

KALICI MIKNATISLI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTOR SÜRÜCÜSÜ

PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR DRIVE

DAĞHAN ÇAYCI

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2007

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu alışma jürimiz tarafından **ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**
ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan :.....
(Prof.Dr. Hüseyin DEMİRCİOĞLU)

ye(Danışman) :.....
(Prof.Dr. Işık ÇADIRCI)

ye :.....
(Doç.Dr. UĞur BAYSAL)

ye :.....
(Yrd.Doç.Dr.Yakup ÖZKAZANÇ)

ye :.....
(Yrd.Doç.Dr. Timur AYDEMİR)

ONAY

Bu tez, /..... / tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Erdem YAZGAN
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

KALICI MIKNATISLI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTOR SÜRÜCÜSÜ

Dağhan ÇAYCI

ÖZ

Bu çalışmada kalıcı mıknatıslı motor tiplerinden kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorunun hız denetimini sağlayabilen bir motor sürücüsü tasarımlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarının yamuksal zıt EMK ve sinüsel zıt EMK'dan oluşan her iki alt kümesinin de hız denetimini sağlayan sürücü düzeneği, bir laboratuvar ve gösteri seti olarak kullanılmak üzere gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada fırçasız doğru akım motorlarının çalışma prensipleri ve farklı tipleri incelenmiş, bu motorların kendine özgü sürüş teknikleri hakkında bilgi verilmiştir. Üretilen momentteki salınımın ve düzensizliklerin en aza indirilebilmesi için fırçasız doğru akım motorlarının ürettikleri farklı zıt EMK yapılarına göre farklı denetim teknikleri geliştirilmiştir. Yapısal olarak birbirine oldukça benzeyen yamuksal ve sinüsel zıt EMK'lı tip kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları için moment doğrusallığında belirli ölçüde bir kaybın kabul edilebildiği durumlarda denetim teknikleri arasında geçişler olanaklı hale gelmektedir. Yapılan çalışmada düşük maliyetlerle üretilen yamuksal zıt EMK'lı fırçasız doğru akım motoru denetim teknikleri, uygun oransal-tümlevsel-türevsel denetim ve akım denetimli gerilim kaynaklı çevirgeç yöntemleri ile desteklenerek , sinüsel zıt EMK'lı kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru üzerinde hız kontrolünü sağlamak amaçlı uygulanmıştır. Pahallı, daha karmaşık ve hassas olan sinüsel zıt EMK'lı kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru denetim teknikleri yerine üretim maliyetlerini aşağıya çeken bu denetim yapısı, çalışma kapsamında yapılan deneysel uygulamalarda hız denetimi üzerinde çok başarılı sonuçlar vermiştir.

Kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru sürücüsü laboratuvar seti, Hall algılayıcıları sinyal takipçili akım denetimli gerilim kaynaklı çevirgeç, mikro denetleyici tabanlı denetim elemanları, motor ve yük seti, doğru akım güç çevrim - dağıtım devresi ve çevresel birimler olmak üzere beş ana donanım birimi ve iki yazılımdan oluşmaktadır. Sürücü ve motorun hız denetmini sağlayan gömülü denetim yazılımı mikro denetleyici üzerinde koşturulurken, kullanımı kullanıcının

insiyatifinde olan, kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru analiz yazılımı kişisel bilgisayarda çalıştırılmaktadır. Sayısal ve donanımsal pek çok değıştirge ayarı yapabilme imkanı tanıyarak çok çeşitli uygulamalara uyumlandırılabilen sürücü devre, kullanıcı için faydalı bir araştırma ortamı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru, PID denetim, Kapalı Çevrim Hız Denetimi, Mikro Denetleyici Tabanlı Motor Hız Denetimi.

Danışman: Prof. Dr. Işık ÇADIRCI, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR DRIVE

Dağhan ÇAYCI

ABSTRACT

In this work, a permanent magnet brushless DC motor driver is designed and realized. The driver which can control the motor speed of both PMBLDC motors with trapezoidal back EMF and with sinusoidal back EMF, is realized to be used as a laboratory and demonstration set.

Different types of brushless DC motors are examined with their working principles and information about the special driving techniques of these motors are given in this work. To minimize oscillations and irregularities of the torque output of the brushless DC motors, different control systems are developed according to their different back EMF structures. If some loss for the torque output linearity is acceptable for the structurally resembling trapezoidal back EMF and sinusoidal back EMF brushless DC motors, transitions between motor drive techniques can be applicable. Supported with PID control and current controlled voltage source inverter, trapezoidal back EMF BLDC motor drive technique is applied to a sinusoidal back EMF BLDC motor to control the motor speed. Experimental works shows that instead of expensive, complex and sensitive sinusoidal back EMF BLDC motor control techniques, using such type of control structure which lowers the manufacturing costs of the driver gives very successful speed control results.

Permanent magnet brushless DC motor laboratory set is composed of two software and five main hardware part which are current controlled voltage inverter with Hall sensor signal follower, microcontroller based control elements, the motor and the load set, DC current power conversion and distribution circuit, peripheral units. The microcontroller embedded software which controls the driver activity and the motor speed control, runs on the microcontroller where as 'Permanent Magnet Brushless DC Motor Driver Speed Control Analysis Program' which is optional for the user to be used, runs on a PC. The driver which can be tuned for various applications by permitting lots of its digital and hardware parameters to be tuned provides useful experimental media for the user.

Key Word: Permanent Magnet DC Motor, Brushless DC Motor, PID Control, Closed Loop Speed Control, Microcontroller Based Motor Speed Control

Advisor: Professor Işık Çadircı, Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi sırasında ve eğitimim süresince hiçbir desteğini esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Işık ÇADIRCI'ya değerli katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili eşim Çiğdem Yavuz ÇAYCI'ya çalışmalarına gurur duyduğum bilgisi ile verdiği destek, bu zorlu dönem boyunca bana karşı gösterdiği büyük sabır ve her zaman yanımda varlığını hissetmemi sağladığı için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Herşeyimi borçlu olduğum, sevgilerini her zaman yüreğimde hissettiğim annem Sema ÇAYCI, babam Coşkun ÇAYCI ve kardeşim Deniz ÇAYCI'ya üzerimdeki bütün emekleri için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Örnek kişilikleri ile karakterime yön veren sevgili dedelerim Prof.Dr. Abdurrahman ÇAYCI ve Ali FİDAN'a, her türlü katkılarını hiçbir zaman üzerimden eksik etmeyen kayınvaldem Şengül YAVUZ ve kayınpederim Mehmet YAVUZ'a minnettarlıklarımı sunarım.

Lisans ve yüksek lisans öğrenim yaşamım boyunca bana öğrenmeyi öğreten Hacettepe Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'ndeki hocalarıma çok teşekkür ederim.

Sayın Lütfi ÇILDIR ve Kasım YALDIZ'ın nezlinde tüm yöneticilerim ve iş arkadaşlarıma, çalışmalarım boyunca gösterdikleri anlayış ve katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Hacettepe Üniversitesi 2007

Ankara

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	1
1.2. Tezin İçeriği	3
2. KALICI MIKNATIS FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU YAPISI	6
2.1. Fırçasız Motorların Gelişim Süreci.....	6
2.2. Kalıcı Miknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motorları.....	8
2.3. Kalıcı Miknatıslı Motorların Sınıflandırılması	9
2.3.1. Alan akısının yönüne göre sınıflandırma.....	9
2.3.2. Akı dağılımına göre sınıflandırma	9
2.3.3. Miknatıs montaj konumuna göre sınıflandırma	11
2.4. Kalıcı Miknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru Yapısı.....	11
2.4.1. Duraç yapıları.....	12
2.4.2. Döneç yapıları	13
2.4.3. Konum algılayıcıları.....	14
2.5. Kalıcı Miknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Diğer Motorlarla Karşılaştırılması.....	18
2.6. Kalıcı Miknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Uygulama Alanları.....	20
3. KALICI MIKNATISILI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARININ ELEKTRİKSEL ANALİZİ VE MODELLENMESİ.....	22
3.1. Kalıcı Miknatıslı Yamuksal Zıt EMK'lı Fırçasız Doğru Akım Motorunda EMK ve Elektromanyetik Moment Özelliklerinin İncelenmesi	22
3.2. Kalıcı Miknatıslı Sinüsel Zıt EMK'lı Fırçasız Doğru Akım Motorunda EMK ve Elektromanyetik Moment Özelliklerinin Matematiksel İncelemesi.....	26
3.3. Kalıcı Miknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motorları Elektriksel Modeli.....	30
4. SÜRÜCÜ DEVRENİN TASARIMI	37
4.1. Fırçasız Motorlarda Altı Adım Anahtarlama Tekniği	37
4.2. Akım Denetimli Gerilim Kaynaklı Çevirgeç	43
4.3. Geleneksel Denetim Yapıları ve Oransal-Tümlevsel-Türevsel Denetim	43
4.3.1. Açık/kapalı denetleyiciler.....	44
4.3.2. Oransal denetleyiciler.....	44
4.3.3. Oransal-Tümlevsel denetleyiciler	45
4.3.4. Oransal-tümlevsel-türevsel denetleyiciler.....	46
4.4. Kalıcı Miknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motor Sürücüsünün Modellenmesi.....	47
5. SÜRÜCÜNÜN DONANIMSAL YAPISI	52
5.1. Motor ve Yük Seti	56
5.2. Akım Denetimli Gerilim Kaynaklı Çevirgeç	59
5.2.1. Hall algılayıcıları girişleri	59
5.2.2. Motor faz akımı denetimi.....	61
5.2.3. Güç beslemesi ve elektriksel yük pompası elemanları.....	66
5.2.4. Dış denetim ve topraklama bacakları	67
5.3. Mikro Denetleyici	70
5.4. Doğru Akım Güç Çevrim ve Dağıtım Devresi	73
5.5. Çevresel Birimler	74

5.5.1. Tuş takımı	75
5.5.2. LCD panel	76
5.5.3. RS232 mikro denetleyici-kişisel bilgisayar bağlantısı elemanları	78
6. SÜRÜCÜ YAZILIMLARI VE YAZILIM AKIŞ ŞEMALARI	80
6.1. Sürücü Yönetimi Yazılımı ve Akış Şemaları	80
6.2. Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Motor Hız Denetimi Veri Analiz Yazılımı	95
7. SÜRÜCÜNÜN KULLANIMI VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	100
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	117
KAYNAKLAR.....	120
EKLER	122

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 – Kalıcı Mıknatıs DA Motorunun Klasik AA ve DA Motorlardan Gelişim Süreci	7
Şekil 2.2 Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motorunu Oluşturan Parçalar	8
Şekil 2.3 Sinüsel Zıt EMK Dalga Yapısı	10
Şekil 2.4 Yamuksal Zıt EMK Dalga Yapısı	11
Şekil 2.5 Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru Temel Yapıları	12
Şekil 2.6 Duraç Yapısı	13
Şekil 2.7 Optik Kodlayıcı Genel Yapısı	14
Şekil 2.8 Kesin Optik Kodlayıcı Yapısı	15
Şekil 2.9 Dönen Transformatör Yapısı ve Endüklenen Çıkış Gerilimleri	16
Şekil 2.10 a) Akım Dağılımı Düzenli İnce Düz Levha b) Lorentz Kuvveti Etkisiyle Akım Dağılımı Düzensiz Hale Geçmiş İnce Düz Levha	17
Şekil 2.11 Hall Algılayıcılarının Farklı Yerleşim Tipleri	17
Şekil 3.1 Kavramsal Motor Yapısı	22
Şekil 3.2 Kavramsal Motorda +x Referans Çizgisi Üzerindeki Hava Boşluğunda Oluşan Manyetik Akı Yoğunluğunun Döneç Dönüş Açısı θ 'ya bağlı değişimi	22
Şekil 3.3 Kavramsal Motorda A fazının Birbirinden 30 Derece Arayla Konumlandırılmış İki Bobinin Kaptıkları Akı Bağlarının Döneç Dönerken θ 'ya Bağlı Değişimi	23
Şekil 3.4 Kalıcı Mıknatıslı Yamuksal Zıt EMK'lı Fırçasız D.A. Motorunun İdeal EMK ve Akım Dalga Şekilleri.(a) Birinci Bobinin EMK Dalga Şekli. (b) İkinci Bobinin EMK Dalga Şekli.(c) Faz A'da Oluşan EMK Dalga Şekli.(d) İdeal Akım Dalga Şekilleri	24
Şekil 3.5 Kavramsal Kalıcı Mıknatıslı Sinüsel Zıt EMK'lı Fırçasız D.A. Motor	26
Şekil 3.6 Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız D.A.Motoru R,L ve Zıt EMK Elektriksel Modeli	32
Şekil 3.7 Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız D.A. Motorunun Basitleştirilmiş R,L ve Zıt EMK Elektriksel Modeli	33
Şekil 3.8 Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız D.A. Motoru Modeli	34
Şekil 3.9 Motor Modelinin Kök Yer Eğrisi Analizine Hazırlanmış Hali	35
Şekil 3-10 Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız D.A. Motorun Moment ve Zıt EMK Sabitleri Çarpımı Sıfırdan Sonsuza İlerlerken Kök Yer Eğrisi Analizi	36
Şekil 4.1 Örnek Bir Kalıcı Mıknatıslı Yamuksal Zıt EMK'lı Fırçasız Doğru Akım Motoruna Ait Hall Algılayıcısı Çıkışlarının, Motor Fazlarının Zıt EMK ve Akım Özelliklerine Göre Çıkışları	38
Şekil 4.2 Anahtarlama Sırasına Göre Değişen Faz Akımlarının Yönleri	39
Şekil 4.3 Döneç ve Duraç Manyetik Alan Vektörleri	40
Şekil 4.4 Kalıcı Mıknatıslı Sinüsel Zıt EMK'lı Fırçasız D.A. Motor İçin Örnek Faz Akımları ve Hall Algılayıcıları Sinyalleri	41
Şekil 4.5 Kalıcı Mıknatıslı Sinüsel Zıt EMK'lı Fırçasız D.A. Motor Zıt EMK Yapıları	41
Şekil 4.6 Anahtarlama Sırasına Göre Oluşan Moment Çıkışı	42
Şekil 4.7 Örnek Altı Adımlı Anahtarlama Devresi	42
Şekil 4.8 Paralel Yapılandırılmış Oransal-Tümlevsel -Türevsel Denetim Yapısı	47
Şekil 4.9 Tasarımlanan Sürücü Yapısı	48
Şekil 4.10 Sürücü Devre Yapısının Modeli	49
Şekil 5.1 Sürücünün Bölgesel Yerleşim Planı ve Sinyal Akış Yönleri	54
Şekil 5.2 Sürücü Elektriksel Devre Şeması	55
Şekil 5.3 Sürücünün Fiziksel Görüntüsü	56

Şekil 5.4 Motor-Sürücü Devre Bağlantısı	57
Şekil 5.5 Motor Hall Algılayıcıları	57
Şekil 5.6 Allegro A3280 Pin Düzeni ve Boyutları (inç ölçüsünde)	58
Şekil 5.7 L6235N Blok Şeması	60
Şekil 5.8 L6235N Hall Algılayıcıları Girişleri Elektriksel Bağlantı Şeması	60
Şekil 5.9 L6235N Motor Faz Akımı Denetimi Elemanları Elektriksel Bağlantı Şeması	62
Şekil 5.10 PWM Akım Denetleyicisi Basitleştirilmiş Şeması	63
Şekil 5.11 Değişen C6 ve VR1 Değerlerine Göre Gerçekleşen Kapalı Zaman Grafiği	64
Şekil 5.12 Sabit Kapalı Zamanlı PWM Akım Denetiminde Farklı Zaman Aralıkları İçin Oluşan Akım Yönleri	64
Şekil 5.13 Sabit Kapalı Zamanlı PWM Akım Denetimi Sırasında Oluşan Sinyal Yapıları	65
Şekil 5.14 L6235N Güç Beslemesi ve Yük Pompası Elemanları Elektriksel Bağlantı Şeması	66
Şekil 5.15 L6235N Dış Denetim Bacakları Elektriksel Bağlantı Şeması	67
Şekil 5.16 Normal İşleyiş, Frenleme ve Aşırı Akım Koşullarında Çevirgeç ve Motor Fazları Üzerinden Geçen Akım Yönleri	69
Şekil 5.17 PIC18F452 Elektriksel Bağlantı Şeması	71
Şekil 5.18 LM2576 bacak düzeni	74
Şekil 5.19 Sürücü Doğru Akım Güç Çevrim ve Dağıtım Devresi	74
Şekil 5.20 3X4 Tuş Takımı Çıkış Bacakları ve İç Bağlantı Yapısı	75
Şekil 5.21 3X4 Tuş Takımı Elektriksel Bağlantı Şeması	76
Şekil 5.22 Sürücü LCD Panel Elektriksel Bağlantı Şeması	77
Şekil 5.23 Sürücü Devre RS232 İletişim Elektriksel Bağlantı Şeması	79
Şekil 6.1 Ana Yazılım Döngüsü Akış Şeması	82
Şekil 6.2 Tuş Takımı Denetimi Fonksiyonu Akış Şeması	83
Şekil 6.3 Yamuksal Yaklaşımla Devamlılığı Sağlanmış Örnek Bir u(n) Ayırık Zaman Sinyali ve Altında Kalan Alan	89
Şekil 6.4 Motor Denetim Fonksiyonu Akış Şeması	92
Şekil 6.5 Dış Kesme Fonksiyonu Akış Şeması	94
Şekil 6.6 Kalıcı Miknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru Hız Denetimi Veri Analiz Programı Kullanıcı Arayüzü	95
Şekil 7.1 Sürücü Devrenin Enerjilendirilmesiyle Beraber Likit Kristal Ekranda Beliren Kullanıcı Ana Menüsü	100
Şekil 7.2 Hall Algılayıcısı 1 Sinyal Çıkışı	101
Şekil 7.3 Motor Hall Algılayıcıları Sinyal Çıkışları	102
Şekil 7.4 TN10 ve TN11 Test Noktalarından Ölçüm Alma Biçimi	103
Şekil 7.5 Mikro denetleyici Darbe Genişliği Modülatörü Sinyal Çıkışı	104
Şekil 7.6 Akım Denemli Gerilim Kaynaklı Çevirgeç Akım Denetim Referans Gerilim Sinyali	104
Şekil 7.7 A ve B Fazları Arasında Oluşan Gerilim Yapısı	105
Şekil 7.8 Motor Faz A Akımını Ölçmek İçin Yapılan Bağlantı	106
Şekil 7.9 Motor Faz A Akımı Sinyal Şekli	106
Şekil 7.10 1200 RPM Hedef Hız Denetimi İçin Ortaya Çıkan Hız –Zaman Grafikleri	108
Şekil 7.11 Yüksüz Durumda, Motor Hızının 2500 RPM Hedef Hız Değerine Ulaşmasını Sağlamak İçin Yapılan Çalışmaya Ait Hız-Zaman Grafiği	111

Şekil 7.12 Motorun 1 Numaralı yük (silindirik ,50 g) Takılı Durumunda İken, 300 RPM Hedef Hız Değerine Ulaşmasını Sağlamak İçin Yapılan Çalışmaya Ait Hız-Zaman Grafiği	112
Şekil 7.13 Motorun 1 Numaralı Yük (silindirik ,50 g) Takılı Durumunda İken, 100/1024 Görev Çevrimi Oranlı Sabit PWM Mikro denetleyici Referans Sinyali İle Sabit Akım Denetimi Sağlanması Durumunda Ortaya Çıkan Motor Hız-Zaman Grafiği	113
Şekil 7.14 Motorun 2 Numaralı Yük (silindirik ,70 g) Takılı Durumunda İken, 1600 RPM Hedef Hız Değerine Ulaşmasını Sağlamak İçin Yapılan Çalışmaya Ait Hız-Zaman Grafiği	115

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız D.A. Motorların Fırçalı D.A. Motorlarla Karşılaştırılması	18
Çizelge 2.2 Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız D.A. Motorların Endüksiyon Motorlarla Karşılaştırılması	19
Çizelge 5.1 Yük Özellikleri.....	58
Çizelge 5.2 PIC18F452'nin Temel Özellikleri	70
Çizelge 7.1 Motorun 1 numaralı yük (silindirik ,50 g) takılı durumunda iken, 300 RPM Hedef Hız Değerine Ulaşmasını Sağlamak İçin Yapılan Çalışmaya Ait ilk 10 Örneklik Hız-Zaman Verisi	114

SİMGELER VE KISALTMALAR

AA	Alternatif Akım
BLDC	Brushless Direct Current – Fırçasız Doğru Akım
DA	Doğru Akım
DC	Direct Current – Doğru Akım
EMK	Elektro Motor Kuvveti
EMF	Electromotive Force – Elektro Motor Kuvveti
LCD	Liquid Crystal Display – Likit Kristal Ekran
MTBF	Mean Time Between Failure - Hatalar Arası Ortalama Zaman
PC	Personal Computer – Kişisel Bilgisayar
PD	Propotional Integral Derivative – Oransal Tümülevsel Türevsel
PI	Propotional Integral – Oransal Tümülevsel
PID	Propotional Integral Derivative – Oransal Tümülevsel Türevsel
PLL	Phase Locked Loop – Faz Kilitlemeli Döngü
PMBLDC	Permanent Magnet Brushless Direct Current – Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım
PWM	Pulse Width Modulation – Darbe Geniliği Modülasyonu
RPM	Revolution per Minute – Dakikada Devir Sayısı
USART	Universal Synchronous Asynchronous Reciver Transmitter – Evrensel senkron Asenkron Alıcı Verici
VSI	Voltage Source Inverter – Gerilim Kaynaklı Çevirgeç

1. GİRİŞ

Kendine özgü özellikleri ile endüstriyel kullanımda yaygın biçimde yer bulan kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları, güç beslenmeleri bakımından doğru akım motoru sınıfına benzerken, bir çeşit senkron motor olmalarından ötürü çalışma prensibi bakımından alternatif akım motorlar ile benzerlikler gösterir. Çalışması için özel denetim ve ateşleme sistemlerine ihtiyaç duyan bu motorların çalışma prensiplerini inceleyebilmek, oransal-tümlevsel-türevsel denetiminin sayısal olarak mikro denetleyici üzerinde koşturulması sayesinde hız denetimde yaygın olarak kullanılan oransal-tümlevsel-türevsel ve oransal-tümlevsel kapalı çevrim denetimlerindeki değıştirge değışimlerinin kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek amacıyla gerçekleştirilen "Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motor Sürücüsü" bir uygulama çalışması niteliğindedir.

Bu çalışmada kullanıcının mümkün olduğunca denetim yapıları ve sürücü devre üzerinde görsel ara yüzü kullanarak değışiklikler yapabilmesine özen gösterilmiş, donanımsal ayar gereken kısımlar, üzerinde ayar yapmaya imkan tanıyacak şekilde hazırlanmıştır. Üretimi düşük maliyetlerle gerçekleştirilebilen bu tasarım, kullanıcıya kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru denetimi ve sürüşü üzerinde pratik yapma imkanı sağlayacaktır.

1.1. Literatür Araştırması

Özel bir motor olan kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru, sadece hız ve akım denetimi için değil, dönme hareketini gerçekleştirebilmek için de denetleyicilere ihtiyaç duyar. Çoğu zaman dönme hareketini sağlayan sürücü devre aynı zamanda hız ve/veya akım denetimini de gerçekleştirir.

Gelişen teknoloji ile birlikte düşen denetleyici üretim maliyetleri ve birim fiyatta daha güçlü mıknatısların üretilmesi kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarının tüm uygulama alanlarında kendine yer edinmesini sağlamıştır. Yapılan araştırmada kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarının sürülmesi ve denetimi ile ilgili akademik çalışmaların özellikle son 15 sene içinde yoğunluk kazandığını göstermektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak yamuksal zıt EMK'lı kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarına oranla anlık konum takibi

sağlandığında daha iyi moment çıkışı elde edilen sinüsel zıt EMK'lı tip kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorların (Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor) sürüş teknikleri ve algılayıcısız kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru sürüş konularında yoğunluk göstermektedir.

Khopkar R.V. yapmış olduğu çalışmada [11], fırçasız motor faz akımını denetlemek için fırçasız motor sürücülerinde sıklıkla kullanılan ve DA gerilim hattını hızlı anahtarlama ile kırpan gerilim kaynaklı çevirgeç yapısı yerine AA gerilim kaynağını doğrulturken kullandığı tristör denetimli doğrultucu yapı ve DA bağlantı bobini kullanarak oluşturduğu akım kaynaklı çevirgeç yapısı ile motor DA gerilim hattının gerilimini denetler. Bu tarzda bir denetim ile gerilim kaynaklı çevirgeçte oluşan anahtarlama kayıplarının ve anahtar soğutma gereksinimlerinin oldukça azaltıldığını bununla beraber akım kaynaklı çevirgeç yapısının kullandığı çok sarımlı büyük endüktans değerli DA gerilim hattı bobinin, ana DA gerilim hattına seri bağlanması ve iletken kaybı nedeni ile büyük direnç kayıplarına neden olduğunu belirtmiştir.

Chikkam D.R. sürüş tekniği olarak geleneksel kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları ile örtüşen torus yapılı kalıcı mıknatıslı fırçasız motoru, motorlu engelli sandalyesi tekerleklerinin hareketini sağlamak amacı ile kullanmıştır[4]. Chikkam, konum denetleyicisi olarak Hall algılayıcılarını kullandığı çalışmada, akım denetimi için, akım kaynağı çevirgeci, akım yönünü belirlemek içinse altı adım anahtarlama tekniğini kullanmıştır.

Literatürde sürücü yapılarının DA gerilim ile çalışması nedeniyle kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları, duraç ve döneç yapılarının senkronize çalışmasından ötürü senkron motor özelliği de taşıdıklarından, sıklıkla kalıcı mıknatıslı senkron motor olarak da adlandırılırlar. Lamar K. , 2002 yılında gerçekleştirdiği çalışmasında[13], yamuksal zıt EMK'lı kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorunu (kendisi bu motoru kalıcı mıknatıslı senkron motor olarak nitelemiştir) konum algılayıcısı kullanmadan sürmüştür. Bunun için altı adım anahtarlama tekniğinde iki fazdan akım geçerken üçüncü fazdan akım geçmeyeceği ve bu aralıkta gerilim uygulanmayan üçüncü fazdan yapılacak gerilim ölçümü ile faz akımının yönünün değiştirilmesi gereken zamanın kestirilebileceği gerçeğini kullanmıştır. Lamar algılayıcısız sürüşün düşük maliyetli

de olsa Hall algılayıcı gereksinimini ortadan kaldırdığını belirtirken, algılayıcısız gerçekleştirdiği sürücü yapısının en belirgin dezavantajının motoru harekete geçirmek için durma konumunda hangi fazlara enerji verilmesinin bilinmemesi ve referans hızın motor çalışması sırasında ani değişimler göstermesi halinde ideal akım yön değişim zamanının tam belirlenememesi olduğunu belirtmiştir.

Pillay P. ve Krishan R.'nin ortaya koydukları çalışmada[20], Yamuksal zıt EMK'lı kalıcı mıknatıslı fırçasız motorların motor elektriksel modelleri çıkartılmış ve bu modeller üzerinden yapılan analizlerle ardıl izlem ve darbe genişliği modülasyonu akım denetimleri incelenmiştir.

Tabar F.M. , Bouzekri H. , Davat B. , ve Gosselin O. tarafından gerçekleştirilen çalışma[24], yamuksal zıt EMK'lı kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarının akım denetimli gerilim kaynaklı çevirgeçle denetimini inceler. Akım denetimini sağlamak için ardıl izlem denetim yolunu seçen uygulama biri motordan çıkıp toprağa giden akımın ölçülerek denetimin sağlandığı diğerininse hem toprağa giden akımın hem de üst taraf diyotlarının üzerinden geçen akımı ölçerek denetimin sağlandığı iki örnek üzerinde denetim performanslarını tartışır. Üst taraf diyotlarının akım ölçümünün sürücü yapısına daha iyi bir anlık tepki sağladığı sonucunu ortaya koyar.

Kumar K., Singh A.K. ve Singh S.N. yaptıkları çalışmada[12], kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru hız denetimini, geliştirdikleri oransal-tümlevsel-türevsel denetleyici ve bulanık mantık denetleyicisinin karışımından oluşan denetim yapısıyla sağlamışlardır. İki denetleyici yapısının karışımı ile oluşan bu tarz bir denetim sistemi, geleneksel oransal-tümlevsel-türevsel yapıdaki oransal denetim kısmını bulanık mantık kullanan bir yapı ile değiştirmesiyle oluşturulmuştur. Çalışma, oluşturulan karışım denetim tekniğinin, yük etkilerinin hissedildiği doğrusal olmayan uygulamalarda geleneksel oransal-tümlevsel-türevsel denetleyici yapısına göre daha iyi sonuç verdiğini göstermektedir.

1.2. Tezin İçeriği

Tez aşağıda yer alan sekiz ana bölümden oluşmaktadır:

- *Birinci Bölüm:* Çalışmanın genel yapısı ve amaçları ortaya konmuş, yapılan literatür çalışmasına yer verilmiş ve tezin genel akışı hakkında bilgi verilmiştir.
- *İkinci Bölüm:* Kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorunun yapısı, tiplerine göre sınıflandırılması, sağladığı avantajlar ve getirdiği dezavantajlar incelenmiş, kullanıldıkları uygulama alanları hakkında bilgi verilmiştir.
- *Üçüncü Bölüm:* Bu bölümde kalıcı mıknatıs doğru akım motorlarının iki ana tipi olan yamuksal zıt-EMK'lı ve sinüsel zıt EMK'lı motorların elektriksel moment üretiminin hangi matematiksel temellere dayandığı incelenmiş, bu motorların elektriksel modeli çıkartılmış ve geri beslemeli faz akımı denetimi uygulandığında ortaya çıkan motor modeli ortaya konmuştur.
- *Dördüncü Bölüm:* Sürücü devre tasarımında kullanılan anahtarlama ve denetim tekniklerinin çalışma prensipleri detaylı olarak irdelenmiştir. Tasarımlanan sürücünün modeli çıkartılmış ve bu model üzerinden teorik olarak hız denetim kabiliyeti sorgulanmıştır.
- *Beşinci Bölüm :* Bu bölümde tasarımılanan sürücünün tüm donanımsal yapısı en ince detaylara kadar incelenmiş, sürücü yapısını oluşturan her donanımsal elemanın sürücü yapısındaki işlevi, olası farklı kullanım biçimleri, elektriksel bağlantıları, yetenekleri ve çalışma prensipleri ayrıntılarıyla anlatılmıştır.
- *Altıncı Bölüm :* Sürücünün yazılımsal özelliklerinin incelendiği bu bölümde, hazırlanan mikro denetleyici gömülü yazılımı tüm özellikleri ile tanıtılmış, sayısal oransal-tümlevsel-türevsel denetim algoritması, tuş takımı denetim algoritması gibi sürücü donanımı ile doğrudan ilişkili bazı önemli alt fonksiyonlar akış şemaları verilerek detaylı olarak incelenmiş, kullanıcı arayüzü ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir. Bilgisayar üzerinde koşturulan ve kullanıcının motor hız denetim verilerinin görsel analizini yapabilmesini sağlamak amacıyla yazılmış 'Kalıcı Mıknatıs Fırçasız Doğru Akım Motoru Hız Denetimi Veri Analiz Yazılımı' kullanımı anlatılmıştır.

- *Yedinci Bölüm* : Örnek bir uygulama üzerinde pratik anlamda sürücü kullanımı anlatılmış, denetim sırasında oluşan sürücü devre sinyal yapıları incelenmiştir. Deneysel sonuçlara ve yorumlarına yer verilmiş, gerçekleştirilen sürücünün motor hız denetimi başarısı yorumlanmıştır.
- *Sekizinci Bölüm* : Elde edilen sonuçlara göre gerçekleştirilen sürücü performansının ve donanımsal yapısının çalışma amaçlarına uygunluğu tartışılmış, üretim sürecinde yaşanan bazı deneyimler paylaşılmıştır.

2. KALICI MIKNATIS FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU YAPISI

2.1. Fırçasız Motorların Gelişim Süreci

Klasik motorlar söz konusu olduğunda klasik terimi bu motorların aşağıdaki üç önemli kriteri sağladıklarını vurgulamaktadır :

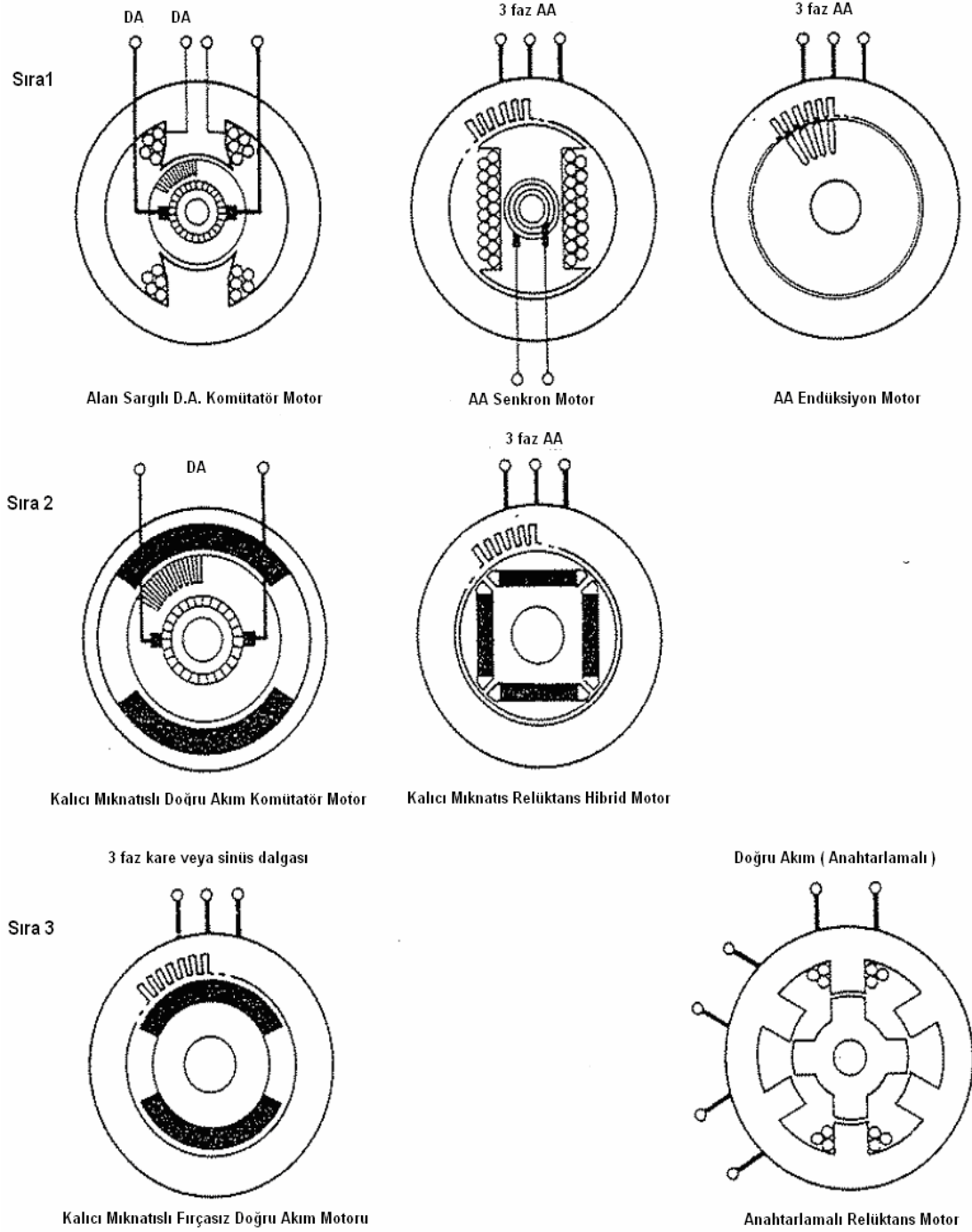
- Hepsi sabit anlık moment üretebilmektedirler (çok ufak moment dalgalanması vardır)
- Hepsi saf DA ya da AA sinüs dalgası kaynakları ile çalışabilirler.
- Hepsi elektronik denetim olmaksızın harekete geçebilirler.

D.A. komütatör motorlar, senkron A.A. senkron motorlar ve A.A. Endüksiyon motorlar klasik motorlar sınıfına girerler. Ayarlanabilir gerilimli D.A. komütatör motor, hareket denetimi uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Kolay denetim yapısı, kararlılığı ve az sayıda denetim elemanı gereksinimi en önemli avantajları iken komütasyon için fırça kullanması, fırça kaynaklı kayıplar ve sorunlar başlıca dezavantajlarını oluşturur. Yüksek güç ile sürüş gereksinimi durumunda ise genellikle A.A. senkron veya endüksiyon motorlar tercih edilir. Endüksiyon motorlarda kayma (slip), moment oluşumu için mutlaka gereklidir ve bu nedenle kuramsal olarak bile bu motorlarda sıfır döneç kaybı olması mümkün değildir. Bu durum, döneç kayıplarını indirmekle duraçta oluşan kayıpları engellemekten çok daha zor olduğu için endüksiyon motorların en büyük dezavantajıdır.

Zaman içinde ortaya çıkan çeşitli uygulamalardaki gereksinimler ve klasik motorların kolay denetim yapılarına sahip olmalarına karşın yapısal olarak sınırlı verimlilik ve bakım özelliklerine sahip olmaları, kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları gibi denetimi daha karmaşık ama klasik motorlara oranla çok daha üstün özelliklere sahip motorların geliştirilmesine neden olmuştur.

Şekil 2.1 'de fırçasız motorların klasik alternatif akım ve doğru akım motorlarından başlayan gelişim süreci izlenebilmektedir. Şekil 2.1 Sıra 1'de klasik motorlara yer verilmiştir. Şekil 2.1 sıra 2 'de yer alan motorlar, sıra 1 deki motorların alan sarımlarının kalıcı mıknatıslarla yer değiştirmesi ile türetilmişlerdir. Bu tür bir değişimde AA senkron motor kendiliğinden fırçasız motor özelliği alırken, DA motoru dönüşümü için ek değişimler gerekmiştir. DA motorunun fırçasız yapıya

kavuşabilmesi için sıra 2'den sıra 3'e geçişte duraç ve döneçlerin yer değiştirmesi gerekmiştir[17]. Bu değişim kalıcı mıknatıslı fırçasız DA motorlarının ortaya çıkmasını sağlamıştır.



Şekil 2.1 – Kalıcı Mıknatıslı DA Motorunun Klasik AA ve DA Motorlardan Gelişim Süreci[17]

2.2. Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motorları

Kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları geniş bir çevreye yayılmış uygulama alanlarında sıklıkla kullanılmaktadırlar. Bu motorlarda fırçalı doğru



Şekil 2.2 Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motorunu Oluşturan Parçalar[15]

akım motorlarının aksine döneç mıknatısları dönecin manyetik akısını oluşturur, bu durum fırçasız doğru akım motorlarının daha verimli ve kararlı çalışmalarını sağlar [7]. Senkron motorların temel özelliği olan, duraç tarafından üretilen elektromanyetik alanın döneç tarafından üretilen manyetik alanla aynı frekansta dönme yapısıyla örtüşürler. Bu özellikleri ile senkron makineler olarak da tanımlanabilirler.

Kalıcı mıknatıslı motorlar aşağıda sıralanan özellikleriyle kullanıcıya büyük avantajlar sunar,

- Fırça sürtünmesi ve fırça geriliminin yok edilmesiyle artan yüksek verimlilik
- Düşük elektriksel gürültü
- Düşük mekanik gürültü
- Üstün hız aralığı
- Duraç yapısının dışarıya yerleştirilmesinden kaynaklanan üstün ısı karakteristiği
- Düşük bakım masrafları

- Hafif ve küçük yapıları
- Yüksek MTBF değerleri[8]

Bu ilgi çekici özellikleri ile birlikte fırçasız motorların üretim maliyetlerinin daha pahalı olması, motor dönüşünü sağlamak için özel sürücü yapılarına gereksinim duyması gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Motor hareketinin sağlanması için motor sarımlarında dönen bir manyetik alan oluşturmak gereklidir ve oluşturulan bu manyetik alan döneç mıknatıslarının oluşturduğu manyetik alanla uyumlandırılmak zorundadır.[5] Bu zorunluluk da fırçasız motorların hareketi sağlamak için sürücüye ihtiyaç duymalarının temel nedenidir. Kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarının ilk kurulum maliyetlerini yukarıya çeken bu iki ana dezavantaj uzun vadeli kullanımda yerini yukarıda sayılan üstün özellikleri nedeniyle oluşan fiyat avantajına bırakır.

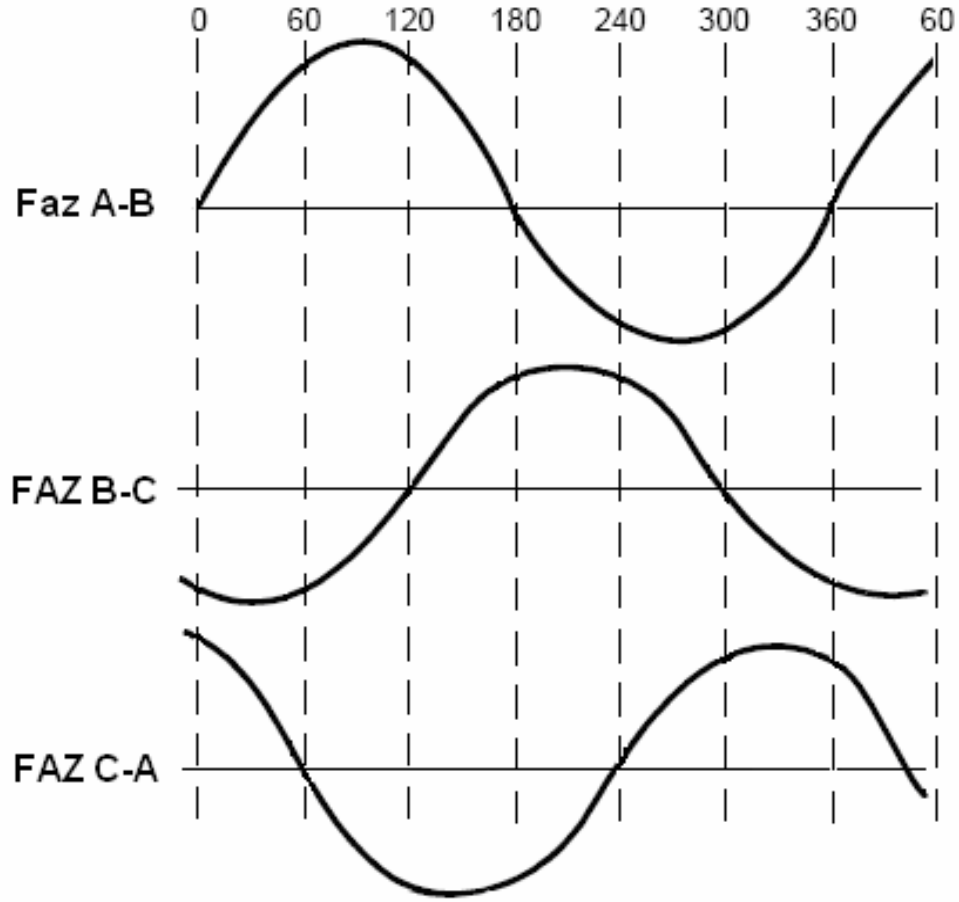
2.3. Kalıcı Mıknatıslı Motorların Sınıflandırılması

2.3.1. Alan akısının yönüne göre sınıflandırma

Kalıcı mıknatıslı motorlar kabaca alan akısının yönüne göre sınıflandırılabilir. Radyal tip kalıcı motorlarda akı döneç yarıçapı boyunca uzanır. İkinci sınıf olan eksensel tip kalıcı mıknatıslı motorlardaysa mıknatıs akı yönü yarıçap doğrultusuna dik uzanır. Radyal tip motorlar en çok kullanılan kalıcı mıknatıslı motor tipidir.[2]

2.3.2. Akı dağılımına göre sınıflandırma

Kalıcı mıknatıslı motorlar en çok akı yoğunluğu dağılımı ve akım tahriklerine göre sınıflandırılırlar. Bu motorlardan yamuksal zıt EMK karakteristiğine sahip olanlar kalıcı mıknatıslı yamuksal zıt EMK'lı fırçasız doğru akım motoru , sinüsel zıt EMK'lı olanlarsa kalıcı mıknatıslı sinüsel EMK'lı fırçasız doğru akım motoru olarak adlandırılırlar. Bu iki tip motorun yapısal olarak birbirlerine çok benzemesi literatürde isim karmaşıklığına yol açmaktadır. Kimi kaynaklarda her iki motor da senkron makine olmaları nedeniyle kalıcı mıknatıslı senkron motor olarak da geçmektedir. Her iki tip motor da kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motor sınıfında yer alsalar da bir başka yaygın kullanım da yamuksal zıt EMK'lı motor tipine fırçasız doğru akım motoru, sinüsel zıt EMK'lı tipe ise kalıcı mıknatıslı senkron motor denmesidir.



Şekil 2.3 Sinüsel Zıt EMK Dalga Yapısı[28]

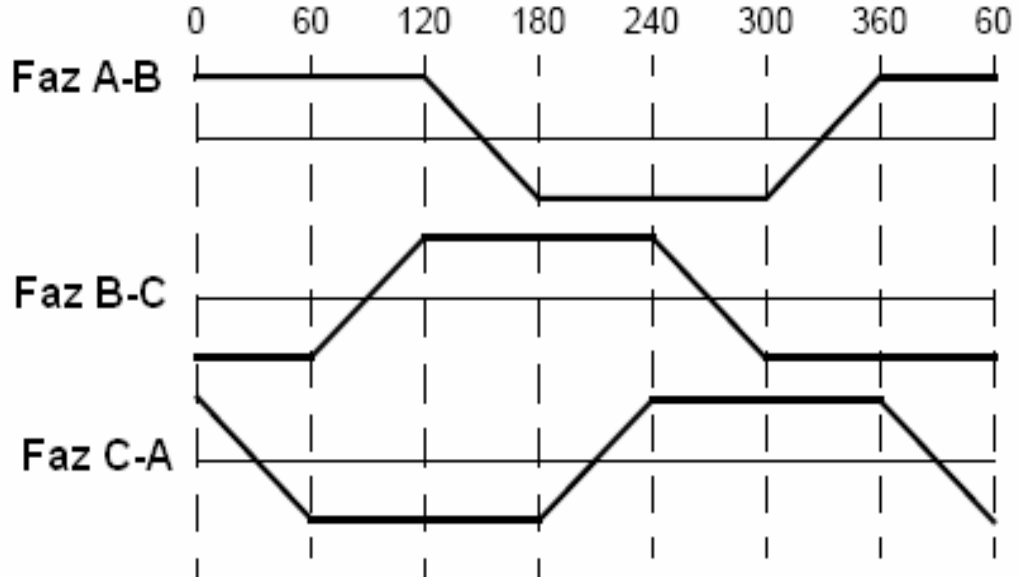
Kalıcı mıknatıslı sinüsel zıt EMK'lı fırçasız motorlar aşağıda yer alan özellikleri ile yamuksal zıt EMK'lı tiplerden ayrılırlar,

- Mıknatıs akısının hava boşluğunda oluşturduğu sinüsel dağılım.
- Sinüsel akım dağılımları
- Duraç iletkenlerinin sinüsel dağılımı

Kalıcı mıknatıslı yamuksal zıt EMK'lı fırçasız motorlarsa aşağıdaki özellikleri ile farklılaşırlar,

- Mıknatıs akısının hava boşluğunda oluşturduğu dikdörtgensel dağılım.
- Dikdörtgensel akım dağılımı

- Yoğunlaştırılmış duraç sarımları



Şekil 2.4 Yamuksal Zıt EMK Dalga Yapısı[28]

2.3.3. Mıknatıs montaj konumuna göre sınıflandırma

Kalıcı mıknatıslı motorlar mıknatıslarının yerleştirilme konumlarına göre yüzeye monte ve içine monte tip olarak iki sınıfa ayrılırlar.

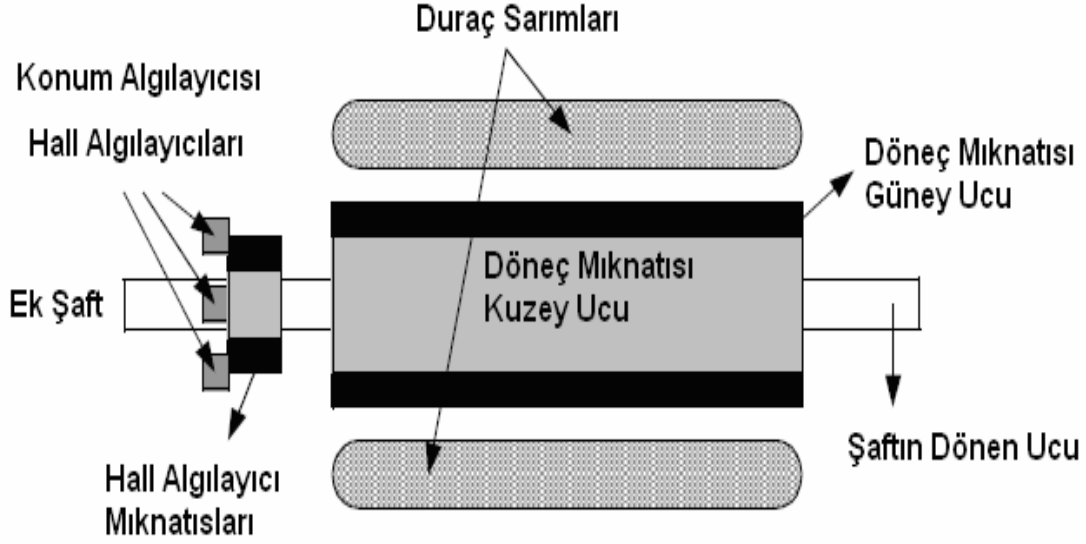
Yüzeye monte mıknatıslara sahip motorlarda mıknatıslar yüzeye monte edildiği için üretimleri kolaydır ve duraç yuvalarıyla kalıcı mıknatısın mesafesinin kısılması, istenmeyen doldurma (cogging) moment etkisini azaltır. Bu tip motorlar mıknatısların yerlerinden kopma ihtimalleri nedeniyle yüksek hız uygulamalarında kullanılmazlar[2].

Diğer motor tipi ise kalıcı mıknatısların döneç içine gömüldüğü motorlardır. Kalıcı mıknatıslar uygulamaya göre değişen tipte döneç içine gömülmüş olabilmektedirler. Yüzeye monte mıknatıslı motorlar kadar yaygın kullanılmaları da yüksek hız uygulamaları için iyi birer adaydırlar.

2.4. Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru Yapısı

Kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları, hareketini sağlayan dinamikleri belirleyen ve uygun denetim stratejilerinin oluşturulmasında mutlaka değerlendirilmesi gereken üç ana bölümden oluşur.

- Duraç Yapısı
- Döneç Yapısı
- Konum Algılayıcısı



Şekil 2.5 Kalıcı Miknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru Temel Yapıları

Algılayıcısız denetim teknikleri üzerine yapılan yoğun çalışmalar sonucu bu denetim tekniğini kullanan uygulamalarda artışlar görülse de kullarımdaki fırçasız motorların çoğu değişik tiplerdeki konum algılayıcılarını üzerlerinde barındırmaktadırlar.

2.4.1. Duraç yapıları

Kalıcı miknatıslı fırçasız D.A. motorlarda duraç, sarımların iç çevre boyunca eksensel olarak kesilmiş oluklara yerleştirildiği, istiflenmiş çelik tabakalardan oluşur. Yapı geleneksel endüksiyon motorlara benzese de sarımların dağılımı farklılık gösterir. Çoğu fırçasız doğru akım motoru yıldız bağlantılı üç duraç sarımından oluşan duraç yapısına sahiptir. Her üç sarım da çok sayıda bobinin birer sarım oluşturmak için birbirlerine bağlanması ile oluşur. Her bir motor oluşuna bir ya da daha çok bobin yerleştirilir ve sarımı oluşturmak için birbirine bağlanır. Her bir sarım duraç iç çevresinde çift sayıda kutup meydana getirecek şekilde dağıtılır.[28]



Şekil 2.6 Duraç Yapısı[28]

Yamuksal ve sinüsel olmak üzere iki ayrı duraç sarım tipi bulunmaktadır. Duraç sarımlarının farklı dağıtım şekilleri, duraç yapısında oluşan akı dağılımını belirleyerek yamuksal ve sinüsel tip kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Akı dağılımına göre sınıflandırma bölümünde detaylı olarak incelenmiş olan yamuksal ve sinüsel motor tipleri, oluşturdukları farklı zıt EMK yapıları ile fırçasız motorlar için alternatif denetim sistemlerinin gelişimini sağlamışlardır.

2.4.2. Döneç yapıları

Döneç kalıcı mıknatıs yapısındadır. Dönecin üretilmesi için uygulamanın gerektirdiği manyetik alan yoğunluğuna göre uygun materyalin seçimi gereklidir. Genellikle fırçasız motorların üretiminde demir mıknatıslar fiyat avantajlarıyla ön plana çıkmaktadırlar, ne var ki teknolojinin gelişimiyle beraber nadir toprak elementleri alaşımlı mıknatıslar popülerliklerini arttırmaktadır. demir mıknatıslar daha ucuz maliyetli olsalar da birim hacimlerinde daha düşük manyetik alan oluşturabilmektedirler buna karşılık nadir toprak elementleri alaşımlı mıknatıslar birim hacimde daha yüksek manyetik yoğunluk sağlayarak ferrit mıknatıslı motorların boyutlarına göre daha küçük boyutlu motorlarla aynı momentin üretilmesine olanak tanırırlar.

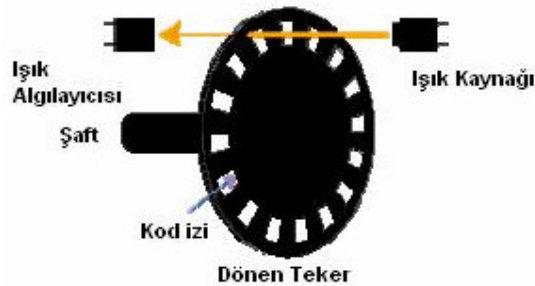
Neodimyum (Nd), samaryum kobalt (SmCo) ve neodimyum, demir ve bor alaşıımı (NdFeB) nadir toprak elementleri alaşıımlı mıknatıslara örnek olarak verilebilir. Döneç boyutunu düşürmek ve akı yoğunluğunu arttırmak amaçlı araştırmalar hızla devam etmektedir.

2.4.3. Konum algılayıcıları

Kalıcı mıknatıslı fırçasız motorlar, dönme hareketini gerçekleştirebilmeleri için duraç ve döneç arasındaki manyetik etkileşimi uyumlandırmak zorundadırlar bu da motorun hareketli kısmı olan döneç yapısının konum takibinin yapılmasını gerektirir. Motor denetleyicisi tabanlı yazılımsal çözümler de uygulamalarda kendilerine yer bulsalar da kullanılan fırçasız motorların pek çoğu döneç konumunu takip edebilen donanımsal konum algılayıcılarına sahiptirler. Fırçasız motorlarda kullanılan konum algılayıcıları genel olarak üç ana alt bölüme indirgenebilir.

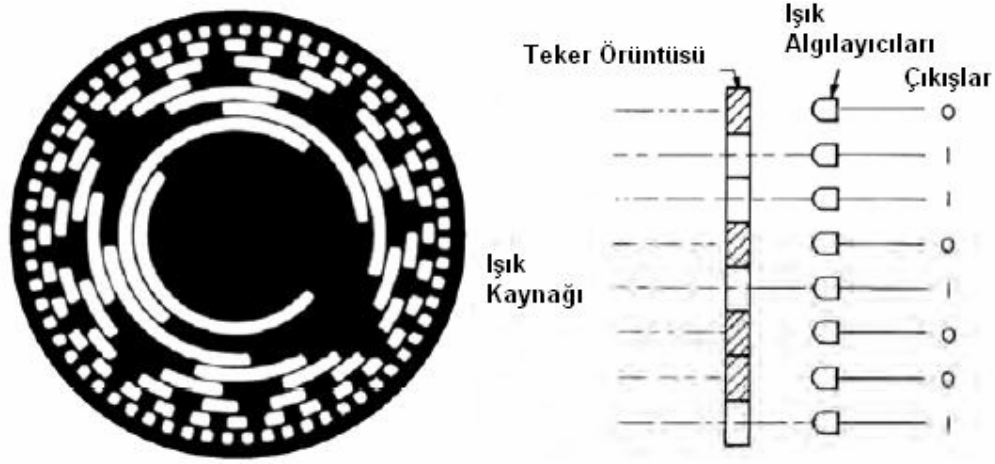
- Optik Kodlayıcılar
- Dönen Transformatörler (Rotary Transformers, Position Revolvers)
- Hall Algılayıcıları

Optik kodlayıcı algılayıcılar temel olarak dönen bir teker, ışık kaynağı ve ışık algılayıcısından meydana gelir. Teker dönen mil ucuna monte edilir ve özel olarak kodlanmış saydam ve saydam olmayan örüntülere sahiptir. Teker döndükçe bu örüntüler ışık algılayıcısı üzerine düşen ışığı keserek veya geçmesine izin vererek sayısal atmalar veya çıkış sinyali üretir.



Şekil 2.7 Optik Kodlayıcı Genel Yapısı

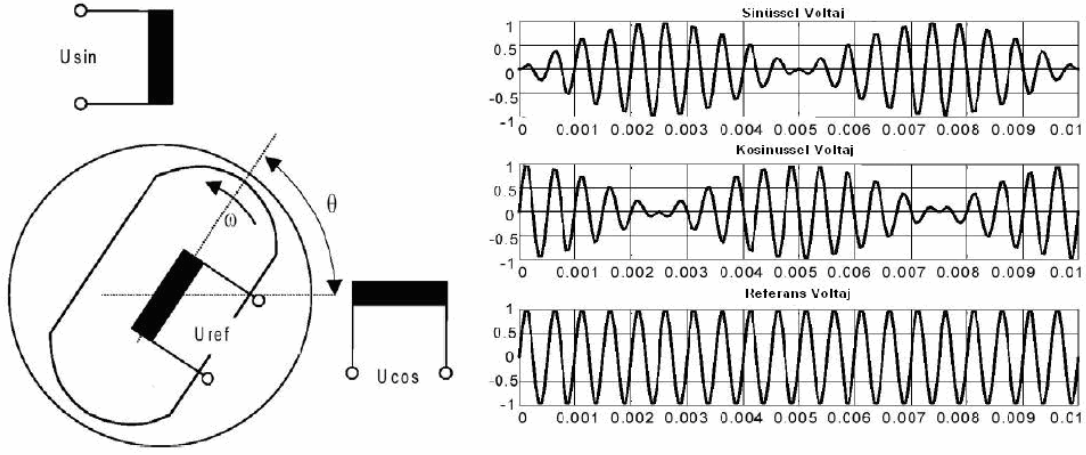
Arttırmalı tip optik kodlayıcılar iyi bir çözünürlüğe ve kolay uygulama yapısına sahip olmakla beraber döneç konumunu takip edebilmeleri için dönecin sabit bir konumdan hareketine başlamasını gerektirirler. Başlangıç konum bilgisi taşımazlar.



Şekil 2.8 Kesin Optik Kodlayıcı Yapısı

Kesin optik kodlayıcılar, kodlayıcının bit sayısı ile orantılı olacak şekilde dönecin kesin konumunu algırlar. Motorun hareket halinde olması veya durması konum ölçümünü engellemez. Kesin optik kodlayıcılar konum bilgisini anlık olarak ikilik sayısal bilgi şeklinde bildirirler. Kod, kodlayıcı teker üzerinde yer alan bağımsız izlere ait ışık algılayıcılarından gelen bilgi ile oluşturulur. Bu ışık algılayıcıları, belirli bir konum için oluşan teker kod örüntüsünün durumuna göre yüksek (ışıklı konum) veya alçak (karanlık konum) genlikli sinyal üretirler.

Dönen transformatörler, transformatör mantığı ile çalışırlar. Ana sarım döneç üzerine yerleştirilir ve birbirlerinden doksan derece ayrılmış ikincil sarımlarda döneç mil açısına göre farklı gerilimler endüklenir. Döneç üzerindeki ana sarımda Uref sinüsel referans gerilimi olduğu düşünülürse, duraç üzerine doksan derece farkla yerleştirilmiş ikincil sarımlarda sinüsel ve kosinüsel gerilimler endüklenir.



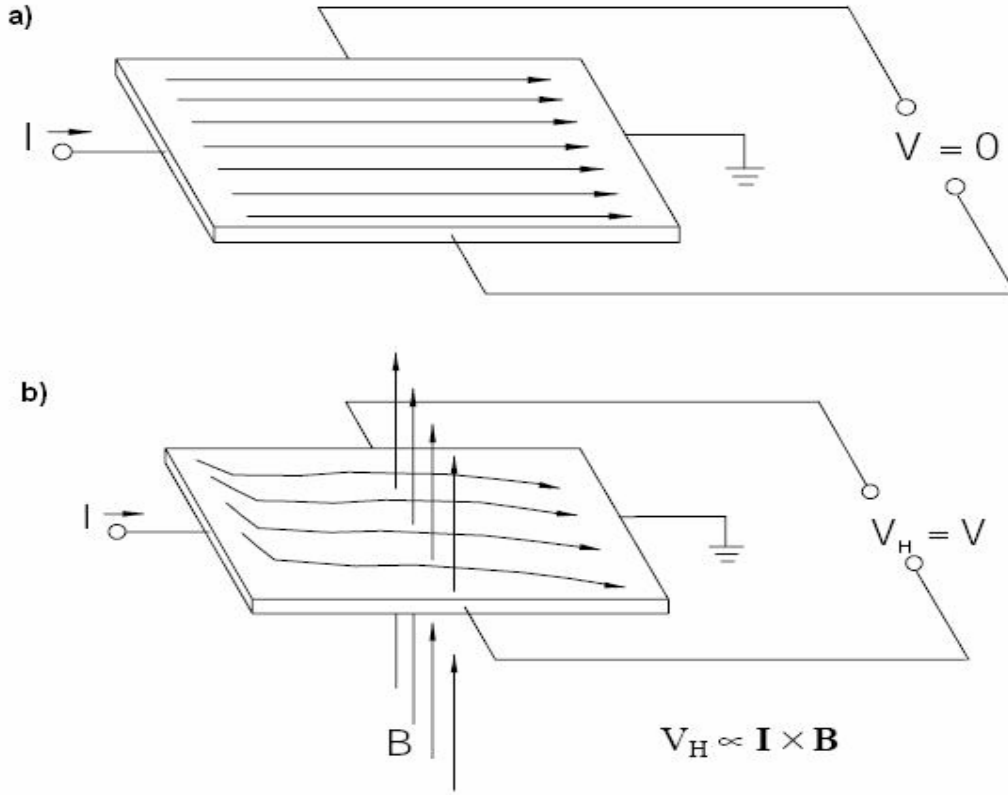
Şekil 2.9 Dönen Transformatör Yapısı ve Endüklenen Çıkış Gerilimleri

Dönüş açısı θ , çıkış gerilimlerinin oranının ters tanjant fonksiyonu alınarak bulunabilir.[2]

Özellikle yamuksal tip fırçasız motorlarda kullanılan bir başka konum algılayıcısı da Hall algılayıcılarıdır. Hall algılayıcılarının çalışma prensibi E.H. Hall tarafından 1879'da ortaya konulan Hall etkisi teorisine dayanır.

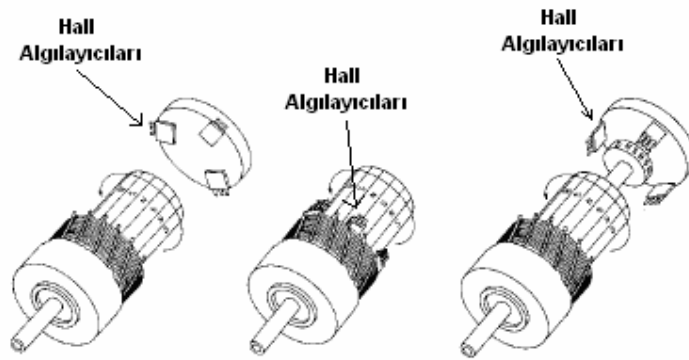
Eğer akım taşıyan bir iletken bir manyetik alan içinde bulunursa, manyetik alan yönüne göre yük taşıyıcılarını iletkenin bir yanına doğru itecek ters bir kuvvet uygular. Bu durumun en iyi gözlemlenebildiği örnek ince ve düz iletkenlerdir.[28]

Şekil 2.10-a'da görülen, akım dağılımı düzenli olan ince düz bir levhaya, akım yönüne dik bir manyetik alan uygulandığında oluşan durum Şekil 2.10-b'de, görünmektedir. Bu haliyle akım üzerine bir Lorentz kuvveti uygulanmıştır.[10] Uygulanan kuvvet iletken üzerindeki akım dağılımının düzenini bozar ve levha halindeki iletkenin iki ucunda bir potansiyel farkı oluşumuna neden olur, ortaya çıkan potansiyel farkı levha üzerinden geçen akım ve uygulanan manyetik alanın büyüklüğü ile doğru orantılı olarak değişir.



Şekil 2.10 a) Akım Dağılımı Düzenli İnce Düz Levha b) Lorentz Kuvveti Etkisiyle Akım Dağılımı Düzensiz Hale Geçmiş İnce Düz Levha

Daha önce belirtildiği üzere motorun hareketini sağlayabilmemiz için hangi motor sarımından hangi yönde akım geçmesi gerektiğini bilmemiz gerekir bu da



Şekil 2.11 Hall Algılayıcılarının Farklı Yerleşim Tipleri[9]

döneç konumunun belirlenmesi gereğini doğurur. Motora uygulamaya göre değişen belirli açı aralıklarıyla yerleştirilen Hall algılayıcıları, döneç mıknatıs kutupları yakınlarından geçtiğinde yakınlarından geçen kutubun kuzey veya güney

kutup oluşuna göre alçak veya yüksek genlikli çıkış sinyali üretirler. Bu sinyallere göre döneç konumu belirlenir. Şekil 2.11’de Hall algılayıcılarının motor üzerinde yerleşimlerinin farklı şekilleri gösterilmiştir.

2.5. Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Diğer Motorlarla Karşılaştırılması

Kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları klasik doğru akım motorlarıyla ve endüksiyon motorlarıyla karşılaştırıldıklarında pek çok avantaj sağlamakla beraber bazı dezavantajlar da sunar. Kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarının getirdiği avantaj ve dezavantajlar Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1 Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız D.A. Motorların Fırçalı D.A. Motorlarla Karşılaştırılması

Özellik	Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız D.A. Motor	Fırçalı D.A. Motor
Anahtarlama	Döneç konum bilgisine dayalı elektronik anahtarlama	Fırçalı anahtarlama
Bakım	Fırça gereksinimi olmadığı için daha az	Periyodik bakıma ihtiyaç duyar
Ömür	Daha uzun	Daha kısa
Hız/Moment Karakteristiği	Düz- Nominal yükte tüm hız aralığında çalışabilirler	Kısmen düz – yüksek hızlarda artan fırça kayıpları yararlı moment üretimini azaltır.
Verimlilik	Yüksek – Fırça kaybı oluşmaz	Orta karar
Çıkış Gücü / Motor Büyüklüğü	Yüksek – Çok iyi ısısal karakteristiği sayesinde motor büyüklüğü daha küçüktür. Sarımların döneç üzerinde oluşu ısı atımını kolaylaştırır.	Orta Karar / Düşük – Armatürün oluşturduğu ısının hava boşluğunda oluşturduğu yüksek ısı, motor boyutlarının küçültülmesine engel oluşturur.
Döneç Ataleti	Düşük	Daha yüksek
Hız Aralığı	Yüksek – Fırçasız tasarım kayıpları engeller	Daha düşük – Fırça kayıpları hız bant aralığını düşürür.

Elektriksel Gürültü Üretimi	Düşük	Fırçalardaki arklar elektriksel gürültü üretir.
Üretim Maliyeti	Kalıcı Mıknatıslardan dolayı yüksek	Düşük
Denetim	Karmaşık ve pahalı	Basit ve ucuz
Denetim Gereksinimi	Motoru döndürebilmek için mutlaka denetleyiciye ihtiyaç duyar.Aynı denetim mekanizması hız kontrolünde de kullanılabilir.	Hız denetimi gerekmedikçe denetleyiciye ihtiyaç duymaz.

Çizelge 2.2 Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız D.A. Motorların Endüksiyon Motorlarla Karşılaştırılması

Özellik	Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız D.A. Motor	Endüksiyon Motor
Hız/Moment Karakteristiği	Doğrusal - Nominal yükte tüm hız aralığında çalışabilirler	Doğrusal değil – Düşük hızlarda düşük moment
Çıkış Gücü / Motor Büyüklüğü	Yüksek – Kalıcı mıknatıslar döneç üzerinde bulunduğundan belirli bir çıkış gücü için daha küçük motor büyüklüğü	Orta karar – Hem duraçta hem de döneçte motor sarımı bulunmaktadır.
Döneç Ataleti	Düşük	Yüksek
Başlatma Akımı	Nominal – Başlatma devresine ihtiyaç duymaz	Nominal değerin yedi katına kadar çıkan başlatma akımı gereksinimi
Denetim Gereksinimi	Motoru döndürebilmek için mutlaka denetleyiciye ihtiyaç duyar.Aynı denetim mekanizması hız kontrolünde de kullanılabilir.	Hız denetimi gerekmedikçe denetleyiciye ihtiyaç duymaz.
Kayma	Yok	Kayma frekansı nedeniyle döneç frekansı duraç frekansına göre düşüktür. Kayma artan yükte beraber artar.

2.6. Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Uygulama Alanları

1962 yılında T.G. Wilson ve P.H. Trickey'in yazdığı makaleden yola çıkılarak üretilen ilk fırçasız motor 5 HP'nin üzerindeki uygulamalar için kullanılamamaktaydı. 1980'ler gelindiğinde Powertec firmasından Robert E. Lordo ilk büyük fırçasız motorlar olarak tanımlanan 50 Hp'nin üzerinde güce ulaşan motorunu üretti [4]. Günümüzde 300 HP ve üstü güç veren fırçasız motorlar fırçasız yapıları gereği sağladıkları tehlikeli ortamda güvenli çalışabilme özellikleriyle madenlerde, taşıma bandı gibi yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanılabilmektedir.

Yüksek enerjili mıknatısların ve elektronik malzeme fiyatlarının düşmesiyle maliyetleri oldukça aşağı çekilen fırçasız motorlar piyasada otomasyon, uygulama, endüstriyel denetim, otomotiv, havacılık endüstrisi gibi pek çok alanda kendini göstermektedirler. Fırçasız motor denetimi uygulama alanlarını üç ana kategoride inceleyebiliriz,

- Sabit Yük
- Değişken Yük
- Konumlama Uygulamaları

Sabit yüklü uygulamalarda değişken hız kabiliyeti, hızın referans bir değerdeki doğruluğunu sağlamaktan daha önemlidir. İvmelenme ve yavaşlama oranları dinamik olarak değişmezler. Bu tip uygulamalarda yük mile doğrudan bağlıdır. Havalandırma cihazları, vantilatörler ve pompalar bu sınıfa girerler. Bu tip uygulamalar genellikle düşük maliyetli denetim yapıları gerektirir.

Değişken yüklü uygulamalar genellikle motor üzerindeki yükün belirli bir hız aralığı içinde değiştiği uygulamalardır. Çoğunlukla yüksek hızlı ve hassas denetim yapılarına ihtiyaç duyarlar. Ev uygulamalarında çamaşır makinesi, kurutucular otomotivde benzin pompaları, elektronik sürüş ve motor denetleyicileri, uzay ve havacılık alanında denge çarkı denetimi, robot kollar, pompalar ve santrifüj bu tip uygulamalara örnek olarak verilebilir. Yarı veya tam kapalı denetim sistemlerine ihtiyaç duyarlar. Gelişmiş denetim algoritmaları kullanılması gerekliliği bu uygulamalarda karmaşıklaşan denetim yapılarıyla beraber maliyeti artırır.

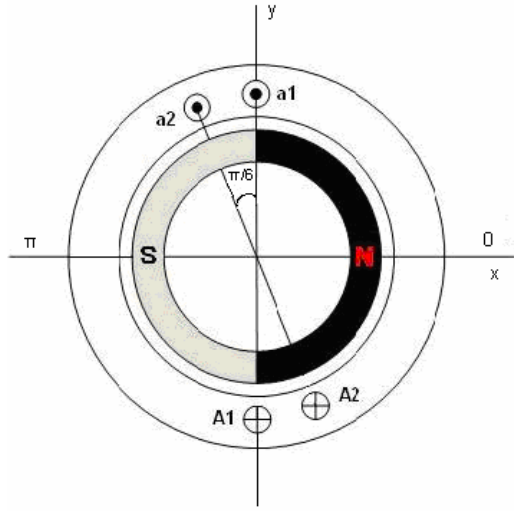
Pek çok otomasyon uygulaması konumlama uygulamaları alana girer. Bu alandaki uygulamalar basit kayış sürürlü veya dişli kullanan sistemler gibi güç iletimini gerektiren uygulamalardır ve motor hareketinde sıklıkla ters dönüş yönünde hareketler gerektirebilirler. Bu tip uygulamalarda dinamik hız ve güç tepkisi önemlidir.

Tipik bir konumlama hareketi ivmelenme, sabit hız, yavaşlama ve konumlama olarak adlandırılabilir üç fazdan oluşur. Bu fazların gerçekleşmesi sırasında yükte değişimler de meydana gelebilir ve bu durum daha da karmaşık denetim sistemlerinin uygulanması gerekliliğini ortaya çıkarır. Bu tarz sistemlerin denetimi genellikle kapalı döngü sistemleri gerektirir. moment, hız ve konumlama kapalı döngülerinin aynı anda gerçek zamanlı uygulanması gerekebilir. Süreç denetimleri, makine denetimleri ve taşıyıcı-bant denetimleri bu kategoride oldukça fazla uygulamalara sahiptir.

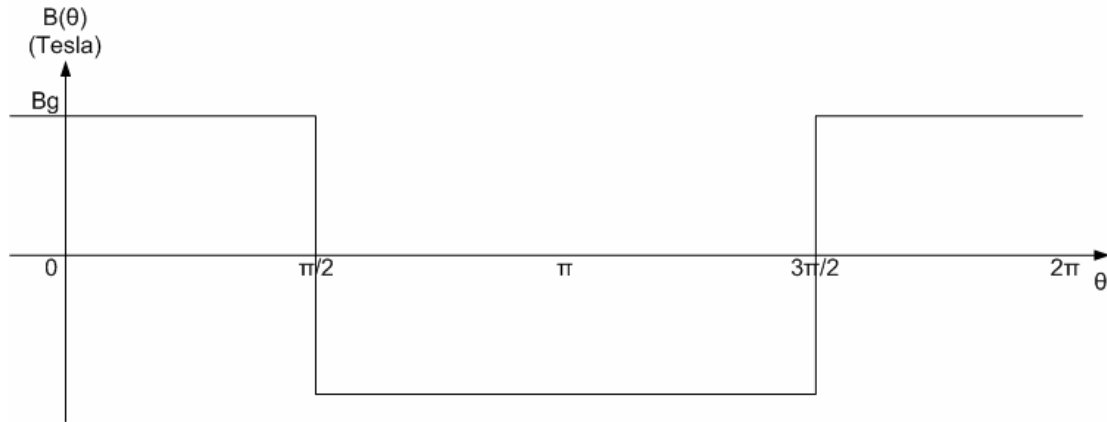
3. KALICI MIKNATISILI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARININ ELEKTRİKSEL ANALİZİ ve MODELLENMESİ

3.1. Kalıcı Mıknatıslı Yamuksal Zıt EMK'lı Fırçasız Doğru Akım Motorunda EMK ve Elektromanyetik Moment Özelliklerinin İncelenmesi

İki kutuplu, kutup arkları 180 derece olan 3 fazlı, faz başına 4 oluk düşen bir kavramsal kalıcı mıknatıslı yamuksal zıt EMK'lı fırçasız bir D.A. motoru düşünelim. Koordinat eksenleri kuzey mıknatıs kutbu $\theta = 0$ radyan olacak şekilde +x yönünde alınmış olsun. (Şekil 3.1) Dönerin bir tam dönüşünde 0 radyan referansı üzerinde hava boşluğunda oluşan manyetik alanın θ açısına bağlı değişimi Şekil 3.2'deki gibi kare dalga şeklinde oluşur.



Şekil 3.1 Kavramsal Motor Yapısı



Şekil 3.2 Kavramsal Motorda +x Referans Çizgisi Üzerindeki Hava Boşluğunda Oluşan Manyetik Akı Yoğunluğunun Döner Dönüş Açısı θ 'ya bağlı değişimi

θ açısı döneğin hareketini temsil etmek üzere döneç dönerken a_1A_1 sarımının kaptığı akı Ψ_1 doğrusal olarak değişir. Bunun sebebi mıknatıs tarafından oluşturulan hava boşluğu akısının dönecin her kutup sarımı için sabit oluşudur. Kapılan en büyük pozitif akı 0 radyanda oluşurken en büyük negatif değer π radyanda oluşur. x duraç ve döneç eksen uzunluğu, r_1 döneç yarı çapı, N_1 faz sarımındaki oluk başına düşen iletken sayısını ifade etmek üzere hava boşluğu etrafında manyetik akı yoğunluğunun tümlevini alırsak,

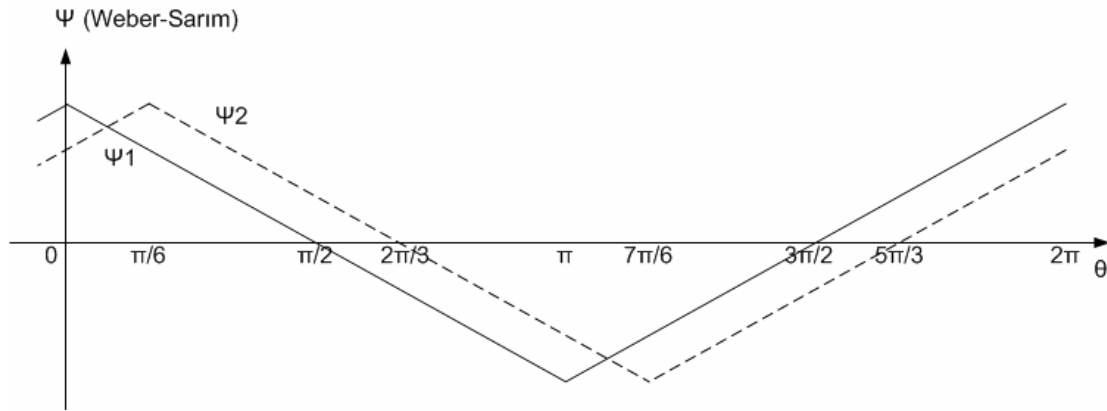
$$\Psi_{1\max} = \int B(\theta) r_1 d\theta x \quad (3.1)$$

$$\Psi_{1\max} = N_1 B_g \pi r_1 x \quad (3.2)$$

Kapılan akının maksimum değeri Eş 3.2'deki gibi bulunur.

θ açısı 0 radyandan $\pi/2$ radyana doğru ilerlerken sarımın hava boşluğu etrafından kaptığı akıyı ifade etmek istersek,

$$\Psi_1(\theta) = \left[1 - \frac{\theta}{\pi/2} \right] \Psi_{1\max} \quad (3.3)$$



Şekil 3.3 Kavramsal Motorda A fazının Birbirinden 30 Derece Arayla Konumlandırılmış İki Bobinin Kaptıkları Akı Bağlarının Döneç Dönerken θ 'ya Bağlı Değişimi

Buradan yola çıkılırsa a_1A_1 bobininde endüklenen EMK e_1 Eş. 3.6'daki gibi bulunur.

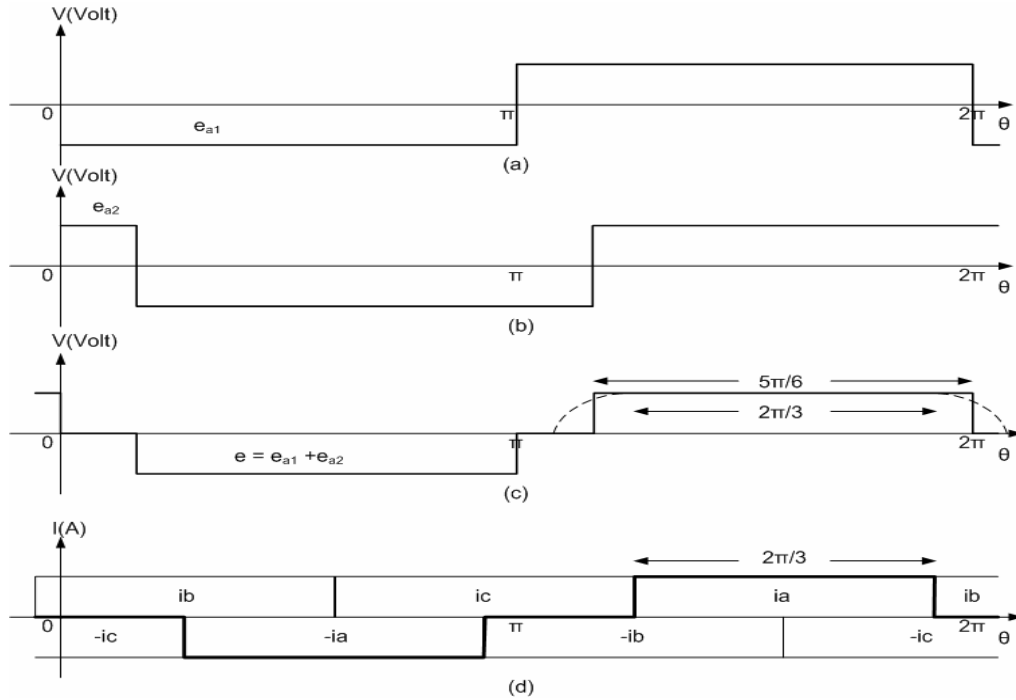
$$e_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} \quad (3.4)$$

$$E = k_e \omega \quad T = k_t i \quad (3.5)$$

$$e_1 = 2N_1 B_g x r_1 \quad (3.6)$$

Eş 3.6 şekil 3.4-a'da gösterilen kare dalga EMF sinyalinin büyüklüğünü verir. Faz A'nın diğer bobininin şekil 3.4-b'de gösterilen dalga şekli, $\pi/6$ radyanlık bir faz kayması dışında şekil 3.4-a ile bire bir aynıdır. Bobinlerin seri bağlanması durumunda toplam faz EMK'sı bu iki bobinde oluşan EMK'ların toplamı şeklinde oluşur. Faz A'da oluşan EMK şekil 3.4-c'de gösterilmiştir.

Faz sarımlarının döneç referans eksenine göre farklı açılarda iki bobine bölünmesinin amacı, fazda adım adım ilerleyen bir EMK dalga yapısı oluşturmaktır. Gerçek uygulamada, ateşlemeler Şekil 3.4-c'deki dik kenarların şekilde kesikli noktalarla gösterildiği şekilde yuvarlaklaşmasına neden olur. Bu şekilde kalıcı mıknatıs yamuksal EMK'lı fırçasız D.A. motoruna ismini veren yamuksal dalga şekli oluşur[17].



Şekil 3.4 Kalıcı Mıknatıslı Yamuksal Zıt EMK'lı Fırçasız D.A. Motorunun İdeal EMK ve Akım Dalga Şekilleri. (a) Birinci Bobinin EMK Dalga Şekli. (b) İkinci Bobinin

EMK Dalga Şekli.(c) Faz A'da Oluşan EMK Dalga Şekli.(d) İdeal Akım Dalga Şekilleri

Faz EMK'sının düzgün tepeli kısmının büyüklüğü, N_{ph} faz başına seri bağlanmış sarım sayısı olmak üzere Eş. 3.7'deki gibi bulunur.

$$e = 2N_{ph} B_g x r_1 \omega \quad (3.7)$$

yukarıdaki örnek baz alınırsa iki bobinin seri bağlı olmasıyla N_{ph} ,

$$N_{ph} = 2N_1 \quad (3.8)$$

olarak ifade edilir. Eş 3.7 N_{ph} faz başına sarım sayısını, ω mekanik hızı ifade etmek üzere p kutup çiftli makinelerde da Eş. 3.7 aynen kullanılır.

Şekil 3.7-d i büyüklüğünde $2\pi/3$ radyan genişliğinde ideal dikdörtgensel akım dalga yapılarını gösterir. İletim yapıları üç set faz akımı için simetrik dikdörtgensel dalgalardan oluşur. Eğer sarımlar birbirlerine yıldız bağlantı ile bağlanmışlarsa, herhangi bir zaman aralığında sadece iki faz üzerinden akım geçmektedir.

Herhangi bir $2\pi/3$ radyanlık faz akımı periyodunda elektrik enerjisinden mekanik enerjiye dönüştürülen anlık güç aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$p = \omega T_e = 2ei \quad (3.9)$$

Eş 3.10'daki 2 rakamı aynı anda iki fazın iletimde olmasından dolayı ortaya çıkmaktadır. Eş 3.7 ve Eş 3.9 bir arada kullanılırlarsa elektromanyetik moment ifadesi Eş 3.10'daki gösterilen şekilde bulunur.

$$T_e = 4N_{ph} B_g x r_1 i \quad (3.10)$$

Eş 3.10 tüm kutup çifti sayıları için geçerlidir.İki fazdaki toplam EMK'yı $E = 2e$ olarak ifade edersek kalıcı mıknatıslı yamuksal EMK'lı fırçasız D.A. motorlar için EMK ve moment denklemleri Eş 3.11 ve Eş 3.12'deki gibi bulunur.

$$E = k\phi\omega = k_e \omega \quad (3.11)$$

$$T = k\phi i = k_t i \quad (3.12)$$

Eş. 3.11 ve 3.12’de $k = 4 Nph$, $\Phi = B_g r_1 \pi x$ değerlerini ifade eder. k_t moment sabitini ifade ederken k_e ise zıt EMK katsayısı olarak adlandırılır ve kalıcı mıknatıslı yamuksal EMK’lı fırçasız D.A. motorlar için birbirlerine eşittirler.

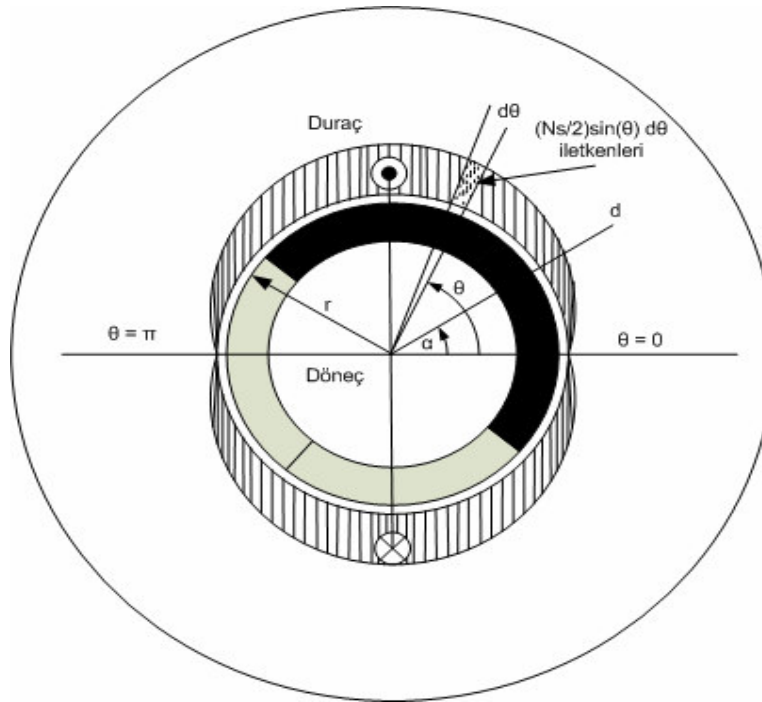
3.2. Kalıcı Mıknatıslı Sinüsel Zıt EMK’lı Fırçasız Doğru Akım Motorunda EMK ve Elektromanyetik Moment Özelliklerinin Matematiksel İncelemesi

Kalıcı mıknatıslı sinüsel zıt EMK’lı fırçasız D.A. motorları duraç amper-iletken dağılımı ve manyetik akının etkisi incelenerek analiz edilebilir. Şekil 3.5’de iki kutuplu bir kalıcı mıknatıslı sinüsel zıt EMK’lı fırçasız D.A. motor gösterilmiştir. İletkenler duraç yapısı üzerinde sinüsel dağılımlı iletken yoğunluğu oluşturacak şekilde dağıtılmıştır. Bu yapıda herhangi bir $d\theta$ açı aralığında iletken sayısını ifade etmek gerekirse,

$$N_\theta = (N_s / 2) \sin \theta d\theta \quad (3.13)$$

Eş 3.13 ‘de N_s tüm sarımdaki sarım tur sayısını ifade eder, p kutup çifti sayısını ifade etmek üzere kutup başına düşen sarım tur sayısı Eş 3.14 ile bulunur

$$N_p = N_s / 2p \quad (3.14)$$



Şekil 3.5 Kavramsal Kalıcı Mıknatıslı Sinüsel Zıt EMK’lı Fırçasız D.A. Motor

Çok kutuplu bir motorda bir mekaniksel dönüş p kutup çifti sayısında elektriksel döngüden oluşur. θ mekaniksel açıyı ifade etmek üzere, θ_e elektriksel çevrim açısı Eş 3.16'da gösterilmiştir.

$$\theta = \theta_e / p \quad (3.15)$$

$$\theta_e = p\theta \quad (3.16)$$

Duraç amper-sarım dağılımı, iletken dağılımı ile aynı formda sinüs dağılımlı akım tabakası yapısı gösterir ve $d\theta$ pozitif yönde akan amper-iletken yönünü göstermek üzere aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$D_i = i \frac{N_s}{2} \sin(p\theta) d\theta \quad (3.17)$$

Kuzey d ekseninde merkezlenen ve duraç sarımı ekseninde α açısı kadar ayrılmasıyla oluşan döneç mıknatıs akı dağılımı Eş 3.18'de görülmektedir.

$$B(\theta) = B_m \cos(p\theta - \alpha) \quad (3.18)$$

Mıknatısın dönme hareketi de hesaba katılırsa, ω anlık açısal hızı ifade etmek üzere Eş. 3.18, Eş. 3.19'daki halini alır.[17]

$$B(\theta) = B_m \cos(p\theta - \omega t - \alpha) \quad (3.19)$$

Eş 3.18 ve Eş. 3.19'da dikkat edilmesi gereken durum, B_m değerinin mıknatısın kendi başına ürettiği hava boşluğu akı yoğunluğunun tepe değeri oluşudur. Her ne kadar armatür tepkisi hava boşluğundaki akı yoğunluğunu etkileyebilse de limit durum olan manyetik doygunluk durumu ortaya çıkmadıkça ifadelerde etkisi yok sayılabilir.

Dairesel yönde temel amper- sarım grubu için uygulanan kuvvet

$$F = B_m x i \sin(p\theta) \cos(p\theta - \omega t - \alpha) d\theta \quad (3.20)$$

olarak bulunur, bu ifadede x duraç ve döneç eksen uzunluğunu ifade eder. Duraç üzerinde, karşı elemanla birlikte $2Fr_1$ 'lik çift oluşturulur. Eşit ve zıt yönlerde olan çift döneç üzerinde etkide bulunur ve dönüş hareketini sağlar. Döneç üzerinde oluşan

toplam elektromanyetik moment, hava boşluğu yapısının üzerinde tüm temel dağılımların toplamı olarak oluşur. $2Fr_1$ 'lik kuvvetin çiftin p kutup çiftli üzerinden tümlevini alırsak, p kutup çiftli kalıcı mıknatıslı sinüsel zıt EMK'lı fırçasız motor için elektromanyetik moment ifadesi,

$$T = -p \int_0^{\pi/p} 2F_r d\theta = -2r_1 B_m x_i \int_0^{\pi} \sin(\theta) \cos(\theta - \omega t - \alpha) d\theta \quad (3.21)$$

$$T = -\frac{\pi r_1 B_m x_i N_s}{2} \sin(\omega t + \alpha) \quad (3.22)$$

Eş. 3.23'deki gibi bulunur. Dikkat edilirse Eş.3.23'deki moment ifadesi sinüsel bir fonksiyon olarak ortaya çıkmıştır ve duraç akımı ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Bir başka önemli sonuçsa $t = 0$ anı için Eş.3.22'yi ele alırsak, en yüksek moment ile kalkışın sağlanabilmesi için kuzey mıknatıs kutbu ekseninin duraç amper iletken dağılımı eksenini 90 derece gecikmeli olarak takip etmesi gerekliliğidir. Kalıcı mıknatıslı sinüsel zıt EMK'lı fırçasız D.A. motorunu en yüksek verimde ve doğrusal bir moment yapısıyla sürebilmek için i faz akımının denetlenerek faz açısı denetiminin Eş 3.22'de geçen sinüs fonksiyonunu içindeki $(\omega t + \alpha)$ faz açısını 90 derecede tutması gerekir. Bu durum Kalıcı mıknatıslı sinüsel zıt EMK'lı fırçasız D.A. motorlar için tasarlanacak sürücü yapılarının anlık döneç konumunu takip edebilecek yapıda olmalarını gerektirir.

Anlık moment denkleminin döneç konumunun döneç açısına bağlı olduğu bilgisinden hareketle moment denklemi,

$$T = ik_t(\theta) \quad (3.23)$$

olarak yazılabilir.

Normal işletimde duraç frekansı (rad / s) dönüş frekansına (elektriksel rad/s) eşit hale getirilir.

$$\omega = 2\pi f \text{ elektriksel rad/s} \quad (3.24)$$

mekanik hız ifadesi ise aşağıdaki gibi oluşur,

$$\omega_m = \omega / p \quad (3.25)$$

Faraday kanuna göre durağan faz sarmıllarında oluşan anlık EMK Eş. 3.26'daki gibi oluşur.

$$e = -\frac{d\psi}{dt} \quad (3.26)$$

Bu ifadede Ψ anlık kapılan akıyı ifade eder. p kutup çiftli bir kalıcı mıknatıslı sinüsel zıt EMK'lı D.A. motorunda akı bağıını hesaplamak için θ açısında ve $d\theta$ aralığında birim iletkenlerin oluşturduğu bir bobin düşünelim, iletkenlerin dönüşleri de $-\theta$ açısında ve $d\theta$ aralığında bulunsun. Açık devre koşulunda bobinden akım geçmez, bütün akı mıknatıslı kaynaklıdır. Bobinden geçen akı Eş. 3.27'deki gibi oluşur.

$$\phi = \int_{-\theta}^{\theta} B(\theta) r_1 x d\theta \quad (3.27)$$

Eş. 3.19'daki $B(\theta)$ değerini Eş. 3.27'ye yerleştirdiğimizde akı değerini,

$$\phi = \frac{B_m 2r_1 x}{p} \sin(p\theta) \cos(\omega t + \alpha) \quad (3.28)$$

olarak buluruz.

$\theta = \pi / 2p$ ve $t = 0$ alırsak, kutup başına düşen akı ifadesi,

$$\phi = \frac{B_m 2r_1 x}{p} \quad (3.29)$$

olarak bulunur. Bu akı dönecin dönme hareketi ile birlikte dönen sabit bir akıdır. Bobinde kaptığı akı Eş. 3.30'daki şekilde ifade edilir.

$$d\Psi = \phi \left[\frac{N_s}{2} \sin(p\theta) d\theta \right] \quad (3.30)$$

Sarımdaki toplam akı bağı bütün temel bobinlerin kaptığı akıların toplamından oluşur. P kutup çiftli bir makine için sarımdaki toplam kapılan akı ifadesi Eş 3.33'deki gibi çıkar.

$$\Psi_M = p \int_0^{\pi/p} d\Psi \quad (3.31)$$

$$\Psi_M = \frac{B_g x r_1 N_s \pi}{2p} \cos(\omega t + \alpha) = \frac{\pi}{4} N_s \phi_M \cos(\omega t + \alpha) \quad (3.32)$$

İfade $\Psi_{Mg} = (\pi/4) N_s \Phi_M$ olacak şekilde sadeleştirilirse,

$$\Psi_M = \Psi_{Mg} \cos(\omega t + \alpha) \quad (3.33)$$

Eşitliği elde edilir. Faraday kanununa göre anlık faz zıt EMK'sı

$$e = - \frac{d\Psi_M}{dt} \quad (3.34)$$

$$e = \omega \Psi_{Mg} \sin(\omega t + \alpha) \quad (3.35)$$

olarak bulunur. Eş 3.35'de görüldüğü gibi kalıcı mıknatıs sinüsel zıt EMK'lı fırçasız D.A. motorunun zıt EMK karakteristiği beklendiği gibi bir sinüs fonksiyonu yapısındadır. Üretilen zıt EMK hız ile doğru orantılıdır. İfadenin döneç konumuna bağlılığı göz önünde bulundurularak, EMK denklemini mekanik hız cinsinden ifade etmek istenirse,

$$e = \frac{\omega}{p} \frac{B_g x r_1 N_s \pi}{2} \sin(\omega t + \alpha) \quad (3.36)$$

$$e = \omega_m k_e(\theta) \quad (3.37)$$

olarak ifade edilir.

3.3. Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motorları Elektriksel Modeli

Yıldız bağlantılı üç fazlı bir kalıcı mıknatıslı fırçasız D.A. motorda nötr kullanılmadığı için tüm faz akımlarının toplamı sıfır olmalıdır. İa, İb, İc sırasıyla A, B ve C faz akımlarını temsil etmek üzere

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (3.38)$$

$$i_a + i_b = -i_c \quad (3.39)$$

Şekil 3.6'deki faz gerilimleri matematiksel olarak ifade edilirse, Eş. 3.40 elde edilir.

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \left(\begin{pmatrix} L_a & L_{ba} & L_{ca} \\ L_{ab} & L_b & L_{cb} \\ L_{ac} & L_{bc} & L_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (3.40)$$

- e_a A fazı üzerindeki zıt EMK voltajı
- e_b B fazı üzerindeki zıt EMK voltajı
- e_c C fazı üzerindeki zıt EMK voltajı
- i_a A fazı akımı
- i_b B fazı akımı
- i_c C fazı akımı
- L_a A fazı endüktansı
- L_{ab} A fazının B fazı ile karşılıklı oluşturdukları endüktans
- L_{ac} A fazının C fazı ile karşılıklı oluşturdukları endüktans
- L_b B fazı endüktansı
- L_{ba} Bfazının A fazı ile karşılıklı oluşturdukları endüktans
- L_{bc} B fazının C fazı ile karşılıklı oluşturdukları endüktans
- L_c C fazı endüktansı
- L_{ca} C fazının B fazı ile karşılıklı oluşturdukları endüktans
- L_{cb} C fazının B fazı ile karşılıklı oluşturdukları endüktans
- V_a A fazı kaynak gerilimi
- V_b B fazı kaynak gerilimi
- V_c C fazı kaynak gerilimi

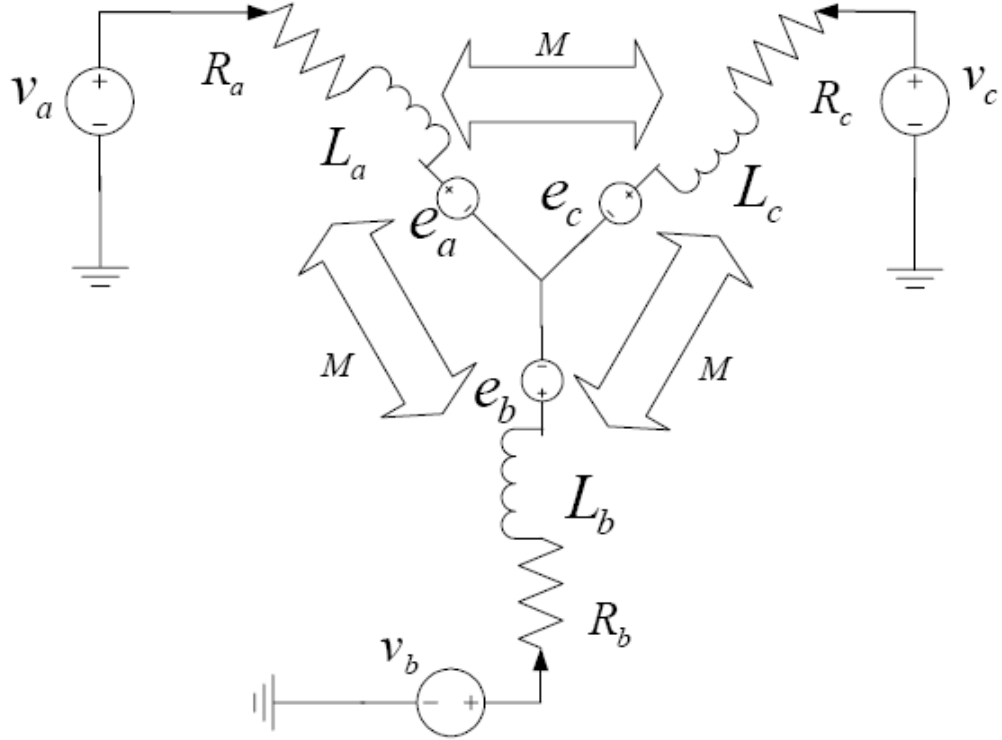
Eğer döneç alanını harekete geçiren kalıcı mıknatısın yapısının endüktansların döneç konumundan bağımsız olmalarını sağladığı düşünülürse,

$$L_a = L_b = L_c = L_p \quad (3.41)$$

Eş 3.40'daki matrisin simetri durumu, endüktansların döneç konumundan bağımsız olma durumu ile birlikte değerlendirilirse,

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{bc} = L_{cb} = L_{ca} = L_{ac} = M \quad (3.42)$$

eşitliği elde edilir. Bu durumda Eş 3.40 aşağıda görüldüğü gibi Eş 3.42'ye indirgenir.



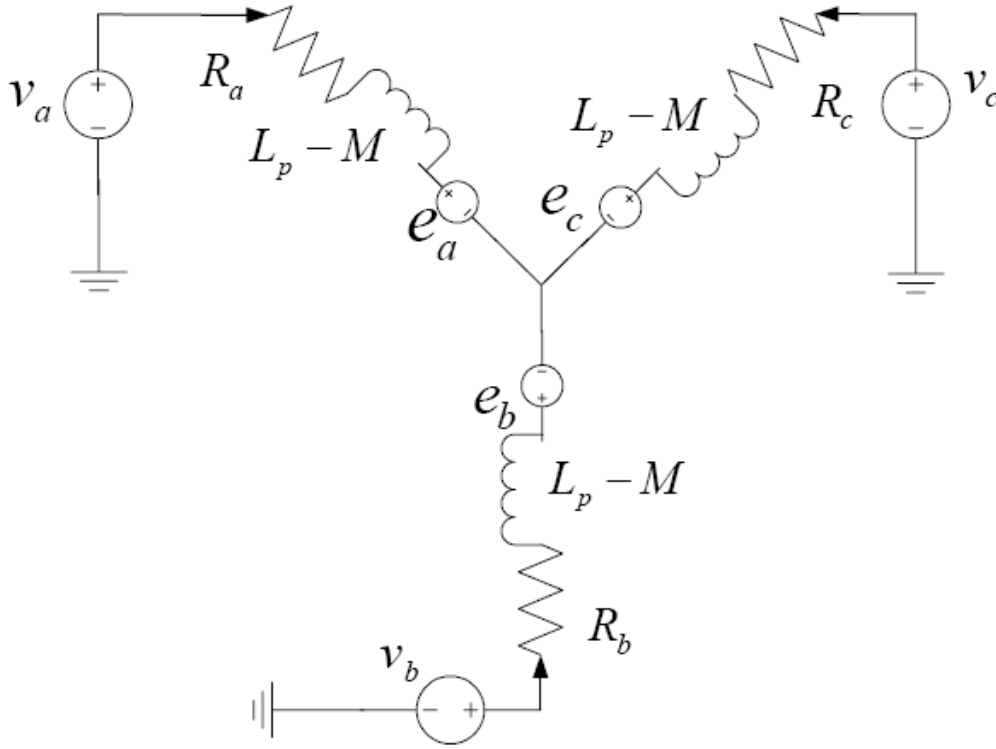
Şekil 3.6 Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız D.A. Motoru R,L ve Zıt EMK Elektriksel Modeli[11]

$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} L_a & M & M \\ M & L_b & M \\ M & M & L_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (3.43)$$

Eş 3.39,Eş 3.41,Eş 3.42 ve Eş 3.43 bir arada kullanılırsa,

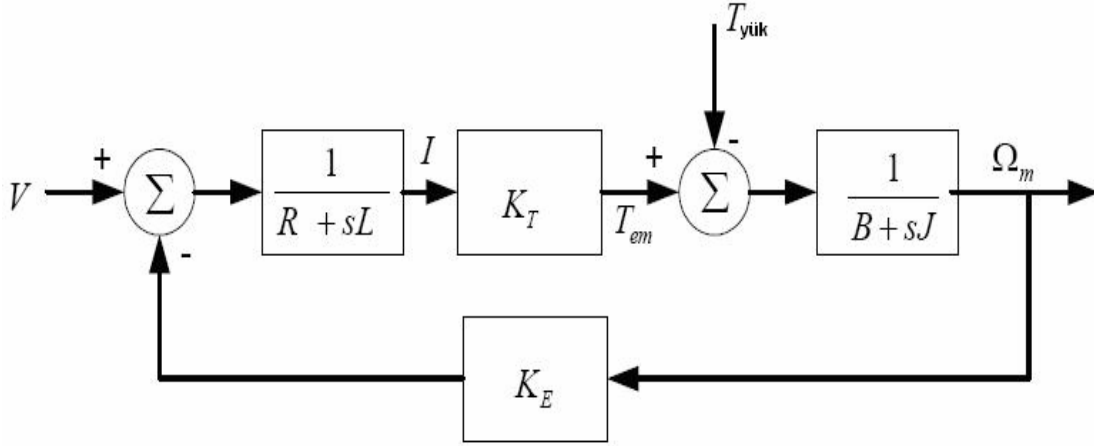
$$\begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} L_p - M & 0 & 0 \\ 0 & L_p - M & 0 \\ 0 & 0 & L_p - M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (3.44)$$

Eş 3.44 elde edilir.



Şekil 3.7 Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız D.A. Motorunun Basitleştirilmiş R,L ve Zıt EMK Elektriksel Modeli[11]

Kalıcı mıknatıslı fırçasız D.A. motorlarının yamuksal ve sinüsel zıt EMK'lı tipleri için moment ve zıt EMK karakteristikleri sırasıyla Eş 3.11, Eş 3.12, Eş. 3.23 ve Eş 3.37'de belirtilmişti. Eşitliklerden çıkartılan ana fikirlerden biri de, yamuksal zıt EMK için ideal ateşleme zamanlarının sağlanması , sinüsel zıt EMK'lı tiplerde ise akımın faz açısının döneç dönüş açısına göre ideal denetimin sağlanması koşulunda her iki motor tipinde de doğrusal moment yapısı oluşturulabileceği ve sinüsel zıt EMK'lı motordaki döneç açısına bağlılığın da ortadan kalkmasıyla kalıcı mıknatıslı fırçasız motor modellerinin ortak bir model üzerinde incelenebilmesinin mümkün olduğudur. Şekil 3.7'daki kalıcı mıknatıslı fırçasız motor elektriksel modelinin aktif fazların eşdeğer direnç, endüktans,faz akımı ve zıt EMK değerlerinin Laplace ortamına taşınmasıyla oluşturulan kalıcı mıknatıslı fırçasız motor elektriksel modeli I iki faz üzerinden geçen akım büyüklüğü ve L aktif olan iki fazın toplam endüktans değerini belirtmek üzere Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız D.A. Motoru Modeli

Şekil 3.8'deki motor modeli incelenirse, elektriksel moment ve zıt EMK eşitliklerinin de gösterdiği gibi ideal sürüş koşullarında kalıcı mıknatıslı fırçasız D.A. motor modelinin, fırçalı D.A. motor modeli ile örtüştüğü görülür. Bu modelde Ω_m mekanik hızı ifade ederken V besleme gerilimini temsil eder.

Şekil 3.8'den yola çıkılarak kalıcı mıknatıslı fırçasız D.A. motorun aktarım işlevi yüksüz olarak Eş 3.45'deki gibi bulunur.

$$\frac{\Omega_m(s)}{V(s)} = \frac{\frac{K_T}{JL}}{s^2 + \left(\frac{JR + BL}{JL}\right)s + \left(\frac{BR + K_T K_E}{JL}\right)} \quad (3.45)$$

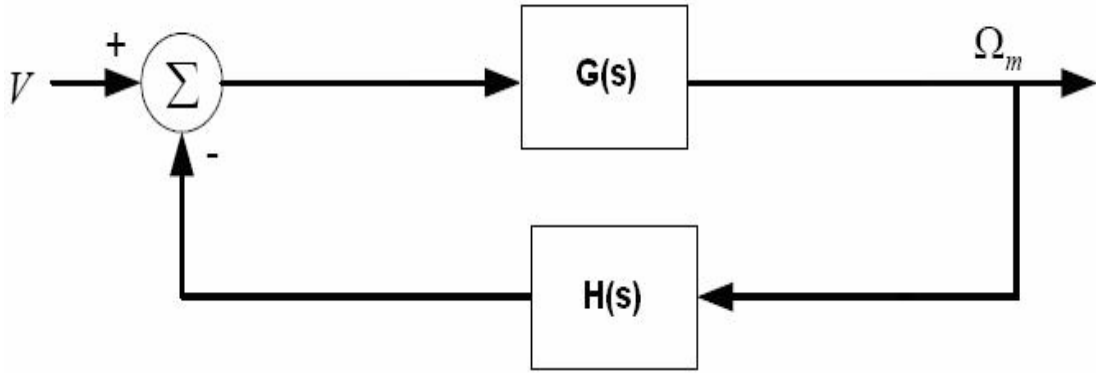
Kök yer eğrisi bir denetim sistem tasarım tekniği olup açık çevrim kazancının sıfırdan sonsuza artırılması durumunda kapalı çevrim köklerinin belirlenmesini sağlar[22]. Moment ve zıt EMK sabitleri çarpımı sıfırdan sonsuza giderken Şekil 3.8'deki kalıcı mıknatıslı fırçasız D.A. motorun kök yer eğrisi analizini gerçekleştirmek için Şekil 3.8'deki sistem modelinde yükü sıfır alırsak ve sistem modelini Şekil 3.9'deki gibi ifade edersek, $G(s)$ ve $H(s)$ 'in değerleri Eş 3.46 ve Eş 3.47'de belirtildiği gibi oluşur.

$$G(s) = \frac{K_T}{(R + sL)(B + sJ)} \quad (3.46)$$

$$H(s) = K_E \quad (3.47)$$

Bu durumda kapalı döngü denklemi Eş 3.48'daki gibi yazılır

$$\frac{\Omega_m(s)}{V(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (3.48)$$



Şekil 3.9 Motor Modelinin Kök Yer Eğrisi Analizine Hazırlanmış Hali

Kapalı çevrim döngüsünün bölen kısmı sıfıra eşitlendiğinde elde edilen denkleme karakteristik denklem denir. Bunun nedeni bu denklemin köklerinin zaman karakteristiğini belirlemesidir[6]. Bu durumda kapalı çevrim döngüsünün karakteristik denklemi,

$$\Delta(s) = 1 + G(s)H(s) \quad (3.49)$$

$$\Delta(s) = 1 + K_E K_T \frac{1}{(R + sL)(B + sJ)} \quad (3.50)$$

olarak bulunur.

$G(s)H(s)$ terimi $P(s)$, $K_T K_E$ terimi K olarak ifade edilirse

$$\Delta(s) = 1 + KP(s) \quad (3.51)$$

$$P(s) = \frac{1}{(R + sL)(B + sJ)} \quad (3.52)$$

Eş 3.23'de bulunan $P(s)$ 'in kökleri,

$$p_1 = -R/L \quad (3.53)$$

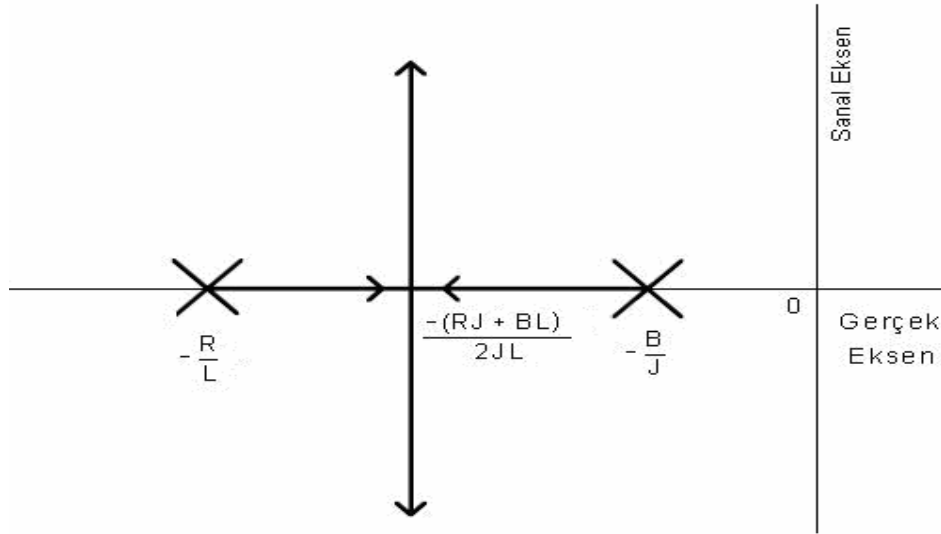
$$p_2 = -B/J \quad (3.54)$$

olarak bulunur. $P(s)$ formülünde iki kutup bulunurken hiç sıfır bulunmaz. Bu durumda kök yer eğrisi çiziminde $K_e K_t$ terimi sıfırdan sonsuza ilerlerken kapalı çevrim kökleri p_1 ve p_2 'den başlayıp sonsuza uzanırlar. $P(s)$ formülünde kutup - sıfır farkı iki olduğundan asimptot açıları 90° ve 270° olarak bulunur.

Asimptot merkezi bulunmak istenirse,

$$\sigma_A = \frac{\left(-\frac{R}{L}\right) + \left(-\frac{B}{J}\right)}{2} = -\frac{(RJ + BL)}{2JL} \quad (3.55)$$

Bu durumda kök yer eğrisi çizimi Şekil 3.10'daki gibi gerçekleşir. Şekil 3.10 incelenirse kapalı çevrim köklerinin $K_e K_t$ çarpımının her değeri için sol yarı alan içinde kaldığı görülmektedir. Bu hali ile motor kararlı bir yapıya sahiptir ve hız denetimi uygulamaları için uygundur.



Şekil 3-10 Kalıcı Miknatıslı Fırçasız D.A. Motorun Moment ve Zıt EMK Sabitleri Çarpımı Sıfırdan Sonsuza İlerlerken Kök Yer Eğrisi Analizi

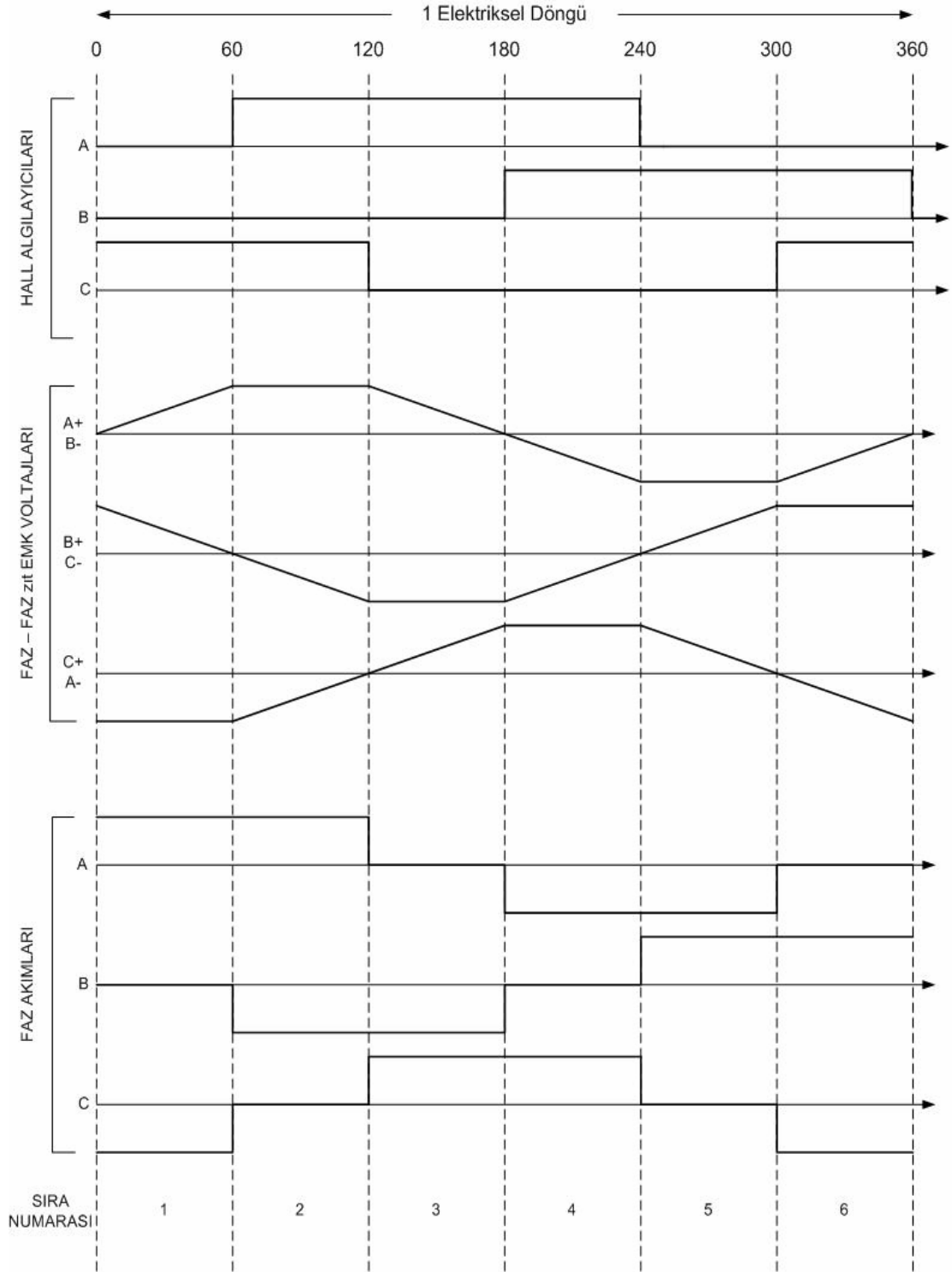
4. SÜRÜCÜ DEVRENİN TASARIMI

4.1. Fırçasız Motorlarda Altı Adım Anahtarlama Tekniği

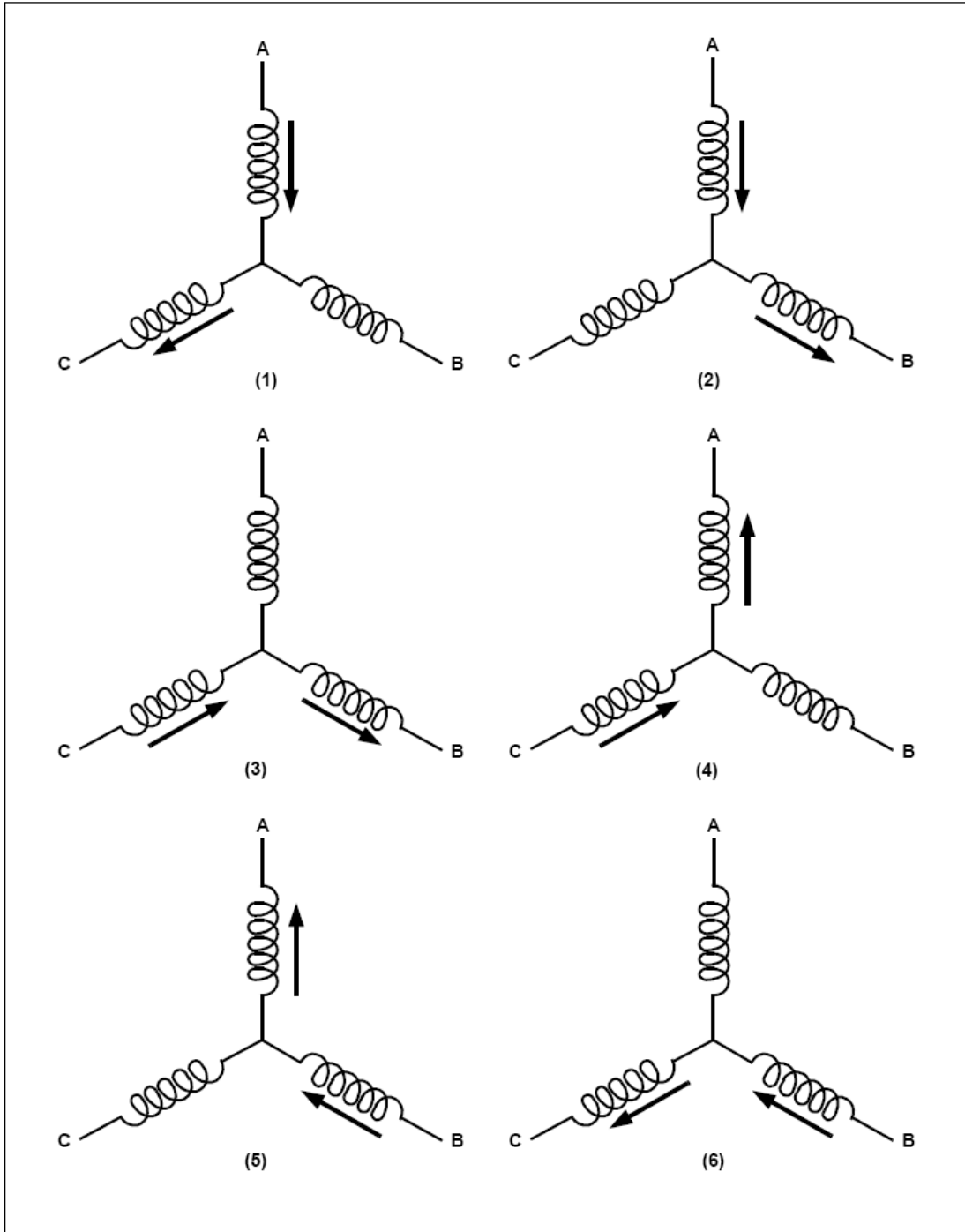
Bu anahtarlama tekniğinde , her anahtarlama sırasında sarımların birine akım girerken diğer bir sarımdan aynı büyüklükteki akım çıkar yani nötr noktası göreceli bir referans noktası olarak alınırsa bir sarımdan pozitif yönde akım geçerken diğer sarımdan aynı büyüklükte negatif yönde akım geçer. Üçüncü faz enerjilendirilmemiş durumda bırakılır. Moment, kalıcı mıknatıslar ile duraç bobinleri tarafından oluşturulan manyetik alanların etkileşimi ile üretilir. İdeal olarak en yüksek moment bu iki alanın birbirlerine doksan derecelik bir açıyla etkileşimi ile ortaya çıkar. Motorun hareketi için duraçta dönen bir manyetik alan oluşturması gerekliliği ve bunun da mil konumunun takibi ile mümkün olduğu önceki bölümlerde açıklanmıştı. Dönen bir duraç manyetik alanı oluşturmak için duraç sarımlarından geçen akımın yönünü bir elektrik çevrim boyunca altı kere değiştiren anahtarlama tekniğine altı adımlı anahtarlama tekniği denir[28].

Özellikle kalıcı mıknatıslı yamuksal zıt EMK fırçasız D.A. motorlarında, Hall algılayıcılarının sağladığı konum bilgisi ile kullanılan altı adımlı anahtarlama tekniği 80000 RPM'ye ulaşan hızlarda bile kullanım imkanı sağlar. Maliyet duyarlı sistemlerde basit ve kolay uygulanabilir yapısıyla öncelikli olarak tercih edilen bu anahtarlama tekniği, akım yönünün aniden değişmesine dayalı yapısı ve oluşturduğu moment dalgalanması sebebiyle moment doğrusallığının ve veriminin çok önem taşıdığı uygulamalarda genellikle tercih edilmemektedir.

Şekil 4.1'deki örnekte kalıcı mıknatıslı yamuksal zıt EMK'lı fırçasız doğru akım motorunda kullanılan birbirlerinden 120 elektriksel derece ile ayrılmış 180 elektriksel derecelik çıkış veren üç Hall Algılayıcısının motor fazlarının EMK ve akım özelliklerine göre ideal çıkışları ve altı adım anahtarlama tekniğine göre anahtarlama sırası gösterilmiştir. Anahtarlanma sırasına göre oluşacak faz akımlarının yönü Şekil 4.2'de belirtilmiştir.



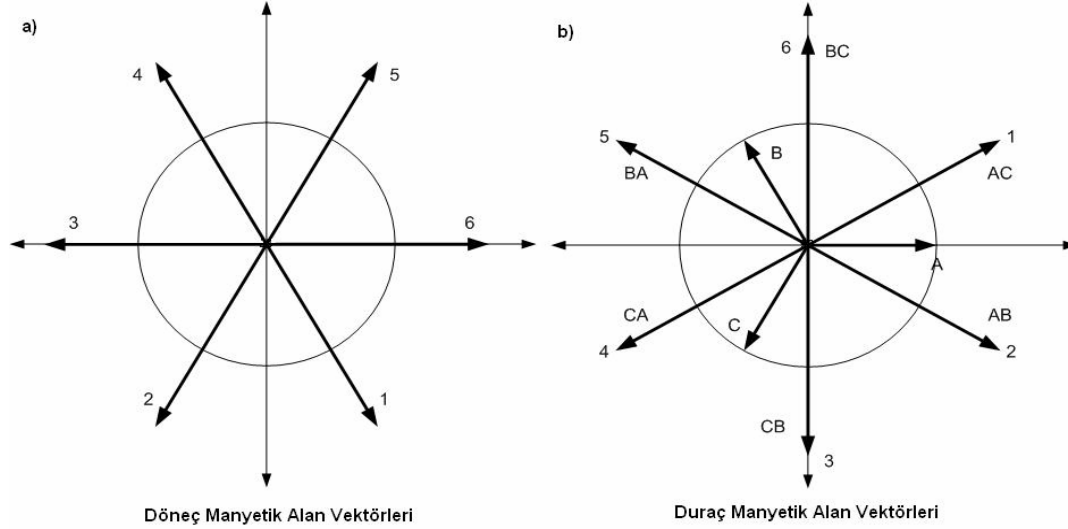
Şekil 4.1 Örnek Bir Kalıcı Mıknatıslı Yamuksal Zıt EMK'lı Fırçasız Doğru Akım Motoruna Ait Hall Algılayıcısı Çıktılarının, Motor Fazlarının Zıt EMK ve Akım Özelliklerine Göre Çıktıları.



Şekil 4.2 Anahtarlama Sırasına Göre Değişen Faz Akımlarının Yönleri[28]

Her 60 derecelik dönüşte üç Hall algılayıcısından bir tanesi durum değiştirir. Bir tam elektriksel çevrimin tamamlanması altı adım gerektirir. 60 derecelik değişimlere uyumlu olacak şekilde faz akımlarının da yönünün değiştirilmesi gerekir. Duraç sarımlarındaki akım yönünün değişmesi, hareket için gerekli olan

dönen manyetik alanın oluşumunu sağlar. Kalıcı mıknatıslı yamuksal zıt EMK'lı fırçasız motor için altı adım anahtarlama ile oluşan dönen duraç ve döneç alan vektörleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Bu sayede ideal anahtarlama ve akım durum değişimi koşullarında

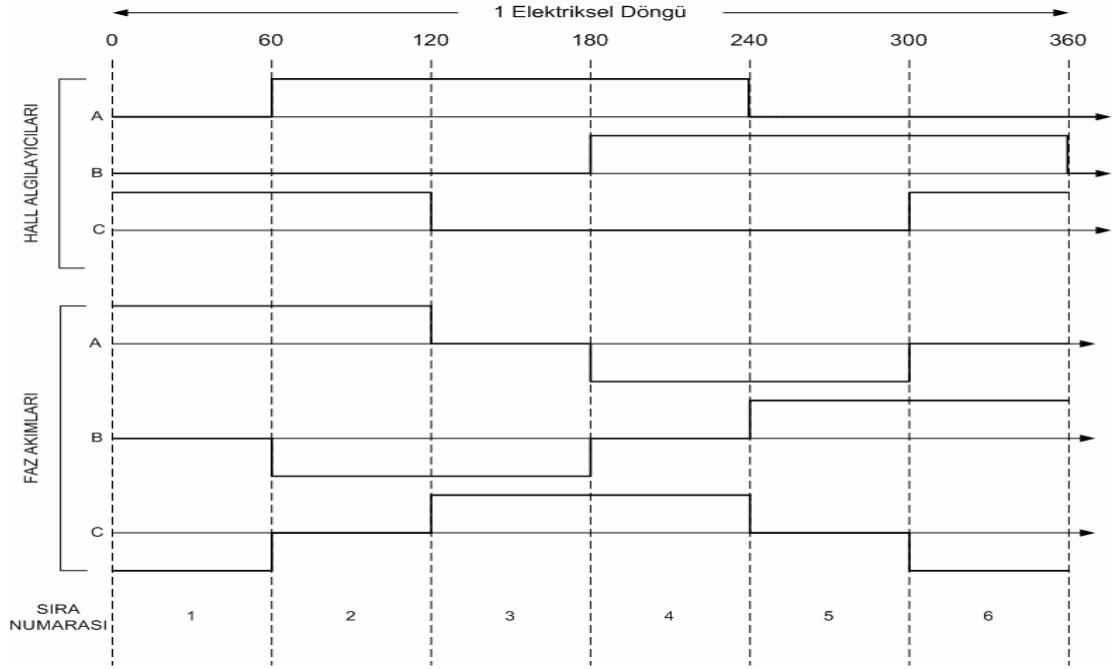


Şekil 4.3 Döneç ve Duraç Manyetik Alan Vektörleri

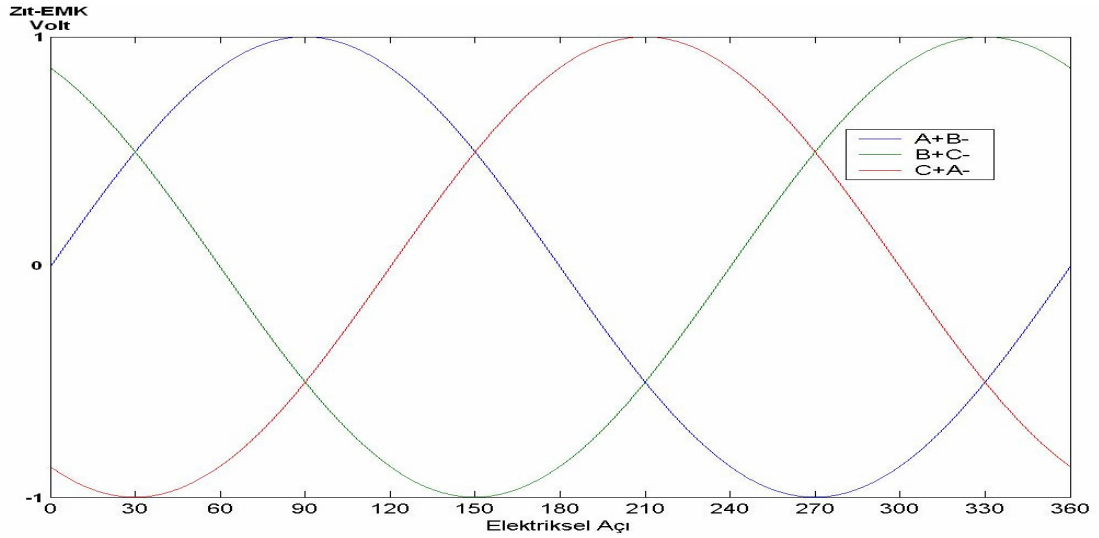
döneç ve duraç manyetik alanları arasındaki açı 90 derecede korunur ve doğrusal bir moment çıkışı sağlanır. Ne var ki pratikte akım yönünde ani atlamalar yapmak mümkün değildir bu nedenle bu yöntem kullanıldığında çıkış momentinde dalgalanmalar yaşanması kaçınılmazdır.

Altı adım anahtarlama yöntemi sadece yamuksal zıt EMK'lı motorlar için değil aynı zamanda sinüsel zıt EMK'lı motorları sürmek için de kullanılabilen bir yöntemdir. Sinüsel zıt EMK'lı motorlar ürettikleri sinüsel zıt EMK ile pratikte daha yumuşak moment salınımları oluştururlar ve hassas vektörsel alan denetimi gibi motor mil konumunun kesin takibini gerektiren, mil açısı, motor hızı ve akım denetimi gibi geri besleme yapıları ile desteklenebilen yöntemler ile yamuksal motorlara oranla daha iyi moment doğrusallığı sağlayabilirler. Maliyet duyarlı sistemlerde kullanılan altı adım anahtarlama tekniğinin sinüsel motorları sürerken oraya çıkardıkları en büyük sorun faz akımlarının sinüsel değil dikdörtgensel dalgalardan oluşan ancak sinüs benzeri olarak nitelenebilecek yapıda oluşudur. Bu tarz bir sürüş tekniğinde ideal koşullar da bile kesin moment doğrusallığını yakalamak olanaksızdır.

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de örnek bir sinüsel motor için Hall algılayıcıları çıkışları, faz besleme akımları ve fazlar arası oluşan zıt EMK yapıları verilmiştir. Yamuksal zıt EMK’lı motorlarda doğrusal moment oluşumuna imkan veren 60 derecelik dönüş aralıklarıyla 90 derecede sabit kalabilen duraç ve döneç manyetik alanları



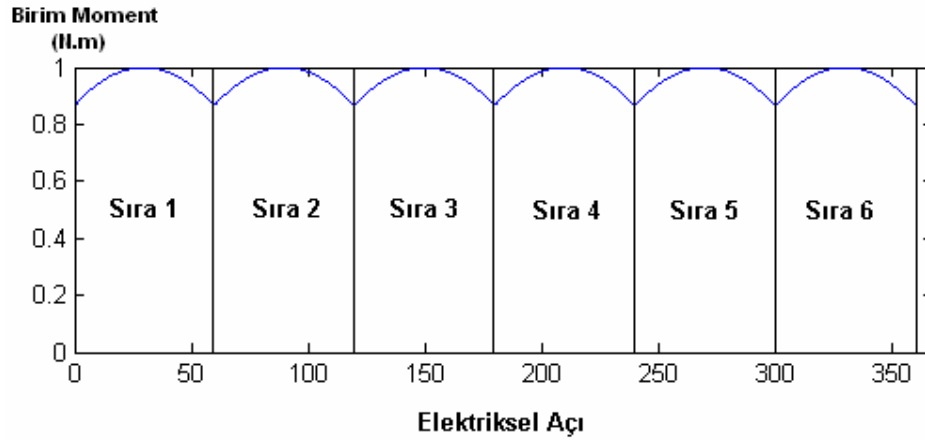
Şekil 4.4 Kalıcı Mıknatıslı Sinüsel Zıt EMK’lı Fırçasız D.A. Motor için Örnek Faz Akımları ve Hall Algılayıcıları Sinyalleri



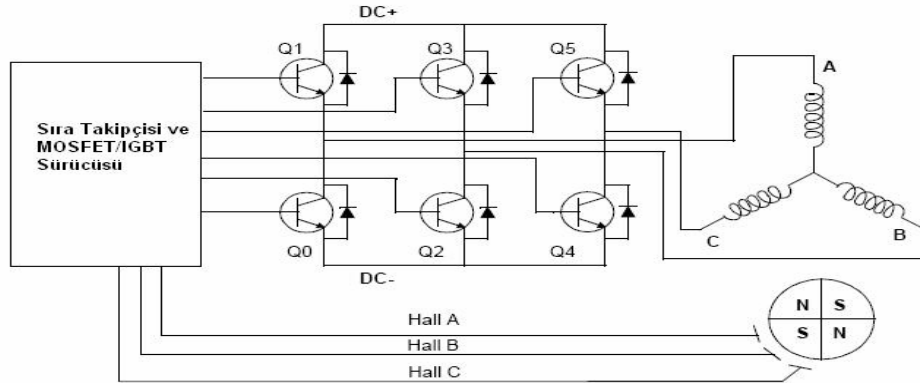
Şekil 4.5 Kalıcı Mıknatıslı Sinüsel Zıt EMK’lı Fırçasız D.A. Motor Zıt EMK Yapıları

arasındaki açı, sinüsel motorlarda mil konumuna göre sürekli değişir. Altı adım anahtarlama bir elektriksel tur boyunca sadece altı kez yani 60'ar elektriksel derecelik dönüş açılarıyla alınabilen konum bilgisi, alanlar arası açı farkını 90 derecede tutmak için yeterli olmaz. 90 derece referans kabul edilirse alanlar arası açı farkı $\pm 30^\circ$ arasında salınım yapar bu da moment doğrusallığında aynı ölçüde salınma neden olur. Şekil 4.6, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'deki verilere ve anahtarlama sırasına göre oluşan moment salınışını gösterir.

Örnek bir altı adımlı anahtarlama devresi Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekilde gösterilen devre, motoru harekete geçirmek için yeterli olmakla beraber motorun hız veya moment denetiminin sağlanabilmesi için motor faz besleme gerilim veya akımının üzerinde PWM benzeri yöntemlerle denetim kurulabilmesi ve kapalı döngü geri besleme yapılarının sisteme eklenmesi gerekir.



Şekil 4.6 Anahtarlama Sırasına Göre Oluşan Moment Çıkışı



Şekil 4.7 Örnek Altı Adımlı Anahtarlama Devresi

4.2. Akım Denetimli Gerilim Kaynaklı Çevirgeç

Gerilim kaynaklı çevirgeçler, DA gerilimini değişken frekans ve büyüklükte AA gerilimine dönüştüren cihazlardır. AA Motor hız denetimi uygulamalarında sıklıkla kullanılırlar. Bu cihazlarla üretilen AA geriliminin frekansı uygulamaya göre sabit veya değişken olabilir. Çevirgeç anahtarları uygulama, işleyiş ve nominal değer gereksinimlerine uygun şekilde seçilmelidir[2]. Anahtar tiplerinden MOSFET'ler düşük güç ve gerilim uygulamaları için evrensel bir yarı iletken olmakla beraber IGBT ve BJT'ler orta güç uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Akım denetleyicileri, çevirgeçlerde kapı sinyallerini oluşturmak amaçlı kullanılır. Akımın denetimi sağlanan değişken olarak kullanılmasının sebebi genel denetim sistemini, duraç dinamikleri olan duraç direnci, endüktansı ve endüklenen EMK değişkenlerinden bağımsız hale getirmesidir. Bu haliyle akım düzenleyici bu yapı sadece ideal akım kaynağı olarak çalışmakla kalmaz genel denetim yapısının karmaşıklığı ve boyutunu da oldukça düşürür.

Akım denetiminde darbe genişliği modülasyonu en çok kullanılan tekniklerden biridir. Sabit ve değişken frekanslı uygulama teknikleri bulunur. Darbe genişliği modülasyonu tekniğinin temelinde denetleyici tarafından oluşturulan referans akım değeri ve motorun çıkış akımı arasındaki farkın eksi veya artı oluşuna göre darbe genişliğinin şekillendirilerek çevirgeç kapılarının açılıp kapanma süresinin belirlenmesi yatar, bu geri beslemeli denetim yapısıyla çevirgeç uçlarındaki DA gerilim istenilen akımı motora sağlayacak şekilde kırılır.

4.3. Geleneksel Denetim Yapıları ve Oransal-Tümlevsel-Türevsel Denetim

Günümüzde endüstri ve pek çok uygulama alanında süreç denetimi ve kararlılığını sağlamak için değişik denetim yöntemi uygulanmaktadır. Geniş bir açı ile bakıldığında denetim sistemlerini iki ana grupta inceleyebiliriz.

- Geleneksel denetim yapıları
- Yeni nesil denetim yapıları

Geleneksel denetim yapılarına P (oransal), PI (oransal-tümlevsel), PID (oransal-tümlevsel-türevsel), PD(oransal-türevsel) gibi yıllardır kullanımda olan denetleyiciler örnek verilebilir. Geleneksel denetleyicilerin ortak noktası ,denetimi

yapılacak sistemin matematiksel modelinin bilinmesinin gerekliliğidir. Yeni nesil denetleyiciler getirdikleri yeni yaklaşımlarla çoğu zaman sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duymazlar. Bu tarz denetim yapılarına bulanık denetleyici, sinirsel denetleyici ve sinirsel-bulanık denetleyiciler örnek verilebilir.

Pek çok endüstriyel süreç doğrusal yapıda değildir ve modellerinin çıkarılabilmesi oldukça zordur. PID denetleyicilerinin değiştirgelerinin iyi ayarlanması durumunda pek çok doğrusal olmayan süreci denetleyebildikleri çok iyi bilinmektedir. Pratik uygulamalar da göstermektedir ki PID denetim tekniğinin bu süreçleri denetleyebilmesi üç temel davranış biçimini yani oransal tepki, tümlevsel tepki ve türevsel tepkiyi bir arada basit yollarla uygulayabilmesi gibi oldukça mantıklı bir nedene dayanır[26].

4.3.1. Açık/kapalı denetleyiciler

Açık/Kapalı ya da iki konumlu denetleyiciler süreç değişkenini sürekli tam açık veya tam kapalı çıkış vererek denetim altına almaya çalışırlar. Eğer süreç değişkeni hedef değerin altındaysa denetleyici eyleyici tam güç uygulayarak tekrar hedef değer civarına çekmeye çalışır, süreç değeri hedef değerin üstüne çıktığında ise devindirici gücü kesilerek süreç değişkeninin hedef değere yaklaşması sağlanır.

Yapısından da anlaşılacağı üzere bu tip bir denetleyici yapısı süreç değişkeninin hedef değer etrafında salınım yapmasına neden olur, bu nedenle bu tip denetimin kullanıldığı uygulamalarda amaç süreç değişkenini hedef değer etrafında oluşturulacak bir ölü bölge aralığı içinde tutmaktır.[27]

4.3.2. Oransal denetleyiciler

Pek çok uygulamada açık/kapalı denetleyicinin yapısal olarak getirdiği hata penceresi kabul edilemez. Oransal denetleyiciler hata sinyalinin büyüklüğüne göre açık veya kapalı konumun arasında da çıkış verebildiklerinden süreç değişkeninin daha sıkı denetimine izin verir. Bir oransal denetleyici doğrusal olmayan tepki yapılarına sahip olabilseler de genellikle doğrusal tepkiye sahiptir yani hata sinyalinin iki katına çıkması sistem tepkisinin de iki katına çıkmasına neden olur.

Oransal denetleyiciler pratik uygulamalarda oransal bir bölge içinde çalışmak zorundadırlar, hata sinyali bu bölgenin dışına çıktığında denetleyici çıkışı en büyük veya en küçük çıkışı verir. Bu yapı Açık/kapalı denetimdeki salınışları engellemekle beraber geriye dönük hata takibinin yapacak bir yapı bulunmadığından hata sıfıra indiğinde denetim sinyali çıkışını sıfıra çeker[26]. Denetim sinyalinin sıfıra çekilmesi denetimin sıfır hatayı korumak için gereken çıkış sinyalinin verilememesi anlamı taşır bu da kararlı durumda referans sinyaline göre sabit bir hata oluşumunu da beraberinde getirir[27].

Oransal denetleyicinin oluşturduğu denetim sinyalinin fonksiyonu Eş. 4.1'de gösterilmiştir.

$$u(t) = Ke(t) \quad (4.1)$$

4.3.3. Oransal-Tümlevsel denetleyiciler

Oransal denetleyicilerde hatanın sıfıra indirgenebilmesi bu denetleyiciye geçmişe dönük hata sinyallerinin değerlendirilebileceği tümlev davranışının kazandırılmasıyla mümkün olur, bu şekilde hata sinyali sıfıra inse de sıfır hatayı koruyacak denetim çıkış sinyalinin oluşturulması mümkün olur. Hatanın sıfıra indirilmesini sağlayan yapı tümlev alıcı yapıdır. Her ne kadar tek başına bir tümlev denetleyicisi hatanın tümlevini alabilen yapısıyla hatayı sıfıra indirebilme kabiliyetindeyse de sistem tepkisi çok yavaştır [27]. Buna karşılık oransal denetleyiciler hatayı oransal olarak takip etmelerinden dolayı hızlı tepki verebilme kabiliyetindedirler. Oransal – Tümlevsel denetleyiciler bu iki denetim yapısının bir arada çalışmasını sağlayarak oransal denetleyici kadar hızlı olmasalar da tümlevsel denetleyiciye göre çok daha hızlı biçimde hatayı sıfıra indirebilirler ve hız denetimi gibi uygulamalarda sıklıkla kullanılırlar.

Oransal ve tümlevsel denetleyicilerinin oluşturduğu oransal-tümlevsel denetim yapısının ürettiği denetim çıkış sinyali t_i tümlev zamanı olmak üzere Eş.4.2'de gösterilmiştir.

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{t_i} \int_0^t e(t) dt \right] \quad (4.2)$$

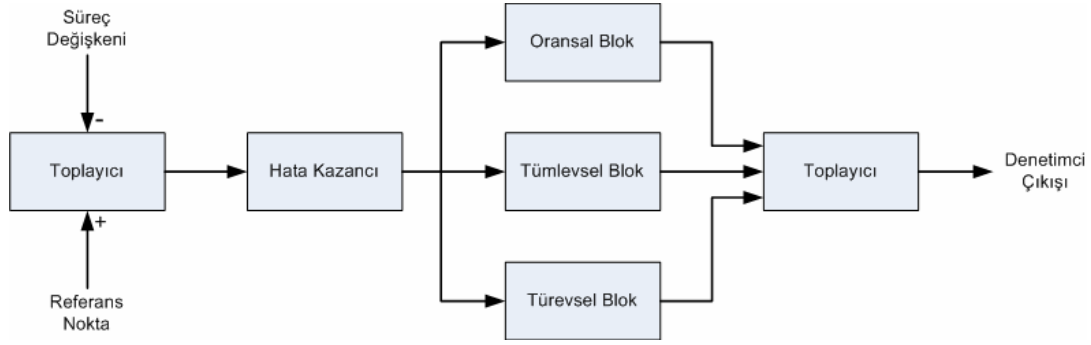
4.3.4. Oransal-tümlevsel-türevsel denetleyiciler

İsminden de anlaşıldığı gibi oransal-tümlevsel-türevsel denetleyiciler tüm oransal,tümlevsel ve türevsel denetleyicilerin özelliklerinin bir arada kullanılabilmesini sağlarlar. Oransal – Tümlevsel denetleyiciler açıklanırken hatayı sifıra indirirken tümlevsel denetleyicilere göre nispeten hızlı bir yapıda denetlemeyi sağladıkları açıklanmıştı. Bu tarz bir denetim yapısının eksikliği ani dayanak noktası değişimlerine verdikleri tepkinin tümlevsel yapısı nedeniyle yeterince hızlı olmayışıdır. Bu sorun ancak hata sinyalinin değişim hızının takibi yani bir anlamda hata sinyalinin bir sonraki durumunun önceden öngörülüp sistemin bu duruma göre bir çıkış verebilmesiyle mümkün olur. Hata sinyalinin değişim hızının takibi hata sinyali üzerinde türevsel bir denetim sağlanmasını gerektirir. Oransal-Tümlevsel denetleyici yapısına türevsel bir denetim yapısının eklenmesiyle günümüzde uygulamalarda en çok kullanılan denetim yapısı olan oransal-tümlevsel-türevsel denetleyicisi oluşur.

PID denetleyicilerin pek çok farklı yapılandırılma şekli olsa da oransal,tümlevsel ve türevsel yapılarının paralel olarak bağlandığı yapılandırma Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Böylesine bir yapılandırmada hata sinyali tüm alt denetleyicilere etki eder.

Şekil 4.8’deki üç ana bloğun da değiştirgelerinin belirlenmesi işlemine ayarlama denir. Değiştirgelerin ayarlanması denetleyicinin yapılandırılmasına ve denetimi sağlanacak sürecin değiştirgeleri ve toleranslarına bağlı olarak değişir[27]. Aynı denetleyici iki farklı süreç denetimi için uygulanacaksa değiştirgeleri bu iki süreç için farklı şekilde ayarlanmalıdır.

Ayar konusunda iki noktaya dikkat edilmelidir. Dikkat edilmesi gereken ilk nokta tümlev ya da türev bloklarının diğer denetim bloklarını bastırmayacak şekilde ayarlanmasıdır. Diğer bir noktaysa eğer sistemin uzun süreli olarak büyük hatalara maruz kalabilmesi gibi bir durum söz konusuysa tümlev bloğunun doyuma ulaşacağı sistem hatayı sifıra doğru indirmeye başlasa da uzun süren hata farkının tümlev bloğundaki doyum konumunun değişmesine engel olabileceğinin göz ardı edilmemesi gerekir.



Şekil 4.8 Paralel Yapılandırılmış Oransal-Tümlevsel -Türevsel Denetim Yapısı

Oransal ve tümlevsel denetleyicilerinin oluşturduğu oransal-tümlevsel denetim yapısının ürettiği denetim çıkış sinyali, t_i tümlev zamanı, t_d türev zamanı olmak üzere Eş.4.3'de gösterilmiştir.

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{t_i} \int_0^t e(t) dt + t_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.3)$$

Eş 4.3 Laplace ortamına taşınırsa Eş. 4.4 elde edilir.

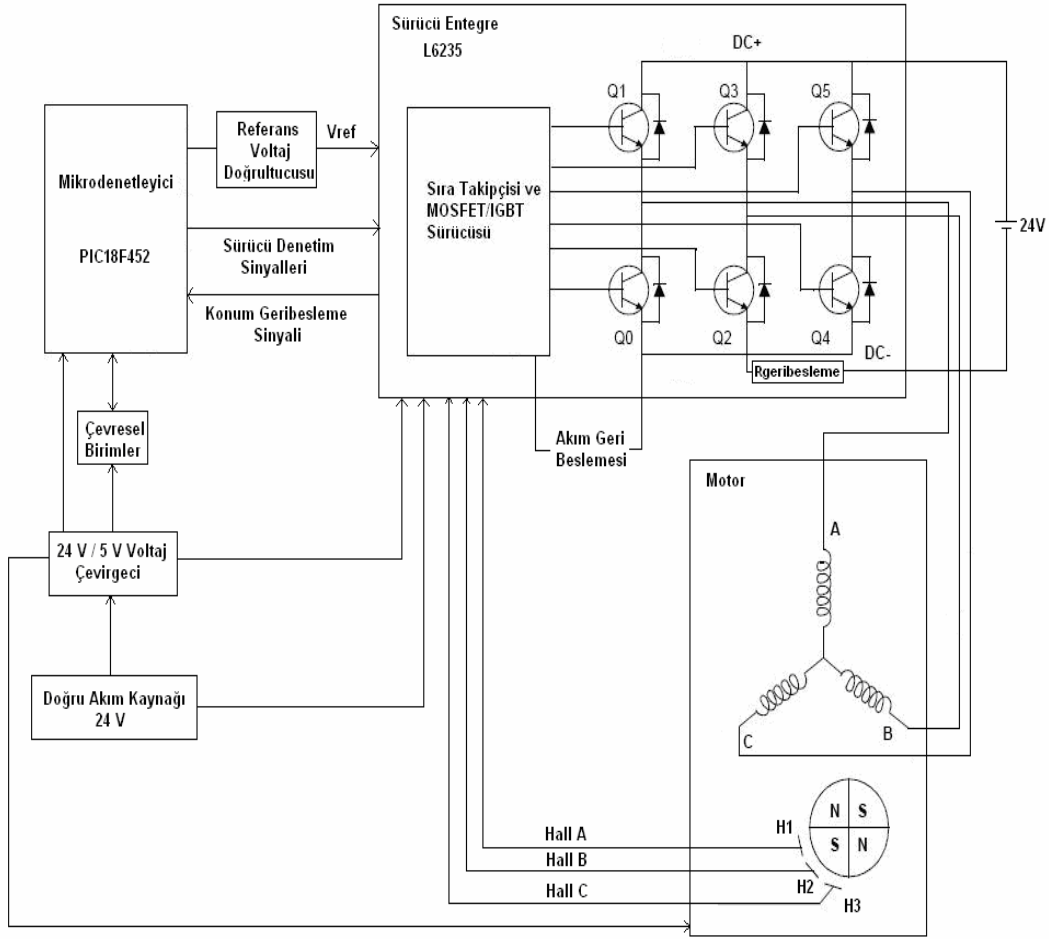
$$U(s) = K \left(1 + \frac{1}{t_i s} + t_d s \right) E(s) \quad (4.4)$$

4.4. Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motor Sürücüsünün Modellenmesi

Bu çalışma kapsamında tasarlanan sürücünün yamuksal ve sinüsel zıt EMK'lı kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarını sürebilmesi ve değişik yükler ile hız denetiminin sağlanabilmesi amaçlanmıştır, bu kapsamda 30 Watt'lık sinüsel zıt EMK'lı, 10 kutuplu, üç adet 120 derecelik elektriksel açı farkıyla konumlanmış Hall konum algılayıcısı çıkışına sahip kalıcı mıknatıslı sinüsel zıt EMK'lı fırçasız doğru akım motorunun hız denetimi gerçekleştirilmiştir.

Sürücü yapısı ana hatlarıyla çevresel iletişimi ve PID denetim hesaplarını gerçekleştiren bir mikro denetleyici, motor Hall algılayıcı bilgilerini altı adım anahtarlama tekniğine göre işleyen, akım denetimli gerilim kaynaklı çevirgeç özelliği taşıyan sürücü entegre ve bu iki ana yapıyı destekleyen ve parametrik ayarların yapılabilmesine imkan tanıyan çevresel devre elemanları ve iletişim

birimlerinden oluşur. Şekil 4.9 tasarımılanan sürücünün genel yapısını göstermektedir.



Şekil 4.9 Tasarımlanan Sürücü Yapısı

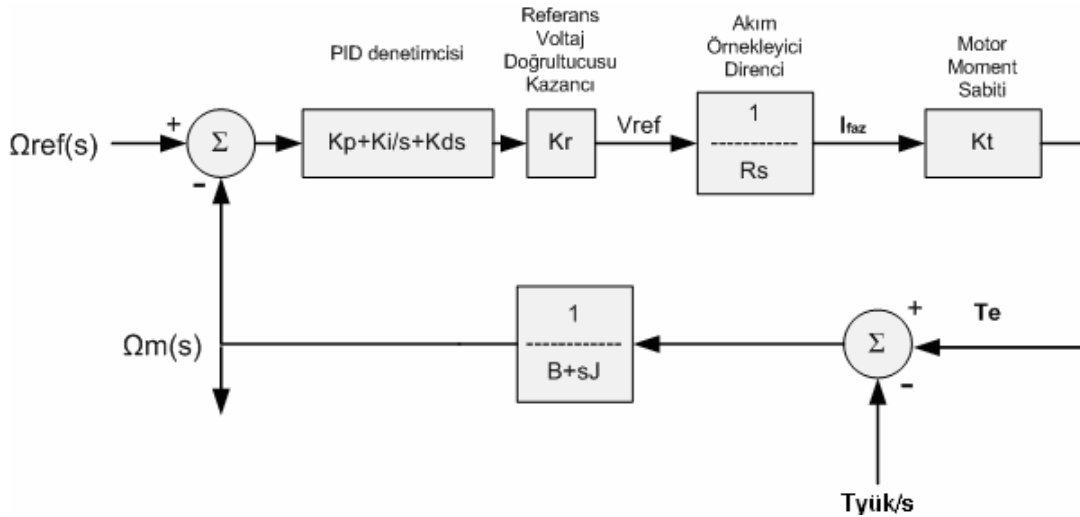
Kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorunun matematiksel modeli Eş 3.43 ile açıklanmıştır. Bölüm 4.2'de anlatılan akım denetimli gerilim kaynaklı çevirgeç yapısının en önemli özelliği ideal bir doğru akım kaynağı gibi çalışması bu sayede motor hareket dinamiklerini duraç endüktansı, duraç direnci ve zıt EMK yapısından bağımsız hale getirmesi ve sistem modelini basitleştirmesidir.

Yamuksal zıt EMK'lı tip kalıcı mıknatıslı fırçasız motorlar için Eş 3.12'de belirtilen elektriksel moment ifadesi altı adım anahtarlama tekniği ile sürülen bir motor için duraç ve döneç manyetik alanları arasındaki farkın 90 derecede korunabilmesi nedeniyle tamamıyla geçerliken, sinüsel zıt EMK'lı tip motorlar için, altı adım anahtarlama tekniğinin anlatıldığı Bölüm 4.1'de ayrıntıları açıklanmış olan

manyetik alanlar arası farkın 90 derece referans alındığında ± 30 derecelik salınım yapması durumundan dolayı elektriksel moment çıkışı da bu aralıkta bir salınım gösterir. Altı adım anahtarlama tekniği doğası gereği bu salınımı ± 30 derecelik bir aralıkta denetim altında tutar, bu salınımın tolere edilebildiği durumlarda, sinüsel zıt EMK'lı motorlar için elektriksel moment ifadesi olan Eş. 3.23'deki $k_t(\theta)$ ifadesi ± 30 derece arasındaki ortalama değeri olan k_t ile değiştirilebilir. Bu durumda altı adım anahtarlama tekniğinin uygulandığı yani iki fazdan aynı büyüklükte akım geçerken üçüncü fazın açık devre konumunda bırakıldığı bir yapı için elektriksel moment ifadesi, i akım büyüklüğünü, k_t ise ilgili motora ait motor moment sabitini belirtmek kaydıyla hem yamuksal hem de sinüsel zıt EMK'lı motorlar için Eş 4.5'deki gibi ifade edilebilir.

$$T_e = ik_t \quad (4.5)$$

Sürücü devre hız denetimini sağlamak için PID veya PI denetim yapılmasına imkan tanımaktadır. Yukarıda anlatılan sürücü yapısının ışığında sürücü devre modeli K_r referans gerilim doğrultucusu kazancı, J döneç eylemsizlik momentini, B motor mekanik sistemi sonumlanma oranını, R_s akım örnekleme direncini, K_t motor moment sabitini, T_e oluşan elektriksel momenti, $T_{yük}$ yük etkisini, Ω_{ref} referans hız değerini, Ω_m oluşan motor hızını ifade etmek üzere Şekil 4.10'daki gibi oluşturulabilir.



Şekil 4.10 Sürücü Devre Yapısının Modeli

Sabit bir yük ile motor hızının denklemini bulmak istersek Ω_m ifadesi Eş. 4.6'daki gibi yazılabilir.

$$\Omega_m(s) = (\Omega_{ref}(s) - \Omega_m(s)) \left(\frac{s^2 K_d + s K_p + K_i}{s} \right) \left(\frac{K_r K_t}{R_s} + \frac{T_{yük}}{s} \right) \left(\frac{1}{B + sJ} \right) \quad (4.6)$$

$$\Omega_m(s) = (\Omega_{ref}(s) - \Omega_m(s)) \left(\frac{(s^2 K_d + s K_p + K_i) K_r K_t + R_s T_{yük}}{s R_s (B + sJ)} \right) \quad (4.7)$$

$$\Omega_m(s) (s R_s (B + sJ)) = (\Omega_{ref}(s) - \Omega_m(s)) ((s^2 K_d + s K_p + K_i) K_r K_t + R_s T_{yük}) \quad (4.8)$$

$$\Omega_m(s) ((s R_s (B + sJ)) + ((s^2 K_d + s K_p + K_i) K_r K_t + R_s T_{yük})) = \Omega_{ref}(s) ((s^2 K_d + s K_p + K_i) K_r K_t + R_s T_{yük}) \quad (4.9)$$

Eş 4.9 düzenlendiğinde sistemin aktarım işlevi Eş.4.10'daki gibi bulunur,

$$\frac{\Omega_m(s)}{\Omega_{ref}(s)} = \frac{K_d K_r K_t s^2 + K_p K_r K_t s + (R_s T_{yük} + K_i K_r K_t)}{(K_d K_r K_t + R_s J) s^2 + (R_s B + K_p K_r K_t) s + (R_s T_{yük} + K_i K_r K_t)} \quad (4.10)$$

Referans hız, sabit Ω_{ref} hızı olarak alınırsa $\Omega_{ref}(s)$ ifadesi Eş 4.11'deki gibi yazılır.

$$\Omega_{ref}(s) = \frac{\Omega_{ref}}{s} \quad (4.11)$$

Eş 4.10'daki sistem aktarım işlevi Eş 4.11'deki Ω_{ref} ile kullanırsak $\Omega_m(s)$ eşitlik 4.12 olarak karşımıza çıkar.

$$\Omega_m(s) = \frac{\Omega_{ref}(s)}{s} \frac{K_d s^2 + K_p s + (R_s T_{yük} + K_i K_r K_t)}{(K_d K_r K_t + R_s J) s^2 + (R_s B + K_p K_r K_t) s + (R_s T_{yük} + K_i K_r K_t)} \quad (4.12)$$

Laplace ortamında Eş 4.12'de yer alan $\Omega_m(s)$ eşitliğine son değer teoremini uygularsak,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Omega_m(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \left(\frac{\Omega_{ref}(s)}{s} \right) \frac{K_d s^2 + K_p s + (R_s T_{yük} + K_i K_r K_t)}{(K_d K_r K_t + R_s J) s^2 + (R_s B + K_p K_r K_t) s + (R_s T_{yük} + K_i K_r K_t)} \quad (4.13)$$

$$\Omega_m(\infty) = \Omega_{ref} \quad (4.14)$$

Çalışmalarda sistemde P.I.D. denetleyicisi yerine P.I. denetleyici yapısı konulduğunda da Eş. 4.14'deki sonuca ulaşıldığını gösterir. Eş. 4.13 bize Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motor Sürücüsünün P.I.D. ve P.I. hız denetimi yapısının sayesinde sistemin adım fonksiyonlu referans hız girişlerini başarıyla takip edebileceğini gösterir .

5. SÜRÜCÜNÜN DONANIMSAL YAPISI

Bu çalışma kapsamında geliştirilen ‘Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motor Sürücüsü’, kalıcı mıknatıslı fırçasız motorların iki ana tipi olan yamuksal ve sinüsel zıt EMK’lı fırçasız motorların hız denetimini sağlamaktadır. Ortaya konan ürünün bir uygulama ve laboratuvar seti olarak kullanılabilmesi hedeflendiği için donanımsal ve yazılımsal pek çok denetim değiştirgesi üzerinde kullanıcıya değişiklik yapma imkanı tanınmış, denetim sonuçlarının gerek görsel ara yüzlerle gerekse test noktaları vasıtasıyla osiloskop ve benzeri ölçüm cihazlarıyla takip edilebilmesi sağlanarak kullanıcının sürücü değiştirgelerinde yapılacak değişimlerin motor hız denetimi üzerindeki sonuçlarının izlenebilmesi sağlanmıştır.

Sürücü yapısı aşağıda yer alan değiştirge değişikliklerinin gerçekleştirilmesine izin vermektedir.

Sayısal değiştirgeler,

- Hedef Hız
- Denetim tipi (PI – PID , sabit akım)
- Denetim tipine özgü değiştirgeler (K,Ti,Td,Sabit akım büyüklüğü)
- Motor dönüş yönü

Donanımsal değiştirgeler,

- Maksimum faz akımı
- Akım denetimli gerilim kaynaklı çevirgeç darbe genişliği modülasyonunun frekansı
- Hız geri besleme sinyalinin genişliği
- LCD panel kontrast ayarı (bakım-idame amaçlı)

Sürücü yapısının takibinin yapılmasına imkan verdiği değiştirgeler

- LCD ara yüz ile takip edilebilen değiştirgeler

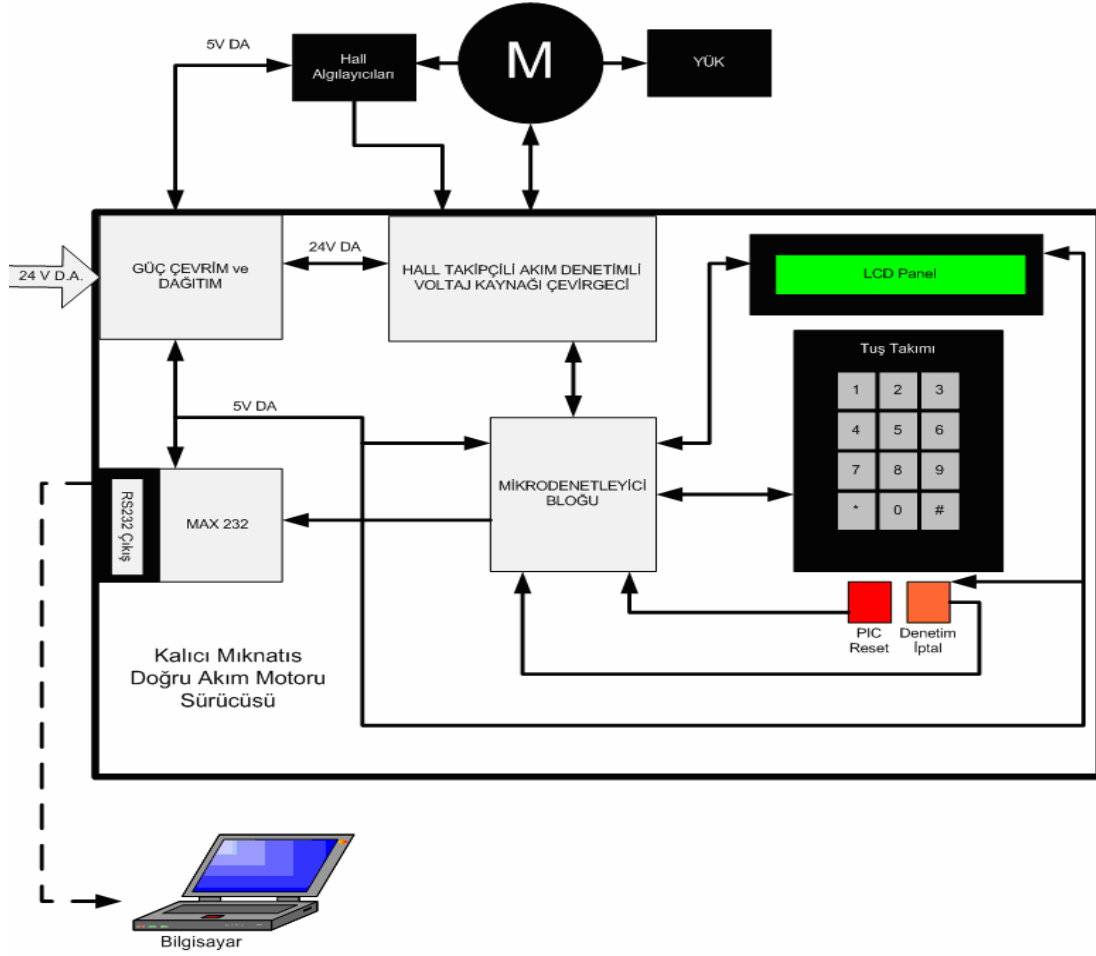
- Tüm sayısal denetim değıştirmeleri
- 250 örneğe kadar RPM birimli hız sonuçları (50 mekanik tur)
- 250 örneğe kadar sayısal denetleyici tarafından oluşturulan denetim sinyali çıkış değerleri.
- Test noktaları ve kablo bağlantıları kullanılarak elde edilebilen veriler
 - Hall algılayıcıları çıkışları (Hall A,Hall B, Hall C)
 - Fazlar arası oluşan potansiyel farkları
 - Faz akımları (Faz A, Faz B, Faz C)
 - Mikro denetleyici PWM çıkışı
 - Referans akıma ait gerilim sinyalleri
- Bilgisayar üzerinde takip edilebilen veriler
 - Sayısal denetim değıştirmeleri
 - 250 örneklelik denetim hız verisi sonuçları ve hedef hız sapmaları
 - Hız denetim sonuçlarının örnek bazlı ve tur bazlı olarak grafiksel takibi
 - Çalışma verilerinin kaydedilip, yüklenmesine olanak veren arşivleme özelliği ile önceden yapılmış deneysel sonuçları sürücü bağlantısı olmadan da arşivlenmiş verilerin takibi.

300 – 2500 RPM hız aralığında hız denetimini sağlayan Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motor Sürücü Seti, donanımsal olarak 5 ana bölümden oluşmaktadır.

- Motor ve yük seti
- Hall sinyali takipçili akım denetimli gerilim kaynaklı çevirgeç
- Mikro denetleyici

- Doğru akım güç çevrim ve dağıtım devresi
- Çevresel birimler

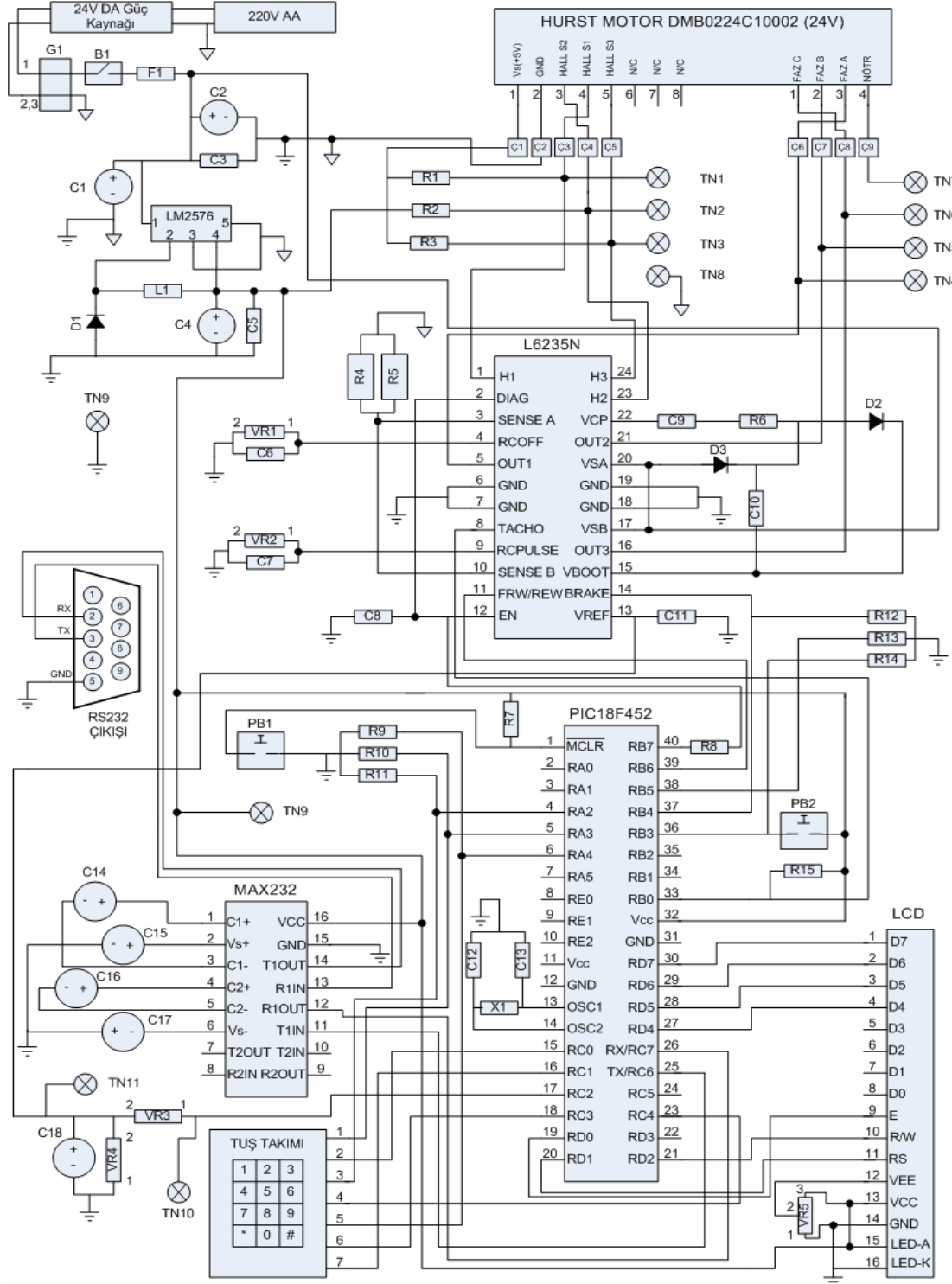
Şekil 5.1 yukarıda belirtilen 5 ana bölümün, bölgesel olarak sürücü üzerine yerleştirilişini ve birbirleri arasında oluşan sinyal yönlerini göstermektedir.



Şekil 5.1 Sürücünün Bölgesel Yerleşim Planı ve Sinyal Akış Yönleri

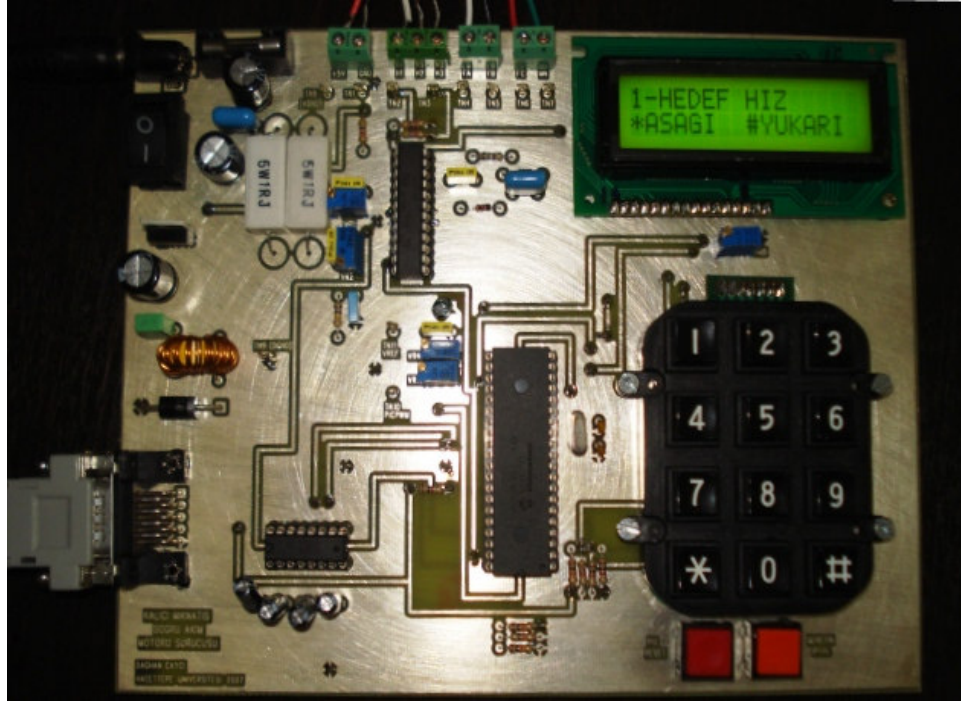
Şekil 5.1’de kişisel bilgisayar üzerinde koşturulan yazılımın denetim sonuçlarının görsel takibini ve arşivlenmesini sağlamak amaçlı hazırlanmış olduğu ve sürücü devrenin bilgisayar bağlantısı olmadan da çalışabilmesinden ötürü kişisel bilgisayar - sürücü bağlantısı kesik çizgi ile belirtilmiştir. İlerleyen bölümlerde sürücü setini oluşturan bu beş ana kısmın donanımsal yapıları, çalışma prensipleri ve birbirleriyle olan ilişkileri detaylı olarak incelenecektir. Şekil 5.2 tasarımılanan sürücü devrenin elektriksel bağlantı şemasını göstermektedir. Şekil 5.2’de yer alan

kısaltmalar EK1’de , Şekil 5.2’de gösterilen sürücü devrenin elektriksel bağlantı şemasına ait elemanların isimleri ve değerleri EK2’de , devre elemanlarının baskı devre üzerindeki yerleşimleri ise EK3’de belirtilmiştir.



Şekil 5.2 Sürücü Elektriksel Devre Şeması

Tasarımlanan ve gerçekleştirilen sürücünün resmi Şekil 5.3'de görülmektedir.

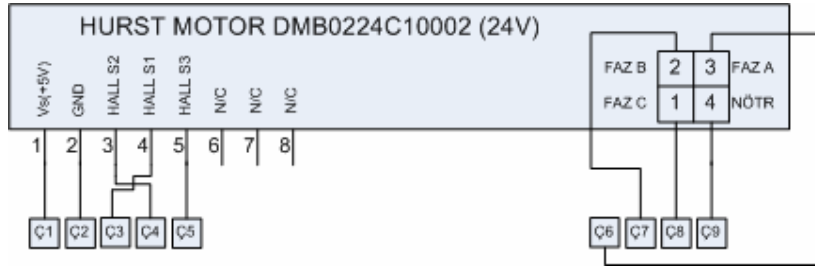


Şekil 5.3 Sürücünün Fiziksel Görüntüsü

5.1. Motor ve Yük Seti

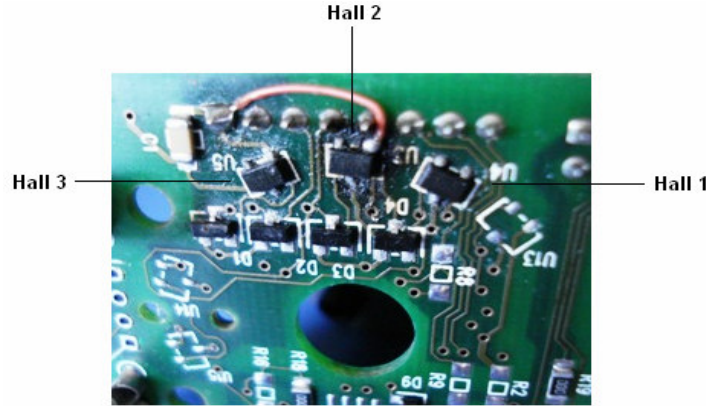
Çalışmada Emerson Motor Company firmasının bir alt kuruluşu olan Hurst Manufacturing firmasının sinüsel zıt EMK'lı 30 W nominal güç çıkışlı 24 V DA gerilim ile çalışan 10 oz-in ($7.06 \cdot 10^{-2}$ N.m) nominal moment çıkışlı DMB0224C10002 NT Dynamo Brushless modeli kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru kullanılmıştır. EK4'de boyutları ve konektör yapıları gösterilmiş olan yıldız bağlantı yapısına sahip 10 kutuplu motor, arka mil bölümüne yerleştirilmiş 3 adet Hall algılayıcısına sahiptir. EK2'de gösterilen P1 güç konektörü, P2 optik kodlayıcı konektörü, P3 Hall algılayıcıları konektörü olmak üzere üç bağlantı konektörüne sahiptir. Motor optik kodlayıcıya sahip olmadığından P2 konektörü kullanılmamaktadır. Sürücünün motor ile bağlantısı sırasıyla P1 ve P3 konektörüne uyumlu terminal konektörlerine sahip 4 ve 5 kablodan oluşan kablo gruplarıyla sağlanmaktadır. Şekil 5.4 motor-sürücü elektriksel bağlantısını göstermektedir.

Kullanılan motorun 10 kutuplu yani 5 kutup çiftli bir makine olması nedeniyle 360 derecelik 1 elektriksel çevrim motor hareketinde 72 derecelik mekanik dönüşe



Şekil 5.4 Motor-Sürücü Devre Bağlantısı

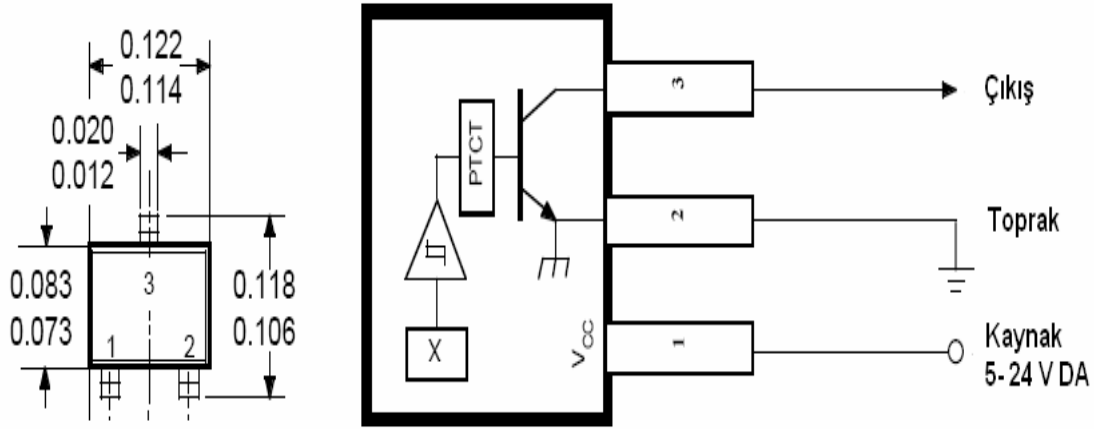
karşılık gelmektedir. Motor mandallama yapısına sahip 120 elektriksel derece farkla konumlandırılmış üç adet Hall algılayıcısına sahiptir ve motor arka mil bölümünde döneç mıknatıs düzeni birebir kopya etmiş bir mıknatıs tekerleğinin karşısına 24 derece mekanik konum farkıyla yerleştirilmişlerdir.(Şekil 5.5)



Şekil 5.5 Motor Hall Algılayıcıları

Şekil 5.5 motor Hall algılayıcılarının montajının yapıldığı arka paneli göstermektedir. Şekilde belirtilen üç Hall algılayıcısı dışındaki devre elemanları aktif olmayıp optik sürücü düzeneği taşıyan benzer motor modelleri için yerleştirilmişlerdir.

Motor Hall algılayıcısı olarak Allegro firmasının A3280 modeli Hall Etkili Mandallayıcılarını kullanmaktadır. Algılayıcılarda kullanılan mandallama ifadesinin nedeni algılayıcı çıkışlarının durum değişiminin tam 0 Gauss noktasında değil, normal çalışma koşullarında olası ani durum değişimlerini önlemek amacıyla +22 Gauss , -23 Gauss'luk bir ardıl izlem güvenlik bandında gerçekleştirmesidir. Hall algılayıcılarının bacak düzeni Şekil 5.6'da belirtilmiştir. Açık kolektör yapısı gereği çıkışın yükseltici direnç ile kullanılması gereklidir.



Şekil 5.6 Allegro A3280 Pin Düzeni ve Boyutları (inç ölçüsünde) [1]

Motorun elektriksel, mekanik ve ısısal karakteristiklerini belirten katsayılar EK4'de gösterilmiştir[21].

Motor yük seti 3 adet silindirik yük, 3 adet setiskül ve bir adet 2 mm'lik alyan anahtarından oluşmaktadır. Yükler motor miline doğrudan bağlantı yapılabilecek şekilde motor ölçülerine göre hazırlanmıştır. Yük mile yük üzerindeki setiskülün alyan anahtarıyla motor miline doğru sıkıştırılmasıyla bağlanır.

İçi boş silindirik bir yapının atalet denklemi M kütle , R_o dış yarıçap, R_i iç yarı çap olmak üzere Eş. 5.1'de görülmektedir.

$$J = \frac{M}{2} (R_o^2 + R_i^2) \quad (5.1)$$

Bu formülden yola çıkılarak üretilen yükler için hesaplanan yük ataletleri Çizelge 5.1'de belirtilmiştir.

Çizelge 5.1 Yük Özellikleri

	Kütle(g)	Dış Yarıçap (cm)	İç Yarıçap (cm)	Yük Ataleti (kg.m ²)
Yük 1	50	1.45	0.40	$5.66 \cdot 10^{-6}$
Yük 2	70	1.45	0.40	$7.92 \cdot 10^{-6}$
Yük 3	90	1.45	0.40	$1.02 \cdot 10^{-5}$

5.2. Akım Denetimli Gerilim Kaynaklı Çevirgeç

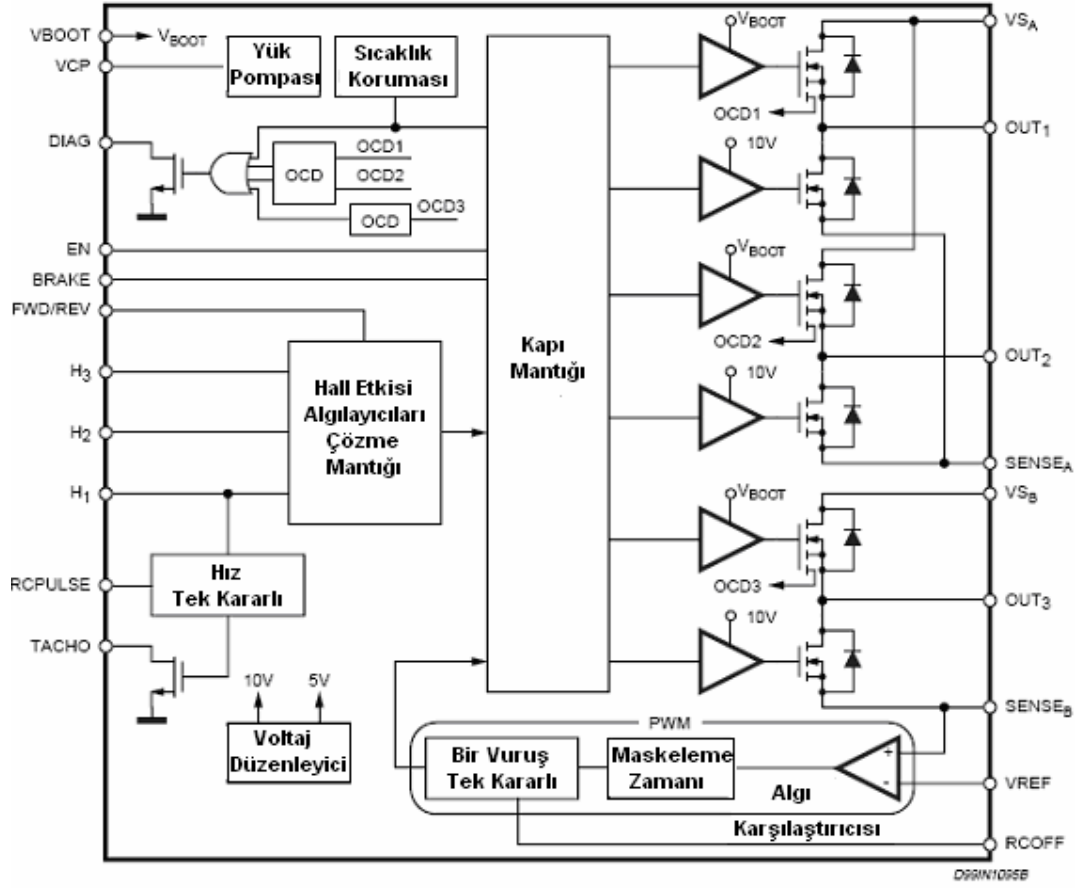
Çalışmada fırçasız motor sürücü uygulamaları için üretilen STMicroelectronics firmasının L6235N entegresi kullanılmıştır. 130 Watt'a güç çıkışına olanak veren L6235N entegresi 3 fazlı fırçasız motorların dönen bir duraç akımı oluşturabilmek için ihtiyaç duyduğu anahtarlama amaçlı 6 adet DMOS güç transistöründen oluşan bir çevirgece sahiptir. Düşük güç uygulamaları için üretilmiş olan entegre, DMOS ve DMOS sürücü yapılarını iç yapısında bulundurarak denetim uygulamaları için yer ve maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Sahip olduğu Hall algılayıcıları evrensel mantık serisi izleyicisi, hız denetim işlevini sağlayan mikro denetleyicinin yükünü azaltarak daha basit yapıya sahip entegreler ile denetim işlevinin yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Çıkış akımı geri beslemesi denetiminde çevirgeç kapılarına sabit kapalı zamanlı darbe genişliği modülasyonu uygulayarak motor faz akımlarını ayarlayabilen yapısı, daha kolay denetlenebilen bir motor modeli oluşturulabilmesini sağlamaktadır.

Şekil 5.7 entegre iç yapısının ve çalışma prensibinin genel bir özetini sunmaktadır. İlerleyen alt bölümlerde entegreye ait bacakların tasarımlanan sürücü devre üzerindeki elektriksel bağlantıları ve görevleri anlatılacaktır.

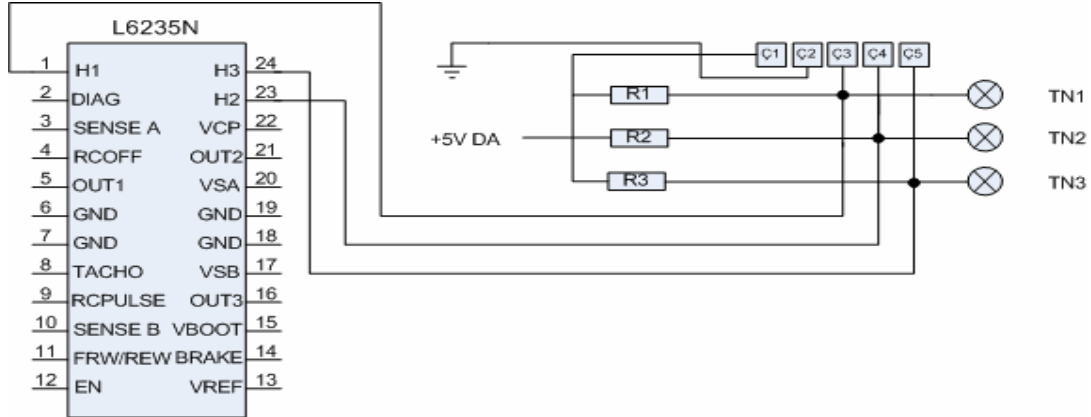
5.2.1. Hall algılayıcıları girişleri

L6235N sırasıyla bacak 1 motor Hall algılayıcısı 1, bacak 23 motor Hall algılayıcısı 2, bacak 24 motor Hall algılayıcısı 3'e bağlantı yapmak suretiyle motorun konum bilgisini 60 derecelik elektriksel açı farkıyla takip ederek, evrensel Hall kodlarına göre uygulanan altı adım anahtarlama tekniği ile motor faz akımlarının yönlerini yönetir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de detayları daha önce anlatılmış olan bu teknik sayesinde dönen bir duraç akımı sağlanmış olur.

Şekil 5.8 entegrenin Hall algılayıcı girişi bacaklarının sürücü devredeki bağlantı yapısını gösterir. Piyasada bulunan motorların üzerindeki hemen hemen her Hall algılayıcısı açık kollektör yapısındadır. Şekilde görünen 4.7 K Ω 'luk R1,R2 ve R3



Şekil 5.7 L6235N Blok Şeması[23]



Şekil 5.8 L6235N Hall Algılayıcıları Girişleri Elektriksel Bağlantı Şeması

dirençleri bir uçları 5V DA gerilimine bağlı olmak suretiyle sinyal yükseltme direnci işlevi görür ve açık kolektör yapısından sinyalleri alabilmemizi sağlarlar. R1, R2 ve R3 dirençlerinin değerleri motorun kullandığı Hall algılayıcılarının maksimum yutak akımı ve devrede kullanılacak yükseltme gerilimine göre belirlenir.

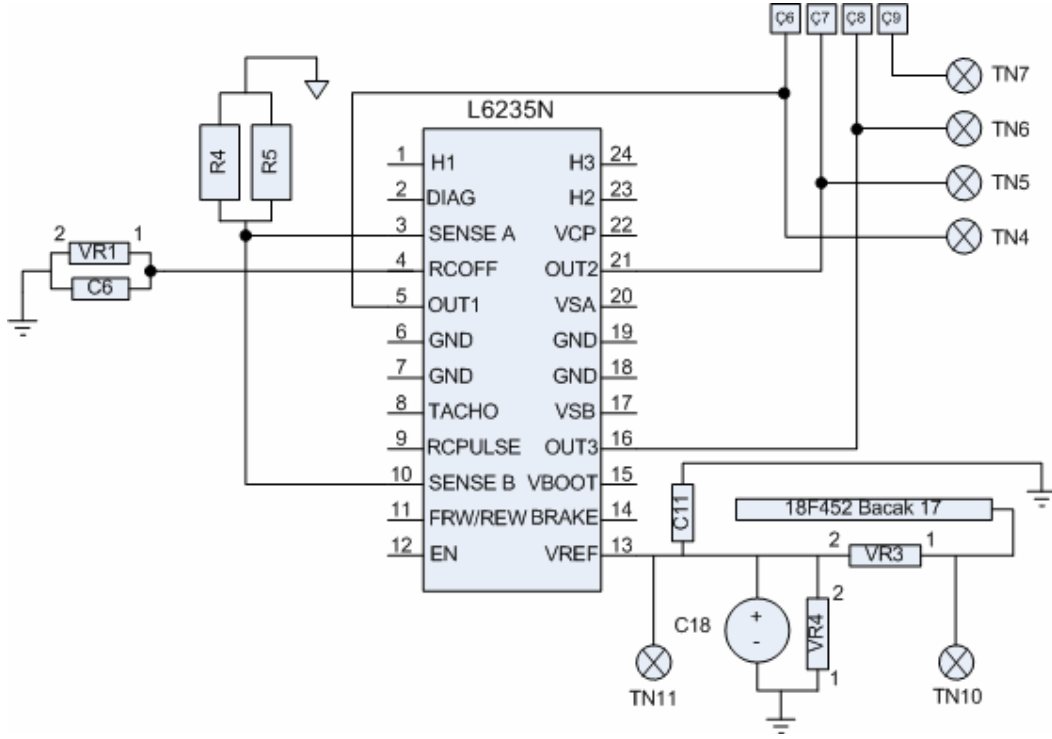
Sürücüde Hall algılayıcıları çıkışlarının takip edilebildiği üç adet test noktası bulunmaktadır. TN1 Hall1 (Hall A) , TN2 Hall2 (Hall B), TN3 Hall3 (Hall C) sinyallerinin takip edilebilmesini sağlar.

5.2.2. Motor faz akımı denetimi

Motorun hız denetimi, duraç faz akımlarının denetimiyle gerçekleştirilir. ‘Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motor Sürücüsü’nün ana denetimi PIC18F452 mikro denetleyicisi ile sağlanmaktadır. Motoru istenilen hızda çalıştırmak için sayısal bir oransal-tümlevsel-türevsel denetim algoritması koşturan mikro denetleyici, algoritma çıkışına göre yaklaşık 39 kHz’lik sabit frekanslı, 1024 adımlı değişken görev çevrimi oranlı bir darbe genişliği modülasyonlu bir sinyal üretir. Mikro denetleyiciden çıkan sinyal TN10 test noktası aracılığı ile ölçülebilir. (Şekil 5.9) Bu sinyal VR4 (0 – 100K Ω), VR3 (0 – 10K Ω) çok turlu trimpotları ve 1 μ F’lık C18 kapasitöründen oluşan gerilim bölücü – alçak geçirgen filtre yapısında olan alt sisteme uygulanır. Sayısal – Analog çevirici görevi üstlenen bu alt sistem L6235 entegresinin akım denetimini sağlaması için gerekli olan L6235 bacak 13’deki dış referans gerilimini oluşturur. Eş 5.2 D mikro denetleyicinin uyguladığı referans sinyalin görev çevrimi oranı yüzdesini ifade etmek üzere yaklaşık olarak, oluşan ortalama akım denetimi referansı geriliminin denklemini gösterir.

$$V_{ref} = \frac{(5V)(VR3)}{(VR4) + (VR3)} \frac{D}{100} \quad (5.2)$$

VR4 ve VR3 dirençlerinin ayarlı yapısı bize referans geriliminin maksimum değerini ve aşağıda anlatılacağı üzere maksimum faz akımını belirleyebilme imkanı sunar. 1 nF değerindeki C11 kapasitörü V_{ref} sinyali üzerinde oluşabilecek olası yüksek frekanslı gürültüleri bastırmak için yerleştirilmiştir. V_{ref} sinyali TN11 test noktası aracılığı ile ölçülebilir.



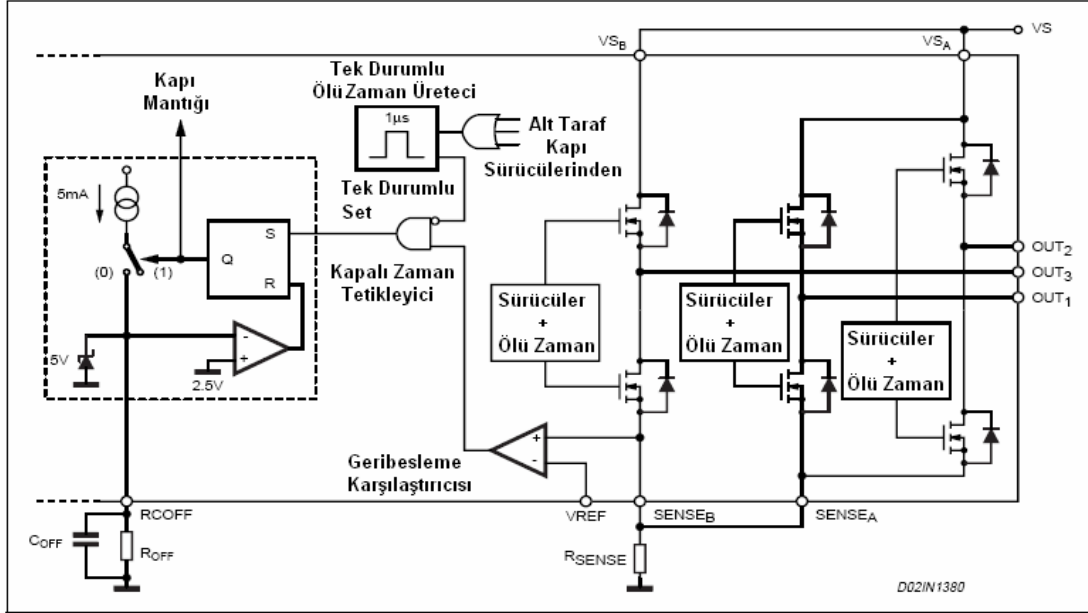
Şekil 5.9 L6235N Motor Faz Akımı Denetimi Elemanları Elektriksel Bağlantı Şeması

L6235 üzerindeki çevirgeç yapısı doğrudan olarak toprağa bağlanmaz, faz akımı geri beslemesinin sağlanabilmesi için bir geri besleme direnci üzerinden toprağa bağlanır. Geri besleme direncinin seçiminde iki hassas durum söz konusudur.

- Geri besleme direnci çevirgece seri bağlandığından dolayı enerji harcanmasına neden olur ve akım çevrimi sırasında L6235'in Sense A ve Sense B bacakları üzerinde tehlikeli negatif gerilimler oluşturabilir. Bu nedenle geri besleme direnci değeri küçük seçilmelidir.
- Akım denetimi Vref bacağındaki akım dış referans gerilimi ile geri besleme üzerinde oluşan geri besleme geriliminin karşılaştırılması ile sağlanır. Bu nedenle çok düşük geri besleme direnci değerleri V_{ref} gerilimi üzerindeki gürültünün ve iç karşılaştırıcının ofset değerinin çıkış akımı üzerindeki hata payını artırır. Bu nedenle çok düşük geri besleme dirençlerinden kaçınılmalıdır.[14]

Sürücü devrede geri besleme direnci olarak 5W 1 Ω 'luk iki direncin paralel bağlantısından oluşan 0.5 Ω 'luk geri besleme direncinden faydalanılmıştır.

L6235N Şekil 5.10'da basitleştirilmiş yapısı gösterilen sabit kapalı zamanlı darbe genişliği modülasyonlu akım denetimi yapısına sahiptir. Darbe genişliği modülasyonunun sabit kapalı kalma süresi Şekil 5.9'daki 1nF'lık C6 kapasitörü ve VR1 (0 – 100K Ω) çok turlu trimpotu ile ayarlanabilmektedir.

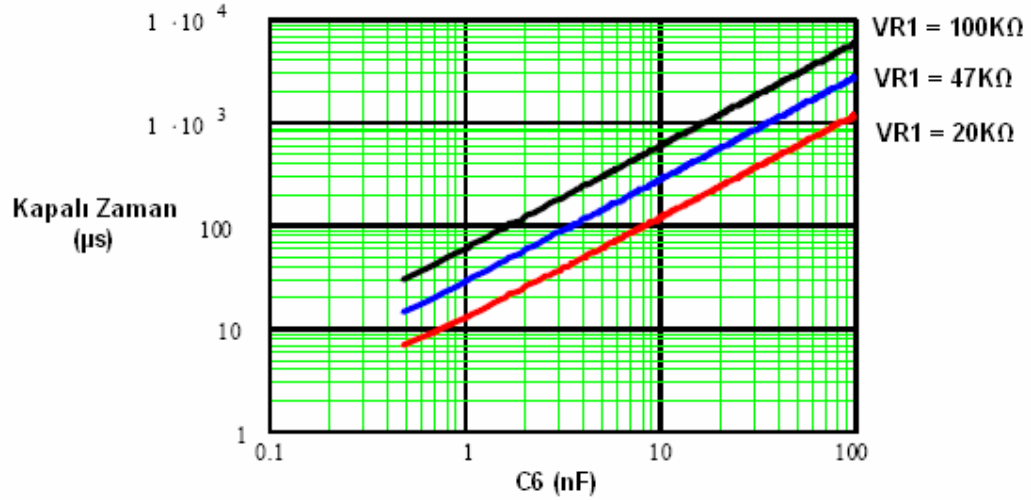


Şekil 5.10 PWM Akım Denetleyicisi Basitleştirilmiş Şeması [14]

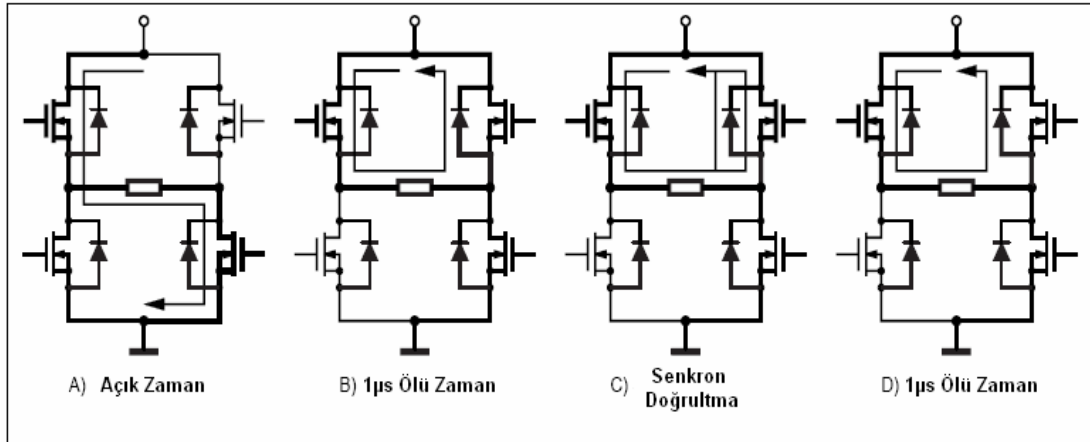
Aktif fazlar üzerinden geçen akım arttıkça geri besleme direnci üzerine düşen gerilim de artar, L6235'in bacak 3 ve bacak 10 üzerinde oluşan geri besleme gerilimi referans gerilime ulaşıncaya kadar Hall algılayıcı çıkışlarına göre belirlenen fazlardan akım artarak akmaya devam eder. Geri besleme gerilimi dış referans gerilimine ulaştığında karşılaştırıcı tek kararlı kapalı zaman tetikleyici yapıyı aktif hale geçirerek güç transistörlerini senkron doğrultma durumuna çekerken faz akımları da yavaş düşüş konumuna girer. Bu safhada alt taraf transistörleri kapalıyken üst taraf transistörleri açılarak motor akımının üst çevirgeç yapısında serbest dolanımı sağlanır, motor akımı yavaşça azalır. C6 kapasitörü ve VR1 çok turlu trimpotunun belirlediği bir süre boyunca devam eden senkron doğrultma safhası C6 ve VR1 in bağlı olduğu L6235'in 4 numaralı bacağı üzerindeki gerilimin 2.5 volta inmesiyle beraber yerini tekrar uygun fazlardan akım geçmesini sağlayan bir üst taraf bir alt taraf transistörünün açık bulunduğu açık konuma bırakır. Sabit kapalı kalma süresi Eş.5.3 ile hesaplanabilir.

$$t_{kapalı} \cong 0.6(C6)(VR1) \quad (5.3)$$

Şekil 5.11 C6 ve VR1'in değişen değerleri için oluşan kapalı zaman aralıklarını göstermektedir.



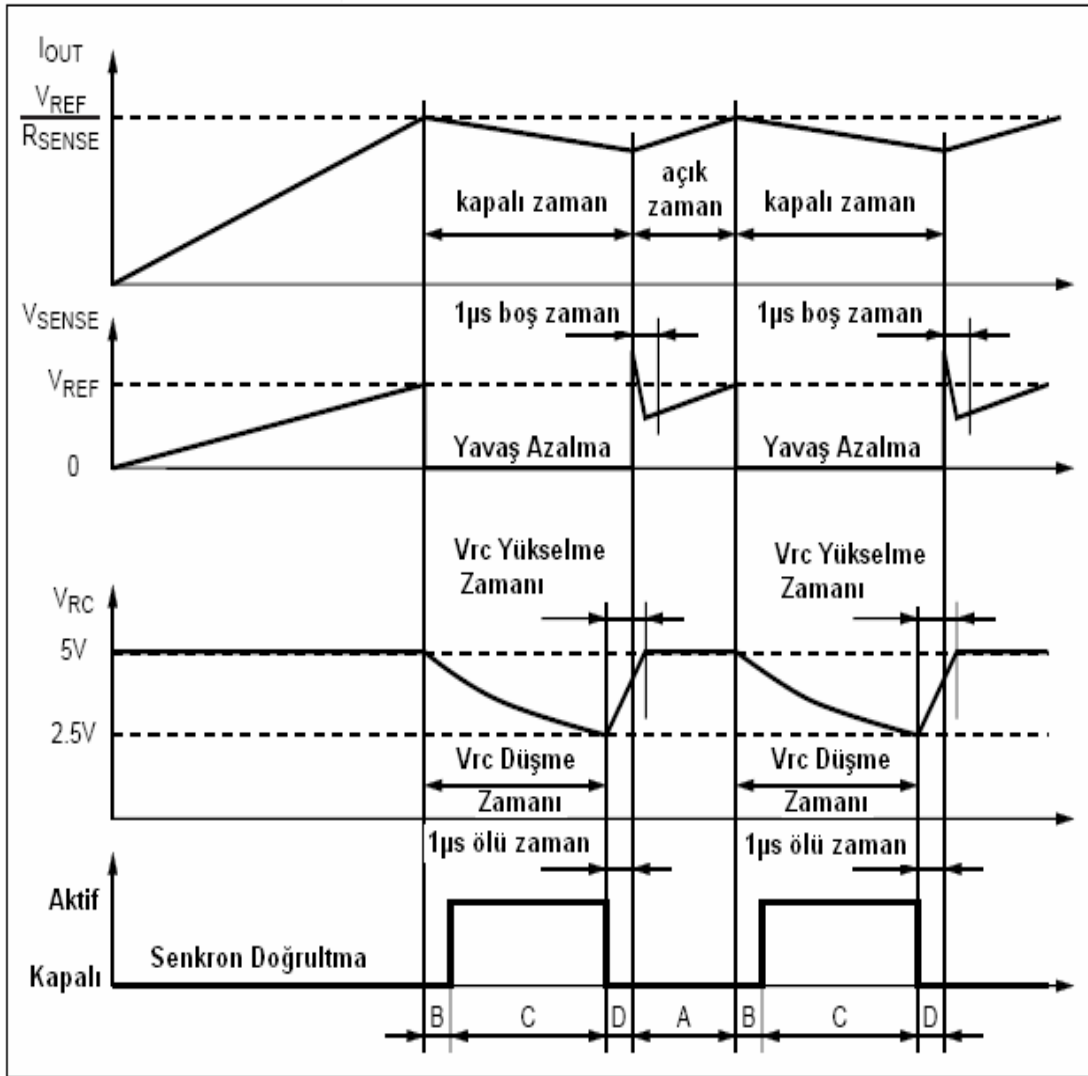
Şekil 5.11 Değişen C6 ve VR1 Değerlerine Göre Gerçekleşen Kapalı Zaman Grafiği[14]



Şekil 5.12 Sabit Kapalı Zamanlı PWM Akım Denetiminde Farklı Zaman Aralıkları İçin Oluşan Akım Yönleri[14]

Açık kapalı konumlar arası geçişte 1µs'lik ölü zamanlar uygulanır. Bu uygulamanın amacı aynı faza ait alt taraf ve üst taraf transistörlerinin aynı anda açık kalma olasılığını engellemek ve kapalı konumdan açık konuma geçerken oluşan ani akım atlamaları nedeniyle karşılaştırmacının yanlışlıkla kapalı zamanı tekrar tetiklemesini engellemektir. Sabit kapalı zamanlı PWM akım denetimi sırasında oluşan sinyal

yapıları Şekil 5.13’de , sabit kapalı zamanlı PWM akım denetiminde farklı zaman aralıkları için oluşan akım yönleri ise Şekil 5.12’de gösterilmiştir.

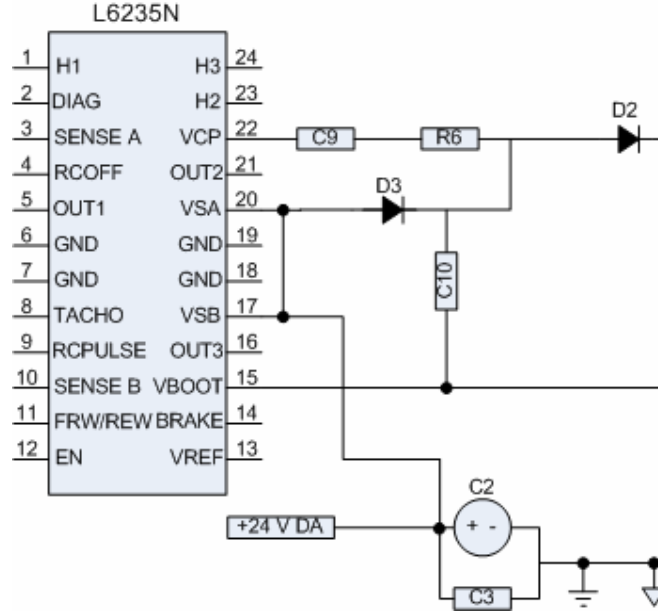


Şekil 5.13 Sabit Kapalı Zamanlı PWM Akım Denetimi Sırasında Oluşan Sinyal Yapıları[14]

Şekil 5.13’deki çıkış akımı değerlerine dikkat edilirse, çıkış akımı referans geriliminin geri besleme direncine bölümünün sonucunu takip etmektedir. Bu akım denetimli gerilim kaynaklı çevirgeçlerin en faydalı özelliklerinden biri olan motor denetim yapılarını sadeleştirme özelliğini gösterir, dış referans gerilimini takip eden akım büyüğü, motor duraç direnci, endüktansı ve endüklenen zıt EMK değıştirtgelerinden bağımsız olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tasarımlanan sürücü devresi faz çıkışları için birer adet test noktasına sahiptir. TN4 faz A (faz1), TN5 faz B (faz 2), TN6 (faz 3), TN7 ise motor yıldız bağlantısının orta noktasından gerilim ölçümü yapmak için kullanılmaktadır. Faz akımlarının ölçümü motora giden bağlantı kablosu üzerinden ölçüm yapılarak mümkün olabilmektedir.

5.2.3. Güç beslemesi ve elektriksel yük pompası elemanları



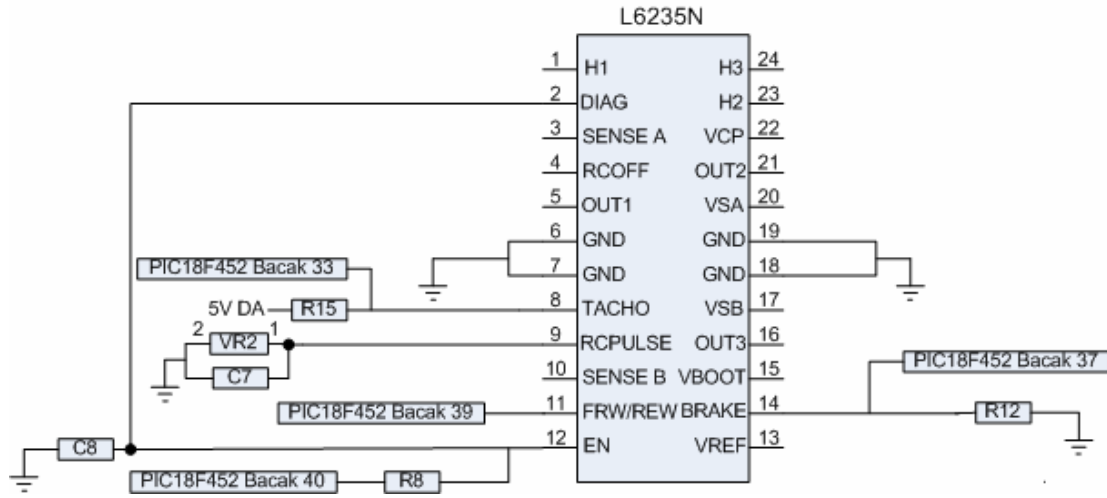
Şekil 5.14 L6235N Güç Beslemesi ve Yük Pompası Elemanları Elektriksel Bağlantı Şeması

Altı transistörlü çevirgeç yapısında üst taraf transistörlerini sürebilmek için motor besleme geriliminin transistörü açık tutabilecek kadar üzerinde bir gerilim kaynağına ihtiyaç duyulur. Tek kaynakla çalışan sistemlerde bu sorun genellikle elektrik yük pompası ile çözülür. L6235N entegresi 22. bacağı olan VCP bacağında 600 KHz'lik yüzde 50 görev çevrimi oranlı 10V ile 0V arası salınım yapan bir kare dalga üretir. 10nF'lık C9 kapasitörü VCP bacağı 0V iken D3 diyotu üzerinden yüklenirken VCP bacağı 10V konumunda iken D2 üzerinden C10 kapasitörünü yükler birkaç tur içinde kapasitörlerin doyuma ulaşmasıyla 15. bacak olan VBOOT üzerinde V_{D3} ve V_{D2} diyot ileri gerilim düşümünü ifade etmek üzere $V_s - V_{D3} + 10V - V_{D2}$ 'lik bir gerilim oluşur. Oluşturulan bu gerilim üst taraf transistörlerini açmaya yeterlidir. 100Ω'luk R6 direnci dış bileşenlerdeki maksimum

akımı düşürmek ve VCP bacağında 10V-0V arası geçişler sırasında oluşan yetişme hızını arttırmak için kullanılmaktadır[23].

Devrenin ana 24V DA gerilim beslemesi 17 ve 20. bacaklar olan VSA ve VSB üzerinden sağlanmaktadır. 100 μ F'lık C2 kapasitörü ana kaynaktaki olası salınımları, 220 nF'lık C3 kapasitörü ise yine ana kaynaktaki yüksek frekanslı olası salınımları engellemek için kullanılmaktadır. C3 ve C2 kapasitörlerinin bir başka özelliği ise güç ve sayısal toprakların birleştirildiği nokta oluşlarıdır. Toprakların tek noktada birleştirilmesindeki amaç yüksek akım taşıyan güç toprak hattında çıkabilecek problemlerin sayısal devreye etkisini en aza indirgeyebilmektir.

5.2.4. Dış denetim ve topraklama bacakları



Şekil 5.15 L6235N Dış Denetim Bacakları Elektriksel Bağlantı Şeması

L6235N entegresi kullanıcıya motor denetiminin sağlanması için çeşitli çıkış ve giriş bacakları sunmaktadır. Bunlardan ilki motor faz akımının denetimi bölümünde detaylı olarak incelenmiş olan ve mikro denetleyicinin motor faz akımını denetlemesini sağlayan V_{REF} bacağıdır. Mikro denetleyicinin hız denetimini sağlayabilmesi ve gerekli denetim sinyalini oluşturabilmesi için güncel hız verisine ihtiyacı vardır. L6235 entegresinin 8. bacağı olan TACHO bacağı Hall1 algılayıcısının düşük genlikli sinyal seviyesinden yüksek genlikli sinyal seviyesine geçtiği anlarda RCPULSE bacağına bağlı VR2(0-100K Ω) çok turlu trimpotu ve 10nF'lık C7 kapasitörünün belirlediği süre boyunca içinde barındırdığı açık akış yapısındaki transistör kapısını açık tutarak çıkış değerini yüksek genlikli sinyalden

alçak genlikli sinyal değerine düşürür. Transistörün açık kalma süresi yaklaşık olarak Eş.5.4'deki gibi hesaplanır.

$$t_{açık} \cong 0.6(VR2)(C7) \quad (5.4)$$

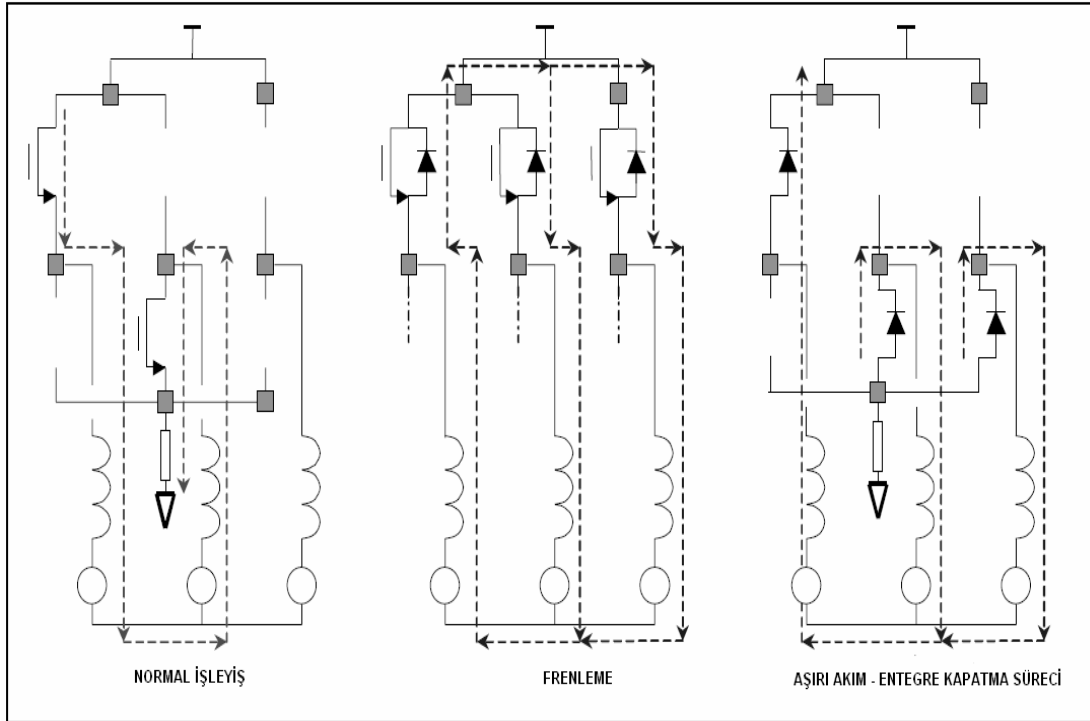
1 KΩ'luk R15 direnci açık akaç yapısındaki transistör için bir bacağı 5V DA gerilimine diğeri transistörün akaç bacağına bağlı olmak suretiyle yükseltme direnci işlevi görür. Denetimi yapılan motor 10 kutuplu olduğu için her elektriksel çevrim için bir sinyal oluşturulmak üzere bir tam mekanik turda 5 kez TACHO sinyali oluşturulur. Mikro denetleyici TACHO sinyalleri arasındaki zaman farkından yararlanarak oluşan hız değerini hesaplar ve bir sonraki elektriksel çevrim çıkış akımını belirlemek için darbe genişliği modülasyonlu denetleyici çıkış sinyalini oluşturur. Mikro denetleyici TACHO sinyalinin yüksekten alçak konuma geçiş anını bir kesme sinyali ile yakaladığından $t_{AÇIK}$ zamanını için önemli olan nokta ardaşık iki kesme arasında olması gereken zaman farkından büyük olmamasıdır. Böylesi bir durumun oluşması halinde hız sinyallerinden birinin kaybedileceği ortadadır. Motorun 3250 RPM nominal hızda döndüğünü varsayarsak, denetleyicinin motor hızını hesaplayabilmesi için 3.69 ms'de bir kesme oluşması gerekir, $t_{AÇIK}$ zamanı bu süreden büyük olmamalıdır.

L6235 entegresinin 11. bacağı olan FWR/REW bacağı motor dönüş yönünün belirlenmesini sağlar. Bacak gerilimi toprağa çekilirse saat yönünde, 5 Volt'a çekilmesi durumunda ters saat yönünde dönüş sağlanır. Dönüş yönünün belirlenmesi doğrudan altı adım anahtarlama serisinin sıra ile mi yoksa ters sıra ile mi işletileceğine bağlıdır.

12. bacak olan EN bacağı L6235'in aktif hale geçmesini sağlar. Bu bacağı uygulanacak 5V'luk sinyal entegreyi aktif hale geçirir. Bu bacak 2 bacak olan DIAG bacağı ile kısa devre olacak şekilde bağlanmıştır. L6235 yapısında aşırı akım koruma sistemi barındırır. Aşırı akımın olduğu durumlarda açık akaç yapılı DIAG bacağı toprağına çekilir, böylelikle DIAG bacağı ile kısa devre durumda olan EN bacağı da toprağına çekilir ve entegre işlevi otomatik olarak sonlandırılır ve motor durdurulur.

L6235 üzerindeki BRAKE bacağı motor dönüşünü ani olarak durdurma imkanı sunar. 13. bacak olan BRAKE bacağının toprağına çekilmesi durumunda tüm üst

taraf transistörleri açılırken tüm alt taraf transistörleri kapatılır böylelikle motor faz bacakları birbirlerine bağlanmış olur. Frenleme esnasında zıt EMK dönüş yönünün tersine fren momenti yönünde bir kuvvet oluşturur ve motorun hızlı bir şekilde durmasına yardımcı olur. Yüksek ters EMK ve yük ataleti durumunda uygulanan frenleme işlemi entegrenin nominal değerlerini aşan bir akım oluşturabilir. Bu nedenle entegrenin aşırı akım koruma önlemleri fren koşullarında da işlemeye devam eder. Şekil 5.16 normal çalışma, frenleme ve aşırı akım koşullarında çevirgeç ve motor fazları üzerinden geçen akım yönlerini göstermektedir. Pratik kullanım anlamında BRAKE bacağı ile ilgili önemli bir konu da motor dönüşünün istenmediği her durumda toprağa çekili durumda bulunması gerekliliğidir, aksi halde Vref bacağından bağımsız olarak motor minimum hızda dönüşüne devam edecektir. Bu nedenle BRAKE bacağının denetim sinyali gelmedikçe toprak konumunda kalması için bir bacağı toprağa diğer ucu BRAKE bacağına bağlı 10KΩ'luk R12 direnci kullanılmıştır.



Şekil 5.16 Normal İşleyiş, Frenleme ve Aşırı Akım Koşullarında Çevirgeç ve Motor Fazları Üzerinden Geçen Akım Yönleri[14]

Entegre üzerindeki 6,7,18 ve 19. bacaklar entegrenin toprak bağlantısıdır. Yüksek akım geçen ve eksi gerilim oluşumlarına açık olan güç toprağına değil mutlaka

devrenin sayısal toprağına bağlanmalıdırlar. Toprak bacaklarının bir başka özelliğı ise entegrenin ısı atımını sağlayan bacakları oluşlarıdır. Sürücü devrede sayısal toprak alanının geniş tutulmasının nedeni ısı atımını kolaylaştırmaktır.

5.3. Mikro Denetleyici

Sürücünün altı adım anahtarlama sıra takibi dışındaki tüm denetimsel yapısını ve kullanıcı ara yüzlerinin idaresini, mikro denetleyici üzerinde gömülü yazılım olarak hazırlanan ‘Sürücü Yönetimi’ gömülü yazılımı sağlamaktadır. LCD görsel ara yüzü, tuş takımı desteğı, yoğun menü, kayan nokta işlemleri ve değışken idaresi gerekliliğinden dolayı sürücü yazılımının assembly dilinde girişlere de izin veren bir C derleyicisi üzerinde hazırlanması uygun görölmüş ve yaklaşık 1000 satırlık C kodundan oluşan gömülü yazılım hazırlanmıştır. Sürücü denetim yazılımı ile ilgili ayrıntılar Bölüm 6’da detaylı olarak incelenmiştir. Belirtilen ihtiyaçları karşılamak amacıyla mikro denetleyici olarak Microchip firmasının PIC 18 serisinden PIC18F452 entegresi seçilmiştir. PIC18F452 entegresinin temel özellikleri Çizelge 5.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.2 PIC18F452’nin Temel Özellikleri[16]

Özellik	Değerler
Maksimum Çalışma Frekansı	DC – 40 MHz
Program Hafızası (Kbyte)	32
Program Hafızası (Komut)	16384
Veri Hafızası (byte)	1536
EEPROM Veri Hfızası (byte)	256
Kesme Kaynakları	18
Giriş-Çıkış Bağlantı Kapıları	Bağlantı Kapısı A,B,C,D,E
Yakalama/Karşılaştırma/PWM Modülleri	2
Seri İletişim	MSSP / USART
Paralel İletişim	PSP
10 bit Analog-Sayısal Çevirici	8 Giriş Kanalı
Komut Sayısı	75

PIC18F452, 40 bacaklı yapısı ve sahip olduğu 5 adet bağlantı kapısı ile sürücü devrenin çevresel cihazlarla iletişimi için yeterlidir. Entegre içine gömülü PLL yapısıyla salıngaç frekansı 40 MHz’in üzerine çıkmamak koşuluyla 4 katına çıkarabilmektedir. Bu nedenle devrede 40 MHz’lik bir salıngaç yerine gürültü etkisinin daha az oluştuğı 10MHz’lik salıngaç kullanılmış ve entegre PLL yapısı

takımı mikro denetleyici gömülü yazılımı üzerinde hazırlanan tuş takımı fonksiyonu ile işletilmektedir. Mikro denetleyici bacak 15,16,18 ve 23 tuş takımı çalışması için çıkış kanalı oluştururken, bacak 4,5 ve 6 tuş takımı girişlerini oluşturur. PIC18F452'nin sırasıyla 19,20 ve 21. bacakları LCD panelin denetim giriş-çıkışları olan EN,RS ve R/W'ın denetimini sağlarken yine sırasıyla 27,28,29 ve 30. bacaklar LCD'nin D4,D5,D6 ve D7 veri bacaklarına bağlıdır. Mikro denetleyicide kullanılan bacak sayısını azaltma amacı olarak LCD ile 4 bit'lik iletişim seçilmiştir. 4 bitlik iletişim 8 bitlik LCD iletişimine göre 4 kat yavaş gerçekleşse de uygulama için yeterli görülmüştür.

Mikro denetleyici üzerinde motorun hız denetimini sağlamak için sayısal oransal-tümlevsel-türevsel denetim algoritması işletilmektedir. Yazılımsal detayları sürücünün yazılımsal özelliklerinin anlatıldığı bölüm 6'da anlatılan denetim algoritmasının işlevsel olabilmesi için kullanıcının belirlediği hedef hız değeri ile motorun anlık hız bilgisinin farkının alınarak hata büyüklüğünün hesaplanması gerekir. PIC18F452'nin 33. bacağı olan RB0 bacağı giriş çıkış kanalı olarak kullanılabilirdiği gibi dışardan uyarmalı bir kesme bacağı olarak da kullanılabilir. Sürücü tasarımında L6235N entegresinin TACHO bacağından her 1/5'lik tur da bir kez çıkan konum sinyali RB0 bacağına dış kesme sinyali olarak uygulanmaktadır. Anlık hız değeri, ardışık iki konum sinyali arasında motorun kat ettiği açısal dönüş sabit 72 derece olduğundan bu iki sinyal arasındaki zaman farkı ölçülerek bulunur, yani konumun zamana bağlı türevi alınmış olur. Hesaplanan hata sinyali PID denetim formülü ile işlenerek bir çıkış değeri oluşturulur. Oluşturulan çıkış değeri, birincil donanımsal darbe genişliği modülatörü çıkış bacağı olan RC2'de oluşturulan PWM sinyalinin görev çevrimi oranını belirler. RC2 bacağında oluşturulan sinyal bölüm 5.2.2'de anlatıldığı gibi analog sinyale dönüştürülür ve L6235 entegresinin V_{ref} bacağına akım değeri referansı olarak uygulanır.

Tuş takımı aktif elektronik bileşen içermediğinden ve tuş takımı denetimi için ayrıca bir entegre kullanılmadığından dolayı yukarıda belirtildiği gibi tuş takımı yönetimi gömülü ana yazılımın bir fonksiyonu olarak işletilmektedir. Bunun anlamı, gömülü yazılım tuş takımının kullanımının gerekli olduğu koşullarda sadece kullanıcının yaptığı tuş takımı girişlerini denetler. Motor denetiminin aktif hale getirildiği durumlarda ise tüm işlemci aktivitesi motor denetim değiştirgelerinin

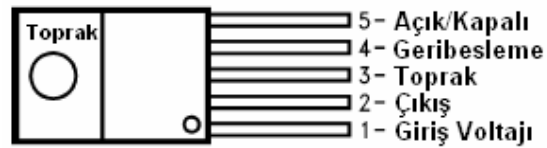
takibi ve hesaplanması için kullanılır. PB2 'Denetim İptal' bas çek düğmesi kullanıcı motor denetimini istediği zaman durdurabilmesi için kullanılmaktadır. Normal koşullarda 10KΩ'luk R14 direnci üzerinden toprak gerilimini gören RB3 bacağı, PB2 düğmesine basılmasıyla 5V ile beslenir ve motor hız denetimi sonlandırılır. Devrede motor denetimi sırasında oluşan istenmeyen gerilim atlamaları, bazı koşullarda bu bacağın tetiklenmesine neden olabilmektedir, bu nedenle RB3 bacağı üzerindeki gerilim sürekliliğinin yazılımsal takibi gerekli görülmüş ve gömülü yazılım bu gerilim atlamalarını önleyecek şekilde hazırlanmıştır.

Gömülü yazılım, kişisel bilgisayar üzerinde koşturulan Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru Veri Analiz yazılımı ile bir seri iletişim protokolü olan RS232 ile haberleşmektedir. PIC18F452 üzerinde donanımsal USART veri kanalı barındırmaktadır. Donanımsal USART yapısının sağladığı kolaylık, ana yazılımın seri iletişim için gerekli kesme rutinleri ile uğraşmasına gerek kalmadan seri iletişimi gerçekleştirmesini sağlamasıdır. TX/RC6 bacağı mikro denetleyiciden seri veri transferine olanak sağlarken RX/RC7 bacağı veri girişini sağlar. Kişisel bilgisayar ile PIC18F452 arasındaki seri iletişim gerilim uyumu MAX232N entegresi ile gerçekleştirilir.

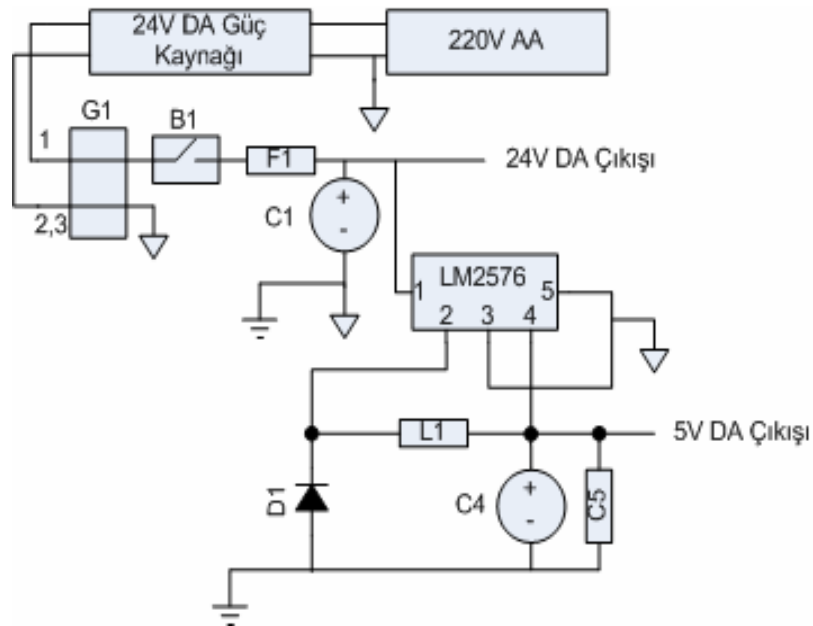
Mikro denetleyicinin RB4,RB5 ve RB6 bacakları çıkış kanalı olarak belirlenmiştir. RB4 çıkışı motor fren sistemini aktif hale geçirirken, RB5 çıkışı motor dönüş yönünü belirler. L6235 entegresinin açık/kapalı denetimi ise PIC18F452'nin RB7 çıkışı ile belirlenir.

5.4. Doğru Akım Güç Çevrim ve Dağıtım Devresi

Çalışmada kullanılan Kalıcı mıknatıslı sinüsel zıt EMK'lı fırçasız DA motor 24 volt DA ile çalışmaktadır. L6235N entegresi pratikte 52 volta kadar beslenebilse de bu uygulamada 24 Volt DA gerilimli bir motor kullanıldığı için 24 volt DA ile beslenmektedir. Sürücü de kullanılan maksimum 3A çıkışlı 220V AA / 24 V DA adaptörü bu iki birimin güç ihtiyacını karşılasa da LCD panel ve sürücü devrenin diğer güç gerektiren entegreleri MAX232N,PIC18F452 5V DA ile çalışmaktadır. Bu nedenle adaptörün sağladığı 24V DA çıkışını 5V DA gerilimine düşürmek için LM2576T - 5.0 sabit 5V DA çıkışlı düşürücü gerilim düzenleyicisi kullanılmıştır. Şekil 5.18 LM2576'nın bacak düzenini göstermektedir.



Şekil 5.18 LM2576 bacak düzeni[19]



Şekil 5.19 Sürücü Doğru Akım Güç Çevrim ve Dağıtım Devresi

5.5. Çevresel Birimler

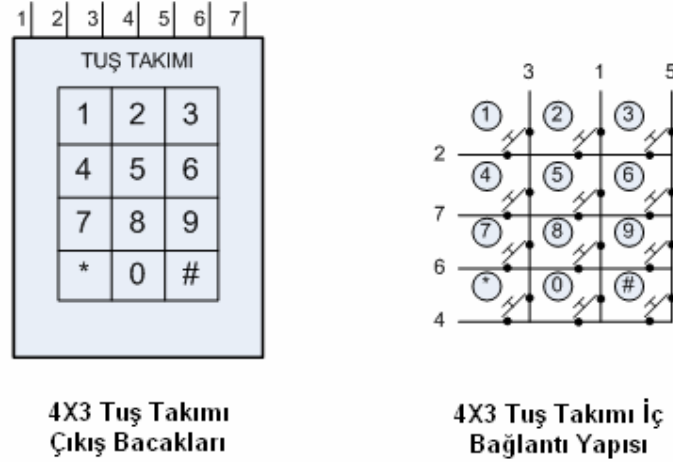
Sürücü devre tasarımında kullanıcını ile sürücü devrenin etkileşimini sağlayan üç ana çevresel birim yapısı bulunmaktadır.

- Tuş Takımı
- LCD Panel
- Kişisel Bilgisayar

Çevresel elemanlardan kişisel bilgisayar bağlantısı sürücü devrenin işlevini görmesinde etkili olmayıp kullanıcının motor denetim sonuçlarını görsel olarak takip etmesini sağlar.

5.5.1. Tuş takımı

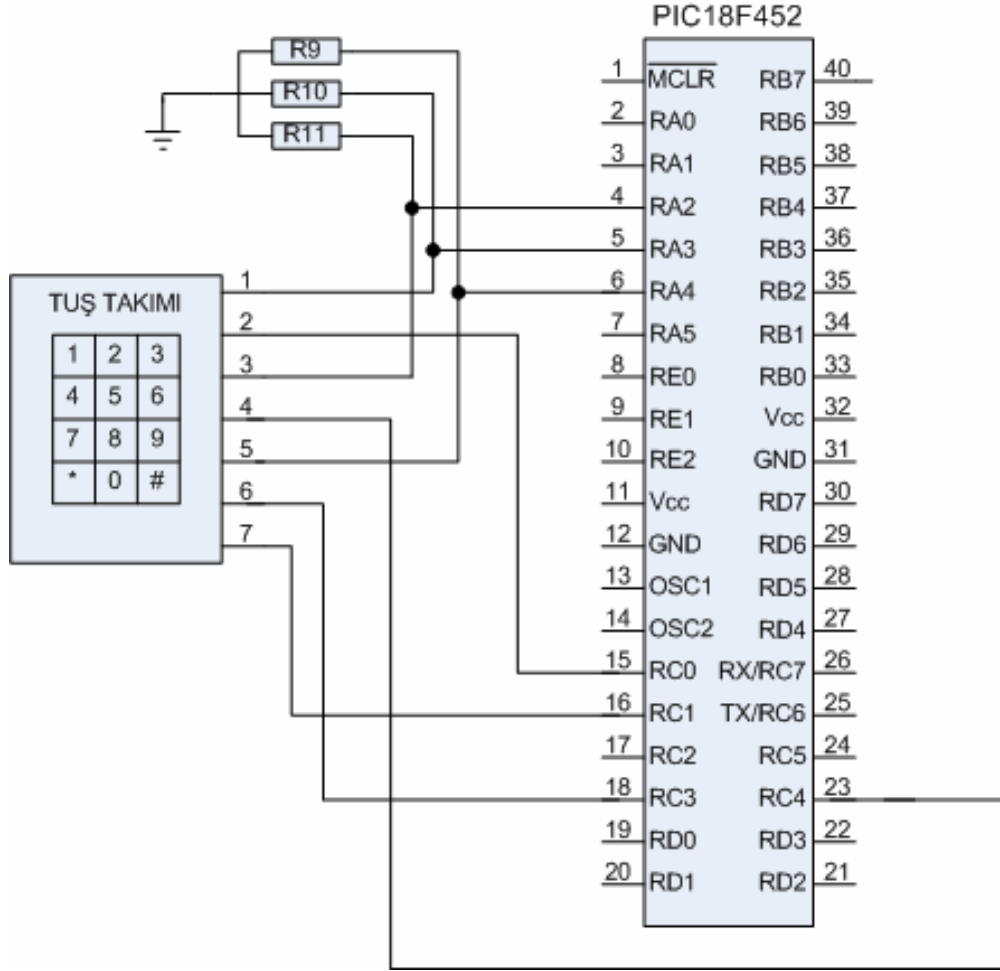
Sürücü devre tasarımında 3X4'lük klasik telefon tuş takımından yararlanılmıştır. Üzerinde aktif eleman barındırmayan bu tuş takımı bacak düzeni ve iç bağlantıları Şekil 5.20'de gösterilmiştir.



Şekil 5.20 3X4 Tuş Takımı Çıkış Bacakları ve İç Bağlantı Yapısı

3X4 tuş takımının 7 bacak çıkışı bulunmaktadır. Çalışma esası bir tuşa basıldığında iki çıkış bacağının birbirine bağlanması prensibine dayanır. Bağlantı kurulduğunda çıkış bacakları arasında yaklaşık 80Ω'luk bir direnç olduğu gözlemlenmiştir. Tuş takımının sürümü ana yazılımda bir fonksiyon olarak gerçekleştirilmiştir ve sadece yazılımın gerekli gördüğü zamanlarda işlevsellik kazanır. Şekil 5.21 tuş takımının sürücü devredeki elektriksel bağlantı şemasını göstermektedir. PIC18F452 mikro denetleyicisinde giriş kanalı olarak tanımlanan bacaklar toprak bağlantısı yapılmadığı sürece yüksek empedans durumunda bulunurlar. Yazılımdaki tuş takımı fonksiyonunun işlevselliği gereği mikro denetleyicide giriş kanalı olarak tanımlanmış RA2,RA3 ve RA4 bacakları 5V sinyali gelmediği sürece toprak gerilimini görmelidirler. Giriş kanallarını yüksek empedans durumundan kurtarmak amacıyla 1KΩ'luk R9,R10,R11 düşürme dirençleri kullanılmıştır. Tuş takımı fonksiyonu aktif duruma geçirildiğinde PIC18F452 çıkış kanalı olarak belirlenmiş RC0,RC1,RC3 ve RC4 bacaklarından tuş takımına 5 V sinyali gönderir. Herhangi bir tuşa basıldığında tuş takımının ilgili iki bacağı birleşir ve RA2,RA3 veya RA4 bacaklarının birinde 5V sinyali görülür. Bu durumda hangi tuş sütununa basıldığı belli olsa da sütundaki dört tuştan hangisine basıldığı

belirlenemez bu nedenle tuş takımına dört kanaldan iletilen enerji önce iki kanala daha sonra tek kanala indirilerek mantıksal sorgulama yoluyla basılan tuş belirlenir.

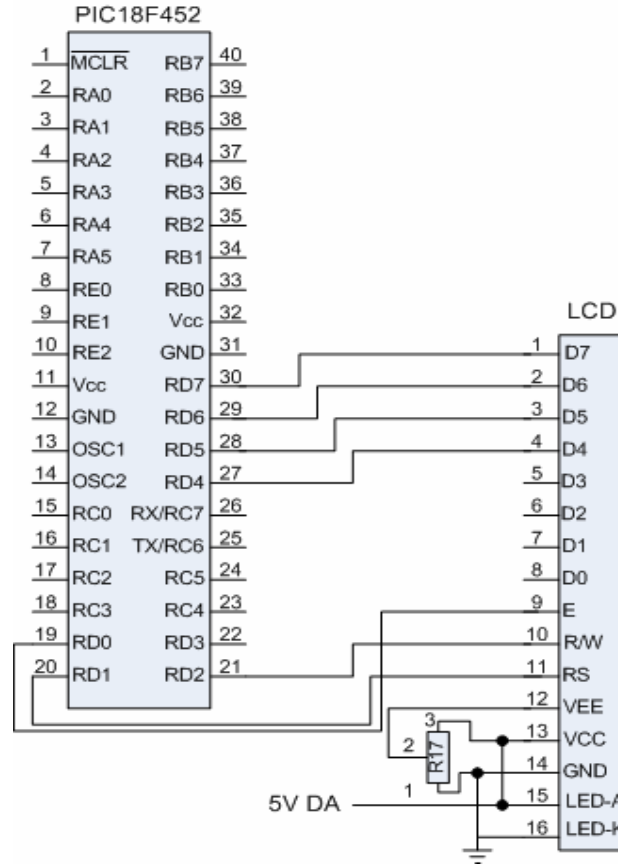


Şekil 5.21 3X4 Tuş Takımı Elektriksel Bağlantı Şeması

5.5.2. LCD panel

Likit kristal ekranlar bize birçok harfi, sayıları ve değişik dillerin alfabelerini görüntüleme imkanı verirler. Değişik hane sayılarına sahip olan likit kristal ekranlarda bir hane 35 noktadan oluşur. LCD ekranlar kendi denetleyicilerine sahip olduklarından mikro denetleyicinin görevi sadece ekrana bilgi yazdırmakla sınırlıdır, yedi segmentli ekranlardaki gibi bir tarama işlemi yapmaları gerekmez. LCD'lerde genellikle Hitachi firmasının üretmiş olduğu HD44780 denetleyicisi

kullanılır. Bu entegrenin kullanıldığı tüm entegreleri aynı mantıkla denetlemek ve bilgi yazdırmak mümkündür[19]



Şekil 5.22 Sürücü LCD Panel Elektriksel Bağlantı Şeması

Sürücü tasarımında kullanıcı ile görsel iletişim kurulabilmesi için 16X2 haneli HD44780 uyumlu bir LCD panel kullanılmıştır. LCD kullanımında bacak düzeni önemlidir, piyasada satılan LCD panellerde farklı bacak düzenleri bulunabilmektedir. Likit kristal panelin 5V ile beslenen 15. bacağı ve toprak gerilimini gören 16. bacağı arka panel aydınlatması için kullanılmaktadır. 13. bacak 5V devre besleme gerilimi, 12. bacak ise devre toprak gerilimi girişleridir.

11. bacak kontrast ayar bacağı olup VR5 çok turlu trimpotu ile kullanılır. Kullanıcı VR5 direncini devre üzerinden ayarlayarak LCD kontrast değerini değiştirebilir, çok koyu ayarlanmış kontrast değeri LCD panelin ilk açılışında sorunlar çıkartabilir. Kontrast ayarının boş satırlarda koyuluk görülmeyecek şekilde ayarlanması uygundur.

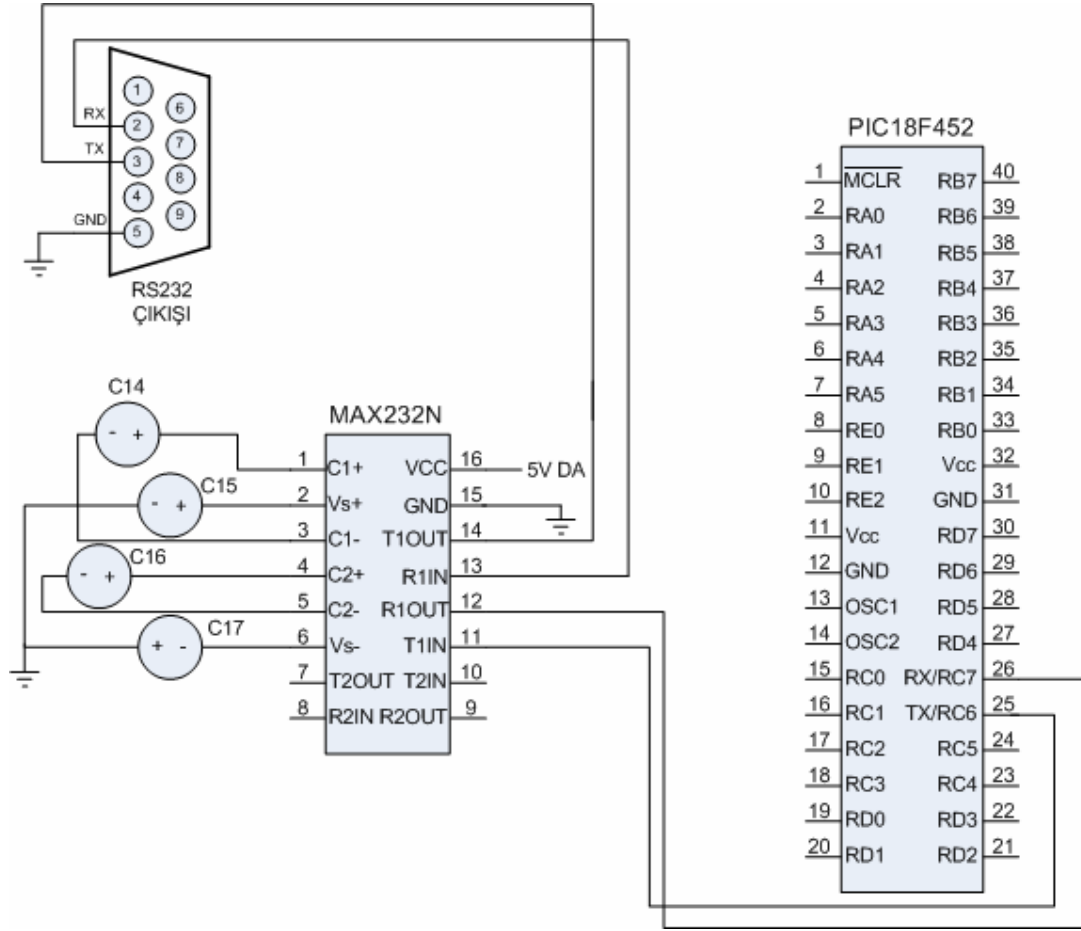
9,10 ve 11. bacaklar sırasıyla enable, read-write ve register select bacaklarıdır, mikro denetleyici bu denetim bacaklarını kullanarak LCD'ye bilgi yazdırmaktadır. Mikro denetleyicinin kullanacağı bacak sayısını azaltmak için LCD ile 4 bit'lik veri iletişimi seçilmiştir. Bu nedenle veri akışı için LCD panelin sadece D4,D5,D6 ve D7 veri bacakları kullanılmaktadır. 4 bit'lik veri iletişimi durumunda mikro denetleyici sadece 7 giriş-çıkış kanalıyla LCD ile iletişim kurabilmektedir.

5.5.3. RS232 mikro denetleyici-kişisel bilgisayar bağlantısı elemanları

Seri iletişimde gönderici kısmında 8 bitlik veri paralel yapıdan seri yapıya çevrilir ve tek bir hattan alıcıya iletilir. Alıcı taraf bu sekiz bit'lik seri veriyi tekrar paralele çevirerek bir bayt'lık bilgi halinde kullanır. Veri gönderen ve veri alan uçların belirli kurallar çerçevesinde haberleşmesi gerekir. Verinin nasıl paketleneyeceği, bir karakterdeki bit sayısını, verinin ne zaman başlayıp ne zaman biteceğini bu kurallar çerçevesi belirler. Bu kurallar çerçevesine protokol denir[25].

Sürücü devre kişisel bilgisayar üzerinde çalışan motor verilerinin analizinin yapıldığı yazılımla RS232 seri iletişim protokolünü kullanarak haberleşir. Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi sürücü devrenin mikro denetleyicisi olan PIC18F452 üzerinde donanımsal USART tüm devresi bulundurmaktadır ve RS232 protokolünün gerektirdiği kesme fonksiyonları ve paketleme yapısını denetler. Biri verici ve diğeri alıcı kanal olmak üzere iki kanallı bir yapı mikro denetleyicinin bilgisayar ile 9600 baud hızında iletişim kurması için yeterlidir.

Mikro denetleyici ile bilgisayar arasındaki RS232 seri iletişimin temel sorunu gerilim seviyeleri arasındaki farktır. RS232 protokolü çerçevesinde +3V ile + 15V arasındaki sinyalleri yüksek -3V ile -15V arasındaki sinyalleri alçak sinyal olarak algılanmaktadır. +3V ve -3V arası sinyaller geçersiz kabul edilir. PIC18F452 ise seri sinyal iletişimde +5V'u yüksek, 0V'u alçak sinyal olarak kullanmaktadır ve bilgisayar ile yapılan iletişimde gerilim uyumu sorunu ortaya çıkmaktadır. Bu uyum sorunu, seri iletişimde gerilim uymunu sağlamak için özel olarak tasarlanmış MAX232N entegresi ile giderilmiştir. Şekil 5.23 Sürücü devre RS232 iletişim elektriksel bağlantı şemasını göstermektedir.



Şekil 5.23 Sürücü Devre RS232 İletişim Elektriksel Bağlantı Şeması

MAX232 entegresi 1µF'lık kutuplu C14,C15,C16 ve C17 kapasitörlerini mikro denetleyici çıkış gerilimlerini RS232 standardına çekmek için kullanır. 5V'luk kaynak gerilimi ile beslendiğinde 2.bacak olan Vs+ bacağında +8.5 V, 6.bacak olan Vs- bacağında -8.5 V oluşur. Mikro denetleyiciden gelen 5V yüksek genlik sinyali 8.5 volta yükseltilirken , 0V seviyesindeki düşük genlik sinyali – 8.5V'a çekilir. MAX232N'in 14 bacağında gerilim uyumu sağlanan sinyal, sürücü üzerine monte edilmiş DB9 konnektör ve standart bir RS232 kablosuyla bilgisayara aktarılır. Bilgisayardan gelen veri ise aynı konnektör ve veri kablosu aracılığı ile MAX232N'in 13. bacağı tarafından alınıp gerilim uyumu sağlanarak mikro denetleyiciye aktarılır.

6. SÜRÜCÜ YAZILIMLARI VE YAZILIM AKIŞ ŞEMALARI

Bu çalışma kapsamında sürücü yönetimini sağlamak ve sürücü denetimi sonuçlarının görsel takibini sağlamak amacıyla iki yazılım hazırlanmıştır.

- Sürücü Yönetimi Gömülü Yazılımı
- Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru Hız Denetimi Veri Analiz Yazılımı

Sürücü Yönetimi yazılımı, sürücü mikro denetleyicisi olan PIC18F452 üzerine yüklenen bir hex dosyası niteliğinde iken Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru Hız Denetimi Veri Analiz Yazılımı herhangi bir kişisel bilgisayarda koşturulabilen bir exe dosyasından oluşmaktadır.

6.1. Sürücü Yönetimi Yazılımı ve Akış Şemaları

Sürücü yönetimi gömülü yazılımı, sürücü yönetimini sağlayan mikro denetleyicinin tüm aktivitesini yöneten yazılımdır. Mikro denetleyiciler çeşitli denetim gereksinimlerine cevap verebilmek için yapılarında pek çok donanımsal denetim ve uygulama mekanizması barındırırlar. Bu çalışmada kullanılan PIC18F452 mikro denetleyicisi kullanıcıya 8 kanal 10 bitlik analog-sayısal çevirici, USART seri iletişim kanalı, paralel iletişim kanalı, 5 farklı giriş-çıkış kapısı, 2 farklı darbe genişliği modülatörü, dış kesme kanalları ve uzayan bir liste halinde pek çok donanımsal özellikler sunar. Bununla beraber farklı denetim uygulamaları bunlardan sadece uygulama için gerekli olanları kullanmak ister. Tasarımcı için mikro denetleyici seçiminde uygulama için gerekli özellikleri minimum bacak sayısı ile karşılayan entegreler ön plana çıkar. Bu nedenle mikro denetleyiciler bu çok sayıda özelliği en uygun bacak sayısı ile sağlayabilmeleri için bacaklarına çoklu görevler yüklenecek şekilde tasarımlanırlar. Mikro denetleyicilerde hangi zamanda hangi bacağın bu çoklu görevlerden hangisini gerçekleştireceği gömülü yazılımlarla belirlenir. Mikro denetleyicilerin çok yaygın şekilde endüstride kullanılmalarının sebebi de aslında gömülü yazılımlar sayesinde kazandıkları esnek yapıdır. Sürücü Yönetimi yazılımı PIC18F452 mikro denetleyicisinin A,B,C,D çok bacaklı giriş-çıkış kapılarını,USART seri iletişim hattını, EXT0 dış

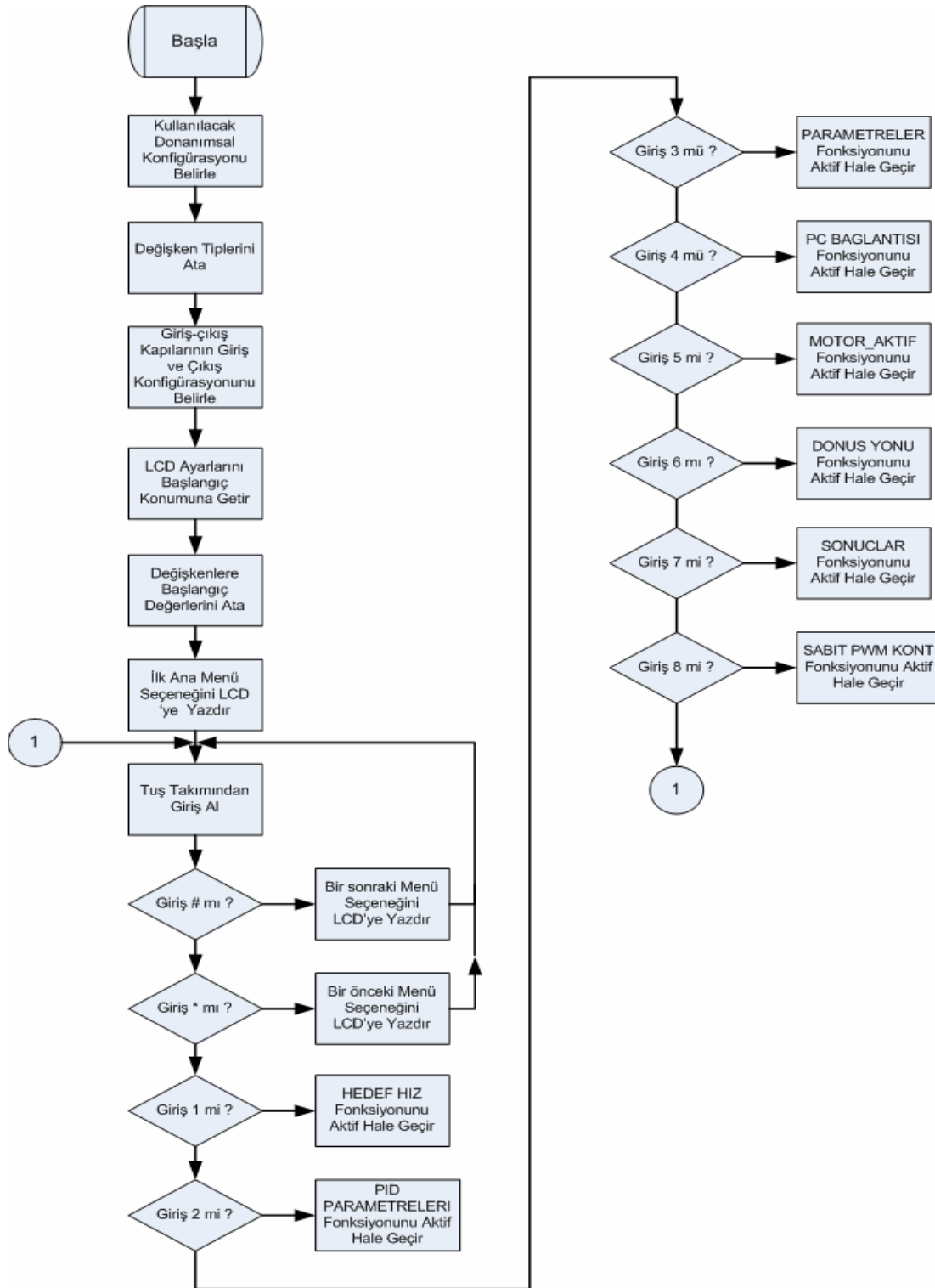
kesme kapısını, RC2 donanımsal darbe genişliği modülatörü çıkışını aktif hale getirecek şekilde programlanmıştır.

Sürücü denetiminde kullanıcı ara yüzlerinin gerektirdiği karmaşık menü yapısı, tuş takımı yönetimi, yoğun kayan nokta işlemleri gerekliliği gömülü yazılımın hızlı olmasına karşın yönetimi zor olan ve yazılımın iyi tasarılanmaması durumunda hız artışı yerine yavaşlamalara neden olan assembly yazılım dili yerine, yazılımı ve yönetimi daha kolay olan mikro denetleyici gömülü yazılımlarını derlemek için hazırlanmış C yazılım dili tabanlı bir derleyicide hazırlanması uygun görülmüştür. Yaklaşık 1000 satırlık C kodundan oluşan 'Sürücü Yönetimi' gömülü yazılımı, yazılımsal olarak 8000 satırlık assembly dili kod satırına karşılık gelmektedir. Kullanılan C derleyicisinin kullanıcıya sağladığı en büyük esneklik ise yazılan kodun herhangi bir noktasında kullanıcıya Assembly yazılım dilinde komut girişine izin vermesidir. Assembly dilini kullanmanın hız kazancından başka sağladığı en önemli özellik mikro denetleyici denetim yazmaçlarını doğrudan yönetebilmesidir. C derleyicisinin sağladığı bu esneklik, motor denetiminin aktif hale geçtiği yazılım döngülerinde zamanlayıcı ve kesme denetimini sağlamak için kullanılmıştır.

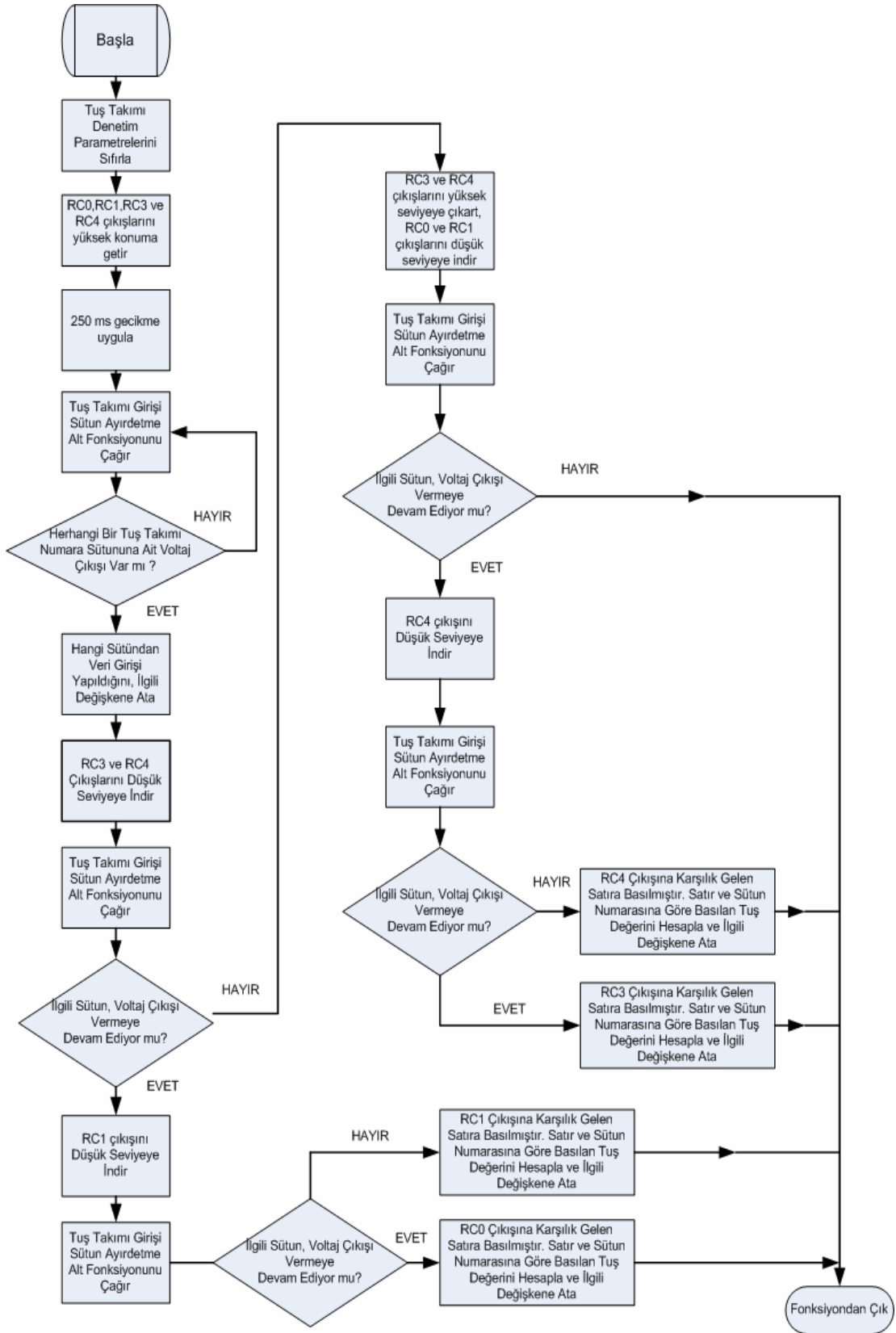
Hazırlanan gömülü yazılım, menü tabanlı sade bir ana akış döngüsünün etrafına konumlandırılmış fonksiyonlardan oluşmaktadır. Ana yazılım mikro denetleyicinin hangi donanımsal özelliklerinin hangi ayarlarla kullanılacağını belirtildiği, değişken tanımlarının yapıldığı, değişkenlerin ve çevresel iletişim değiştirgelerinin başlangıç konumuna getirdikleri bir giriş bölümü ile başlar ve kullanıcı ile görsel iletişimin başlatıldığı bir menü döngüsü içine girerek sürücüyü kullanıcının yönetimine bırakır. Alt fonksiyonlar halinde yazılım yapılmış menüler yardımıyla kullanıcı seçtiği komutlar ve değiştirdiği denetim değiştirgeleriyle tüm denetim aktivitesini ele alır.

Ana yazılım akış şeması Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Yazılımın hazırlandığı C derleyicisi çevresel iletişimi sağlamak için RS232 bağlantısı ve LCD panel sürümü için hazır fonksiyonlar sunar, bu hazır fonksiyonlar yapısı derleyiciden kaynaklanan bazı hataların giderilmesi ve yazılım kolaylığı sağlanması için ufak alt fonksiyonlar yazılarak yeniden düzenlenmiştir. Kullanıcı tuş takımı denetimi içinse ayrı bir denetim fonksiyonu hazırlanmıştır. Fonksiyon tuş takımı girişlerini sütunlar

halinde denetleyen bir alt fonksiyona sahiptir. Tuş takımı denetim fonksiyonu akış şeması Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.1 Ana Yazılım Döngüsü Akış Şeması



Şekil 6.2 Tuş Takımı Denetimi Fonksiyonu Akış Şeması

Ana yazılım menü düzeni sekiz seçenekten oluşmaktadır, görsel ara yüzdeki numaralandırılma sırasıyla bunları ifade etmek gerekirse,

- 1 - Hedef Hız
- 2 - PID Parametreleri
- 3 - Parametreler
- 4 - PC Bağlantısı
- 5 - Motor_Aktif
- 6 - Dönüş Yönü
- 7 - Sonuçlar
- 8 - Sabit PWM Kontrol

‘Hedef Hız’ menüsü kullanıcının, sürücünün motoru hangi hızda denetleyeceğini bildirdiği menüdür. Denetleme hedef hızının değeri RPM biriminde girilir. Hız denetim aralığı olan 300 RPM ile 2500 RPM arası girişler geçerli sayılır. 300 RPM’in altındaki girişler 300, 2500 RPM’den yukarı girişler 2500 RPM olarak kabul edilir. Giriş yapıldıktan sonra kullanıcıya girişi kabul edip etmediği sorulur, onaylandığı takdirde hedef hız değişkeni giriş yapılan yeni değerine atanır.

Kullanıcının bu menüye girmesi otomatik olarak denetimin hız denetimi modunda çalışmasını sağlar.

Mikro denetleyicinin sayısal oransal-tümlevsel-türevsel denetim fonksiyonunu yerine getirebilmesi için hedef hız değeriyle birlikte PID denetim değiştirgelerinin de girişine gereksinimi vardır. Kullanıcı ‘PID Parametreleri’ menüsüne girerek denetleyiciye ait K tüm denetim modlarına etkiyen kazanç değiştirgesini, Ti tümlevsel zaman katsayısı değiştirgesini ve D türevsel zaman katsayısı değiştirgesini belirler. K kazanç değiştirgesi birimsizken 0 – 9.999 arasındaki girişleri, Ti zamanı değiştirgesi 0 -9999 milisaniye arasındaki girişleri, D türevsel zaman değiştirgesi ise 0 – 99.99 milisaniye arasındaki girişleri kabul eder. Her

denetim değiştirgesi girişinden sonra kullanıcı tarafından kabul edilip edilmediği sorgulanır. Kabul edilen değerler ilgili PID denetim katsayı değişkenlerine atanır. Kullanıcının bu menüye girmesi 'Hedef Hız' menüsünde olduğu gibi denetimin hız denetimi modunda çalışmasını sağlar.

Sürücünün donanımsal özelliklerinin anlatıldığı 5. bölümde kullanılan L6235 entegresinin dış referans gerilimine göre motor akımını denetleyebildiği belirtilmişti. Hazırlanan gömülü yazılım, sayısal oransal-tümlevsel-türevsel denetim uygulayarak hız denetimini sağlamakla beraber gösteri amaçlı bir mod daha içermektedir. Bir anlamda motor akım denetimi olarak nitelenebilecek bu mod ile çalışıldığında mikro denetleyici hız denetim algoritmasını çalıştırmaz sadece kullanıcı girişine bağlı olarak sabit bir referans gerilim üretir ve motorun dönüş hızını kaydeder. Bu modun amacı her seferinde sabit bir referans gerilimi uygulansa bile gürültü etkileri, motor dinamiklerindeki değişimler ve çevresel koşullar nedeniyle oluşan hız çıkışının farklı uygulamada farklı sonuçlar verebileceğinin gösterilmesidir. 'Sabit PWM Kontrol' menüsü bu belirtilen denetim modu için kullanıcının referans akım değerini belirlemesini sağlar. Kullanıcı referans faz akım değerini L6235N entegresine uygulanacak V_{ref} referans gerilimini oluşturan mikro denetleyici donanımsal darbe genişliği modülatörünün görev çevrimi oranını belirleyerek gerçekleştirir. Kullanıcı bu menüde darbe genişliği modülatörünün görev çevrimi oranını 0 -1023 arası bir giriş yaparak belirler.Yapılan girişin oluşturduğu referans akım değeri yaklaşık olarak değeri Eş.6.1'deki gibi bulunabilir.

$$ReferansAkım = 5V * \frac{KullanıcıGirişi}{1024} * \frac{VR4}{VR3 + VR4} * \frac{1}{R_{geribesleme}} \quad (6.1)$$

Bu menüye giriş yapılması sabit akım denetiminin aktif denetim modu olmasını sağlar.

'Parametreler' menü seçeneği, aktif denetleyici modu hangisiyse onunla ilgili denetim değiştirmelerini topluca kullanıcıya sunar. Sayısal PID Motor Hız Denetimi aktif durumdaysa,

- Hedef Hız değeri

- PID denetim oransal kazanç katsayısı K değeri
- PID denetim tümlevsel zaman katsayısı T_i değeri
- PID denetim türevsel zaman katsayısı D değeri
- Motor Dönüş Yönü
- Denetim Modu

bilgileri kullanıcıya aktarılırken sabit Akım Denetimi aktif durumdaysa,

- Denetim Modu
- Motor Dönüş Yönü
- Sabit PWM Görev Çevrimi Oranı Girişi

bilgileri kullanıcıya LCD panel aracılığı ile aktarılır.

'Dönüş Yönü' menüsü 'SY' saat yönünü 'TSY' saat yönünün tersini ifade etmek üzere kullanıcının motorun hangi yönde dönmesini istediğini belirlemesini sağlar. Kullanıcı girişine göre altı adım anahtarlama tekniği sıralı veya ters sıralı işletilerek motor dönüş yönü ayarlanır.

Motor denetimi sırasında motor elektriksel çevrimleri arasında geçen sürenin tespit edilerek, iki konum sinyali arasında konum farkının sabit olması bilgisinden de yararlanılarak hız ölçümü yapıldığı önceki bölümlerde anlatılmıştı. Aşağıda detaylarının anlatılacağı üzere, aktif motor denetimi sırasında denetim fonksiyonu yeni oluşan her hız ölçümünü kayan nokta işlemi yaparak anlık olarak hesaplar ve sonuç bir kayan nokta değişkeni olarak bulunur. Kullanıcının, hız denetimi sonuçlarını denetim sonrasında inceleyebilmesi için sonuçların bir dizin içinde saklanması gerekir. Mikro denetleyici zaman farkını 16 bitlik uzun tamsayı olarak hesaplarken bu değerden yola çıkılarak hesaplanan anlık hız değerini kayan nokta değişkeni olarak bulur. Mikro denetleyiciler yapıları gereği sınırlı bir hafızaya sahiptirler. Kayan nokta değişkenleri, uzun tamsayı değişkenlerine göre iki kat daha fazla yer kaplarlar. Hız bilgisinin değişken zaman bilgisinden sabit katsayılarla türetildiği gerçeğinden yola çıkılarak mikro denetleyici veri hafızasında

tasarruf sağlamak ve daha fazla veri kaydedebilmek amacıyla denetim sırasında sadece 16 bitlik zaman verileri kaydedilir. Motorun 50 turluk mekanik dönüşü zamanına karşılık gelen 250 zaman verisi kaydedebilen mikro denetleyici, denetim hız sonuçlarının incelemesi ihtiyacı duyulduğunda aşağıda detayları belirtilen yolu izleyerek zaman verilerinden hız bilgilerini tekrar oluşturur.

Ω_n n'inci örnek için dakikada dönüş hızını ifade ederse, Ω_n hızında bir motor saniyede $\Omega_n/60$ mekanik tur gerçekleştirir, buradan yola çıkılırsa bir tam mekanik dönüş $60/\Omega_n$ saniyede kat edilir. Motordan her $1/5$ 'lik mekanik tur için bir kere konum sinyali alınır. Bir mekanik turu $60/\Omega_n$ saniyede alan motor $1/5$ mekanik turluk yolu $12/\Omega_n$ saniyede kat eder. Mikro denetleyici konum sinyalleri arasındaki zaman farkını $1.6 \mu s$ 'lik adımlara sahip 16 bitlik bir zamanlayıcı kullanarak ölçer. $1/5$ mekanik dönüşte harcanan zamana denk gelen iki sinyal arası zaman farkı, bu iki sinyal arasında oluşan zamanlayıcı adım sayısının zamanlayıcı adımları arasındaki zaman farkıyla çarpılmasıyla bulunur. Bu bilgilerden yola çıkılırsa T_n iki konum sinyali arasında zamanlayıcı adım sayısını göstermek üzere Eş 6.2'ye ulaşılır.

$$T_n 1.6 * 10^{-6} = \frac{12}{\Omega_n} \quad (6.2)$$

Eş 6.1 tekrar düzenlenirse,

$$\Omega_n = \frac{7.5 * 10^6}{T_n} \quad (6.3)$$

Eş. 6.3 sadece kaydedilen zaman verilerinden hız denetim sonuçlarını tekrar üretmek için değil motor hız denetiminin aktif olduğu durumda zamanlayıcı bilgisinden hız hata hesabını yapmak için gerekli olan anlık hız hesaplaması içinde kullanılmıştır.

Kaydedilen hız verilerinin hem sürücü görsel ara yüzüyle hem de kurulan RS232 bağlantısıyla kişisel bilgisayarda grafiksel olarak incelenebildiği önceki bölümlerde anlatılmıştı. 'PC Bağlantısı' menüsü 250 verilik zaman bilgisini RS232 bağlantısıyla kişisel bilgisayara aktarmak için kullanılır. Bu menünün seçimiyle beraber aktarım işlemi de başlar, bu nedenle veri aktarımına başlamadan önce

kişisel bilgisayarda koşturulan veri analiz programının mikro denetleyiciden veri aktarımı yapabilecek konumda olmasına dikkat edilmelidir.

‘Sonuçlar’ menüsü denetim sonuçlarının LCD panel aracılığı ile kullanıcıya aktarılmasını sağlar. Mikro denetleyici, denetimin aktif hale geçirilmesini takip eden 251 verilik konumlar arası zaman değişimi bilgisini bir dizinde tutar. Bu menüye girildiğinde, mikro denetleyici Eş. 6.3’ü kullanarak her zaman verisi için sırasıyla hız değerini hesaplar. Dönecin başlangıç konumundaki tam konumu bilinemediğinden ilk iki zaman verisi için hız hesabı yapılmaz. Mikro denetleyici ayrı bir 251 verilik dizinde ise ölçülen her hız değerinin oluşmasını sağlayan sayısal PID denetleyicisinin çıkış değerini saklar. Kullanıcı bu menüye girdiğinde PID denetleyicisinin çıkış değerini ve bu çıkış değerine göre oluşan hız değerini takip edebilmiş olur. Her hangi bir tuşa basıldığında bir sonraki denetleyici çıkış sinyali verisi ve bu çıkışla oluşan yeni hız verisi LCD panel aracılığı ile kullanıcıya iletilir. Bu menü içindeyken # tuşuna basılması durumunda otomatik olarak 250. veri ikilisine atlanır ve bir tuşa basılarak menüden çıkılır.

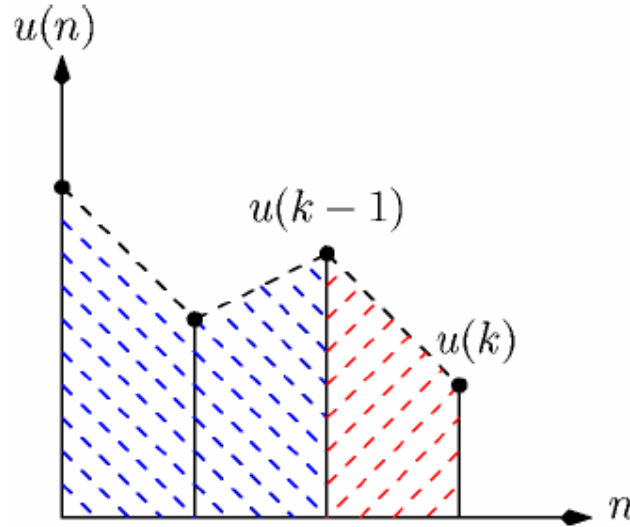
‘Motor_Aktif’ menü seçeneği motor denetimini aktif hale geçirir. Mikro denetleyici gömülü yazılımının kullanıcıya iki farklı denetim seçeneği sunar,

- Sabit Akım Denetimi
- Sayısal PID Motor Hız Denetimi

Sabit akım denetimi gösteri amaçlı bir mod olup amaçları ve detayları yukarıda belirtilmiştir. Bu çalışma kapsamında hedeflenen kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorunun denetimi ‘Sayısal PID Motor Hız Denetimi’ modunun aktif hale geçirilmesi ile sağlanır. Mikro denetleyici hız denetimini, kullanıcının belirlediği hedef hız değeri ile ölçülen motor hızının farkını hata sinyali olarak kabul eden paralel yapılı bir sayısal oransal-tümlevsel-türevsel denetleyici algoritmasını işleterek oluşturduğu referans sinyaller ile gerçekleştirir. Algoritma çalışmasını özetlemeden önce sayısal PID algoritmasının hangi matematiksel temellere dayanarak ortaya konduğunu belirtmek gerekir.

Öncelikle bir tümlev alıcısının yapısını inceleyelim. Şekil 6.3’te $u(n)$ herhangi bir fonksiyonu nitelerken, $u(n)$ noktalarının altında kalan alanlar mavi ve kırmızı

çizgiler ile gösterilmiştir. $y(n)$, $u(n)$ fonksiyonunun tümlevini alan bir alan fonksiyonu olsun ve $y(k)$ değeri $u(k)$ değerine kadar $u(n)$ fonksiyonunun yamuksal bir yaklaşımla devamlılığı sağlanmış noktalarının altında kalan alanı temsil etsin. Bu durumda $y(k)$ değeri $y(k-1)$ değeri ve Şekil 6.3'de kırmızı çizgilerle taranmış alanın toplamıdır. Bunu denklem ile ifade etmek istersek T_s $u(n)$ sinyallerinin örnekleme zaman aralığını bildirmek üzere,



Şekil 6.3 Yamuksal Yaklaşımla Devamlılığı Sağlanmış Örnek Bir $u(n)$ Ayrık Zaman Sinyali ve Altında Kalan Alan[18]

$$y(k) = y(k-1) + \frac{T_s}{2} [u(k) + u(k-1)] \quad (6.4)$$

Eş 6.4'ü z bölgesine taşırsak,

$$Y(z) = z^{-1}Y(z) + \frac{T_s}{2} [U(z) + z^{-1}U(z)] \quad (6.5)$$

$$(1 - z^{-1})Y(z) = \frac{T_s}{2} (1 + z^{-1})U(z) \quad (6.6)$$

Eş 6.6 düzenlenirse Z bölgesinde tümlev fonksiyonu $Y(z)$ Eş 6.7'deki gibi bulunur.

$$Y(z) = \frac{T_s}{2} \frac{(1 + z^{-1})}{(1 - z^{-1})} U(z) = \frac{T_s}{2} \frac{z + 1}{z - 1} U(z) \quad (6.7)$$

Laplace ortamında tümlev fonksiyonu $1/s$ olarak ifade edilir. Eş. 6.7’de yamuksal yaklaşımla alçak geçirgen filtre yapısında bulunan Z bölgesindeki tümlev fonksiyonunun tanımından yola çıkarsak Eş. 6.8’deki şekilde Laplace ve Z ortamları arasında geçiş sağlanabilir.

$$\frac{1}{s} \Leftrightarrow \frac{T_s}{2} \frac{z+1}{z-1} \quad (6.8)$$

Eş.6.8’e göre Laplace ortamında s ile ifade edilen türev fonksiyonuysa Z bölgesinde Eş. 6.9 olarak ifade edilebilir.

$$s \Leftrightarrow \frac{2}{T_s} \frac{z-1}{z+1} \quad (6.9)$$

Eş 6.9 $z = -1$ için bir kutuba sahiptir ve kısmi kesir açılımı yapıldığında

$\frac{z}{z+1} \Leftrightarrow (-1)^n$ terimi ortaya çıkar, bu durum da doğal olarak salınımsal bir yapı ortaya koyar bu nedenle Laplace ortamındaki türev tanımını Z bölgesine taşıyabilmek için kararlı durum tepkisi Eş. 6.9 ile aynı olan Eş 6.10’daki yaklaşım kullanılabilir[18].

$$s \Leftrightarrow \frac{2}{T_s} \frac{z-1}{2z} = \frac{1}{T_s} \frac{z-1}{z} = \frac{u(t) - u(t-1)}{T_s} \quad (6.10)$$

Paralel yapılandırılmış oransal-tümlevsel-türevsel denetleyicinin zamana bağlı denklemi $e(t)$ hata sinyalini belirtmek üzere Eş.6.11’de görülmektedir.

$$u[t] = K \left[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (6.11)$$

Eş 6.11 Laplace ortamında ifade edilirse,

$$U(s) = K \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) E(s) \quad (6.12)$$

Eş. 6.12, yukarıda anlatılan yamuksal dönüşüm ile Laplace ortamından Z ortamına taşınırsa,

$$U(z) = K \left[1 + \frac{1}{\tau_i} \frac{T_s}{2} \frac{z+1}{z-1} + \frac{\tau_d}{T_s} \frac{z-1}{z} \right] E(z) \quad (6.13)$$

$$(z^2 - z)U(z) = K \left[(z^2 - z) + \frac{T_s}{2\tau_i} (z^2 + z) + \frac{\tau_d}{T_s} (z^2 - 2z + 1) \right] E(z) \quad (6.14)$$

$$u(n+2) - u(n+1) = K \left[e(n+2) - e(n+1) + \frac{T_s}{2\tau_i} \{e(n+2) + e(n+1)\} + \frac{\tau_d}{T_s} \{e(n+2) - 2e(n+1) + e(n)\} \right] \quad (6.15)$$

Eş 6.15 hata sinyali $e(t)$ 'ye göre düzenlenirse,

$$u(n+2) - u(n+1) = K \left[1 + \frac{T_s}{2\tau_i} + \frac{\tau_d}{T_s} \right] e(n+2) + K \left[-1 + \frac{T_s}{2\tau_i} - \frac{2\tau_d}{T_s} \right] e(n+1) + K \frac{\tau_d}{T_s} e(n) \quad (6.16)$$

$$u(n+2) = u(n+1) + q_0 e(n+2) + q_1 e(n+1) + q_2 e(n) \quad (6.17)$$

Eş 6.17'de belirtilen q_0, q_1 ve q_2 katsayıları sırasıyla Eş. 6.18, Eş. 6.19 ve Eş. 6.20'de belirtilmiştir.

$$q_0 = K \left[1 + \frac{T_s}{2\tau_i} + \frac{\tau_d}{T_s} \right] \quad (6.18)$$

$$q_1 = K \left[-1 + \frac{T_s}{2\tau_i} - \frac{2\tau_d}{T_s} \right] \quad (6.19)$$

$$q_2 = K \frac{\tau_d}{T_s} \quad (6.20)$$

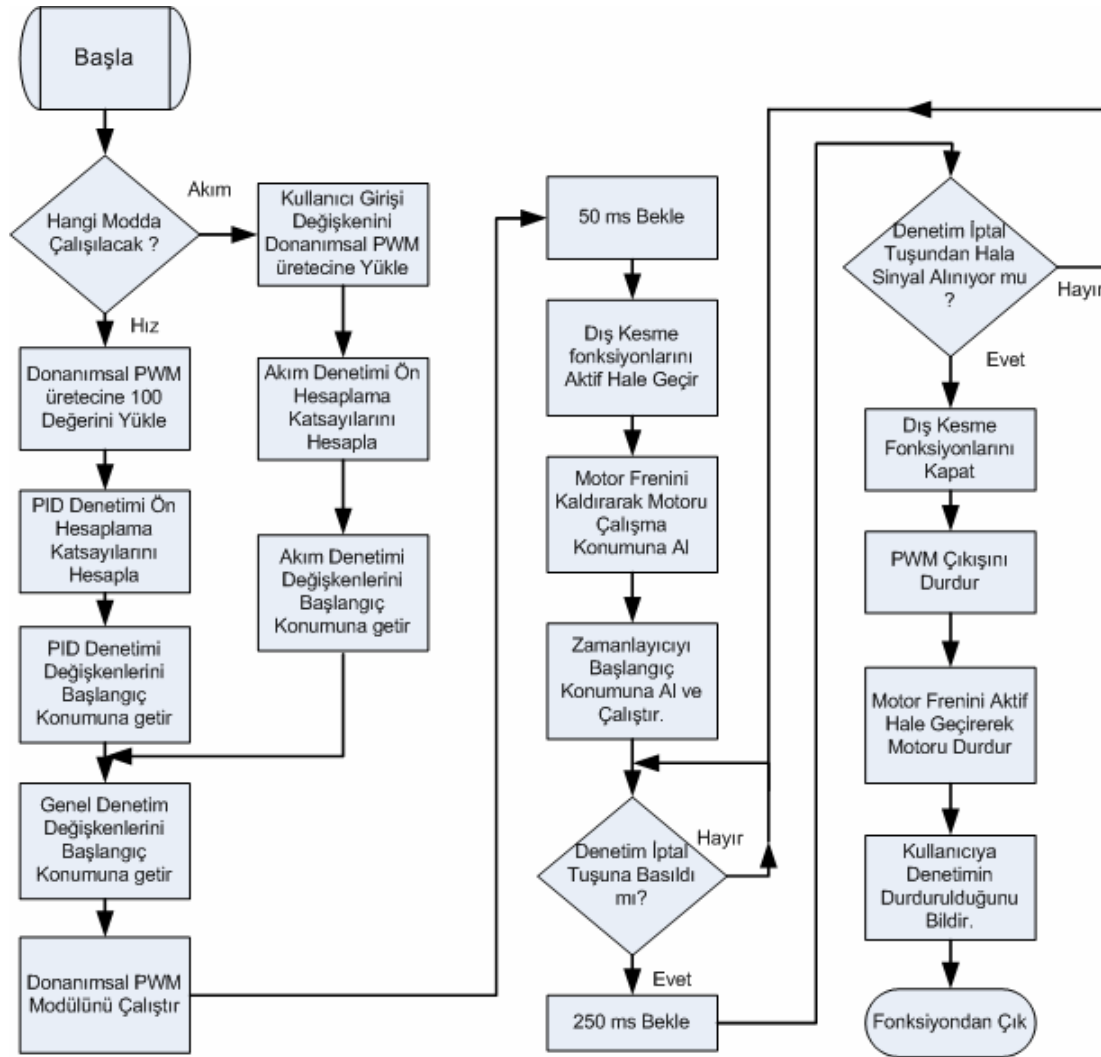
Eş. 6.17'yi $n=k-2$ örneği için tekrar yazarsak,

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \quad (6.21)$$

Sayısal işletilen paralel yapıllı ortak kazançlı PID denetimi, Eş 6.21 uygulanarak elde edilebilir.

Mikro denetleyici gömülü yazılımı içindeki motor denetimini aktif hale geçiren ve Şekil 6.4'de akış şeması görülen fonksiyon, denetim değişkenlerinin motorun

çalışması için ayarlandığı denetim hazırlık aşaması ve kullanıcının denetimi sonlandırmak isteyip istemediğini sorgulayan basit bir döngü yapısından oluşur.



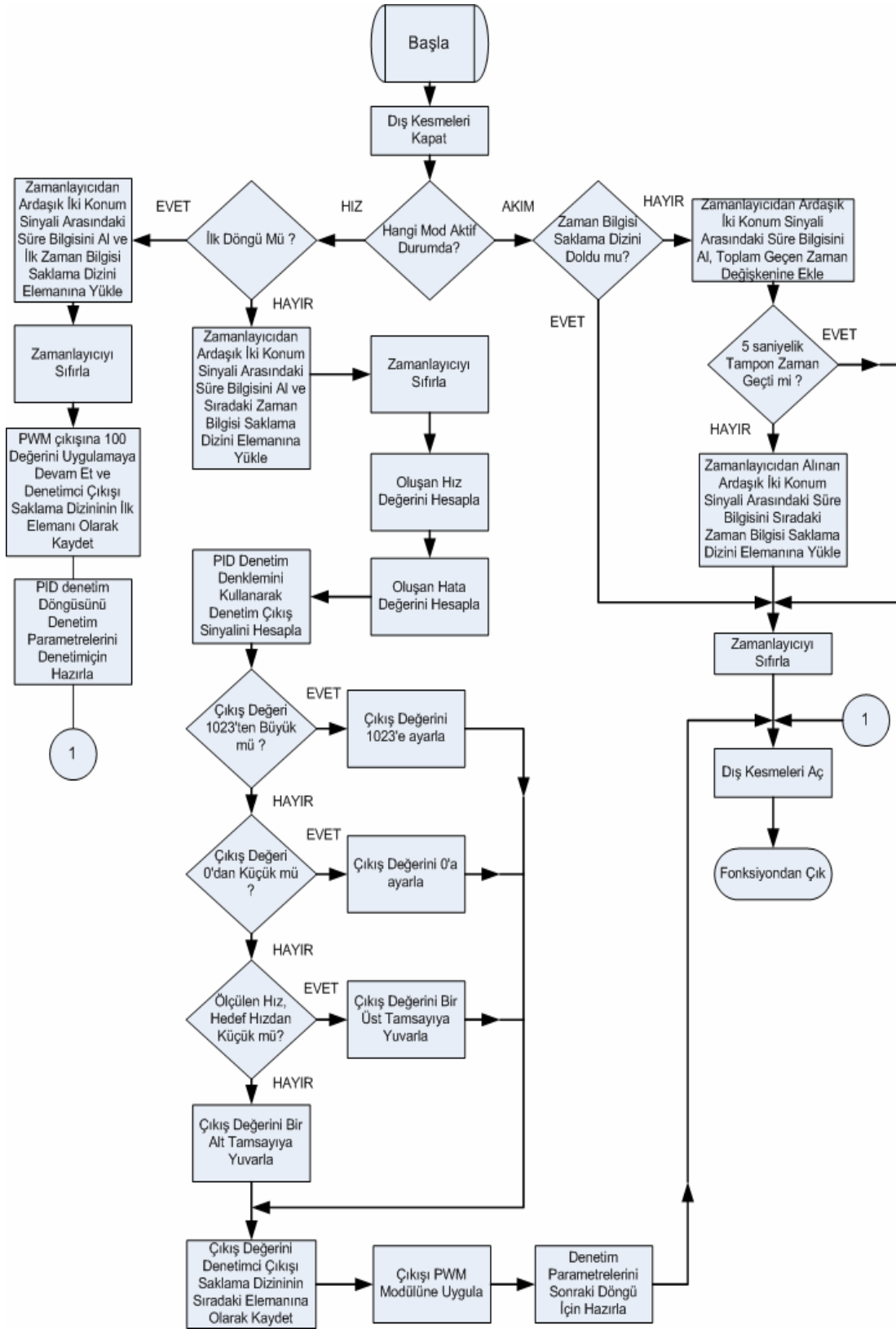
Şekil 6.4 Motor Denetim Fonksiyonu Akış Şeması

Motor denetim fonksiyonu çalıştırıldığında kullanıcı tarafından önceden belirlenmiş çalışma moduna göre ön katsayı hesaplarını yapar. Buradaki amaç, kullanıcının diğer menüler aracılığıyla belirlediği denetim değiştiricilerine göre denetimin gerektirdiği ön katsayıları hesaplamak böylelikle hızlı hesaplamaların yapılmasını gerektiren ana denetim döngüsünde aynı işlemlerin tekrar tekrar yapılmasını engellemektir. Katsayılar belirlendikten sonra her iki denetim modunun ortak kullandığı değiştiriciler başlangıç konumuna alınır. Sonraki aşamada PWM modu aktif hale getirilir, motor freni kaldırılır ve dış kesmelerin aktif hale getirilmesiyle sürücü aktif çalışma durumuna geçer. Bu noktadan itibaren motoru aktif konuma

geçiren fonksiyon kullanıcının denetimi iptal edip etmediğini denetleyen basit bir döngü içinde çalışmasını sürdürür. Denetim hesapları mikro denetleyicinin aldığı konum bilgisi dış kesme sinyallerine bağlı olduğundan denetim dış kesme fonksiyonunun içinde gerçekleştirilir.

Şekil 6.5 hazırlanan dış kesme fonksiyonunun akış şemasını gösterir. Dış kesme fonksiyonu geldiği anda mikro denetleyicinin diğer kesme sinyallerini kabul etmesi engellenir. Denetim 'Akım Denetimi' modundaysa, motora sürekli aynı referans akım sinyali gönderilerek motor fazlarından belirlenen büyüklükte bir akım geçmesi sağlanır. En kötü koşulda motor hızının kararlı bir hal almasının beklendiği 5 saniyelik bir gecikme sonrasında mikro denetleyici zaman verilerini kaydetmeye başlar ve saklama dizini doluncaya kadar bu işlemi sürdürür. Denetim 'Hız Denetimi' modunda çalışıyorsa ilk kesme sinyali geldiğinde dönecin ilk konumu kesin olarak bilinemediğinden hız hesabı yapılamaz. İlk sinyal geldiğinde PID denetimin başlatılması için değişkenler ve zamanlayıcı üzerinde son değişiklikler yapılır. Gerçek denetim hız bilgisinin kesin olarak ölçülebildiği ikinci kesme sinyali ile başlar. Hız ölçümü Eş 6.3 kullanılarak yapılır, ölçülen hız değeri kullanıcının belirlemiş olduğu hedef hız değerinden çıkartılarak PID denetim hata giriş değeri bulunur. Hata değeri ve PID denetleyicinin bir önceki çıkış değeri Eş. 6.21 formülünde yerlerine konularak yeni PID denetleyici çıkış sinyali bulunur. Bu noktada dikkat edilmesi gereken nokta Eş 6.21'de geçen q_0, q_1 ve q_2 katsayılarıdır. PID algoritması motor hızıyla beraber değişen değişken örnekleme zaman aralıklarıyla çalışmaktadır, bu nedenlerle q_0, q_1 ve q_2 katsayıları örnekleme zaman aralığı olan T_s değerinin her yeni döngüde değişmesi nedeniyle tekrar hesaplanmak zorundadır. PID denetim algoritmasına ait mikro denetleyici hesaplamaları, sistem tepkisini en az zamanda gerçekleştirmek üzere kodlanmıştır.

PID denetim çıkış değeri sistem değişkenlerine göre çok büyük veya çok küçük olabilirler. Referans çıkış sinyali 1024 adımlı donanımsal bir PWM modülü ile sağlandığı için çıkış sinyali 1023 değerinden büyük olamaz bu nedenle daha 1023'den daha büyük değerdeki çıkışlar en büyük çıkış değeri olan 1023 olarak uygulanır bununla beraber 0'dan küçük çıkışlarsa 0 olarak işlem görür. Çıkış değeri belirlendikten sonra PID çıkış değerlerini saklayan dizinde sıradaki elemana



Şekil 6.5 Dış Kesme Fonksiyonu Akış Şeması

yazılır ve sonuç referans gerilimi olarak motora uygulanır. Kayıt dizinleri doluncaya kadar her dış kesme fonksiyonunun işleyişinde zaman ve PID çıkış değerleri kaydedilmeye devam eder. Fonksiyon dış kesme fonksiyonlarının tekrar açılmasıyla sonlanır.

6.2. Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Motor Hız Denetimi Veri Analiz Yazılımı

Nesneye dayalı bir programlama dili olan Visual Basic 6.0 SP6 programlama dili ile yazılmış yaklaşık 600 kod satırından oluşan 'Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Motor Hız Denetimi Veri Analiz Yazılımı', LCD panel ve tuş takımı yardımıyla teker teker

Şekil 6.6 Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru Hız Denetimi Veri Analiz Programı Kullanıcı Arayüzü

inceleyebildiğimiz motor denetimi hız sonuçları verilerini topluca görmemize ve grafiksel olarak inceleyebilmemizi sağlar. Yazılım ile zamana bağlı olarak motor hızının hedef hız değerine göre oluşturduğu hata yüzdesini takip etmek de

mümkündür. Yazılım, sürücüden yüklenen çalışma verilerini bilgisayar üzerine veya harici bir cihaza kaydetme imkanı sunarak çalışma verilerini arşivleme imkanı da sunmaktadır. Yazılımın arşivlenmiş sürücü çalışma verilerini tekrar açarak kullanabilmesi, sürücü bağlantısı olmadan önceki çalışma verilerini inceleme imkanı sunar.

‘Veri Analiz Yazılımı’ 6 adet ana menü seçeneğine ve 2 adet durum göstergesine sahiptir.

Durum göstergeleri,

- Veri İletim Durumu
- Aktif Veri

Seçeneklerinden oluşurken, ana menü seçenekleri,

- Bağlantı Ayarları
- PIC – PC Veri Transferi
- Dosyaya Veri Kaydetme
- Dosyadan Veri Yükleme
- Sayısal Analiz
- Grafik Analiz

menüleridir. Yazılım koşturulmaya başlandığında aktif bir veri yüklü olmadığı için sadece ‘Bağlantı Ayarları’, ‘PIC – PC Veri Transferi’ ve ‘Dosyadan Veri Yükleme’ seçenekleri kullanılabilir durumdadır. Diğer menü seçenekleri aktif verilerin yazılıma yüklenmesiyle birlikte açılacaktır.

‘Bağlantı Ayarları’ menü tuşu seçildiğinde ekranda görünen ‘Seri İletişim Kapısı’, ‘Baud Rate’, ‘Parity’, ‘Data Bits’ ve ‘Stop Bits’ veri girişi alanları kullanıma açılacaktır. Bu menü ile mikro denetleyici ile kurulacak RS232 bağlantısının ayarlarının yapılması sağlanır. Mikro denetleyici gömülü yazılımında bir değişiklik yapılmadığı sürece bu seçeneklerden sadece ‘Seri İletişim Kapısı’ bölümünde

değişiklik yapılmalıdır, 'Seri İletişim Kapısı' seçeneği bilgisayarın mikro denetleyici ile kuracağı RS232 bağlantısında kullanacağı iletişim kapısını belirler. Örnekle açıklamak gerekirse 'Com1' seri iletişim kapısı kullanılıyorsa 1, Com 16 seri iletişim kapısı kullanılıyorsa 16 değeri girilmelidir.

'PIC – PC Veri Transferi' menüsü mikro denetleyici hafızasında tutulan çalışma verilerinin yazılıma aktarılmasını sağlar. Bu menü tuşuna basıldığında yazılım mikro denetleyiciden veri almak için bekleme durumuna geçer, bu sırada 'Veri İletim Durumu' göstergesi 'Bağlantı Bekleniyor' uyarısı verirken 'Aktif Veri' göstergesi 'Motor Verisi Bekleniyor' uyarısı verir. Ekranda bu uyarılar görüldüğünde, mikro denetleyici gömülü yazılım ana menüsünden 'PC Bağlantısı' menüsü seçilirse veri aktarımı başlar. Veri transferinin başlamasıyla birlikte 'Veri İletim Durumu' göstergesi 'Veri Transferi Başladı' uyarısı verir. Veri transferinin bitmesi ile birlikte 'Veri İletim Durumu' göstergesi 'Veri Aktarımı Tamamlandı' uyarısı verir. Aktarılan veriler sağlıklıysa 'Aktif Veri' göstergesi 'Güncel Motor Verileri Aktif' uyarısı verirken veri aktarımında ya da mikro denetleyici çalışma esnasında hatalı bir veri kaydı yapmışsa 'Aktif Veri' göstergesi 'Motor Verilerinde Hata Bulunmakta' uyarısı verir. Yazılım hazırlanırken RS232 iletişiminde hata denetimi sadece verilerin mantıksal denetimi üzerine kurulmamış, gelen her bir bayt'lık karakter bilgisi ayrıca geçerlilik denetimine tabi tutulmuştur.

'Dosyaya Veri Kaydetme' menüsü yüklenen motor çalışma verilerini arşivlemek için kullanılır. Bu menü seçildiğinde ekranda bilgisayar sürücü, klasör, dosya yapısını gösteren menüler, kayıt isminin girileceği bir giriş seçeneği, 'Kaydet' ve 'Otomatik Kayıt İsmi Oluştur' adında iki tuş belirir. Önce arşivleme hangi klasörün içine yapılmak isteniyorsa sürücü bölümünden bu klasörün bağlı olduğu sürücü seçilmelidir. Sürücü menüsünün altındaki klasör menüsünde bu sürücüdeki dosyalar belirecektir. Bu menüden kaydın yapılması istenen klasör çift tıklanarak seçilmelidir. Seçim yapıldığında kayıt ismi girişi yapılacak bölgede seçilen sürücü ve klasörün ismi belirecektir. Klasör isminin devamına istenilen bir kayıt ismi verilebilir. Kayıtlar .txt uzantısıyla saklanmaktadır, verilen kayıt isminin sonuna .txt uzantısı yazılmasa da yazılım kayıt sırasında bu uzantıyı otomatik olarak yazar. Kullanıcı kayıt yapmak istediği klasörü seçtikten sonra isterse 'Otomatik Kayıt İsmi Oluştur' tuşuna basarak yazılımın motor denetimi kazanç katsayısı ve tümlev

zamanı katsayısına bağılı olarak bir isim atamasını sağlayabilir. Kaydet tuşu motor çalışma verilerinin belirtilen dosya ismiyle kaydedilmesini sağlar. Kullanıcı kayıt ismi girişini boş bırakırsa ve kaydet tuşuna basarsa hiçbir kayıt yapılmadan ana menüye geri dönölür.

‘Dosyadan Veri Yükleme’ menüsü yapı olarak ‘Dosyaya Veri Kaydetme’ menüsüne oldukça benzer. Bu menüde de önce dosyanın yükleneceğı sürücü seçilir ve aşğıdaki menüde sürücüye ait dosyalar belirir. Klasör menüsünden yüklemenin yapılacağı klasör çift tıklamayla seçildiğinde, bir alttaki menüde klasöre ait dosyalar belirir. Yüklmek istenen dosya seçilip yükle tuşuna basılırsa istenilen dosya yüklenir. Kullanıcı girişı boş bırakılarak yükle tuşuna basılırsa, herhangi bir yükleme yapmadan ana menüye dönölür.

‘Sayısal Analiz’ menüsü oluşan motor hızının hedef hıza göre hata yüzdesini zamana bağılı olarak incelememizi sağlar. Bu menü tuşuna basıldığında denetim katsayıları, denetim tipi bilgileri, motorun durma konumundan itibaren veri kaydının yapıldığı süre boyunca oluşan ortalama motor hızı gibi bilgilerin verildiğı bilgilendirme satırları ve hata yüzdesinin incelendiğı menü ekrana gelir. Menü üç satırdan oluşur. İlk sütun geçen süreyi ikinci sütun veri sırasına göre oluşan motor hızını üçüncü sütunsa yine veri sırasına göre motor hızı ile hedef hız arasındaki yüzdelik farkı bildirir. Ana menü tuşuna basılarak ana menüye dönülebilir.

‘Grafik Analiz’ motor hız denetimi sonuçlarının grafiksel incelemesinin yapıldığı seçenektir. Bu tuşa basıldığında aktif halde olan motor çalışma verileri analiz programı tarafından önceden şablonu hazırlanmış bir Microsoft Excel dosyasına yazdırılır ve çalışma verilerinin oluşturduğu grafik ekrana basılır. Şablon dosya olan ‘GRAFIK.xls’ dosyasının, yazılım çalıştırılmadan önce bilgisayarın ‘c:’ sürücüsü üzerinde bulunduğundan emin olunmalıdır. Ekrana bastırılan grafikte beraber şablon dosyanın ‘MOTOR VERİLERİ’ adında bir alt sayfaya daha sahip olduğu görülecektir. Kullanıcı bu menüye girerek motor denetimi ile ilgili verilere ulaşabilir.

Grafik Excel dosyası olarak kaydedilmek istenirse, Microsoft Excel yazılımında dosya menüsünde farklı kaydet seçeneğı seçilmelidir. Şablonun üzerine kayıt yapılmaması önemle tavsiye edilmektedir. Kayıt yapılması grafik çıktısını

engellemeyecek olsa da analiz programında 'Grafik Analiz' seçeneği seçildiğinde kullanıcının ilk anda motor çalışma verileri grafiğini değil şablon dosyanın 'MOTOR VERİLERİ' sayfasını görmesine neden olabilir. Böyle bir durum oluştuğu takdirde kullanıcı şablon dosya üzerinde görećeđi 'MOTOR HIZ ZAMAN GRAFİĞİ' seçeneğini seçerek grafiği inceleyebilir.

7. SÜRÜCÜNÜN KULLANIMI VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Üretilen ‘Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motor Sürücüsü’nün pratikteki çalışma şeklini, kabiliyetlerini, denetim kapsamında oluşturulan ve oluşan sinyal yapılarını gösterebilmek için örnek bir uygulamanın tanıtılması uygun görülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalarda farklı denetim değıştirmelerinin hız denetimi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Sürücü donanımsal bağlantıları ve veri analiz programının ön hazırlıkları EK5’de tanımlanmıştır. EK5’de belirtilen hazırlıklar tamamlandığında sürücü enerjilendirilebilir. Sürücü yönetimi LCD panel, tuş takımı ve iki adet denetim tuşu ile sağlanırken, tüm sinyal ölçümleri devre üzerindeki test noktaları üzerinden alınır.

Devrenin enerjilendirilmesi ile beraber kullanıcı LCD panel ve tuş takımını kullanarak sürücü komut girişlerini sağlar.

Sürücü şekil 7.1’de görüldüğü gibi ana menü konumunda çalışmasına başlar. Kullanıcı LCD panel üzerinde ‘*’ ve ‘#’ tuşlarına basarak ana menü elemanlarını görebilir.



Şekil 7.1 Sürücü Devrenin Enerjilendirilmesiyle Beraber Likit Kristal Ekranda Beliren Kullanıcı Ana Menüsü

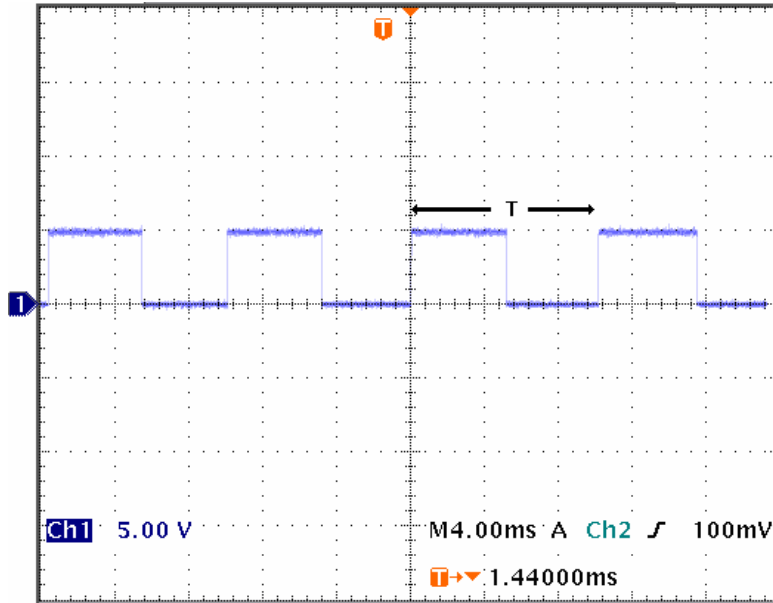
Ana menüde bulunan alt menü isminin solunda kalan rakam ilgili alt menünün kodunu belirtir. Kullanıcı ana menü içindeyken herhangi bir konumda alt menü kodunu tuş takımı üzerinden tuşlarsa, ilgili alt menü ekrana yansır.

Ana menü üzerindeyken ‘3’ tuşuna basılarak sürücü değıştirmeleri hakkında bilgi edinilebilir. Bu menüde ‘#’ tuşu ana menüye dönüşü sağlar. Ana menüde ‘6’

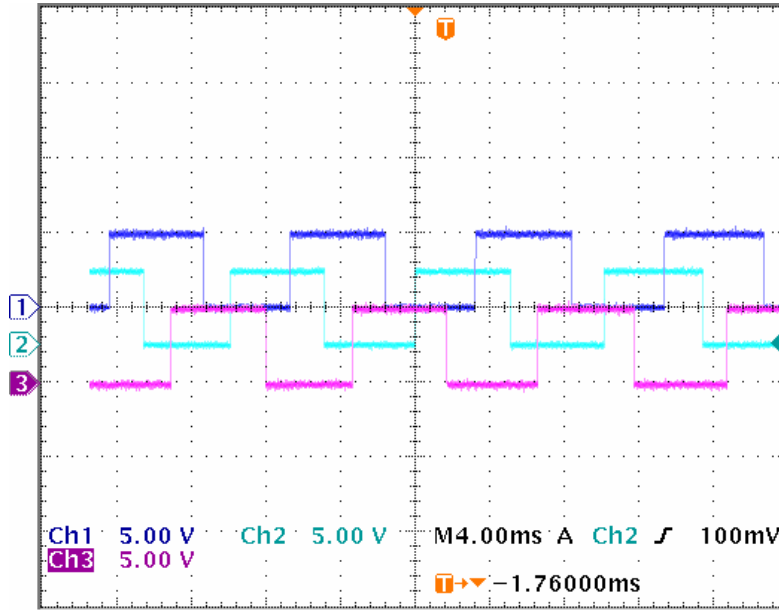
tuşuna basılması motorun dönüş yönünü belirlediğimiz alt menüye girmemizi sağlar. Alt menüde '*' tuşuna basarak saat yönünde dönüşü temsil eden 'SY' seçeneğini seçelim. Ana menüde '1' tuşuna basarak 'Hedef Hız' alt menüsüne girelim ve hedef hızı 1200 RPM olarak belirleyelim. Yine ana menüye döndüğümüzde '2' tuşuna basarak 'PID Sabitleri' alt menüsüne girelim, K genel kazanç sabitini için 0.700 değerini, Ti tümlensel zaman sabiti için 45 ms değerini, D türevsel zaman sabiti için 2,5 ms değerini belirleyelim.

Ana menüye döndüğümüzde miline 90 gr ağırlığındaki 3 numaralı yükü taktığımız motorumuzun hız denetimini sağlamak için gerekli tüm değiştirge ayarlarını tamamlamış oluruz. Motoru çalıştırmak ve motor denetimini aktif hale getirmek için ana menüdeyken '5' tuşuna basmamız yeterli olur. Tuşa basmamızla beraber likit kristal ekranda 'Denetim Aktif' yazısı çıkar ve motor denetimi aktif hale gelir.

Şekil 7.2 Hall1 algılayıcısına ait sinyal çıkışını gösterir. 3 Hall algılayıcısı çıkışının gerçek zamanlı çıkışı Şekil 7.3'de gösterilmiştir.



Şekil 7.2 Hall Algılayıcısı 1 Sinyal Çıkışı



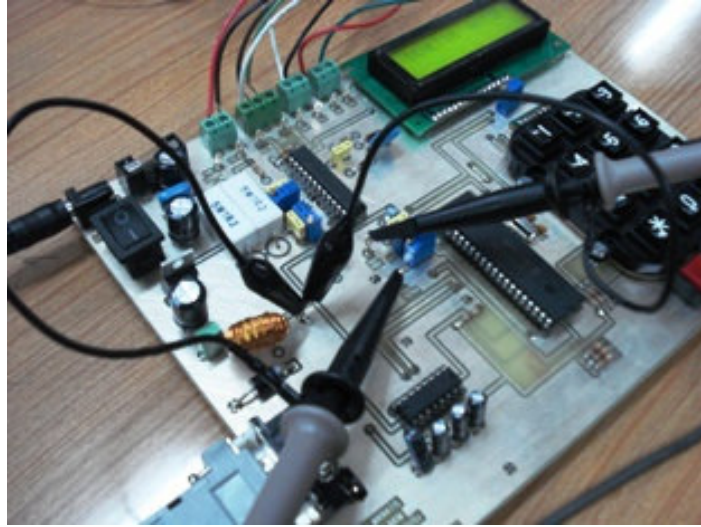
Şekil 7.3 Motor Hall Algılayıcıları Sinyal Çıkışları

Şekil 7.2’de gözlemlenen Hall 1 algılayıcısına ait T periyodu 10.08 ms olarak ölçülmüştür. 0.08 ms’lik çözünürlüğe sahip osiloskop ölçeğinde gözlemlenmiş olan Hall algılayıcısı sinyal çıkışı Şekil 7.2’den yola çıkılarak ± 10 RPM’lik bir hata payı ile hesaplanabilir. 10.08 ms uzunluğundaki Hall periyodu 1190 RPM’lik anlık motor hızını işaret etmektedir.

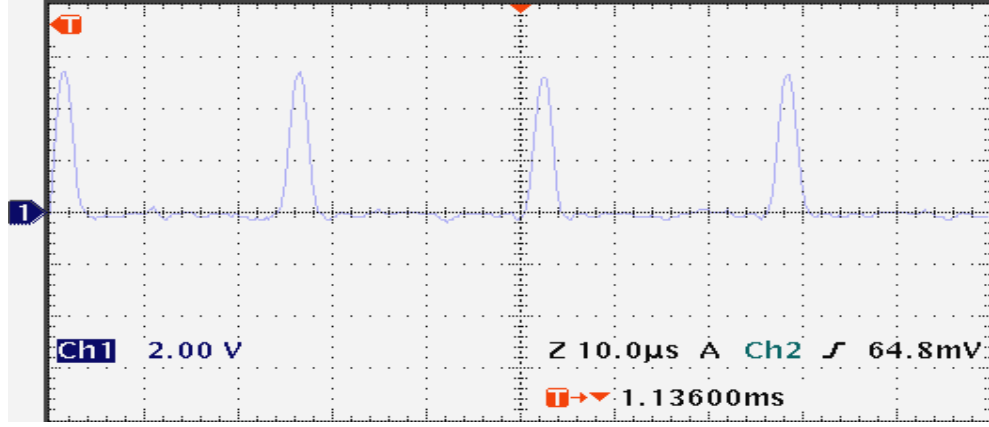
Şekil 7.3’de elde edilen sinyal çıkışları, altı adım anahtarlama tekniğinin başarı ile uygulandığını kanıtlaması bakımından önemlidir. Hall algılayıcılarının durum değişimlerinin rahat gözlemlenebilmesi için Hall 2 ve Hall 3 çıkışları genlik ekseninde aşağıya doğru kaydırılmış olan gerçek zamanlı osiloskop çıktısında üç Hall algılayıcısı çıkış sinyalinin topluca oluşturduğu 6 farklı kombinasyon gözlemlenmektedir. Sinyallerin bu 6 kombinasyon içinde yüksek veya alçak sinyal durumunda olma sıraları gözlenirse Şekil 4.5’de belirtilen örnek Hall algılayıcısı çıkış sinyalleri sırasını takip ettiği fark edilir. Bu sonuçlar sürücünün Hall algılayıcısı sinyallerini başarı ile takip ettiğini kanıtlar. Gerçekte fırçasız motor anlatıldığı üzere özel bir motor olmasından dolayı konum sinyalleri doğru alınmadıkça ve faz enerjilendirilmeleri uygun sırada gerçekleşmedikçe motor dönecinde bir dönme hareketi sağlanamaz. Faz enerjilendirilmelerinin uygun bir sırada gerçekleşmesi bir zorunluluktur.

Mikro denetleyicinin motorun hız denetimini sağlamak için gömülü yazılımındaki sayısal oransal-tümlevsel-türevsel denetim algoritması ile oluşturduğu değişken görev çevrimi oranlı darbe genişliği modülasyonlu denetim çıkış sinyali ve akım denetimli gerilim kaynaklı çevirgece uygulanan akım denetimi referans gerilimi sırası ile TN10 ve TN11 test noktaları kullanılarak gözlemlenebilir. Osiloskobun referans uçları TN9 test noktasına, gözlem uçlarınıysa mikro denetleyici darbe genişliği modülatörü çıkışını gözlemek için TN10 – PWM test noktasına, akım denetimli gerilim kaynaklı çevirgeç akım denetimi referans gerilimi çıkışını gözlemek için TN11 – Vref test noktasına bağlanır. Bağlantı biçimi Şekil 7.4’de gösterilmiştir. Gözlemlenen PWM çıkış sinyali Şekil 7.5’de , akım denetimli gerilim kaynaklı çevirgeç akım denetimi referans gerilimi sinyali ise Şekil 7.6’da gösterilmiştir.

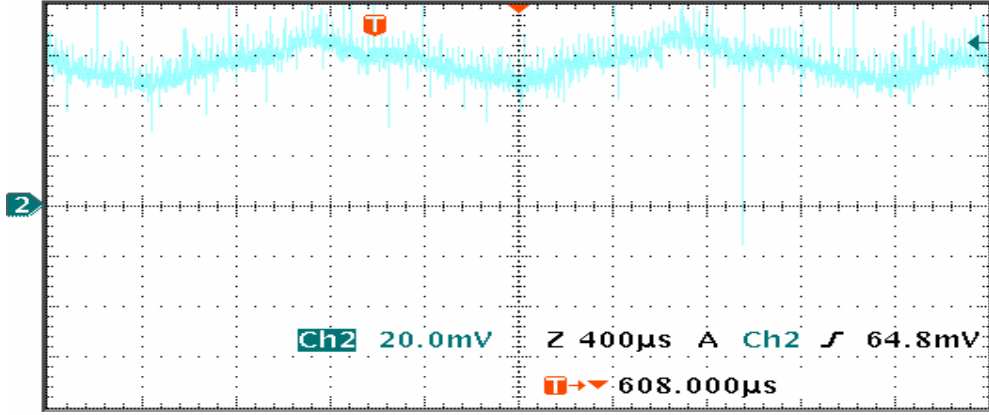
Şekil 7.5’deki sabit frekanslı darbe genişliği modülasyonu sinyallerinin periyotları incelenirse 39 kHz’lik sinyal frekansı gözlemlenebilir. 39 KHz’lik sinyal



Şekil 7.4 TN10 ve TN11 Test Noktalarından Ölçüm Alma Biçimi



Şekil 7.5 Mikro denetleyici Darbe Genişliği Modülatörü Sinyal Çıkışı



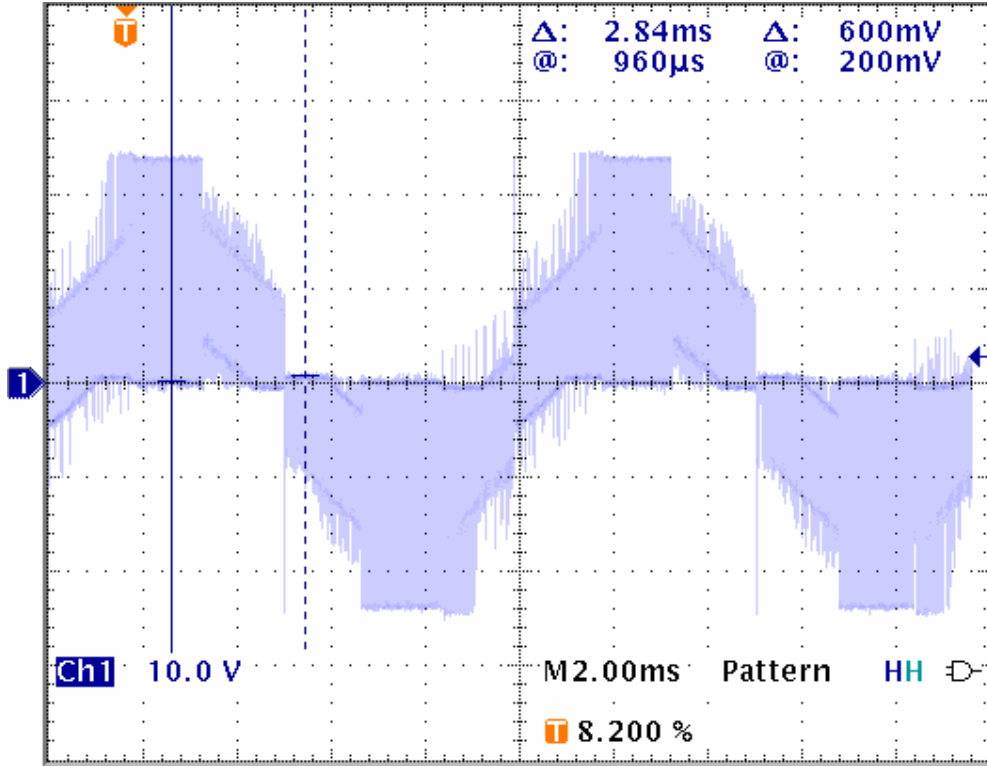
Şekil 7.6 Akım Denemli Gerilim Kaynaklı Çevirgeç Akım Denetim Referans Gerilim Sinyali

mikro denetleyicinin en yüksek çalışma salıngaç frekansı olan 40 MHz'de 10 bit çözünürlükte darbe genişliği modülasyonu çıkış sinyali olarak üretebileceği en büyük frekans değeridir. Darbe genişliği modülasyonu sinyali incelendiğinde sinyalin düşük sayılabilecek bir görev çevrimi oranına sahip olduğunu gözlemleriz. Bu durum doğrudan sürücü için donanımsal olarak belirlediğimiz maksimum çalışma akımı değeri ile ilgilidir. Çalışma akımının maksimum değeri düşürüldükçe mikro denetleyicinin darbe genişliği modülasyonu ile oluşturduğu denetim sinyali çözünürlüğü artar.

Şekil 7.6 , Şekil 7.5'deki sinyalin gerilim bölücüsü ve alçak geçirgen filtreden geçirilmiş halidir. Bölüm 5.2.2'de bu sinyalin faz akımlarının büyüklüğüne doğrudan etki ettiği anlatılmıştı. Şekil 7.6 incelendiğinde belirli bir ortalama değer

etrafında salınım yapan bir sinyal yapısı göze çarpmaktadır. Sinyalin ortalama değeri, motor fazlarından geçen ortalama akım değerini belirlemektedir.

Çalışmalar sırasında fazlar arası oluşan gerilim şekilleri TN4,TN5 ve TN6 test noktaları kullanılarak gözlemlenebilir. Şekil 7.7 bu çalışma için A ve B fazları arasında oluşan gerilim yapısını göstermektedir.



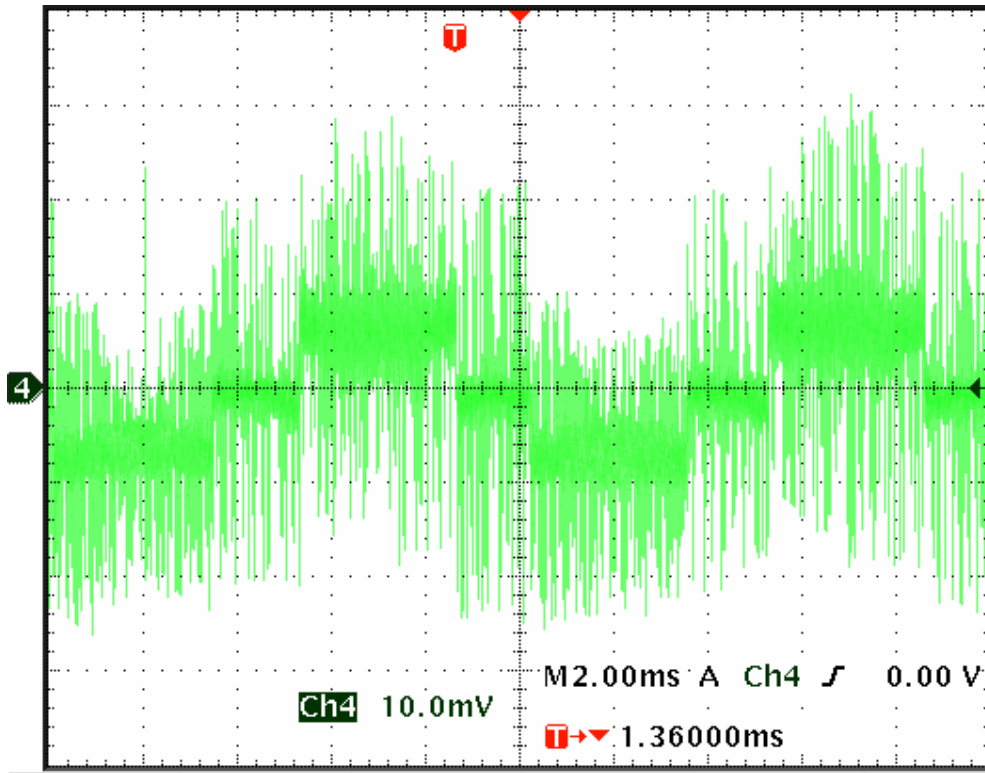
Şekil 7.7 A ve B Fazları Arasında Oluşan Gerilim Yapısı

Motor faz akım şekillerini osiloskopta gözlemlemek için kablo üzerinden geçen akım değerini gerilim değerine çevirecek özel bir ölçüm cihazı kullanılır. İletken tel üzerinden belli bir yönde geçen akımın, akım yönüne göre değişen bir manyetik alan oluşturacağı prensibinden faydalanarak düşük dirençli sürücü ve motor bağlantısı arasına girmeye gerek kalmadan ölçüm yapabilen bu ölçüm cihazları, ölçümü yapılacak faz kablosunun etrafına geçirilerek faz akım şekillerini osiloskoptan takip etmemizi sağlar. Şekil 7.8 akım ölçümünü yapabilmemiz için gerekli bağlantıyı göstermektedir.



Şekil 7.8 Motor Faz A Akımını Ölçmek İçin Yapılan Bağlantı

Şekil 7.8'de motor – sürücü faz A bağlantı kablosunu saracak şekilde konumlandırılmış ölçüm cihazını görmekteyiz. Bu tarz ölçüm cihazları, ölçüme başlanmadan önce kayma hatalarını engelleyebilmek için sıfırlama işleminden geçmelidir. 1200 RPM'de hız denetimini sağlamaya çalıştığımız motorun faz A akım şekli Şekil 7.9'da görülmektedir. Bu ölçüm yapılırken ölçüm cihazı çözünürlüğü olarak 100mV/A değeri kullanılmıştır.



Şekil 7.9 Motor Faz A Akımı Sinyal Şekli

Şekil 7.9'da görülen motor faz akımının zamana bağlı grafiği sürücü devrenin çalışma esasını özetler. Şekilde sinyalin yoğunlaştığı koyu bölgelere dikkat edilirse faz akımının Şekil 4.5'de belirtilen ideal adım atlamalı dalga biçimini sağlamaya çalıştığı gözlemlenir. Bununla beraber akım denetimli gerilim kaynaklı çevirgecin 24 V ana DA hattına dalga modülasyonu tekniği ile uyguladığı kırpmanın akım üzerindeki etkileri, sinyal grafiğinde koyu bölgelerin kısa aralıklarla altına ve üstüne çıkan atma şeklindeki sinyal yapısı ile görülebilir. Oluşan yaklaşık 10 ms'lik dalga periyodu bir elektriksel döngüye karşılık geldiğinden yaklaşık 1200 RPM'lik anlık dönüş hızını ifade eder. 20-30 mV gibi küçük bir gerilim değerleriyle yapılan bir ölçümde elbette gürültü etkisi elbette gözden kaçırılmamalıdır. Şekil 7.9'de görülen ölçüm sonuçları, bir elektriksel çevrim boyunca adım yapıları akım şeklini göstererek, altı adım sürüş tekniğinin sinüsel zıt EMK'lı fırçasız DA motor üzerinde başarı ile uygulandığını ve motora dönme hareketini kazandırabildiğini kanıtlar.

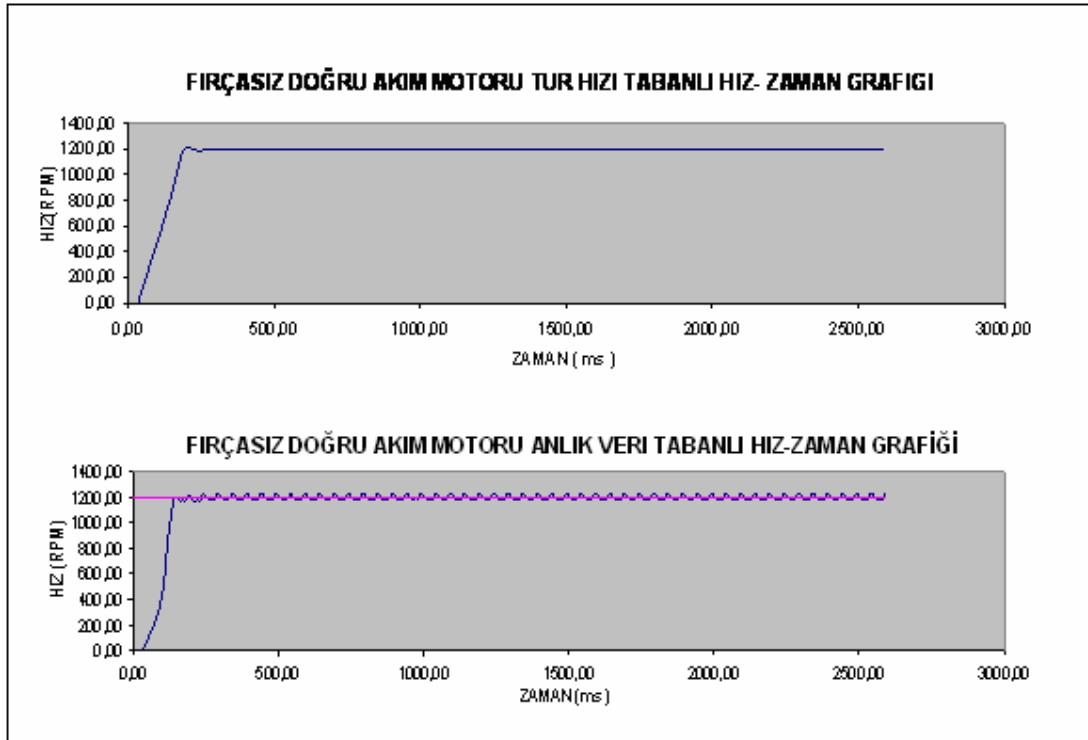
Sürücü ve motor denetimi ile ilgili sinyal ölçümleri alındıktan sonra kullanıcı denetim sürücü üzerindeki 'Denetim İptal' tuşunu kullanarak denetimi sonlandırabilir. Likit kristal ekran üzerinde 'Denetim Durduruldu' uyarısını ana menü ekranı takip eder. Kullanıcı ana menüde iken '7' tuşuna basarak hız denetimi için kaydedilmiş 50 motor tam mekanik dönüşüne ait 250 elektriksel çevrim için hız ve mikro denetleyici oransal-tümlevsel-türevsel denetim çıkış sinyali olan görev çevrimi değerlerini 'Sonuçlar' menüsünden takip edebilir. Bu menü içindeyken her herhangi bir tuşa basılması bir sonraki verinin ekranda görülmesini sağlar, '*' tuşu ise son kaydedilen verilerin ekrana iletilmesini ve çabuk bir şekilde ana menüye dönülmesini sağlar. Bu menü aracılığı ile belirlenen PID denetim katsayılarının denetleyiciyi sınır noktalarında çalıştırıp çalıştırmadığı ve hız denetimi başarısı takip edilebilir. Hız denetimi başarısı görsel olarak takip edilmek istenirse bilgisayarda koşturulan 'Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru Hız Denetimi Veri Analiz Yazılımı' kullanılmalıdır.

'Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru Hız Denetimi Veri Analiz Yazılımı' ana menüsünde 'PIC-PC Veri Transferi' seçeneği seçildiğinde yazılım mikro denetleyiciden veri almak için bekleme konumuna geçer bu durumda sürücü gömülü yazılımı ana menüsünde '4' tuşuna basılırsa, kaydedilen motor çalışma

verileri bilgisayar ortamına aktarılır. Bu yolla 1200 RPM hedef hız denetimini sağlamak için yukarıda yaptığımız çalışma sonuçlarını bilgisayara aktarabiliriz.

Bilgisayarda kullandığımız yazılımın ana menüsünde 'Sayısal Analiz' seçeneğini seçersek, yüklediğimiz çalışma verilerine ait PID katsayılarını durma noktasından itibaren veri kaydı boyunca oluşan ortalama hızı, denetim tipini ekrana gelen bilgi kutularından takip edebiliriz. Bu seçeneği seçtiğimizde ekranda yeni bir bilgi kutusu oluşur buradan geçen zamana göre oluşan motor hızını ve motor hızının hedef hıza göre yüzdelik hatasını takip edebiliriz.

Ana menüdeki 'Grafik Analiz' seçeneği denetim sonucu ortaya çıkan hız-zaman grafiğini görmemizi sağlar. Şekil 7.10 90 gr ağırlığındaki 3 Numaralı yükün 1200 RPM hedef hız değerinde dönmesini sağlamak için yaptığımız çalışmanın hız – zaman grafiğini göstermektedir. Bu çalışmada genel kazanç sabiti K 0.700, tümlevsel zaman katsayısı 75 ms ve türevsel kazanç katsayısı 2,5 ms olarak seçilmiştir.



Şekil 7.10 1200 RPM Hedef Hız Denetimi İçin Ortaya Çıkan Hız –Zaman Grafikleri

Şekil 7.10'da gösterilen yaptığımız hız denetimi çalışmasının grafik analizi kullanıcıya iki grafik sunar. Üstte bulunan ilk grafik motorun bir tam mekanik turu hangi zaman aralıklarıyla, hangi ortalama hız ile döndüğünü 50 tam mekanik tur için gösterirken, altta bulunan daha yüksek veri çözünürlüğüne sahip ikinci grafik her elektriksel çevrimde oluşan hız anlık hız ölçümlerinin zamana bağlı değişimini gösterir.

Yaptığımız çalışmaya ait sonuçlar, motorun ilk tur dönüşünü tamamlamadan 140 ms içinde hız hedefine ulaştığını ve 5. tur dönüşünün başladığı 301. ms den itibaren kayıtların tutulduğu devam eden 46 tam tur boyunca motorun ortalama mekanik tur hızının 1200 ± 1 RPM hız aralığında denetlenebildiğini ortaya koymuştur.

Motor hızı örnek bazında (bir elektriksel çevrim) incelendiğinde, bir tam mekanik turu oluşturan 5 örneklik zaman içinde motor hızının hedef değerin %2.5 ile %3 arası üzerine çıkabildiği, bunu takiben mikro denetleyicinin hemen bir sonraki elektriksel turda motor hızını hedef hıza çekebilmek için yaptığı müdahale ile hedef değerin altına çektiği gözlemlenmiştir. Motor bir tam mekaniksel turu tamamlarken geçen 5 elektriksel döngülük süre içinde hafif bir salınım yapmakla beraber ortalama mekanik tur hızı hedef hızı takip etmektedir. Mekanik tur içinde hafif salınımsal bir yapı gözlemlenebilmesi, bir mekanik tur içinde alınabilen 5 adetle sınırlı gerçek zaman hız verisi ile mikro denetleyici türevsel-tümlevsel-türevsel denetim algoritmasının, motor hızına sadece 5 kez müdahale edebilmesinin doğal bir sonucudur. Yapılan müdahalelerde, mikro denetleyici darbe genişliği modülatörünün oluşturduğu referans akım gerilim sinyalinin çözünürlüğü de bu salınıma etki etmektedir. Düşük çözünürlükte uygulanacak modülasyon küçük modülasyon adımı değişimlerinde büyük hız atlamalarına neden olacaktır.

EK6, yapılan örnek çalışma için motor hızının 50. örneğe kadar oluşan denetim verilerini sumaktadır. 50. örnekten sonra motor mekanik tur hızı hedef hızın ± 1 RPM aralığında seyrine devam ettiği için sonraki veriler sunulmasına gerek görülmemiştir. Kullanıcı, motorun hız-zaman grafiğini takip edebildiği Excel çalışma sayfasının sol alt köşesinde bulunan 'Motor Verileri' sekmesini seçerek, EK6'da sadece 50 elemanına yer verilen denetim verileri tablosunun, tüm denetim verilerini içeren ve 250 elemandan oluşan değerlerine ulaşabilir. Her yeni çalışma

verisinin veri analiz yazılımına yüklenmesi , yeni grafiklerin oluşmasını sağlayacağı gibi bu tablonun da yenilenmesini sağlar.

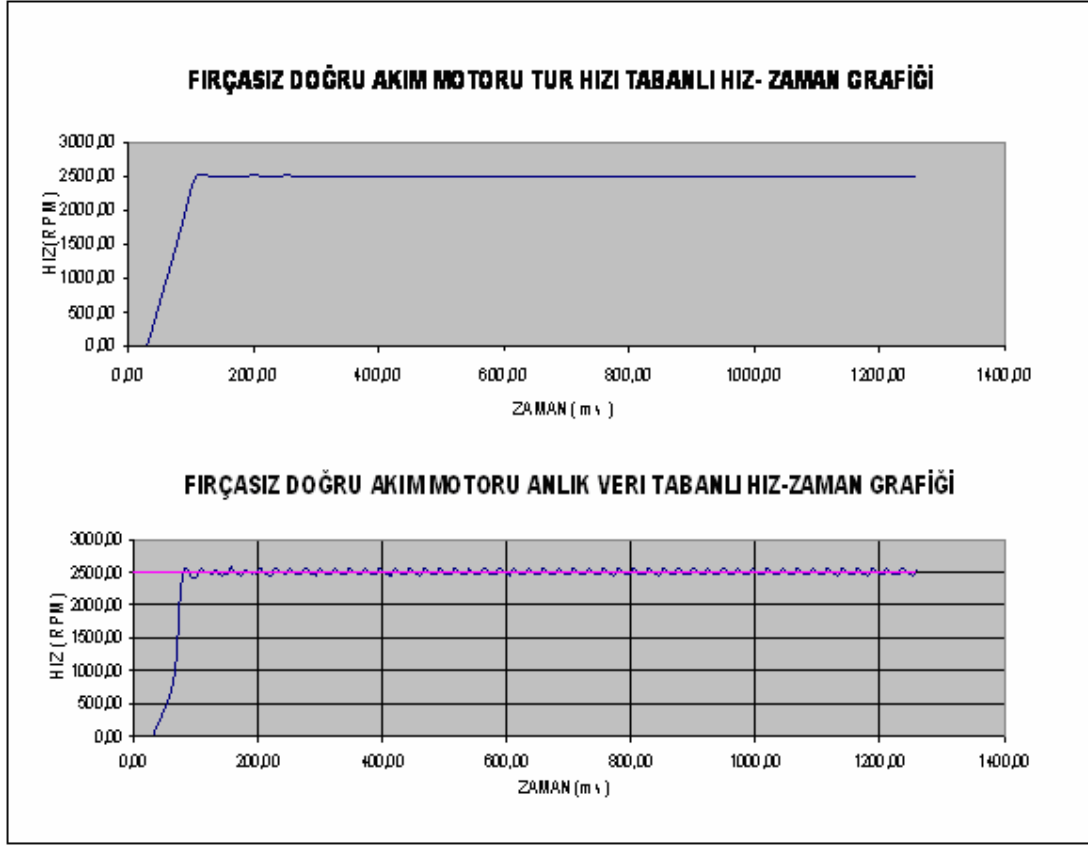
Grafik sonuçlarının incelenmesinden sonra oluşturulan excel tablosu sağ üst köşedeki çarpı işaretine basılarak kapatılır. Bu aşamada Excel programı 'GRAFIK.xls' tablosunun üzerine kayıt yapılmak istenip istenmeyeceğini soracaktır, şablon dosyanın zarar görmemesi açısından 'HAYIR' seçeneği işaretlenmelidir. Motor verileri ile oluşturulan excel dosyasının mutlaka kaydedilmesi gerekiyorsa farklı bir isim altında kaydedilmesi tavsiye edilir. Bununla beraber 'Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru Hız Denetimi Veri Analiz Yazılımı' kullanıcıya motor hız denetimi çalışma verilerini arşivleme imkanı sunduğu için bu şekilde bir kayıt yapılmasına gerek yoktur. Bölüm 6.2'de detaylı olarak anlatılan veri arşivleme ve arşivlenen verilerin yazılıma yüklenmesi seçenekleri kullanıcıya kullanım açısından oldukça büyük kolaylıklar sağlayacaktır.

'Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru Hız Denetimi Veri Analiz Yazılımı'nın kullanıcıya sağladığı en büyük fayda, motor hız denetimi sonuçlarının tamamının bir arada hız – zaman grafiği olarak sunmasıdır. Kullanıcı çalışma sonuçlarının grafik çıktılarına bakarak ,deneme yanılma yoluyla belli bir yük ve hedef hız değeri için en iyi zaman tepkisini ve en az tepe değerini oluşturacak sürücü devre oransal-tümlevsel-türevsel denetim sabitlerini ayarlayabilecektir.

Yukarıda yapılan örnek bir uygulama ile sürücü devre sinyal yapıları ve hız denetimi sonuçları incelenmiş ve sürücü devrenin hem altı adım sürüş tekniğini hem de uygun sürücü değıştirge ayarları sağlandığında hız denetimini başarıyla uygulayabildiğini göstermektedir. İlerleyen kısımda yük setinde yer alan diğer yüklerin kullandığı ve motorun yüksüz çalıştığı durumlarda ,farklı hız ve oransal-tümlevsel-türevsel denetim sabitleri koşulları altında oluşan denetim sonuçları incelenmiştir.

Şekil 7.11 Motorun yüksüz çalışma durumunda, 2500 RPM hedef hız için denetim sonuçlarını göstermektedir. En iyi denetim koşullarının sağlanabilmesi için farklı PID denetim sabitleri ile yapılan deneylerde genel kazanç katsayısı K, 0.7'ye, tümlevsel zaman T_i , 75 ms'ye ayarlanmıştır. Türevsel zaman katsayısı D ise 0 seçilmiştir. Türevsel zaman katsayısının 0 değerine ayarlanması oransal-

tümlevsel-türevsel denetim algoritmasının sadece oransal-tümlevsel denetleyici olarak çalışması için yeterlidir.

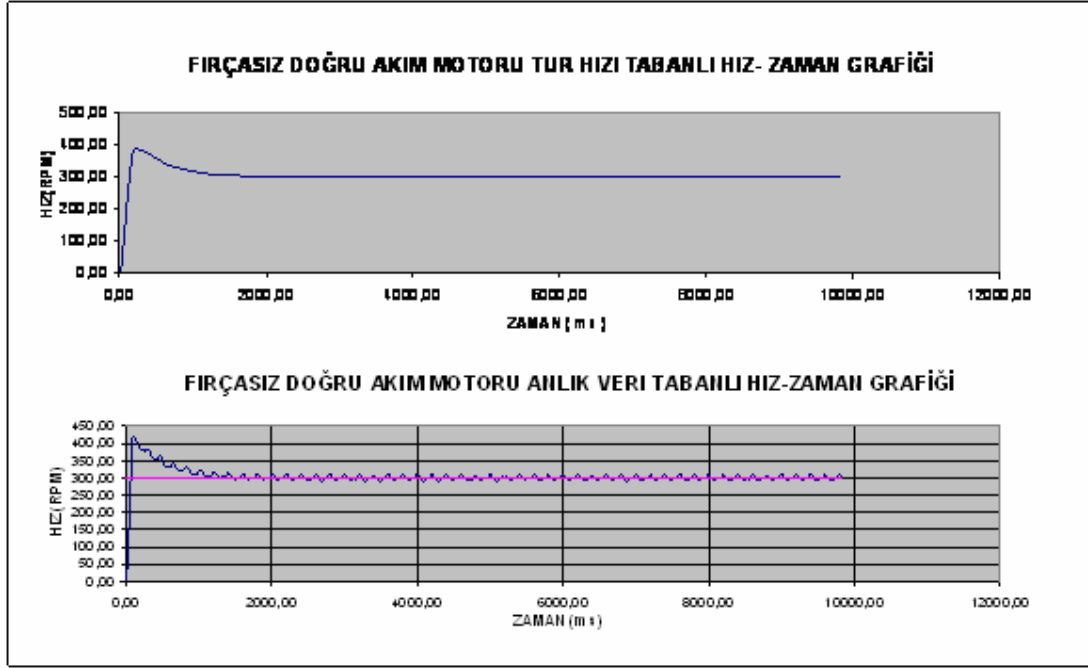


Şekil 7.11 Yüksüz Durumda, Motor Hızının 2500 RPM Hedef Hız Değerine Ulaşmasını Sağlamak İçin Yapılan Çalışmaya Ait Hız-Zaman Grafiği

Yüksüz durum için yapılan çalışma, sürücü denetiminin sağlandığı en yüksek değer olan 2500 RPM’de motor hızının denetlenebildiğini ortaya koymuştur. Ortalama mekanik tur hız değerlerinin, hedef değer olan 2500 RPM’in ± 3 RPM aralığına yerleştiği gözlemlenmiştir. Mekanik tur içindeki salınsal hız değerlerin hedef hıza göre +70 RPM ve – 60 RPM hıza varan atmalar yapabildiği ancak bu değerlerin ölçüldüğü tam mekanik dönüş hızlarının ± 3 RPM aralığının dışına çıkmadığı görülmüştür.

Şekil 7.12 Motorun 50 g’lık 1 numaralı silindirik yük takılı durumunda iken, 300 RPM hedef hız için denetim sonuçlarını göstermektedir. Bu çalışmada genel kazanç sabiti K 0.180, tümlevsel zaman katsayısı 405 ms ve türevsel kazanç

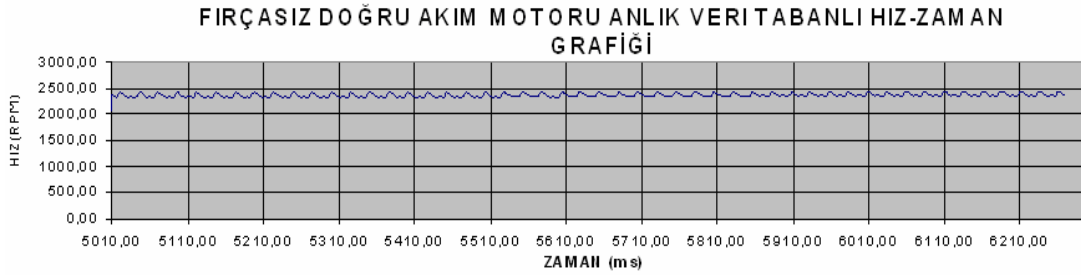
katsayısı 10.80 ms olarak seçilmiştir. Özel olarak seçilmiş bu çalışma, sürücü kullanımı ve donanımsal ayarların etkilerini ortaya koyması bakımından önemlidir.



Şekil 7.12 Motorun 1 Numaralı yük (silindirik ,50 g) Takılı Durumunda İken, 300 RPM Hedef Hız Değerine Ulaşmasını Sağlamak İçin Yapılan Çalışmaya Ait Hız-Zaman Grafiği

Şekil 7.12 sürücünün, motortun mekaniksel tur hızlarını 1889 ms içinde hedef hız olan 300 RPM'e göre +2.5 RPM , - 0.5 RPM'lik bir banda çekerek hız denetimini sağlayabildiği görünse de dikkat çekici nokta hız değerinin yaptığı 119 RPM'lik tepe noktasıdır. En iyi değer olarak elde edilebilen bu tepe noktası değerinin sebebi hem donanımsal hem de yazılımsal sürücü yapısından kaynaklanmaktadır. Sürücünün donanımsal ayarları, motorun nominal faz akımı değeri olan 1 A faz akımını sağlayabilmek üzere ayarlanmıştır. Yük setinde kullanılan yükler motorun bu değerde bir faz akımına ihtiyaç duymasını gerektirmese de ilerde oluşabilecek yük ihtiyaçları düşünülerek motorun en yüksek verimlilikle kullanılabilmesi için bu ayarlar kullanılmıştır. Eş. 5.2 ve Şekil 5.13 bize devrede en yüksek faz akım değerini nasıl ayarladığımızı anlatmaktaydı. Kullanıcı VR3 ve VR4 çok turlu trimpotlarının ayarlarını değiştirerek en yüksek faz akımını istediği şekilde ayarlayabilir. Mikro denetleyici gömülü yazılımı, oluşturduğu darbe genişliği modülasyonu sinyalinin görev çevrimi oranını belirleyerek motora giden faz

akımını denetler. Yazılım motora takılı yükü bilemeyeceğinden motor kalkışını sağlayabilmek için ayarlanan en büyük motor faz akımının yaklaşık 1/10'u kadar bir akımın motor fazlarından geçmesine izin vererek motor kalkışını sağlar. Mikro denetleyici 1024 adımlı darbe genişliği modülasyonu kullanır ve en büyük motor faz akımının yaklaşık 1/10'u kadar bir akımın motor fazlarından geçmesine izin verebilmek için 100/1024 görev çevrimi oranlı bir PWM referans akım gerilim sinyali üretir. Motordan ikinci konum sinyalinin gelmesiyle ölçülen hız hatası birlikte PID denetleyicisi devreye girer ancak bilindiği üzere PID denetim algoritmasının tam olarak uygulanabilmesi için ardaşık üç hız verisine ihtiyaç vardır ve bu da alınan 4. konum sinyali ile gerçekleştirilebilir. Anlaşılacağı üzere motorun 4. elektriksel döngüsü başlayıncaya kadar hız denetimi tam olarak uygulanamamaktadır. 100/1024 görev çevrimi oranlı referans sinyali ile oluşan faz akımı değeri, motorun hedef hızda motoru döndürebilmek için ihtiyacı olan ortalama faz akımı değerinden yüksekse, bu durum motorda ani hız yükselmesine neden olur ve yukarıda belirtildiği gibi 4. elektriksel turdan önce tam olarak denetim algoritması tarafından denetlenemez. Şekil 7.13 motor miline yine 1 numaralı yük bağlı iken kalkış için kullanılan 100/1024 oranlı darbe genişliği modülasyonu sinyalinin sürekli olarak motora uygulandığında oluşan motor hız-zaman grafiğini gösterir. Görüldüğü gibi kalkış için uygulanan faz akımı motorun yükü hedef hızda döndürmesi için gereken ortalama faz akımından daha yüksektir.



Şekil 7.13 Motorun 1 Numaralı Yük (silindirik ,50 g) Takılı Durumunda İken, 100/1024 Görev Çevrimi Oranlı Sabit PWM Mikro denetleyici Referans Sinyali İle Sabit Akım Denetimi Sağlanması Durumunda Ortaya Çıkan Motor Hız-Zaman Grafiği

Çizelge 7.1, Şekil 7.12'de hız zaman grafiği sunulan çalışmaya ait ilk 10 hız verisini göstermektedir.

Çizelge 7.1 Motorun 1 numaralı yük (silindirik ,50 g) takılı durumunda iken, 300 RPM Hedef Hız Değerine Ulaşmasını Sağlamak İçin Yapılan Çalışmaya Ait ilk 10 Örneklik Hız-Zaman Verisi

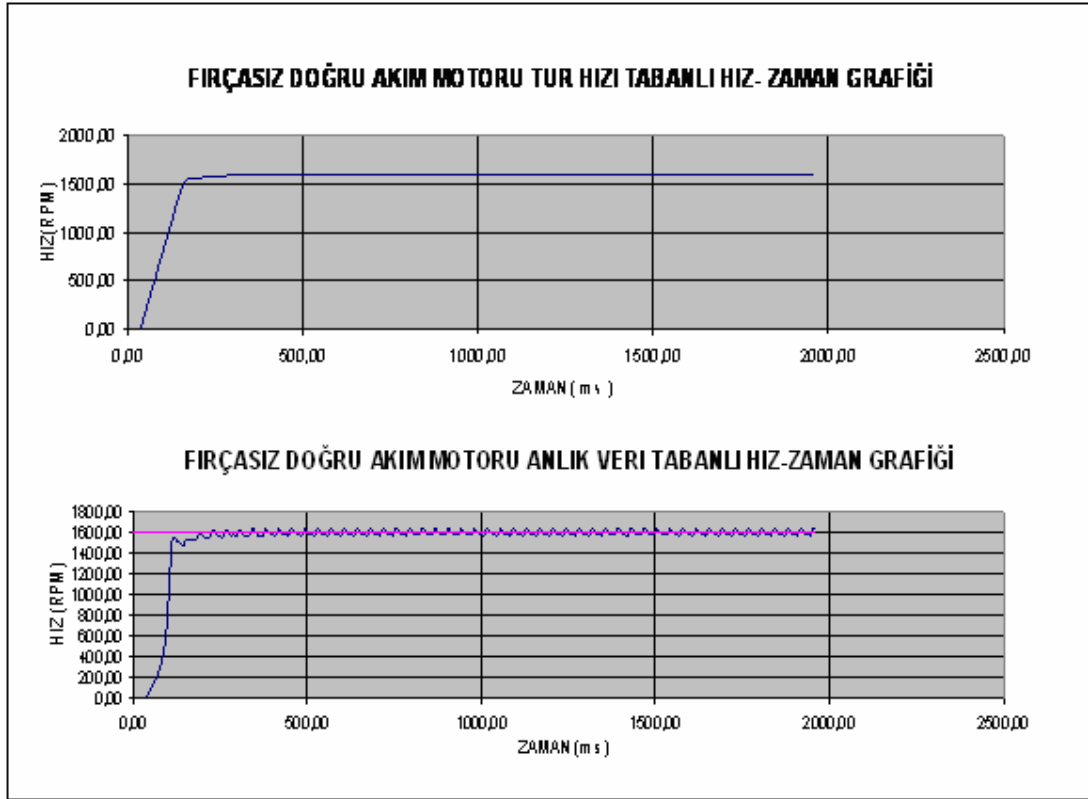
FİRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU VERİ TABLOSU							
HEDEF HIZ	ORNEK NO	ANLIK ZAMAN	GEÇEN ZAMAN	ANLIK HIZ	TUR	TUR ORT. HIZ	TURGeçen Zaman
300,00	Belirsiz	16,80	16,80	0,00	Belirsiz	0,00	16,80
300,00	1	46,41	63,22	258,54	1	378,26	180,90
300,00	2	28,64	91,86	418,99			
300,00	3	28,77	120,63	417,13			
300,00	4	29,56	150,19	405,91			
300,00	5	30,71	180,90	390,75			
300,00	6	31,38	212,28	382,38	2	380,23	338,72
300,00	7	31,32	243,60	383,20			
300,00	8	31,82	275,42	377,11			
300,00	9	31,09	306,51	385,96			
300,00	10	32,22	338,72	372,49			

Görüldüğü gibi motorun 3. elektriksel döngüsünde motor hızı 418 RPM'e çıkmıştır. Denetim algoritmasının tam olarak çalışmasıyla birlikte motor hızı hedef hıza doğru çekilmeye başlanmış ve 11. mekanik turun başladığı 1889 ms'de mekanik dönüş hızları tam olarak hedef hızda denetim altına alınmıştır.

Sürücünün hem 1A motor faz akımı imkanı sunması hem de 300 RPM gibi düşük bir hızda hafif bir yükü büyük bir tepe noktası oluşturmadan denetlemesi imkansızdır. Sürücünün kullanıcıya yazılımsal değiştirgeleri olduğu kadar donanımsal bazı değiştirgeleri de değiştirme imkanı tanınmasının amaçlarından biri de kullanıcının sürücüyü yapmak istediği uygulamaya göre şekillendirmesine izin vermektir. Kullanıcı sürücüyü yukarıda yaptığımız çalışma gibi düşük hızlarda da çalışabilen hafif bir yük ile kullanmak istiyorsa, 1A'lık motor faz akımı uygulama için oldukça yüksek bir değer olacağından sadece VR3 ve VR4 çok turlu trimpot direnç oranını ve yazılımsal denetim değiştirgelerini ayarlayarak motor hızını tepe noktası yapmayan ama hızlı tepki veren bir yapıya kavuşturabilir.

Şekil 7.14 ise Motorun 70 g'lık 2 numaralı silindirik yük takılı durumunda iken, 1600 RPM hedef hız için denetim sonuçlarını göstermektedir. Bu çalışmada genel

kazanç sabiti K 1.500, tümlevsel zaman katsayısı 82 ms ve türevsel kazanç katsayısı 0.25 ms olarak seçilmiştir.



Şekil 7.14 Motorun 2 Numaralı Yük (silindirik ,70 g) Takılı Durumunda İken, 1600 RPM Hedef Hız Değerine Ulaşmasını Sağlamak İçin Yapılan Çalışmaya Ait Hız-Zaman Grafiği

2 Numaralı yük ile yapılan çalışmada motor mekanik dönüş hızı tepe noktası yapmadan 4. mekanik tur ile beraber hedef hıza yakın bir sehir izlemeye başlamış ve 356 ms içinde 8. mekanik turunu atarken 1600 RPM'lik hedef hıza göre ± 2 RPM'lik bir bant içine girmiştir. Çalışma verileri denetimin sağlandığı bant içinde her mekanik tur içindeki elektriksel çevrimler sırasında oluşan salınımsal yapılarda ölçülen en büyük değerinin 1643 RPM, en küçük değerine 1573 RPM olduğunu göstermektedir.

Dikkat edilirse Şekil 7.14'de gösterilen çalışma daha ağır bir yük ve daha yüksek bir hedef hız için yapılırsa da Şekil 7.12'de gösterilen çalışmada hedef hız değerine ulaşılması çok daha uzun bir süre almıştır. Bilindiği gibi oransal-tümlevsel-türevsel

denetimde genel kazanç katsayısı değerinin artması, tümlev zamanınınınsa aşağı çekilmesi denetim hızını arttır bu gerçekte beraber şekil 7.12 için yukarıda anlatılan motor hız tepe noktasının aşağıya çekilmesi sorununu mümkün olduğu kadar aşabilmek için tümlevsel zaman katsayısı yüksek, genel kazanç katsayısı ise düşük tutulmuştur bu da hız denetim süresini uzatmıştır. Oransal- tümlevsel- türevsel denetim değişken katsayılar üzerine kurulduğu için her uygulama için tek bir çözüm bulunmaz, denetim değiştirgeleri, uygulamanın sınırları ve hedefleri doğrultusunda belirlenir. Şekil 7.12'deki çalışma da daha büyük motor hızı tepe noktası toleransı gösterildiği takdirde daha çabuk hız denetimi sağlanabilir.

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan bu çalışmada laboratuvar ve gösteri seti olarak kullanılmak üzere kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarının iki farklı tipi olan yamuksal zıt EMK'lı ve sinüsel zıt EMK'lı kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarının hız denetimini sağlayan bir motor sürücüsü tasarımlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Sürücü 30W'lık sinüsel zıt EMK'lı kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru üzerinde denenmiş ve motor tam tur dönüş hızını çeşitli yük koşullarında hedef hızların %0.1'ne varan dar bantlar içinde denetleyebildiği gözlemlenmiştir.

Sinüsel zıt EMK'lı tip kalıcı mıknatıslı fırçasız motorlar kuramsal olarak gerçek zamanlı konum takibi ve dolayısı ile yoğun işlem gücü sağlayabilen karmaşık denetim yapılarına ihtiyaç duyarlar. Deneysel çalışmalarda, hız denetimi için elde edilen başarılı sonuçlar, sürücü tasarımında yamuksal zıt EMK'lı tip kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarının denetiminde kullanılan, düşük üretim maliyetli altı adım anahtarlama motor sürüş tekniğinin akım denetimli gerilim kaynaklı çevirgeç ile birlikte kullanılması durumunda, sinüsel zıt EMK'lı tip fırçasız motorlarda da başarılı bir motor sürüşü sağlayabildiğini göstermektedir.

Deneysel çalışmalar motor tam tur dönüş hızlarının çok dar bantlar içinde denetiminin sağlanabildiğini göstermektedir. Motor hızının ölçülebildiği en küçük çözünürlük olan 1/5 tur için elde edilen hız verileri bir tam tur tamamlanırken motor hızının, çok düşük hedef hızlar için (300-600 RPM) %4'e 600 RPM'den itibaren %3'e varan oranlarda sapmalar gösterebildiğini ortaya koymaktadır, bununla beraber bu sapmaların gözlemlendiği bir tam mekanik tur hızının, en düşük hedef hız seçimlerinde bile hedef hızın \pm %0.5 bandından çıkmadığı yani denetiminin hız salınımları yaşasa da bir tam tur hızını denetim altına alabildiği görülmüştür. Eğer hedef uygulama bu tur içi salınımlara tolerans gösteremeyecek bir yapıdaysa, optik kodlayıcı gibi yüksek çözünürlüklü konum bilgisi sağlayan cihazların yüksek hızlı sayısal sinyal işleyici entegreler ile birlikte kullanımı gibi çözümler getiren benzer bir sürücü yapısı tasarımlanmalıdır. Daha sık örnek alınması ve denetim bilgilerinin daha hızlı işlenmesini sağlayacak bu tarz bir yapı, tur içi hız salınımların azalmasını sağlayacaktır. Tasarımlanan sürücüye sayısal-analog çevirici entegresi ve bu entegreyi besleyecek farklı gerilimler üretebilen güç çevrim elemanlarının eklenmesi, mikro denetleyicinin belirlediği referans motor faz

akımı değeri referans geriliminin daha az gürültü taşıyacak şekilde iletilmesini sağlayacak dolayısıyla daha doğrusal bir faz akımı elde edilmesini sağlayacaktır.

Hız denetimi uygulamanın gerektirdiği pek çok özelliğe sahip düşük maliyetli PIC18F452 entegresi üzerinde koşturulan sayısal oransal-tümlevsel-türevsel denetim algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Oransal-tümlevsel-türevsel denetim yapısı en yaygın olarak kullanılan geri beslemeli denetim tekniğidir. Çoğu gerçekte oransal – tümlevsel denetim işlevi görmekle beraber, kapalı çevrim denetim sistemlerinin %95'ini PID denetleyicileri oluşturmaktadır[3]. Bir laboratuvar ve gösteri seti oluşturma amacıyla ortaya konması gereği 'Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motor Sürücüsü' tasarımında, kullanıcıya kapalı çevrim hız denetimi uygulamalarında sayısal olarak gerçekleştirilen oransal-tümlevsel-türevsel ve oransal-tümlevsel denetim değiştirgeleri üzerinde olduğu kadar sürücü denetimi üzerinde de gerek sayısal gerek donanımsal hareket imkanı sağlayarak, hem oransal-tümlevsel-türevsel denetim değiştirgelerinin motor hız denetimi üzerindeki etkilerini inceleyebilme hem de kullanılacak farklı motor tiplerine ve farklı yük gereksinimlerine göre sürücü yapısını en iyi konumu oluşturabilme imkanı sağlanmıştır.

Deneyisel çalışmalar oransal-tümlevsel denetimin, hız denetimini sağlamada çoğu kez yeterli olduğunu ancak türevsel denetimin de bu yapıya eklendiği oransal-tümlevsel-türevsel denetimde türevsel etkinin motorun hız denetimini daha çabuk sağlamada etkili olabildiği gözlemlenmiştir.

Sürücü devre, kişisel bilgisayar olmadan da serbestçe kullanılabilme ve çalışma sonuçlarının likit kristal ekran üzerinden takip edilebilmesi özelliğine sahiptir. Kullanıcıya RS232 protokolü kullanan seri iletişim hattı üzerinden motor denetim sonuçlarını kişisel bilgisayar ortamına taşıma imkanı sağlayan 'Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru Hız Denetimi Veri Analiz Yazılımı', denetim sonuçlarını bilgisayarda veya dış ortamda arşivleme ve arşivlenmiş bilginin yüklenerek tekrar analizine de imkan tanımaktadır. Sapma oranlarının, hız ve denetim değiştirgelerinin takip edildiği yazılım, güncel motor verilerine göre otomatik olarak grafik çıktısı oluşturabilmektedir. Bu yapısı ve yüksek denetim kabiliyeti ile kullanıcıya çok yönlü inceleme, araştırma ve gözlem imkanları sunan 'Kalıcı Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motoru Sürücüsü', motor hız denetimi

konusuyla ilgilenen yüksek ğretim lisans ve yüksek lisans ğrencilerinin, kalıcı mıknatıslı fırçasız doğru akım motorlarının çalışma prensiplerini incelemesi ve sayısal oransal-tümlevsel-türevsel denetiminin etkilerini gözlemlemesi için laboratuvar seti olarak kullanılmaya uygundur.

KAYNAKLAR

- [1] Allegro Microsystems Inc. , Datasheet 20609.20d, “ 3280,3281 and, 3283”(19)
- [2] Arroyo E.L.C., Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor System, Yüksek Mühendislik Tezi, University of Puerto Rico, p15-17, 2006(12)
- [3] Åström K. J., University of California Santa Barbara, Control System Design, Preprint, 2002
<http://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds110/fa02/cds101/caltech/astro-m-ch6.pdf>
- [4] Chikkam R D., Performance of Disc Brushless DC Motor Applied as Gearless Drive for Wheelchair, Yüksek Mühendislik Tezi, Louisiana Stste University, USA, p9, 2005
- [5] D'Souza S. ,Microchip Technology Inc. , GS001 – “Getting Started with BLDC Motors and dsPIC30F Devices”,2005
- [6] Dorf R.C., Bishop R.H., 1998, Modern Control Systems, Addison Wesley Longman,Inc.,p44
- [7] Elevich L.N.,Freescale Semiconductor Application Note AN1916 Rev 2.0, ”3-Phase BLDC Motor Control with Hall Sensors Using56800/E Digital Signal Controllers”, 2005
- [8] Ellis G., PCIM-Europe, “Advances in Brushless Motor Technology, Control and Manufacture”,1996
- [9] Honeywell Sensing and Control , Application Notes – “SS4/SS5/SS400/SS500 Low Gauss Bipolar Hall Effect Sensors”
http://sensing.honeywell.com/index.cfm/ci_id/140961/la_id/1/document/1/re_id/0
- [10] Honeywell Sensing and Control , Solidstate devices technical notes chapter 2 – “Hall Effect Sensors”
<http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/solidstate/technical/chapter2.pdf>
- [11] Khopkar R.V., DC-DC Converter Current Source Fed Naturally Brushless DC Motor Drive, Yüksek Mühendislik Tezi, Texas A&M University, USA, p11-14
- [12] Kumar K., Singh A.K. ve Singh S.N., North Eastern Regional Institute of Science & Technology-India ‘Hybrid Fuzzy Controller for Permanent Magnet Brushless DC Motor’
- [13] Lamar K., Polytechnical Instutution - Hungary , ‘Digital Control of Permanent Magnet Synchronous Motors’
- [14] Marano V., STMicroelectronics , AN1625 Application Note, “ L6235 Three Phase Brushless DC Motor Driver”,2003

- [15] Mazurkiewicz J. , “Electronic Commutation”, 2000
http://fab.cba.mit.edu/classes/MIT/961.04/topics/brushless_DC1.pdf
- [16] Microchip , Datasheet 18FXX2, “High Performance Enhanced FLASH Microcontrollers with 10 Bit A/D”,2002
- [17] Miller T.J.E.,1989,Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives, Clarendon Press – Oxford,p12-13,63-66,90-96
- [18] Moudgalya K.M.,Indian Institute of Technology-Bombay , CL 692-Digital Control Lecture Notes, 2005
- [19] National Semiconductor , Datasheet, “LM2576/LM2576HV Series SIMPLE SWITCHER® 3A Step-Down Voltage Regulators”,2004
- [20] Pillay P. , Krishan R. , IEEE Transactions on Industry Applications Vol 25. No. 2 , ‘Modeling, Simulation and Analysis of Permanent Magnet Motor Drives – Part II – The Brushless DC Motor Drive’, 1989
- [21] Schapker A. , Emerson Electric Company, motor datasheet, Size 17 Motor with External Motor Module Inch 0.75 Stack, 2002
- [22] Sivrioğlu S., Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, “ENE 587 Ders Notları”,2007
<http://www.gyte.edu.tr/Dersler/105/ENE%20587/ENE587-050407.pdf>
- [23] STMicroelectronics , Datasheet L6235, “ DMOS Driver For Three Phase Brushless DC Motor”,2003
- [24] Tabar F.M.,Bouzekri H.,Davat B.,Gosselin O. ,‘Influence of Current Observers On The Performance of a PMSM Supplied by Hysteresis Current Controlled VSI’,1993
- [25] Tuğay G.,2004,Herkes İçin Elektronik Hobi,Alfa Basım Yayım Dağıtım,p66-67
- [26] Vukic Z.-University of Zagreb, Kuljaca O-University of Texas. , Lectures on PID Controllers, 2002
- [27] Webb J.,Greshock K., Industrial Control Electronics, Second Edition,1993, Prentice Hall Inc.,p 405-423
- [28] Yedamale P. ,Microchip Technology Inc. , AN885 – “Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals”,2003

EKLER

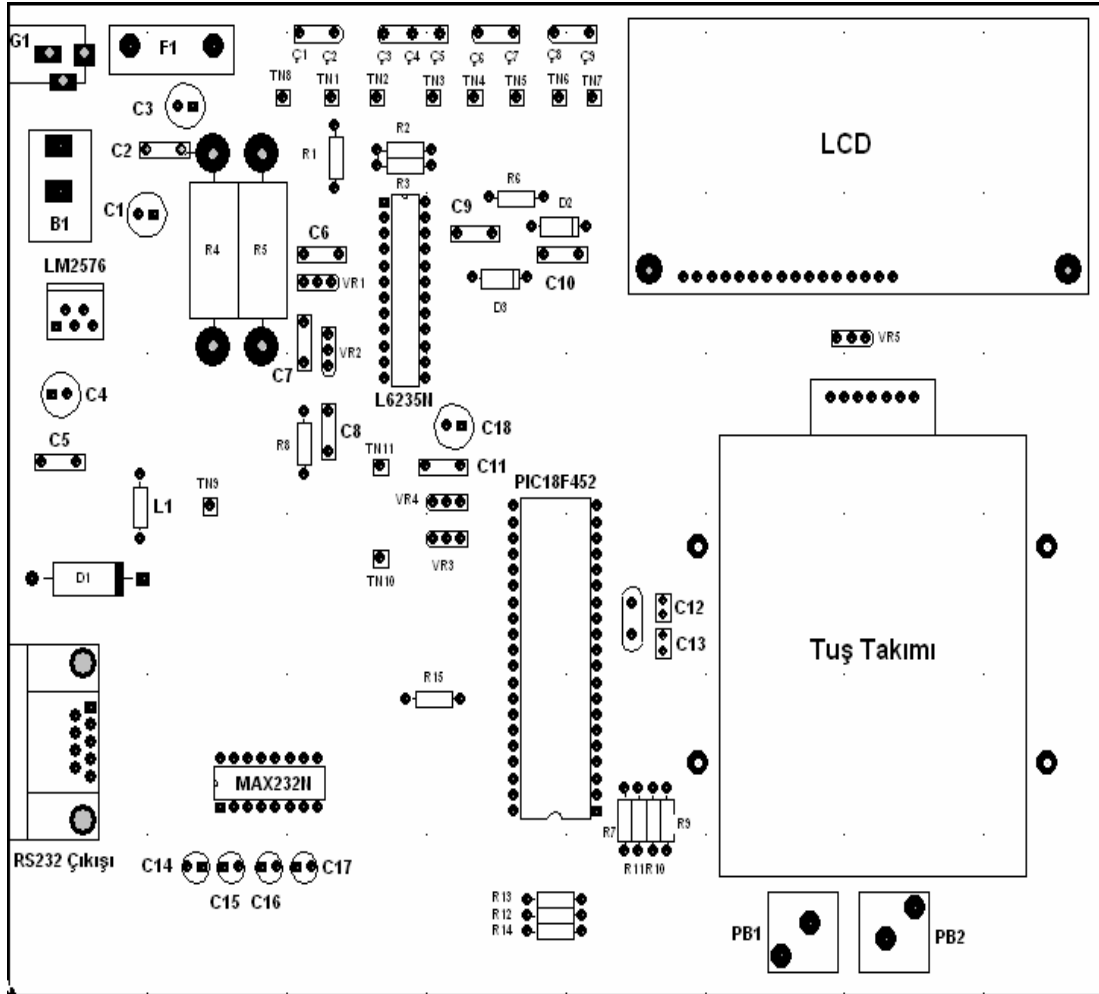
EK1. SÜRÜCÜ DEVRE ELEKTRİKSEL DEVRE ŞEMSAINDA YER ALAN KISALTMALAR

B	İki Konumlu Düğme	R	Direnç
C	Sığaç	L	Bobin
Ç	Sürücü Çıkışı	PB	Bas-Çek Düğme
D	Diyot	TN	Test Noktası
F	Sigorta	VR	Yüzeye Monte Çok Turlu Trimpot
G	Güç Girişi	X	Kristal

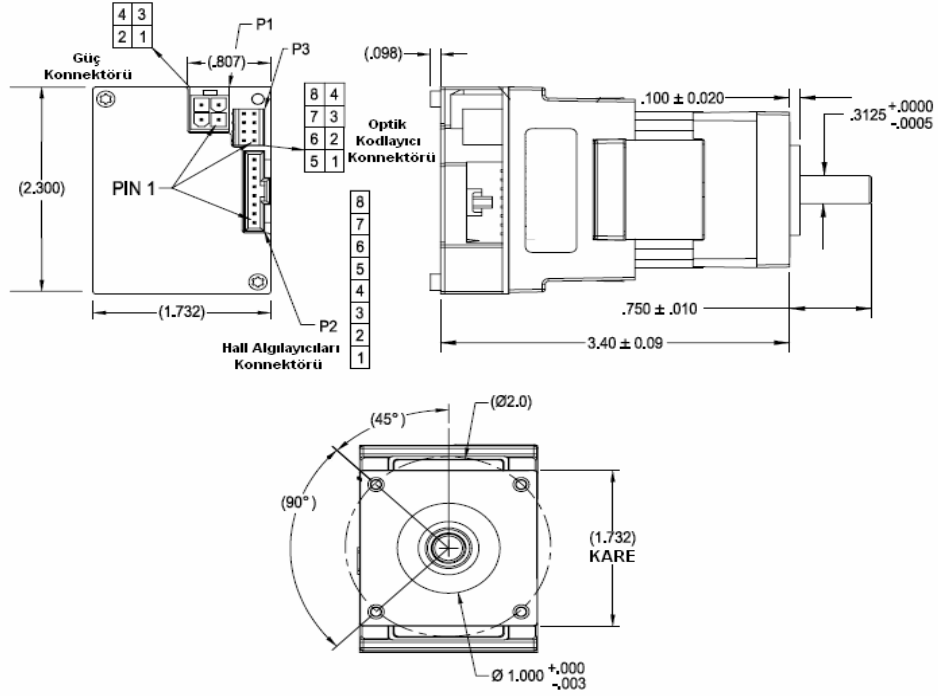
**EK2. SÜRÜCÜ ELEKTRİKSEL DEVRE ŞEMASINDA YER ALAN DEVRE
ELEMANLARININ SAYISAL DEĞERLERİ**

C12,C13	22 pF Sığaç	L1	182 mH Bobin
C6,C11	1nF Sığaç	R4,R5	1 Ω 5W Direnç
C8	5.6 nF Sığaç	R6	100 Ω /0.25W Direnç
C7,C9	10nF Sığaç	R9,R10,R11	1 K Ω /0.25W Direnç
C3,C10	220nF Sığaç (100V)	R1,R2,R3	4.7 K Ω /0.25W Direnç
C5	470nF Sığaç	R7,R12, R13,R14, R15	10 K Ω /0.25W Direnç
C14,C15, C16,C17, C18	1 μ F Sığaç (Yönlü – 16V)	R8	100 K Ω /0.25W Direnç
C1,C2	100 μ F Sığaç (Yönlü – 63V)	VR4	10 K Ω Yüzeye Monte Çok Turlu Trimpot
C4	1000 μ F Sığaç (Yönlü – 16V)	VR1,VR2, VR3	100 K Ω Yüzeye Monte Çok Turlu Trimpot
D1	1N5822	VR5	5 K Ω Yüzeye Monte Çok Turlu Trimpot
D2,D3	1N4148	X1	10 MHz Kristal
F1	2A Sigorta		

EK3. TASARIMLANAN SÜRÜCÜ DEVRE ELEMANLARININ BASKI DEVRE ÜZERİNDEKİ YERLEŞİMİ



EK4. HIZ DENETİMİ GERÇEKLEŞTİRİLEN MOTORUN BOYUTLARI, KONNEKTÖR YAPISI VE ELEKTRİKSEL,MEKANİK,ISISAL KARAKTERİSTİK KATSAYILARI

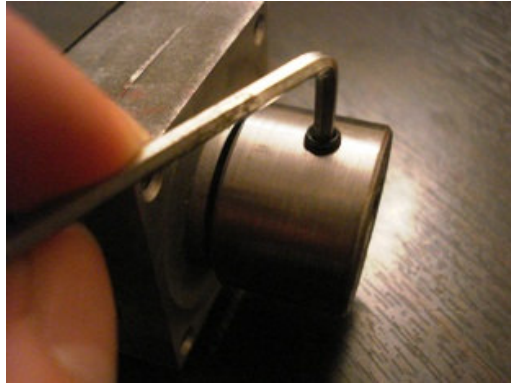


Sarımlar Arası Direnç (R_{tm})	4.03 Ohm	Elektrik Zaman Katsayısı (t_e)	1.14 ms
Sarımlar Arası Endüktans (L_{tm})	4.60 mH (1KHz)	Mekanik Zaman Katsayısı (t_m)	3.74 ms
Moment Sabiti (K_t)	9.79 oz.in./A	Isısal Direnç (R_{th})	4.78 C° / Watt
Gerilim(Zıt EMK) Sabiti (K_e)	7.24 (V/ K_{RPM})	Isısal Zaman Sabiti (t_{th})	16 min
Ortam Sıcaklığı	22.4 C°	Döneç Ataleti (J_r)	0.000628 oz.in.s ²

EK5. SÜRÜCÜ DONANIMSAL BAĞLANTILARI VE ÇALIŞMA ÖNCESİ YAPILMASI GEREKEN ÖN HAZIRLIKLAR

Bu bölümde sürücüye güç verilmeden önce yapılması gereken sürücü donanımsal bağlantıları ve bilgisayar üzerinde çalıştırılan analiz yazılımının düzgün bir şekilde kullanılabilmesi için gerekli ön hazırlıklar anlatılacaktır.

Şekil EK5.1 yükün 2mm'lik aylan anahtarı yardımıyla motor miline bağlantısını gösterir.



Şekil EK5.1 Yükün Motor Miline Bağlantısı

8'li konektöre sahip Hall algılayıcıları kablo grubu ve 4'lü konektöre sahip motor faz kabloları grubu Şekil EK5.2'deki gibi motora bağlanır. Konektör yapıları mandallı yapıya sahip olduğu için ters bir bağlantıya izin vermez.



Şekil EK5.2 Motor Bağlantıları

Çizelge EK5.1 8'li konektör ucuna sahip Hall algılayıcıları kablo grubunun, Çizelge EK5.2 4'lü konektör ucuna sahip motor faz kablolarının sürücü devre ile yaptıkları

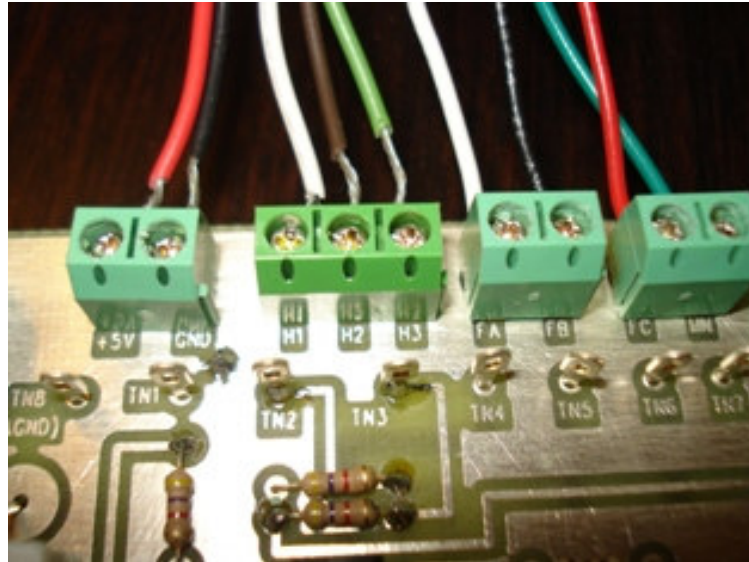
bağlantıları gösterir. Motor kablolarının sürücüye takılmış hali Şekil EK5.3'de gösterilmiştir.

Çizelge EK5.1 Hall Algılayıcıları Kablo Grubunun Sürücü Devre İle Bağlantısı

Kablo Rengi	Sürücü Üzerinde Bağlanacak Yuvanın İsmi
KIRMIZI	+5V
SİYAH	GND
BEYAZ	H1
KAHVERENGİ	H2
YEŞİL	H3

Çizelge EK5.2 Faz Kabloları Kablo Grubunun Sürücü Devre İle Bağlantısı

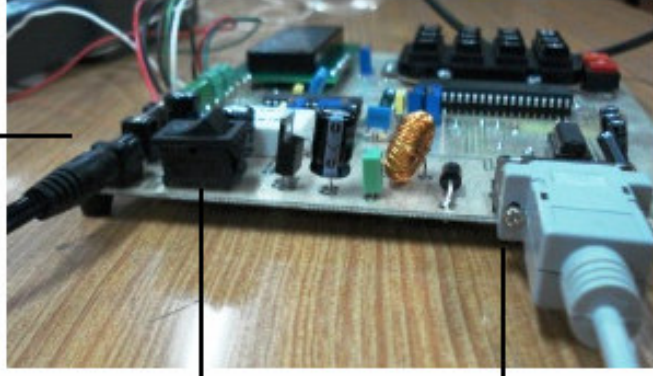
Kablo Rengi	Sürücü Üzerinde Bağlanacak Yuvanın İsmi
BEYAZ	FA
SİYAH	FB
KIRMIZI	FC
YEŞİL	MN



Şekil EK5.3 Motor Kabloları – Sürücü Devre Bağlantısı

Açma-kapama düğmesi kapalı olan konum 'O' konumundan 'I' konumuna alındığında devre enerjilendirilmiş olur. Şekil EK5.4 sürücü devrenin, adaptör girişi ve mini DB9 bağlantısını göstermektedir.

**24 Volt Adaptör
Bağlantısı**



**Sürücü Devre
Açma Kapama
Düğmesi**

**Seri İletişim Kablosu
Bağlantısı**

Şekil EK5.4 Adaptör ve Seri İletişim Kablosu Bağlantısı

Eğer sürücü devre bilgisayar üzerindeki analiz yazılımıyla beraber kullanılacaksa devreye enerji verilmeden önce bilgisayardan gelen seri iletişim kablosu, sürücü devre üzerindeki mini DB9 konektörüne bağlanır. 'GRAFIK.xls' dosyasının bilgisayarın 'C:\' sürücüsü altında yer aldığı kontrol edildikten sonra 'ANALIZ.exe' dosyası çalıştırılır. Bilgisayar ve Sürücü devre arasındaki seri iletişim kablosu kontrol edilir ve bilgisayarca kullanılan seri iletişim kapısı not alınır. Yazılım çalıştığında, ana menü ekranında 'Seri İletişim Kapısı' yazısı altında yazan seri iletişim kapısı numarası karşılaştırılır, bir farklılık varsa ana menüdeki 'Bağlantı Ayarları' tuşuna basılır ve tuşa basılmasıyla kullanıcının girişine açık hale gelen 'Seri İletişim Kapısı' yazısı altındaki giriş not alınan seri iletişim kapısının numarası girilir. 'Bağlantı Ayarlarını Kaydet' tuşuna basıldığında ana menü seçeneklerine dönlür ve yazılımın hatasız bir şekilde çalışabilmesi için gerekli ön hazırlıklar tamamlanmış olur.

EK6. ÖRNEK ÇALIŞMA KAPSAMINDA ELDE EDİLEN İLK 50 VERİYE AİT VERİ TABLOSU

FIRCASIZ DOGRU AKIM MOTORU VERİ TABLOSU							
HEDEF HIZ	ORNEK NO	ANLIK ZAMAN	GEÇEN ZAMAN	ANLIK HIZ	TUR	TUR ORT. HIZ	TURGeçen Zaman
1200,00	Belirsiz	33,32	33,32	0,00	Belirsiz	0,00	33,32
1200,00	1	46,98	80,30	255,45	1	770,37	139,77
1200,00	2	23,88	104,18	502,45			
1200,00	3	14,13	118,32	849,18			
1200,00	4	11,37	129,68	1055,59			
1200,00	5	10,09	139,77	1189,15			
1200,00	6	10,04	149,82	1194,65	2	1185,56	190,39
1200,00	7	10,24	160,05	1172,42			
1200,00	8	10,21	170,26	1175,73			
1200,00	9	10,25	180,51	1170,41			
1200,00	10	9,88	190,39	1214,57			
1200,00	11	10,06	200,45	1193,13	3	1187,81	240,92
1200,00	12	10,26	210,72	1169,13			
1200,00	13	10,20	220,92	1176,47			
1200,00	14	10,20	231,11	1177,02			
1200,00	15	9,81	240,92	1223,29			
1200,00	16	9,98	250,90	1202,89	4	1196,35	291,08
1200,00	17	10,19	261,08	1178,13			
1200,00	18	10,12	271,20	1185,40			
1200,00	19	10,13	281,33	1185,02			
1200,00	20	9,75	291,08	1230,31			
1200,00	21	9,93	301,01	1208,90	5	1200,16	341,09
1200,00	22	10,14	311,16	1182,97			
1200,00	23	10,09	321,24	1189,34			
1200,00	24	10,11	331,35	1187,27			
1200,00	25	9,74	341,09	1232,34			
1200,00	26	9,93	351,02	1208,70	6	1200,04	391,10
1200,00	27	10,14	361,16	1182,97			
1200,00	28	10,09	371,25	1189,34			
1200,00	29	10,11	381,36	1187,27			
1200,00	30	9,74	391,10	1231,93			
1200,00	31	9,92	401,02	1209,09	7	1200,66	441,08
1200,00	32	10,14	411,16	1183,90			
1200,00	33	10,09	421,25	1189,72			
1200,00	34	10,10	431,35	1188,02			
1200,00	35	9,74	441,08	1232,54			
1200,00	36	9,92	451,00	1209,48	8	1200,61	491,07
1200,00	37	10,13	461,14	1184,09			
1200,00	38	10,08	471,22	1189,91			
1200,00	39	10,10	481,33	1187,65			
1200,00	40	9,74	491,07	1231,93			
1200,00	41	9,92	500,99	1210,07	9	1200,55	541,06
1200,00	42	10,14	511,13	1182,97			

1200,00	43	10,09	521,22	1189,34	10	1200,81	591,04
1200,00	44	10,10	531,32	1187,65			
1200,00	45	9,73	541,06	1232,74			
1200,00	46	9,93	550,98	1208,90			
1200,00	47	10,13	561,12	1184,09			
1200,00	48	10,08	571,20	1189,91			
1200,00	49	10,10	581,30	1188,02			
1200,00	50	9,73	591,04	1233,15			

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Dağhan ÇAYCI

Doğum Yeri : İzmir

Doğum Yılı : 01.01.1979

Medeni Hali : Evli

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise : 1990 - 1997 İzmir Bornova Anadolu Lisesi

Lisans : 1998 - 2003 Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik
Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil : İngilizce

İş Tecrübesi : 2005 Mega Endüstriyel Otomasyon Sistemleri
2005 – 2007 HAVELSAN - devam

İrtibat : daghan1979@yahoo.com.tr