



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**FİRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU
SÜRÜCÜSÜNÜN SİMÜLASYONU,
TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

BİLAL İMREN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Yaşar BİRBİR

İSTANBUL, 2022



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**FİRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU
SÜRÜCÜSÜNÜN SİMÜLASYONU,
TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

BİLAL İMREN

523117047

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Yaşar BİRBİR

İSTANBUL, 2022

ÖNSÖZ

Bu çalışmada bana farklı fikirler sunarak çalışmamı daha zengin kılmama vesile olan sayın danışman hocam Prof. Dr. Yaşar BİRİR' e, pratik tecrübelerini sonuna kadar benimle paylaşan Arş. Gör. Kenan TOKER' e ve Öğr. Gör. Fatih Serdar SAYIN' a ve her daim bana destek olan iş arkadaşım Müh. Esad ALIŞIK' a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Son olarak her daim bana sabır gösteren aileme tüm içtenliğimle teşekkürlerimi sunarım

Bilal İMREN
İSTANBUL, 2022



İÇİNDEKİLER

| | |
|--|------|
| ÖNSÖZ..... | i |
| İÇİNDEKİLER..... | ii |
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT | v |
| SEMBOLLER | vi |
| KISALTMALAR | vii |
| ŞEKİL LİSTESİ | viii |
| TABLO LİSTESİ | xi |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. MATERYAL VE YÖNTEM | 2 |
| 2.1. Fırçasız Doğru Akım Motorunun İç Yapısı..... | 2 |
| 2.2. Fırçasız Doğru Akım Motorunun Eşdeğer Devresi | 3 |
| 2.3. Fırçasız Doğru Akım Motoru Sürücüleri..... | 4 |
| 2.3.1. Anahtarlama Elemanları | 5 |
| 2.3.2. Komütasyon Yöntemleri | 8 |
| 2.3.3. Kontrol Yöntemleri | 12 |
| 2.4. Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Kullanılan Sensörler | 15 |
| 2.4.1. Hall Sensör | 15 |
| 2.4.2. Enkoder (Kodlayıcı) | 16 |
| 2.4.3. Resolver (Çözücü) | 18 |
| 2.5. Sistem Modelleme Çalışmaları | 19 |
| 2.5.1. Komütasyon Bloğu..... | 19 |
| 2.5.2. Fırçasız Doğru Akım Motoru Modeli..... | 20 |
| 2.5.3. Hall Sensör Modeli..... | 22 |
| 2.5.4. Kosinüs Bileşenlerinin Hesaplaması | 22 |
| 2.6. Döngüde Donanım Test Sistemi Çalışmaları..... | 24 |
| 2.7. Elektronik Devre Tasarımı Çalışmaları | 27 |
| 2.7.1. Güç Katı Tasarımı | 29 |
| 2.7.2. Kontrol Katı Tasarımı..... | 32 |
| 2.7.3. Arayüz Katı Tasarımı | 33 |
| 2.8. Yazılım Geliştirme Çalışmaları | 36 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2.8.1. | Kullanıcı Arayüzü Modülünün Geliştirilmesi | 37 |
| 2.8.2. | Giriş Çıkış Modülünün Geliştirilmesi | 37 |
| 2.8.3. | Geri Besleme Modülünün Geliştirilmesi | 37 |
| 2.8.4. | PWM Modülünün Geliştirilmesi | 38 |
| 2.8.5. | Kontrol Modülünün Geliştirilmesi | 39 |
| 3. | TESTLER | 40 |
| 3.1. | Sistem Modelleme Testleri | 40 |
| 3.2. | Döngüde Donanım Testleri | 43 |
| 3.3. | Sürücü Testleri | 45 |
| 3.4. | Test Sonuçlarının Karşılaştırılması | 48 |
| 4. | SONUÇ | 49 |
| | KAYNAKLAR | 50 |
| | EKLER | 53 |
| | Ek 1 Osiloskop Kalibrasyon Sertifikası | 53 |
| | Ek 2 Multimetre Kalibrasyon Sertifikası | 57 |
| | ÖZGEÇMİŞ | 61 |

ÖZET

FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU SÜRÜCÜSÜNÜN SİMÜLASYONU, TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Fırçasız doğru akım motorları endüstride çeşitli kullanım alanlarına sahiptirler. Bu motorlar ilgili uygulamanın ihtiyaçları doğrultusunda bir motor sürücü aracılığı ile hız veya akım kontrol modunda kullanılabilir. Bu tezde yapılan çalışmalar aşağıdaki gibidir.

- **Sistem Modelleme**

Bir fırçasız doğru akım motoru 3 faz eşdeğer transfer fonksiyonu kullanılarak MATLAB&Simulink R2017b ortamında modellenmiştir. Geliştirilen model üzerinde değişken yük altına hız ve akım kontrol başarımı analiz edilmiştir.

- **Döngüde Donanım Sistemi (Hardware In The Loop)**

Geliştirilen fırçasız doğru akım motoru modeli HDL Coder aracı kullanılarak VHDL koduna dönüştürülmüştür. Üretilen VHDL kodu NI LabVIEW 2021 ortamında NI myRIO 1900 RT FPGA cihazına gömülerek döngüde donanım uygulaması yapılmıştır.

- **Elektronik Devre Tasarımı**

Geliştirilen sürücünün devresi kontrol katı, güç katı ve arayüz katı olmak üzere 3 modül olarak Altium ortamında tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Kontrol katı mikrodenetleyici birimini içermektedir. Güç katı 3 fazlı tam köprü topolojisinde evirici devresini, güç girişlerini ve güç çıkışlarını içermektedir. Evirici devresinde anahtarlama elemanı olarak IGBT modül kullanılmıştır. Arayüz katı arayüz ekranı, sinyal girişleri ve sinyal çıkışlarını içermektedir.

- **Yazılım Geliştirme**

Sürücü yazılımı C programlama dili ile ARM tabanlı bir mikrodenetleyici üzerinde çalışacak şekilde geliştirilmiştir. Komütasyon yöntemi olarak trapezoidal komütasyon kullanılmıştır. Geliştirilen sürücünün hız ve akım kontrol başarımı test edilmiştir.

ABSTRACT

BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR DRIVER SIMULATION, DESIGN AND IMPLEMENTATION

Brushless direct current motors have various uses in industry. These motors can be used in speed or current control mode by means of a motor driver in line with the needs of the relevant application. The studies in this thesis are as follows.

- **System Modeling**

A brushless direct current motor is modeled in MATLAB&Simulink using a 3-phase equivalent transfer function. The speed and current control performance under variable load is analyzed on the implemented model.

- **Hardware In The Loop System**

The implemented brushless DC motor model was converted to VHDL code using HDL Coder tool. The generated VHDL code was embedded in the NI myRIO RT FPGA device in the NI LabVIEW environment, and hardware implementation was performed in the loop.

- **Electronic Circuit Design**

The circuit of the implemented driver has been designed and implemented in Altium environment as 3 modules as control stage, power stage and interface stage. The control unit contains the microcontroller unit. The power stage contains the inverter circuit, power inputs and power outputs in 3-phase full bridge topology. IGBT module is used as the switching element in the inverter circuit. The interface layer contains the interface screen, signal inputs and signal outputs.

- **Software Development**

The driver software has been developed to run on an ARM-based microcontroller with the C programming language. Trapezoidal commutation was used as the commutation method. The speed and current control performance of the implemented driver has been tested.

SEMBOLLER

| | |
|----------------|--|
| A | : Amper |
| C_0 | : Statik Sürtünme Torku |
| C_v | : Dinamik Sürtünme Torku |
| gcm^2 | : gram santimetre kare |
| H | : Henry |
| Hz | : Hertz |
| I_0 | : Boştaki Akımı |
| I_n | : Nominal Akım |
| J | : Rotor Ataleti |
| Kd | : Türev Kontrol Katsayısı |
| Ke | : Zıt Elektromotor Kuvveti (BEMF) Sabiti |
| kHz | : Kilo Hertz |
| Ki | : İntegral Kontrol Katsayısı |
| Kp | : Oransal Kontrol Katsayısı |
| Kt | : Tork Sabiti |
| kW | : Kilo Watt |
| L | : Endüktans |
| L_{f-f} | : 2 Faz Arası Endüktans |
| mNm | : Mili Newton Metre |
| ms | : Mili Saniye |
| N_0 | : Boştaki Hızı |
| η_{\max} | : Maksimum Verim |
| N_n | : Nominal Hız |
| R | : Direnç |
| R_{f-f} | : 2 Faz Arası Direnç |
| RX | : Seri Haberleşme Alıcı Hat |
| s | : Saniye |
| T_n | : Nominal Yük |
| TX | : Seri Haberleşme Gönderici Hat |
| μF | : Mikro Farad |
| μH | : Mikro Henry |
| V | : Volt |
| V_n | : Nominal Gerilim |
| Ω | : Ohm |

KISALTMALAR

| | |
|-------|--|
| AC | : Alternative Current (Alternatif Akım) |
| BEMF | : Back Electromagnetic Force (Zıt Elektromotor Kuvveti) |
| DA | : Doğru Akım |
| DC | : Direct Current (Doğru Akım) |
| FDAM | : Fırçasız Doğru Akım Motoru |
| FPGA | : Field Programmable Gate Array (Alanda Programlanabilir Kapı Dizisi) |
| HDL | : Hardware Description Language (Donanım Tanımlama Dili) |
| HIL | : Hardware In The Loop (Döngüde Donanım) |
| IGBT | : Insulated Gate Bipolar Transistor (Yalıtılmış Kapılı Bipolar Transistör) |
| Maks. | : Maksimum |
| Min. | : Minimum |
| MCU | : Microcontroller(Mikrodenetleyici) |
| NI | : National Instruments |
| PID | : Propotional Integral Derivative (Oransal İntegral Türev) |
| PWM | : Pulse Width Modulation (Darbe Genişliği Modülasyonu) |
| Ref. | : Referans |
| RPM | : Revoluton Per Minute (Dakika Başına Devir Sayısı) |
| SPWM | : Sinusoidal Pulse Width Modulation (Sinüsoidal Darbe Genişliği Modülasyonu) |
| SVPWM | : Space Vector Pulse Width Modulation (Uzay Vektörü Darbe Genişliği Modülasyonu) |
| USB | : Universal Serial Bus |
| VHDL | : Very High Speed Hardware Description Language (Çok Yüksek Hızlı Donanım Tanımlama Dili) |

ŞEKİL LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Şekil 1.1. Fırçasız Doğru Akım Motoru | 1 |
| Şekil 2.1. Fırçasız Doğru Akım Motoru İç Yapısı | 2 |
| Şekil 2.2. Fırçasız Doğru Akım Motoruna Ait Stator ve Rotor..... | 2 |
| Şekil 2.3. Stator Eşdeğer Devresi | 3 |
| Şekil 2.4. Fırçasız Doğru Akım Motoru Sürücüsü Blok Şeması..... | 4 |
| Şekil 2.5. 3 Fazlı Tam Köprü Topoloji Evirici Devresi | 4 |
| Şekil 2.6. Diyot Sembolü..... | 5 |
| Şekil 2.7. Bir Fazlı Doğrultucu Giriş ve Çıkışı | 5 |
| Şekil 2.8. Kontrollü Anahtarlama Elemanlarının Çalışma Aralıkları | 6 |
| Şekil 2.9. IGBT Sembolleri | 6 |
| Şekil 2.10. Tekli IGBT Elemanı..... | 7 |
| Şekil 2.11. IGBT Modül | 7 |
| Şekil 2.12. Şok Bobini..... | 7 |
| Şekil 2.13. Standart Kutuplu Elektrolitik Filtre Kondansatörü | 7 |
| Şekil 2.14. Sırası ile %1 ve %25 Doluluk Oranlı PWM Sinyalleri..... | 8 |
| Şekil 2.15. Sırası ile %50 ve %99 Doluluk Oranlı PWM Sinyalleri..... | 8 |
| Şekil 2.16. Hall Sensör, Faz Gerilimleri ve PWM Sinyalleri..... | 10 |
| Şekil 2.17. Taşıyıcı Sinyali ile Referans Sinyalinin Karşılaştırılması (a) SPWM Anahtarlama Sinyali ve Etkin Değer Karşılığı (b) | 11 |
| Şekil 2.18. PI Kontrol Algoritması Blok Şema | 13 |
| Şekil 2.19. K_p Katsayısının Sisteme Olan Etkisi | 14 |
| Şekil 2.20. K_i Katsayısının Sisteme Olan Etkisi..... | 14 |
| Şekil 2.21. Hall Sensör | 15 |
| Şekil 2.22. Artımsal Enkoderin Çalışması | 16 |
| Şekil 2.23. 4 bit Mutlak Enkoder Disk Yapısı..... | 17 |
| Şekil 2.24. Resolver Sargı Yapısı..... | 18 |
| Şekil 2.25. Resolver Uyartım, Sinüs ve Kosinüs Sinyalleri | 18 |
| Şekil 2.26. Sistem Modeli Şeması..... | 19 |
| Şekil 2.27. Trapezoidal Komütasyon Blok Şeması | 19 |
| Şekil 2.28. Fırçasız Doğru Akım Motoru Transfer Fonksiyonu Blok Şeması | 20 |
| Şekil 2.29. Stator 3 Faz Elektriksel Transfer Fonksiyonu Blok Şeması | 20 |

| | |
|--|----|
| Şekil 2.30. Mil Torku Elde Edilmesi..... | 21 |
| Şekil 2.31. Rotor Transfer Fonksiyonu Blok Şeması..... | 21 |
| Şekil 2.32. Hall Sensör Modeli..... | 22 |
| Şekil 2.33. Kosinüs Bileşenlerinin Hesaplanması..... | 23 |
| Şekil 2.34. Esas Açının Bulunması..... | 24 |
| Şekil 2.35. Döngüde Donanım Test Sistemi Blok Şeması..... | 24 |
| Şekil 2.36. Döngüde Donanım Sistemi Bilgisayar Arayüzü..... | 25 |
| Şekil 2.37. Üretilen VHDL Kod Dosyaları..... | 26 |
| Şekil 2.38. NI LabVIEW Ortamında Geliştirilen FPGA Entegrasyon Şeması..... | 26 |
| Şekil 2.39. Döngüde Donanım Test Sisteminin Görseli..... | 27 |
| Şekil 2.40. Gerçekleştirilen Sürücünün Genel Görünümü..... | 27 |
| Şekil 2.41. Tam Köprü Doğrultucu Devre Şeması..... | 29 |
| Şekil 2.42. Evirici Modülü Devre Şeması..... | 29 |
| Şekil 2.43. Doğru Akım Düşürücü Güç Kaynağı Devre Şeması..... | 30 |
| Şekil 2.44. Akım Ölçümü Devre Şeması..... | 30 |
| Şekil 2.45. Giriş Koruma Devresi Şeması..... | 31 |
| Şekil 2.46. Güç Katı PCB Tasarımı..... | 31 |
| Şekil 2.47. Kontrol Katı Devre Şeması..... | 32 |
| Şekil 2.48. Kontrol Katı PCB Tasarımı..... | 32 |
| Şekil 2.49. Analog Giriş/Çıkış Devre Şeması..... | 33 |
| Şekil 2.50. Dijital Giriş/Çıkış Devre Şeması..... | 33 |
| Şekil 2.51. Hall Sensör Devre Şeması..... | 34 |
| Şekil 2.52. RS485 Arayüzü Devre Şeması..... | 34 |
| Şekil 2.53. Kullanıcı Arayüzü Devresi..... | 35 |
| Şekil 2.54. Arayüz Katı PCB Tasarımı..... | 35 |
| Şekil 2.55. Hız ve Pozisyon Ölçümü Kaynak Kod Parçası..... | 38 |
| Şekil 2.56. Trapezoidal Komütasyon Anahtarlama Tablosu..... | 38 |
| Şekil 2.57. PID Kontrol Algoritması Kaynak Kod Parçası..... | 39 |
| Şekil 2.58. Anti Windup Algoritması Kaynak Kod Parçası..... | 39 |
| Şekil 3.1. Rotor Hızı Grafiği (Yüksüz)..... | 41 |
| Şekil 3.2. Rotor Hızı Grafiği (Yüklü)..... | 41 |
| Şekil 3.3. A Fazı Akımı Grafiği (Yüksüz)..... | 42 |

| | |
|---|----|
| Şekil 3.4. A Fazı Akımı Grafiği (Yüklü)..... | 42 |
| Şekil 3.5. Rotor Hızı Hız Grafiği (Yüksüz)..... | 43 |
| Şekil 3.6. Rotor Hızı Hız Grafiği (Yüklü)..... | 43 |
| Şekil 3.7. A Fazı Akımı Grafiği (Yüksüz) | 44 |
| Şekil 3.8. A Fazı Akımı Grafiği (Yüklü)..... | 44 |
| Şekil 3.9. FAULHABER 3274-BP4 FDAM | 45 |
| Şekil 3.10. Rotor Hız Grafiği (Yüksüz)..... | 46 |
| Şekil 3.11. Rotor Hız Grafiği (Yüklü)..... | 46 |
| Şekil 3.12. A Faz Akımı Grafiği (Yüksüz)..... | 47 |
| Şekil 3.13. A Faz Akımı Grafiği (Yüklü)..... | 47 |



TABLO LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Tablo 2.1. Trapezoidal PWM Anahtarlama Tablosu..... | 9 |
| Tablo 2.2. Kontrol Katsayılarının Çıkışa Etkisi | 13 |
| Tablo 2.3. Hall Sensör Değer Tablosu | 16 |
| Tablo 2.4. Stator Transfer Fonksiyonunda Bulunan Semboller | 20 |
| Tablo 2.5. Rotor Transfer Fonksiyonunda Bulunan Semboller..... | 21 |
| Tablo 2.6. Sürücünün Özellikleri | 28 |
| Tablo 2.7. STM32F303 Pin Konfigürasyonu | 36 |
| Tablo 2.8. Sürücü Parametreleri | 37 |
| Tablo 3.1. FAULHABER 3274-BP4 Parametre Değerleri | 40 |
| Tablo 3.2. Sistem Modelleme Test Parametreleri | 40 |
| Tablo 3.3. Sistem Modelleme Test Sonuçları..... | 42 |
| Tablo 3.4. Döngüde Donanım Test Parametreleri..... | 43 |
| Tablo 3.5. Döngüde Donanım Test Sonuçları | 44 |
| Tablo 3.6. Test Altyapısı | 45 |
| Tablo 3.7. Sürücü Test Parametreleri | 45 |
| Tablo 3.8. Sürücü Test Sonuçları | 47 |
| Tablo 3.9. Test Sonuçlarının Karşılaştırılması | 48 |

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin ve endüstrinin gelişmesine bağlı olarak fırçasız doğru akım motorları ön plana çıkmaktadırlar. Geleneksel fırçalı doğru akım motorları bakım masrafları, fırça ve kolektörde meydana gelen kayıplar ve düşük verimli olması gibi sebeplerden dolayı fırçasız doğru akım motorlarının kullanımı artmaya başlamıştır.

Fırçasız doğru akım motorların avantajları aşağıdaki gibidir.

- Sabit tork ile hız kontrolü
- Yüksek verimlilik
- Fırça kolektör mekanizmasının olmaması
- Boyutlarına göre daha yüksek güç yoğunluğu
- Yüksek devirlerde çalışma imkânı
- Sessiz çalışma
- Uzun ömür
- Daha az bakım ihtiyacı

Fırçasız doğru akım motorların dezavantajları aşağıdaki gibidir.

- Sürücü ile kullanım zorunluluğu
- Geri besleme için pozisyon sensörü zorunluluğu (Sensörsüz kontrol yöntemleri bu çalışma kapsamında değildir.)
- Yüksek maliyet

Şekil 1.1’de bir fırçasız doğru akım motoruna ait görsel verilmiştir.



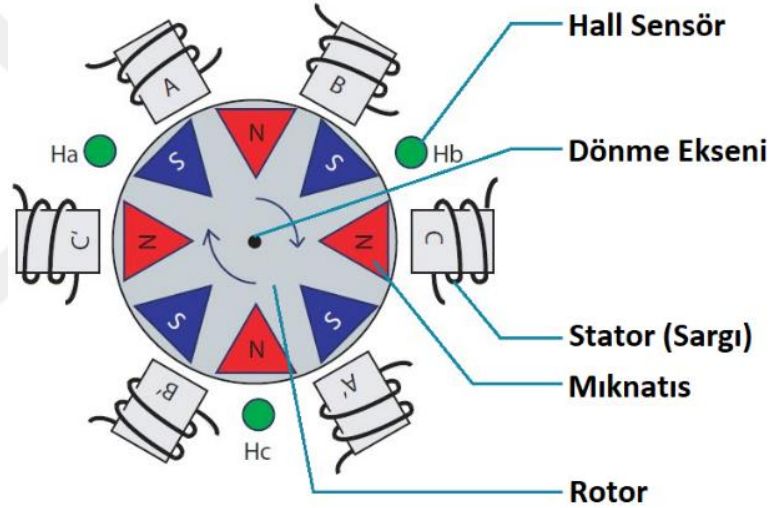
Şekil 1.1. Fırçasız Doğru Akım Motoru

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Fırçasız Doğru Akım Motorunun İç Yapısı

Fırçasız doğru akım motoru stator ve rotor olmak üzere 2 temel parçaya ayrılır. Stator, faz sargılarının bulunduğu sabit kısımdır. Rotor, mıknatıs kutuplarının bulunduğu döner eksen üzerinde hareketli kısımdır. Stator ve rotora ek olarak stator sargıları arasında eşit aralıklarla yerleştirilmiş 3 adet hall sensörü bulunabilmektedir. Bu hall sensörleri aracılığıyla rotorun pozisyonu algılanmakta ve komütasyon sağlanmaktadır.

Hall sensörlerine ek olarak mutlak enkoder, artımsal enkoder veya resolver vb. farklı geri besleme elemanları da mevcuttur. Geri besleme elemanlarına yönelik daha detaylı bilgi başlık 2.4'te verilmiştir. Bu çalışmada geri besleme elemanı olarak hall sensör kullanılmıştır. Bir fırçasız doğru akım motorunun iç yapısı Şekil 2.1'de verilmiştir. [1]



Şekil 2.1. Fırçasız Doğru Akım Motoru İç Yapısı

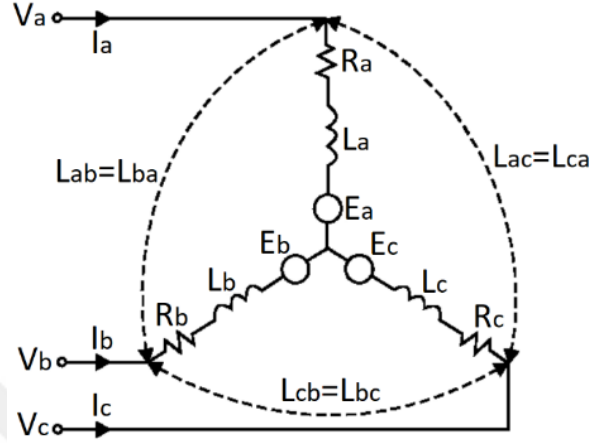
Bir fırçasız doğru akım motoruna ait stator ve rotor görseli Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Fırçasız Doğru Akım Motoruna Ait Stator ve Rotor

2.2. Fırçasız Doğru Akım Motorunun Eşdeğer Devresi

Fırçasız doğru akım motorları özel tasarım motorlar hariç tutulursa 3 fazlı olarak üretilmektedir. Fırçasız doğru akım motorunun stator eşdeğer devresi Şekil 2.3'te verilmiştir. [2]



Şekil 2.3. Stator Eşdeğer Devresi

Stator eşdeğer devresine matematiksel olarak ifade edilmek istenirse Denklem (2.8) ortaya çıkmaktadır. [3][4]

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \cdot \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Denklem (2.2)'de 3 faz akım ile motorun ürettiği elektromanyetik tork arasındaki ilişki ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} T_a \\ T_b \\ T_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \cdot [K_t] \cdot \begin{bmatrix} \cos 0 \\ \cos -2\pi/3 \\ \cos -4\pi/3 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Denklem (2.3)'de rotor milinde oluşan toplam tork ifade edilmektedir.

$$T_e = T_a + T_b + T_c \quad (2.3)$$

Denklem (2.4)'te motorun hızı ile ürettiği zıt elektromotor kuvveti (BEMF) arasındaki ilişki ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = [N] \cdot [K_s] \cdot \begin{bmatrix} \cos 0 \\ \cos -2\pi/3 \\ \cos -4\pi/3 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Denklem (2.5)'te stator sargılarının elektriksel transfer fonksiyonu ifade edilmektedir.

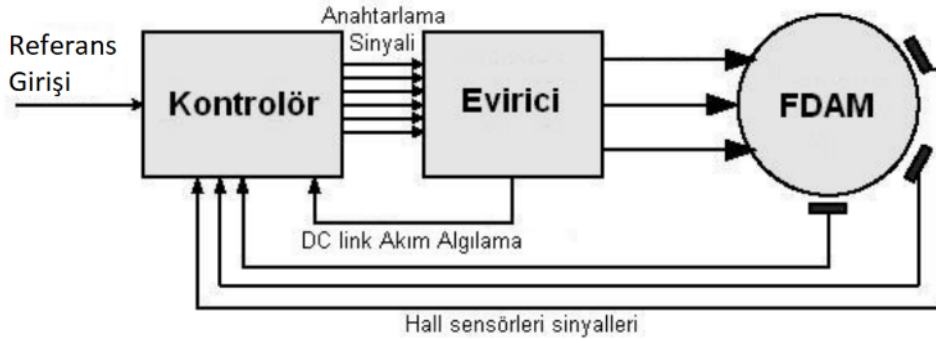
$$\frac{1}{L.s+R} \quad (2.5)$$

Denklem (2.6)'te ise rotorun mekanik transfer fonksiyonu ifade edilmektedir.

$$\frac{1}{J.s+C_v} \quad (2.6)$$

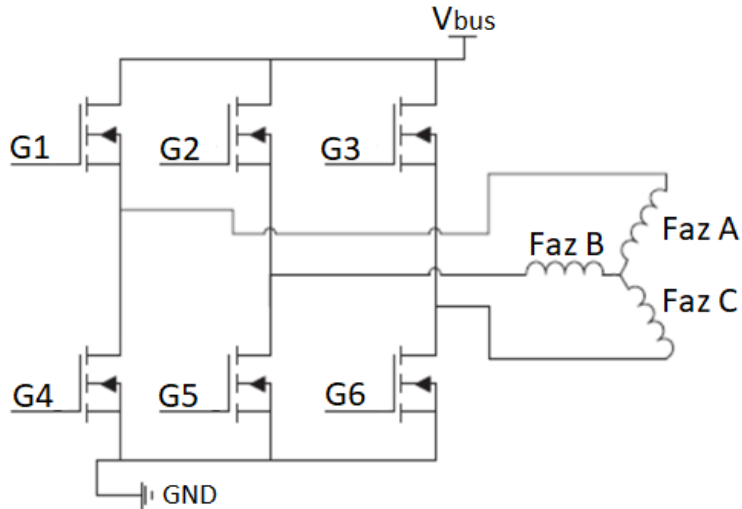
2.3. Fırçasız Doğru Akım Motoru Sürücüleri

Fırçasız doğru akım motoru sürücüleri evirici devresi ve kontrolör devresi olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. Şekil 2.4'te bir fırçasız doğru akım motoru sürücüsünün blok şeması verilmiştir. [5]



Şekil 2.4. Fırçasız Doğru Akım Motoru Sürücüsü Blok Şeması

Evirici devresi 6 yarı iletken anahtarlama elemanından oluşan 3 fazlı tam köprü topolojisinden meydana gelmektedir. Şekil 2.5'te güç devresine ilişkin devre şeması verilmiştir. Burada V_{bus} DA gerilim seviyesini, G1-G6 arası yarı iletken devre elemanlarının anahtarlama sinyali (kapı-gate) girişlerini ifade etmektedir. [6][7]



Şekil 2.5. 3 Fazlı Tam Köprü Topoloji Evirici Devresi

2.3.1. Anahtarlama Elemanları

Frekans değiştiriciler doğrultucu, filtre ve evirici olmak üzere 3 temel kısımdan oluşmaktadır. Şekil 12’de bir frekans değiştiriciye ait temel blok diyagramı verilmiştir. Doğrultucu kısmı kontrollü veya kontrolsüz anahtarlama elemanlarından, filtre kısmı genellikle birkaç kondansatörden, evirici kısmı ise kontrollü anahtarlama elemanlarından oluşmaktadır. Bu projede bir fazlı doğrultucu kısmı dört adet diyot, filtre kısmı elektrolitik kutuplu kondansatör, 3 fazlı evirici kısmı ise 6 adet IGBT ile oluşturulmuştur.

2.3.1.1. Kontrolsüz Anahtarlama Elemanları

Akımı herhangi bir dış kontrol sinyaline bağlı olmaksızın üretim yapısına göre kontrol eden elemanlardır. N ve P olmak üzere iki katmandan oluşur.

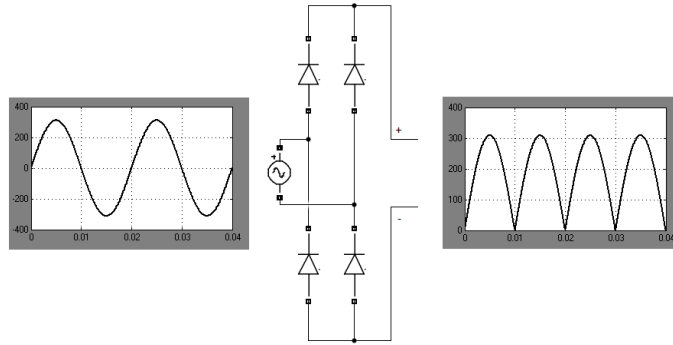
Diyotlar

Akımı tek yönde ileten elemanlardır. Bu projede doğrultucu devresi diyotlar ile oluşturulmuştur.



Şekil 2.6. Diyot Sembolü

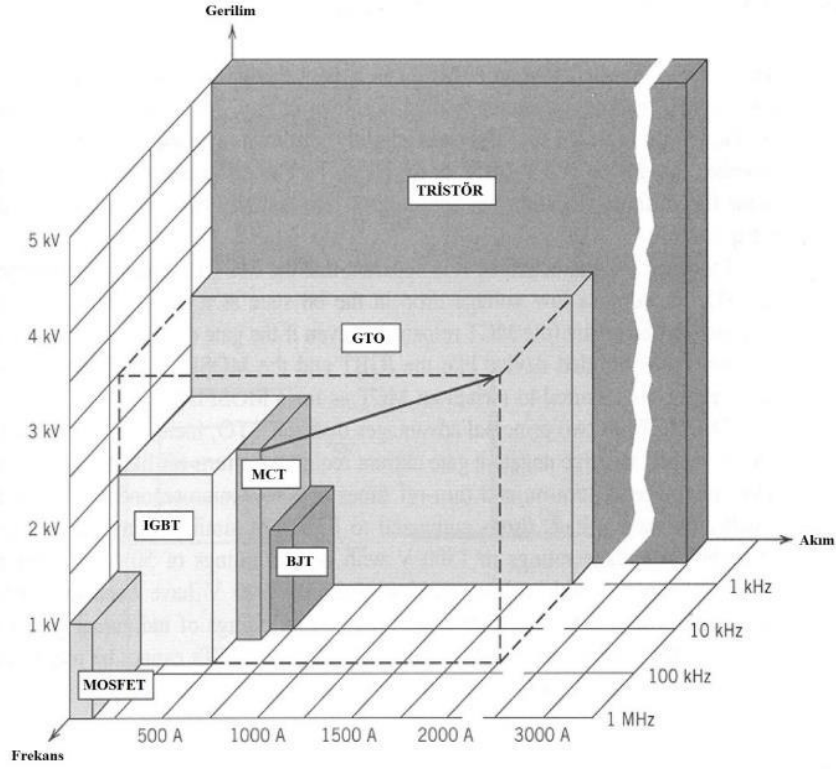
Bir fazlı köprü devrelerinde fazın negatif bölgesi pozitif tarafa taşınmış olur. Bu sayede teknik olarak doğru akım elde edilmektedir.



Şekil 2.7. Bir Fazlı Doğrultucu Giriş ve ıkışı

2.3.1.2. Kontrollü Anahtarlama Elemanları

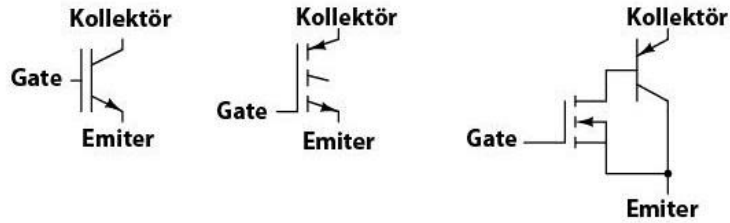
Akımı bir kontrol sinyaline bağlı olarak ileten veya kesen elemanlardır. Gerilim, akım ve frekans parametrelerine göre çalışma aralıkları farklı olan çok sayıda kontrollü anahtarlama elemanları bulunmaktadır. Bunların söz konusu parametrelere göre çalışma aralıkları Şekil 6’da verilmiştir. Bu projede anahtarlama elemanı olarak IGBT kullanılacaktır. [8]



Şekil 2.8. Kontrollü Anahtarlama Elemanlarının Çalışma Aralıkları

İzole Kapılı İki Kutuplu Transistörler (Insulated Gate Bipolar Transistors – IGBT)

Gate ucuna gerilim uygulandığında iletme geçen güç elektroniği elemanıdır. Mosfet gibi yüksek giriş empedansı nedeniyle küçük akımlar ile kapı (gate) girişinden kontrol edilebilmektedir. BJT gibi düşük iletim kaybı nedeniyle yüksek akım taşıyabilmektedir. Mosfet ve BJT'lerin pozitif yönlerini bir arada sunmaktadır. Bu nedenle güç elektroniğinde en çok kullanılan elemanlardan biridir. PNPN şeklinde 4 katmanlıdır.

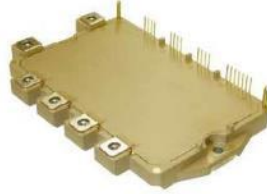


Şekil 2.9. IGBT Sembolleri

Motor sürücülerinde genellikle IGBT'ler kullanılmaktadır. Günümüzde motor sürücülerini için 6 veya 7 adet IGBT elemanını bir arada bulunduran tek paket modüller kullanılmaktadır. Düşük maliyetli ve eski model sürücülerde tekli IGBT elemanları kullanılmaktadır.



Şekil 2.10. Tekli IGBT Elemanı



Şekil 2.11. IGBT Modül

2.3.1.3. Filtre Elemanları

Doğrultucu çıkışında elde edilen doğru akım 0 ile maksimum değer arasında şebeke frekansının iki katı salınıma sahiptir. Böyle bir doğru akım eviricide kullanılamamaktadır. Bu nedenle filtre edilerek salınım aralığının küçültülmesi (başka bir deyişle yumuşatılması) şarttır.

Filtre devrelerinde bobin ve kondansatör olmak üzere iki tür pasif eleman kullanılmaktadır. Bobin akımı, kondansatör ise gerilimi filtre etmektedir.

Bobin

Dışarıdan gelen parazit sinyallerini sönmölemek için kullanılır. Genellikle doğrultucu girişindeki faz ve nötr ortak nüve etrafına sarılır. Bu filtreye şok bobini adı verilmektedir.



Şekil 2.12. Şok Bobini

Kondansatör

Gerilim depolayan devre elemanıdır. Bu projede doğrultucu çıkışından elde edilen doğru akımın salınımını yumuşatmak için kullanılacaktır.



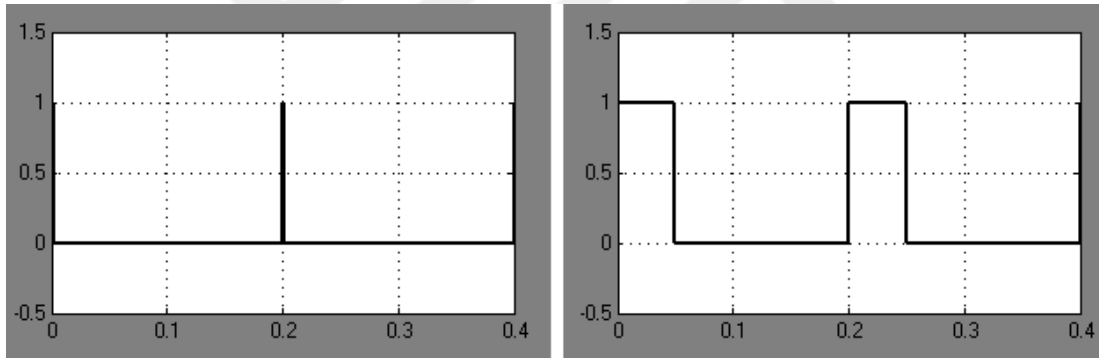
Şekil 2.13. Standart Kutuplu Elektrolitik Filtre Kondansatörü

2.3.2. Komütasyon Yöntemleri

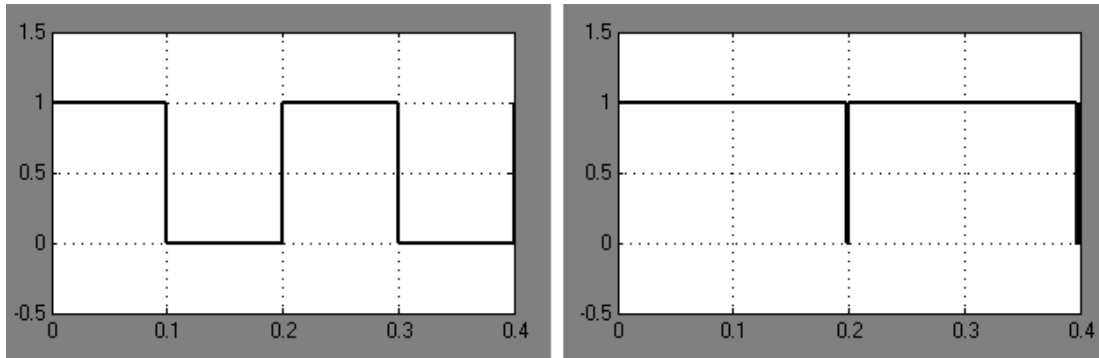
Fırçasız doğru akım motorlarında döner hareketin sağlanabilmesi için, motor fazları belirli bir sıralama ile enerjilendirilmelidir. Bu olaya elektriksel komütasyon adı verilmektedir. Elektriksel komütasyon güç devresinde bulunan yarı iletken anahtarlama elemanlarının darbe genişliği modülasyonu (PWM) yöntemi kullanılarak elde edilen anahtarlama sinyalleri ile anahtarlanmasıyla gerçekleştirilmektedir.

Darbe genişliği modülasyonu, periyodik bir kare dalgada bir yükselen kenardan bir sonraki düşen kenara kadar olan sürenin toplam periyot süresine olan oranının istenilen değerde değiştirilmesidir. Bu değere doluluk oranı (duty cycle) adı verilmektedir. Sinyalin etkin değerini değiştirmektedir. Ortalama değerın karekökü kuramına göre Denklem (2.7) ifade edilebilmektedir.

$$V_{\text{etkin}} = \frac{V_{\text{max}}}{\% \text{ Doluluk Oranı}} \quad (2.7)$$



Şekil 2.14. Sırası ile %1 ve %25 Doluluk Oranlı PWM Sinyalleri



Şekil 2.15. Sırası ile %50 ve %99 Doluluk Oranlı PWM Sinyalleri

Fırçasız doğru akım motoru sürücülerinde kullanılan komütasyon yöntemleri aşağıdaki gibidir.

- Trapezoidal PWM
- Sinüzoidal PWM (SPWM)

Bu çalışmada trapezoidal PWM yöntemi kullanılarak bir fırçasız doğru akım motoru sürücüsü modellenmiş, tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir.

2.3.2.1. Trapezoidal PWM

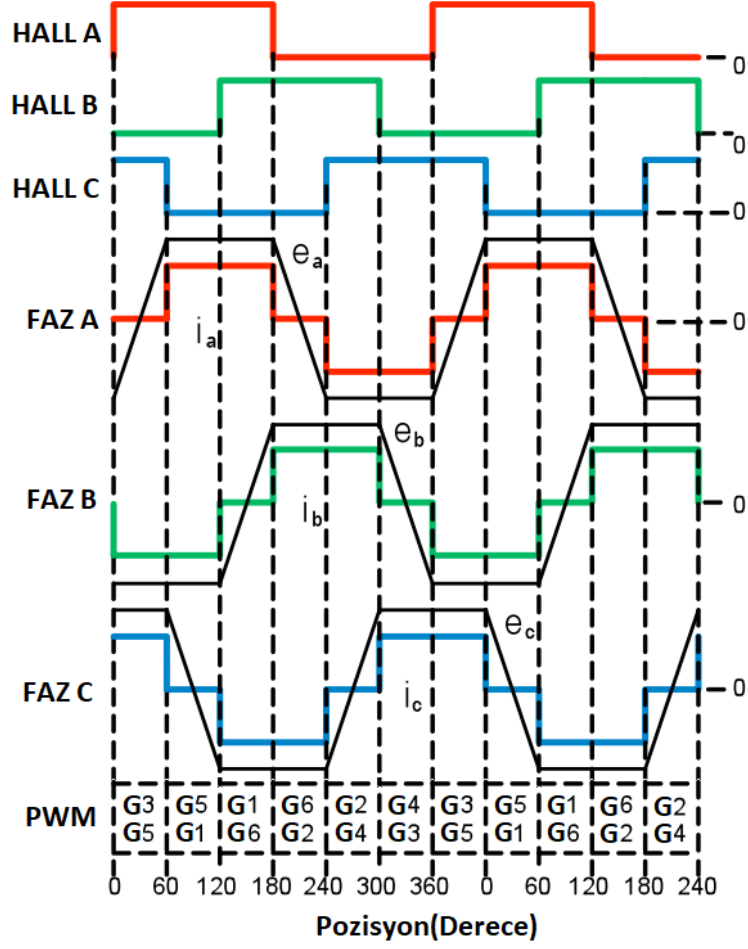
Trapezoidal PWM yönteminde evirici devresinde bulunan yarı iletken devre elemanları bir anahtarlama tablosunda belirtilen sıraya göre anahtarlanamaktadır. Bu anahtarlama sonucunda elde edilen elektriksel komütasyonda aynı anda 2 faz enerji almaktadır. Bu yöntemde, rotor pozisyonu 3 adet hall sensörü ile algılanmaktadır.

Trapezoidal komütasyon yöntemi motor hızını kontrol etmede etkili bir yöntemdir. Gerçekleştirilen elektriksel komütasyonda fazlar arasındaki geçişi sert olduğundan dolayı düşük devir hızlarında tork dalgalanması meydana gelmektedir. Bu tork dalgalanması ses ve titreşim olarak açığa çıkmaktadır. Ancak diğer yöntemlere kıyasla en düşük maliyetli olan yöntemdir. Bu nedenle sıklıkla tercih edilmektedir. Tablo 2.1’de trapezoidal PWM yönteminde kullanılan anahtarlama tablosu verilmiştir. Burada G1-6 arası evirici devresinde bulunan yarı iletken devre elemanlarının kapı(gate) girişlerini, HA-C arası hall sensörleri ve Faz A-C arası faz gerilimlerini ifade etmektedir. [9]

Tablo 2.1. Trapezoidal PWM Anahtarlama Tablosu

| Pozisyon (Derece) | HA | HB | HC | G1 | G2 | G3 | G4 | G5 | G6 | Faz A | Faz B | Faz C |
|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|-------|-------|
| 0 – 60 | 1 | 0 | 1 | | | 1 | | 1 | | 0 | -V | +V |
| 60 – 120 | 1 | 0 | 0 | 1 | | | | 1 | | +V | -V | 0 |
| 120 – 180 | 1 | 1 | 0 | 1 | | | | | 1 | +V | 0 | -V |
| 180 – 240 | 0 | 1 | 0 | | 1 | | | | 1 | 0 | +V | -V |
| 240 – 300 | 0 | 1 | 1 | | 1 | | 1 | | | -V | +V | 0 |
| 300 – 360 | 0 | 0 | 1 | | | 1 | 1 | | | -V | 0 | +V |

Şekil 2.16'da hall sensör sinyalleri, faz gerilimleri ve PWM sinyallerine ilişkin grafik verilmiştir.



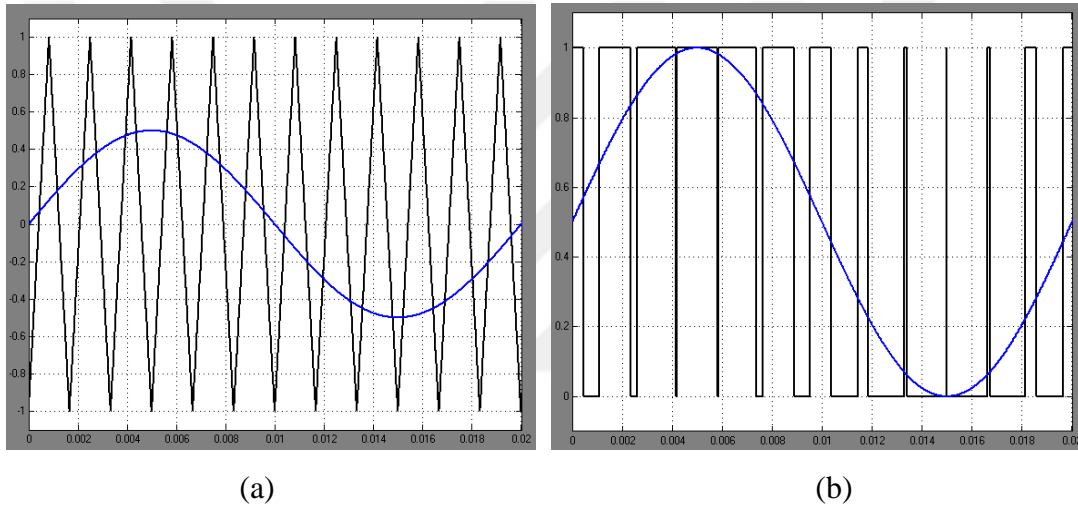
Şekil 2.16. Hall Sensör, Faz Gerilimleri ve PWM Sinyalleri

2.3.2.2. Sinüzoidal PWM

Doluluk oranının %0 ile %100 arasında f_m frekanslı bir sinüs sinyali ile orantılı olacak şekilde değiştirilmesidir. Bu işlem sonunda V_{etkin} değeri f_m frekanslı bir sinüzoidal sinyal gibi değişecektir. Alıcının çektiği akımda sinüzoidal olacaktır. Bundan sonra SPWM olarak anılacaktır.

Analog SPWM

SPWM üretiminde kullanılan klasik yöntemdir. Üçgen şeklinde f_c frekanslı bir taşıyıcı sinyalinin, f_m frekanslı bir sinüs referans sinyali ile karşılaştırılması sonucu üretilmektedir.



Şekil 2.17. Taşıyıcı Sinyali ile Referans Sinyalinin Karşılaştırılması (a)
SPWM Anahtarlama Sinyali ve Etkin Değer Karşılığı (b)

Dijital SPWM

Bu yöntemde SPWM üretimi için mikrodenetleyici kullanılmaktadır. Mikrodenetleyicinin ram belleğinde yaratılan tek boyutlu diziye bir tam periyotluk sinüs örnekleme değerleri kaydedilmektedir. Mikrodenetleyici bu tabloya bakarak her bir elemanın değeri kadar doluluk oranına sahip darbe üretmekte, tablo sonuna geldiğinde başa dönmektedir. Bu işlem sonunda analog SPWM yönteminde taşıyıcı ile referans sinyalinin karşılaştırılması ile elde edilen sinyalin aynısı elde edilmektedir.

2.3.3. Kontrol Yöntemleri

Fırçasız doğru akım motorlarında kullanım amacına göre aşağıdaki büyüklükle kontrol edilmektedir.

- Hız
- Pozisyon
- Akım
- Tork

Belirtilen büyüklükler genellikle PI, PID, fuzzy v.b kapalı çevrim kontrol algoritmaları aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada fırçasız doğru akım motorunun hız ve akım kontrolü PI kontrol algoritması ile gerçekleştirilecektir.

2.3.3.1. PI kontrol

PI kontrol algoritmasında, oransal(P) ve integral(I) kontrol bir arada kullanılmaktadır. Oransal kontrol tek başında kullanıldığında meydana gelen kalıcı durum hatası integral kontrol ile giderilmektedir. Sistemin ilk durumunda veya sisteme yeni bir referans değeri verildiğinde, kontrol çıkışı bir salınım gerçekleştirmekte sonrasında verilen referansa ulaşarak kararlı hale gelmektedir.

PI kontrol denklemleri aşağıdaki gibidir. Burada $e(t)$ sisteme verilen referans değeri ile sistemin mevcut değeri arasındaki farktır. P oransal çıkış, I ise integral çıkışıdır. Kontrolcü çıkışı oransal ile integral çıkışının toplamı olarak ifade edilmektedir. [10]

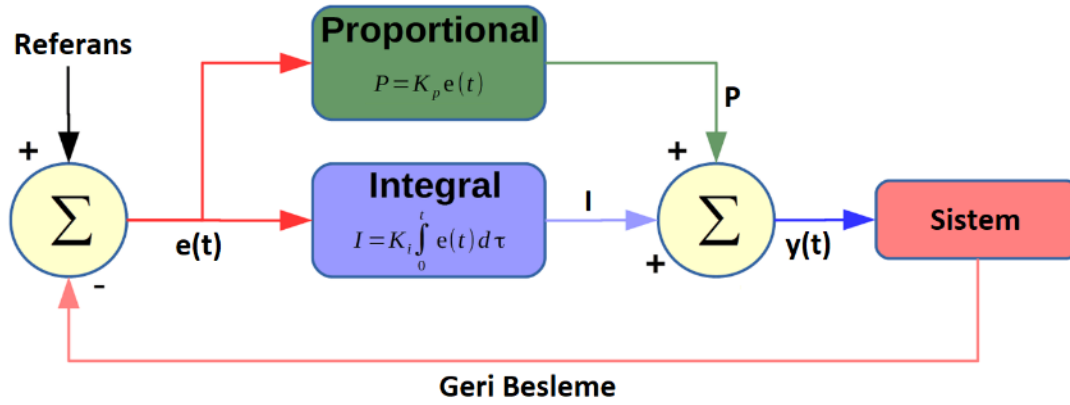
$$e(t) = (\text{Referans}) - (\text{Geri Besleme}) \quad (2.8)$$

$$P = K_p \cdot e(t) \quad (2.9)$$

$$I = K_i \int_0^t e(t) \cdot dt \quad (2.10)$$

$$y(t) = P + I \quad (2.11)$$

Şekil 2.18'de PI kontrol algoritmasına ilişkin blok şema verilmiştir. Burada K_p oransal katsayı değerini, K_i integral katsayı değerini, $y(t)$ ise kontrolcü çıkışını ifade etmektedir.



Şekil 2.18. PI Kontrol Algoritması Blok Şema

Tablo 2.2’de kontrol katsayılarının kontrolcü çıkışına olan etkisine ilişkin bilgiler verilmiştir.

Tablo 2.2. Kontrol Katsayılarının Çıkışa Etkisi

| Katsayı | Yükselme Süresi | Aşım | Oturma Süresi | Kalıcı Hatası | Hal |
|---------|-----------------|-----------|---------------|------------------|-----|
| K_p | Düşürür | Yükseltir | Az etkiler | Düşürür | |
| K_i | Düşürür | Yükseltir | Yükseltir | Ortadan kaldırır | |

2.3.3.1.1. Kontrolcü Parametrelerinin Belirlenmesi

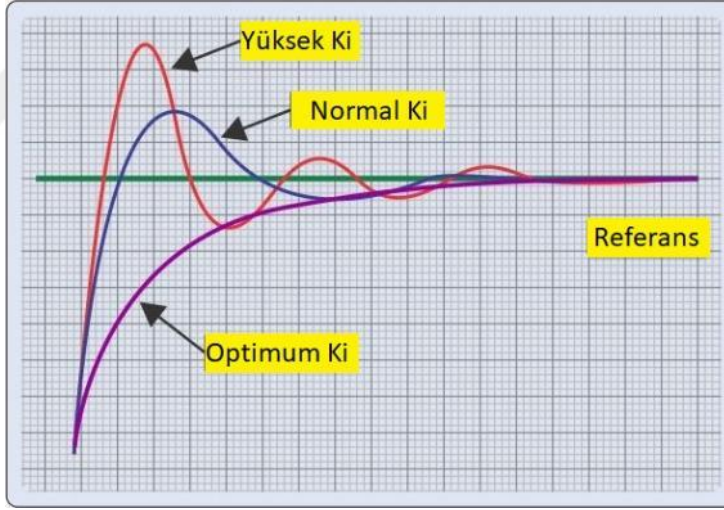
Kontrolcü parametrelerinin belirlenmesi de kontrolcü yapısının oluşturulması kadar önemlidir. PI kontrolde parametrelerin belirlenmesi için Cohen-Coon yöntemi, Tyreus-Luyben yöntemi ve Ziegler-Nichols yöntemi gibi birtakım temel yöntemler mevcuttur. Bunlardan Ziegler-Nichols yöntemi halen en çok kullanılan ayar yöntemlerinden birisidir. Ancak yapılan çalışmalara bakıldığında geleneksel parametre ayarlama yöntemleri; yüksek aşım miktarı, düşük doğruluk oranı ve ayar süresinin uzun olması gibi dezavantajlarından dolayı yapay zekâ optimizasyon algoritmaları kadar başarılı olamamaktadır.[11][12][13]

K_p katsayısının olması gerektiği değerden çok yüksek seçilmesi sonucunda sistem hızlı yanıt verecektir. Fakat hata değeri yüksek olacağından dolayı sistemde aşım meydana gelecektir. K_p , çok düşük seçildiğinde ise sistem yavaş yanıt verecek ve sistemin referans değerine ulaşması oldukça uzun bir zaman alacaktır.



Şekil 2.19. K_p Katsayısının Sisteme Olan Etkisi

İntegral, sistemdeki geçmişe yönelik hataların toplanmasıyla çalışan bir algoritmadır. Belirlenen K_i değeri olması gerekenden yüksek ise P kontrolden dolayı sistemde oluşan aşım etkisini artacaktır. Seçilecek ideal değer ile sistemdeki aşım sönmünecek ve sistem belirlenen referans değerine gelecektir.



Şekil 2.20. K_i Katsayısının Sisteme Olan Etkisi

2.4. Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Kullanılan Sensörler

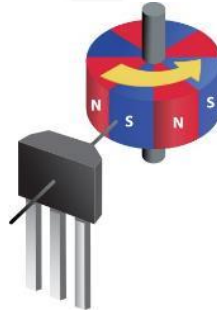
Fırçasız doğru akım motorları döner hareket yapan elektrik makineleridir. Söz konusu döner hareketin hızı ve pozisyonun algılanmasında kullanılan sensör tipleri aşağıdaki gibidir.

- Hall Sensör
- Enkoder
- Resolver

2.4.1. Hall Sensör

Manyetik alan etkisinden yararlanarak üretilen temassız elektronik sensörlerdir. Bir sistemin konum, hız veya pozisyon bilgisini elde etmek için kullanılır. Diğer sensör tiplerine göre en ucuz çözümdür. Hall sensör pozitif manyetik alan altında Lojik 1, negatif manyetik alan altında Lojik 0 çıkışı üretmektedir.

Fırçasız doğru akım motorlarında her kutup geçişinde rotor manyetik alanının yönü pozitiften negatife doğru veya negatiften pozitive doğru değişmektedir. Hall sensör aracılığı ile bu kutup geçişleri dijital kare sinyal olarak elde edilmektedir. Şekil 2.21’de hall sensörün çalışma yapısına ilişkin görsel verilmiştir. Bu çalışma kapsamında hall sensör kullanılmıştır. [14]



Şekil 2.21. Hall Sensör

3 fazlı fırçasız doğru akım motorlarında pozisyon algılamak için 3 adet hall sensör kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de fırçasız doğru akım motorunda hall sensörlerin yerleşimi görülmektedir. Tablo 2.3’te hall sensör değerine göre rotorun elektriksel pozisyonuna ilişkin değerler verilmiştir. Görüldüğü üzere hall sensörü ile rotor pozisyonu elektriksel olarak 60 derecelik çözünürlükte algılanabilmektedir. Buna bağlı olarak hall sensörler hız kontrolde kullanılabilir olsa da hassas pozisyon kontrolde kullanılamamaktadır. [15]

Tablo 2.3. Hall Sensör Değer Tablosu

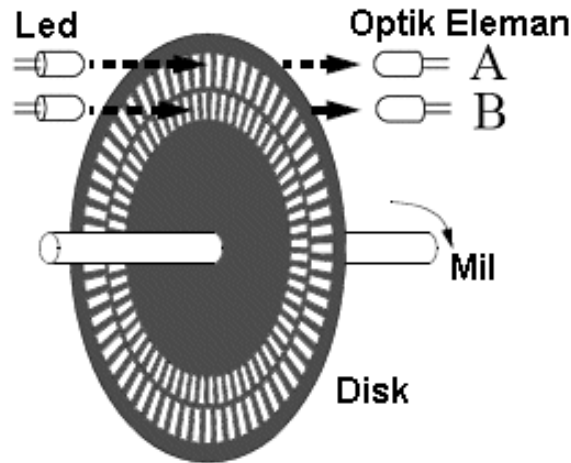
| Pozisyon (Derece) | Hall Sensör A | Hall Sensör B | Hall Sensör C |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| 0 – 60 | 1 | 0 | 1 |
| 60 – 120 | 1 | 0 | 0 |
| 120 – 180 | 1 | 1 | 0 |
| 180 – 240 | 0 | 1 | 0 |
| 240 – 300 | 0 | 1 | 1 |
| 300 – 360 | 0 | 0 | 1 |

2.4.2. Enkoder (Kodlayıcı)

Enkoder motor milinin döner hareketine karşılık, dijital bir kare sinyal üreten elektromekanik bir cihazdır. Hall sensöre göre yüksek çözünürlükte pozisyon algılama imkânı sunmaktadır. Artımsal enkoder ve mutlak enkoder olmak üzere iki tiptedir.

Artımsal Enkoder (Incremental Encoder)

Artımsal enkoder üzerinde ardışık olarak sıralanmış yarıklar bulunan bir disk, ışık kaynağı ve optik algılayıcıdan meydana gelmektedir. Döner hareket sırasında her bir yarık geçişinde optik algılayıcı kare sinyal üretmektedir. Artımsal enkoderin çözünürlüğü 360 derecelik bir tam turda üretilen kare sinyal sayısı ile orantılıdır ve ppr (pulse per revolution) birimi ile ifade edilmektedir. Örneğin, 1024 ppr çözünürlüğüne sahip bir artımsal enkoder 360 derecelik bir tam turda 1024 kare sinyal üretmektedir. Görüldüğü üzere hall sensör 60 derecelik bir çözünürlük sunarken 1024 ppr değerine sahip bir artımsal enkoder $360/1024 = 0.35156$ derecelik bir çözünürlük sunabilmektedir. Şekil 2.22’de artımsal enkoderin çalışma mantığına ilişkin görsel verilmiştir.

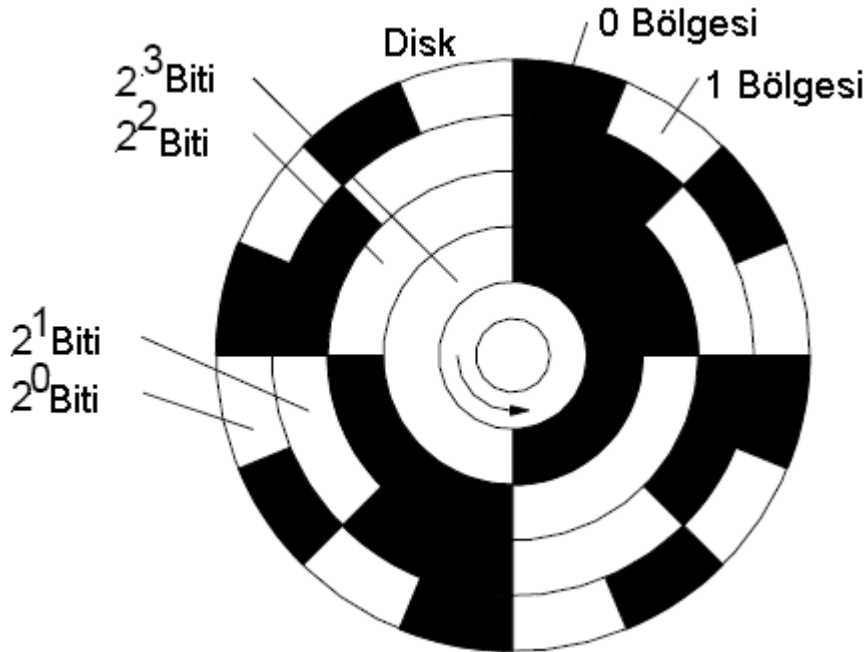


Şekil 2.22. Artımsal Enkoderin Çalışması

Mutlak Enkoder (Absolute Encoder)

Artımsal enkoderler döner hareket esasında üretilen bir kare sinyalin sayılması esasına göre çalışmaktadır. Bu sistemin bir dezavantajı sayma işlemini yapan elektronik kontrol sistemi devrede değilken harici bir fiziksel etki ile elektrik motorunun pozisyonu değişir ise gerçek pozisyon ile son sayılan değer arasında bir fark oluşacak ve gerçek pozisyon değeri kaybedilecektir. Mutlak enkoder bu dezavantajın önüne geçmektedir.

Mutlak her bir açı değeri için üzerinde benzersiz bir desene sahip yarık dizisi, ışık kaynağı ve optik algılayıcıdan meydana gelmektedir. Mutlak enkoderin üzerinde bulunan yarık deseni 2'lik tabanda sayısal bir değerdir. Bu değer bit sayısı mutlak enkoderin çözünürlüğünü ifade etmektedir. Örneğin, 4 bit çözünürlüğüne sahip bir mutlak enkoder 360 derecelik bir tam turda $2^4=16$ farklı yarık deseni üretmektedir. Bu çözünürlüğe sahip bir mutlak enkoder $360/16 = 22.5$ derecelik bir çözünürlük sunmaktadır. Her bir pozisyon değeri kendine ait benzersiz bir yarık desenine sahip olduğundan dolayı, elektronik kontrol sistemi devrede değilken meydana gelecek fiziksel bir pozisyon değişikliği artımsal enkoder elemanında olduğu gibi kaybedilmeyecektir. Şekil 2.23'te 4 bit mutlak enkoderin disk yapısına ilişkin görsel verilmiştir.

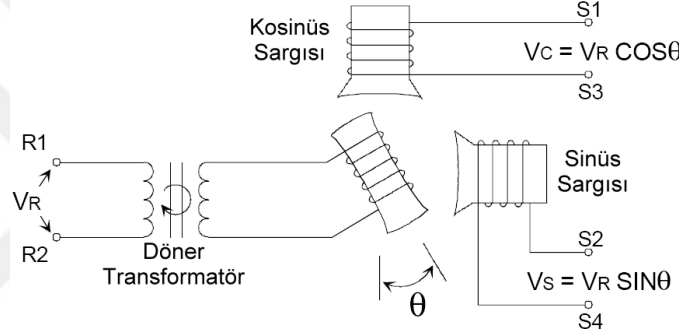


Şekil 2.23. 4 bit Mutlak Enkoder Disk Yapısı

2.4.3. Resolver (Çözücü)

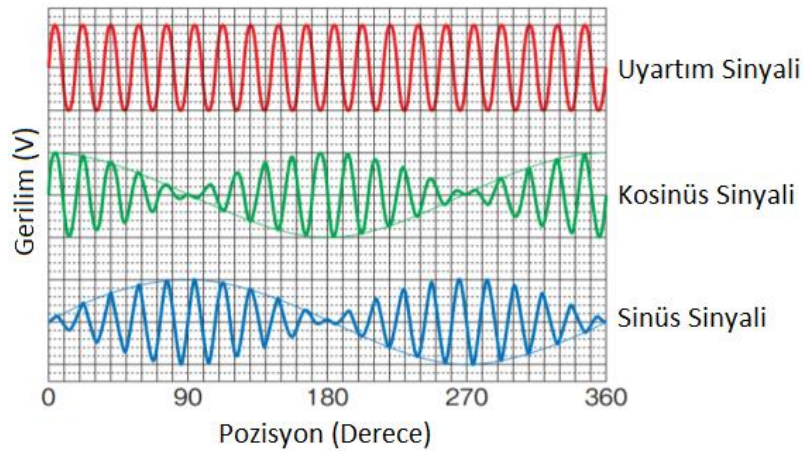
Enkoder sensörleri dijital sinyal üretmektedirler. Çözünürlük arttıkça disk üzerinde bulunan yarık sayısının artmaktadır. Yarık sayısı arttıkça, yarık boyutu küçülmekte ve titreşimlere karşı hassasiyet artmaktadır.

Resolver rotor ve statordan oluşmaktadır. Rotor üzerinde uyarım sargısı bulunmaktadır. Stator üzerinde sinüs ve kosinüs olmak üzere iki sargı bulunmaktadır. Uyarım sargısına uygun frekans ve genlikte uygulanan sinüs gerilim sinyali sonucunda, mil pozisyonuna göre sinüs ve kosinüs sargıları 90 derece faz farklı sinüs ve kosinüs gerilim sinyalleri üretmektedir. Üretilen bu analog sinüs ve kosinüs gerilim sinyalleri bir DAC (Digital to Analog Converter) devresi aracılığı ile dijital hale getirilmektedir. Şekil 2.24'te bir Resolver sensörünün iç yapısı verilmiştir. [16]



Şekil 2.24. Resolver Sargı Yapısı

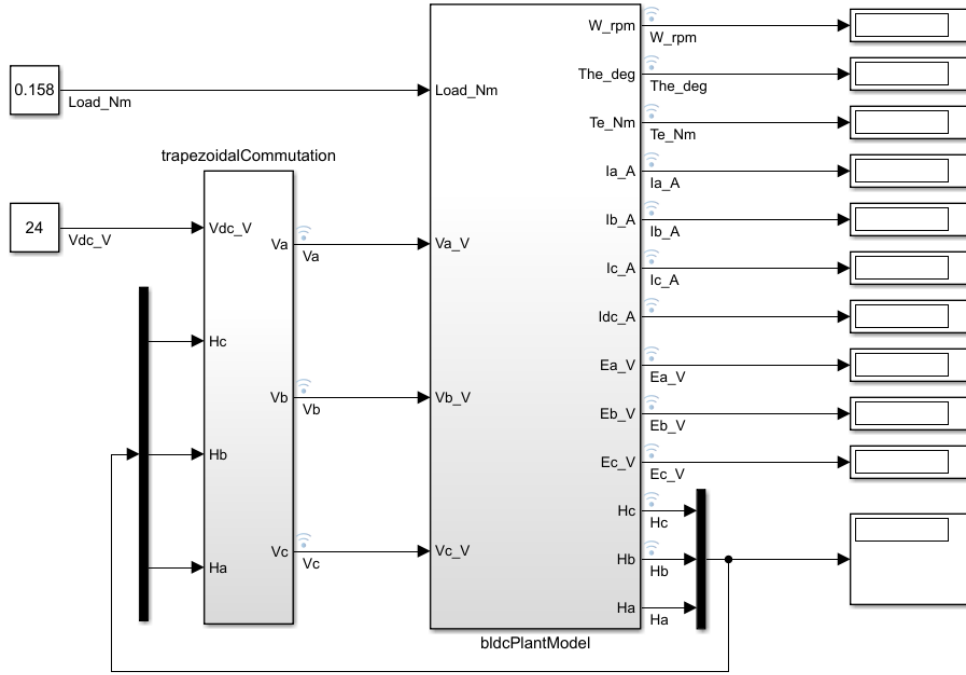
Şekil 2.25'te bir resolver sensörüne uygulanan uyarım gerilimi sinyal biçimi ve elde edilen sinüs/kosinüs gerilimi sinyal biçimleri verilmiştir. Burada sinüs ve kosinüs gerilim sinyallerinin genlik farkı derece olarak mil pozisyonunu, genlik değişim frekansı derece/saniye olarak mil hızını vermektedir.



Şekil 2.25. Resolver Uyarım, Sinüs ve Kosinüs Sinyalleri

2.5. Sistem Modelleme Çalışmaları

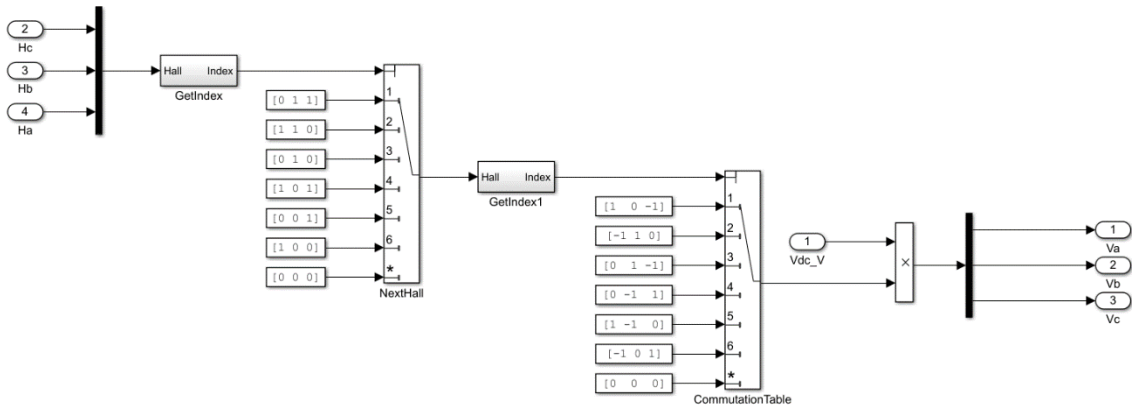
Sistem modelleme çalışmalarında fırçasız doğru akım motorunun eş değer devre denklemleri kullanılarak MATLAB&Simulink R2017b ortamında VHDL kod üretimine uygun bir sistem modelleme çalışması yapılmıştır. Sistem modeli blok şeması Şekil 2.26'da verilmiştir. Sistem modeli trapezoidal komütasyon ve fırçasız doğru akım bloğundan oluşmaktadır. [17][18]



Şekil 2.26. Sistem Modeli Şeması

2.5.1. Komütasyon Bloğu

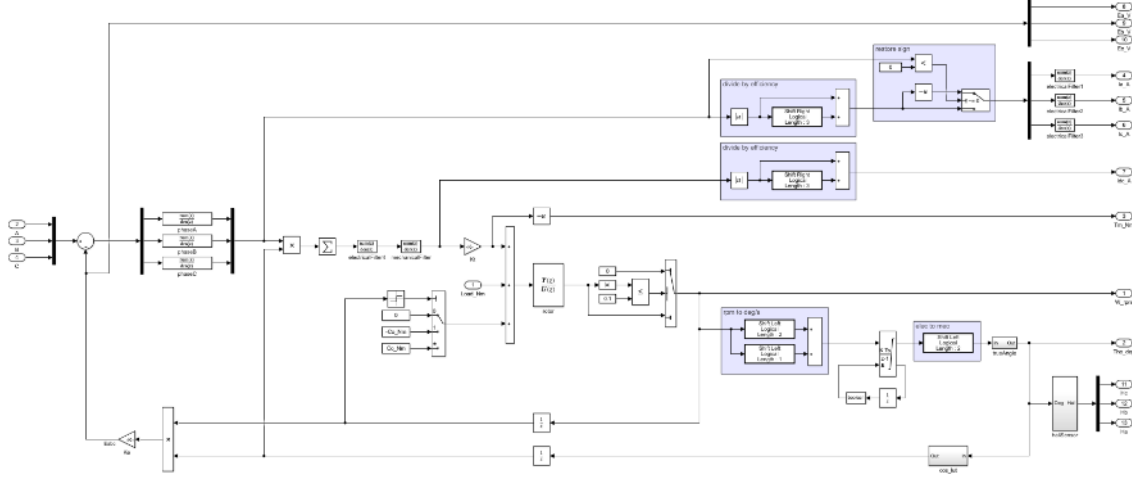
Sistem modelleme çalışmasında komütasyon yöntemi olarak trapezoidal komütasyon kullanılmıştır. Trapezoidal komütasyon blok şeması Şekil 2.27'de verilmiştir. Anahtarlama tablosu Tablo 2.1'de verilen değerlere göre tanımlanmıştır.



Şekil 2.27. Trapezoidal Komütasyon Blok Şeması

2.5.2. Fırçasız Doğru Akım Motoru Modeli

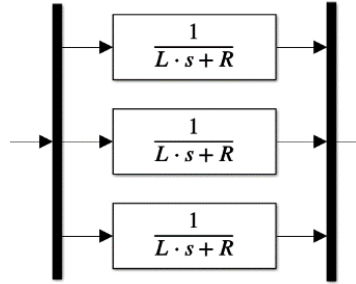
Başlık 2.2’de verilen fırçasız motor eşdeğer devresi ve denklemleri kullanılarak stator ve rotor transfer fonksiyonları oluşturulmuştur. Fırçasız doğru akım motoru transfer fonksiyonu blok şeması Şekil 2.28’de verilmiştir. [19]



Şekil 2.28. Fırçasız Doğru Akım Motoru Transfer Fonksiyonu Blok Şeması

2.5.2.1. Stator Transfer Fonksiyonu

Statorunda 3 fazlı sargı bulunmaktadır. Bu nedenle her faz için ayrı transfer fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 2.29’da stator sargılarının 3 faz elektriksel transfer fonksiyonu blok şeması verilmiştir.



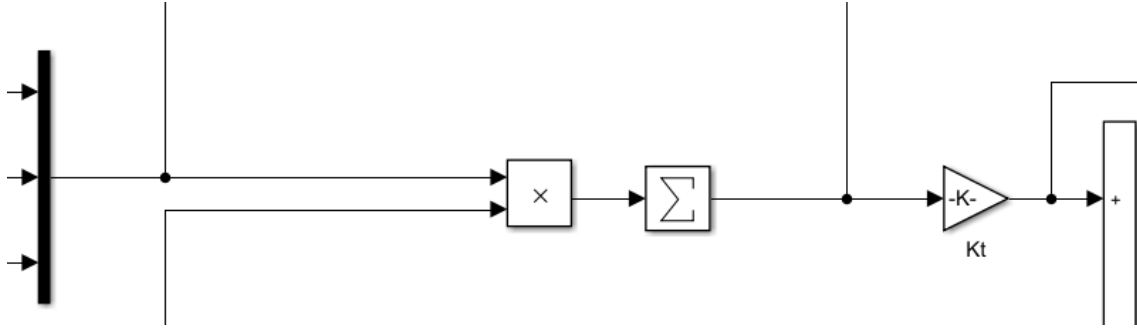
Şekil 2.29. Stator 3 Faz Elektriksel Transfer Fonksiyonu Blok Şeması

Tablo 2.4’te stator transfer fonksiyonunda bulunan ifadelerin açıklamaları ve birimleri verilmiştir.

Tablo 2.4. Stator Transfer Fonksiyonunda Bulunan Semboller

| İfade | Açıklama | Birim |
|-------|--|----------|
| R | Tek Faz Sargı Direnci | Ω |
| L | Tek Faz Sargı Endüktansı | H |
| Giriş | Faz Gerilimi ile Zıt-Emk Arasındaki Fark | V |
| Çıkış | Faz Akımı | A |

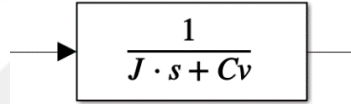
Denklem (2.2) ve (2.3)'de belirtilen hesaplama göre mil torqu elde edilmesi Şekil 2.30'da verilmiştir. Burada K_t tork sabitini ifade etmektedir. Birimi Nm/A'dır.



Şekil 2.30. Mil Torqu Elde Edilmesi

2.5.2.2. Rotor Transfer Fonksiyonu

Rotor transfer fonksiyonu oluşturulurken atalet momenti ve dinamik sürtünme değerleri dikkate alınmıştır. Şekil 2.31'de rotorun mekanik transfer fonksiyonunun blok şeması verilmiştir.



Şekil 2.31. Rotor Transfer Fonksiyonu Blok Şeması

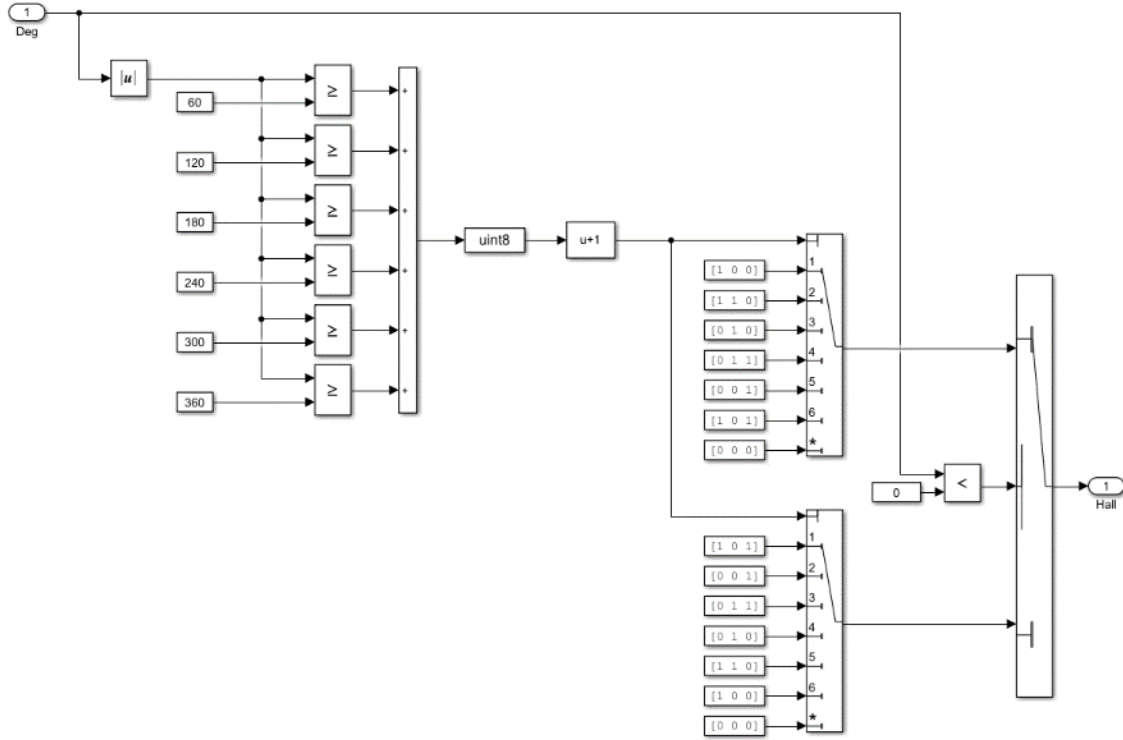
Tablo 2.5'te rotor transfer fonksiyonunda bulunan ifadelerin açıklamaları ve birimleri verilmiştir.

Tablo 2.5. Rotor Transfer Fonksiyonunda Bulunan Semboller

| İfade | Açıklama | Birim |
|----------------|-------------------------|-------------------|
| J | Atalet Momenti | Kg.m ² |
| C _v | Dinamik Sürtünme Sabiti | Nm/RPM |
| Giriş | Rotor Mil Torqu | Nm |
| Çıkış | Rotor Hızı | RPM |

2.5.3. Hall Sensör Modeli

Sistem modelleme çalışmasındaki en önemli bloklardan biri hall sensördür. Tablo 2.3'te belirtilen hall sensör değerleri kullanılarak motorun mil pozisyonuna göre 3 bitlik hall sensör değerinin üretilmesi sağlanmıştır. Şekil 2.32'da hall sensör modeline görüntüsü verilmiştir.



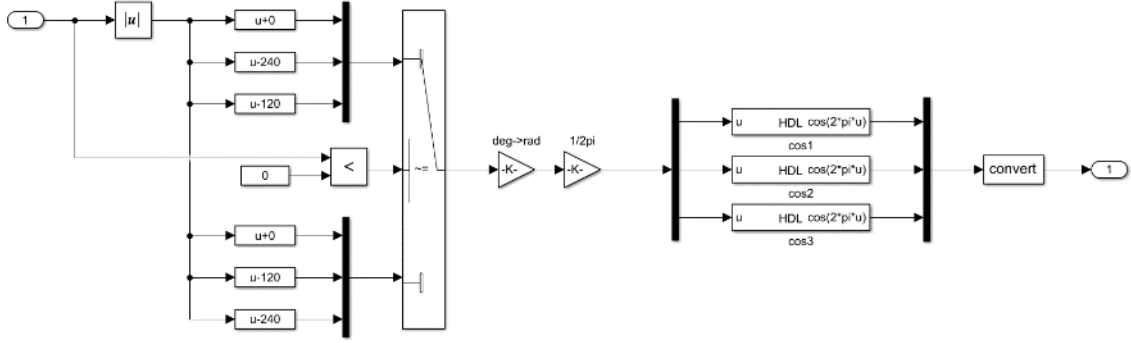
Şekil 2.32. Hall Sensör Modeli

2.5.4. Kosinüs Bileşenlerinin Hesaplaması

Denklem (2.2) ve (2.4)'te 3 faz gerilim, akım, tork ve zıt-emk bileşenlerinin elde edilebilmesi için mil pozisyonuna bağlı ve 120 derecelik faz farkına sahip 3 adet cosinüs değerinin elde edilmesi gerekmektedir. Burada en önemli zorluk modelin VHDL kod dönüşümüne uygun olması gerekliliğidir. Bu gereksinimin karşılanabilmesi için "Look-Up Table" methodunu kullanan "HDL cos" bloğu kullanılmıştır.

"Loop-Up Table" methodunda kosinüs fonksiyonunun sonuç değerleri belirtilen eleman sayısı kadar iterasyon yoluyla önceden hesaplanmakta ve kaydedilmektedir. Bu sayede kosinüs fonksiyonu her çalıştığında yeniden değer üretilmeyecek önceden hesaplanmış en yakın değer elde edilecektir. Burada en önemli kriter belirtilen eleman sayısının yeterince çok olmasıdır. Yetersiz eleman sayısı ile gerçekleştirilen kosinüs fonksiyonu fırçasız doğru akım motoru modeli hatalı çalışmasına sebep olacaktır. Bu çalışmada

“Look-Up Table” methodu için belirtilen eleman sayısı 2^{120} adettir. Şekil 2.33’te kosinüs bileşenlerinin hesaplanmasına ilişkin blok şema verilmiştir. Burada MATLAB&Simulink içerisinde bulunan “HDL cos” bloğunun girişi radyan biriminde olduğundan dolayı dereceden radyana dönüşüm işlemi de yapılmıştır.

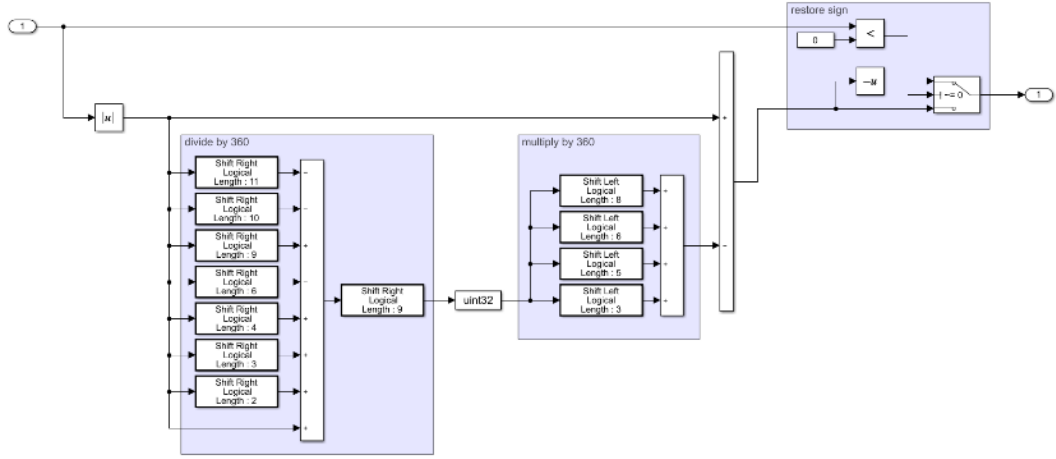


Şekil 2.33. Kosinüs Bileşenlerinin Hesaplanması

2.5.4.1. Mil Pozisyonunun Esas Açısının Bulunması

Kosinüs bileşenlerinin hesaplanması için kullanılan “Look-Up Table” methodunda kosinüs hesaplama aralığı 0 ile 360 derece arasındadır. Bu nedenle bu aralık dışındaki açı değerlerinin esas açısının bulunması gerekmektedir. Modelin VHDL kod dönüşümüne uygun olması için çarpma ve bölme bloklarının mümkün olduğunda az tutulması gerekmektedir. Bu nedenle esas açı hesaplamasında klasik çarpma ve bölme işlemleri yerine mantıkla çarpma ve bölme işlemleri kullanılmıştır.

Bir sayısının bitsel olarak 1 bit sola kaydırılması 2 ile çarpma, 1 bit sağa kaydırılması 2’ e bölme işlemi gerçekleştirilmektedir. Esas açı bulma işlemi bu kural çerçevesinde bitsel olarak gerçekleştirilmiştir. Burada en önemli konu sayının işaretinin korunmasıdır. Bunun için işlem öncesinde sayının işareti saklanmıştır. Şekil 2.34’te esas açının bulunmasına ilişkin blok şema verilmiştir.

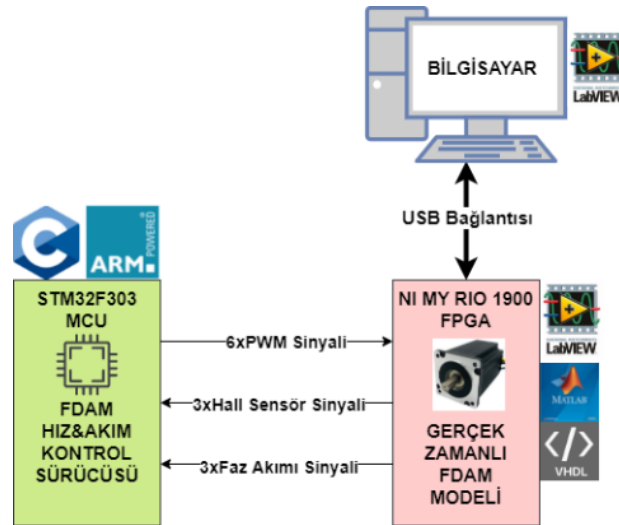


Şekil 2.34. Esas Açının Bulunması

2.6. Döngüde Donanım Test Sistemi Çalışmaları

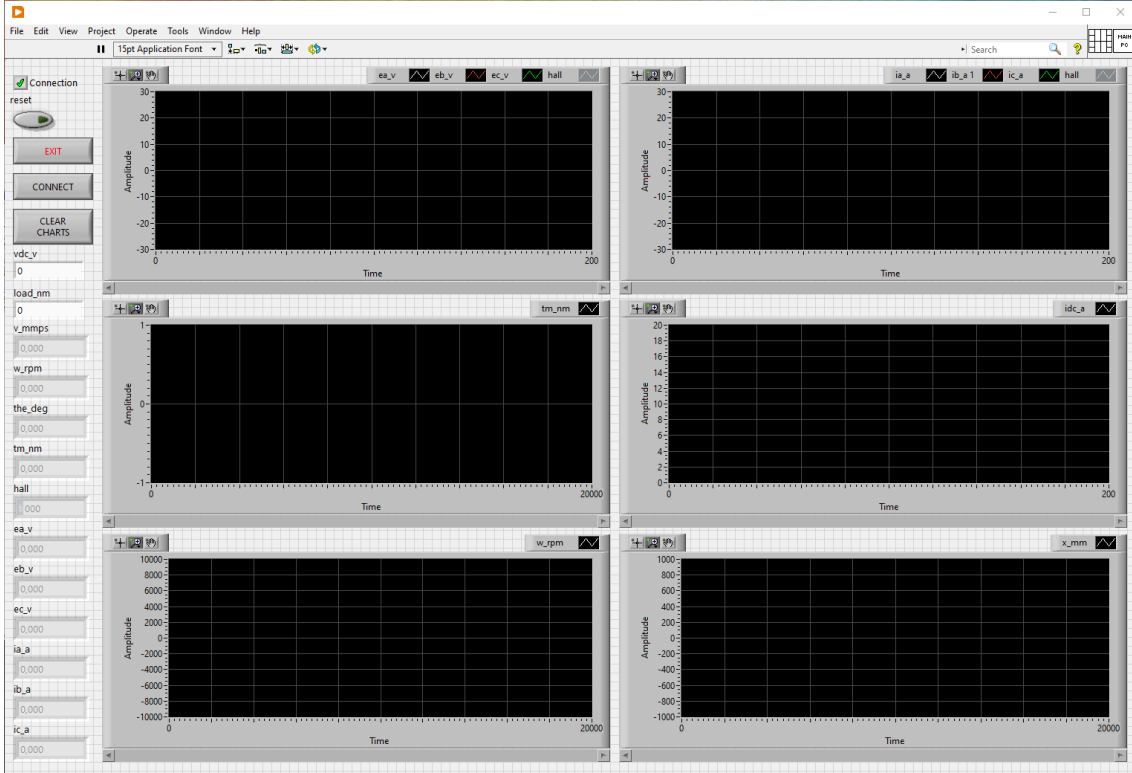
Döngüde donanım test sistemi çalışmalarında fırçasız doğru akım motoru modeli kullanılarak bir döngüde donanım test sistemi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Döngüde donanım test sistemleri Hardware-In The Loop (HIL) olarak da ifade edilmektedir. [20]

Döngüde donanım test sistemlerinin temel amacı fiziksel bir sistemin ölçülebilir veya hesaplanabilir koşullar altında dinamik davranışlarını taklit etmektir. Döngüde donanım test sistemleri ile fiziksel bir sistem olmadan veya fiziksel sistemin test edilemeyeceği koşullar altında söz konusu fiziksel sistem için kontrol algoritması geliştirme faaliyetleri ve bu algoritmanın gerçek donanım üzerinde çalışmasına ilişkin test faaliyetleri çok daha düşük maliyetler ile yürütülmesi mümkündür. Şekil 2.35'te tasarlanan ve gerçekleştirilen döngüde donanım test sisteminin blok şeması verilmiştir. [21][22]



Şekil 2.35. Döngüde Donanım Test Sistemi Blok Şeması

Tasarlanan döngüde donanım test sisteminde kontrolcü olarak STM32F303 mikrodenetleyici kullanılmıştır. Mikrodenetleyici ile NI myRIO 1900 donanımı arasında 6 adet dijital PWM sinyali, 3 adet dijital hall sensör sinyali ve 3 adet analog faz akımı sinyali bağlantısı bulunmaktadır. Ayrıca NI my-RIO 1900 ile bir bilgisayar arasında USB bağlantısı bulunmaktadır. Bu USB bağlantısı üzerinden modellenen fırçasız elektrik motorunun hız, pozisyon, faz akımları, hall sensör sinyalleri ve tork verileri gerçek zamanlı olarak bir bilgisayar arayüzüne aktarılmaktadır. Bilgisayara aktarılan bu veriler NI LabVIEW 2021 ortamında geliştirilen bir bilgisayar arayüzünde gerçek zamanlı grafik olarak görüntülenmektedir. Şekil 2.26'da geliştirilen bilgisayar arayüzü ekran görüntüsü verilmiştir. [23]



Şekil 2.36. Döngüde Donanım Sistemi Bilgisayar Arayüzü

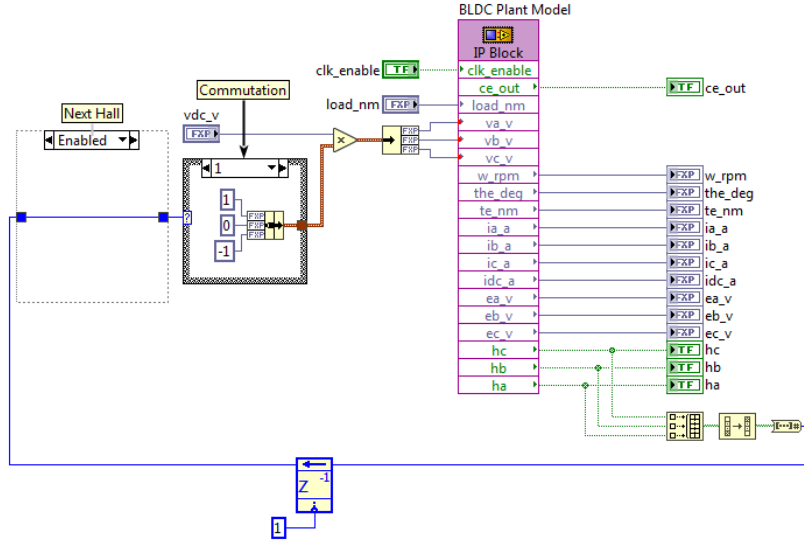
MATLAB&Simulink ortamında oluşturulan fırçasız doğru akım motoru modeli HDL Coder aracı ile VHDL koduna dönüştürülmüştür. Üretilen VHDL kod dosyalarına ilişkin ekran görüntüsü Şekil 2.37’de verilmiştir.

| Ad | Değiştirme tarihi | Tür | Boyut |
|------------------------|-------------------|-------------------|-------|
| trueAngle.vhd | 20.01.2022 13:33 | Virtual Hard Disk | 8 KB |
| linearMechanism_tc.vhd | 6.01.2022 13:57 | Virtual Hard Disk | 3 KB |
| linearMechanism.vhd | 6.01.2022 13:57 | Virtual Hard Disk | 13 KB |
| inverter.vhd | 20.01.2022 13:33 | Virtual Hard Disk | 6 KB |
| hallSensor.vhd | 20.01.2022 13:33 | Virtual Hard Disk | 11 KB |
| getIndex1.vhd | 20.01.2022 13:33 | Virtual Hard Disk | 2 KB |
| getIndex.vhd | 20.01.2022 13:33 | Virtual Hard Disk | 2 KB |
| cos3.vhd | 20.01.2022 13:33 | Virtual Hard Disk | 13 KB |
| cos2.vhd | 20.01.2022 13:33 | Virtual Hard Disk | 13 KB |
| cos1.vhd | 20.01.2022 13:33 | Virtual Hard Disk | 13 KB |
| cos_lut.vhd | 20.01.2022 13:33 | Virtual Hard Disk | 8 KB |
| commutation.vhd | 20.01.2022 13:33 | Virtual Hard Disk | 12 KB |
| blcdMotor_pkg.vhd | 20.01.2022 13:33 | Virtual Hard Disk | 1 KB |
| blcdMotor.vhd | 20.01.2022 13:33 | Virtual Hard Disk | 38 KB |
| gm_blcdPlantModel.slx | 20.01.2022 13:33 | Simulink Model | 56 KB |

Şekil 2.37. Üretilen VHDL Kod Dosyaları

Üretilen VHDL kodu NI LabVIEW 2021 ortamında “IP Block Node” kullanılarak NI myRIO 1900 RT FPGA cihazına entegre edilmiştir.

NI LabVIEW ortamında geliştirilen entegrasyon şeması Şekil 2.38’de verilmiştir.



Şekil 2.38. NI LabVIEW Ortamında Geliştirilen FPGA Entegrasyon Şeması

Bu çalışma aracılığıyla gerçek donanım üzerinde çalışan kontrol algoritmalarının, FPGA içerisine entegre edilen fırçasız doğru akım motoru sistem modeli üzerinde test edilebileceği bir alt yapı kazanılmıştır. Şekil 2.39’da tasarlanan ve gerçekleştirilen döngüde donanım test sistemine ilişkin görsel verilmiştir.

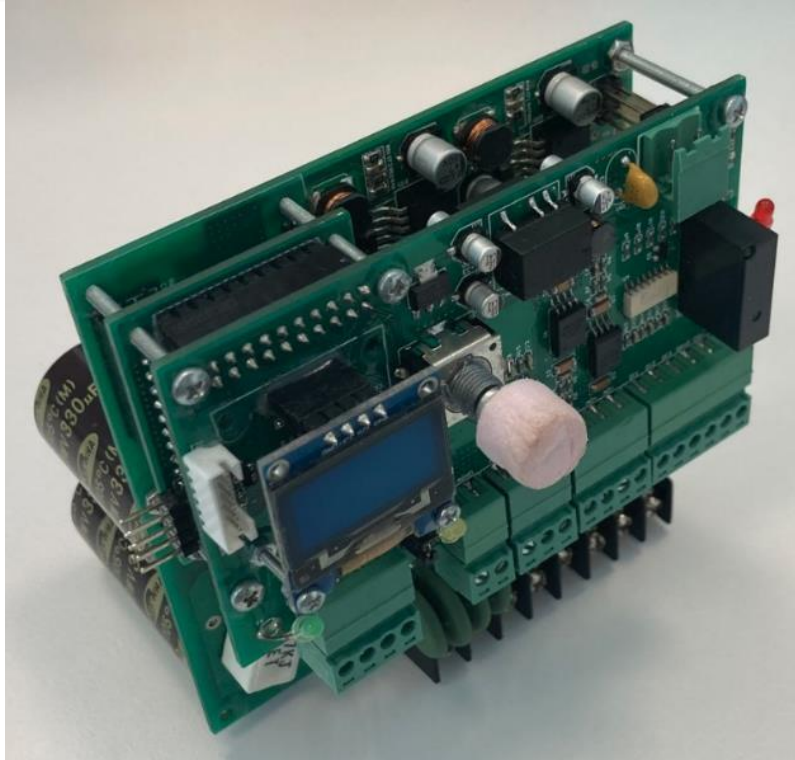


Şekil 2.39. Döngüde Donanım Test Sisteminin Görseli

2.7. Elektronik Devre Tasarımı Çalışmaları

Elektronik devre tasarımı çalışmalarında güç katı, kontrol katı ve arayüz katı olmak üzere 3 kat olarak fırçasız doğru akım motoru sürücüsü tasarlanmıştır ve gerçekleştirilmiştir.

Sürücünün genel görünümü Şekil 2.40'ta verilmiştir.



Şekil 2.40. Gerçekleştirilen Sürücünün Genel Görünümü

Sürücü özellikleri Tablo 2.6’da verilmiştir.

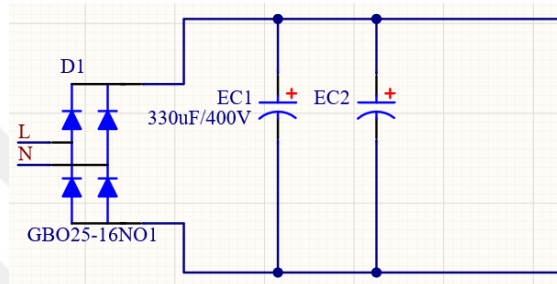
Tablo 2.6. Sürücünün Özellikleri

| | |
|----------------------------|--|
| Kontrol Katı Giriş Voltajı | 18-35 V |
| Güç Katı Giriş Voltajı | 0-311 V _{DA} / 0-220 V _{AA} |
| Güç Katı Çıkış Voltajı | 0-220 V _{AC} |
| Maksimum Güç | 1.5 kW |
| Komütasyon | Trapezoidal / Sinüzoidal |
| PWM Frekansı | 10 kHz |
| Dijital Girişler | 3 Adet 0-24 V (Optik İzole) |
| Dijital Çıkışlar | 1 Adet Kuru Kontak |
| Analog Girişler | 2 Adet +-5V |
| Analog Çıkışlar | 1 Adet +-5V |
| Geri Besleme | Hall Sensör |
| Haberleşme Arayüzü | 1 Adet RS485 |
| Kullanıcı Arayüzü | 128x64 OLED Ekran Sonsuz Turlu Potansiyometre |

2.7.1. Güç Katı Tasarımı

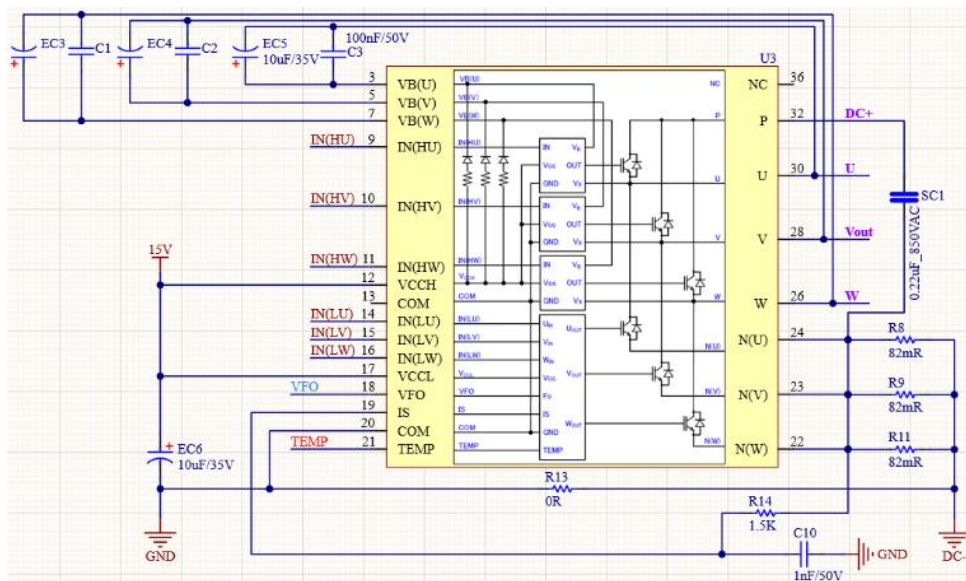
Güç katında tam köprü doğrultucu devre, 3 fazlı tam köprü evirici devresi, 15V, 5V, 3.3V doğru akım düşürücü güç kaynağı devreleri, faz akımı ölçüm devresi ve DA bara gerilimi ölçüm devresi bulunmaktadır.

Sürücünün güç girişinde tam köprü doğrultucu devre bulunmaktadır. Tam köprü doğrultucu devre elemanı olarak IXYS GBO25-16NO1 köprü diyot entegresi kullanılmıştır. DA bara kondansatörü olarak 2 adet 330 μ F kondansatör kullanılmıştır. Bu sayede hem AA hem de DA gerilim girişine destek sağlanmaktadır. Tam köprü doğrultucu devre şeması Şekil 2.41’de verilmiştir.



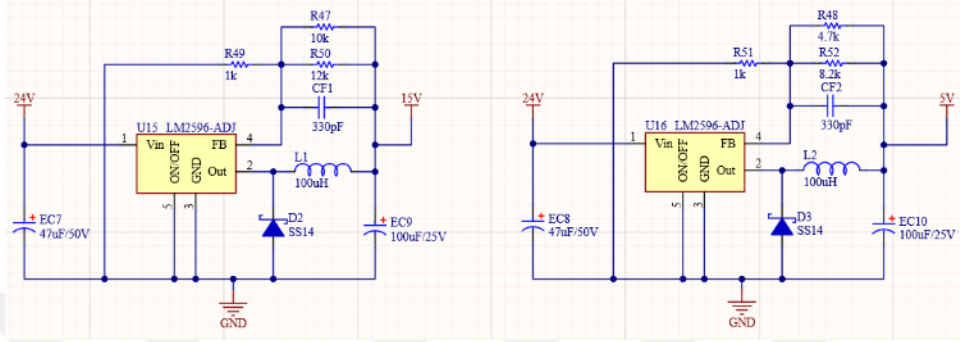
Şekil 2.41. Tam Köprü Doğrultucu Devre Şeması

Evirici devresinde anahtarlama elemanı olarak tek kılıf içerisinde 6 adet IGBT barındıran Fuji Electric 6MBP35XSF060-50 IPM modül kullanılmıştır. Kullanılan modülün maksimum gerilim değeri $400V_{DA}$, maksimum akım değeri 35 A’dır. Bu sayede yerden tasarruf sağlanmıştır. Evirici modülünün devre şeması Şekil 2.42’de verilmiştir. [25][26]



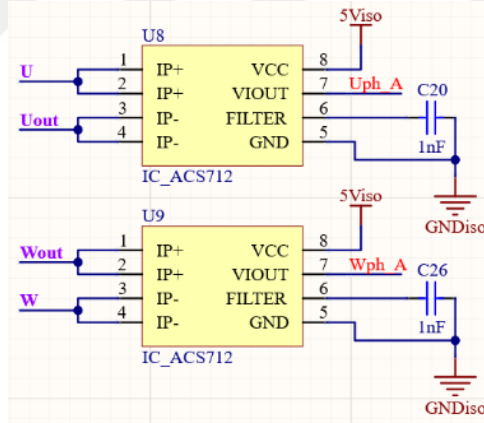
Şekil 2.42. Evirici Modülü Devre Şeması

Doğru akım düşürücü güç kaynağı devrelerinde LM2596-ADJ entegresi kullanılmaktadır. LM2596-ADJ anahtarlamalı güç kaynağı devrelerinde sık kullanılan bir entegredir. Ayarlı yapıda olması sayesinde $0-V_{giriş}$ aralığında istenilen seviyede gerilim çıkışı elde edilebilmektedir. Doğru akım düşürücü güç kaynağı devre şeması Şekil 2.43'te verilmiştir.



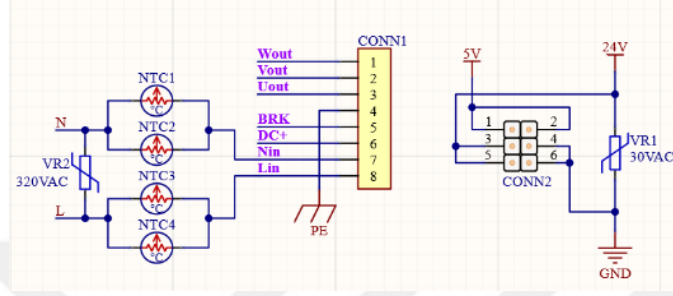
Şekil 2.43. Doğru Akım Düşürücü Güç Kaynağı Devre Şeması

U ve W fazları üzerinden ACS712 akım sensörü kullanılarak akım ölçümü yapılmaktadır. ACS712 akım sensörü temassız akım ölçümü için kullanılan bir entegredir. Bu sayede elektriksel olarak izole bir biçimde akım ölçümü sağlanabilmektedir. Akım ölçümü devre şeması Şekil 2.44'te verilmiştir.



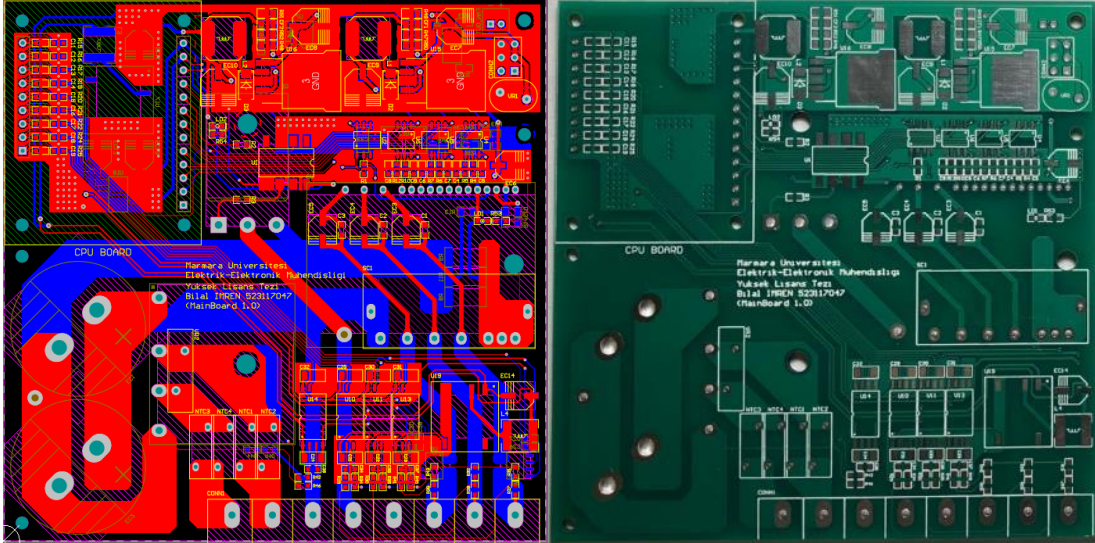
Şekil 2.44. Akım Ölçümü Devre Şeması

Sürücünün güç devresi girişinde 2 adet 330 μ F kondansatör bulunmaktadır. Söz konusu kondansatörler boş iken ilk şarj anında kısa devre etkisi yaratacaktır. Bu etkiye “inrush current” adı verilmektedir. Güç devresi tasarımında “inrush current” etkisi dikkate alınmış ve bu etkiyi azaltmak için toplam 4 adet 12 Ω değerinde NTC kullanılmıştır. Bu sayede DA bara üzerinde bulunan kondansatörlerin ilk şarj akımını sınırlandırılmıştır. Giriş koruma devresi şeması Şekil 2.45’te verilmiştir.



Şekil 2.45. Giriş Koruma Devresi Şeması

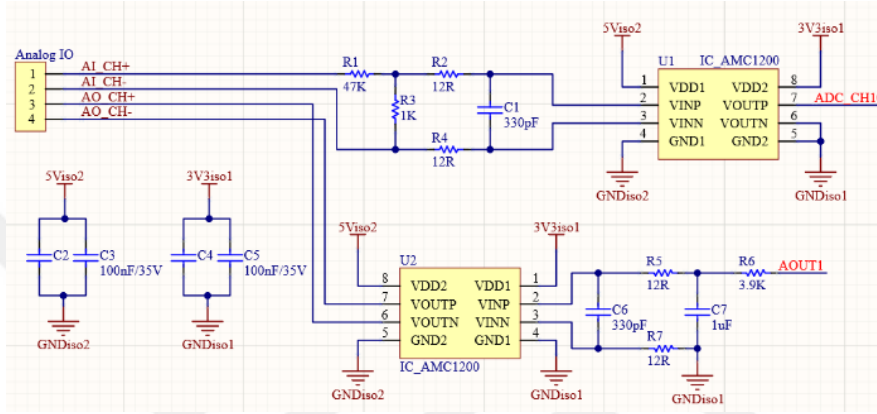
Güç katı devresi Altium ortamında 100x100 mm boyutlarında iki taraflı PCB olarak tasarlanmıştır. Güç katı PCB tasarımı Şekil 2.46’da verilmiştir.



Şekil 2.46. Güç Katı PCB Tasarımı

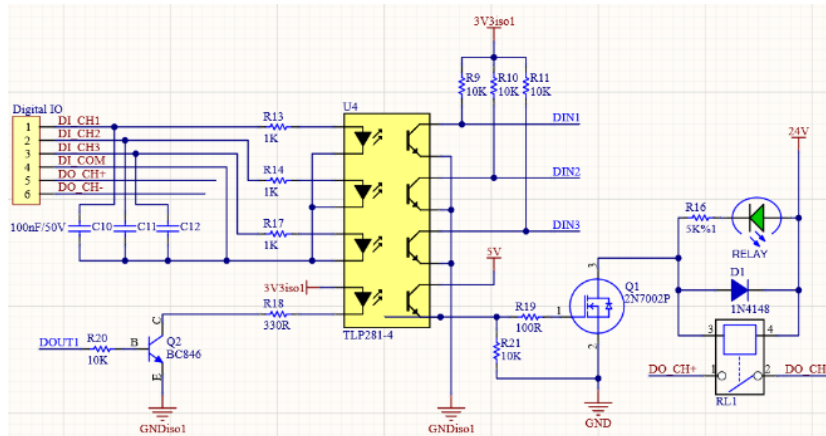
2.7.3. Arayüz Katı Tasarımı

Arayüz katında analog giriş/çıkış devresi, dijital giriş/çıkış devresi, hall sensör arayüzü devresi, RS485 haberleşme arayüzü devresi ve kullanıcı arayüzü devresi bulunmaktadır. Analog giriş ve çıkış devresinde 1 adet analog giriş ve 1 adet analog çıkış bulunmaktadır. AMC1200 opamp entegresi kullanılmıştır. +5V/-5V aralığında analog sinyali algılama ve +5V/-5V aralığında analog sinyal üretilebilmektedir. Gerilim ölçümü devre şeması Şekil 2.49'da verilmiştir.



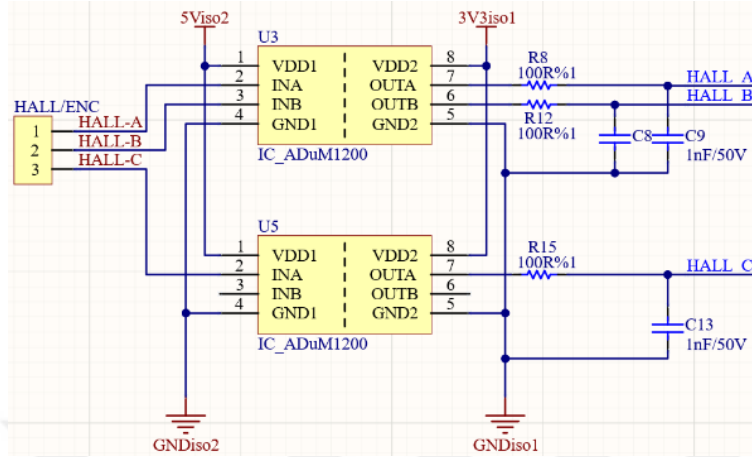
Şekil 2.49. Analog Giriş/Çıkış Devre Şeması

Dijital giriş/çıkış devresinde 3 adet dijital giriş ve 1 adet kuru kontak çıkış bulunmaktadır. Dijital girişler için TLP281 optokuplör entegresi kullanılmıştır. Kuru kontak çıkışı için tek kutuplu tek konumlu mekanik röle kullanılmıştır. Dijital giriş/çıkış devre şeması Şekil 2.50'de verilmiştir.



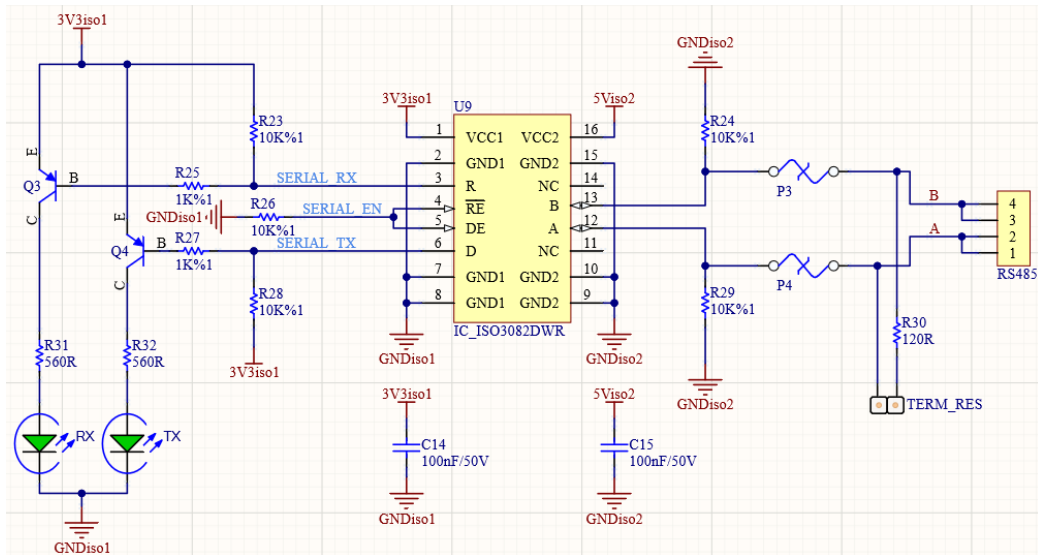
Şekil 2.50. Dijital Giriş/Çıkış Devre Şeması

Hall sensör devresinde 3 adet dijital kare sinyal girişi bulunmaktadır. ADuM1200 dijital izolator entegresi kullanılmıştır. Bu sayede elektriksel olarak izole sensör arayüzü sağlanmaktadır. Hall sensör devre şeması Şekil 2.51’de verilmiştir.



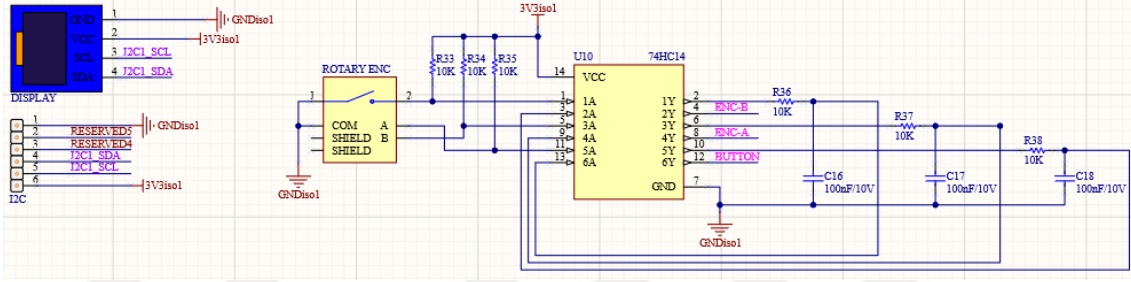
Şekil 2.51. Hall Sensör Devre Şeması

RS485 arayüzü devresinde A ve B olmak üzere iki adet haberleşme hattı bulunmaktadır. RX ve TX hatlarına paralel LED bağlantısı yapılmıştır. Bu sayede haberleşme durumu LED’ler üzerinden görülebilmektedir. A ve B hatlarında bulunan seri PTC elemanları ile kısa devre koruması sağlanmıştır. ISO3082DWR entegresi kullanılmıştır. RS485 arayüzü devre şeması Şekil 2.52’de verilmiştir.



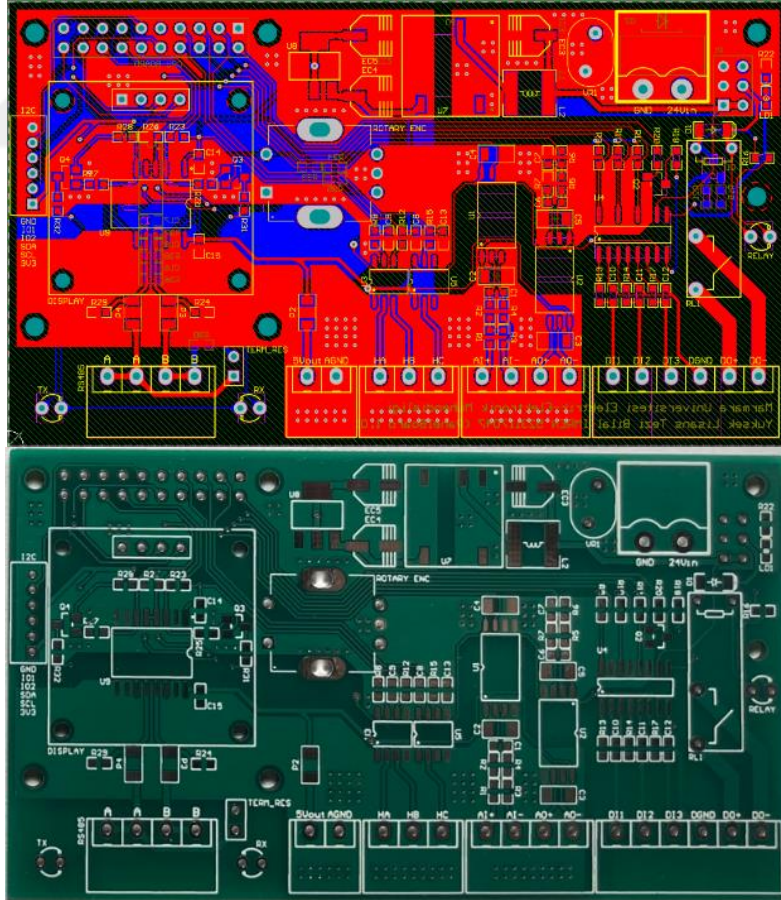
Şekil 2.52. RS485 Arayüzü Devre Şeması

Kullanıcı arayüzü devresinde 1 adet OLED ekran ve 1 adet sonsuz turlu potansiyometre bulunmaktadır. Sonsuz turlu potansiyometre çıkışlarında yapısı gereği “debounce” riski bulunmaktadır. Bu durumun önüne geçmek için 74HC14 entegresi ile donanımsal dijital filtre devresi tasarlanmıştır ve “debounce” sorunu en aza indirgenmiştir. OLED ekran I2C haberleşme arayüzü üzerinden kontrol katına bağlanmaktadır. Kullanıcı arayüzü devresi Şekil 2.53’te verilmiştir.



Şekil 2.53. Kullanıcı Arayüzü Devresi

Arayüz katı devresi Altium ortamında 100x58 mm boyutlarında iki taraflı PCB olarak tasarlanmıştır. Arayüz katı PCB tasarımı Şekil 2.54’te verilmiştir.



Şekil 2.54. Arayüz Katı PCB Tasarımı

2.8. Yazılım Geliştirme Çalışmaları

Geliştirilen sürücünün kontrol katı ARM tabanlı STM32F105RCT6 mikrodenetleyici içermektedir. Bu proje kapsamında söz konusu mikrodenetleyici üzerinde yazılım geliştirme çalışmaları yapılmış ve yazılım geliştirme çalışmaları sonucunda sürücü testleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan mikrodenetleyicinin pin konfigürasyonu Tablo 2.7’de verilmiştir. [28][29]

Tablo 2.7. STM32F303 Pin Konfigürasyonu

| Pin Numarası | Pin Adı | Pin İşlevi |
|--------------|------------|-----------------------|
| PA0 | ADC1_IN0 | Analog Giriş |
| PA1 | ADC1_IN1 | Analog Giriş |
| PA2 | CONSOLE_TX | |
| PA4 | ADC1_IN4 | Analog Giriş |
| PA5 | ADC1_IN5 | Analog Giriş |
| PA6 | ADC1_IN6 | Analog Giriş |
| PA7 | ADC1_IN7 | Analog Giriş |
| PA8 | PWM1 | High side PWM sinyali |
| PA9 | PWM2 | High side PWM sinyali |
| PA10 | PWM3 | High side PWM sinyali |
| PB3 | AOUT1 | Analog Çıkış |
| PB5 | RS485_EN | Dijital Çıkış |
| PB6 | RS485_TX | UART Transmitter |
| PB7 | RS485_RX | UART Receiver |
| PB8 | I2C_SCL | I2C Clock |
| PB9 | I2C_SDA | I2C Data |
| PB13 | PWM1N | Low side PWM sinyali |
| PB14 | PWM2N | Low side PWM sinyali |
| PB15 | PWM3N | Low side PWM sinyali |
| PC0 | ADC1_IN10 | Analog Giriş |
| PC3 | ADC1_IN13 | Analog Giriş |
| PC4 | LED_ERROR | Dijital Çıkış |
| PC5 | LED_STATUS | Dijital Çıkış |
| PC6 | HALLA | HALL Sensör Girişi |
| PC7 | HALLB | HALL Sensör Girişi |
| PC8 | HALLC | HALL Sensör Girişi |
| PC10 | RELAY_OUT | Dijital Çıkış |
| PC11 | DIN3 | |
| PC12 | DIN2 | |
| PC13 | ENC_B | |
| PC14 | ENC_A | |
| PC15 | BUTTON | Dijital Giriş |
| PD2 | DIN_1 | |

Yazılım geliştirme ortamı olarak STM32CubeIDE 1.8.0 kullanılmıştır. Programlama dili olarak C dili kullanılmıştır. Sürücü yazılımı “taşınabilirlik, yeniden kullanılabilirlik, okunabilirlik” kuralları çerçevesinde alt modüller halinde geliştirilmiştir. Yazılım alt modülleri aşağıdaki gibidir.

- Kullanıcı Arayüzü Modülü
- Giriş Çıkış Modülü
- Geri Besleme Modülü
- PWM Modülü
- Kontrol Modülü

2.8.1. Kullanıcı Arayüzü Modülünün Geliştirilmesi

Sahada kullanım ihtiyacı göz önünde bulundurularak, geliştirilen sürücüye 1 adet OLED ekran dâhil edilmiştir. Ekran üzerinden Tablo 2.8’de yer alan parametreler güncellenebilmektedir.

Tablo 2.8. Sürücü Parametreleri

| Parametre | Değer |
|----------------------------------|--------------------------------|
| Motor Türü | Fırçasız Doğru Akım / Asenkron |
| Kutup Sayısı | 2 – 16 |
| Nominal Frekans | 50 / 60 Hz |
| Motor Yönü | İleri / Geri |
| Kontrol Türü | Hız Kontrol / Akım Kontrol |
| PWM Modu | Trapezoidal / Sinüzoidal |
| Hız Kontrol Rampa Basamağı (dV) | 10 – 1000 RPM |
| Akım Kontrol Rampa Basamağı (dI) | 0.1 – 10 A |
| Rampa Süresi (dt) | 10 ms – 1000 ms |
| Geri Besleme Türü | Hall Sensör / Artımsal Enkoder |

Kullanıcı arayüzü üzerinden referans değeri, motor türü, kutup sayısı, anahtarlama frekansı, kontrol türü, kontrol katsayıları, rampa ayarları, giriş çıkış ayarları yapılabilmektedir.

2.8.2. Giriş Çıkış Modülünün Geliştirilmesi

Giriş çıkış arayüzleri üzerinden motor sürücüyü başlatma, motor sürücüyü durdurma, acil durma, durum çıkışı bağlantıları yapılabilmektedir.

2.8.3. Geri Besleme Modülünün Geliştirilmesi

ARM tabanlı mikrodenetleyiciler hall sensör, artımsal enkoder vb. kare sinyal veren geri besleme elemanlarının frekansının ölçülebilmesi için özel TIMER birimlerine

sahiptir.

TIMER birimi ile bir sayaç oluşturulmuş ve geri besleme elemanından gelen sinyalin her yükselen kenarında bu sayaç değeri sinyal periyodu olarak kaydedilmiştir. Bu sayede motor hızı, pozisyonu bilgileri sürücü tarafından ölçülebilmektedir. Hız ve pozisyon ölçümüne ilişkin kaynak kod parçası Şekil 2.55'te verilmiştir.

```
uint32_t hall_speed(volatile uint32_t * const pTimerCounter, uint32_t timerCounterFreq)
{
    uint32_t hallSpeed_cnts = 0;
    hallSpeed_cnts = (int32_t)*pTimerCounter;
    *pTimerCounter = 0;
    if (hallSpeed_cnts != 0) {
        hallSpeed_cnts = timerCounterFreq / hallSpeed_cnts;
    }
    return hallSpeed_cnts;
}

void hall_position(int32_t* const hallPosition_cnt, int8_t direction, uint8_t reset)
{
    if (direction == 1) {
        (*hallPosition_cnt)++;
    }
    else if (direction == -1) {
        (*hallPosition_cnt)--;
    }
    if (reset) {
        *hallPosition_cnt = 0;
    }
}
```

Şekil 2.55. Hız ve Pozisyon Ölçümü Kaynak Kod Parçası

2.8.4. PWM Modülünün Geliştirilmesi

PWM modülü trapezoidal üretilebilmesi için gerekli olan anahtarlama tablolarını içermektedir. Trapezoidal komütasyon anahtarlama tablosuna ait kaynak kod parçası Şekil 2.56'da verilmiştir.

```
13 // BH1, BH2, BH3, BL1, BL2, BL3
14 {0, 0, 0, 0, 0, 0}, // Hall: b000
15 {0, 1, 0, 1, 0, 0}, // Hall: b001
16 {0, 0, 1, 0, 1, 0}, // Hall: b010
17 {0, 0, 1, 1, 0, 0}, // Hall: b011
18 {1, 0, 0, 0, 0, 1}, // Hall: b100
19 {0, 1, 0, 0, 0, 1}, // Hall: b101
20 {1, 0, 0, 0, 1, 0}, // Hall: b110
21 {0, 0, 0, 0, 0, 0}, // Hall: b111;
```

Şekil 2.56. Trapezoidal Komütasyon Anahtarlama Tablosu

2.8.5. Kontrol Modülünün Geliştirilmesi

Bu çalışma kapsamında hız kontrol ve akım kontrol algoritmaları geliştirilmiştir. Kontrol algoritması olarak PID kullanılmıştır. PID kontrol algoritmasının kaynak kod parçası Şekil 2.57’de verilmiştir.

```
static inline float pidCore_update(pidCore_t* const pPidCore, float setPoint, float actualValue)
{
    pPidCore->error = fabs(setPoint) - fabs(actualValue);
    // Anti Windup
    if (pPidCore->error > 0.1) {
        if (fabs(pPidCore->output - pPidCore->outputLimitMax) > 0.1) {
            pPidCore->integral = pPidCore->integral_prior + pPidCore->error * (pPidCore->iteration_time / 1000.0);
        }
    }
    else if (pPidCore->error < -0.1) {
        if (fabs(pPidCore->output - pPidCore->outputLimitMin) > 0.1) {
            pPidCore->integral = pPidCore->integral_prior + pPidCore->error * (pPidCore->iteration_time / 1000.0);
        }
    }
    pPidCore->derivative = (pPidCore->error - pPidCore->error_prior) / (pPidCore->iteration_time / 1000.0);

    pPidCore->output = pPidCore->KP * pPidCore->error + pPidCore->KI * pPidCore->integral + pPidCore->KD * pPidCore->derivative;

    pPidCore->error_prior = pPidCore->error;
    pPidCore->integral_prior = pPidCore->integral;

    if (pPidCore->output > pPidCore->outputLimitMax) {
        pPidCore->output = pPidCore->outputLimitMax;
    }
    else if (pPidCore->output < pPidCore->outputLimitMin) {
        pPidCore->output = pPidCore->outputLimitMin;
    }

    return pPidCore->output;
}
```

Şekil 2.57. PID Kontrol Algoritması Kaynak Kod Parçası

PID kontrolde sistem çıkışının referans değere ulaşamaması durumunda integral yığılması sorunu meydana gelmektedir. İntegral yığılmasının önüne geçmek için “Anti Windup” algoritması yazılmıştır. “Anti Windup” algoritmasının kaynak kod parçası Şekil 2.58’de verilmiştir.

```
// Anti Windup
if (pPidCore->error > 0.1) {
    if (fabs(pPidCore->output - pPidCore->outputLimitMax) > 0.1) {
        pPidCore->integral = pPidCore->integral_prior + pPidCore->error * (pPidCore->iteration_time / 1000.0);
    }
}
else if (pPidCore->error < -0.1) {
    if (fabs(pPidCore->output - pPidCore->outputLimitMin) > 0.1) {
        pPidCore->integral = pPidCore->integral_prior + pPidCore->error * (pPidCore->iteration_time / 1000.0);
    }
}
```

Şekil 2.58. Anti Windup Algoritması Kaynak Kod Parçası

3. TESTLER

Testlerde FAULHABER 3274-BP4 fırçasız doğru akım motorunun parametreleri kullanılmıştır. Kullanılan motorun parametre değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir. [30]

Tablo 3.1. FAULHABER 3274-BP4 Parametre Değerleri

| Parametre | Açıklama | Değer |
|-----------|--|-------------------------------|
| V_n | Nominal Gerilim | 24 V |
| R_{f-f} | 2 Faz Arası Direnç | 0,253 Ω |
| L_{f-f} | 2 Faz Arası Endüktans | 64,2 μ H |
| N_0 | Boştaki Hızı | 8820 RPM |
| I_0 | Boştaki Akımı | 0,38 A |
| N_n | Nominal Hız | 8420 RPM |
| I_n | Nominal Akım | 6,88 A |
| T_n | Nominal Yük | 0,158 Nm |
| n_{max} | Maksimum Verim | %88 |
| K_e | Zıt Elektromotor Kuvveti (BEMF) Sabiti | 2,94 mV/RPM |
| K_t | Tork Sabiti | 28,1 mNm/A |
| J | Rotor Ataleti | 48 gcm ² |
| C_0 | Statik Sürtünme Torku | 2,04 mNm |
| C_v | Dinamik Sürtünme Torku | 9,24.10 ⁻⁴ mNm/RPM |

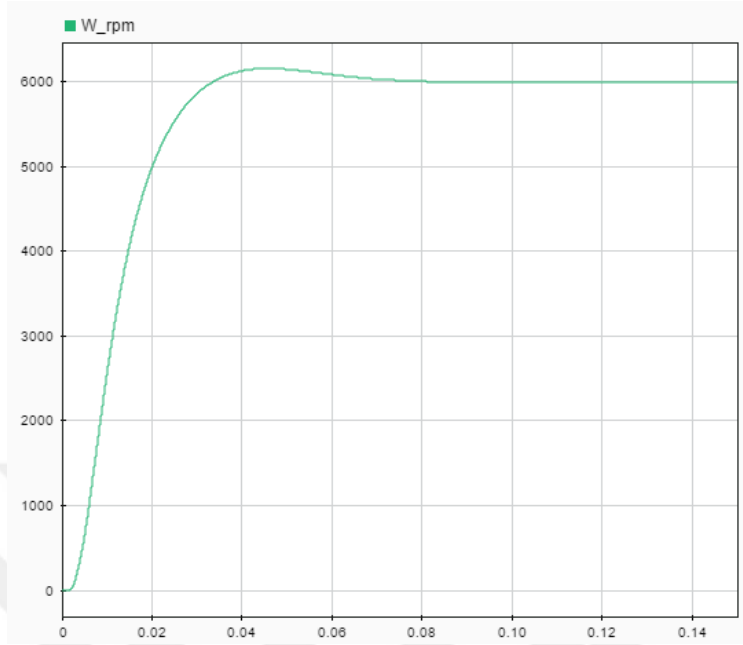
3.1. Sistem Modelleme Testleri

Tablo 3.1’de belirtilen motor parametreleri kullanılarak sistem modelleme testleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.2’de sistem modelleme testlerine ilişkin parametreler verilmiştir. Burada kontrolcü parametreleri deneysel testler ile belirlenmiştir.

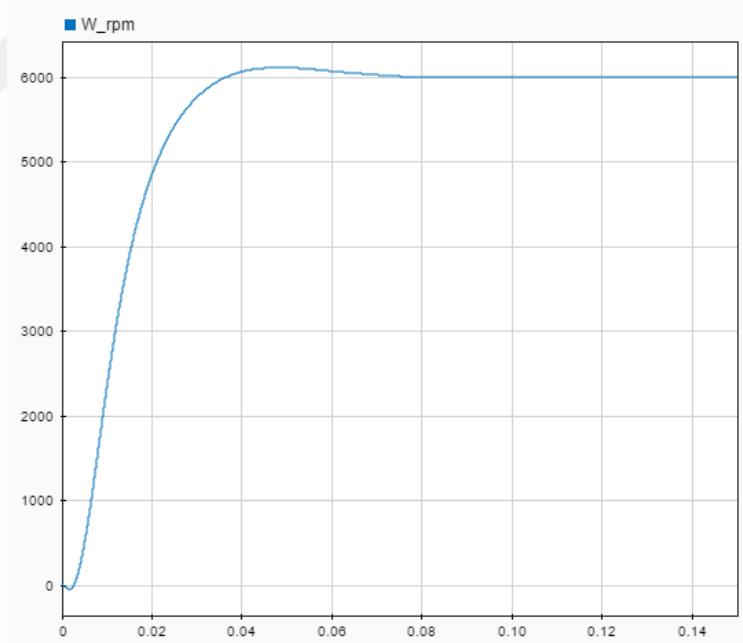
Tablo 3.2. Sistem Modelleme Test Parametreleri

| Parametre | Açıklama | Değer |
|-----------|-------------------------------|--------------------|
| V_{bus} | DA Bara Gerilimi | 24 V |
| f_{pwm} | PWM Frekansı | 20 kHz |
| K_p | PI Kontrolcü Oransal Katsayı | 5.10 ⁻³ |
| K_i | PI Kontrolcü İntegral Katsayı | 8.10 ⁻⁴ |

Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de 6000 RPM hız referansında yüksüz ve yüklü rotor hızına ilişkin grafikler verilmiştir.

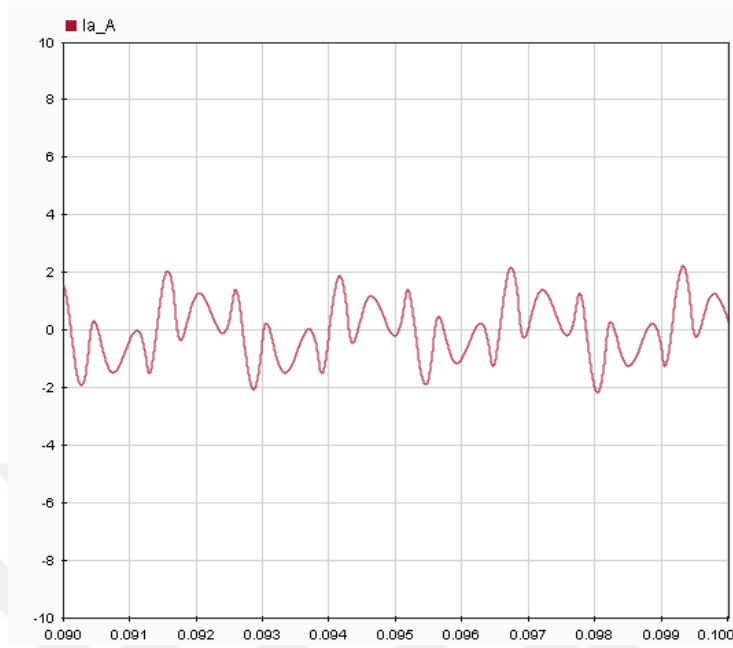


Şekil 3.1. Rotor Hızı Grafiği (Yüksüz)

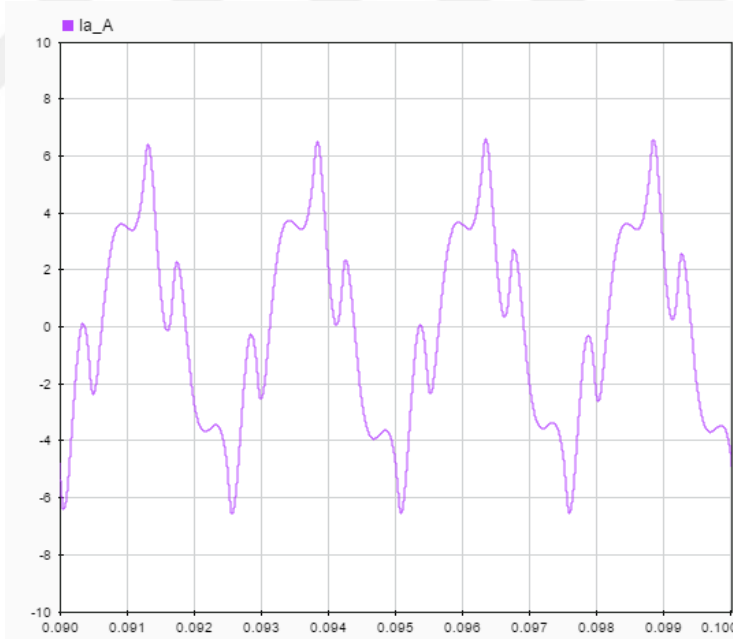


Şekil 3.2. Rotor Hızı Grafiği (Yüklü)

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te 6000 RPM hız referansında yüksüz ve yüklü A fazının akımına ilişkin grafikler verilmiştir.



Şekil 3.3. A Fazı Akımı Grafiği (Yüksüz)



Şekil 3.4. A Fazı Akımı Grafiği (Yüklü)

Sistem modelleme test sonuçlarına ilişkin değerler Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Sistem Modelleme Test Sonuçları

| Yük | Hız Ref. | Maksimum Hız | Kalıcı Hal | Maks. Akım |
|----------|----------|--------------|------------|------------|
| 0 Nm | 6000 RPM | 6154 RPM | 5994 RPM | 2,1 A |
| 0,158 Nm | 6000 RPM | 6105 RPM | 5997 RPM | 6,2 A |

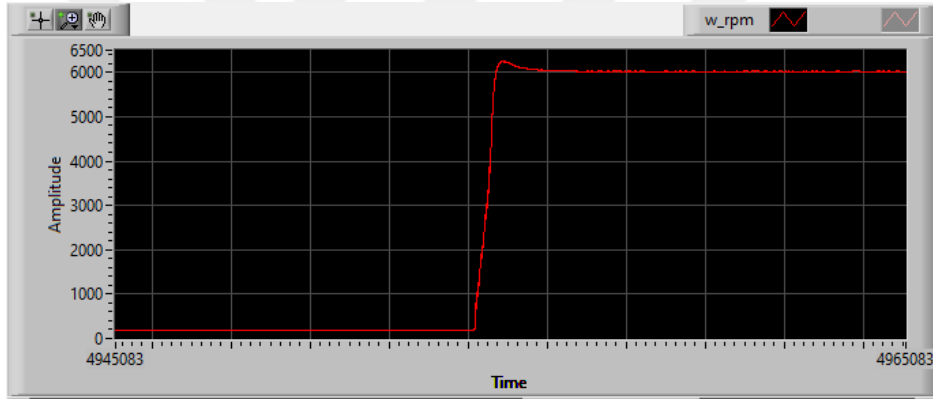
3.2. Döngüde Donanım Testleri

Tablo 3.1’de belirtilen motor parametreleri kullanılarak döngüde donanım testleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.4’te döngüde donanım testlerine ilişkin parametreler verilmiştir. Burada kontrolcü parametreleri deneysel testler ile belirlenmiştir.

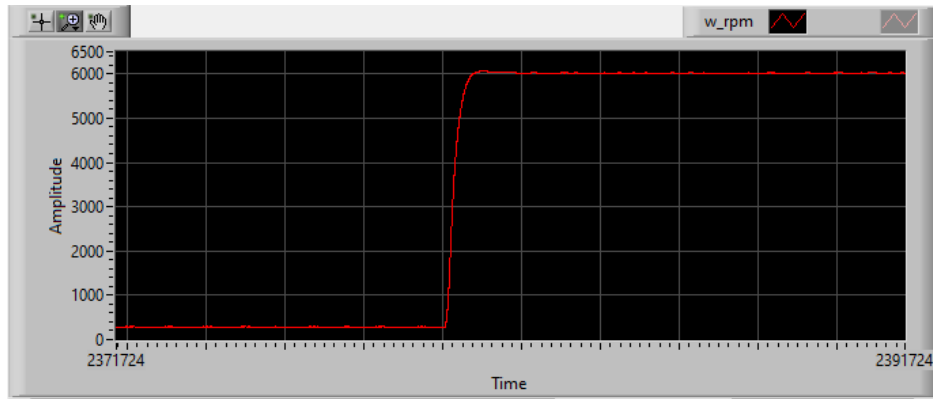
Tablo 3.4. Döngüde Donanım Test Parametreleri

| Parametre | Açıklama | Değer |
|-----------|-------------------------------|-------------------|
| V_{bus} | DA Bara Gerilimi | 24 V |
| f_{pwm} | PWM Frekansı | 20 kHz |
| K_p | PI Kontrolcü Oransal Katsayı | $5 \cdot 10^{-3}$ |
| K_i | PI Kontrolcü İntegral Katsayı | $8 \cdot 10^{-4}$ |

Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’da 6000 RPM hız referansında yüksüz ve yüklü rotor hızına ilişkin grafikler verilmiştir.

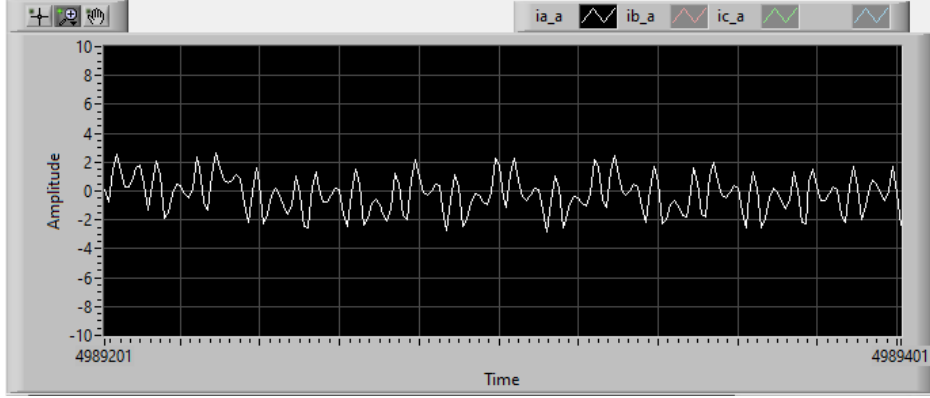


Şekil 3.5. Rotor Hızı Hız Grafiği (Yüksüz)

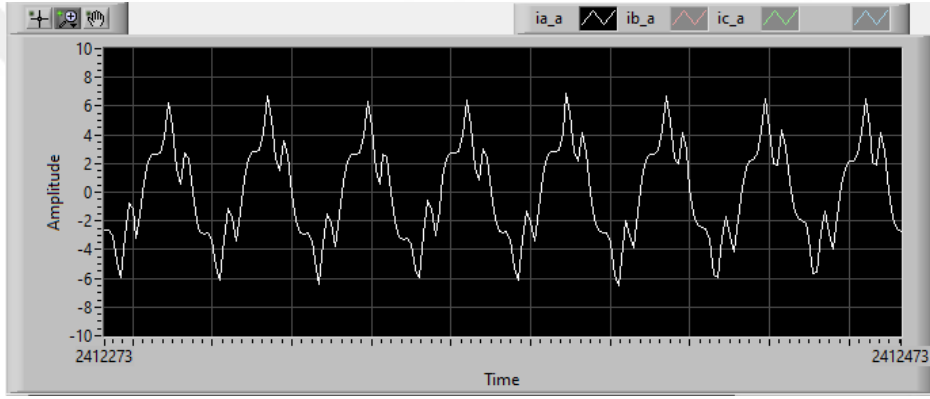


Şekil 3.6. Rotor Hızı Hız Grafiği (Yüklü)

Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de 6000 RPM hız referansında yüksüz ve yüklü A fazının akımına ilişkin grafikler verilmiştir.



Şekil 3.7. A Fazı Akımı Grafiği (Yüksüz)



Şekil 3.8. A Fazı Akımı Grafiği (Yüklü)

Döngüde donanım test sonuçlarına ilişkin değer Tablo 3.5’te verilmiştir.

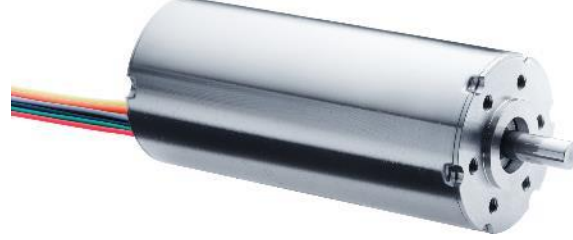
Tablo 3.5. Döngüde Donanım Test Sonuçları

| Yük | Hız Ref. | Maksimum Hız | Kalıcı Hal | Maks. Akım |
|----------|----------|--------------|------------|------------|
| 0 Nm | 6000 RPM | 6200 RPM | 6020 RPM | 2,2 A |
| 0,158 Nm | 6000 RPM | 6090 RPM | 6020 RPM | 6,5 A |

3.3. Sürücü Testleri

Sürücü testlerinde FAULHABER 3274-BP4 fırçasız doğru akım motoru kullanılmıştır.

Şekil 3.9’da kullanılan motorun görseli verilmiştir.



Şekil 3.9. FAULHABER 3274-BP4 FDAM

Kullanılan motorun parametre değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Sürücü testleri kapsamında kullanılan test altyapısına ilişkin bilgiler Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6. Test Altyapısı

| | |
|-----------------|-----------------|
| Giriş Gerilimi | 24V |
| Komütasyon Modu | Trapezoidal PWM |
| Geri Besleme | Hall Sensör |
| Kontrol Türü | Hız |
| Osiloskop | RIGOL DS1054Z |
| Multimetre | UNIT UT33A+ |

Sürücü testlerine ilişkin parametre değerleri Tablo 3.7’de verilmiştir. Burada kontrolcü parametreleri deneysel testler ile belirlenmiştir.

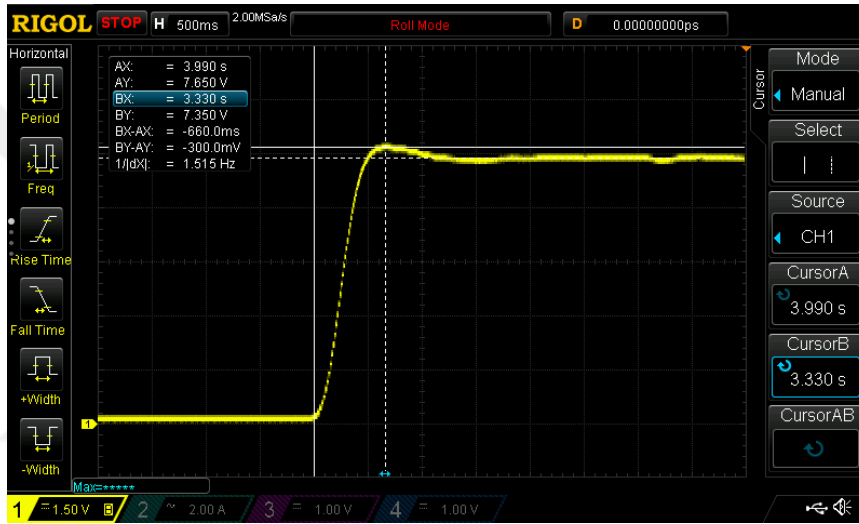
Tablo 3.7. Sürücü Test Parametreleri

| Parametre | Açıklama | Değer |
|-----------|-------------------------------|-------------------|
| V_{bus} | DA Bara Gerilimi | 24 V |
| f_{pwm} | PWM Frekansı | 20 kHz |
| K_p | PI Kontrolcü Oransal Katsayı | $5 \cdot 10^{-3}$ |
| K_i | PI Kontrolcü İntegral Katsayı | $8 \cdot 10^{-4}$ |

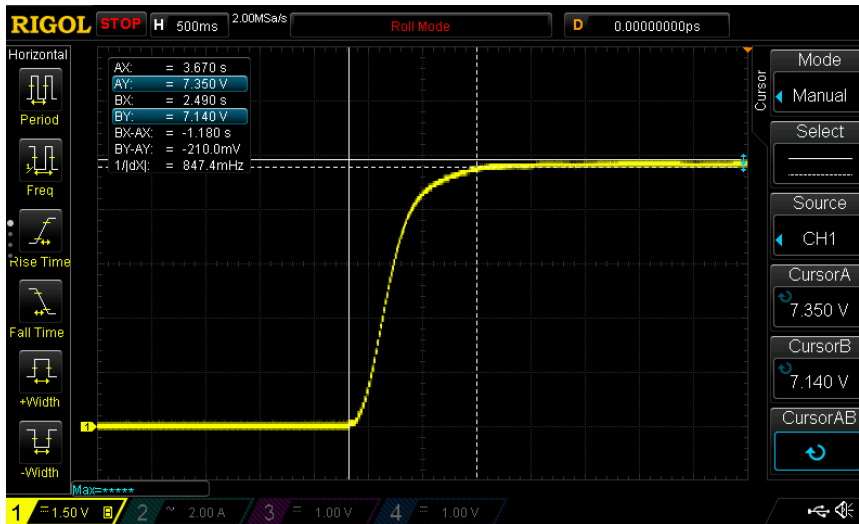
Hall sensörlerden alınan bir kare dalga sinyal frekansı bir sayıcı ve analog dijital dönüştürücü devre yardımıyla analog sinyale dönüştürülmüştür. Bu analog sinyal osiloskop ile ölçülerek rotor hızı grafiği elde edilmiştir.

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de 6000 RPM hız referansında yüksüz ve yüklü rotor hızına ilişkin grafikler verilmiştir. Ölçüm kanalına ait bilgiler aşağıdaki gibidir.

- Kanal Adı : 1. Kanal (Sarı)
- X Ekseni : 500 ms/div
- Y Ekseni : 1.5 V/div
- Hız/Gerilim : 750 RPM/V



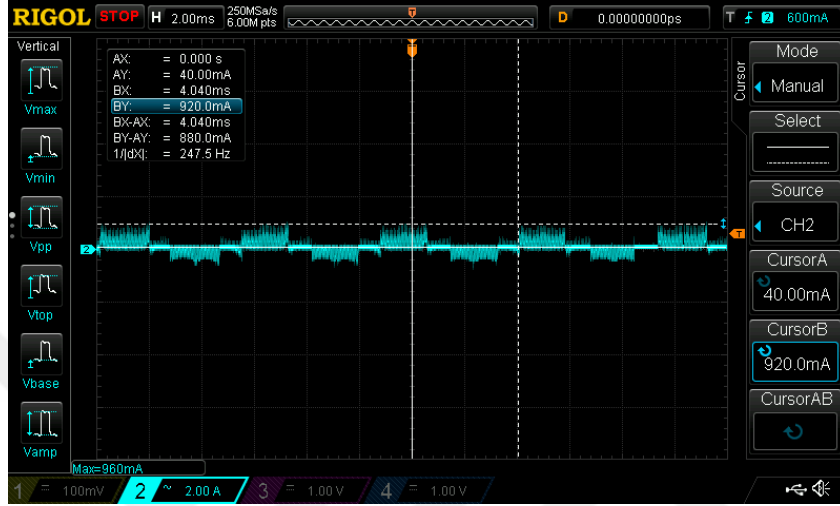
Şekil 3.10. Rotor Hız Grafiği (Yüksüz)



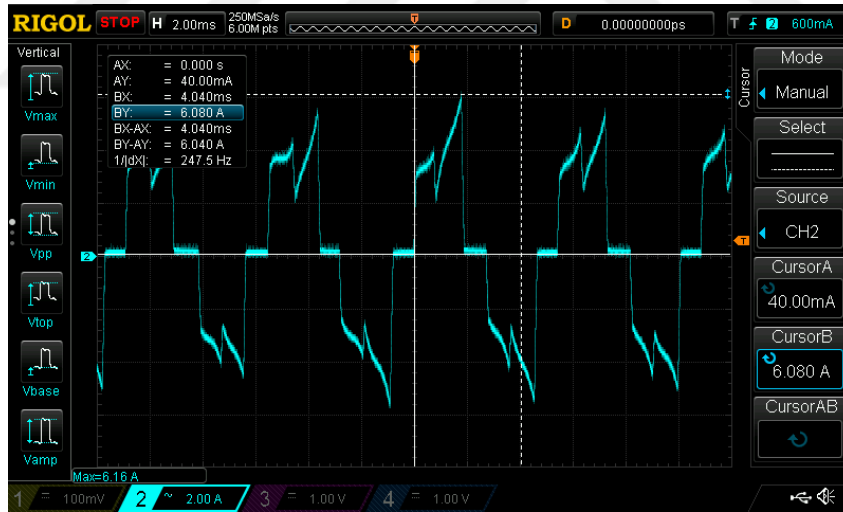
Şekil 3.11. Rotor Hız Grafiği (Yüklü)

Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te 6000 RPM hız referansında yüksüz ve yüklü A fazının akımına ilişkin grafikler verilmiştir. Ölçüm kanalına ait bilgiler aşağıdaki gibidir.

- Kanal Adı : 2. Kanal (Mavi)
- X Ekseni : 2 ms/div
- Y Ekseni : 2 A/div



Şekil 3.12. A Faz Akımı Grafiği (Yüksüz)



Şekil 3.13. A Faz Akımı Grafiği (Yüklü)

Sürücü test sonuçlarına ilişkin değer Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8. Sürücü Test Sonuçları

| Yük | Hız Ref. | Maksimum Hız | Kalıcı Hal | Maks. Akım |
|------|----------|--------------|------------|------------|
| 0 Nm | 6000 RPM | 6185 RPM | 6030 RPM | 2,1 A |
| Yük* | 6000 RPM | 6010 RPM | 5950 RPM | 6,1 A |

*Uygun hassasiyete sahip tork sensörü altyapısı bulunmadığından dolayı yük ölçümü bulunmamaktadır. Deneysel olarak yükleme gerçekleştirilmiştir.

3.4. Test Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu çalışmada FAULHABER 3274-BP4 fırçasız doğru akım motorunun sistem modelleme, döngüde donanım ve sürücü testleri yapılmıştır. Tablo 3.9'da test sonuçlarının karşılaştırması ve değerlendirme sonuçları verilmiştir.

Tablo 3.9. Test Sonuçlarının Karşılaştırılması

| Parametre | Sistem Modelleme Testleri | Döngüde Donanım Testleri | Sürücü Testleri | Değerlendirme (Sürücü Testlerine Göre) |
|---|----------------------------------|---------------------------------|------------------------|---|
| Maksimum Rotor Hızı (0 Nm Yük) | 6154 RPM | 6200 RPM | 6185 RPM | %0,50 Sapma |
| Maksimum Rotor Hızı (0,158 Nm Yük) | 6105 RPM | 6090 RPM | 6010 RPM | %1,58 Sapma |
| Maksimum A Fazı Akımı (0 Nm Yük) | 2,1 A | 2,2 A | 2,1 A | %4,76 Sapma |
| Maksimum A Fazı Akımı (0,158 Nm Yük) | 6,2 A | 6,5 A | 6,1 A | %1,64 Sapma |

4. SONUÇ

Bu çalışmada ARM mikrodenetleyici tabanlı fırçasız doğru akım motor sürücüsü tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Tasarım ve gerçekleştirme çalışmalarına ek olarak MATLAB&Simulink R2017B ortamında sistem modelleme ve NI LabVIEW 2021 ortamında NI myRIO 1900 RT FPGA tabanlı döngüde donanım sistemi çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen test verileri karşılaştırılarak değerlendirme yapılmıştır. Değerlendirme sonucuna göre sistem modelleme ve döngüde donanım test verileri ile sürücü test verileri arasındaki sapmanın %0,50 ile %4,76 arasında olduğu görülmüştür.

Çalışmalar sonucunda fırçasız elektrik motorlarının modellenmesi, fırçasız elektrik motoru sürücüleri ve kontrol algoritmaları, döngüde donanım sistemleri, güç elektroniği devre tasarımı, gömülü yazılım geliştirme vb. çeşitli alanlarda tecrübe ve alt yapı edinilmiştir.

Edinilen bu tecrübe ve altyapı ile gelecekte farklı tipte ve büyüklükte elektrik motorları için benzer çalışmaların yapılması, sapma oranının düşürülmesi konusunda yeni çözümlerin ortaya konulması planlanmaktadır.

Kullanılan ölçüm cihazlarının kalibrasyon sertifikaları Ek 1 ve Ek 2’de verilmiştir.

KAYNAKLAR



- [1] Simpkins C. (2010). Position estimation and control of compact BLDC motors based on analog linear hall effect sensors. American Control Conference, 30.06.2010, Baltimore/USA.
- [2] Gençer, Ç., Gedikpınar, M. (2006). Modelling and Simulation of BLDCM Using MATLAB/SIMULINK. Journal of Applied Sciences, 6(3), 688-691.
- [3] Bahadır, A., Aydoğdu, Ö. (2021). DSP Tabanlı Fırçasız Doğru Akım Motorunun Bulanık Mantık ile Kontrolü. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 23, 427-434.
- [4] Murali, M., Arulmozhiyal, R. (2021). Investigation on Modeling and Simulation BLDC Motor Fed Universal Actuation System. International Journal of Numerical Methods for Calculation and Design in Engineering (RIMNI), 37(1).
- [5] Gökdekoğlu, H. (2007). Fırçasız Doğru Akım Motoru Konum Kontrolörü Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- [6] Mousmi, A, Abbou, A., Houm, Y. (2017). Trapezoidal Control of Brushless DC Motor based on DSP F28335. International Conference on Wireless Technologies. 19-20.04.2017. Fez/Morocco.
- [7] Mahmud, M., Motakabber, S. M. A, Zahirul Alam, A. H. M., Nordin, A.N. (2020). Control BLDC Motor Speed using PID Controller. International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), 11(3), 477-481.
- [8] MOHAN, N., UNDELAND, T. M., ROBBINS, W. P., 2014. Güç Elektroniği. İstanbul: Literatür Yayıncılık.
- [9] Lee, S., Lemley, T. (2009). A comparison study of the commutation methods for the three-phase permanent magnet brushless DC motor. Electrical Manufacturing Technical Conference. 09.20.2009-10.01.2009, Nashville/USA
- [10] Topal, M. (2019) Fırçasız Doğru Akım Motorunun Üç Farklı Yöntemle Hız Kontrolü Ve Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 30.
- [11] Anwar M. N., Pan, S. (2013). Synthesis of The PID Controller Using Desired Closed-Loop Response. 10th IFAC International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, 46(32), 385-390.
- [12] Tabak, A. (2020). Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Hız Kontrolünü

- Gerçekleştirmek İçin PID/PD Kontrolcü Tasarımı ve Performans İncelemesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 1(19), 145-155.
- [13] Zhang, Y., Zhang, L., Dong, Z. (2019). An MEA-Tuning Method for Design of the PID Controller. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 1-11.
- [14] Liu, G., Chen, B., Song, X. (2019). High-Precision Speed and Position Estimation Based on Hall Vector Frequency Tracking for PMSM With Bipolar Hall-Effect Sensors. *IEEE Sensors Journal*, 19(6), 2347-2355.
- [15] Kim, Y. S. (2021). Modeling and Simulation Technique of Brushless DC Motor for Phase Control by Operation Mode. *International Journal of Mechanical Engineering*, 6(3), 774-780.
- [16] Sun, J., Cao, G., Huang, S., Qiu, H. (2016). Software-Based Resolver-to-Digital Converter Using the PLL Tracking Algorithm. 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 19-22.08.2016, Xian/China.
- [17] Gaddekar, K., Joshi, S., Mehta, H. (2020). Performance Improvement in BLDC Motor Drive Using Self-Tuning PID Controller, Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA), 15-17.07.2020, Coimbatore/India.
- [18] Nandini, D., Daniel, J. J. (2017). Modelling of BLDC Motor Driven Solar Water Pump With INC-MPPT in MATLAB. International Conference on circuits Power and Computing Technologies (ICCPCT), 20-21.04.2017, Kollam/India.
- [19] Nikam, A.D., Jadhav, H.T. (2019). Modelling & Simulation of Three Phases BLDC Motor for Electric Braking. 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT), 05-06.07.2019, Kannur/India.
- [20] Bakker, C., Cox, B., Snover, B., Sirota A. (2012). The Implementation of a Motor Simulator for the Development of the Europa Lander Motor Controller. IEEE Aerospace Conference, 07.06.2021, Big Sky/USA.
- [21] Bolun, W., Tao, Z., Zhengjin, S., Hualiang, Z., Feng, X., Zihong, L. (2021). A method for Rapid Deployment of Brushless DC Motor Servo System Model Based on FPGA. 6th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE), 15-17.06.2021, Dalian/China.
- [22] Giridharan K., Chitra, A., Vanishree, J., Sultana, R. W. (2012). Simulation and

- FPGA Modeling of a Virtual BLDC Motor. International Review on Modelling and Simulations (I.RE.MO.S.), 06.2021, 5(3), 1282-1288.
- [23] Kielan, P., Mazur, D., Szklarz, A. (2017). BLDC motor control in HiL configuration with the use of Matlab/Simulink Software and PLC. Przegląd Elektrotechniczny, 06.2017, 1(6), 7-10.
- [24] Jiang D., Ning P., Lai R., Fang Z., Wang F. (2018). Modular design method for motor drives. Chinese Journal of Electrical Engineering, 4(1), 1-10.
- [25] Lee M., Baek M., Lee J., Chung D. (2018). A new smallest 1200V intelligent power module for three phases motor drives. The International Power Electronics Conference, 20.05.2018, Seoul/Korea.
- [26] FUJI Electric 6MBP35XSF060-50 IGBT Module Datasheet, 03.2016. <https://felib.fujielectric.co.jp/download/details.htm?dataid=17022373&site=global&lang=en>, 04.02.2021
- [27] Özer, T., Kırarak, S., Oğuz, Y., Kelek M. M., Karaca, A. (2021). DsPic33fj32mc204 Mikroişlemci Tabanlı Hall Sensörlü Fırçasız Doğru Akım Motor Sürücüsü Tasarımı ve Proteus Simülasyon Uygulaması. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21, 820-828.
- [28] Dong, Q., Chu Z. (2021). Brushless DC Motor Driver based on SA306A Integrated Switching Amplifier. 6th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE), 15-17.06.2021, Dalian/China.
- [29] Wang, S., Guo, W., Dun, W. (2015). The Drive Design of the STM32-based Brushless DC Motor. International Symposium on Computers and Informatics (ISCI), 17-18.01.2015, Beijing/China
- [30] FAULHABER Brushless DC-Servomotors Series 3274-BP4 Datasheet, 11.02.2021. www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/EN_3274_BP4_DFF.pdf, 04.02.2021.

EKLER

Ek 1 Osiloskop Kalibrasyon Sertifikası

| | | | |
|--|-----------------------------------|---|--|
| SİMKA | | SİMKA Kalibrasyon ve Danışmanlık Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi |  Kalibrasyon TS EN ISO/IEC 17025 AB-0003-K |
| Kalibrasyon Sertifikası Certificate of Calibration | | AB-0003-K | 2021E2622 |
| Sayfa No : 1 / 4 Page Number | | 11-21 | |
| Cihazın Sahibi/Adresi : BİLAL İMREN Customer/Address | | | |
| | | PENDİK / İSTANBUL | |
| İstek Numarası Order No | : 202105029 | | |
| Makine / Cihaz Instrument / Device | : OSİLOSKOP Oscilloscope | | |
| İmalatçı Manufacturer | : RIGOL | | |
| Tip Type | : DS1054Z | | |
| Seri Numarası Serial Number | : DS1ZA200300970 | Envanter No Inventory Number | : |
| Kalibrasyon Tarihi Date of Calibration | : 18/11/2021 | Bölüm/ Masraf Yeri Division | : |
| Sertifikanın Sayfa Sayısı Number Of Pages | : 4 | Simkal Kodu Simkal Code | : LIW1363001 |
| Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde(SI) tanımlanmış birimleri realize eden ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliğini belgeler. This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the unit of measurement according to the International System of Units (SI). | | | |
| Kalibrasyon laboratuvarı olarak faaliyet gösteren SİMKA, TÜRKAK'tan AB-0003-K ile TS EN ISO / IEC 17025:2017 standardına göre akredite edilmiştir. Simkal accredited by TÜRKAK under registration number AB-0003-K for TS EN ISO/IEC 17025:2017 as "Calibration Laboratory" Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) kalibrasyon sertifikalarının tanınırlığı konusunda Avrupa Akreditasyon Birliği (EA) ile Çok Taraflı Anlaşma (MLA) ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği (ILAC) ile karşılıklı tanıma antlaşmasını (MRA) imzalamıştır. The Turkish Accreditation Agency (TURKAK) is a signatory to the European co-operation for the Accreditation (EA) Multilateral Agreement (MLA) and to the International Laboratory Accreditation (ILAC) Mutual Recognition Arrangement (MRA) for the recognition of calibration certificates. | | | |
| Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan takip eden sayfalarda verilmiştir. The measurements, uncertainties with confidence probability and calibrations methods are given on the following pages which are part of this certificate. | | | |
| Kaşe Seal | Yayımlandığı Tarih Date | Kalibrasyonu Yapan Calibrated By | Onaylayan/ Approval Tarih / Date |
|  | 18/11/2021 | Tekniker Ufuk Çelik | 18/11/2021 Elektrik Yüksek Mühendisi Hanife URAL |

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçerli değildir.

This certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.



SİMKAL Kalibrasyon ve Danışmanlık
Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi

AB-0003-K

2021E2622

11-21

Sayfa No: 2 / 4 Makine Cihaz : OSİLOSKOP
Page Number Instrument/Device : Oscilloscope
Tipi / Type : DS1054Z
Marka / Mark : RIGOL
Seri No / Serial Number : DS1ZA200300970
Env. No / Inv. Number :
Simkal Kodu / Code : LIW1363001 / 136333

Kalibrasyonda kullanılan referanslar(izlenebilirlik):

References used in calibration(Traceability)

| CİHAZ Device | MARKA Mark | MODEL/TİP Type | SERİ NO Serial Num. | SERTİFİKA NO Certificate Number | KAL. TARİH Cal Date | G.K. TARH Next Cal Date |
|----------------------|---------------|-------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------|----------------------------|
| KALİBRATÖR | FLUKE | 5502A | 2392801 | 2021E0873 | 21/04/2021 | 2022/04 |
| COUNTER | HP | 5335A | 2626A 11563 | 2021E0960 | 29/04/2021 | 2022/04 |
| RB.FREKANS STANDARDI | SYMMETRICOM | 8040C | 612013518 | UME.G1ZF-0127 | 03/12/2018 | 2023/12 |
| REFERENCE MULTIMETER | FLUKE | 8508A | 932654016 | UME.GILV-093 | 13/04/2021 | 2022/04 |

SİMKAL Elektrik/Sıcaklık Kalibrasyon Çevre Şartları: Sıcaklık: (23±2)°C/(23±3)°C Nem: (50±20) %Rh Ölçüm Şartları:
Environmental conditions Temperature Humidity Measurement Conditions
Ölçüm Belirsizliği: Beyon edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği standart belirsizliğinin, k=2 olarak alınan genişletme katsayısı ile çarpımı
Measurements Uncertainty sonucu bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır. Belirsizlikler ölçüm değerleri sayfasında verilmiştir.
The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2 which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%. The uncertainties are given on the measurement data pages.
Uygunluk Beyanı: Değerlendirme kullanıcıya bırakılmıştır / Assessment has been left to the user
Statement of Compliance
Karar Kuralı: Uygunluk beyanında, ölçüm belirsizliğinin nasıl hesaba katılacağına açıklayan kural.
Decision Rule Talep edilmesi durumunda, Kalibrasyon sonuçlarının değerlendirilmesi, ILAC-G8 rehberine uygun olarak yapılır.
On statement of compliance, the rule that defines how measurement uncertainty will be taken into account.
On request the calibration results are evaluated according to ILAC-G8 guide

Tavsiye Edilen Gelecek Kalibrasyon Tarihi: Cihazın uygun periyotlarda kalibrasyonundan kullanıcı sorumludur.
Recommened Next Calibration Date The user is obligated to have the instrument recalibrated at appropriate intervals
Feragat Beyanı: Müşterinin verdiği bilgilerin, sonuçların geçerliliğini etkilemesi durumunda, bundan müşteri sorumlu olur.
Abnegation of Compliance In the case where the information provided by the customer effects the validity of the the results, the customer is responsible.
Açıklamalar / Cihazın bulunduğu yer:
Remarks / Place

"# işaretli ölçümler akreditasyon kapsam dışıdır. Kalibrasyon sonuçları, sertifika seri no ve simkal kodu ile belirtilen cihaza ekipmana. Kalibrasyon tarihinden itibaren sertifikada belirtilen şartlar altında geçerlidir.
"# marked measurements are out of the scope of accreditation. The calibration results are related to instrument/device which serial number and Simkal code are given in the certificate. The results are valid for under environmental conditions stated in the certificate beginning from the calibration date.

Cihazın Laboratuvara Kabul Tarihi: / Date of Receipt Of Device :
Kalibrasyon Yöntemi: Cihazın kalibrasyonu, "Kalibrasyon Prosedürü" bölümünde isimleri belirtilen prosedürlere uygun şekilde yapılmıştır.
Calibration Method Kalibratörler ve test edilen cihazın ısınma sürelerine dikkat edilir.
The warm up times of the calibrator and the device under test are taken care.
Kalibrasyon Etiketinin Yeri: Kalibrasyon etiketinin yeri, cihazın önünde veya üstünde uygun ve görünür bir yüzeyindedir.
Placement of Calibration Label Placement of the calibration label is on the top or front of the device which is a visible and conformable surface.

Kalibrasyon Prosedürü / Calibration Procedure:

| KOD / Code | ADI / Name | Ölçme Bölgesi / Measurement Range |
|------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| KPE 03.03 | Osiloskop Kalibrasyonu | 5 mV - 105 V p-p, 2 ns-5 s, 990 MHz |
| KPE 03.05 | AC Gerilim Kaynaklarının Kalibrasyonu | 1 mV - 1000 V, 1 Hz-1 MHz |
| KPE 12.02 | Frekans/Periyot Ölçümü Kalibrasyonu | 1 Hz - 18 GHz |

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen çoğaltılamaz. İmzasız ve mührsüz sertifikalar geçerli değildir.
This certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.



SİMKAL Kalibrasyon ve Danışmanlık
Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi

AB-0003-K

2021E2622

11-21

Makine / Cihaz : OSİLOSKOP
Instrument / Device : Oscilloscope
Tipi / Type : DS1054Z
Marka / Mark : RIGOL

Seri No / Serial Number : DS1ZA200300970
Env .No/ Inv Number :
Sımkal Kodu / Code : LIW1363001

Sayfa No: 3 / 4
Page Number

KALİBRASYON ÖLÇME DEĞERLERİ
Calibration Measurement Values

| Kademe Değeri Amplitude | Uygulanan Değer Applied Value | Ölç. Değer CH1 Meas Value CH1 | Ölç. Değer CH2 Meas Value CH2 | Belirsizlik Uncertainty | | | |
|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|--|--|--|
| | | % Hata/Error | % Hata/Error | % | | | |
| 1mV/Div. | 1mV x 6 Div. | 0,1 | 0,3 | 2,0 | | | |
| 2mV/Div. | 2mV x 6 Div. | -0,2 | 0,1 | 1,2 | | | |
| 5mV/Div. | 5mV x 6 Div. | 0,0 | 0,1 | 0,7 | | | |
| 10mV/Div. | 10mV x 6 Div. | -0,1 | 0,0 | 0,5 | | | |
| 20mV/Div. | 20mV x 6 Div. | -0,1 | 0,0 | 0,4 | | | |
| 50mV/Div. | 50mV x 6 Div. | -0,2 | -0,2 | 0,4 | | | |
| 0,1V/Div. | 0,1V x 6 Div. | -0,6 | -1,3 | 0,4 | | | |
| 0,2V/Div. | 0,2V x 6 Div. | -0,1 | -0,4 | 0,3 | | | |
| 0,5V/Div. | 0,5V x 6 Div. | -0,2 | -0,1 | 0,3 | | | |
| 1V/Div. | 1V x 6 Div. | 0,0 | -0,2 | 0,3 | | | |
| 2V/Div. | 2V x 6 Div. | 0,0 | -0,1 | 0,3 | | | |
| 5V/Div. | 5V x 6 Div. | -0,8 | -1,3 | 0,3 | | | |
| Time Base | Time Base | Time Base A | | % | | | |
| | | %Hata/Error | | | | | |
| 5ns/Div. | 5ns/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 10ns/Div. | 10ns/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 20ns/Div. | 20ns/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 50ns/Div. | 50ns/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 0,1µs/Div. | 0,1µs/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 0,2µs/Div. | 0,2µs/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 0,5µs/Div. | 0,5µs/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 1µs/Div. | 1µs/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 2µs/Div. | 2µs/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 5µs/Div. | 5µs/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 10µs/Div. | 10µs/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 20µs/Div. | 20µs/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 50µs/Div. | 50µs/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 0,1ms/Div. | 0,1ms/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 0,2ms/Div. | 0,2ms/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 0,5ms/Div. | 0,5ms/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 1ms/Div. | 1ms/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 2ms/Div. | 2ms/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 5ms/Div. | 5ms/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 10ms/Div. | 10ms/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 20ms/Div. | 20ms/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 50ms/Div. | 50ms/Div.x8 | 0,0 | | 0,1 | | | |
| 0,1s/Div. | 0,1s/Div.x8 | 0,0 | | 0,2 | | | |
| 0,2s/Div. | 0,2s/Div.x8 | 0,0 | | 0,2 | | | |
| 0,5s/Div. | 0,5s/Div.x8 | 0,0 | | 0,2 | | | |
| 1s/Div. | 1s/Div.x8 | 0,0 | | 0,7 | | | |
| 2s/Div. | 2s/Div.x8 | 0,0 | | 0,7 | | | |
| 5s/Div. | 5s/Div.x8 | 0,0 | | 0,7 | | | |

AÇIKLAMALAR :
Remarks

- ✓ : Toleransları İçinde Inside of the Tolerance
X : Toleransları Dışında Out of the Tolerance
- : Test Edilmedi Not Tested
* Arızalı Out of order
: Akreditasyon Kapsam Dışı / Out of the scope of the accreditation
Y : Yorumuz Without Comment
- Ölçümlerde değerlendirilmemiş ise kalibrasyon sonuçlarının değerlendirilmesi kullanıcı tarafından yapılır.
If the measurement values are not evaluated, the calibration results are evaluated by user.

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçerli değildir.
This certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.



SiMKAL Kalibrasyon ve Danışmanlık
Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi

AB-0003-K

2021E2622

11-21

Makine / Cihaz : OSİLOSKOP
Instrument / Device : Oscilloscope
Tipi / Type : DS1054Z
Marka / Mark : RIGOL

Seri No / Serial Number : DS1ZA200300970
Env .No/ Inv Number :
Simkal Kodu / Code : LIW1363001

Sayfa No: 4 / 4
Page Number

KALİBRASYON ÖLÇME DEĞERLERİ
Calibration Measurement Values

| Kademe | Cihaz Nom. Değ. | Ölç. Değer CH1 | Ölç. Değer CH2 | Belirsizlik | | |
|----------------|------------------|-----------------|-----------------|-------------|--|--|
| Range | Equip Nor. Value | Meas. Value CH1 | Meas. Value CH2 | Uncertainty | | |
| BW Amp:30 mVpp | MHz | MHz | MHz | | | |
| Band Width | 50 | 112 | 113 | %5 | | |
| BW Limit | 20 | 26 | 26 | %5 | | |
| Rise Time ns | 7 ns | 4 ns | 4 ns | (%2+0,2 ns) | | |
| | | | | | | |
| Kademe Değeri | Uygulanan Değer | Ölç. Değer CH3 | Ölç. Değer CH4 | Belirsizlik | | |
| Amplitude | Applied Value | Meas. Value CH3 | Meas. Value CH4 | Uncertainty | | |
| | | % Hata/Error | % Hata/Error | % | | |
| 1mV/Div. | 1mV x 6 Div. | 0,0 | -1,3 | 2,0 | | |
| 2mV/Div. | 2mV x 6 Div. | 0,0 | -1,2 | 1,2 | | |
| 5mV/Div. | 5mV x 6 Div. | -0,1 | -0,8 | 0,7 | | |
| 10mV/Div. | 10mV x 6 Div. | 0,0 | -1,2 | 0,5 | | |
| 20mV/Div. | 20mV x 6 Div. | 0,0 | -1,2 | 0,4 | | |
| 50mV/Div. | 50mV x 6 Div. | 0,0 | -1,2 | 0,4 | | |
| 0,1V/Div. | 0,1V x 6 Div. | -1,0 | -1,3 | 0,3 | | |
| 0,2V/Div. | 0,2V x 6 Div. | -1,0 | -1,1 | 0,3 | | |
| 0,5V/Div. | 0,5V x 6 Div. | 0,0 | -1,1 | 0,3 | | |
| 1V/Div. | 1V x 6 Div. | 0,0 | -1,3 | 0,3 | | |
| 2V/Div. | 2V x 6 Div. | 0,0 | -1,6 | 0,3 | | |
| 5V/Div. | 5V x 6 Div. | -1,5 | -1,7 | 0,3 | | |
| Kademe | Cihaz Nom. Değ. | Ölç. Değer CH3 | Ölç. Değer CH4 | | | |
| Range | Equip Nor. Value | Meas. Value CH3 | Meas. Value CH4 | | | |
| BW Amp:30 mVpp | MHz | MHz | MHz | | | |
| Band Width | 50 | 112 | 111 | %5 | | |
| BW Limit | 20 | 26 | 26 | %5 | | |
| Rise Time ns | 7 ns | 4 ns | 4 ns | (%2+0,2 ns) | | |
| | | | | | | |
| Probe | | 2,974 Vpp | | 0,003 Vpp | | |
| Comp. | Square | 1,0000 kHz | | 0,0002 kHz | | |




AÇIKLAMALAR :
Remarks

✓ : Toleransları İçinde X : Toleransları Dışında - : Test Edilmedi * : Arızalı
Inside of the Tolerance Out of the Tolerance Not Tested Out of order
: Akreditasyon Kapsam Dışı / Out of the scope of the accreditation Y : Yorumuzuz
Without Comment

Ölçümlerde değerlendirme yapılmamış ise kalibrasyon sonuçlarının değerlendirilmesi kullanıcı tarafından yapılır.
If the measurement values are not evaluated, the calibration results are evaluated by user.

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçerli değildir.
This certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

Ek 2 Multimetre Kalibrasyon Sertifikası

| | | | |
|---|---|--|--|
|  | SİMKAL Kalibrasyon ve Danışmanlık Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi Sanayi Mahallesi, Teknopark Bulvarı No: 1/8A , KAT -1, 8B01-8B04 İstanbul Pendik İstanbul / Türkiye | |  Kalibrasyon TS EN ISO/IEC 17025 AB-0003-K |
| | Kalibrasyon Sertifikası Certificate of Calibration | | |
| Sayfa No : 1 / 4 Page Number | | | |
| Cihazın Sahibi/Adresi Customer/Address | : BİLAL İMREN PENDİK / İSTANBUL | | |
| İstek Numarası Order No | : 202105029 | | |
| Makine / Cihaz Instrument / Device | : MULTİMETRE Multimeter | | |
| İmalatçı Manufacturer | : UNI-T | | |
| Tip Type | : UT33A+ | | |
| Seri Numarası Serial Number | : C180693518 | Envanter No Inventory Number | : |
| Kalibrasyon Tarihi Date of Calibration | : 18/11/2021 | Bölüm/ Masraf Yeri Division | : |
| Sertifikanın Sayfa Sayısı Number Of Pages | : 4 | Simkal Kodu Simkal Code | : LIW1309001 |
| Bu kalibrasyon sertifikası, Uluslararası Birimler Sisteminde(SI) tanımlanmış birimleri realize eden ulusal ölçüm standartlarına izlenebilirliğini belgeler. This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the unit of measurement according to the International System of Units (SI). | | | |
| Kalibrasyon laboratuvarı olarak faaliyet gösteren SİMKAL, TÜRKAK'tan AB-0003-K ile TS EN ISO / IEC 17025:2017 standardına göre akredite edilmiştir. Simkal accredited by TÜRKAK under registration number AB-0003-K for TS EN ISO/IEC 17025:2017 as "Calibration Laboratory" Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) kalibrasyon sertifikalarının tanınırlığı konusunda Avrupa Akreditasyon Birliği (EA) ile Çok Taraflı Anlaşma (MLA) ve Uluslararası Laboratuvar Akreditasyon Birliği (ILAC) ile karşılıklı tanınma anlaşmasını (MRA) imzalamıştır. The Turkish Accreditation Agency (TURKAK) is a signatory to the European co-operation for the Accreditation (EA) Multilateral Agreement (MLA) and to the International Laboratory Accreditation (ILAC) Mutual Recognition Arrangement (MRA) for the recognition of calibration certificates. | | | |
| Ölçüm sonuçları, genişletilmiş ölçüm belirsizlikleri ve kalibrasyon metodları bu sertifikanın tamamlayıcı kısmı olan takip eden sayfalarda verilmiştir. The measurements, uncertainties with confidence probability and calibrations methods are given on the following pages which are part of this certificate. | | | |
| Kaşe Seal | Yayımlandığı Tarih Date | Kalibrasyonu Yapan Calibrated By | Onaylayan/ Approval Tarih / Date |
|  | 18/11/2021 | Tekniker Ufuk Çelik | 18/11/2021 Elektrik Yüksek Mühendisi Hanife URAL |

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçerli değildir.

This certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.



SİMKAL Kalibrasyon ve Danışmanlık
Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi

AB-0003-K

2021E2624

11-21

Sayfa No: 2 / 4 Makine Cihaz : MULTİMETRE
Instrument/Device : Multimeter
Page Number : 2 / 4 Tipi / Type : UT33A+
Marka / Mark : UNI-T
Seri No / Serial Number : C180693518
Env. No / Inv. Number :
Simkal Kodu / Code : L1W1309001 / 130917

Kalibrasyonda kullanılan referanslar(izlenebilirlik):

References used in calibration(Traceability)

| CİHAZ Device | MARKA Mark | MODEL/TİP Type | SERİ NO Serial Num. | SERTİFİKA NO Certificate Number | KAL. TARİH Cal Date | G.K. TARİH Next Cal Date |
|-----------------|---------------|-------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| KALİBRATÖR | FLUKE | 5502A | 2392801 | 2021E0873 | 21/04/2021 | 2022/04 |

SİMKAL Elektrik/Sıcaklık Kalibrasyon Çevre Şartları: Sıcaklık: (23±2)°C/(23±3)°C Nem: (50±20) %Rh Ölçüm Şartları:
Environmental conditions Temperature Humidity Measurement Conditions
Ölçüm Belirsizliği: Beyan edilen genişletilmiş ölçüm belirsizliği standart belirsizliğin, k=2 olarak alınan genişletme katsayısı ile çarpımı
Measurements Uncertainty sonucu bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır. Belirsizlikler ölçüm değerleri sayfasında verilmiştir.
The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2 which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%. The uncertainties are given on the measurement data pages.

Uygunluk Beyanı: Değerlendirme kullanıcıya bırakılmıştır / Assessment has been left to the user
Statement of Compliance

Karar Kuralı: Uygunluk beyanında, ölçüm belirsizliğinin nasıl hesaba katılacağını açıklayan kural.
Decision Rule Talep edilmesi durumunda, Kalibrasyon sonuçlarının değerlendirilmesi, ILAC-G8 rehberine uygun olarak yapılır.
On statement of compliance, the rule that defines how measurement uncertainty will be taken into account.
On request the calibration results are evaluated according to ILAC-G8 guide

Tavsiye Edilen Gelecek Kalibrasyon Tarihi: Cihazın uygun periyotlarda kalibrasyonundan kullanıcı sorumludur.
Recommended Next Calibration Date The user is obligated to have the instrument recalibrated at appropriate intervals

Feragat Beyanı: Müşterinin verdiği bilgilerin, sonuçların geçerliliğini etkilemesi durumunda, bundan müşteri sorumludur.
Abnegation of Compliance In the case where the information provided by the customer effects the validity of the results, the customer is responsible.

Açıklamalar / Cihazın bulunduğu yer:
Remarks / Place

"H" işaretli ölçümler akreditasyon kapsamı dışındadır. Kalibrasyon sonuçları, sertifika seri no ve simkal kodu ile belirtilen cihaza/ekipmana. Kalibrasyon tarihinden itibaren sertifikada belirtilen şartlar altında geçerlidir.

"H" marked measurements are out of the scope of accreditation. The calibration results are related to instrument/device which serial number and Simkal code are given in the certificate. The results are valid for under environmental conditions stated in the certificate beginning from the calibration date.

Cihazın Laboratuvara Kabul Tarihi: / Date of Receipt Of Device :

Kalibrasyon Yöntemi: Cihazın kalibrasyonu, "Kalibrasyon Prosedürü" bölümünde isimleri belirtilen prosedürlere uygun şekilde yapılmıştır.
Calibration Method Kalibratörler ve test edilen cihazın ısınma sürelerine dikkat edilir.

The warm up times of the calibrator and the device under test are taken care.

Kalibrasyon Etiketinin Yeri: Kalibrasyon etiketinin yeri, cihazın önünde veya üstünde uygun ve görünür bir yüzeyindedir.

Placement of Calibration Label Placement of the calibration label is on the top or front of the device which is a visible and conformable surface.

Kalibrasyon Prosedürü / Calibration Procedure :

| KOD / Code | ADI / Name | Ölçme Bölgesi / Measurement Range |
|------------|----------------------------|------------------------------------|
| KPE 01.01 | DC Voltmetre Kalibrasyonu | 100 µV - 1000 V |
| KPE 03.01 | AC Voltmetre Kalibrasyonu | 1 mV - 1000 V, 10 Hz - 1 MHz |
| KPE 02.03 | DC Ampermetre Kalibrasyonu | 1 µA - 11A/20 A |
| KPE 04.03 | AC Ampermetre Kalibrasyonu | 100 µA - 11 A/20 A, 10 Hz - 30 kHz |
| KPE 06.16 | DC Ohmmetre Kalibrasyonu | 1 Ohm - 1100 MOhm |
| KPE 07.04 | Kapasitemetre Kalibrasyonu | 330 pF - 100 uF, 1kHz |

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçerli değildir.

This certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.



SiMKAL Kalibrasyon ve Danışmanlık
Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi

AB-0003-K

2021E2624

11-21

Makine / Cihaz : MULTİMETRE
Instrument / Device : Multimeter
Tipi / Type : UT33A+
Marka / Mark : UNI-T

Seri No / Serial Number : C180693518
Env .No/ Inv Number :
Simkal Kodu / Code : LIW1309001

Sayfa No: 3 / 4
Page Number

KALİBRASYON ÖLÇME DEĞERLERİ
Calibration Measurement Values

| Kademe | Referans Değer | Cihaz Ölçüm Değeri | Cihaz Ölçüm Değeri | Belirsizlik |
|------------|----------------|--------------------|--------------------|-------------|
| DC Gerilim | mV | mV | mV | mV |
| 200 mV | 20,0000 | 19,9 | | 0,1 |
| | 180,0000 (±) | 179,7 | -179,8 | 0,1 |
| | V | V | V | V |
| 2 V | 0,2000000 | 0,200 | | 0,001 |
| | 1,800000 (±) | 1,804 | -1,804 | 0,001 |
| 20 V | 2,000000 (±) | 2,00 | -2,00 | 0,01 |
| | 10,00000 | 10,01 | | 0,01 |
| | 18,00000 (±) | 18,02 | -18,02 | 0,01 |
| 200 V | 20,00000 | 20,0 | | 0,1 |
| | 180,0000 (±) | 180,1 | -180,1 | 0,1 |
| 600 V | 300,0000 | 300 | | 1 |
| | 540,000 (±) | 540 | -540 | 1 |
| AC Gerilim | mV 50Hz | mV 50Hz | | mV 50Hz |
| 200 mV | 20,000 | 19,9 | | 0,1 |
| | 180,000 | 179,4 | | 0,2 |
| | V 50Hz | V 50Hz | | V 50Hz |
| 2 V | 1,80000 | 1,800 | | 0,001 |
| 20 V | 2,00000 | 2,00 | | 0,01 |
| | 10,0000 | 9,99 | | 0,01 |
| | 18,0000 | 17,98 | | 0,01 |
| 200 V | 180,000 | 179,8 | | 0,2 |
| 600 V | 300,000 | 299 | | 1 |
| | 540,00 | 539 | | 1 |
| DC Akım | µA | µA | | µA |
| 200 µA | 180,000 | 179,4 | | 0,2 |
| 2000 µA | 1800,00 | 1799 | | 2 |
| | mA | mA | mA | mA |
| 20 mA | 18,0000 | 17,89 | | 0,02 |
| 200 mA | 180,000 (±) | 179,4 | -179,5 | 0,2 |
| | A | A | | A |
| 2 A | 1,00000 | 0,994 | | 0,003 |
| | 1,80000 | 1,790 | | 0,003 |
| 10 A | 5,0000 | 4,98 | | 0,03 |
| | 9,0000 | 8,97 | | 0,03 |
| AC Akım | µA 50Hz | µA 50Hz | | µA 50Hz |
| 200 µA | 180,00 | 179,1 | | 0,4 |
| 2000 µA | 1800,00 | 1796 | | 3 |
| | mA 50Hz | mA 50Hz | | mA 50Hz |
| 20 mA | 18,0000 | 17,87 | | 0,02 |
| 200 mA | 180,000 | 179,1 | | 0,2 |
| | A 50Hz | A 50Hz | | A 50Hz |
| 2 A | 1,80000 | 1,783 | | 0,003 |
| 10 A | 9,0000 | 8,95 | | 0,03 |

AÇIKLAMALAR :
Remarks

✓ : Toleransları İçinde X : Toleransları Dışında - : Test Edilmedi * Arızalı
Inside of the Tolerance Out of the Tolerance Not Tested Out of order

: Akreditasyon Kapsamı Dışı / Out of the scope of the accreditation

Y : Yorumuz
Without Comment

Ölçümlerde değerlendirme yapılmamış ise kalibrasyon sonuçlarının değerlendirilmesi kullanıcı tarafından yapılır.
If the measurement values are not evaluated, the calibration results are evaluated by user.

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçerli değildir.
This certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.



SiMKAL Kalibrasyon ve Danışmanlık
Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi

AB-0003-K

2021E2624

11-21

Makine / Cihaz : MULTIMETRE
Instrument / Device : Multimeter
Tipi / Type : UT33A+
Marka / Mark : UNI-T

Seri No / Serial Number : C180693518
Env.No/ Inv Number :
Simkal Kodu / Code : LIW1309001

Sayfa No: 4 / 4
Page Number

KALİBRASYON ÖLÇME DEĞERLERİ
Calibration Measurement Values

| Kademe | Referans Değer | Cihaz Ölçüm Değeri | Belirsizlik | | | |
|----------|----------------|--------------------|-------------|--|--|--|
| | Ohm | Ohm | Ohm | | | |
| 200 Ohm | 10,0000 | 10,0 | 0,1 | | | |
| | 100,0000 | 99,9 | 0,1 | | | |
| | kOhm | kOhm | kOhm | | | |
| 2 kOhm | 1,000000 | 0,998 | 0,001 | | | |
| 20 kOhm | 10,00000 | 9,98 | 0,01 | | | |
| 200 kOhm | 100,0000 | 99,9 | 0,1 | | | |
| | MOhm | MOhm | MOhm | | | |
| 2 MOhm | 1,000000 | 0,998 | 0,002 | | | |
| 20 MOhm | 10,00000 | 10,01 | 0,07 | | | |
| | nF | nF | nF | | | |
| 2 nF | 1,0000 | 0,984 | 0,016 | | | |
| 20 nF | 10,000 | 9,95 | 0,06 | | | |
| 200 nF | 100,00 | 99,2 | 0,6 | | | |
| | µF | µF | µF | | | |
| 2 µF | 1,0000 | 0,996 | 0,005 | | | |
| 20 µF | 10,000 | 9,93 | 0,05 | | | |
| 200 µF | 100,00 | 99,6 | 0,7 | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| BEEP | TEST | OK. | | | | |
| DIYOT | TEST | OK. | | | | |

AÇIKLAMALAR :
Remarks

✓ : Toleransları İçinde X : Toleransları Dışında - : Test Edilmedi * : Arızalı
Inside of the Tolerance Out of the Tolerance Not Tested Out of order
: Akreditasyon Kapsam Dışı / Out of the scope of the accreditation Y : Yorumuz
Without Comment

Ölçümlerde değerlendirme yapılmamış ise kalibrasyon sonuçlarının değerlendirilmesi kullanıcı tarafından yapılır.
If the measurement values are not evaluated, the calibration results are evaluated by user.

Bu sertifika, laboratuvarın yazılı izni olmadan kısmen çoğaltılamaz. İmzasız ve mühürsüz sertifikalar geçerli değildir.
This certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.

ÖZGEÇMİŞ

EĞİTİM

| Bölüm | Kurum | Derece | Mezuniyet Tarihi |
|----------------------------------|--|---------------|-------------------------|
| Elektrik-Elektronik Mühendisliği | Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü | Yüksek Lisans | Şubat 2022 |
| Elektrik-Elektronik Mühendisliği | Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi | Lisans | Ağustos 2017 |
| Bilişim Teknolojileri | Bahçeşehir İMKB Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi | Lise | Haziran 2011 |

MESLEKİ DENEYİM

| Birim | Kurum | Pozisyon | Başlangıç Tarihi | Ayrılma Tarihi |
|----------------------|---|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Aviyonik Tasarım | TAAC Havacılık Teknolojileri A.Ş. | Yazılım Geliştirme Mühendisi | Mayıs 2021 | - |
| Yazılım Geliştirme | Altınay Savunma Teknolojileri A.Ş. | Yazılım Geliştirme Mühendisi | Ocak 2019 | Mayıs 2021 |
| Test Sistemleri | Femsan Elektrik Motorları A.Ş. | Kontrol ve Uygulama Mühendisi | Kasım 2018 | Ocak 2019 |
| Araştırma Geliştirme | Ges Teknik Klima ve Otomasyon Sistemleri A.Ş. | Gömülü Yazılım Mühendisi | Eylül 2017 | Kasım 2018 |