T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FPGA TABANLI ENKODER DESTEKLİ YÜKSEK HASSASİYETLİ MOTOR KONTROLÖR TASARIMI

Melisa AYDOĞAN

DANIŞMAN
Prof. Dr. Fırat KAÇAR

II. DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Vecdi Emre LEVENT

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Haziran, 2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Melisa AYDOĞAN tarafından, **Prof. Dr. Fırat KAÇAR** danışmanlığında hazırlanan **" FPGA Tabanlı Enkoder Destekli Yüksek Hassasiyetli Motor Kontrolör Tasarımı"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **24/06/2022** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Prof. Dr. Fırat KAÇAR İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Elektronik Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Serap CEKLİ İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Telekomünikasyon Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Abdullah YEŞİL Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Elektronik Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Melisa AYDOĞAN

Anneme, babama ve kardeşime ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

FPGA Tabanlı Enkoder Destekli Yüksek Hassasiyetli Motor Kontrolör Tasarımı

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince desteklerini esirgemeden gerek teknik konuda gerek motivasyon konusunda hep yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini paylaşan hem lisans hem de yüksek lisans eğitimimde yol gösterici olan, bana inanan çok değerli Prof. Dr. Fırat Kaçar'a ve beni destekleyen, yol gösteren Dr. Vecdi Emre Levent'e her şey için çok teşekkür ederim.

Her zaman her konuda beni destekleyen, inanan ve güvenen anneme, babama, kardeşime ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim. Son olarak bugünlerimizin mimarı Ulu Önder Mustafa Kemal Atatürk'e bizlere verdiği tüm hak ve özgürlükler için de teşekkür ederim.

Haziran 2022 Melisa AYDOĞAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **x**
TABLO LİSTESİ ..... **xiii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xiv**
ÖZET ..... **xvi**
ABSTRACT ..... **xviii**
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **3**
3. YÖNTEM **5**
3.1. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU (FSDAM) 5
3.1.1. FSDAM Çalışma Prensibi 5
3.1.2. FSDAM Yapısı 7
3.1.2.1. Stator *8*
3.1.2.2. Rotor *9*
3.1.3. Fırçasız DA Motorlarında Kullanılan Mıknatıslar 11
3.1.4. Rotor Yapısına Göre Fırçasız Doğru Akım Motoru Çeşitleri 11
3.1.4.1. Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motorları *11*
3.1.4.2. Disk Tipi Fırçasız Doğru Akım Motorları *12*
3.1.4.3. İç Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motorları *12*
3.1.5. Fırçasız DA Motorlarının Kontrolünde Kullanılan Sensörler 13
3.1.5.1. Alan Etkili Algılayıcılar (Hall Sensörleri) *13*
3.1.5.2. Kodlayıcılar (Encoder) *16*
3.1.5.3. Açı Algılayıcılar (Resolver) *19*
3.1.6. Fırçasız DA Motorlarında Faz Sayısı 20

3.1.6.1. Bir Fazlı Fırçasız Doğru Akım Motoru *20*
3.1.6.2. İki Fazlı Fırçasız Doğru Akım Motoru *21*
3.1.6.3. Üç Fazlı Fırçasız Doğru Akım Motoru *23*
3.1.7. Komüstasyon 28
3.1.7.1. Trapezoidal Komütasyon *29*
3.1.7.2. Sinüsoidal Komütasyon *31*
3.1.7.3. Alan Yönlendirmeli Kontrol *33*
3.1.8. Fırçasız Doğru Akım Motoru Dinamik Modeli 34
3.2. PROGRAMLANABİLİR MANTIK CİHAZLARININ GELİŞİMİ 36
3.2.1. Programlanabilir Bağlantı Teknolojileri 36
3.2.1.1. Fuse Teknolojisi *36*
3.2.1.2. Antifuse Teknolojisi *37*
3.2.1.3. EPROM Tabanlı Teknoloji *38*
3.2.1.4. EEPROM Tabanlı Teknoloji *39*
3.2.1.5. FLASH Tabanlı Teknoloji *40*
3.2.1.6. SRAM Tabanlı Teknoloji *40*
3.2.2. Programlanabilir Mantık Cihazlarının Gelişimi 42
3.2.2.1. SPLD (Simple Programmable Logic Devices) *42*
3.2.2.2. PROM *42*
3.2.2.3. PLA (Programmable Logic Array) *43*
3.2.2.4. PAL (Programmable Array Logic) *44*
3.2.2.5. GAL (Generic Array Logic) *44*
3.2.2.6. CPLD (Complex Programmable Logic Device) *45*
3.2.3. ASIC (Application Specific Integrated Circuits) 46
3.2.3.1. Full Custom *46*
3.2.3.2. Gate Arrays *47*
3.2.3.3. Standard Cell Devices *48*
3.2.3.4. Structured ASIC *48*
3.3. ALANDA PROGRAMLANABİLİR KAPI DİZGELERİ (FPGA) 49
3.3.1. FPGA Mimarisi 50
3.3.2. FPGA Programlama Teknolojileri 52
3.3.2.1. SRAM Tabanlı Programlama *52*
3.3.2.2. SRAM/Flash Tabanlı Programlama *53*
3.3.2.3. Anti-Fuse Tabanlı Programlama *53*

3.3.2.4. EPROM/EEPROM Tabanlı Programlama *53*
3.3.2.5. Flash Tabanlı Programlama *53*
3.4. PID KONTROLÖRLER 54
3.4.1. P Kontrolör 54
3.4.2. PD Kontrolör 55
3.4.3. PI Kontrolör 55
3.4.4. PID Kontrolör 56
3.5. MALZEMELER 57
3.5.1. Basys3 FPGA Geliştirme Kartı 57
3.5.2. Üç Fazlı Fırçasız DA Motoru 58
3.5.3. Motor Sürücü Kartı 58
3.5.4. Mutlak Enkoder 59
3.5.5. STM32F103 Nucleo-64 Kartı 59
4. BULGULAR 61
5. TARTIŞMA 72
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 75
KAYNAKLAR 77
EKLER 81
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 82
ETİK KURUL İZİN YAZISI 83
KURUM İZNİ YAZILARI 84
ÖZGEÇMİŞ 85

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3. 1: Pozisyon geri beslemeli bir FSDAM sürücü sisteminin devre şeması 6

Şekil 3. 2: Sürücü anahtarların bağlantı şeması 7

Şekil 3. 3: Mevcut pozisyon verilerine karşılık gelen hall sensör ve anahtar durumları 7

Şekil 3. 4: FSDAM İç Yapısı [34] 8

Şekil 3. 5: Stator Sargıları [3] 8

Şekil 3. 6: Fırçasız DA motorlarında kullanılan stator çeşitleri [8] 9

Şekil 3. 7: Fırçasız DA motorlarının rotor çeşitleri [3] 10

Şekil 3. 8: Dış rotorlu FSDAM iç yapısı [8] 12

Şekil 3. 9: Disk tipi FSDAM iç yapısı [8] 12

Şekil 3. 10: İç rotorlu FSDAM iç yapısı [8] 13

Şekil 3. 11: Hall sensörün çalışma prensibi [2] 14

Şekil 3. 12: Hall sensörünün çalışma karakteristiği [13] 15

Şekil 3. 13: Mutlak Temaslı Kodlayıcı Diski [14] 17

Şekil 3. 14: Artımlı enkoder [15] 18

Şekil 3. 15: Mutlak enkoder [15] 19

Şekil 3. 16: Bir açı algılayıcının (resolver) genel yapısı [13] 19

Şekil 3. 17: Bir Fazlı Fırçasız DA Motoru [18] 20

Şekil 3. 18: Bir Fazlı Fırçasız DA Motoru Sürücü Devresi [18] 21

Şekil 3. 19: 12 V 1W FSDAM Yapısı [18] 21

Şekil 3. 20: İki Fazlı FSDAM Devresi ve Faz Akımları Dalga şekilleri [18] 22

Şekil 3. 21: Üç Fazlı FSDAM Genel Yapısı [18] 23

Şekil 3. 22: 120° iletim Komütasyonu [18] 24

Şekil 3. 23: Üç Fazlı FSDAM Sürücü Devresi [18] 24

Şekil 3. 24: Pozisyon Moment Karakteristiği [18].....25
Şekil 3. 25: İdeal Akım Dalga Formları [18].....27
Şekil 3. 26: Komütasyon Sırasında Mıknatısların Manyetik Durumu [49].....29
Şekil 3. 27: Trapezoidal komütasyona ait hall sensör çıkışları ve faz gerilimleri [49].....30
Şekil 3. 28: Hall sensörleri ile trapezoidal (altı adımlı) komütasyon.....31
Şekil 3. 29: Sinüsoidal Komütasyon Akım Dalga Formları [49].....31
Şekil 3. 30: Sinüsoidal Faz Gerilimleri [49].....32
Şekil 3. 31: FSDAM İdealleştirilmiş Dalga Formları [49].....33
Şekil 3. 32: FSDAM Dinamik Modeli [47].....35
Şekil 3. 33: Programlanmamış eriyebilir bağlantılar [26].....36
Şekil 3. 34: Sigorta ile programlama.....37
Şekil 3. 35: Programlanmamış eriyebilir bağlantılar [26].....37
Şekil 3. 36: Antifuse Programlama [26].....37
Şekil 3. 37: Antifuse Programlama Aşamaları.....38
Şekil 3. 38: EPROM transistörleri ve standart MOS [26].....38
Şekil 3. 39: EPROM transistör tabanlı bir bellek hücresi [26].....39
Şekil 3. 40: EEPROM Hücresi [26].....40
Şekil 3. 41: SRAM teknolojisine sahip bir AND dizisi [29].....41
Şekil 3. 42: PLD' nin Gelişim Aşamaları.....42
Şekil 3. 43: PROM Programlama [26].....43
Şekil 3. 44: Programlanmamış PLA [26].....44
Şekil 3. 45: Programlanmamış PAL [26].....44
Şekil 3. 46: CPLD Yapısı [29].....45
Şekil 3. 47: ASIC Başlıkları.....46
Şekil 3. 48: Basit gate array temel hücreleri [30].....47
Şekil 3. 49: Gate Arrays yonga görünümü [30].....47
Şekil 3. 50: Yapısal ASIC temelleri [30].....49

Şekil 3. 51: Yapısal ASIC genel mimarisi [30].....49

Şekil 3. 52: Basit FPGA Yapısı [29].....51

Şekil 3. 53: Global satır/sütun programlanabilir ara bağlantıları içindeki temel yapılandırılabilir mantık blokları (CLB'ler) [29].....51

Şekil 3. 54: LUT-4 Uygulaması [48].....52

Şekil 3. 55: P kontrolör geri besleme kontrol sistemi.....54

Şekil 3. 56: PD Kontrolör geri besleme kontrol sistemi.....55

Şekil 3. 57: PI Kontrolör geri besleme kontrol sistemi.....56

Şekil 3. 58: PID Kontrolör geri besleme kontrol sistemi.....56

Şekil 3. 59: Basys3 FPGA Geliştirme Kartı [39].....58

Şekil 3. 60: Üç Fazlı Fırçasız DA Motoru [40].....58

Şekil 3. 61: Motor Sürücü Kartı [38].....59

Şekil 3. 62: Mutlak Enkoder [37].....59

Şekil 3. 63: STM32F103 Nucleo-64 Development Board [46].....60

Şekil 4.1: Kurulan sistemin şematik gösterimi.....61

Şekil 4.2: Clock Wizard Şematik Gösterimi.....62

Şekil 4.3: Hall sensör VHDL kodu.....62

Şekil 4.4: SPI Protokolü Bağlantı Şeması.....63

Şekil 4.5: Enkoder VHDL Kodu.....63

Şekil 4.6: STM32 ile enkoder açısı hesaplama ve hall sensör okuma işlemi.....64

Şekil 4.7: UART Protokolü VHDL Kodu.....64

Şekil 4.8: Komut ifadeleri.....65

Şekil 4.9: Motor Kontrol Ara Yüzü.....65

Şekil 4.10: FSDAM için PID Kontrolör Akış Diyagramı.....66

Şekil 4.11: Fırçasız DA Motorunun PID Kontrolör ile ile Kapalı Çevrim Pozisyon Kontrolü.....67

Şekil 4.12: PID Kontrolör VHDL Kodu.....67

Şekil 4.13: PWM Sinyalleri VHDL Kodu 68
Şekil 4.14: Duty cycle değeri 25 iken PWM sinyali 68
Şekil 4.15: Duty cycle değeri 50 iken PWM sinyali 68
Şekil 4.16: PWM Frekansı ve Duty Cycle VHDL kodu 69
Şekil 4.17: Uygulanan PWM Sinyalleri 69
Şekil 4.18: Motor fazlarına verilen sinyaller 69
Şekil 4.19: ILA (Integrated Logic Analyzer) 70
Şekil 4.20: ILA Komponent Tanımlaması 70
Şekil 4.21: ILA Pin Atamaları 71
Şekil 4.22: Tez çalışmasında kullanılan sistem 71

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Fırçasız DA Motor Düzeneğinde Hall Sensörlerinin Motorun Sağa Dönüşüne Bağlı olarak ürettiği işaretler [13] 15

Tablo 3.2: Fırçasız DA Motor Düzeneğinde Hall Sensörlerinin Motorun Sola Dönüşüne Bağlı olarak ürettiği işaretler [13] 16

Tablo 5.1: Hedef ve Mevcut Pozisyon Değerleri 73

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

F : Elektrik yüküne etkiyen kuvvet
q : Elektronun hızı
B : Manyetik alan şiddeti
α : Plaka düzlemi ile manyetik alan arasında kalan yatay açı
h : Metal plaka malzemesinin hassasiyet katsayısı
W : Açısal hız
T : Örnekleme periyodu
n : Örnekleme periyodu içerisindeki darbe sayısı
N : Diskteki ızgara sayısını
f : Frekans
Va : A fazındaki stator gerilimi
Vb : B fazındaki stator gerilimi
Vc : C fazındaki stator gerilimi
R : Faz başına stator direncidir
ia : A fazındaki stator akımı
ib : B fazındaki stator akımı
ic : C fazındaki stator akımı
L : Öz endüktans
M : İki faz arasındaki karşılıklı endükta**ns**
e : Fazlarda indüklenen zıt EMK
Te : Elektromanyetik tork
ωm : Mekanik açısal hız
J : Rotor ve bağlı şaftın ataleti
B : Sönüm sabiti
θ : Açısal dönüş
P : Kutup çifti sayısı
Kp : Oransal kazanç
Ki : İntegral Kazancı
Kd : Türev Kazancı

Kısaltmalar	Açıklama
ASIC	: Aplication Sipesific Integrated Circuits
CLB	: Configurable Logic Block
CPLD	: Complex PLD
DA	: Doğru Akım
EEPROM	: Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
EPROM	: Erasable Programmable Read Only Memory
FOC	: Field Oriented Control
FPGA	: Field Programmable Gate Arrays
FSDAM	: Fırçasız Doğru Akım Motoru
GAL	: Generic Array Logic
LUT	: Look-Up Table
VHDL	: Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language
SRAM	: Static Random Access Memory
PAL	: Programmable Array Logic
PLA	: Programmable Logic Array
PLD	: Programmable Logic Device
PROM	: Programmable Read Only Memory
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
SPLD	: Simple PLD

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FPGA TABANLI ENKODER DESTEKLİ YÜKSEK HASSASİYETLİ MOTOR KONTROLÖR TASARIMI

Melisa AYDOĞAN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Danışman : Prof. Dr. Fırat KAÇAR
II. Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Vecdi Emre LEVENT

Hassas motor kontrolü özellikle pan-tilt gibi sistemlerin yüksek açısal doğrulukta rotasyonu uygulamalarında oldukça kritiktir. Kamera ve pan-tiltin bir arada kullanıldığı sistemlerde, kameranın yüksek zoom değerleri ile çalışma durumunda motorların yüksek hassasiyetle kontrol edilmemesi, izlenmek istenen yerden metrelerce sapmaya neden olabilir. Bu gereksinimler hem kontrol algoritmasının yüksek başarımlı hem de kontrolcünün yüksek frekansta ve paralel veri işleyebilme yeteneğinin olması gerekliliğini doğurmaktadır.

Fırçasız DA motoru hassas kontrol edilebilmeleri, yüksek verimli olmaları, hızlı yanıt vermeleri, uzun çalışma ömürleri, bakım gerektirmemeleri, yüksek hız aralıklarında çalışmaları ve sessiz çalışmaları gibi sağladığı avantajlar sebebi ile savunma, medikal, robotik gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir fırçasız DA motorunun bir başka avantajı da aynı güç çıkışına sahip bir fırçalı doğru akım motorundan daha küçük ve daha hafif yapılabilmesi, bu nedenle alan ve ağırlık açısından daha kullanışlı olmasıdır. Dezavantajı ise kontrolünün daha karmaşık olmasıdır. Ayrıca motor pozisyonu için bir kontrol mekanizmasına ihtiyaç

duyulmaktadır, bu kontrol mekanizması sensörlü veya sensörsüz olabilir. Sensörlü kontrolde enkoderler, hall sensörler ya da açı algılayıcılar kullanılabilmektedir. Bu tasarımda mutlak enkoder kullanılmış ve elde edilen pozisyon değeri bir PID kontrolörün girişine verilmiştir. PID kontrolör FPGA üzerinde tasarlanmış olup programlama için VHDL donanım tanımlama dili kullanılmaktadır. Motorun, tasarlanan ara yüz üzerinden alınan hedef pozisyona ulaşması için FPGA ile PWM sinyalleri üretilmektedir. Üretilen bu sinyaller motor sürücü kartına bağlanarak MOSFETler üzerinden anahtarlama yapılması ile sargılara sırayla akım verilerek motorun dönmesi sağlanmaktadır.

Tez çalışması kapsamında fırçasız DA motoru ile ilgili kavramlar ele alınmış motorun yapısı, çalışma prensibi incelenmiştir. Tasarım FPGA tabanlı bir sistem üzerinde gerçeklenmiştir. Programlanabilir mantık cihazı üzerinde geliştirme aşamaları, tasarım yöntemleri ve FPGA ile ilgili araştırmalara yer verilmiştir. Kontrol algoritmaları incelenmiş ve FPGA/MCU tabanlı PID kontrol algoritmasının başarımları kıyaslanmıştır. FPGA ve MCU tabanlı kontrol çözümü ile hata minimize edilerek motorun hedef pozisyona ulaşması hedeflenmiştir. Bu amaç ve ihtiyaçlar doğrultusunda gerekli tasarımlar yapılarak, elde edilen sonuçlar aktarılmıştır.

Haziran 2022 , 105 sayfa.

Anahtar kelimeler: Fırçasız DA Motoru, FPGA, PID Kontrolör, Mutlak Enkoder

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

FPGA BASED HIGH PRECISION MOTOR CONTROLLER WITH ENCODER SUPPORT

Melisa AYDOĞAN

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronics Engineering

Electrical and Electronics Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Fırat KIÇAR

Co-Supervisor: Assist. Prof. Dr. Vecdi Emre LEVENT

Precise motor control is especially critical in high angular accuracy rotation applications of systems such as pan-tilts. In systems where the camera and pan-tilt are used together, not controlling the motors with high precision in case the camera works with high zoom values may cause a deviation of meters from the targeted position. These requirements necessitate both the high performance of the control algorithm and the ability of the controller to process high frequency and parallel data.

Brushless DC motors are widely used in many fields such as defense, medical, robotics, due to their advantages such as being sensitive to control, high efficiency, fast response, long working life, no maintenance, working in high speed ranges and quiet operation. Another advantage of a brushless DC motor is that it can be made smaller and lighter than a brushed DC motor of the same power output, so it is more useful in terms of space and weight. The downside is that it is more complex to control. In addition, a control mechanism is needed for the motor position, this control mechanism can be with or without sensors. Encoders, hall sensors or resolvers can be used in sensor control. In this design, absolute encoder is used and the obtained

position value is given to the input of a PID controller. PID controller is designed on FPGA and VHDL hardware definition language is used for programming. PWM signals are produced with FPGA in order for the motor to reach the target position taken over the designed interface. These generated signals are connected to the motor driver card and the motor is rotated by giving current to the windings sequentially by switching over the MOSFETs.

Within the scope of the thesis, the concepts related to the brushless DC motor were discussed and the structure and working principle of the motor were examined. The design was implemented on an FPGA-based system. Development stages, design methods and researches on FPGA on programmable logic device are included. The control algorithms are examined and the performances of the FPGA/MCU based PID control algorithm are compared. With the FPGA and MCU-based control solution, it is aimed to minimize the error and reach the target position of the motor. Necessary designs were made in line with these purposes and needs, and the results were conveyed.

June 2022, 105 pages.

Keywords: BLDC Motor, Absolute Encoder, FPGA, PID Controller

1. GİRİŞ

Fırçasız DA motoru, günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv, beyaz eşya ve savunma sanayide popüler hale gelmektedir çünkü geleneksel motorlardaki mekanik komütatör yerini elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren bir sisteme bırakmaktadır. Geleneksel bir motorun fırçaları, enerji verildiğinde sabit bir manyetik alanda dönen rotor sargılarına güç iletir. Sabit fırçalar ile dönen rotor üzerindeki dönen metal temas arasındaki sürtünme aşınmaya neden olur. Ayrıca, fırçanın metale zayıf teması ve ark nedeniyle güç kaybı olabilir. Bir fırçasız DA motorunda ise fırçalar yoktur bunun yerine "elektronik komütatör" vardır, bu sayede aşınma ve güç kaybı ortadan kaldırılarak motorun güvenilirliği ve verimliliği artırılır. Ayrıca, fırçasız DA motorları, fırçalı DA motorlarına ve asenkron motorlara göre daha iyi hız ve tork özellikleri dahil olmak üzere bir dizi başka avantaja sahiptir; daha hızlı dinamik yanıt, gürültüsüz çalışma ve daha yüksek hız aralıkları gibi. Bir fırçasız DA motorunun bir başka avantajı da aynı güç çıkışına sahip bir fırçalı DA motorundan daha küçük ve daha hafif yapılabilmesi sebebiyle alanın dar olduğu uygulamalar için uygun hale getirilmesidir. Dezavantajı ise fırçasız DA motorlarının çalışması için elektronik yönetime ihtiyaç duymasıdır. Örneğin, stator bobinlerine doğru zamanda enerji vermek için rotorun konumunu gösteren sensörlerden gelen girdileri kullanan bir mikro denetleyiciye ihtiyaç vardır. Hassas zamanlama, doğru hız ve tork kontrolünün yanı sıra motorun en yüksek verimlilikte çalışmasını sağlar [35].

Motor sürücü sistemi, rotorun pozisyon bilgisine göre, stator sargılarından geçen akımın yönünü değiştirerek rotorun dönmesini sağlar. Üç fazlı fırçasız DA motorunu kontrol etmek için 6 anahtarlı bir devre kullanılır ve açma, kapama sinyalleri gönderilerek motor hareket ettirilir. Bir köprü yapısında düzenlenmiş üç çift güç MOSFETi kullanılmaktadır. Her çift, motorun bir fazının anahtarlamasını yönetir. Tipik bir düzenlemede, yüksek taraf MOSFETler, giriş DA voltajını modüle edilmiş bir sürüş voltajına dönüştüren darbe genişlik modülasyonu (PWM) kullanılarak kontrol edilir. PWM kullanımı, başlatma akımının sınırlandırılmasına olanak tanır ve hız ve tork üzerinde hassas kontrol sunar. PWM frekansı, yüksek frekanslarda meydana gelen anahtarlama kayıpları ile düşük frekanslarda meydana gelen ve aşırı durumlarda motora zarar verebilecek dalgalanma akımları arasındaki bir dengedir. Tipik olarak,

tasarımcılar maksimum motor dönüş hızından en az bir büyüklük mertebesinde daha yüksek bir PWM frekansı kullanır [36].

Fırçasız DA motorların pozisyonunu belirlemek için çeşitli kontrol yöntemleri kullanılmaktadır bunlar, alan etkili algılayıcılar (hall sensörleri), kodlayıcılar (encoder), açı algılayıcılar (resolver) olarak sıralanabilir. Uygulamaya uygun olan yöntemi bulmak için gerekli karşılaştırmalar yapılarak bir sonuca ulaşılır. Pozisyon kontrolü ve hız kontrolünde geri besleme olarak kullanılacak bu verilerin doğruluğu ve hassasiyeti uygulama için ne derece önemli bu belirlenir. Bu çalışmada pozisyon kontrolü önemli olduğu için pozisyonun hassas bir şekilde ölçülmesi ve doğruluğu büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple mutlak enkoder kullanılmış olup SPI haberleşme protokolü ile pozisyon datasına erişim sağlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında öncelikle fırçasız DA motoru incelenecek olup çalışma prensibi, yapısı, içerisinde kullanılan mıknatıs türleri, yapılarına göre türleri, kontrolünde kullanılan sensörler ve matematiksel modeli ile ilgili bilgiler verilmiştir. Sonrasında ise PLD'lerin gelişim aşamaları incelenerek FPGA ile ilgili açıklamalara yer verilmiştir. Son olarak ise fırçasız DA motorunun pozisyon kontrolünü sağlamak için kullanılan PID kontrolör ve diğer kontrolörler ile ilgili açıklamalar yapılmıştır. Kurulan sistemde FPGA üzerinden, VHDL donanım tanımlama dili kullanılarak, PWM sinyalleri üretilecek ve motor sürücü kartı üzerinden fırçasız DA motorunun üç fazına bağlanacaktır böylece motorun dönmesi sağlanacaktır. Motorun pozisyonu kontrol etmek için yüksek hassasiyetli bir mutlak enkoder kullanılarak, bu enkoderdan alınan değer PID kontrolörün girişine bağlanacaktır. PID kontrolörün set değeri girilen hedef pozisyon değerine karşılık gelmektedir. Hedef pozisyon ise C# ile yazılmış olan bir ara yüz aracılığıyla sisteme iletilmektedir, ayrıca bu ara yüz üzerinden motorun hızı da ayarlanabilmektedir. Yapılan tüm işlemler MCU üzerinde de uygulanarak motorun hedefe ulaşma süresi ve doğrulukları incelenerek FPGA ve MCU arasında karşılaştırmalar yapılmış ve yorumlanmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Literatür taraması sonucunda çeşitli FPGA tabanlı fırçasız DA motoru kontrol uygulamalarına rastlanmıştır. Çalışmaların arasında kontrol yöntemleri, kullanılan motor, kullanılan pozisyon sensörü, motor sürücü devresi ve mikrodenetleyici/FPGA'ler gibi farklılıklar bulunmaktadır. Bunlardan birinin değişmesi dahi sistemi bütünüyle etkilemektedir. Bu etkileri daha iyi anlayabilmek için kaynaklar incelenerek farkların yarattığı etkiler daha iyi anlaşılacaktır.

Myo Maung Maung, Maung Maung Latt ve Chaw Myat Nwe çalışmalarında PID kontrolör kullanarak DA motorunun sürtünme dengelemeli olarak açısal pozisyonu üzerine çalışmışlardır ve Arduino üzerinde uygulamışladır. Motor sürücü olarak L298N kullanmışlardır ve PID kontrol algoritması ile motor sürücü devresine uygulanacak olan PWM sinyallerini hesaplamışlardır. Motor olarak 12V Namiki DA dişli motor ve optik enkoder kullanmışlardır kullanılan materyallerin pozisyon kontrolü için uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ve hedef pozisyonda durması yani sabit durum hatasının sıfıra yakın olduğu sonucuna varmışladır [41].

Imran Sarwar çalışmasında fırçasız DA motoruna ait hareket kontrolü için modelleme yapmıştır. Rootlocus tekniği, durum geri besleme kontrolörü ve kararlı durum için integral kontrolör yöntemlerini uygulamış; kararlı durum hatalarını ve yerleşme zamanlarını karşılaştırmıştır. Rootlocus tekniğinin sabit durum hatalarını kontrol etmekte başarısız olduğunu belirtmiştir. Durum geri besleme denetleyicisinin ise yüzde aşımını kontrol etmiş, ancak sabit durum hatası çok yüksek olduğunu ifade etmiştir. İntegral kontrolör yönteminin ise kararlı durum hatasını başarılı bir şekilde kontrol ettiğini ve en uygun yöntem olduğu sonucuna varmıştır [42].

Si Young Yun, Ho Joon Lee, Jung Ho Han ve Ju Lee hall sensörü kullanarak düşük maliyetli fırçasız DA motorunun konum kontrolü üzerine çalışmışladır. Kontrolör olarak dsPIC33FJMC804 CPU kullanmışlardır ve yüzeye monte sabit mıknatıslı motor olan prototip ile uygulama yapmışlardır. Sistemin 0° ile 90° arasında yanıt süresi ve hedef pozisyona ne derecede yaklaştıklarını karşılaştırmışlardır. Araç hava giriş sistemi için tasarlandığı için

pozisyonun çok önemli olmadığını bu sebeple elde ettikleri değerlerin sistem için yeterli olduğunu belirtmişlerdir [45].

Özkan Atan, yüksek lisans tezinde fırçasız DA motorunun tasarlanması ve PWM yöntemi ile kontrolü üzerine çalışmıştır. Fırçasız DA motorunun farklı darbe genişliklerinde hız, gerilim, akım ve momentin değişimini izlemiştir. Simülasyon çalışmasında ise darbe genliğini PID kontrolör kullanarak sistemin hız kontrol başarımını gözlemiştir. Uygulama aşamasında ise sistemi kontrolsüz bir şekilde çalıştırarak doğrultucudan çekilen akım ve uygulanan gerilim değişimini incelemiş ve farklı darbe genliğine sahip gerilimler uygulamış ve gerilim dalga şekilleri ile simülasyon sonuçlarını karşılaştırmıştır. Sonuç olarak bir işlemci ve sürücü devresi ile motor hızının kontrol edilebileceğini belirmiştir [4].

Burcu Ulu, yüksek lisans tezinde fırçasız DA motorunun hız kontörlü üzerine çalışmıştır. Motora uygulanacak olan PWM sinyalini PI ve PID kontrolör ile belirlemiş ve gerçek zamanlı hız kontrolünü hedeflemiştir. Motorun herhangi bir andaki yük değişimi, giriş gerilimi dalgalanması gibi bozucu etkileri telafi etmek için referans girişini ayarlamıştır ve istenilen hıza ulaşmasını sağlamıştır. Çalışmasında kurulan sistemin sonucunda PI kontrolörün PID kontrolöre göre daha iyi bir çözüm olduğu sonucuna varmıştır [2].

Yusuf Kösesoy, yüksek lisans tezinde FPGA tabanlı fırçasız doğru akım motoru denetleyicisinin tasarımı ve uygulaması üzerine çalışmıştır. Motor hızının tespiti için artımlı enkoder, konum tespiti ve moment ölçümleri için hall sensör kullanmıştır. Elektromanyetik girişim ve uyumluluk sorunlarını minimize etmek için dört katmanlı bir baskı devre tasarlamıştır. PI kontrol kullanmış ve FPGA üzerinde uygulamasını yapmıştır [44].

3. YÖNTEM

3.1. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU (FSDAM)

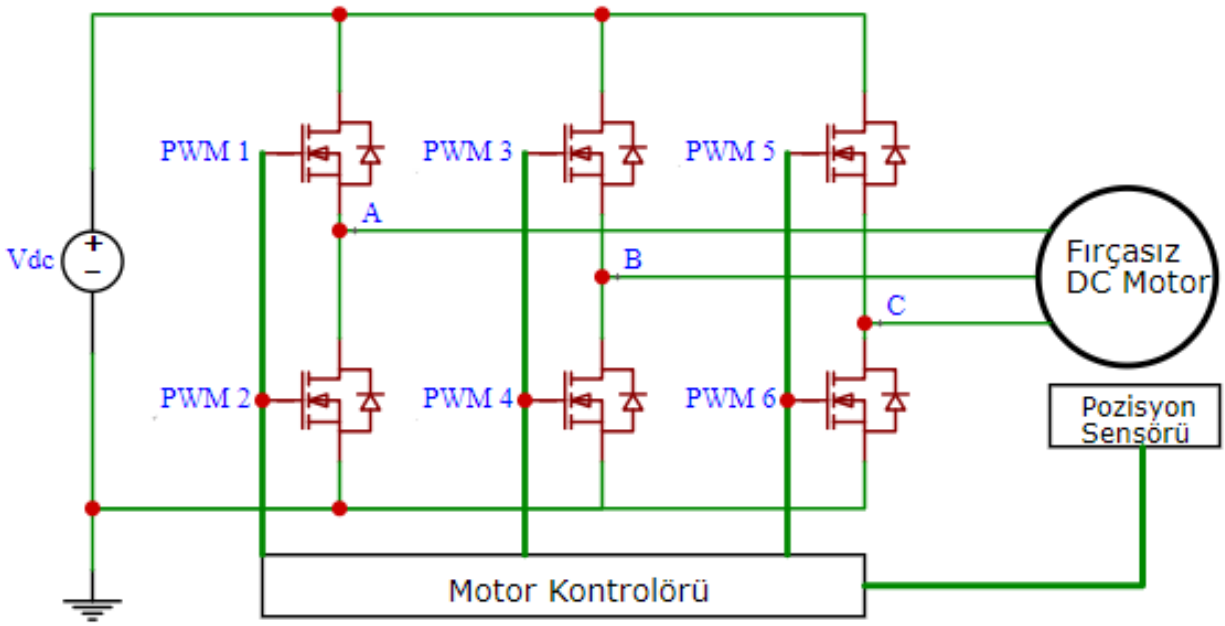
Fırçasız doğru akım motorları adından da anlaşılacağı üzere komütasyon için fırça kullanmazlar bunun yerine elektronik olarak komüte edilirler. Komütasyon ifadesi, rotorla birlikte hareket eden iletkenlerdeki akımın yönü, iletken bir kutbun altından diğer kutbun altına doğru geçmesiyle yön değişikliğine uğramasından kaynaklanan ve bobin iletkenlerinden geçen akımın yön değiştirmesi olayı olarak tanımlanmaktadır.

Fırçasız doğru akım motorunun yapısı sabit mıknatıslı senkron motora benzerken, çalışma prensibi olarak DA motorlarına benzemektedir. Fırçasız DA motorunu çalıştırmak ve kontrol etmek için statora gömülü pozisyon sensörü ve 3 fazlı invertör uygun kontrol sistemi ile sürücü sistemine dahil edilmelidir [1]. Fırçalı ve fırçasız DA motorları karşılaştırıldığında FSDAM'ların daha verimli çalıştığı görülmektedir. Örnek vermek gerekirse, aynı giriş gücü hem fırçalı hem de fırçasız doğru akım motoruna uygulandığında fırçasız motor elektrik enerjisini mekanik enerjiye daha verimli dönüştürür. Bunun yanı sıra pek çok avantajı bulunmaktadır, tork özelliklerine karşı daha yüksek hız aralıkları, hızlı dinamik cevap, yüksek verim, çalışma ömrünün uzun olması, sessiz çalışması şeklinde sıralanabilir. Ayrıca soğutulmaları sargıların statora yerleştirilmesi ile kolaylaşır, böylece motor daha fazla yüklenme imkânı bulur. Fırçalı doğru akım motorundaki fırça kayıpları ve kıvılcım gibi sorunlar meydana gelmez. Rotor geometrisinin silindirik yapılmasıyla titreşim sorunları da azaltılabilir. İvmelenme süresini kısaltmak için güçlü mıknatıslar kullanılarak rotor çapı küçültülebilir [2].

3.1.1. FSDAM Çalışma Prensibi

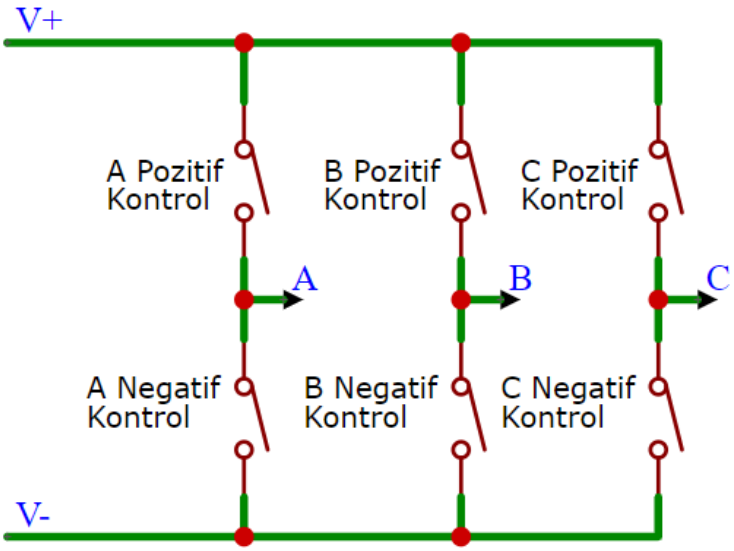
FSDAM, sabit mıknatıslı bir rotora sahip bir tür senkron motordur. Elektronik komütasyonun yapılabilmesi için rotorun konumunun bilinmesi gerekmektedir. Stator sargıları bir evirici üzerinden ve eviriciler de bir akım kaynağı tarafından beslenmektedirler. Evirici üzerindeki anahtarlama elemanı olarak kullanılan transistörler rotor konumuyla senkron bir şekilde belli bir sıra ile anahtarlanırlar. Rotor üzerindeki konum algılayıcı veya algılayıcısız kontrol algoritması ile konuma bağlı olarak hangi anahtarın açılıp kapanacağına karar

verilmektedir. Pozisyon değerinin geri dönüş değeri olarak kullanıldığı klasik bir FSDAM sürücü sistemi kontrol şematiği Şekil 3.1'deki gibi olmaktadır.



Şekil 3. 1: Pozisyon geri beslemeli bir FSDAM sürücü sisteminin devre şeması

Statordaki akım yönü, hall sensörden alınan rotor konum bilgisine göre değişmektedir. Değiştirme işlemi Şekil 3.2'deki anahtarlar ile sağlanmaktadır. Anahtarların kontrolü aracılığıyla stator sargılarına verilen gerilim ve akımın yönü ile rotorda dönme hareketi meydana gelmektedir. Dönme esnasında statorda manyetik alan kutbu oluşur. Stator ve rotordaki manyetik alan kutuplarının zıt kutupların birbirini çekmesi, aynı kutupların birbirini itmesi sonucunda dönme momenti meydana gelmektedir, momentin büyüklüğü rotor ile stator arasındaki manyetik alan şiddetine bağlıdır. Dönme hareketiyle birlikte rotorun pozisyonu da değişmektedir. Sensörler aracılığı ile konum değişimleri algılanır, işlemciye gönderilir ve yeni konuma göre anahtarların durumu değiştirilir. Rotor yeni konumuna göre de bir itme çekme kuvveti etkisinde kalır bu esnada anahtarlamalar hızlı bir şekilde yapılırken rotorun dönme hareketinin de devamlılığı sağlanmış olur. Dönme sonucu oluşan sensör ve anahtarların konumları Şekil 3.3'te verilmiştir [2].



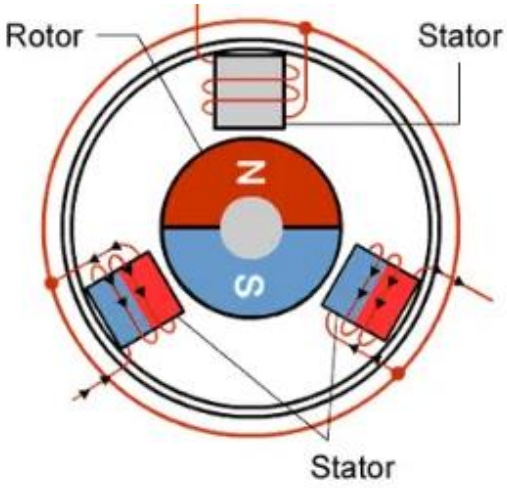
Şekil 3. 2: Sürücü anahtarların bağlantı şeması

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

Şekil 3. 3: Mevcut pozisyon verilerine karşılık gelen hall sensör ve anahtar durumları

3.1.2. FSDAM Yapısı

Fırçasız doğru akım motorları stator ve rotor olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. FSDAM'lar da bir tür senkron motordur. Bu ifade stator ve rotor tarafından oluşturulan manyetik alanların aynı frekansta dönmesi anlamına gelmektedir. Fırçasız DA motorlarında, indüksiyon motorlarındaki gibi kayma meydana gelmez. Fırçasız DA motorları tek fazlı, 2 fazlı veya 3 fazlı olarak üretilebilmektedirler. Faz sayısına göre stator aynı sayıda sargıya sahiptir. En yaygın olarak kullanılan fırçasız DA motor türü ise 3 fazlı olandır [3].



Şekil 3. 4: FSDAM İç Yapısı [34]

3.1.2.1. Stator

FSDAM'ın statoru, bir yüzü yalıtılmış çelik sacların preslenmesi ile elde edilmektedir. FSDAM sargıları yıldız veya üçgen bağlanabilir [3]. Fırçasız DA motorlarında, rotor oluk sayısı; rotorun kutup sayısına, faz sayısına ve stator sargı şekline bağlı olarak belirlenmektedir. Demir kayıplarını azaltmak amacıyla statorların yapımında silisli saclar kullanılmaktadır [5]. Ayrıca sargıların statorda yer alması da sargılarda meydana gelen ısınmanın en efektif şekilde dışarı aktarılmasını ve motorun da daha hızlı soğumasını sağlar. Bu sayede hem motorun ömrü artmış hem de yüksek hızlarda mekanik sorunlar en aza indirilmiş olur [6].



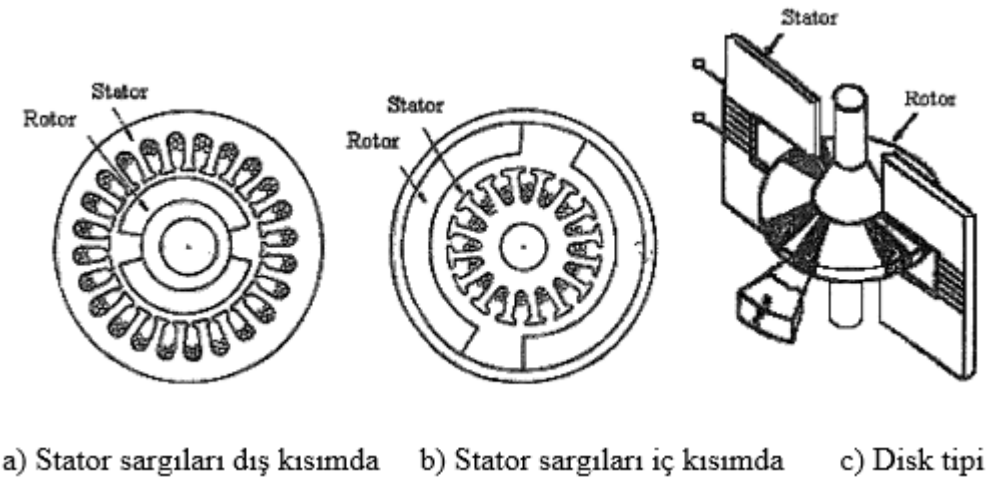
Şekil 3. 5: Stator Sargıları [3]

FSDAM'larda kullanılan stator çeşitleri aşağıdaki gibidir.

a) Stator sargıları dış kısma yerleştirilmiştir, bu yapı yüksek hız ve momente ihtiyaç duyulan uygulamalar için uygundur.

b) Stator sargıları iç kısımdadır, salınım istenmeyen ve sabit hız istenen uygulamalar için uygundur.

c) Disk tipi stator görülmektedir, düşük hız ve düşük güç hedeflenen uygulamalar için uygundur [8].



a) Stator sargıları dış kısımda b) Stator sargıları iç kısımda c) Disk tipi

Şekil 3. 6: Fırçasız DA motorlarında kullanılan stator çeşitleri [8]

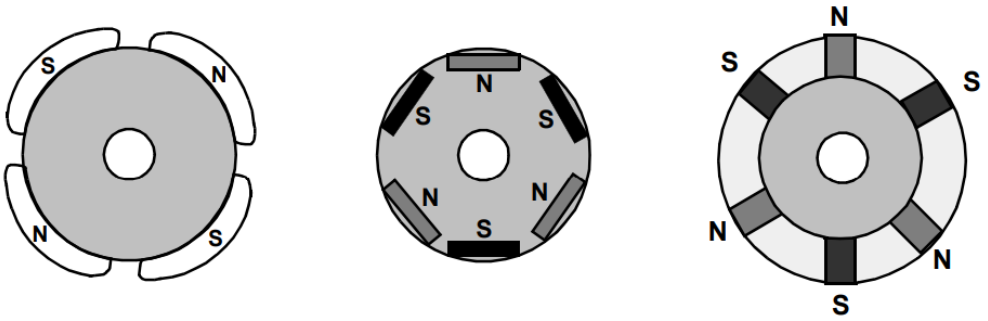
3.1.2.2. Rotor

Fırçasız DA motorlarında mıknatısların yerleştirildiği dış gövde kısmına rotor olarak tanımlanmaktadır. Rotorun kutup sayısı statora göre değişkenlik göstermektedir. Kutup sayısı ile tork seviyesi doğru orantılıdır, torkun fazla olması devirin ve hızın düşmesine neden olmaktadır [6].

Rotor kalıcı mıknatıstan yapılmıştır ve alternatif Kuzey (K) ve Güney (G) kutuplarıyla iki ila sekiz kutup çifti arasında değişebilir. Rotordaki gerekli manyetik alan yoğunluğuna bağlı olarak, rotoru yapmak için uygun manyetik malzeme seçilir. Ferrit mıknatıslar genel olarak kalıcı mıknatıslar yapmak için kullanılır. Ferrit mıknatısların maliyeti daha uygundur ancak birim hacimdeki akı yoğunluğunun düşük olması gibi bir dezavantajı vardır. Buna karşılık, alaşım malzemede birim hacimdeki manyetik akı yoğunluğu daha yüksektir ve rotorun aynı tork değeri için daha fazla sıkıştırmasını sağlar. Ayrıca, bu tür mıknatıslar, boyut-ağırlık oranını iyileştirir ve ferrit mıknatıslar kullanan aynı boyuttaki motor için daha yüksek tork sağlarlar, bu tür mıknatıslara örnek olarak Neodimyum (Nd), Samarium Kobalt (SmCo) ve Neodimyum, Ferrit ve Boron (NdFeB) alaşımı verilebilir [3].

Fırçasız DA motorları, aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere mıknatısların rotora yerleştirme şekillerine göre üçe ayrılmaktadır. Bunlar, rotor yüzeyine monte edilmiş

mıknatıslardan oluşan motor (a), dikdörtgen kesitli sabit mıknatısların rotora gömülü olarak monte edilmesiyle elde edilen motor(b) ve dikdörtgen kesitli sabit mıknatısların rotor kanallarına yerleştirilmesi ile elde edilen (c) motorlardır [3].



a) Yüzey montajlı rotor b) Gömülü montajlı rotor c) Kanal montajlı rotor

Şekil 3. 7: Fırçasız DA motorlarının rotor çeşitleri [3]

Yüzey mıknatıslı, fırçasız DA motorları: Sabit mıknatısların rotor dış yüzeyine yerleştirildiği yapıdır, mıknatısların stator kutuplarına yakınlığından kaynaklı yüksüz durumda daha küçük bir momente sahiptir. Ayrıca rotorun dış yüzeyindeki mıknatısların yüksek hızlarda yerinden çıkma riski bulunmaktadır. Bu yapıda etkin hava boşluğu rotor pozisyonuna göre değişim göstermektedir, bu da endüktans değişimine sebep olmaktadır [2].

Hava aralığı: Stator ile rotor arasındaki dairesel boşluk hava aralığı olarak tanımlanmaktadır. Hava aralığı motor verimi üzerinde oldukça etkilidir. Hava aralığı ile kalıcı mıknatısların oluşturduğu manyetik akının etkisi ters orantılıdır, yani hava aralığı ne kadar fazla ise manyetik akı o kadar azalmakta ve buna bağlı olarak motorun momentinin düşmesine sebep olmaktadır [8].

Gömülü mıknatıslı, fırçasız DA motorları: Dikdörtgen kesitli sabit mıknatısların rotorun iç tarafına yerleştirilmesi ile oluşturulan yapıdır. Kullanımı pek yaygın olmamakla birlikte yüksek hızlarda çalışmak için uygundur. Rotor pozisyonu ve endüktans değişimi önemsenmeyecek kadar düşük bir seviyededir [2].

Kanal mıknatıslı, fırçasız DA motorları: Dikdörtgen kesitli sabit mıknatısların rotorun kanallarına yerleştirilmesi ile oluşan yapıdır, en iyi motor türü olarak nitelendirilebilir [2].

3.1.3. Fırçasız DA Motorlarında Kullanılan Mıknatıslar

Rotorun manyetik alanının ömrü rotor yüzeyine yerleştirilen mıknatıslara bağlıdır. Bu sebeple mıknatıs seçimi de oldukça önemlidir. Dolayısıyla motor seçilirken göz ardı edilmemesi gereken en önemli özellikler motorun birim hacmindeki momenti, çalışma sıcaklığı ve fonksiyonellik bakımından mıknatısın sertliğidir [10]. Rotorlarda sabit mıknatıs olarak genellikle ferrit ya da seramik, AlNiCo (Alüminyum-Nikel-Kobalt) ve samaryum-kobalt (SmCo) mıktanıs türleri kullanılmaktadır. Bu maddelere ilâveten günümüzde rotorda, neodmiyum-ferrit-boron (NdFeB) ve neodmiyum (Nd) ile samaryum-kobalt alaşımı ile yapılan sabit mıknatısların üretimi de yapılmaktadır

AlNiCo Mıknatıslar: AlNiCo mıknatısların tepki kuvvetleri yüksek akı yoğunluğuna karşı düşük olmaktadır, dolayısıyla mıknatısiyet özelliklerini çabucak kaybedebilirler. Bu olumsuz özelliği sebebiyle rotor yapımında çok fazla tercih edilmemektedirler [11].

Ferrit ya da Seramik Mıknatıslar: Ferrit mıknatısların hem akı yoğunlukları hem de tepki kuvvetleri yüksek olmaktadır, buna bağlı olarak mıknatısiyet özelliklerini kaybetme ihtimali de yoktur. Maliyetlerinin düşüklüğü ve kolayca bulunabilen bir mıknatıs türü olması sebebi ile rotor yapımında oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar [11].

Samaryum-Kobalt Mıknatıslar: Manyetik özellikleri açısından en avantajlı mıknatıstır. Hem akı yoğunluğu ve hem de tepki kuvveti oldukça yüksektir. Ancak zor bulunmasından kaynaklı olarak maliyeti yüksektir.

3.1.4. Rotor Yapısına Göre Fırçasız Doğru Akım Motoru Çeşitleri

Fırçasız doğru akım motorları rotorunun yapısına göre üç gruba ayrılırlar. Bunlar;

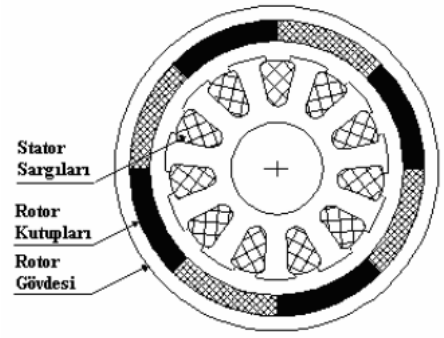
• Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motorları

• Disk Tipi Fırçasız Doğru Akım Motorları

• İç Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motorları

3.1.4.1. Dış Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motorları

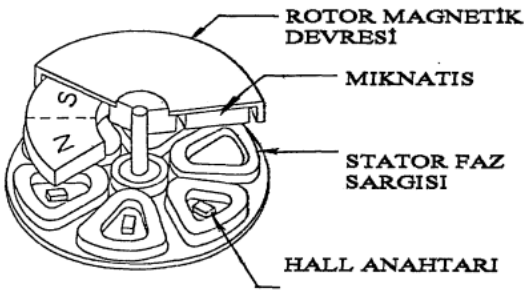
Dış rotorlu fırçasız doğru akım motorlarında mıknatıslar stator sargısının dışında bulunan rotor yuvarlağının içine yerleştirilmektedir. Bu yapı döner kısmın kütlesi artmasına ve atalet momentinin yüksek olmasına neden olur. Ayrıca daha sessiz çalışması ve düşük hızlarda yüksek performans özelliği bu motorların sağladığı avantajlardır [8].



Şekil 3. 8: Dış rotorlu FSDAM iç yapısı [8]

3.1.4.2. Disk Tipi Fırçasız Doğru Akım Motorları

Bir yüzeyine mıknatıslar yerleştirilmiş çelikten yapılmış disk rotordan meydana gelen motor tipidir. Gerektiği kadar çok kutupla kolayca manyetize edilebilirler. Stator genellikle ya baskılı devre sargılarından ya da baskılı devre kartına yapıştırılmış ayrı sargılardan oluşur. Mıknatıs ve stator arka demiri arasındaki hava boşluğu çok büyüktür ve bu, yüksek manyetik akı sızıntısına neden olur. Bu verimsiz bir manyetik devre tasarımı anlamına gelse de çoğu düşük tork gerektirdiğinden bu motoru kullanan uygulamalar için bir engel değildir [9]. Yüksek hız uygulamalarında statorda ısı sorunu ve girdap akımı kayıpları ortaya çıkabilmektedir.

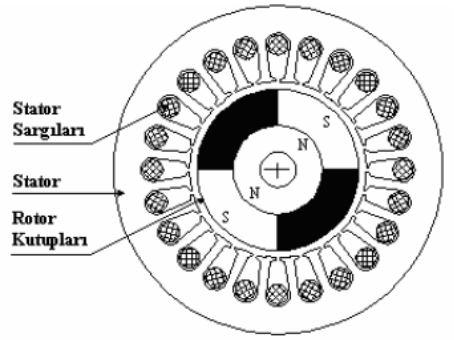


Şekil 3. 9: Disk tipi FSDAM iç yapısı [8]

3.1.4.3. İç Rotorlu Fırçasız Doğru Akım Motorları

İç rotorlu fırçasız DA motorları, yapısal olarak senkron ve asenkron motorlarla benzerlik göstermektedir. Dış tarafa yerleştirilmiş olan stator, sabit endüvi sargılarını taşır. Rotorda ise mıknatıslar bulunur. Bu tür motorların en belirgin özelliği, düşük eylemsizlik ve buna bağlı yüksek moment/atalet oranıdır. İç rotorlu motor yapısının dış rotorlu motor yapısına göre birkaç olumsuz özelliği bulunmaktadır. En büyük sorun yüksek hızlarda mıknatısların yerlerinden çıkma ihtimalidir ve bu ihtimali engellemek için rotorlar yüksek elektriksel dirençli metal şeritler ile sarılırlar. Diğer bir sorun ise bu yapıda statorun soğumasının kolay olmasına

rağmen seri üretim aşamasında dış rotorlu FSDAM'lara göre daha zor ve maliyetli olmasıdır [5].



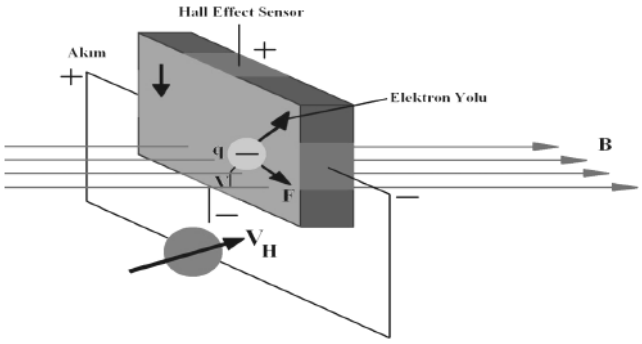
Şekil 3. 10: İç rotorlu FSDAM iç yapısı [8]

3.1.5. Fırçasız DA Motorlarının Kontrolünde Kullanılan Sensörler

Sensörler, bir kaynak tarafından üretilmiş olan işaret ya da uyarıları alan ve bu işaretlere karşılık uygun bir sinyal üreten devre elemanıdır. Motor kontrolü bakımından ise kontrol edilen elektriksel veya mekanik büyüklükten geri besleme alarak kontrol devrelerinde işlenecek olan büyüklük türüne dönüştürmek amacıyla kullanılan elektromanyetik, elektromekanik veya optik elemanlardır [12]. Fırçasız doğru akım motorlarının kontrolünde rotorun konum bilgisi, stator sargılarının doğru zamanda anahtarlanabilmesi için önemlidir. Motor kontrolü uygulamalarında rotorun açısal konumu ve hızını algılamak için pozisyon sensörleri ile kurulan algoritmalar veya sensörsüz kontrol algoritmaları bulunmaktadır. Motor kontrol işlemlerinde rotorun açısal konumu ve hızını algılayabilmek için genellikle kodlayıcılar(enkoderler), alan etkili algılayıcılar (hall sensörleri), açı algılayıcılar (resolver) kullanılmaktadır. Sensör seçiminde, konum değişikliğinin açısal karşılığı, çevresel şartlar, sensöre ayrılmış olan alan, çözünürlük ve doğruluk, sensörün çekeceği maksimum güç, sensörün seri olarak üretilip üretilemeyeceği dikkat edilmesi gereken hususlardır [13].

3.1.5.1. Alan Etkili Algılayıcılar (Hall Sensörleri)

Hall sensörlerin çalışma prensibi alan tarafından uygulanan kuvvetin, manyetik alan içerisinde kalan elektrik yüklerinin üzerine etki etmesi ve buna bağlı olarak hareket etmelerine dolayısıyla bir potansiyel oluşturmaları olarak açıklanabilir. Şekil 3.11' de elektrik yüküne etki eden kuvvet ve buna bağlı olarak oluşan yük hareketi gösterilmektedir.



Şekil 3. 11: Hall sensörün çalışma prensibi [2]

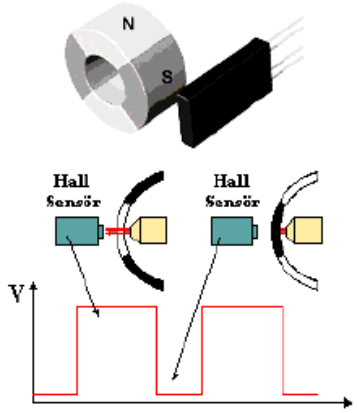
Alan içinde yükün hareket etmesini sağlayan kuvvet,

$$F = qvB \tag{3.1}$$

Olarak tanımlanır, bu denklemde $q=1,6x10^{-6}C$, v elektron hızını ve B manyetik alan şiddetini göstermektedir. Hız ve manyetik alan değerlerinin vektörel büyüklük olması sebebiyle elektron üzerine etkiyen kuvvetin yönü iki büyüklüğe de dik olacak şekildedir. Elektronlar, kuvvetin etkisi ile metal plakanın kenarlarına doğru hareket edecek dolayısıyla diğer bölümden daha düşük potansiyele sahip olacaktır. İki kısım arasındaki potansiyel farkından kaynaklı aralarında hall gerilimi meydana gelecektir. Belirli bir sıcaklık değeri için bu gerilim denklem 3.2'deki gibi ifade edilir.

$$V_H = hiB\sin\alpha \tag{3.2}$$

Bu denklemdeki α açısı, plaka düzlemi ile manyetik alan arasında kalan yatay açı, h metal plaka malzemesinin hassasiyet katsayısını (geometrik yapıya bağlı) göstermektedir. Oluşan gerilimin yönü ve şiddeti, uygulanan elektrik akım ve manyetik alanın şiddetine ve yönüne bağlıdır. Akım çıkışta elde edilen gerilimle doğru orantılı olduğundan, kontrol büyüklüğü olarak kullanılmaktadır. Hall sensörünün çalışma karakteristiği Şekil 3.12'de görülmektedir.



Şekil 3. 12: Hall sensörünün çalışma karakteristiği [13]

Hall sensörlerin statora yerleştirilmesi hem karmaşık hem de oldukça risklidir. Örneğin mıknatıslardan kaynaklı yanlış bir sinyal alınması ve bununla birlikte rotor konumunun yanlış algılanması rotor konumunun önemli olduğu uygulamalarda büyük bir risktir. Hall sensörlerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır bunlar; sıcaklığa karşı hassasiyetleri, motorun içerisine yerleştirilme şartı, seri üretime uygun olmamaları ve çözünürlüklerinin sınırlı seviyede olması şeklinde sıralanabilir. Ancak maliyetleri sebebi ile bu dezavantajlar göz ardı edilerek oldukça fazla tercih edilmektedir [9]. Bir fırçasız doğru akım motor sisteminde kullanılan hall sensörlerinin, motorun sağa ve sola dönüşüne bağlı olarak ürettiği işaretler ve bu işaretler yardımıyla eviricideki güç anahtarlarının sürülmesine ilişkin kodlar Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de

Tablo 3.1: Fırçasız DA Motor Düzeneğinde Hall Sensörlerinin Motorun Sağa Dönüşüne Bağlı olarak ürettiği işaretler [13]

Motor Dönüş Yönü	Anahtar Periyotları	Hall Sensörü				Anahtarların Konumları					
		F / R	H1	H2	H3	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
Sağa	0 – 60	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0
	60 – 120	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
	120 – 180	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1
	180 – 240	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0
	240 – 300	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0
	300 – 360	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0

Tablo 3.2: Fırçasız DA Motor Düzeneğinde Hall Sensörlerinin Motorun Sola Dönüşüne Bağlı olarak ürettiği işaretler [13]

Motor Dönüş Yönü	Anahtar Periyotları	Hall Sensörü				Anahtarların Konumları					
		F / R	H1	H2	H3	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
Sola	0 – 60	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
	60 – 120	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1
	120 – 180	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
	180 – 240	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0
	240 – 300	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0
	300 – 360	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0

3.1.5.2. Kodlayıcılar (Encoder)

Kodlayıcılar, temaslı kodlayıcılar ve temaszsız kodlayıcılar olmak üzere iki başlığa ayrılmaktadır. Temaslı kodlayıcılar, pozisyondaki bir değişikliği belirtmek için elektriksel olarak bir sinyal ileten fırçalar veya pim sensörleri gerektirir. Temassız kodlayıcılar, hareketi algılamak için manyetik, kapasitif veya optik temellere dayanır. Çıkışlar mutlak konumu belirten dijital kodlanmış bir kelime veya toplam hareketi biriktirmek için sayılan tekrarlayan darbelerle artımlı olabilir.

Mutlak veya artımlı döner konum algılama, bir milin dönüşünü gösterir. Kodlama diski, giriş mili döndürüldüğünde algılanan radyal çizgilerle modellenmiştir. Mekanik paketleme, uygulama gereksinimlerine bağlı olarak büyük ölçüde değişir.

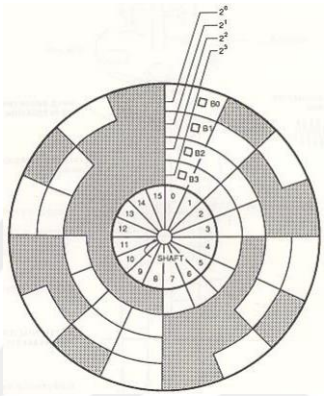
Doğrusal konum algılama, hareketi doğrusal bir iz ve bir ölçek boyunca algılanan hareketli bir kafaya bağlıdır. Döner cihazlar için çalışma prensipleri ve çıkış tipleri benzerdir. Mekanik paketleme, geniş bir uygulama gereksinimleri yelpazesini barındırır. Kodlayıcılar, çıkışları dönen bir disk veya hareketli bir ölçekte kodlanmış bir sinyalin okunması yoluyla elde edilen mekanikten elektrik dönüştürücüleridir [14]. Kodlayıcılar şu şekilde sınıflandırılmaktadır:

• Kodlanmış elemanı okumak için kullanılan yönteme göre temaslı veya temassız,

• Çıktı türüne göre mutlak dijital kelime veya artımlı darbeler dizisi

• Çıktıyı üretmek için kullanılan fiziksel unsura göre elektriksel iletim, manyetik, optik, kapasitif olarak sıralanabilmektedir.

Temaslı Kodlayıcılar: Temas kodlayıcılar, bir fırça veya pim sensörü ile kodlanmış disk arasında mekanik temas kullanmaktadırlar. Disk, Şekil 3.13'te gösterildiği gibi tabanlarında birleştirilen ince metalik şeritler olan bir dizi eş merkezli halka veya iz içerir. Şekildeki dört yol 2^0,2^1,2^2,2^3'ten oluşan ikili kodu temsil etmektedir. İlişkili kontak sensörleri B0, B1, B2, B3'te tanımlanır ve 0 ile 15 arasındaki rakamları kodlamaktadır. Disk döndükçe, sensörler dönüşümlü olarak iletken şeritler ve bitişik yalıtkanlarla temas ederek bir dizi kare dalga sinyali üretir [14].



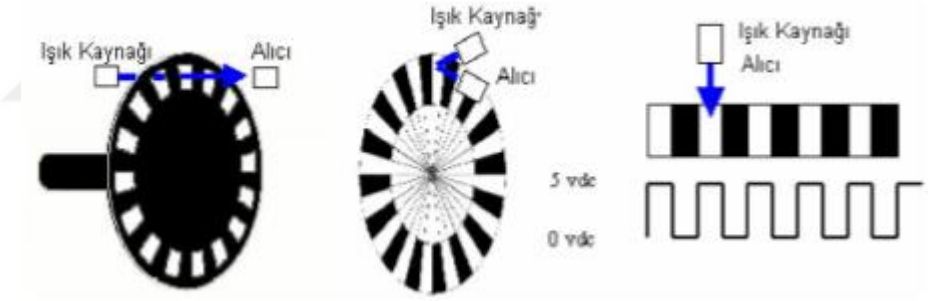
Şekil 3. 13: Mutlak Temaslı Kodlayıcı Diski [14]

Temassız Kodlayıcılar: Temassız kodlayıcılar, kodlanmış diski okumak için elektrik iletiminden başka fiziksel unsurları da kullanmaktadır. En yaygın türleri manyetik, kapasitif ve optik kodlayıcılardır [14].

Manyetik Kodlayıcılar: Dönme hızı ile sınırlı uygulamalarda kontak kodlayıcıların yerini almak için manyetik kodlayıcılar geliştirilmiştir. Manyetik kodlayıcılar, bir indüktördeki rezonans frekans değişikliğini, bir manyetizasyon değişikliğini veya bir manyetik doygunluğu tespit ederek çalışır. Her yöntem için, manyetik olarak kodlanmış disk tarafından akı indüksiyonu, mevcut bir duruma yardım ederek veya engelleyerek değişimi etkiler. Böylece, her ilke için, mantıksal bir veya sıfıra karşılık gelen iki normal durum vardır. Rezonans frekansı tipi, frekansı bir mantıksal durumu temsil eden bir ayarlı devre kullanır ve devrenin ayarının bozulması, karşıt mantıksal durumu temsil eder. Manyetik doygunluk yönteminde, indüktör ya doymuş ya da doymamıştır. Alternatif olarak, manyetik devrenin direnci, mantıksal birlere ve sıfırlara etkin bir şekilde çevrilir. Çözünürlükleri manyetize edilmiş noktanın boyutu ile sınırlıdır ve bitişik izler üzerindeki manyetize edilmiş noktalar arasındaki etkileşim nedeniyle karmaşıktır. Manyetik kodlayıcılar, temaslı kodlayıcıların temel hız sınırlamasına karşı daha üstündür ve disk ile sensör arasındaki fiziksel teması ortadan kaldırarak daha uzun ömür sunmaktadır [14].

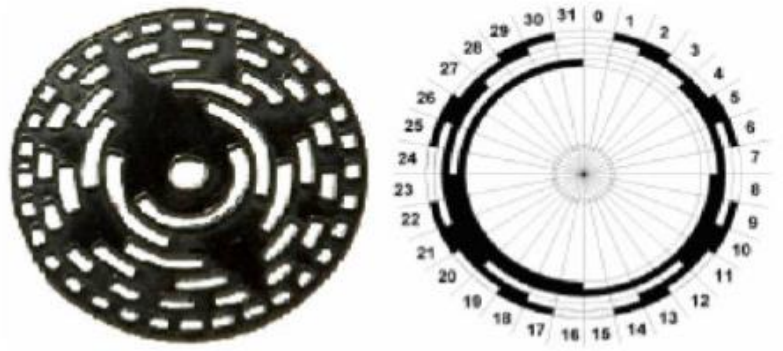
Kapasitif Kodlayıcılar: Kapasitif kodlayıcılar, temassız türlerin en az kullanılan türüdür. Okuma elektrostatik olarak yapılır bu sayısal çıkışı geliştirmek amacıyla bir faz kayması ölçüm yöntemi veya frekans kontrol yöntemi ile sağlanır. Bu tür kodlayıcılar 19 bite kadar tek dönüşlü birimler olarak üretilirler yani belirli bir donanımı yoktur. Pratik tasarım, üretim ve çalıştırma sorunları, kapasitif kodlayıcıların kullanımını sınırlamıştır [14].

Optik Kodlayıcılar: Rotor konumunun açısal karşılığı optik sensörler kullanılarak hassas bir şekilde algılanmaktadır [4]. Optik sensörlerin çalışma prensibi ise şu şekildedir iki disk vardır ve bunlardan biri sabit biri hareketlidir. Bir ışık kaynağı tarafından iletilen ışığın diski geçip geçemediği ile doğrusal veya açısal olarak yer değiştirmesinin algılanması olayına dayanır. Yüzde 50 geçirgenliği bulunan durgun bir diskten iletilen ışın demeti, hareketli olan diske ulaşır. Hareketli olan diskten geçen ışık demeti, ışığa duyarlı bir yüzeye sahip olan optik sensörün yüzeyine odaklanır ve elektriksel işarete dönüşmüş olur. Dolayısıyla hareketli diskin aralığı küçüldükçe hareket kabiliyeti o kadar hassaslaşır. İki tür kodlayıcı tipi vardır bunlar; artımsal algılayıcı ve mutlak algılayıcılardır. Artımsal algılayıcıların çıkışı dijital bir bittir. Bu çıkışların bir elektronik devre ile sayılması yöntemiyle motorun konumu ve hızı elde edilir [2].



Şekil 3. 14: Artımlı enkoder [15]

Mutlak algılayıcılarda ise motorun konumu belirli bir noktaya göre 8 bit ya da 16 bit olarak elde edilir. Bu dijital desendeki bitler, çözünürlüğü dolayısıyla hassasiyeti oluşturur. Örneğin 8 bitlik bir mutlak algılayıcı 2^8= 256 farklı konum belirtebilirken 2^{16} = 1024 farklı konum belirtmektedir.

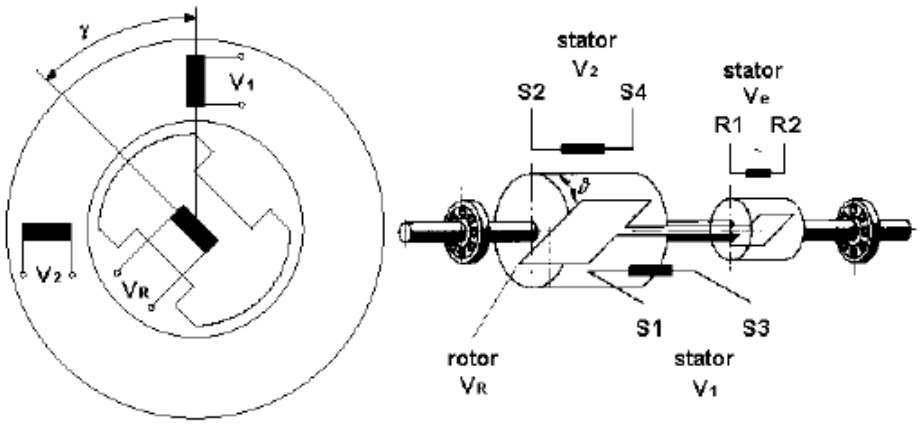


Şekil 3. 15: Mutlak enkoder [15]

Artımsal algılayıcılar mutlak algılayıcılara göre daha basit, maliyetinin uygun ve kullanışlı olmaları nedeniyle daha fazla tercih edilmektedirler.

3.1.5.3. Açı Algılayıcılar (Resolver)

Açı algılayıcılar, motor kontrolünde oldukça hassas ve doğru ölçüm yapmaktadır. Mekanik olarak sargılı bir rotor ve birbirlerine göre 90° faz farkı ile yerleştirilmiş olan iki stator sargısından meydana gelirler. Besleme gerilimi verilerek döndürülen rotor, stator sargılarında 90° faz farklı gerilim endüklenmesine sebep olur. Endüklenmiş olan gerilimlerin birbirlerine göre oranları alınarak rotor konumu oldukça hassas ve yüksek doğruluk ile elde edilir. Bir açı algılayıcının (resolver) genel yapısı Şekil 3.16'da görülmektedir. Açı algılayıcılar, kodlayıcılara göre mekanik olarak daha dayanıklıdır ancak maliyetleri sebebi ile çok tercih edilmemektedirler.



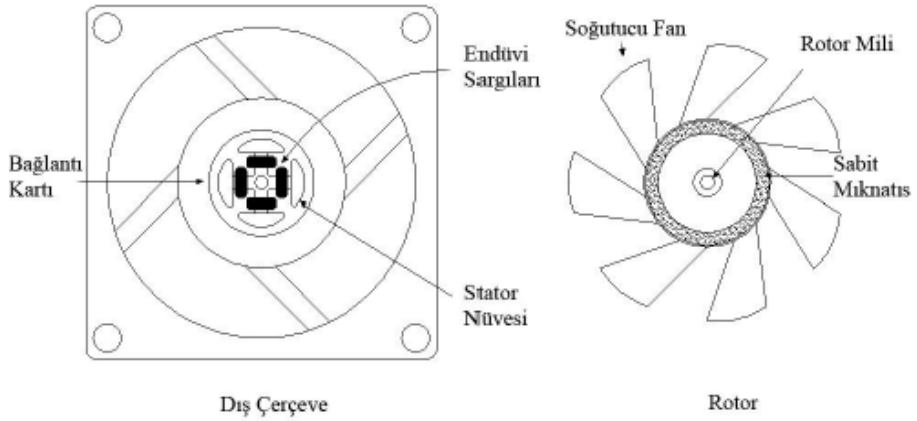
Şekil 3. 16: Bir açı algılayıcının (resolver) genel yapısı [13]

3.1.6. Fırçasız DA Motorlarında Faz Sayısı

3.1.6.1. Bir Fazlı Fırçasız Doğru Akım Motoru

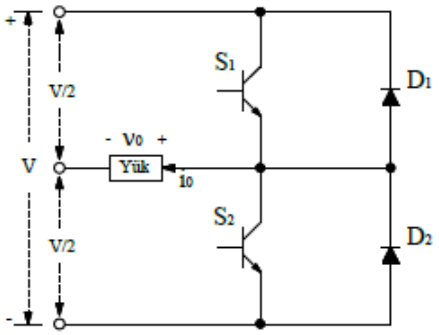
Tek fazlı FSDAM, tek fazlı elektrik enerjisi ile motorun hareket edebilmesi ve moment üretebilmesi için tek faz çekirdeksiz stator, stator tarafından üretilen moment ve dönen rotordan oluşmaktadır.

Endüvi sargılarını enerjilendirmek amacıyla Şekil 3.18'deki sürücü devresi kullanılmaktadır. Rotordaki sabit mıknatısların kutuplarını algılamak için hall sensörü gibi manyetik kutup algılama elemanı kullanılır. Rotor merkezine sabitlenmiş olan bir milden ve rotorun iç kısmına yerleştirilmiş olan halka mıknatıslardan oluşur. Halka mıknatıs N ve S kutuplarına sahiptir. Rotorun dış kısmında soğutucu bir fan pervanesi koyulmuştur. Elektrik akımı bağlantı kartı üzerinden endüvi sargılarına uygulanır, böylece döner moment oluşur ve rotor da dönmeye başlar [18].



Şekil 3. 17: Bir Fazlı Fırçasız DA Motoru [18]

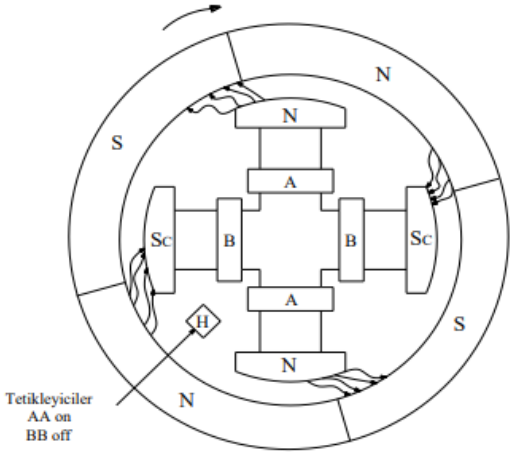
Motor çalışmaya başlamadan önce, mıknatısın hangi kutupta olduğu algılanır, bu sonuca göre sinyal bağlantı kartına gönderilir. Elde edilen pozisyon bilgisi sürücü devresindeki, anahtarlama elemanları olan S1 ve S2 yarı iletkenlerini tetiklemek için kullanılır. Anahtarlama elemanlarının uygun zamanlarda tetiklenmesi ile sargılarda döner alan oluşması sağlanır. Oluşan döner manyetik alan mıknatısın manyetik alanı ile etkileşime girer ve bunun sonucunda rotor hareket etmeye başlar [19].



Şekil 3. 18: Bir Fazlı Fırçasız DA Motoru Sürücü Devresi [18]

3.1.6.2. İki Fazlı Fırçasız Doğru Akım Motoru

Motor, kalıcı mıknatıslı olup endüvi sabittir. Alan döner durumdadır. Endüvisi 4 çıkıntılı kutba ve A – AB – B gibi iki özdeş sargı setine sahiptir [3].



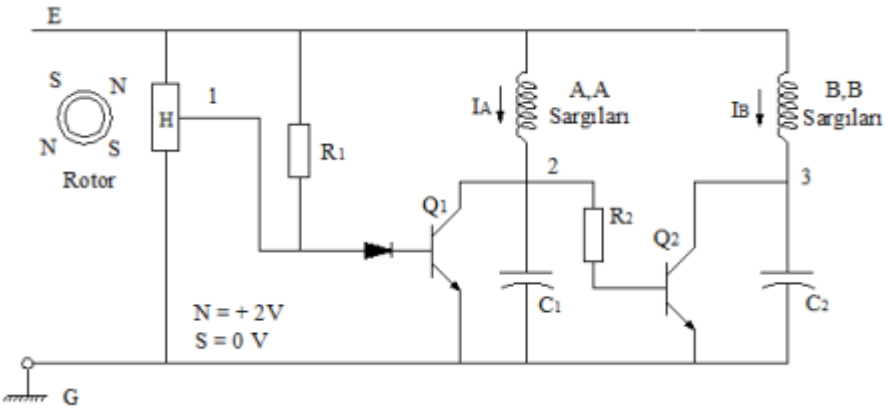
Şekil 3. 19: 12 V 1W FSDAM Yapısı [18]

A-A sargıları enerjilendiğinde N kutbu oluşturmak için bağlanmıştır. Sabit bir sargı yapısı vardır. A sargısı iletim ve B sargısı kesim modunda olacak şekilde hall sensör tarafından tetiklenmektedir, böylece birbirleriyle uyumlu iki S kutbu üretilmiş olur.

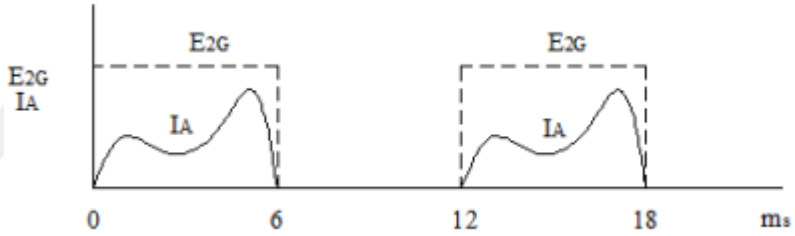
B-B sargılarında da durum aynen geçerlidir, öncesinde var olan Sc kutuplarının enerjilendirilmesiyle iki N kutbu oluşturulmuş olur. Sabit duran sargı setleri A-A ve B-B eş zaman aralıkları ile iki elektronik anahtar ile ardışık olarak uyarılır. Dört sabit mıknatıs kutbuna sahip olan rotorun saat yönünde döndüğü kabul edilir.

Sabit duran hall sensörü ile N ve S kutuplarının sıraları algılanır ve elemanın dönen N kutbu etkisi altında kalması durumunda elektronik anahtarlardan biri A-A sargılarını uyarmak için bir tetikleme sinyali üretir ve rotor ile stator kutupları arasında saat yönünde manyetik moment oluşmuş olur, dolayısıyla saat yönündeki dönüş sürekli olarak devam eder. Bu sırada

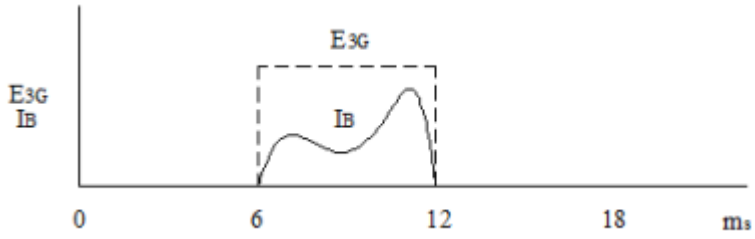
gerçekleşen kutuplar arası akı örneği şekilde gösterilmektedir. Diğer durum ise elemanın S kutbu etkisinde kalmasıdır, bu durumda diğer anahtarın kapanmasına neden olur ve B-B sargılarının enerjilenmesine sebep olur. Buna bağlı olarak A-A sargılarındaki enerji kesime uğrar ve bu durumda da saat yönünde moment üretilmiş olur [18,19]. Rotorun hareketli kalması bir bobin setlerinin sırayla anahtarlanması ile sağlanır.



a) İki Fazlı Fırçasız DA Motoru Devresi



b) A sargılarındaki akım



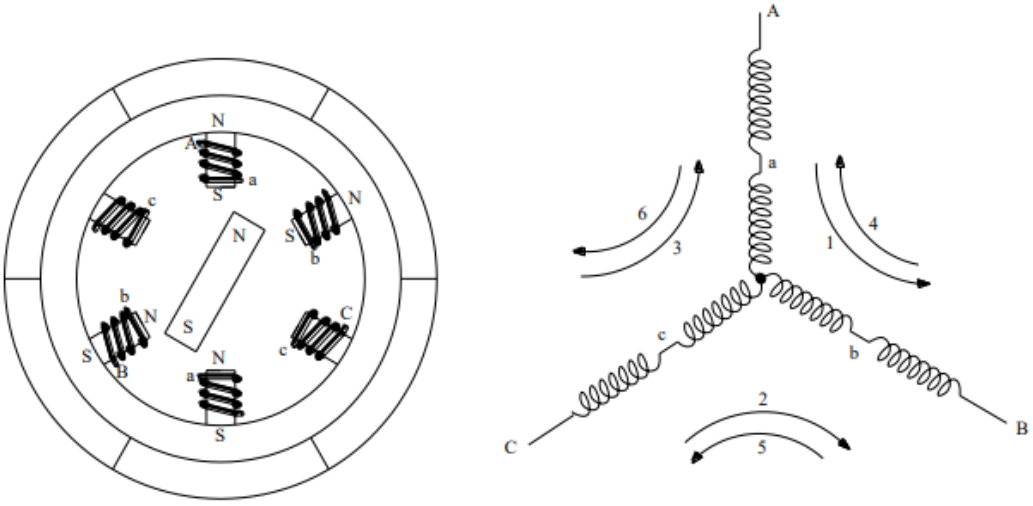
c) B sargılarındaki akım

Şekil 3. 20: İki Fazlı FSDAM Devresi ve Faz Akımları Dalga şekilleri [18]

İki faz güç üreten dönüştürücüde anahtarlama elemanı olarak Q1 ve Q2 transistörleri kullanılmaktdır, bu transistörler hall sensöründen aldığı sinyal ile aktifleşmektedir. Hall sensörü N kutbu etkisi altında yaklaşık olarak 2V gerilim üretir ancak S kutbu etki altındayken gerilim sıfırdır. Şekil 3.120'deki C1 ve C2 kapasitörleri, bobinlerin enerjisinin kesilmesi ile açığa çıkan indüktif enerjisi emer. Şekil b ve c'de ise aynı zaman aralıklarında A ve B sargılarının akımları gösterilmektedir [18,19].

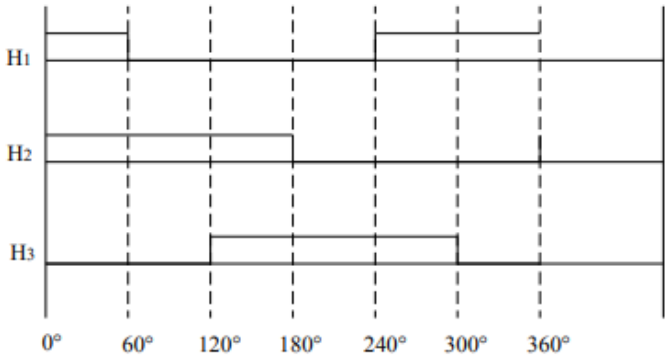
3.1.6.3. Üç Fazlı Fırçasız Doğru Akım Motoru

En çok tercih edilen fırçasız doğru akım motoru türü üç fazlı olandır. Aşağıdaki şekilde de görüldüğü üzere üç fazlı fırçasız doğru akım motoru sabit bir şekilde yıldız bağlı olarak simetrik bir şekilde statora yerleştirilen üç sargı setinden ve dönen kalıcı bir mıknatıstan oluşmaktadır. Her bir sargıdan akan akım, diğer sargıların oluşturduğu alanlarla toplanacak olan manyetik alan vektörü oluşturur.

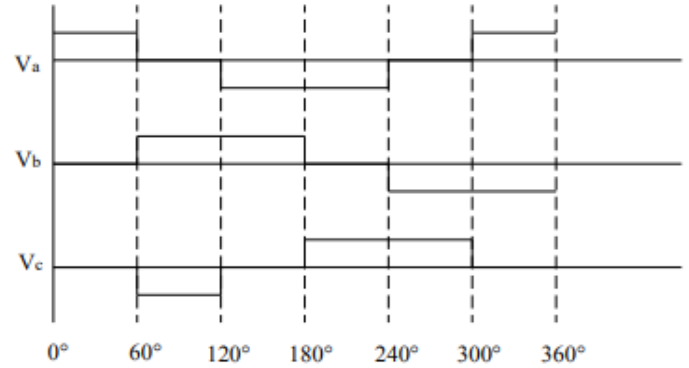


Şekil 3. 21: Üç Fazlı FSDAM Genel Yapısı [18]

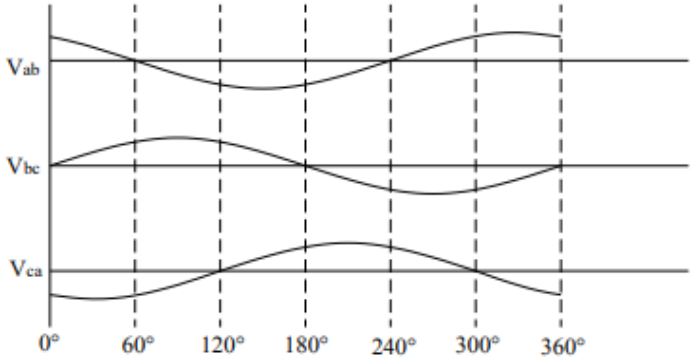
Sargılardaki akımın kontrol edilmesi ile statorun manyetik alanı istenilen yön ve genlikte geliştirilebilmektedir. Moment ise net stator alanı ve rotorun manyetik alanı arasındaki etkileşimden üretilmektedir. Üç fazlı fırçasız doğru akım motorlarının sürülmesinde kullanılan en basit yöntemlerden biri altı adım sürücü yöntemidir. Bu yöntemde her bir faz gerilimi 120°'lik elektriksel aralıklar ile gösterilen rotorun elektriksel açısına bağlı olarak enerjilendirilmektedir, Şekil 3.22 (b)'de bu gözlenmektedir. Sargılardan akan akımın sırası ise Şekil c'de gösterildiği gibi gerçekleşmektedir [20].



a) Hall Sensörü Çıkışları



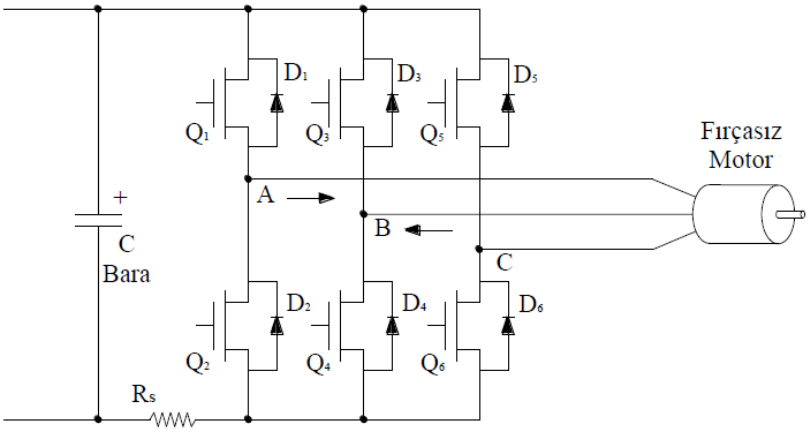
b) Altı Adım Faz Gerilimleri



c) Zıt EMK Gerilim Dalga Formu

Şekil 3. 22: 120° iletim Komütasyonu [18]

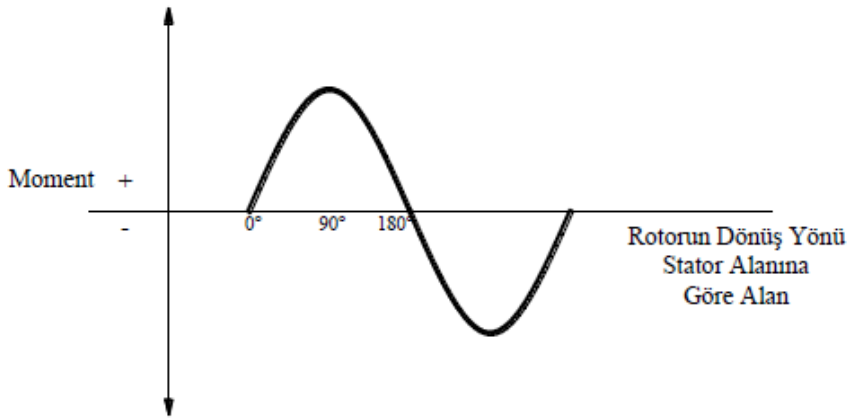
Bu işlem Şekil 3.23'teki gibi yarı iletken anahtarlama elemanları bulunduran sürücü devresi ile gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3. 23: Üç Fazlı FSDAM Sürücü Devresi [18]

Üstteki anahtar (Q1, Q3 veya Q5) iletim ve alttaki anahtar (Q2, Q4 veya Q6) kesimde iken faz gerilimi pozitif, üstteki anahtar kesim alttaki anahtar iletim durumunda olduğunda ise faz gerilimi negatiftir. Her iki anahtarın da kesimde olduğu durumda ise sargıdan akım akmaz. Bu durumda sargı uçlarındaki gerilim motorun zıt EMK'nin büyüklüğüne eşittir. Başka bir

deyişle, bir seferde her faz gerilimi üç durumdan birini alır pozitif, negatif veya bekleme durumu. Akım yolunun devam etmesi için her sektörde sadece bir faz pozitif, diğer fazlardan biri negatif olarak enerjilendirilir. Düzgün bir şekilde komütasyon yapabilmek için, kontrolörün rotor açısını 60°'lik aralıkta biliyor olması gerekmektedir [20]. Şekil 3.22 (a)'da gösterildiği gibi üç hall sensör çıkışı, genellikle rotor konumunu algılamak için kullanılır. Hall sensörünün sıralanma süreci uygun yapıldığında, her bir sensör çıkışı rotor döndürüldüğündeki hattan hata zıt EMK gerilimi dalga formuyla aynı fazda olmaktadır [20]. Rotorun her bir pozisyonu için net stator alanının, momenti maksimuma çıkaran optimal bir yönü bulunmaktadır. Sabit mıknatıslı rotor alanı, statorun ürettiği alan ile aynı yönde ise moment üretilmez, alanlar güç üretmek için kesişirler. Yalnızca motor mili ve yataklarına baskı uygulayarak dönmeye neden olmazlar, titreşim hareketi oluşur [19]. Şekil 3.24'teki şekilde de görüldüğü üzere stator alanının, rotor tarafından üretilen alana dik olduğunda açığa çıkan manyetik güç rotoru döndürmek için çalışır. Bu durumda moment maksimum seviyeye çıkmış olur, stator ve rotor tarafından üretilen alanlar ayrıştırılabilirler. Bu durumda yalnızca dikey bileşen faydalı moment üretirken, paralel bileşen ise gereksiz basınç gücü üretir. Bu sebeple paralel bileşenleri minimum ve dikey bileşenleri maksimum seviyede tutacak olan bir fonksiyonla çalışmak daha verimli olacaktır.



Şekil 3. 24: Pozisyon Moment Karakteristiği [18]

Fırçasız DA motorları için komütasyon periyodunun sonunda mevcut olan aşırı akımın ve buna bağlı zıt EMK'nin başarılı bir şekilde ortadan kaldırılması, verimlilikte iyileştirmeler, azalan bileşen maliyeti ve daha düşük akustik gürültü ile sonuçlanır. Komütasyon döngüsünün başlangıcında sargılara ilk akım verildiğinde, rotor ve stator aynı polariteye sahiptir ve bu nedenle istenen dönüş yönünde birbirlerini iterler. Sargıdaki akım hızla yükselir ve daha sonra komütasyon döngüsü boyunca yolun yaklaşık dörtte birinde tepe değere ulaşır ve bu noktadan

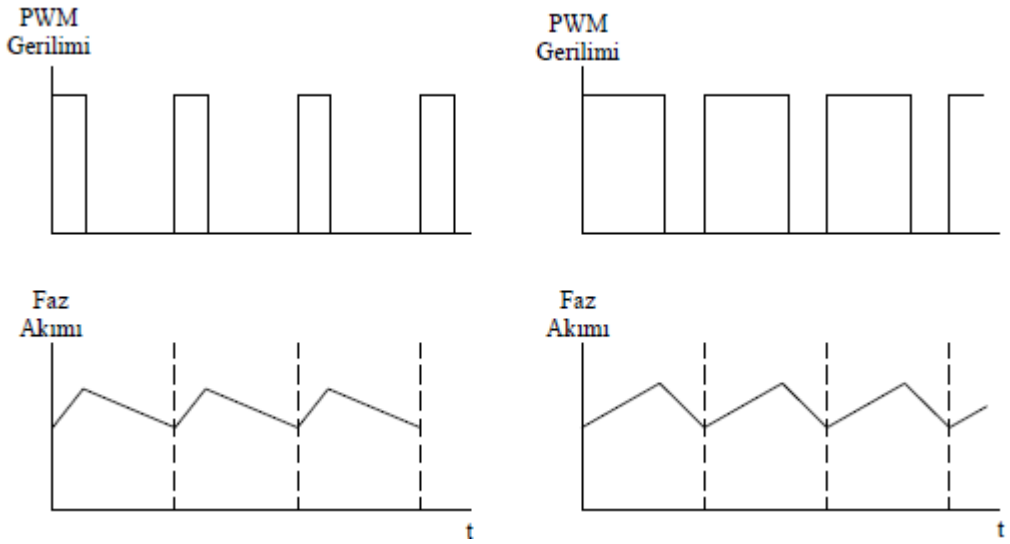
sonra, yavaşça düşmeye başlar ve yaklaşık dörtte üçünde tepe değerinin yaklaşık yüzde 90'ına ulaşır. Bu düşüşün ardından, ilk tepe noktasının üzerindeki bir seviyeye akım akışında keskin bir artış olur. Komütasyon tam bu noktada gerçekleşir; akımın en tepe değerinde olduğu bu nokta komütasyon için en kötü zamandır denilebilir. [21]. Sargıların anahtarlanmasıyla birlikte, açık sargı boyunca büyük bir zıt EMK gerilimi açığa çıkar ki bu da motor ve elektroniği için istenmeyen etkilere sebebiyet verir. Bu etkileri azaltmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri anahtarlama elemanı olarak kullanılan yarı iletkenleri çalışma değerinden büyük değerlerde seçmektir. Böylece zıt EMK'nin bir sonucu olarak üretilen yüksek gerilim ve akım karşısında oluşabilecek arızaların önüne geçilmiş olur, bu önlemin tek dezavantajı ise maliyetidir. Diğer bir yöntem ise hall sensörü büyük bir komütasyon gecikme süresi ile ilerletmektir, böylece komütasyon, akım çok yüksek bir değere ulaşmadan önce gerçekleşir. Ancak, çok fazla ilerleme ve motorun çalıştırılması zorlaşır; yani ulaşılabilirliğin de bir sınırı vardır. Komütasyon döngüsünün başlangıcında, rotor ve stator kutupları aynı polariteye sahipken, iki kutup birbirini ittiği ve aynı kutuplar birbirini çektiği için torkun çoğu bu aşamada üretilir. Komütasyon döngüsünün sonuna doğru ise zıt kutuplar birbirlerini çektikleri için düzgün bir şekilde hizalanırlar ve buna bağlı olarak daha az tork üretilir. Aynı zamanda sargıdaki akım akışının aşırı hale gelmemesi için kontrol altına alınması gerekmektedir böylece verimlilik de artmış olacaktır.

Fırçasız DA motorlarının hızını kontrol etmek için, sargıları yüksek frekanslarda açıp kapatmak amacıyla darbe genişlik modülasyonunun (PWM) kullanımı gittikçe artmaktadır. Bu, sargıdaki enerji miktarını değiştirir. PWM, tepe akımlarını kontrol etmek için de kullanılır. PWM kontrol devresi, hız kontrolü için bir kontrolöre entegre edilmiştir. Komütasyon döngüsünün sonuna doğru sargılardaki akımı kontrol etmek için kullanılır. PWM sargılara uygulanacak gerilimi kontrol edebilmek, motor hızını ayarlayabilmek ve sargılardaki akımı sınırlayabilmek için kullanılmaktadır [21].

Komütasyona ek olarak çıkış geriliminin de kontrol edilmesi gerektiğinde, PWM kontrolü her iki tarafa veya sadece alt taraftaki anahtarlara uygulanabilir. PWM sadece alt taraf anahtarla (Q2, Q4 veya Q6) uygulandığında PWM'in kesim süresi boyunca üst anahtarların serbest diyotlarından biri üzerinden kısa devre akım yolu belirlenir. Örneğin, Q1 ve Q4 anahtarların komütasyon için iletimdeyken akım A ve B sargıları üzerinden akar. Q4 PWM yaptığı için kesimdedir, bu sebeple akım yolu "Q1, A Sargısı, C Sargısı, D3" tolu üzerinden kurulur. Bu durumda idealize edilmiş dalga formu Şekil 3.25 (a)'da gösterilmektedir. Bu konfiguürasyon, hızlı tork değişimleri sırasında akımı kontrol edemediğinden, sadece tork ve

hız yönleri her zaman aynı olduğunda 1-quadrant veya 2-quadrant çalışma kullanılır. Hem üst hem de alt taraftaki anahtarlara PWM uygulandığında, PWM kesimdeyken akım düşüşü daha hızlı gerçekleşir. Önceki örnekte hem Q1 hem de Q4 PWM yaptığında, akım yolu "D2, A sargısı, C sargısı, D3" üzerinde kurulur. Bu durum, sargıya ters bara geriliminin uygulanması ve akımın hızlı bir oranda azalması gibidir. Tork ve hız yönlerinin isteğe bağlı olduğu bu konfigürasyonda 4 Quadrant bir çalışma mümkündür. Bu konfigürasyon, servo uygulamalarında olduğu gibi çabuk hız terslemesi gerektiğinde tercih edilir. 4 Quadrant PWM"deki akım dalga formu Şekil 3.25 (b)'de gösterilmektedir. 4 Quadrant anahtarlama uygulamada, ek PWM anahtarlama kayıpları meydana getirir. Bu durumda, hızlı azalan akımın bara kapasitesinden akması gerekir. Bu sebeple daha yüksek kapasitanslı ve daha yüksek salınım akım oranına sahip bir kapasitör seçilmelidir.

Hızlı tork tersleme koşulu sırasında, anahtarlama geçişi esnasında hem üst hem de alt anahtarlar iletimde olduğunda bir kısa devre durumu oluşabilir. Bu nedenle, güvenli çalışma için iletim anından sonra birkaç mikrosaniyelik ölü zamanı uygulanmalıdır. 2 Quadrant anahtarlamada, ölü zamanın eklenmesi normalde gerekli değildir. Altı adım sürücü yönteminde komüstasyon geçişleri sırasında yüksek moment titreşimleri üretir ve bu toplam sistem veriminin düşmesine sebep olur. Ayrıca yüksek güç motorlarında mekanik gürültüye sebep olur ancak yüksek dinamik performans ve mutlak hız düzenlemesi gerektirmeyen, küçük boyutlu uygulamalar için oldukça kullanışlı olmaktadır.



(a) 2-Quadrant PWM (b) 4-Quadrant PWM

Şekil 3. 25: İdeal Akım Dalga Formları [18]

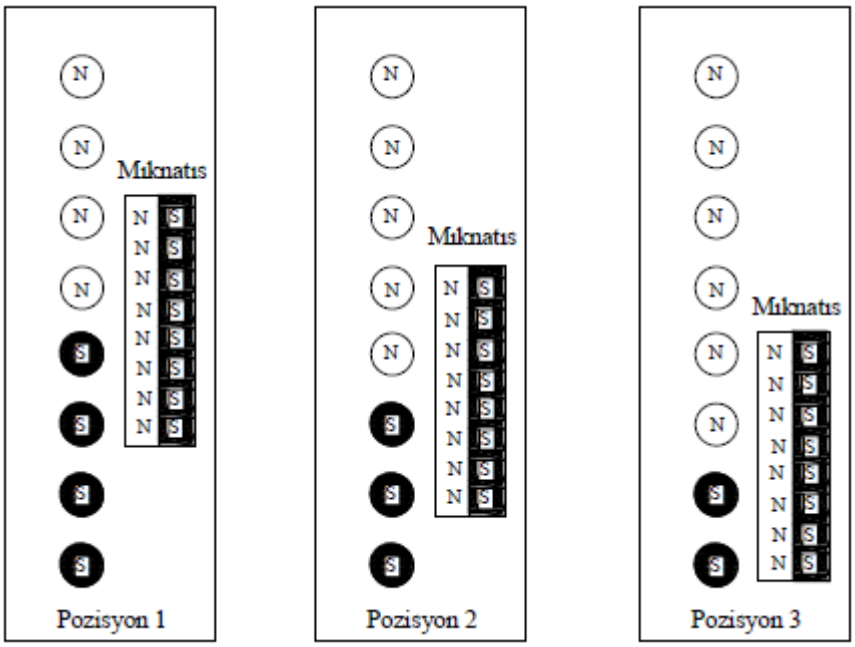
3.1.7. Komüstasyon

Komütasyon, dönen motor üzerindeki sargılardan akan akım yönünün değiştirilme işlemidir. Şekil 3.26'da mıknatıs ve sargıların durumu gösterilmektedir, bu örnek incelenirse: Düz bir şekilde yerleştirilmiş olan bileşenler, standart bir motorda motorun bir kısmını oluşturmaktadır. Dolayısıyla kavisli bir şekilde olabilirler. Manyetik devrenin sadece bir parçasını gösteren bu şekilde, 8 iletken ve 1 mıknatıs bulunmaktadır. "N – S", sargılardan geçen akımın oluşturduğu efektif kutupları gösterir. Her üç pozisyon için de mıknatıslar üzerindeki güç aşağı doğrudur.

Mıknatısların serbest hareket eden rotora bağlandığı varsayılırsa, aşağı doğru olan güç mıknatısları sırasıyla 1., 2. ve 3. pozisyona iter dolayısıyla rotor hareket etmiş olur. Görüldüğü üzere her bir pozisyonda, iletkenler yeni rotor konumlarına karşılık olarak farklı alan üretirler. Optimum tork üretimi için iletkenlere nasıl enerji verildiğinin seçimi rotor konumuna bağlı olarak değişir. Rotor pozisyonuna göre iletken seçme süreci komütasyon olarak ifade edilmektedir.

Fırçalı doğru akım motorları bu işlemi mekanik komütatörler gerçekleştirir, fırçalar rotora bağlı olan komütatör üzerinde kayar. Bu bobinlere bireysel bağlantılar sağlar, farklı rotor pozisyonlarında enerji verilecek farklı bobinleri bağlar.

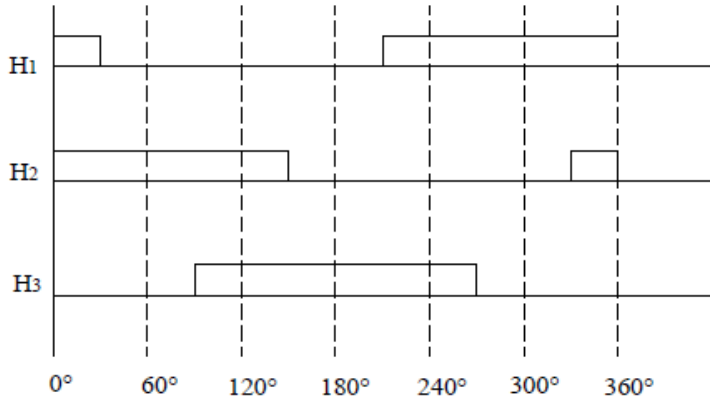
FSDAM'lar komütasyonu elektronik olarak gerçekleştirir, çoklu sargılara bağlı olan kontrolör, hangi sargıların enerjilendirilmesi gerektiğine rotorun pozisyonuna göre karar verir. Genellikle harici pozisyon algılayıcısı olarak hall etkili sensörler, kodlayıcı ya da açı algılayıcılar kullanılır. Algılanan pozisyona göre kontrolör sargılara, anahtarlama elemanı olarak kullanılan transistorlara güç aşaması üzerinden enerji vermektedir [22].



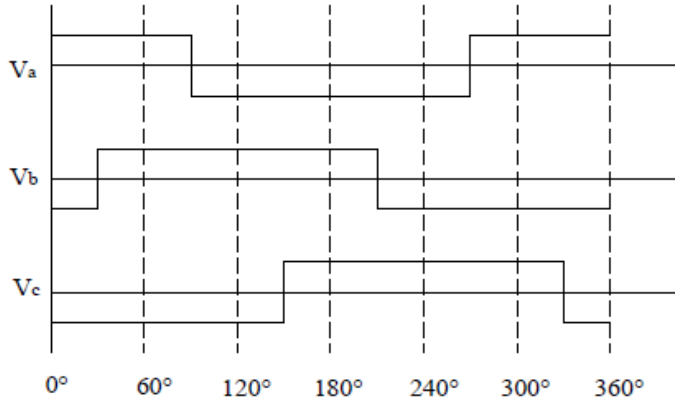
Şekil 3. 26: Komütasyon Sırasında Mıknatısların Manyetik Durumu [49]

3.1.7.1. Trapezoidal Komütasyon

Fırçasız doğru akım motorları için en basit kontrol yöntemlerimden biri trapezoidial komüstasyondur. Bu yöntemde üçüncü sargı kesimdedir ve Şekilde 3.26'daki gibi aynı anda diğer iki sargı üzerinden kontrol sağlanır. Motora gömülü üç hall sensörü, genellikle 60°'lik aralıklarda rotor konumunu ölçmek ve bu bilgiyi motor kontrolörüne dijital sinyaller iletmek için kullanılır. Herhangi bir zamanda, sargıların ikisindeki akımlar büyüklük olarak eşit ve üçüncüsü sıfır olduğundan, bu yöntem yalnızca altı farklı yönden birine sahip akım uzay vektörleri üretebilir. Motorun dönmesiyle birlikte sargılara giden akım her 60°'lik dönüşte elektriksel olarak anahtarlanır yani komütasyon uygulanır [23].



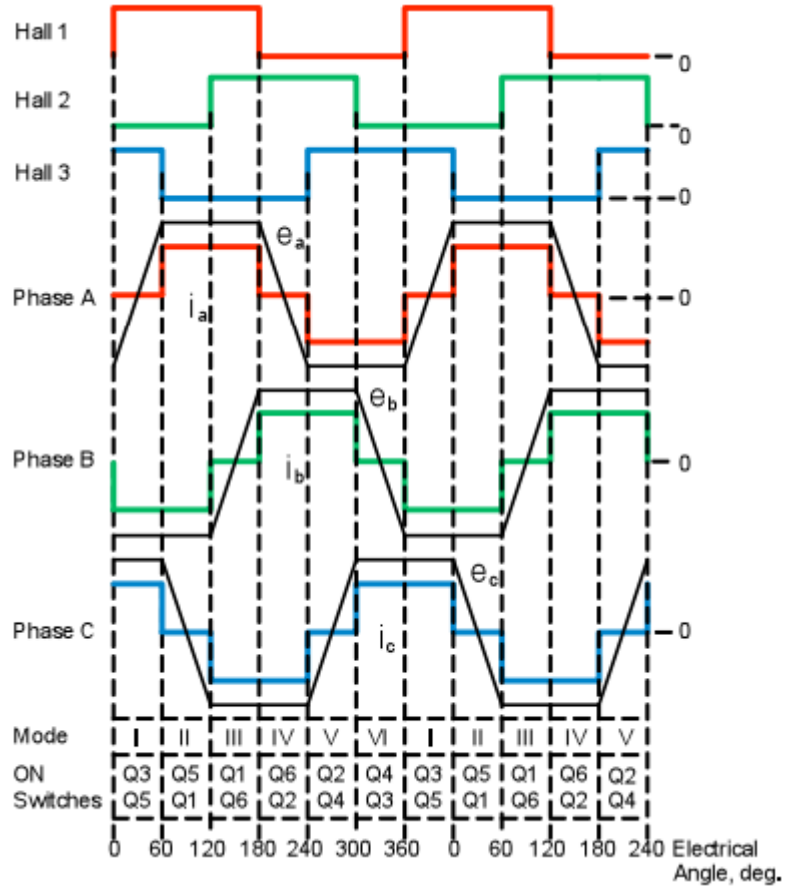
(a)Hall Sensörü Çıkışları



(b)Faz Gerilimleri

Şekil 3. 27: Trapezoidal komütasyona ait hall sensör çıkışları ve faz gerilimleri [49]

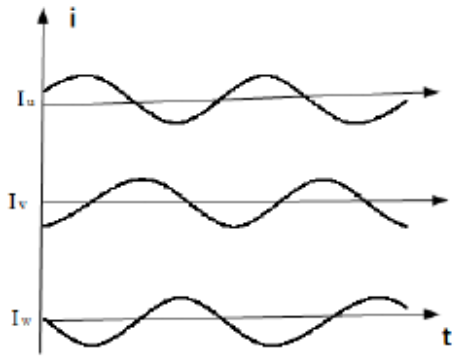
Bu yöntem, kontrol algoritmasının basitliği sebebiyle oldukça popülerdir. Motor hızını kontrol etmek için efektiftir, tek dezavantajı ise komütasyon sırasında, özellikle düşük hızlarda tork dalgalanmasıdır. Dolayısıyla basit kapalı döngü işlemi gerektiren düşük kaliteli uygulamalar için daha uygun olmaktadır [24]. Ancak lineer olmayan sebeplerden kaynaklanan önemli bir tork dalgalanması vardır, çünkü herhangi bir zamanda sadece iki motor sargısı akım taşır ve lineer olmayanlar gürültü ve titreşim üretir. Akım kontrolörü, fazdan faza akım transferinden geçişlere tepki vermemesi için yeterince yavaş olmalıdır; dolayısıyla performansı sınırlar. Yüksek torklu trapezoidal komütasyon oluşturmak için 180° komütasyon yöntemi tercih edilir, ancak 120° komütasyon minimum tork dalgalanması sağlar. Altı adımlı çalışma yöntemi, hall sensörü ile 120° komütasyon yöntemi ile Şekil 3.27'de gösterilmektedir. Her bölüm 60°'lik aralıklara sahiptir, böylece iki motor sargısı aynı anda enerilendirilebilir. Anahtarlama sırası, motor döndükçe art arda iki motor fazını yürütmek üzere belirlenir.



Şekil 3. 28: Hall sensörleri ile trapezoidal (altı adımlı) komütasyon

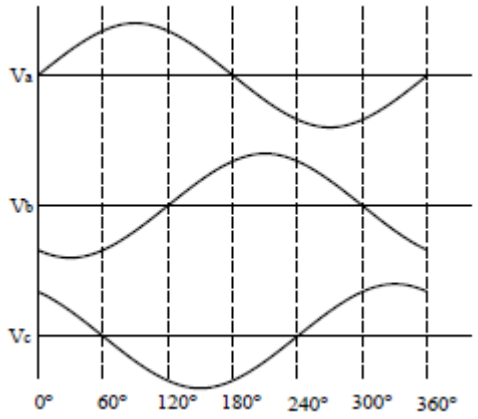
3.1.7.2. Sinüsoidal Komütasyon

Fırçasız doğru akım motorlarının kontrolünde kullanılan trapezoidal komütasyon yönteminde özellikle düşük hızlarda hassasiyet seviyesi oldukça düşüktür. Sinüzoidal komütasyon bu sorunu çözmek için uygun bir yöntemdir. Bu yöntemde motorların dönmesiyle düzgün ve sinüzoidal olarak değişen üç akım ile üç sargı sürülür.



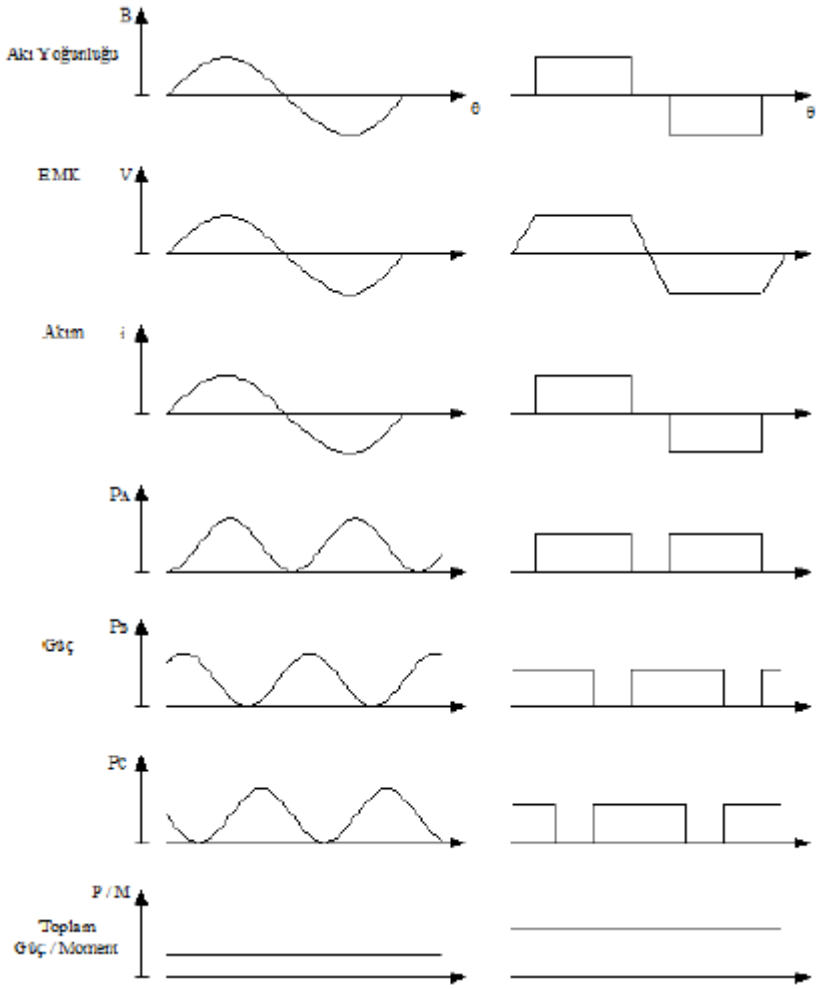
Şekil 3. 29: Sinüsoidal Komütasyon Akım Dalga Formları [49]

Bu akımların bağıl fazları, rotora göre her zaman kareleme yönünde ve sabit büyüklüğe sahip olan düzgün dönen bir akım uzay vektörü ile sonuçlanacak şekilde seçilir. Böylece trapezoidal komütasyondan kaynaklanan tork dalgalanmasını ve komütasyon sivrilmelerini ortadan kaldırır [23]. Motor dönerken motor akımlarının düzgün sinüzoidal modülasyonunu oluşturmak için rotor konumunun doğru belirlenmesi gerekmektedir. Sinüzoidal komütasyon, optik kodlayıcı veya açı algılayıcı gibi yüksek çözünürlüklü konum geri besleme sensörleri gerektirir dolayısıyla maliyeti de yüksektir. Aynı anda üç anahtar iletimde olduğu için verimleri de düşüktür. Ancak zıt EMK ile bile tork dalgalanmaları düşük olacaktır, düşük hızlar için bu durum oldukça verimlidir. Hızın artması ile akım döngüsünün kontrolü zorlaşır ve sinüzoidal sinyali takip edemez bunun sonucunda çok yüksek hızlarda performansı düşer ve verimsiz hale gelir.



Şekil 3. 30: Sinüsoidal Faz Gerilimleri [49]

Sargı akımları sinüsoidaldir ve aralarında 120° faz farkı vardır. Zaman değişkeni karışıklığı, akım kontrol döngüsünde yüksek hızlarda motorda akım kazanç hatasına ve faz geri kalmasına sebep olur. Quadrature yönden kaymaya sebep olur. Verilen akım ile daha az tork üretilir ve nominal torka ulaşmak için daha fazla akıma ihtiyaç duyar, dolayısıyla verim azalır, bu hız arttıkça devam eder. Bazı noktalarda motor akımı 90°'den ileriye geçer ve bu durumda tork sıfıra yaklaşır. Sinüsoidal komütasyonda bu noktanın üzerindeki hızlarda negatif tork üretilir ki bu istenmeyen bir durumdur.



(a) Sinusoidal Tip (b) Trapezoidal Tip

Şekil 3. 31: FSDAM İdealleştirilmiş Dalga Formları [49]

Kontrolör işlem kabiliyetini yüksek hızlarda tam gösteremez. Üretilen tork üzerinde doğrudan etkisi olan akım yüzey vektörü kontrolü ile bu durumun önüne geçilebilir. Sargılara uygulanan akımlar sinüsoidaldir ve aralarında 120° faz farkı vardır. Sargı akımından ve geriliminden izole edilen kontrolör ile hızdan bağımsız olarak tork üretilir. Böylece sinüsoidal komütasyonun neden olduğu performans düşüklüğü de engellenmiş olur. Düşük hızlarda yumuşak hareket sağlarken, yüksek hızlarda verimli çalışmaktadır [19].

3.1.7.3. Alan Yönlendirmeli Kontrol

Kısaca FOC (Field-Oriented Control) olarak adlandırılan alan yönlendirmeli kontrol motorun hızını ve torkunu hassas ve verimli bir şekilde kontrol etmek için kullanılan verimli bir komütasyon tekniğidir. Adından da anlaşılacağı gibi, FOC teknikleri, maksimum torku elde etmek için stator alanını rotor akışına dik olarak yönlendirir.

FOC'nin uygulanması Clarke Park, ters Clarke ve ters Park dönüşümleri gibi matematiksel dönüşümleri ve hesaplamaları işlemek için karmaşık yazılım ve işlem gücü gerektirdiğinden oldukça karmaşıktır. Konum ve hız tahmini, faz stator akımlarından ve voltajlarından sensörsüz olarak bulunacaksa, mikrodenetleyicinin motor dönerken açı ve hızı tahmin edebilmesi için yeterince hızlı olması gerekmektedir. Bu, dönüşümlerin geri kalanı aynı anda hesaplanırken bu matematik hesaplamalarını veri hattına bağlamak veya büyük arama tabloları uygulamak için gerçek zamanlı Dijital Sinyal İşlemcilerinin (DSP'ler) kullanılmasını gerektirebilir. Aktüatörler ve robotik kollar gibi yüksek doğruluk gerektiren FOC uygulamaları için yüksek hassasiyetli kodlayıcılara ihtiyaç vardır. Enkoderlerin çözünürlüğüne bağlı olarak, konumlar minimum tork dalgalanması ile hassas bir şekilde kontrol edilebilir [43].

3.1.8. Fırçasız Doğru Akım Motoru Dinamik Modeli

Bir Fırçasız DA motorunun modellenmesinde a, b, c, stator ve rotor arasındaki karşılıklı endüktans sinüsoidal olmadığı için faz değişken modeli tercih edilir. Denklemleri formüle etmeden önce, Fırçasız DA motorunun modellenmesinde aşağıdaki varsayımlar yapılır.

•Motor doymamış.

•Tüm stator sargılarının dirençleri eşittir, öz ve karşılıklı endüktanslar sabittir.

•Güç yarı iletken cihazları idealdir.

Bir Fırçasız DA motoru modellemek için iki olası yöntem vardır, biri a, b, c faz değişken modeli ve diğeri d-q eksen modelidir. Fırçasız DA motorunda trapez zıt EMK'li sabit mıknatıs bulunurken, senkron motorda sinüzoidal zıt EMK bulunur. Dolayısıyla d-q eksenine dönüşüm ek bir fayda sağlamadığından a, b, c faz değişken modeli seçilmiştir. Fırçasız DA motorunun eşdeğer diyagramı Şekil 3.32'de gösterildiği gibidir.

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Formül açık bir şekilde aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$V_{an} = R_a i_a + L_{aa}\frac{di_a}{dt} + L_{ab}\frac{di_b}{dt} + L_{ac}\frac{di_c}{dt} + e_a \quad (3.6)$$

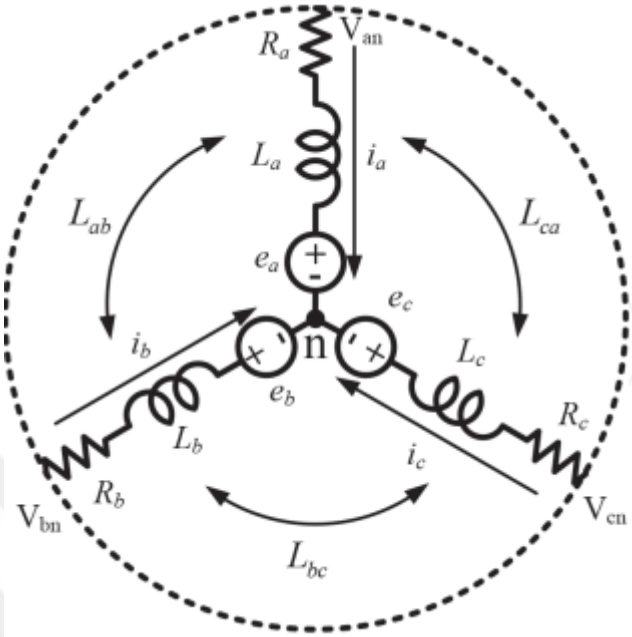
$$V_{bn} = R_b i_b + L_{ba}\frac{di_a}{dt} + L_{bb}\frac{di_b}{dt} + L_{bc}\frac{di_c}{dt} + e_b \quad (3.7)$$

$$V_{cn} = R_c i_c + L_{ca}\frac{di_a}{dt} + L_{cb}\frac{di_b}{dt} + L_{cc}\frac{di_c}{dt} + e_c \quad (3.8)$$

Burada

- Va , Vb, Vc faz başına stator gerilimleridir.
- R, faz başına stator direncidir.
- i_a , i_b, i_c faz başına stator akımlarıdır.

- $L = L_{aa} = L_{bb} = L_{cc}$ öz endüktanstır.
- $M = L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} = L_{ac} = L_{ba} = L_{cb}$ iki faz arasındaki karşılıklı endüktanstır.
- ea , eb, ec , indüklenen geri emf'dir.



Şekil 3. 32: FSDAM Dinamik Modeli [47]

Mekanik kayıp ihmal edildiğinden elektromanyetik tork, Nm cinsinden Te ile ifade edilmektedir.

$$T_e = \frac{1}{\omega_m}\,(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \tag{3.9}$$

Burada ω_m rad/s cinsinden mekanik açısal hızdır.

Hareket denklemi elektromanyetik tork, yük torku ve elektromekanik sistem olarak bilinen motor hızı arasındaki ilişkiyi ifade etmek için kullanılmaktadır [32].

$$J\frac{d}{dt}\omega_m + B\omega_m = T_e - T_L \tag{3.10}$$

Burada J rotor ve bağlı şaftın ataleti (kgm^2) ve B sönüm sabiti (Nms/rad) olarak ifade edilmektedir. Elektriksel olarak rotor hızı ve konumu arasındaki ilişki de aşağıdaki gibidir.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{P}{2}\,\omega_m \tag{3.11}$$

Burada ise θ, açısal dönüşü ve P kutup çifti sayısını ifade etmektedir [33]. Ayrıca elektriksel ve mekanik hız arasındaki bağıntı şu şekilde de ifade edilebilmektedir.

$$\omega_e = \frac{P}{2}\,\omega_m \tag{3.12}$$

Her fazın geri emf'si elektriksel olarak 120 derecelik bir faz farkına sahiptir ve geri emf ve rotor konumu birbirleriyle ilişkilidir buna bağlı olarak geri emf değeri için her fazın denklemi aşağıdaki gibidir:

$$e_a = \mathrm{k}\,\frac{\mathrm{d}}{dt}\,(\theta)\omega \tag{3.13}$$

$$e_b = \mathrm{k}\,\frac{\mathrm{d}}{dt}\,(\theta\ -\frac{2\pi}{3})\omega \tag{3.14}$$

$$e_c = \mathrm{k}\,\frac{\mathrm{d}}{dt}\,(\theta + \frac{2\pi}{3})\omega \tag{3.15}$$

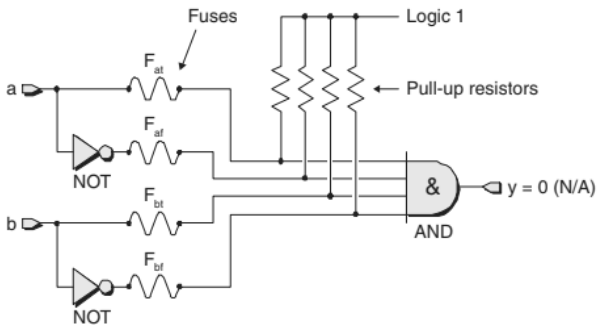
Burada da k geri emf sabitidir.

3.2. PROGRAMLANABİLİR MANTIK CİHAZLARININ GELİŞİMİ

3.2.1. Programlanabilir Bağlantı Teknolojileri

3.2.1.1. Fuse Teknolojisi

Kullanıcıların kendi cihazlarını programlamasına izin veren ilk tekniklerden biri eriyebilir bağlantı teknolojisi olarak bilinmektedir. Bu durumda cihaz her bir bağlantı bir sigorta üzerinden üretilir. Bu sigortalar çok fazla güç tüketilmesi gibi istenmeyen durumların meydana gelmesi durumunda sigortalar yanar ve bu da birimin geri kalanını zarar görmekten koruyan bir açık devre yaratır. Eriyebilir bağlantılı bir cihazda tüm sigortalar başlangıçta sağlamdır, yani programlanmamış durumda logic 0'dır. Sigortalı bağlantı teknolojisine sahip cihazlar tek seferlik programlanabilirler çünkü sigorta bir kez yakıldığında geri dönüşü yoktur [26].



Şekil 3. 33: Programlanmamış eriyebilir bağlantılar [26]

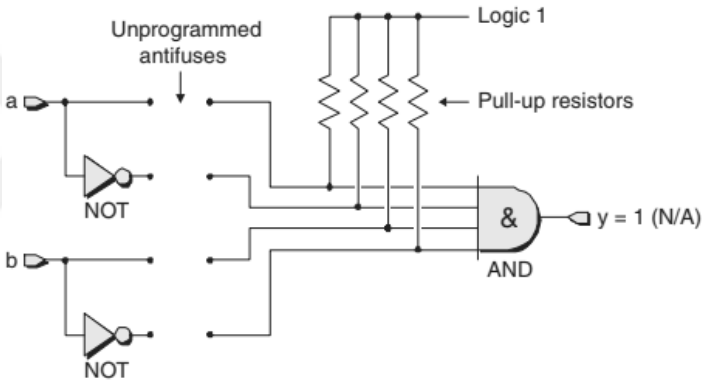


a) Programlamadan önce sigorta sağlam, (b) Programlama akımı, (c) Programlamadan sonra sigorta açık

Şekil 3. 34: Sigorta ile programlama

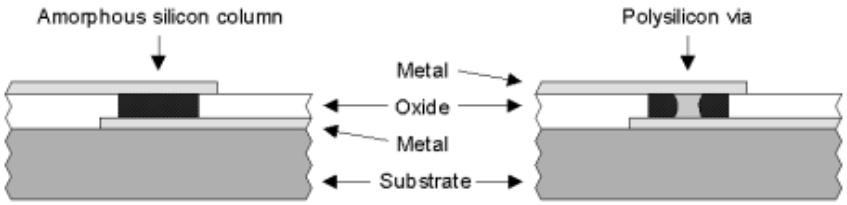
3.2.1.2. Antifuse Teknolojisi

Eriyebilir bağlantı teknolojisine alternatif olarak her biri yapılandırılabilir antifuse adı verilen bağlantılar bulunur. Programlanmamış durumda bir antifuse o kadar yüksek dirence sahiptir ki açık devre olarak kabul edilir.



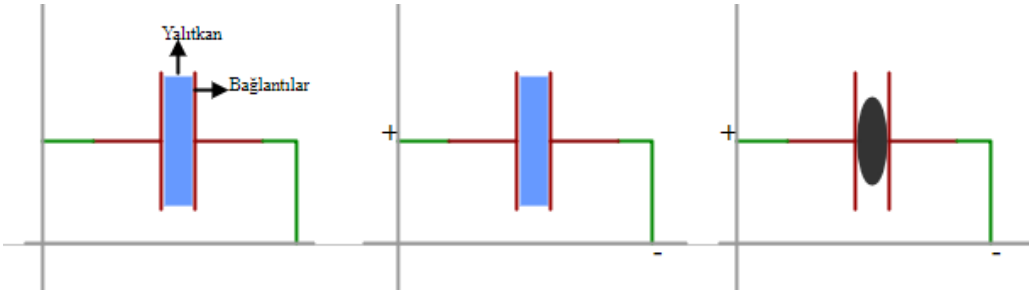
Şekil 3. 35: Programlanmamış eriyebilir bağlantılar [26]

Seçilen antifuse bağlantılarına yüksek voltaj ve akım darbeleri uygulanarak programlanabilir. Bir antifuse, iki metal hattı birbirine bağlayan amorf (kristal olmayan) silikondan oluşan mikroskobik bir kolon olarak üretilir. Programlanmamış durumunda, amorf silikon, bir milyar ohm'u aşan çok yüksek bir dirence sahip bir yalıtkan görevi görür [26].



a) Programlamadan Önce b) Programlamadan Sonra

Şekil 3. 36: Antifuse Programlama [26]



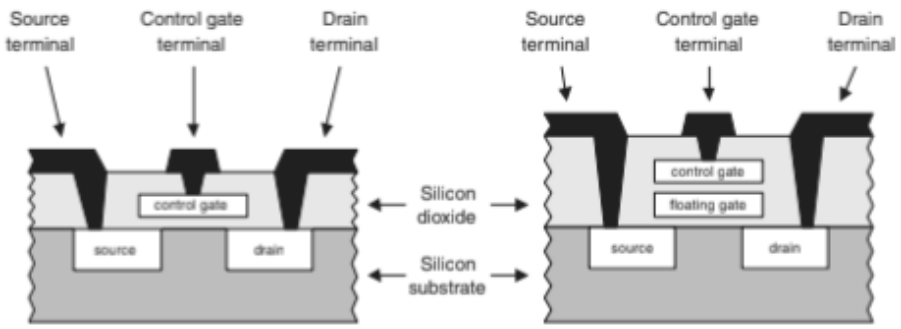
a) Antifuse, programlamadan önce açık, b) Programlama gerilimi, kontak oluşturmak için yalıtım katmanını bozar, c) Antifuse, programlamadan sonra etkin bir şekilde kısa devre yapıyor

Şekil 3. 37: Antifuse Programlama Aşamaları

Bu özel öğeyi programlama eylemi, yalıtkan amorf silikonu iletken polisilikona dönüştürerek bir yol olarak programlanmış olur. Antifuse teknolojisi de tek seferlik programlanabilme özelliğine sahiptir [26].

3.2.1.3. EPROM Tabanlı Teknoloji

Eriyebilir bağlantı veya antifuse teknolojileri ile üretilmiş olan cihazlar yalnızca bir kez programlanabilmektedir. Bu sebeple yeniden programlanabilen bir teknolojiye ihtiyaç duyulmuştur. Intel tarafından 1971 yılında EPROM (Eraseble Programmable Read Only Memory) olarak bilinen alternatif bir teknoloji bulundu. Bir EPROM transistörü, standart bir MOS transistörü ile aynı temel yapıya sahiptir, ancak ek olarak oksit katmanları ile izole edilmiş ikinci bir polisilikon yüzer geçide sahiptir.

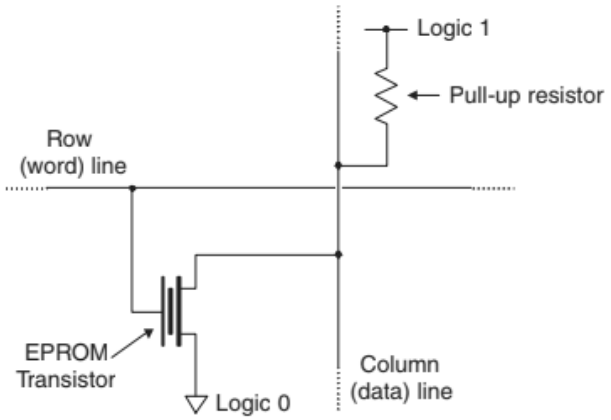


(a) Standard MOS transistor (b) EPROM transistor

Şekil 3. 38: EPROM transistörleri ve standart MOS [26]

Programlanmamış durumda, yüzer geçit yüksüzdür ve kontrol kapısının normal çalışmasını etkilemez. Transistörü programlayabilmek için kontrol kapısı ve Drain terminalleri

arasına nispeten yüksek bir gerilim (12V mertebesinde) uygulanır. Bu transistörün sert bir şekilde açılmasına neden olur ve enerji yüklü elektronlar, yüksek enerjili elektron enjeksiyonu olarak bilinen bir süreçte oksitten yüzer geçide doğru ilerlerler. Programlama sinyali kaldırıldığında, yüzer kapı üzerinde negatif bir yük kalır. Bu yük oldukça kararlıdır ve normal çalışma koşulları altında on yıldan fazla dayanabilir. Yüzer geçir üzerinde depolanan yük, kontrol kapısının normal çalışmasını engelleyerek programlanmış hücreleri programlanmamış hücrelerden ayırt eder. Bu bir bellek hücresi oluşturmak için bir transistör kullanabileceğimiz anlamına gelir [26].

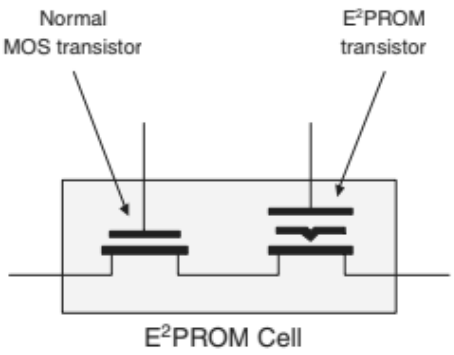


Şekil 3. 39: EPROM transistör tabanlı bir bellek hücresi [26]

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü gibi EPROM transistör tabanlı bellek hücresinde eriyebilir bağlantı, sigorta ve maske programlı bağlantı gerektirmemektedir. Programlanmamış durumda, EPROM transistörlerindeki tüm yüzer geçitler yüksüzdür. Bu durumda bir satır hattını aktif duruma getirmek, o satıra bağlı tüm transistörleri çalıştıracak ve böylece tüm sütun hatlarının ilgili transistörler ile logic 0'a çekilmesine neden olacaktır. Cihazı programlayabilmek için seçilen transistörlerle ilişkili yüzer geçitleri şarj etmek amacıyla cihaza girişleri kullanılabilir, böylece bu transistörleri devre dışı bırakabilir. Bu durumda hücreler logic 1 olarak görünürler. Bir EPROM hücresi, o hücredeki yüzer geçitte bulunan elektronları boşaltarak silinir. Elektronları boşaltmak için gerekli olan enerji ultraviyole (UV) ışınları tarafından sağlanır [26].

3.2.1.4. EEPROM Tabanlı Teknoloji

EPROM'lardan sonra elektrikle silinebilir, programlanabilir salt okunur bellekler ortaya çıktı. Bir EEPROM hücresi, iki transistör ve aralarındaki boşluktan dolayı eşdeğer bir EPROM hücresinde 2,5 kat daha büyüktür [26].



Şekil 3. 40: EEPROM Hücresi [26]

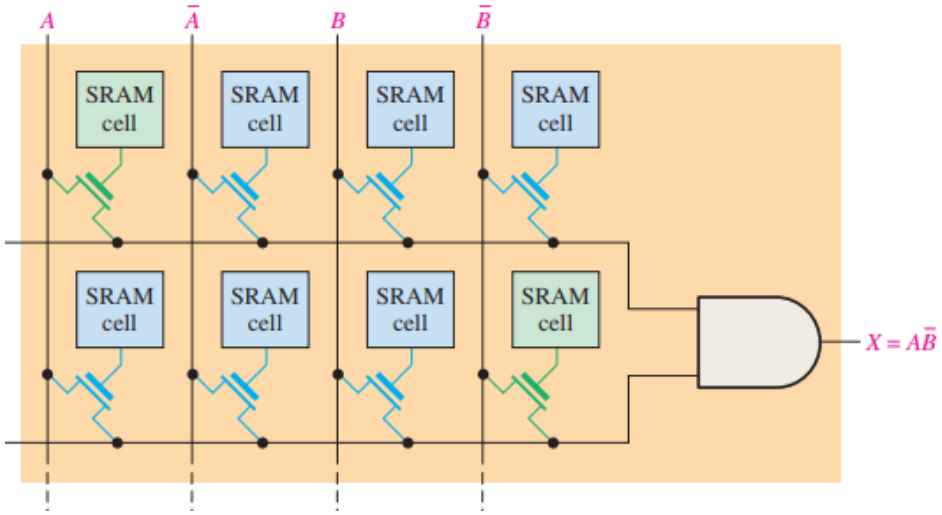
EEPROM transistörü, yüzer geçit içermesi bakımından bir EPROM transistörüne benzer, ancak bu geçidi çevreleyen yalıtkan oksit tabakaları çok daha incedir. İkinci transistör, hücreyi elektriksel olarak silmek için kullanılabilir [26].

3.2.1.5. FLASH Tabanlı Teknoloji

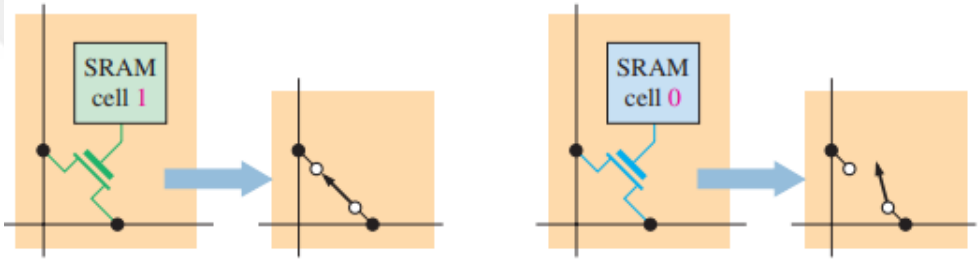
Flash tabanlı teknoloji EPROM'a kıyasla daha hızlı silme işlemi gerçekleştirmektedir. FLASH tabanlı bileşenler çeşitli mimariler kullanabilir. Bazıları, bir EPROM hücresiyle aynı alana sahiptir, ancak bir EEPROM bileşeninin karakteristiği olan daha ince oksit katmanlarına sahip tek bir yüzer geçit transistör hücresine sahiptir. Bu cihazlar elektriksel olarak silinebilirler, ancak yalnızca aygıtın tamamını veya büyük bir bölümünü temizleyerek bu mümkün olur. Diğer mimariler, bir EEPROM hücresininkine benzer iki transistörlü bir hücreye sahiptir, böylece tek tek silinmelerine ve yeniden programlanmalarına izin verir [26].

3.2.1.6. SRAM Tabanlı Teknoloji

Birçok FPGA ve bazı CPLD'ler, SRAM'lerde kullanılana benzer bir işlem teknolojisi kullanır. SRAM tabanlı programlanabilir mantık dizilerinin temel konsepti Şekil (a)'da gösterilmektedir. Satırları ve sütunları bağlamak veya bağlantısını kesmek için bir transistörü açmak veya kapatmak için SRAM tipi bir bellek hücresi kullanılır. Örneğin, bellek hücresi 1 (yeşil) içerdiğinde, transistör açıktır ve (b) bölümünde gösterildiği gibi ilgili satır ve sütun satırlarını birbirine bağlar. Bellek hücresi 0 (mavi) içerdiğinde, transistör kapalıdır, bu nedenle (c)'de gösterildiği gibi hatlar arasında bağlantı yoktur.



a) SRAM Tabanlı Programlanabilir Dizi

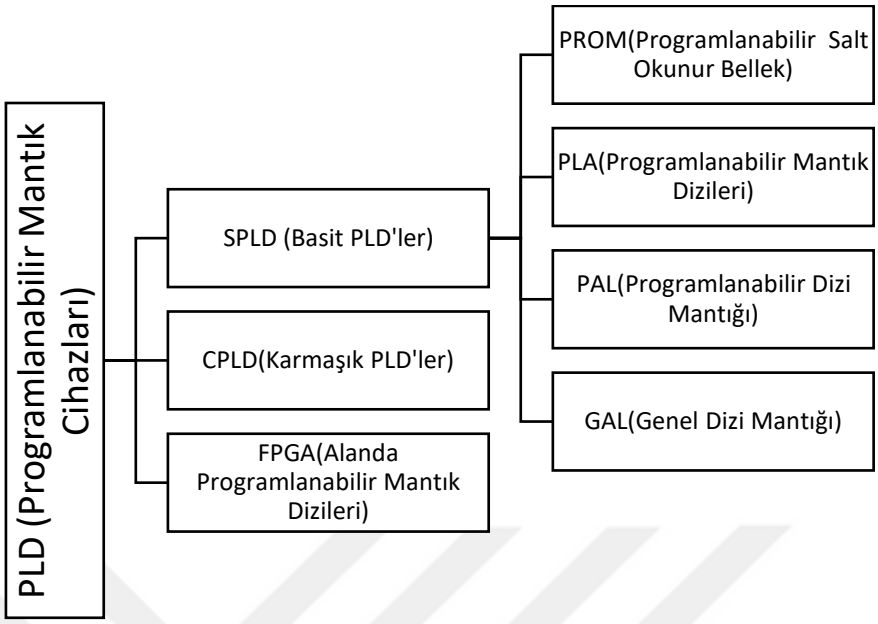


(b) Transistor on (c) Transistor off

Şekil 3. 41: SRAM teknolojisine sahip bir AND dizisi [29]

SRAM teknolojisi, uçucu bir teknoloji olduğu için diğer teknolojilerinden farklıdır. Bu, güç kapatıldığında bir SRAM hücresinin verileri tutmadığı anlamına gelir. Programlama verileri bir belleğe yüklenmelidir ve güç açıldığında, bellekteki veriler SRAM tabanlı PLD'yi yeniden programlamalıdır. Sigorta, antifuse, EPROM, EEPROM ve flash teknolojileri kalıcıdır, bu nedenle güç kapatıldığında programlamalarını korurlar. Bir sigorta kalıcı olarak açıktır, bir antifuse kalıcı olarak kapalıdır ve EPROM ve EEPROM tabanlı dizilerde kullanılan kayan kapılı transistörler, açık veya kapalı durumlarını süresiz olarak koruyabilir.

3.2.2. Programlanabilir Mantık Cihazlarının Gelişimi



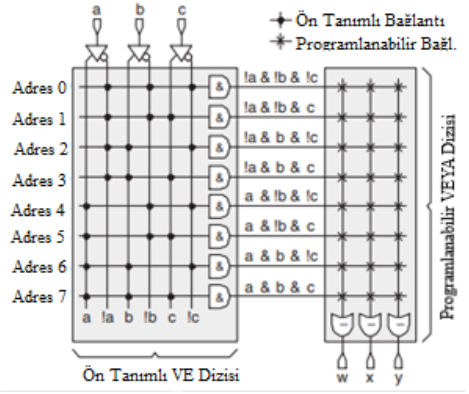
Şekil 3. 42: PLD' nin Gelişim Aşamaları

3.2.2.1. SPLD (Simple Programmable Logic Devices)

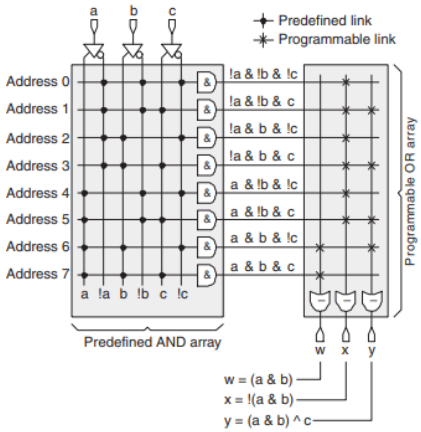
İlk programlanabilir entegre devreler programlanabilir mantık cihazları (PLD'ler) olarak adlandırılmıştır. SPLD, CPLD ve FPGA'dan önce tanıtılmıştır. Programlanabilir mantık dizisi (PLA), programlanabilir dizi mantığı (PAL) ve genel mantık dizisi (GAL) olmak üzere üç ana SPLD mimarisi türü aşağıda açıklanmıştır.

3.2.2.2. PROM

Programlanabilir ROM, bir kez programlandığında silinemeyen veya değiştirilemeyen tek seferlik programlanabilir bir yongadır. PROM'da programlanabilir VEYA dizilerini çalıştıran, sabit, önceden tanımlanmış VE dizileri bulunmaktadır. Örneğin 3 giriş ve 3 çıkışı olan henüz programlanmamış bir PROM aşağıdaki gibi görünmektedir.



a) Programlanmamış PROM (Önceden tanımlanmış VE dizisi, Programlanabilir VEYA dizisi)



b) Programlanmış PROM

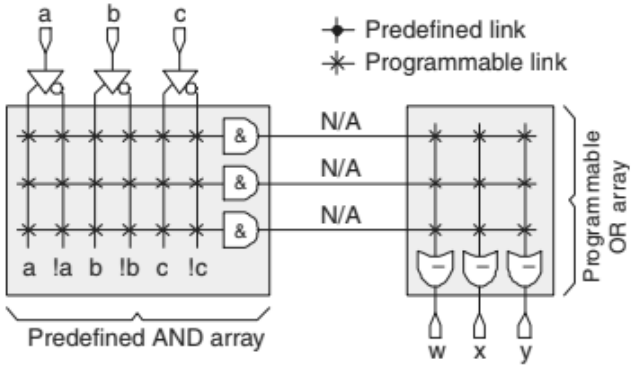
Şekil 3. 43: PROM Programlama [26]

VEYA dizisindeki programlanabilir bağlantılar, eriyebilir bağlantılar veya EPROM ve EEPROM cihazlarında EPROM transistörleri ve EEPROM hücreleri olarak uygulanabilmektedir. PROM'lar başlangıçta program komutlarını ve sabit veri değerlerini depolamak için bilgisayar bellekleri olarak kullanılmak üzere tasarlanmıştı. Ayrıca arama tabloları ve durum makineleri gibi basit mantıksal işlevleri uygulamak için de kullandılar. Aslında bir PROM, çok fazla girdi veya çıktıya sahip olmadığı sürece herhangi bir kombinasyonal mantık bloğunu uygulamak için kullanılabilir [26].

3.2.2.3. PLA (Programmable Logic Array)

PROM mimarisindeki sınırlamaları kaldırmak amacıyla PLD gelişim aşamalarından biri de PLA'lardır. Bunlar basit PLD'lerin kullanıcı tarafından programlanmaya en çok olanak tanıyan yapıdır çünkü hem VE hem de VEYA kapıları programlanabilmektedir.

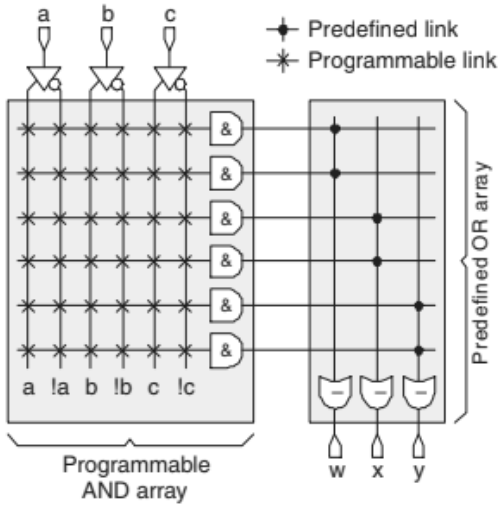
Bir PROM'dan farklı olarak VE dizisindeki VE işlevlerinin sayısı cihaza yapılan girişlerin sayısından bağımsızdır. Diziye daha fazla satır eklenerek ek VE'ler oluşturulabilir. Benzer şekilde VEYA dizisindeki VEYA işlevlerinin sayısı hem aygıta yapılan girişlerin sayısından hem de VE dizisindeki VE işlevlerinin sayısından bağımsızdır. Ek VEYA'lar diziye basitçe daha fazla sütun ekleyerek oluşturulabilir [26].



Şekil 3. 44: Programlanmamış PLA [26]

3.2.2.4. PAL (Programmable Array Logic)

PLA'ların ortaya çıkardığı hız problemlerini çözmek için, programlanabilir dizi mantığı (PAL) adı verilen yeni bir yapı ortaya çıkmıştır. Kavramsal olarak, bir PAL, programlanabilir bir VE dizisine ve önceden tanımlanmış bir VEYA dizisine sahip olduğundan, PROM'un neredeyse tam tersidir.



Şekil 3. 45: Programlanmamış PAL [26]

PAL'lerin PLA'lara göre avantajı yalnızca biri programlanabilir olduğundan daha hızlı olmalarıdır. Dezavantajı ise PAL'ler daha sınırlı bir yapıdadır çünkü sınırlı sayıda çıktının VEYA'lanmasına izin vermektedirler. [26 - 27].

3.2.2.5. GAL (Generic Array Logic)

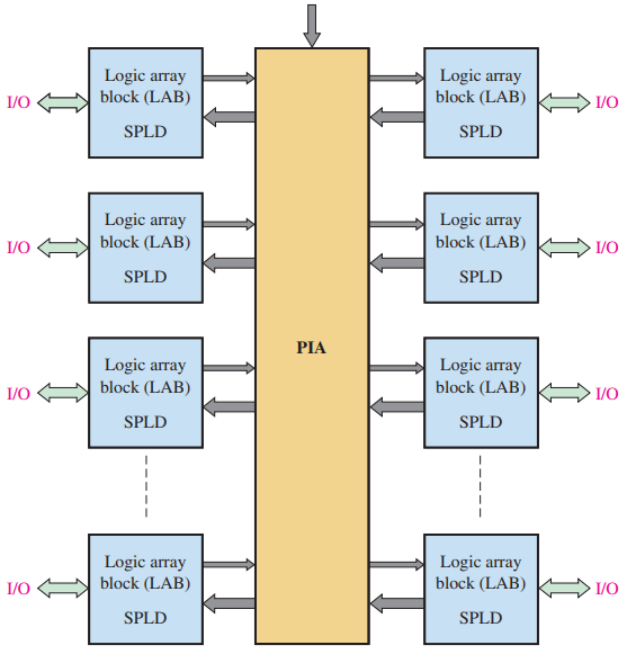
Son geliştirilen PLD elemanlarından olan genel kapsamlı dizi lojik (GAL), PAL elemanları gibi programlanabilir 'VE' dizisi ve sabit 'VEYA' dizisi ile programlanabilir çıkış

devresi içerir. GAL ile PAL arasındaki temel iki fark; GAL' ın yeniden programlanabilir olması ve GAL' ın programlanabilir çıkış devresine sahip olmasıdır [28]. GAL, PAL mimarisine benzer olmasına rağmen, EEPROM kullanır ve yeniden yapılandırılabilir [27].

3.2.2.6. CPLD (Complex Programmable Logic Device)

Her zaman daha fonksiyonel, küçük boyutlu, daha hızlı, daha güçlü ve daha az maliyetli teknolojiler hedeflenmektedir. Bu hedefler doğrultusunda karmaşık PLD'ler olarak bilinen CPLD'ler ortaya çıkmıştır. Karmaşık programlanabilir mantık cihazı (CPLD), temelde birden fazla SPLD içeren ve daha büyük mantık tasarımları için daha fazla kapasite sağlayan tek bir cihazdır.

Bir CPLD temel olarak programlanabilir ara bağlantıları olan birden çok SPLD dizisinden oluşur. CPLD'lerin dahili olarak organize edilme şekli üreticiye göre değişse de, Şekil 10-8 genel bir CPLD'yi göstermektedir. Bir CPLD'deki her SPLD dizisine LAB (mantık dizisi bloğu) olarak ve PIA (programlanabilir ara bağlantı dizisi) olarak adlandırılır. LAB'ler ve LAB'ler arasındaki ara bağlantılar yazılım kullanılarak programlanır. Bir CPLD, ayrı LAB'lerin (aslında SPLD'ler) SOP yapısına dayalı olarak karmaşık mantık işlevleri için programlanabilir. Girişler, herhangi bir LAB'ye bağlanabilir ve çıkışları, PIA aracılığıyla diğer herhangi bir LAB'ye bağlanabilir [29].

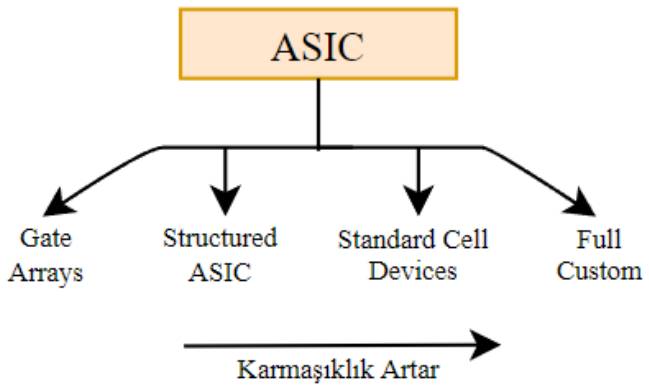


Şekil 3. 46: CPLD Yapısı [29]

Üreticiye ve cihaz ailesine bağlı olarak, CPLD'nin programlanabilir anahtarları EPROM, E2PROM, FLASH veya SRAM hücrelerine dayalı olabilir. SRAM tabanlı cihazlar söz konusu olduğunda, bazı varyantlar, her bir SPLD bloğuyla ilişkili SRAM hücrelerinin programlanabilir anahtarlar veya gerçek bir bellek yığını olarak kullanılmasına izin vererek çok yönlülüğünü artırır [26].

3.2.3. ASIC (Application Specific Integrated Circuits)

Adından da anlaşılacağı gibi, Uygulamaya Özel Entegre Devre (ASIC), belirli bir uygulamanın gereksinimlerini karşılamak için üretilen yongalardır. 1967'de Fairchild Semiconductor, birkaç yüz transistör içeren Micromosaic adlı bir cihazı tanıttı. Micromosaic en önemli özelliği, transistörlerin başlangıçta birbirine bağlı olmamasıydı. Tasarım mühendisleri, cihazın gerçekleştirmesini istedikleri işlevi belirtmek için bir bilgisayar programı kullandılar. Bu program, transistörleri bağlamak için gerekli ara bağlantıları belirledi ve cihazı tamamlamak için gereken maskeleri üretti. Nispeten basit olmasına rağmen, Micromosaic, modern ASIC'in öncüsü ve Bilgisayar Destekli Tasarımın (CAD) ilk gerçek uygulaması olarak kabul edilir. ASIC, Gate Array (GA) devices Structured ASICs, Standard Cell (SC) ve Full Custom olmak üzere dört ana başlığa ayrılır [30].



Şekil 3. 47: ASIC Başlıkları

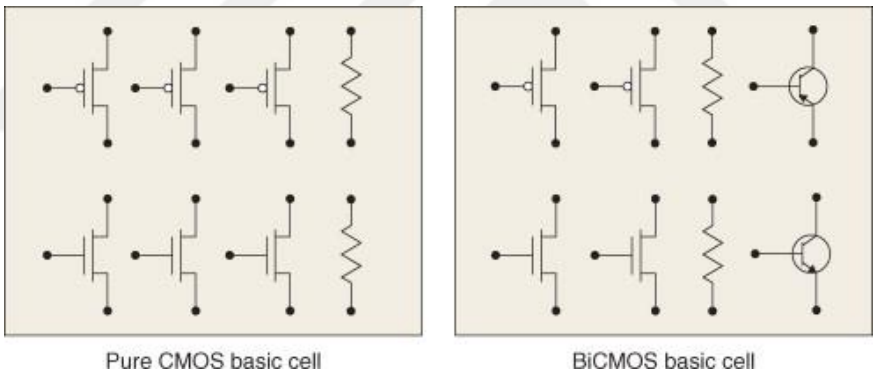
3.2.3.1. Full Custom

Dijital entegre devrelerin ilk günlerinde, gerçekten sadece iki ana cihaz sınıfı vardı (bellek yongaları ve basit programlanabilir mantık cihazları hariç). İlki, TI ve Fairchild gibi şirketler tarafından yaratılan ve bunları kullanmak isteyen herkese standart olarak hazır parçalar olarak satılan nispeten basit yapı taşı tipi bileşenlerdi. İkincisi, belirli bir şirket tarafından kullanılmak üzere sipariş vermek üzere tasarlanmış ve üretilmiş mikroişlemciler gibi tamamen özel ASIC'lerdi. Tam özel cihazlar söz konusu olduğunda, tasarım mühendisleri, silikon çipi

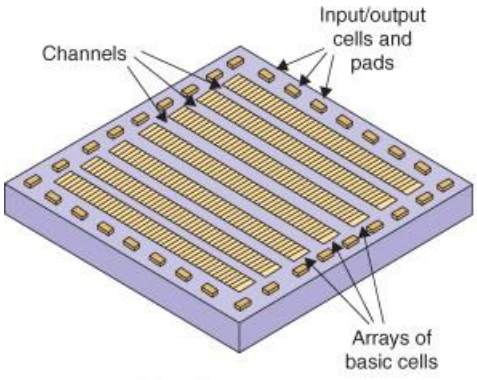
üretmek için kullanılan her maske katmanı üzerinde tam kontrole sahiptir. ASIC sağlayıcısı, silikon üzerinde herhangi bir bileşeni önceden üretmez ve herhangi bir hücre kitaplığı sağlamaz. Mühendisler, uygun tasarım araçlarının yardımıyla, tek tek tüm transistörlerin boyutlarını "el işi" yapabilir ve ardından bu bileşenlere dayalı daha yüksek seviyeli mantık fonksiyonları oluşturabilir. Örneğin, mühendisler biraz daha hızlı bir mantık kapısına ihtiyaç duyarlarsa, bu kapıyı inşa etmek için kullanılan transistörlerin boyutlarını değiştirebilirler. Tam özel cihazlar için kullanılan tasarım araçları genellikle şirket içinde oluşturulur. Tam özel cihazlar ayrıca karşılaştırıcılar, amplifikatörler, filtreler ve dijitalden analoğa ve analogdan dijitale dönüştürücüler gibi analog devreleri içerebilir. Tam özel cihazların tasarımı oldukça karmaşık ve zaman alıcıdır, ancak ortaya çıkan çipler, minimum miktarda silikon mülkü israfıyla minimum miktarda güç tüketen maksimum miktarda mantık içerir [30].

3.2.3.2. Gate Arrays

Bağlantısız transistör ve direnç içeren temel hücreler mantığına dayanır; her ASIC sağlayıcısı, kendi temel hücresinde sağlanan bileşenlerin sayılarını ve türlerini belirler.



Şekil 3. 48: Basit gate array temel hücreleri [30]



Şekil 3. 49: Gate Arrays yonga görünümü [30]

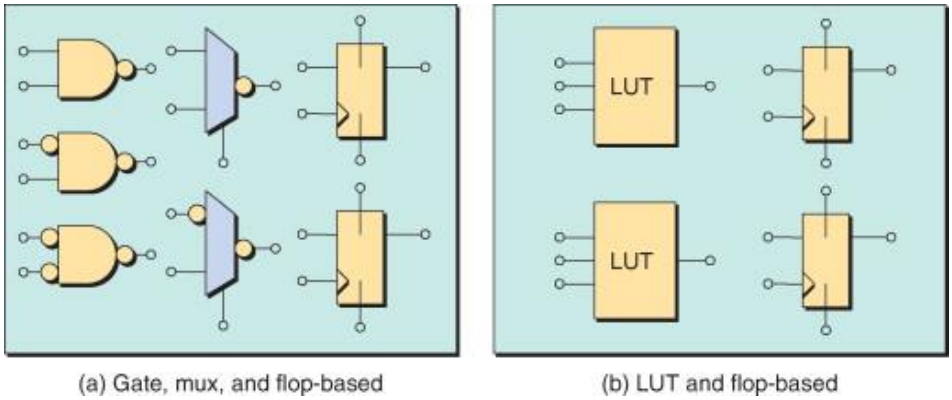
Hızlı bir şekilde sonuç veren, tasarımı ve üretiminin kolay olan ASIC yapısıdır. Tasarım gizliliği ise düşüktür çünkü devre şemaları maskelerle birlikte üreticiye teslim edilir.

3.2.3.3. Standard Cell Devices

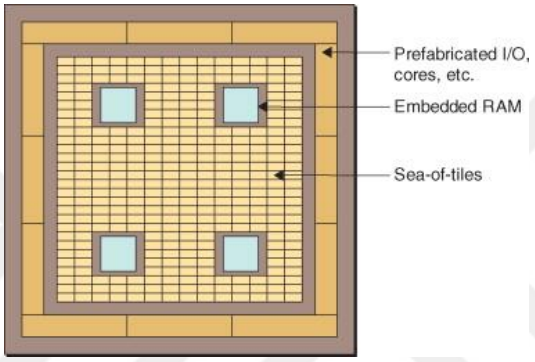
1980'lerin başında standart hücre cihazları kullanıma sunuldu. Bu bileşenler kapı dizileriyle pek çok benzerlik taşır. ASIC sağlayıcısı, tasarım mühendisleri tarafından kullanılabilecek hücre kitaplığını tanımlar. Satıcı ayrıca işlemciler, iletişim işlevleri ve çeşitli RAM ve ROM işlevleri gibi öğeleri içeren hard makro ve soft makro kitaplıkları da sağlar. Son olarak, tasarım mühendisleri önceden tasarlanmış işlevleri yeniden kullanmaya veya fikri mülkiyet (IP) blokları satın almaya karar verebilirler. Kapı dizilerinin aksine, standart hücre cihazları temel hücre kavramını kullanmaz ve yonga üzerinde önceden hazırlanmış hiçbir bileşen yoktur. Her bir mantık kapısını ağ listesine ayrı ayrı yerleştirmek ve kapıların yönlendirileceği (birbirine bağlanacak) en uygun yolu belirlemek için özel araçlar kullanılır. Standart hücre cihazları, her bir mantık fonksiyonunun, yedekli bileşenler olmaksızın minimum sayıda transistör kullanılarak oluşturulmasına izin verir ve fonksiyonlar, aralarındaki herhangi bir bağlantıyı kolaylaştıracak şekilde konumlandırılabilir. Bu nedenle standart hücre cihazları, kapı dizilerine göre silikonun optimuma daha yakın bir şekilde kullanım sağlar [26].

3.2.3.4. Structured ASIC

Yapılandırılmış ASIC'ler kavramı 1990'ların başında ortaya çıkmıştır. On yıl sonra bir dizi ASIC üreticisi, ASIC tasarım maliyetlerini ve geliştirme sürelerini azaltmanın yenilikçi yollarını araştırmaya başladı. Her cihaz, “module” veya “tile” olarak adlandırılan temel ögelerden oluşmaktadır. Birçok yapılandırılmış ASIC mimarisi, yalnızca iki veya üç metalizasyon katmanının özelleştirilmesini gerektirir (bir durumda, yalnızca tek bir geçiş katmanının özelleştirilmesi gerekir). Böylece zaman ve maliyetler önemli ölçüde azalır [26].



Şekil 3. 50: Yapısal ASIC temelleri [30]



Şekil 3. 51: Yapısal ASIC genel mimarisi [30]

3.3. ALANDA PROGRAMLANABİLİR KAPI DİZGELERİ (FPGA)

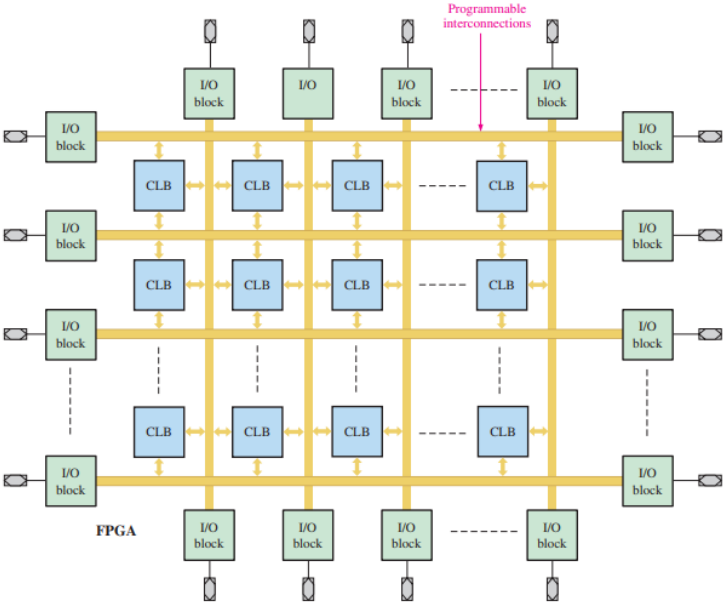
1980'lerin başında programlanabilir mantık cihazlarının bir ucunda SPLD'ler ve CPLD'ler gibi oldukça yapılandırılabilir ve hızlı tasarım ve değişiklik süreleri olan, ancak büyük veya karmaşık işlevleri destekleyemeyen programlanabilir cihazlar vardı. Diğer ucunda ise ASIC'ler vardır ve son derece büyük ve karmaşık işlevleri destekler, ancak tasarım için acı verici derecede pahalı ve zaman alıcıdır [26]. Bu aradaki boşluğu gidermek için Xilinx, 1984'te piyasaya sundukları alan programlanabilir kapı dizisi veya FPGA adı verilen yeni bir IC sınıfı geliştirdi. Bir FPGA genellikle daha karmaşıktır ve uygulamaları bazen örtüşebilse de bir CPLD'den çok daha yüksek bir yoğunluğa sahiptir. İlk FPGA'ler CMOS teknolojisine dayanmaktadır ve konfigürasyon için SRAM hücrelerini kullanmaktadır. Bu cihazlar nispeten basit olmasına ve günümüz standartlarına göre daha az sayıda kapı içermesine rağmen, temel mimarilerin birçok yönü ile kullanılmaya devam etmektedir.

FPGA programlanabilir lojik kapılardan ve programlanabilir ara bağlantılardan oluşan entegre devredir. FPGA' ler programlanma şekline göre ikiye ayrılır. Tek seferlik

programlanabilen FPGA’ ler bağlantı yapılarındaki yüksek dirençli yollardan istenilenlerin kısa devre edilmesi nedeniyle yalnızca bir kez programlanabilmektedir. Diğer tür FPGA’ ler ise programlama bilgisini bir hafıza alanından okumakta ve istenildiği kadar programlanabilmektedirler. Bu özelliği sayesinde sahada çıkabilecek problemler veya istenilen performans iyileştirmeleri için bu tür FPGA’ ler daha çok tercih edilmektedir. Ancak FPGA’ in içindeki kodun tekrar değiştirilmesinin istenmediği durumlarda tek seferlik programlanabilir FPGA’ ler tercih edilmektedir bunun sebebi bu FPGA’ ler kodu hafızasında tutmak için ayrı bir belleğe ihtiyaç duymamaktadır bu önemli bir avantaj sağlamaktadır.

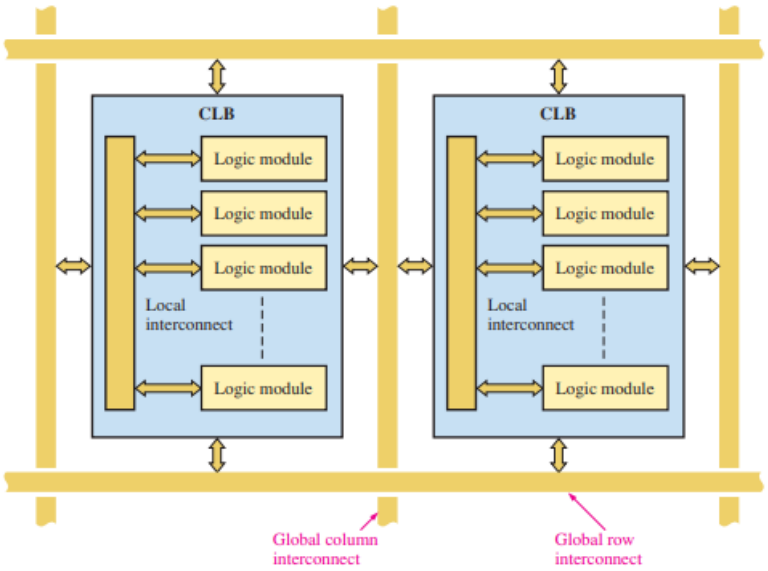
3.3.1. FPGA Mimarisi

Klasik CPLD mimarisi, programlanabilir ara bağlantılara sahip PAL/GAL veya PLA tipi mantık bloklarından oluşur. Temel olarak, FPGA (alanda programlanabilir kapı dizisi) mimaride farklılık gösterir, PAL/PLA tipi dizileri kullanmaz ve CPLD'lerden çok daha büyük yoğunluklara sahiptir. Klasik bir FPGA, bir CPLD'den birçok kat daha fazla eşdeğer kapıya sahiptir. FPGA'lardaki mantık üreten elemanlar genellikle CPLD'lerden çok daha küçüktür ve bunlardan çok daha fazlası vardır. Ayrıca, programlanabilir ara bağlantılar genellikle FPGA'larda bir satır ve sütun düzenlemesinde düzenlenir. Bir FPGA'daki üç temel öğe, Şekil 3.52’de gösterildiği gibi yapılandırılabilir mantık bloğu (CLB), ara bağlantılar ve giriş/çıkış (I/O) bloklarıdır. Yapının çevresindeki I/O blokları, dış dünyaya ayrı ayrı seçilebilir giriş, çıkış veya çift yönlü erişim sağlar. Dağıtılmış programlanabilir ara bağlantı matrisi, CLB'lerin ara bağlantısını ve giriş ve çıkışlara bağlantı sağlar. Büyük FPGA'lar, belleğe ve diğer kaynaklara ek olarak on binlerce CLB'ye sahip olabilir.



Şekil 3. 52: Basit FPGA Yapısı [29]

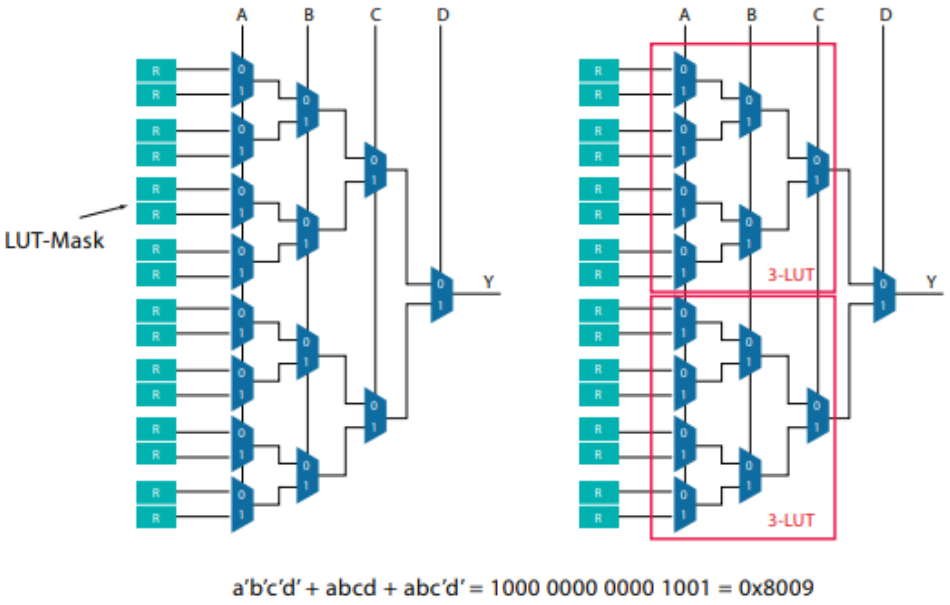
Çoğu programlanabilir mantık üreticisi, yoğunluk, güç tüketimi, besleme voltajı, hız ve bir dereceye kadar mimaride farklılık gösteren bir dizi FPGA üretir. FPGA'lar yeniden programlanabilir ve programlanabilir bağlantılar için SRAM veya antifuse proses teknolojisini kullanır.



Şekil 3. 53: Global satır/sütun programlanabilir ara bağlantıları içindeki temel yapılandırılabilir mantık blokları (CLB'ler) [29]

Mantık hücreleri FPGA' nın temelini oluşturmaktadır, bu yapı üretici firmaların ve hatta aynı firmanın farklı ürün ailelerine göre de değişebilmektedir. Mantık hücrelerinin temelinde

bir ya da daha fazla LUT (Look Up Table), çoklayıcı (MUX) ve flip flop bulunur. Genellikle en az 4 girişi bulunan LUT' lar mantık işlemlerini yerine getiren küçük belleklerdir. N girişli bir LUT, 2^N bitlik bir belleğe karşılık gelir. FPGA' ların kapasitesi genellikle LUT ve flip floptan oluşan mantık hücrelerinin sayısı ile ölçülmektedir.



Şekil 3. 54: LUT-4 Uygulaması [48]

Şekil 3.54'te gösterilen LUT-4 yapısına bakıldığında ilk şekilde 16 bit SRAM için 16:1 çoklayıcı 2:1 çoklayıcının ağaç olarak kullanılması ile sağlanmaktadır. İkinci şekilde ise iki tane 3-LUT yapısı ve bir tane 2:1 çoklayıcı kullanılarak sistem basit hale getirilmektedir.

3.3.2. FPGA Programlama Teknolojileri

Her FPGA, programlanabilir anahtarları kontrol etmek için kullanılan temel bir programlama teknolojisine dayanır. Beş farklı programlama yöntemi vardır bunlar: SRAM tabanlı, SRAM/Flash tabanlı, Anti-fuse tabanlı, EPROM/EEPROM tabanlı, Flash tabanlı tabanlı teknolojilerdir. Bu yaklaşımlardan sadece Flash, SRAM ve antifuse yaklaşımları modern FPGA'lerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.3.2.1. SRAM Tabanlı Programlama

FPGA'lerin çoğu, SRAM konfigürasyon hücrelerinin kullanımına dayanır, bu da onların tekrar tekrar yapılandırılabileceği anlamına gelir. Bu tekniğin ana avantajları, yeni tasarım fikirlerinin hızlı bir şekilde uygulanabilmesi ve test edilebilmesi ve gelişen standartların ve protokollerin kolay bir şekilde adapte edilebilmesidir. Ayrıca, sistem ilk çalıştırıldığında, FPGA

başlangıçta kendi kendini test etme veya kart/sistem testi gibi bir işlevi yerine getirmek üzere programlanabilir ve ardından ana görevini yerine getirmek üzere yeniden programlanabilir. SRAM tabanlı cihazların bir dezavantajı, sistem her açıldığında yeniden yapılandırılmaları gerekmesidir. Bu, ya özel bir harici bellek aygıtının ya da yerleşik bir mikroişlemcinin kullanılmasını gerektirir [26].

3.3.2.2. SRAM/Flash Tabanlı Programlama

SRAM tabanlı programlama ile benzerdir tek farkı flash bellek sayesinde konfigürasyon mekanizmasına gerek kalmamasıdır. Konfigürasyon esnasındaki veri akışının kopyalanmasının önüne geçildiği için güvenli bir yöntemdir [28].

3.3.2.3. Anti-Fuse Tabanlı Programlama

Programlama yüksek gerilim uygulanarak metaller arasındaki yalıtkan malzeme yok edilir bu sebeple uçucu değillerdir ancak geri dönüşü olmadığı için yalnızca bir kez programlanabilmektedirler. Güç tüketimleri ve gecikme süreleri düşüktür bu sebeple SRAM tabanlı programlamadan daha hızlı ve daha güvenilirlerdir [28].

3.3.2.4. EPROM/EEPROM Tabanlı Programlama

EPROM tabanlı programlamada harici bir depolama mekanizmasına gerek yoktur çünkü yeniden programlanabilirler fakat bunun için sistemden çıkartılmaları gerekmektedir, bu da zaman kaybı yaratır çünkü EPROM'ların ultraviyole ışına maruz kalması gerekmektedir. EEPROM tabanlı programlama işlevsel olarak EPROM 'larla aynıdır ancak yapı olarak farklılık göstermektedir. EEPROM içerisindeki veriler sistemden çıkartılmadan üzerine yüksek gerilim uygulanarak silinebilmektedir bu sebeple EPROM'lara göre daha hızlı ve kolay bir şekilde programlanabilmektedirler. EEPROM'un birçok avantajı olmasına rağmen tasarımda çoklu gerilim kaynağına ihtiyaç duydukları ve EPROM'un neredeyse iki katı kadar yer kaplamaları gibi dezavantajları da vardır. EPROM/EEPROM tabanlı programlama teknolojileri kalıcı özelliğe sahiptirler [28].

3.3.2.5. Flash Tabanlı Programlama

Flash tabanlı programlamada veriler flash bellek içerisinde saklanmaktadır, veriler kalıcıdır ve tek seferlik programlanabilirler. SRAM/flash yönteminden farklı olarak herhangi bir SRAM' a ihtiyaç yoktur. Güç tüketimleri ve elektromanyetik ortamdan etkilenme oranları düşüktür. Verilerin kopyalaması mümkün değildir bu özelliği güvenlik için önemli bir etkendir.

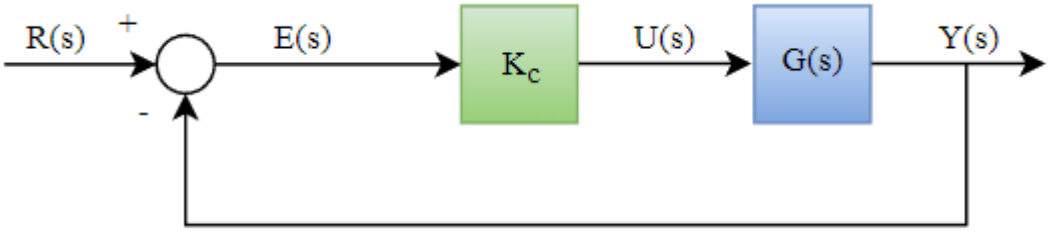
3.4. PID KONTROLÖRLER

3.4.1. P Kontrolör

En basit kontrolör oransal kontrolördür. Bu oransal terim ile, geri besleme kontrol sinyali u(t), formül ile geri besleme hatası e(t) ile orantılı olarak hesaplanır,

$$u(t) = K_p e(t) \tag{3.16}$$

burada K_p orantısal kazançtır ve geri besleme hatası, referans sinyali r(t) ile çıkış sinyali y(t) (e(t) = r(t) − y(t)) arasındaki farktır. Kapalı döngü geri besleme kontrol konfigürasyonu için blok diyagram Şekil 1.1'de gösterilmektedir, burada R(s), E(s), U(s) ve Y(s) referans sinyalinin Laplace dönüşümleri, geri besleme hatası, kontrol sırasıyla sinyal ve çıkış sinyali. G(s), tesisin Laplace transfer fonksiyonunu temsil eder.



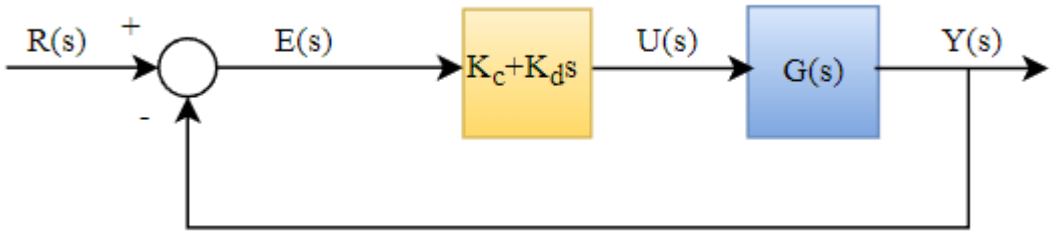
Şekil 3. 55: P kontrolör geri besleme kontrol sistemi

Kullanım amacı sistemin karalı durum hatasını minimize etmek olan P kontrolör, basitliği nedeniyle sistem hakkında çok az bilginin mevcut olduğu ve sistemin kararlı durum hatasına tolerans gösterdiği durumlarda sıklıkla kullanılır. Kontrolör sadece bir parametrenin belirlenmesini içerdiğinden, tesis hakkında detaylı bilgi verilmeden Kp seçimi yapılabilmektedir [25]. Orantısal kazanç faktörü K_p arttıkça sistemin karalı durum hatası da azalmaktadır. Ancak azalmaya rağmen sistemin karalı durum hatasını ortadan kaldırmayı başaramaz. Orantısal kazancı arttırarak daha küçük genlik ve faz marjı, daha geniş frekans bandını karşılayan daha hızlı dinamikler ve gürültüye karşı büyük hassasiyet sağlar. Bu kontrolör yalnızca sistemin sabit durum hatasına tolerans gösterdiği durumlarda kullanılabilmektedir. Ek olarak, P kontrolörünün uygulanmasının yükselme süresini azalttığı ve kararlı durum hatasında belirli bir azalma değerinden sonra, K'nin arttırılmasının yalnızca sistem yanıtının aşılmasına neden olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. P kontrolörü ayrıca gecikmeler ve ölü zamanlar olduğunda yeterince agresif ise osilasyona neden olmaktadır. Daha fazla gecikmenin olması daha fazla sorunu da beraberinde getirir. Ayrıca, işlemin gürültüsünü doğrudan etkileyerek yükseltmektedir.

3.4.2. PD Kontrolör

Pek çok uygulamada, bir oransal kontrolör Kp, kapalı döngü sistemi için stabilizasyon veya yeterli sönümleme üretme gibi belirli bir kontrol amacına ulaşmak için yeterli değildir. P-D kontrolör kullanılmasının amacı, sistem yanıtının gelecekteki hatalarını tahmin edebildiğinden kontrolü geliştirerek sistemin kararlılığını arttırmaktadır. Hata sinyali değerindeki ani değişimin etkilerinden kaçınmak için hata sinyali yerine sistem değişkeninin çıkış yanıtından türev alınır. Bu nedenle D modu, hata sinyalindeki ani değişikliklerden kaynaklanan kontrol çıkışında meydana gelen ani değişiklikleri önlemek için çıkış değişkeninin değişimiyle orantılı olacak şekilde tasarlanmıştır. Ek olarak D, proses gürültüsünü doğrudan yükseltir, bu nedenle sadece D kontrolü kullanılmamaktadır.

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \tau_D e'(t) \tag{3.17}$$



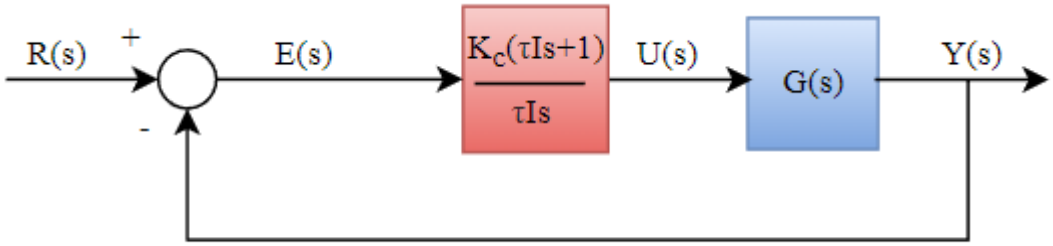
Şekil 3. 56: PD Kontrolör geri besleme kontrol sistemi

3.4.3. PI Kontrolör

PI denetleyici, PID denetleyiciler arasında en yaygın kullanılan denetleyicidir. İntegral eylemi ile, tek başına oransal kontrolör ile mevcut olan kararlı durum hatası tamamen ortadan kaldırılmıştır. Ancak tepki hızı ve sistemin genel karalılığı açısından olumsuz bir etkisi vardır, bu sebeple bu kontrolör daha çok sistemin hızının sorun olmadığı alanlarda kullanılmaktadır. u(t) kontrolörünün çıktısı, biri orantısal fonksiyondan, diğeri integral eylemden olmak üzere aşağıdaki forma sahip iki terimin toplamıdır.

$$(t) = K_p e(t) + \frac{K_i}{\tau I} \int_0^t e(\tau)\, d\tau \tag{3.18}$$

burada e(t) = r(t) - y(t), r(t) referans sinyali ile y(t) çıkışı arasındaki hata sinyalidir, Kc orantısal kazançtır ve τI integral zaman sabitidir. τI parametresi her zaman pozitiftir ve değeri PI denetleyicisi tarafından gerçekleştirilen integral eyleminin etkisiyle ters orantılıdır. Daha küçük bir τI, integral eyleminin daha güçlü bir etkisi ile sonuçlanacaktır.



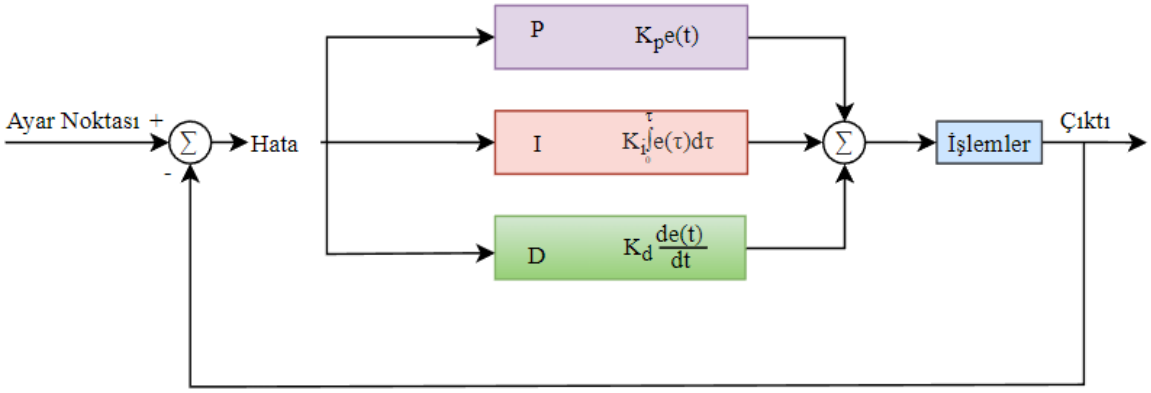
Şekil 3. 57: PI Kontrolör geri besleme kontrol sistemi

3.4.4. PID Kontrolör

Bir PID denetleyicisi üç terimden oluşur: orantısal (P), integral (I) ve türev (D). İdeal bir formda, bir PID denetleyicisinin çıkışı u(t), üç terimin toplamıdır.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_i}{\tau I}\int_0^t e(\tau)\,d\tau + K_d \tau_D \frac{de(t)}{dt} \qquad (3.19)$$

burada e(t) = r(t)−y(t), r(t) referans sinyali ile y(t) çıkışı arasındaki geri besleme hata sinyalidir ve τ_D türev kontrol kazancıdır. PID kontrolör, sıfır sabit durum hatası, hızlı yanıt (kısa yükselme süresi), osilasyon olmadan ve daha yüksek kararlılık dahil olmak üzere optimum kontrol dinamiklerine sahiptir. PI denetleyiciye ek olarak türevsel bir kazanç bileşeni kullanılmasının gerekliliği, sistemin çıkış yanıtında oluşan aşırılık ve salınımları ortadan kaldırmaktır. P-I-D kontrolörünün ana avantajlarından biri, birden fazla enerji depolamayı içeren daha yüksek dereceli işlemlerle kullanılabilmesidir.



Şekil 3. 58: PID Kontrolör geri besleme kontrol sistemi

3.5. MALZEMELER

Bu bölümde tez çalışması kapsamında kullanılan Basys3 FPGA geliştirme kartı, STM32 geliştirme kartı, üç fazlı fırçasız doğru akım motoru, motor sürücü devresi ve enkoder hakkında bilgiler verilecektir.

3.5.1. Basys3 FPGA Geliştirme Kartı

Bu geliştirme kartında Xilinx tarafından üretilen Artix-7 serisine ait XC7A35T-1CPG236C FPGA bulunmaktadır. Bu FPGA'in genel özellikleri:

- 5200 dilimde 33.280 mantık hücresi (her dilim dört adet 6 girişli LUT ve 8 flip-flop içermektedir.)
- 1800Kbit hızlı blok RAM
- 5 adet saat yönetimli faz kilitlemeli döngü devresi
- 90 adet DSP dilimi
- Dahili saat hızları 450MHz'yi aşmaktadır.
- On-Chip yapısına sahip Analog-Dijital Dönüştürücü (XADC)

Basys 3 geliştirme kartının üzerinde bulunan bileşenler ise aşağıdaki gibidir.

- 16 adet kullanıcı anahtarı
- 16 adet kullanıcı LED'i
- 5 adet kullanıcı butonu
- 4 basamaklı 7 segmentli ekran
- Üç Pmod bağlantı noktası
- Bir Pmod ise XADC sinyalleri için ayrılmıştır.
- 12-bit VGA çıkışı
- USB-UART köprüsü
- Seri Flash
- FPGA'nın programlanması ve haberleşmesi için USB-JTAG portu
- Taşınabilir bellek, klavye ve fare için USB HID(Human Interface Device) Host [31]



Şekil 3. 59: Basys3 FPGA Geliştirme Kartı [39]

3.5.2. Üç Fazlı Fırçasız DA Motoru

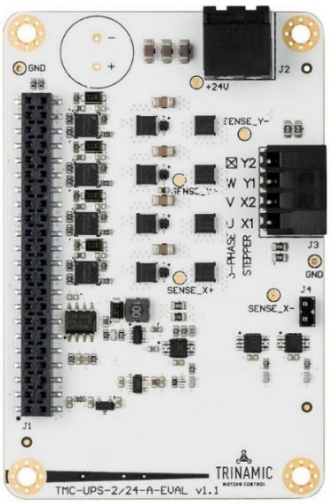
Kullanılan üç fazlı fırçasız DA motoru, 11 kutup çiftine sahiptir, yüksek hız, yüksek hassasiyetli uygulamaları hedefler. Motorun üzerinde hall sensörler bulunmaktadır, böylece rotorun pozisyonu net olarak incelenebilecektir.



Şekil 3. 60: Üç Fazlı Fırçasız DA Motoru [40]

3.5.3. Motor Sürücü Kartı

Kullanılan motor sürücü devresi Trinamic firmasına aittir, uygulanan PWM sinyalleri, 5V ve 24 V girişleri ile motor sürebilmektedir. Güç MOSFET'leri ve Half-Bridge Gate Driver'lar bulunmaktadır. Gate driverlar ile uygulanan PWM sinyalleri MOSFET'lere iletilir. Gate driverlar devredeki herhangi bir sorun meydana geldiğinde devrenin tamamının etkilenmesini önler ve MOSFET'lerin de yüksek hızda ve doğrulukta anahtarlanmasını sağlar.



Şekil 3. 61: Motor Sürücü Kartı [38]

3.5.4. Mutlak Enkoder

AksIM-2, sınırlı alana sahip uygulamalara entegrasyon için tasarlanmış temassız, yüksek performanslı eksen dışı mutlak döner kodlayıcıdır. İçi boş bir halka, gerçek mutlak işlevsellik ve yüksek hızlı çalışma, bu kodlayıcıyı birçok uygulama için uygun hale getirir. AksIM-2 kodlayıcı sistemi, eksenel olarak manyetize edilmiş bir halka ve bir okuma kafasından oluşur. Enkoderler BiSS, Asenkron seri (UART), SPI, PWM veya SSI iletişim arayüzleri ile donatılmıştır ve devir başına 20 bite kadar bir dizi ikili çözünürlük sunar.

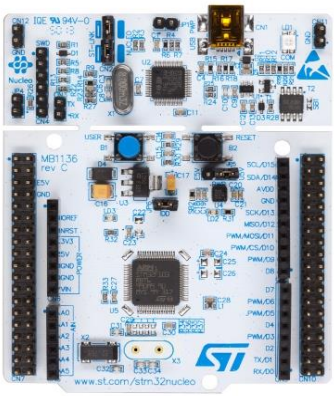


Şekil 3. 62: Mutlak Enkoder [37]

3.5.5. STM32F103 Nucleo-64 Kartı

STM32 Nucleo-64 kartı, kullanıcıların STM32 mikrodenetleyici tarafından sağlanan çeşitli performans ve güç tüketimi özellikleri kombinasyonları arasından seçim yaparak yeni konseptleri denemeleri ve prototipler oluşturmaları için uygun maliyetli ve esnek bir seçenek sunmaktadır. Uyumlu kartlar için harici SMPS, çalışma modunda güç tüketimini önemli ölçüde

azaltmaktadır. Arduino Uno V3 bağlantı desteği ve ST konnektörleri ile açık geliştirme platformunun işlevselliğinin kolayca genişletilmesine olanak tanır.

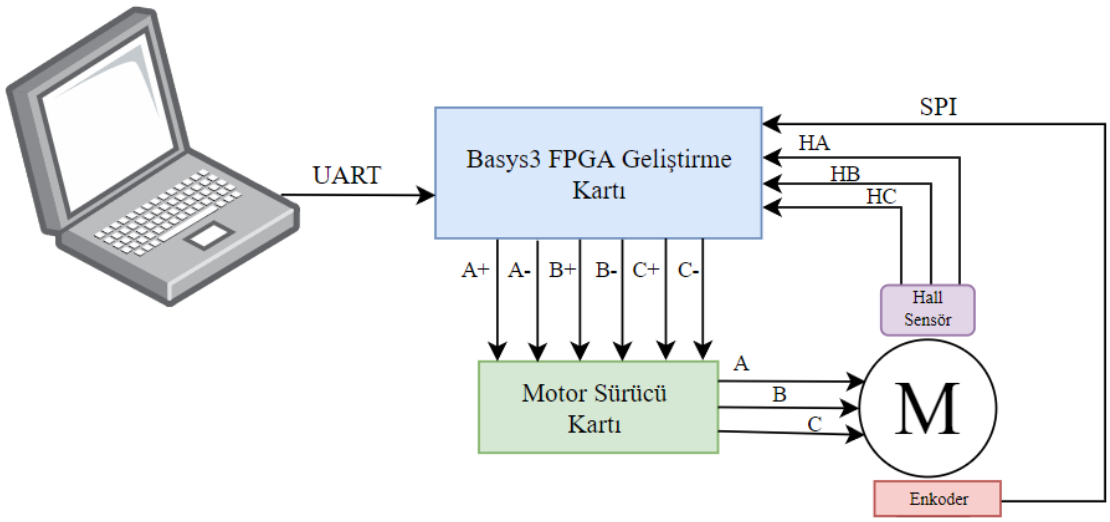


Şekil 3. 63: STM32F103 Nucleo-64 Development Board [46]

- LQFP64 veya LQFP48 paketinde STM32 mikrodenetleyici
- Arduino ile paylaşılan 1 kullanıcı LED'i
- 1 kullanıcı ve 1 reset butonu
- 32.768 kHz kristal osilatör
- Kart konnektörleri: Arduino ve ST konnektörleri
- 24 MHz veya 48 MHz HSE

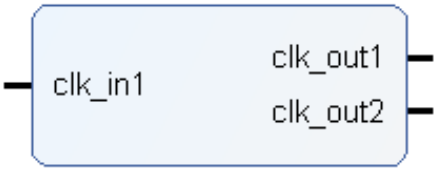
4. BULGULAR

Tez çalışmasında pozisyon geri beslemeli bir sistem üzerine çalışılmıştır. Üç fazlı fırçasız doğru akım motorunu kontrol etmek için PWM sinyalleri kullanılmaktadır. PWM sinyalini sisteme uygulamadan önce rotor konumunun bilinmesi gerekmektedir, çünkü sinyallerin sırası hangi sargıya enerji verileceğini belirlemektedir. FPGA ve MCU üzerinden hall sensörler okunarak buna bağlı olarak üretilen PWM sinyalleri motor sürücü devresinde bulunan transistörlere bağlanır ve anahtarlama yapılması ile sargılara sırayla akım verilmesi sağlanarak motorun dönüş hareketi gerçekleştirilmiş olmaktadır. Tüm bunlar Şekil 4.1'deki gibi bir düzenek ile sağlanabilmektedir.



Şekil 4.1:Kurulan sistemin şematik gösterimi

Kurulan bu sistem için öncelikle gerekli frekans ayarları yapılmalıdır. Bunun için Vivado içerisinde bulunan Şekil 4.2'de gösterilen Clock Wizard IP'sini kullanarak frekans hem PWM hem de SPI tarafı için uygun değerlere ayarlanmıştır. Çünkü kullanılan enkoderın SPI clock frekansı değeri maksimum 4MHz olabilmektedir.



Şekil 4.2: Clock Wizard Şematik Gösterimi

Hall sensörün ürettiği sinyalleri hem FPGA hem de MCU üzerinden okuyarak motorun pozisyonuna ulaşılabilmektedir. Hall sensör verilerini okumak için yazılan VHDL kodu aşağıdaki gibidir. Hall sensörden alınan datalara göre PWM sinyalleri üretilerek sisteme iletilmektedir. Motorun dönüş yönü de ara yüz aracılığı ile değiştirilebilmektedir.

```
if( motor_direction = '0') then
     if (H_Phase = "101") then
         PWM_Phase <="100100";
     elsif (H_Phase = "100") then
         PWM_Phase <="100001";
     elsif (H_Phase = "110") then
         PWM_Phase <="001001";
     elsif (H_Phase = "010") then
         PWM_Phase <="011000";
     elsif (H_Phase = "011") then
         PWM_Phase <="010010";
     elsif (H_Phase = "001") then
          PWM_Phase <="000110";
     end if;
```

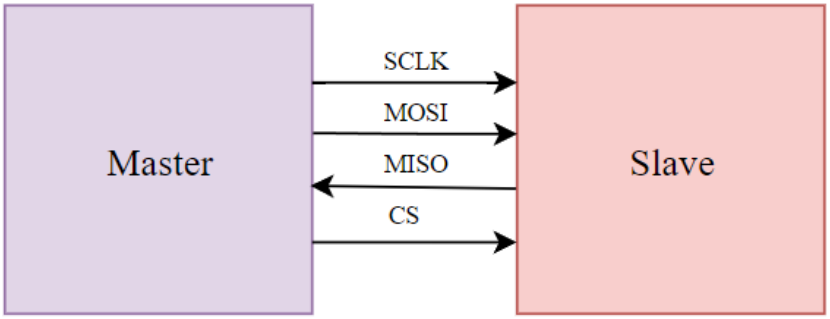
a) Sağa dönüş

```
elsif (motor_direction ='1') then
     if (H_Phase = "001") then
         PWM_Phase <="001001";
     elsif (H_Phase = "011") then
         PWM_Phase <="100001";
     elsif (H_Phase = "010") then
         PWM_Phase <="100100";
     elsif (H_Phase = "110") then
         PWM_Phase <="000110";
     elsif (H_Phase = "100") then
         PWM_Phase <="010010";
     elsif (H_Phase = "101") then
          PWM_Phase <="011000";
     end if;
 end if;
```

b) Sola Dönüş

Şekil 4.3: Hall sensör VHDL kodu

Hall sensörden rotorun konumu okunsa da enkoder kadar yüksek çözünürlüklü değildir bu sebeple aynı zamanda anlık olarak yüksek çözünürlüğe sahip olan bir mutlak enkoderdan da motor konumu okunmaktadır. Enkoder ile SPI (Serial Peripheral Interface) haberleşme protokolü ile iletişim kurulur. Bu sebeple öncelikle SPI haberleşme protokolü ve kullanılan enkoderle nasıl iletişim kurulacağı incelenmiştir. SPI'da haberleşme bir master ve bir slave arasında gerçekleşir. Master soru soran, slave ise cevap veren taraf olarak tanımlanabilir, MOSI üzerinden komut atılır ve MISO üzerinden cevap alınır. SS pini ile birden fazla slave ile haberleşme sağlanabilmektedir. Bu çalışma üzerinde FPGA ve MCU tarafı master olurken, enkoder tarafı slave olmaktadır.



Şekil 4.4: SPI Protokolü Bağlantı Şeması

Enkodere ait doküman incelendiğinde iletişimin başlaması için 0x00,0x00 datalarının komut olarak atılması gerektiği görülmüştür, bu komut atıldıktan sonra gelen yanıt 40 bitlik bir datadır ve bunun ilk 20 biti pozisyon datasını içermektedir. Bu sebeple gerekli data parçalama işlemleri gerçekleştirilir ve bulunan konum oldukça hassas bir şekilde elde edilmiş olur. Bu sayede motorun pozisyon kontrolü de hassas bir şekilde yapılabilmektedir çünkü geri dönüş değeri olarak enkoderdan alınan pozisyon değeri kullanılmaktadır.

```
entity Encoder_reader is
    Port ( Data : out std_logic_vector(19 downto 0);
           Data_valid : out std_logic;
           SPI_CLK : out STD_LOGIC;
           SPI_CS : out STD_LOGIC;
           SPI_MISO : in STD_LOGIC;
           SPI_MOSI : out STD_LOGIC;
           clk_spi : in STD_LOGIC
           );
end Encoder_reader;
```

Şekil 4.5: Enkoder VHDL Kodu

STM32 üzerinden enkoder ve hall sensör okuma işlemleri için timer interrupt kullanılmaktadır böylece her 10 milisaniyede anlık datalara ulaşılmaktadır. Hall sensörü okumak için GPIO pinleri input olarak ayarlanarak okuma yapılmıştır. Encoder ile okunan datalar ise gerekli işlemler yapıldıktan sonra açı cinsinden bulunmuştur.

```
HAL_GPIO_WritePin(CS_ENCODER_GPIO_Port, CS_ENCODER_Pin, GPIO_PIN_RESET);
HAL_SPI_Transmit(&hspi1, enc_cmd, 2, 100);
HAL_SPI_Receive(&hspi1, enc_data, 5, 100);
HAL_GPIO_WritePin(CS_ENCODER_GPIO_Port, CS_ENCODER_Pin, GPIO_PIN_SET);
data = (uint32_t) (enc_data[0] << 16) | (uint32_t) (enc_data[1] << 8) | (uint32_t) (enc_data[2]);

encoderPosition = (data >> 6);
angularAbsolutePosition = ((float) (encoderPosition) / (float) (1 << 18) * 360.0F);

a= HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB, GPIO_PIN_3);
b= HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB, GPIO_PIN_4);
c= HAL_GPIO_ReadPin(GPIOB, GPIO_PIN_5);

sprintf(uart_motor_buffer, "Pozisyon: %f  A: %d  B: %d  C: %d\n", angularAbsolutePosition, a, b, c);
        HAL_UART_Transmit(&huart2, (uint8_t*) &uart_motor_buffer,
        strlen(uart_motor_buffer), 100);
```

Şekil 4.6: STM32 ile enkoder açısı hesaplama ve hall sensör okuma işlemi

Elde edilen tüm verileri gözlemlemek ve FPGA/MCU ile iletişim kurabilmek için UART haberleşme protokolüne ihtiyaç duyulmaktadır. Seri port üzerinden bilgisayara bağlanan FPGA/MCU ile C# ile tasarlanmış olan Motor Kontrol Ara Yüzü üzerinden haberleşme sağlanır. Bunun için bir VHDL ile UART modülü tasarlanmış sisteme entegre edilmiştir.

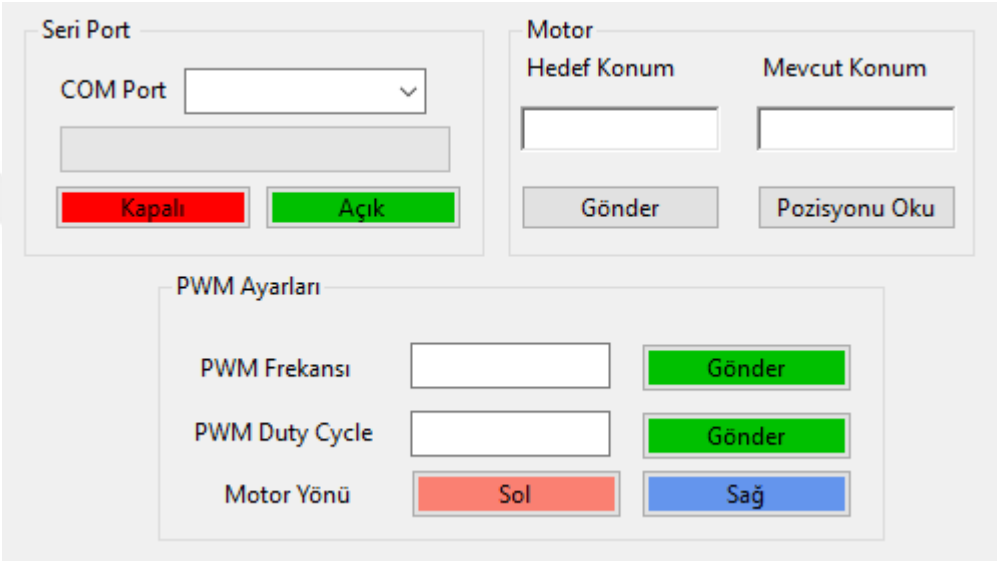
```
entity UART is
    Port (
          Clk                 : in STD_LOGIC;
          Rate                : in STD_LOGIC;
          RX                  : in STD_LOGIC;
          D_out               : out STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0);
          Valid_out           : out STD_LOGIC;
          TX                  : out STD_LOGIC;
          D_in                : in STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0);
          Valid_in            : in STD_LOGIC
          );
end UART;
```

Şekil 4.7: UART Protokolü VHDL Kodu

Tasarlanan ara yüz üzerinden hedef konum, motorun dönüş yönü, duty cycle değeri girilebilmekte ve FPGA/MCU'ya aktarılabilmektedir. Her bir değer için farklı header değerleri kullanılarak gelen datalar ayırt edilmiştir. Şekil 4.8'de görüldüğü üzere header 1 ile alınan değer PWM frekansını belirtmektedir, 2 ile alınan değer duty cycle değerini ve 3 ile alınan değer motorun yönünü belirtmektedir.

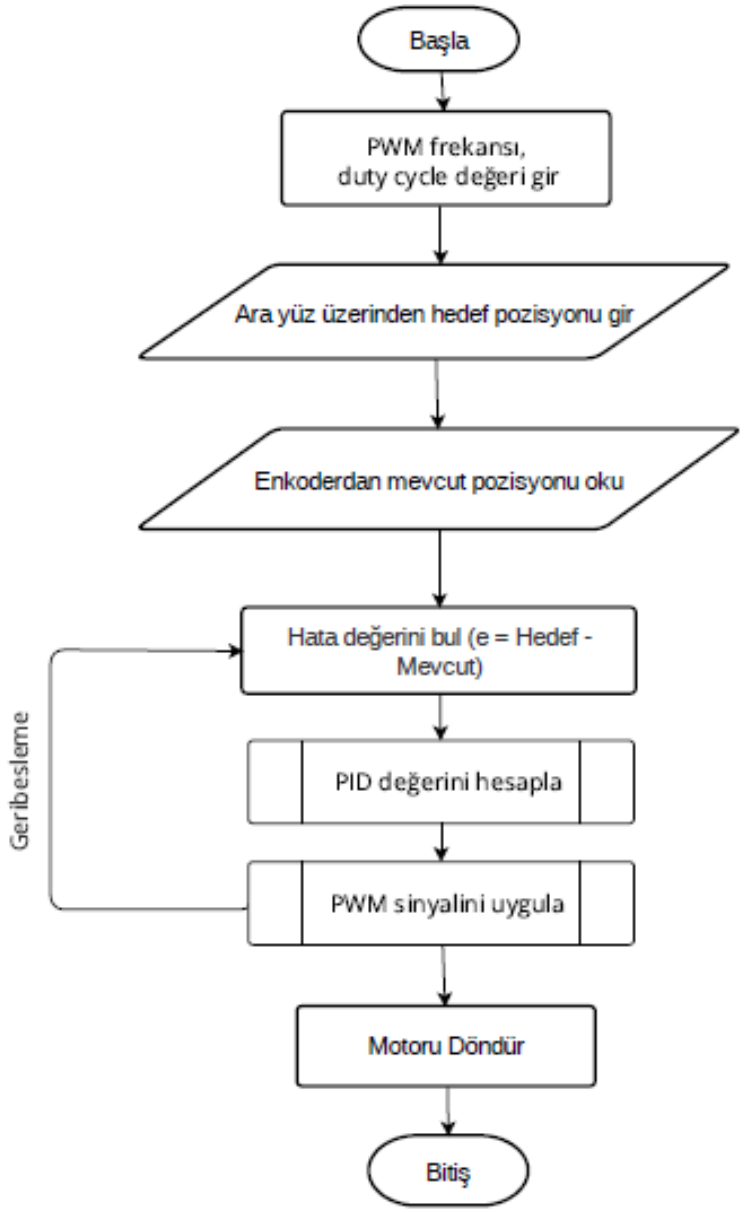
```
if (command_data = to_unsigned(1,8)) then
    pwm_freq <= uart_data;
end if;
if (command_data = to_unsigned(2,8)) then
    pwm_duty <= uart_data;
end if;
if (command_data = to_unsigned(3,8)) then
    motor_direction<=uart_data(0);
end if;
```

Şekil 4.8: Komut ifadeleri



Şekil 4.9: Motor Kontrol Ara Yüzü

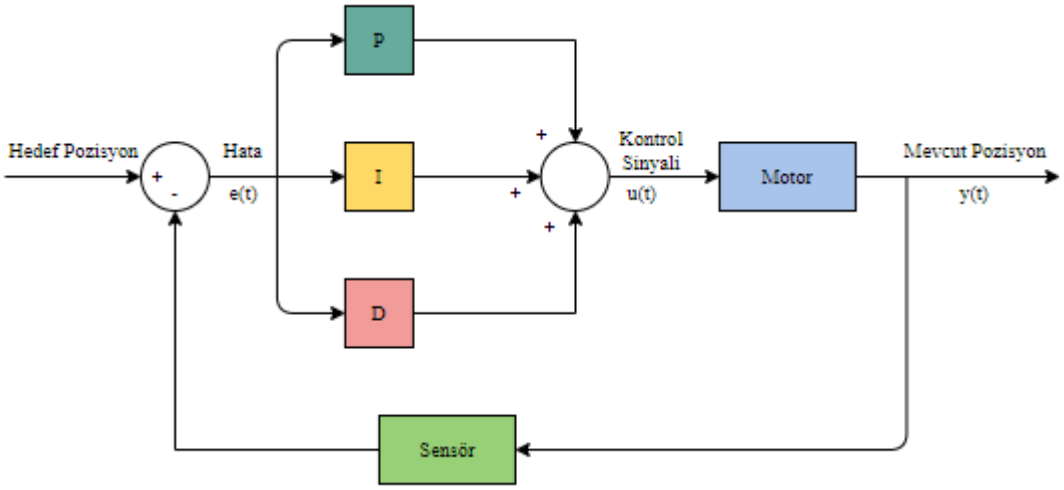
Sistemin hedef pozisyona en doğru ve en hızlı şekilde ulaşmasını sağlamak için kontrolör olarak PID kontrolör kullanılmıştır. PID kontrolör, endüstriyel kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan genel bir kontrol döngüsü geri besleme mekanizmasıdır. Bir PID kontrolörü, ölçülen bir proses değişkeni ile istenen bir ayar noktası arasındaki fark olarak bir "hata" değeri hesaplar. Kontrolör, proses kontrol girişlerini ayarlayarak hatayı en aza indirmeye çalışır. Şekil 4.10, bu kurulum için uygulama programı akış diyagramını göstermektedir.



Şekil 4.10: FSDAM için PID Kontrolör Akış Diyagramı

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_i}{\tau I}\int_0^t e(\tau)\,d\tau + K_d \tau_D \frac{de(t)}{dt} \qquad (4.1.)$$

Fırçasız DA motoru için kontrol sinyalini almak için PID denklemi hesaplanır. Denklem 4.1'de, e(t) hedef açısı ile mevcut açı arasındaki konum hatası değeri farkıdır, u(t) fırçasız DA motoru için PWM sinyalidir ve y(t) mevcut açıdır. Kp, Ki ve Kd sırasıyla orantı, integral ve diferansiyel katsayı değerleridir.



Şekil 4.11: Fırçasız DA Motorunun PID Kontrolör ile ile Kapalı Çevrim Pozisyon Kontrolü

Orantısal kazanç (Kp) hatanın büyüklüğünü inceler ve orantılı olarak yanıt verir. Büyük bir hatası olmasına rağmen, motor konumunun büyüklüğü büyük bir yanıt alacaktır. İntegral kazanç (Ki) kararlı durum hatasını azaltmaya çalışır. Ve türev kazancı (Kd), hata sinyalinin değişim hızına bakmaya çalışır. Türev kontrolü, hızlı bir değişim hızına motor pozisyonunun daha büyük bir sistem tepki eğrisi olmak için aşmayı azaltacaktır. Son olarak, kontrolör, sistem performansını iyileştirmek için PID kazanç değerleri kullanılarak fırçasız DA motorunun sinyal değişimine bağlı olarak PWM sinyali hesaplanır.

```
entity PID_controller is
port( clk     : in std_logic;
      reset   : in std_logic;
      set_val: in std_logic_vector(11 downto 0);
      pwm_in : in std_logic_vector(11 downto 0);
      pwm_out: out std_logic_vector(11 downto 0)
);
```

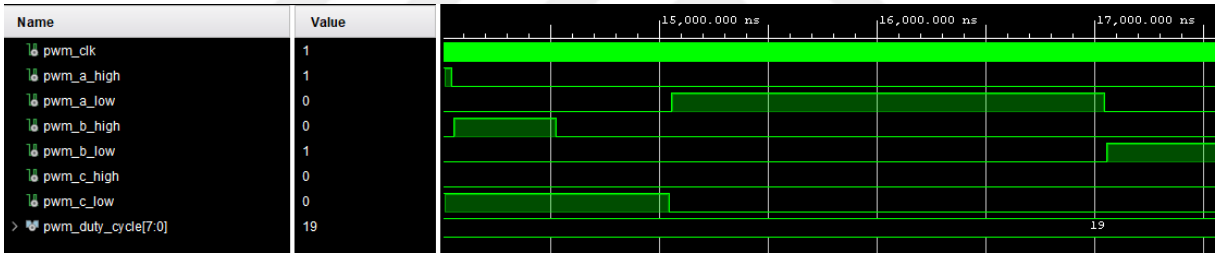
Şekil 4.12: PID Kontrolör VHDL Kodu

Bunun için öncelikle VHDL donanım tanımlama dili kullanılarak motor kontrolü için PWM sinyalleri üretilmiştir ve sisteme uygulanmıştır. PWM sinyalleri A+, A-, B+, B-, C+ ve C- olarak sıralanmaktadır.

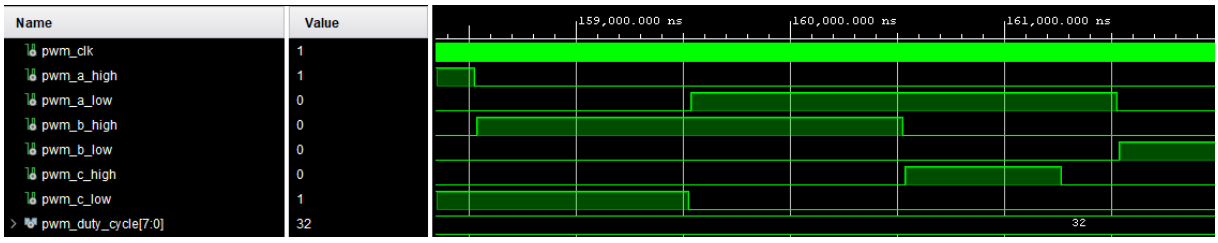
```
entity pwm is
port( pwm_clk    : in  std_logic;
      RX         : in std_logic;
      pwm_a_high : out std_logic;
      pwm_a_low  : out std_logic;
      pwm_b_high : out std_logic;
      pwm_b_low  : out std_logic;
      pwm_c_high : out std_logic;
      pwm_c_low  : out std_logic
      );
end pwm;
```

Şekil 4.13: PWM Sinyalleri VHDL Kodu

PWM frekansı ise bir sayaç ile 6 farklı durum için PWM sinyali üretmektedir çünkü 60°'lik aralıklar ile pozisyon değişmektedir. Ve üretilen PWM sinyallerinin duty cycle değerlerini de yine ara yüz aracılığı ile değiştirilebileceği daha önce ifade edilmişti. Şekil 4.14'te duty cycle değerinin 25 ve Şekil 4.15'te duty cycle değerinin 50 olarak ayarlandığı durumdaki sinyaller görülmektedir.



Şekil 4.14: Duty cycle değeri 25 iken PWM sinyali



Şekil 4.15:Duty cycle değeri 50 iken PWM sinyali

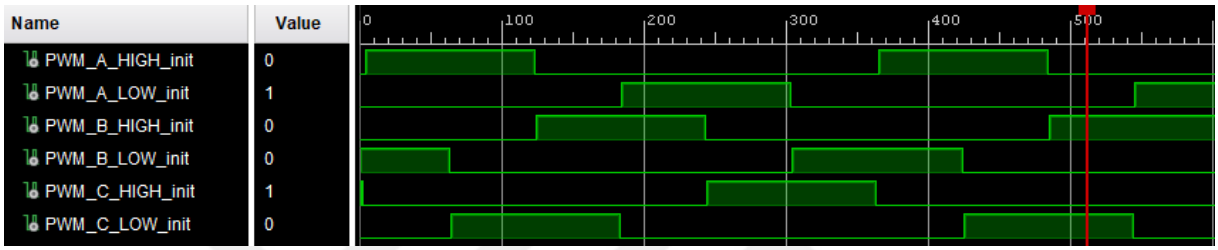
PWM frekansı motorun dönüş hızına etki etmektedir, frekans arttıkça hız artar.

```
counter<=counter+1;

if(counter > (10e2*to_integer(pwm_duty))) then
    pwm_temp <='0';
else
    pwm_temp <='1';
end if;

if(counter >= 10e2*to_integer(pwm_freq)) then
    counter<=0;
end if;
```

Şekil 4.16: PWM Frekansı ve Duty Cycle VHDL kodu



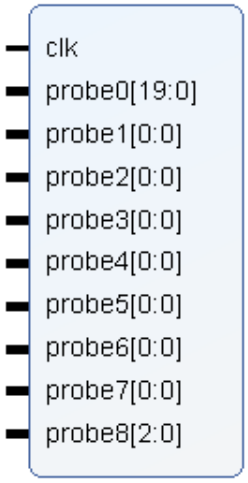
Şekil 4.17: Uygulanan PWM Sinyalleri

Motor sürücü kartına uygulanan PWM sinyallerinden motora giden 3 fazdaki sinyaller ise osiloskop üzerinde Şekil 4.18'teki gibi görünmektedir.



Şekil 4.18: Motor fazlarına verilen sinyaller

Tasarımın doğru çalıştığını görebilmek için Xilinx firmasına ait bir IP çekirdeği olan ILA (Integrated Logic Analyzer) kullanılmıştır. Bu sayede tasarımdaki sinyaller çalışma zamanında gözlemlenmiştir.



Şekil 4.19: ILA (Integrated Logic Analyzer)

IP çekirdeğini sinyallere atayabilmek için probelara her bir giriş datasının büyüklük bilgisi girilmektedir. Bu bilgileri Şekil 4.19'daki gibi atadıktan sonra VHDL kodu tarafında IP çekirdeği olan ILA'yı bir komponent olarak tanımlayarak ana kodun içinde kullanılmıştır.

```
component  ila_0 is
    port (
    clk : IN std_logic;
    probe0 : IN std_logic_vector(19 DOWNTO 0);
    probe1 : IN std_logic;
    probe2 : IN std_logic;
    probe3 : IN std_logic;
    probe4 : IN std_logic;
    probe5 : IN std_logic;
    probe6 : IN std_logic;
    probe7 : IN std_logic;
    probe8 : IN std_logic_vector(2 DOWNTO 0)

    );
end component;
```

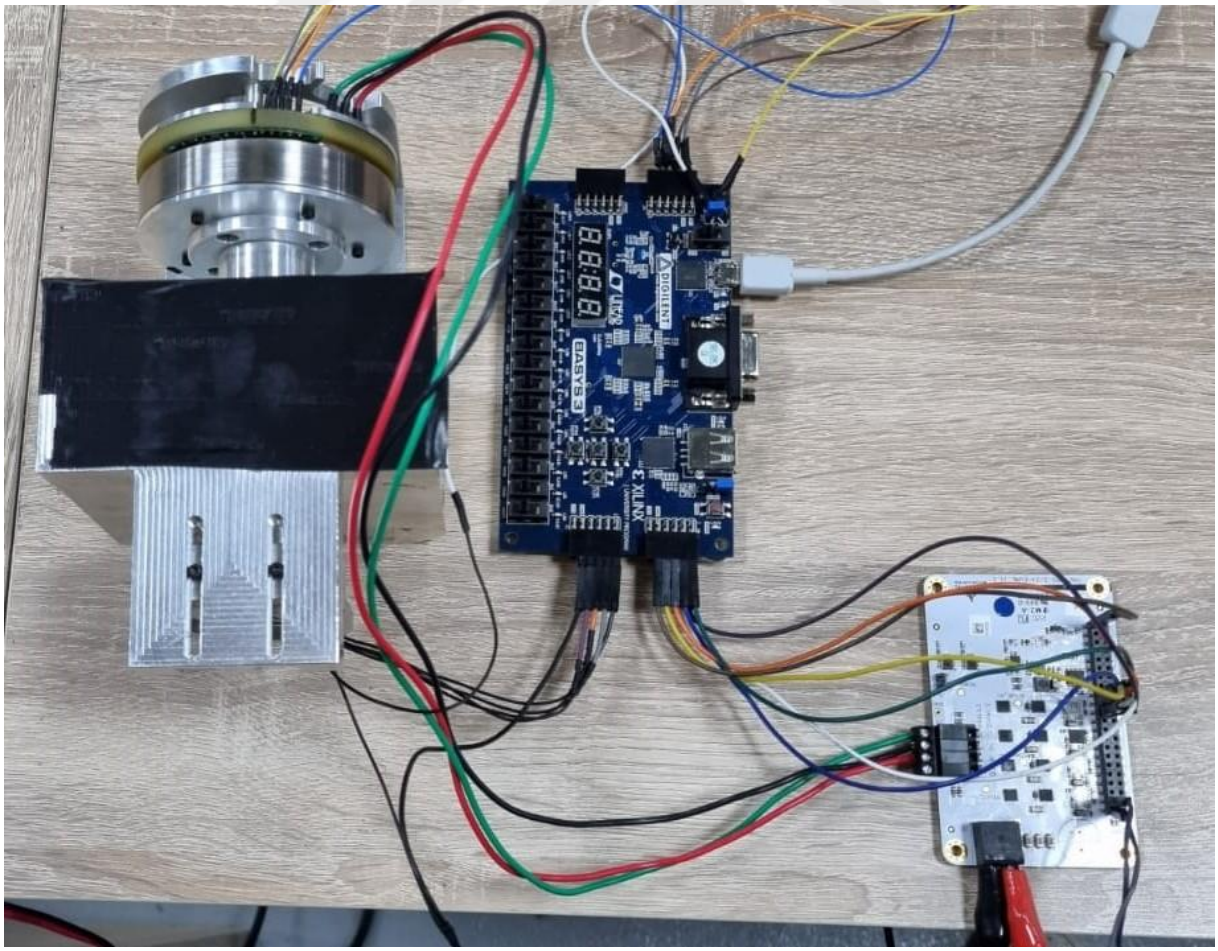
Şekil 4.20: ILA Komponent Tanımlaması

Komponent tanımlamasında sonra ise ILA'nın girişine bağlanacak olan yani gözlemlenecek olan dataların ataması yapılmıştır. Örneğin probe0 enkoder datasını içerdiği için 20 bit ve probe8 hall sensör datasını içerdiği için 3 bitlik bir giriş kullanılmıştır.

```
ila_0_init : ila_0
   port map (
   clk    => clk_300MHz,
   probe0 => encoder_data,
   probe1 => encoder_data_valid,
   probe2 => PWM_Motor_Init(0),
   probe3 => PWM_Motor_Init(1),
   probe4 => PWM_Motor_Init(2),
   probe5 => PWM_Motor_Init(3),
   probe6 => PWM_Motor_Init(4),
   probe7 => PWM_Motor_Init(5),
   probe8 => Hall_Init
   );
```

Şekil 4.21: ILA Pin Atamaları

FPGA'lerin paralel işlem yapma yeteneği ve yüksek frekanslarda çalışması, fırçasız DA motorunun hızlı yanıt ve yüksek verimlilik sağlaması, enkoderin yüksek hassasiyetli ölçüm yapması büyük avantajlar sağlamaktadır. Kurulan sistemde de yüksek frekanslarda çalışma, hızlı yanıt, yüksek hassasiyet ve doğruluk hedeflenmekteydi, bu sebeple yüksek hassasiyetli motor kontrolör sistemi Şekil 4.22'deki gibi tasarlanarak hedeflere ulaşılmıştır.



Şekil 4.22:Tez çalışmasında kullanılan sistem

5. TARTIŞMA

Hassas kontrol gerektiren sistemler için motorun pozisyonu büyük önem taşımaktadır. Pan-tilt ve kameranın bir arada kullanıldığı sistemlerde çok küçük bir açı değişimi dahi yüksek zoom yapılmış olan görüntüde çok büyük farklar yaratmaktadır. Bu sebeple pozisyonu kararlı bir şekilde tutabilmek için kurulan sistemde bileşenlerin amaca uygun seçilmiş olması ve kontrol yöntemi büyük önem taşımaktadır.

Kullanılan Basys3 FPGA geliştirme kartı, uygulama yapmak için yeterli mantık hücresine sahiptir. FPGA hem kontrol algoritmasının yüksek başarımlı çalışmasını hem de yüksek frekansta paralel işlem yapabilmesini sağladığı için sistem için uygun bir tercih olmaktadır. Kullanılan mikrodenetleyici, STMicroelectronics firmasına ait STM32F103'tür ve karşılaştırma yapabilmek için yeterli bir geliştirme kartıdır.

Fırçasız DA motorunun kontrolü için farklı yöntemler bulunmaktadır. Çalışmalarda kullanılan mikrodenetleyiciler Arduino, STM32 ve FPGA çipleri de farklılık göstermektedir. Yine aynı şekilde kullanılan enkoderin türü, çözünürlüğü, haberleşme protokolü; kullanılan motor sürücü devresindeki MOSFETlerin anahtarlama sürelerindeki farklılıklar çalışmaları birbirinden ayırmaktadır. Çalışmalar incelendiğinde amaçlarının genel olarak hız kontrolü üzerine olduğu gözlenmiştir, hız kontrolünde pozisyon kontrolüne göre nispeten daha az detaya ihtiyaç duyulmaktadır; bir hall sensör ile rotorun mevcut pozisyonunun elde edilmesi ve PWM'in düzgün bir şekilde uygulanması ile hedeflenen hıza ulaşmasını sağlamışlardır.

Si Young Yun, Ho Joon Lee, Jung Ho Han ve Ju Lee çalışmalarında pozisyon kontrolü üzerine çalışmışlar ve hedef ile mevcut pozisyon arasındaki açı değerlerini paylaşmışlardır. Arduino ile uygulama yaptıkları için hedef pozisyon ile mevcut pozisyon arasında bir, iki derecelik farklar gözlenmektedir. Bu onların çalışmış olduğu sistem için uygun olsa da pan-tilt kameralı bir sistem için bir derece oldukça büyük bir kaymaya sebep olmaktadır.

FPGA tabanlı sistemin MCU tabanlı sisteme göre ne derecede farklı olduğunu görmek için FPGA ve MCU arasında hedefe gitme süreleri ve hedef pozisyona olan mesafeleri arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki tablolarda paylaşılmıştır.

Tablo 5.1: Hedef ve Mevcut Pozisyon Değerleri

	FPGA	MCU
0°	0	0
45°	45.57	46.1
90°	89.42	88.7
135°	135.42	136.5
180°	180.72	181.9
225°	224.49	226.1
270°	270.51	271.4
315°	314.62	313.9
360°	359.6	1.2

Tablo 5.1'de görüldüğü üzere FPGA tabanlı tasarımda hedef pozisyon değerine oldukça yakın bir şekilde ulaşmaktadır. FPGA ve MCU arasında bir kıyaslama yapıldığında MCU'nun hedefe yakın olsa da FPGA kadar hassas olmadığı söylenebilmektedir. Ayrıca FPGA tabanlı sistemin paralel işlem yapabilme yeteneği sayesinde oldukça hızlı bir şekilde hedefe ulaştığı görülmüştür. Bu karşılaştırmalar sonucunda FPGA tabanlı bir sistemin özellikle yüksek hassasiyet gerektiren projelerde üstün olduğu sonucuna varılmıştır.

Kullanılan enkoder ise diğer çalışmalarda hall sensörden elde edilen pozisyon datasından oldukça yüksek çözünürlüğe sahip olduğundan motorun pozisyonunu yüksek hassasiyetle görebilmekteyiz. Enkoderlardan daha iyi bir yöntem olan açı algılayıcılar da kullanılabilirdi, böylece daha doğru ve daha hızlı bir geri besleme alınarak sistemin hızı da arttırılabilirdi. Ancak açı algılayıcılar maliyet olarak yüksektir, bu sebeple fiyat/performans olarak kullanılan enkoder ideal bir tercihtir.

Motorun üzerinde bulunan hall sensörler ise diğer tasarımlara göre büyük bir avantaj sağlamaktadır çünkü hall sensörün yerleştirilmesinde en ufak bir kayma dahi rotor pozisyonunun yanlış algılanmasına sebep olabilmektedir, ancak kullanılan motorun üzerinde sabitlenmiş halde bulunduğu için bu sorun ortadan kaldırılmıştır.

Kontrolör olarak PID kontrolör yöntemi kullanılmıştır, ancak çalışmalar incelendiğinde PID kontrolör kullanıldığı kadar PI kontrolörün de fırçasız DA motorunun kontrolünde yoğun bir şekilde kullanılmış olduğu görülmektedir. Tez çalışmasında PI ve PID kontrolör yapısı test

edilerek, sonuçlar karşılaştırılabilirdi. Ancak PID kontrolörün çalışılan sistem üzerinde oldukça iyi sonuç verdiği ve hassas kontrolün sağlanmasında en büyük etkenlerden biri olduğu da aşikardır.

Diğer çalışmalardan farklı olarak FPGA tabanlı bir sistemde altı adım metodu trapezoidal kontrol yöntemi ile hem hall sensör hem de mutlak enkoder pozisyon geri beslemesi kullanılarak pantilt sisteme sahip kameralar için bir kontrol mekanizması kurularak tasarım ve uygulaması yapılmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında FPGA tabanlı enkoder destekli yüksek hassasiyetli fırçasız DA motoru kontrolü üzerine çalışılmıştır. Çalışma için kullanılan sensör, motor, motor sürücü kartı detaylı bir şekilde incelenerek tasarım için gerekli parametreler belirlenmiş ve bir taslak oluşturulmuştur. Basys3 FPGA geliştirme kartı kullanılarak VHDL dili ile gerekli tasarımlar yapılmıştır. Tasarımda fırçasız doğru akım motoruna hedef pozisyon bilgisi tasarlanan ara yüz aracılığı ile UART haberleşme protokolü üzerinden sağlanmaktadır. Aynı zamanda SPI haberleşme protokolü ile enkoderdan mevcut pozisyon bilgisine ulaşılmaktadır ve tasarlanan PID kontrolör ile hedefe oldukça yaklaşarak hata minimuma indirilmekte ve PWM sinyali üretilmesi ile hedef pozisyona ulaşılmaktadır.

Fırçasız doğru akım motoru yüksek verimli olmaları, sessiz çalışmaları sebebiyle pek çok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır, pantilt ile birlikte kullanılan kameralı sistemlerde yüksek hassasiyetli bir yapıda olması da tercih sebebi olmuştur.

Tercih edilen enkoder yüksek çözünürlüğe sahip olduğundan motorun pozisyonunu yüksek doğrulukla elde edilmektedir. Mutlak enkoderların en büyük avantajı referans noktaya ihtiyaç duymamaları ve güç kesilse dahi pozisyonu tutmasıdır.

Programlanabilir mantık cihazlarından biri olan FPGA de sağladığı pek çok avantaj sebebi ile özellikle savunma sanayide yaygın olarak kullanılmaktadır. Paralel işlem yapabilme yeteneği ile tez çalışmasında hedeflenen hızlı ve yüksek hassasiyetli kontrolün sağlanması konusunda büyük bir öneme sahiptir.

PID kontrolör ile pozisyonun minimum hata ile hedefe ulaşması hedeflenmiştir. PID kontrolör parametreleri deneysel olarak bulunmuş ve sistem bunun üzerine kurulmuştur. Ancak PID parametrelerini, MATLAB üzerinde modelleme yaparak bulmak kesinlikle deneme yanılma yöntemi ile bulmaktan çok daha iyi ve kesin bir sonuç verecektir, bu sebeple ilerde yapılacak olan çalışmalar için fırçasız DA motorunun modellenmesi ve PID parametrelerinin bu şekilde belirlenmesi önem taşımaktadır.

Tasarımın uygulanmasında altı adım kontrol yöntemi ile treapezoidal sinyaller kullanılmıştır, bu yöntem FOC yöntemine göre daha basit bir yöntemdir ve uygulanması daha

hızlı olmaktadır, ayrıca en düşük anahtarlama kaybına sahip kontrol metodudur ve maksimum tork sağlamak için uygundur. FOC yöntemiyle ise motor daha verimli, düşük gürültülü, yüksek hızda kontrol edilebilmektedir. Yine de trapezoidal kontrol yönteminin sistem için yeterince iyi bir tercih olduğu söylenebilmektedir, çünkü tasarımda önemli olan uygulanabilirlik ve anahtarlama kaybının düşük olması gibi temel etkenlerdir.

Çalışmada elde edilen kontrol hassasiyetinin arttırılabilmesi için daha ileri seviye üretim teknolojisi barındıran bir FPGA seçimi ve pipelining tasarım metodolojileri kullanılabilir. Mevcut kullanılan Xilinx firmasının Basys3 geliştirme kartı üzerinde Artix 7 isimli bir FPGA ailesinden çip barındırmaktadır. Artix 7 FPGA ailesi 28nm üretim teknolojisinde basılmış olup fiyat/performans rekabeti yapılabilmesi için önerilen bir FPGA'dir. Ancak daha ileri seviye üretim teknolojisi olan Xilinx UltraScale ve Ultrascale+ aileleri 16nm'de üretilmişlerdir. Dolayısıyla hem daha düşük güç tüketimi hem de daha yüksek frekanslarda tasarımlar çalışabilmektedir.

İlerleyen çalışmalarda Ultrascale+ ailesinden bir FPGA'in kullanılması daha yüksek frekanslarda çalışabilmeyi mümkün kılıp, motora giden saniyedeki kontrol sinyallerinin sayısının arttırılabilmesini sağlayacaktır. Dolayısıyla daha yüksek hassasiyetli kontrol yapılabilecektir. Diğer taraftan FPGA tabanlı tasarımlarda pipelining tekniği ile tasarımın frekansı arttırılabilmektedir. Ancak bu noktada bir ödünleşme bulunmaktadır. Pipelining tekniği ile frekans arttırırken gecikmede artmaktadır. Motor kontrol hassasiyetinin artması için frekansın, gecikmeye oranla daha az artacak şekilde bir tasarım yapılması gerekmektedir. Aksi taktirde tasarımın frekansı artsa dahi kontrol hassasiyeti kötüleşebilecektir.

KAYNAKLAR

[1] Ezzaldean, M. M.,2018, Vol. 36, Design of Speed-Controller for Brushless DC-Motor Based on Grey Predictor-PID Controller, Department of Electrical Engineering, University of Technology, Baghdad, Iraq.

[2] Ulu, B., 2011, Fırçasız Doğru Akım Motor (BLDC) Hız Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.

[3] Yedamale, P., 2003. Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, Microchip Technology Inc. App. Note, USA.

[4] Atan, Ö., 2007, Fırçasız DC Motorun Modellenmesi ve PWM ile kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van.

[5] Aydoğdu, Ö., 2006, Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Genetik Tabanlı Bulanık Denetleyici ile Sensörsüz Kontrolü, Konya.

[6] Aktaş, M., Ders Notu, Fırçasız Doğru Akım Motoru, On dokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun.

[7] Gödekoğlu, H., 2007, Fırçasız Doğru Akım Motoru Konum Kontrolörü Tasarımı, İTÜ, İstanbul.

[8] Yıldız, T., 2009, Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Modellenmesi ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.

[9] Hendershot, J.R., Miller, T., 1994, Design of Brushless Permanent Magnet Motors, Magna Physics Publishing and Clarendon Press , Oxford.

[10] Miller, T., 1989, Brushless PM and Reluctance Motor Drives, Clarendon Press, Oxford.

[11] Demirbaş, Ş., 1995, Fırçasız DA Motorlarının Simülasyonu ve Analizi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

[12] Orman, K., 2008, Daimî Mıknatıslı Senkron Motorlar için Akım Gözetleyici ve Hız Kestirimi, Erzurum.

[13] Yılmaz, M., 2005, Fırçasız DA Motorun Algılayıcısız Kontrolünde Dalgacık Tekniğinin Uygulanması, İTÜ, İstanbul.

[14]http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~tcs3/tcs3/0306_conceptual_design/Docs/05_Encoders/encoder_primer.pdf, Ziyaret Tarihi: 16.12.2021

[15] Bayraktar, H.C., 2015, Yabancı Uyartımlı ile Fırçasız DC Motorların Hız ve Karakteristiklerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

[16] Watanabe, H., Katsushima, H., Fujii, T., 1991, An Improved Measuring System of Rotor Position Angles of the Sensorless Direct Drive Servo Motor, Osaka City University, Japonya.

[17] Karaca, H., 2004, PIC Mikro denetleyici Kullanılarak Fırçasız DC Motorun Sensörsüz Kontrolü, Konya.

[18] Hasanusta, K., 2016, Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Optimal Hall Sensör Konumunun Motor Parametrelerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

[19] Bektaş Y., Serteller N.F.O., 2011, Fırçasız Doğru Akım Motoru (FSDAM) ve Sürücü Devresi Eğitim Seti Analizi Geliştirilmesi ve Motorun Bilgisayar Ortamında İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

[20] Ohm, D.Y.; Park, J.H., 1999, About Commutation and Current Control Methods For Brushless Motors, 29th annual IMCSD symposium, San Jose.

[21] Armstrong, L., 2005, Current Control Removes Brushless DA Motor Commutation Spikes, Zetex Semiconductors plc.

[22] Ellis, G., 1996, Advances in Brushless DA Motor Technology Control and Manufacture, Kollmorgen Corporation, published PCIM-Europe.

[23] Field Oriented Control, 2007, Copley Control Corp.

[24] Lee, S. L., Keohane, T., G., 2009, A Comparison Study Of The Commutation Methods For The Three-Phase Permanent Magnet Brushless DC Motor, Electrical Manufacturing Technical Conference.

[25] Liuping, W., 2020, Basics of PID Control.

[26] Maxfield, C., 2004, The Design Warrior’s Guide to FPGAs, ISBN: 0-7506-7604-3

[27] Ian Grout, Digital Systems Design with FPGAs and CPLDS, 2008

[28] Sarıtaş, E. ve Karataş, S., 2015, Her Yönüyle FPGA ve VHDL, Palme Yayıncılık, Ankara,978-605-355-129-4

[29] Floyd, T.L., 2015, Digital Fundamentals,11th edition, ISBN 978-0-13-273796-8

[30] Clive Max Maxfield, Bebop to the Boolean Boogie (Third Edition) An Unconventional Guide to Electronics, 2009, ISBN 978-1-85617-507-4

[31] Digilent, 2019, Basys 3 FPGA Board Reference Manual.

[32] Tze-Yee Ho, Cong-Khoi Huynh, Tsung-Hsien Lin, Shih-Wei Yang, 2020, The Design and Implementation of a Sensorless Power Tool Based on a Microcontroller, Tayvan.

[33] Babu, J. & Radhika, R., 2018, FPGA based implementation of brushless DC motor drive using single current sensor and comparison with conventional method. IEEE Int. Conf. Power, Control. Signals Instrum. Eng. ICPCSI 2017 703–709

[34] https://www.electrical4u.com/brushless-dc-motors, Ziyaret Tarihi: 05.05.2022

[35] Von Steven Keeping, An Introduction to Brushless DC Motor Control https://www.digikey.de/de/articles/an-introduction-to-brushless-dc-motor-control, Ziyaret Tarihi: 28.04.2022

[36] https://www.digikey.com/en/articles/how-to-power-and-control-brushless-dc-motors, Ziyaret Tarihi: 28.04.2022

[37] https://www.rls.si/eng/aksim-2-off-axis-rotary-absolute-encoder, Ziyaret Tarihi: 05.05.2022

[38] https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/Eval_Documents/TMC-UPS2A24V-A-EVAL_Hw1.00_Rev1.00.pdf , Ziyaret Tarihi: 05.05.2022

[39]https://digilent.com/reference/programmable-logic/basys-3/start,Ziyaret Tarihi:05.05.2022

[40]https://www.thingap.com/wp-content/uploads/2021/11/TG-304X-Datasheet-Rev-H.pdf, Ziyaret Tarihi: 05.05.2022

[41] Maung, M.M., Latt, M. M., Nwe, C. M., 2018, DC Motor Angular Position Control using PID Controller with Friction Compensation, International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 8, Issue 11, November 2018 149 ISSN 2250-3153, Myanmar Birliği Cumhuriyeti.

[42] Sarwar, I., 2021, Modelling and Motion Control of BLDC motor for Pan tilt Platform, Air University, Islamabad, Pakistan.

[43] Brushless-DC Motor Driver Considerations and Selection Guide ,2020, Texas Instruments

[44] Kösesoy, Y., 2019, FPGA Tabanlı Bir Fırçasız DA Motor Denetleyicisinin Tasarımı ve Gerçeklemesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

[45] Yun, S. Y., Lee, H. J., Han, J. H., Lee J., 2012, Position Control of Low Cost Brushless DC Motor Using Hall Sensor, Hanyang Üniversitesi, Seul, Kore.

[46] https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f103rb.html, Ziyaret tarihi 16.05.2022

[47] https://www.intechopen.com/chapters/62199, Ziyaret tarihi 01.06.2022

[48] FPGA Architecture, 2006, Altera.

[49] Yan, G., 2009 Fırçasız Doğru Akım Motor Analizi ve Sürücü Devre Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.

EKLER

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

☐ **Etik Kurul izni gerekmektedir.**

☒ **Etik Kurul izni gerekmemektedir.**

Melisa AYDOĞAN

KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

☐ **Kurum izni gerekmektedir.**

☒ **Kurum izni gerekmemektedir.**

Melisa AYDOĞAN