

TC.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PIC MİKRODENETLEYİCİ YARDIMI İLE
DC MOTORUN HIZ KONTROLÜ**

Ömür AYDOĞMUŞ

Tez Yöneticisi
Doç. Dr. Hüseyin ALTUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2006

TC.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PIC MİKRODENETLEYİCİ YARDIMI İLE DC MOTORUN HIZ KONTROLÜ

Ömür AYDOĞMUŞ

Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

Bu tez, tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin ALTUN

Üye: Prof.Dr. Sedat SÜNTER

Üye: Yrd. Doç.Dr. Mehmet ÖZDEMİR

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda fikir ve tecrübelerini değerli zamanından feda ederek bana yardımını eksik etmeyen danışmanım Sayın Doç.Dr. Hüseyin ALTUN Bey 'e teşekkür ederim.

Hayatımın her anında olduğu gibi, tez çalışmalarım sırasında da anlayışları ve sabırlarıyla beni destekleyen eşime ve aileme çok teşekkür ederim.

Ayrıca malzemelerin temininde ve prototipin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Mak. Müh. Aydın KARTAL Bey'e teşekkür ederim.

Ömür AYDOĞMUŞ

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER LİSTESİ	III
FOTOĞRAFLAR LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	VIII
SİMGELER LİSTESİ	IX
KISALTMALAR LİSTESİ	X
ÖZET	XI
ABSTRACT	XII
1. GİRİŞ	1
2. DC MOTORLAR ve HIZ KONTROLÜ	5
2.1. DC Motorlar	5
2.2. Sabit Mıknatıslı DC Motor (SMDCM)	6
2.3. DC Motor Devre Diyagramları	9
2.4. Sürekli Durumda Hız Moment İlişkisi	10
2.5. DC Motor Hız Kontrol Yöntemleri	13
2.5.1. Motor Geriliminin Değiştirilmesi ile Yapılan Hız Kontrolü	13
2.6. Serbest Uyarımlı DC Motorun Dört-Bölgeli Çalışması	15
2.7. Serbest Uyarımlı DC Motorun Transfer Fonksiyonu	16
2.8. DC Motorun DC-DC Kıyıcı ile Kontrolü	20
2.8.1. Çalışma Prensipleri ve Kontrol Teknikleri	21
2.8.2. DC-DC Kıyıcıdan Beslenen Serbest Uyarımlı DC Motor	25
2.9. Dört-Bölgeli Kontrol	26
3. DÖRT-BÖLGELİ DC MOTOR HIZ KONTROLÜNÜN MATLAB/SIMULINK İLE BENZETİMİ	31
4. PIC16F877 İLE KONTROLÖR TASARIMI	39
4.1. PIC Mikrodenetleyiciler ve Özellikleri	39
4.2. PIC16F877	41
4.2.1. Giriş/Çıkış Portları	41
4.2.2. Bellek Yapısı	42
4.3. Kontrolör Devresi Tasarımı	43

4.4	Analog Dijital Çevirici.....	47
4.5	DGM Sinyalinin Üretilmesi.....	49
4.6	Giriş/Çıkış Bağlantılarının Belirlenmesi.....	51
4.7	Kontrolör Kartının Özellikleri	52
5.	DC MOTOR SÜRÜCÜ DEVRESİ TASARIMI	60
5.1	Motor Sürücü Devresi.....	60
5.2	Dört-Bölgeli Deneysel Sonuçlar	65
5.3	Benzetim ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması	71
5.4	Prototip Özellikleri.....	77
6.	SONUÇLAR.....	81
	KAYNAKLAR	83
	ÖZGEÇMİŞ	85
	EK-1 PIC16F877 'nin donanım özellikleri	86

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1	PIC mikrodenetleyici ile DC motor kontrolü blok şeması 4
Şekil 2.1	Elektromekanik enerji dönüşümü 5
Şekil 2.2	DC makinede bazı kısım ve elemanlar 6
Şekil 2.3	a) Paralel, b) Seri Endüvi sarım türleri 6
Şekil 2.4	SMDC motorun yapısı..... 7
Şekil 2.5	SMDC motorun a) Hız-moment, b) Akım-moment karakteristikleri 8
Şekil 2.6	Farklı kaynak gerilimleri için SMDC motorun hız-moment karakteristikleri 8
Şekil 2.7	a) Serbest uyarımlı, b) Şönt uyarımlı, c) Sabit mıknatıslı, d) Seri uyarımlı, e) Kompunt uyarımlı DC motorların genel devre diyagramları 9
Şekil 2.8	Sürekli durumda DC motorun endüvi eşdeğer devresi 10
Şekil 2.9	DC motor hız-moment karakteristikleri 11
Şekil 2.10	Farklı gerilim ve manyetik akı değerlerinde a) Serbest uyarımlı, b) seri uyarımlı DC motorların hız-moment karakteristikleri 14
Şekil 2.11	Dört-Bölgeli çalışmada DC motorun kaynak geriliminin, zıt emk'nın, momentin, hızın ve motor akımının yön gösterimleri 15
Şekil 2.12	Serbest uyarımlı DC motorun dinamik eşdeğer devresi 16
Şekil 2.13	Serbest uyarımlı DC motorun blok diyagramı 18
Şekil 2.14	Serbest uyarımlı DC motorun basitleştirilmiş a) Tam, b)Yaklaşık blok diyagramları..... 19
Şekil 2.15	a) Buck tipi kıyıcı devresi, b) Yük gerilimi, c) Kapı sinyali, d) Yük akımı, e)Kaynak akımı dalga şekilleri 23
Şekil 2.16	a) Boost tipi kıyıcı devresi, b) Kapı sinyali, c) Anahtar gerilimi, d) Kaynak akımı dalga şekilleri..... 24
Şekil 2.17	a) DC-DC kıyıcı kontrollü serbest uyarımlı DC motor, b) Eşdeğer devre 25
Şekil 2.18	a) Sürekli iletimde ve b) Sürekli olmayan iletimde, motor uçlarında gerilim ve akımın dalga şekilleri 26
Şekil 2.19	Dört-bölgeli E sınıf kıyıcı devresi 27
Şekil 2.20	Şekil 2.19 'daki dört bölgeli kıyıcının dalga şekilleri a) İleri yönde motor ($0.5 \leq \delta \leq 1$ ve $V_a > E$) b) İleri yönde generatör ($0.5 \leq \delta \leq 1$ ve $V_a < E$) 29
Şekil 3.1	Dört-bölgeli DC motor hız kontrolü için Matlab/Simulink modeli 31
Şekil 3.2	PI kontrolör bloğu içyapısı 32
Şekil 3.3	DGM bloğu içyapısı 32
Şekil 3.4	H-köprü içyapısı 33

Şekil 3.5	Yüksüz durumda 2000 d/d için a) Armatür gerilimi, b) Armatür akımı, c) Kaynak akımı	34
Şekil 3.6	%45 yüklü durumda 2000 d/d için a) Armatür gerilimi, b) Armatür akımı, c) Kaynak akımı	35
Şekil 3.7	3000 d/d, 2000 d/d referansları için motor hızının zamanla değişimi	35
Şekil 3.8	1500, -3000 ve 1500 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi ...	36
Şekil 3.9	+3000 d/d, +1500 d/d, +30000 d/d referans hızları için elde edilen sonuç	36
Şekil 3.10	3500, -3500 ve 3500 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi ...	37
Şekil 3.11	-3500 d/d, 3500 d/d, ve -3500 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi	37
Şekil 3.12	1000 d/d, 2000 d/d, ve 3000 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi	38
Şekil 3.13	3000 d/d, 2000 d/d, ve 1000 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi	38
Şekil 4.1	Program bellek haritası	43
Şekil 4.2	Kristal osilatör	43
Şekil 4.3	Reset devresi	44
Şekil 4.4	LCD 'nin PIC ile bağlantı şeması	45
Şekil 4.5	Butonların PIC ile bağlantı şeması	46
Şekil 4.6	A/D dönüştürücünün blok Diyagramı	47
Şekil 4.7	Analog Giriş Modeli	48
Şekil 4.8	A/D dönüşüm çevrimi	48
Şekil 4.9	A/D dönüştürme işleminin sonuç adresleri ve konumları	49
Şekil 4.10	T periyodu sabit t_{on} süresi ayarlanabilen DGM sinyali	49
Şekil 4.11	PIC 'in CCP1 modülü ile elde edilen 1.22 kHz'lik DGM sinyali	50
Şekil 4.12	Kullanılan giriş-çıkışlar ve açıklamaları	51
Şekil 4.13	Kontrol devresinin kapalı şeması	52
Şekil 4.14	Referans değerlerinin LCD 'de görüntülenmesi	52
Şekil 4.15	ISIS 6 Professional 'da oluşturulan kontrolör devre şeması	53
Şekil 4.16	ISIS 6 Professional ile incelenen S_1 ve S_4 anahtarlarına uygulanan kontrol sinyalleri	54
Şekil 4.17	PIC için geliştirilen programın akış şeması	55
Şekil 4.18	PI Kontrolörü'nün blok diyagramı	56
Şekil 4.19	Farklı PI parametreleri ve $n_r=2000$ d/d için deneysel sonuçlar	56

	Sayfa
Şekil 4.20 Kontrolör döngüsü.....	57
Şekil 4.21 Kutup ve sıfırların kompleks düzlemdeki yerleşimi.....	58
Şekil 4.22 $kis=0,0164847$, $kps=0,0007327$ ve $n_r=2000$ d/d için motor hızının zamanla değişimi	59
Şekil 5.1 IGBT sürme devresi	61
Şekil 5.2 DC Motor sürücü devresi	62
Şekil 5.3 DGM sinyalinin 1/4 görev periyodu için IGBT 'lerin kapı gerilimleri	63
Şekil 5.4 Üretilen DGM sinyali ve yüksüz durumda H-köprü devresi gerilimi	64
Şekil 5.5 Üretilen DGM sinyali ve motor uçlarındaki gerilim	64
Şekil 5.6 H-köprü kıyıcının dört-bölgeli çalışması.....	65
Şekil 5.7 Yüksüz durumda 2000 d/d için a) Armatür gerilimi, b) Armatür akımı, c) Kaynak akımı	66
Şekil 5.8 %45 yüklü durumda 2000 d/d için a) Armatür gerilimi, b) Armatür akımı, c) Kaynak akımı	67
Şekil 5.9 Motorun dört-bölgeli deneysel sonuçları.....	67
Şekil 5.10 3000 d/d, 2000 d/d referansları için motor hızının zamanla değişimi	68
Şekil 5.11 1500, -3000 ve 1500 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi ..	68
Şekil 5.12 +3000 d/d, +1500 d/d, +30000 d/d referans hızları için elde edilen sonuç	69
Şekil 5.13 3500, -3500 ve 3500 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi ...	69
Şekil 5.14 -3500 d/d, 3500 d/d, ve -3500 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi	70
Şekil 5.15 1000 d/d, 2000 d/d, ve 3000 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi	70
Şekil 5.16 3000 d/d, 2000 d/d, ve 1000 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi	71
Şekil 5.17 Yüksüz durumda 2000 d/d için a) Armatür gerilimi (benzetim), b) Armatür akımı(benzetim), c) Kaynak akımı(benzetim), d) Armatür gerilimi (deneysel), e) Armatür akımı(deneysel), f) Kaynak akımı(deneysel)	72
Şekil 5.18 %45 yüklü durumda 2000 d/d için a) Armatür gerilimi (benzetim), b) Armatür akımı(benzetim), c) Kaynak akımı(benzetim), d) Armatür gerilimi (deneysel), e) Armatür akımı(deneysel), f) Kaynak akımı(deneysel)	73

Şekil 5.19	3000 d/d, 2000 d/d referansları için motor hızının zamanla değişimi a) Benzetim, b) Deneysel	74
Şekil 5.20	1500, -3000 ve 1500 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi a) Benzetim, b) Deneysel	74
Şekil 5.21	+3000 d/d, +1500 d/d, +30000 d/d referans hızları için elde edilen sonuç a) Benzetim, b) Deneysel	75
Şekil 5.22	3500, -3500 ve 3500 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi a) Benzetim, b) Deneysel	75
Şekil 5.23	-3500 d/d, 3500 d/d, ve -3500 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi a) Benzetim, b) Deneysel	76
Şekil 5.24	1000 d/d, 2000 d/d, ve 3000 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi a) Benzetim, b) Deneysel	76
Şekil 5.25	3000 d/d, 2000 d/d, ve 1000 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi a) Benzetim, b) Deneysel	77
Şekil 5.26	Hız bilgisini bilgisayara göndermek için kullanılan PIC şeması	78

FOTOĞRAFLAR LİSTESİ

	Sayfa
Fotoğraf 4.1 Kontrolör devresinin görünüşü.....	46
Fotoğraf 4.2 LCD 'nin görüntüsü	53
Fotoğraf 5.1 IGBT sürücü devresinin görüntüsü	61
Fotoğraf 5.2 IGBT 'ler ile oluşturulan H-köprü devresi görüntüsü	62
Fotoğraf 5.3 H-köprü devresinde kullanılan IGBT 'nin görüntüsü	63
Fotoğraf 5.4 Kontrol kutusu.....	78
Fotoğraf 5.5 Kontrol kutusunun PC ile haberleşme portu	79
Fotoğraf 5.6 Kontrol kutusu bağlantı uçları.....	79
Fotoğraf 5.7 Deney Düzeneği	80

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Dört çalışma bölgesi için kaynak gerilimi ve akım yönleri	16
Tablo 4.1 Osilatör frekansına göre seçilmesi gereken kondansatör değerleri	44
Tablo 4.2 20MHz 'lik osilatör ile elde edilebilecek DGM frekans değerleri	50
Tablo 4.3 Deneyde kullanılan DC motor parametreleri.....	57
Tablo 5.1 IGBT 'lerin iletimde ve kesimde olma durumları	62

SİMGELER LİSTESİ

Simge	Açıklama	Birim
B	Sürtünme katsayısı	N.m.s
C	Alan sabiti	V.s
E_c	Zıt emk	V
I	Akım	A
i	Akım	A
J	Eylemsizlik momenti	kg.m ²
kis	PI entegral sabiti	-
k_m	Konstrüksiyon (imalat) sabiti	-
kps	PI oransal sabiti	-
L	İndüktansı	mH
n	Hız	d/d
R	Direnç	Ω
T	Moment	N.m
V	Besleme gerilimi	V
ω	Açısal hız	rad/s
d	Kıyıcı görev peryodu	μ s
ϕ	Ak1	Wb
ξ	Sönüm faktörü	-
τ	Zaman sabiti	sn

KISALTMALAR LİSTESİ

ALU	: Aritmetik Sayısal Ünitesi
CLC	: Akım Sınır Kontrolü
CMOS	: Tamamlayıcı Metal Oksit Yarıiletken
CPU	: Merkezi İşlem Birimi
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
EEPROM	: Elektriksel Silinebilir Programlanabilir Sadece Okunabilir Bellek
EPROM	: Silinebilir Programlanabilir Sadece Okunabilir Bellek
GTO	: Kapıdan Kesime Götürülebilen Tristör
IGBT	: Kapıdan Yalıtımlı Bipolar Transistör
LCD	: Likit Kristal Ekran
MMK	: Manyetomotor Kuvveti
MOSFET	: Metal Oksit Yarıiletken Alan-Etkili Transistör
PIC	: Çevresel Arabirim Denetleyicisi
RAM	: Rasgele Erişilebilir Bellek
RISC	: Azaltılmış Komut Takımı
ROM	: Sadece Okunabilir Bellek
SMDCM	: Sabit Mıknatıslı DC Motor
TRC	: Zaman Oranı Kontrolü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PIC MİKRODENETLEYİCİ YARDIMI İLE DC MOTORUN HIZ KONTROLÜ

Ömür AYDOĞMUŞ

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

2006, Sayfa: 89

Bu çalışmada, endüstride geniş bir uygulama alanına sahip olan DC motorun kapalı-çevrim hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bunun için PIC mikrodeneleyici tabanlı dört-bölgele bir DC motor sürücü sistem tasarlanmıştır. Öncelikle DC motoru ayarlanabilir bir kaynaktan besleyebilmek için DC-DC kıyıcı devre, yardımcı devreler, arayüz ve kontrol devreleri tasarlanmış ve oluşturulmuştur. Sürücü kontrolü genel amaçlı bir mikrodeneleyici (PIC16F877) ile yapılmıştır. Kontrolör devresi ise sayısal olarak gerçekleştirilmiş olup kontrol programı C dilinde yazılmıştır.

Bu çalışmanın amacı esnek, güvenilir ve verimli bir şekilde PIC mikrodeneleyici tabanlı ve kapalı-çevrim dört-bölgele bir DC motor sürücü sisteminin düşük maliyetle gerçekleştirilebileceğini göstermektir. Bu nedenle prototip sabit mıknatıslı bir DC motorun hızlanma ve yavaşlama, düz ve ters yönde dönme ve frenlenmesi için inşa edilen DC motor sürücü sistemine ait beklenen doğrulukta deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte DC motor sürücü sisteminin Matlab/Simulink ile benzetimi yapılmış ve benzetim sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak DC motorun, tasarlanan bu sistem ile geniş bir hız aralığında ve iyi bir performans ile dört-bölgele kapalı çevrim hız kontrolü gerçekleştirilebilmiştir. Düşük maliyetle gerçekleştirilen bu sistemin DC motor hız kontrolü için kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: DC motor, PIC mikrodeneleyici, PI, DC-DC kıyıcı, dört-bölgele kontrol.

ABSTRACT

Master Thesis

DC MOTOR SPEED CONTROL WITH PIC MICROCONTROLLER

Ömür AYDOĞMUŞ

Fırat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Education

2006, Page: 89

In this study, closed-loop speed control of a DC motor which is used for a wide range of applications in industry has been realized. Therefore, a PIC micro controller based four-quadrant DC motor drive system has been designed. Firstly the DC-DC chopper circuit, the auxiliary circuits, interfaces and control circuits have been designed and built for providing a variable DC voltage to supply the DC motor. Drive control is performed by a general purpose micro controller (PIC16F877). The control circuit has been realized digitally and the control program has been written in C programming language.

The purpose of this study is to show that flexible, reliable and efficient PIC micro controller based and closed-loop four-quadrant DC motor drive systems can be built at low costs. For this purpose, expected experimental results have been obtained which show the implementation of the drive system for speed acceleration and deceleration, forward and reversal operation and braking of a prototype permanent magnet DC motor. In addition to the experimental work, the dc motor drive system has been simulated using Matlab/Simulink, and the simulation results have been compared with those obtained from experiment.

Consequently, it has been shown that with this designed drive system closed-loop and four-quadrant speed control of a DC motor can be accomplished efficiently in a wide speed range. It has been also shown that the implemented drive system can give reasonable results of speed control for a DC motor.

Key Words: DC motor, PIC microcontroller, PI, DC-DC chopper, four-quadrant control

1. GİRİŞ

Mikroişlemciler, manyetik malzemeler ve yarıiletken teknolojisindeki son gelişmeler birçok endüstriyel alanda, yüksek performanslı elektrik motor sürücülerini için geniş bir uygulama alanı sunmaktadır. Ayrıca yarıiletken teknolojisindeki gelişme mikroişlemcileri daha küçük, daha hızlı ve daha ucuz hale getirmiştir. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan motor kontrol sistemleri az yer kaplayan, bakımları kolay yapılabilen, düşük maliyetli ve gelişmiş kontrol özelliklerine sahip olmalıdır. Mikroişlemciler, neredeyse elektronik olarak gerçekleştirilen işlem fonksiyonlarının tümünü sayısal olarak gerçekleştirebilecek özelliğe sahiptirler. Daha önceleri değiştirilemez program elemanları (ROM, bazı mantıksal devreler vb.) ile gerçekleştirilen ve çok pahalı olan bazı uygulamalar, mikroişlemciler kullanılarak çok daha ucuz ve esnek özelliklerle yapılabilmektedir [Rahman v.d, 1997; Kusko v.d, 1987; Konishi v.d, 1980].

Mikroişlemci tabanlı bir kontrol sistemi ile standart donanımlı bir DC motor kontrol edilmek istenildiğinde, yüksek hızlarda ani yön değiştirme durumunda bazı problemler ortaya çıkabilir. Motoru besleyen kaynak akımı, zıt elektromotor kuvveti (e.m.k) ve kontrol devresinde depolanan enerjiden dolayı hızlı bir şekilde anahtarlanaamaz. Motor hızı bazı frenleme teknikleri kullanılarak yavaşlatılması gerekmektedir. Bunun için, motor miline mekanik fren elemanı bağlanabilir. Bununla birlikte bu tür bir sistem verimsizdir ve eğer motor büyük bir yükü sürüyor ise yeterli olmayabilir. Bunun yerine daha verimli olan ve motoru bir generatör gibi kullanarak frenleme yaptıran bir yöntem kullanmak gerekir. Bunu gerçekleştirebilmek için dört-bölgeli bir anahtarlama devresi kullanmak gerekir [Joos v.d, 1975].

DC motorların yüksek performans ile çalışmaları için hızlarının geniş bir aralıkta kontrol edilmesi gerekir. Elektrikli trenler, sac ile kâğıt sarma makineleri, elektrikli araçlar, vinçler ve robot kolları gibi birçok uygulamada kullanılan DC motorlar, hız kontrolüne gerek duyarlar [Chan, 1987].

DC motorlar yüksek kalkış momenti, geniş hız aralığı ve kontrol kolaylığı gibi avantajlarından dolayı, endüstride özel bazı uygulamalarda sürekli bir kullanım alanına sahiptirler. DC motor kullanımının artmasına paralel olarak, gerçek-zamanlı motor kontrolü üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır [Hasegawa, 1984; Cegrell v.d, 1975; White v.d, 1983].

Güç elektroniğinde tristörlerin anahtarlama elemanı olarak kullanılmalarıyla, DC motor hız kontrolü için kullanılan kontrollü güç kaynakları daha fazla önem kazanmıştır. Günümüzde MOSFET, IGBT ve GTO gibi yarıiletken elemanlar anahtarlama elemanı olarak kullanılmaktadırlar [Khoei v.d, 1996]. Güç yarıiletken teknolojisi sürekli bir gelişim

içerisindedir. Üreticilerin amacı yüksek anahtarlama frekansına sahip, düşük kayıplı, sağlam ve düşük maliyetli ideal bir eleman geliştirmektir. 1980 'lerin başında ilk olarak piyasaya sürülen IGBT 'ler, büyük ölçüde gelişme göstermiş, konverter ve inverterlerde yaygın olarak kullanım alanı bulmuştur [Russel v.d, 1983; Baliga, v.d,1984].

Bir motorun hız kontrol uygulaması yapılırken ortaya çıkan esas problemler, doyma ve sürtünme nedeniyle motorun nonlinear karakteristiklerinin kontrolör performansını etkilemesidir [Chalmers, 1992; Johnson v.d, 1992; Canudas v.d, 1987].

Yarıiletken ve mikrodnetleyici alanında meydana gelen hızlı gelişmeler sonucunda elektrik motorlarının kontrolü kolaylaşmıştır. Günümüzde, motorların hız kontrolünün mekanik dişliler yerine, gelişmiş kontrol sistemleri ile yapılması tercih edilmektedir. Bu sistemler sadece motorun hızını değil, motorun dinamik performansını da iyileştirerek sürekli durum karakteristiklerini de kontrol etmektedir.

Endüstride kullanılan birçok iş makinesi hız ve konum kontrolü gerektirdiği dikkate alındığında, DC motorlar bazı uygulamalarda tercih edilmesinin nedeni hız ve konum kontrollerinin kolay bir şekilde yapılabilmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca AC gerilimin bulunmadığı otomobil gibi araçlarda da DC motorlar tercih edilmektedir.

Daha önceleri DC motorların hız kontrolleri analog devre elemanları ile gerçekleştirildiğinden, motor sürücü devreleri oldukça karmaşık bir yapıya sahip idi. Yarıiletken anahtarlama elemanlarındaki gelişmeler, mikrodnetleyicilerin AC ve DC hız sürücülerinde kullanımını arttırmıştır. Daha az yer kaplayan, kolay bakım gerektiren, daha ucuz ve genişletilmiş kontrol özelliklerine sahip motor sürücüleri geliştirilmiştir [Davis v.d, 1992].

DC motorların hız kontrolünde kullanılan sürücü devrenin yanı sıra kontrolörün de önemi oldukça fazladır. DC motorların hızı yüke bağlı olarak değiştiğinden, sabit hız uygulamalarında açık çevrim kontrolü istenilen bir yöntem değildir. Bundan dolayı, DC motor hız kontrolünde kapalı çevrim kontrolü tercih edilir. Temel olarak, bir kapalı çevrim hız kontrolünü gerçekleştirmek için motor hızını geribeslemek gerekir. Motordan ölçülen hız bilgisi bir kontrolörden geçirilerek, motor için gerekli olan gerilim büyüklüğü hesaplanır ve sürücü devre yardımı ile motora uygulanır. Motorun hız bilgisini mikrodnetleyiciye gönderebilmek için bazı ek ünitelere ihtiyaç duyulur. Encoder veya takogeneratör kullanılarak, motor hızı ile mikrodnetleyici arasında bağlantı kurulur.

Motora uygulanacak gerilimi ayarlayabilmek için darbe genişlik modülasyon (DGM) tekniği kullanılabilir. Motora uygulanmak istenen gerilim değeri DGM 'nin görev periyodunun ayarlanmasıyla sağlanır. Tüm bunları analog veya dijital olarak gerçekleştirmek mümkündür. Ancak dijital olarak gerçekleştirildiğinde sistem, daha esnek bir yapı kazanmaktadır. Bu sebepten dolayı, bu çalışmada DGM sinyali mikrodnetleyici yardımı ile üretilmiştir. Elde

edilen DGM sinyalinin görev periyodunun ayarlanabilir özelliğinden faydalanarak tristör, transistör, GTO, MOSFET veya IGBT gibi yarıiletken elemanlarının kontrol girişlerine uygulanarak kontrollü bir DC kaynak yapılabilir. DC motoru dört-bölgeli çalıştırabilmek için gerekli olan sürücü devre ise, esasında dört-bölgeli bir kıyıcı devredir. Motor kaynak açısından dinamik bir yük olduğu için, kullanılacak yarıiletken anahtarların uygun seçilmesi gerekmektedir. Anahtar seçimi yapılırken motor akımı ve gerilimi göz önüne alınmalıdır. Motorun dinamik bir yük olmasından dolayı, anahtarlar üzerinde oluşabilecek geçici durumların önceden iyi bilinmesi gerekmektedir. Motor akımını taşıyabilecek özellikte ve DGM frekansına hızlı cevap verebilecek uygun bir anahtar seçilmelidir. Bundan dolayı, DC motor kontrolünde kullanılması uygun olan yarıiletken anahtarlardan biri IGBT 'dir. Bu çalışmada yarıiletken IGBT anahtarlar kullanılarak, H-köprü kıyıcı devresi gerçekleştirilmiştir.

DC motorun hız ve hız yönü kontrolünün gerçekleştirilebilmesi için, kullanıcıdan veya sistemden gelen referans hız ve yön bilgisinin kontrol edilmesi gerekir. Bundan dolayı, bilgi girişini kontrol etmek amacıyla kontrolör işlevini yapan mikrodenetleyicinin girişleri kullanılabilir. Aynı zamanda referans girişlerin gözlemlenmesi açısından bilgi ekranına ihtiyaç duyulur. Bu ihtiyacı karşılayabilmek için mikrodenetleyici ile uyumlu çalışabilecek bir ekran ara yüzüne gerek duyulur. Bu çalışmada mikrodenetleyiciyle paralel çalışan bir LCD ekran kullanılmıştır.

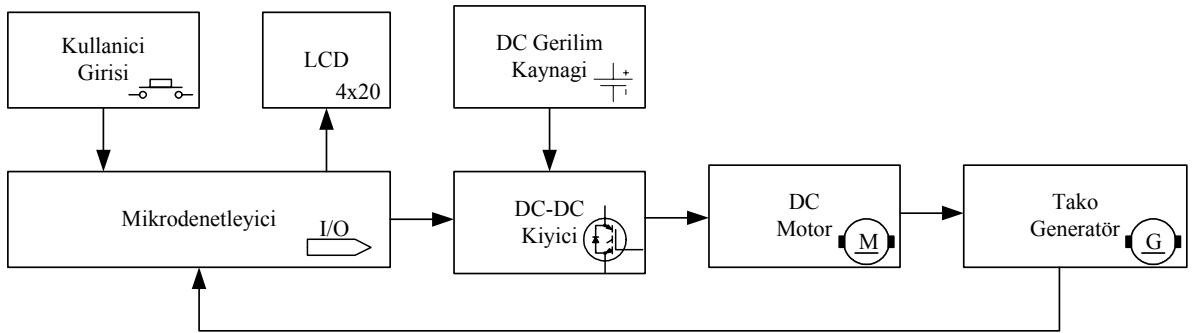
Motor kontrolünde, kontrolör ve motor sürücü devresi birbirinden elektriksel olarak yalıtılmış olması gerekmektedir. Bu sayede, sürücü kısmında oluşabilecek bir arızadan dolayı kontrolör tarafının etkilenmesi önlenir. Ayrıca, IGBT 'lerin kapı (gate) girişlerine kontrol sinyali uygulanırken, H-köprü kıyıcı devresini oluşturan IGBT 'lerin sıfır noktaları birbirinden yalıtılmış olması gerekmektedir. Emiter uçları birbirine bağlı olan IGBT 'lerin sıfır noktaları aynıdır. Bu çalışmada her bir sıfır noktası için farklı bir kaynak oluşturularak ve kontrolörü bu kaynakların sıfır noktalarından ayırabilmek için Opto-Coupler 'lar kullanılmıştır.

Bu çalışmada, DC motorun basit yapılı ve akımı ile manyetik alanı arasındaki ilişkinin bağımsız olma özelliklerinden faydalanılarak, PIC mikrodenetleyicisi yardımı ile motorun hız ve yön kontrolü gerçekleştirilmiştir. PIC mikrodenetleyici her ne kadar sayısal sinyal işlemci (DSP) kadar hızlı işlem yapabilme kapasitesine sahip değilse de birçok özelliğe sahiptir. Bu nedenle, DC motor kontrolü gibi uygulamalarda kullanıldığında kontrol sisteminin maliyeti azaltılabilmektedir.

PIC mikrodenetleyicilerin, geleneksel mikroişlemcilere göre üstünlükleri oldukça fazladır. Mikroişlemci ile kontrol edilen bir sistemde, mikroişlemcinin yanı sıra RAM, ROM veya EPROM gibi hafızalar, I/O giriş çıkış birimi ve buna benzer birçok üniteler kullanılmak zorundadır. Bu sistemin tasarlanması ve yapımı zordur, ayrıca maliyeti de yüksektir. PIC

mikrodenetleyicilerin bir sistemi denetleyebilmesi için yalnızca bir mikrodenetleyici ve osilatör devresi yeterlidir. Sistemde gerekli olan hafıza birimlerinin ve I/O birimlerinin mikrodenetleyici içinde tümdevre halinde bulunması en önemli avantajlarından. PIC mikrodenetleyicinin bu özelliklerinin yanı sıra fiyatının da ucuz olması, DC motor kontrolünde avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen DC motor hız kontrolünün blok şeması Şekil 1.1 'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, kullanıcı tarafından girilen referans ve tako generatörün ölçtüğü hız bilgileri PIC mikrodenetleyicide karşılaştırıldıktan ve PI kontrolöründen geçirildikten sonra, DGM tekniğiyle üretilen H-köprü kiyıcı devresindeki IGBT yarıiletken anahtarların kontrol sinyalleri yardımıyla sabit mıknatıslı DC motorun hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ayrıca DC motor sürücü sisteminin Matlab/Simulink [MathWorks Inc.] ile benzetimi yapılmış, elde edilen benzetim sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmış ve benzer sonuçların elde edildiği gösterilmiştir.



Şekil 1.1 PIC mikrodenetleyici ile DC motor kontrolü blok şeması.

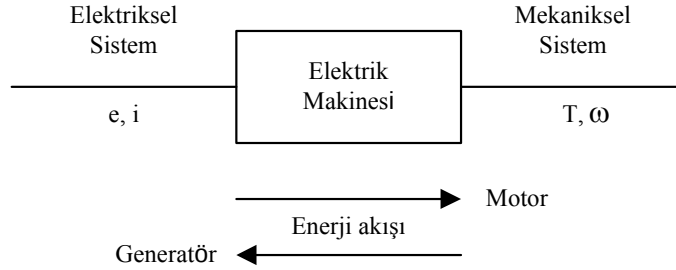
2.DC MOTORLAR ve HIZ KONTROLÜ

2.1 DC Motorlar

DC makineler de indüksiyon ve senkron makineler gibi elektromekanik enerji dönüşümü için kullanılmaktadır. Bu makineler elektrik enerjisini mekanik enerjiye veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürken Faraday Yasası gereği aşağıdaki iki elektromanyetik olay meydana gelmektedir:

- Bir iletken manyetik alan içinde hareket etmesiyle iletkende gerilim indüklenir (Generatör Kuralı).
- Akım taşıyan bir iletken manyetik alan içine konulduğunda iletkende mekanik bir güç oluşur (Motor Kuralı).

Makinede elektrik enerjisi mekanik enerjiye veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürken, bu iki etki eşzamanlı meydana gelir. Motor, manyetik alan içine yerleştirilmiş ve akım taşıyan iletkenlerden oluşan bir elektromekanik sistemdir. Bu durumda motorun her bir iletkeninde bir güç meydana gelir. Eğer iletkenlerin konumu ve yapısı dönmeye uygun ise, bir elektromanyetik moment oluşur. Bu moment ile rotorun dönmesi sağlanır. Generatör çalışmada ise, iletkenler manyetik alan içerisinde döndürülür ve her bir iletkeninde gerilim indüklenir. Şekil 2.1 'de görüldüğü gibi elektrik makinesi, enerji akışının yönüne göre adlandırılır.

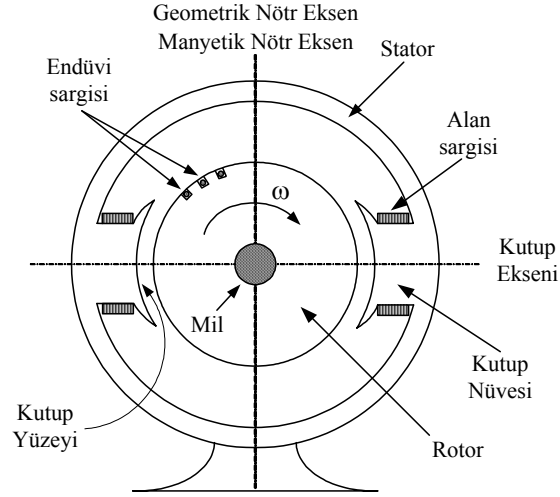


Şekil 2.1 Elektromekanik enerji dönüşümü.

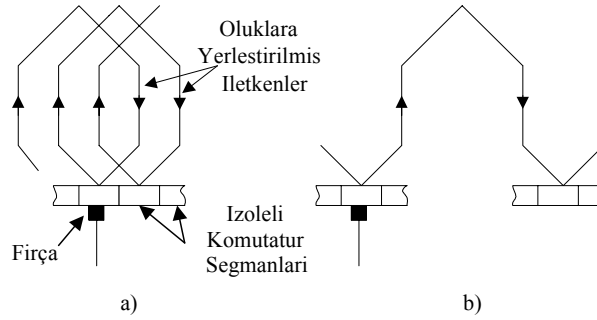
DC makinenin bazı önemli parçaları ve fiziksel özellikleri Şekil 2.2 'de verilmiştir. Manyetik alan sargıları statora yerleştirilmiştir ve alan kutupları gerekli manyetik akıyı sağlamaktadır. Bazı makinelerde aynı kutup üzerinde birkaç alan sargısı bulunabilir. Bu montajı sağlamak amacıyla kutup nüvesi ince sac levhalar halinde yapılır. Endüvi sargısına yakın olmasından dolayı, kutup ayaklarının da laminasyonlu olması gerekir. Endüvi sargısının içinde bulunduğu endüvi nüvesi genellikle rotor üzerinde bulunur ve ince sac levhalardan yapılır. Endüvi sargısındaki enerjiyi dışarı almak veya endüvi sargısına enerji vermek için kullanılan komütatör, birbirlerinden mika ile izole edilmiş sert bakır parçalardan imal edilir. Şekil 2.3 'te

görüldüğü gibi endüvi sargısı komutatóre bağıdır ve komutatór üzerinde bulunan karbon fırçalar sayesinde elektriksel bağılantı kurulur. Endüvi sargısı, enerjiyi taşıyan sargıdır.

Endüvi sargısı Şekil 2.3 'te verildiğı gibi paralel veya seri sarımlı yapılmaktadır. Endüvi sargısı, seri ve paralel sarım yöntemlerinin farklı birleşimleri ile de sarılabilir. [Nasar, 1981]



Şekil 2.2 DC makinede bazı kısım ve elemanlar.



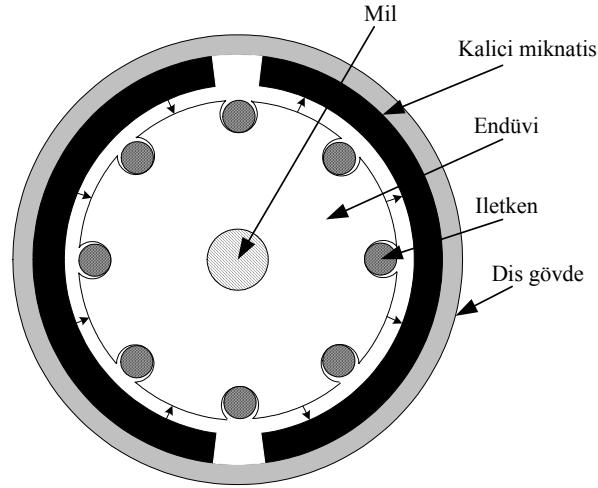
Şekil 2.3 a) Paralel, b) Seri Endüvi sarım türleri.

2.2 Sabit Mıknatıslı DC Motor (SMDCM)

Sabit mıknatıs malzemelerinde meydana gelen yeni gelişmeler, sabit mıknatıslı motorları DC şönt motorların yerini alacak aday konumuna getirmiştir. Sabit mıknatıslı DC motorlarda alan kutupları sabit mıknatıslardan oluşmaktadır. Sabit mıknatıslı DC motorlar (SMDCM) 75 beygir gücüne kadar tasarlanmasına karşın ekonomik nedenlerden dolayı çoğu sabit mıknatıslı DC motor küçük güçtedir. SMDCM'ler birçok farklı konfigürasyonlar ve kategorilerde olabilirler. SMDCM'lerde klasik DC makinelerde kullanılan alan sargıları yerine sabit mıknatıslar bulunmaktadır. Sabit mıknatıslar, elektrik makinelerine yapı bakımından önemli faydalar sağlamaktadır. Bunların başında, makineye gerekli olan manyetik alanı üretmek

için harici bir uyarıtım kaynağına olan ihtiyaç ve böylece uyarıtımdan kaynaklanan güç kayıpları ortadan kalkmaktadır. Sabit mıknatıslı makinelerde alan sargıları olmadığı için, serbest uyarıtımlı emsallerine göre daha yüksek verime sahiptirler ve daha az malzeme kullanıldığı için daha az hacim kaplayarak daha ucuza mal edilebilir.

SMDCM'ler bahsedilen avantajlarının yanında bazı dezavantajlara da sahiptirler. Bunlar, motor sargılarında oluşabilecek aşırı akımların veya aşırı ısınmanın sonucu sabit mıknatısıyetin kaybolma riski ve anma hızının üzerindeki çalışmalarda alan zayıflatmasının uygulanamamasıdır. Endüvi reaksiyonunun kutup alanını zayıflatma etkisi, motor fren çalışmasında dururken en yüksek değerine ulaşır. SMDCM tasarlanırken, ekonomik olması da dikkate alınarak, endüvi reaksiyonunun olumsuz etkisi en aza indirgenebilir.

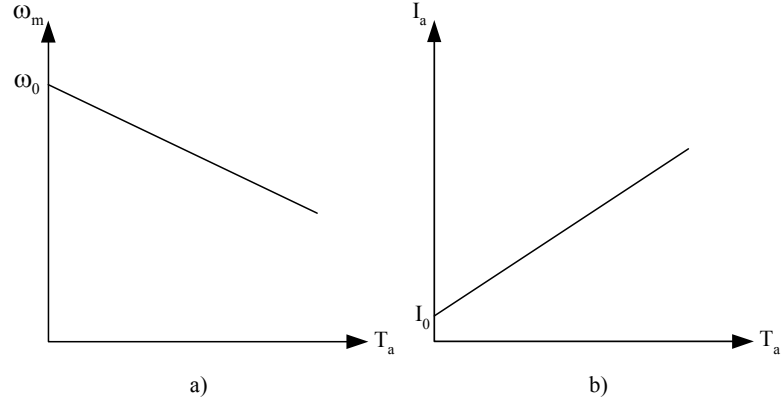


Şekil 2.4 SMDC motorun yapısı.

Şekil 2.4 'te sabit mıknatıslı bir DC motorun yapısı gösterilmiştir. Motorun rotoru, üzerinde komutatr ve fırçaların yer aldığı geleneksel DC motorlarda bulunan endüviden oluşmaktadır. Motorun uyarıtım kısmı, klasik serbest uyarıtımlı ve çıkık kutuplu yapıdan farklıdır. Sabit mıknatıs kutupları, dış gövde içine monte edildikleri için düzgün bir stator yapısı meydana gelmektedir.

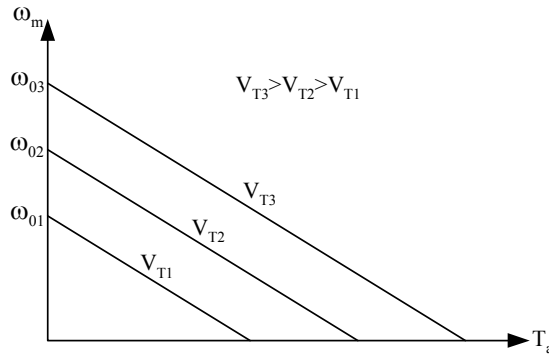
Şekil 2.4 'te oklar mıknatıs yönünü göstermektedir. Bu motorlarda dış gövdenin iki görevi vardır. Birincisi mıknatısın manyetik alanına dönüş yolu sağlamak, ikincisi mıknatısları mekanik olarak korumaktır. Geleneksel DC motorlarda kutup alanı alan sargısı akımı tarafından sağlandığı için sargı akımı, kontrol edilerek kutup manyetik alanı kontrol edilebilir. SMDC motorlarda ise kutup alanı sabit mıknatıs tarafından sağlandığı için, alan kontrolü mümkün değildir.

SMDC motorda kutup alanı sabit olduğu için hız-moment ve akım-moment karakteristikleri Şekil 2.5 'te verildiği gibi doğrusaldır.



Şekil 2.5 SMDC motorun a) Hız-moment, b) Akım-moment karakteristikleri.

SMDC motorun hız-moment karakteristiği ya kaynak gerilimi ya da endüvi devresi direnci değiştirilerek kontrol edilebilir. Motoru besleyen kaynak gerilimi değiştirildiği takdirde motorun boşa çalışma hızı (ω_0) değişir ancak, hız-moment karakteristiğinin eğimi değişmemektedir. Farklı kaynak gerilimleri için elde edilen hız-moment karakteristiklerinin eğimleri, Şekil 2.6 'da görüldüğü gibi aynıdır. Ayrıca kullanılan sabit mıknatısın hacmi değiştirilirse veya yerine aynı hacimde farklı akı yoğunluğuna sahip başka mıknatıs malzeme kullanılırsa, motor için birçok farklı hız-moment karakteristiği elde edilebilir.



Şekil 2.6 Farklı kaynak gerilimleri için SMDC motorun hız-moment karakteristikleri.

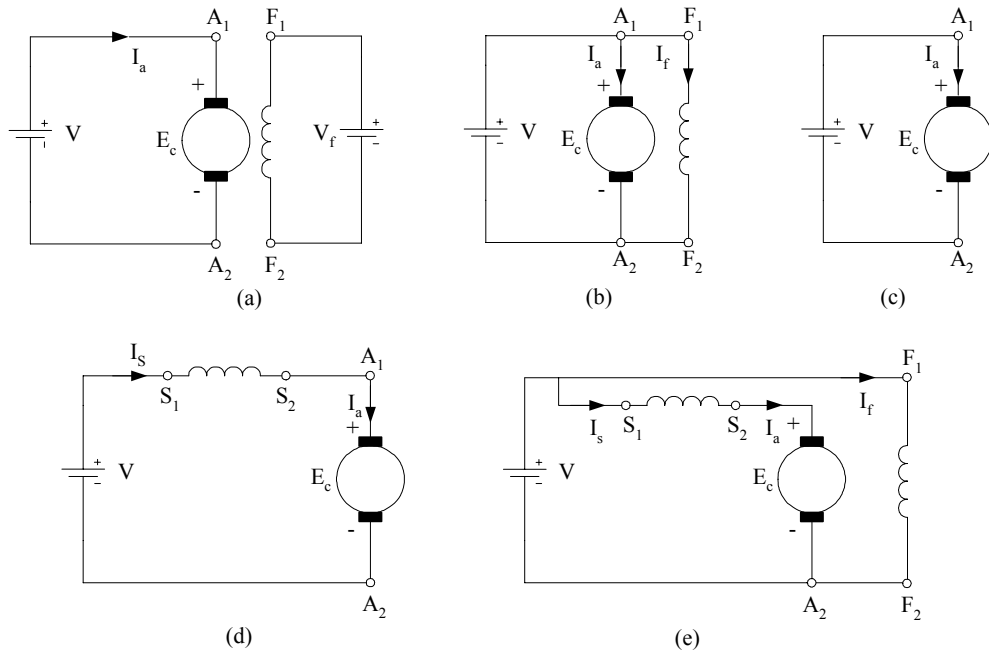
SMDC motorlarda endüvi reaksiyonunun etkisini azaltmak için hava aralığı nispeten daha geniş yapılır. Endüvi reaksiyonu etkisi endüvi akımıyla orantılıdır. Sıcaklık artarken sabit mıknatısların mıknatısiyet değeri azaldığı için, SMDC motorlar tasarlanırken sıcaklık etkisi de dikkate alınmaktadır.

SMDC motorları, otomobil endüstrisinde, kalorifer fanlarında, cam sileceklerinde ve koltuk ayarı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer uygulama yerleri olarak da doğrultulmuş ac ve batarya ile çalışan oyma bıçakları, diş fırçaları, elektrikli traş makineleri, el ve ev aletleri, oyuncaklar sayılabilir [Bal, 2001].

2.3 DC Motor Devre Diyagramları

DC motor sürücüleri iyi bir hız kontrolü gerektiren yerlerin yanı sıra ayrıca sık sık kalkış, frenleme ve yön değiştirme gerektiren uygulamalarda da kullanılır. Bu uygulamalardan bazıları kâğıt makineleri, maden deliciler, makine aletleri ve çekicilerdir.

DC motorların genel devre diyagramları Şekil 2.7 'de gösterildiği gibidir. Serbest uyarımlı motorda alan ve endüvi gerilimi birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilir. Şönt motorda ise alan ve endüvi ortak bir kaynağa bağlıdır. Bu nedenle, alan akımı veya endüvi gerilimini bağımsız bir şekilde kontrol edebilmek için alan ya da endüvi devresine bir reosta direnç eklenebilir. Fakat bu verimli bir yöntem değildir. Seri motorda alan akımı ve endüvi akımı aynı olduğundan, uyarma alanı endüvi akımının bir fonksiyonudur. Kompunt motorda, seri alanın manyetomotor kuvveti (MMK) endüvi akımının bir fonksiyonudur ve şönt alanın MMK 'sı ile aynı yöndedir.



Şekil 2.7 a) Serbest uyarımlı, b) Şönt uyarımlı, c) Sabit mıknatıslı, d) Seri uyarımlı, e) Kompunt uyarımlı DC motorların genel devre diyagramları.

2.4 Sürekli Durumda Hız Moment İlişkisi

Sürekli durumda çalışan bir DC motorun eşdeğer devresi Şekil 2.8 'de verilmektedir. Endüvi devresi direnci R_a ; serbest ve şönt uyarımlı motorlarda endüvi sargısı direncine, seri ve kompunt uyarımlı motorlarda ise seri alan sargısının direnci ile endüvi sargısı direncinin toplamına eşittir. Sürekli durumda DC motorun temel denklemleri;

$$E_c = k_m \phi \omega_m \quad (2.1)$$

$$V = E_c + I_a R_a \quad (2.2)$$

$$T = k_m \phi I_a \quad (2.3)$$

şeklindedir. Burada;

ϕ : Kutup akısı, (Wb)

I_a : Endüvi akımı, (A)

V : Besleme gerilimi, (V)

ω_m : Endüvi hızı, (rad/s)

T : Motorun ürettiği moment, (N.m)

k_m : Konstrüksiyon (imalat) sabiti

E_c : Zıt e.m.k, (V)

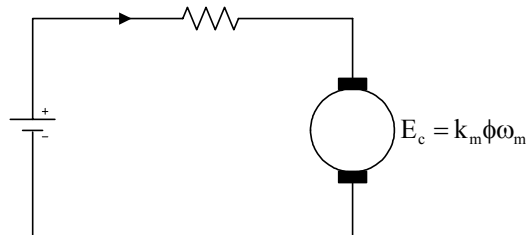
olarak tanımlanır.

Denklem (2.1), (2.2) ve (2.3) 'ten;

$$\omega_m = \frac{V}{k_m \phi} - \frac{R_a}{k_m \phi} I_a = \frac{V}{k_m \phi} - \frac{R_a}{(k_m \phi)^2} T \quad (2.4)$$

elde edilir.

Denklem (2.1) 'den denklem (2.4) 'e kadar olan ifadeler serbest, şönt, seri veya kompunt uyarımlı motorlara uygulanabilir.



Şekil 2.8 Sürekli durumda DC motorun endüvi eşdeğer devresi.

Serbest uyarımlı motorlarda eğer alan akımı sabit tutulursa manyetik akı denklem (2.3) 'teki moment ifadesindeki gibi sabit kabul edilebilir. Bu nedenle;

$$k_m \phi = C \quad (2.5)$$

yazılabilir. Denklem (2.5) 'i denklem (2.1), (2.3) ve (2.4) 'te yerine yazarsak;

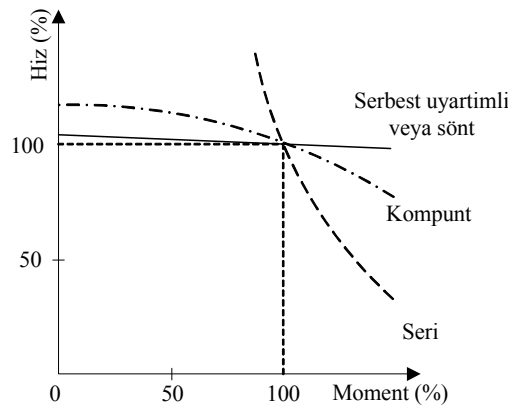
$$T = C I_a \quad (2.6)$$

$$E_c = C \omega_m \quad (2.7)$$

$$\omega_m = \frac{V}{C} - \frac{R_a}{C} I_a = \frac{V}{C} - \frac{R_a}{C^2} T \quad (2.8)$$

sonuçları ortaya çıkar.

Böylece, Şekil 2.9 'da gösterildiği gibi serbest uyarımlı motorun hız moment karakteristiği doğrusal olur. Boşta çalışma hızı, endüvi gerilimi ve alan uyarım değerleri ile hesaplanabilir. Denklem (2.8) 'den görüldüğü gibi moment artarken hız azalır ve hız regülasyonu endüvi devresi direncine bağlıdır. Pratikte endüvi reaksiyonundan dolayı alan akımı sabit tutulmasına rağmen, moment artarken akı azalır. Bu nedenle hızda meydana gelecek azalma, denklem (2.8) 'de verilen hızdaki azalmadan daha az olacaktır. Yüksek yük momentlerinde alan zayıflamasından dolayı makine düzensiz çalışmaya yönelebilir. Bu durumda ilave alan sargısı, endüvi reaksiyonunun ters manyetik alanı bozucu etkisini azaltmaya çalışacaktır.



Şekil 2.9 DC motor hız-moment karakteristikleri.

Serbest uyarımlı ve orta büyüklükte bir motor için, yüksüz durumdan tam yük durumuna doğru hızdaki düşüş yaklaşık %5 kadardır. Serbest uyarımlı motorlar iyi hız regülasyonu ve değişken hız ayarı gerektiren uygulamalarda kullanılırlar.

Seri motorlardaki manyetik akı, endüvi akımının bir fonksiyonudur. Manyetik doyuma ulaşılmadığı bölgede ϕ , I_a ile doğru orantılı olarak göz önüne alınabilir.

$$\phi = k_f I_a \quad (2.9)$$

Denklem (2.9) denklem (2.1), (2.3) ve (2.4) 'te yerine konulursa;

$$T = k_m k_f I_a^2 \quad (2.10)$$

$$\omega_m = \frac{V}{k_m k_f I_a} - \frac{R_a}{k_m k_f} \quad (2.11)$$

$$\omega_m = \frac{V}{\sqrt{k_m k_f}} \frac{1}{\sqrt{T}} - \frac{R_a}{k_m k_f} \quad (2.12)$$

Şekil 2.9 'da gösterildiği gibi seri motor momentindeki artış, endüvi akımının ve bu yüzden akımın artmasına neden olur. Bu nedenle, indüklenen gerilim ile uygulanan gerilim arasında bir denge oluşuncaya kadar hız düşmelidir. Bu yüzden karakteristik eğride yüksek bir düşüş meydana gelmektedir.

Seri motorları yüksek kalkış momentine ihtiyaç duyulan uygulamalarda ve yüksek moment gerektiren yükler için kullanmak uygundur. Bu nedenle serbest uyarımlı motor ile karşılaştırıldığında, momentteki aynı artış miktarı için motor akımında daha az oranda artış meydana gelir. Böylece, yüksek moment gerektiren yükler sürülürken kaynağın aşırı yüklenmesi önlenir ve motorun aşırı yük altındaki sıcaklığı uygun bir değerde tutulur.

Denklem (2.12) 'ye göre hız, momentin karekökü ile ters orantılıdır. Bu nedenle, moment düşerken hız artar. Genellikle bir DC motorun mekanik aksamı, motor hızının nominal hızın iki katına kadar çıkmasına müsaade eder. Seri motorlar, nominal hızın iki katını aşan uygulamalarda motor momentinin çok düşük olmasından dolayı tercih edilmezler. Seri motorlar sık sık kalkış gerektiren ve aşırı yük momentlerinin sürülmesi gerektiği yerlerde, aynı zamanda momentin güvenilir minimum bir değer altına düşmediği uygulamalarda kullanılabilir.

Şekil 2.9 'da gösterildiği gibi kompunt motorun hız-moment karakteristiğine göre, yüksüz durumdaki hız, şönt alanının büyüklüğüne ve hızdaki azalma ise seri alanın büyüklüğüne bağlıdır. Kompunt motorlar, seri motorlara benzer şekilde düşme karakteristiğine ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılırlar ve yüksüz durumdaki hız güvenli bir değerle sınırlıdır. Kaldıraçlar, vinçler ve buna benzer uygulamalarda tercih edilirler. Ayrıca, geniş bir aralıkta yük değişimi gerektiren uygulamalarda kullanılırlar.

Şekil 2.9 'da gösterilen karakteristikler doğal hız-moment karakteristikleri olarak adlandırılırlar. Bu karakteristikler, motorun nominal gerilim ve akı değerlerinde ve endüvi veya alan devrelerine harici bir direnç ilave olmadığı durumda çalışırken elde edilirler [Ryff, 1988].

2.5 DC Motor Hız Kontrol Yöntemleri

DC motorun hız-moment ilişkisi denklem (2.4) 'te gösterilmiştir. Bu denklemde hız, aşağıda verilen üç yöntemden biri ile kontrol edilebilir.

- Motora uygulanan gerilim değiştirilerek,
- Alan sargısının oluşturduğu manyetik alan değiştirilerek,
- Endüvi devresine direnç ilave edilerek.

Bu üç yöntemden en çok kullanılanı, motora uygulanan gerilim değiştirilerek yapılan hız kontrol yöntemidir. Bu hız kontrol yönteminde motorun boşa çalışma hızı da kontrol edilerek, farklı gerilim değerleri için motorun hız-moment karakteristiğinin eğimi değişmemektedir. Bununla birlikte, motorun hızı ancak sıfır ile anma hızı arasındaki bölgede ayarlanabilmektedir. Endüvi devresine direnç ilave edilerek DC motorun hız kontrolü yapılacak olursa birçok dezavantajlar ortaya çıkmaktadır. Ancak, bu yöntem basit ve ucuz bir yöntemdir. İlave dirençten dolayı bu yöntemin bazı dezavantajları I^2R kayıpları, boşa ve hafif yük altında motor hızının ancak çok dar bir aralıkta değiştirilebilmesi, anma hızın üzerine motor hızının ayarlanamaması ve endüvi devresine ilave edilen direnç değeri arttıkça motorun hız-moment karakteristiği eğiminin büyük ölçüde artması nedeniyle motor hızının anma hızın çok altında bir değere ayarlanamamasıdır. Sadece alan sargısının oluşturduğu manyetik alan değiştirilerek motorun hız kontrolü yapılacak olursa, motorun hızı ancak anma hızın üzerinde bazı hız değerlerine ayarlanabilir ve bu durumda motorun sürdüğü yük sabit kalacak olursa motor aşırı yüklenmektedir. Bundan dolayı da motorun aşırı yüklenmemesi için özel bir yükü sürmesi gerekir.

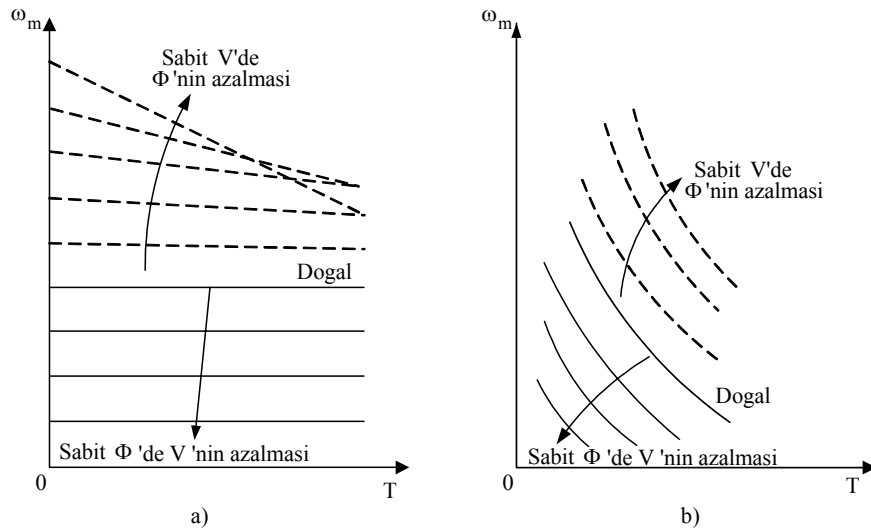
2.5.1 Motor Geriliminin Değiştirilmesi ile Yapılan Hız Kontrolü

Sürekli durumda çalışan serbest veya seri uyartımlı bir DC motorun gerilimi azalır, Şekil 2.8 'den görülebileceği gibi endüvi akımı ve buna bağlı olarak motor momenti azalacaktır. Motor momenti yük momentinden daha az olduğundan, motor hızı ve dolayısıyla zıt emk azalır. Bu azalma, motor momenti yük momentine eşit olana kadar devam eder. Eğer serbest uyartımlı motor gerilimi büyük ölçüde azalır, zıt emk değerinden daha küçük olur. Endüvi akımı yön değiştirilerek motorun, negatif moment üreten bir generatör gibi çalışmasına neden olur. Bu çalışma, zıt emk 'nın, uygulanan gerilime eşit olduğu değeri sağlayan hıza ulaşıncaya kadar

devam eder. Seri motorda uygulanan gerilimde bir azalma olursa, motor generatör gibi çalışmaz ve üretilen moment yük momentinden küçük olduğu için hız azalır.

Diğer taraftan DC motor sürekli durumda çalışırken besleme geriliminde bir artış olursa, denklem (2.2) ve (2.3) 'e göre endüvi akımı ve buna bağlı olarak moment artarak motor hızlanır ve bunun sonucu olarak da emk artar. Sonuç olarak, momentin yük momentine eşit olduğu daha yüksek bir hız değerine ulaşılır. Hızın artması veya azalması durumunda endüvi gerilimindeki değişim, düşük oranda olmalıdır. Endüvi geriliminde büyük oranda bir değişim, endüviden büyük bir akımın akmasına ve bu nedenle komutatörün tahrip olmasına veya ömrünün azalmasına neden olur.

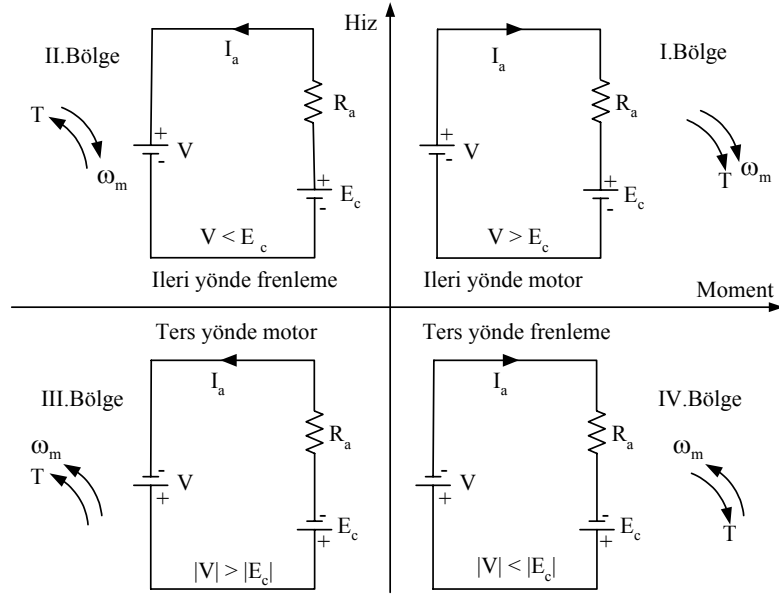
Sabit farklı gerilim değerleri için serbest ve seri uyarımlı DC motorların sürekli durumdaki hız-moment karakteristikleri Şekil 2.10a ve 2.10b 'de gösterilmiştir. Besleme geriliminin azalması ile motor, doğal hız-moment eğrisi ile moment eksenini arasında herhangi bir hız-moment değerinde çalıştırılabilir. Şekil 2.10a 'da görüldüğü gibi serbest uyarımlı DC motor, farklı besleme gerilimi değerinde boşa çalışma hızı da değişir ve sabit farklı besleme gerilimi değerleri için motorun hız-moment karakteristikleri birbirlerine paraleldir. Motor gerilimi anma değerinin üzerine çıkamayacağı için bu hız kontrol yöntemi, motoru sadece doğal hız-moment karakteristiği altındaki bölgede çalıştırmak için kullanılabilir. Bu hız kontrol yönteminin en önemli özelliği, hızdaki değişimin, hız-moment karakteristiğine etki etmemesidir. Motorun bu özelliğinden dolayı, motor sıfır ile anma hızı arasında kontrol edildiği takdirde motor momenti sabit, gücü ise değişken olmaktadır. Bu yöntemi uygulamada kullanılacak kontrollü DC gerilim ise, AC-DC veya DC-DC konverterlerden biri ile elde edilebilir.



Şekil 2.10 Farklı gerilim ve manyetik akı değerlerinde a) Serbest uyarımlı, b) Seri uyarımlı DC motorların hız-moment karakteristikleri.

2.6 Serbest Uyarımlı DC Motorun Dört-Bölgeli Çalışması

Dört-bölgeli konverter sürücüler enerji tasarrufu özelliğinden dolayı, genellikle faydalı frenleme ile çalışırlar. Şekil 2.11 'de farklı bölgelerde çalışma durumları için kaynak gerilimi, zıt emk ve endüvi akımının yönleri gösterilmiştir. V besleme gerilimi, E_c zıt emk ve I_a endüvi akımının yönleri ileri yön motor çalışma bölgesinde (I. Bölge) pozitif kabul edilir. Bu nedenle moment ile hız da bu bölgede pozitifdir.



Şekil 2.11 Dört-Bölgeli çalışmada DC motorun kaynak geriliminin, zıt emk'nın, momentin, hızın ve motor akımının yön gösterimleri.

Motor ileri yönde frenleme bölgesinde (II. Bölge) çalışırken, motorun hız yönü değişmediğinden dolayı zıt emk pozitif kalmaya devam edecektir. Ancak, moment negatif olduğundan enerji akışı yön değiştirir. Bu durumda endüvi akımı ters yönde olmak zorundadır ve kaynak gerilimi V , zıt emk E_c 'den daha küçüktür. Ters yönde motor çalışmada (III. Bölge) ise hız ters yönde olduğundan, zıt emk da ters yönde olur. Momenti negatif ve enerji akışını kaynaktan motora doğru tutmak için, kaynak gerilimi ve endüvi akımı ters yönde olmalıdır ($|V| > |E_c|$). Ters yönde frenleme bölgesinde (IV. Bölge) zıt emk negatif ancak moment pozitif olduğu için enerji akışı motordan kaynağa doğru ve endüvi akımı I_a pozitif, besleme gerilimi V ise negatif alınmalıdır ($|V| < |E_c|$). Farklı dört çalışma bölgesi için kaynak gerilimi ve akımının yönleri Tablo 2.1 'de özetlenmiştir.

Tablo 2.1 Dört çalışma bölgesi için kaynak gerilimi ve akım yönleri

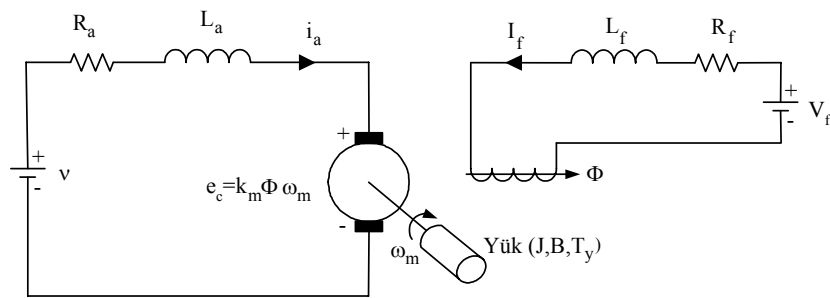
Çalışma Bölgesi	Kaynak Gerilimi	Kaynak Akımı
İleri yönde motor (I.Bölge)	+	+
İleri yönde frenleme (II. Bölge)	+	-
Ters yönde motor (III. Bölge)	-	-
Ters yönde frenleme (IV. Bölge)	-	+

İleri yönde motor ve frenleme (I. ve II. Bölge) içeren bir çalışma için, pozitif gerilimli ve her iki yönde akım taşıyabilen bir kaynağa ihtiyaç duyulduğu Tablo 2.1 'den anlaşılmaktadır. İleri yönde motor ve ters yönde frenleme (I. ve IV. Bölge) içeren bir çalışma için kaynak, her iki yönde de gerilim sağlayabilmelidir. Sonuç olarak kaynak, 4 bölgeli çalışmada her iki yönde akım taşıyabilmeli ve her iki yönde gerilim verebilmelidir.

2.7 Serbest Uyarımlı DC Motorun Transfer Fonksiyonu

Kararlılık analizi ve kapalı çevrim sürücü tasarımı için transfer fonksiyonu uygun bir şekilde olmalıdır. Kapalı çevrimli DC sürücüler, motorun manyetik alanı veya gerilimi değiştirilerek hız ve konum kontrolünde kullanılabilir. Gerilim ve manyetik alan kontrollü serbest uyarımlı DC motorun transfer fonksiyonunun, kararlılık analizi ve kapalı çevrim sürücü tasarımı için uygun şekilde türetilmesi gerekir.

Serbest uyarımlı bir DC motorun dinamik modeli Şekil 2.12 'de verilmiştir. Kaynak gerilimi, endüvi akımı, zıt emk ve moment sırasıyla v , i_a , e_c ve T_y ile temsil edilmiştir. B ve J terimleri sırasıyla motor miline bağlı olan motor yük sisteminin sürtünme katsayısı ve atalet momentini göstermektedir.



Şekil 2.12 Serbest uyarımlı DC motorun dinamik eşdeğer devresi.

Dinamik şartlar altında endüvi devresinin gerilim eşitliği aşağıdaki gibidir.

$$v = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + C \omega_m \quad (2.13)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T - T_y - B\omega_m \quad (2.14)$$

Bundan başka,

$$T = Ci_a \quad (2.15)$$

Denklem (2.15) denklem (2.14) 'te yerine yazılırsa,

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = Ci_a - T_y - B\omega_m \quad (2.16)$$

elde edilir. Başlangıç şartları sıfır kabul edilerek, denklem (2.13) ve (2.16) 'ya Laplace dönüşümü uygulanırsa,

$$sL_a I_a(s) + R_a I_a(s) + C\omega_m(s) = V(s) \quad (2.17)$$

$$sJ\omega_m(s) + B\omega_m(s) + T_y(s) = Ci_a(s) \quad (2.18)$$

denklemleri ortaya çıkar. Burada, $I_a(s)$, $V(s)$, $\omega_m(s)$ ve $T_y(s)$; sırası ile i_a , v , ω_m ve T_y değişkenlerinin Laplace dönüşümleridir. Denklem (2.17) 'den;

$$I_a(s) = \frac{V(s)}{R_a(1+s\tau_a)} - \frac{C}{R_a} \frac{\omega_m(s)}{(1+s\tau_a)} = \frac{V(s) - C\omega_m(s)}{R_a(1+s\tau_a)} \quad (2.19)$$

bulunur. Burada endüvi devresi zaman sabiti τ_a ;

$$\tau_a = L_a / R_a \quad (2.20)$$

ile ifade edilir. Denklem (2.18) 'den,

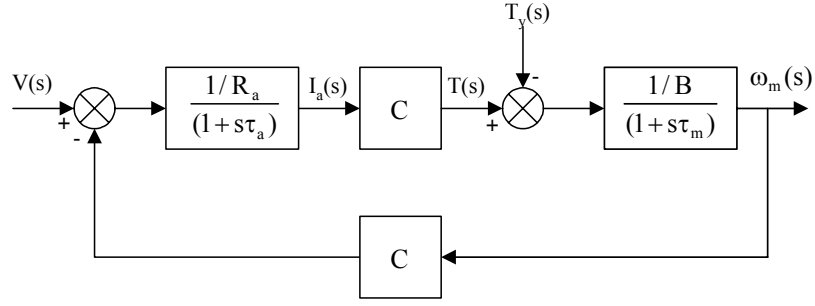
$$\omega_m(s) = \frac{(C/B)I_a(s)}{(1+s\tau_m)} - \frac{1}{B} \frac{T_y(s)}{(1+s\tau_m)} = \frac{1}{B} \frac{T(s) - T_y(s)}{(1+s\tau_m)} \quad (2.21)$$

bulunur. Burada, motor yük sisteminin mekanik zaman sabiti τ_m ise;

$$\tau_m = J / B \quad (2.22)$$

ile ifade edilir.

Denklem (2.19) ve (2.21) 'den Şekil 2.13 'teki blok diyagramı elde edilir. Şekil 2.13 'te motorun zıt emk 'dan dolayı, doğal hız geri beslemeli ve kapalı çevrimli bir sistem gibi davrandığı görülmektedir. Burada $V(s)$ ve $T_y(s)$ olmak üzere iki giriş bulunmaktadır. Bu iki girişe ait cevapları elde edebilmek için biri $V(s)$ ile diğeri $T_y(s)$ ile ilişkili $\omega_m(s)$ cinsinden iki transfer fonksiyon gereklidir.



Şekil 2.13 Serbest uyarımlı DC motorun blok diyagramı.

Kapalı çevrimli DC konverter sürücü, genellikle hız kontrol çevriminin dışında ve akım kontrol çevriminin içinde çalışır. Bu bakımdan kapalı çevrimli sürücü sistem için transfer fonksiyonu uygun bir şekilde oluşturulmalıdır. $V(s)$ ile $I_a(s)$ ve daha sonra $I_a(s)$ ile $\omega_m(s)$ arasında bir ilişki kurulursa, $V(s)$ ile $\omega_m(s)$ arasında uygun bir transfer fonksiyonu elde edilmiş olacaktır. $T_y=0$ için denklem (2.21) yeniden düzenlenirse;

$$\omega_m(s) = \frac{C_m I_a(s)}{(1 + s\tau_m)} \quad (2.23)$$

ifade elde edilir. Burada $C_m = C / B$ oranı kadardır. Denklem (2.23) denklem (2.19) 'da yerine yazılırsa,

$$\frac{I_a(s)}{V(s)} = \frac{C_{m1}(1 + s\tau_m)}{1 + \tau_{m1}(1 + \tau_a / \tau_m)s + \tau_{m1}\tau_a s^2} \quad (2.24)$$

ortaya çıkar. Burada,

$$\tau_{m1} = JR_a / (BR_a + C^2) \quad (2.25)$$

$$C_{m1} = \frac{B}{BR_a + C^2} \quad (2.26)$$

dir. Denklem (2.24) 'ten,

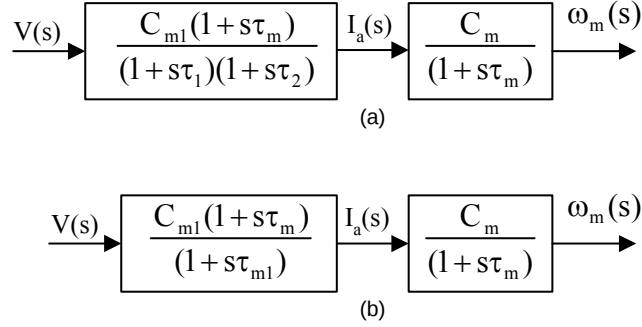
$$\frac{I_a(s)}{V(s)} = \frac{C_{m1}(1 + s\tau_m)}{(1 + s\tau_1) + (1 + s\tau_2)} \quad (2.27)$$

elde edilir. Burada;

$$\frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\tau_a} + \frac{1}{\tau_m} - \sqrt{\left(\frac{1}{\tau_a} + \frac{1}{\tau_m} \right)^2 - \frac{4}{\tau_{m1}\tau_a}} \right] \quad (2.28)$$

$$\frac{1}{\tau_2} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\tau_a} + \frac{1}{\tau_m} + \sqrt{\left(\frac{1}{\tau_a} + \frac{1}{\tau_m} \right)^2 - \frac{4}{\tau_{m1}\tau_a}} \right] \quad (2.29)$$

dir.



Şekil 2.14 Serbest uyarımlı DC motorun basitleştirilmiş a) Tam, b)Yaklaşık blok diyagramları.

Denklem (2.23) ve (2.27) 'den Şekil 2.14a 'daki blok diyagramı elde edilir. τ_1 ve τ_2 zaman sabitleri, birbirinin kompleks eşleniği olabilir. Bu durumda, denklem (2.24) daha uygun bir şekilde yeniden yazılabilir.

$$\frac{I_a(s)}{V(s)} = \frac{C_{m2}(1+s\tau_m)}{s^2 + 2\xi\omega_m s + \omega_m^2} \quad (2.30)$$

Burada;

$$\omega_m^2 = \frac{1}{\tau_a \tau_{m1}} \quad (2.31)$$

$$C_{m2} = \frac{1}{\tau_a \tau_m R_a} \quad (2.32)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\tau_a}{\tau_m} \right) \sqrt{\frac{\tau_{m1}}{\tau_a}} \quad (2.33)$$

dir. Genellikle, $\tau_a \ll \tau_m$ olduğundan denklem (2.24) 'ten;

$$\frac{I_a(s)}{V(s)} = \frac{C_{m1}(1+s\tau_m)}{(1+s\tau_{m1})} \quad (2.34)$$

elde edilir. Denklem (2.23) ve (2.34) 'e ilişkin basitleştirilmiş blok diyagramı Şekil 2.14b 'de gösterilmiştir.

Bazı uygulamalarda yük momenti hızla orantılı olarak değişir. Bu uygulamalarda yük momentinin sürücü performansı üzerindeki etkisi, sürtünme terimi B 'nin göz önüne alınmasıyla gösterilebilir (denklem (2.16)). Eğer yük momenti hızla orantılı değilse $\omega_m(s)$ ve $T_y(s)$ arasında ayrı bir transfer fonksiyonu gerekir. Bu transfer fonksiyonu, Şekil 2.13 'teki blok diyagramının, sistemin diğer blok diyagramlarına bağlanması ile ve referans hızın sıfır alınması ile elde edilir.

2.8 DC Motorun DC-DC Kıyıcı ile Kontrolü

DC-DC kıyıcılar yüksek verimle çalışmaları, hafif ve küçük boyutta olmaları, kontrol esnekliği ve hızlı cevap verebilme özelliklerinin bulunması, aynı zamanda düşük hızlarda faydalı frenleme yapabilmeleri gibi bir takım avantajlarından dolayı DC motor kontrolünde tercih edilirler

Servo uygulamalarda esnek bir şekilde kontrol edilebildiklerinden dolayı, serbest uyarımlı veya sabit mıknatıslı DC motorlar kullanılır. Geçmişte, yük taşımacılığında çoğunlukla seri motorlar kullanılıyordu. Günümüzde ise, bu tip taşımacılıkta serbest uyarımlı DC motor kullanılmaktadır.

Açık veya kapalı çevrimli DC motor kontrolü için kullanılan kıyıcıların kontrollü doğrultuculara göre bazı avantajlarından söz edilebilir. Çıkış gerilimindeki dalgalanma yüksek frekanslı olmasından dolayı, motor endüvi akımındaki dalgalanma daha az ve hız-moment düzleminde süresiz iletim bölgesi daha küçüktür. Endüvi akımındaki dalgalanma az ise makine kayıpları da az olur. Süresiz iletim bölgesindeki küçülme, hız regülasyonunu ve sürücünün geçici durum cevabını iyileştirir. Çıkış gerilimindeki dalgalanmayı yüksek frekansta gerçekleştirmek için genel olarak yüksek darbe sayısına sahip bir doğrultucu kullanmak gerekir. Yüksek sayıda darbeli doğrultucu kullanımı tristörün kullanım faktörünü azaltır. Diğer taraftan bir kıyıcı, oldukça yüksek frekanslarda çalışabilir. Örneğin bir kıyıcıyı, tristörlü konvertörle bile 300 Hz 'de çalıştırmak mümkündür. Tristörlü inverterle frekans 600 Hz 'e çıkarılabilir. Güç transistörleri kullanıldığında çalışma frekansı 2.5 kHz 'den daha fazla olabilir. Düşük güçlü uygulamalarda MOSFET kullanılabilir ve çalışma frekansı 200 kHz 'den fazla olabilir. AC kaynak frekansı 50 Hz iken, doğrultucu çıkış geriliminin ve akımının harmonikleri tek fazlı doğrultucu için 100 Hz ve üç fazlı tam kontrollü doğrultucu durumunda ise 300 Hz 'lik bir değere sahiptir.

2.8.1 Çalışma Prensipleri ve Kontrol Teknikleri

Buck tipi bir kıyıcının devre diyagramı ve sürekli durumdaki dalga şekilleri Şekil 2.15 'te gösterilmiştir. Şekilde doğru gerilim kaynağının (V), kendinden komutasyonlu yarıiletken S anahtarı üzerinden indüktif bir yükü beslediği görülmektedir. Kıyıcı, zorlamalı komutasyon devreli tristör, GTO, güç transistörü, MOSFET ve IGBT gibi yarıiletken anahtarlar kullanılarak yapılabildiğinden dolayı kendinden komutasyonlu yarıiletken anahtar sembolü kullanılmıştır. Anahtar içindeki diyod sembolü akım geçiş yönünü göstermek için kullanılmıştır. D_F diyodu yüke paralel bağlıdır. Yarıiletken S anahtarı, bir T peryodu süresince periyodik olarak çalışır ve $t_{on}=dT$ ($0<d<1$) süresince iletimde kalır. d değişkenine, kıyıcının görev periyodu denilir. Şekil 2.15c 'de I_c kontrol sinyalinin dalga şekli gösterilmiştir. I_c kontrol sinyali, transistörlü kıyıcı için baz akımı ve tristörlü kıyıcının kapı akımıdır. Kıyıcı MOSFET veya IGBT 'li ise, I_c sinyali kapı gerilimidir. Bir kontrol sinyali var iken ve yarıiletken S anahtarı ileri yönde biaslanmış ise ilettime, kontrol sinyali yok iken kesime girecektir.

$0 \leq t \leq dT$ aralığında anahtar iletimde ve yük kaynak gerilimine maruz kalarak yük akımı I_a , I_{a1} 'den I_{a2} 'ye artmaktadır. $dT \leq t \leq T$ aralığında anahtar kesimde ve yük üzerindeki gerilim yaklaşık sıfırdır. Ancak yük indüktansı, D_F diyodu sayesinde I_a akımının yönünü koruyarak I_a akımı, I_{a2} 'den I_{a1} 'e düşmektedir. $0 \leq t \leq dT$ aralığına iletimde çalışma ve $dT \leq t \leq T$ aralığına kesimde çalışma aralığı denilir. D_F diyodu, S anahtarı kesimde iken yük akımı için serbest dolaşım yolu oluşturarak yük akımının dalga şeklini düzenler. Ayrıca, anahtar kesimde iken yük akımının sürekliliğini sağlayarak ani değişimden dolayı anahtar uçlarında meydana gelebilecek geçici bir yüksek gerilimin oluşmasını önler. Kaynak akımı ise sadece iletimde çalışma aralığında akar ve o an için yük akımına eşittir.

Yük geriliminin DC bileşeni veya ortalama değeri V_a ;

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^T V dt = \frac{1}{T} \int_0^{dT} V dt = dV \quad (2.35)$$

ifadesi ile hesaplanır.

d , 0 ve 1 aralığında kontrol edilerek yük geriliminin 0 'dan V 'ye kadar değişimi sağlanabilir. Böylece bir kıyıcı sayesinde sabit bir DC gerilim kaynağından değişken bir DC gerilim elde edilmesi sağlanmış olur.

d görev periyodunu ayarlamak için, S anahtarı çeşitli şekillerde kontrol edilebilir.

- Zaman Oranı Kontrolü (Time Ratio Control, TRC)
- Akım Sınır Kontrolü (Current Limit Control, CLC)

Darbe genişlik kontrolü olarak bilinen TRC 'de, iletim zamanının kıyıcı periyoduna oranı kontrol edilir. TRC aşağıdaki gibi iki farklı şekilde kullanılır.

- Sabit frekanslı TRC: Kıyıcı periyodu T sabit tutulur ve anahtarın iletim süresi, d görev periyodunu kontrol etmek için değiştirilir.
- Değişken frekanslı TRC: Burada d , ya t_{on} sabit T değiştirilerek ya da t_{on} ve T 'nin her ikisi birden değiştirilerek ayarlanabilmektedir.

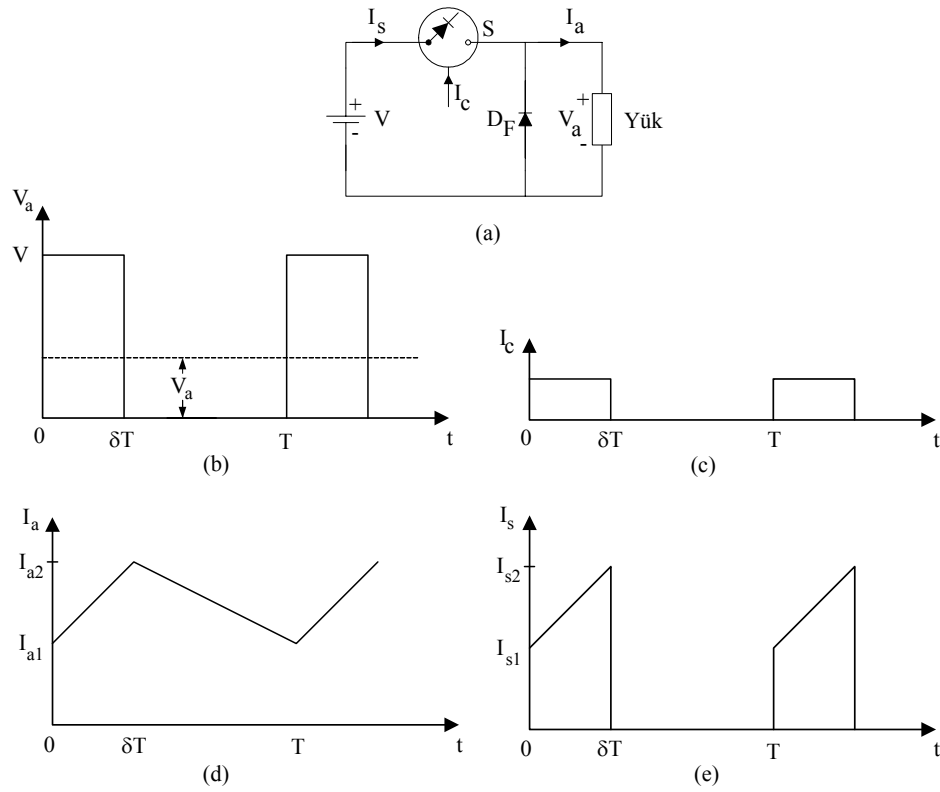
Sabit iletim zamanlı değişken frekanslı kontrolde, düşük çıkış gerilimleri kıyıcı frekansının çok küçük değerlerinde elde edilir. Kıyıcının düşük frekansta çalışması motor performansını olumsuz yönde etkiler. Ayrıca, bir kıyıcının değişken frekanslı olarak çalışması giriş filtresinin tasarlanmasını zorlaştırır. Bundan dolayı, değişken frekans kontrolü nadiren kullanılır.

Akım sınır kontrolünde d , kesin olarak belirlenmiş maksimum ve minimum değerler arasında yük akımının kontrol edilmesi ile dolaylı olarak kontrol edilir. Yük akımı, belirlenen maksimum değere ulaştığında anahtar, yükü kaynaktan ayırır ve akım değeri belirlenen minimum değere ulaşınca yük tekrar kaynağa bağlanır.

Şekil 2.15 'teki dalga şekillerinden aşağıdaki önemli bazı sonuçlar çıkarılabilir;

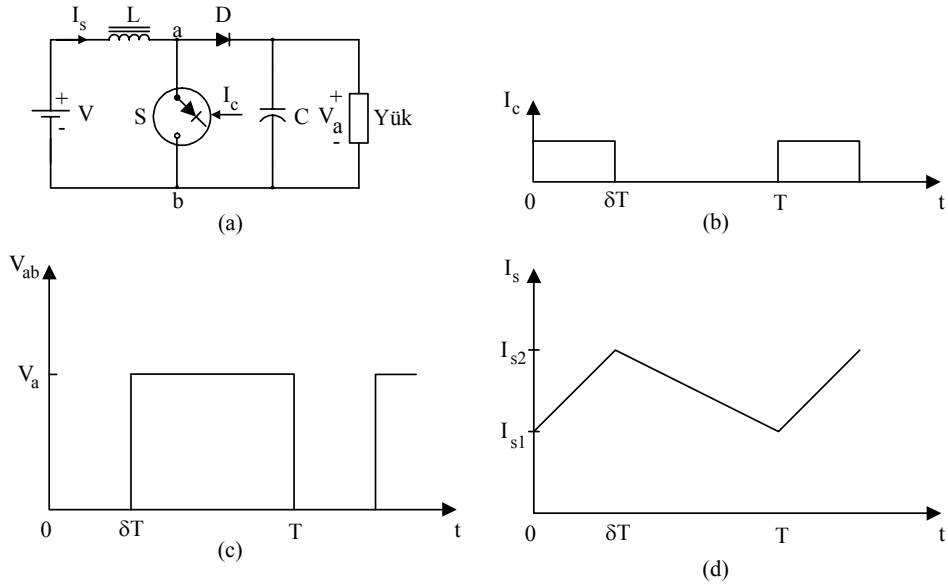
- Kaynak akımı sürekli değildir ve darbeleri şekilde akar. Darbeleri akım, ihtiyaç duyulan giriş gücünün artmasına ve kaynak geriliminin düzensiz çalışmasına neden olur. Kaynak akımının dalga şekli, DC ve AC harmoniklerine ayrılarak incelenebilir. Temel AC harmonik frekansı kıyıcı frekansı ile aynıdır. DC kaynağa bağlanan diğer yükleri etkiledikleri ve iletken boyunca radyo frekans etkileşimlerine neden olduklarından dolayı AC harmonikler istenilmez. Bu nedenle, genellikle kıyıcı ve DC kaynak arasına bir L-C filtresi yerleştirilir. Daha yüksek kıyıcı frekanslarında, harmonikler daha ucuz bir filtre ile uygun seviyelere düşürülebilir. Bundan dolayı, bir kıyıcı mümkün olan en yüksek frekansta çalıştırılmalıdır.
- Yük uçlarındaki gerilim, kusursuz bir doğru gerilim değildir. DC bileşene ilave olarak kıyıcı frekansı ve onun katları şeklinde harmoniklere sahiptir. Yük akımı, AC salınımlara da sahiptir. Bu da, DC motorun performansını olumsuz yönde etkiler. Verilen görev periyodu için yük gerilimindeki harmoniklerin büyüklükleri sabittir.

Yükteki harmonik akımlar ve bu nedenle yük akımındaki dalgalanmalar kıyıcı frekansına ve yük indüktansına bağlıdır. Yük akımındaki dalgalanma, kıyıcı frekansının veya yük indüktansının arttırılması ile azaltılabilir. Bu nedenle, kıyıcı mümkün olan en yüksek frekansta çalıştırılır. Buna rağmen yük akımı dalgalanması müsaade edilebilir değerlerden fazla ise dalgalanma, kıyıcı ile yük arasına bir indüktif filtre bağlanarak azaltılabilir.



Şekil 2.15 a) Buck tipi kıyıcı devresi, b) Yük gerilimi, c) Kapı sinyali, d) Yük akımı, e) Kaynak akımı dalga şekilleri.

Şekil 2.15 'te gösterilen kıyıcı A sınıfı kıyıcı olarak isimlendirilir. DC sürücü kontrolü için kullanılan birçok kıyıcı devresinden birisidir. Bu kıyıcı, sadece pozitif gerilim ve akım sağlayabilmektedir. Bu nedenle tek bölge kıyıcı olarak serbest uyarımlı motor kontrolünü ancak birinci bölgede gerçekleştirebilir. Çıkış gerilimini V 'den 0 'a kadar değiştirebildiğinden dolayı step-down kıyıcı veya DC - DC buck konverter olarak da söylenir. Temelde, step-up kıyıcı veya boost tipi DC-DC konverter gerçekleştirmek için de kullanılabilir. Step-up devre diyagramı ve kıyıcının sürekli durum dalga şekilleri Şekil 2.16 'da gösterilmiştir. Bu kıyıcı, B sınıfı kıyıcı olarak isimlendirilir. I_c kontrol sinyalinin mevcut olduğu süre boyunca, S anahtarı iletimde kalır. T periyodu süresince anahtar, $0 \leq t \leq \delta T$ aralığında iletimde ve $\delta T \leq t \leq T$ aralığında kesimde olur. İletim süresince I_s , I_{s1} 'den I_{s2} 'ye yükselir, böylece L indüktansında depolanan manyetik enerjinin miktarı artar. Anahtar kesimde iken akım, yük ve C 'nin paralel birleşiminden akar, daha yüksek bir gerilime karşı zorlandığından dolayı değişiminin eğimi negatiftir ve I_{s2} 'den I_{s1} 'e azalır.



Şekil 2.16 a) Boost tipi kıyıcı devresi, b) Kapı sinyali, c) Anahtar gerilimi, d) Kaynak akımı dalga şekilleri.

İndüktansta depolanan enerji ve düşük gerilim kaynağı ile sağlanan enerji yüke aktarılır. C kapasitörü iki amaç için kullanılmıştır. S anahtarının açıldığı anda I_s kaynak akımı ve I_a yük akımı birbirine eşit değildir. C 'nin olmaması durumunda, S anahtarı iletimdeyken iki akım birbirine eşit olmaya zorlanacaktır. Bu, L 'de ve yük indüktansında indüklenen gerilimin yükselmesine neden olacaktır. C 'nin kullanılmasının bir diğer nedeni ise yük gerilimindeki dalgalanmaları azaltmaktır. d diyodunun kullanılmasının nedeni, yükten S anahtarına veya V kaynağına doğru akım akışını önlemek içindir.

Step-up kıyıcının çalışmasını anlamak için, C 'nin yük uçlarında sabit bir V_a gerilimini sağlamak için yeterince büyük kabul edilir. a ve b noktaları arasındaki gerilimin ortalama değeri aşağıdaki ifadeyle hesaplanabilir.

$$V_{ab} = \frac{1}{T} \int_{\delta T}^T V_a dt = V_a (1 - \delta) \quad (2.36)$$

İndüktans uçlarındaki ortalama gerilim;

$$V_L = \frac{1}{T} \int_0^T \left(L \frac{di}{dt} \right) dt, \quad V_L = \frac{1}{T} \int_{I_{s1}}^{I_{s2}} L \frac{di}{dt} dt = 0 \quad (2.37)$$

dır. Kaynak gerilimi ise indüktans gerilimi ile V_{ab} geriliminin toplamına eşittir.

$$V = V_L + V_{ab} \quad (2.38)$$

Denklem (2.36) ve (2.37), denklem (2.38) 'de yerine konulursa;

$$V = V_a (1 - \delta) \text{ veya } V_a = \frac{V}{1 - \delta} \quad (2.39)$$

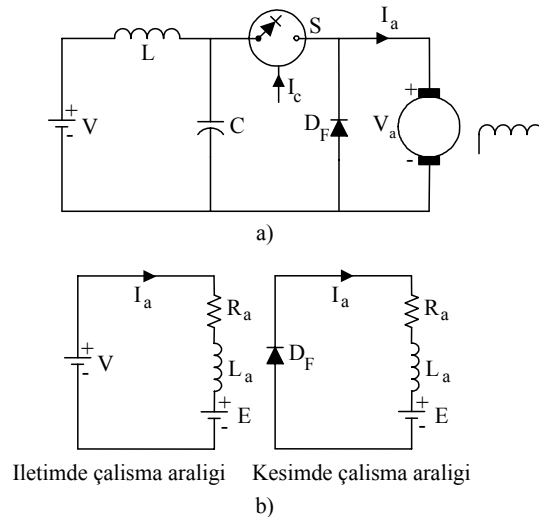
elde edilir.

Denklem (2.39) 'a göre teorik olarak δ 'nin, 0 'dan 1 'e kontrol edilmesi ile V_a çıkış gerilimini V 'den ∞ 'a kadar ayarlamak mümkündür. Pratikte V_a C 'ye ve yük ile kıyıcı parametrelerine bağlı olarak, V ile daha yüksek bir gerilim değeri aralığında kontrol edilebilir.

Step-up kıyıcının asıl avantajı, kaynak akımındaki dalgalanmanın küçük olmasıdır. Çoğu uygulamada step-down kıyıcıya ihtiyaç duyulurken, düşük güçle çalışan ve aküyle beslenen araçlarda step-up kıyıcılar kullanılmaktadır. Burada yüksek gerilimli motor, düşük gerilimli kaynaktan step-up kıyıcı ile kontrol edilebilir.

2.8.2 DC-DC Kıyıcıdan Beslenen Serbest Uyarımlı DC Motor

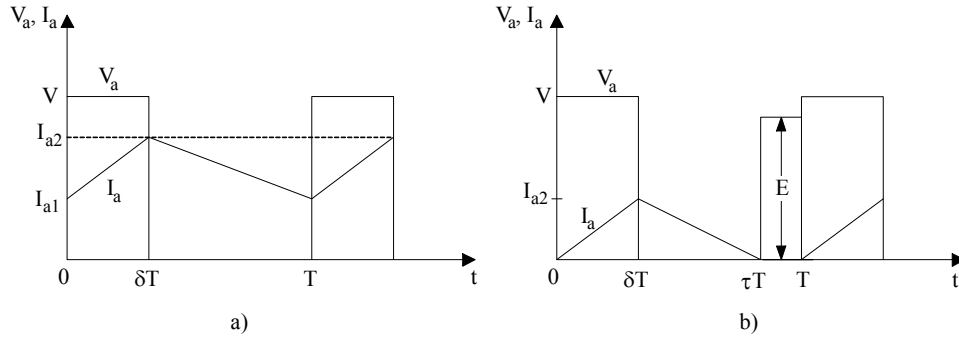
Şekil 2.15 'teki tek bölgeli step-down (A sınıfı) kıyıcı ile sürülen serbest uyarımlı DC motorun sürekli durum analizi ve performansı gösterilmiştir. Sürücünün temel şeması, Şekil 2.17a 'da gösterilmiştir. Kaynak ile kıyıcı arasına, kaynak akımı ve geriliminin düzensizliğini azaltmak için bir L-C filtresi bağlanmıştır. Filtrenin kayıpsız olduğu ve C kapasitörünün yeterince büyük olduğu kabul edilirse, kıyıcının giriş gerilimi V kaynak gerilimine eşit olacaktır. İletimde ve kesimde çalışma aralıkları için motorun eşdeğer devresi Şekil 2.17b 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.17 a) DC-DC kıyıcı kontrollü serbest uyarımlı DC motor, b) Eşdeğer devre.

Sürekli durumda çıkış gerilimi ve endüvi akımı ideal kabul edilerek dalga şekilleri Şekil 2.18 'de gösterilmiştir. Bu durumda, endüvi akımı kıyıcı periyodu süresince sürekli olarak akar ve kıyıcının sürekli iletim modunda çalıştığı söylenir.

İletimde çalışma aralığı süresince, kaynak tarafından sağlanan toplam enerji çıkışının bir kısmı endüvi tarafından mekanik enerjiye dönüştürülür, diğer bir kısmı R_a direncinde ve anahtarda ısıya dönüşür ve geriye kalan enerji L_a indüktansında depolanır. İndüktansta depolanan manyetik enerji sayesinde, kesimde çalışma aralığı süresince endüvi akımı akışının devamlılığı sağlanmış olur. Bu çalışma aralığı süresince, mekanik enerji ve ısı kayıplarının her ikisi de depolanan bu enerjiden sağlanmalıdır. Endüvi devresi indüktansı düşük ve endüvi akımı küçük (düşük motor momentinde) olduğunda, özellikle ya zıt emk 'nın büyük olması ya da kesim süresinin uzun olması durumlarında depolanan manyetik enerji, S 'nin kesimde olduğu sürece akım akışının devamlılığını sağlayabilecek kadar yeterli olmayabilir. Bu durumda, endüvi akımı Şekil 2.18b 'de gösterildiği gibi, iletimin olmadığı kesimde çalışma aralığında sıfır olabilir.



Şekil 2.18 a) Sürekli iletimde ve b) Sürekli olmayan iletimde, motor uçlarında gerilim ve akımın dalga şekilleri.

Günümüzde yarıiletken anahtarların kullanımıyla kıyıcılar, motorun normal sürekli durum çalışmasında, akımın süreksizliğini yok etmek için çok yüksek frekanslarda çalışırlar. Akımda süreksizlik, sadece geçici durum çalışmasında ortaya çıkar.

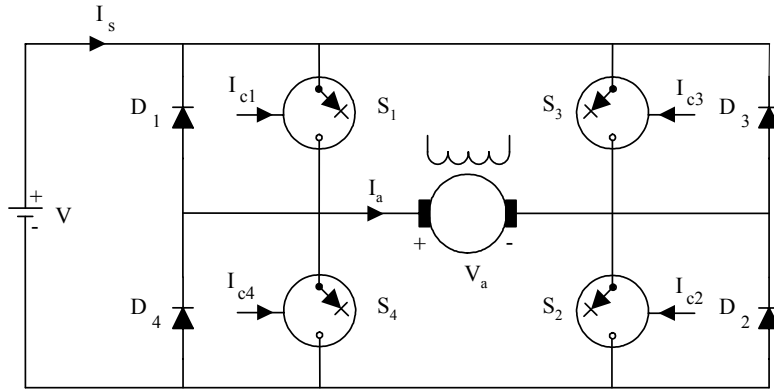
Akım sınırlamalı kontrolde, kıyıcı belirlenmiş akım sınırları arasında çalışır ve bundan dolayı süreksiz bir iletim meydana gelmez.

2.9 Dört-Bölgeli Kontrol

Dört bölgeli çalışma elde etmek için, Şekil 2.19 'da gösterilen E sınıfı kıyıcı kullanılabilir. Bu kıyıcı aşağıda açıklanan yöntemlerle kontrol edilebilir.

Yöntem I: S_2 anahtarı devamlı iletimde, S_3 anahtarı devamlı kesimde ve S_1 ile S_4 anahtarları kontrol edilirse, bu durumda devre iki bölgeli bir kıyıcı gibi davranır. Böyle yapıldığı takdirde, motor I. ve II. bölgelerde kontrol edilerek motor gerilimi ayarlanmış ve her iki yönde endüvi akımı akışı sağlanmış olur.

Eğer S_3 anahtarı devamlı iletimde, S_2 anahtarı devamlı kesimde ve S_1 ile S_4 anahtarları kontrol edilmeye devam ettirilirse, motor uçlarındaki gerilim yön değiştirerek endüvi akımı yine her iki yönde akacak ve böylece motor III. ve IV. bölgelerde kontrol edilmiş olur. İleri yönde motor çalışmadan ters yönde motor çalışmaya geçmek istenilirse, aşağıda anlatılan işlem sırası izlenmelidir.



Şekil 2.19 Dört-bölgeli E sınıf kıyıcı devresi.

İlk bölgede S_2 anahtarı devamlı iletimde, S_3 anahtarı devamlı kesimde ve S_1 ile S_4 anahtarları kontrol edilir. Yön değişimi için d minimum değere düşürülür. Motor akımı ters döner ve müsaade edilen maksimum değere ulaşır. Akım kontrol çevrimi akımın, müsaade edilen maksimum değer üzerine çıkmasını önler. Motor maksimum momentle yavaşlar ve hızı sıfıra düşer. Bu esnada, S_2 devamlı kesime ve S_3 devamlı iletime götürülerek d ve S_1 ile S_4 anahtar çifti istenilen hıza göre ayarlanır. Bu durumda motor, maksimum momentle ters yönde hızlanır ve akım, akım kontrol çevrimi ile ayarlanarak ters yönde istenilen hıza ulaşılır.

Bu kontrol yöntemi, şu özelliklere sahiptir. Devrenin çalışması asimetrik olmasından dolayı anahtarların kullanım faktörü düşüktür. S_3 ve S_2 anahtarları uzun süre iletimde kalabilir. Eğer anahtar olarak tristör kullanılıyorsa, bu durum komutasyon problemleri oluşturabilir. Minimum çıkış gerilimi, anahtarların iletime girdiği minimum süreyle doğrudan ilişkilidir. Anahtarların iletime girme süresinin minimum olmasında bazı sınırlamalar bulunduğu için özellikle tristörlü kıyıcıda, minimum ortalama çıkış gerilimi ve böylece minimum uygun motor hızı sınırlıdır.

S_1 ile S_4 anahtarları ve S_3 ile S_2 anahtarları aynı anda iletimde olmamasına dikkat etmek gerekir. Bir anahtarın kesime ve diğer anahtarın iletime geçmesi arasında belirli bir gecikme

zamanı olmalıdır. Bu da müsaade edilen maksimum çalışma frekansını sınırlar. Çıkış geriliminin periyodu süresince iki anahtarlama işlemine gerek vardır.

Yöntem II: S_1 ve S_2 anahtarları, D_3 ve D_4 diyotları ile çalıştığında bu kıyıcı pozitif akım ve her iki yönde değişken gerilim sağlayabilir. Böylece motor kontrolü I. ve IV. bölgelerde yapılabilir. S_3 ve S_4 anahtarları, D_1 ve D_2 diyotları ile çalıştığında ise bu kıyıcı negatif akım ve her iki yönde değişken gerilim sağlayabilir. Böylece motor kontrolü II. ve III. bölgelerde yapılabilir.

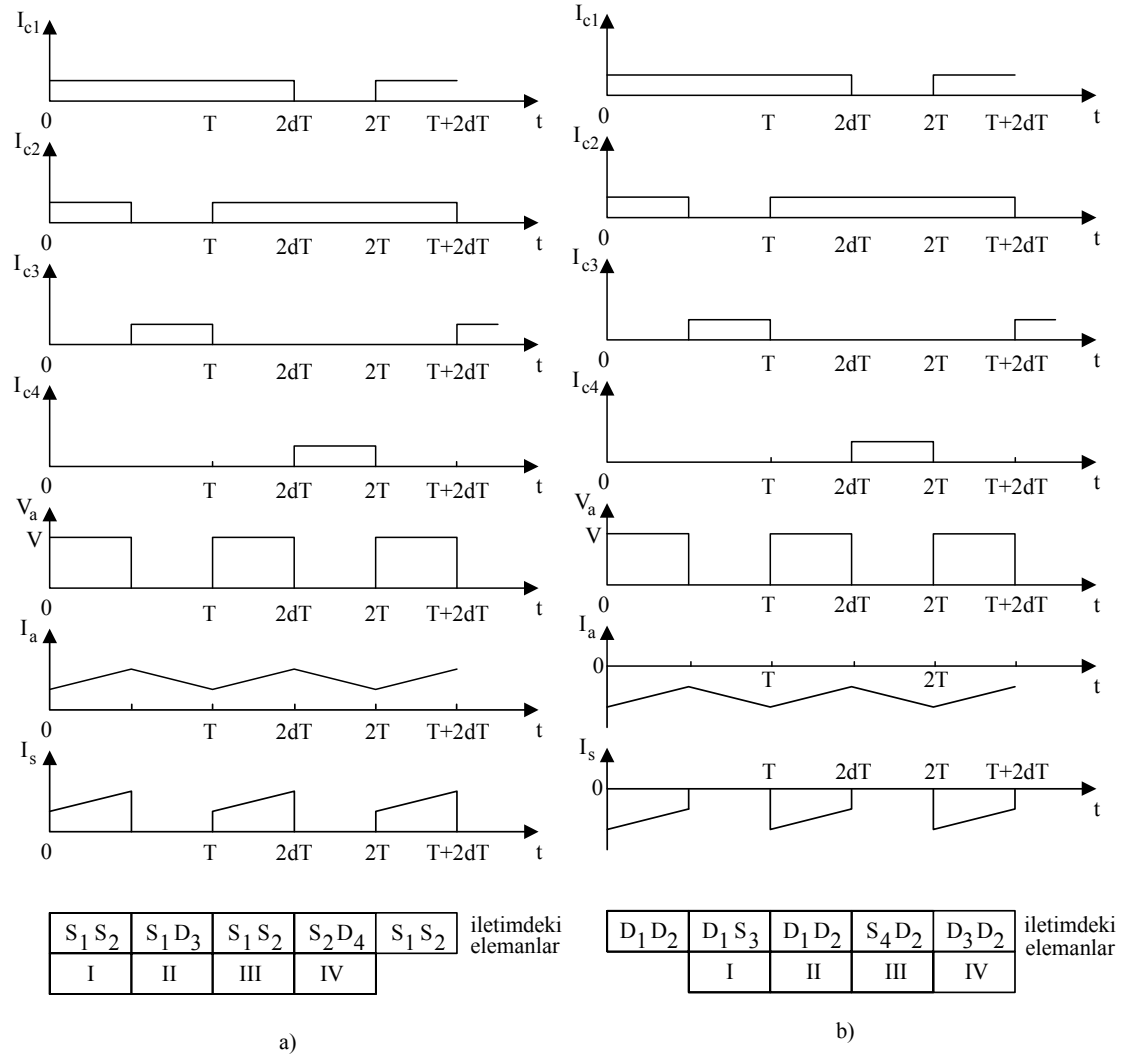
I. bölgeden III. bölgeye geçiş yapılırken, anahtar değişimi şu şekilde olmalıdır. I. bölgede S_1 ve S_2 anahtarları, d 'nin 0.5 ile 1 arasında değiştirilmesiyle kontrol edilir. Endüvi akımının yönü Şekil 2.19 'da gösterilmiştir. Motor yönünü değiştirmek için S_1 ve S_2 anahtarları kesime götürülür. Bu durumda endüvi akımı, D_3 diyotu, V kaynağı ve D_4 diyotundan akar ve hızla sıfıra düşer. Motorun zıt emk'sı pozitif polaritede kalır. d 'yi 0 ile 0.5 aralığında tutarak S_3 ve S_4 anahtarları kontrol edilir ve burada d , 0.5 'e daha yakındır. Motor akımı ters yönde akar ve maksimum gerilime ulaşılır. Akım kontrol çevrimi, akımın müsaade edilen maksimum değeri geçmemesi için d 'yi kontrol eder. Motor, maksimum momentle yavaşlar ve sıfır hıza düşer. d istenilen hıza göre ayarlanır ($0.5 < d < 1$). Motor, akım kontrol çevrimi ile ayarlanarak maksimum momentle hızlanır ve ters yönde istenilen sürekli durum hız değerine ulaşır.

Bu kontrol yöntemi, Yöntem I ile karşılaştırıldığında, sıfıra yakın çıkış geriliminde her bir anahtar yaklaşık T periyodu süresince iletimde kalmalıdır. Minimum çıkış gerilimi ve minimum motor hızı için sınırlama yoktur. Bir anahtarın kesime ve diğer anahtarın ilettime girmesi arasında bir gecikme olması gerekmez. Sonuç olarak çalışma frekansı daha yüksek olabilir. Yöntem I ile karşılaştırıldığında çıkış geriliminin her bir periyodu için iki anahtar yerine sadece bir anahtarın anahtarlama için kullanılması nedeniyle anahtarlama kayıpları azdır. Simetrik çalışmadan dolayı anahtarlar daha iyi bir kullanım faktörüne sahiptirler.

Yöntem III: Bu yöntem, Yöntem II 'nin değiştirmiş halidir. Yöntem II 'de S_1 ve S_2 anahtarları ile D_3 ve D_4 diyotları, motoru I. ve IV. bölgelerde kontrol etmesine izin veren bir kıyıcı şekli oluşturur. S_3 ve S_4 anahtarları ile D_1 ve D_2 diyotlarından oluşan ikinci kıyıcı şekli ise II. ve III. bölgelerde çalışmayı sağlar. Yöntem II 'de kıyıcılar ayrı ayrı kontrol edilirken, yöntem III 'te aşağıda anlatıldığı gibi eşzamanlı olarak kontrol edilirler.

S_1 , S_2 , S_3 ve S_4 anahtarları için kontrol sinyalleri, sırası ile I_{c1} , I_{c2} , I_{c3} ve I_{c4} olarak gösterilmiştir. Bir kontrol sinyali mevcut ve yarıiletken S anahtarı ileri yönde biaslanmış ise ilettime diğer durumda ise kesime girecektir. İleri yönde motor ve ileri yönde frenleme için I_{c1} 'den I_{c4} 'e kadar olan kontrol sinyalleri ve V_a , I_a ve I_s 'nin dalga şekilleri sırasıyla Şekil 2.20a ve Şekil 2.20b 'de gösterilmiştir. S_1 anahtarına, $t=0$ ile $t=2dT$ aralığında bir kontrol sinyali uygulanır. Burada $d=t_{on}/2T$ 'dir. S_2 anahtarına ise $t=T$ ile $t=T+2dT$ aralığında bir kontrol sinyali

uygulanır. S_1 ve S_4 ile S_2 ve S_3 anahtarlarına zıt kontrol sinyalleri uygulanır ve birbirlerini tamamlayan anahtar çiftleridir. Genellikle bu anahtar çiftlerinden birinin kesime girerken, diğerinin iletme girmesi arasında bir gecikme zamanı olmalıdır. Bu gecikme zaman aralığı Şekil 2.20 'de ihmal edilmiştir.



Şekil 2.20 Şekil 2.19 'daki dört bölgeli kıyıcının dalga şekilleri a) İleri yönde motor ($0.5 \leq d \leq 1$ ve $V_a > E$)
b) İleri yönde generatör ($0.5 \leq d \leq 1$ ve $V_a < E$).

Her bir anahtarın periyoduna karşılık gelen $2T$ süresince kıyıcı, Şekil 2.20a ve b 'de I, II, III ve IV ile gösterilen dört farklı aralıkta çalışır. Bu aralıklar boyunca iletimde olan elemanlar da gösterilmiştir. Makinenin I. Bölgede çalışması şu şekilde açıklanabilir. I aralığında S_1 ve S_2 anahtarları iletimdedir. Motor kaynak gerilimine eşit pozitif bir gerilime maruz kalır ve endüvi akımı artar. I aralığının sonunda S_2 kesime girer ve II aralığında S_1 ve S_3 'e kontrol sinyalleri uygulanır. Motor pozitif bir akım taşıdığından dolayı akım D_3 ve S_1 elemanları

üzerinden akar. Böylece, V_a sıfır olur ve I_a azalır. S_3 anahtarı, iletimde olan D_3 diyotundaki gerilim düşümü nedeniyle ters yönde biaslanmış gibi kesimde kalır. III aralığının başında S_2 tekrar iletime geçer, bu durumda $V_a=V$ olur ve I_a artar. III aralığının sonunda S_1 kesime girer. IV aralığında S_2 ve S_4 'e kontrol sinyalleri uygulanır. Pozitif motor akımı S_2 ve D_4 elemanları üzerinden akar ve S_4 anahtarı, D_4 üzerindeki gerilim düşümü nedeniyle ters biaslandığından iletime geçmez.

İleri yönde motor çalışması I_a pozitif olduğu zaman elde edilir. Çalışma işlemi; d 'yi azaltarak veya E 'yi V_a değerinden büyük olacak şekilde arttırarak veya I_a 'yı negatif yaparak ileri yönde motor çalışmasından, ileri yönde fren çalışmasına geçilebilir. Şekil 2.20b 'de ileri yönde frenleme ve dört bölge için iletimde olan elemanlar gösterilmiştir. Kırıyıcının çalışması şu şekilde açıklanabilir. I aralığında S_1 ve S_3 'e kontrol sinyalleri uygulanır. Pozitif bir zıt emk, D_1 ve S_3 elemanları üzerinden endüvi akımını negatif yönde akmaya zorlar. Bu aralık boyunca endüvi devresi indüktansında depolanan enerjinin artmasından dolayı $|I_a|$ artar. S_1 anahtarı D_1 diyotundaki gerilim düşümü nedeniyle ters biaslandığından dolayı iletime geçmez. I aralığının sonunda S_3 kesime girer. Kaynaktan sağlanan enerji ile endüvi akımı; D_1 diyotu, V kaynağı ve D_2 diyotu üzerinden akmaya zorlanır. S_1 ve S_2 anahtarlarına, kontrol sinyalleri uygulanmasına rağmen D_1 ve D_2 diyotlarındaki gerilim düşümleri nedeniyle ters biaslandıklarından, kesimde kalır. Böylece motor uç gerilimi, V 'ye eşit olur ve $|I_a|$ azalır. III aralığında S_4 iletime geçer ve endüvi akımı S_4 ve D_2 elemanları üzerinden akar. S_2 anahtarına bir kontrol sinyali uygulanmasına rağmen D_2 diyotundan dolayı ters biaslandığı için iletime geçemez. Endüvi akımının genliği tekrar artmaya başlar. III aralığının sonunda S_4 anahtarı kesime girer. Kaynaktan sağlanan enerji ile endüvi akımı; D_1 diyotu, V kaynağı ve D_2 diyotu üzerinden akmaya zorlanır.

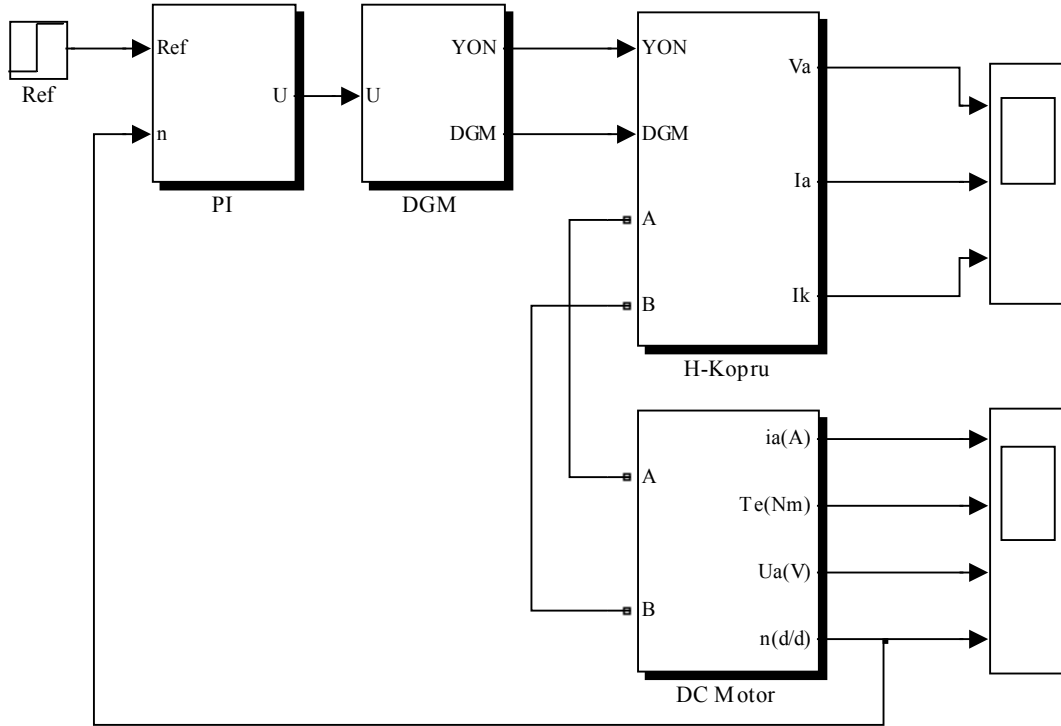
Ters yönde motor ve frenleme durumları, V_a negatif iken d 'yi 0 ile 0.5 arasında değiştirerek elde edilir. Ters yönde motor çalışması $|V_a|>|E|$ ve ters yönde frenleme ise $|E|>|V_a|$ iken d ayarlanarak elde edilir.

Bu yöntem, Yöntem I ve Yöntem II ile karşılaştırılırsa daha basit bir yapıda olduğu görülür. S_1 ve S_4 ile S_2 ve S_3 anahtar çiftlerinden birinin kesime girerken diğerinin iletime girmesi arasında bir gecikme zamanı olması gerektiğinden, müsaade edilen maksimum çalışma frekansı Yöntem II 'ye göre daha az olabilir [Dubey v.d, 1978; Satpati v.d, 1980].

3. DÖRT-BÖLGELİ DC MOTOR HIZ KONTROLÜNÜN MATLAB/SIMULINK İLE BENZETİMİ

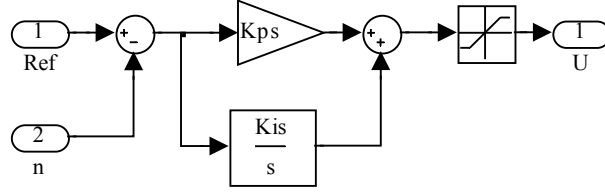
DC motorun dört-bölgeli hız kontrolü için kullanılan Matlab/Simulink modeli Şekil 3.1 'de gösterildiği gibi PI, DGM, H-Köprü ve DC motor olmak üzere toplam dört bloktan oluşmaktadır. Bloklar oluşturulurken deneysel uygulamada kullanılan mikrodenetleyicinin programlama mantığına benzer bir yol izlenmiştir.

Programın kısaca çalışma mantığını açıklamak gerekirse; girilen referans hıza bağlı olarak belirtilen süre içinde DC motorun dört-bölgeli hız kontrolü PI kontrolör kullanılarak Şekil 3.1 'de de görüldüğü gibi PI kontrolör bloğu ile hesaplanan U gerilim değeri DGM bloğu ile ihtiyaç duyulan görev periyodunda bir DGM sinyali H-Köprü içinde bulunan anahtarlara uygulanmak için elde edilmektedir. H-Köprüye bağlı bulunan DC motordan alınan hız bilgisi kapalı bir döngü ile PI kontrolöre uygulanmaktadır. Böylece kapalı çevrim hız kontrolü gerçekleştirilmiş olur.



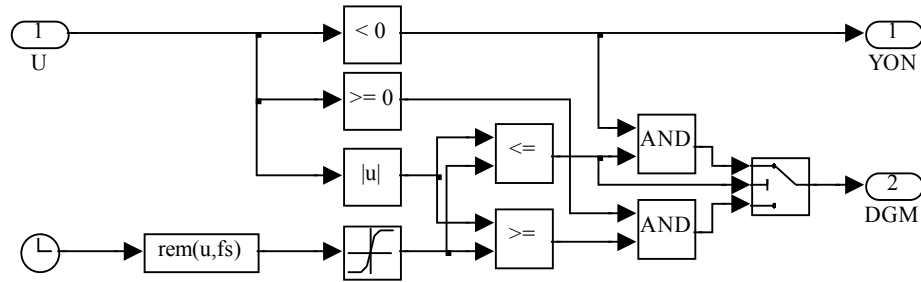
Şekil 3.1 Dört-bölgeli DC motor hız kontrolü için Matlab/Simulink modeli.

PI kontrolü gerçekleştirilen bloğun içyapısı Şekil 3.2 'de gösterildiği gibidir. PI kontrolü için gerekli olan hata sinyali referans hız ile motor hızının karşılaştırılması sonucu elde edilmektedir. Daha sonra kps ve kis oransal ve entegral katsayıları ile motora uygulanması gereken gerilim değeri hesaplanmaktadır, hesaplanan gerilim değeri sınırlayıcıdan geçirildikten sonra elde edilen U gerilimi motora uygulanması gereken gerilimin genliğini belirtmektedir.



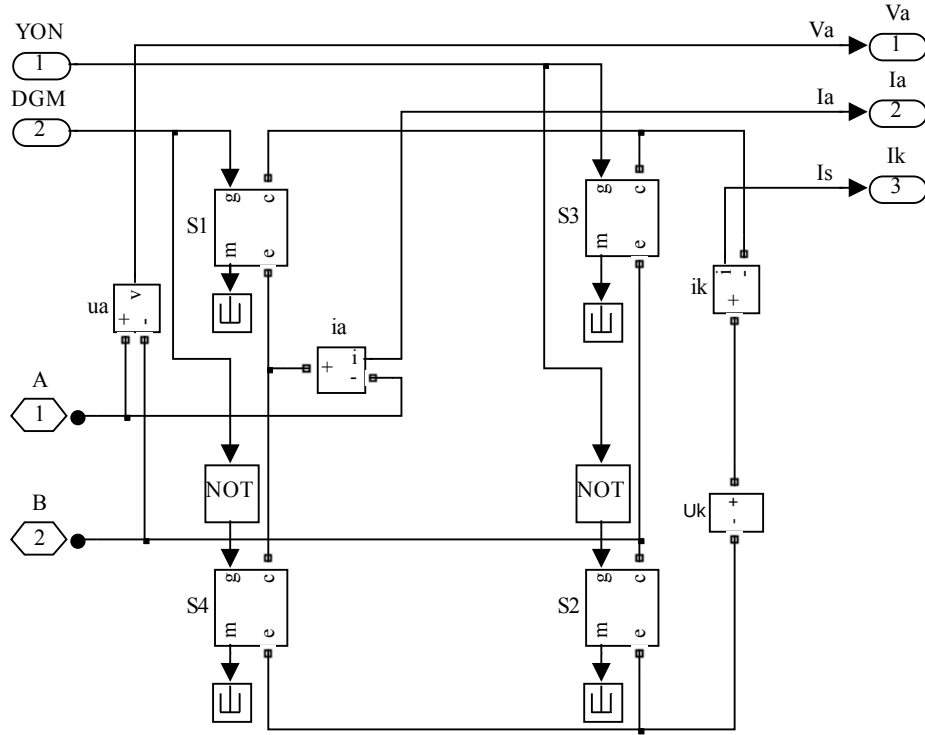
Şekil 3.2 PI kontrolör bloğu içyapısı

H-köprü içinde bulunana anahtarlar için gerekli olan DGM sinyali PI kontrolörün hesapladığı U gerilimine bağlı olarak elde edilmektedir. Bunu sağlayabilmek için Şekil 3.3 'te gösterilen DGM bloğu kullanılarak kontrolör çıkışından alınan U gerilim değeri, DGM sinyalinin t_{on} süresini belirlemek için testere dişi sinyal ile karşılaştırılarak Şekil 3.3 'te gösterildiği gibi gerilimin polaritesine göre H-köprü için gerekli DGM sinyali elde edilmektedir. Şekilde görülen YÖN sinyali ise motora uygulanması gereken gerilimin polaritesini belirlemektedir.



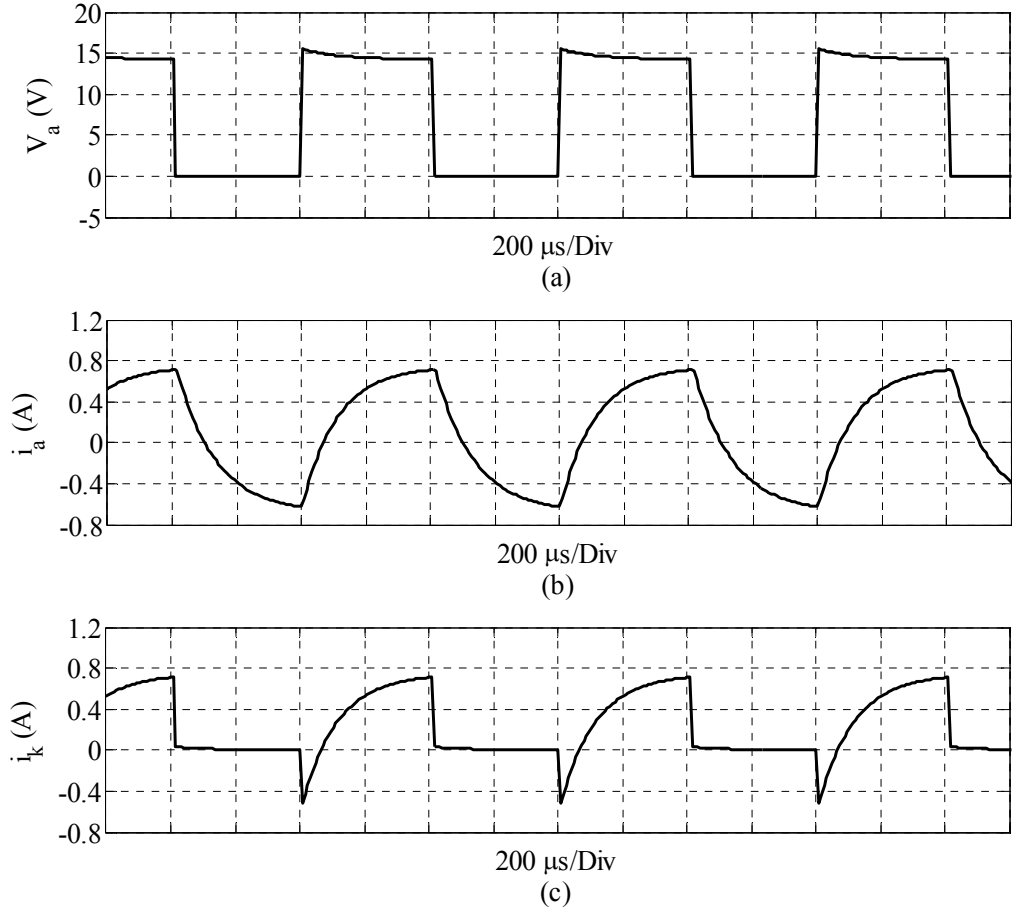
Şekil 3.3 DGM bloğu içyapısı

Dört-bölgeli çalışmayı gerçekleştirebilmek için kullanılan H-köprünün içyapısı Şekil 3.4 'te gösterildiği gibi dört adet anahtardan oluşmaktadır. Anahtarlar DGM bloğundan gelen sinyallere göre anahtarlanmaktadır. DGM sinyali S_1 anahtarına, DGM sinyalinin tersi alınarak S_4 anahtarına uygulanmaktadır. Bu anahtarlama tekniği sayesinde bir DGM sinyali yeterli olmaktadır. S_3 ve S_2 anahtarları ise H-köprü çıkışının polaritesini ayarlamak için kullanılmaktadır. Motorun H-köprüye bağlanması için A ve B uçları dışarıya alınmıştır.



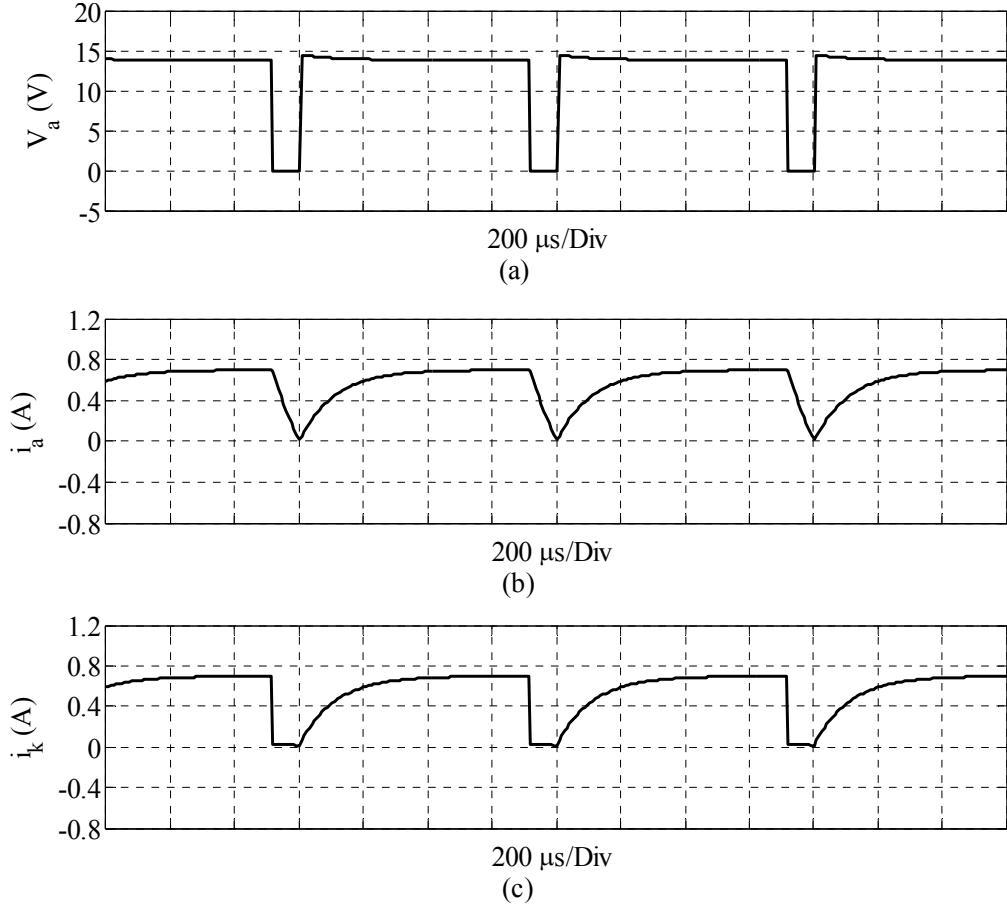
Şekil 3.4 H-köprü içyapısı

Motor yüksüz durumda 2000 d/d ile dönerken ölçülen armatür gerilimi, armatür akımı ve kaynak akımlarının benzetim sonuçları Şekil 3.5 'te gösterildiği gibi elde edilmiştir. Şekil 3.5a 'da motor armatür gerilimi, Şekil 3.5b 'de motorun armatür akımı ve Şekil 3.5c 'de ise kaynak akımı gösterilmektedir. Burada motor üzerindeki gerilimin polaritesinin pozitif olmasına rağmen motor akımı bir periyot içinde hem pozitif hem de negatif olmuştur. Bunun sebebi DC motor yüksüz durumda ileri yönde çalıştırılırken I. bölge ve II. bölgeler arasında çalışmasıdır. Motor I.bölgede pozitif yönlü akım çekerken II. bölgede ise negatif akım çekmektedir. Aynı durum için Şekil 3.5c incelendiğinde kaynak akımının motor üzerindeki gerilimin yükselen kenarında sistemden akım çektiği görülmektedir. Bu durum motor akımı pozitif olana kadar devam etmektedir. Kaynak akımının negatif yönlü olduğu kısımlarda DC makinenin generatör olarak çalıştığı söylenebilir.



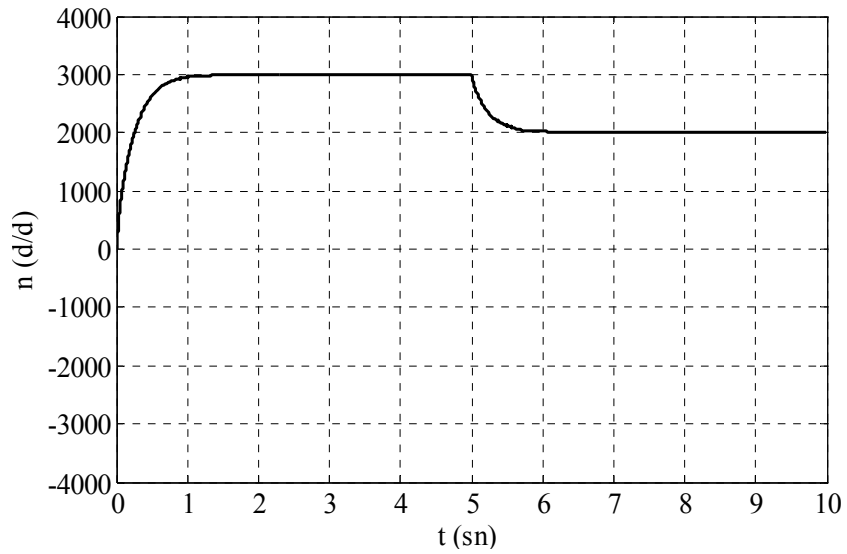
Şekil 3.5 Yüksüz durumda 2000 d/d için a) Armatür gerilimi, b) Armatür akımı, c) Kaynak akımı

Aynı koşullar altında motor tekrar 2000 d/d hıza ulaştıktan sonra motora yaklaşık %45 yük uygulanmış ve bu durumda Şekil 3.6 'daki grafikler elde edilmiştir. Şekil 3.6a 'da motor üzerindeki gerilimin ortalama değerinin bir önceki çalışma olan yüksüz durumdaki gerilimin ortalama değerinden daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebi motorun yüklü durumda ihtiyaç duyduğu gücün artması ve bunun da ancak besleme geriliminin artırılmasıyla sağlanabildiği görülmektedir. Motor yüksüz durumda ileri yönde II. bölge ile I.bölge arasında çalışmakta iken motora uygulanan yük arttıkça çalışma bölgesi I. bölgeye doğru kaymaktadır. Motor yükü belirli bir seviyenin üzerinde olunca motor sadece I.bölgede çalıştığı Şekil 3.6b 'de görülmektedir. Şekil 3.6b 'de motorun çektiği akım II. bölgeye geçemediği için sadece pozitif yönlüdür. Makine sadece I. bölgede çalıştığından dolayı kaynak akımı Şekil 3.6c 'de gösterildiği gibi sıfır değerinin altına düşmemektedir. Motora daha fazla yüklenildiğinde ise ihtiyaç duyduğu gerilim değeri besleme geriliminden daha büyük ise o zaman motor istenilen referans hıza çıkamayacaktır.



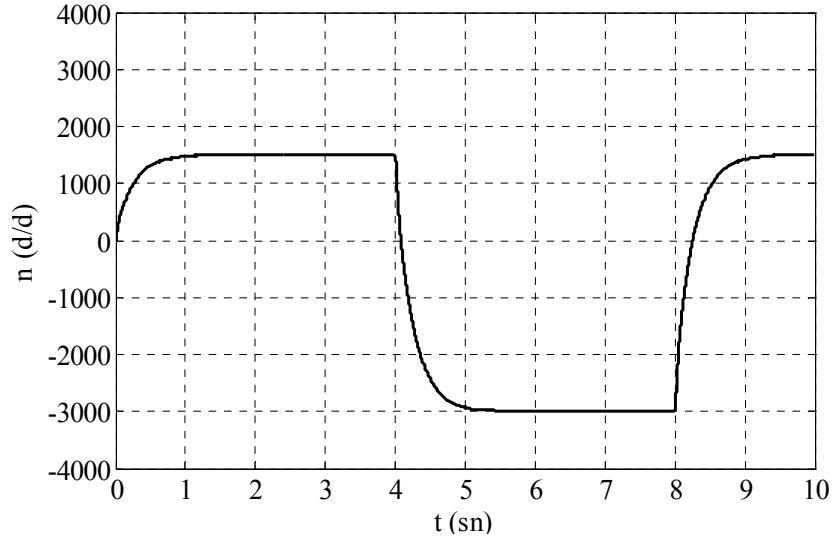
Şekil 3.6 %45 yüklü durumda 2000 d/d için a) Armatür gerilimi, b) Armatür akımı, c) Kaynak akımı

Şekil 3.7 'de görüldüğü gibi motor önce ileri yönde 3000d/d referans hız için 5 sn süreyle çalıştırılmış ve daha sonra 5. saniye sonunda 2000 d/d referans hız için ileri yönde çalışmaya devam etmiştir.



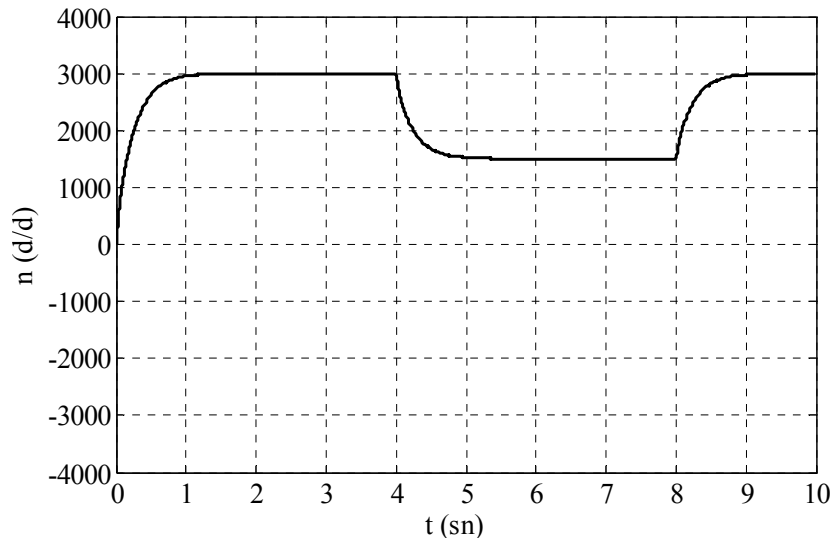
Şekil 3.7 3000 d/d, 2000 d/d referansları için motor hızının zamanla değişimi.

Motor Şekil 3.8 'de gösterildiği gibi 3 farklı referans hız için çalıştırılmıştır. İlk olarak motor 1500d/d referans hız için ileri yönde, sonra -3000 d/d referans hız için ters yönde ve daha sonra tekrar 1500 d/d referans hız için ileri yönde dörder saniye süreyle çalıştırılmıştır.



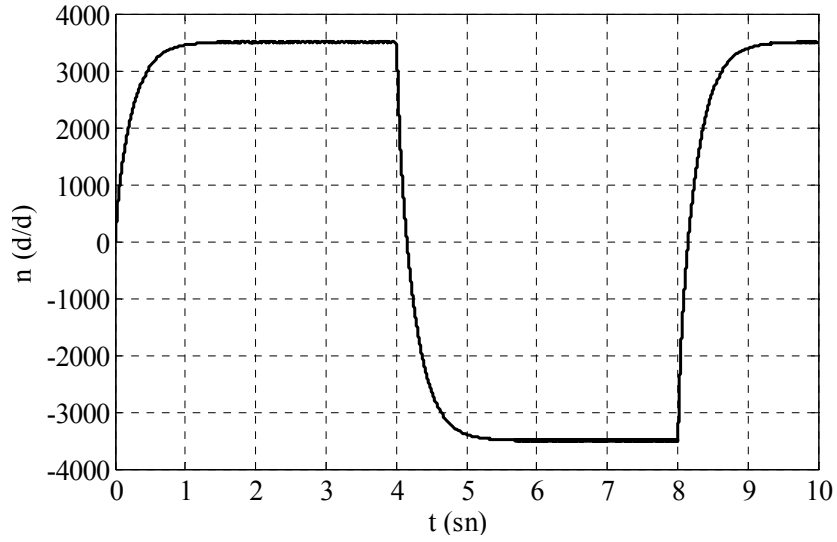
Şekil 3.8 1500 d/d, -3000 d/d ve 1500 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi.

Üç farklı referans hız için motor sırasıyla 3000 d/d, 1500 d/d ve 3000 d/d hızlarda çalıştırılmıştır. Şekil 3.9 'dan görüldüğü gibi motor her bir referans hız için 4 saniye süreyle çalıştırılmıştır



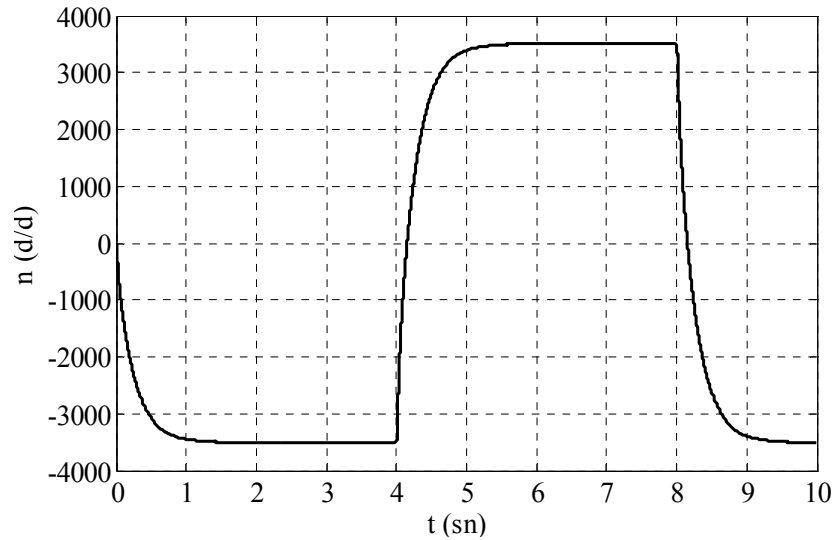
Şekil 3.9 +3000 d/d, +1500 d/d, +3000 d/d referans hızları için elde edilen sonuç.

Motor Şekil 3.10 'da gösterildiği gibi önce ileri yönde 3500 d/d hıza çıkarılmış ve 4. saniye sonunda ters yönde 3500 d/d hızla döndürülmüştür. Daha sonra motor tekrar ileri yönde 3500 d/d referans hız için çalıştırılmıştır.



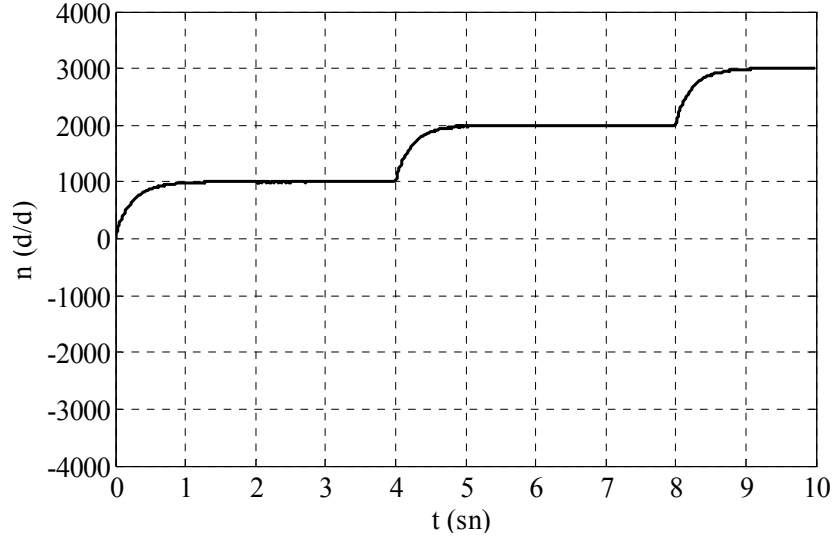
Şekil 3.10 3500 d/d, -3500 d/d ve 3500 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi.

Şekil 3.11 'de görüldüğü gibi motora Şekil 3.10 'da verilen referansların tersi verilmiştir. Buna göre motor önce ters yönde 3500 d/d, sonra ileri yönde 3500 d/d ve daha sonra tekrar ters yönde 3500 d/d referans hız değerleri için dörder saniye çalıştırılmıştır.



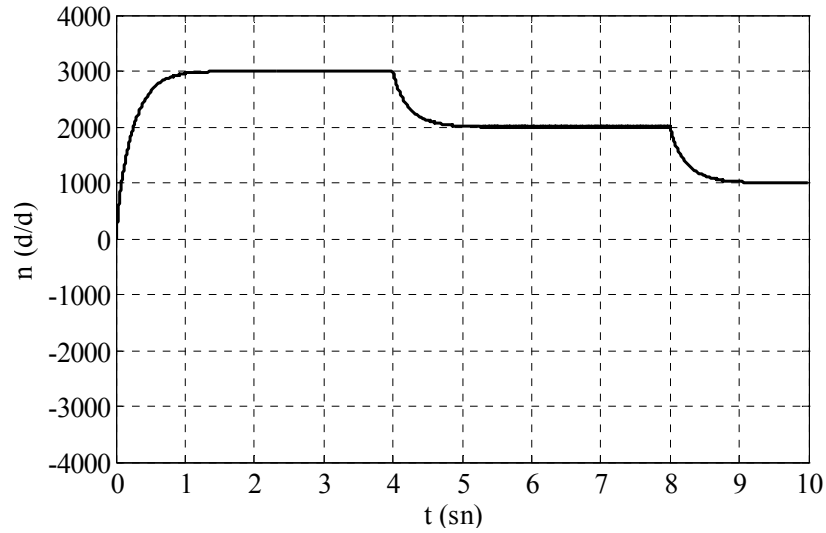
Şekil 3.11 -3500 d/d, 3500 d/d, ve -3500 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi.

Üç farklı referans hız için motor sırasıyla 1000 d/d, 2000 d/d ve 3000 d/d hızlarda çalıştırılmıştır. Şekil 3.12 'den görüldüğü gibi motor her bir referans hız için 4 saniye süreyle çalıştırılmıştır.



Şekil 3.12 1000 d/d, 2000 d/d, ve 3000 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi.

Şekil 3.13 'ten görüldüğü gibi motor üç farklı referans hız için önce 3000 d/d, sonra 2000 d/d ve son olarak 1000 d/d hızlarında çalıştırılmıştır.



Şekil 3.13 3000 d/d, 2000 d/d, ve 1000 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi.

4. PIC 16F877 İLE KONTROLÖR TASARIMI

4.1 PIC Mikrodenetleyiciler ve Özellikleri

Bir mikroişlemci kendi başına kullanılamaz. Mikroişlemcinin kullanılabilmesi için hafıza birimi, giriş/çıkış birimleri ve zamanlama devresine ihtiyaç duyulur. Bu birimlere klavye ve LCD gibi kullanıcı arabirimlerinin de eklenmesi ile oldukça kullanışlı bir sistem elde edilmiş olur [Doğan, 2003].

Mikroişlemcilerde üç temel ünite vardır. Bunlar merkezi işlem birimi (CPU), I/O, hafızalar ve ek olarak bazı destek birimleridir. Bundan dolayı mikroişlemcili sistemlerde unite sayısının fazla olması, güç tüketiminin fazla olması ve fiyatlarının yüksek oluşu mikroişlemcili sistemlerin kullanım alanlarını olumsuz yönde etkilemiştir. Bu dezavantajlarından dolayı mikroişlemci sistemi için gerekli olan üniteler tek bir tümdevre altında birleştirilerek mikrodenetleyiciler üretilmiştir. Mikrodenetleyicilerin mikroişlemcilerden en büyük farkları üzerinde bellek, giriş/çıkış devreleri ve daha birçok yardımcı devrelerin olmasıdır.

PIC serisi mikrodenetleyicisi, Microchip firması tarafından geliştirilen bir mikrodenetleyici ürünüdür. Üretilmesindeki amaç, çok fonksiyonlu sayısal uygulamaların hızlı ve ucuz bir mikroişlemci ve yazılım yoluyla gerçekleştirilmesidir. PIC (Peripheral Interface Controller) çevresel arabirim kontrolörü anlamına gelmektedir. İlk olarak 1994 yılında 16 bitlik ve 32 bitlik büyük işlemcilerin giriş ve çıkışlarındaki yükü azaltmak ve denetlemek amacıyla çok hızlı ve ucuz bir çözüme ihtiyaç duyulduğu için geliştirilmiştir.

PIC serisi tüm işlemciler, herhangi bir ek bellek veya giriş/çıkış arabirim devresi gerektirmeden sadece 2 adet kondansatör, 1 adet direnç ve bir kristal yardımı ile çalıştırılabilmektedir. Tek bacadan 25 mA akım olmak üzere, tümdevre toplam olarak 300 mA akım verebilme gücüne sahiptir. Tümdevre 1 MHz osilator frekansında çektiği akım, çalışırken 2 mA, stand-by durumunda ise 20µA kadardır.

PIC mikrodenetleyicilerin avantajları veya tercih edilmelerinin nedenleri aşağıdaki gibi maddeler halinde sıralanabilir.

- Sayısal uygulamalarda hızlı ve pratik, fiyatının oldukça ucuz olması,
- Bellek ve veri için ayrı yerleşik işlem yollarının bulunması,
- Veri ve belleğe hızlı bir şekilde erişilebilmesi,
- PIC 'e göre diğer mikrodenetleyicilerde veri ve programı taşıyan bir tek BUS bulunması, dolayısıyla PIC 'in bu özelliği ile diğer mikrodenetleyicilerden iki kat daha hızlı olması,

- Herhangi bir ek bellek veya giriş/çıkış elemanı gerektirmeden sadece 2 kondansatör ve bir direnç ile çalışabilmeleri,
- Yüksek frekanslarda çalışabilme özelliği,
- Uyku modunda çok düşük akım çekmesi,
- Kesme kapasitesi ve 14 bit komut işleme hafızası.

PIC komutları bellekte çok az yer kaplar ve dolayısıyla 12 veya 14 bitlik bir program bellek sözcüğüne sığarlar. Harvard mimari teknolojisi kullanılmayan mikrodnetleyicilerde, yazılım programında veri kısmına atlama yapılarak, veriler komut gibi çalıştırılması sağlanmaktadır. Bu da büyük hatalara yol açmaktadır. PIC 'lerde ise bu durum söz konusu değildir.

PIC oldukça hızlı bir mikrodnetleyicidir. Her bir komut döngüsü 1µs kadardır. Örneğin 5 milyon komutluk bir programın 20MHz 'lik bir kristalle döngüsü yalnızca 1 saniye sürer. Bu süre 386SX33 bilgisayar işlemcisi hızının yaklaşık 2 katıdır. RISC işlemcisi olması nedeniyle PIC işlem hızını arttırmıştır.

PIC tamamıyla statik bir işlemcidir, yani saat durdurulduğunda da tüm yazmaç (Register) içeriğindeki bilgi korunur. Programı çalışmadığı zaman PIC uyuma moduna geçerek çok düşük akım çekmesi sağlanabilir. PIC uyuma moduna geçtiğinde, saati (clock) durur ve uyuma işleminden önce hangi durumda olduğunu çeşitli bayraklarla (flag) ifade eder.

PIC 'lerde her türlü ihtiyaçlara cevap verebilen çeşitli hız, sıcaklık, kılıf, I/O, zamanlayıcı (timer), iletişim portları, analog sayısal dönüştürücü (A/D) ve bellek seçenekleri bulunmaktadır. Tümdevre bir kod koruma özelliğine sahiptir. Koruma biti programlandıktan sonra program belleği içindeki bilginin okunması önlenir. PIC, program geliştirmek amacıyla programlanabilir ve tekrar silinebilir özelliğe sahiptir. Aynı zamanda seri üretim amacıyla bir kere programlanabilir (OTP) özelliği de bulunmaktadır.

PIC mikrodnetleyicisinin en önemli kısmı olan aritmetik sayısal ünitesi (ALU) bir yazmaç (W) içerir. PIC, diğer mikroşlemcilerden farklı olarak aritmetik ve mantık işlemleri için bir tek ana yazmacı olmasıdır. W yazmacı 8 bit genişliğinde olup, CPU 'daki herhangi bir veriyi başka bir adrese transfer etmek için kullanılır. CPU alanında ayrıca iki kategoriye ayırabileceğimiz veri dosya listeleri bulunur. Bu veri dosya listelerinden biri I/O, ve diğeri kontrol işlemlerinde RAM olarak kullanılır.

4.2 PIC16F877

Yüksek performanslı RISC CPU 'su olan 16F877 'de 35 tane komut vardır. Bu komutların çoğu, 2 çevrim süren dallanma komutları hariç, 1 çevrimde işletilmektedir. İşletim hızı 20 MHz 'dir. 8kbayt x 14 kelimelik FLASH program, 368x8 baytlık veri ve 256x8 baytlık EEPROM hafızaları vardır. Ayrıca 14 tane dahili ve harici kesme, 8-seviyeli donanım yığını vardır. Doğrudan, dolaylı ve bağıl adres modlarına sahiptir. Programlama ve çalışma esnasında sadece 5V 'luk besleme gerilimine ihtiyaç duymaktadır.

PIC16F877 düşük maliyetli, yüksek performanslı, CMOS, full-statik bir mikrodenetleyicidir. 8 seviyeli, derin küme ve çoklu iç ve dış kesme kaynaklarına sahiptir. Harvard Mimarisinin ayrı komut ve veri taşıyıcısıyla 8 bitlik veri taşınmasına ve 14 bitlik komut kelimesine imkân vermektedir. İki aşamalı olarak birçok komutun tek bir çevrimle işlenmesini sağlamaktadır. PIC16F877 mikrodenetleyicileri tipik olarak 2/1 oranında sıkıştırılmış kodlara erişmektedir ve aynı türden 8 bit mikrodenetleyicilerden 2/1 oranında daha hızlıdır. PIC16F877 36 bitlik RAM belleğine, 256 bayt EEPROM belleğine ve 33 I/O bacağa sahiptir. Bunun yanı sıra zamanlayıcı ve sayaç ta (counter) mevcuttur. PIC16F877 mikrodenetleyicisi ile ilgili donanım ve hafıza özellikleri, blok diyagramı ve bacak bağlantıları ve bacak adları ile açıklamaları EK-1 'de verilmiştir [Microchip Tech.].

PIC16F877 'de 8 bit ve 16 bit olmak üzere 3 adet zamanlayıcı/sayıcı ve iki adet DGM modülü bulunmaktadır. 10 bitlik ve 8 kanallı analog-sayısal dönüştürücü, iki adet karşılaştırıcı ve chip üzerinde programlanabilen gerilim referans birimleri vardır. FLASH program hafızası 100.000 defa yazılıp silinebilir. EEPROM hafızası 1.000.000 defa yazılıp silinebilir. EEPROM, içindeki bilgileri yaklaşık 40 yıl hafızada tutabilir.

4.2.1 Giriş/Çıkış Portları

I/O portlarındaki bazı pinler, devredeki çevresel özellikler için alternatif bir fonksiyonla çoklanmıştır. Genelde bir çevresel fonksiyon aktif olduğunda, bu fonksiyon ile ilgili bacaklar genel amaçlı I/O hattı gibi kullanılmayabilir.

PORTA, 6-bit genişliğinde çift yönlü bir porttur. TRISA, veri yönü saklayıcısının bitlerinden biri "1" yapıldığında, PORTA' da bu bite tekabül eden bit giriş olarak ayarlanmış olur. TRISA yazmacının bitlerinden biri "0" yapıldığında, PORTA 'nın bu bitine tekabül eden bit çıkış olarak ayarlanmış olur. PORTA yazmacının okunmasında pinlerin durumu belirlenir, oysa yazma işlemi port latch 'e yazmayla gerçekleşir. Tüm yazma işlemleri sırasıyla okuma, değiştirme ve yazma işlemlerinin yapılmasıyla gerçekleştirilir. PORT' a bir yazma işlemi; port

pinlerinin okunması, sonra bu değerlerin değiştirilmesi ve daha sonra port veri latch 'ine yazılmasıyla sonuçlandırılır. PORTA 'nın RA4 pini aynı zamanda TIMER0 'ın saat girişidir (RA4/T0CKI). RA4/T0CKI pini, Schmitt Trigger girişi ve açık drain çıkışı şeklinde kullanılabilir. Diğer tüm PORTA pinleri TTL giriş seviyelerine ve CMOS çıkış sürücülerine sahiptir. Ayrıca analog girişler ve analog VREF girişine sahiptir. Analog ya da sayısal her bir pinin işlevi, ADCON1 (A/D Control Register1) hafızasındaki kontrol bitlerinin set/clear şeklinde seçilmesiyle belirlenir.

PORTB, 8-bit genişliğinde çift yönlü bir porttur. TRISB, veri yön saklayıcısıdır. TRISB yazmacının bitlerinden biri "1" yapıldığında, PORTB' de bu bite tekabül eden bit giriş olarak ayarlanmış olur. TRISB yazmacının bitlerinden biri "0" yapıldığında, PORTB' de bu bite tekabül eden bit çıkış olarak ayarlanmış olur. PORTB 'nin üç pini RB3/PGD, RB6/PGC ve RB7/PGD, düşük voltaj programlama fonksiyonlarıyla çoklanmıştır.

PORTC, 8-bit genişliğinde çift yönlü bir porttur. TRISC, veri yön saklayıcısıdır. TRISC yazmacının bitlerinden biri "1" yapıldığında, PORTC 'de bu bite tekabül eden bit giriş olarak ayarlanmış olur. TRISC yazmacının bitlerinden biri "0" yapıldığında, PORTC 'de bu bite tekabül eden bit çıkış olarak ayarlanmış olur.

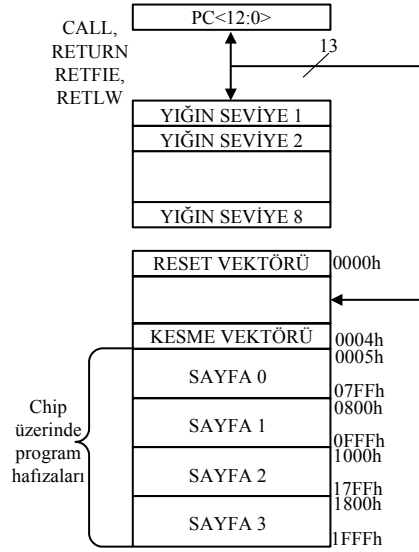
PORTD 8-bit genişliğindedir, giriş olarak kullanıldığında Schmitt Trigger 'li ve buffer 'lıdır. Her bir pin ayrı ayrı giriş çıkış olarak ayarlanabilir. PORTD 8-bit genişliğinde paralel slave port olarak da ayarlanabilir.

PORTE ayrı ayrı giriş ve çıkış olarak ayarlanabilen 3 pine sahiptir. Bu pinler Schmitt Trigger buffer 'ına sahiptir. PORTE 'nin I/O'ları PSP moduna ayarlandığında mikroişlemci kontrol girişleri olmaktadır.

4.2.2 Bellek Yapısı

PIC16F877 'de üç tane bellek bloğu vardır. Program belleği ve veri belleği ayrı ayrı yollara sahiptir. Bu nedenle iki belleğe de aynı anda giriş mümkün olmaktadır.

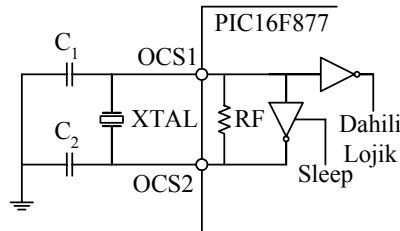
PIC16F877 8Kx14 kelimelik program bellek alanını adreslemek için 13-bit 'lik program sayacına sahiptir. PIC16F877 8Kx14 kelimelik FLASH program belleğine sahiptir. RESET vektörü 0000h ve kesme vektörü 0004h adreslerindedir. PIC16F877 'nin program bellek haritası ve yığını Şekil 4.1 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Program bellek haritası.

4.3 Kontrolör Devresi Tasarımı

DC motor kontrolünü gerçekleştirmek için kontrolör devresi ve sürücü devresi olmak üzere iki devreye ihtiyaç vardır. Bu çalışmada kullanılan kontrolör ve sürücü devreleri birbirinden bağımsız olarak çalıştırılabilecek şekilde ayrı iki kart üzerinde monte edilmiştir. Böylece sürücü devresi farklı bir kontrolör devresi tarafından da kontrol edilebilir. Kontrolör devresi tasarlanırken dikkat edilmesi gereken hususlardan biri mikrodenetleyicinin beslendiği DC kaynak düzgün çıkış vermelidir ve bu kaynağın salınımları düşük seviyelerde olmalıdır. Bundan dolayı, kullanılan mikrodenetleyici kartını beslemek için regüleli bir DC kaynak yapılmıştır. Diğer bir önemli husus ise mikrodenetleyicinin çalışması için gerekli olan saat (osilatör) devresinin doğru seçilmesidir. PIC mikrodenetleyici değişik saat devresi kullanabilme özelliğinden dolayı farklı frekanslarda çalışılabilir. Böylece çalışma hızı tasarıma uygun bir şekilde ayarlanabilir. PIC 'lerde dört ayrı osilatör devresi kullanılabilmektedir. Kristal osilatörler zamanlamada hassasiyetin kritik olduğu yerlerde kullanılmaktadır. Bundan dolayı, bu uygulamada kristal osilatör kullanılmıştır. Kristal osilatörlerin de farklı hızları bulunmaktadır. Bu çalışmada maksimum işlem hızına ihtiyaç duyulduğundan maksimum osilatör frekansı olan 20 MHz 'lik kristal osilatör kullanılmıştır.



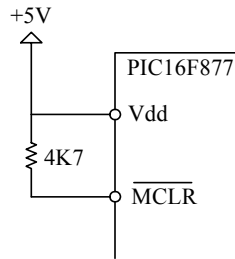
Şekil 4.2 Kristal osilatör.

Kristal osilatör, PIC16F877 'ye bağlanırken Şekil 4.2 'de gösterildiği gibi OSC1 ve OSC2 bacakları ile sıfır noktası arasına kondansatör bağlanması gerekmektedir. Ayrıca, kristal osilatörlerin kullanıldığı devrelerde kullanılan kondansatörlerin seçimine dikkat edilmelidir. İhtiyaç duyulan çalışma frekansına göre kullanılması gerekli kondansatörler Tablo 4.1 'de verilmiştir. Buna göre 20 MHz osilatör için Tablo 4.1 kullanılarak 22 pF kondansatör değeri seçilmiştir.

Tablo 4.1 Osilatör frekansına göre seçilmesi gereken kondansatör değerleri

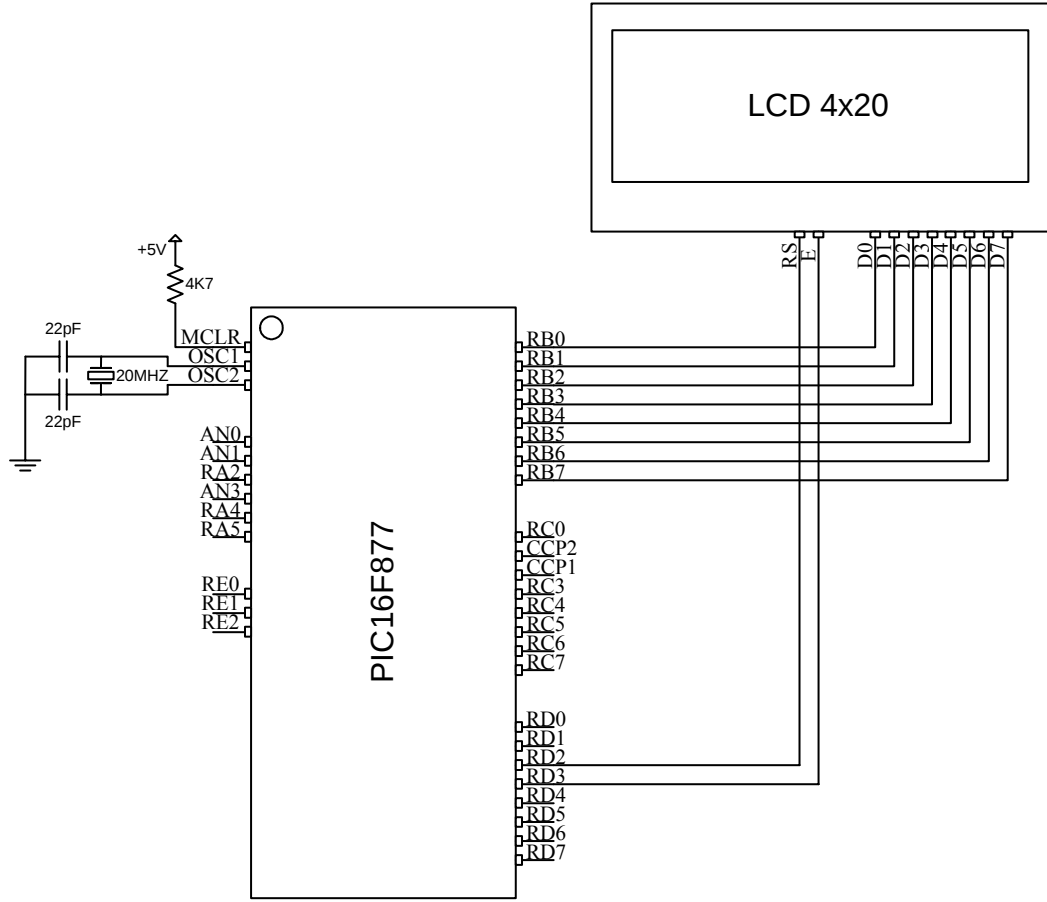
OSİLATÖR TİPİ	FREKANS	OSC1	OSC2
LP	32 KHz	33 pF	33pf
	200 KHz	15 pF	15 pF
XT	200 KHz	47–68 pF	47–68 pF
	1 MHz	15 pF	15 pF
HS	4 MHz	15 pF	15 pF
	4 MHz	15 pF	15 pF
	8 MHz	15–33 pF	15–33 pF
	20 MHz	15–33 pF	15–33 pF

PIC, ancak regüleli bir güç kaynağından beslendiği takdirde Şekil 4.3 'teki reset devresi kullanılabilir. Reset devresini oluşturmak için $\overline{\text{MCLR}}$ bacağı ile Vdd arasına 4,7 k Ω değerinde bir direnç eklemek yeterlidir.



Şekil 4.3 Reset devresi.

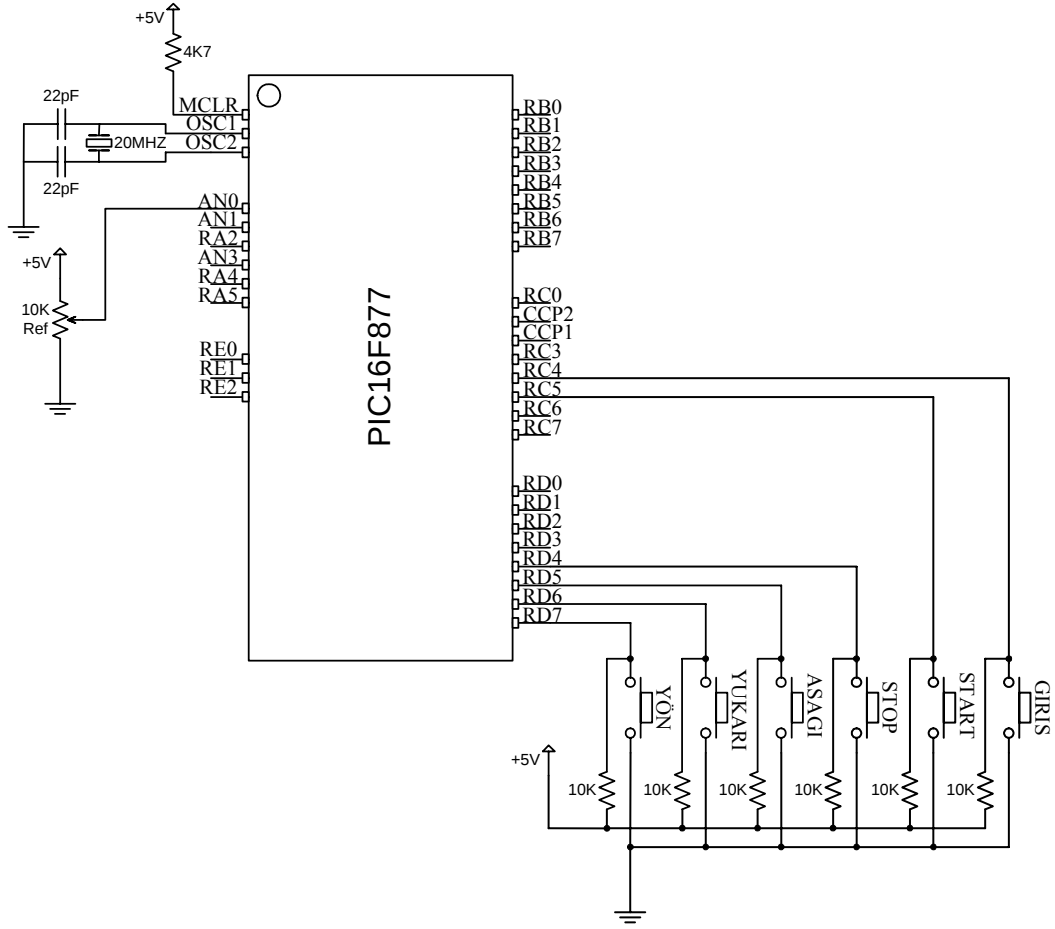
PIC 'in çalışması için gerekli olan besleme gerilimi ve saat devresi ayarlandıktan sonra, giriş/çıkış portlarının belirlenmesi gerekmektedir. PIC16F877 'de toplam 5 adet port ve bu portların kendilerine özgü farklı özellikleri bulunmaktadır. Bu özelliklere göre giriş ve çıkış uçları belirlenmelidir. Bu çalışmada kullanılan LCD 'nin veri girişleri için B portunun 8 biti kullanılmıştır. LCD'nin RS (register select) ve E (enable) uçları ise çıkış olarak belirlenmiş ve PIC'in başka bir portuna bağlanmıştır. Şekil 4.4 'te PIC ile LCD 'nin bağlantı şeması gösterilmiştir. LCD 4 satır ve 20 sütundan oluştuğu için, her satıra toplam 20 karakter yazılabilir. Kullanılan LCD 'nin kendi içinde işlemcisi bulunduğundan dolayı, LCD 'yi sürmek için ayrıca ara bir tümdevre kullanmaya gerek yoktur.



Şekil 4.4 LCD 'nin PIC ile bağlantı şeması.

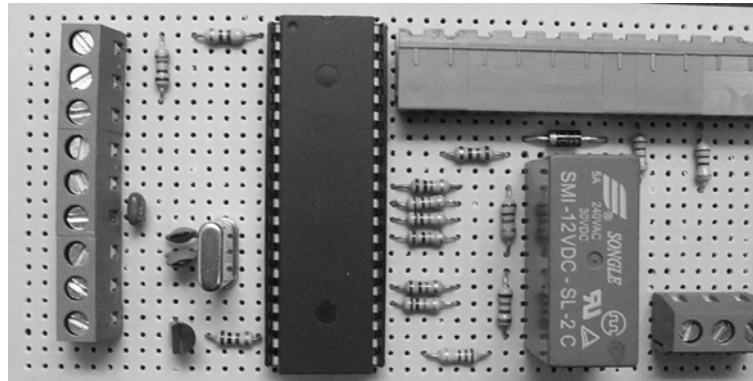
Kullanıcı tarafından PIC 'e bilgi gönderebilmek için giriş bitlerinin hangi portta ve hangi bitlerin giriş biti olarak kullanılmak istenildiği önceden belirlenmesi gerekir ve programlama sırasında bu bitler lojik 1 yapılmalıdır. Program aracılığıyla lojik 1 yapılan bitler giriş olarak belirlenmiş olur. Butonlar giriş portuna bağlanırken, giriş ile +5V arasına 10 k Ω değerinde bir direnç bağlanarak sürekli durumda lojik 1 olarak tutulabilir. Bu durumda butona basıldığında giriş sinyali 0 olur ve program yapılırken bu durum göz önüne alınmalıdır.

Motor kontrolünde kullanıcı tarafından belirlenmesi gereken yön, hız ve zaman bilgilerinin girilmesi gerekmektedir. Motorun hangi yönde kaç saniye dönmesi gerektiğini belirlemek için Şekil 4.5 'te gösterildiği gibi dört adet giriş butonu kullanılmıştır. Ayrıca motoru çalıştırmak ve durdurmak için de iki adet buton kullanılmıştır.



Şekil 4.5 Butonların PIC ile bağlantı şeması.

Bu çalışmada, motorun referans hız bilgisi analog giriş yardımıyla yapılmıştır. Şekil 4.5 'te gösterildiği gibi AN0 analog girişine 10 k Ω değerinde bir potansiyometre bağlanarak referans hız bilgisi girilmiştir. Kontrol devresinin görünüşü Fotoğraf 4.1 'de verilmiştir.



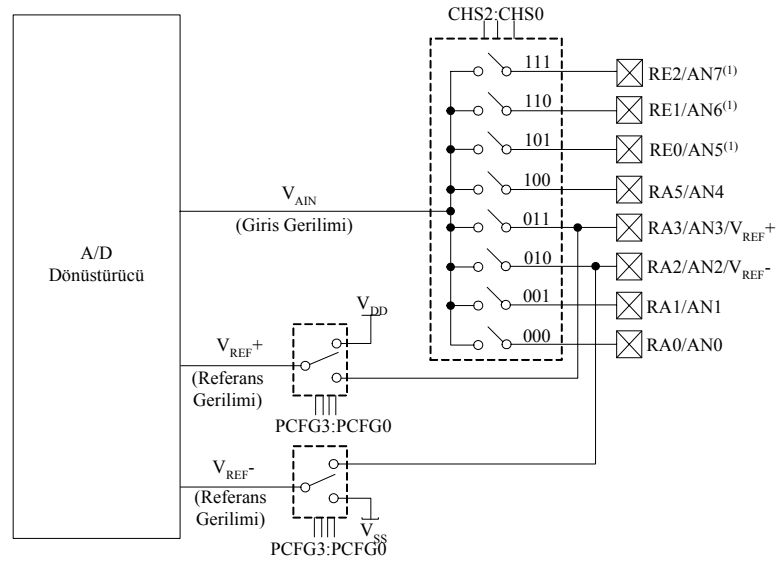
Fotoğraf 4.1 Kontrolör devresinin görünüşü.

4.4 Analog Dijital Çevirici

Kontrolör kartında toplam iki adet analog giriş kullanılmıştır. AN0 analog girişi referans hız bilgisi ve AN3 analog girişi tako generatörden alınan hız bilgisi için kullanılmıştır. Seçilen analog girişler için gerekli ayarlamalar aşağıda anlatılmıştır. Analog girişten alınan sinyal, PIC içinde 10 bit'lik bir sayısal değere çevrilir. Analog dijital dönüştürücü modülünün elde ettiği dijital sayı 0 ile 1024 arasında değişmektedir.

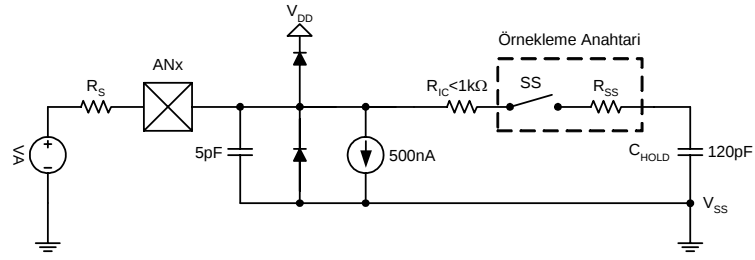
A/D modülü 4 adet yazmaca sahiptir. Bu yazmaçlar sırasıyla 8 bit 'lik kısmının saklandığı yazmaç (ADRESH), bit 'lik kısmının saklandığı yazmaç (ADRESL), Kontrol Yazmacı0 (ADCON0) ve Kontrol Yazmacı1 (ADCON1)

ADRESH:ADRESL yazmaçları 10-bitlik A/D dönüştürücünün sonucunu saklarlar. A/D çevirme işlemi bittiği zaman sonuç ADRESH:ADRESL yazmaç çiftine yüklenir. ADIF kesme bayrağının set edilmesi ile GO/DONE biti (ADCON0<2>) temizlenir. A/D modülünün blok diyagramı Şekil 4.6 'da gösterilmiştir. Analog girişlerin seçilme işlemi A/D çeviricinin değer yakalama işleminden önce yapılması gerekmektedir.



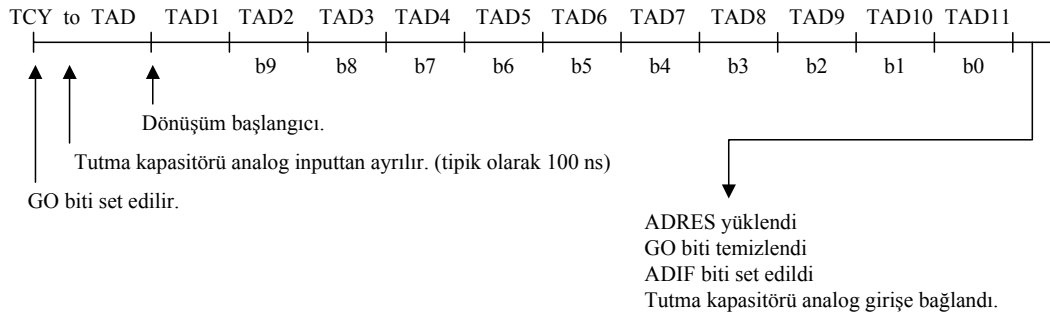
Şekil 4.6 A/D dönüştürücünün blok Diyagramı.

Analog giriş modeli Şekil 4.7 'de gösterilmiştir. Kaynak direnci (R_s) ve dahili örnekleme anahtarı direnci (R_{ss}), örnek tutma (C_{HOLD}) kondansatörünün şarj olması için gerekli süreyi doğrudan etkiler. Örnekleme anahtarı direnci V_{DD} gerilimi ile değişir. Analog kaynaklar için maksimum tavsiye edilen direnç 10 k Ω 'dur. Direncin azalması ile beraber örnek tutma zamanı da azalır. Başka bir analog giriş kanalını kullanmak için bir önceki A/D çevriminin tamamlanmış olması gerekmektedir. Minimumu tutma zamanı 25 °C sıcaklıkta yaklaşık olarak 20 μs dir.



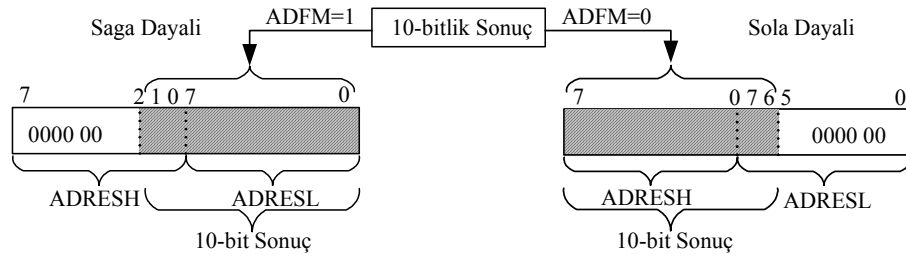
Şekil 4.7 Analog Giriş Modeli.

Şekil 4.8 'deki gibi GO bitinin set edilmesinden sonra ilk zaman dilimi TCY ile TAD arasındadır. GO/DONE biti dönüşüm sırasında temizlenirse dönüşüm yarıda kesilecektir. A/D dönüştürme kısmen bitmiş olsa bile A/D sonuç yazmaç çifti güncellenemeyecektir. ADRESH:ADRESL yazmaçlarındaki değer, en son tamamlanmış olan A/D dönüşüm değeri olarak kalacaktır. Sonra A/D dönüştürme işlemi yarıda kesilir, bir sonraki tutmanın başlamasından önce 2TAD kadar bekleme gereklidir. Bu sürenin (2TAD) ardından tutma işleminin başlaması ile daha önce belirlenmiş olan giriş kanalı otomatik olarak seçilmiş olur. GO/DONE biti A/D dönüşümün başlangıcından önce set edilir.



Şekil 4.8 A/D dönüşüm çevrimi.

ADRESH:ADRESL yazmaç çifti A/D çevrimin 10-bitlik sonucunun saklandığı yerdir. Bu yazmaç çifti 16-bitlik genişliktedir. A/D modül sağa veya sola dayalı olarak bilgi saklayabilir. Şekil 4.9 'da gösterildiği gibi ADFM kontrol biti ile A/D dönüştürme işlemi sonucunun konumu seçilebilir. Diğer kalan bitlere ise 0 değeri yüklenir. 10-bitlik analog sonuç sola dayalı olarak kullanıldığından ADFM=0 seçilmiştir. ADRESH ve ADRESL yazmaçlarından faydalanılarak 10 bit değerinde yeni bir değer elde etmemiz gerekmektedir. 8 bitlik ADRESH değerini 2 bit sola, ADRESL değerini de 6 bit sağa kaydırdıktan sonra bu iki değeri toplayarak 10 bitlik yeni bir değer elde etmiş oluruz. ADCON1 yazmacına 00000100 (0x04) değeri yüklenmiştir, bununla beraber ADCON1 yazmacının en ağırlıksız 4 biti ile AN0 ve AN3 analog girişleri seçilmiş olur.

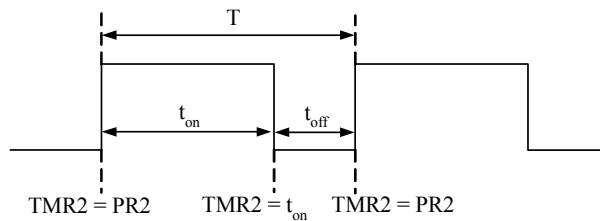


Şekil 4.9 A/D dönüştürme işleminin sonuç adresleri ve konumları.

4.5 DGM Sinyalinin Üretilmesi

Bu çalışmada gerilim değeri ayarlanarak motorun hız kontrolü, Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) tekniği kullanılarak yapılmıştır. Motor sürücü devresinde kullanılacak yarıiletken anahtarların çalışma frekansları da göz önünde bulundurularak DGM sinyalinin görev periyodunun önceden belirlenmesi gerekmektedir. PIC16F877 mikrodenetleyicisinde iki adet donanımsal olarak kullanılabilir DGM modülü bulunmaktadır. Mikrodenetleyici tarafında üretilcek DGM sinyalinin 10 bitlik çözünürlükte çalıştırılabilmesi için DGM modülünün ayarlanması gerekmektedir. DGM sinyalinin frekansı, kullanılan kristal osilatörün frekansı ile bağlantılı olduğundan 10 bitlik çözünürlükte DGM sinyali ancak müsaade edilen frekanslarda üretilebilir.

DGM çıkışı zamanla, Şekil 4.10 'da gösterildiği gibi bir değişime sahiptir. Bu değişimin periyodu sabit ancak, t_{on} ve t_{off} süreleri ayarlanabilmektedir. Dolayısıyla görev periyodu olarak da söylenen $d = t_{on} / (t_{on} + t_{off}) = t_{on} / T$ oranı ayarlanarak motorun uçları arasındaki DC gerilimin ortalama değeri değiştirilebilmektedir.



Şekil 4.10 T periyodu sabit t_{on} süresi ayarlanabilen DGM sinyali.

DGM sinyalinin periyodu PR2 yazmacı ile belirlenir. DGM sinyalinin periyodu $T = [(PR2) + 1] \cdot 4 \cdot T_{OSC} \cdot (TMR2)$ formülünden hesaplanabilir.

DC motor kontrolünde kullanılacak DGM sinyalinin frekansı seçilirken, sürücü devrede kullanılacak yarıiletken anahtarların hızlarından daha yüksek çalışma frekansına sahip olmamasına dikkat etmek gerekir. Sürücü devrede kullanılan IGBT 'ler yaklaşık 10 kHz anahtarlama frekansına kadar çalışabilmektedir. DGM modülü ise 20 MHz 'lik osilatör ile

çalıştırıldığında 10 bitlik çözünürlük için yaklaşık 20 kHz frekansa kadar çalıştırılabilmektedir. Fakat DGM sinyali periyodu ile kontrolörün işlem yapabilmesi için gerekli süre arasında büyük bir fark olmaması için 20 MHz osilatör ile maksimum işlem hızı ve minimum DGM frekansı elde edilmiştir. Farklı DGM frekansları için yazmaç değerleri Tablo 4.2 'den verilmiştir.

Tablo 4.2 20MHz 'lik osilatör ile elde edilebilecek DGM frekans değerleri

DGM FREKANSI (kHz)	1.22	4.88	19.53	78.12	156.3	208.3
Prescaler Değeri	16	4	1	1	1	1
PR2 Değeri	0xFFh	0xFFh	0xFFh	0x3Fh	0x1Fh	0x17h
Maksimum Çözünürlük (bit)	10	10	10	8	7	5.5

Bu durumda, frekansı 1.22 kHz olan bir DGM sinyali elde etmek için şu şekilde hesaplamalar yapılmıştır. Kristal osilatör frekansı $F_{osc} = 20$ MHz alındığı takdirde;

$$TMR2 = \frac{F_{osc}}{f \cdot 2^{10}} = \frac{20 \cdot 10^6}{1,22 \cdot 10^3 \cdot 2^{10}} = 16$$

bulunmuş ve TMR2'ye bu değer yazılmıştır. Daha sonra üretilecek DGM sinyalinin periyodu;

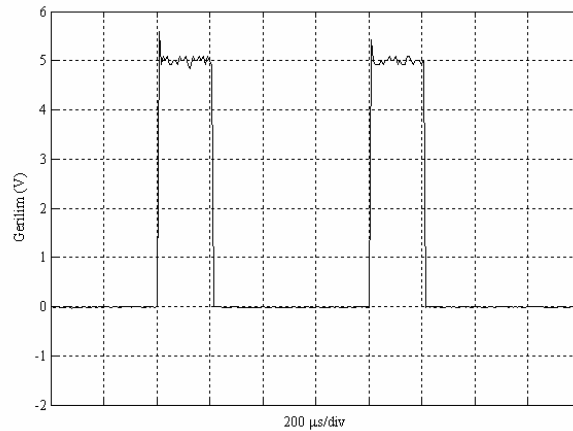
$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1220} = 819 \text{ } \mu\text{s}$$

olarak hesaplanmıştır. Sonra da $T = [(PR2) + 1] \cdot 4 \cdot T_{osc} \cdot (TMR2)$ ifadesinden;

$$819 \cdot 10^{-6} = [(PR2) + 1] \cdot 4 \cdot \frac{1}{20 \cdot 10^6} \cdot 16 \Rightarrow PR2 = 255$$

olarak PR2'ye yazılacak değer bulunmuştur.

DGM modülünün ürettiği sinyal yukarıda hesaplandığı gibi frekansı 1.22 kHz olacak şekilde Şekil 4.11 'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.11 PIC 'in CCP1 modülü ile elde edilen 1.22 kHz'lik DGM sinyali.

4.6 Giriş/Çıkış Bağlantılarının Belirlenmesi

Kontrolör kartının tasarlanmasında önemli olan konulardan biri giriş veya çıkış olarak belirlenecek bacakların kullanılacak bacağın özelliğine göre belirlenmesidir. Şekil 4.12 'de PIC üzerinde seçilen giriş ve çıkışlar gösterilmiştir. Buna göre, TRISx yazmaçlarına yüklenilmesi gereken değerler aşağıda belirtilmiştir.

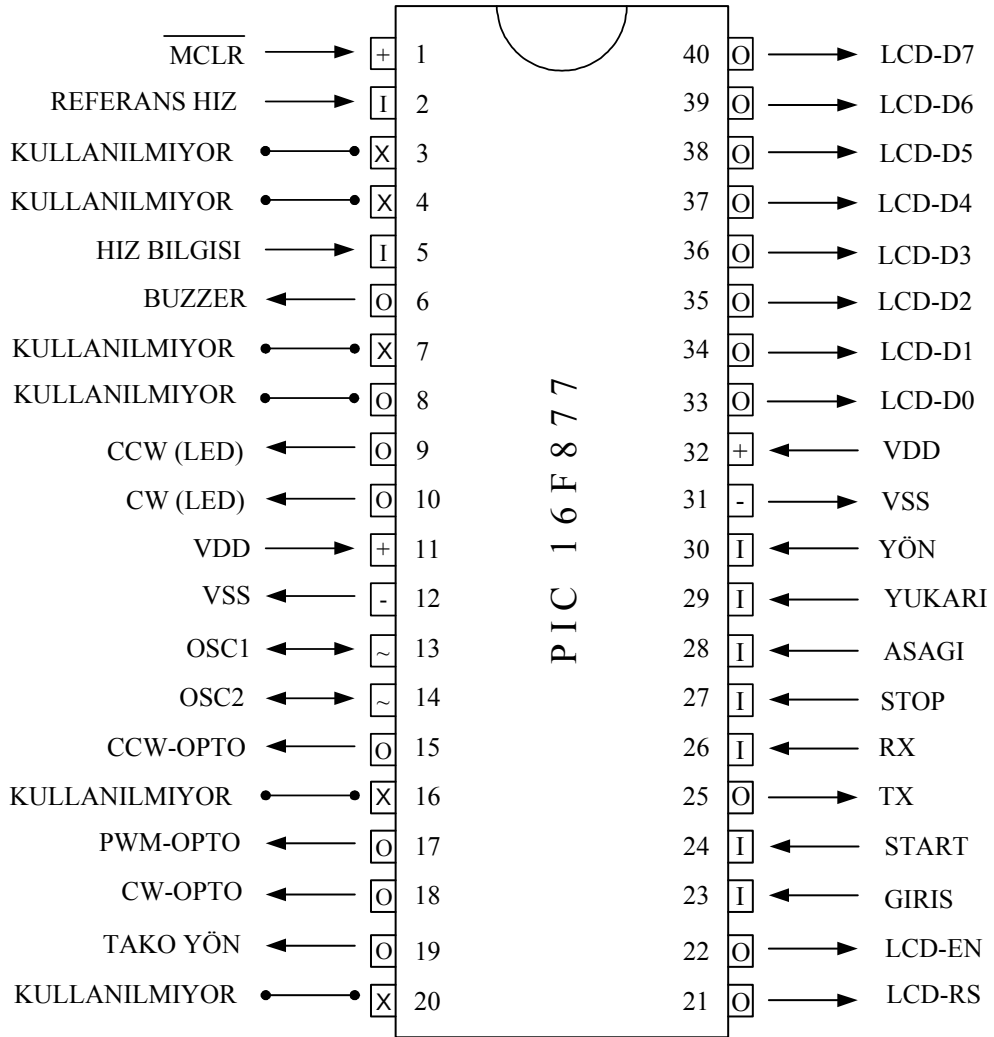
TRISA=0b00001001;

TRISB=0b00000000;

TRISC=0b10110000;

TRISD=0b11110000;

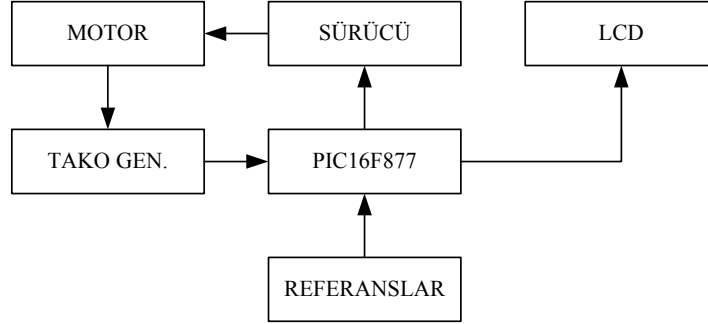
TRISE=0b00000000;



Şekil 4.12 Kullanılan giriş / çıkışlar ve açıklamaları.

4.7 Kontrolör Kartının Özellikleri

Kontrolör kartı giriş ve çıkışlara sahip olan bir sistem olarak düşünülebilir. Şekil 4.13 'te gösterildiği gibi kullanıcı butonları ve tako generatör tarafından mikrodenetleyiciye gönderilen giriş bilgisi ve mikrodenetleyiciye daha önceden tanıtılan yazılım programı aracılığıyla gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra mikrodenetleyici, sürücü devresine ve LCD 'ye uygun bilgi ve kontrol sinyalleri göndermektedir.



Şekil 4.13 Kontrol devresinin kapalı şeması.

Motorun referans hızı, çalışma yönü ve kaç saniye süreyle çalışması gerektiği kullanıcı butonları ve potansiyometre yardımı ile girilebilir. Şekil 4.14 'te gösterildiği gibi öncelikle 1. referans değeri girilmektedir. Potansiyometre ile motor hızı, “YÖN” butonu ile motorun hangi yönde döneceği ve “YUKARI-AŞAĞI” butonları ile motorun çalışma süresi ayarlanmaktadır. Yön belirlenmesinde ok işaretleri kullanılmıştır. “→” işareti motor saat yönünde döndürülmek istenildiğinde, “←” işareti ise motor saat yönünün tersi yönde döndürülmek istenildiğinde seçilmektedir. 1. referans değerlerinin girilmesinden sonra “GİRİŞ” butonuna basılarak 2. referans değerleri ve ardından tekrar basılarak 3. referans değerleri girilebilir. Ayrıca “GİRİŞ” butonuna dört defa basıldığı zaman program 1. referans değerlerine geri döner ve diğer referans bilgilerini sıfırlar.

n1: → 2555 rpm / 05sn n2: rpm / sn n3: rpm / sn Referans 1 ! OFF	n1: → 2555 rpm / 05sn n2: ← 3000 rpm / 07sn n3: rpm / sn Referans 2 ! OFF	n1: → 2555 rpm / 05sn n2: ← 3000 rpm / 07sn n3: → 1500 rpm / 15 sn Referans 3 ! OFF
--	---	---

Şekil 4.14 Referans değerlerinin LCD 'de görüntülenmesi.

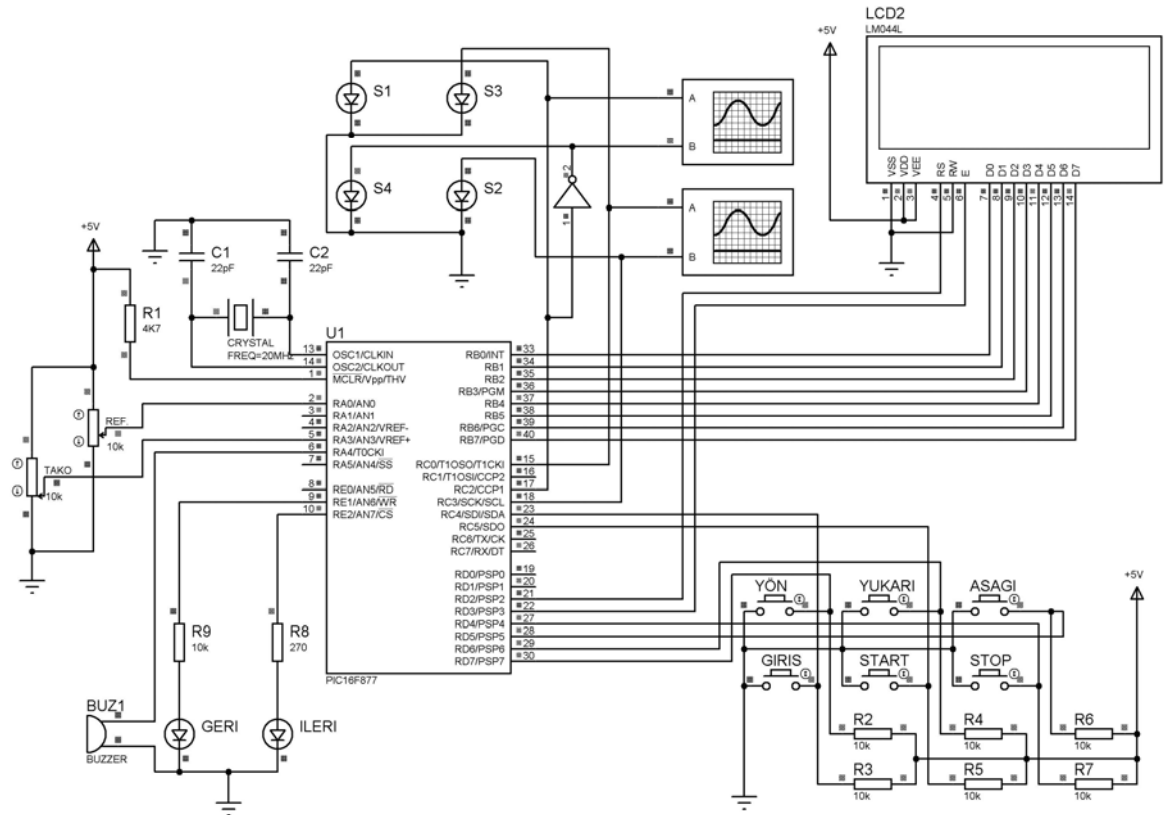
Referans değerlerinin girilmesinden sonra “START” butonuna basılarak motor enerjilenir ve kontrolör yardımı ile istenilen referanslarda belirtilen süre kadar çalışır ve belirtilen toplam süre sonunda motor hızı sıfır değerine düşürülür. Ayrıca istenildiğinde

kullanıcı tarafından belirtilen süre beklenilmeden “STOP” butonuna basılarak motor durdurulabilir. Motorun belirtilen sürelerde çalışmasının ardından motor durur ve referans değerlerini sıfırlayarak başlangıç ekranına geri döner ve kullanıcı tarafından bilgi girilmesini bekler. Bu çalışmada kullanılan LCD ’nin görüntüsü Fotoğraf 4.2 ’de gösterilmiştir.



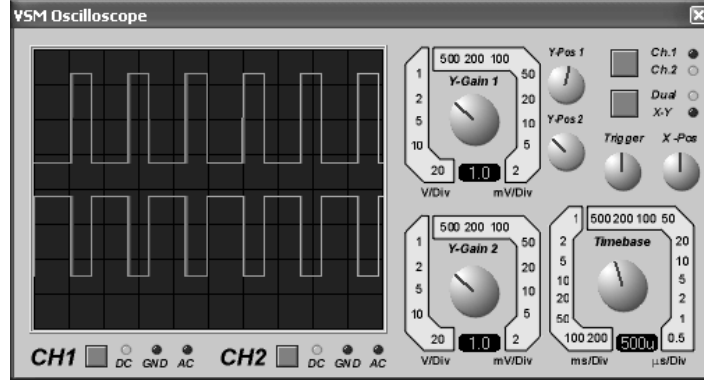
Fotoğraf 4.2 LCD ’nin görüntüsü.

Kontrolör kartının montajı yapılmadan önce tasarlanan kontrolör kartı ve PIC programı “ISIS 6 Professional” benzetim programında kontrol edilmiştir. Kontrolör kartının benzetim devre şeması Şekil 4.15 ’te verilmiştir. Benzetim ortamında, kontrolör devresinin giriş ve çıkışları kontrol edildikten sonra bazı hatalar gözlemlenmiştir ve program ile kontrol kartında gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra devrenin montajı gerçekleştirilmiştir



Şekil 4.15 ISIS 6 Professional ’da oluşturulan kontrolör devre şeması.

Benzetim programı sayesinde IGBT 'lere uygulanacak kontrol sinyalleri önceden incelenerek deneysel çalışma sırasında ortaya çıkabilecek bazı program hataları giderilmiştir. S₁ ve S₄ anahtarlarına uygulanan kontrol sinyalleri Şekil 4.16 'da gösterilmiştir.



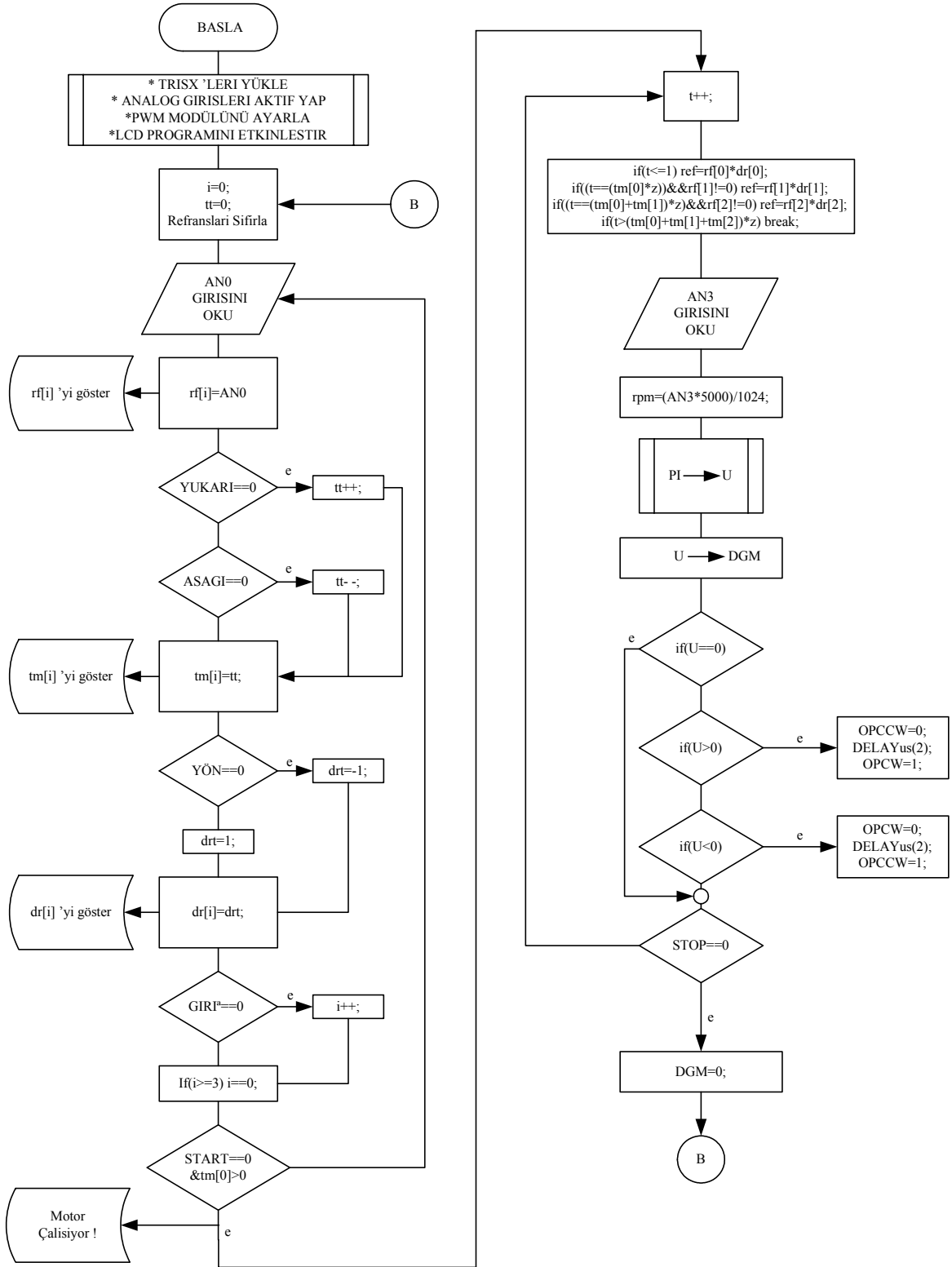
Şekil 4.16 ISIS 6 Professional ile incelenen S₁ ve S₄ anahtarlarına uygulanan kontrol sinyalleri.

Böylece kontrolör devresi ve program algoritması benzetim ortamında kontrol edilerek motor kontrolüne uygun hale getirilmiştir.

4.8 DC Motor Kontrol Programı Algoritması

Program yapılandırılırken önce mikrodenetleyicinin bazı yazmaçlarının aktif edilmesi ve ayarlanması gerekmektedir. Öncelikle TRISx yazmacı ile dijital giriş ve çıkışlar seçilmelidir. Daha sonra analog giriş ve DGM modülleri aktif edilmelidir. Bu yazmaçlar, programın başlangıcında ayarlanması gerekir.

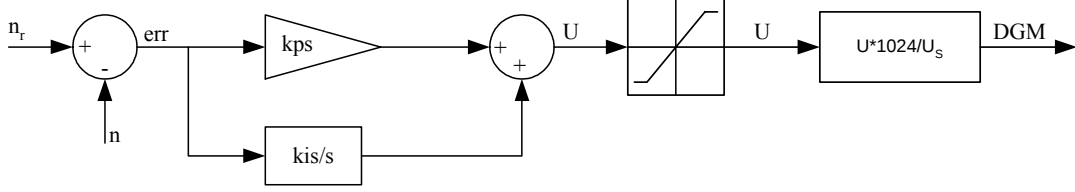
Program içinde kullanılan önemli değişkenler; “rf[i]” referans hız, “tm[i]” çalışma süresi, “dr[i]” yön bilgisi ve “rpm” tako generatörden okunan hız bilgisini temsil eder. Daha sonra referans değişkenler rf[4], tm[4] ve dr[4] dizilerine atanır. “START” butonuna basılarak motor çalışma program döngüsü başlatılmış olur. Bu döngü içinde işlem hızını düşürmemek için LCD 'ye bilgi gönderilmemektedir, sadece referans bilgilerin işlenmesi için PI kontrolör ve DGM modülü çalıştırılmıştır. Böylece gereksiz işlemler döngü içinde yapılmayarak işlem hızı arttırılmıştır. Motorun hız bilgisi analog girişten alınırken PIC mikrodenetleyicide 0-1024 arasında bir değer üretilmektedir. PI kontrolör programında tako generatör bilgisi kullanılarak hız d/d olarak $\text{rpm} = \text{AN3} \times 5000 / 1024$ ifadesi ile hesaplanmıştır. PI kontrolör programında hesaplanan U gerilim değeri DGM modülü için 10 bitlik sayıya dönüştürülmüştür. 10 bitlik değerlerin en ağırlıksız iki biti L ve geriye kalan 8 biti ise H yazmacına atanmıştır (CCPR1L=H, CCP1CON=0x0C+L). Böylece DGM sinyali 10 bit olarak elde edilmiştir. PI kontrolör programının hesapladığı U değerine göre çıkışlar ayarlanmıştır. Şekil 4.17 'de geliştirilen programın basit bir akış şeması verilmiştir.



Şekil 4.17 PIC için geliştirilen programın akış şeması.

Şekil 4.17 'de gösterilen PI hesaplamalarını yapan blok diyagramı Şekil 4.18 'de ayrıntılı bir şekilde verilmektedir. Burada n_r referans hız, n tako generatörden okunan hız, kps

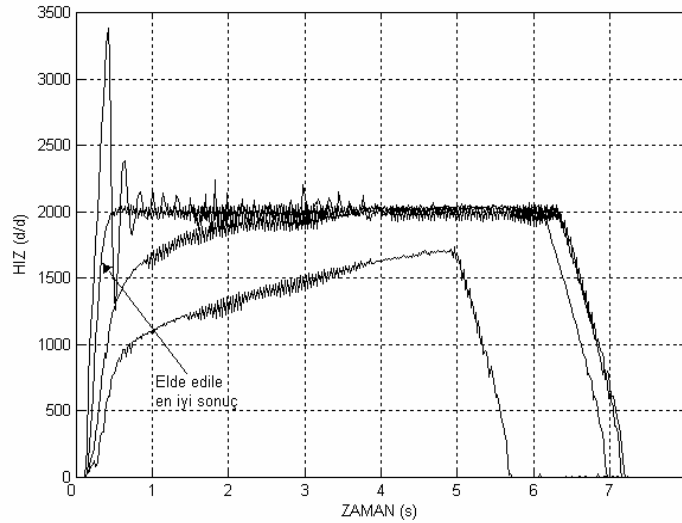
ile kis sırasıyla PI kontrolörünün oransal ve entegral katsayıları ve U PI bloğu sonunda hesaplanan ve motora uygulanması gereken gerilim değeri için kullanılmıştır.



Şekil 4.18 PI Kontrolörü'nün blok diyagramı.

Programda hesaplanan U değeri daha sonra PIC 'in üreteceği DGM sinyali değerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Hesaplanan bu değer 0 ile 1024 arasında olması gerektiğinden dolayı DGM değeri hesaplanmadan önce U değeri belirli sınırlar arasında tutulmalıdır. Bunun için U değeri bir sınırlayıcıdan geçirilmiş ve böylece hesaplanan U değeri ± 16 V değerleri arasında kalmıştır. U geriliminin negatif olması durumunda ise hesaplanan DGM değerinin mutlak değeri alınarak 1024 değerinden çıkarılmıştır.

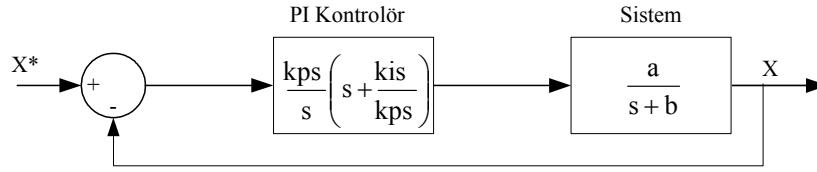
Hız referansı 2000 d/d olarak verilen motorun farklı PI parametreleri ile elde edilen deneysel sonuçları Şekil 4.19 'da görülmektedir. 4 farklı PI parametresi için elde edilen sonuç grafiklerden sadece bir tanesi uygun görülmektedir. Bilindiği gibi iyi bir kontrolde kontrolörün, referans değeri mümkün olduğu kadar taşma ve salınma yapmadan en kısa sürede yakalaması istenir. Burada elde edilen sonuçlar içinde en iyisi Şekil 4.19 'da gösterilmiştir.



Şekil 4.19 Farklı PI parametreleri ve $n_r = 2000$ d/d için deneysel sonuçlar.

PI parametreleri iyi belirlenmeden büyük sistemlerde denenmesi tehlikelidir ve sistemde büyük tahribatlar oluşturabilir. Bundan dolayı sistem kontrolü yapılmadan önce PI

kontrolörü kullanılırken kps ve kis değerlerinin iyi belirlenmesi gerekmektedir. PI kontrolör parametrelerinin hesaplanmasında aşağıda verilen sistem göz önünde bulundurulabilir.



Şekil 4.20 Kontrolör döngüsü.

Şekil 4.20 'de gösterilen sistem yerine motor düşünülebilir, böylece motorun transfer fonksiyonundan yararlanılarak PI parametreleri hesaplanabilir. Motor transfer fonksiyonunu elde etmek için gerekli motor parametreleri deneysel sonuçlarla elde edilmiştir. Deneyde kullanılan motor parametreleri Tablo 4.3 'te verilmiştir.

Tablo 4.3 Deneyde kullanılan DC motor parametreleri.

Açıklama	Simge	Değer
Endüvi Direnci, (Ω)	R_a	10
Endüvi İndüktansı, (mH)	L_a	1.233
Atalet Momenti, (kg.m^2)	J	$2.388.10^{-6}$
Sürtünme Katsayısı, (N.m.s)	B	$11,944.10^{-6}$
Alan Sabiti (V.s)	C	$32,592.10^{-3}$

Motorun transfer fonksiyonu Şekil 4.20 'deki sistem fonksiyonuna benzetilmek istenirse;

$$\frac{C/J}{s + B/J} = \frac{a}{s + b} = \frac{13649}{s + 5}$$

sonucu elde edilir. Kontrol döngüsünün transfer fonksiyonu;

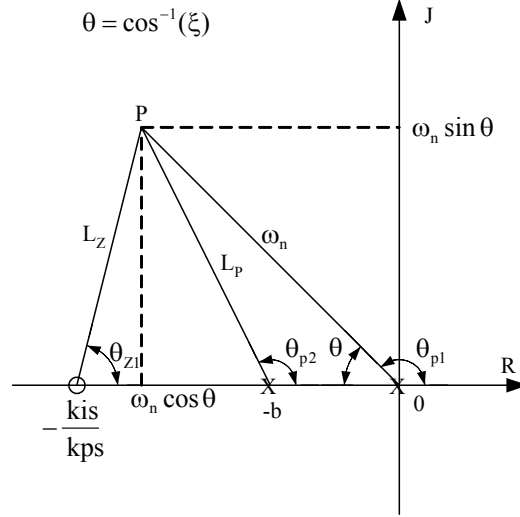
$$\frac{X}{X^*} = \frac{1}{Z} \frac{\omega_n^2 (s + Z)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.1)$$

şeklindedir. Burada ω_n doğal frekansı, ξ sönüm faktörü ve Z sıfırının ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$\omega_n^2 = a.kis ; \xi = \frac{b + a.kps}{2\omega_n} ; Z = \frac{kis}{kps} \quad (4.2)$$

Oluşan sistemin kutup ve sıfırlarının kompleks düzlemdeki yerleşim biçimi Şekil 4.21 'deki gibi ise, ω_n doğal frekans ile ξ sönüm faktörü bilinen değerler olmak üzere, kis ve kps parametreleri kolaylıkla hesaplanabilmektedir.

$$\theta_{p1} = 180^\circ - \theta ; \theta_{p2} = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{\omega_n \sin \theta}{\omega_n \cos \theta - b} \right) ; \theta_{z1} = \theta_{p1} + \theta_{p2} - 180^\circ \quad (4.3)$$



Şekil 4.21 Kutup ve sıfırların kompleks düzlemdeki yerleşimi.

Kutup ve sıfırların açılarını denklem (4.3) 'ten bulduktan sonra, aşağıda verilen ifadeyle kis/kps oranı bulunabilir.

$$\tan \theta_{z1} = \frac{\omega_n \sin \theta}{\frac{kis}{kps} - \omega_n \cos \theta} \quad (4.4)$$

L_p ve L_z uzunlukları ise şu şekilde bulunur.

$$L_p = \frac{\omega_n \sin \theta}{\sin \theta_{p2}} ; L_z = \frac{L_p \sin(180^\circ - \theta_{p2})}{\sin \theta_{z1}} \quad (4.5)$$

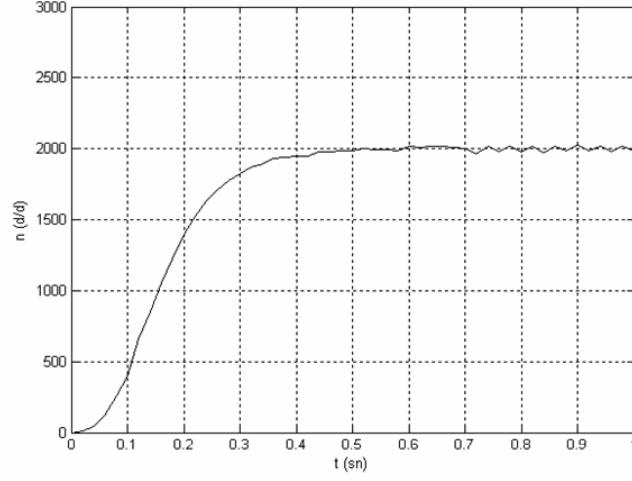
Bulunan bu uzunluklar yardımıyla sistemin K kazancı ve buradan da kps tespit edilir.

$$K = a.kps = \frac{L_p \omega_n}{L_z} \Rightarrow kps = \frac{L_p \omega_n}{a L_z} \quad (4.6)$$

kps bulunduktan sonra denklem (4.4) 'te yerine konularak kis bulunabilir.

Bu ifadelerden yararlanılarak farklı ω_n ve ξ için hesaplanan sonuçlardan, $\omega_n=15$ ve $\xi=0,5$ için $kis=0,0164847$ ve $kps=0,0007327$ PI kontrolör değerlerinin uygun olduğu belirlenmiştir. PI parametrelerinin hesaplanmasıyla ilk deneysel sonuç Şekil 4.22 'de

gösterildiği gibi istenilen kontrolü sağladığı görülmüştür. Şekilden de görüleceği gibi referans hız değeri 2000 d/d olarak verilmiştir ve kontrolör kısa sürede referans hızı taşıma ve büyük salınımlar yapmadan yakalamıştır.



Şekil 4.22 $k_{is}=0,0164847$, $k_{ps}=0,0007327$ ve $n_r=2000$ d/d için motor hızının zamanla değişimi.

5. DC MOTOR SÜRÜCÜ DEVRESİ TASARIMI

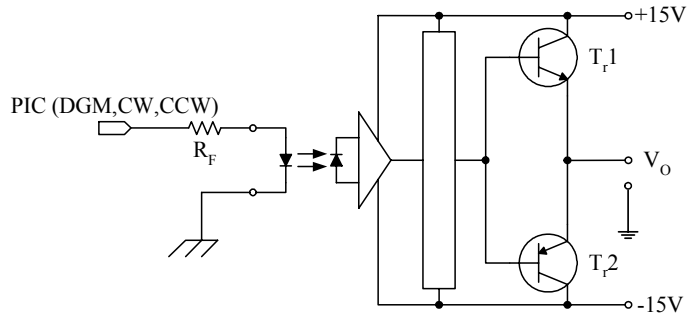
Öncelikle bu çalışmada amaç, PIC mikrodeneleyici yardımıyla bir DC motorun dört-bölge hız kontrolünü gerçekleştirmektir. Bunun için motoru, çıkış gerilimi değişken ve kontrollü bir güç kaynağından beslemek üzere E sınıfı DC-DC kıyıcı olarak adlandırılan H-köprü sürücü devresi kullanılmıştır. H-köprü sürücü devresinde yarıiletken anahtar eleman olarak da IGBT seçilmiştir. IGBT yarıiletken anahtar elemanların kontrol sinyalleri, PIC mikro denetleyicinin donanımı kullanılarak DGM tekniği ile üretilmiştir. PIC mikrodeneleyicinin bilgisayar yardımıyla programlanmasında C programlama dilinden yararlanılmıştır. DC motor kontrolü için hazırlanan yazılım programı Hi-Tech PicC programı aracılığıyla makine diline çevrilmiştir. Daha sonra makine dilinde kodlanmış program, PIC mikrodeneleyiciye bilgisayarın haberleşme portu ve hazırlanmış bir programlama devresi yardımıyla PIC mikrodeneleyiciye yüklenmiştir. DC motorun hız kontrolünde akım kontrol çevrimi de kullanıldığı takdirde, PIC mikrodeneleyicinin performansı düşük olduğundan sadece klasik PI hız kontrolörü için bir yazılım programı hazırlanmıştır. Ancak, bu yolla DC motorun hız kontrolü daha basit ve ucuz bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Kontrol aşamasında geribeslenen motorun hız bilgisi bir takogeneratör aracılığıyla elde edilmiş ve PIC mikrodeneleyiciye analog bilgi olarak girilmiştir. Ayrıca kontrol sistemine referans hız, yön ve çalışma süresi gibi bilgilerin tanıtılması için buton ve potansiyometre elemanlarından oluşan bir kullanıcı klavyesi yapılmıştır. Bunun yanı sıra bu bilgilerin görüntülenmesi için dört satır ve 20 sütunluk bir LCD ekran kullanılmıştır.

5.1 Motor Sürücü Devresi

Sürücü devresi ile mikrodeneleyici uyumlu çalışabilmesi için bazı hususlara dikkat etmek gerekir. Öncelikle sürücü devresinin ihtiyacı olan kontrol sinyalleri uygun bir şekilde elde edilmelidir. Bundan dolayı kullanılacak IGBT yarıiletken anahtarların kapı gerilimlerinin ihtiyaç duyduğu gerilim seviyelerinin ve özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bu çalışmada 25N120RUF IGBT kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan IGBT 'lerin genel olarak kullanıldığı yerler; AC ve DC motor kontrolü, genel amaçlı inverterler, robotik ve servo kontrol uygulamalarıdır.

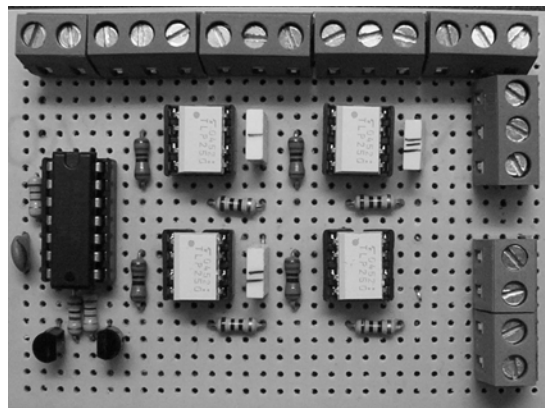
Mikrodeneleyicinin ürettiği çıkış sinyalinin genliği lojik 1 olduğu zaman 5 V 'tur ancak, IGBT 'lerin kapısına uygulanması gereken kontrol sinyali ise ± 15 V 'tur. Bunun için mikrodeneleyicinin çıkışı ile IGBT 'nin kapısı arasında izoleli bir devre kullanılarak, mikrodeneleyicinin çıkışı lojik 0 iken IGBT 'nin kapı gerilimi -15 V ve mikrodeneleyicinin

çıkışı lojik 1 olduğu zaman ise IGBT 'nin kapı gerilimi +15 V olması sağlanmıştır. Bu çalışmada mikrodenetleyici ile sürücü devre arası izole edilirken içinde Opto-Coupler ve IGBT kapılarını sürebilen devreye sahip olan bir tümdevre kullanılmıştır. IGBT 'leri sürmek ve kontrolör devresinden izole etmek için kullanılan tümdevrenin blok diyagramı Şekil 5.1 'de gösterilmiştir. T_{r1} iletime, T_{r2} kesime girdiği zaman IGBT kapı gerilimi +15 V ve T_{r2} iletime, T_{r1} kesime girdiği zaman IGBT kapı gerilimi -15 V olur. Böylece IGBT 'yi iletime ve kesime sokmak için gerekli sinyaller sağlanmış olur.



Şekil 5.1 IGBT sürme devresi.

Şekil 5.1 'de gösterilen V_o çıkışı, IGBT 'nin kapı ucuna seri bir R_G kapı direnci üzerinden bağlanmıştır. Ayrıca IGBT 'nin emiter (E) ucuna ise ± 15 V gerilimi sağlayan kaynağının ortak ucu bağlanmıştır. S_1, S_3 ve S_2, S_4 IGBT anahtar sıfırlarının birbirinden ayrı olması gerektiğinden dolayı, farklı sıfır noktaları sağlamak amacıyla üç adet transformatör kullanılmıştır. IGBT 'leri sürmek için kullanılan sürme devresinin görünüşü Fotoğraf 5.1 'de verilmiştir.



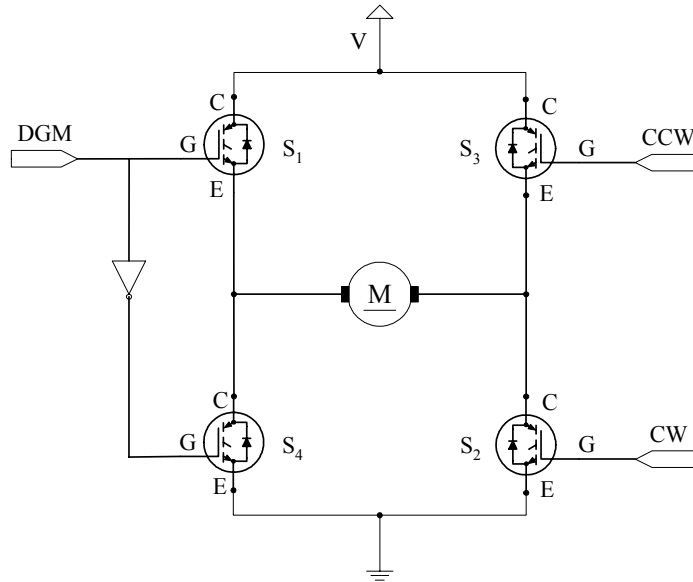
Fotoğraf 5.1 IGBT sürücü devresinin görüntüsü.

Bu çalışmada kullanılan H-köprü kıyıcı devresi Şekil 5.2 'de gösterilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta S_1, S_4 ve S_2-S_3 anahtar çiftlerinin aynı anda iletimde olmamasıdır. Ayrıca anahtar çiftlerinin iletim durumları değiştirilirken iletime girecek anahtar,

aynı koldaki anahtar kesime girdikten sonra iletime girmesi gerekir. Saat yönü (CW) ve saat yönü tersi (CCW) kontrol sinyalleri üretilirken program içinde bu durum göz önünde bulundurularak, gerekli gecikme önlemleri alınmıştır. S_1 ve S_4 anahtarları DGM sinyali ile birlikte çalıştığı için tek bir çıkıştan beslenmektedir. Bundan dolayı DGM sinyalinin tersi S_4 'e uygulanırken yaklaşık 1 μs geciktirilmiştir. IGBT 'lerin iletimde ve kesimde olma durumları Tablo 5.1 'de gösterilmiştir.

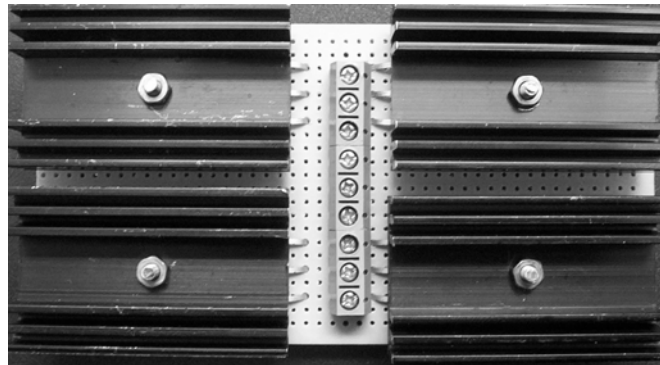
Tablo 5.1 IGBT 'lerin iletimde ve kesimde olma durumları

Motor Yönü	S_1	S_2	S_3	S_4
İleri yönde motor	1	1	0	0
İleri yönde frenleme	0	1	0	1
Geri yönde motor	0	0	1	1
Geri yönde frenleme	1	0	1	0



Şekil 5.2 DC Motor sürücü devresi.

IGBT 'ler ile oluşturulan H-köprü kıyıcı devresi görüntüsü Fotoğraf 5.2 'de verilmiştir.



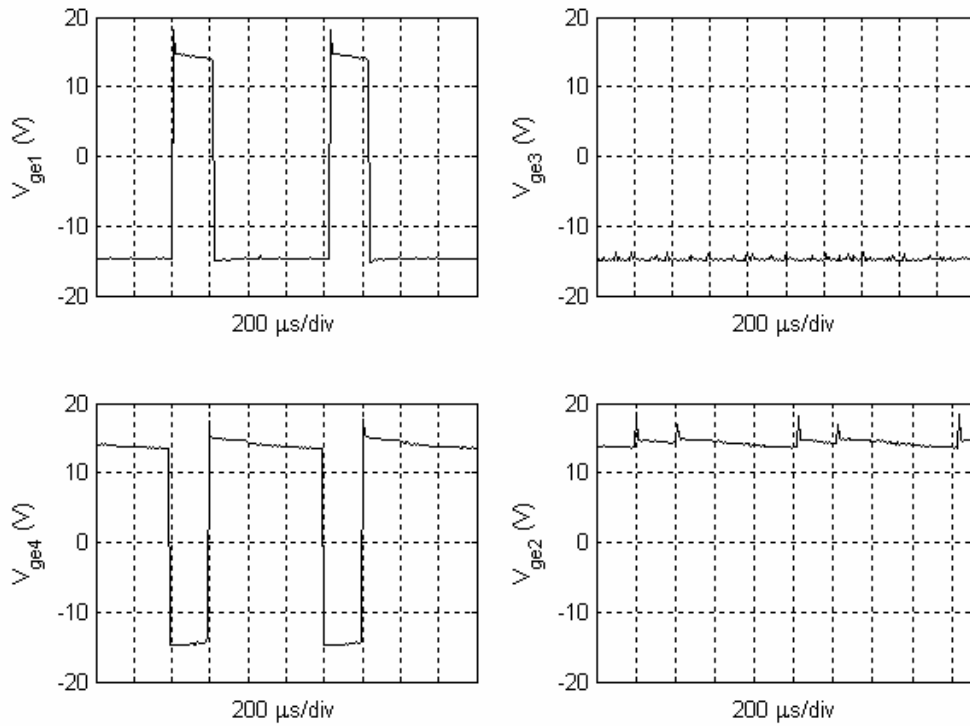
Fotoğraf 5.2 IGBT 'ler ile oluşturulan H-köprü devresi görüntüsü.

Fotoğraf 5.2 'de gösterilen IGBT 'lere soğutucu bağlanmıştır. Soğutucu bağlanmamış tek bir IGBT yarı iletken anahtarının görüntüsü ise Fotoğraf 5.3 'te verilmiştir.



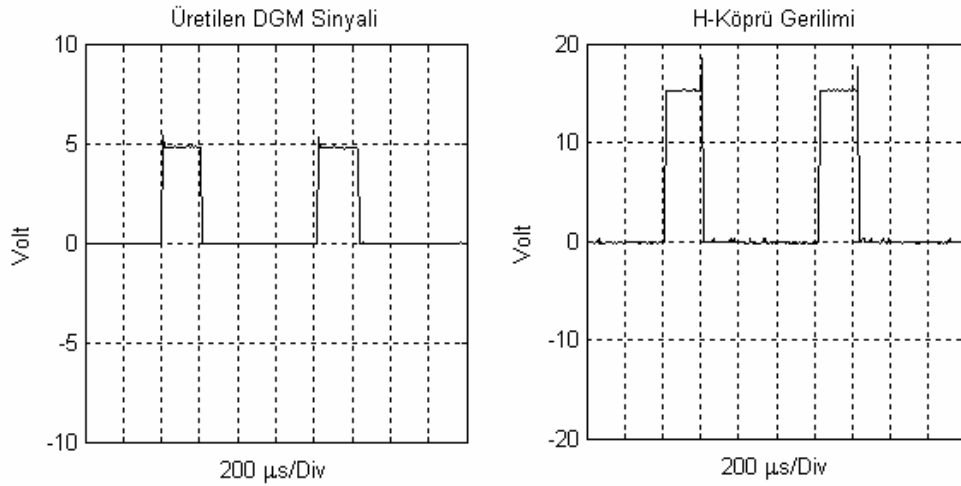
Fotoğraf 5.3 H-köprü devresinde kullanılan IGBT 'nin görüntüsü.

DGM sinyalinin 1/4 görev periyodu için IGBT 'lerin kapılarına uygulanan gerilimler Şekil 5.3 'te gösterilmiştir. V_{ge1} S_1 'e uygulanan gerilimi, V_{ge2} S_2 'ye uygulanan gerilimi, V_{ge3} S_3 'e uygulanan gerilimi ve V_{ge4} S_4 'e uygulanan gerilimi göstermektedir. S_1 iletimdeyken S_4 kesimde ve S_4 iletimdeyken S_1 kesimdedir. S_2 iletimde ve S_3 kesimde olması durumunda motor saat yönünde döner.



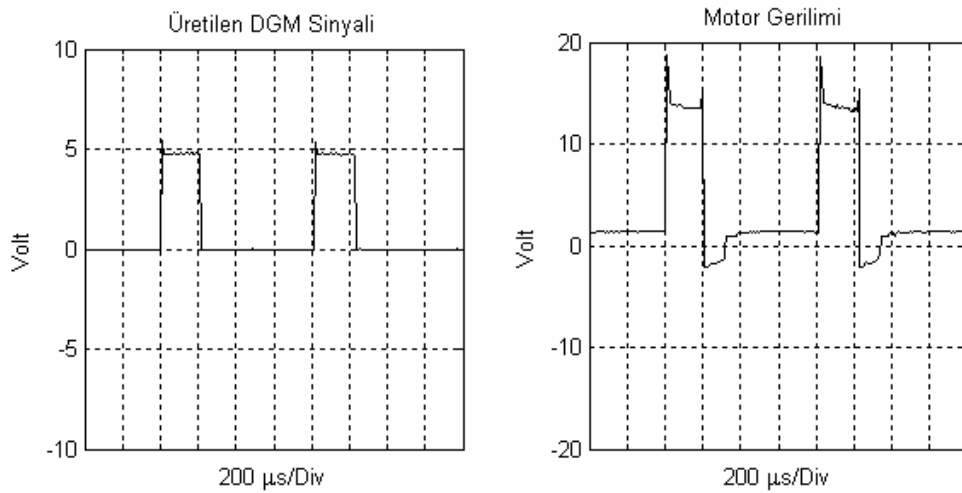
Şekil 5.3 DGM sinyalinin 1/4 görev periyodu için IGBT 'lerin kapı gerilimleri.

Sürücü devre ve gerekli sinyaller ayarlandıktan sonra çıkış dalga şekilleri, önce yüksüz ve sonra motor bağlanarak kontrol edilmiştir. Mikrodenetleyicinin ürettiği DGM sinyali ve yüksüz durumda H-köprü devresinden elde edilen çıkış gerilimi Şekil 5.4 'te gösterilmiştir. PIC tarafından üretilen DGM sinyalinin genliği 5 V olmasına rağmen motor için gerekli olan 16 V genlikli gerilim H-köprü devresi kullanılarak sağlanmıştır.



Şekil 5.4 Üretilen DGM sinyali ve yüksüz durumda H-köprü devresi gerilimi.

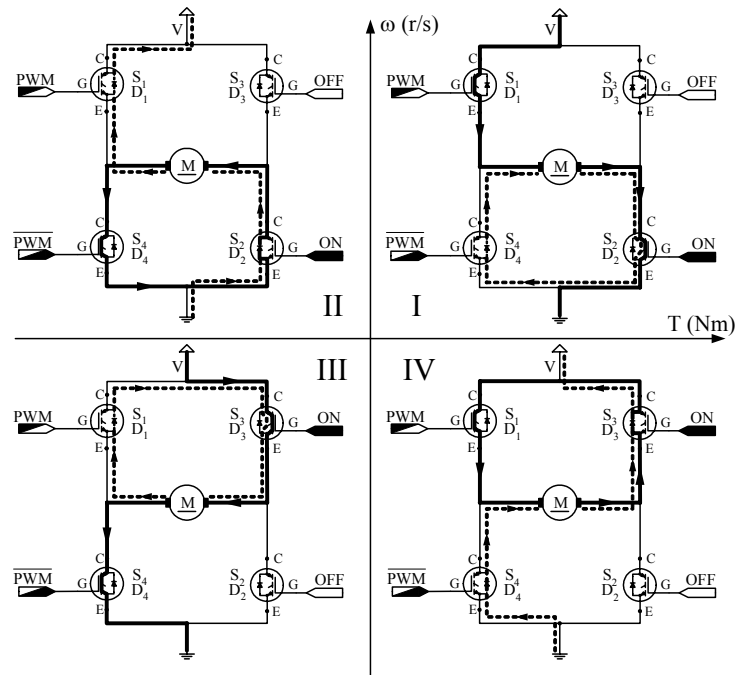
Daha sonra H-köprü devre uçlarına motor bağlanarak ve tekrar aynı ölçümler yapılarak, motor üzerindeki gerilim Şekil 5.5 'te gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.5 Üretilen DGM sinyali ve motor uçlarındaki gerilim.

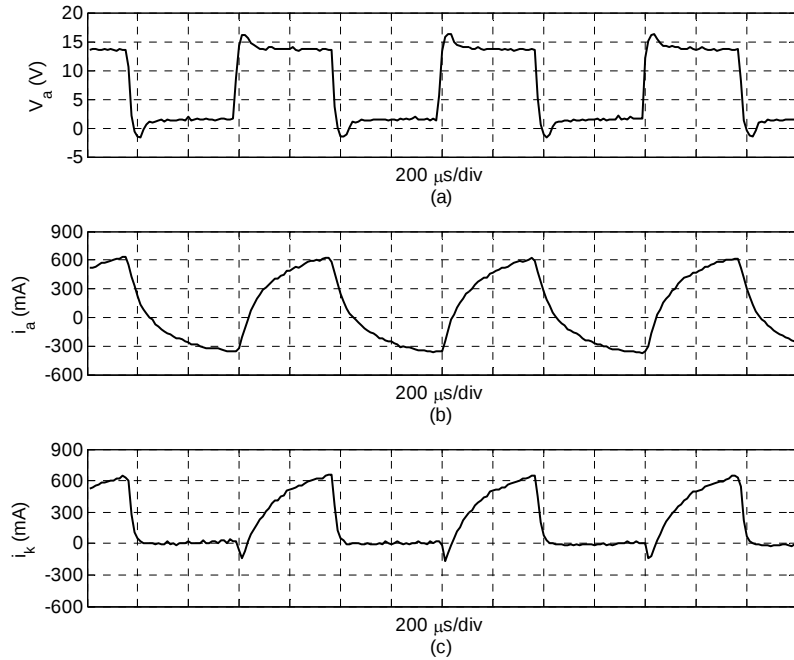
5.2 Dört-Bölgeli Deneysel Sonuçlar

DC motorun dört-bölgeli çalışması sırasında anahtarların durumları, motor üzerindeki gerilimler ve akım yönleri bölgelere göre Şekil 5.6 'da ayrı ayrı incelenmiştir. Buna göre, I. bölgede armatür gerilimi e.m.k. geriliminden büyük ve armatür akımı pozitif yönlüdür. Bundan dolayı makine ileri yönde motor olarak çalışmaktadır. Ayrıca akım S_1 ve D_4 arasında anahtarlansmaktadır. S_1 - S_2 iletimde ve S_3 - S_4 kesimde olduğu anda makine motor olarak çalışmaktadır. D_4 - S_2 iletimde ve S_3 - S_1 kesimde olduğunda motor boşluk modunda çalışmaktadır. Makine II. bölgede ise ileri yönde gerilim üretmektedir. Bu durumda armatür gerilimi e.m.k. geriliminden küçüktür ve armatür akımı negatif yönlüdür. II. bölgede akım S_4 ve D_1 arasında anahtarlansmaktadır. Boşluk çalışmada S_4 - D_2 iletimde ve S_3 - S_1 kesimdedir. D_1 - D_2 iletimde ve S_3 - S_4 kesimde olduğunda ise makine generator olarak çalışmaktadır. III. bölgede motor ters yönde dönmektedir. Bu bölgede armatür geriliminin mutlak değeri e.m.k. geriliminin mutlak değerinden büyük ve armatür akımı negatif yönlüdür. III. bölgede akım S_4 ve D_1 arasında anahtarlansmaktadır. Motor ters yönde dönerken S_3 - S_4 iletimde ve S_1 - S_2 kesimdedir. Boşluk çalışma esnasında ise D_1 - S_3 iletimde, S_2 - S_4 kesimdedir. IV. bölge çalışması sırasında makine ters yönde gerilim üretmektedir. Bu durumda armatür geriliminin mutlak değeri e.m.k. geriliminin mutlak değerinden küçüktür. Armatür akımı ise pozitif yönlü akmaktadır. Bu bölgede akım S_1 ve D_4 arasında anahtarlansmaktadır. S_1 - D_3 iletimde ve S_4 - S_2 kesimde olduğu zaman boşluk çalışmaktadır. D_3 - D_4 iletimde ve S_1 - S_2 kesimde olduğu sırada makine ters yönde gerilim üretmektedir.



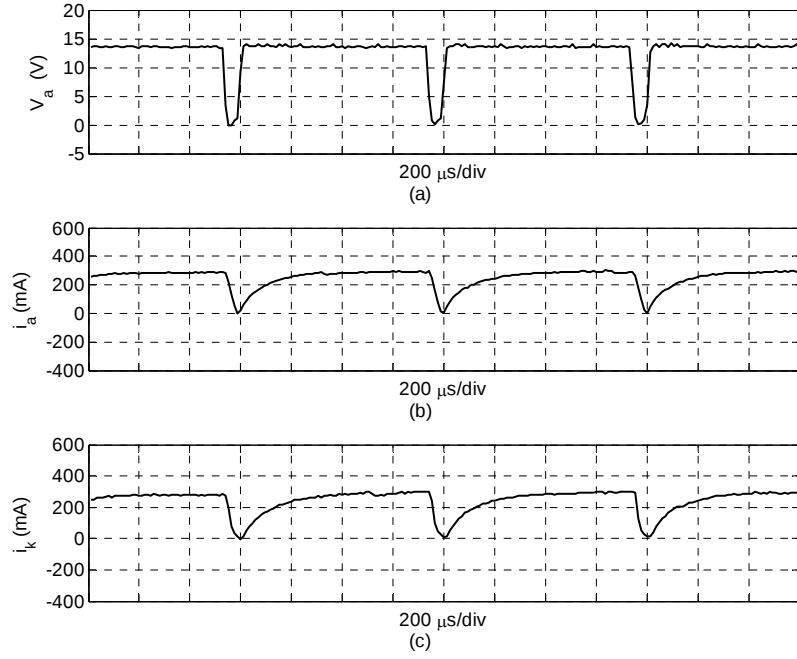
Şekil 5.6 H-köprü kıyıcının dört-bölgeli çalışması.

Yüksüz durumda motor 2000 d/d hız ile dönüyorken sürekli durum için armatür gerilimi, armatür akımı ve kaynak akımı Şekil 5.7 'de gösterilmiştir. Motor boşta çalışırken armatür akımının ortalama değeri Şekil 5.7b 'de gösterildiği gibi sıfıra çok yakındır. Kıyıcıyı besleyen kaynak akımı ise Şekil 5.7c 'de görüldüğü gibi armatür akımının negatif olduğu bölge içinde S_1 anahtarı iletimde ve S_4 anahtarının kesimde olduğu anda kıyıcı boşluk çalışmadan generatör durumuna geçmektedir. Bu geçiş II. bölgeyi temsil etmektedir. Şekil 5.7c 'de görüldüğü gibi kaynak akımı negatif yönde aktığı bölgeler bulunmaktadır. Bunun sebebi ise armatür akımının o anda negatif yönlü olmasıdır. Şekil 5.7c 'de motorun I. bölgeden II. bölgeye ve tekrar I. bölgeye geçişi görülebilmektedir. Burada görüldüğü gibi kaynak akımının negatif olduğu anda güç akışı DC kaynağa doğru olmaktadır.



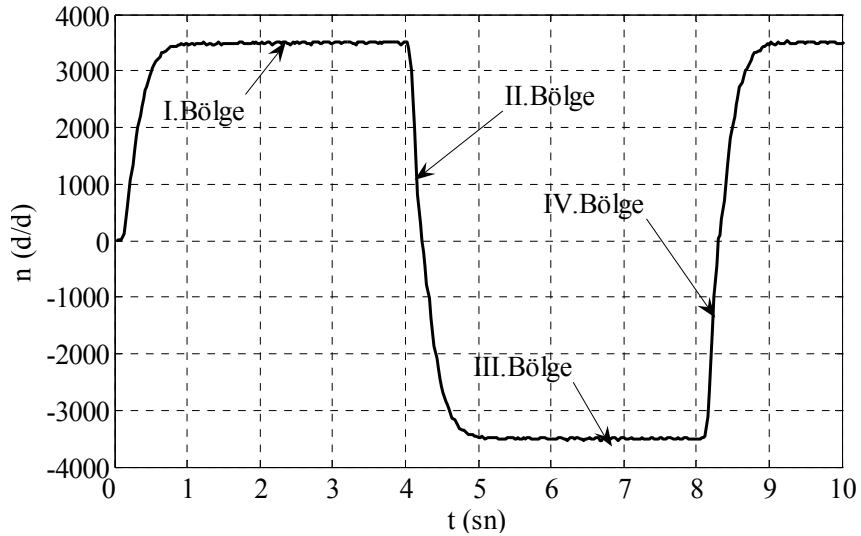
Şekil 5.7 Yüksüz durumda 2000 d/d için a) Armatür gerilimi, b) Armatür akımı, c) Kaynak akımı

Benzer şekilde armatür gerilimi, armatür akımı ve kaynak akımı %45 yük altında motor 2000 d/d hız ile dönüyorken sürekli durumda elde edilen sonuçlar Şekil 5.8 'de gösterilmiştir. Burada motor bir önceki şartlara göre tek fark olarak %45 yük altında çalışmaktadır. Şekil 5.8a 'dan da anlaşılabileceği gibi motor kaynaktan daha fazla güce ihtiyaç duyar. Böylece kıyıcı motorun ihtiyaç duyduğu gücü sağlayabilmek için motor üzerindeki gerilimin ortalama değerini artırır, bunu yapabilmek içinde iletimde kalma süresini arttırdığı görülmektedir. Şekil 5.8b 'de görüldüğü gibi bu urumda armatür akımı devamlı pozitif yönlü akmaktadır. Motor bu şartlar altında sadece I. bölgede çalışmaktadır.



Şekil 5.8 %45 yüklü durumda 2000 d/d için a) Armatür gerilimi, b) Armatür akımı, c) Kaynak akımı

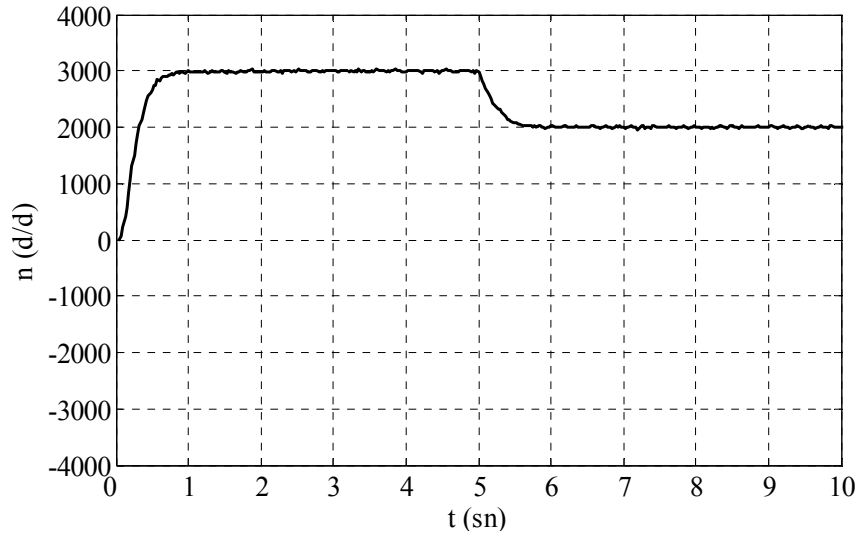
Motoru Şekil 5.9 'da gösterildiği gibi 4.dört-bölgeli çalıştırmak için sırasıyla saat yönünde 3500 d/d, saat yönünün tersi yönde 3500 d/d ve tekrar saat yönünde 3500 d/d referans hız değerleri verilmiştir. 1. referans olarak motor I. bölgede ileri yönde 3500 d/d hıza ulaşmıştır. Daha sonra belirtilen süre sonunda motor III. bölgeye geçmek için önce ileri yönde frenlenmiş ve sonra III. bölgeye geçerek verilen referans hıza ulaşmıştır. III. bölgede belirtilen süre kadar çalıştıktan sonra tekrar I. bölgeye geçmek için ters yönde frenlenerek I. bölgeye geçiş yapmıştır.



Şekil 5.9 Motorun dört-bölgeli deneysel sonuçları.

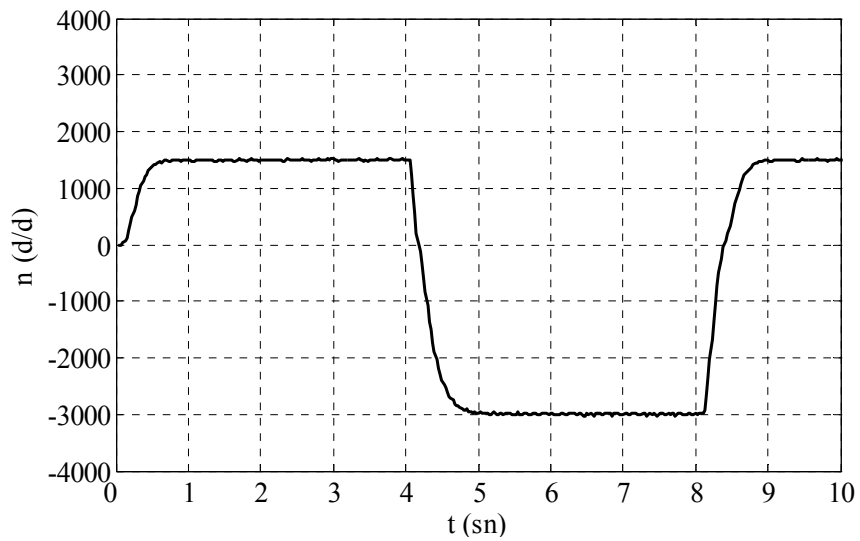
Farklı referans hız değerleri için elde edilen deneysel sonuçlardan bazıları aşağıda şekillerle verilmiştir.

Şekil 5.10 'da görüldüğü gibi motor önce ileri yönde 3000d/d referans hız için 5 sn süreyle çalıştırılmış ve daha sonra 5. saniye sonunda 2000 d/d referans hız için ileri yönde çalışmaya devam etmiştir.



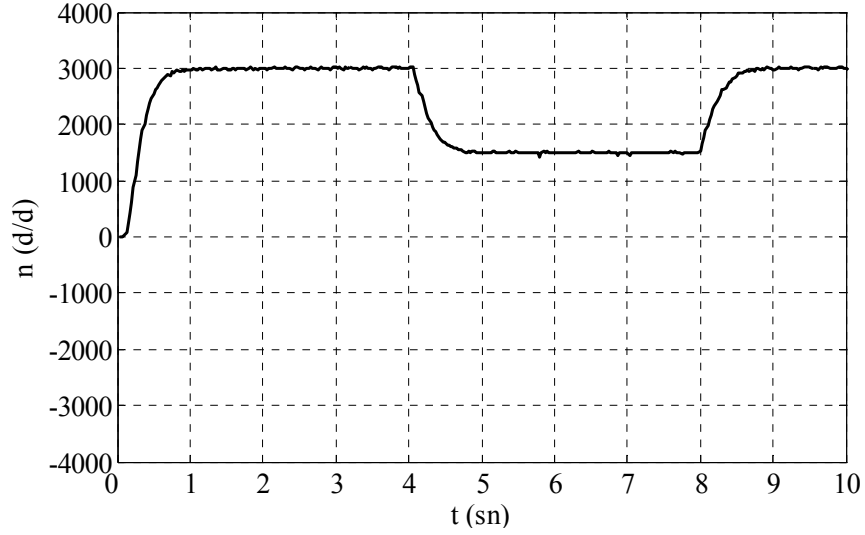
Şekil 5.10 3000 d/d, 2000 d/d referansları için motor hızının zamanla değişimi.

Motor Şekil 5.11 'de gösterildiği gibi 3 farklı referans hız için çalıştırılmıştır. İlk olarak motor 1500d/d referans hız için ileri yönde, sonra -3000 d/d referans hız için ters yönde ve daha sonra tekrar 1500 d/d referans hız için ileri yönde dörder saniye süreyle çalıştırılmıştır.



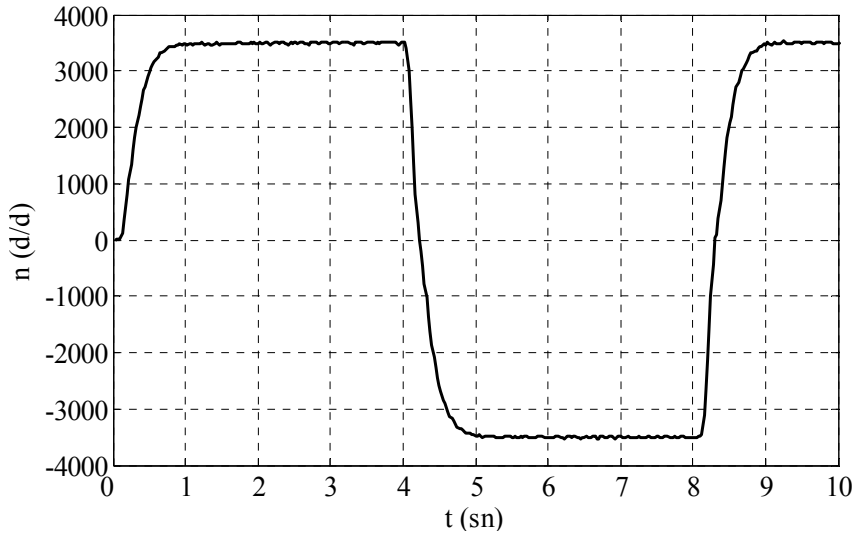
Şekil 5.11 1500 d/d, -3000 d/d ve 1500 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi.

Üç farklı referans hız için motor sırasıyla 3000 d/d, 1500 d/d ve 3000 d/d hızlarda çalıştırılmıştır. Şekil 5.12 'den görüldüğü gibi motor her bir referans hız için 4 saniye süreyle çalıştırılmıştır.



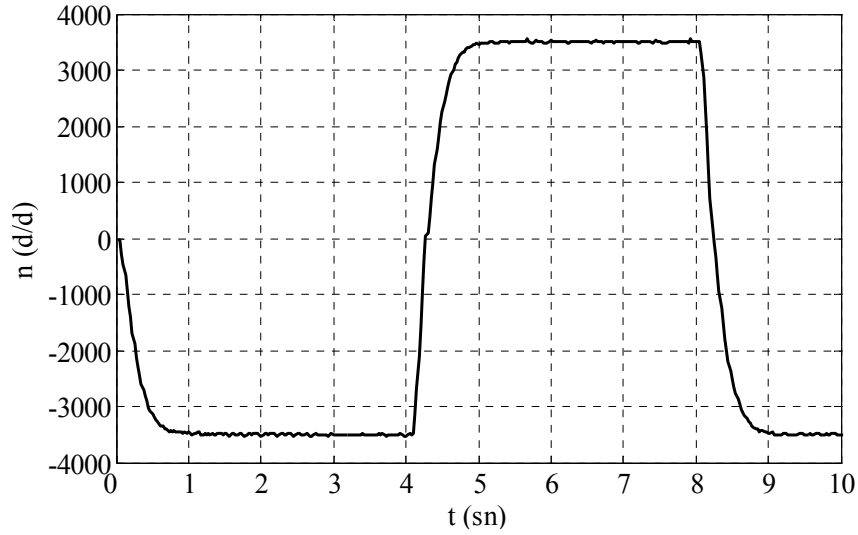
Şekil 5.12 +3000 d/d, +1500 d/d, +3000 d/d referans hızları için elde edilen sonuç.

Motor Şekil 5.13 'te gösterildiği gibi önce ileri yönde 3500 d/d hıza çıkarılmış ve 4. saniye sonunda ters yönde 3500 d/d hızla döndürülmüştür. Daha sonra motor tekrar ileri yönde 3500 d/d referans hız için çalıştırılmıştır.



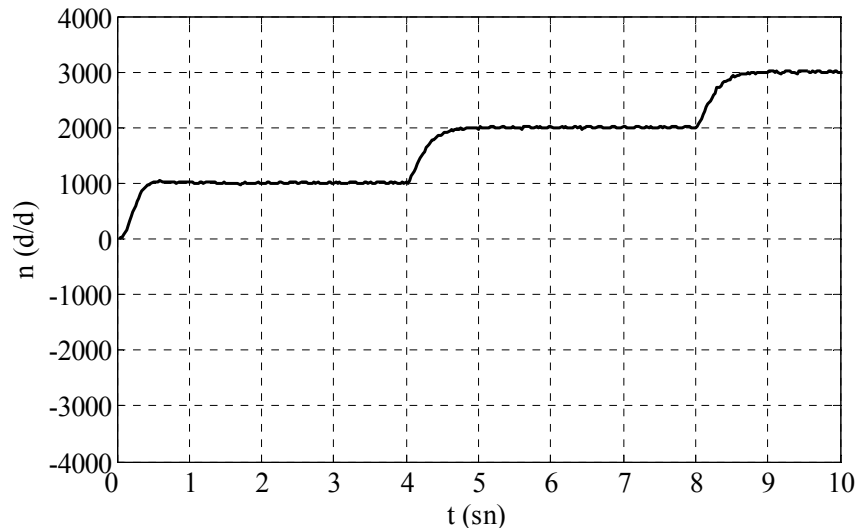
Şekil 5.13 3500 d/d, -3500 d/d ve 3500 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi.

Şekil 5.14 'te görüldüğü gibi motora Şekil 5.13' te verilen referansların tersi verilmiştir. Buna göre motor önce ters yönde 3500 d/d, sonra ileri yönde 3500 d/d ve daha sonra tekrar ters yönde 3500 d/d referans hız değerleri için dörder saniye çalıştırılmıştır.



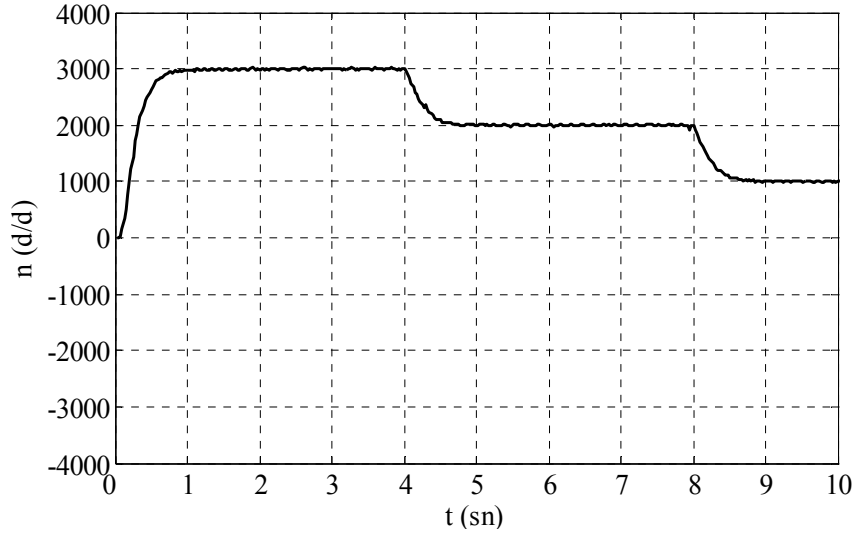
Şekil 5.14 -3500 d/d, 3500 d/d, ve -3500 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi.

Üç farklı referans hız için motor sırasıyla 1000 d/d, 2000 d/d ve 3000 d/d hızlarda çalıştırılmıştır. Şekil 5.15 'ten görüldüğü gibi motor her bir referans hız için 4 saniye süreyle çalıştırılmıştır.



Şekil 5.15 1000 d/d, 2000 d/d, ve 3000 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi.

Şekil 5.16 'dan görüldüğü gibi motor üç farklı referans hız için önce 3000 d/d, sonra 2000 d/d ve son olarak 1000 d/d hızlarında çalıştırılmıştır.

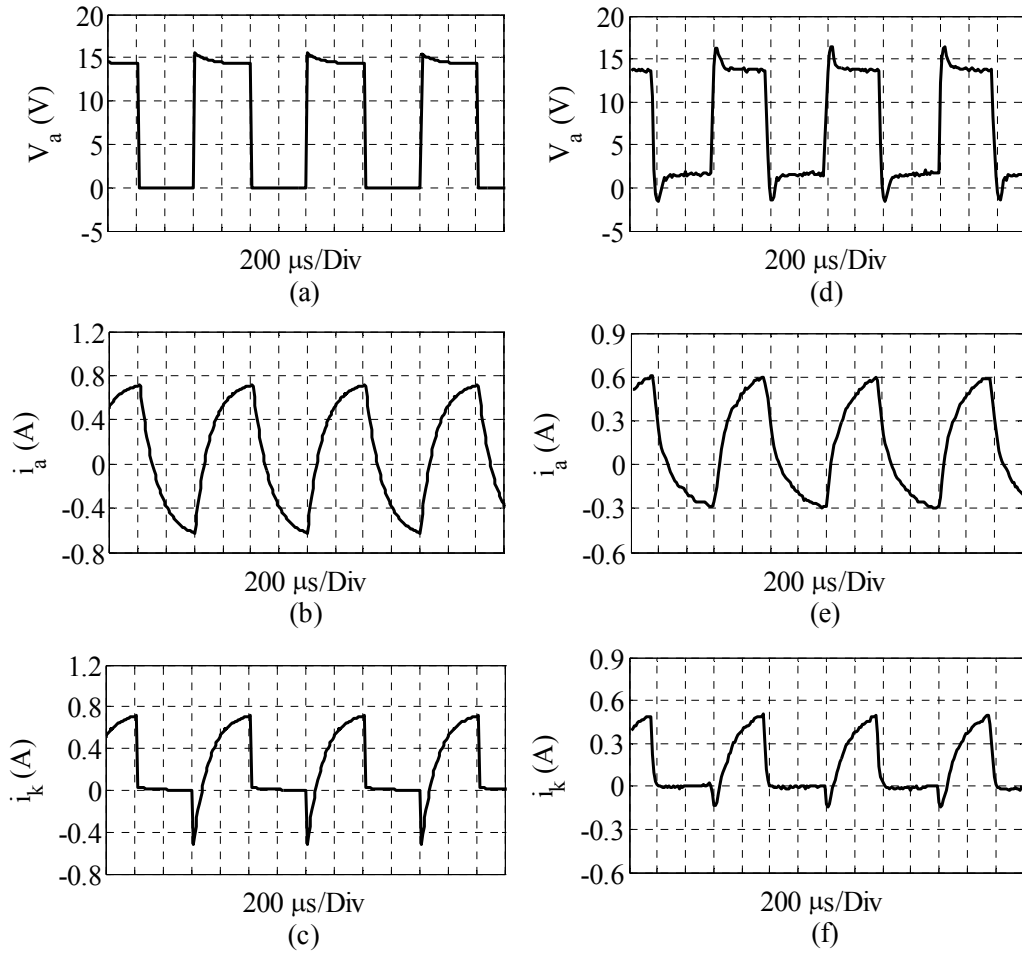


Şekil 5.16 3000 d/d, 2000 d/d, ve 1000 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi.

5.3 Benzetim ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Daha önce elde edilmiş olan benzetim sonuçları ile deneysel çalışma ile elde edilen sonuçlar burada beraber incelenerek karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçlar karşılaştırılırken aynı referans durumları ve aynı yük koşulları göz önünde bulundurulmuştur.

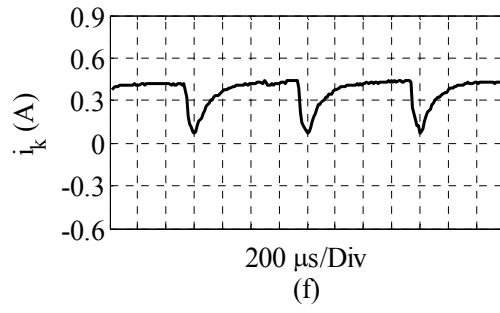
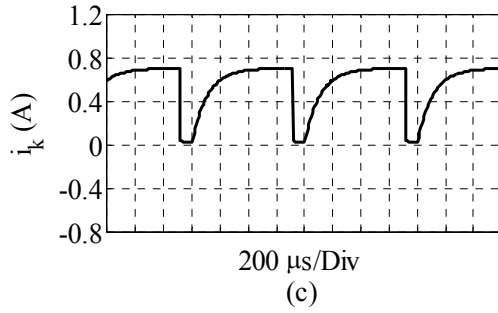
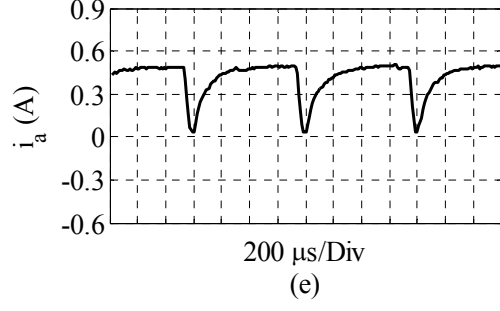
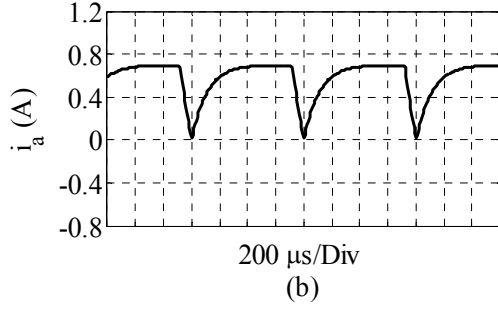
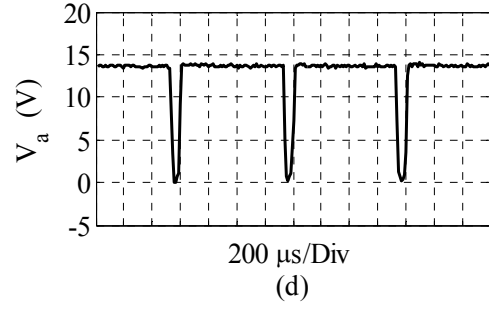
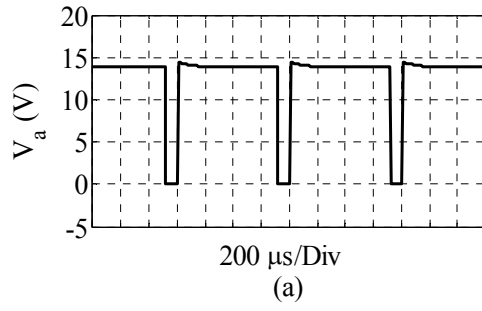
Motor yüksüz durumda 2000 d/d hızda dönerken ölçülen armatür gerilimi, armatür akımı ve kaynak akımlarının benzetim ve deneysel sonuçları Şekil 5.17 'de gösterildiği gibi birbirine benzer çıkmıştır. Benzetim sonucunda elde edilen motor armatür gerilimi Şekil 5.17a 'da, motor armatür akımı Şekil 5.17b 'de ve kaynak akımı Şekil 5.17c 'de gösterilmektedir. Deneysel olarak ölçülen motor armatür gerilimi Şekil 5.17d 'de, motor armatür akımı Şekil 5.17e 'de ve kaynak akımı Şekil 5.17f 'de gösterilmektedir. Şekil 5.17 incelendiğinde benzetim ve deneysel sonuçlar arasında bazı farklılıklar görülmektedir.



Şekil 5.17 Yüksüz durumda 2000 d/d için

- a) Armatür gerilimi (benzetim), b) Armatür akımı(benzetim), c) Kaynak akımı (benzetim),
d) Armatür gerilimi (deneysel), e) Armatür akımı(deneysel), f) Kaynak akımı (deneysel).

Motor yüksüz durumda 2000 d/d hızda dönerken motor milinde yük oluşturduğu zaman Şekil 5.18 'deki sonuçlar elde edilmektedir. Benzetim sonucunda elde edilen motor armatür gerilimi Şekil 5.18a 'da, motor armatür akımı Şekil 5.18b 'de ve kaynak akımı Şekil 5.18c 'de gösterilmektedir. Deneysel olarak ölçülen motor armatür gerilimi Şekil 5.18d 'de, motor armatür akımı Şekil 5.18e 'de ve kaynak akımı Şekil 5.18f 'de gösterilmektedir. Şekil 5.18 incelenecek olursa benzetim ve deneysel sonuçlar arasında bazı farklılıklar görülmektedir.

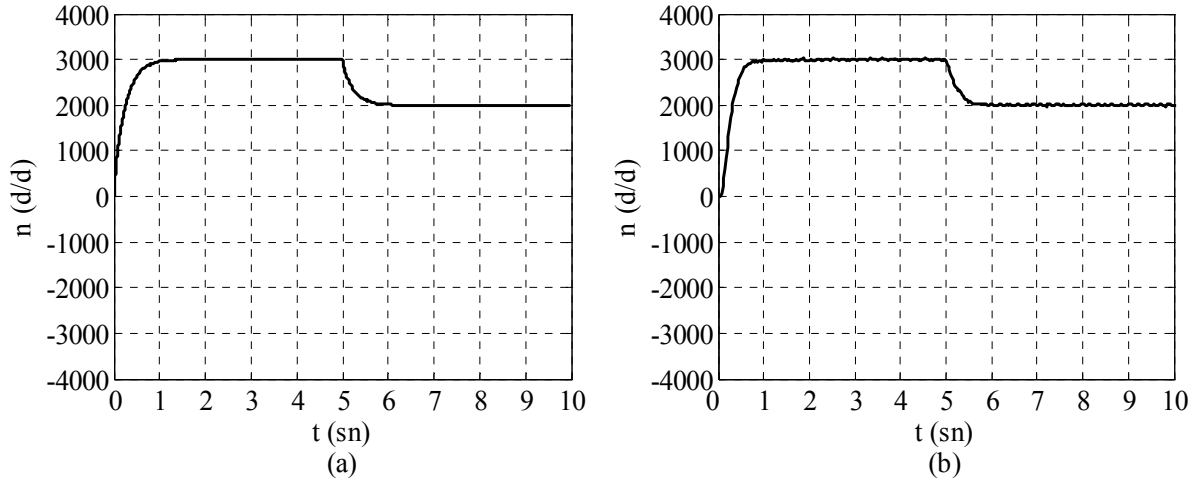


Şekil 5.18 %45 yüklü durumda 2000 d/d için

- a) Armatür gerilimi (benzetim), b) Armatür akımı(benzetim), c) Kaynak akımı (benzetim),
d) Armatür gerilimi (deneysel), e) Armatür akımı(deneysel), f) Kaynak akımı (deneysel).

Daha önceden benzetim ve deneysel sonuçlar alınırken kullanılmış olan referans hız değerleri için elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır ve sonuçların hemen hemen aynı olduğu görülmüştür.

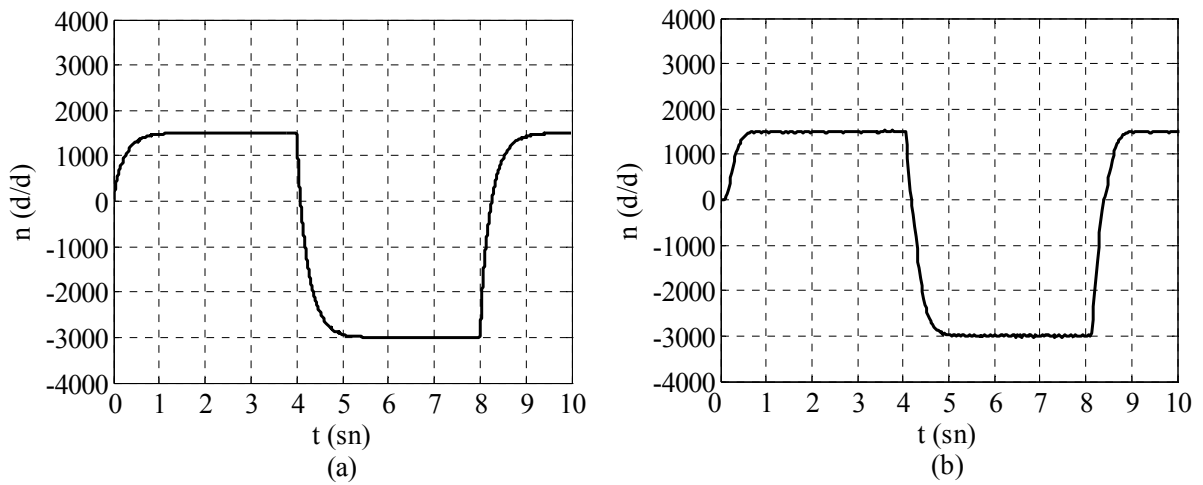
Şekil 5.19a 'da elde edilen benzetim sonucu ile 5.19b 'de gösterilen deneysel sonuç karşılaştırıldığında aynı hız referansları için benzer cevapların alındığı görülmektedir.



Şekil 5.19 3000 d/d, 2000 d/d referansları için motor hızının zamanla değişimi.

a) Benzetim, b) Deneysel

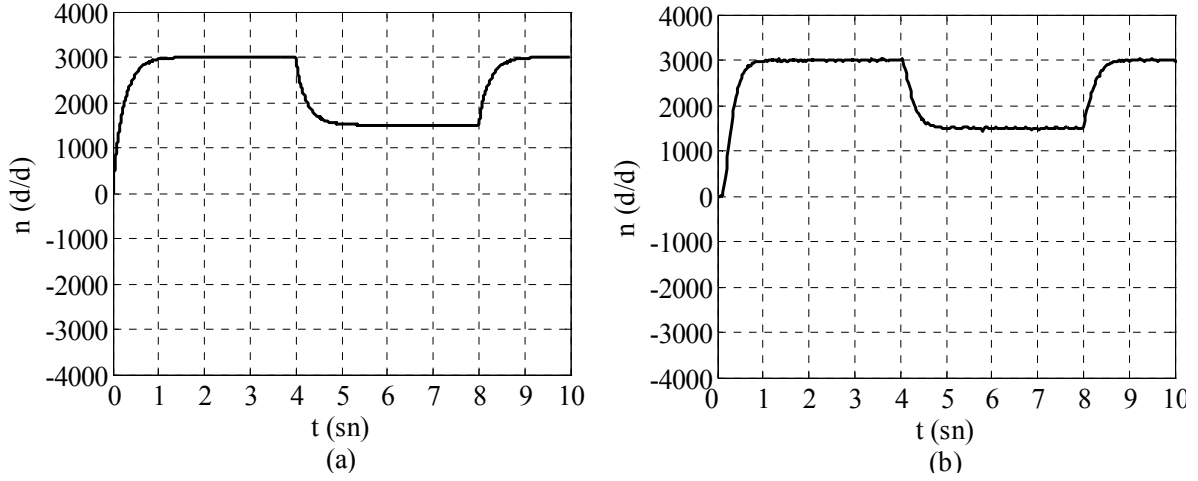
İlk önce 1500d/d referans hız için ileri yönde daha sonra -3000 d/d referans hız için ters yönde ve tekrar ilk referansa geri gönderilerek elde edilen benzetim sonucu Şekil 5.20a 'da gösterildiği gibi, deneysel sonuç ise Şekil 5.20 'de gösterildiği gibi çıkmıştır. Şekil 5.20a ve 5.20b 'nin benzer çıktığı görülmektedir.



Şekil 5.20 1500 d/d, -3000 d/d ve 1500 d/d referans hızları için motor hızının zamanla değişimi.

a) Benzetim, b) Deneysel

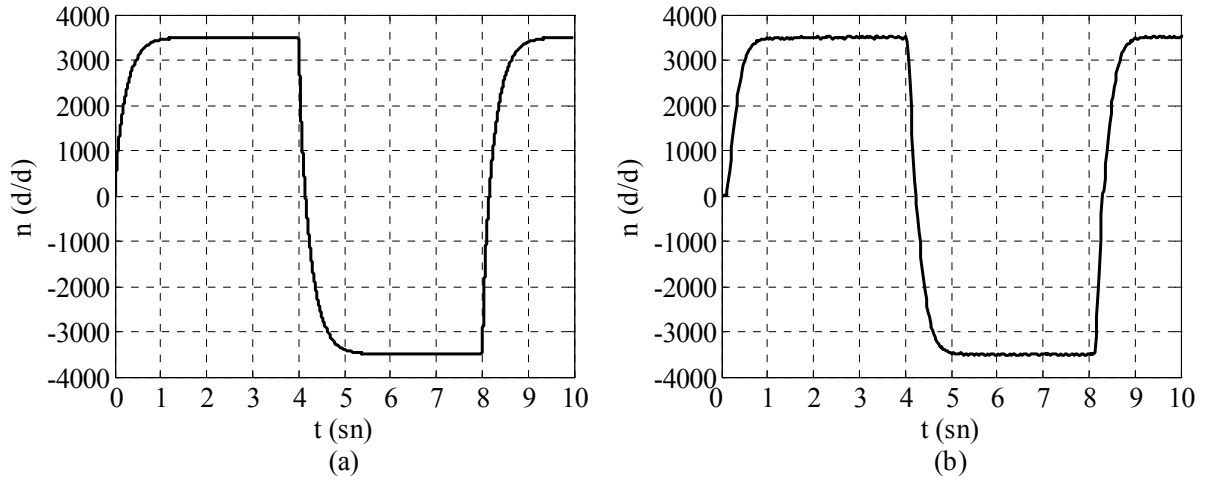
Üç farklı referans hız için motor sırasıyla 3000 d/d, 1500 d/d ve 3000 d/d hızlarda çalıştırılarak Şekil 5.21a 'da gösterilen benzetim ve Şekil 5.21b 'de gösterilen deneysel sonuç gösterilmektedir



Şekil 5.21 +3000 d/d, +1500 d/d, +3000 d/d referans hızları için elde edilen sonuç.

a) Benzetim, b) Deneysel

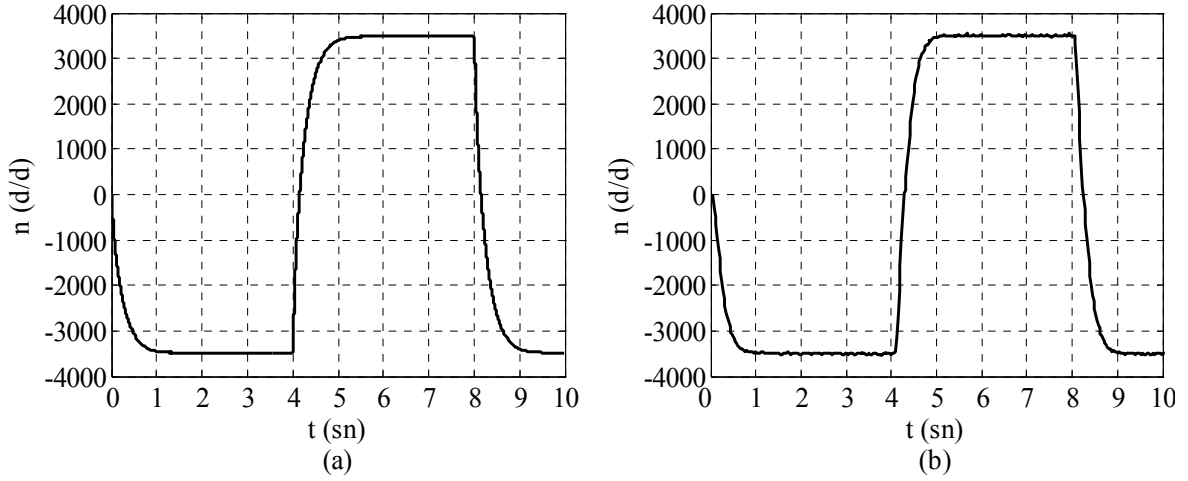
Motor pozitif yönde dönerken aynı hız referansı için ters döndürülmüş ve ardından ilk referans hıza geri dönülmüştür. Bu çalışma sırasında elde edilen benzetim sonucu Şekil 5.22a 'da gösterildiği gibi çıkmıştır. Aynı koşullar için elde edilen deneysel sonuç ise Şekil 5.22b 'de gösterilmiştir.



Şekil 5.22 3500 d/d, -3500 d/d ve 3500 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi.

a) Benzetim, b) Deneysel

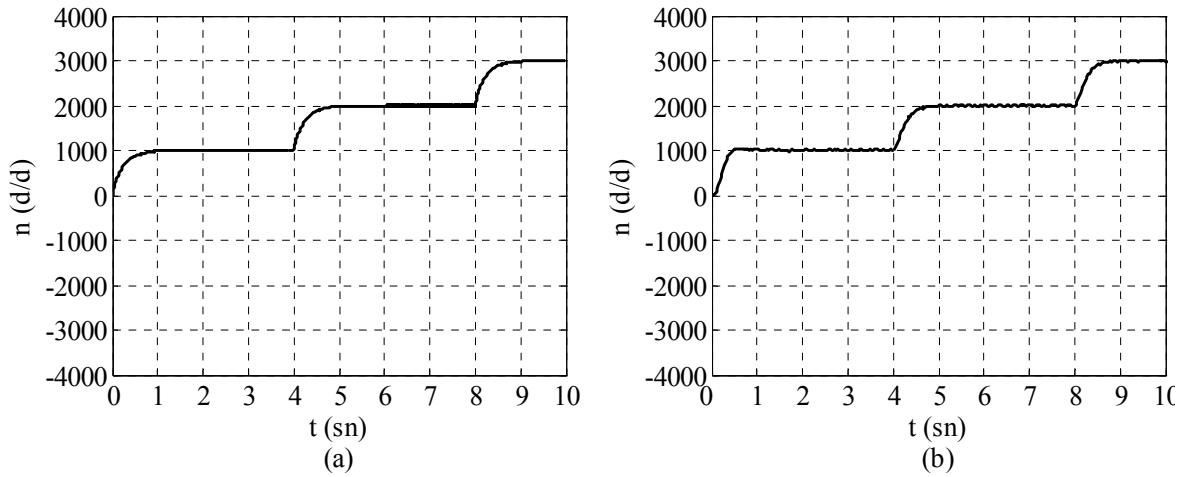
Şekil 5.22 'de verilen referansların tersi verilerek elde edilen benzetim sonuçları Şekil 5.23a 'da, deneysel sonuçlar ise Şekil 5.24b 'de gösterildiği gibi çıkmıştır.



Şekil 5.23 -3500 d/d, 3500 d/d, ve -3500 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi.

a) Benzetim, b) Deneysel

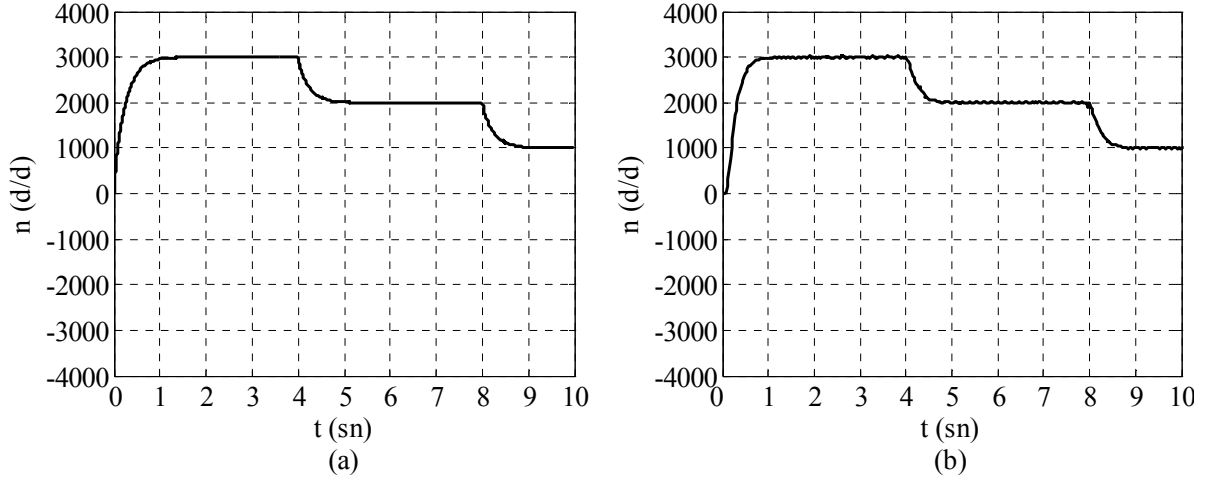
Üç farklı referans hız için motor sırasıyla 1000 d/d, 2000 d/d ve 3000 d/d hızlarda çalıştırılarak Şekil 5.24a 'daki benzetim sonucu elde edilmiştir. Şekil 5.24b 'de ise deneysel sonuçlar verilmiştir. Her iki şekilde de motor istenildiği referanslara benzer cevap ile çıkmıştır.



Şekil 5.24 1000 d/d, 2000 d/d, ve 3000 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi.

a) Benzetim, b) Deneysel

Şekil 5.25a 'da verilen referanslara göre elde edilen benzetim sonucu, Şekil 5.25b 'de ise deneysel sonuç gösterilmiştir



Şekil 5.25 3000 d/d, 2000 d/d, ve 1000 d/d referans hızlar için motor hızının zamanla değişimi.

a) Benzetim, b) Deneysel

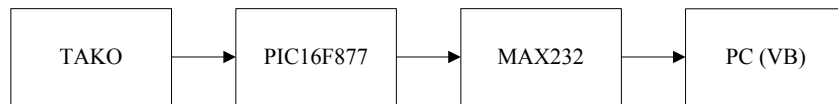
5.4 Prototip Özellikleri

Motor kontrolü için yapılan kontrol kutusunun önden görünüşü Fotoğraf 5.4 'de gösterilmiştir. Butonlar ve potansiyometre yardımıyla referans bilgileri girilebilmektedir. Referans hız bilgisini girmek için kullanılan potansiyometre yardımıyla 0 ile 5000 d/d arasında hız bilgisi girilebilmektedir. Yön, Giriş, Aşağı ve Yukarı butonları ile referans bilgileri girilmektedir. Start ve Stop butonları ise çalışma ve durma işlemlerini manüel olarak yapabilmek için kullanılmıştır. LCD ekran yardımı ile girilen referanslar ve motorun çalışma durumu görüntülenmektedir.



Fotoğraf 5.4 Kontrol kutusu.

Hız bilgisini bilgisayara göndermek için ayrı bir PIC kullanılmıştır. Bunun sebebi PI kontrolör döngüsünü bu işlemlerle yavaşlatmamaktır. Veri transferi için seri haberleşme protokolünden faydalanılmıştır. PIC 'in bilgisayar ile haberleşmesi için Visual Basic programı ile seri haberleşme yapan bir program yazılmıştır. Veri transferinde kullanılan bağlantılar Şekil 5.26 'da gösterildiği gibi yapılmıştır.



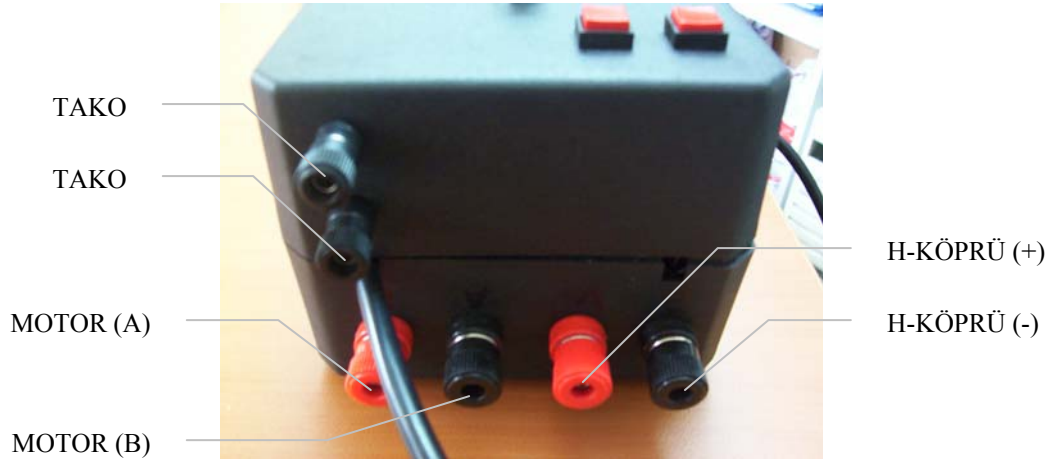
Şekil 5.26 Hız bilgisini bilgisayara göndermek için kullanılan PIC şeması.

Analog hız bilgisi, PIC yardımıyla önce dijital bilgiye çevrilmiş daha sonra PC 'ye gönderilmiştir. Kontrol kutusunun yan kısmında bulunan seri haberleşme çıkışı Fotoğraf 5.5 'te gösterildiği gibi 9 uçlu RS-232 portudur. Ayrıca fotoğrafta görülen açma kapama anahtarının görevi ise haberleşme işlemini başlatmaktır. Anahtar açık iken PC 'ye hız bilgisi gönderilmektedir.



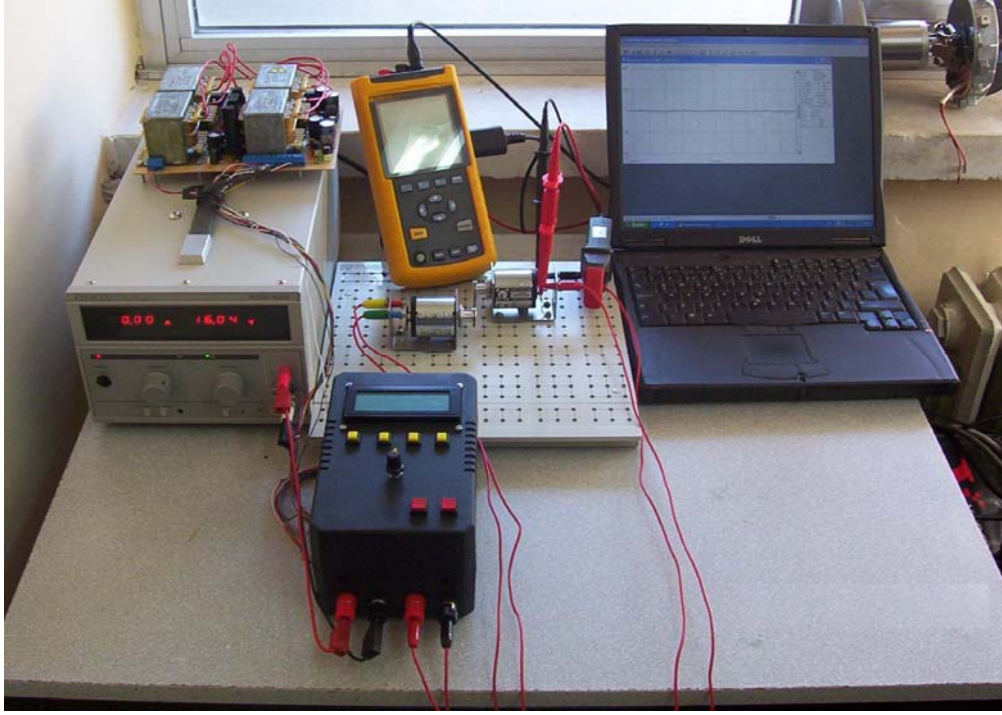
Fotoğraf 5.5 Kontrol kutusunun PC ile haberleşme portu

Kontrol kutusunun alt kısmında bulunan giriş ve çıkışların görüntüsü Fotoğraf 5.6 'da gösterildiği gibidir. H-Köprü besleme gerilimi gösterildiği gibi harici olarak verilmektedir. H-Köprü uçlarındaki kaynak geriliminin değiştirilebilir olması sayesinde farklı gerilim değerindeki motorlarda çalıştırılabilir. H-Köprünün çıkışı ise fotoğrafta belirtildiği gibi Motorun A ve B uçlarıdır. Ayrıca motor hız bilgisinin kontrol kartına gönderilmesi için kullanılan tako generatörün bağlanacağı uçlarda fotoğrafta gösterildiği gibi iki girişten oluşmaktadır.



Fotoğraf 5.6 Kontrol kutusu bağlantı uçları.

Deney düzeneğinin görüntüsü Fotoğraf 5.7 'de verilmiştir.



Fotoğraf 5.7 Deney düzeneği.

6. SONUÇLAR

Teknolojideki gelişmeler, her alanı etkilediği gibi motor kontrol sistemlerini de olumlu yönde etkilemiştir. Endüstriyel uygulamaların hemen hemen hepsinde motora ve motor kontrolüne ihtiyaç duyulmaktadır. DC motor fırça ve kolektörlerinin bakım gerektirme dezavantajlarına rağmen yüksek kalkış momenti, geniş hız aralığı ve kontrol kolaylığı gibi avantajlarından dolayı endüstriyel uygulamalarda geniş kullanım alanı bulmaktadır. Ayrıca DC kaynağın akü ve piller ile sağlanabilmesinden dolayı ev aletleri ve otomobil gibi AC kaynağın bulunmadığı yerlerde DC motor tercih edilmektedir.

DC motor hızı, armatüre uygulanan gerilime bağlı olduğundan armatür geriliminin ayarlanması ile hız kontrolü gerçekleştirilebilir. DGM tekniği sayesinde motora uygulanan gerilimin görev periyodu değiştirilerek ayarlanabilir bir DC kaynak elde edilir. Ayarlanabilir bir DC kaynak yardımıyla motor besleme gerilimi değiştirilerek motorun hızı kontrol edilebilir. Hassas bir hız kontrolü yapmak için ise kapalı çevrim hız kontrolü kullanılmalıdır. Kapalı çevrim hız kontrolünde görev periyodu motordan alınan hız bilgisine göre belirlenmektedir. Motor hızı referans hız ile karşılaştırılması sonucunda elde edilen hata değeri PI kontrolörden geçirilerek DGM sinyalinin görev periyodu hesaplanır ve hesaplanan bu sinyal yarıiletken anahtara uygulanarak kapalı çevrim hız kontrolü gerçekleştirilebilir.

Bazı uygulamalarda, DC motorun hız kontrolünün yanı sıra motorun yön kontrolüne de ihtiyaç duyulur. Bu tür uygulamalarda ise dört-bölgeli DC-DC kıyıcı devreler kullanılmaktadır. Dört-bölgeli kıyıcılar sayesinde motor ileri ve geri yönde frenleme yapabilirken, ileri ve geri yönde motor olarak çalışabilir. DC motor ileri veya ters yönde dönerken aksi yönde dönmesi istenildiğinde motor bölgeler arasında geçiş yapmak zorundadır. Bu durumda motor boşluk çalışma ve regeneratif çalışma moduna girer. Motor dört-bölgeli çalışırken akım yönü ve motorun hız yönü değişiklikler gösterir. Burada önemli olan sistemin bu değişikliklere karşı anında cevap verebilecek şekilde uygun tasarlanmış olmasıdır. Örnek olarak; motor ileri yönde motor olarak çalışırken aniden ters yönde motor olarak çalıştırılmak istenildiğinde bu geçiş esnasında doğabilecek bazı problemlerin önceden bilinip buna göre önlemler alınması gerekmektedir. Bölge geçişleri sırasında motora, üzerinde biriken enerjiyi boşaltabilmesi için uygun bir akım yolu oluşturulmalıdır. Bunu sağlamak amacıyla H-köprüyü oluşturan yarıiletken elemanlara paralel serbest dolaşım diyotlarının bulunması gerekmektedir. Bu sayede, motor sisteme zarar vermeden üzerinde biriken enerjiyi akım yönünde vermesi sağlanabilir. Motor, üzerindeki enerjiyi ya regeneratif olarak çalışıp kaynağa geri verir ya da boşluk çalışarak kendi üzerinde harcar. Motor kaynak açısından dinamik bir yük olduğu için, kıyıcı devrede kullanılacak yarıiletken anahtarların uygun seçilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı, dört-bölgeli DC motor kontrolünde IGBT 'ler ile oluşturulan bir H-köprü kıyıcı devresi kullanmak

uygundur. Motor dört-bölgeli çalışırken kıyıcı özelliklerinin yanı sıra H-köprüyü oluşturan yarıiletken anahtarların kontrolünü sağlayacak olan mikrodenetleyicinin ve program algoritmasının da doğru oluşturulması gerekmektedir. Program algoritmasında doğacak bir hata yüzünden yarıiletken anahtarlar zarar görebilir. Bundan dolayı; anahtarlama zamanlamalarının hatalı yapılmaması için program algoritması ve kontrolör devresinde önlemlerin alınmış olması gerekmektedir. Örnek olarak; H-köprüde aynı kol üzerinde bulunan anahtar çiftlerinin aynı anda iletimde olmaları durumunda kaynak kısa devre olacağından dolayı program ve devrede gerekli önlemlerin alınması şarttır.

Bu çalışmada kullanılan PIC mikrodenetleyicisinin birçok avantaja sahip olmasının yanı sıra bazı uygulamalarda özellikle karmaşık program algoritmalarında program işleme hızının düşmesinden dolayı önceden yapılması düşünülen bazı özelliklerin iptal edilmesi durumunda kalınmıştır. Bilindiği gibi geri beslemeli DC motor hız kontrolünde hız ve akım kontrolü kullanılarak daha hassas sonuçlar elde etmek mümkündür. Fakat PIC ile oluşturulan akım kontrolörünün DGM sinyali periyodu ile aynı anda işlem yapabilecek hızda olamayışından dolayı akım kontrolörü kullanılmaktan vazgeçilmiştir. Bunun yerine sadece PI hız kontrolörü ile kontrol gerçekleştirilmiştir. Matlab/Simulink ile elde edilen benzetim sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuç olarak PIC mikrodenetleyicisi yardımı ile DC motorun hız ve yön kontrolü dört-bölgeli olarak gerçekleştirilebilir. PIC mikrodenetleyicinin ucuz olması ve devre tasarımındaki esnekliği sayesinde kontrolör devresinin oluşturulması oldukça basit ve kullanışlıdır. Bu nedenle, DC motorun geribeslemeli hız kontrolünün kolay bir şekilde hazırlanabileceği ve maliyet açısından ucuza gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. DC motorun geri beslemeli hız kontrolünde kıyıcının ve kontrolörün uyumlu bir şekilde çalıştırıldığında elde edilen sonuçlara göre yeterli derecede bir hız kontrolünün yapılabileceği söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Bal, G., 2001, Doğru Akım Makinaları ve Sürücüler, Seçkin Yayınevi, pp. 205.
- Baliga, B.J., M. S. Adler, R.P. Love, Gray, P.V., and Zommer, N., 1984, The insulated gate transistor: a new three-terminal MOS controlled bipolar power device, IEEE Trans. Electron Devices, 31, pp. 821–828.
- Canudas, C., Astrom, K. J., and Braun, K., 1987, Adaptive friction compensation in DC-motor drives, IEEE J. Robot., Automat., 3, no. 6, pp. 681-685.
- Cegrell, T. and Hedqvist, T., 1975, Successful adaptive control of paper machines, Automatica, 11, pp. 53-59.
- Chalmers, B. J., 1992, Influence of saturation in brushless permanent-magnet motor drives, IEE Proc. B, Electr. Power Appl., 139, no. 1, pp. 51-52.
- Chan, C. C. , 1987, Low Cost Electronic Controlled Variable Speed Reluctance Motors, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 34, no. 1, pp. 95-100.
- Davis, L., Moghbelli, H. and Ahmed, A., 1992, Microprocessor control of DC motor drives, Proc. of the IEEE industry application society, pp.302-307.
- Doğan İ., 2003, PIC C ile PIC Programlama, Infogate, pp.2.
- Dubey, G.K. and Shepherd, W., 1978, Comparative study of chopper control techniques for dc motor control, Jour. Intn. of Engrs. Electrical Eng. Div., 58, pp. 307-312.
- Hasegawa, T., 1984, A microcomputer-based thyristor Leonard system having powerful RAS function, IEEE Trans. Ind. Electronics, 31, pp. 74-78.
- Johnson, C. T. and Lorenz, R.D., 1992, Experimental identification of friction and its compensation in precise, position controlled mechanisms, IEEE Trans. Ind.Applicat., 28, no. 6, pp. 1392-1398.

- Joos, G. and Barton, T.H., 1975, Four-quadrant DC Variable Speed Drives Design Consideration, of the IEEE, 63, pp. 1660-1668.
- Khoei, A., Hadidi, K., 1996, Microprocessor Based Closed-Loop Speed Control System for DC Motor Using Power Mosfet. Electronics Circuits and Systems IEEE International Conference ICECS'96, vol. 2, 1247-1250.
- Konishi, T., Kamiyama, K. and Ohmae, T., 1980, A Performance Analysis of Microprocessor-Based Control System Applied to Adjustable Speed Motor Drives, IEEE Industrial Applications, 16, no. 3, pp. 378-387.
- Kusko, A. and Galler, D., 1987, Survey of Microprocessor in Industrial Motor Drive Systems, Microcomputer Control of Power Electronics and Drives, pp. 159-162.
- MathWorks Inc, 1999, MATLAB for Microsoft Windows, MathWorks Inc, Natick, MA.
- Microchip Technology Inc., 2001, PIC 16F87xA Data Sheet.
- Nasar, S. A., 1981, Electric Machines and Electromechanics, Schaum's Outline Series, pp. 63.
- Rahman, M. A. and Hoque, M. A., 1997, IEEE Transactions on Mechatronics, 2, no.3.
- Russel, J.P., Goodman, A.M., Goodman, L. A., and Neilson, J. M., 1983, The COMFET- a new high conductance MOS-gated device, IEEE Electron Devices Lett., 4, pp. 63-65.
- Ryff, P.F., 1988, Electric Machinery, Prentice Hall, pp.77.
- Satpati, H., Dubey, G.K. and Singh, L.P., 1980, Performance and analysis of chopper-fed dc separately excited motor under regenerative braking, Jour. of Electric Machines and Electromechanics, 5, no. 4, pp. 293-308.
- White, B.A., Lipezynski, R.T., and Daniels, A.R., 1983, A simple digital control scheme for a dc motor, Proc. Inst. Electr. Eng., 130, pp.143-147.

ÖZGEÇMİŞ

1977 Elazığ doğumlu olan Ömür AYDOĞMUŞ, ilk, orta ve lise öğrenimini Elazığ 'da tamamladı. Lisans öğrenimini, Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde 1996-2000 yılları arasında tamamladı. 2000-2003 yılları arasında elektrik motorları üreten SEZAL Elektrik Enerji A.Ş.'de kalite kontrol ve işletme mühendisi olarak çalıştı. 2003-2004 yılları arasında endüstriyel otomasyon yapan bir firmada proje mühendisi olarak çalıştı. Şu anda Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya devam etmektedir.

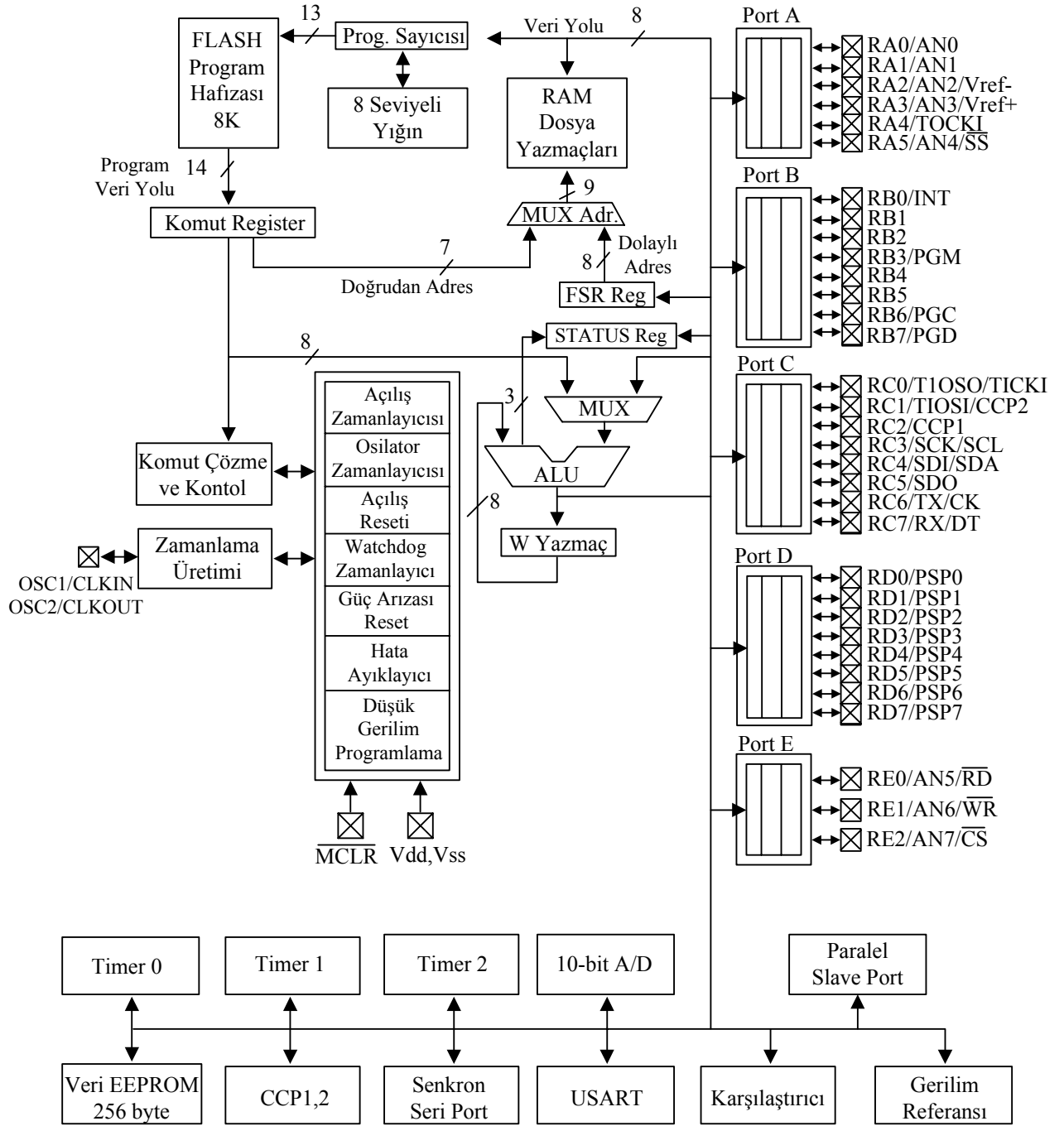
EK-1: PIC16F877 'NİN DONANIM ÖZELLİKLERİ

Tablo E-1.1 PIC16F877 'nin donanım özellikleri.

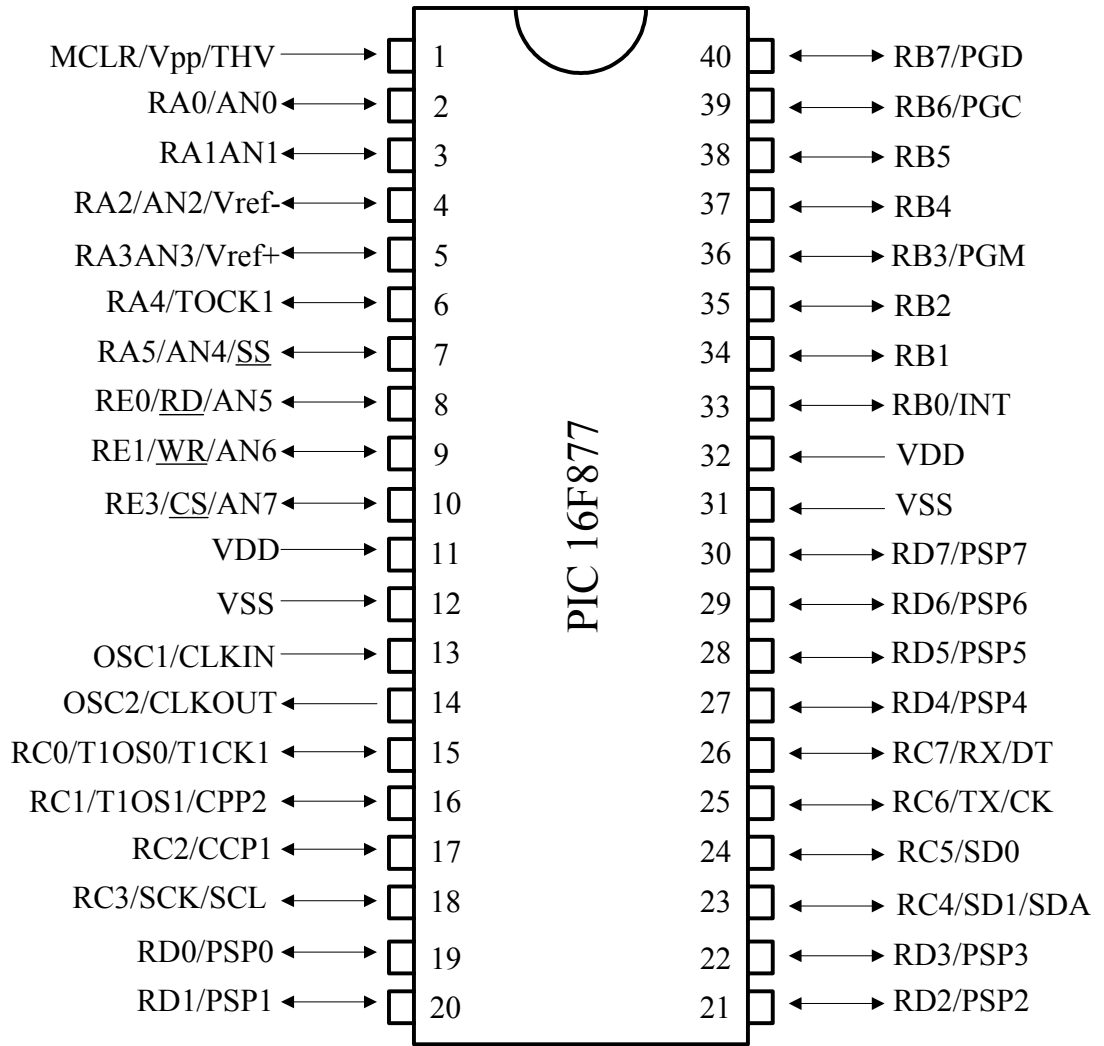
Özellik	Açıklama
Çalışma Frekansı	DC - 20 MHz
RESET (ve Gecikmeler)	POR, BOR (PWRT, OST)
FLASH Program Hafızası(14-bit kelime)	8K
Veri Hafızası (bayt)	368
EEPROM Veri Hafızası (bayt)	256
Kesmeler	15
I/O Portları	Port A,B,C,D,E
Zamanlayıcı	3
Seri Haberleşme	MSSP, USART
Paralel Haberleşme	PSP
10 bit Analog-Sayısal Modül	8 giriş kanalı
Analog Karşılaştırıcı	2

Tablo E-1.2 PIC16F877 hafıza özellikleri

Data SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	10-Bit A/D Kanal	CCP (DGM)	MSSP		USART	Timer 8/16 bit	Karşılaştırıcı
				SPI	Master I ² C			
368	256	8	2	VAR	VAR	VAR	2/1	2



Şekil E-1.1 PIC16F877 blok diyagramı.



Şekil E-1.2 PIC16F877 bacak bağlantıları.

Tablo E-1.3 PIC16F877 bacak adları ve açıklamaları

Pin Adı	DIP Pin#	Buffer Tipi	Açıklama
OSC1/CLKIN	13	ST/CMOS(4)	Kristal osilatör girişi/Harici CLK girişi
OSC2/CLKOUT	14	-	Kristal osilatör modunda kristal osilatör çıkışı, kristal ya da rezonatöre bağlanır. RC modunda, OSC1'in ¼ frekansına sahip CLKOUT çıkışıdır. Bu frekans aynı zamanda komut çevrim frekansını gösterir.
MCLR/Vpp/THV	1	ST	Ana reset (giriş) veya programlama gerilim (çıkış) veya Reset etmek için bu pin "0" (LOW) seviyesine getirilmelidir.
RA0/AN0	2	TTL	PORTA iki yönlü bir I/O portudur. RA0 analog giriş (AN0).
RA1/AN1	3	TTL	Dijital I/O RA1, analog giriş (AN1) olabilmektedir.
RA2/AN2/VREF-	4	TTL	Dijital I/O RA2, analog giriş (AN2) olabilmektedir veya negatif gerilim referans girişi.
RA3/AN3/VREF+	5	TTL	Dijital I/O RA3, analog giriş (AN3) olabilmektedir veya pozitif gerilim referans girişi.
RA4/T0CKI	6	ST	Dijital I/O RA4, TIMER0 harici saat girişi.
RA5/SS/AN4	7	TTL	Dijital I/O RA5, analog giriştir (AN4),senkronize seri port için slave seçme girişi, karşılaştırıcı 2 çıkış.
RB0/INT	33	TTL/ST(1)	PORTB iki yönlü I/O portudur. RB0 aynı zamanda harici kesme pini olmaktadır.
RB1	34	TTL	Dijital I/O RB1
RB2	35	TTL	Dijital I/O RB2
RB3/PGM	36	TTL	Dijital I/O RB3, ICSP programlama seçme girişi
RB4	37	TTL	Dijital I/O RB4,
RB5	38	TTL	Dijital I/O RB5,
RB6/PGC	39	TTL/ST(2)	Dijital I/O RB6, ICSP programlama saati
RB7/PGD	40	TTL/ST(2)	Dijital I/O RB7, ICSP programlama verisi
RC0/T1OSO/T1CKI	15	ST	PORTC iki yönlü I/O portudur. Dijital I/O RC0, Timer1 osilatör çıkışı, Timer1 harici saat girişi.
RC1/T1OSI/CCP2	16	ST	Dijital I/O RC1, Timer1 osilatör girişi, Yakalama2 girişi/Karşılaştırıcı2 çıkışı/DGM2 çıkışı
RC2/CCP1	17	ST	Dijital I/O RC2, Yakalama1 girişi/Karşılaştırıcı1 çıkışı/DGM1 çıkışı
RC3/SCK/SCL	18	ST	Dijital I/O RC3, Senkron Seri saat girişi/ SPI mod için çıkış Senkron Seri saat girişi/ I ² C mod için çıkış
RC4/SDI/SDA	23	ST	Dijital I/O RC4, SPI veri girişi, I ² C data I/O.
RC5/SDO	24	ST	Dijital I/O RC5, SPI data çıkışı.
RC6/TX/CK	25	ST	Dijital I/O RC6, USART asenkron verici, USART 1 senkron saat.
RC7/RX/DT	26	ST	Dijital I/O RC7, USART asenkron alıcı, USART senkron veri.
RD0/PSP0	19	ST/TTL(3)	PORTD iki yönlü I/O portudur, mikroişlemci arayüzü olduğu zaman paralel slave port olarak kullanılabilir.
RD1/PSP1, RD2/PSP2	20,21	ST/TTL(3)	Dijital I/O RD1, Paralel slave port veri
RD3/PSP3, RD4/PSP4	22,27	ST/TTL(3)	Dijital I/O RD2, Paralel slave port veri
RD5/PSP5, RD6/PSP6	28,29	ST/TTL(3)	Dijital I/O RD2, Paralel slave port veri
RD7/PSP7	30	ST/TTL(3)	Dijital I/O RD2, Paralel slave port veri
RE0/RD/AN5	8	ST/TTL(3)	PORTE iki yönlü I/O portudur.RE0 paralel slave port için okuma kontrolü, analog giriş 5.
RE1/WR/AN6	9	ST/TTL(3)	Dijital I/O RE1, Paralel slave port için yazma kontrolü, analog giriş 6.
RE2/CS/AN7	10	ST/TTL(3)	Dijital I/O RE2, paralel slave port için yonga seçme kontrolü, analog giriş 7.
V _{SS}	12,31	-	Lojik ve I/O ucları için toprak referansı.
V _{DD}	11,32	-	Lojik ve I/O ucları için pozitif besleme.

I: giriş, O: çıkış, I/O: giriş/çıkış, TTL: TTL girişi, ST: Schmitt Trigger girişi, ICSP: Seri programlama