. 2500rpm, 2 Nm, Hız Kontrolcüsü .....	65
Şekil 66. Simulink Sistem Modeli .....	66

Şekil 67. Üç Faz Evirici Devre Sistem Modeli .....	67
Şekil 68. Zıt EMK Mantık Devresi .....	68
Şekil 69.YSA Simulink Modeli .....	69

## SİMGELER DİZİNİ

<b>Simge</b>	<b>Açıklama</b>
$\omega_m$	Motor mekanik hızı
$f$	Faz gerilim frekansı
$p$	Kutup sayısı
$\theta$	Rotor açısı
$V_a$	Faz gerilimi (A fazı)
$R_a$	Direnç değeri (A fazı)
$L_a$	Bobin değeri (A fazı)
$i_a$	Faz akımı (A fazı)
$E_a$	İndüklenen zıt EMK değeri (A fazı)
$L_m$	Fazlar arası indüktans
$k_e$	Zıt EMK sabiti
$T_L$	Yük torku
$T_e$	Elektromanyetik tork
$J$	Atalet
$\beta$	Sürtünme katsayısı

## KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Kısaltma</b>	<b>Açıklama</b>
AA	Alternatif Akım
CNN	Evrışimli Sinir Ağları
DA	Doğru Akım
DL	Derin Öğrenme
EMF	Electromagnetive Force
EMK	Elektromotor Kuvveti
FDAM	Fırçasız Doğru Akım Motoru
FDM	Fırçalı Doğru Akım Motoru
GA	Genetik Algoritma
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MSE	Mean Squared Error
NC	Enerjilendirilmemiş faz (Not connected)
Opt	Optimizasyon
P	Oransal
PI	Oransal İntegral
PID	Oransal İntegral Türev
PWM	Pulse Width Modulation
ReLU	Rectified Linear Unit
SGN	Sıfır Geçiş Noktası
SMSM	Sabit Mıknatıslı Senkron Motor
Tanh	Hiperbolik Tanjant Aktivasyon Fonksiyonu
YSA	Yapay Sinir Ağları



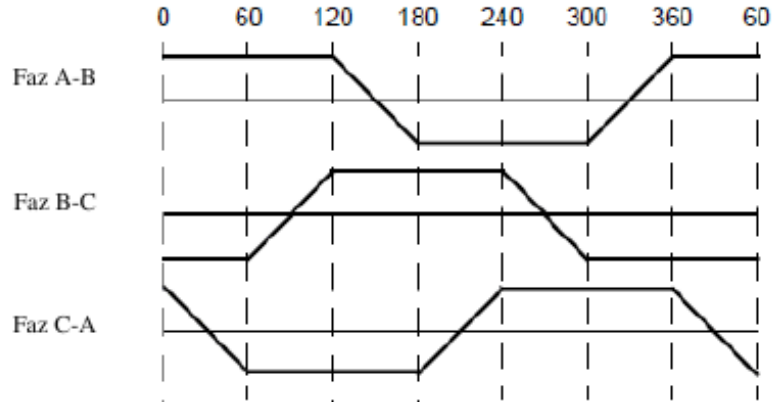
## 1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin ve endüstrinin gelişmesine bağlı olarak elektrik motorlarına olan ihtiyaç artmakta ve kullanım alanları yaygınlaşmaktadır. Fırçasız doğru akım motorları (FDAM) bakım masraflarının düşük olması, düşük atalet, iyi bir tork-hız karakteristiğine sahip olması sebebiyle diğer motor türlerine oranla yaygın olarak kullanılmaktadır. Savunma sanayisinde silah sistemleri, insansız hava araçları, füze sistemleri gibi projelerin tahrik mekanizmalarında, medikal cihazlarda, otomotiv gibi endüstrilerde kendisine yer bulmaktadır. Elektronik bileşenlerin yeteneklerinin artması, kontrol sistemlerinin yaygınlaşması akıllı motor sürücülerinin gelişiminde fayda sağlamıştır. Bu gelişim sayesinde elektrik motorlarının kullanım alanı günden güne artmaktadır. Yeni motor sargı teknikleri, mıknatıs yerleşim planları ile FDAM gelişiminde etkili olan sebeplerdendir. Seri üretiminin kolaylığı ve verimli bir elektrik makinesi olması da avantajlarındanır.

FDAM, rotor hızı ile stator manyetik alanı aynı frekansta döndüğü için bir çeşit senkron motor türüdür. Uygulanan gerilim-hız ve uygulanan akım-tork arasında doğrusal bir ilişki bulunduğu için fırçasız doğru akım motorları senkron motor olarak da adlandırılabilir. FDAM'nin komütasyon işlemi fırçasız doğru akım motorlarının aksine elektronik olarak gerçekleştirilir (Gamazo-Real vd., 2010). Fırçalı doğru akım motorlarında (FDM) komütasyon, fırça denilen mekanik bileşenler ile gerçekleştirilmekte, motorun çalışma süresinde fırçalar yıpranmakta ve bakım ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır.

Boşta endüklenen gerilim sinyalinin (zıt elektromotor kuvveti) biçimi motor türünü belirlemektedir. Fırçasız doğru akım motorlarında bu biçim Şekil 1'de görüldüğü gibi trapezoidal biçimdedir. Bu sinyal biçim motor stator sargılarının sarılma şekli ile doğrudan ilişkilidir ve FDAM yamuk şekilli sarılıdır. Trapezoidal biçimli zıt elektromotor kuvveti (EMK) ile FDAM'nin komütasyon işlemi 6-adım komütasyon ismi verilen bir yöntem ile gerçekleştirilir. Bu yöntemde her bir adım  $60^\circ$  elektriksel açıya denk gelmektedir ve 6 adımda bir tam tur veya  $360^\circ$  elektriksel açı taranmış olur (Lita ve Cheles, 2008). 6-adım komütasyon Şekil 1'de görüldüğü gibi herhangi iki fazın enerjilendirilmesi ile gerçekleştirilir. Trapezoidal sinyal biçimi ile FDAM'nin üreteceği tork dalgalı bir yapıya sahip olacaktır. Lakin diğer senkron motor ailesinden olan Sabit

Mıknatıslı Senkron Motorlara (SMSM) daha düşük güç ihtiyacı ile daha yüksek torklara çıkabilmektedir (Lee vd.,2009).



**Şekil 1. Trapezoidal zıt elektromotor sinyali**

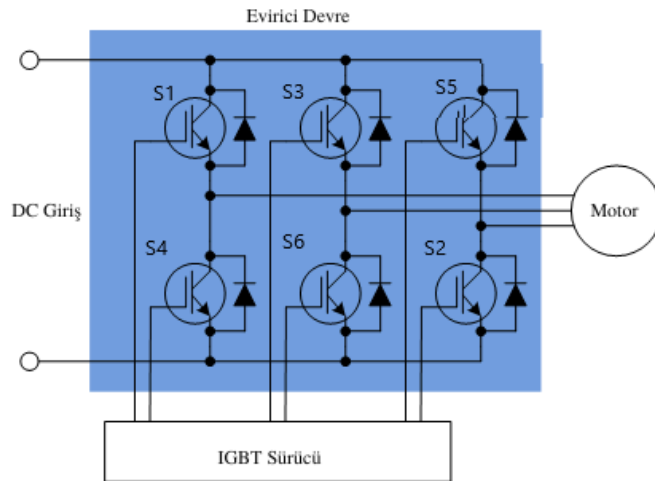
(Rao, 2015)

Sensör teknolojisinin gelişmesi ile birlikte hız kontrolü, pozisyon kontrolü, kuvvet kontrolü gibi uygulamalar FDAM aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. Bu kontrol uygulamaları bir sensöre ihtiyaç duymaktadır. FDAM rotorunun açısı, hız ve pozisyon kontrolü gibi uygulamalarda hall, artırimsal enkoder, mutlak enkoder gibi sensörler kullanılmaktadır. Alan etkili sensörler, akıllı motor sürücülerinin de etkisi ile elektronik komütasyonun gerçekleştirilmesinde yardımcı olmaktadır (Gamazo-Real vd., 2010). Ayrıca, FDAM'nin çalıştırılması için stator sargıları motor fazlarından sırayla enerjilendirilmelidir. Rotora ait manyetik kutup alan etkili sensör ile etkileşerek, sensörün mantıksal sinyal üretmesini sağlar. Üretilen bu sinyal ile FDAM'nin çalışması için en doğru faz enerjilendirme kombinasyonunu tespit edilmiş olur (Rao, 2015). Hız kontrolü uygulaması motor fazlarındaki gerilimin regülasyonu prensibine dayanmaktadır. FDAM faz gerilimlerinin regülasyon işlemi, motor sürücüsünün izole edilmiş kapılı, iki kutuplu transistörler (IGBT) veya mosfetler kullanılarak sürücüsüne verilen doğru akım(DA) geriliminin, anahtarlama dizisi üç faz Şekil 2' de görüldüğü gibi IGBT evirici elektronik devresi ile gerçekleştirilmektedir. Kısaca elektronik devre üzerinde bulunan 6 adet IGBT'nin Tablo 1'de görüldüğü gibi belirli bir sırayla anahtarlanması işlemidir. Sensörler yardımı ile gerçekleştirilecek kontrol uygulaması sensörden tarafından aldığı veriyi anlamlandırıp, motor sürücüsüne kontrol sinyali üreten kontrolcüler de gerektirmektedir. Bu da sensörlü motor kontrol uygulamalarının maliyetini artırmaktadır. Günümüzde ortaya çıkan çip krizi sebebiyle elektronik bileşenlerin maliyeti bir hayli yükselmiştir.

Sensörlü kontrol uygulamaları, elektrik motoru kontrol uygulamalarında proje bütçelerinde olumsuz etkiye sahiptir. Ek olarak, alan etkili ve enkoder gibi sensörler elektriksel gürültüden oldukça kolay etkilenebilen bileşenlerdir. FDAM çalışma esnasında, anahtarlama uygulamasının da etkisiyle elektriksel gürültü yaymaktadır. Bu yönüyle sensörlü kontrol uygulamalarının güvenilirliğini ve sistem dayanıklılığını azaltmaktadır (Rif'an vd., 2019).

**Tablo 1. Üç faz IGBT evirici anahtarlama sırası**

Faz Gerilimi	Anahtarlama Durumu		Çıkış Gerilimi
	Logic 1	Logic 0	
$V_a$	$S_1$	$S_4$	$+\frac{V_d}{2}$
	$S_4$	$S_1$	$-\frac{V_d}{2}$
$V_b$	$S_3$	$S_6$	$+\frac{V_d}{2}$
	$S_6$	$S_3$	$-\frac{V_d}{2}$
$V_c$	$S_2$	$S_5$	$+\frac{V_d}{2}$
	$S_5$	$S_2$	$-\frac{V_d}{2}$



**Şekil 2. Üç faz IGBT evirici devre**

Bu gibi problemlerin önüne geçebilmek adına sensörsüz kontrol yöntemleri geliştirilmiştir (Rif'an vd., 2019). Proje geliştirme bütçelerine olumlu katkısı yatsınamayan sensörsüz kontrol yöntemleri günden güne yaygınlaşmaktadır. Sensörsüz

kontrol tekniği gelişmiş kontrol algoritmaları ve karmaşık elektronik tasarım faaliyetleri de gerektirmektedir (Rif'an vd., 2019).

Yukarıda bahsedilen FDAM sensörlü ve sensörsüz kontrol tekniklerinin ışığında, askeri sistemlerde kullanımının oldukça yaygın olması, kontrol uygulamalarında elektriksel gürültünün önüne geçmek ve proje maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla FDAM sensörsüz hız kontrolü uygulamasının simülasyonu ve sistem benzetimi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Hassas hız kontrolü uygulamasına yönelik zıt EMK değerleri kullanılarak yapay sinir ağları (YSA) ile rotor pozisyonu tahmin algoritmaları tasarlanmış, bu algoritmalar PID kontrolcü ve GA ile desteklenmiştir. PI yerine PID yönteminin kullanılmasının sebebi, referans hıza oturma sürelerinin iyileştirilmesi ve gerçek zamanlı kontrol uygulamasının gereklilikleridir. PID parametrelerinin sistem cevabına etkileri Tablo 2'de görülmektedir.

**Tablo 2. PID Parametre Değişim Etkileri**

<b>Parametre Değer Artışı</b>	<b>Yükseliş Zamanı</b>	<b>Aşma</b>	<b>Oturma Süresi</b>	<b>Kalıcı Durum Hatası</b>
Kp	Azalır	Artar	Küçük değişim	Azalır
Ki	Azalır	Artar	Artar	Elimine eder
Kd	Küçük değişim	Azalır	Azalır	Küçük değişim

Bu tez çalışması 5 bölümden oluşmaktadır.

Bölüm 1'de FDAM hakkında bilgiler verilmiştir. Fırçalı DA motorları ile aralarındaki farklardan bahsedilmiştir. Ek olarak FDAM'nin kontrol yöntemleri ve her iki yöntemin de avantajları ve dezavantajlarına değinilmiştir. Ayrıca çalışmanın içeriğine de yer verilmiştir.

Bölüm 2'de FDAM'nin yapısı, çeşitleri, çalışma prensibi, avantajları ve dezavantajlarına değinilmiştir.

Bölüm 3'de FDAM'nin matematiksel modeli, sürücü ve kontrol uygulaması ve sensörsüz kontrol yöntemleri anlatılmıştır.

Bölüm 4'de FDAM'nin YSA kullanılarak sensörsüz hız kontrolü sistem modelinin MATLAB/Simulink paket programında benzetimi, PID kontrolcüsünün sisteme entegrasyonu ve GA ile PID katsayılarının optimizasyonuna yer verilmiştir.

Bölüm 5’de yapılan sistem benzetim çalışmaları sonrası, stator akımları, faz zıt EMK değerleri, motor hızı, elektromanyetik tork ve rotor açısı gibi sonuçlar incelenmiştir.

## 2. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI

FDAM elektromekanik sistemlerde ana tahrik bileşeni olarak kullanılması günden güne artmaktadır. Elektromekanik sistemlerde kullanımın yaygınlaşmasında kontrol kolaylığı, üretim kolaylığı, yüksek verimlerde istenilen tork ve hızların elde edilebilmesi gibi etkenler rol oynamaktadır. Motor sürücüsü teknolojisinin de gelişiminin hızlanması ile vazgeçilmez hale gelmektedir.

Bir FDAM, stator, rotor olmak üzere iki ana bileşenden oluşur (Topal, 2019). Rotor üzerinde kalıcı mıknatıs bulunması sebebi ile senkron motor türü olarak kabul edilmektedir.

### 2.1. FDAM Stator Yapısı

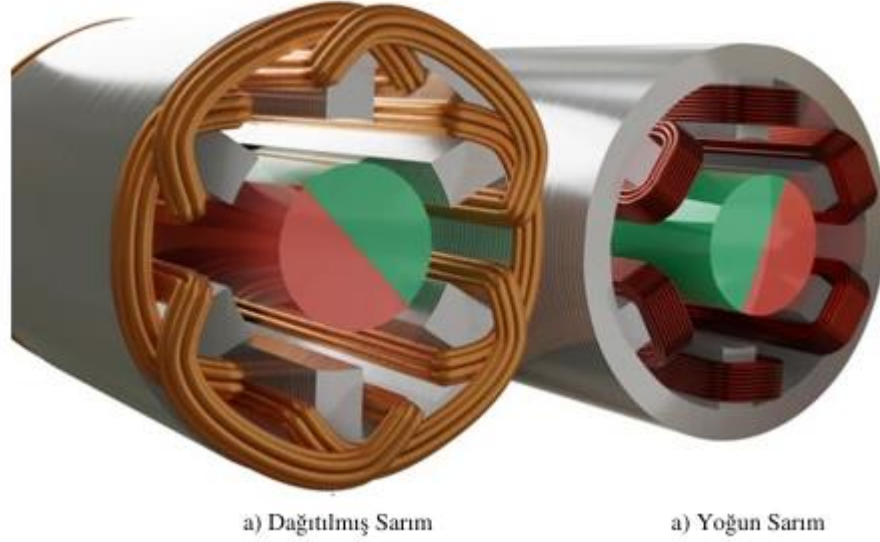
Stator, bakır telin bobinaj işlemi sonrası belirli yöntemler ile oluşturulan bobinlerin birbirlerine bağlanması işlemi ile oluşturulur. Bobinaj işlemi sonrası oluşan bileşenlere sargı adı verilir. Sargıların birleştirilmesi ile motorun stator yapısı oluşturulmuş olur. Üç faz FDAM stator sargıları birbirlerine yıldız bağlantı tipi ile bağlanmaktadır. Şekil 3’de örnek sargı işlemi tamamlanmış stator görülmektedir. Stator sargılarının dağıtılması ile motora ait kutup sayısı belirlenmiş olacaktır (Topal, 2019). FDAM’nin hızı kutup çifti sayısı ile ters oranda ilişkilidir. Denklem 1’de görüleceği üzere faz gerilimi frekansının( $f$ ) kutup sayısına( $p$ ) oranı motor hızını( $\omega_m$ ) elde etmemizi sağlamaktadır.



Şekil 3. FDAM Stator Sargı

$$\omega_m = \frac{60f}{p} \quad (1)$$

Sargıların yoğun sarım ve dağıtılmış sarım olmak üzere Şekil 4’de görüldüğü gibi iki çeşit sarım tekniği bulunmaktadır.



**Şekil 4. Stator Sarım Teknikler**

(Kaynak: Oswos, t.y.)

#### 2.1.1. Yoğun Sarım

Yoğun sargı sarım tekniğinde dışın tamamı sargı paketi ile çevrilmiştir ve sargı boşluğu oldukça azdır. Bu sebep ile düşük hızlarda omik kayıp oldukça azdır. Ek olarak, bu sargı tekniği sonrası indüklenen zıt EMK sinyali trapezoidal biçimdedir. Omik kayıpları az olmasına rağmen yüksek hızlarda harmoniklerin oluşmasına sebep olur (Oswos, t.y.).

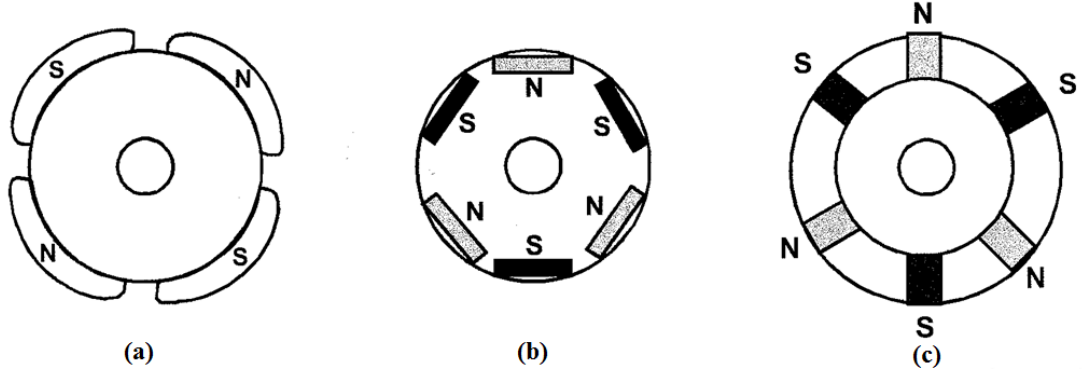
#### 2.1.2. Dağıtılmış Sarım

Yoğun sargı sarım tekniğinin aksine birden fazla dışın bir sargı paketi ile çevrilmesi işlemidir. Küçük boyutlu motorların üretiminde oldukça yaygın kullanılmaktadır. Bu sargı tekniği ile indüklenen zıt EMK sinüzoidal biçimdedir. Bu biçim, harmonik oluşumunu azaltır ve kayıpları indirir. Yüksek motor verimi gerektiren uygulamalarda oldukça yaygın kullanılmaktadır (Oswos, t.y.).

## 2.2. FDAM Rotor Yapısı

Rotor, FDAM'nin çalışma esnasında manyetik alan etkisiyle dönen bileşen olup, sabit mıknatıslardan oluşan, 2 ile 8 adet arasında Kuzey(K) ve Güney(G) kutup çiftinden meydana gelen bileşendir (Yedamale, 2003). Motorun geliştirilme kullanım alanı, teknik gereklilikleri doğrultusunda hesaplanan manyetik alan yoğunluğuna göre mıknatıs seçimi yapılmaktadır (Yedamale, 2003). Mıknatıs seçiminde temel kriterlerden biri de sıcaklık dayanımıdır. Bir motor yük altında çalışma esnasında sıcaklığın da etkisi ile manyetik alan yoğunluğunda azalma ortaya çıkacak ve üretilen tork değeri düşmeye başlayacaktır (Galioto vd., 2014) Bu etkiye demanyetizasyon adı verilmektedir. Ferrit mıknatıslar, Neodmiyum (Nd), Samaryum Kobalt (SmCo), Neodmiyum Ferrit-Boron (NdFeB) mıknatıslar kalıcı mıknatısın oluşturulmasında kullanılan tiplerden bir kaçıdır (Galioto vd., 2014)

FDAM'nin tasarımına ve teknik gerekliliklerine bağlı olarak sabit mıknatıslar rotor üzerine yüzey montaj, şekillerde yerleştirilmektedir (Mohanraj vd., 2022).



Şekil 5. Rotor Mıknatıs Yerleşimi

(Kaynak: Topal, 2019)

Yüzey montaj mıknatıs yapıştırma yöntemiyle oluşturulmuş rotora sahip motor senkron motor olarak adlandırılır. Mıknatıslar epoksi yardımı ile silindirik rotora sabitlenir. Şekil 5-a'da görüldüğü gibi yüzey montaj mıknatıslı rotora sahip motor yüksek tork değerlerine ulaşabilme kapasitesine sahiptir (Cros, 2003). Şekil 5-b'de görüldüğü gibi gömülü montaj tekniği, rotora sabitlenen mıknatısların çalışma esnasında merkezkaç kuvvetinden korunmasını sağlar ve bu etkinin yüksek frekanslı uygulamalarda sebep olacağı mıknatısın sabit olduğu bölgeden kurtulup, motora zarar vermenin önüne geçer. Şekil 5-c'de görülen montaj yönteminde mıknatıs rotor nüvesinden açılan rotor yüzeyine açılan



kanal içerisine yerleştirilmektedir. Bu yöntem sayesinde yüksek hız ve yüksek tork uygulamalarında mıknatıs tahribatının önüne geçilmesi hedeflenmektedir (Topal, 2019). Mıknatıs yerleşimleri rotor ve stator arasında hava boşluğuna etki etmektedir. Hava aralığı ile manyetik akı arasında ters orantı ilişkisi bulunmaktadır. Hava aralığının fazla olması oluşacak manyetik alanı etkiler ve sonucunda elektrik motorunun üretebileceği tork değerinden daha düşük değerlere ulaşmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, hava boşluğunun düşük olması da ısınma problemlerine sebep olabilmektedir. Isınma problemleri mıknatısların demanyetize olması sebep olacaktır. Bu gibi problemlerin önüne geçmek adına delikli rotor tasarımı gibi yöntemlere başvurulmaktadır.

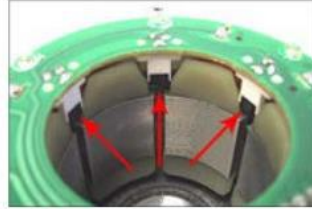
### **2.3. FDAM Uygulamalarında Kullanılan Sensörler**

FDAM stator üzerindeki sargıların belirli bir sırayla enerjilendirilmesi sonrası döner. FDAM elektronik olarak kontrol edilen motor tipidir. Hangi sargının enerjilendirileceğine rotor bilgisine göre karar verilmektedir. Rotorun pozisyon bilgisi için alan (hall) etkili, optik (enkoder) ve resolver sensörler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sensörlerden alınan lojik kod bilgisi ile komütasyon için uygun anahtarlama elemanının açılıp kapanması ile motorun dönme hareketi başlayacaktır.

#### **2.3.1. Alan (Hall) Etkili Sensörler**

Alan etkili sensörler bir dizi tetikleme mıknatısı ve anahtarlardan oluşur. Motorun çalışma esnasında sensörde bulunan manyetik alan eşik değerine göre anahtarların açılıp kapanması sağlanır. Anahtarların açılıp, kapanması bilgisi FDAM evirici devresine iletilir. Bu bilgiyi alan evirici, anahtarlama sırasına karar vererek motora hareket verir. Üç fazlı bir FDAM kontrolü uygulaması için alan etkili sensör 120°'lik açı farkına sahip anahtarlara sahiptir (Gödekoğlu, 2007). İlk kez montajı yapılan alan etkili sensörün manyetik alan etkilerinden korunması için statora uygun uzaklıkta monte edilmesi gerekmektedir. Montaj işleminde hata yapılan sensör anahtarlama sinyallerini rotor pozisyonuna uygun üretemeyecek ve motorun komütasyon işlemi gerçekleştirilememiş olacaktır. Komütasyon, motor fazlarındaki akımın anahtarlama işlemidir. Komütasyon işlemi tamamlanmayan motor çalışmayacaktır. Günümüzde sürücülerin yeteneklerinin artması ile bu komütasyon işlemi kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 6'da montajı tamamlanmış alan etkili sensör görülmektedir. Günümüz motor kontrolü

uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ek olarak, bazı enkoder tiplerinde alan etkili sensör desteği bulunmaktadır. Bu destek ile montajında sensör bulunmayan bir elektrik motorunun komütasyon işlemlerinin elektronik olarak gerçekleştirilebilir ve pozisyon kontrolü işlemi daha hassas gerçekleştirilecektir.



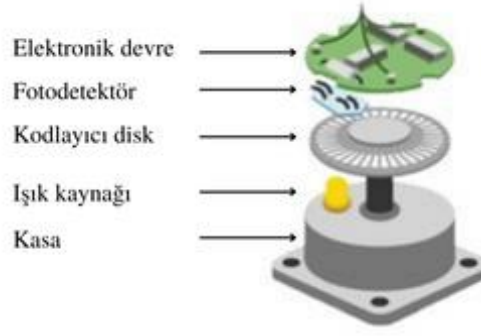
**Şekil 6. Montajı Tamamlanmış Alan Etkili Sensör**

(Kaynak: Topal, 2019)

### 2.3.2. Optik (Enkoder) Sensörler

Günümüzde optik sensörlerin kullanım alanı oldukça yaygındır. Otomasyon sistemleri, otomobil, hava araçları vb. birçok alanda tercih edilmektedir (Ellin ve Dolsak, 2008). Motor milinin dönüş hareketi ile, elektrik sinyali üreten bir elektromekanik sistemdir. Optik sensörler, ışık kesitine bağlı olarak geri bildirim sağlar. Şekil 7’de görüldüğü gibi optik enkoder elektronik devre, foto detektör, kodlayıcı disk ve ışık kaynağı bileşenlerine sahiptir. Motor miline sabitlenen sensör, motorun çalışması ile ışığın dönüş ile kodlayıcı disk üzerinden foto detektör üzerine kodlanmasına ile sinüzoidal formda sinyal üretir. Üretilen bu sinyal elektronik devre aracılığı ile evirici devrenin enkoder tarafından üretilen sinyali anlamlandırabilmesi için Şekil 8’de görüldüğü gibi kare dalgaya dönüştürülür. Kare dalgaya dönüşen sinyal ile rotorun pozisyon bilgisi elde edilmiş olur.

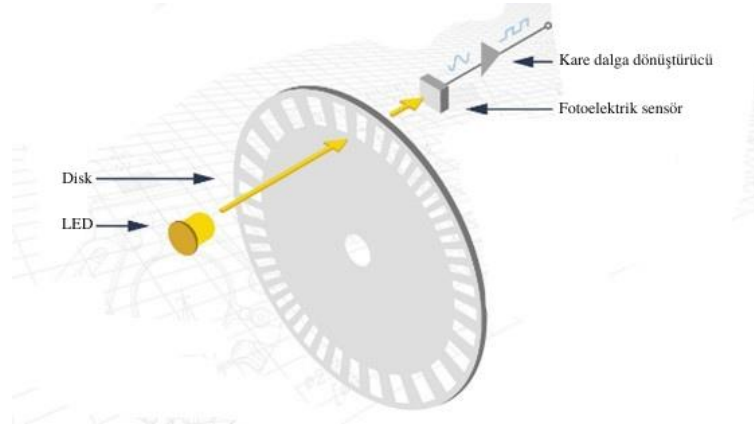
Döner ve doğrusal olmak üzere 2 tip optik enkoder tipi bulunmaktadır. Bu enkoderlerin çalışma prensipleri aynıdır. Döner ve doğrusal enkoderler kendi içerisinde artımsal ve mutlak olmak üzere iki çeşide sahiptir. Artımsal ve mutlak enkoderler arasındaki temel fark pozisyon bilgisi kodlama prensibi ve sıfır noktasının belirlenmesi işlemidir. Artımsal enkoderler kodlayıcı diskinde bulunan yuvaları bir bütün olarak anlamlandırır.



**Şekil 7. Optik Sensör Bileşenler**

(Kaynak: Midoriamerica, t.y.)

Motorun tam bir tur dönüşü tamamlandığında teknik dokümanında tanımlanan çözünürlük kadar puls üretir. Çözünürlük bir tam turda enkoder tarafından üretilen puls sayısını belirtir. Artırımsal enkoderlerin kullanımı ucuz maliyeti ile oldukça yaygındır. Artırımsal enkoderler enerji kesilmesi durumunda kaldığı pozisyonu unutur. Tekrar enerji verilmesi durumunda kaldığı pozisyonu sıfır noktası olarak kabul eder.

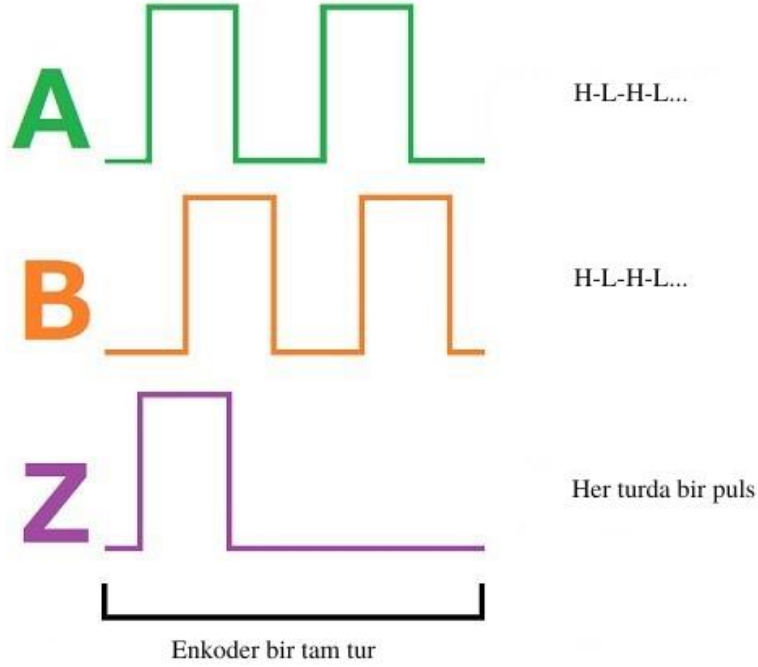


**Şekil 8. Optik Sensör Çalışma Prensibi**

(Kaynak: Midoriamerica, t.y.)

Artırımsal enkoderlerin aksine mutlak enkoderlerde bulunan kodlayıcı disk yuvaları her biri farklıdır. Bu sayede mutlak enkoderler daha hassas pozisyon bilgisi tespit edebilmektedir. Ek olarak, enerji kesimi durumunda mutlak enkoder pozisyon bilgisini unutmaz ve tekrar enerji verilmesi durumunda kaldığı pozisyonu hafızasında tutmuş olur. Genellikle enkoderler kullanıcıya A, B ve Z adı verilen sinyaller paylaşır. Bu sinyaller kare dalgaya dönüştürülmüş bilgiyi içerir. A sinyali motorun hız bilgisini, B sinyali

motorun dönüş yönünü ve Z sinyali referans noktasını belirtir. Z sinyali her turda bir kez lojik 1 çıkışı verir ve kullanıcıya hassas ölçüm imkânı sağlar.



**Şekil 9. Örnek Optik Enkoder Sinyali**

(Kaynak: Encoder, t.y.)

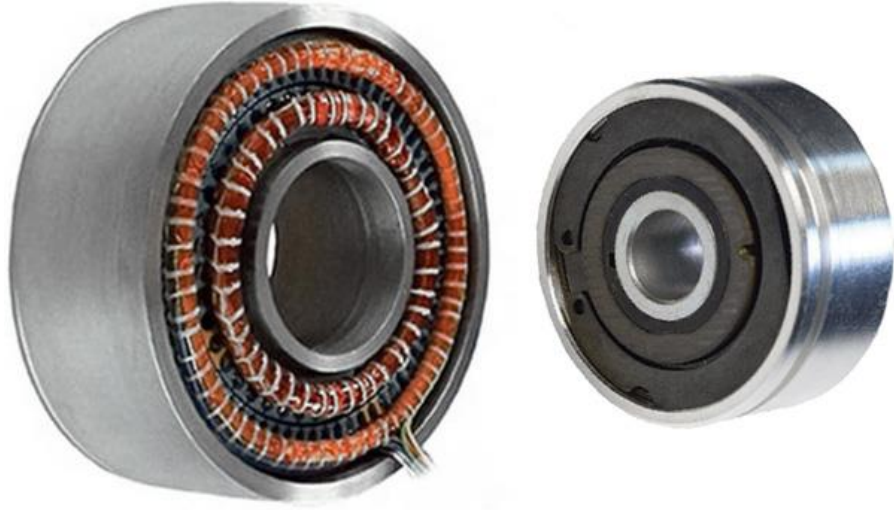
### 2.3.3. Resolver Sensörler

Resolver sensörler rotor bilgisinin ölçülmesi için kullanılan elektrik transformatörüdür. Şekil 10'da görüldüğü gibi tasarım olarak elektrik motoruna benzemektedir. Benzer şekilde sargılardan oluşan stator ve metal bir rotordan meydana gelmektedir. Monte edildiği motorun dönüşü ile sargılar arasındaki indüktif bağlantının değişimi prensibi ile ölçüm gerçekleştirilmektedir. Çıkış sargılarının her birinde gerilim indüklemek için Alternatif akım (AA) ile giriş sargıları enerjilendirilir. Motorun dönüşü ile motor miline bağlı olan enerjilendirilmiş resolverın üreteceği manyetik alan ile motora ait rotor tarafında üretilen manyetik arasında kesişme meydana gelir. Bu kesişme ile sinüs ve kosinüs bileşenlerinde yön ve zaman değişimi meydana gelir. Bu etkileşim ile sıfırdan başlayıp maksimuma giden bir sinüs eğrisi oluşurken, maksimum noktadan başlayıp sıfıra giden bir kosinüs eğrisi meydana gelir. Resolverın bir turu sonrası eğriler sayesinde 0

dereceden 360 dereceye kadar olan tüm bölgeler taranmış olur (Celera, t.y.) Denklem 2’de gerçekleştirilen işlem sonrası rotor açısı( $\theta$ ) elde edilmiş olur.

$$\theta = \tanh^{-1} \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \quad (2)$$

Yüksek sıcaklık dayanımı ve sağlam yapısı ile zorlu şartlarda yapılan uygulamalarda kullanımı yaygındır (Dynapar, t.y.)

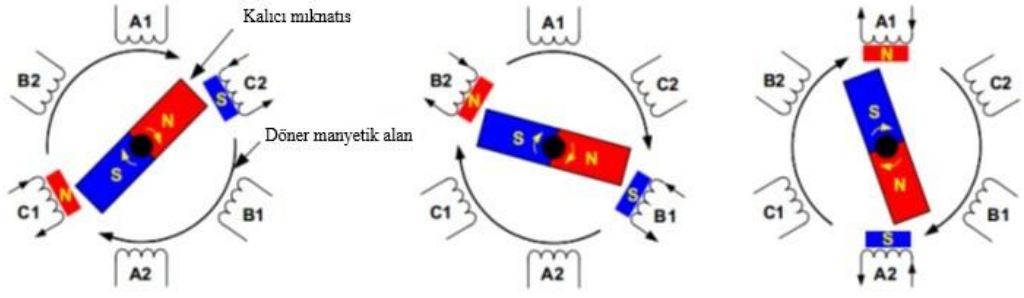


**Şekil 10. Örnek Resolver**

(Kaynak: Celera, t.y.)

#### **2.4. FDAM Çalışma Prensibi**

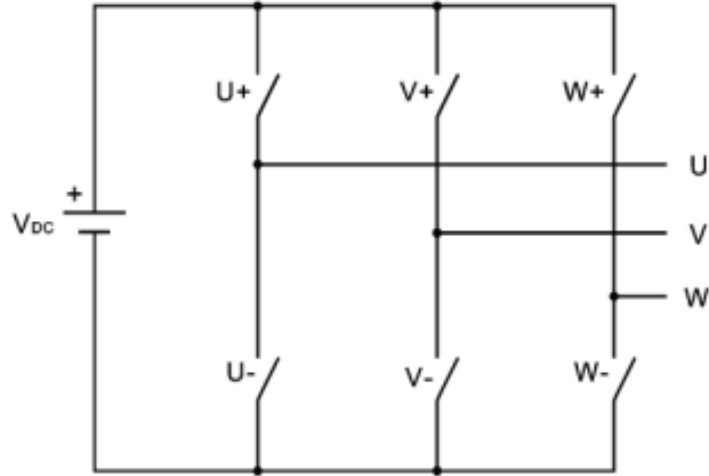
FDAM’nin çalışma prensibi manyetik kutuplar arası itme-çekme kuvveti oluşturulmasına dayanmaktadır. Stator üzerinden geçen akım ile manyetik kutup oluşur. Oluşan kutup ile rotor üzerinde bulunan sabit mıknatısın aynı kutubu itilir, zıt kutubu ise çekilir. İtme-çekme işlemi sonrası tork ortaya çıkar. Sıralı olarak sargıların enerjilendirilmesi ile döner manyetik alan elde edilir. Böylelikle motor dönmeye başlar. Motorun dönüş hareketine devam etmesi için sargıların sürekli enerjilendirilmesi gerekmektedir. FDAM’nin dönüşü Şekil 11’deki gibidir.



**Şekil 11. Motorun Dönüş İlkesi**

(Kaynak: Topal, 2019)

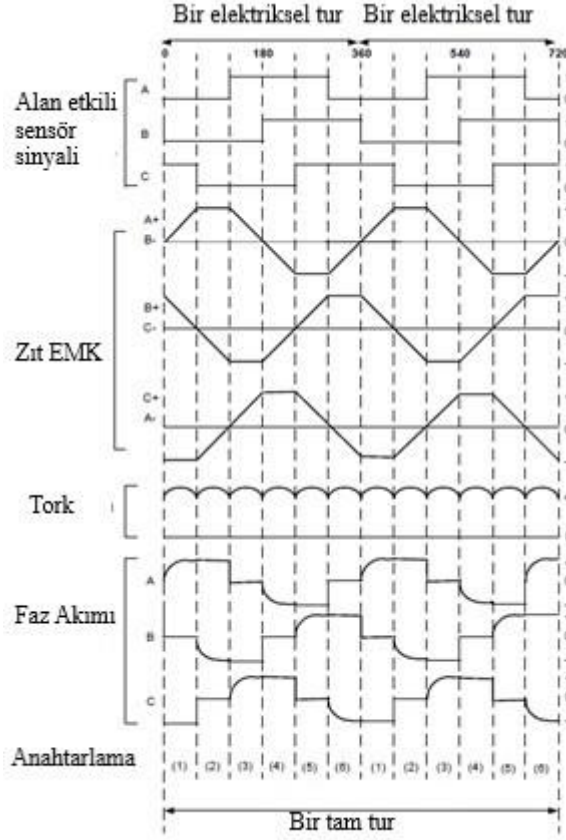
Sargıların sıralı enerjilendirme işlemi için evirici devreler yaygın olarak kullanılmaktadır. Eviriciler DA-AA dönüştürücü türüdür. Sabit DA geriliminin, istenilen frekans ve genlikte AA gerilime dönüştürülmesi amacı ile kullanılır. Eviriciler tek faz eviriciler ve üç faz eviriciler olmak üzere iki gruba ayrılır. Üç faz FDAM'nin çalışması için üç faz evirici kullanılmalıdır. Üç faz eviricide Şekil 12'de görüldüğü gibi altı adet güç anahtarı bulunur.



**Şekil 12. Üç Faz Evirici Devre Şeması**

Üç fazlı eviricide  $120^\circ$  kaydırılmış üç adet çıkış bulunmaktadır. Bu üç adet çıkış motora ait üç fazın sırayla enerjilendirilmesinde kullanılmaktadır. Her bir güç elemanın açılıp kapanması için, referans anahtarlama sinyali uygun bir zamanda uygulanmalıdır. Anahtarlama sinyali bir kare dalga veya bir PWM sinyalidir. Anahtarlama sinyalinin frekansı, eviricinin çıkışında bulunan faz geriliminin çıkış frekansını belirler. Bu frekans

büyüklüğü motor hızına etki eder. Faz gerilim frekansı artan motor daha hızlı dönmeye başlar (Ktu, t.y.). Anahtarlama sekansı sonrası FDAM'nin bir mekanik turu tamamladığında alan etkili sensör çıkışı, zıt EMK kuvveti, tork, faz akımları Şekil 13'de görüldüğü gibi karakteristiğe sahiptir.



**Şekil 13. FDAM Sinyal Karakteristiği**

(Kaynak: Yedamale, 2003)

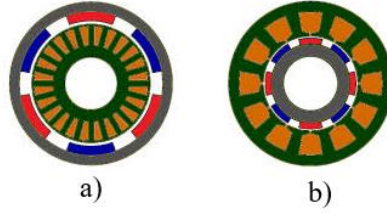
## 2.5. FDAM Sınıflandırılması

FDAM rotor yapısına göre dış rotorlu ve iç rotorlu olmak üzere iki sınıfa ayrılır (Ulu, 2011).

### 2.5.1. Dış Rotorlu FDAM

Yapısal olarak rotorun iç kısımda bulunduğu FDAM'nin aksine, dış rotorlu FDAM'de rotor yapısal olarak dış kısımdadır ve statoru çevreler (Turhan, 2014). Kısaca FDAM'nin döner bileşeni dış kısımdadır. Hub motorlar olarak da adlandırılırlar. Rotora sabitlenmiş

mıknatıslar motorun dış kısmında bulunduğu için mıknatıs sağlığı açısından bakım süreleri oldukça kısadır. İç rotorlu motorlara göre yapısal farklılıkları bulunduğu için, daha yüksek atalet değerlerine ulaşabilmektedir (Turhan 2014). İnsansız hava araçları, elektrikli araçlar, fan, çamaşır makinesi gibi yüksek atalet gerektiren uygulamalarda kullanım yaygındır.



**Şekil 14. Dış Rotor FDAM- İç Rotorlu FDAM**

Şekil 14-a’da görülen dış rotorlu yapı, FDAM’nin yapısal olarak iç rotorlu FDAM’den farkını ifade etmektedir.

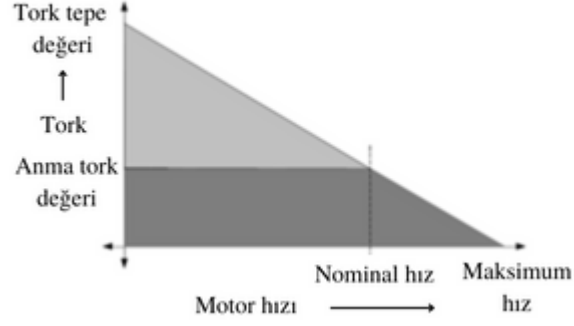
### 2.5.2. İç Rotorlu FDAM

Yapısal olarak rotorun FDAM’nin iç kısmında bulunduğu ve stator tarafından çevrelenen FDAM tipidir (Turhan, 2014). Şekil 14-b’de görüldüğü gibi yapıya sahiptir. Bu tip motorlarda rotor, çevresel etkilerden korunmuş olur. Eylemsizlikleri düşük motorlardır.

## 2.6. Tork Hız Karakteristiği

FDAM’de tepe ve anma olmak üzere iki çeşit tork değeri bulunmaktadır. Sürekli çalışma sırasında FDAM anma tork değerine kadar yüklenebilir. Anma tork değeri FDAM’nin nominal hızına kadar sabit kalır. Nominal hız değerinin üstündeki değerlerde yüklenebilecek tork düşmeye başlayacaktır. Bir FDAM tepe değerinde tork değeri ile yüklenmek istiyorsa, hızından feragat edilmelidir. Şekil 15’de görüldüğü gibi Tepe değerine yaklaşan tork yükleme işlemlerinde FDAM nominal hızından daha düşük hızlarda dönmektedir.

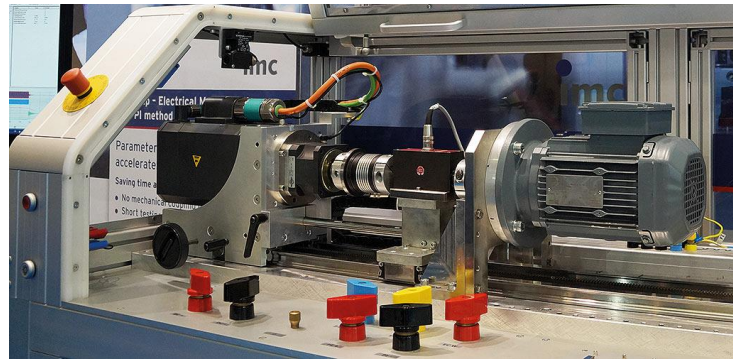




**Şekil 15. FDAM Tork-Hız Eğrisi**

## 2.7. Test Metotları

Bilgisayar ortamında tasarımı gerçekleştirilen FDAM'ye ait faz gerilimleri, faz akımları, yüksüz hız, anma torku gibi parametrelerin doğrulanması amacı ile test düzenekleri geliştirilip, uygulamayı simüle etmesi amacı ile test faaliyeti gerçekleştirilmektedir. Yaygın olarak bu sistemler bir adet karşı yük, bir adet tork sensörü ve motorun kendisini barındırmaktadır. Karşı yük bir motor, elektriksel fren veya bir direnç bankası olabilir. Karşı yük bir motor olarak kullanıldığı takdirde, motorlar aynı mil ile bağlı olacaktır. Bu uygulamada karşı yükün sargılarına uygulanan akım değeri kontrol edilir. Sargılarda artan akım ile karşı yük dönen mili tutmaya çalışacaktır. Tutma etkisi ile FDAM yüklenmiş olacaktır. Karşı yükte elektriksel fren kullanılması da benzer uygulamadır. Şekil 16'da karşı yükün motor olarak tercih edildiği test sistemi görülmektedir.



**Şekil 16. Örnek Motor Test Sistemi**

(Kaynak: Imc, t.y.)

## 2.8. FDAM Avantajları ve Dezavantajları

Fırçalı doğru akım motorları ile kıyaslandığında, FDAM birçok avantaja ve az sayıda dezavantaja sahiptir. En önemli avantajı fırça benzeri bileşenler içermediği için daha az bakım gerektirir ve çalışma ömrü uzundur. Ek olarak, rotorunun sabit mıknatıs içermesi ve düşük atalet değeri ile sahip olduğu hacme oranla daha fazla güç üretmesini sağlar. Benzer avantajlar ve dezavantajlar aşağıda görülmektedir.

### 2.8.1. FDAM Avantajları

1. Hız kontrolü basittir.
2. Fırça bulundurmadığı için bakım süreleri uzundur.
3. Verimleri yüksektir.
4. Yüksek dinamik tepkiye sahiptir.
5. Sessiz operasyon yeteneğine sahiptir.
6. Daha küçük boyutlarda benzer motorlara oranla daha yüksek tork üretirler.
7. Komütasyonu kolaydır.
8. Uygulama alanı geniştir.

### 2.8.2. FDAM Dezavantajları

1. Fırçalı motorlara oranla yüksek maliyete sahiptir.
2. Montaj zorluğu.
3. Karmaşık sürücü topolojisine sahiptir.

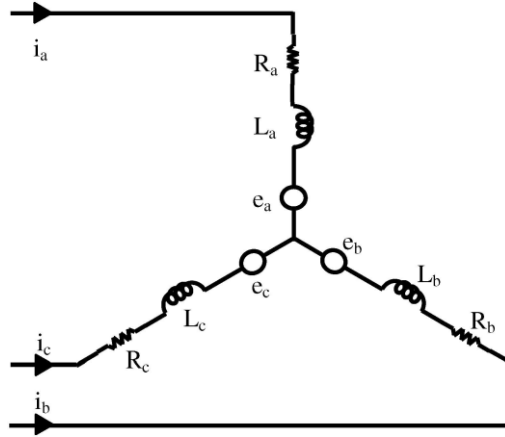
Tezin bu bölümünde, FDAM stator ve rotor yapısı, hız kontrolü, tork kontrolü gibi uygulamalarda kullanılan sensörler, FDAM'nin çalışma prensibi gibi konulara yer verilmiştir. FDAM çeşitleri ve FDAM tork-hız karakteristiği ve detaylarından bahsedilmiştir. Bir sonraki başlıkta FDAM ve FDAM sürücü matematiksel modelinden bahsedilecektir.

### 3. FDAM ve FDAM SENSÖRSÜZ SÜRÜCÜ MATEMATİKSEL MODELİ

Tez çalışmasının bu kısmında yıldız bağlantı biçimine sahip üç fazlı FDAM matematiksel modeline yer verilmiştir. Bunun yanı sıra, hız kontrolü için gerekli kontrolcü altyapısı ve sensörsüz hız kontrolüne yönelik YSA modelinin matematiksel modeli anlatılmıştır.

#### 3.1. FDAM Matematiksel Modeli

FDAM çalışma esnasından indüklenen gerilim trapezoidal bir formda olduğu için matematiksel modelinin d-q uzayında oluşturulması karmaşık işlemler barındırır ve her bir motor parametresinin incelenmesinde yetersiz kalmaktadır (Abdulhadi, 2022). Bu sebepten ötürü faz-değişken yaklaşımından faydalanılmaktadır. Üç fazlı FDAM her bir fazda bulunan birbirlerine seri bağlı direnç, bobin ve gerilim kaynağından oluşan ve her fazın birbirine yıldız bağlantı biçimi ile birleştirildiği Şekil 17’de görüldüğü gibi bir eşdeğer devre yapısına sahiptir.



Şekil 17 Üç Faz FDAM Eşdeğer Elektrik Devresi

Stator fazlarında bulunan her bir direnç ( $R$ ) ve bobin değerinin ( $L$ ) arasındaki ilişki kullanılarak, her bir faza ait terminal gerilimi ( $V$ ) Denklem 3, Denklem 4 ve Denklem 5 kullanılarak hesaplanabilir. Denklemlerde bulunan  $i$  her bir faza ait akım değerini,  $E$  ise, zıt EMK değerini belirtmektedir.

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{\delta i_a}{\delta t} + E_a \quad (3)$$

$$V_b = R_b i_b + L_b \frac{\delta i_b}{\delta t} + E_b \quad (4)$$

$$V_c = R_c i_c + L_c \frac{\delta i_c}{\delta t} + E_c \quad (5)$$

Her bir faza ait stator direnci  $R$  ve faz indüktans değeri  $L$  olarak kabul edilirse ve fazlar arası indüktans değeri  $L_m$ , göz önüne alındığında faz gerilimleri Denklem 6, Denklem 7 ve Denklem 8'de görüldüğü gibi hesaplanacaktır.

$$V_a = R i_a + L \frac{\delta i_a}{\delta t} + L_m \frac{\delta i_b}{\delta t} + L_m \frac{\delta i_c}{\delta t} + E_a \quad (6)$$

$$V_b = R i_b + L \frac{\delta i_b}{\delta t} + L_m \frac{\delta i_a}{\delta t} + L_m \frac{\delta i_c}{\delta t} + E_b \quad (7)$$

$$V_c = R i_c + L \frac{\delta i_c}{\delta t} + L_m \frac{\delta i_a}{\delta t} + L_m \frac{\delta i_b}{\delta t} + E_c \quad (8)$$

Faz gerilimleri matris olarak tekrar yazılırsa; Denklem 9'daki gibi olacaktır.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & L_m & L_m \\ L_m & L & L_m \\ L_m & L_m & L \end{bmatrix} \quad (9)$$

Zıt EMK değeri motorun manyetik akısına ve hızına bağlıdır. FDAM'nin çalışmadığı durumlarda zıt EMK sifıra eşittir. Bundan dolayı da zıt EMK değeri de sifırdır. Rotorun

dönmeye başlamasından itibaren zıt EMK değeri oluşmaya başlar. Zıt EMK'nin görevi, motorun sahip olduğu yüke göre akımı ayarlamaktır. Her bir faza ait zıt EMK değeri Denklem 10, Denklem 11 ve Denklem 12'de görüldüğü gibi hesaplanmaktadır. FDAM'de indüklenen zıt EMK rotorun konumuna bağlı olarak trapezoidaldir. Zıt EMK, rotor konumunun bir fonksiyonudur. Motorun mekanik hızına ( $\omega_m$ ) ve  $k_e$  zıt EMK sabitine (V/rad/s) bağlıdır.

$$E_a = k_e \omega_m f(\theta) \quad (10)$$

$$E_b = k_e \omega_m f\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (11)$$

$$E_c = k_e \omega_m f\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (12)$$

Trapezoidal formda olan zıt EMK'ye ait fonksiyon Denklem 13'te görüldüğü gibidir.

$$f = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta \leq \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right), & \frac{2\pi}{3} \leq \theta \leq \pi \\ 1, & \pi \leq \theta \leq \frac{5\pi}{3} \\ -1 + \frac{6}{\pi}\left(\theta - \frac{5\pi}{3}\right), & \frac{5\pi}{3} \leq \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (13)$$

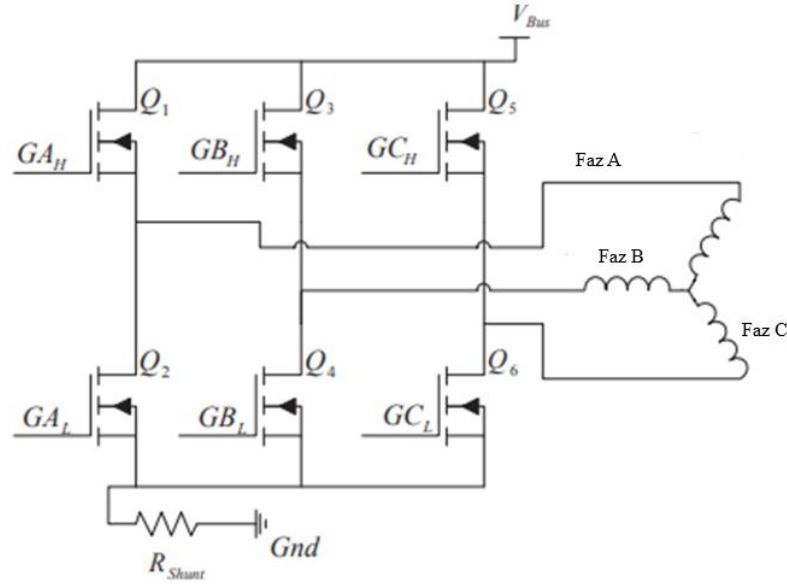
Motora ait mekanik parametreler kullanılarak, FDAM'ye ait tork parametresi Denklem 14 kullanılarak hesaplanabilir.

$$T_e - T_L = J \frac{\delta \omega_m}{\delta t} + \beta \omega_m \quad (14)$$

Bu ifadede  $T_e$  elektromanyetik torku,  $T_L$  torku (Nm),  $J$  rotor ve buna bağlı yükün atalet momentini ( $kgm^2$ ),  $\beta$  ise; FDAM'ye ait sürtünme katsayısıdır.  $T_e$ , motora ait elektriksel gücün ( $P_e$ ), mekanik hıza ( $w_m$ ) oranıdır.

### 3.2. FDAM Sürücüsü ve Hız Kontrolcüsü

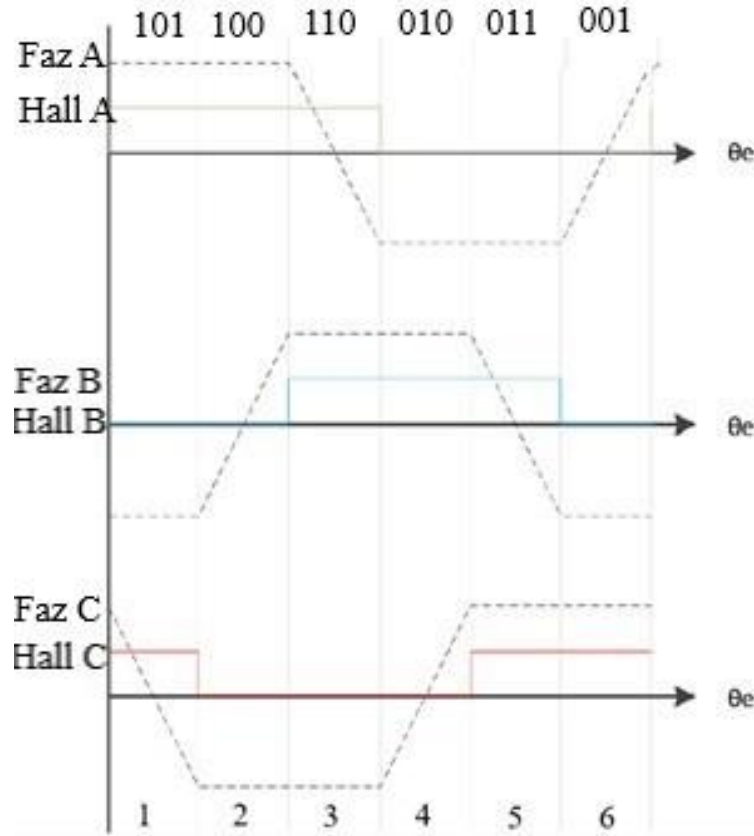
FDAM kontrolü motor fazlarının enerjilendirilmesi prensibine dayanmaktadır (Akin vd., 2011). Üç faz FDAM'nin kontrolü için altı adet güç anahtarı içeren evirici devresi kullanılmaktadır. Her bir faz için iki adet güç anahtarı bulunmaktadır. Fazlar eviriciye ortak noktalarından bağlanmaktadır. Şekil 18'de eviriciye ait elektrik devresi görülmektedir.



Şekil 18. Üç Faz Evirici Devre

FDAM'nin çalıştırılması için stator sargılarının belirli bir sıra ile enerjilendirilmesi gerekmektedir (Gadewar vd., 2017). Hangi sargının enerjilendirileceğine karar verilmesi için motora ait rotor pozisyonunun tespit edilmesi gerekmektedir (Trong vd., 2015). Rotor pozisyonunun tespit edilmesi için statora yerleştirilen alan etkili sensörler ve sensörsüz

kontrol yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir (Khambhadiya vd., 2021). Dönüş esnasında, alan etkili sensöre yaklaşan motor kutbu, alan etkili sensörün lojik 1 ya da lojik 0 sinyal bilgisi verecektir. Alan etkili sensör rotorun hangi aşamada olduğunu belirleyip, evirici devrede kullanılmak üzere anlamlandırılması için mantık devresine göndermektedir (Topal, 2019). Şekil 19’da görüldüğü gibi, motorun bir tur dönüşünde altı adet kombinasyon bulunmaktadır. Her bir bölgede ilgili fazlar alan etkili sensör verisine göre enerjilendirilmekte ve bir sonraki adıma kadar enerji verilmeye devam etmektedir. Bu durumda alan etkili sensörden gelen bilgiye göre akımın polaritesi değişecektir. Akımın polarite değişimi IGBT güç anahtarları ile sağlanmaktadır. Her komütasyon sekansı üç fazdan bir tanesini pozitif polarite ile diğerini ise negatif polarite ile enerjilendirmektedir. üç fazdan bir tanesi ise enerjilendirilmemektedir. Enerjilenen fazlara bağlı olarak motorun hızı kontrol edilmektedir. Fazların enerjilendirilme sekansı için rotor pozisyonunun tespit edilmesi önemlidir.



Şekil 19. Hall Sensörü ve Zıt EMK Değerleri

**Tablo 3. Anahtarlama Sırası**

Anahtarlama Aralığı	Sekans Sırası	Alan Etkili Sensör			Açılacak Anahtarlar		Faz Akım Bilgisi		
		Ha	Hb	Hc			Ia	Ib	Ic
0°-60°	1	1	0	0	Q1	Q4	+	-	NC
60°-120°	2	1	1	0	Q1	Q6	+	NC	-
120°-180°	3	0	1	0	Q3	Q6	NC	+	-
180°-240°	4	0	1	1	Q3	Q2	-	+	NC
240°-300°	5	0	0	1	Q5	Q2	-	NC	+
300°-360°	6	1	0	1	Q5	Q4	NC	-	+

FDAM'nin kontrolünün gerçekleştirilmesi için sensörlü uygulamaların yanı sıra sensörsüz kontrol yöntemlerinden de faydalanılmaktadır. Altı adımlı FDAM kontrolünde, anahtarlama sekansı, kontrolcünün 60° adımlar ile güç anahtarlarının altı aşamada 360°'yi tamamlaması beklenmektedir. Her bir aralıkta, üç fazdan uygun olan ikisinin enerjilendirilmesi beklenmektedir. Tablo 3'de görüldüğü gibi, anahtarlama sekansı, sensör verisi ilişkisi ve faz polarite ve anahtarlanacak güç anahtarı sekansı belirtilmiştir. Sensörsüz kontrol uygulamasında, alan etkili sensörlerden gelen verinin yerini kullanılan yöntemlere göre FDAM tarafından sağlanan veriler sağlamaktadır.

FDAM sensörsüz kontrol uygulamaları, motor tarafından indüklenen zıt EMK kuvvetinin kullanılmasına dayanmaktadır. Sensörsüz hız kontrol yöntemleri doğrudan zıt EMK algılama ve dolaylı yoldan zıt EMK algılama olmak üzere iki başlıkta incelenmektedir (Pindoriya vd., 2016). Bu iki yöntem kendi içinde aşağıdaki listede görülen yöntemlere ayrılmaktadır.

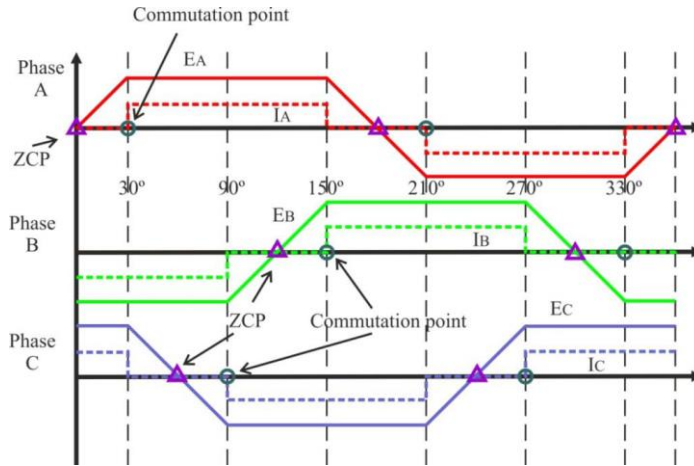
- Doğrudan zıt EMK algılama
  - PWM yöntemleri
  - Zıt EMK sıfır geçiş noktası belirleme (SGN)
- Dolaylı yoldan zıt EMK algılama
  - Serbest geçiş diyot iletimi
  - Zıt EMK 3. harmonik gerilim algılaması
  - Zıt EMK integrasyonu yöntemi

Bu yöntemlerden SGN ve zıt EMK integrasyonu yöntemi gerçek hayatta yaygın olarak kullanılmaktadır.



### 3.2.1. Zıt EMK Sıfır Geçiş Noktası Belirleme

Zıt EMK sıfır geçiş belirleme yöntemi, ölçülen faz gerilimleri arasındaki farkın belirlenmesi temel almaktadır (Damodharan ve Vasudevan, 2010). Bu yöntemde faz gerilimleri arasındaki fark yükseltilmiş zıt EMK değerinin sıfır geçiş noktasında elde edilmesini sağlamaktadır. Bir FDAM, üç faz eviricinin anahtarlama sekansına göre motora ait ilgili iki faz enerjilendirilir. Sıfır geçiş belirleme yöntemi kullanılarak  $30^\circ$  adımlar ile enerjilendirilmemiş faz, akım değeri ile belirlenecektir. Ani hız değişikliklerinde bu yöntem durumdan fazla etkilenmemektedir (Pindoriya vd., 2016). Üç faz evirici devrenin anahtarlama işlemleri sonrası, faz gerilimleri içerisinde yüksek harmonikler oluşmaya başlayacaktır. Harmonik oluşumunun sistem üzerindeki etkisini azaltılması adına, alçak geçiren filtre (LPF) kullanılmalıdır. Yüksek hızlarda faz gerilimi frekansı artacaktır. LPF'nin kullanılması SGN yöntemi kullanılan uygulamadaki maksimum hızı sınırlamaktadır.



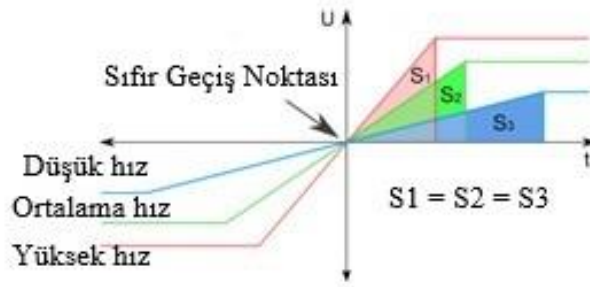
**Şekil 20. Sıfır Geçiş Noktası Belirleme, Suskun Faz**

(Kaynak: Gamazo-Real vd., 2010)

Şekil 20'de görüldüğü gibi suskun fazın tespit edilmesi, faz akımının sıfır olduğu noktanın tespit edilmesi ile sağlanmaktadır (Damodharan ve Vasudevan, 2010). Düşük hızlarda FDAM'nin hız kontrolü zor bir uygulamadır ve faz gerilimleri bolca gürültü barındırmaktadır. Gürültü içeren faz gerilimi motorun anlık hızının artıp azalmasına sebep olmaktadır. Artıp azalan hız, komütasyon noktalarının anlık değişimine sebep olmaktadır. Bu da SGN ile gerçekleştirilen yöntemin pozisyon hatalarına sebebiyet vermektedir.

### 3.2.2. Zıt EMK İntegrasyonu

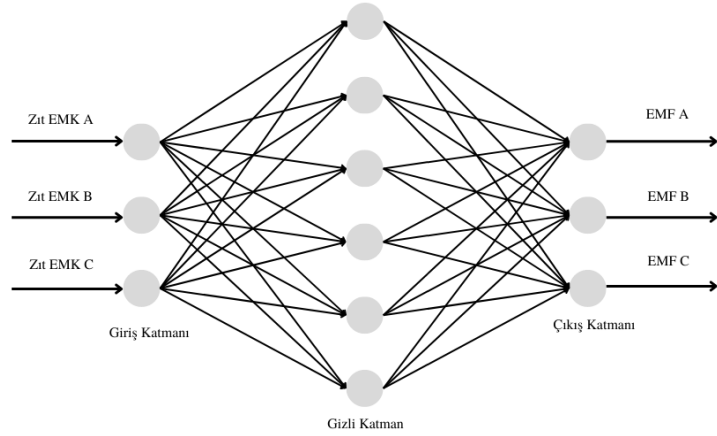
Zıt EMK integrasyonu tekniği enerjilendirilmemiş motor fazına, zıt EMK entegrasyonu ile komütasyon sekansının belirlenmesini temel almaktadır (Lovas, 2012). Zıt EMK integrasyonu yönteminin temel karakteri, integrasyon alanının enerjilendirilmeyen fazın zıt EMK'sinin SGN'den geçmesi ile başlamasıdır ve SGN tüm hız değerlerinde yaklaşık aynı noktadır (Lovas, 2012). Zıt EMK'nin önceden tanımlanmış eşik değerine ulaşması ile komütasyon noktasına bağlı olarak ilgili fazlar enerjilendirilmektedir. Şekil 21'de görüldüğü gibi SGN tüm hızlarda aynıdır. S1, S2 ve S3 integrasyon alanlarını belirtmektedir. Zıt EMK entegrasyon yöntemi, sensörlü kontrol yöntemi ile karşılaştırıldığında rotor hızından bağımsızdır ve hız değişimlerine tepkisi iyidir ve istenilen hız değerinde hata oranları düşüktür (Attar vd., 2021). Lakin anahtarlama kaynaklı gürültüden etkilenebilirler ve pozisyon hatalarına sebep olabilirler.



Şekil 21. Zıt EMK integrasyon ve sıfır geçiş noktası

### 3.3. Zıt EMK Elde Edilmesi ve Yapay Sinir Ağı Modeli

FDAM hız ve pozisyon kontrolü günümüzde yaygın kullanılan bir uygulamadır. FDAM'nin hız kontrolünün gerçekleştirilmesi için sensör verilerinden faydalanılmak yerine, zıt EMK değerinden faydalanılmıştır. Zıt EMK değeri YSA modelinde eğitilerek üç faz eviricinin anahtarlama sekansı belirlenmiştir.

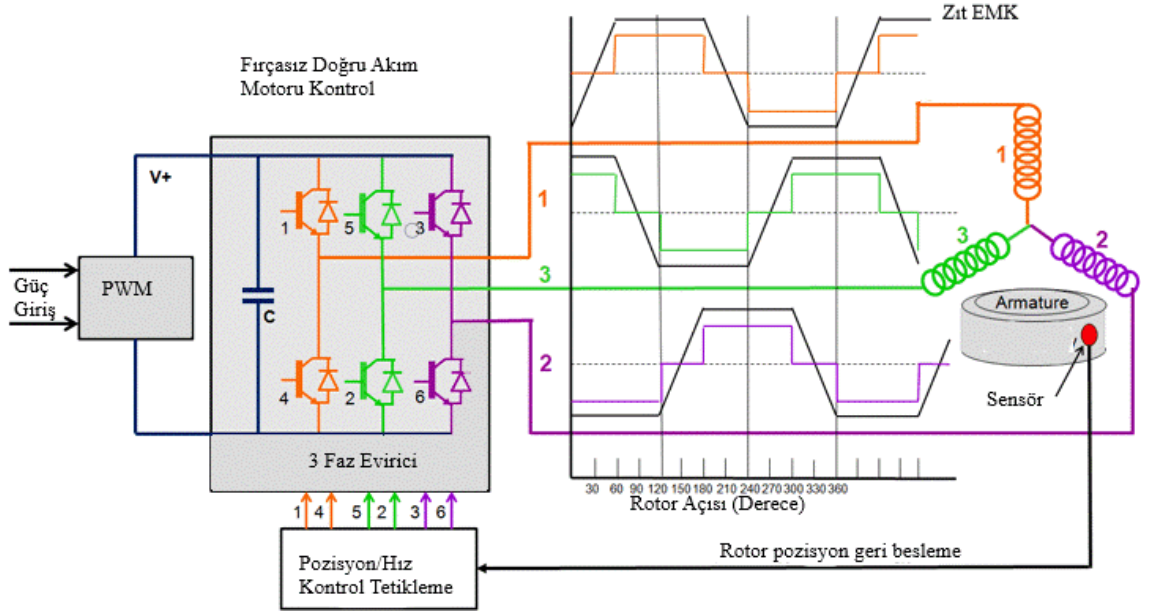


**Şekil 22. YSA Modeli**

Şekil 22’de görüldüğü gibi, giriş katmanında bulunan Zıt EMK değerleri, tamamlanan eğitim sonrası, anahtarlama sekansı için referans EMF değerleri üretilerek FDAM’nin hız kontrolü sağlanmaktadır. Bir FDAM’nin hız kontrolü uygulamasında, referans hız değerine bağlı olarak güç anahtarlarının açılıp kapanma sırası değişmekte ve sistem istenilen hıza ulaşmak için ilgili fazları sırasıyla enerjilendirmektedir. FDAM’nin A fazına ait zıt EMK değerinin elde edilmesi için Denklem 15’te görülen ilişkiden faydalanılabilir.

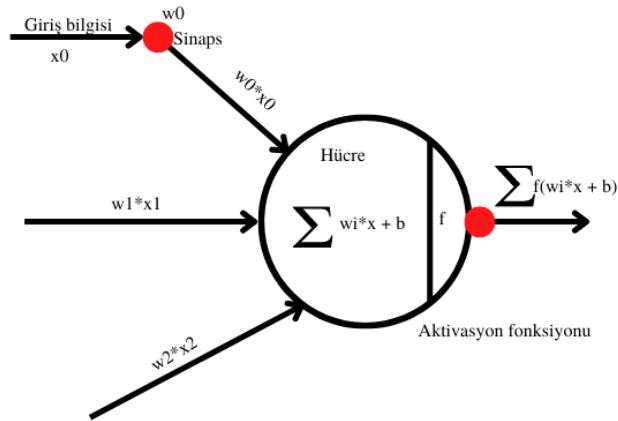
$$E_a = k_e \omega_m f(\theta) \quad (15)$$

$k_e$  FDAM’ye ait zıt EMK katsayısı (V/rpm),  $\omega_m$  dönüş hızı (rpm),  $\theta$  rotor açısını belirtmektedir. Bu ilişkiden yola çıkarak dönüş hızı artan bir FDAM’nin  $E_a$  değeri artar. FDAM’de trapezoidal formda olan zıt EMK  $120^\circ$  faz farkına sahiptir. FDAM’den elde edilen pozisyon bilgisine göre güç anahtarları kontrol edilmekte ve trapezoidal formda olan zıt EMK değeri Şekil 23’de görüldüğü gibi elde edilmektedir. FDAM’de zıt EMK değerinin trapezoidal formda olması sargı şekli gibi etmenlerden kaynaklanmaktadır.



**Şekil 23. FDAM Zıt EMK Formu**

YSA, öğrenme, bilgi türetebilme gibi yetenekleri insandan bağımsız olarak gerçekleştirebilmek amacı ile geliştirilen algoritmalarıdır. YSA'da öğrenme işlemi örnekler kullanılarak gerçekleştirilir. Öğrenme esnasında belirtilen giriş çıkış verileri ve kurallara göre eğitim gerçekleştirilir. YSA nöronlardan oluşan giriş, gizli ve çıkış olmak üzere katmanlardan meydana gelir Şekil 24'de örnek nöron yapısı görülmektedir.



**Şekil 24. Nöron Yapısı**

Nöronlar giriş bilgisini üretilen çıkış bilgisine etkisini ayarlamak adına ağırlıklar ile çarpılır ve bias ile toplanır. Biaslar giriş sinyalinin sıfırdan farklı olmasını sağlar. Giriş

sinyalleri 0 olduğu taktirde öğrenme gerçekleşmez. Bu işlem sonrası aktivasyon fonksiyonuna iletilen bilgiler çıkış değeri üretir ve bilgi bir sonraki katmana iletilir. Tipik bir YSA, giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olmak üzere üç bölümden oluşur. Denklem 16’da tipik bir yapay sinir ağında nörona gelen  $x$  verisinin  $w$  ağırlık değeri ile çarpılıp,  $b$  bias değeri ile toplanarak aktivasyon fonksiyonuna ( $a$ ) iletilmeden önce gerçekleştirilen matematiksel işlem görülmektedir.  $z$  ise ilgili nöronda gerçekleştirilen işlemler sonrası çıkış değerini belirtmektedir. Denklem 17’de ise aktivasyon fonksiyonu işlemi görülmektedir.  $\sigma$  aktivasyon fonksiyonlarından sigmoid fonksiyonunu belirtmektedir.

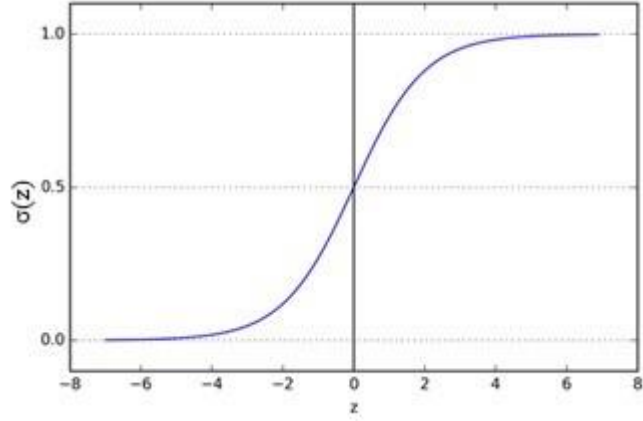
$$z = w \cdot x + b \quad (16)$$

$$a = \sigma(z) \quad (17)$$

Aktivasyon fonksiyonları, fonksiyonun tipine bağlı olarak nöron çıkışında verinin tipini belirlemek için kullanılır. Doğrusal ve doğrusal olmayan olmak üzere iki tip aktivasyon fonksiyonu bulunmaktadır. Sigmoid, Tanh, ReLU ve Leaky ReLU bunlardan en yaygın kullanılan tiplerdir.

### 3.3.1. Aktivasyon Fonksiyonu Tipleri

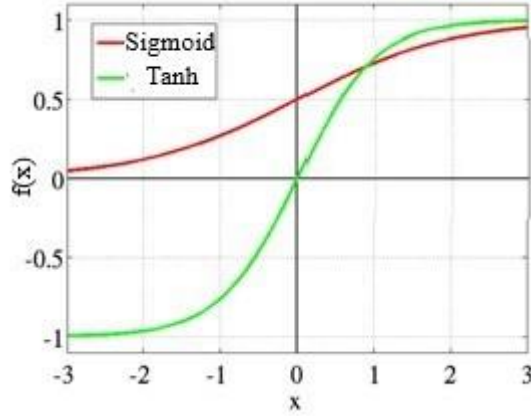
- Sigmoid fonksiyonu: Olasılıksal tahmin uygulamaları amacı ile kullanılmaktadır. Çıkış verisi 0 – 1 arasındadır. Şekil 25 ve Denklem 17’de fonksiyona ait karakteristik görülmektedir.



**Şekil 25. Sigmoid Aktivasyon Fonksiyonu**

$$\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (17)$$

- Tanh fonksiyonu: Sigmoid fonksiyonunun gelişmiş versiyonudur. Sigmoid fonksiyonundan farklı olarak negatif değerlerdeki verilerin kullanılması daha verimlidir. Veriler -1 – 1 arasındadır.

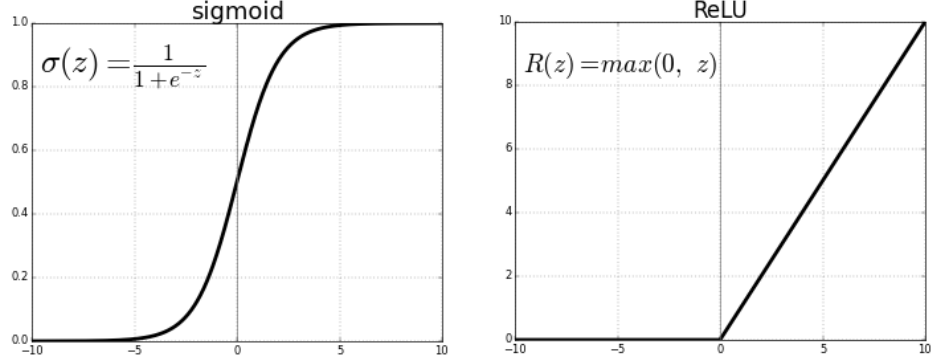


**Şekil 26. Tanh Aktivasyon Fonksiyonu**

$$f(x) = \tanh x = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (18)$$

Şekil 26 ve Denklem 18'de Tanh fonksiyonuna ait karakteristik görülmektedir.

- ReLU ve Leaky ReLU fonksiyonu: ReLU evrişimli sinir ağları (CNN) ve derin öğrenme (DL) uygulamalarında en çok kullanılan aktivasyon fonksiyonu tipidir.



**Şekil 27. ReLU Aktivasyon Fonksiyonu**

ReLU fonksiyonunda sıfırdan küçük değerler 0 kabul edilir. Bu algoritmanın veri setine göre eğitim kapasitesini düşürür.

$$R(z) = \max(0, z) \quad (19)$$

Şekil 27 ve Denklem 19'da ReLU fonksiyonunun karakteristiği görülmektedir.

Zıt EMK değerlerinden FDAM'ye ait hız bilgisinin tahmin edilmesi için, tek katmanlı sinir ağından faydalanılmıştır. Tek katmanlı sinir ağları mantık devrelerindeki lojik kapılar gibi düşünülebilir. Yapılan çalışmada yapay sinir ağı giriş katmanı stator zıt EMK değerini, çıkış katmanı ise evirici devre kapıları için anahtarlama sekansını içermektedir. Bir nörona gelen giriş verisi ve çıkış verisi ilişkisinden faydalanılarak aşağıdaki Denklem 20'ye ulaşılmaktadır. Denklem 20 gizli katmanda bulunan birinci nöronun giriş verisi ile ilişkisini belirtmektedir.  $E_a$  A fazına ait zıt EMK değeri,  $w$  ağırlık ve  $b$  bias değerini belirtmektedir. Ağırlık değeri ile çarpılan zıt EMK değeri, bias ile toplanılarak aktivasyon fonksiyonuna iletilmektedir. Aktivasyon fonksiyonu olarak Tanh fonksiyonundan faydalanılmıştır.

$$z = E_a * w + b \quad (20)$$

İlgili değerler aktivasyon fonksiyonuna yerleştirildiği zaman Denklem 21 elde edilecektir.

$$g(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}} \quad (21)$$

İlgili değerler  $z$  yerine konulduğu takdirde Denklem 22'de görüldüğü gibi olacaktır.

$$g(z) = \frac{e^{(E_a w + b)} - e^{-(E_a w + b)}}{e^{(E_a w + b)} + e^{-(E_a w + b)}} \quad (22)$$

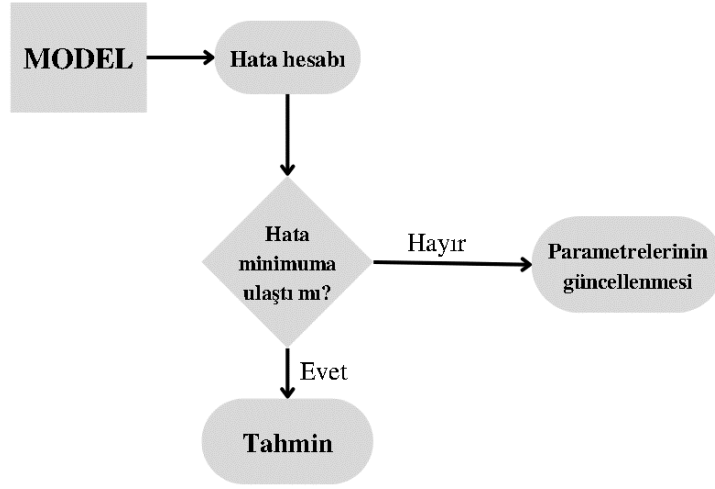
İlgili işlemler nörona gelen her veriye uygulanmaktadır. YSA modeli çıkışında ise evirici devreye ait anahtarlama sekansı elde edilmektedir.

YSA modeli eğitim aşamasında FDAM'ye ait verilerin toplanması işlemi gerçekleştirilmiştir. Eğitim aşaması öncesi alan etkili sensör gerçekleştirilen hız kontrolü uygulamasında anahtarlama sekansını oluşturan veriler YSA modelinde test verisi olarak kullanılmıştır. YSA giriş verisini oluşturan zıt EMK değerleri, model içerisinde alan etkili sensör verileri ile karşılaştırılarak hata oranı hesaplanmış ve algoritmanın hata payının minimize edilmesi işlemine kadar eğitim devam etmiştir.

Eğitim, ağırlık ve bias verilerinin rastgele oluşturulması ile başlar. Hesaplanan hata payına göre, ağırlık ve bias verileri güncellenir ve hata payı azaltılmaya çalışılır.

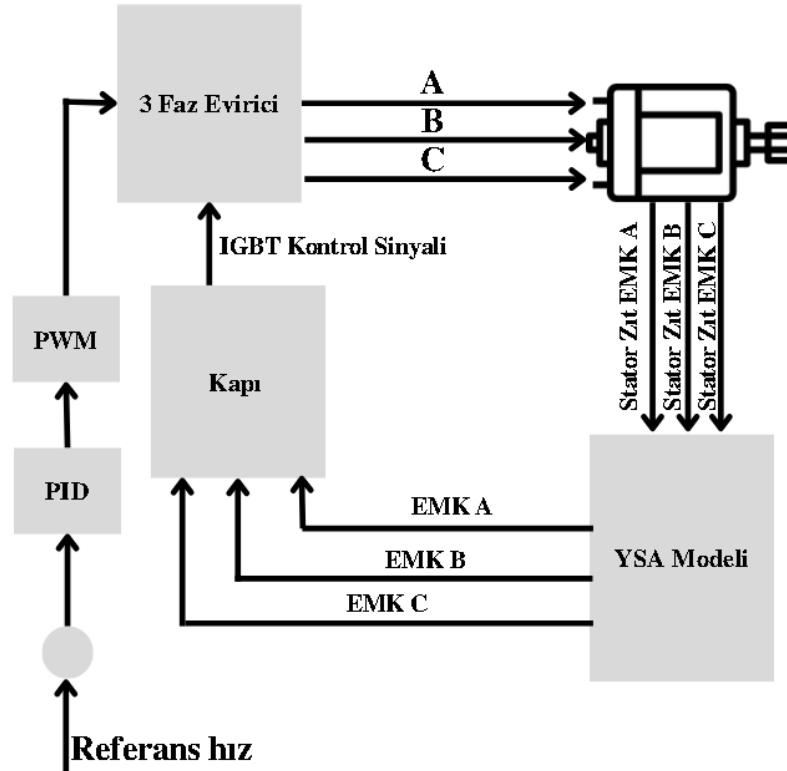
Geri yayılım yöntemi, eğitim aşamasında kullanılan ağırlık değerlerini denetleyerek model hata payını denetler. Bir YSA eğitime başlatılırken rastgele ağırlık değerleri ile başlatılır. Eğitim boyunca ağırlık değeri güncellenir ve hatanın en düşük olduğu nokta aranır. Şekil 28'de sistem akışı görülmektedir.





**Şekil 28. Geri Yayımlı Akış Diyagramı**

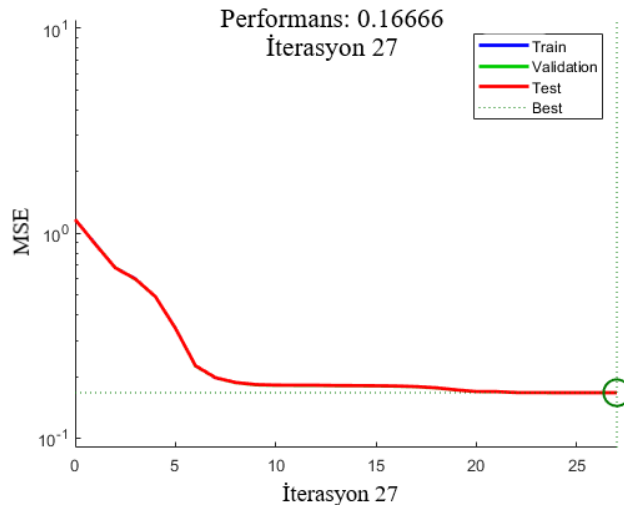
Hata oranının azaltılması ile tahmin işlemi gerçekleştirilir. Tahmin işlemi sonrası elde edilen veriler, evirici devrenin anahtarlama sekansını oluşturmaktadır. İlgili sistem ait sistem şeması Şekil 29’da görüldüğü gibidir.



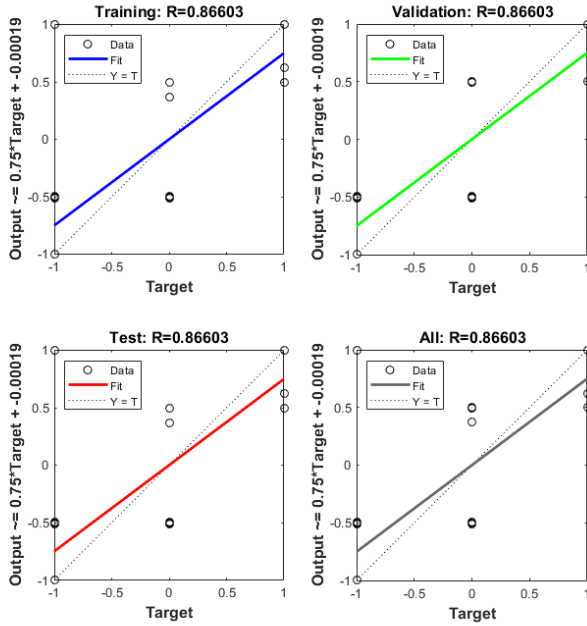
**Şekil 29. Zıt EMK YSA Sistem**

### 3.3.2. YSA Modeli ve Performans Kriterleri

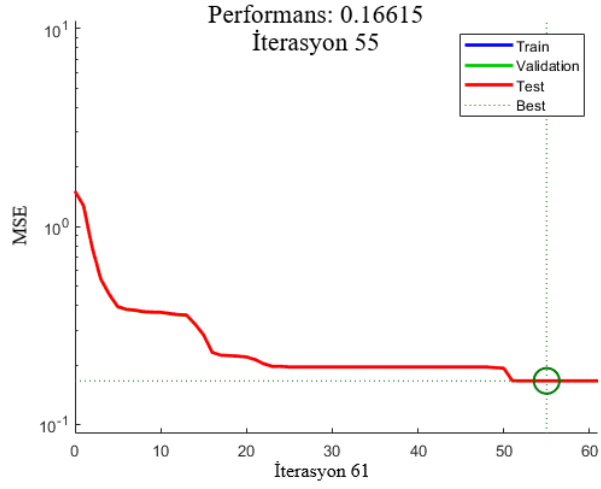
FDAM'nin sensörsüz hız kontrolü uygulamasının gerçekleştirilmesi aşamasında motora ait zıt EMK değerleri YSA modelinde giriş değerlerini, alan etkili sensöre sahip motor üzerinden toplanan IGBT kapı sinyalleri ise, modelin test verilerini oluşturmaktadır. YSA modeli giriş, gizli ve çıkış katmanlarından oluşmaktadır. Gizli katmanda bulunan nöron sayısına karar vermek amacı MSE (Mean Squared Error) sonuçları karşılaştırılmıştır.



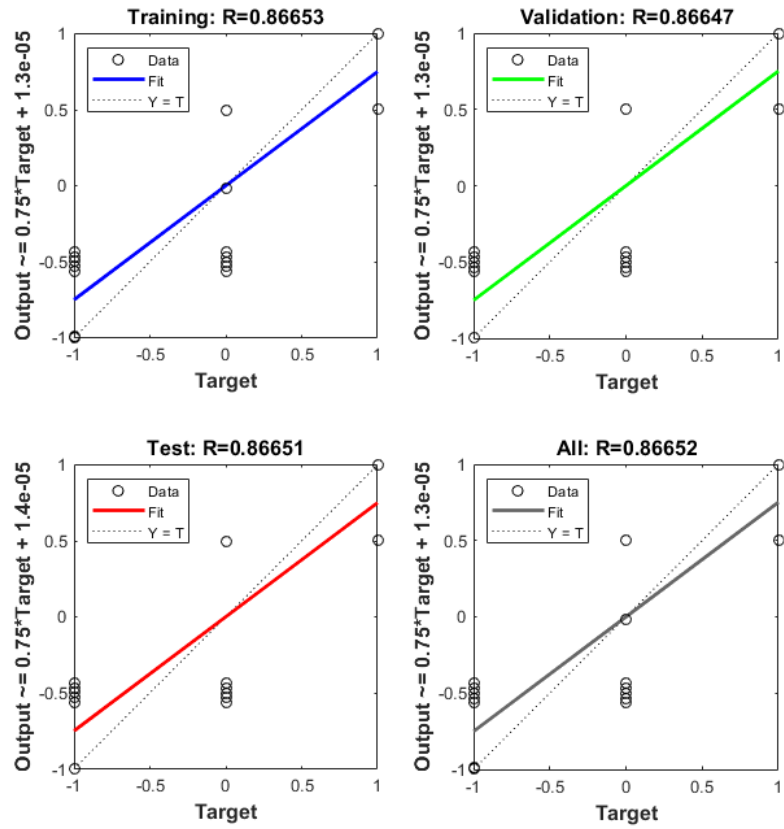
Şekil 30. 3 Nöron Gizli Katman Performans



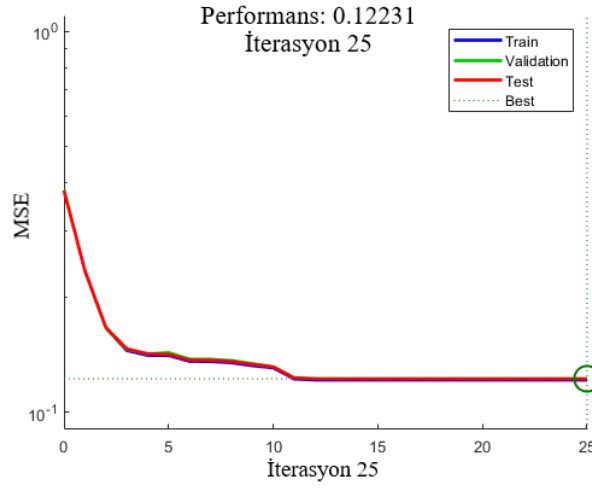
Şekil 31. 3 Nöron Gizli Katman Doğruluk/Başarım Yüzdesi



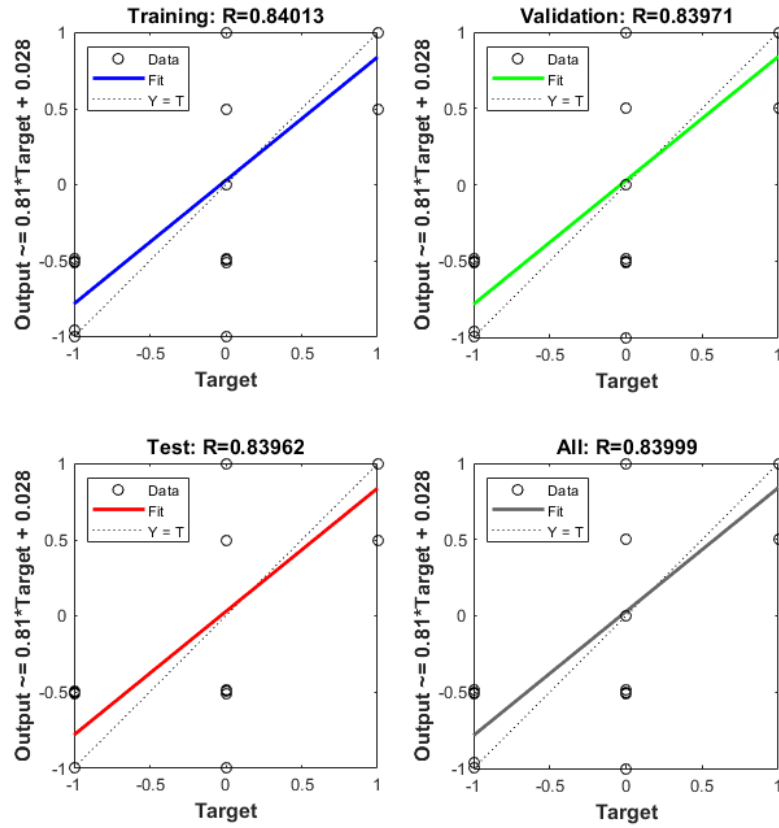
Şekil 32. 5 Nöron Gizli Katman Performans



Şekil 33. 5 Nöron Gizli Katman Doğruluk/Başarım Yüzdesi



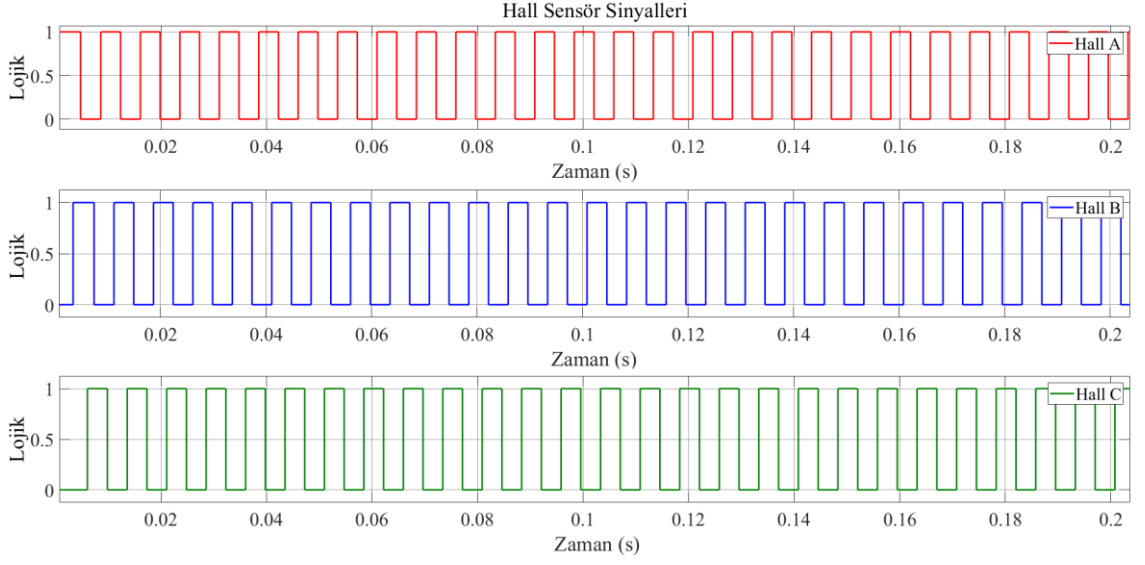
**Şekil 34. 10 Nöron Gizli Katman Performans**



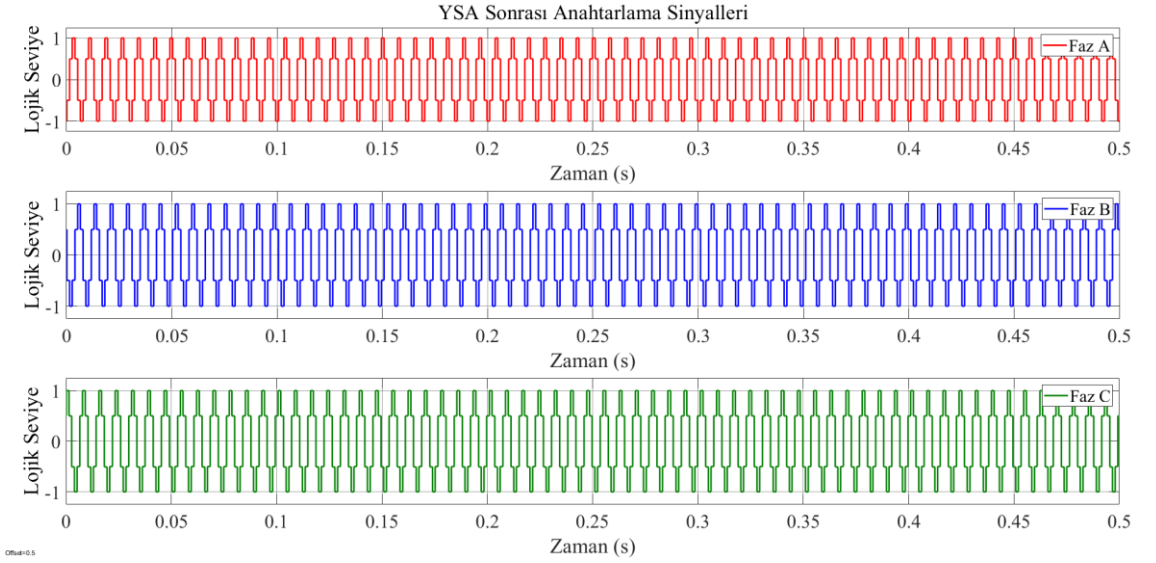
**Şekil 35. 10 Nöron Gizli Katman Başarım/Doğruluk Yüzdesi**

3, 5 ve 10 adet gizli nörona sahip modeller üzerinde eğitim gerçekleştirilmiştir. Şekil 31, Şekil 33 ve Şekil 35 ilgili modellerin başarımlarını içermektedir. Şekil 30, Şekil 32

ve Şekil 34 göz önünde bulundurulduğunda, performans kriteri olarak belirlenen MSE sonucuna göre 10 nörona sahip model kullanılmasına karar verilmiştir.

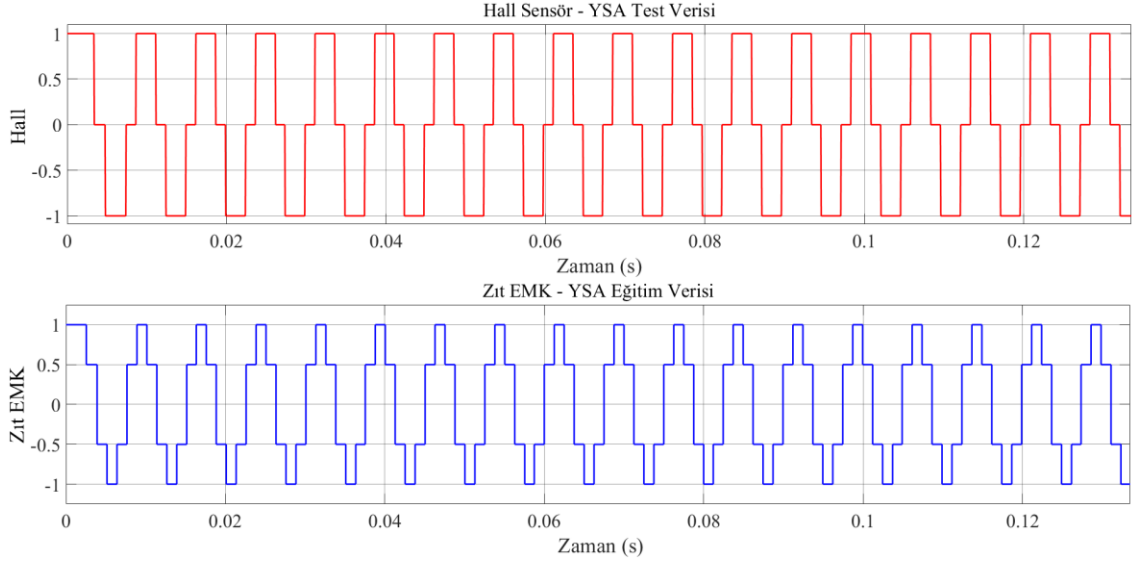


**Şekil 36. Alan Etkili Sensör Kapı Sinyalleri**



**Şekil 37. Zıt EMK Kapı Sinyalleri**

Şekil 36 ve Şekil 37 sırası ile sensöre sahip bir FDAM'ın kapı sinyallerini ve YSA tabanlı FDAM'ın kapı sinyallerini belirtmektedir. YSA modeli sonrası anahtarlama sıklığı artmıştır.

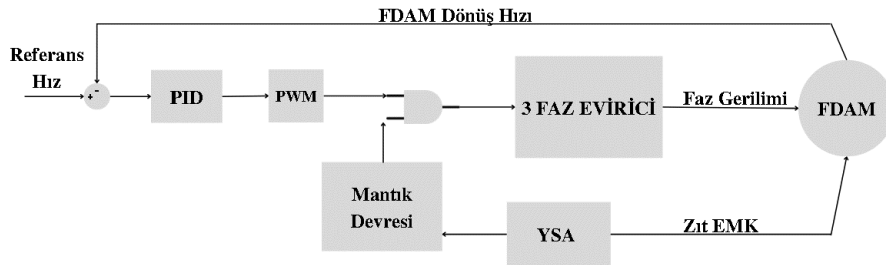


**Şekil 38. Eğitim Verisi-Test Verisi**

Şekil 38’de YSA modelinde alan etkili sensör verisinden elde edilen test verisi ve model sonrası zıt EMK değeri görülmektedir. Zıt EMK değeri üç faz evirici devrede IGBT’lerin anahtarlama sekansını oluşturmaktadır.

### 3.4. PID Hız Kontrolcüsü

Üç faz evirici devresinde, kapalı devre hız kontrolü için rotor pozisyonu zıt EMK değeri ile algılanmıştır. Komütasyon işlemleri için ilgili 2 faz enerjilendirilme işlemi gerçekleştirilmiştir. 2 fazın sürekli enerjilendirilmesini engellemek adına hız hatası algılanmış ve PWM (Pulse Width Modulation) tekniği ile desteklenmiştir. YSA tahmin algoritması, PWM sinyali ile desteklenmiş ve motorun sahip olduğu hızın referans hıza göre davranması için ilgili devre oluşturulmuştur. Şekil 39 sistem şemasını belirtmektedir.



**Şekil 39. Hız Kontrolü Sistem Şeması**

FDAM hız kontrolü uygulaması gerçekleştirilmesi kapalı döngü, ya da geri besleme temelli olarak gerçekleştirilir. Motorun hızı stator sargı fazlarına uygulanan gerilimin regülasyonu ile kontrol edilmektedir. Regülasyon işlemi uygulanan gerilimin PWM işlemi ile kontrol etmesine dayanmaktadır. Tez çalışmasında gerçekleştirilen modelin amacı alan etkili sensörler yerine stator zıt EMK değerlerinin anahtarlama sekansını belirlemek ve PWM ile stator gerilim regülasyonunu sağlamaktır. Böylece FDAM kontrol işlemi gerçekleştirilecektir. Referans hız ile FDAM hızı arasındaki hata sinyali yükseltılarak PWM sinyalini oluşturmaktadır. PWM sinyali ile stator zıt EMK sinyali anahtarlamaı oluşturmaktadır. FDAM hızı aşağıdaki ilişkiden hesaplanmaktadır.

$$w_m = \frac{\delta\theta}{\delta t} \quad (23)$$

Denklem 23'te görüldüğü gibi  $\theta$  rotorun mekanik açısını,  $w$  (rad/s) ise motor dönüş hızını belirtmektedir.

Aşağıdaki tabloda YSA sonrası anahtarlama sekansı görülmektedir.

**Tablo 4. YSA Anahtarlama Sekansı**

YSA Sonrası			Açılacak Anahtarlar					
Ea	Eb	Ec	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1	1	0	0	0	1	1	0
-1	1	0	0	1	1	0	0	0
-1	0	1	0	1	0	0	1	0
1	0	-1	1	0	0	0	0	1
1	-1	0	1	0	0	1	0	0
0	1	-1	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0

PID kontrolcüsü hız hatasından yola çıkarak referans anahtarlamaı oluşturur ve YSA ile mantık devresinde hıza göre referans anahtarlamaı oluşturmaktadır. FDAM hızının referans hıza göre hata ilişkisi Denklem 24'e göre hesaplanır.

$$e(t) = w_{ref} - w_m \quad (24)$$

Kontrolcü olarak PID seçilmesinin sebebi, zamana bağlı hata değerinin gözlemlenmek istemesidir. Ayrıca anahtarlama frekansının yüksek olması sebebiyle PID kontrolcüsünün değişimlere hızlı tepki vermesi özelliklerinden faydalanılmak istenmiştir (Rao ve Mishra, 2014). PID kontrolcü katsayıları aşağıda görüldüğü gibi elde edilmektedir. Denklem 25 oransal bloğu, Denklem 26 ise integral bloğunu ifade etmektedir.

$$P = K_p \cdot e(t) \quad (25)$$

$$I = K_i \int_0^t e(t) \delta t \quad (26)$$

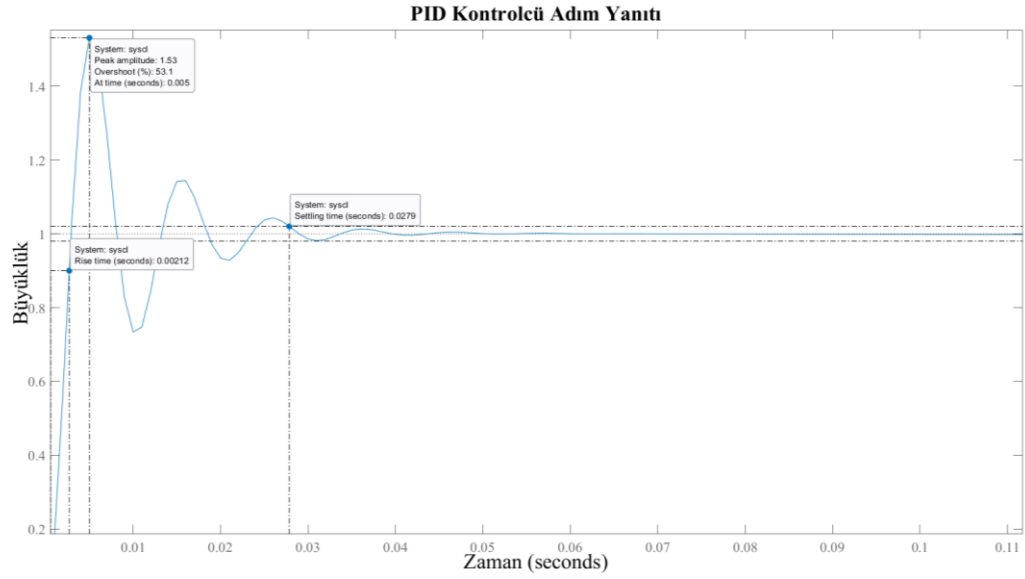
$$D = K_d \frac{\delta e(t)}{\delta t} \quad (27)$$

Denklem 27’de türevsel blok ilişkisi görülmektedir. Kontrolcü çıkışı ise Denklem 28’de ifade edilmiştir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) \delta t + K_d \frac{\delta e(t)}{\delta t} \quad (28)$$

Sistem modellemesi öncesinde PID katsayıları varsayımsal  $K_p$  katsayısı 10,  $K_i$  katsayısı 1 ve  $K_d$  0.1 kabul edilmiştir. Sistemin adım cevabı göz önünde bulundurularak sistem benzetim çalışmalarında ilgili katsayılar kullanılmıştır.





**Şekil 40. Başlangıç PID Katsayılarının Adım Cevabı**

Şekil 40’de görüldüğü gibi adım cevabı göz önünde bulundurulduğunda 2ms yükselme zamanı ve 20ms oturma zamanı kriteri göz önünde bulundurularak başlangıç katsayılarına karar verilmiştir.

Hız kontrolü uygulamasında P, PI ve PID kullanılan kontrolcü davranışlarının karşılaştırılması aşağıdaki tabloda görülmektedir.

**Tablo 5. Kontrolcü Karşılaştırma Tablosu**

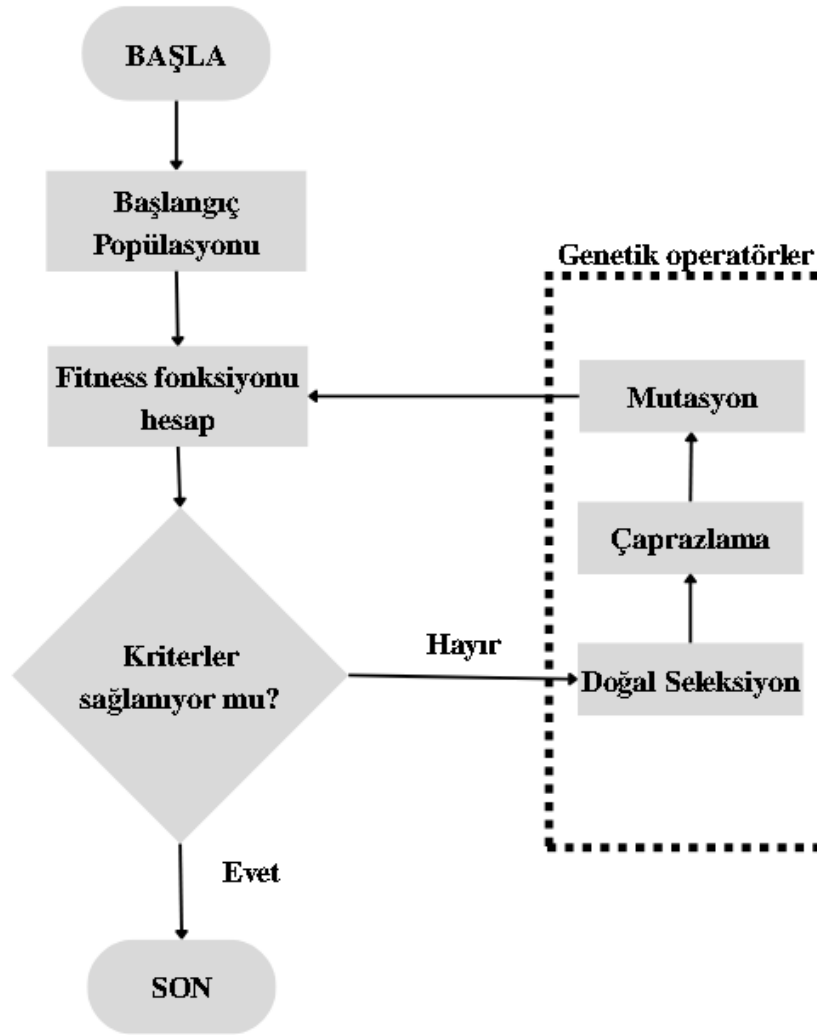
Parametre	P	PI	PID
Yükselme zamanı	Azalır	Azalır	Düşük etki
Aşma	Artar	Artar	Düşük etki
Oturma zamanı	Düşük etki	Artar	Düşük etki
Kalıcı durum hatası	Azalır	Oldukça etkilidir	Etkisizdir
Kararlılık	Etkisiz	Etkisiz	Kd değerine bağlı olarak etkilidir

### 3.5. Genetik Algoritma ile PID Parametrelerinin Optimizasyonu

Genetik algoritmalar, sistem performansının geliştirilmesi amacı ile ilgili matematiksel modellerin kesin olarak belirlenemediği veya öngörülemediği durumlarda makul sonuçlar

üreten bir araçtır. Genetik algoritma, doğada canlıların yaşamları boyunca edindikleri fiziksel, biyolojik özellikleri genler vasıtasıyla bir sonraki nesle aktarılmasından ilham alarak geliştirilmiştir (Erkol H.O, 2017). Canlı biyolojisinde olduğu gibi canlı kendisini meydana getiren bireylerin genlerinin birleşmesi ile meydana gelir. Genetik birleşme sonucu olumlu ve olumsuz özellikler bir sonraki nesle aktarılır. Olumsuz genlerin ağır bastığı birey, adaptasyon geçiremez ve yaşamı sona erer. Olumlu genlere sahip olan birey ise yaşamını sürdürür. Bu olaya doğal seleksiyon adı verilir ve olumlu genler nesilden nesle aktarılmış olur. Genetik algoritma da olumlu genlerin nesilden nesle aktarılması prensibinden yola çıkarak geliştirilmiştir.

Genetik algoritmanın en önemli bileşeni popülasyondur. Popülasyonun içerisinde bulunan her veri ise, biyolojideki kromozomlara karşılık gelmektedir. Başlangıç popülasyonunda bulunan her bir kromozom fitness fonksiyonu ile teste tabi tutulur ve problemin çözümünde faydalı olacak kromozomlardan faydalanılır. Belirlenen kurallara göre yeni kromozomlar üretilir ve fitness fonksiyonu ile testler tekrar gerçekleştirilir. Böylelikle her popülasyon içerisindeki önemli özellikler biyolojide olduğu gibi bir sonraki popülasyona aktarılır. Genetik algoritmada hata oranında global minimum noktasına ulaşmak ana hedefdir (Çelik A., 2019). Global minimum noktasına ulaştıktan sonra aktarım işlemi tamamlanır.



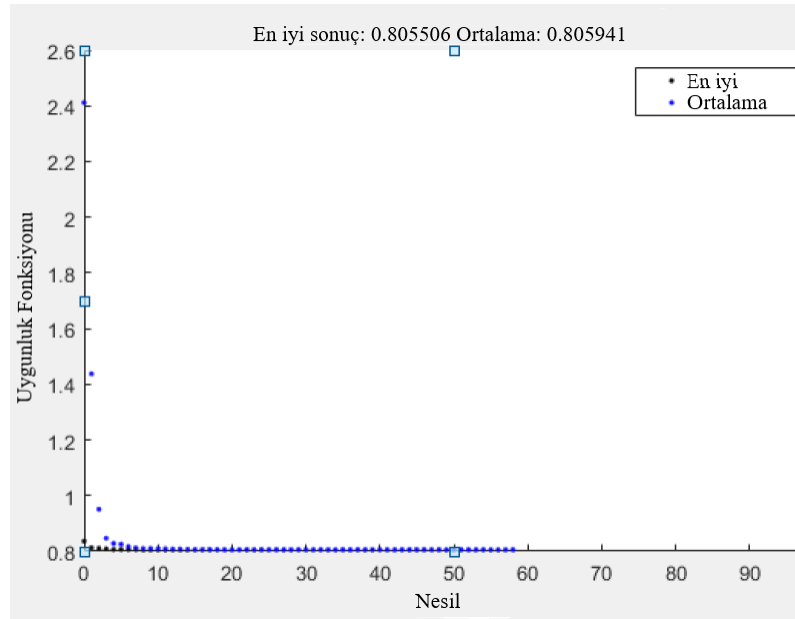
**Şekil 41. Genetik Algoritma Prensibi**

FDAM hız kontrolü uygulamasında YSA yönteminin uygulanması sonucu, referans hıza göre motor hızının kontrolüne için PID parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. ITAE (Integral Time Absolute Error) fonksiyonu ile sistem cevabının referans hıza göre hatası GA'ya aktarılmıştır. Problem tanımı motor hızının referansa oranla hatasının azaltılmasıdır. ITAE algoritma içerisinde bir başarı ölçütü olarak tanımlanmıştır. ITAE Denklem 29'da görüldüğü gibi hatanın mutlak değerinin zamana bağlı integralidir.

$$ITAE = \int_0^t t|e(t)|\delta t \quad (29)$$

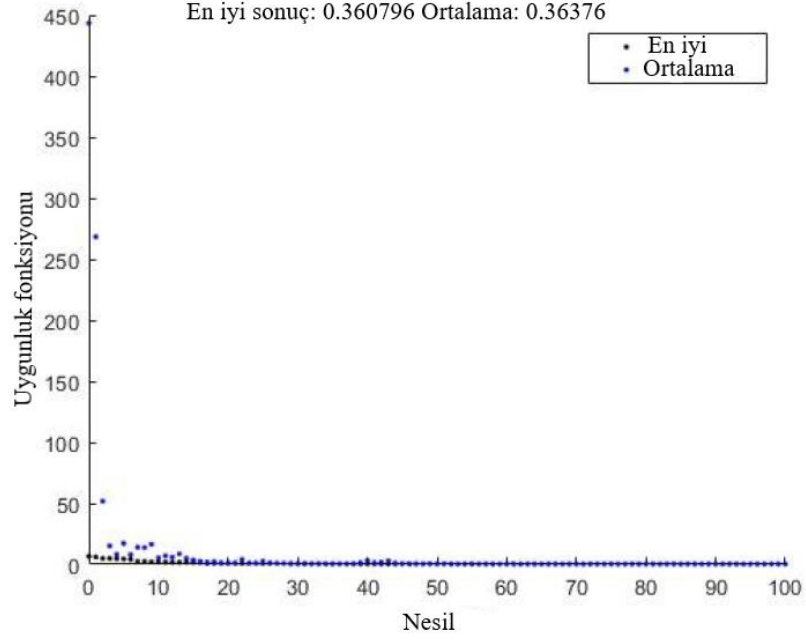
ITAE'nin minimuma indirilmesi aşamasında her bir çaprazlamada GA tarafından belirlenen PID katsayıları FDAM modeline uygulanmış ve tanımlanan hataya kadar devam etmiştir. ITAE, optimizasyon çalışmasının uygunluk fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmasında ITAE uygunluk fonksiyonu olarak kabul edilmiştir. Ek olarak hesaplama gücü ihtiyacının azaltılmasına yönelik 30 adet popülasyon belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığında GA'ya ait parametreler Tablo 6'da görüldüğü gibidir.

Genetik algoritma ile PID parametrelerinin optimizasyonu çalışmasında sistem modelinde gözlemlenen FDAM hız cevabının referans hıza karşılık ITAE ile hata değerinin optimize edilmesi amaçlanmıştır. Uygunluk fonksiyonu olarak belirlenen ITAE, sistemin karşı yükün değişmesi durumunda vereceği cevabı gözlemlenmesini sağlamaktadır. GA iterasyon boyunca optimizasyon durdurma kriteri olarak her bir parametreye 20 nesil, toplamda 60 nesil boyunca incelenmiştir. Ek olarak uygunluk fonksiyonunun 0.4 olması da durdurma kriteridir.



**Şekil 42. Başlangıç Popülasyonu 30**

Belirlenen durdurma kriterleri kapsamında başlangıç popülasyonu 30 olan optimizasyon boyunca toplamda 60 iterasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 42’da görüldüğü gibi gerçekleştirilen 60 iterasyon sonucunda uygunluk fonksiyonu 0.4 eşik değerine ulaşamamıştır.



**Şekil 43. Başlangıç Popülasyonu 50**

Şekil 43 üzerinde görüldüğü birey sayısının 50 olarak belirlendiği optimizasyon çalışmasında sistem 100 iterasyon sonrası istenilen eşik değerine ulaşmıştır. Optimizasyon çalışmalarında elde edilen PID parametreleri karşılaştırılarak sistem performansı gözlemlenmiştir.

Optimizasyon süresinde uygunluk fonksiyonunun istenilen eşik değerine ulaşması amacı ile sıralama yönteminden yararlanılmıştır. Bu yönteme göre sistem optimizasyon sürecinde elde edilen uygunluk değerlerini istenilen eşik değerine göre sıralamaktadır. En uygun değer birinci, en yakın değer ikinci sıraya yerleştirilir ve bir sonraki nesle aktarılır. Diğer değerler değerlendirilmez. Belirlenen nesil boyunca en uygun değer elde edilmeye çalışılmıştır. Nesilden nesle aktarılan uygunluk fonksiyonu değerleri, istenilen eşik değerine ulaşılmasına, dolayısı ile sistemin istenilen performansı göstermesi için parametrelerin belirlenmesini sağlamaktadır.

**Tablo 6. Genetik Algoritma Parametreler**

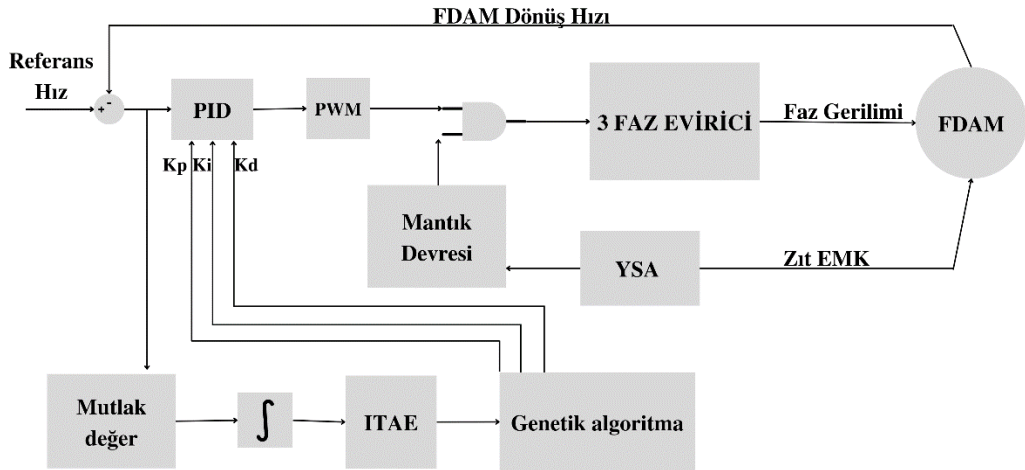
Parametre	Değer	
	1.GA Opt.	2.GA Opt.
Popülasyon	30	50
Alt Limit	Kp: [0 0 0]	Kp: [0 0 0]
	Kd: [0 0 0]	Kd: [0 0 0]
	Kd: [0 0 0]	Kd: [0 0 0]
Üst Limit	Kp: [10 10 10]	Kp: [10 10 10]
	Kd: [10 10 10]	Kd: [10 10 10]
	Kd: [10 10 10]	Kd: [10 10 10]

GA optimizasyonu sonrası elde edilen PID katsayıları Tablo 7’ de görüldüğü gibidir.

**Tablo 7.GA Sonra PID Katsayıları**

Parametre	1.GA Sonrası Değer	2.GA Sonrası Değer
Kp	9.646	9.209
Ki	8.898	8.94
Kd	0.002	0.011

GA çalışmaları sonrası PID parametrelerinin güncellenmesi işlemi Şekil 44’de görüldüğü gibidir.



**Şekil 44. Sensörsüz Hız Kontrol Şeması**

#### 4. SİSTEM MODELLEMESİ

FDAM'nin sensörsüz YSA tabanlı zıt EMK gözlemcisi ile gerçekleştirilen hız kontrolü sistem modellemesi MATLAB/Simulink ortamında simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş ve performansı gözlemlenmiştir. GA optimizasyon yönteminden faydalanılarak PID parametrelerinin güncellenmesi ile sistem performansı GA öncesi ve sonrası olarak karşılaştırılmıştır. Sistem performansı yüksüz, 2 Nm, 5 Nm ve 10 Nm karşı yük durumunda incelenmiştir. Motor parametreleri Tablo 8'de görüldüğü gibidir.

**Tablo 8. FDAM Parametreleri**

Parametre	Sembol	Değer
Kutup sayısı	$p$	4
Stator faz direnci	$R$	0.7 $\Omega$
Stator faz indüktansı	$L$	0.00272 mH
Tork sabiti	$k_t$	0.84 N.m/A
Atalet momenti	$J$	0.0008 $kg.m^2$
Sürtünme katsayısı	$B$	0.001 N.m.s
DC hat gerilimi	$V_d$	300 V
Nominal hız	$w_{rated}$	2000 rpm

Üç faz FDAM 120° faz farkına sahiptir. Hız kontrolüne yönelik PID kontrolcüsünün GA öncesi ve sonrası parametreleri aşağıdaki gibidir.

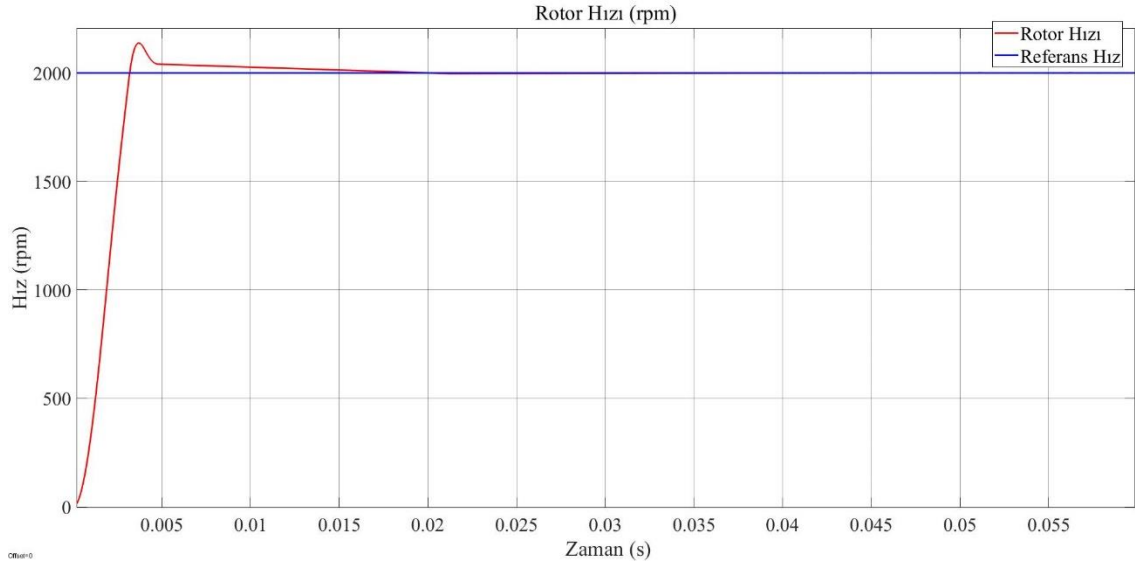
**Tablo 9. PID Parametreleri**

Parametre	Değer	
	GA Öncesi	1.GA Opt.
Kp	10	9.646
Ki	1	8.898
Kd	0.1	0.002

Sistem modelleme çalışmalarında alan etkili sensörler yerine FDAM tarafından üretilen stator zıt EMK değerleri kullanılmıştır. Zıt EMK değerleri YSA'da alan etkili sensör

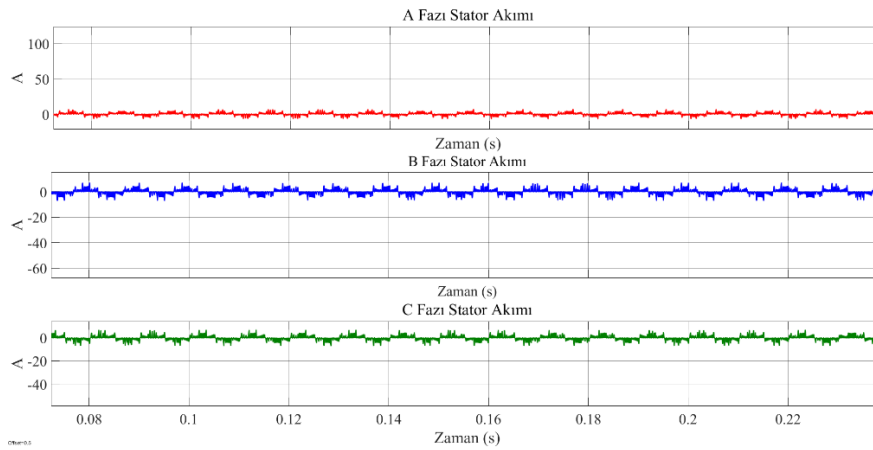
verisi test verisi olarak kullanılarak eğitilmiş ve algoritma çıktısından komütasyon sinyali olarak faydalanılmıştır. Sisteme ait Simulink modeli Ek 1’de görüldüğü gibidir.

Sonuçların gözlemlenmesi PID katsayılarının GA ile optimizasyonu öncesi ve sonrası olmak üzere 2 aşamada gerçekleştirilmiştir. GA öncesi FDAM hız kontrolü sistem cevabı Şekil 45’de görüldüğü gibidir.



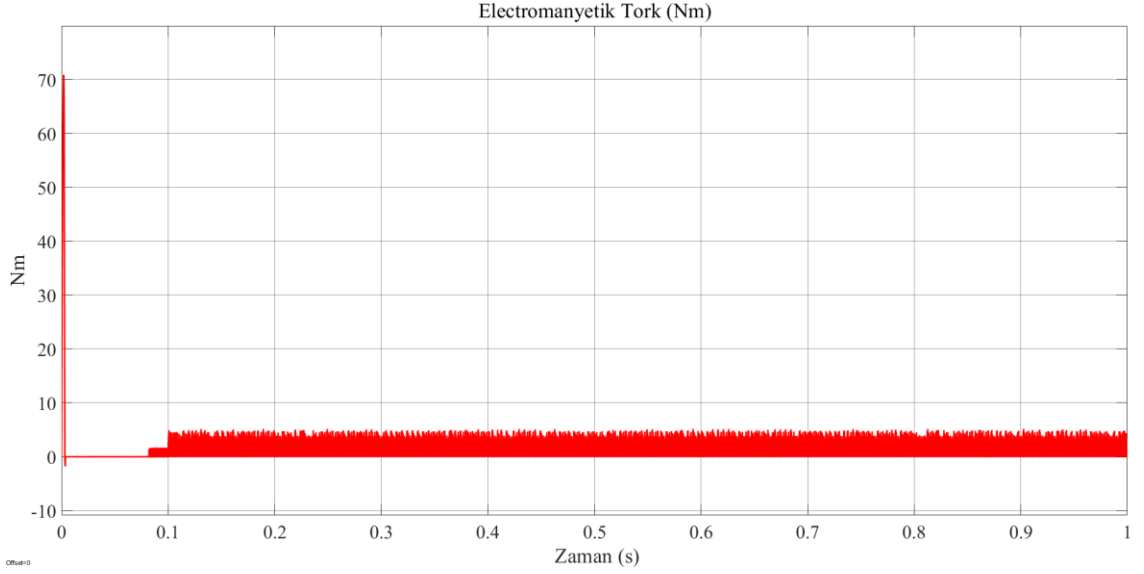
**Şekil 45. Sistem Cevabı- 2000rpm Sabit Referans GA Öncesi**

PID parametrelerinin optimizasyonu sadece sistemin referans hıza olan tepkisini değil, aynı zamanda stator sargı akımlarını ve torku da etkilemektedir. Şekil 46’de üç faza ait stator akım değerleri görülmektedir.



**Şekil 46. Stator Akımları GA Öncesi**

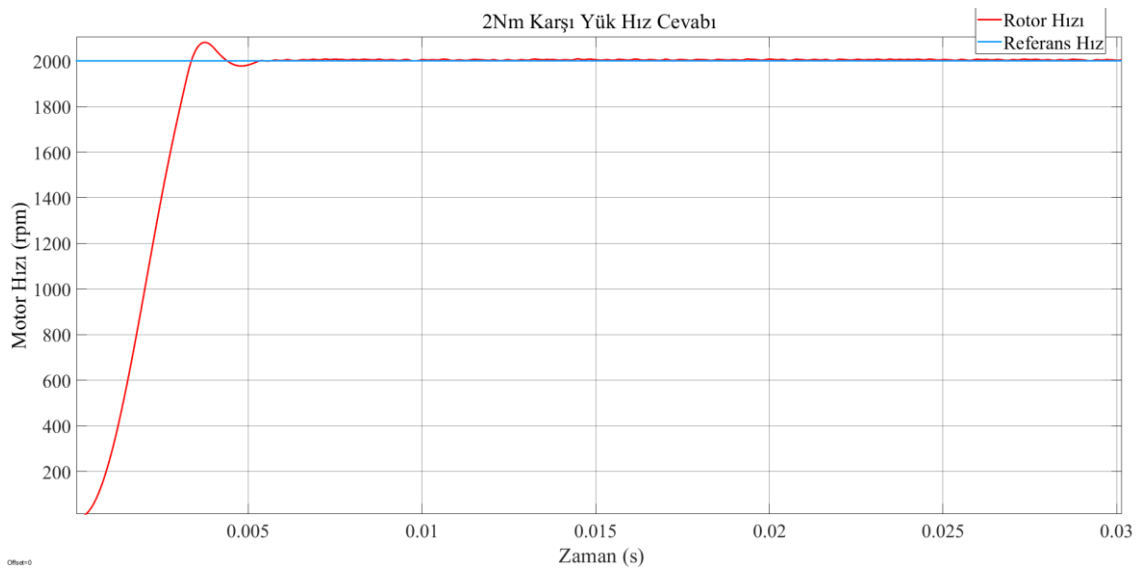




**Şekil 47. Elektromanyetik Tork Değeri GA Öncesi**

Başlangıç stator akım değerlerinin de etkisi ile FDAM gerekli ataleti yenebilmek için akım çekmektedir. GA öncesi üretilen elektromanyetik tork değeri Şekil 47'da görülmektedir.

GA ile PID katsayıları güncellenmiş ve sistemin referans hıza olan cevabı iyileştirilmeye çalışılmıştır. Şekil 45'de görülen sistem cevabında 2000 rpm referans hız değerinde FDAM 2138 rpm tepe değeri değerine ulaşmıştır ve referans değere oturması 20ms sürmüştür. Şekil 48'de birinci GA optimizasyonu sonrası sistem cevabı görülmektedir. Birinci GA sonuçları olağanüstü durumlarda performansa sahip değildir.



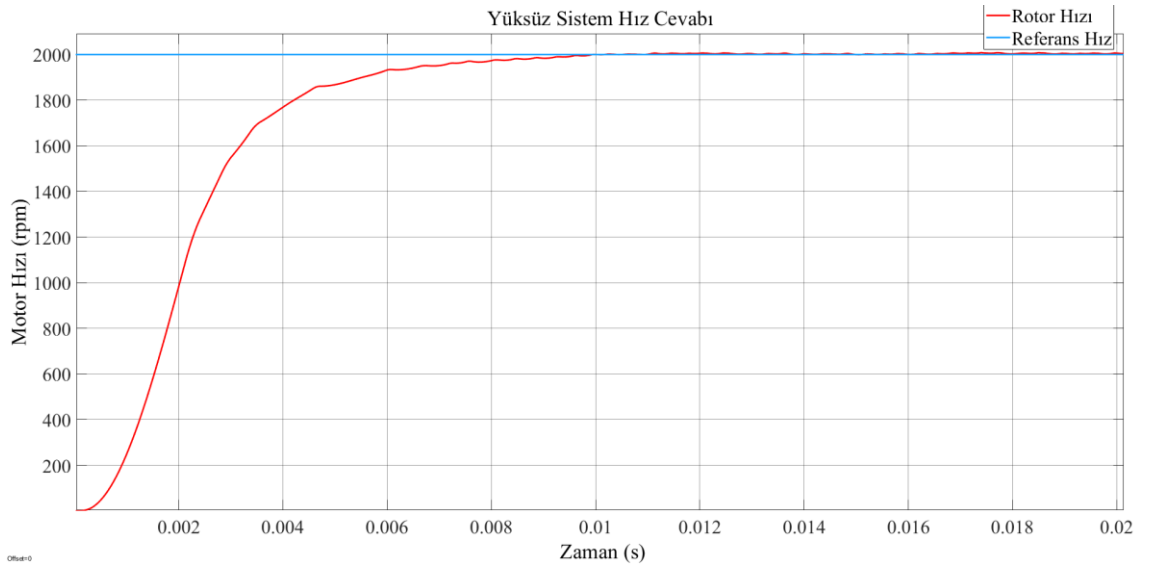
**Şekil 48. İlk GA Opt. – 2 Nm Yük Altında**

Birinci GA sonucu gerçekleştirilen çalışmalar sonrası sistem performansı kabul edilebilir durumdadır. Sistem cevabı aşma değeri 2084 rpm'dir. Lakin yüksek tork değerinde sistem performansını gözlemlemek amacı ve aşma değerini azaltmak amacı ile PID katsayıları üzerinden ikinci optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Bu sebepten ötürü PID parametrelerinin optimizasyon çalışmaları birinci GA parametreleri başlangıç değeri kabul edilerek tekrar gerçekleştirilmiştir. Bu durumda optimizasyon aşağıdaki Tablo 10' da görülen değerlere göre gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 10. İkinci GA Başlangıç- Sonuç Parametreleri**

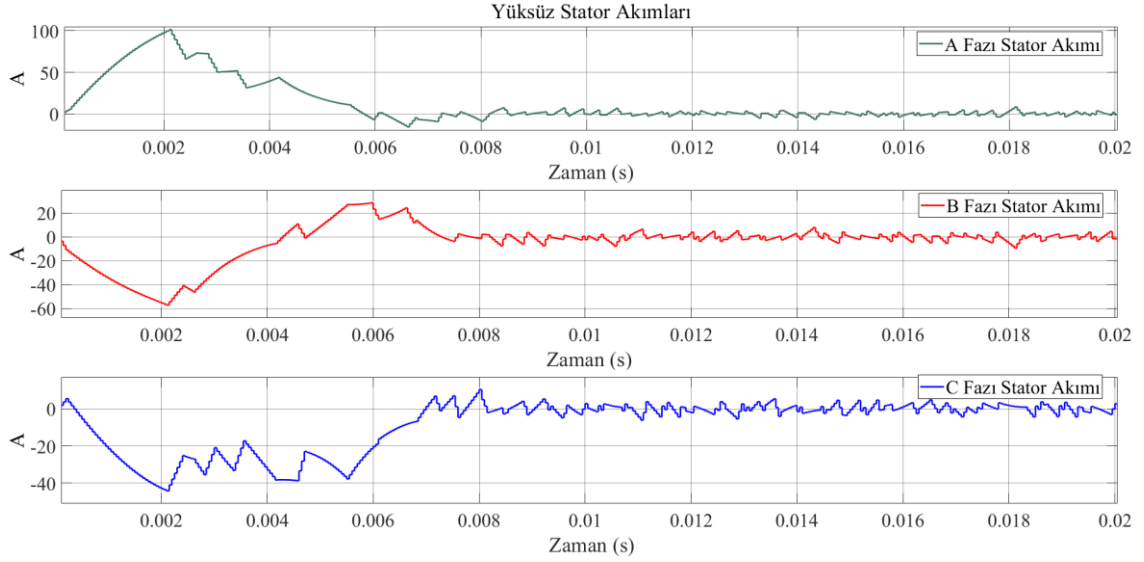
Parametre	Değer	
	1.GA Opt	2.GA Opt.
Kp	9.646	9.209
Ki	8.898	8.94
Kd	0.002	0.011

Şekil 49'de görülen GA sonrası sistem cevabında maksimum tepe değeri 2010 rpm ve sistem referans hızı cevabı 10 ms'dir.



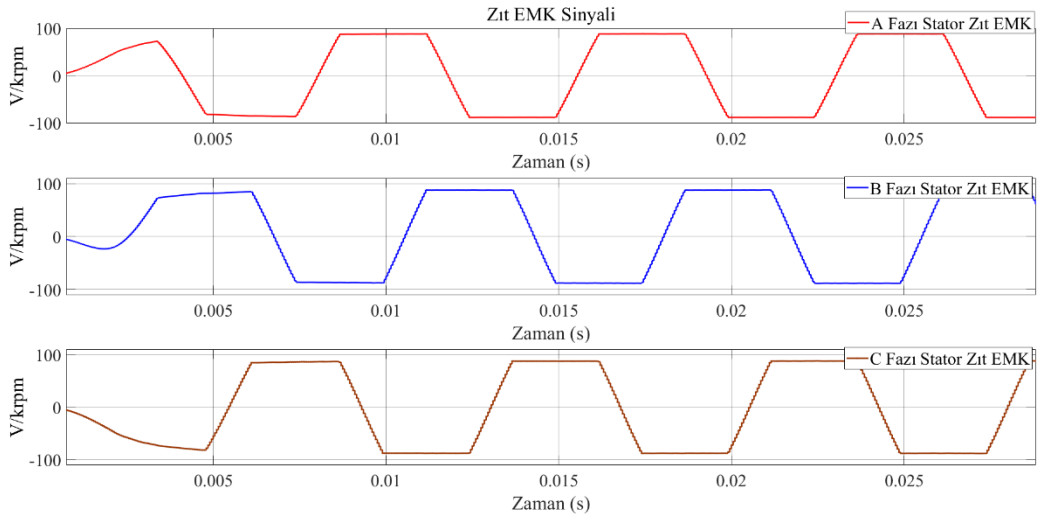
**Şekil 49. İkinci GA Opt.- 2000rpm Sabit Hız GA Sonrası- Yüksüz**

GA PID katsayılarının optimizasyonu sonrası FDAM stator akım ve elektromanyetik tork değerleri değişmiştir. Bu değişim FDAM verimini etkileyebilecek bir değişimdir. Şekil 50’de ilgili fazlara ait stator akım değerleri görülmektedir.



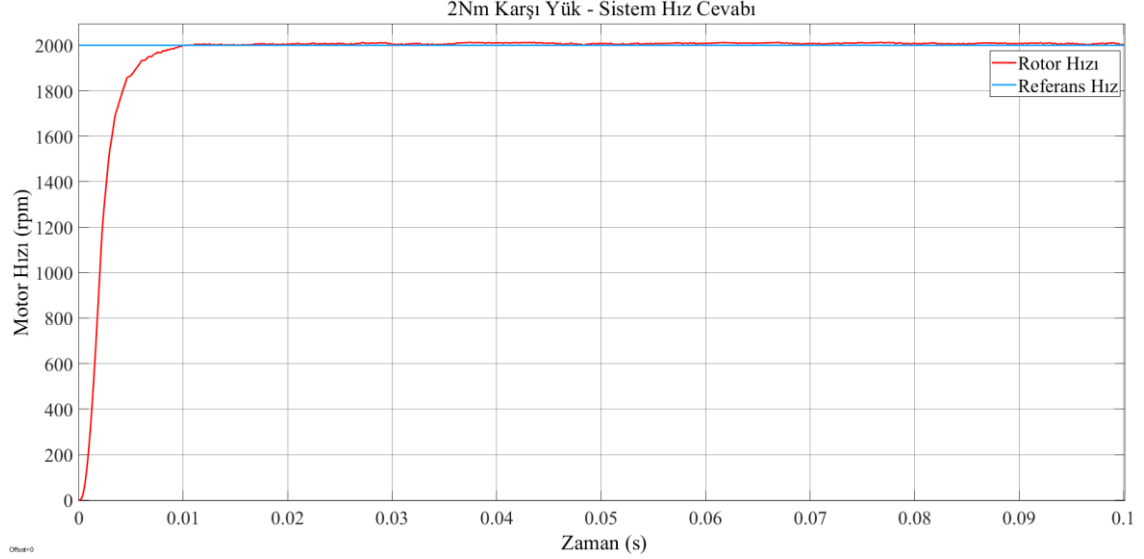
**Şekil 50. 2.GA Stator Akım Değerleri- Yüksüz**

FDAM yüksüz çalıştırılmıştır. Sabit hızda referansında gerçekleştirilen hız kontrolü çalışması sonrası üretilen zıt EMK değeri hızın referans değere oturması ile her bir turda aynı değeri üretmeye başlayacaktır. Zıt EMK değerine ilişkin ilgili sonuçlar Şekil 51’da görüldüğü gibidir.



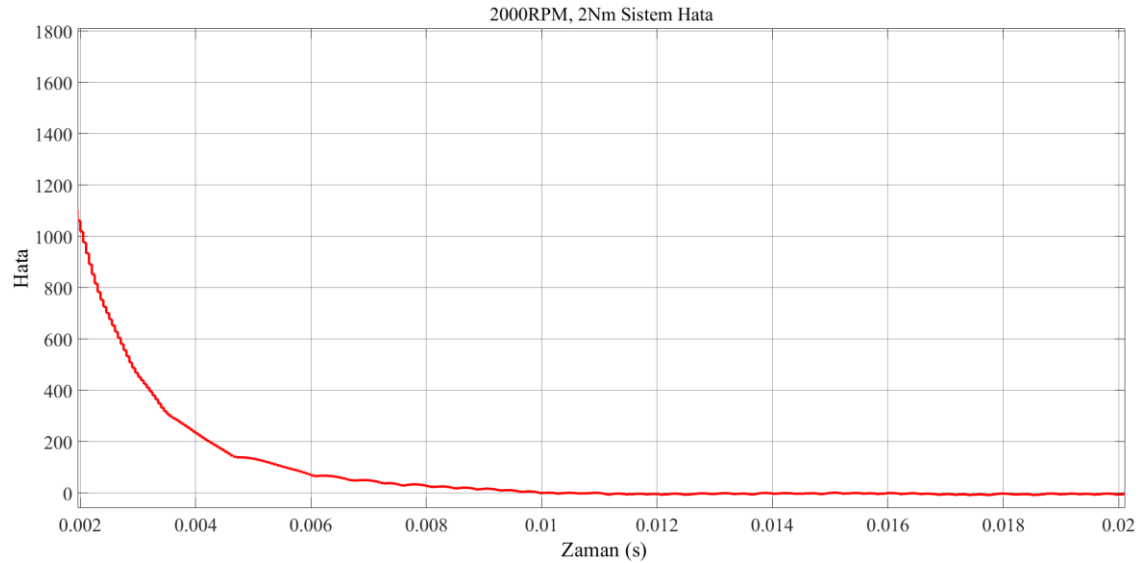
**Şekil 51. FDAM Zıt EMK Değerleri**

Sistem performansı sabit hız referansına ek olarak değişken karşı yük değeri durumdan gözlemlenmiştir. 2 Nm karşı yük durumunda sistem cevabı Şekil 52’de görüldüğü gibidir.



**Şekil 52. 2.GA Opt. – 2000 rpm 2 Nm Karşı Yük Sistem Cevabı**

2 Nm karşı yükün olduğu durumda sistem hız cevabı GA öncesine göre kabul edilebilir durumdadır. 5 ms’den daha az yükselme zamanına sahiptir. Referans hızın 2000 rpm olduğu durumda sistemde aşma mevcuttur.



**Şekil 53. 2000 RPM Hız Kontrolü Hata**

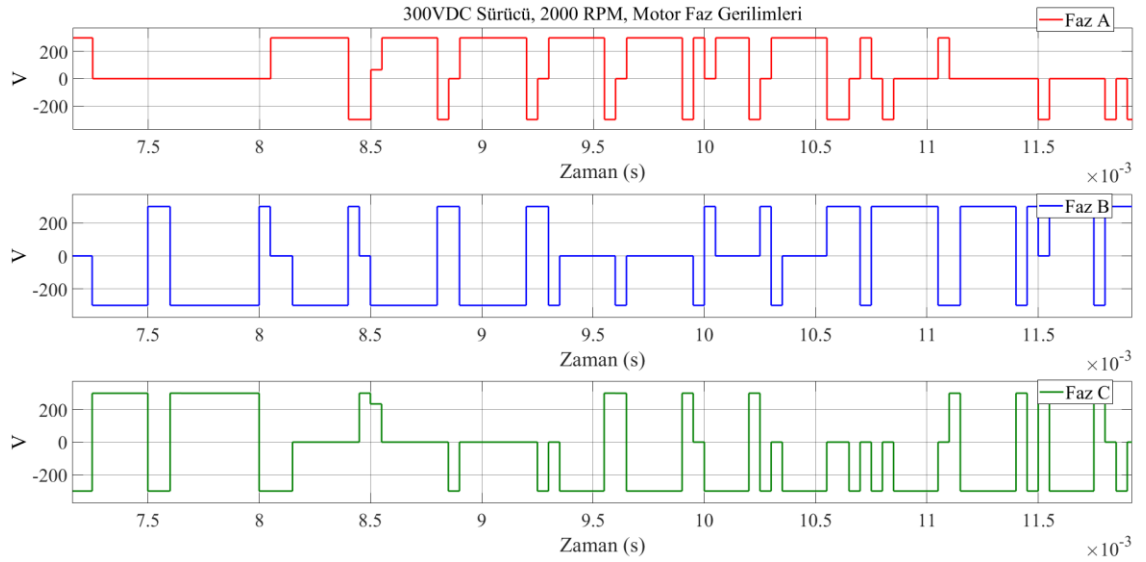
Şekil 53’de 2000 rpm hız referansına karşılık, kontrolcü hatası görülmektedir.

**Tablo 11. 2000 rpm, 2 Nm Hız Kontrolcüsü**

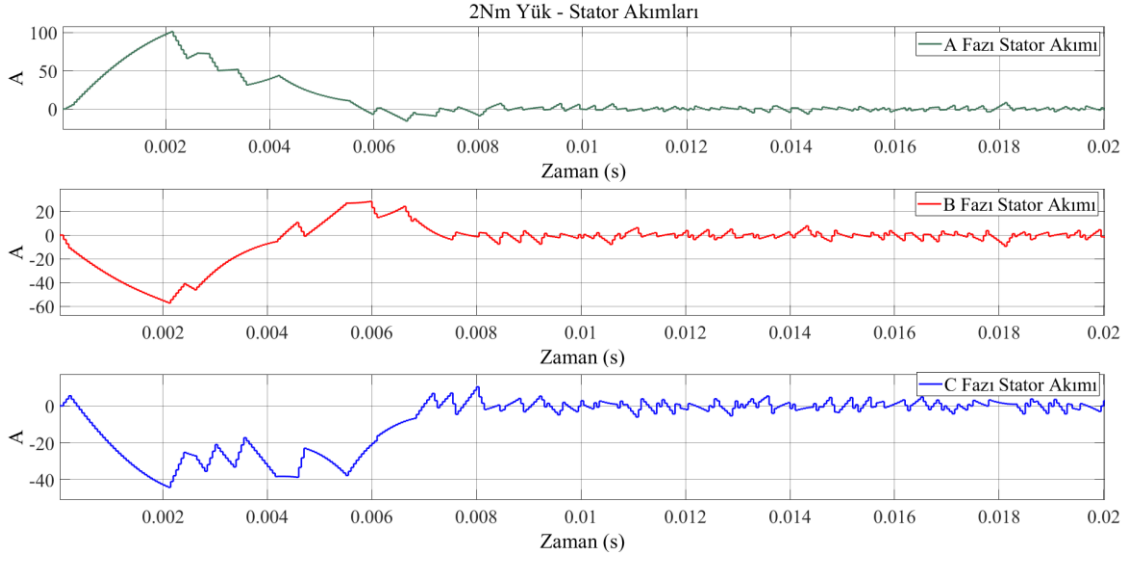
Parametre	Değer
Aşma Değeri	2015 rpm
Ortalama	1967 rpm
RMS	2007 rpm

Tablo 11’de 2000 rpm hız referansı sonrası 2 Nm yük altında sistem cevabı görülmektedir. Hız kontrolcüsü sonrası sistem en fazla 2015 rpm seviyesine yükselmiştir. Hız kontrolcüsünün sisteme etkisi ile sistem ortalama 2007 rpm hız cevabı vermiştir.

YSA modeli sonrası üç faz evirici içerisinde bulunan IGBT’lerin açılıp kapanması kontrol edilmektedir. FDAM’nin çalışması için gerekli komütasyona göre IGBT kontrolü sağlanmaktadır. Zıt EMK değerlerinden elde edilen IGBT tetikleme sinyalleri sonrası Şekil 54’de kontrol edilen ilgili faz gerilimleri görülmektedir. IGBT’lerin açılıp kapanması, ilgili fazın, pozitif polarite, negatif polarite ve enerjisiz gibi karakteristiğe sahip olmasını sağlar. Aynı anda iki faz enerjilendirilir ve üçüncü faz enerjisizdir. 300 VDC bara gerilimi IGBT’ler üzerinde anahtarlanarak ilgili faza iletilmektedir.

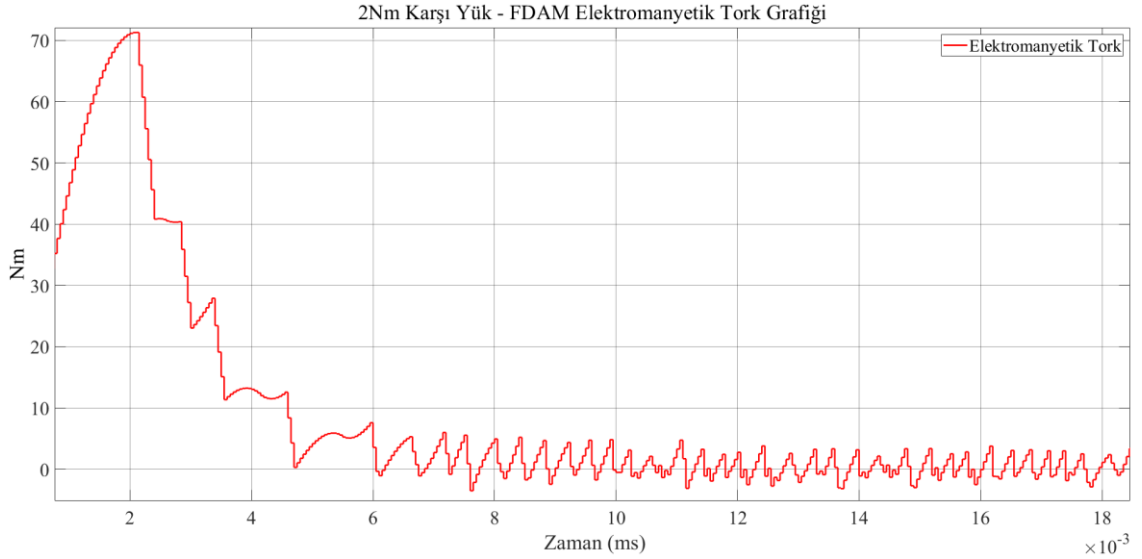


**Şekil 54. 2000 RPM, FDAM Faz Gerilimleri**



**Şekil 55. 2.GA Opt. 2 Nm- Stator Akımları**

2 Nm karşı yükün olduğu durumda stator akımları ve FDAM tarafından üretilen elektromanyetik tork değeri gözlemlenmiştir. Stator akım değerleri Şekil 55’de görüldüğü gibidir.

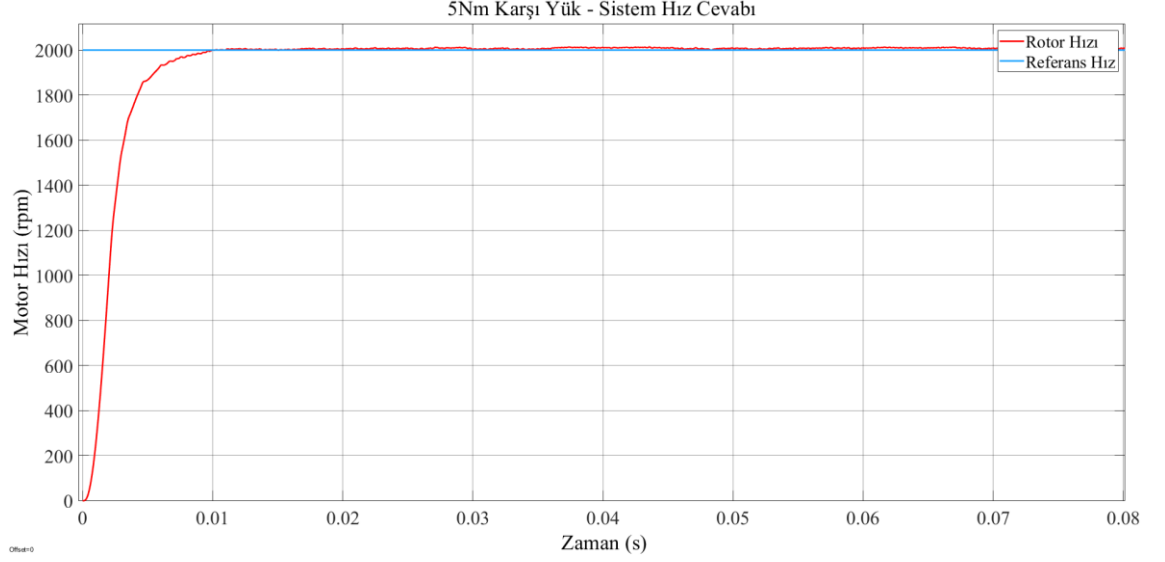


**Şekil 56. 2.GA Opt. 2 Nm- Elektromanyetik Tork**

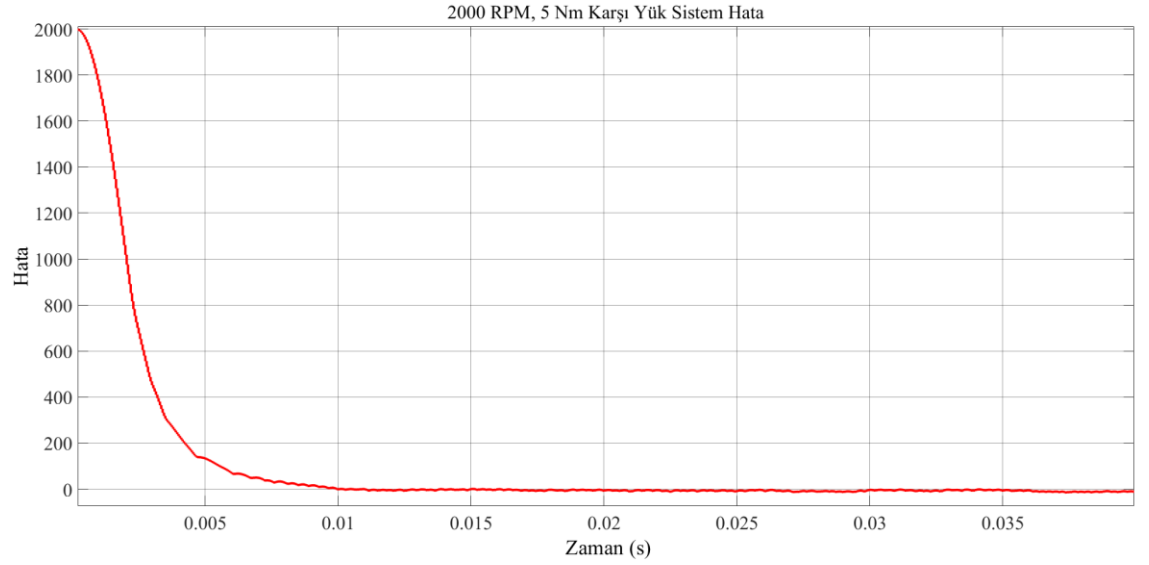
Şekil 56 2 Nm karşı yükün olduğu durumda FDAM tarafından üretilen elektromanyetik tork değerini ifade etmektedir.

2 Nm karşı yük sonrası sistem performansı 5 Nm karşı yük durumdan incelenmiştir. 5 Nm yükün olduğu durumda sistem yükselme cevabı ayındır. Sistem performansının kabul

edilebilir olmasına karşın, kalıcı-durum hatası artmaktadır. Bu durumdaki en büyük etken FDAM'nin nominal tork değerinden daha fazla karşı yüke maruz bırakılmasıdır. Şekil 57'de görüldüğü gibi sistemin referansa oturma zamanı 5ms'den daha azdır.



**Şekil 57. 2.GA Opt. 5 Nm- Sistem Cevabı**

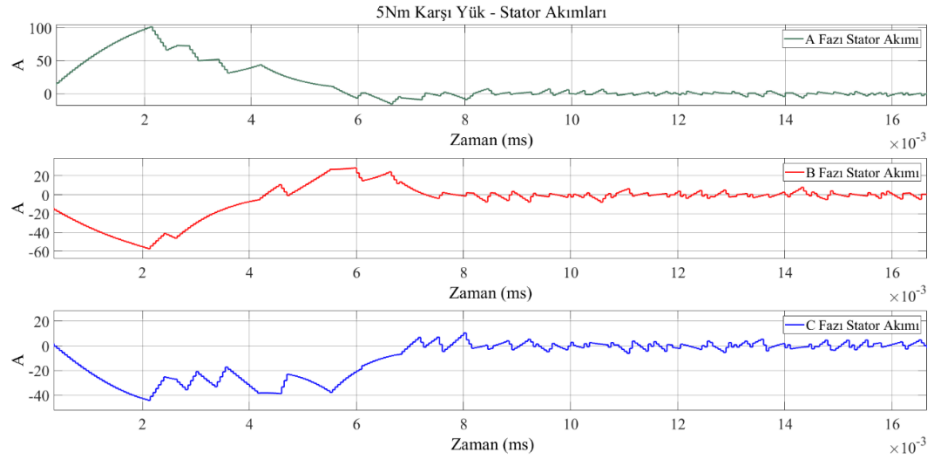


**Şekil 58. 2000 rpm, 5 Nm Sistem Hata**

Şekil 58'de 5 Nm yük altında, hız kontrolcüsünün 2000 rpm hız referansına karşın hata görülmektedir. Tablo 12 ise, hız kontrolcüsü sonrası FDAM'ye ait aşma, ortalama ve RMS değerlerini belirtmektedir.

**Tablo 12. 2000 rpm, 5 Nm Hız Kontrolcüsü**

Parametre	Değer
Aşma Değeri	2015 rpm
Ortalama	1980 rpm
RMS	1982 rpm

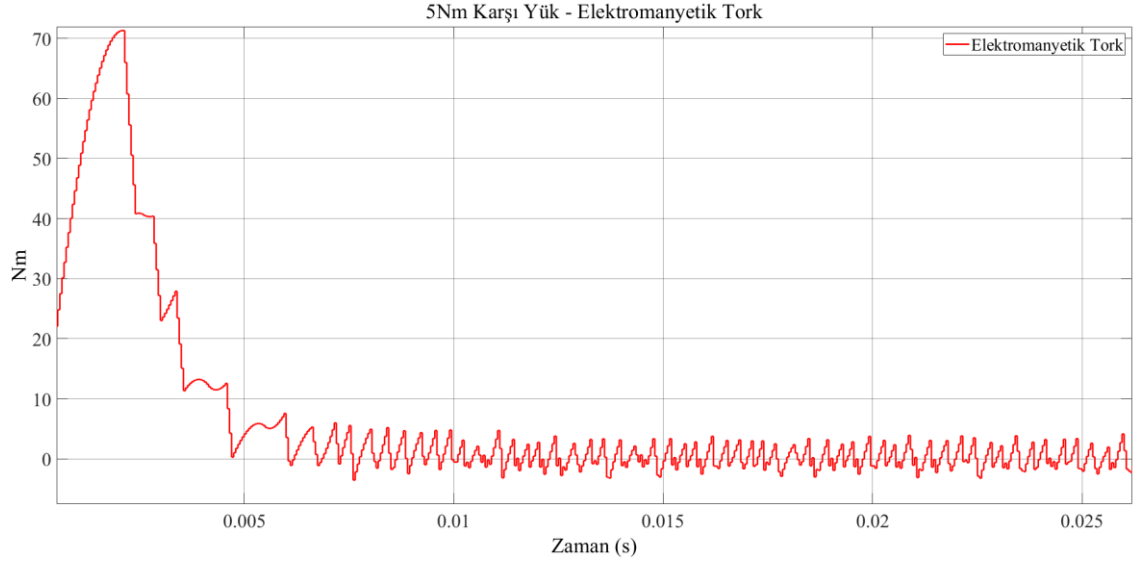


**Şekil 59. 2.GA Opt. 5 Nm- Fazı Stator Akımı**

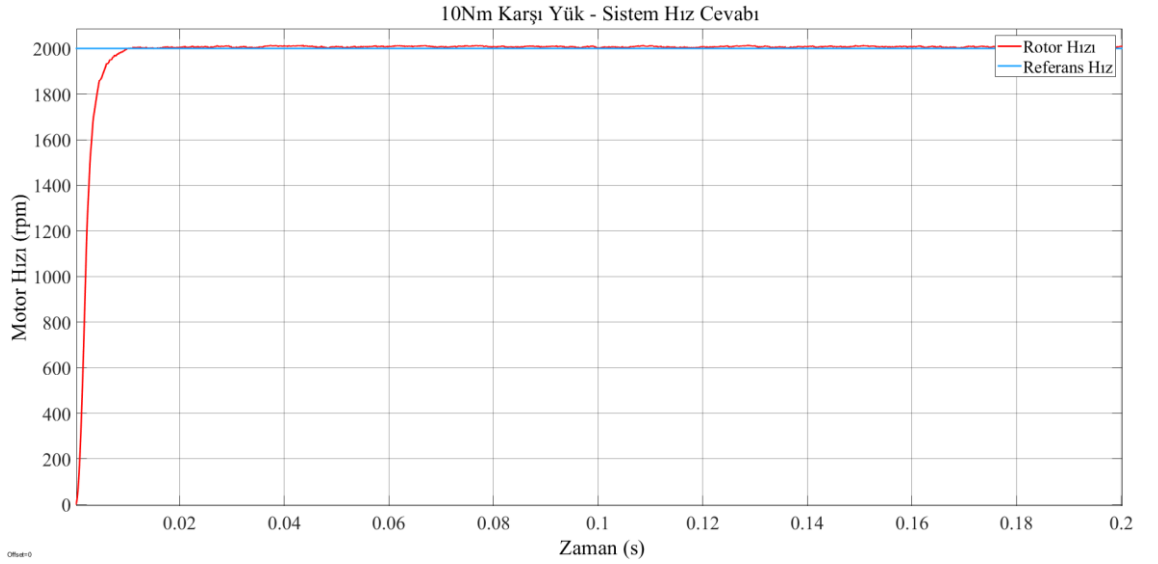
Şekil 59’de görüldüğü gibi 5 Nm yük altında FDAM stator belirtilmiştir. Şekil 60’da FDAM tarafından 5 Nm karşı yükü yenebilmek adına üretilen elektromanyetik tork görülmektedir. FDAM’nin 5 Nm karşı yüke performansı kabul edilebilir değerlerdedir. Karşı yükün artması ile FDAM verimi düşecektir. Bu çalışma ile FDAM’nin zorlu koşullarda çalışma performansı gözlemlenmesi amaçlanmıştır.

Şekil 61’de ise 10 Nm karşı FDAM’ye uygulanmıştır. Bu durumda kalıcı durum hatası artmıştır ve kontrol sistemi performansını kaybetmeye başlamıştır.





**Şekil 60. 2.GA Opt. 5 Nm- Elektromanyetik Tork**



**Şekil 61. 2.GA Opt. 10Nm- Sistem Cevabı**

Tezin bu bölümünde gerçekleştirilen sistem modelleme çalışmaları sonrası değişken yükler altında sistem performansı incelenmiştir. Değişken yüklerin stator akımlarına, FDAM tarafından üretilen elektromanyetik tork değerine etkisi gözlemlenmiştir. Sonraki bölümde tez çalışmasından elde edilen çıkarımlar ve sonuçlara yer verilmiştir.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada askeri, havacılık ve uzay, otomotiv, medikal, endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanılan FDAM'nin yapısı, çalışma prensibi, kontrol yöntemleri ve avantajları ve dezavantajlarına değinilmiştir. FDAM'nin hız ve pozisyon kontrolü yöntemlerinden biri olan sensörsüz hız kontrolüne yönelik YSA ile zıt EMK değerine göre hız tahmini benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. FDAM tarafında indüklenen zıt EMK değerlerinin YSA modeli ile üç faz evirici devrenin anahtarlama referansı olarak kullanılması ve FDAM'nin kontrolü gerçekleştirilmiştir.

FDAM zorlu şartlar altında çalışması, kontrolünün ve üretiminin kolaylığı sebebiyle tahrik sistemlerinin ana bileşenlerinden birini oluşturmaktadır. Simülasyon çalışmalarında oluşturulan sistem modelinin zorlu koşullarda performansı incelenmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir.

Gerçekleştirilen analiz çalışmaları sonrası FDAM, 2 Nm, 5 Nm ve 10 Nm karşı yüke maruz bırakılmıştır. 2 Nm yük altında sistem cevabı 5ms'den daha kısa sürede istenilen hız değerine ulaşabileceğini göstermektedir. FDAM yapısına ve parametrelerine bağlı olarak olağanüstü karşı yük değerlerinde sistem cevabının kabul edilebilir olduğu gözlemlenmiş, lakin hız kontrolünde kalıcı durum hatasının arttığı gözlemlenmiştir. Karşı yükün büyüklüğünden bağımsız, 2000 rpm referans hızlarda, sistem cevabı anlık 2100 rpm değerine ulaşmaktadır ve 5 ms'den daha kısa sürede istenilen hız değerine oturmaktadır. Karşı yükün sisteme etkisi, stator akım değerlerinin artması ve artan akıma bağlı olarak FDAM'nin çalışma esnasında olması gerekenden daha fazla ısınmasıdır. Isınan FDAM'nin bir süre sonra motor verimi düşecektir. Geliştirilen sistem modeli ile sistem ve motor verimi zorlu koşullarda başlangıç durumlarda FDAM'nin çalışma verimini korumasına yardımcı olmaktadır.

Bu çalışma sonrası elektromekanik sistemlerin geliştirilmesi ana tahrik bileşeni olarak kullanılan FDAM'nin sensörsüz hız kontrolüne ilişkin sonuçlar bilgisayar ortamında gözlemlenmiştir.

YSA modelinden faydalanılarak geliştirilen sensörsüz FDAM hız kontrol modelinin performansının artırılmasına yönelik ekstra çalışmalar gerçekleştirilebilir. Yapılan analizler sonrası tork ve akım değerlerindeki dalgalanmalar en iyileştirilebilir.

- Tork değerinde meydana gelen dalgalanmaların önüne geçmek adına akım kontrolcüsü sisteme eklenerek, sistem verimi artırılabilir.
- PID kontrolcüsü yerine, daha farklı denetleyici sistemleri kullanılarak sistem performansı karşılaştırılabilir.
- Sensörsüz kontrol yöntemlerinden olan Zıt EMK SGN ve Zıt EMK integrasyonu ile sistem performansı karşılaştırılabilir.
- YSA modeline sahip olan sistemde hesaplama yeteneği ihtiyacını düşürmeye yönelik çalışmalar gerçekleştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- Abdulhadi, M (2022). *Fırçasız doğru akım motorunun yüksek hızlarda performansının incelenmesi*. Yüksek lisans tezi. Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzincan
- Akin, B., Bhardwaj, M., & Warriner, J. (2011). Sensorless Trapezoidal Control of BLDC Motors. *Texas Instruments Document, ver, 1*.
- Attar, A., Bouchnaif, J., & Grari, K. (2021). Control of Brushless DC motors using sensorless Back-EMF integration method. *Materials Today: Proceedings, 45*, 7438-7443.
- Celera. *Resolvers*. Erişim adresi: <https://www.celeramotion.com/zettlex/resolvers/>  
Erişim tarihi:26.05.2022
- Cros, J., Figueroa, J. R., & Viarouge, P. (2003, October). BLDC motors with surface mounted PM rotor for wide constant power operation. In *38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003*. (Vol. 3, pp. 1933-1940). IEEE.
- Damodharan, P., & Vasudevan, K. (2010). Sensorless brushless DC motor drive based on the zero-crossing detection of back electromotive force (EMF) from the line voltage difference. *IEEE Transactions on Energy Conversion, 25*(3), 661-668.
- Dynapar. *What is a resolvers*. Erişim adresi: [https://www.dynapar.com/technology/encoder\\_basics/resolvers/](https://www.dynapar.com/technology/encoder_basics/resolvers/). Erişim tarihi:26.05.2022
- Ellin, A., & Dolsak, G. (2008). The design and application of rotary encoders. *Sensor Review*.
- Encoder. *What is an optical encoder*. Erişim adresi: <https://www.encoder.com/article-what-is-an-optical-encoder> Erişim tarihi:24.05.2022
- Gadewar, S. V., & Jain, A. M. (2017). Modelling and simulation of three phase BLDC motor for electric braking using MATLAB/Simulink. *Int. J. of Electrical, Electronics And Data Communication, 5*(7), 48-53.
- Galioto, S. J., Reddy, P. B., El-Refaie, A. M., & Alexander, J. P. (2014). Effect of magnet types on performance of high-speed spoke interior-permanent-magnet machines designed for traction applications. *IEEE Transactions on Industry Applications, 51*(3), 2148-2160.
- Gamazo-Real, J. C., Vázquez-Sánchez, E., & Gómez-Gil, J. (2010). Position and speed control of brushless DC motors using sensorless techniques and application trends. *Sensors, 10*(7), 6901-6947.

- Gödekoğlu, H. (2007). *Fırçasız doğru akım motoru konum kontrolörü tasarımı*. Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Imc. *E-motor test stand characteristics*. Erişim adresi: <https://www.imc-tm.com/products/elektromotorenpruefung/e-motor-test-stand-characteristics/>. Erişim tarihi: 26.05.2022
- Khambhadiya, H., & Dhaneria, A. (2021, February). Sensorless Control Method of 3-Phase BLDC Motor Through Back-EMF Observer. In *2021 International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT)* (pp. 1-5). IEEE.
- Ktu. *Üç-fazlı eviriciler*. Erişim adresi: [https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/eee\\_13b9b.pdf](https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/eee_13b9b.pdf). Erişim tarihi: 26.05.2022
- Lee, S., Lemley, T., & Keohane, G. (2009, December). A comparison study of the commutation methods for the three-phase permanent magnet brushless dc motor. In *Electrical Manufacturing Technical Conference 2009: Electrical Manufacturing and Coil Winding Expo, EMCWA 2009* (pp. 49-55).
- Lita, A., & Cheles, M. (2008). Sensorless BLDC control with back-EMF filtering using a majority function. *Microchip Technology Inc*, 1-24.
- Lovas, I. (2012). BLDC sensorless algorithm tuning. *Freescale Semiconductor Application Note*
- MidoriAmerica. *The difference between incremental encoder and absolute encoder*. Erişim adresi: <https://www.midoriAmerica.com/news/the-difference-between-incremental-encoder-and-absolute-encoder/> Erişim tarihi:26.05.2022
- Mohanraj, D., ArulDavid, R., Verma, R., Sathyasekar, K., Barnawi, A. B., Chokkalingam, B., & Mihet-Popa, L. (2022). A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications. *IEEE Access*.
- Oswos. *Windings for electric motors*. Erişim adresi: <https://oswos.com/motor-windings/> Erişim tarihi:20.05.2022
- Pindoriya, R. M., Mishra, A. K., Rajpurohit, B. S., & Kumar, R. (2016, July). Analysis of position and speed control of sensorless BLDC motor using zero crossing back-EMF technique. In *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)* (pp. 1-6). IEEE.
- Rao S.K. & Mishra Ravi, (2014). S. S. T. C. Comparative study of P, PI and PID controller for speed control of VSI-fed induction motor.

- Rao, E. S. A Single-Stage PFC Half-Bridge Converter Controlled Adjustable Speed PMSM Drive.
- Rif'an, M., Yusivar, F., & Kusumoputro, B. (2019). Sensorless-BLDC motor speed control with ensemble Kalman filter and neural network. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 10(1), 1-6.
- Topal, M. (2019). *Fırçasız doğru akım motorunun üç farklı yöntemle hız kontrolü ve analizi*. Yüksek lisans tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Trong, T. N., & Duc, M. N. (2015). The speed control system of BLDC using PID controller with PWM modulation technique. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED AND APPLIED SCIENCES*, 2(12), 47-51.
- Turhan, E. (2014). *Dış rotorlu fırçasız doğru akım motorlarında moment iyileştirmesi*. Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Ulu, B. (2011). *Fırçasız doğru akım motor(bldc) hız kontrolü*. Yüksek lisans tezi. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya
- Yedamale, P. (2003). Brushless DC (BLDC) motor fundamentals. *Microchip Technology Inc*, 20(1), 3-15.
- Erkol, H. O. (2017). GA ve PSO ile Kontrol Parametrelerinin Optimizasyonu. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(1), 179-185.
- Çelik, A. (2019). *Genetik Algoritma #1*. Erişim adresi: <https://alameddinc.medium.com/genetik-algoritma-1-fbbc2c4d001d>. Erişim tarihi:04.06.2022

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ali TAŞKIRAN

### EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : 2018, *KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği*

Yüksek Lisans Öğrenimi : Devam Ediyor, *Karatay Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği*

Bildiği Yabancı Diller : *İngilizce*

Bilimsel Faaliyetleri :

### İŞ DENEYİMİ

Stajlar : 2016, *Ar-Ge Mekatronik Mühendisi Stajyer, Yıldız Pul Vaden Otomotiv*

*2017, Ar-Ge Mekatronik Mühendisi Stajyer, METİSSAFE*

Projeler : 2021, *Ar-Ge Mekatronik Mühendisi – Fikir Sahibi, GPS ve LİDAR Tabanlı Otonom Tarım İlaçlama Robotu, Önallar Tarım Aletleri, TÜBİTAK*

*2021, Ar-Ge Mekatronik Mühendisi, 2000lt. Kendi Yürür İlaçlama Makinesi, Önallar Tarım Aletleri, TÜBİTAK*

*2020, Ar-Ge Test ve Doğrulama Mühendisi, Ağır Vasıtalara Yönelik Elektrikli Kompresör Geliştirilmesi, TÜBİTAK*

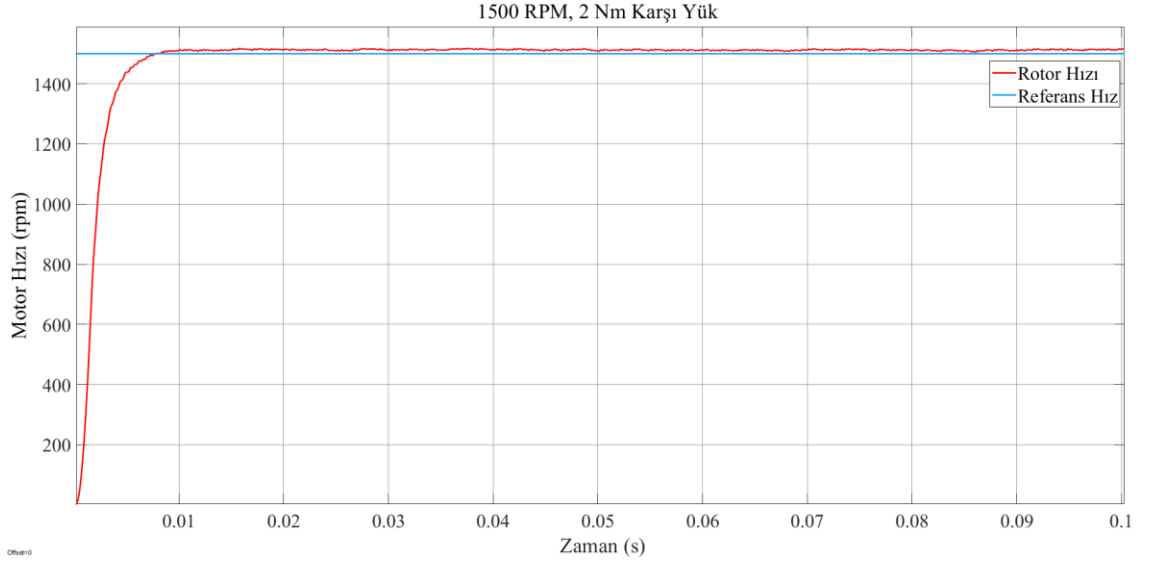
Çalıştığı Kurumlar : 2021 – *Günümüz, Ar-Ge Test ve Doğrulama Mühendisi, FEMSAN Elektrik Motorları*

*2020-2021, Ar-Ge Merkezi Mekatronik Mühendisi, Önallar Tarım Aletleri*

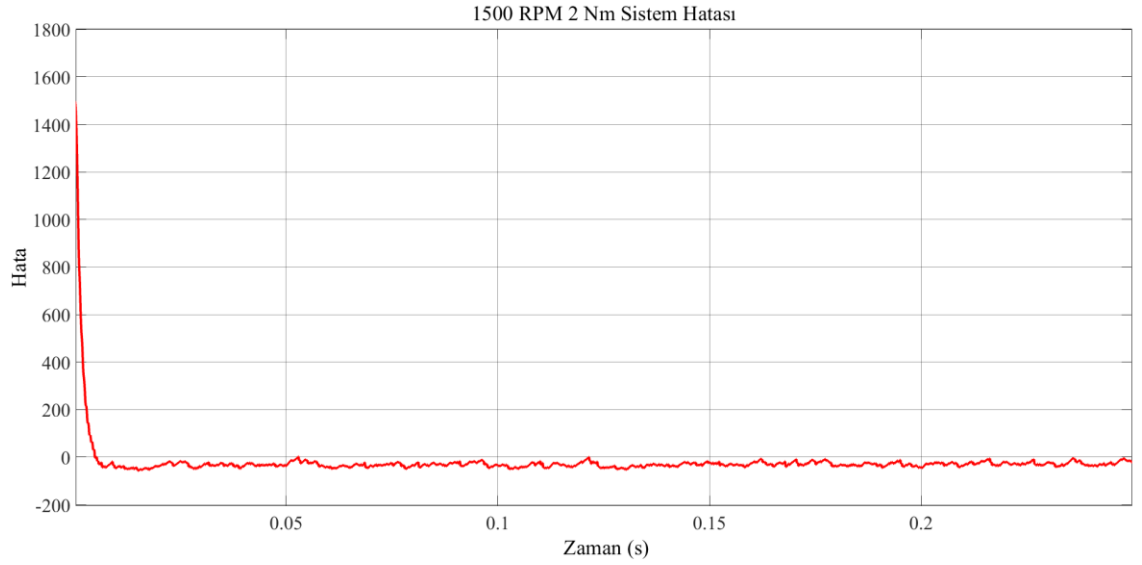
*2019-2020, Ar-Ge Merkezi Mekatronik Mühendisi, Yıldız Pul Vaden Otomotiv*

Tarih: 25 Temmuz 2022

## EK1. 1500 RPM HIZ REFERANSI SİSTEM CEVABI



Şekil 62. 1500 rpm, 2 Nm Karşı Yük Altında

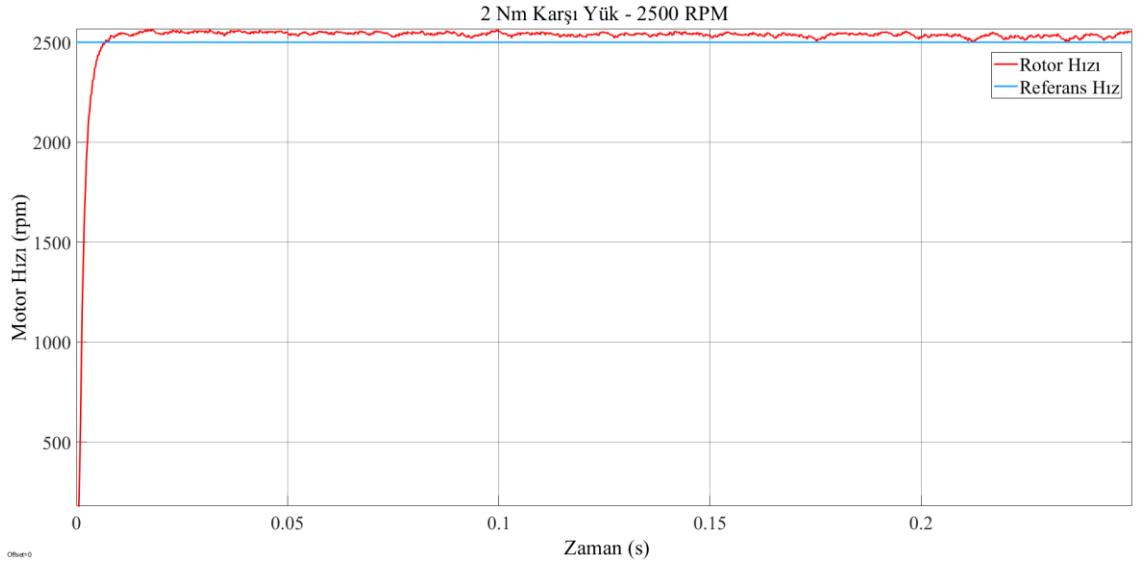


Şekil 63. 1500 rpm, 2 Nm, Hız Kontrolcüsü

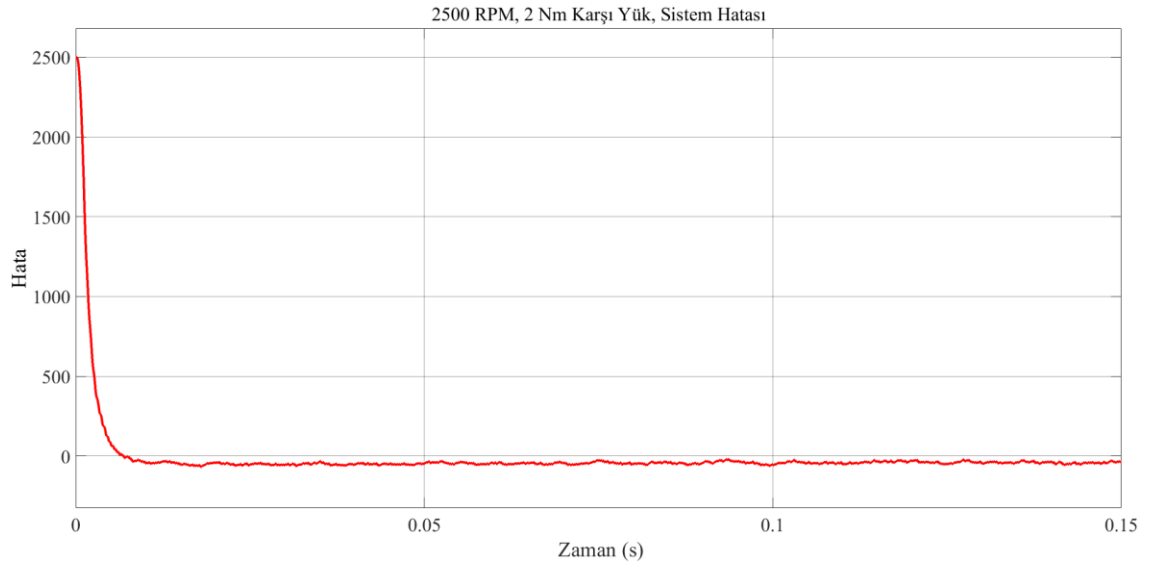
Parametre	Değer
Aşma Değeri	1561 rpm
Ortalama	1516 rpm
RMS	1516 rpm



## EK2. 2500 RPM HIZ REFERANSI SİSTEM CEVABI



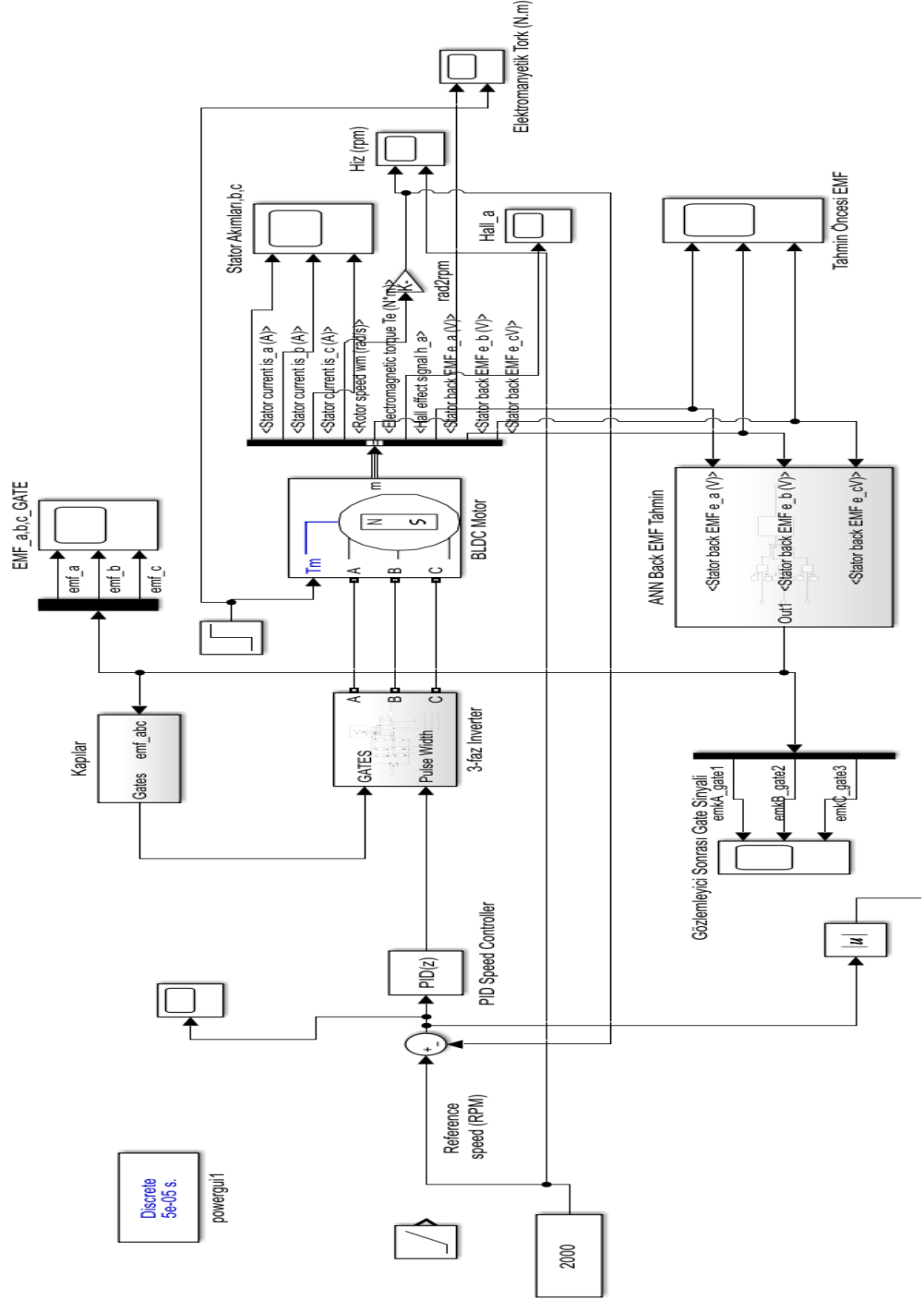
Şekil 64. 2500 RPM, 2 Nm Yük Altında



Şekil 65. 2500rpm, 2 Nm, Hız Kontrolcüsü

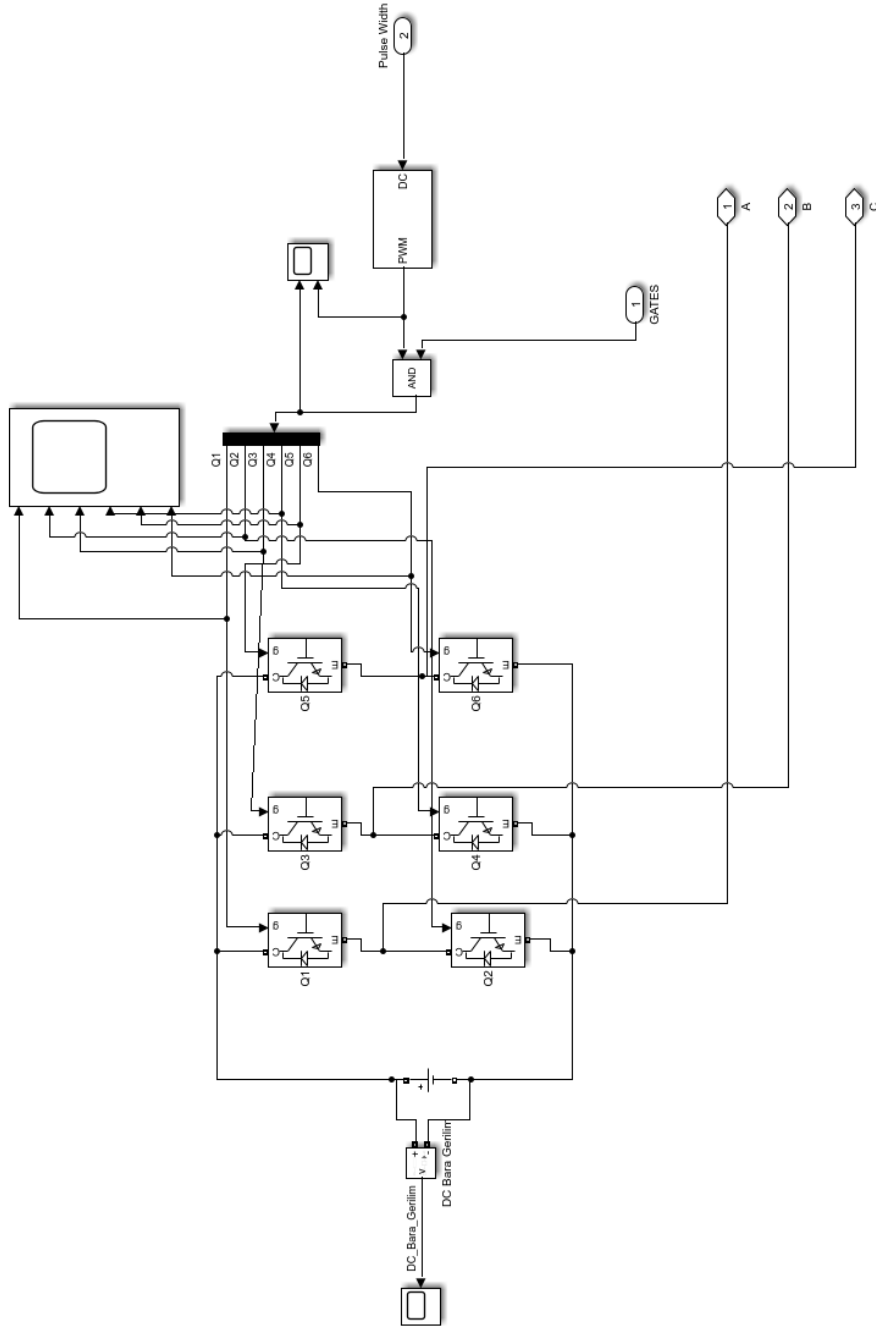
Parametre	Değer
Aşma Değeri	2568 rpm
Ortalama	2519 rpm
RMS	2526 rpm

### EK3. SENSÖRSÜZ FDAM HIZ KONTROL MODELİ



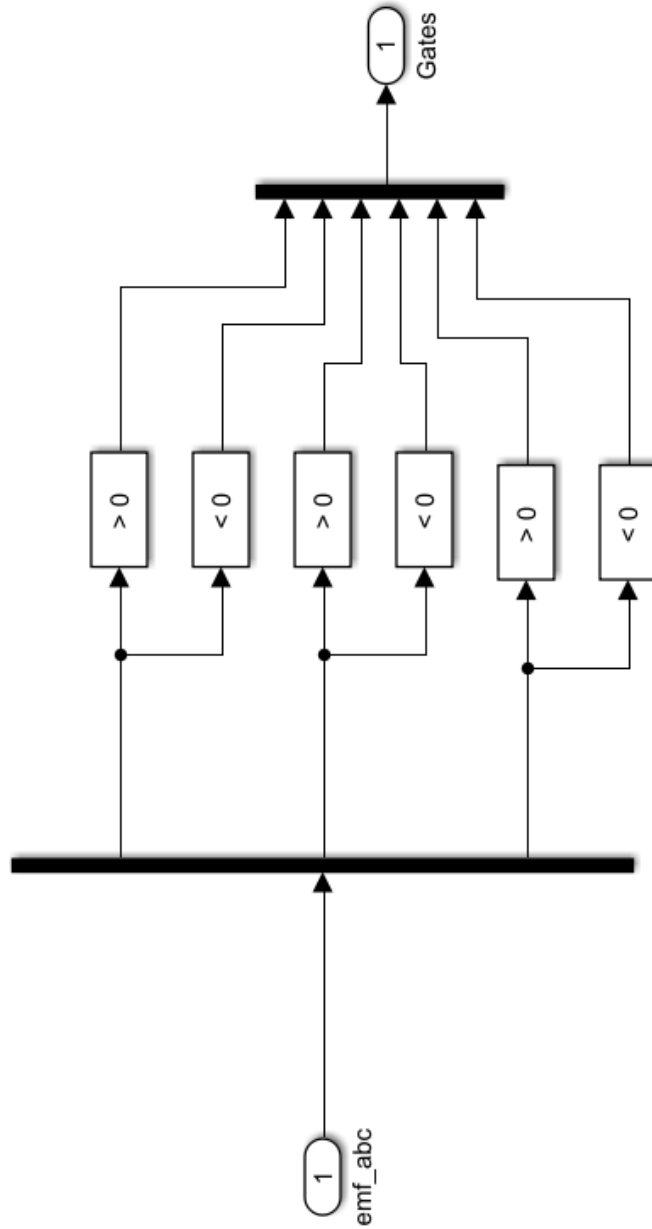
Şekil 66. Simulink Sistem Modeli

## EK 4. ÜÇ FAZ EVİRİCİ DEVRE



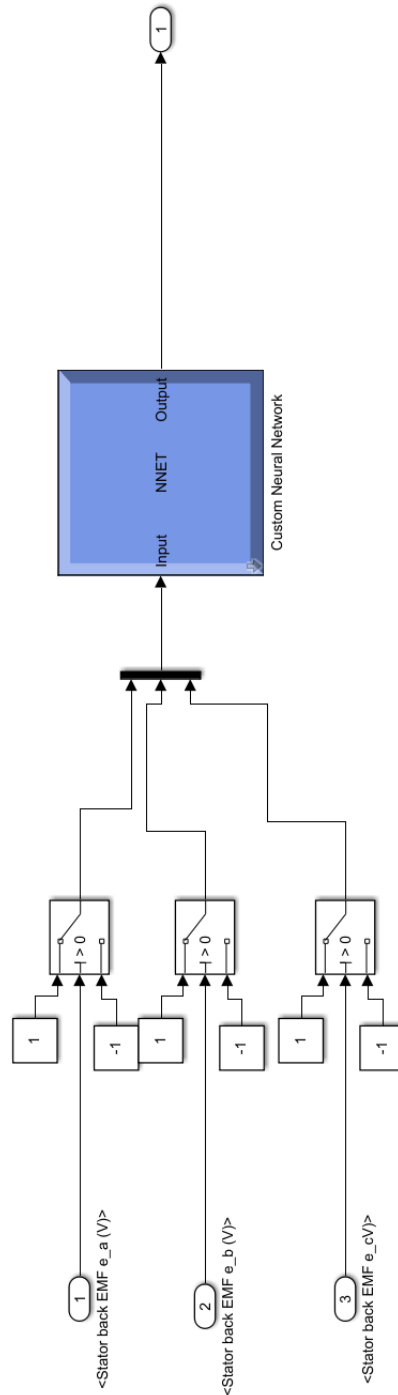
Şekil 67. Üç Faz Evirici Devre Sistem Modeli

## EK 5. KAPI SİNYALİ MANTIK DEVRESİ



Şekil 68. Zıt EMK Mantık Devresi

## EK 6. YSA SIMULINK MODELİ



Şekil 69.YSA Simulink Modeli