T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR İÇİN ALAN YÖNLENDİRMELİ SÜRÜCÜ DÜZENEĞİ TASARIMI VE UYGULAMASI

Harun SAKARYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Konya,2009

T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLARIN ALAN ETKİLİ SÜRÜCÜ DÜZENEĞİ TASARIMI VE UYGULAMASI

Harun SAKARYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI

Konya – 2009

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR İÇİN ALAN YÖNLENDİRMELİ SÜRÜCÜ DÜZENEĞİ TASARIMI VE UYGULAMASI

Harun SAKARYA

Selçuk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Yrd.Doç.Dr.Osman BİLGİN

2009, 94 Sayfa

Jüri : Prof. Dr. Saadetdin HERDEM

Yrd..Doç. Dr. Osman BİLGİN

Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ

Bu çalışmada, alan yönlendirmeli kontrol (FOC) yöntemiyle sürekli mıknatıslı senkron motorların (SMSM) kontrolü gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sistemde, alan yönlendirmeli kontrol, d,q referans çatı modeli kullanılarak yapılmıştır. Park (d,q) ve Ters Park (a,b,c) dönüşümleri olarak bilinen bu işlemler motorun geri besleme elemanlarından alınan bilgilerin sayısal bilgilere dönüştürülmesiyle yapılmıştır. Geri besleme elemanı olarak hız ve konum ölçümü için hall sensor; akım ölçümü için ise karbon direnç kullanılmıştır.
3 fazlı PWM sinyalleri dsPIC mikrodenetleyici ile oluşturulmuştur. PWM sinyalleri ile Geri beslemede PID sistemi kullanılarak referans bilgiler motora uygulanmıştır. Böylece kapalı çevrim bir kontrol sistemi tasarlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Senkron, Servo Motor, Sürekli Mıknatıs, Park, Clarke, Ters Park, Uzay Vektör PWM, Geri besleme, Hall Sensör, Akım Sensörü, dsPIC, 3 Faz PWM

ABSTRACT

Master of Science Thesis

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF FIELD ORIENTED CONTROL DRIVER SYSTEM FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Harun SAKARYA

Selçuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor : Assist.Prof.Dr.Osman BİLGİN

2009, 94 Pages

Jury : Prof. Dr. Saadetdin HERDEM

Assist.Prof.Dr.Osman BİLGİN

Assist.Prof.Dr. Mehmet ÇUNKAŞ

In this sudy, the control of permanent magnet synchronous motor is implemented with field oriented control (FOC) method. In the system, the field oriented control is designed using d,q reference framework model. These procedures, known as Park and Inverse Park transformation, are performed with transformation of the data of motor's feedback components to digital datas. As feedback component; hall sensor is used for speed and position measurement and carbon resistor is used for current measurement.

In the proposed system, 3 phase PWM signals are formed with DsPic microcontroller. 3 phase sinusoidal voltage is formed through Integrated Power Module which is switched with PWM signals. In feedback; reference informations is applied to motor using PID feedback system. So closed loop control system is designed.

Key Words: Synchronous, Servo motor, Permanent Magnet, Park, Clarke, Inverse Park, Space Vector PWM, Feedback, Hall Sensor, Current Sensor, Dspic, 3 Phase PWM.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans çalışmalarımın ilk gününden sonuna kadar değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, gerekli araştırma ve geliştirme çabalarımda yardımlarını esirgemeyen danışmanım Yrd. Doç. Dr. Osman BİLGİN 'e, her türlü maddi-manevi katkılarını esirgemeyen aileme ve İlyas SAKARYA' ya, maddi katkılarından dolayı TÜBİTAK'a, tezin birçok bölümünde teknik desteklerde bulunan Muhammed KARAMAZI' ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET I
ABSTRACT II
TEŞEKKÜR III
SEMBOLLER VIII
KISALTMALAR X

BÖLÜM-I GİRİŞ

1. GİRİŞ 1

BÖLÜM-II KAYNAK ARAŞTIRMASI

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 6

BÖLÜM-III SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR

3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar 11
3.1. Giriş 11
3.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Tanımı 12
3.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Yapısı 13
3.4 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların İç Düzeni 15
3.5 SMSM' lerde Kullanılan Mıknatıslar 16
3.5.1 Manyetik Malzemeler 16
3.5.2 Domenler 17
3.5.3 Sabit Mıknatıslı Malzemelerin Özellikleri 18
3.6 SMSM Çeşitleri 20
3.6.1 Mıknatısların Monte Ediliş Pozisyonlarına Göre SMSM ler 20
3.6.1.1 Yüzeysel SMSM 20
3.6.1.2 Rotoru içten mıknatıslı SMSM 21
3.6.1.2.1 Inset Mıknatıs Tasarımı 21
3.6.1.2.2 Akı Yoğunlaşması Tasarımı 22
3.6.2 Akı Yönüne Göre SMSM ler 23
3.6.2.1 Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Makineler 23
3.6.2.1.1 EASMS Makinelerin Tipleri Ve Yapılar 25
3.6.2.1.1.1 Eksenel Akılı Tek Hava Aralıklı (Tek Stator, Tek Rotor) 26

3.6.2.1.1.2 Eksenel Akılı Çift Hava Aralıklı (İki Rotor Arasında Tek Stator Veya Tersi) 28
3.6.2.1.1.3 Line-Start Sabit Mıknatıslı Senkron Makineler 30
3.6.2.1.1.4 Eksenel Akılı Oluksuz Statorlu Çift Hava Aralıklı Makineler 31
3.6.2.1.1.5 Çift Yanlı, Çekirdeksiz İç Statorlu Makineler 31
3.6.2.1.2 EASMS Makinelerin Yapıları 32
3.6.2.1.2.1 EASMS Makine Sargıları 32
3.6.2.1.2.2 Oluklarda Dağıtılmış Üç Fazlı Sargılar 32
3.6.2.2 Radyal Akılı SMSM ler 33
3.6.2.2.1 Radyal Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinelerin (RASMSM) Yapıları 33
3.6.2.2.1.1 İçten Rotorlu Rotor Yüzeyine Montajlı Sabit Mıknatıslı Makineler 34
3.6.2.2.1.2 Dıştan Rotorlu Rotor Yüzeyine Montajlı Sabit Mıknatıs Makineler 35
3.6.2.2.1.3 Rotor Dış Yüzeyinin İçine Yerleştirilmiş Sabit Mıknatıslı Makineler (Inset PMSM) 36
3.6.2.2.1.4 Mıknatısları Rotora Gömülü Sabit Mıknatıslı Makineler 37
3.6.2.2.1.4.1 “V” Şekilli Sabit Mıknatıslar 37
3.6.2.2.1.4.2 Yüzeysel Mıknatıslanmış Sabit Mıknatıslar 38
3.7 SMSM Temel İfadeleri 39
3.7.1 Hava Aralığı Akısı 39
3.7.2 Kaçak Akı Ve Endüktans 40
3.8 SMSM’ nin Avantajları 41
3.9 SMSM’ nin Uygulama Alanları 41
3.10 SMSM, Asenkron Motor, Fırçalı ve Fırçasız DC Motorların Karşılaştırılması 42

BÖLÜM-IV SÜRÜCÜ DEVRELERİ KONTROL YÖNTEMLERİ

4. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor İçin Kontrol Metotları 43
4.1 Giriş 43
4.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control) 44
4.2.1 Alan Yönlendirmeli Kontrolün Başlıca Özellikleri 45
4.2.2 Alan Yönlendirmeli Kontrolün Avantajları ve Dezavantajları 45
4.3 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda Doğrudan

Moment Kontrolü (Direct Torque Control) 46
4.3.1 Doğrudan Moment Kontrolün Özellikleri 47
4.3.2 Doğrudan Moment Kontrolün Avantajları Ve Dezavantajları..... 47
4.4 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda V/F Kontrolü..... 48
4.4.1 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda V/F Kontrolün Başlıca Özellikleri.. 48
4.4.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda V/F Kontrolün
Avantajları Ve Dezavantajları..... 48
4.5 Kontrol Uygulamanın Sürekli Mıknatıslı Senkron
Motor (SMSM)'ye Kazandırdığı Özellikler 49
4.6 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda FOC Ve DTC
Yöntemlerinin Karşılaştırılması..... 50
4.7 Vektör Kontrolün Başlıca Adımları..... 52
4.8. SMSM' nin Kontrolü için Gerekli Matematiksel İfadeler..... 54
4.8.1. Uzay Vektör Tanımı 54
4.8.2 Vektörel Dönüşümler..... 56
4.8.2.1 Clarke Dönüşümü (a,b,c → α,β)..... 56
4.8.2.2 Park Dönüşümü (α,β → d,q)..... 57
4.8.2.3 Ters Park Dönüşümü (d,q → α,β)..... 58
4.9 Vektörel Dönüşüm Sistemlerinin Kullanım Detayları..... 59
4.10 İnverterlerde Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) Kullanımı 60
4.10.1 PWM Çeşitleri 60
4.10.1.1 Sinuzoidal PWM..... 61
4.10.1.2 Uzay Vektör PWM 62

BÖLÜM-V GERİ BESLEME ELEMANLARI

5.1 Pozisyon Denetleyici Ve Belirleyiciler..... 64
5.1.1 Analog Pozisyon Encoderleri 64
5.1.1.1 Takogeneratör 64
5.1.1.2 Resolver 65
5.1.2 Dijital Pozisyon Encoderleri..... 65
5.1.2.1 Enkoder Çalışma Prensipleri..... 65
5.1.2.2 Artımsal Tip Encoderler 66
5.1.2.3 Mutlak Tip Encoderler..... 67
5.1.2.4 Hall Sensör..... 67

5.1.2.5 Artımsal Ve Mutlak Enkoderlerin Karşılaştırılması 68

BÖLÜM-VI SÜRÜCÜ DEVRE TASARIMI VE DENEYSEL ÇALIŞMALARI

6. Sürücü Devre Tasarımı ve Deneysel Çalışmaları 70
6.1 Giriş 70
6.2 Genel Tasarım 70
6.2.1 DSPIC Kontrol Devresi 71
6.2.2 Güç Katı Devresi 73
6.2.3 İnverter Devresi 74
6.2.4 Geri Besleme Elemanları 76
6.2.4.1 Karbon Dirençler (Akım Okuma) 76
6.2.4.2 Hall Sensör 78
6.2.5 Optoisolator Devresi 79
6.2.6 Tez Çalışmasında Kullanılan SMSM Etiket Bilgileri 81
6.2.7 ICD2 Programlayıcı Devresi 81
6.3 FOC Yöntemi Yazılımı 82
6.4 Deneysel Çalışmanın Değerlendirilmesi 82

BÖLÜM-VII SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1 Sonuçlar ve Sonuçların Değerlendirilmesi 90
7.2 Öneriler 91

BÖLÜM-VIII KAYNAKLAR

8 Kaynaklar 93

EKLER

EK-I
EK-II

SEMBOLLER

Boyuna Eksen Stator Akım Bileşeni	(i_{sD})
Enine Eksen Stator Akım Bileşeni	(i_{sQ})
Samarium-Cobalt	($SmCo_5$, Sm_2Co_{17})
Stator faz akımları	i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}
Rotor Manyetik akısının α bileşeni	$\Psi_{M\alpha}$
Rotor Manyetik akısının β bileşeni	$\Psi_{M\beta}$
Rotor Manyetik akısının d bileşeni	Ψ_d
Clarke dönüşümü sonucu oluşan akım bileşenleri	$i_{s\alpha}$ ve $i_{s\beta}$
Akı referansı	i_{sdref}
Moment referansı	i_{sqref}
Faz rotasyon operatörü, a=ej2π/3	a
Magnetik akı yoğunluğu	B
Rotasyonal sistem	d,q
Magnetik alan şiddeti	H
a ekseni akımı	i_a
b ekseni akımı	i_b
c ekseni akımı	i_c
Stator akımı	i_s
Stator akımı uzay vektörü	i_s
Atalet momenti	J
Transformasyon sabiti, k=2/3	K
a ekseni endüktansı	La
b ekseni endüktansı	Lb
c ekseni endüktansı	Lc
Rotor endüktansı	Lr
Mıknatıslanma endüktansı	Lm

Stator endüktansı	Ls
d ekseni stator endüktansı	Lsd
q ekseni stator endüktansı	Lsq
Çift kutup sayısı	p
Zaman	T
d ekseni gerilimi	Usd
Stator akı referans sistemi	x,y
Stator senkron reaktansı	Xs
Stator sargısı empedansı	Zs
Açısal hız	ω
Stator manyetik akı uzay vektörü	ψs
Stator manyetik akı genliği	|ψs|
Manyetik akı referansı	ψ'_s
Rotor elektriksel açısı	θ_e
Rotor açısı	θ_r
Güç faktörü açısı	ø
Yük (moment) açısı	δ

KISALTMALAR

Sürekli Mıknatıslar	(PM)
Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor	(SMSM),(PMSM)
Alan Etkili Kontrol	(FOC)
Doğrudan Moment Kontrolü	(DTC)
Darbe Genişlik Modülasyonu	(PWM)
Oransal-Türev	(PD)
Voltaj/Frekans	(V/F)
Model Referans Uyarlamalı Sistem	(MRAS)
Doğru Akım	(DC)
Alternatif Akım	(AC)
Senkron Motor	(SM)
Sürekli Mıknatıslı Alternatif Akım	(PMAC)
Fırçasız Doğru Akım Motoru	(BLDC)
Yüzey Mıknatıslı PMSM	(SPMSM)
İç Mıknatıs ya da diğer adıyla İlave Mıknatıslı Senkron Motor	(IPMSM).
Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Makine	(EASMSM)
Radyal Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Makine	(RASMSM)
Gerilim Beslemeli İnverter	(VSI)
Sinuzoidal PWM	(SPWM)
Uzay Vektör Modülasyon	(SVPWM)

BÖLÜM-I

1. GİRİŞ

Günümüzde elektrik makineleri dünyadaki enerji tüketiminin %65' ini harcamaktadır. Motorlara olan bu ihtiyaçtan dolayı enerji açısından sürücülerin maksimum verimi sağlaması şarttır. Sürekli mıknatısların (PM) bakır kayıplarının daha az olması bu makinelere olan ilgiyi arttırmış ve şimdiye kadar yoğunlukla asenkron motorların kullanıldığı bu sektörde sürekli mıknatısların fiyatlarının azalmasına oranla senkron makinelere ilgi artmıştır. Genellikle motor olarak kullanılan bu makinelerin tek dezavantajı fiyatının yüksek olmasıdır.

Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM) elektrik motorları arasında en yüksek ve kaliteli güç yoğunluğuna, verime ve yüksek moment ataletine sahiptir. Yüksek moment ve dinamik kontrol gerektiren uygulamalarda bu motorların kullanışlı ve küçük (kompakt) yapısı ve daha az bakım gerektirmesi SMSM' nin diğer motorlara göre üstün olmasını sağlar (Krishnan, 1987). Bu özellikler, özellikle 1980' lerden sonra yarı iletken sanayisinin gelişmesiyle senkron motorların kontrolü üzerine yapılan çalışmaları hızlandırmış ve kontrol yöntemi olarak Alan Yönlendirmeli Kontrol (FOC) ve Doğrudan Moment Kontrolü (DTC) üzerinde yoğunlaşma oluşmuştur.

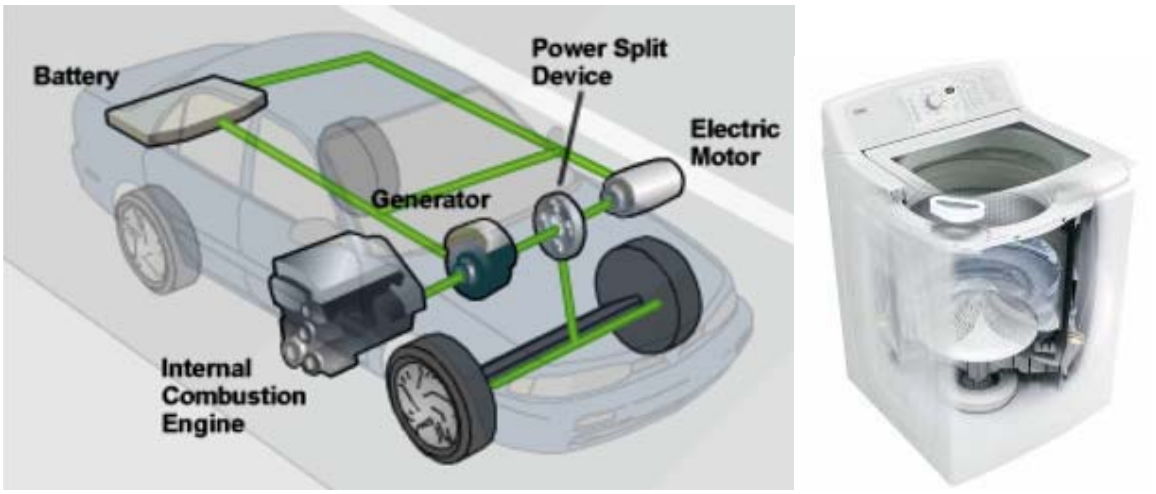
Senkron motorlar; kullanılan kaynağın frekansına ve motor kutup sayılarına bağlı olarak her zaman senkron hızda dönen, sabit hızlı makinelerdir. Elektriksel uyartımlı alan sargılarının yerine bu sargıların görevini alan sürekli mıknatısların bulunduğu motorlar günümüzde çok yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Vas,1990).

Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda mıknatısların rotor yüzeyi yerine rotor çekirdeğine yerleştirilmesi moment kapasitesini artırdığı için tercih edilir. Uyartım sistemlerinde uyartım makinesi olarak kullanılan senkron motorlar;

- Güç katsayısı ve verim yüksekliği,
- Motor gücünün motor ağırlığına oranının büyük olması,
- Salınım bileşenleri olmaması ve yol alma momentine sahip olması,

- Yüksek hava aralığı akı yoğunluğu olması,
- Uygun hız-moment karakteristiğine sahip olması,
- Yüksek moment / Eylemsizlik oranına sahip olması,
- Yüksek verim ve cosφ'ye sahip olması,
- Bilezik, fırça gibi fazla bakım isteyen parçaların bulunmaması,
- Doğru akım uyarma düzeneğine gerek duyulmaması,
- Rotor yüzeyinde oyuklar bulunmayıp hava aralığının hemen hemen sabit olması

özelliklerinden dolayı tercih sebebidir. İstenen birçok özelliğin bu motorlarda bulunması kontrol sistemlerinin geliştirilmesinde önemli rol oynamıştır. Kullanım alanları olarak; Konveyörler, robot kolları, vinçler, metal ve kağıt işlemesi, atık su işlemesi gibi değişik birçok alan saymak mümkündür. Şekil 1.1' de görüldüğü gibi yüksek hız gerektiren uygulamalarda SMSM' lerin kullanılması bu motorların her alanda kullanıldığını göstermektedir.



Şekil.1.1. (a)Hibrid otomobilde kullanılan SMSM (b)Çamaşır Makinesi motoru

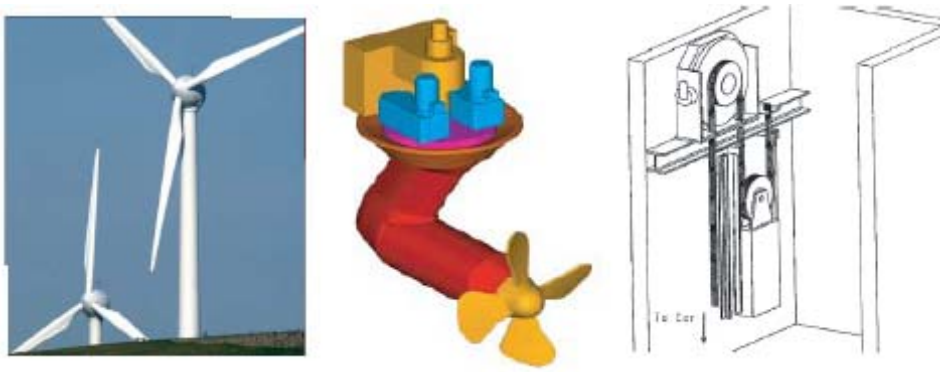
Bunun yanında, moment cevabının düzgün ve daha az dalgalı olması, geniş aralıklarda çalışan yüksek performanslı hareket kontrol uygulamalarında önemli bir gerekliliktir. Örnek olarak, metal işleme makinelerinde yüzey sonunun kalitesi, metali işleyen döner parçanın bağlı olduğu mildeki anlık momentin düzgünlüğü ile doğru orantılıdır. Benzer şekilde, robotlardan uydu takipçilerine kadar geniş bir alanda kullanılan cihazlarda mevcut bulunan servo motorların ürettikleri momentteki dalgalanmaların en aza indirgenmiş olması şarttır (Thomas, 1996). Ayrıca CNC tezgahlarında kullanımı çok yaygındır. Bu

alanlarda SMSM' den yüksek hız istenirken düşük hızlı sistemlerde ise genellikle aşağıdaki şekilde hangi alanlarda kullanıldığı belirtilmiştir.(Şekil.1.2)

a) Rüzgar türbinleri için

b) Gemi, bot ilerletmek amacı için

c) Asansör motoru olarak kullanmak için



Şekil.1.2 (a) Rüzgar Türbini (b) Bot pervanesi (c) Asansör motoru

Sürekli mıknatıslı senkron motor ile uyarma akımı kayıpları ve aynı zamanda ek kayıplar da ortadan kalkmaktadır. Bu tür makinede stator normal bir asenkron motordaki gibidir ve uyarma akımı rotora yerleştirilen sürekli mıknatıslar ile sağlanmaktadır. Mıknatıs yerleştirilmesi ve özellikleri nedeniyle hem bir senkron makine, hem de bir doğru akım makinesi özelliği gösterebilmektedir.

Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda mıknatıs malzemelerinin, yarı iletken anahtarlama elemanlarının ve kontrol teknolojilerinin gelişiminin sağladığı avantajlar, sürekli mıknatıslı senkron motorlarının tasarımını ve kontrolünü daha da hızlı geliştirmiştir. Robot ve uçak teknolojisi gibi yüksek güç verimine karşılık düşük ağırlık oranının olması istenen ve aranan bir durumdur. Makinenin güç yoğunluğu, ısı dağılımı kapasitesi ile orantılıdır. Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda; bakır, fuko ve histerisiz kayıplarının büyük çoğunluğu statorda olmaktadır. Rotor kayıpları ise burada ihmal edilmektedir (Pillay ve Krishnan,1989).

Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda akı, mıknatıslar tarafından sağlanmaktadır. Yüksüz durumda hız, gerilim ile doğru ve akı ile ters orantılıyken, yük altındayken akım ve akı ile doğru orantılıdır.

Sürekli mıknatıslar ile uyarılmış senkron motorlar son yıllarda değişken hız uyartım sistemlerinde kullanılmaktadır. Rotor manyetik alanı doğru akım taşıyan sargılar yerine rotora yerleştirilen sürekli mıknatıslar ile sağlanmaktadır. Alan sargısındaki bakır kayıplarının ortadan kaldırılması makinenin verimine olumlu yönde katkı sağlamaktadır. Stator bakımından asenkron motorlardan farklı değildir. Normal sargılı bir senkron motor ayrı bir doğru akım kaynağına ve fırça-bilezik düzenine ihtiyaç göstermektedir. Sürekli mıknatısların kullanılması ile böyle bir düzene gerek duyulmamaktadır. Asenkron motorlarda moment oluşturmak için gerekli stator akım bileşeni olan mıknatıslama akımı sürekli mıknatıslı senkron motorlarda yoktur. Stator akımı sadece momentin oluşumu için gereklidir. Böylece asenkron motora göre daha büyük güç katsayısına sahip yüksek verimde çalışabilmektedir. Üretilen moment; asenkron motorlardan farklı olarak, besleme gerilimine doğrusal bağlılık göstermekte, makine gerilim ve frekans değişimlerine daha az duyarlı olmaktadır (Diril 1990).

Bunların dışında endüstriyel uygulamalarda elektrik motorlarının kontrol edilmesi amacıyla kullanılan değişken hızlı sürücüler, motor mili vasıtasıyla şebekeden yüke verilen enerjinin ve moment ile hız büyüklerinin kontrolünü sağlar. Uygulamalarda, moment ve hız büyüklüklerinden sadece birisi kontrol edilerek moment ve hız kontrolü yapılır. Sürücü moment kontrol modunda çalıştığında, hız yük tarafından belirlenir. Moment, motordaki gerçek akım ve akının bir fonksiyonudur. Benzer şekilde hız kontrol modunda çalıştığı zaman, moment yük tarafından belirlenir.

Başlangıçta değişken hız kontrolü için, yüksek doğrulukta iyi bir moment ve hız kararlılığına kolayca ulaşılabilen DC uyartım sistemleri kullanılmıştır. Doğru akım motorunda moment, endüvi akımı ile doğrudan orantılıdır. Akım geri beslemesi kullanılarak, DC motor momenti doğrudan kontrol edilebilir. Bu uygulama ile doğru, hızlı, kolay bir moment kontrolü ve yüksek dinamik hız cevapları sağlanabilmektedir.

DC uyartım sistemlerinin hızlı moment cevabı ve hız doğruluğu gibi konulardaki performansını geçmek amacıyla daha az maliyetli ve daha basit yapıdaki standart AC motorları kullanılmaya çalışılmıştır. Bu yönde ilerleyen teknoloji gelişimi AC değişken hız teknolojisinin de gelişimine katkı sağlamıştır. AC sürücülerde kontrol skaler veya vektörel

olarak gerçekleştirilir. Skaler kontrolde, temel değişkenler olarak gerilim ve frekans kullanılır. PWM modülatörün kullanıldığı bu kontrol yönteminde, motordaki manyetik alanın konumu dikkate alınmaz ve sürücülerde hız algılayıcısı kullanılması gerekmez. Rotorun konumu ihmal edilir. Dolayısıyla, açık çevrimli sürücü olarak bilinmektedir. Ayrıca bu kontrol şekli, birçok uygulamada yeterli doğrulukta bir kontrolü sağlayamaz.

Akı vektör kontrollü AC sürücülerde, alan vektörünün konumu kontrol edilerek doğrudan akı kontrolü gerçekleştirilir. Burada, rotor akısı uzaysal konumu, hız geri beslemesiyle elde edilen rotor açısal hızı ile bilinen stator akım vektörünün karsılaştırılmasıyla, sürücü tarafından hesaplanır ve kontrol edilir. Akı vektör kontrolünün en büyük dezavantajı, yüksek doğruluk için bir takogeneratör veya encoder kullanma zorunluluğudur. Bu sürücü sisteminin uygulanmasını zorlaştırır ve fiyatını arttırır (Bakan, 2002).

Bu tez çalışmasında; sürekli mıknatıslı senkron motorların alan yönlendirmeli kontrolü yapılmıştır. Bu kontrolde akım ve gerilim direkt kontrol edilirken akı ve tork dolaylı olarak kontrol edilmektedir. Yapılan uygulamada temel olarak geri besleme elemanlarından alınan bilgiler, işlemci tarafından değerlendirilmektedir ve referans bilgiye göre PWM yöntemi ile oluşturulan 3 faz sinüzoidal sinyal motora uygulanmaktadır. Böylelikle motor kontrolü sağlanmıştır.

BÖLÜM-II

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Zeid S.(1998), "An Analysis of PermanentMagnet Synchronous Motor Drive" isimli çalışmasında Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM)'li gerilim beslemeli inverter ile beslenen Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor' ların (SMSM) sürücü sistemini geliştirmiştir. İçten mıknatıslı SMSM'lerin yüksek performanslı sürücü sistemlerinin uygulamalarında çok döngülü kontrol sistemi kullanılmıştır. Hız kontrolörü bir PI kontrolör olarak en dıştaki döngü sayılmıştır. İç döngüde ise iki kontrolör elemanı yer almış ve motorun direk ve çeyrek eksenli akım bileşenlerinin kontrolü yapılmıştır. Bu akım kontrolörlerinin çalışması d-q ekseni çerçevesinde hesaplanmıştır. Dolaylı alan yönlendirmeli kontrol yapılmıştır. Yüksek hızdaki DSP kartı ile uygulama gerçekleştirilmiş ve çok döngülü kontrol sisteminin faydası görülmüştür.

Khurram A.(2001), "Position and Speed Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors" isimli çalışmasında vektör kontrol tekniğini kullanmış ve rotor yüzeyinden mıknatıslı SMSM'lerin hızı ve pozisyonlarının hesabı için bir yazılım geliştirilmiştir. Kapalı çevrim sistem olarak çalışılmıştır. Bu sistem ilk anda pozisyon hatası yapma oranını arttırmaktadır. Motorun dq modeli geliştirilmiş ve dq modeli çerçevesinde tahmin edilen akımların türevleri kullanılarak pozisyon ve hız tahmini yapılmıştır.

Chandana P., Blaabjerg F., Pedersen J., Thagersen P.(2002), "A Sensorless, Stable V/f Control Method for Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives" isimli çalışmalarında SMSM'lerin pompa ve fanlardaki uygulamalarında V/f kontrol metodunu uygulamışlardır. Rotordaki söndürücü sargıların olmaması, SMSM'lerin açık çevrim V/f kontrolü esnasında aşırı bir frekans uygulanmasıyla karşı karşıya kalmasına neden olacağından dolayı yeni bir V/f kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Bu çalışmada geniş çerçevede bir frekans aralığında geliştirmeler olmuştur. SMSM'de sabit bir stator akısı oluşturmak için gerilimin genliği kontrol edilmiştir. Geniş bir frekans aralığında kontrolü düzeltmek için uygulanan frekans giriş gücüyle orantılı olarak modüle edilmiştir. Bu

düzgünleştirme tekniğinde pozisyon sensörüne gerek yoktur ve kullanılmamıştır. Deneysel çalışmada sonuç olarak pompa ve fanlarda kullanıma uygun memnuniyet verici sonuçlar elde edilmiştir.

Aydın M.,(2004) "Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Disc Motors For Smooth Torque Traction Drive Applications" isimli doktora tezinde yaptığı çalışmada eksenel akılı senkron motorların düzgün moment üretebilen sürücü uygulamalarını incelemiştir. Yapılan çalışmada, eksenel akılı senkron motorlarda stator sargısının yuvalı ve yuvasız olması, motorun ebatları ile motorun optimizasyonu ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Radyal akılı ve eksenel akılı senkron motorlarda moment kalitesi, matematiksel işlemler ve sonlu elemanlar yöntem yaklaşımları kullanılarak iyileştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile iki ve üç boyutlu analizler yapılmıştır.

Gençer Ç., Gedikpınar M.(2005), "Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Sayısal İşaret İşleme Tabanlı Konum Denetimi", isimli çalışmalarında yapısının basit olması nedeniyle bir oransal-türev (PD) denetleyici tasarlanarak, SMSM'nin sayısal işaret işlemci tabanlı konum denetimi gerçekleştirilmiştir. Benzetim ve deney çalışmalarından tasarlanan denetleyicinin, salınımsız hızlı bir dinamik cevaba sahip olduğu görülmüştür.

Zhao L.(2005), "New Optimal High Efficiency DSP-Based Digital Controller Design For Super High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor" isimli çalışmada süper yüksek hızlı SMSM'ler için güç kaynağı anahtarlama tasarımı ve dijital kontrol sistemleri araştırılmıştır. Bu hızdaki SMSM'lerin kararlılık analizi yapılmış ve parametrelerin maksimize yapılabilmesi için bazı tasarım önerileri verilmiştir. Açık çevrim kontrol sistemi uygulanmış ancak sıradan motorlardaki kontrol sistemi gibi kontrol yapılmamıştır. Sıradan motorlarda Voltaj/Frekans (V/F) kontrolde stator direnci önemsenmezken bu hızdaki motorlarda stator direnci stator indüktansından daha büyük olduğu için önemsenecek bir duruma gelmiştir. Bu parametre hesaba katılarak gerekli kontrol sistemi geliştirilmiştir.

Buzcu İ.E.(2005) "Daimi Mıknatıslı Senkron Motorun Rotor Alan Yönlendirmeli Kontrolü ve Pasif Filtre ile Harmoniklerin Azaltılması" isimli yaptığı doktora tezinde; önce sürekli mıknatıslı senkron motorun modellenmesi, sonra da FOC kontrolü üzerinde durulmuştur. Her bölümde SMSM' nin simulink modeli oluşturulmuş, FOC ile simülasyonu

yapılmıştır. Harmoniklerin azaltılması için pasif filtrelerle çözüm aranmıştır. Ayrıca FOC ile SMSM'nin hız kontrolünün Matlab Simulink ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Rashed M., Macconnell I., Stronach A., Acarnley P.(2005), "Sensorless Indirect Rotor Field Orientation Speed Control Of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Adaptive Rotor Flux Estimator" isimli çalışmalarına göre SMSM'nin verimli ve kesin bir sensörsüz hız kontrolü için rotor akı pozisyonunun ve hızının doğru bir şekilde bilinmesi gerekmektedir. Sistem gürültüsünün etkisini azaltmak için rotor hızından direkt olarak rotor akısını tahmin etmeye yardımcı olan dolaylı rotor akı etkili şeması kullanılmıştır. Rotor akı genliği ve rotor akı hızı Model Referans Uyarlamalı Sistem (MRAS) tahminleyicileri kullanılarak başarılmıştır. Bu sistem lineer kontrol teorisine göre çalışmaktadır. Simülasyon ve deneysel sonuçlar iyi bir performans sağlamıştır.

Arroyo E.(2006) "Modeling And Simulation Of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System" isimli çalışmada SMSM'nin Simulinkte simulasyonu detaylı olarak modellendirilmiştir. Alan yönlendirmeli kontrol yöntemi kullanımı yapılmıştır. Simulasyonda gerçeğe uygun modeller kullanılmıştır. Model inverterin farklı elemanlarıyla motorun geçici ve kararlı durumları ile çekilen akım ve gerilim hesaplanmıştır. Yine aynı şekilde kayıplar da hesaplanmış ve inverter tasarımı kolaylaştırılmıştır. Kapalı çevrim PI kontrolör simülasyonu yapılmış, sabit momentte ve alan zayıflatma bölgelerinde bu kontrolör kullanılmıştır. Simülasyonda akım kontrolörleri ile ilgili histerisiz ve darbe genişlik modülasyonu çalışmaları karşılaştırılmış ve toplam harmonik bozulma olayı incelenmiştir.

Taghirad H., Abedi N., Noohi E.(2006), "A New Sensorless Vector Control Method for Permanent Magnet Synchronous Motor without Velocity Estimator" isimli çalışmada SMSM'lerin vektör kontrol metotları üzerine çalışılmışlardır. Hız algılayıcı kullanılmamıştır ve yeni bir koordinat sisteminde vektör kontrolü yapılmıştır. Senkron hız yerine referans hızın hesaplanması geleneksel koordinat sistemlerinin kullanmadığı bir durumdur. Bu koordinat değişimi ile trigonometrik değerler hesaplanmıştır. Tahmin yapabilme teorisi genişletilmiş Kalman Filtresi metodu ile dolaylı olarak hesaplanmıştır.

Deghpan Z.(2006), “Vector Control of Multiphase Permanent Magnet Synchronous Motors” isimli çalışmada çok fazlı SMSM’lerin değişken hızlardaki vektör kontrolünü yapmıştır. Bu çalışmada çıkık kutuplu olmayan rotor yüzeyinden mıknatıslı senkron motorlar ile çalışılmıştır. Bu kontrol yöntemi faz sayısı tek sayı olan ve 3 ten büyük olan motorlar için geçerlidir. Simulinkte modeli geliştirilmiş ve DSP kontrol kartıyla motorun vektör kontrolü yapılmıştır.

Ozcıra S.(2007) “Sabit mıknatıslı senkron motorun kontrol yöntemleri ve endüstriyel uygulamaları”, isimli çalışmasıyla sabit mıknatıslı senkron motorun yapısı ve matematiksel modeli verilmiş, kontrol yöntemleri incelenmiş ve endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan kontrol yöntemi olan doğrudan moment kontrolü metodu ile Matlab/Simulink simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Sabit mıknatıslı senkron motorun analizi ile elektromanyetik moment değerindeki artışın, stator ve rotor manyetik akılarının arasında kalan açının artışı ile orantılı olduğunu görülmüştür.

Adam A.I.(2007) “Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Moment Dalgalanması Ve Gürültünün Azaltılması” inverter anahtarlama sisteminden kaynaklanan SMSM de üretilen harmonik gürültülerinin ve moment dalgalamalarının azaltılması incelenmektedir. Çalışmada farklı gerilim modülasyon çeşitlerinin ve kontrol algoritmalarının harmonikleri ve dalgalanmaların seviyesini nasıl etkilediğini belirlemek için aynı çalışma koşulları altında alan yönlendirmeli kontrol ve doğrudan moment kontrol için Matlab/Simulink modelleri oluşturulmuştur.

Stulrajter M., Hrabovcov´A V., Franko M.(2007), “Permanent Magnets Synchronous Motor Control Theory” isimli çalışmada SMSM’lerin kontrol stratejileri için farklı yaklaşımlar kullanılmışlardır. AC motor kontrol yöntemlerinden skaler ve vektörel kontrol yöntemleri ile çalışılmıştır. Bu kontrol teknikleri hakkında teorik olarak detaylı bir çalışma yapılmış ve simülasyon teknikleri kullanılarak bu kontrol tekniklerinin avantajları ve dezavantajları işlenmiştir.

Kaewjinda W., Konghirun M.(2007), “Vector Control Drive of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Resolver Sensor” isimli çalışmada SMSM’lerin vektör kontrolünü gerçekleştirebilmek için pozisyon sensörlerinin kullanılmasının gerekliliğini ifade

etmişlerdir. Yapılan çalışmada kullanılan sensörün gürültülere karşı duyarsız olması kaliteyi arttırmıştır. Bu çalışma simülasyon olarak Matlab/Simulink'te incelenmiş ve TMS320F2812 dijital sinyal işleme kartı ile kontrol sağlanmıştır.

BÖLÜM-III

3. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORLAR

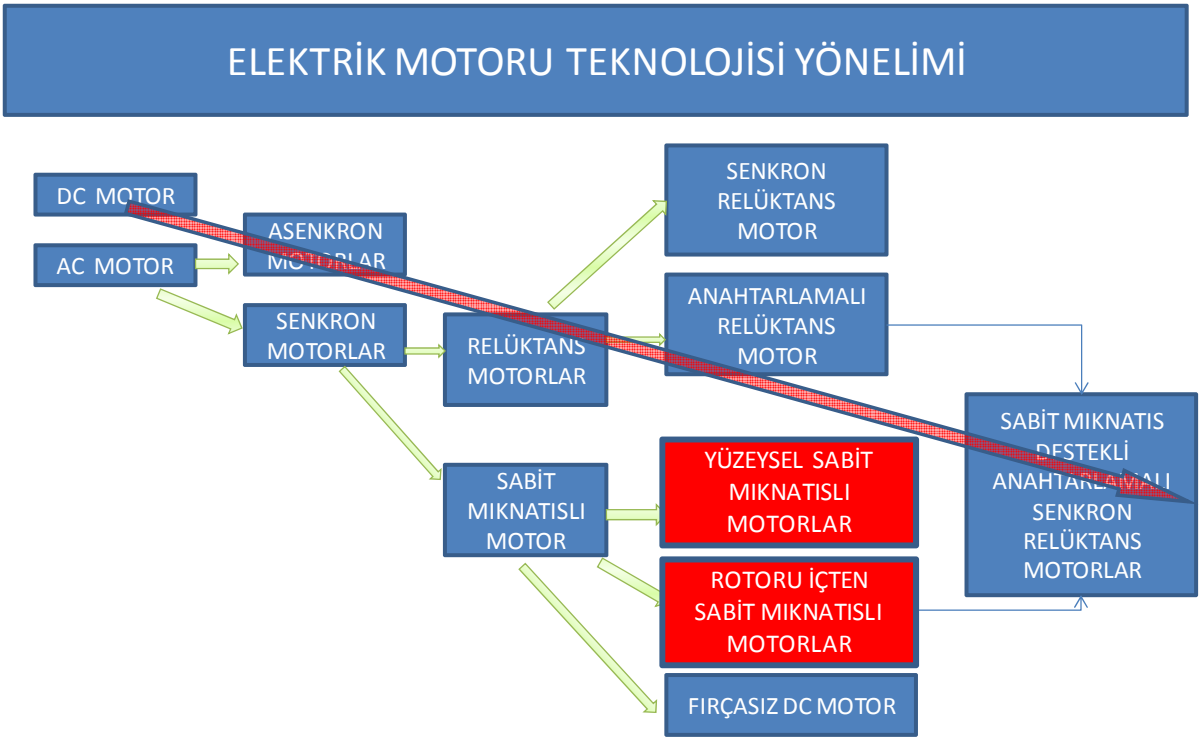
3.1. Giriş

Genel olarak üretilmiş olan elektrik motorlarının sınıflandırılması Şekil.3.1' de gösterilmiştir. İki ana gruba ayrılan motor tiplerinden ilk olarak üretilenler, komütatörler ile çalışabilen doğru akım (DC) motorlarıdır. Diğer grup ise senkron ve asenkron motorlar olmak üzere alternatif akım (AC) motorlarıdır. Ana olarak iki türde üretilen elektrik motorlarında Şekil.3.1' de görüldüğü gibi teknolojinin yönelimi AC olan tipe doğrudur. Bunun sebebi ise bu motorların teknik özelliklerinden dolayı kontrol mekanizmasının çok ileri bir teknolojiye ulaşmasıdır. Yani yüksek verim ve daha iyi bir performansın bulunması, güvenilirlik ve memnuniyet vericilik katsayısının yüksek olması, söz konusu motorlara ilgiyi arttırmaktadır. (Buzcu, 2005)

Elektrik motorlarının faydalı bir enerji dönüşümü yapabilmesi için tork üretmesi gerekir. Üretilen tork üretim mekanizmasına göre genel olarak iki sınıfa ayrılır. Bunlar elektromanyetik ve değişken relüktans mekanizmalarıdır.

Değişken Relüktanslı motorlar günümüzde nadir olarak kullanılan ancak teknolojik bir sistemdir. Özetle anlatılırsa; statorda oluşan akı, hava aralığında minimum relüktansın oluşabilmesi için rotoru o noktaya getirmeye zorlar ve böylece rotorun dönüşü tek yönlü akı oluşumu ile sağlanır. Şekil.3.1' de görüldüğü gibi değişken relüktans sistemine göre çalışan motorların; motor üretim teknolojisinin en yeni sistemlerinde kullanıldığı görülmektedir. Elektromanyetik sistemle çalışan motorlar ise en çok kullanılan mekanizmadır. Stator ve rotorda oluşan iki manyetik alanın etkileşimi ile bir döner alanın oluşturulması sağlanır ve rotorun dönmesi, bu döner alan ile olur.

Alternatif Akımla (AC) çalışan motorlardan SMSM' ler en teknolojik motorlar olarak görülmektedir. Bu bölümde; hızı direkt olarak stator frekansı ve kutup sayısı tarafından belirlenen Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlar incelenecektir.



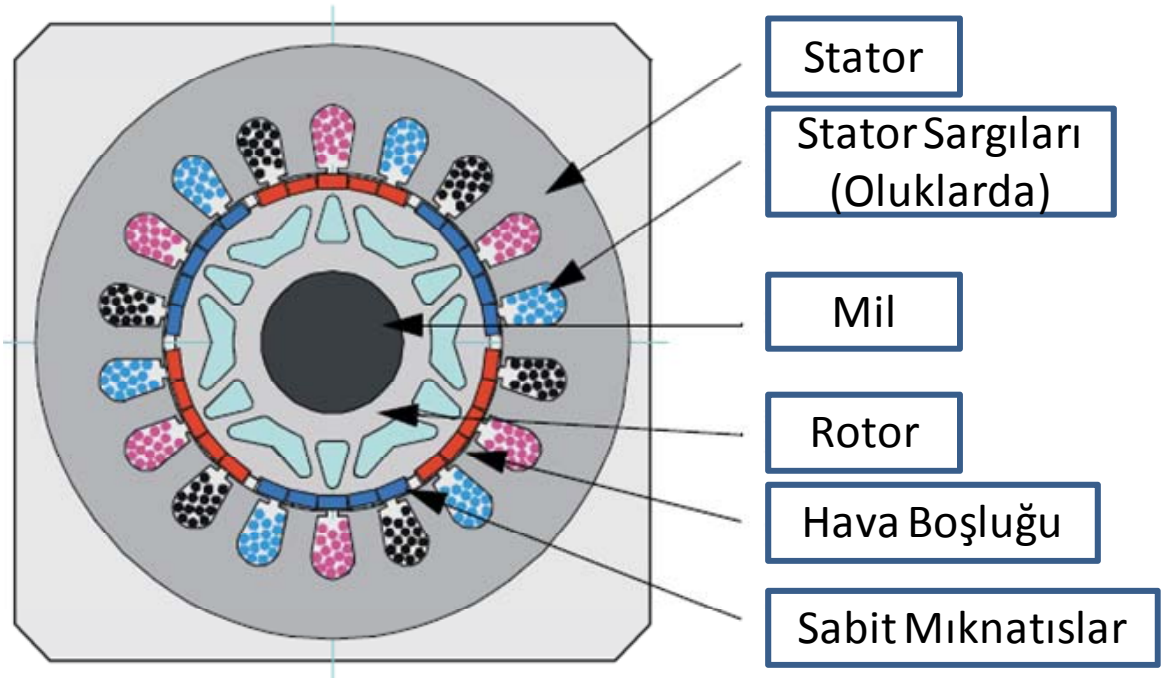
Şekil.3.1. Elektrik Motorlarının Sınıflandırılması

3.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Tanımı

SMSM' ler stator ve rotor olmak üzere iki ana bölüme sahiptir. Senkron motorlar (SM) stator ve rotoruna göre farklı yapılarda olabilirler. Genel olarak motoru döndürebilmek için, statordan ve rotordan olmak üzere iki akıya ihtiyaç vardır. Bu iki akının değişik modellerle oluşturulabilmesi, yeni yöntemler ile farklı motor biçimleri elde etmeyi mümkün hale getirir. Stator akısının üretilmesi 3 fazlı gerilimle stator sargıları tarafından olur. Rotor akısını üretmek için çoğunlukla iki yol vardır. Bunlardan birisi statordan rotor sargı beslemesi kullanmak, diğeri ise; sürekli mıknatıstan yapılmış ve kendiliğinden sabit akı üretmektir. Ancak sürekli mıknatıs kullanılmadan oluşturulan akı, fırçaların bakım gerektirmesi ve diğer oluşabilecek bakım problemlerinden dolayı günümüzde pek istenmeyen bir durumdur. Bu sebeple; rotor alan sargıları ve kutup yapıları, sürekli mıknatıslar ile değiştirilerek sürekli mıknatıslı senkron motorların temeli atılmıştır.

3.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Yapısı

SMSM' lerin en önemli özelliği rotorlarının sabit mıknatıslar ile donatılmış olmasıdır. Mıknatıs kutuplarının sayısı sürekli mıknatıslı senkron motorlarda çok değişiklik gösterir. Motorlar iki kutuptan elli kutba kadar ya da daha fazla mıknatıs kutupları ile yapılmışlardır. Kutup sayılarının motordan motora değişmesinin en büyük nedeni; ihtiyaç olan moment büyüklüğünden kaynaklanmaktadır. Yani aynı miktardaki akım için, daha fazla kutbu olan motor daha büyük moment oluşturur. Mıknatıslar arasında bir aralığa ihtiyaç duyulması nedeniyle, ilerideki bölümlerde değinileceği üzere, belli bir noktanın üzerinde, moment daha fazla artış göstermez. Mıknatısların kullanılması; rotor sargılarının değiştirilmesini ve radyal aralıkta verimli kullanılmasına olanak sağlar, bu yüzden bakır kayıpları bastırılmış olur. İleri mıknatıs malzemeleri samarium-cobalt ($SmCo_5$, Sm_2Co_{17}) veya neodymium-demir-boron (NdFeB) çok yüksek güç yoğunluğuna sahiptirler ve motorun boyutlarının küçülmesi için kullanılabilecek en iyi mıknatıs malzemeleridir.(Vas, 1990)



Şekil.3.2 Sürekli Mıknatıs Rotor Yapıları

Sürekli mıknatıslı motor, yapı olarak DC kolektörlü motor ile yakındır. Tek farkı elektrik sargıları yerine sürekli mıknatısların kullanılmasıdır. Şekil 3.2' de SMSM' lerin temel yapısı görülmektedir.

Sürekli mıknatıslı alternatif akım (PMAC) motorlarında, mıknatıslar rotor içerisine veya rotor çevresine farklı şekillerde yerleştirilebilir. Sürekli mıknatıslı motorlar iki ana başlıkta incelenebilir. Bunlar; Trapezoidal tip ve Sinüzoidal tiptir. Trapezoidal tip olanları aynı zamanda fırçasız doğru akım (BLDC) motoru adını da alır. Sinüzoidal tip olanları ise sürekli mıknatıslı senkron motor olarak adlandırılır (Adnanes, 1991).

Temel farklılıkları ters elektromotor kuvvetin, birinde trapezoidal diğerinde sinüzoidal gerilim dalga şekline sahip olmasıdır. Ancak her iki motorun da her iki dalga şeklinde çalıştırılabildiği görülmüştür. Trapezoidal makine kontrol yapısı basit olması nedeniyle ilk geliştirilendir. BLDC motorlarda sürekli olarak zamanın herhangi anında sadece iki fazdan aynı anda akım geçer. Bundan dolayı kontrol mekanizması kolaydır. Fakat moment dalgalarının varlığı bu makinenin yüksek performans hareket kontrol uygulamalarında kullanılmasına izin vermemektedir. Daha sonra AC makinelerde vektör kontrol yöntemlerinin kullanıldığı, yüksek performans kontrol olanakları nedeniyle sinüzoidal makine geliştirildi. Sinüzoidal makine, pek çok uygulamada asenkron makine ile yarışabilecek en uygun PM motor olarak görünmektedir. PM motorların son yıllarda daha fazla ilgi görmelerinin sebebi bu nedenledir. Ancak SMSM' de sürekli olarak 3 fazdan da akım geçtiğinden dolayı kontrol biraz daha zorlaşmaktadır. Ayrıca sargılarda kaybolan enerji de BLDC ye göre daha fazla olmaktadır (Bizot, 2003).

SMSM temel olarak sargıları stator oyukları içine dağıtılmış ve böylece stator akımı tarafından oluşan akı yaklaşık olarak sinüzoidal olan bir AC makinedir. Hava aralığındaki manyetik alanın rotorda bulunan sabit mıknatıslar tarafından oluşturulması bu motorları asenkron motorlardan ayıran en önemli özelliktir. Diğer özellikler bakımından asenkron motorun aynısı denilebilir. SMSM, statordan elektriksel olarak oluşan akı ve rotordan sabit mıknatısların oluşturduğu sürekli bir akının etkisi altında çift uyartımlıdır. SMSM' nin rotorunda akım yoktur. Bu sebeple rotorunda bakır kayıpları oluşmaz. Sabit Mıknatıs kullanıldığı zaman, elektrik makinesini aynı güçte, daha küçük büyüklükte ve daha yüksek

verimle tasarlamak mümkündür. Diğer taraftan SMSM' de bulunan sürekli mıknatıslar sürekli bir alan akısı ürettiklerinden rotor akımını değiştirmede, normal senkron motorlarda olduğu gibi kolaylıkla kontrol edilemez. Ancak şu an yapılan çalışmalarda Alan Zayıflatma ve Alan Kuvvetlendirme Yöntemleri ile mıknatıslardaki sabit alan akısı istenildiği şekilde değiştirilebilmektedir (Bizot, 2003).

3.4 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların İç Düzeni

Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda, stator faz gerilimleri ve akımları sinüzoidaldir. Makine içerisindeki akı çoğunlukla, hava aralığı içinde sinüzoidal olarak dağılımlı akı üreten, rotor içerisindeki sürekli mıknatıs tarafından ayarlanır. Rotor üzerindeki mıknatıslar farklı şekillerde yerleştirilmişlerdir. Şekil.3.3'te görüldüğü gibi yüzeye monte edilmiş mıknatıslar, ilave mıknatıslar ve gömülü mıknatıslara ait rotor yapıları gösterilmiştir. Biçimlerine bağlı olarak makinenin farklı özellikleri elde edilebilir. SMSM, mıknatıs yerleştirilmesi ve özellikleri nedeniyle hem bir senkron motor, hem de bir doğru akım motoru özelliği gösterebilmektedir.

Şekil 3.3'te görülen mıknatısların rotor yüzeyine sabitlendiği tip; Yüzey Mıknatıslı SMSM (SPMSM) olarak adlandırılır. Yine aynı şekilde mıknatısların rotor içerisinde olduğu tip iç mıknatıs ya da diğer adıyla ilave mıknatıslı senkron motordur (ISMSM). Bu motorlardan başka radyal mıknatıslanma ile ve dairesel mıknatıslanma ile gömülü mıknatıs tipleri de vardır. ISMSM' nin diğer mıknatıslı motorlardan ve asenkron motordan farkı yüksek verime sahip olmasıdır. Makinenin kontrolü basit olmakla birlikte, relüktans etkileri ihmal edilebilecek seviyededir. Ancak bu tip motorlarda düşük stator endüktansı nedeniyle alan zayıflatılması zordur ve böylece başlangıç hızının üzerindeki çalışmalarda zorluklar oluşmaktadır. SPMSM' lerde ise bu sorun daha azdır. Alan zayıflatılması sırasında belirli bir miktarda relüktans momenti elde edilir. Başlangıç hızı üzerindeki çalışmalarda daha olanaklı yapılır.

Rotor yüzeyine yerleştirilen mıknatıslar ile gerçekleştirilen makine düz kutuplu makine olarak davranış göstermekte, büyük hava aralığına sahip, kutup akısına karşı gelen endüvi tepkisi zayıf olmaktadır. Bu türde yapılan senkron motorlar genellikle BLDC motor olarak isimlendirilir. Normal doğru akım motoruna göre rotoru statoru ile yer değiştirilmiş,

elektronik kolektöre sahip sürekli mıknatıslı senkron motordan pek farkı yoktur. Sabit moment üretimi için dikdörtgen dalga seklinde alternatif akım gerektirmekte ve indüklenen gerilim trapez seklinde olmaktadır.



Şekil.3.3 Sürekli mıknatıs rotor yapıları

SmCO ve NdFeB gibi çoğu manyetik malzemeler sabit manyetik akı üretimi için kullanılır.

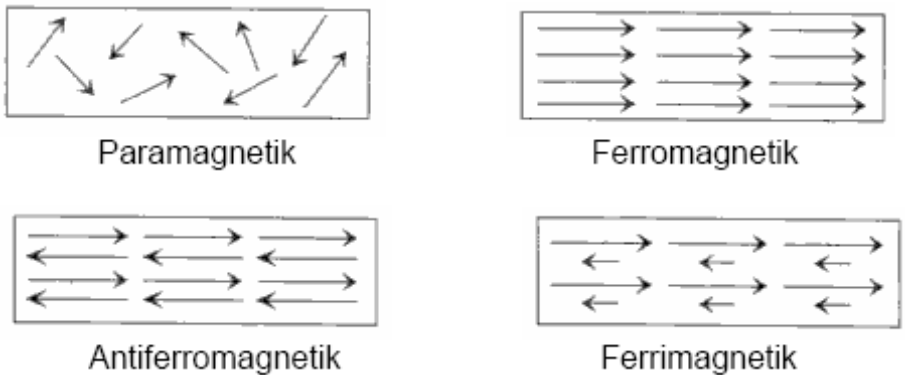
3.5 SMSM' lerde Kullanılan Mıknatıslar

3.5.1 Manyetik Malzemeler

Magnetik malzemeler, Diamagnetik, Paramagnetik, Ferromagnetik, Antiferromagnetik ve Ferrimagnetik olmak üzere beş grupta sınıflandırılırlar. Diamagnetik malzemeler net atomik veya moleküler magnetik momente sahip değildirler. Bu malzemelere bir alan uygulandığında alana zıt yönde akım üretirler.

Paramagnetik malzemeler atomik derecede net magnetik momente sahiptirler fakat komşu momentler arasındaki kuplaj zayıftır. Bu momentler bir alan uygulanmasıyla aynı hizaya gelirler ancak bu hizaya gelme dereceleri termal uyarmanın rastgele etkisiyle yüksek sıcaklıklarda azalır. Ferromagnetik malzemeler atomik derecede net bir magnetik momente sahiptirler ancak paramagnetik malzemelerden farklı olarak komşu momentler arasında güçlü bir kuplaj vardır. Bu kuplaj domenler olarak adlandırılan mikroskobik bölgelerde momentlerin kendiliğinden aynı hizaya gelmelerini artırır. Domenler bir alan uygulamasıyla karşılaştığında daha güçlü bir hizalanmaya yönelirler. Antiferromagnetik ve Ferrimagnetik malzemeler komşu momentlerinin biri diğerine ters paralel biçimde yönlendirilmiş atomik

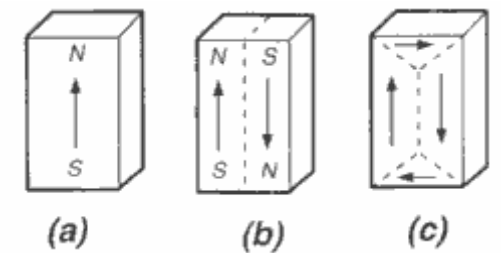
momentlere sahiptir. Antimagnetik malzemelerde komşu momentler eşittir ve net bir magnetik moment yoktur. Ferrimagnetik malzemelerde komşu momentler eşit değildir ve net bir moment vardır (Furlani, 1996). Malzemelerin bu magnetik özelliklerinin şematik görünümleri Şekil 3.4' te verilmektedir.



Şekil 3.4 Magnetik malzemelerin sınıflandırılması

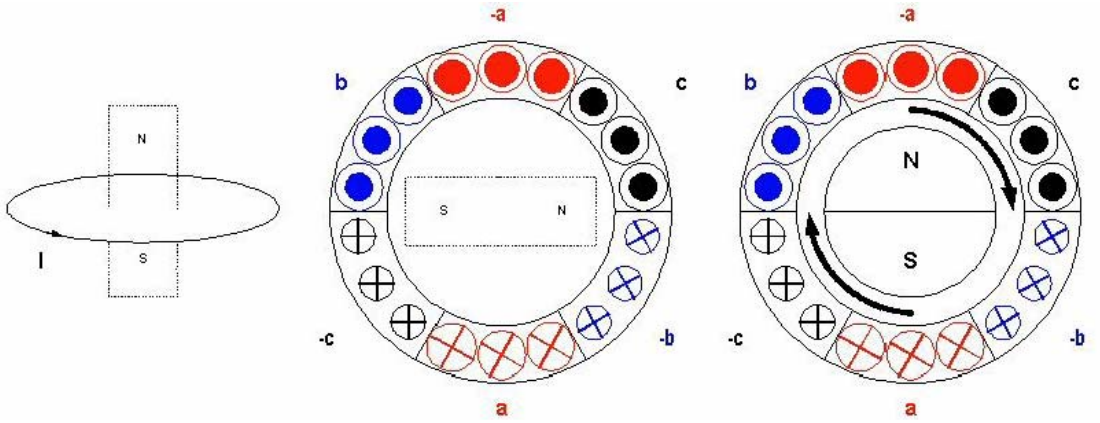
3.5.2 Domenler

Yukarıdaki bölümlerde belirtildiği gibi ferromagnetik malzemelerde atomik moment çiftlerin curie sıcaklığı altlarında kendi kendine gruplaşma eğilimlerinde artma olur. Böylece ferromagnetik malzemelerin oda sıcaklığında magnetik olarak doyuma ulaşacağı beklenebilir. Bununla birlikte bu malzemelerin sık sık mikroskobik derecede mıknatıslanmadığını görürüz. Bu ancak magnetik domenler kavramıyla açıklanabilir. Domenler tipik olarak 1012-1015 atom içerirler. Domenlerdeki atomik momentler tam olarak tercih edilen kristal grafik eksenler doğrultusunda gruplaşmayı sağlayan magnetokristalin eş yönsüzlüğün etkisinde kalırlar. Böylece domen içerisindeki momentler birbirlerine paralel uzanırlar ve domen magnetik doymanın yerel bölgelerini temsil eder. Bir malzemenin büyük hacimli bir örneği boyut, şekil ve yön içerisinde değişiklik gösteren çok sayıda domenlerden oluşur. Örnek malzemenin mıknatıslanması tüm bu domenlerin yapısal ve yönsel olarak toplanması şeklinde tanımlanır. Homojen malzemelerde domenler toplam enerjiyi en az edecek biçimdedirler. Örneğin Şekil 3.5' te görülen blok malzemelerden (a) konfigürasyonunda magnetostatik enerji en yüksek, (c) konfigürasyonunda ise en düşüktür. Komşu domenler birbirlerinden domen duvarı olarak adlandırılan geçiş katmanlarıyla ayrılırlar.



Şekil 3.5 Mıknatıslı malzemelerde enerji a) en yüksek, b) orta, c) en düşük

Şekil 3.6' da görüldüğü gibi magnetostatik enerjinin en yüksek olduğu blok malzeme kullanılmakta ve döner alan sayesinde mıknatısın dönüşü gösterilmektedir.



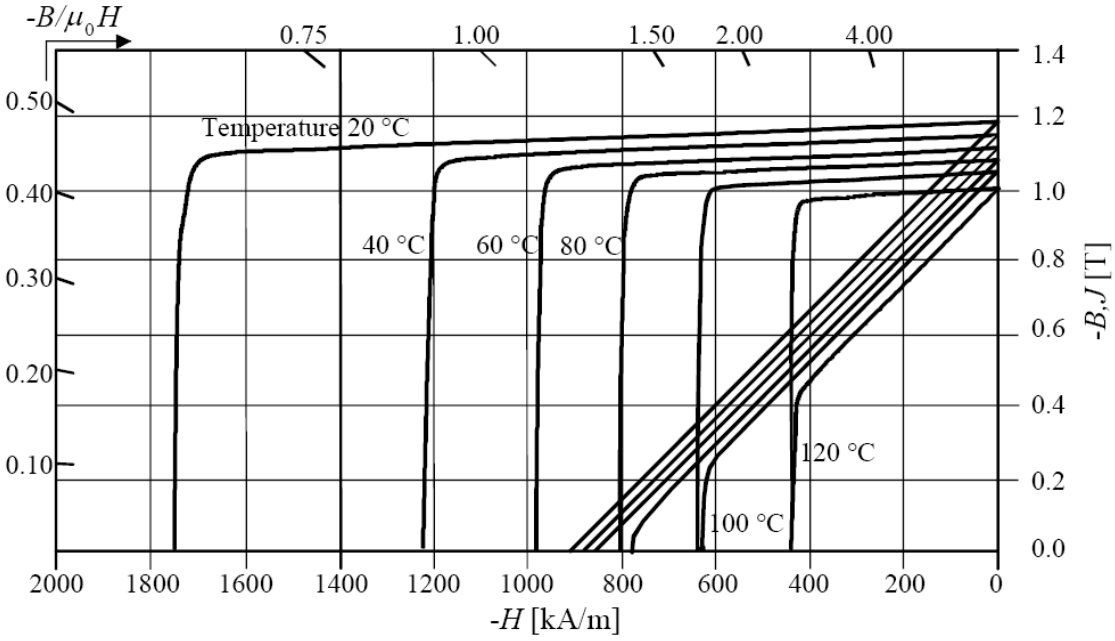
Şekil 3.6 SMSM' de sürekli mıknatısların kullanım amacı

3.5.3 Sabit Mıknatıslı Malzemelerin Özellikleri

İlk olarak manyetik malzemeler Kobalt-Tungsten ve krom-demir alaşımlarına dayanıyordu. 1930'larda, alüminyum-nikelkobalt alaşımlar keşfedildi, fakat 1960'larda Samarium-kobalt ve 70'li yılların sonunda neodymium-demir-bor alaşımlarına dayanan mıknatıslar elektrik motorlarında sabit mıknatıslı malzemelerden faydalanılmasını mümkün kıldı.

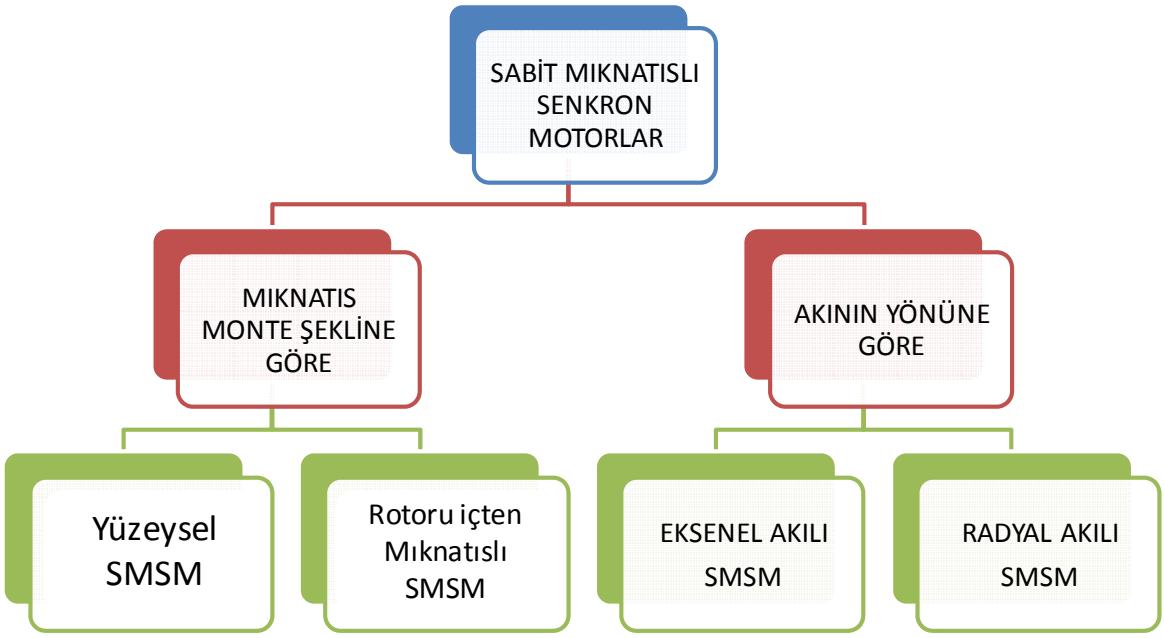
Özellikle 1983'te bulunan SmCo ve NdFeB mıknatısların yüksek akı yoğunluğu (0.8-1.1T) gibi iyi özellikleri bu malzemelerin endüstriyel motorlarda kullanılabilirliğini mümkün kıldı. Oda sıcaklığında NdFeB mıknatısın artık akı yoğunluğu 1.1-1.25 T aralığındadır. Bu da geniş bir hava aralığı boyunca 0.8-0.9 T'lık bir akı yoğunluğu üretmede yeterlidir (örneğin 1 mm'lik bir hava aralığı için sadece 3 mm kalınlığında bir mıknatıs yeterlidir). Bu

malzemelerin coercive kuvvetleri geniş bir demagnetizing (2.bölgedeki mıknatıslanma) endüvi reaksiyonunu tolore etmek için çok yeterlidir. Bu özellik bu malzemelerin negatif d-ekseni akımların izin verildiği motor ve generatör sürücülerinde kullanılmasını sağlar. Artık akı yoğunluğu her bir sıcaklık derecesi yükselmesi için %1 azalır. Şekil 3.7'de bir NdFeB tipi sabit mıknatısın sıcaklığa bağlı B-H eğrisini göstermektedir. Tipik olarak, sabit mıknatıslarda sıcaklık sınırlaması mıknatısların demagnetizing eğrilerine bağlı sıcaklıktan dolayı 120ºC'nin altındadır. Son yıllarda özel alaşımların kullanımıyla bu limit bazı mıknatıslar için yaklaşık 180ºC' ye yükseltilebilir hale gelmiştir. Malzemelerin fiyatları mıknatısların maliyetini yüksek tutmuştur. Ayrıca üretim süreci karmaşıktır (Kurronen, 2003).



Şekil 3.7 bir NdFeB tipi sabit mıknatısın sıcaklığa bağlı B-H eğrisi

3.6 SMSM Çeşitleri



Şekil 3.8 SMSM' lerin Sınıflandırılması

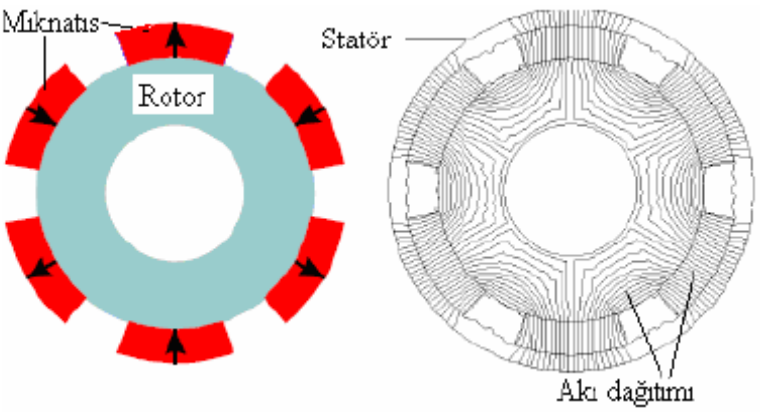
Şekil 3.8' de görüldüğü gibi SMSM'ler mıknatısların monte ediliş pozisyonlarına göre Yüzeysel SMSM ve rotoru içten mıknatıslı SMSM olmak üzere ikiye ayrılır. Ayrıca SMSM' ler akının yönüne göre de iki kısma ayrılırlar. Bunlar eksenel akılı ve radyal akılı SMSM'lerdir.

Bunların karakteristikleri aşağıda verilmiştir.

3.6.1 Mıknatısların Monte Ediliş Pozisyonlarına Göre SMSM' ler

3.6.1.1 Yüzeysel SMSM

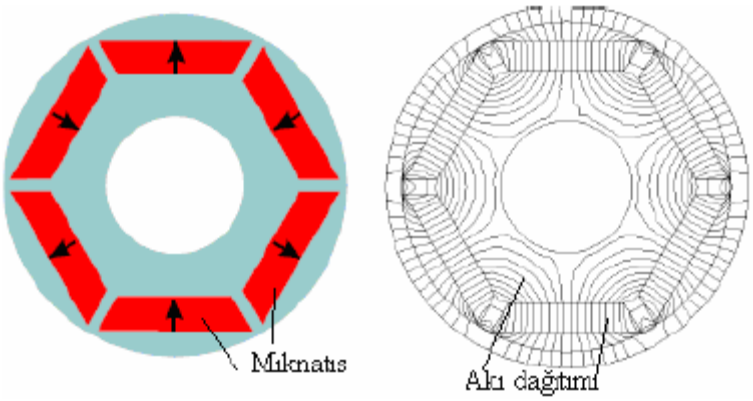
Mıknatıslar rotor yüzeyine monte edildiği zaman, özellikle yüksek hızlarda mıknatıs ile rotor arasındaki bağlantıda yüksek bir gerilim vardır. Böyle durumlarda bağlantı, karbon fiber gibi yüksek gerilmeleri tolore edebilen malzeme ile ve hafif yapılmış özel bir bant ile sağlanır. Bu malzeme, düzgün bir hava aralığı oluşturur ve çıkık kutupluk ve endüvi reaksiyonunun etkilerinin ihmal edilmesine yol açar. Şekil 3.9' da yüzeysel SMSM' ye ait tasarım ve akı dağılımı görülmektedir.



Şekil.3.9 Yüzey mıknatıs tip dizayn

3.6.1.2 Rotoru içten mıknatıslı SMSM

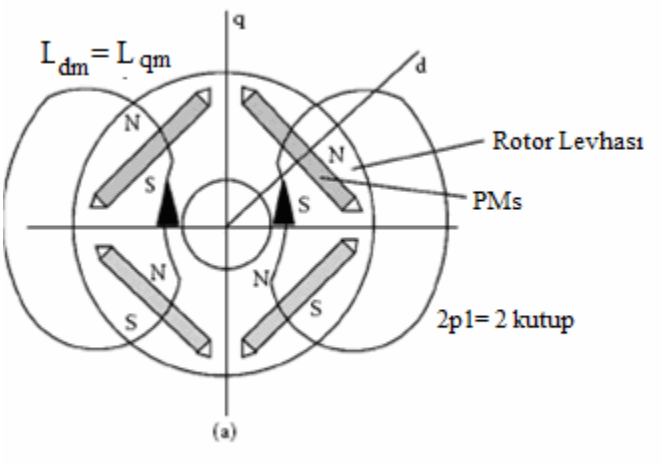
Mıknatısların rotorun içine gömülü yapı surface SMSM yapısına göre yüksek hız uygulamalarında daha fazla pürüzlü bir yapı oluşturur ve sensörsüz kontrolde faydalı bir geometrik çıkıklık meydana getirir. Dahası, gömülü mıknatıs tasarımı, yüzeye monte edilmiş tasarımda mümkün olmayan bir akı zayıflatma derecesine de izin verir. Böylece, yüksek yol alma momenti ve yüksek hız üretme ISMSM'ye çoğu alanda cazibeli bir güç dönüşüm çözümü olmasına yol açar (Andersson, 2000).



Şekil.3.10 Dahili mıknatıs tip dizayn

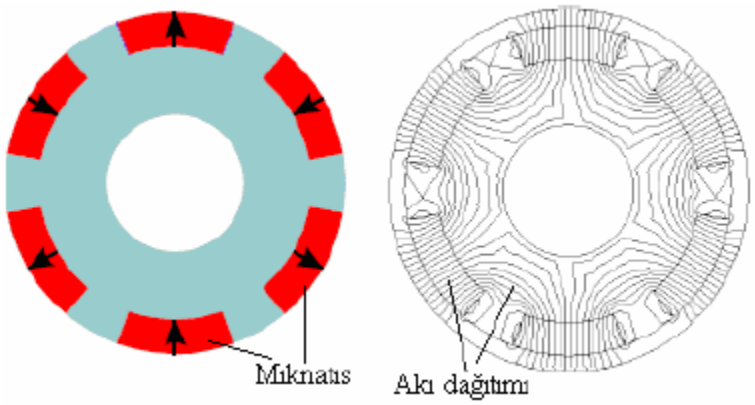
3.6.1.2.1 Inset Mıknatıs Tasarımı

Bu tip tasarım relüktans momentine katkıda bulunan dik eksen reaktansının arttığı yerlerde mıknatıs açısının tam kutup genişliğinden az olduğu makinelerde kullanılır.



Şekil.3.11 Levha rotor tasarımının bir parçası

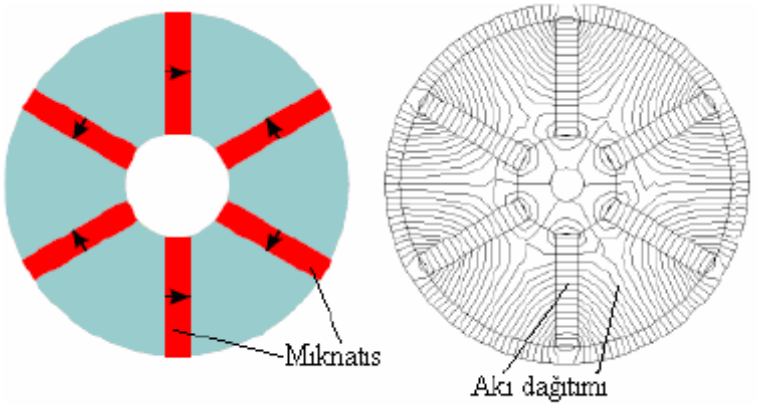
Şekil 3.11' de levhalar halinde içten rotorlu olan SMSM, p=2 kutuplu olarak görülmektedir. Relüktans tork üretmek için ve mekanik etkilerden korunması için mıknatıslar rotor içine konmuştur. Şekil.3.12'de ise bu tipin akı dağılım şekli ve tasarımı görülebilir.



Şekil.3.12 "Inset" mıknatıs tip tasarımı

3.6.1.2.2 Akı Yoğunlaşması Tasarımı

Akı yoğunlaşma topolojilerinde, alan mıknatısları çember çevresi yönünde mıknatıslanır. Bu durum hava aralığı akısının mıknatıslardaki akıdan daha büyük olmasına izin verir ve böylece makine moment yoğunluğunu artırır. Bu düzenleme genellikle düşük akı yoğunluklu mıknatıs malzemelerinde kullanılır. Şekil 3.13' te bu düzenlemeye uygun mıknatıslı motor tasarımı ve akı dağılımı mevcuttur.

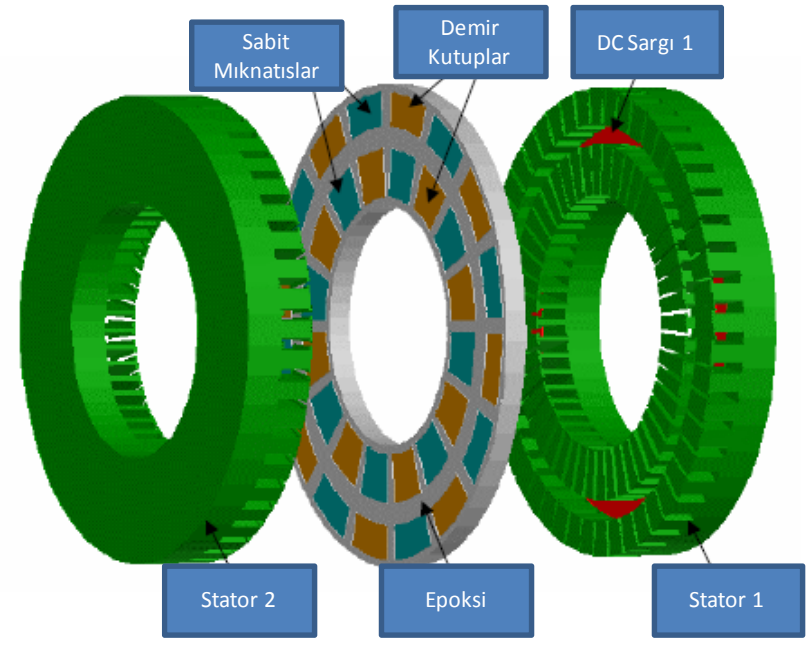


Şekil.3.13 Akı konsantrasyonu mıknatıs tip tasarımı

3.6.2 Akı Yönüne Göre SMSM ler

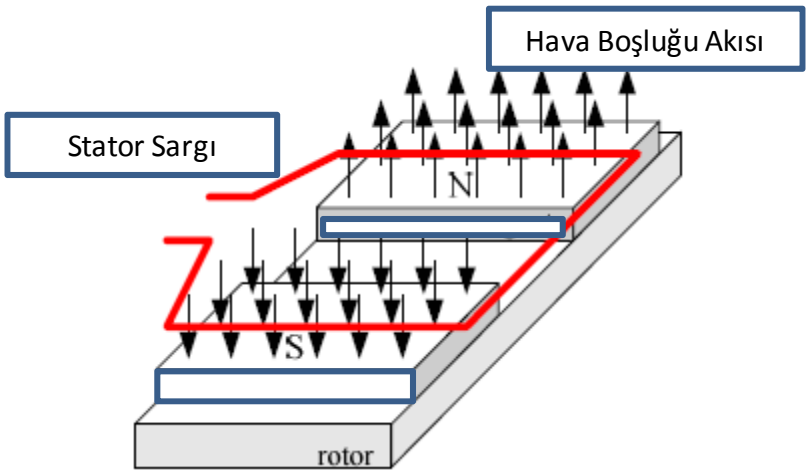
3.6.2.1 Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Makineler

Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron makineler (EASMSM) dairesel yapıda olanlara göre disk şekilleri, kompakt üretimleri ve yüksek güç yoğunlukları gibi nitelikleri nedeniyle oldukça ilgi çekici özelliklere sahiptir. Bunlar Disk makineler olarak da adlandırılırlar. Motor olarak yapılanları özellikle elektrikli araçlar, pompalar, fanlar, vana kontrolleri, santrifüjler, makine elemanları, robotlar ve endüstriyel ekipmanlar için uygundur (Aydın,2001). Şekil 3.14' te bir EASMSM yapısı görülmektedir.



Şekil.3.14 Eksenel akılı içten rotorlu dıştan statorlu SMSM

Eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron makineler küçük ölçekli güç üretimi için de kullanılmaktadırlar. Çok kutuplu yapılabilmelerinden dolayı rüzgâr türbinleri gibi düşük devir uygulamalarında çok idealdirler.



Şekil.3.15 Hava aralığı akı yönleri ve akımın stator sargısı gösterimi

Şekil.3.15' te görülen eksenel akılı SMSM' nin sabit ve değişmeyen mıknatıslarından dolayı rotor alanı zayıflatması zor olacağından d-eksenli akım enjeksiyonu tekniği kullanılarak alan zayıflatılması yapımı başarılmıştır. Başka bir ifadeyle şekilde görülen sargı boyunca hava aralığı akısının büyüklüğü zayıflatılmakta ve böylece daha küçük net EMK elde edilmektedir.

Geleneksel model ile karşılaştırıldıklarında eksenel akılı makinelerin ortaya çıkan belli başlı üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir:

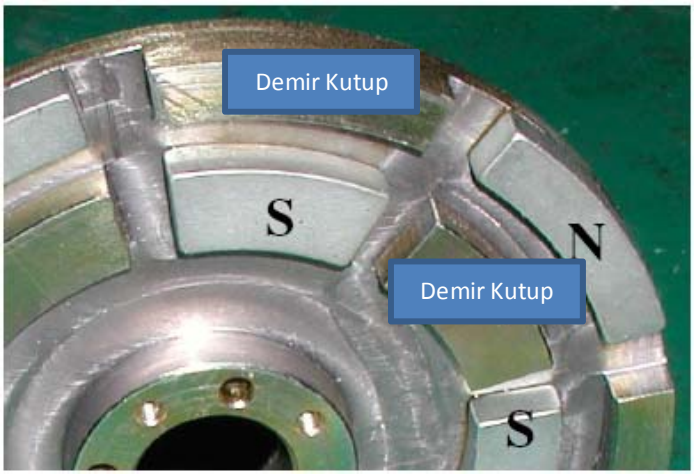
• Yüksek verim
• Magnetik nüvenin yüksek kullanım oranı
• Düşük frekanslarda yüksek kutup sayıları ile kompakt olarak yapılabilmeleri
• Mikro-Üretim üniteleri için imalat kolaylığı
• Ekonomik oluşları
• Bakır kullanım faktörünün yüksekliği
• Yüksek hızlardaki gürültünün azaltılabilirliği
• Düşük birim maliyetli enerji üretilebilirliği
• Yüksek güvenilirlik ve az bakım

Tek bir stator ve rotordan oluşmaları bunların çoklu olarak yapılabilmeleri ile değişik yapılarda değiştirilebilmelerini olanaklı kılar. Çoğu durumda hacim, kütle, güç transferi ve zaman kullanımı gibi etkenleri iyileştirmek için, rotorlar güç iletim parçası olarak kullanılır. Özellikle elektrikli araçlar ile pompa uygulamalarında asansör, fan ve diğer tip makinelerde rotor bu şekilde çift görev üstlenir. Eksenel akılı sürekli mıknatıslı makinelerin yapımları açısından bakıldığında tek yanlı ya da çift yanlı, oyuklu ya da oyuksuz çekirdekli, rotor ortada ya da dışarıda yapılı, mıknatıslar gömülü veya yüzeye yapıştırmalı ve tek modüllü ya da çoklu modüllü olmak üzere çok değişik yapılarda tasarlanabilirler (Aydın, 2001).

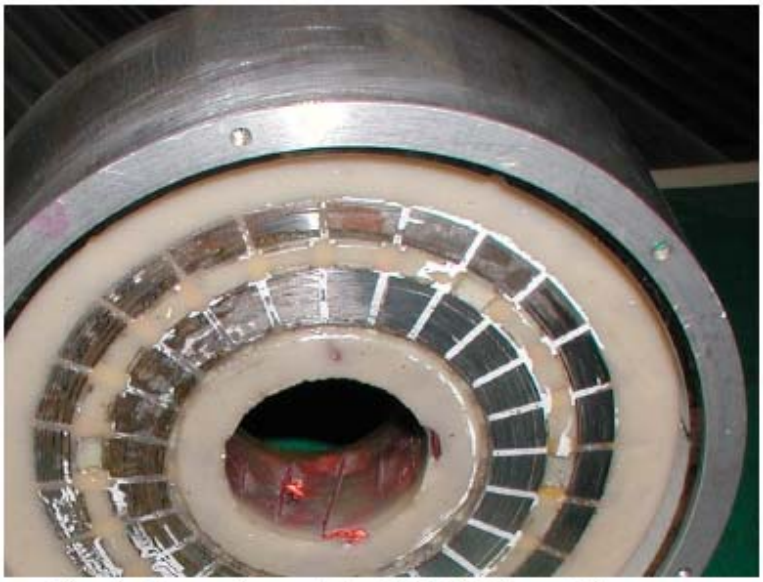
3.6.2.1.1 EASMS Makinelerin Tipleri Ve Yapılar

Prensip olarak eksenel akılı makinelerin her bir tipi, disk tip makinelerin değişik bir sürümü olacaktır. Bunlar özetle aşağıdaki biçimde maddelenebilir:

• Eksenel akılı tek hava aralıklı (tek stator, tek rotor)
• Eksenel akılı çift hava aralıklı (iki rotor arasında tek stator veya tersi)
• Eksenel akılı oyuksuz statorlu tek hava aralıklı
• Çok hava aralıklı (Çoklu stator ve rotor düzenekleri)
• Eksenel akılı oyuksuz statorlu çift hava aralıklı



Şekil.3.16 Disk şeklindeki rotorların görünümü

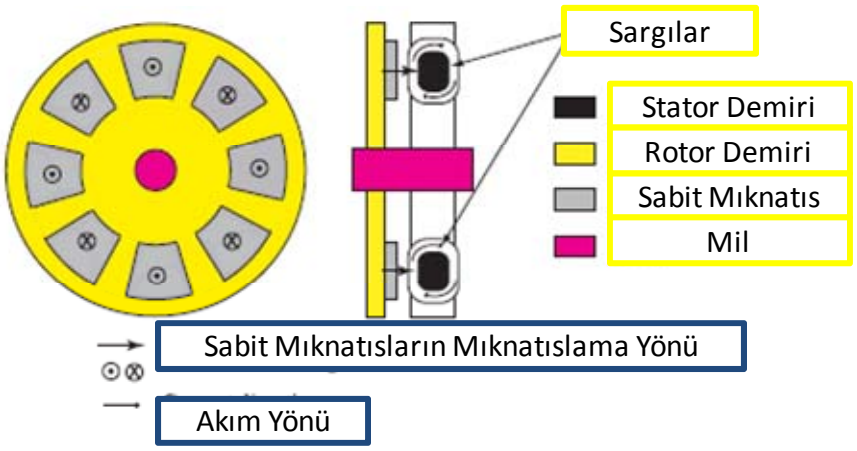


Şekil.3.17 Eksenel akılı SMSM nin statorunun açık şekli

Şekil3.16 ve Şekil3.17' da rotoru ve statoru görülen EASM nin sol ve sağ rotorları birbirinin karşılıklı zıt kutuplarına sahiptirler. Şekil 3.17' de EASMSM rotorları statorunun içine yerleştirilmiş olarak görülmektedir. Burada halka şeklinde özel bir plastik stator halkaları arasına sadece sert bir yapı oluşturmak amaçlı değil ayrıca alan sargılarını sabitleştirmek için de kullanılmıştır. Rotorun N kutupları ile S kutupları birbirine bakacak şekilde yerleştirilmiştir.

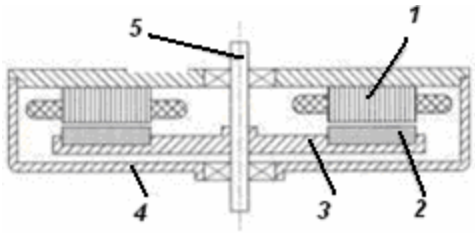
3.6.2.1.1.1 Eksenel Akılı Tek Hava Aralıklı (Tek Stator, Tek Rotor)

Eksenel akılı makinelerin tek yanlı yapılandırılmaları çift yanlı olanlara göre daha basittir ancak tork üretim kapasiteleri daha düşüktür. Şekilde tipik tek yanlı yüzey mıknatıs yapıştırmalı rotorlu, elektromekaniksel çelik şeritten levha tip statorlu EASMS makine görülmektedir. Bunlar endüstride, taşıma ve servo elektromekanik sürücülerde kullanılır (Gieras, 2004).

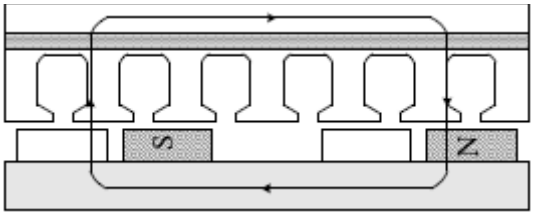


Şekil.3.18 Eksenel akılı PM makine

Bu makineler radyal akılılara göre daha büyük bir çapa ve daha kısa eksen uzunluğuna sahiptir. Şekil 3.18 de gösterildiği gibi akım radyal olarak akarken sabit mıknatısların ürettiği akı eksen boyunca akar. Şekil 3.19' da tek yanlı disk motorun bir kesiti görülmektedir. Şekil 3.20' de ise bu motorlardaki akı yönü gösterilmektedir.



Şekil.3.19 Tek yanlı disk tip makine. 1-Levha stator, 2- SM, 3- rotor, 4- çerçeve, 5- mil

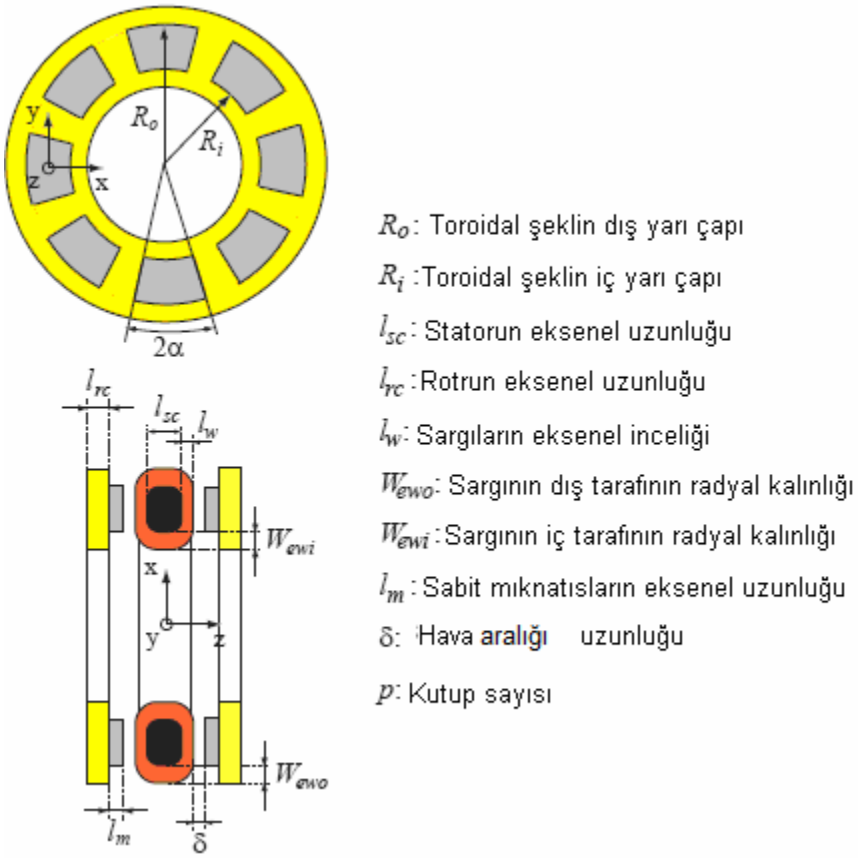


Şekil.3.20 Akının yönü

Bu makine çeşitlerinden düşük hız için kullanılacak olanların en bilineni torus tipli olanlardır. Torus tipli SMSM' lerde stator, iki dış rotor arasına yerleştirilmiştir. Bu rotorlar mile çok iyi bir şekilde sabitlenmiştir. Karşılıklı iki rotorun yerleştirilmiş olan mıknatısları iç tarafa bakacak şekildedir ve stator sargısı toroidal şekildedir. Statorda kafes(yuva) yoktur.

3.6.2.1.1.2 Eksenel Akılı Çift Hava Aralıklı (İki Rotor Arasında Tek Stator Veya Tersi)

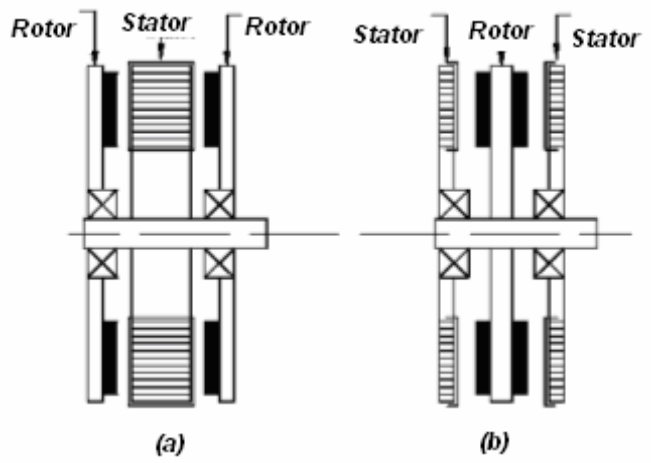
Yüzük biçiminde içten statorlu bu makinelerde ferromagnetik stator çekirdeği çok fazlı oyuksuz endüvi sargılarını (drum tip sargı) taşır. Şekil 3.21' de bu tip motorların iç yapısı görülmektedir.



Şekil.3.21 Torus SM nin geometrik parametreleri

Bu makinede yüzük halkası biçimindeki stator yapısı çelik şeritlerin sürekli sarımından veya çelik tozlarının preslenmesinden yapılır. Yüzük biçimindeki stator oyuklu olarak ta yapılabilmektedir. Bu tip motorlar için oyuklar, sargıların içlerinden geçmesine izin verecek şekilde çelik çekirdek içerisine düzgünce delinerek açılırlar. Bu durumda hava aralığı 1 mm'nin altında yapılabilmekte ve hava aralığı magnetik akısı 0.85 Tesla'yı aşabilmektedir. Önceki tasarıma nazaran mıknatıs hacmi %50 azalmaktadır. Toplam hava aralığı, yalıtkanla birlikte stator sargılarının kalınlığı, mekaniksel açıklık ve eksenel yönde

mıknatıs kalınlıklarının toplamına eşittir. İç ve dış rotorlu yapılar Şekil.3.22'de verilmektedir (Parviainen, 2001).

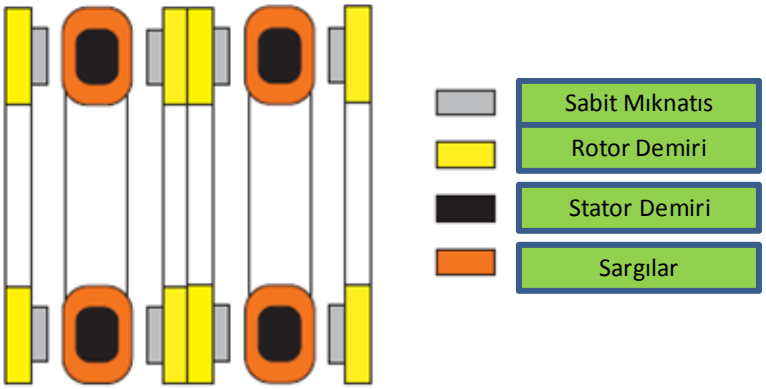


Şekil.3.22 Oyuksuz statorlu çift yanlı makine. (a) dış rotorlu (b) iç rotorlu.

Torus makinenin temel yararlarını şu şekilde sayabiliriz:

- Bu makine küçüktür ve kısa eksen uzunluğundan dolayı ağırlık olarak hafiftir.
- Stator sargılarının iyi havalandırma ve soğutma özelliği vardır.
- Yuva olmaması ve büyük hava aralığı yüksek frekans kayıplarını ve akustik gürültüsünü azaltır.
- Rotor ve stator disklerinin fazla olması hava aralığı yüzeyinin artmasına sebep olur.

Eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron makineler genellikle küçük rüzgar türbinlerinde gemi ve asansörlerde kullanılırlar. Bu makineler en az 2 tane Torus makinenin birleşiminden oluşur. Şekil.3.23'te görülen makine iki stator ve dört rotor diskine sahiptir.

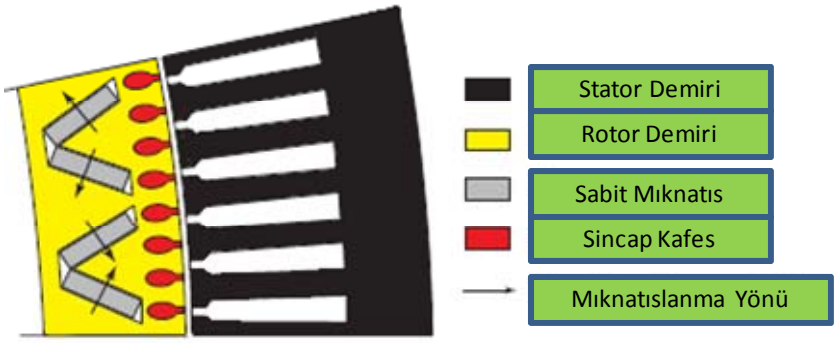


Şekil.3.23 Multi-disk Torus Makine

3.6.2.1.1.3 Line-Start Sabit Mıknatıslı Senkron Makineler

Bu makinenin rotorunda sincap kafesler vardır. Bu sincap kafesler motorun inverter kullanmadan kalkınmasını sağlar. Böylece bu motorlar rahatlıkla direk olarak şebekeye bağlanabilir. İlk olarak sincap kafesler sayesinde asenkron olarak kalkınmaya başlayan motor sonradan senkron olarak çalışmasına devam eder.

Bu makineler asenkron motorların yerine almaya eğilimlidir. Çünkü asenkron motora göre daha yüksek verim ve güç faktörüne sahiptirler ama daha kötü kalkınma özelliğine sahiplerdir ve fiyatları da daha yüksektir. Halen çok kullanılan bir tiptir ve yapımı ustalık isteyen bir makinedir. Pompalarda asenkron motorun yerini almıştır. Düşük hızlı bir uygulamada örneği yoktur.



Şekil.3.24 Line-Start PM makine

Sürekli mıknatıslı generatörler yıllardır rüzgâr türbinlerinde kullanılmaktadır. Çoğu küçük rüzgâr türbin üreticileri direk sürmeli (direct-drive) sürekli mıknatıslı generatör kullanırlar.

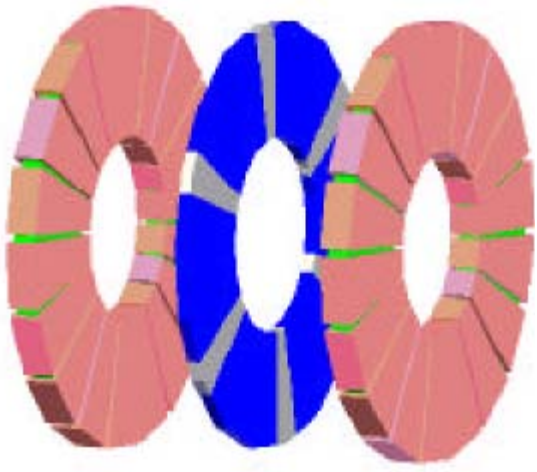
Rüzgâr türbinleri için tasarlanacak generatör düşük maliyet, hafiflik, düşük hız, yüksek moment ve değişken hız üretim koşullarını sağlamalıdır.

Sürekli mıknatıs olarak NdFeB veya Ferrite mıknatıs kullanılabilir. Generatör bir, iki veya üç fazlı olarak yapılabilir. Stator sargıları toroidal olarak sarılır. Rüzgâr kulelerinin gereksinimlerini azaltmak için generatör hafif olmak zorundadır. Rüzgâr santrallerinin düşük döner hızda çalışmalarından dolayı generatör çok kutuplu yapılır. Rotor çekirdeğinde mıknatısların değiştirilebilmesi için rotor yeterli alana sahiptir. Hava aralığı yoğunluğu rotor

çapından bağımsız olarak ayarlanabilir. EASMS Generatör modüler olarak üretilip istenildiğinde bu modüler eksenel olarak eklenebilir ve toplam generatör gücü artırılabilir.

3.6.2.1.1.4 Eksenel Akılı Oyuksuz Statorlu Çift Hava Aralıklı Makineler

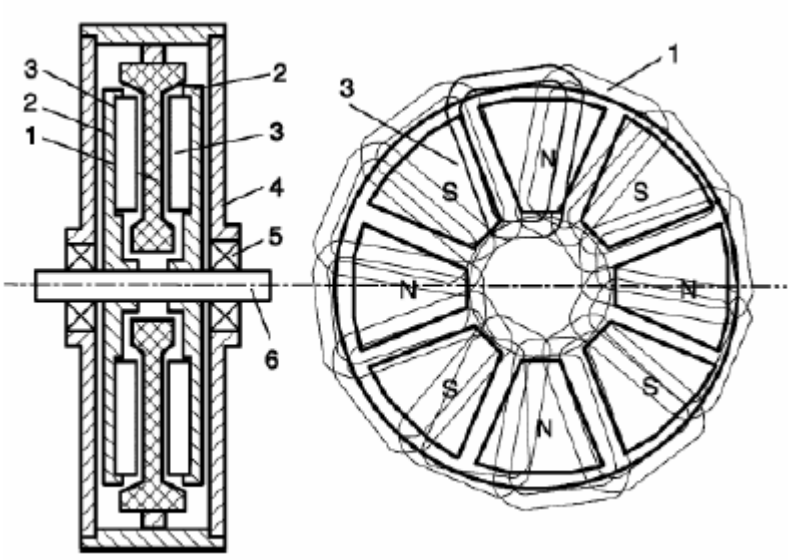
Sürekli mıknatıslı iç rotorlu çift yanlı EASMS makinelerde sargılar stator çekirdeğine yerleştirilirler. Sürekli mıknatıslı disk iki stator arasında döner. Sürekli mıknatıslar rotora gömülür ya da yüzeyine yapıştırılır. Magnetik olmayan hava aralığı çok büyüktür. Statorları paralel bağlı çift yanlı makine stator sargılarının birisi kopsa da çalışabilir. Diğer taraftan eksenel çekim kuvvetlerine zıt ve eşit olan bir akı ürettiğinden seri bağlantı tercih edilir (Gieras, 2005). Şekil 3.25' te bu tip motorlara ait tasarım şekli görülmektedir.



Şekil.3.25 Rotor ve statordan tasarımı (Aydın, 2001)

3.6.2.1.1.5 Çift Yanlı, Çekirdeksiz İç Statorlu Makineler

Çekirdeksiz statorlu EASMS makineler magnetik ve elektriksel iletkenliği olmayan taşıyıcı bir yapı üzerinde sarılmış stator sargılarına sahiptirler. Histerisiz ve girdap akım kayıpları gibi çekirdek kayıpları yoktur. Sürekli mıknatıslar ve rotor kütlesel diskteki kayıplar göz ardı edilebilir. Bu tasarım biçimi yüksek verim ve sıfır tork titreşimi sunar. İnce dilinmiş stator çekirdekli yapı ile karşılaştırıldığında hava aralığı akısı için daha büyük boyutta sürekli mıknatıs kullanımı gerektirir. Stator sargıları karşılıklı olarak rotora yerleştirilmiş mıknatısların oluşturduğu alan içine konmuştur. Şekil 3.26' da bu motorlara örnek olabilecek tasarım şekli gösterilmektedir.



Şekil.3.26 Çift Yanlı, Çekirdeksiz İç Statorlu makineler (Wang, 2005)

3.6.2.1.2 EASMS Makinelerin Yapıları

3.6.2.1.2.1 EASMS Makine Sargıları

Sargıların taşıması gereken özellikler;

• Özellikle sargı uçlarının dış kısımlarında iletken geçişi olmamalı ya da en az olmalı

• Oyuklarda en yüksek bakır kullanım faktörünü sağlamalı

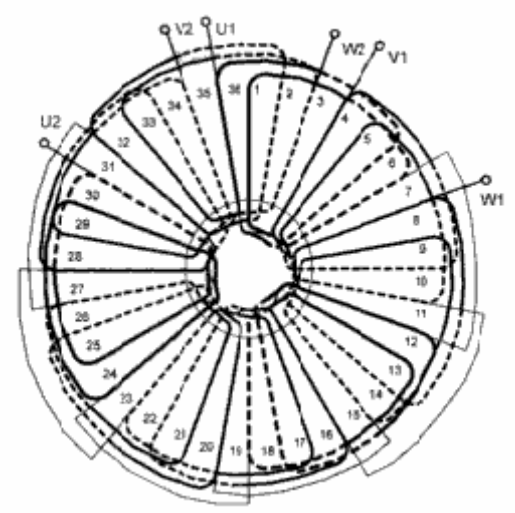
• Moment salınışlarını azaltmak için mmk dağılımını sinüzoidal olarak üretmeli

• Sargı faktörü generatör gücünü azaltmayacak kadar yüksek olmalı

İnce iletken ve dağıtılmış paralel iletkenler kullanılması durumunda üretilen eddy akım kaybında bir azalma olacaktır (Carichi, 1998).

3.6.2.1.2.2 Oyuklarda Dağıtılmış Üç Fazlı Sargılar

Tek katlı sarımda bir oluğa yalnızca bir sargı kenarı yerleşir. Tüm sargıların sayısı oyuk sayısının yarısına eşittir. Bu durumda faz başına düşen sargı sayısı n_C= S/2m, dir. (S: oyuk sayısı, m: faz sayısı). Çift katlı sargılarda her oyukta farklı sargı kenarları bulunur ve toplam sargı sayısı oyuk sayısına eşittir. Şekil.3.27' de tek katlı 36 oyuklu sargı örneği verilmektedir.

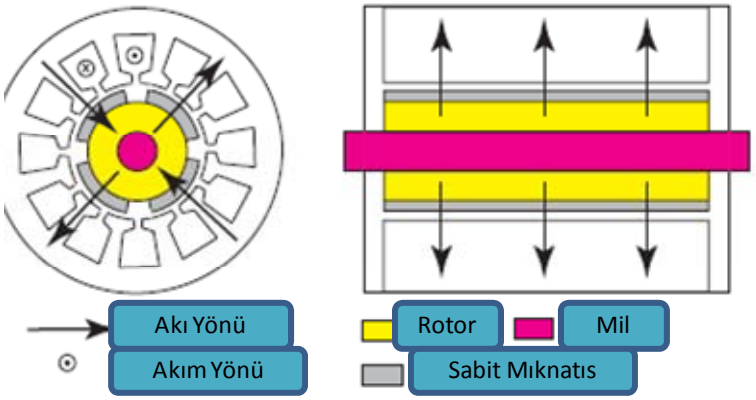


Şekil.3.27 Üç fazlı 6 kutuplu 36 oyuklu tek katlı sargı (Gieras, 2004)

3.6.2.2 Radyal Akılı SMSM ler

3.6.2.2.1 Radyal Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinelerin (RASMSM) Yapıları

Bu makine tipi sürekli mıknatıslı grupta en çok kullanılan tiptir. Genelde doğrudan sürülme işlemlerinde kullanılırlar. Şekil.3.28' de akım ve akı vektörlerinin yönleri gösterilmektedir.



Şekil.3.28 Makine akı ve akım yönleri

Akım eksenel yönde akarken akının yönü radyal şekildedir. Sürekli mıknatıslı makineler içerisinde yapımı en kolay ve en ucuz olanı bu makinelerdir. En genel kullanılan ve statoru asenkron makinenin statoruna benzeyen bir yapısı vardır. Buna rağmen ağırlık ve eksenel uzunluk bakımından ebatları eksenel akılı ve çapraz akılı makinelere göre daha büyüktür. Radyal akılı makine çeşitleri aşağıda verilmektedir.

3.6.2.2.1.1 İçten Rotorlu Rotor Yüzeyine Montajlı Sabit Mıknatıslı Makineler

Bu makinede rotorun dış tarafına yerleştirilmiş mıknatıslar bulunmaktadır.

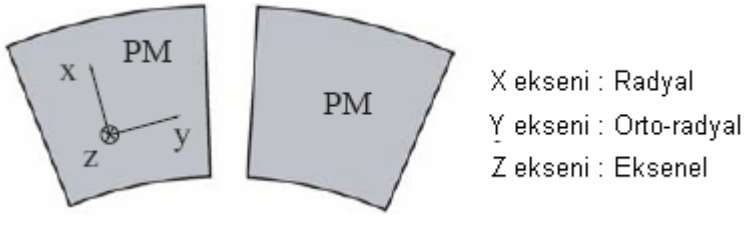


Şekil.3.29 Radyal Akılı İçten rotorlu PM makine

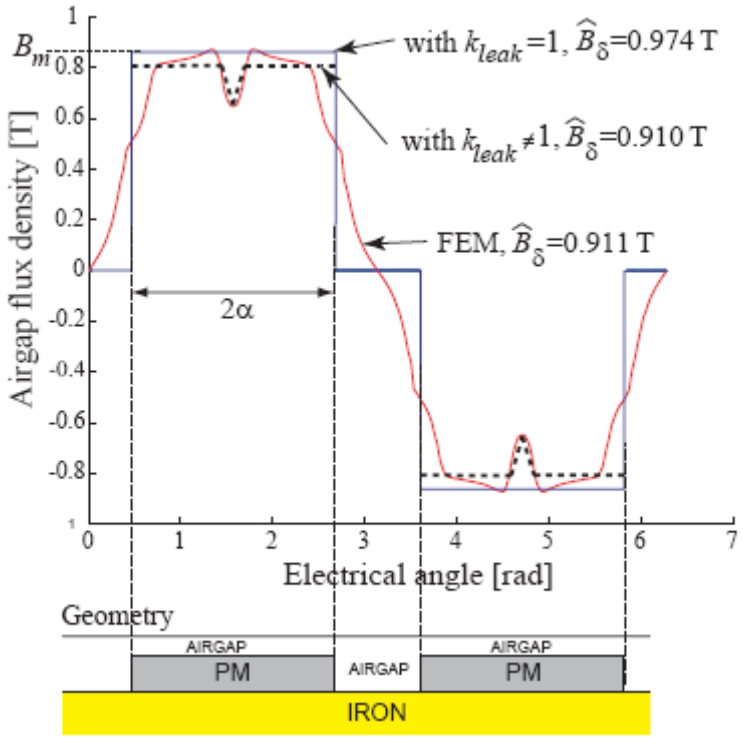
Diğer makinelere göre daha düşük yapı maliyeti vardır. En büyük dezavantajı ise demanyetizasyon alanına karşı sabit mıknatısların açıkta bulunmasıdır. Ayrıca diğer dezavantajı ise merkezkaç kuvvetinden dolayı mıknatısların rotordan ayrılma ihtimalidir. Bundan dolayı düşük hızlı çalışmalarda kullanılması daha uygundur. En çok kullanılan yer gemi motoru amaçlıdır. (Küçük çap, Büyük uzunluk). Ayrıca rüzgar türbinlerinde de kullanılır. Şekil 3.30' da bu tip motorlara ait mıknatısların akı yönleri gösterilmiştir. Ayrıca her bir mıknatısın pozisyonuna göre "hava aralığı akı yoğunluğu" dalga şekli elektriksel açıya göre Şekil 3.31' de gösterilmiştir.

Hava aralığı akı yoğunluğunun sabit mıknatısın genişliğine uygun bir şekilde kare dalga şekline benzemektedir ve akının maksimum değeri Bm'dir. Bm nin bulunabilmesi için gerekli olan eşitlik Formül.3.1' de görülmektedir. Hava aralığındaki maksimum akı yoğunluğunun hesabı aşağıda verilmektedir:

$$Bm = \frac{Br\,\mathrm{Im}}{\mathrm{Im} + \delta + Iw} \tag{3.1}$$



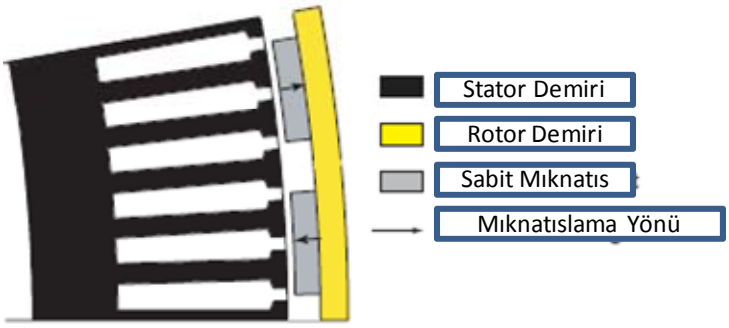
Şekil.3.30 Sabit mıknatısların akı yönleri



Şekil.3.31 Hava aralığı akı yoğunluğu gösterimi

3.6.2.2.1.2 Dıştan Rotorlu Rotor Yüzeyine Montajlı Sabit Mıknatıslı Makineler

Şekil.3.32' de görüldüğü gibi sargılı stator makinenin ortasına ve mıknatıslar da dıştan rotorun iç kısmına yerleştirilmiştir.



Şekil 3.32 Radyal Akılı dıştan rotorlu PM makine

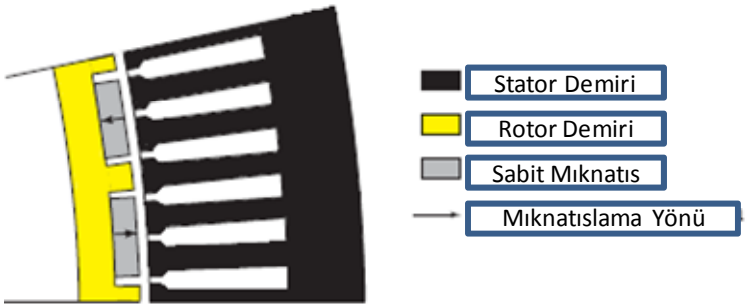
Dıştan rotorlu motorların bazı avantajları vardır. Bunlar;

- Rotor çapı bilinen radyal akılı makinelere göre daha büyüktür ve bundan dolayı daha fazla kutup sayısına ulaşmaya izin verir.
- Dış rotorun dönüşü esnasında merkezkaç kuvvetinden dolayı mıknatısların yerinde ayrılma olasılığı imkansızlaşır.
- Rüzgar türbinleri için çok iyi adapte olacak şekilde bir yapıya sahiptir.

Bu makineyi tasarlayanlardan J. Chen and W. Wu 20kW 36 ve 48 kutupları bulunan iki prototip üretmişlerdir. Bu makineler genellikle 30kW altındaki rüzgar türbinlerinde kullanılırlar.

3.6.2.2.1.3 Rotor Dış Yüzeyinin İçine Yerleştirilmiş Sabit Mıknatıslı Makineler (Inset PMSM)

Rotor oyularak içine dıştan görünecek şekilde yerleştirilmiş olan mıknatısların kenarları Şekil 3.33' te görüldüğü gibi tam olarak rotor demiri ile kapatılmamıştır. Demir ile sabit mıknatıs arasında oluşan çıkıntı ile mıknatıslardaki torka ek olarak relüktans tork oluşur. Düşük hızlarda uygulama örneği yoktur.



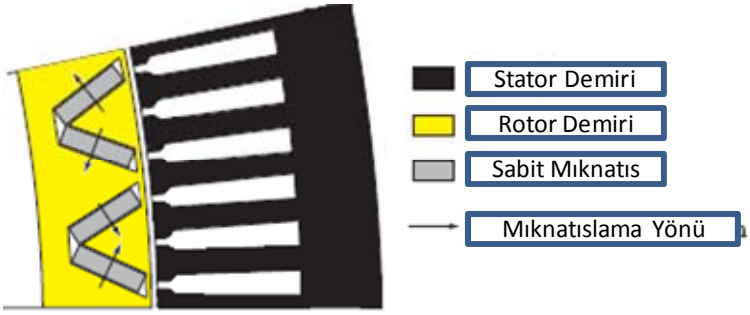
Şekil.3.33 İnset PM makineler

3.6.2.2.1.4 Mıknatısları Rotora Gömülü Sabit Mıknatıslı Makineler

Normal yüzeyden mıknatıslı SM' lere göre rotordaki sabit mıknatıslar tarafından üretilen akının yoğunlaştırılması ile yüksek hava aralığı akı yoğunluğu elde edilir. Bundan başka sabit mıknatıslar demanyetizasyona karşı ve mekanik strese karşı iyi korunmuştur.

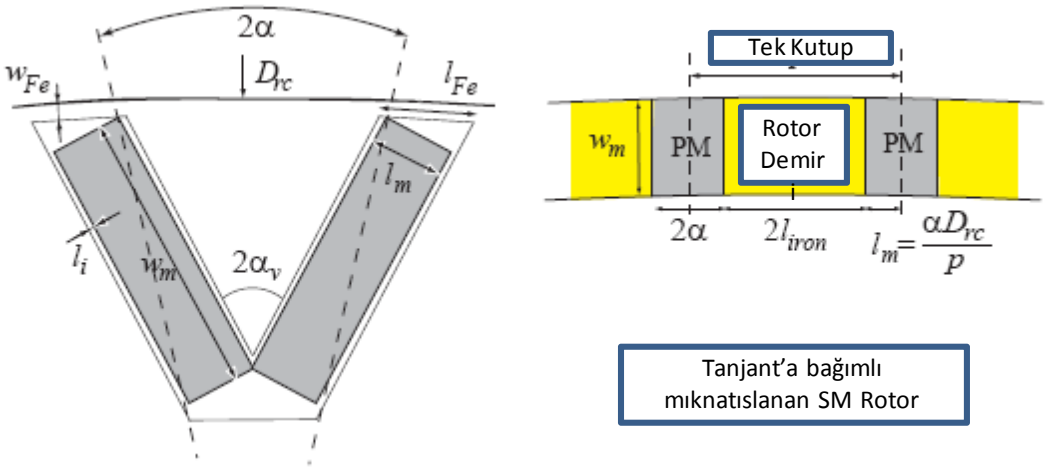
3.6.2.2.1.4.1 "V" Şekilli Sabit Mıknatıslar

Üçgen şekilli rotor içi boşluklarına yerleştirilen mıknatısların bitim noktaları ile aradaki hava aralığı arasında iki adet demir köprü vardır. Bu motor tipi tasarımı Şekil 3.34' te görülmektedir.



Şekil 3.34 V-şekilli mıknatıslı PM nin enine kesiti

Bu makine çeşidinin en büyük dezavantajı demir köprülerdir. Çünkü bu köprülerin minimum kalınlığı mekanik zorlamalar hesaba katılarak sabitleştirilmiştir. Köprülerin daha da inceltilmesi sabit mıknatısın ürettiği akının büyük bir çoğunluğunun hava aralığı yerine demir köprüler üzerinden geçmesine neden olacak ve bu da istenilen torka ulaşılamamasına sebep olacaktır. Bunun yanında Şekil 3.35' te gösterildiği gibi bu makineler çok kutuplu olmaya imkan vermeyecek şekilde bir yapıya sahiptirler. Kutup sayısının artması sabit mıknatıslara ayrılan alanın azalması demektir ve iki V şekilli sabit mıknatıs arasındaki açının küçülmesi demektir. Bu yüzden açının küçülmesiyle mıknatıslar çok çabuk bir şekilde saturasyona uğrarlar. Diğer dezavantaj ise sabit mıknatısların sayısının artmasının maliyeti arttırmasıdır.

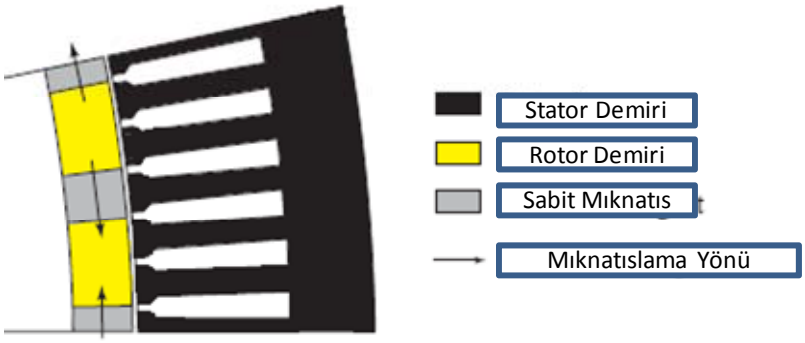


Şekil 3.35 Mıknatısların yerleşim detayı

Bu makineler 45kW 600 d/dk ile test edilmiş ve gıda ve kağıt endüstrisinde sıkça kullanılmıştır.

3.6.2.2.1.4.2 Yüzeysel Mıknatıslı Sabit Mıknatıslar (Tangentially magnetized PM's)

Rotora gömülü mıknatıslı makine çeşitlerinden olan bu makinenin Şekil 3.36' da görüldüğü gibi rotoru sabit mıknatıs ve demir ile birleştirilerek elde edilmiştir. Bu demir mıknatıs birleşimi ise ferromanyetik olmayan bir mile sabitlenmiştir. Bu ferromanyetik mille, sabit mıknatıs tarafından üretilmiş olan akının büyük bir bölümü mil boyunca akacaktır.



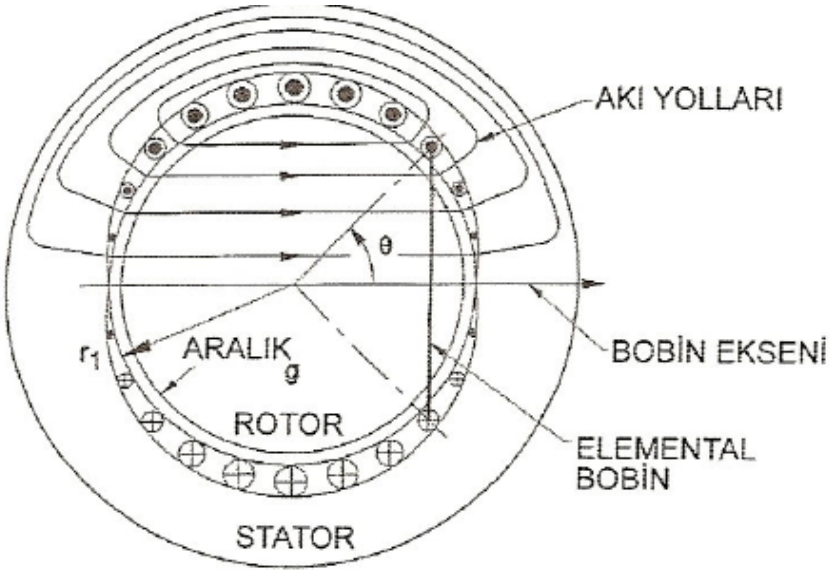
Şekil 3.36 Yüzeysel mıknatıslı PM nin enine kesiti

Genellikle en büyük dezavantajlarından birisi kutup sayısı fazla olursa küçük parçalardan oluşan mıknatıs ve demirlerin yerleştirilmesinin elle işlenmesi gerekliliğidir. Bu yüzden bazı üretim sorunları ortaya çıkmaktadır. Buna rağmen, V şekilli motora göre rotorda köprü olmamasından dolayı akı kaçağı çok düşüktür.

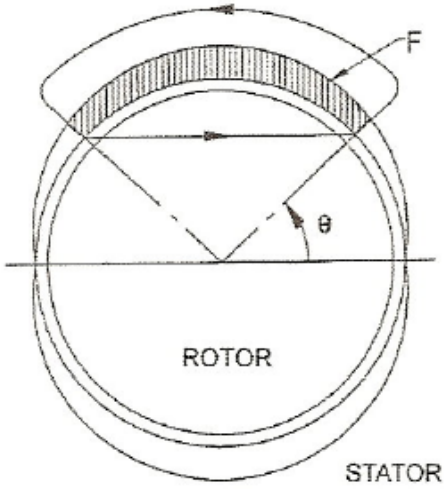
3.7 SMSM Temel İfadeleri

3.7.1 Hava Aralığı Akısı

Motorda büyük öneme sahip zıt emk ve sargı endüktansının hesaplanabilmesi için sinüs dağılımlı sargının kaçak akı değerinin bilinmesi gerekir. Şekil 3.37 ve 3.38' de sargı akımı tarafından oluşturulan akı ve hava aralığında farklı iki noktada akıyı bastıran elektromanyetik moment gösterilmektedir. Buradaki eşitlikler 2 kutuplu motor için düşünülmüştür.



Şekil 3.37 İki kutuplu sinüs dağılımlı sargı: amper iletkeni ve iletken dağılımları



Şekil 3.38 İki kutuplu sinüs dağılımlı sargı: MMK' nın hesaplanması

Elektromanyetik moment eşitliği;

$$F = \int_{\theta}^{\pi/p-\theta} i\frac{Ns}{2}\sin p\theta d\theta = \frac{iNs}{p}\cos p\theta \tag{3.2}$$

Hava aralığı akı yoğunluğunun θ açısında olduğu düşünülürse;

$$B = \mu 0H = \mu 0\frac{F}{2g'} = \text{Ĥ}\cos p\theta \tag{3.3}$$

$$\text{Ĥ} = \frac{\mu 0iNs}{2pg''} \tag{3.4}$$

$$g'' = g' + \frac{L_m}{\mu_{rec}} \tag{3.5}$$

θ ve –θ açıları arasında bulunan akı ise;

$$\phi = \int_{-\theta}^{\theta} \text{Ĥ}\cos p\theta L_{stk} r_1 d\theta = \Phi\sin p\theta \tag{3.6}$$

eğer $D = 2r_1$ ise kutup başına akı;

$$\phi = \frac{\text{Ĥ}DL}{p}[Wb] \tag{3.7}$$

3.7.2 Kaçak Akı Ve Endüktans

İletkenleri θ ve –θ aralığında bulunan bobinin kaçak akısı, akının bobindeki sarımlarının sayısı ile çarpılırsa;

$$d\varphi = \Phi\sin p\theta x\frac{Ns}{2}\sin p\theta d\theta \tag{3.8}$$

Böylece toplam kaçak akı;

$$\varphi = \int_0^{\pi} d\varphi = 2p\int_0^{\pi/p} d\varphi = \frac{\pi}{4}N_s\Phi \tag{3.9}$$

Endüktans ifadesi ise;

$$L = \frac{\pi}{4}\frac{\mu_0 N_s{}^2 L_{stk} r_1}{p^2 g''} \tag{3.10}$$

olarak bulunur.

3.8 SMSM' nin Avantajları:

Senkron makinelerde sargılı rotor yerine sabit mıknatısların kullanımı aşağıdaki avantajları sağlar:

• Bilezik ve fırçaların olmamasından dolayı bakım gereksinimi azalır ve verim artar.
• Rotor bakır kayıpları azalır. Böylece, bakır ve demir kayıpları statorda yoğunlaşır bu durumda makineyi stator boyunca soğumasını sağlar.
• Mıknatısların kullanımı çevresel alanın verimli bir şekilde kullanılmasına imkan sağlar. Bu yüzden herhangi bir çift mıknatıs kutup sayılı SMSM yapmak mümkündür.
Bu motorlar 2'den 50 veya daha fazla kutuplu olarak imal edilirler. Çok fazla kutup sayısı genellikle aynı akımda daha fazla moment üretir. Böylece, Sm2Co17 ve NdFeB gibi yüksek mıknatıslı malzemeler çok yüksek güçlerdeki motor boyutlarının azalmasını sağlar.
• Aynı büyüklükte makineler için, makinelerin karakteristiği seçilen mıknatıs tipine ve onların düzenlenme şekline bağlı olarak çok değişebilir.

3.9 SMSM' nin Uygulama Alanları

Uygulama alanlarını aşağıdaki gibi gruplandırabiliriz:
1. Servo sürücülü motorlar, pozisyon sürücüleri gibi,
2. Robot uygulamaları,
3. Gemi sürücülerinde kullanılan çok güçlü makineler (1 MW),
4. Elektrik üretimi, güneş ve rüzgar enerjisi uygulamalarında,
5. Elektrikli arabalarda,
6. Pompalama
7. Tren motorlarında vs.

3.10 SMSM, Asenkron Motor, Fırçalı ve Fırçasız DC Motorların Karşılaştırılması

Tablo 3.1 Elektrik Motorlarının Karşılaştırılması (Puranen, 2006)

	Fırçalı DC	**BLDC**	**SMSM**	**Asenkron Motor**
Avantajlar	*İyi Kontrol Edilebilme *Lineer Tork ve Akım Eğrisi *Düşük Tork Dalgalanması	*Yüksek Güç Yoğunluğu ve Tork-Atalet Oranı *Isı yayma özelliği. Aşırı güçlere karşı dayanım	*Yumuşak Tork *Yüksek Verim *Yüksek Tork/Hacim Oranı *Isı yayma özelliği. Aşırı güçlere karşı dayanım	*Uygun Kontrolle Mükemmel Hareket edebilme *Yüksek Hız Operasyonlarında Kullanabilme *Düşük Fiyat ve Kolay Mekanizma *Dayanıklılık
Dezavantajlar	*Düşük Güvenilirlik *Bakım Gerekliliği *Aşırı Yüklenememe *Isı Tutma	*Yüksek Ücret *Tork Dalgalanması *Mıknatısların demanyetizasyon Tehlikesi *Alan Zayıflatamama	*Yüksek Ücret *Mıknatısların demanyetizasyon Tehlikesi *Alan Zayıflatamama	*Komplike Kontrol *Güç Faktörünün Değişmesi *Düşük Yüklerde Düşük Verim

Tablo 3.1' den görüleceği üzere Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların avantajları diğer motorların avantajlarına göre daha fazladır. Ayrıca günümüz teknolojisinde motorlarda aranan özelliklere daha uygundur.

BÖLÜM-IV

4. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor İçin Kontrol Metotları

SMSM' leri kontrol etmek için 3 tip kontrol metodu vardır. Bu metotlardan Alan Yönlendirmeli Kontrol ile Direkt Tork Kontrolü daha yeni kontrol yöntemleri iken Gerilim/Frekans (V/F) Kontrol Yöntemi daha eski ve kolay bir kontrol yöntemidir. Ancak en iyi kontrol yöntemi motorun direkt olarak kullanıldığı uygulama ile düşünülmelidir.

4.1 Giriş

21.yüzyılda güç elektroniği ve sayısal işaret işlemedeki gelişmeler, hiçbir ayırıma gerek kalmaksızın birçok uygulamada sürekli mıknatıslı senkron motorların kullanım eğilimlerini arttırmıştır, düşük ya da yüksek performansa sahip birçok uygulama için, SMSM kullanılmasının en önemli avantajı, sürekli mıknatıslardan dolayı yüksek verime ve geniş oranlarda yüksek momente sahip olmasıdır.

Sürekli mıknatıslı senkron motor, stator oyukları içerisinde sargıların uyarılması ile temel olarak alışılmış bir AC motordur; öyle ki stator akımları tarafından oluşturulan akı yaklaşık olarak sinüzoidaldir. Bundan dolayı; asenkron motor için kullanılan kontrol stratejilerinin benzerleri SMSM için de kullanılabilir (Bizot, 2003).

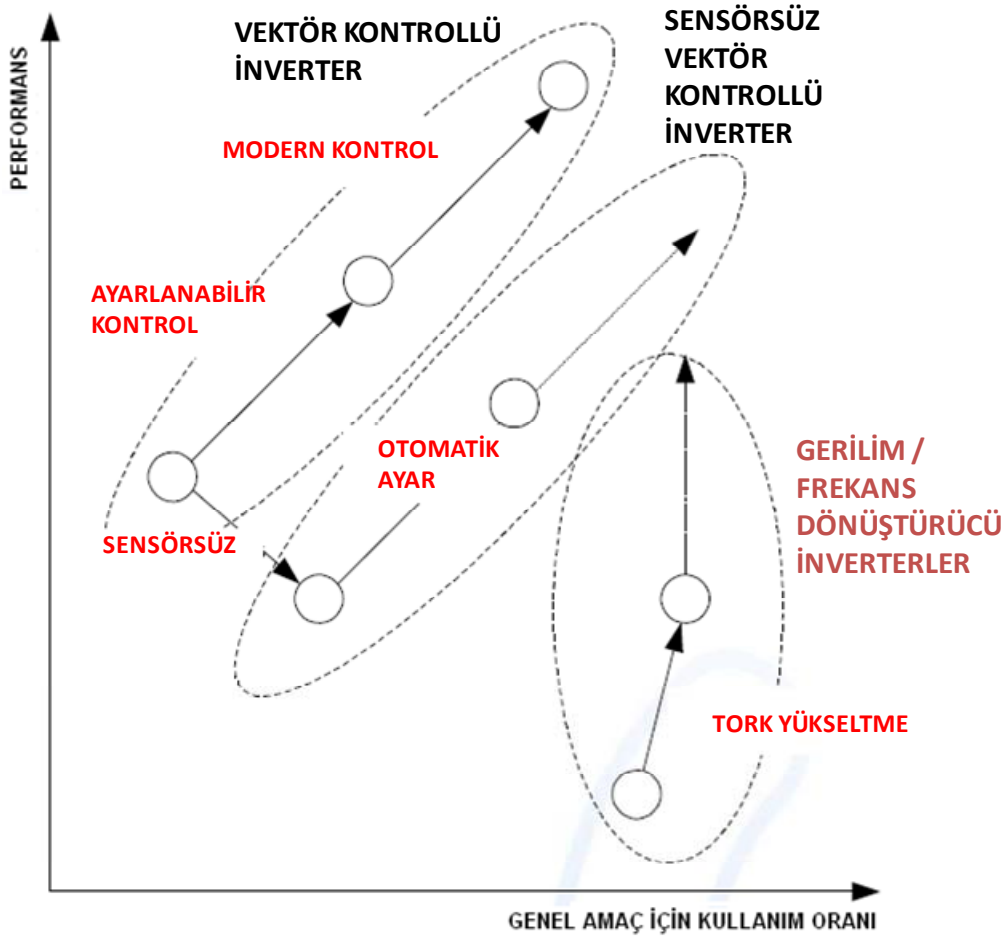
SMSM bir tür AC motor kabul ettiğimizde, üç çeşit kontrol metodu vardır.

Bunlar;

1) Alan yönelmeli kontrol (FOC)
2) Doğrudan moment kontrol (DTC)
3) V/f kontrol

Genellikle orta hızın gerekli olduğu ve yüksek performansın gerekli olmadığı uygulamalar için, kolay gerçekleştirilmesi ve ucuz olması sebebiyle V/f kontrolü daha uygundur. Hız ve momentin hassas olarak kontrolünün gerektiği özellikle düşük ve sıfır hızlar için alan yönelmeli kontrol ya da doğrudan moment kontrolü tercih edilmelidir. Şekil 4.1' de görüldüğü gibi en iyi performans için vektör kontrolü yapılması gerekir ki bu kontrol yöntemleri FOC ve DTC kontrol yöntemleridir. Bu kontrol yöntemlerinin geri beslemesi

olmadan oluşan kontrol ise sensörsüz kontrol yöntemi kategorisine girmekte ve bu da yine teknolojinin en son adımlarından birisi olarak görülmektedir. Şekil 4.1' de görüldüğü gibi V/F kontrol daha ziyade performansın ikinci planda kaldığı, genel amaçlı kullanımlar için geçerli bir yöntemdir.

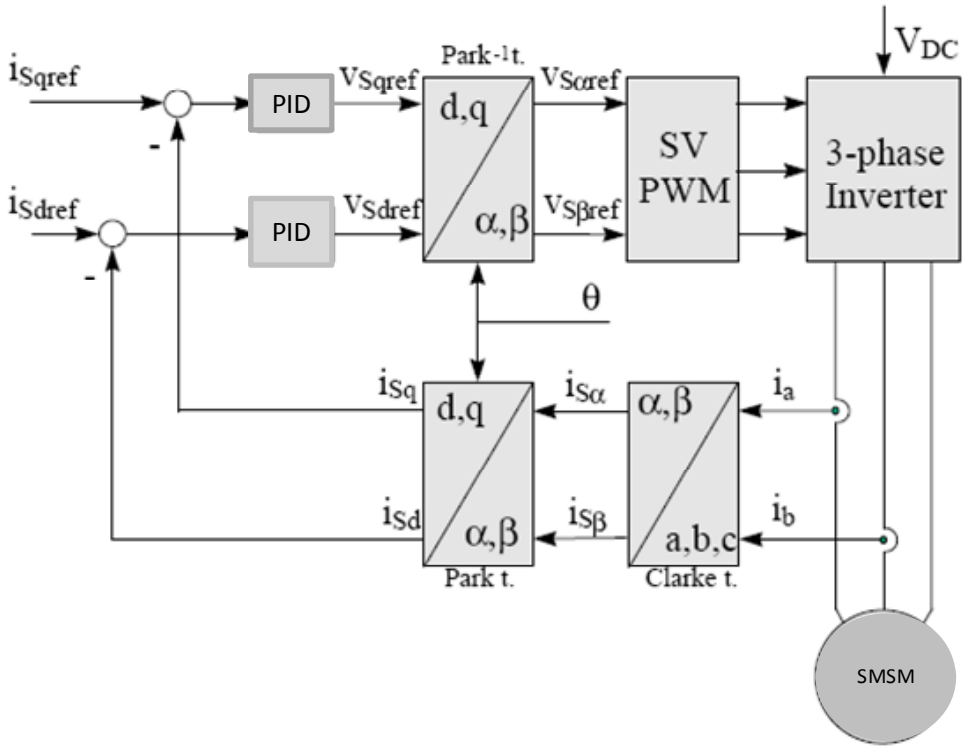


Şekil 4.1 Kontrol Yöntemlerinin Teknolojik İlerlemesi

4.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control)

Bu metot; momenti, sıfır hız dahil düşük hız aralıklarında kontrol eder. Bu metodun temel özelliği; DC motorda olduğu gibi, sürekli mıknatıslar tarafından oluşturulan manyetik akı ile uzay alan hesabı içerisinde motorun akımını kontrol etmektir. Motorun elektriksel karakteristikleri matematiksel olarak, veri denetimini kullanan mikroişlemci ile modellenir. Aynı zamanda alan yönlendirmesini yerine getirmek için, rotorun açısal pozisyonu gerekir. Moment; mıknatıslar ve akı tarafından oluşturulan manyetik akı sonucu ile direkt orantılıdır.

Vektör kontrolü; vinçler gibi basit gerilim ve düşük hız kontrol uygulamaları için en iyi seçimdir. Şekil 4.2' de sistemin kontrol yapısı görülmektedir.



Şekil 4.2 SMSM için FOC kontrolünün blok diyagramı (Freescale Semiconductor)

4.2.1 Alan Yönlendirmeli Kontrolün Başlıca Özellikleri

- Alan yönelmeli kontrol, DC sürücüye benzer bir yapıdadır.
- Motor elektriksel karakteristikleri benzerdir (motor modeli olarak)
- Direkt olmayan moment kontrollü yapılmaktadır.

4.2.2 Alan Yönlendirmeli Kontrolün Avantajları ve Dezavantajları

Avantajlar:

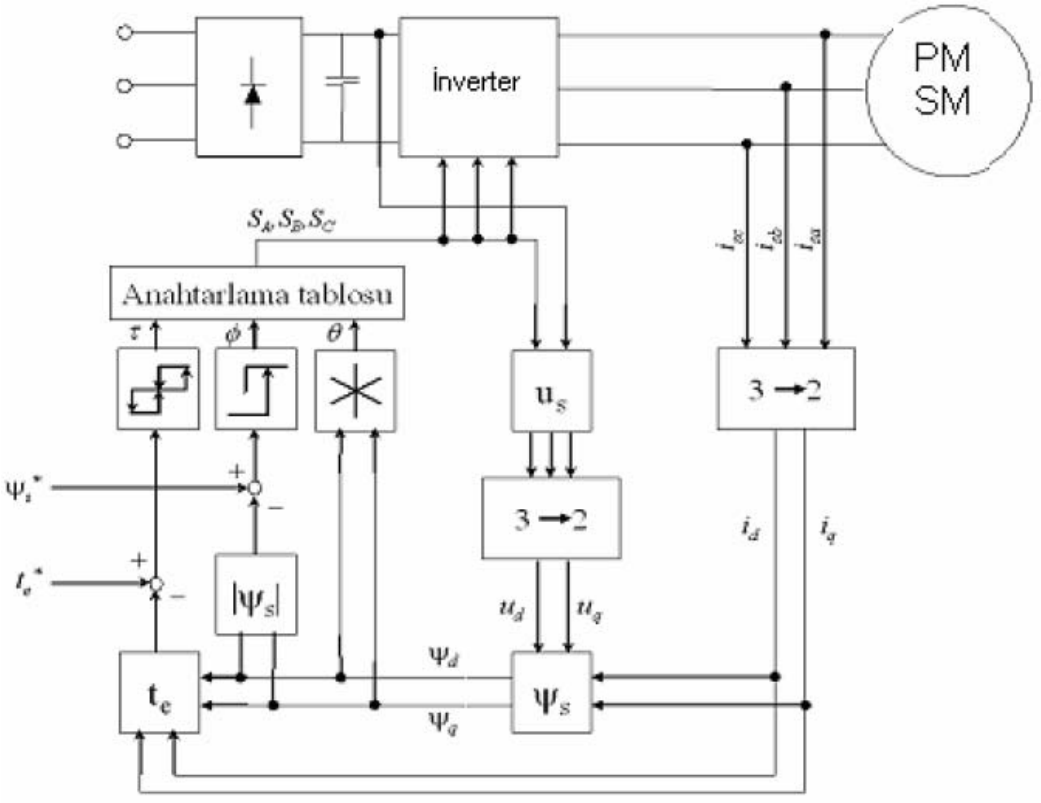
- İyi moment cevabı
- Hassas hız kontrolü
- Sıfır hızda maksimum moment

Dezavantajlar:

- Geri besleme gereklidir
- V/f kontrolünden daha komplekstir
- Yüksek maliyetlidir

4.3 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda Doğrudan Moment Kontrolü (Direct Torque Control)

Stator akımını kontrol etmek yerine, stator manyetik akısını ve momenti direkt olarak kontrol etmek doğrudan moment kontrolünün en temel özelliğidir. Bu kontrolde, stator manyetik akı modülü ve moment için histerezis komparatörlerin çıkışları kullanılarak ve tanımlı anahtarlama tablosundan uygun gerilim vektörü seçilerek, güç anahtarlarını direkt olarak kontrol etmek yolu ile başarılabilir. DTC kontrolünde; histerezis kontrolörlerinden dolayı hızlı dijital sinyal isleme devresi kullanılmalıdır. Doğrudan Moment Kontrol (DTC) tipi için blok diyagramı Şekil 4.3' te görülmektedir (Luukko, 2000).



Şekil 4.3 DTC kontrolünün blok diyagramı

4.3.1 Doğrudan Moment Kontrolün Özellikleri

- Kontrol değişkenleri, mıknatıslanma akısı ve motor momentidir.
- Optimum anahtarlama vektörleri ile akı ve moment doğrudan kontrol edilir.
- Stator akım ve gerilimlerinin kontrolü dolaylıdır. Stator akımları ve akı yaklaşık olarak sinüzoidaldir.
- Yüksek dinamik performans ve en hızlı moment cevabı elde edilir.
- İnverter anahtarlama frekansı, akı ile momentin histerezis bant genişliklerine bağlıdır ve değişkendir.
- Moment dalgalanması, örnekleme süresi ve bant genişliğine bağlıdır.
- Hız kontrolü için tek bir PI denetleyici kullanmak yeterlidir.
- Akı tahmini için, diğer vektör sürücülerinde olduğu gibi gelişmiş tekniklerin kullanılması gereklidir.

4.3.2 Doğrudan Moment Kontrolün Avantajları Ve Dezavantajları

Avantajlar:

- FOC kontrol yönteminden daha hızlı moment kontrolü,
- İyi hız hassasiyeti,
- Sıfır hızda maksimum moment

Dezavantajlar:

Sürekli mıknatıslı senkron motorun sorunu doğrudan moment kontrollü sürücünün anahtar elemanı stator manyetik akısının hesabıdır.

$$\frac{d\psi_s}{dt} = v_s - Ri_s \tag{4.1}$$

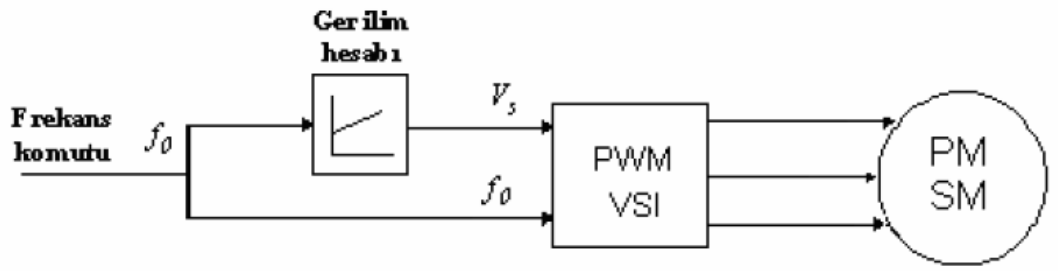
Senkron makine için, stator manyetik akısı aynı zamanda motorun akım modeli kullanılarak da hesaplanabilir. Fakat rotor manyetik akısı, alan akımı veya stator niceliklerinden bağımsız sürekli mıknatıslar tarafından oluşturulur ve sadece rotor açısı biliniyorsa belirlenebilir. Rotor açısı hakkındaki bilgi gerekliliği kaçınılmazdır.

Gerilim modeli genellikle yüksek frekansta iyi performans sağlar. Bununla birlikte, stator direncinin hesaplanmasındaki olası hatalar, stator gerilim ve akım ölçmesi içerisindeki hatalar sebebiyle Denklem 4.1' in entegrasyonu hatalı olur. Bu yüzden ya akım modeli ya da

diğer bazı kararlılık metodu, yüksek frekansta bile iyi performans sağlamak için kullanılır (Bizot, 2003).

4.4 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda V/F Kontrolü

V/f kontrolünde çok basit değişken hız uygulamaları kullanılmaktadır. V/f kontrolü düşük maliyet ve basit bir tasarıma sahiptir. Şekil 4.4' te blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 4.4 V/f kontrolünün blok diyagramı

V/f kontrolü ile SMSM' nin sürülmesi; pozisyon sensörü kullanılmadan yapılan açık-çevrim kontrolüdür. Bu yöntem; motorda, sabit akıya sahip olmak için, çıkış frekansı ile çıkış gerilimi arasındaki oranı sabit tutar. V/f kontrolünün farkı, bu metodun yüksek performanslı sayısal işlem gerektirmemesidir.

4.4.1 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda V/F Kontrolün Başlıca Özellikleri

- Kontrol değişkenleri gerilim ve frekanstır,
- Akı, sabit V/f oranı ile sağlanır,
- Açık-çevrim kontrollüdür,
- Motorun momenti yük tarafından zorlanır.

4.4.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda V/F Kontrolün Avantajları Ve Dezavantajları

Avantajlar:

- Düşük maliyet,
- Geri besleme aygıtı gerektirmemesi,
- Basit olması

olarak sıralanabilir.

Dezavantajlar:

- Moment kontrollü olmaması,
- Alan yönlendirmesi kullanılmaması,
- Rotor konumunun bilinmemesi

4.5 Kontrol Uygulamanın Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor (SMSM)'ye Kazandırdığı Özellikler

Motorun hangi metot uygulanırsa uygulansın ihtiyaçları: büyük güç yoğunluğu, büyük moment-akım oranı ve iyi dinamik özellikler kazanmasıdır.

Özellikle SMSM' nin servo motor olarak kullanılması halinde diğer fırçalı doğru akım ve indüksiyon servo motorlarının dinamik davranışını gösterebilmektedir. Fırçasız motorlar fırçalı motorlara, özellikle doğru akım motorlarına göre, dar hız aralığında denetlenebilen ve zayıf moment özelliğine sahiptir, buna karşılık az bakım gerektiren motorlardır. Fırçalı doğru akım motoru fırça-kollektör düzeni nedeniyle yüksek hızlarda ve büyük akımda çalışmada sorunlu motorlardır. Fırçasız motor olarak anahtarlamalı relüktans motorları da darbeli moment üretmeleri nedeniyle, servo motor olarak kullanılabilecek alternatif akım motorları, sürekli mıknatıslı ve indüksiyon motorları üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Vektör kontrolünün uygulanması ile alternatif akım makinesi olarak sürekli mıknatıslı senkron ve asenkron motorlara, doğru akım makinesi özelliği kazandırılmaktadır. Değişken hız gerektiren uygulamalarda kullanım alanı genişlemektedir. Bu açıdan bakıldığında servo motor olarak sürekli mıknatıslı motor, asenkron motora göre önemli avantajlar elde etmektedir.

Bunlar;

- Küçük eylemsizlik momentine ve hızlı moment cevabına sahip olmaları, yani büyük moment-eylemsizlik momenti oranına sahip olmaları,
- Verimin büyük olması,
- Mıknatıslama akımının rotordaki sürekli mıknatıslar ile sağlanması,

- Stator akım bileşeni olan mıknatıslama akımının olmaması nedeniyle, besleme ünitesi olarak kullanılan doğrultucu ve inverterde daha küçük anma değerli yarı iletken elemanların kullanılması,
- Aynı güçler için, küçük boyutlarda, hafif ve büyük güç yoğunluğuna sahip olması,
- Rotordaki kayıpların yok denecek kadar az olması, dolayısıyla ayrı bir soğutma düzenine gerek göstermemesi olarak özetlenebilir.
- Bununla birlikte asenkron motorların da sürekli mıknatıslı motorlara göre,
- Geniş alan zayıflatma bölgesine sahip olması ve bu bölgede kolay denetlenebilmesi,
- Ucuz ve karmaşık olmayan geri besleme algılayıcıları kullanılması, ucuz maliyetli olması,
- Yüksek çalışma sıcaklıklarından etkilenmemesi gibi avantajlara sahip olması nedeniyle, her iki motorun da uygulama alanlarındaki özelliklerinin karşılaştırılması gerekir (Diril, 1990).

4.6 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorda FOC Ve DTC Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Performanslı AC sürücülerinde kullanılan alan yönelmeli kontrol ve doğrudan moment kontrolü yöntemlerinin prensipleri farklı olup amaçları aynıdır. Her iki yöntem de motor ve yük parametrelerinin değişimlerinden etkilenmeden, motorun moment ile akısını etkin bir şekilde ve istenen yörüngede kontrol etmeyi hedefler.

FOC yönteminde motorun üç fazlı akım kaynağından beslendiği kabul edilmektedir. Yüksek performanslı moment kontrolü için, cevap verme süreleri hızlı olan histerezis akım denetleyicileri kullanılır. DTC yönteminde ise; akı ve moment, inverter gerilim vektörü ile doğrudan kontrol edilir. Akı ve momentin limitlerini sağlamak üzere, uygun stator gerilim vektörünü seçen iki bağımsız histerezis denetleyici kullanılır.

Her iki sistemde de tahmin edilen değişkenlerin doğruluğunun kontrol performansı üzerinde önemli etkisi vardır. FOC sisteminde, koordinat dönüşümü için gerekli değişken rotor akısı elektriksel açısıdır (ρ_r). Rotor akısı açısının tahmini, rotor hızının ölçülen değeri ve kayma frekansının kullanılmasını gerektirir. ρ_r açısındaki bir hata eksenler arasında istenmeyen bir etkileşime neden olarak FOC çalışmasını ortadan kaldırır. DTC sisteminde

ise, stator akısı ve motor momenti, geri beslemeli kontrol için tahmin edilmesi gereken değişkenlerdir. Stator akısı, statorun akım ve gerilim uzay vektörleri kullanılarak, moment ise, statorun akı ve akım uzay vektörleri kullanılarak hesaplanır. Stator akısının doğruluğu büyük ölçüde Rs stator direncinin tahmin edilmesine bağlıdır. Stator akısındaki bir hata, akı ve momentin kontrol davranışını olumsuz etkiler. Her iki sistemde de hızlı moment cevabı elde edilmektedir. Moment dalgalanmaları hemen hemen aynı olmaktadır (Bakan, 2002).

FOC' nin çalışması, kayma frekansının tahminine, dolayısıyla rotor zaman sabitine bağlıdır. DTC' nin çalışması ters elektromotor kuvvetinin integrali alınarak hesaplanan stator akısının değerine bağlıdır. Düşük hızlarda çalışma durumunda, elektromotor kuvvet çok düşük olduğundan Rs' deki küçük bir değişme çok büyük hataya sebep olur. Bu da kontrol performansının bozulmasına neden olur.

FOC' da hesaplamalar dönen eksen takımında yapılır. Bu yüzden, sinüs ve kosinüs fonksiyonları kullanılarak koordinat dönüşümü yapılması gerekir. DTC' de ise hesaplamalar sabit eksen takımında yapılır. Tablo 4.1' de FOC ve DTC kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması görülmektedir.

Tablo 4.1 Vektör Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması

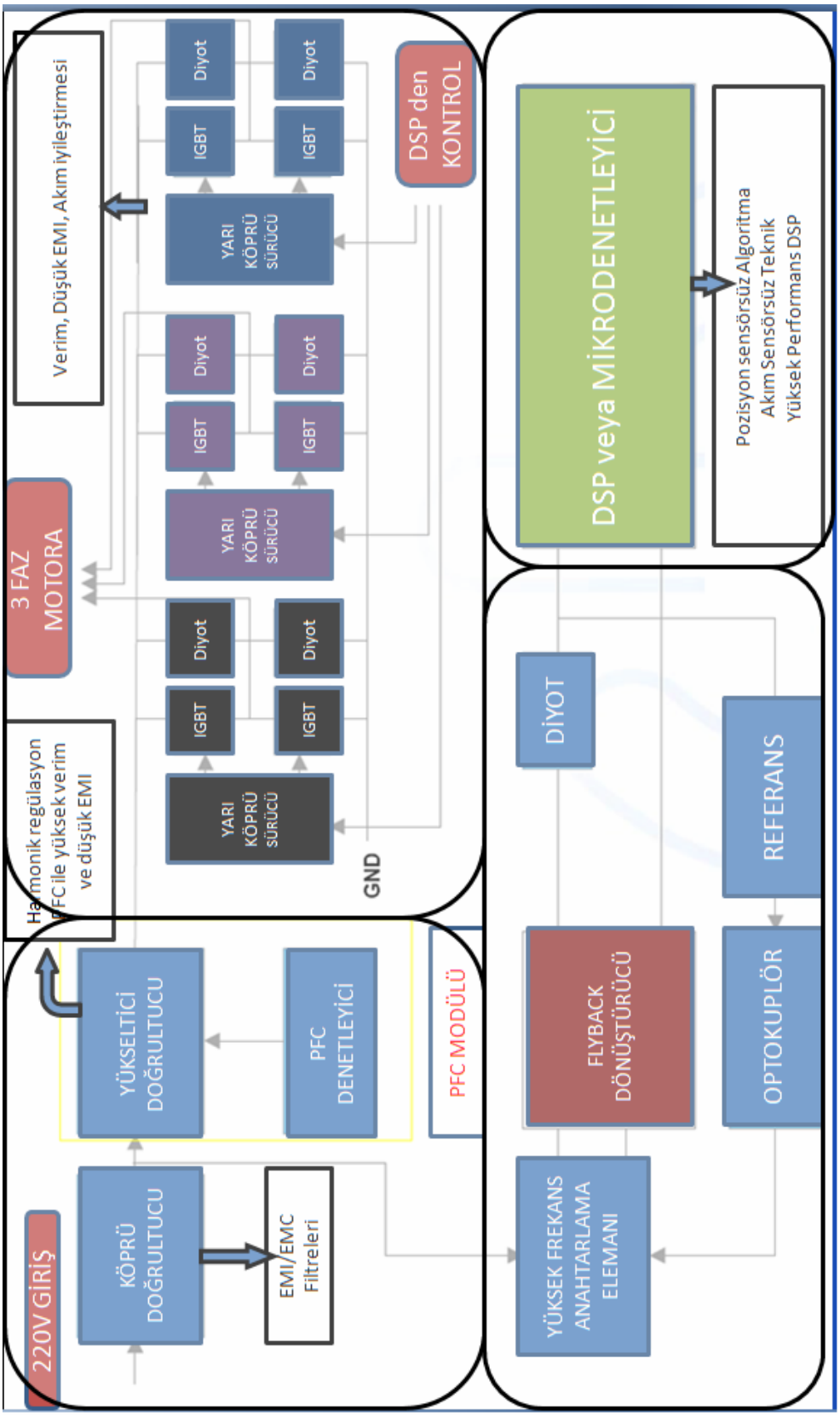
Karşılaştırma Konusu	Alan Yönlendirmeli Kontrol	Doğrudan Moment Kontrolü
Referans Eksen Takımı	Senkron hızda dönen x-y	Sabit sD-sQ
Kontrol Edilen Değişkenler	Moment Rotor Akısı	Moment Stator Akısı
Kontrol Değişkenleri	Stator Akımları	Stator Gerilim Uzay Vektörü, Stator Gerilimleri, Stator Akımları
Algılanan Değişkenler	Rotor Mekanik Hızı Stator Akımları	Moment Stator Sargısı Moment Regülatörü
Tahmin Edilen Değişkenler	Kayma Frekansı Rotor Akısı Pozisyonu	Stator Akı regülatörü
Regülatörler	3 Fazlı Akım Regülatörleri	Doğrudan Kontol Yüksek Cevap Hızı
Moment Kontrolü	Stator Akımları ile Dolaylı Kontrol Yüksek Cevap Hızı Moment Dalgalanması	Moment Dalgalanması
Akı Kontrolü	Stator Akımları ile Dolaylı Kontrol Düşük Cevap Hızı	Doğrudan Kontrol Yüksek Cevap Verme Hızı
Parametre Hassasiyeti	Rotor Zaman Sabitindeki Değişimlere Duyarlılık	Stator Direncindeki Değişimler Duyarlı
Gerçekleştirme Zorluğu	Yüksek Seviyeli Karmaşıklık Trigonometrik fonksiyon kullanma	Orta Seviyeli Karmaşıklık

Sonuç olarak, DTC yönteminin bazı noktalarda dinamik cevap ve gerçekleştirme karmaşıklığı gibi açılardan FOC yönteminden daha üstün olduğu düşünülebilir. Ancak uygulamanın gerçekleriyle karşılaşıldığı zaman özel durumlara da bağlı olarak, ek hesaplamalar ile iyileştirmeler yapıldığında, performans ve karmaşıklık açısından hemen hemen aynı seviyeye gelirler, hatta FOC'un üstünlüğünden söz edilebilir. Yukarıda da belirtildiği üzere sürücü için kontrol tiplerinin seçimi direkt olarak motorun kullanıldığı uygulamaya bağlıdır. Eğer basit yani genellikle orta ya da yüksek hızın gerekli olduğu ve yüksek performansın gerekli olmadığı, fanlar ya da pompalar gibi uygulamalar için, kolay gerçekleştirilmesi ve ucuz olması sebebiyle V/f kontrolü uygundur.

4.7 Vektör Kontrolün Başlıca Adımları

1. Motor faz gerilimi ve akımlarının ölçümü
2. Bu bilgilerle Clarke dönüşümünü (α,β) kullanarak üç fazdan iki faz sistemine geçiş
3. Uzay vektör rotor akısını ve rotorun konum açısını hesaplama (isteğe bağlı)
4. Park dönüşümünü kullanarak stator akımını d,q koordinat sistemine dönüştürme
5. Denetleyiciler tarafından Tork ($İ_{sq}$) ve Akının ($İ_{sd}$) kontrolü
6. Dekuplaj bloğunun kullanılmasıyla uzay vektör stator çıkış geriliminin hesabı
7. Ters Park dönüşümünü kullanarak d,q sisteminden tekrar iki faz sitemine geçiş(α,β)
8. Sinüs dalga modulasyonu ile 3 faz üretimi

Şekil 4.5'te genel olarak vektör kontrol sisteminin yapısı oluşturulmuştur.



Şekil.4.5 Vektör Kontrol Sisteminin Genel Görünümü

4.8 SMSM' nin Kontrolü için Gerekli Matematiksel İfadeler

Kontrol edilen SMSM' nin kontrol mantığının bilinebilmesi ve sürücü tasarımı yapılabilmesi için SMSM' nin matematiksel modelinin ve kullanılan matematiksel ifadelerin bilinmesi gerekir. Burada anlaşılması gereken en önemli konu uzay vektör diyagramlarıdır. Uzay vektör sisteminde kullanılması gereken koordinat dönüşüm sistemleri d,q ve α,β transformasyonlarıdır. FOC kontrolün uygulanabilmesi için moment ve akının bilinebilmesi gerekir. Bu bilgiler moment bileşeni için "d" koordinatının; akı bileşeni için "q" koordinatının değerlerinin hesaplanmasıyla yapılır (Vas, 1996).

4.8.1. Uzay Vektör Tanımı

Bir SMSM' nin herhangi bir çalışma anındaki stator faz akımları sırasıyla i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} ise akımların toplamı, Formül 4.2' den görüldüğü gibi sıfıra eşittir.

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \tag{4.2}$$

Buradan stator akımı uzay vektörü bulunursa;

$$\bar{i}_s = k(i_{sa} + a i_{sb} + a^2 i_{sc}) \tag{4.3}$$

Formüldeki α ve α^2uzay operatörleridir. k ise dönüşüm sabitidir.

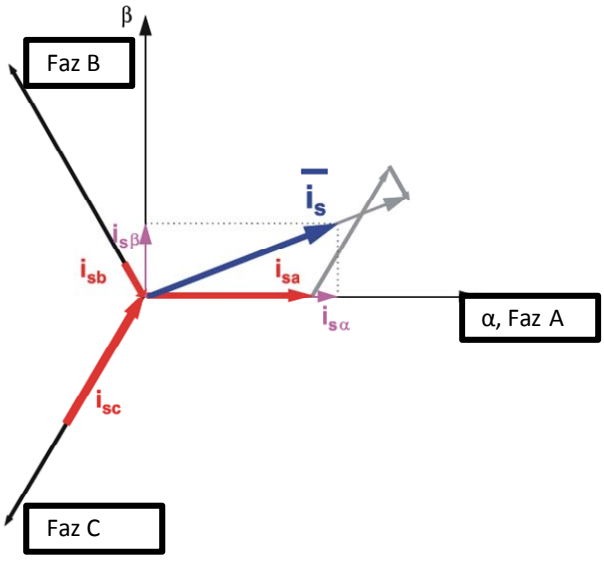
Burada statorun faz akımları;

$$\begin{aligned} I_a &= I_s \sin(\omega_e x t) \\ I_b &= I_s \sin(\omega_e x t - \frac{2\pi}{3}) \\ I_c &= I_s \sin(\omega_e x t - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \tag{4.4}$$

yazılırsa; Matematiksel ifadeden

$$a = e^{j2\pi/3}, \; k = 2/3 \tag{4.5}$$

bulunur.



Şekil 4.6 Akım Uzay vektörü ve İzdüşümü (Balazovic, 2003)

Aynı anda iki adet IGBT devrede olacağından akım formülleri Formül 4.6 ve 4.7' deki gibi yazılabilir. Şekil 4.6' da 3 faz bilgi uzay vektör tanımı çerçevesinde Clarke koordinat sistemine dönüşmektedir.

$$i_{sa} = k(i_{sa} - \frac{1}{2} i_{sb} - \frac{1}{2} i_{sc}) \tag{4.6}$$

$$i_{s\beta} = k \frac{\sqrt{3}}{2} (i_{sb} - i_{sc}) \tag{4.7}$$

Uzay vektörünün reel kısmı, boyuna eksen stator akım bileşeninin (i_{sD}) ani değeri ile eşittir ve enine eksen stator akım bileşeni (i_{sQ}) ile de imajiner kısmı eşittir. Böylece sabit referans sisteminde, stator akımı uzay vektörü statora bağlanmış olur ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\bar{i}_s = i_{sD} + j i_{sQ} \tag{4.8}$$

Simetrik üç fazlı makinelerde, enine ve boyuna eksen stator akımları (i_{sD} , i_{sQ}), gerçek olmayan enine faz akım bileşenleridir.

Gerilim ve manyetik akı için de aynı matematiksel ifadeler kullanılarak aşağıdaki gibi sonuçlar bulunur.

Gerilim için;

$$\bar{u}_s = k(u_{sa} + a u_{sb} + a^2 u_{sc}) \tag{4.9}$$

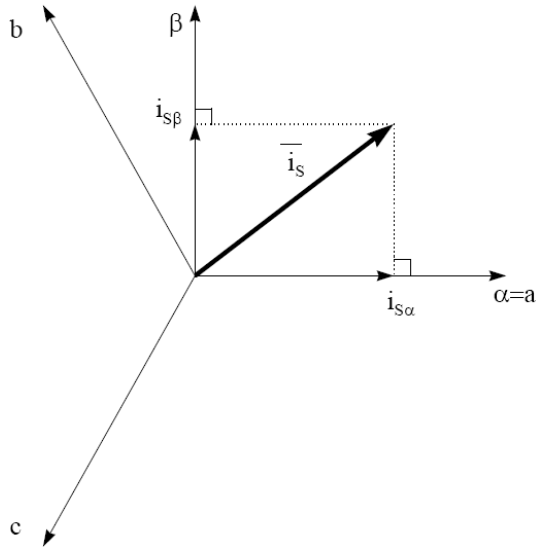
Akı için;

$$\psi_s = k(\psi_{sa} + a\psi_{sb} + a^2\psi_{sc}) \tag{4.10}$$

4.8.2 Vektörel Dönüşümler

4.8.2.1 Clarke Dönüşümü (a,b,c → α,β)

3 fazlı bir sistemin elektriksel bilgilerinin 2 faza dönüştürülmesi sağlanır. Şekil 4.7' de fazör diyagramları gösterilen vektörlerin 3 fazdan 2 faza dönüşümü gösterilmektedir.



Şekil 4.7 Clarke Dönüşümü Fazör Diyagramı

Grafikte, 3 faz(a,b,c) vektör bilgisi, 2 faz(α,β) vektör bilgisine dönüştürülmüş ve formül ile de dönüşüm gösterilmiştir. Buna göre;

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \tag{4.11}$$

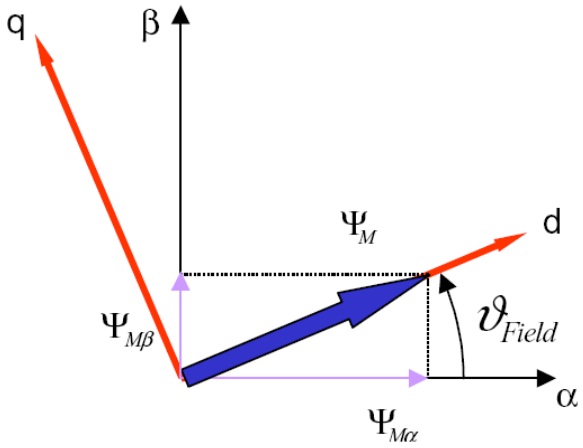
formülü ile (α,β) değerleri bulunur. Burada yine matematiksel işlemler yapılırsa; K=2/3 bulunur ve matriste K değerini yerine yazarsak;

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \left| a + b + c = 0 \right| = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \tag{4.12}$$

şeklinde çok sade bir ifade elde edilmiş olur. Bu ifadeyi yüksek matematik işlem kabiliyetine sahip mikroişlemcilerle çözümlemek gerekecektir.

4.8.2.2 Park Dönüşümü (α,β → d,q)

Bu dönüşüm vektör kontrol sisteminin en önemli noktasıdır. Gerçekte, 2-fazlı birbirine dikey koordinatlarda olan (α,β) yı; (d,q) dönen referans büyüklüğe dönüştürür. Eğer d-eksenin rotor akısıyla uyarlandığını düşünürsek, aşağıdaki diyagram akım vektörü için iki referans çerçevesi arasındaki ilişkiyi gösterir. Şekil 4.8' de dönüşüme ait grafik gösterilmektedir.



Şekil 4.8 Park Dönüşümü Fazör Diyagramı

(d,q) vektör sistemine dönüşüm için gerekli formül aynı şekilde mikroişlemcinin hesaplaması için programlamaya dahil edilir. Buna göre aşağıdaki formül ile sistem dönüşümü tamamlanmış olur.

$$\Psi_M = \sqrt{\Psi_{M\alpha}{}^2 + \Psi_{M\beta}{}^2} \tag{4.13}$$

$$\sin \nu_{field} = \frac{\Psi_{M\beta}}{\Psi_{Md}} \tag{4.14}$$

$$\cos \nu_{field} = \frac{\Psi_{M\alpha}}{\Psi_{Md}} \tag{4.15}$$

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\nu_{field} & \sin\nu_{field} \\ -\sin\nu_{field} & \cos\nu_{field} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

Burada;

$\Psi_{M\alpha}$ = Rotor Manyetik akısının α bileşeni

$\Psi_{M\beta}$ = Rotor Manyetik akısının β bileşeni

Ψ_{d} = Rotor Manyetik akısının d bileşeni

Burada q rotor akı pozisyonudur. Akım vektörünün akı ve moment bileşenleri aşağıdaki denklemlerle elde edilir [Vas,1990].

$$\begin{cases} i_{sd} = & i_{sa}\cos\theta + i_{s\beta}\sin\theta \\ i_{sq} = & -i_{sa}\sin\theta + i_{s\beta}\cos\theta \end{cases} \tag{4.17}$$

Bu formülde *Isd* akı bileşeni, *Isq* ise moment bileşenidir.

4.8.2.3 Ters Park Dönüşümü (d,q → α,β)

Bu dönüşümde sadece faz gerilimlerinin dönüşümü yapılmaktadır. Çünkü clarke ve park dönüşümleri yapıldıktan sonra, mikroişlemci ters park dönüşümü yaparak PWM sinyallerini hazırlar ki bu işlem sadece gerilimin oluşturulması işidir ve sadece gerilim dönüşümü yapılmaktadır. Buna göre;

$$\begin{cases} \nu_{saref} = & \nu_{sdref}\cos\theta - \nu_{sqref}\sin\theta \\ \nu_{s\beta ref} = & \nu_{sdref}\sin\theta + \nu_{sqref}\cos\theta \end{cases} \tag{4.18}$$

Elde edilen Ters Park ifadelerinden; PWM için a,b,c değerlerine dönüşüm formülü ise;

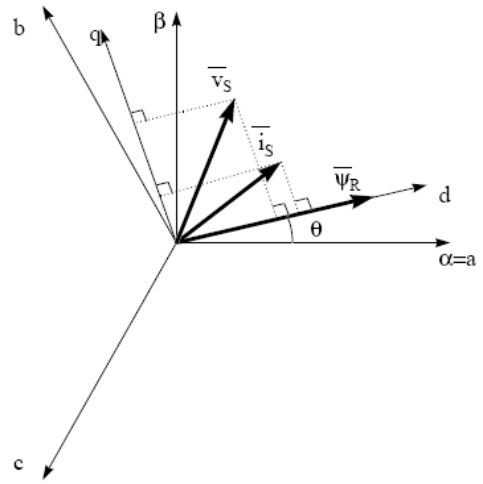
$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} \tag{4.19}$$

sonucu bulunur.

4.9 Vektörel Dönüşüm Sistemlerinin Kullanım Detayları

3 faz olarak PWM sinyallerinin beslediği motorun 2 fazından geçen akımlar ölçülür. 2 fazın ölçülmesiyle 3. faz otomatik olarak hesaplanır. Bu akımlar Clarke dönüşüm sisteminin beslenme kaynağıdır. Clarke dönüşümünde gösterilen formüller sonucu $i_{s\alpha}$ ve $i_{s\beta}$ olarak iki adet bilgi elde edilir. Bu akımlar Park dönüşümünün giriş bilgileridir. Park dönüşümü bu akımlara uygulandıktan sonra d,q döner alan akım bilgileri i_d ve i_q hesaplanmış olur. Bu akım bilgileri kullanıcının giriş yaptığı i_{sdref} (akı referansı) ve i_{sqref} (moment referansı) referans akımlarıyla karşılaştırılır. Bu noktada; kullanılan kontrol tekniği ilginç bir avantaj sağlar. Bu bilgiler hem senkron hem de asenkron motorların kontrolünde kullanılabilir. Sadece akı referansını değiştirmek ve rotor akı pozisyonunu hesaplamak, iki motorun kontrolünün de yapılmasını sağlar. SMSM' lerde rotor akısı sabittir (Mıknatıslar tarafından belirlenir). Bundan dolayı SMSM kontrolünde i_{sdref} sıfır olarak ayarlanmalıdır. Ancak asenkron motorlarda rotorların sabit bir manyetik alanının olmamasından dolayı rotor akısı sürekli değişiklik gösterir ve akı referansı sıfır değildir. i_{sqref} moment ifadesi alan yönlendirmeli hız kontrolü sisteminde hız regülatörünün çıkışı olmalıdır. Park dönüşümünden geçen bilgiler, referans bilgilerle karşılaştırıldıktan sonra v_{sdref} ve v_{sqref} bilgileri Ters Park dönüşümüne tabi tutularak α,ß koordinat düzleminde olan $v_{s\alpha ref}$ ve $v_{s\ss ref}$ olarak iki çıkış gerilimi oluşturulur. Bulunan çıkış gerilimleri Uzay Vektör PWM' in giriş bilgileri olarak işlenir ve sonunda inverteri besleyen sinyaller oluşturulmuş olur. Tekrar ifade etmek gerekirse; Park ve Ters Park dönüşümleri için rotor akı pozisyonuna ihtiyaç vardır. Rotor akı pozisyonu bilgisi makinenin senkron veya asenkron olmasına bağlıdır.

Rotor akı pozisyonunu bilmek FOC yönteminin kalbidir. Eğer bu bilgide bir yanlışlık yapılırsa rotor akısı d ekseninde i_d ve i_q ile simetrik olarak çalışmaz ve yanlış akı ve moment değerleri elde edilir. Şekil 4.9 bütün referansların gösterildiği senkron hız için geçerli bir grafiği göstermektedir.



Şekil 4.9 Akı, gerilim ve akım uzay vektörleri

- Senkron makinelerde rotor hızı rotor akı hızına eşittir. Yani θ açısı (rotor akı pozisyonu) direk olarak pozisyon sensörleriyle veya rotor hızının toplamıyla ölçülür.
- Asenkron makinelerde rotor hızı rotor akı hızına eşit değildir. Bu sebeple motorun d,q eksenlerinin akım modelinden sonucu bulmak gerekir.

4.10 İnverterlerde Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) Kullanımı

İnverter tasarımı yaparken özellikle AC motorların inverter tasarımında gerilim beslemeli inverter (VSI) kullanımı performansı çok iyi etkileyecektir. VSI tipi inverterler için bir PWM tekniği kullanımı gereklidir. Birçok PWM tekniği vardır. Ancak motor kontrolünde genellikle Sinuzoidal PWM (SPWM) tekniği kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada da SPWM tekniği kullanılmıştır.

4.10.1 PWM Çeşitleri

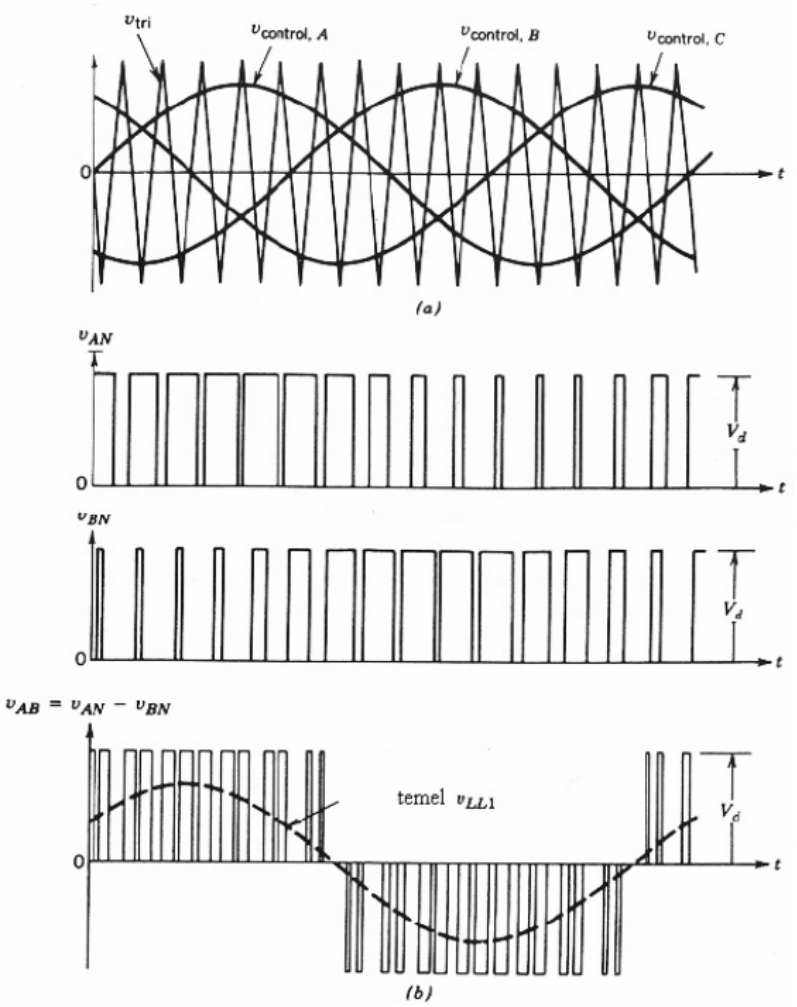
Birçok PWM tekniği olmasına rağmen genelde kullanılan birkaç PWM tekniği vardır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir;

1) Sinüsoidal PWM,
2) Harmonik eliminasyonlu PWM,
3) Akım kontrollu PWM,
4) Uzay vektör modülasyon (SVPWM)
5) Çok seviyeli PWM.

Bu çalışmada SPWM ve SVPWM ile çalışıldığından dolayı bu iki PWM türü anlatılmıştır.

4.10.1.1 Sinuzoidal PWM

Bu bölümde modülasyon sinyali olarak sinüsoidal dalga kullanılarak PWM çıkışlar üretilir. PWM sinyalin iletim ve kesim durumları sinüs dalga (modülasyon dalgası) ile yüksek frekanslı üçgen dalganın (taşıyıcı dalga) karşılaştırılması ile belirlenir. Her yarı periyottaki darbelerin sayısı taşıyıcı frekansına bağlıdır. Şekil 4.10'da bir faz için SPWM ile kapı sinyallerinin nasıl üretildiği gösterilmiştir. Normalde birbirine göre 120 derece faz farkı bulunan üç tane sinüsoidal referans vardır. İlgili faza ait referans sinyal ile taşıyıcı dalga karşılaştırılarak o faz için kapı sinyalleri elde edilir. Şekil 4.10'da gösterilen çıkış gerilimi için aynı faz kolundaki iki anahtarlama elemanı aynı anda iletimde olamaz.



Şekil 4.10 SPWM Oluşumu

SPWM'de modülasyon dalganın frekansı çıkış geriliminin frekansını belirler. Modülasyon dalganın tepe değeri modülasyon indeksini (M) belirler ve çıkış geriliminin efektif değerini kontrol eder.

M= referans dalganın değeri / taşıyıcı dalganın değeri

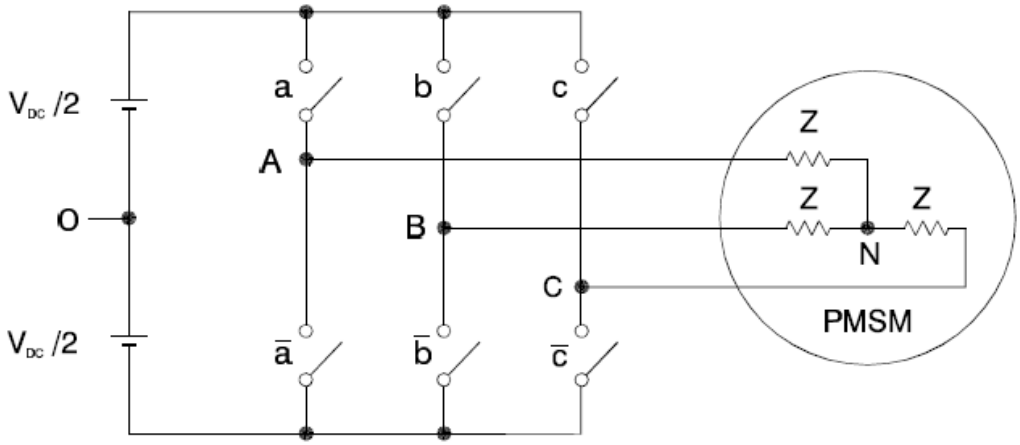
Modülasyon indeksinin değiştirilmesi çıkış geriliminin efektif değerini değiştirmeyi ve büyük ölçüde distorsiyon faktörünün iyileştirilmesini sağlar. Bununla birlikte çıkış gerilimi istenmeyen kayıplara neden olan zaman harmoniklerini içerir.

4.10.1.2 Uzay Vektör PWM

Sinüzoidal modülasyona göre daha düşük harmonik distorsiyonlu çıkış akımı ile daha yüksek çıkış gerilimi meydana getirmesi sebebiyle endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Ayrıca inverter anahtarlama kayıpları büyük ölçüde azaltılırken, aynı zamanda yüksek kaliteli bir AC çıkış akımı sağlanabilir.

Üç fazlı gerilim beslemeli inverterlerin (VSI) normal çalışması, aynı koldaki iki elemanın aynı anda iletimde olmamasını gerektirir. Bu sebeple üç fazlı inverter, yapı olarak iki durumlu üç mekanik anahtar ile tanımlanır.

Her bir inverter faz kolunun anahtarlama durumu ayrı ayrı Sa, Sb ve Sc anahtarlama fonksiyonları tarafından kontrol edilir. Şekil 4.11 anahtarlama pozisyonlarını, Tablo 4.2 anahtarlama zamanlarını ve Tablo 4.3 oluşan gerilimleri gösterir.



Şekil 4.11 SMSM Anahtarlama Devresi

Tablo 4.2 Anahtarlama Peryodu

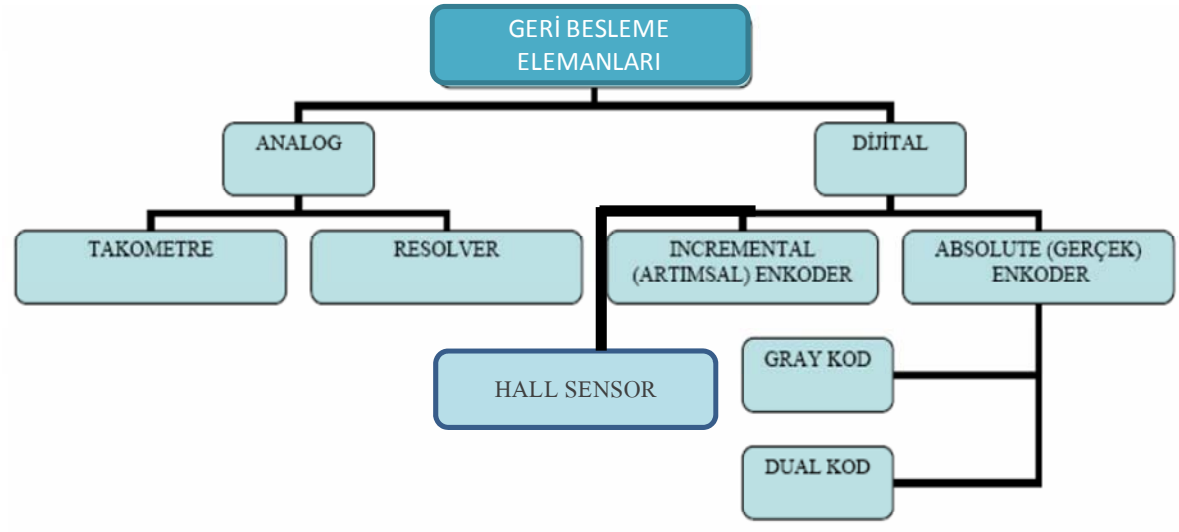
A	B	C	V_{AO}	V_{BO}	V_{CO}
0	0	0	-VDC/2	- VDC/2	- VDC/2
0	0	1	- VDC/2	- VDC/2	+ VDC/2
0	1	0	-VDC/2	+VDC/2	- VDC/2
0	1	1	-VDC/2	+VDC/2	+ VDC/2
1	0	0	+VDC/2	-VDC/2	- VDC/2
1	0	1	+VDC/2	-VDC/2	+ VDC/2
1	1	0	+VDC/2	+VDC/2	- VDC/2
1	1	1	+VDC/2	+VDC/2	+ VDC/2

Tablo 4.3 SMSM faz gerilimleri

A	B	C	V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}
0	0	0	0	0	0
0	0	1	- VDC/3	- VDC/3	2VDC/3
0	1	0	- VDC/3	2VDC/3	- VDC/3
0	1	1	-2VDC/3	VDC/3	VDC/3
1	0	0	2VDC/3	- VDC/3	- VDC/3
1	0	1	VDC/3	-2VDC/3	VDC/3
1	1	0	VDC/3	VDC/3	-2VDC/3
1	1	1	0	0	0

BÖLÜM-V

5.1 Pozisyon Denetleyici Ve Belirleyiciler



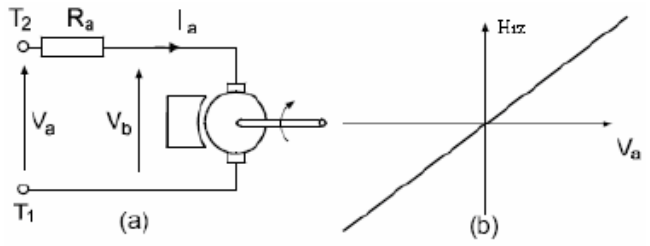
Şekil 5.1 Geri besleme elemanları

Geri besleme elemanı motora bağlı bir şekilde kullanılır ve genellikle motor ile aynı hızda çalışır. Bu nedenle aşırı hızlarda ısınır ve ürettikleri işaretler bulundukları manyetik alandan etkilenir. Geri besleme elemanlarının, sistemi olumsuz yönde etkileyecek bu etkilerinin azaltılması gerekir. Pratik uygulamalarda aşırı hız nedeniyle ısınmanın önlenmesi için uygun dönme (yataklama) sistemleri, elektromanyetik alandan korunması için de uygun şasiler ile korunmaktadırlar. Şekil 5.1' de geri besleme elemanlarının çeşitleri görülmektedir.

5.1.1 Analog Pozisyon Encoderleri

5.1.1.1 Takogeneratör

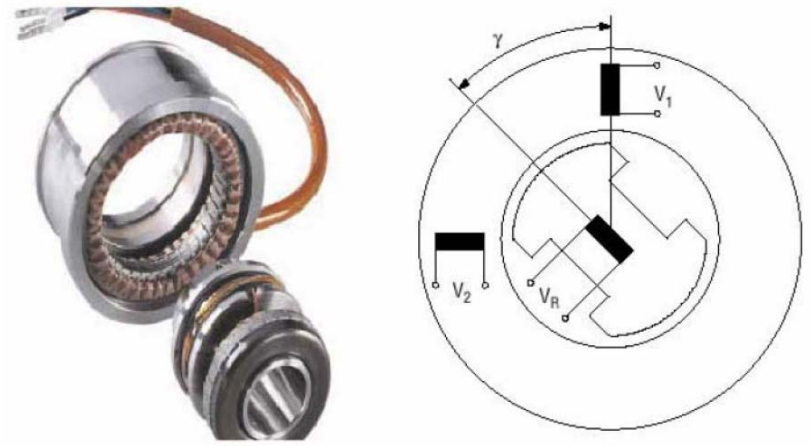
Takogeneratör küçük bir sabit mıknatıslı makinadır (DC, relüktans veya ac makina). Hızla orantılı olarak elektromotor kuvvet üretir. Takogeneratör motorun miline akuple edilir. İdeal karakteristiği şekildeki gibi gösterilebilir. Takogeneratör hızla orantılı gerilim üretir. Bu gerilimde kontrol sistemi işlemleri için gereklidir. Şekil 5.2.b'de takogeneratörün gerilim-hız karakteristiğini göstermektedir. Aynı karakteristik motorun rotor pozisyonunu belirlemek için kullanılabilir.



Şekil 5.2 Takojeneratör: (a) devre diyagramı (b) Hız karakteristiği
Ra armatür direnci ve T1, T2 takogeneratörün bağlantı uçlarıdır.

5.1.1.2 Resolver

Resolverlar genellikle motorun soğutma fanı tarafındaki miline akuple olarak çalışırlar. Motorun bir dönüşü için, o andaki konumunun tespiti için kullanılan bir geri besleme elemanıdır. Resolver motor mili ile eşzamanlı (senkron) dönen bir transformatör gibidir. Şekil 5.3' te tipik bir resolver görülmektedir.



Şekil 5.3 Tipik bir resolver

5.1.2 Dijital Pozisyon Encoderleri

İki çeşit dijital pozisyon encoderi vardır. Artımsal tip ve mutlak tip encoderler.

5.1.2.1 Enkoder Çalışma Prensipleri

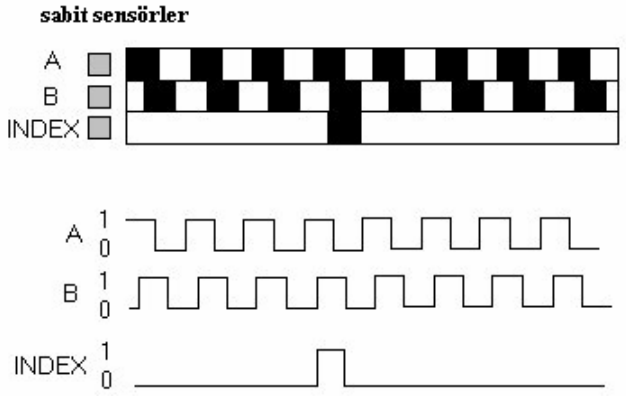
Geleneksel artımsal ve mutlak enkoderlerin çoğu benzer optik tarama tekniklerini kullanırlar. Elektronik bir çıkış üretmek için LED tarafından yayılan ışık döner bir disk ve sabit bir maskenin içinden geçer. Artımsal enkoderlar sayma için ve bir de isteğe bağlı

komütasyon için olmak üzere iki iz setine sahiptirler. Enkoderin çözünürlüğü, disk kenarına eşit bir şekilde dağıtılmış şeffaf ve ışık geçirmeyen çift bölgeler sayısına bağlıdır. Mutlak enkoder diski, tam yerleştirilmiş şeffaf ve ışık geçirmeyen dilim paketlerinden meydana gelen merkezli aynı izlerden oluşmaktadır. Bu izler ile dilimler birleştiğinde bir dijital değer oluşur. Her bitin çözünürlüğü için bir iz gerekmektedir. Örnek: 12- bit (çözünürlük başına 4096 parça) enkoder için 12 iz vardır.

5.1.2.2 Artımsal Tip Encoderler

Motordan geçen akım, bir sayıcının artırılması veya azaltılması yoluyla hesaplanır. Sayıcı için gerekli olan bilgi iki fazlı darbe sinyali sayesinde sağlanır. Bu iki fazlı darbe sinyalindeki fazlar arasında ise 90 derecelik fark vardır. Böylece motorun saat yönüne mi yoksa saat yönü tersine dönüş yaptığı hesaplanabilir. Bunun avantajları çözünürlüğe de bağlıdır (her bir turdaki darbe sayısı). Bunun için disk üzerinde 2 tane iz olması yeterli olacaktır. Büyük bir dezavantajı da vardır ki sistem bir darbeyi okuyamama hatası yaptığında (yüksek hızlar için geçerli olan bir sebep) veya güç kaynağı kapalı iken yanlış bilgi iletilecektir. Bundan dolayı sayıcıyı resetlemek için bir referans darbe üretilir.
Bu tip encoder milin dönme açısına göre seri çıkış darbeleri üretir. Mil dönmüyorken çıkış darbesi vermez.

Enkoder, sayılan darbe sayısı ile dönme pozisyonu algılar. Tek yönlü enkoder tipi yalnızca kanal A çıkışına sahiptir ve mil dönerken bir darbe üretilir. Çift yönlü enkoder tipi A ve B kanallarına sahiptir ve tek yönlü tipe ilave olarak mil dönme yönünü de algılar.



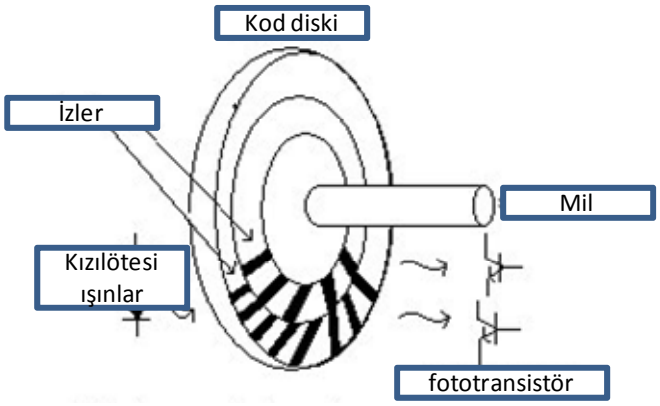
Şekil 5.4 Artımsal encoder diski iz örüntüsü

Şekil 5.4’ e göre motor milinin dönme hızına bağlı olarak üretilen sinyallerin frekansı da orantılı bir şekilde değişir. Üretilen darbe sayısının sayılması ve kullanılan diskin çözünürlüğünün bilinmesiyle motorun açısal hareketi bilinebilir.

5.1.2.3 Mutlak Tip Encoderler

Milin mutlak dönme açısını göstermek için paralel olarak kodlanmış işaret çıkışları verir. Artımlı tipten farklı olarak darbe sayısını saymak için sayıcıya gerek yoktur ve encoder milinin dönme açısı daima bilinebilir. (Mutlak tipin çözünürlüğü daha iyidir ve daha büyük değerlerde çıkış verebilir.) Şekil 5.5’ te mutlak tip enkoderin yapısı görülmektedir.

Bu tip encoder orijin ayarı yapmaya gerek yoktur. Milin o andaki konumu orjin olarak tanımlanabilir. Encoder çıkış işareti anahtar çıkışlarından etkilenmez ve milde ince ayar gerekmez. Ayrıca encoder tarafından kodlanmış işaret çıkışı okunamadığı durumda bile, devir azaldığı zaman doğru dönme açısı kaydedilir. Bunun yanısıra, encoder uygulama teçhizatının titreşiminden doğabilecek hareketlerden etkilenmez.

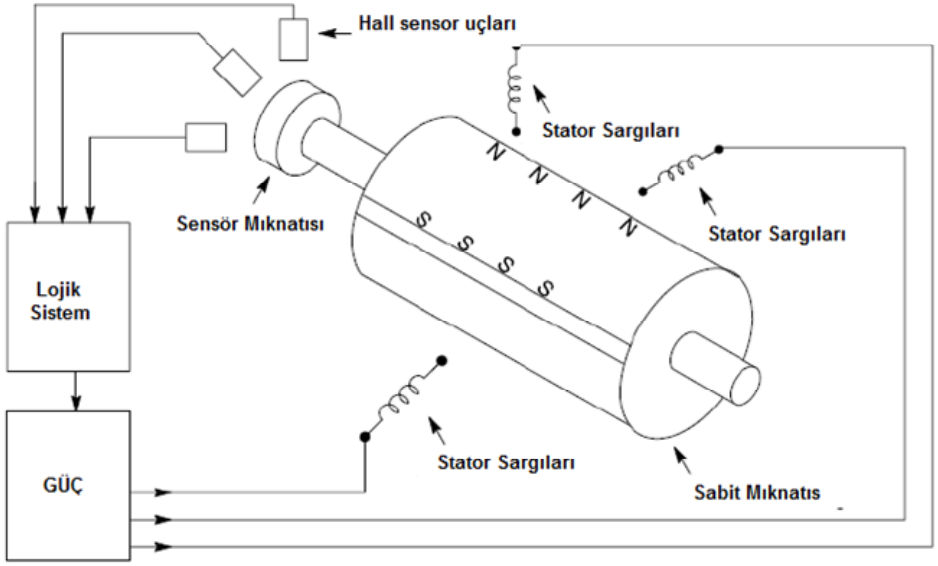


Şekil 5.5 Mutlak tip encoder yapısı

5.1.2.4 Hall Sensör

Hall sensör birbirine 120’ şer derece faz farkı olan üç çıkışa sahiptir. Bu çıkışlar, Şekil 5.6’ da gösterildiği gibi rotor üzerinde hall sensöre ait olan bir mıknatısın çevresine yerleştirilmişlerdir. Bu mıknatısın kutup sayısı hall sensörün çözünürlüğü ile doğru

orantılıdır. Motorun hız ve pozisyon kontrolü bu üç çıkış değerlerinin işlemci tarafından değerlendirilmesiyle hesaplanır.



Şekil 5.6 Hall Sensörün İç Yapısı

5.1.2.5 Artımsal Ve Mutlak Enkoderlerin Karşılaştırılması

Geri besleme sistemi her zaman başlangıç pozisyonuna referans edildiğinden, artımsal enkoderler gürültüye ve güç kesintilerine karşı hassastırlar. Güç kesintisi olması durumunda, artımsal enkoder kullanılan bir sistem yeniden başlatılmalıdır.

Mutlak enkoderlerde kodlanmış rakam benzersiz olmasından dolayı hareket sistemi bir kere başladıktan sonra güç kesildiğinde sistem hareket etse bile pozisyon kesin olarak belirlenir.

Mutlak enkoderler hataları toplamazlar. Ara sıra oluşan gürültü mutlak enkoder tarafından gönderilen bir pozisyon değerini bozduğu zaman, sadece o belirli kısım bundan etkilenir. Bir sonraki pozisyon değeri aynı gürültüden etkilenmeyecektir ve daha önceden meydana gelmiş herhangi bir hata ileriki okumalarda düzeltilecektir.

Genellikle artımsal enkoderler mutlak enkoderlere göre düşük maliyetle daha yüksek çözünülürlük sağlarlar ve çok az çıkış hatlarının olmasından dolayı daha basit ara yüze sahiptirler. Tipik olarak, bir artımsal enkoder 5 hat, 3 pozisyon/hız sinyali, bir güç ve bir

toprak hattına sahiptir. Buna karşın, 12 bitlik bir mutlak enkoderde 12 çıkış teli, bir güç ve bir toprak hattı vardır. Ayrıca, mutlak döner enkoderler pahalıdırlar, çalıştırılma safhasında epeyce bir uzmanlık isterler, çok sağlam değildirler ve veri iletme oranında sınırlıdırlar. Bu yüzden, motor kontrol uygulamalarında az kullanılmışlardır ve mutlak enkoderler kullanılmanın uygun görüldüğü çoğu uygulamada da artımsal döner enkoderler kullanılmaktadır. Pozisyon belirlemede birçok diğer metotlarda yeni yeni ortaya çıkmaktadır ve bunlar optik fiberlerin kullanılıp verinin iletilmesi ve alınması uzaktan kumanda ile makineden başarabilmesi ümit edilmektedir.

BÖLÜM-VI

6. Sürücü Devre Tasarımı ve Deneysel Çalışmaları

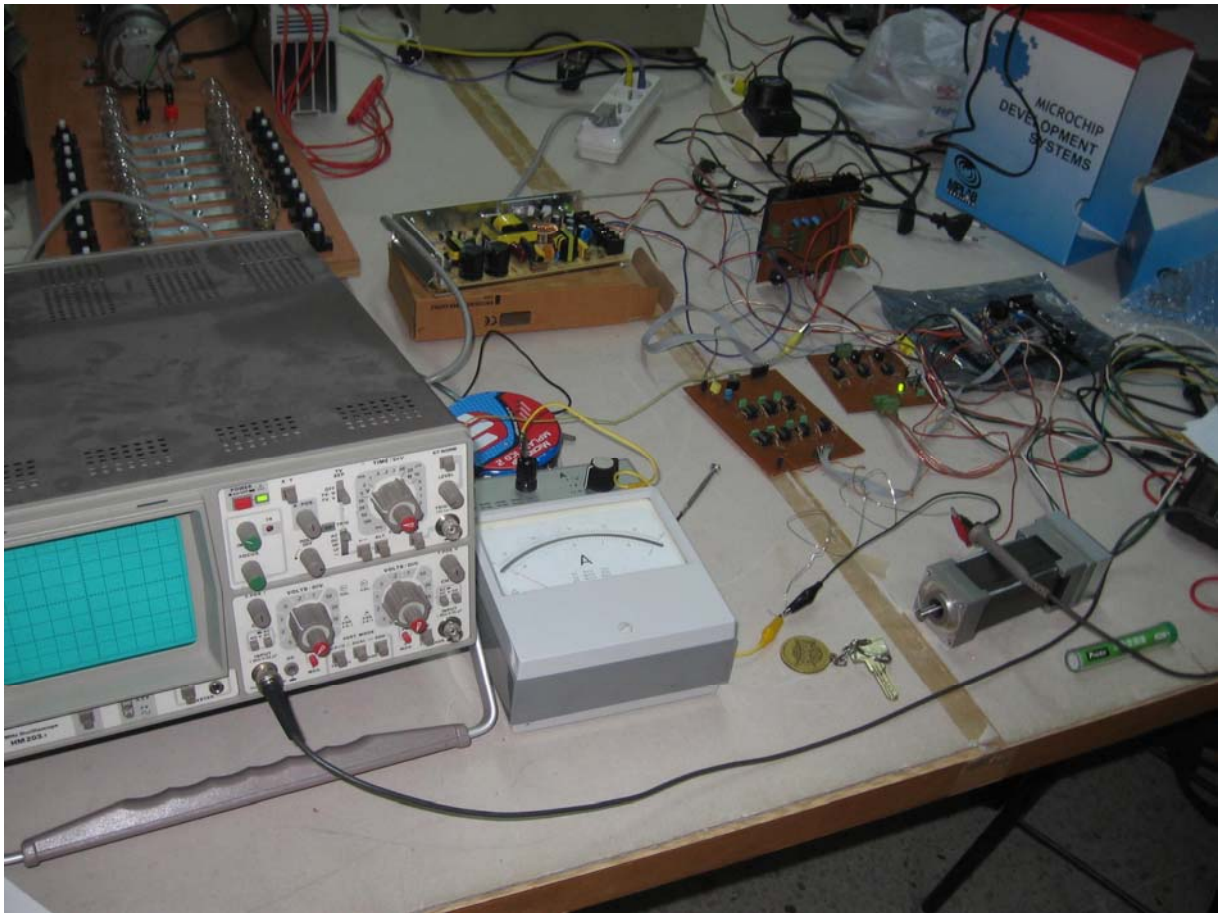
6.1 Giriş

Bu tez çalışmasında sürekli mıknatıslı senkron motorların kontrolü yapılmış olup kontrol tipi olarak geri besleme elemanları aracılığıyla kapalı çevrim olarak çalışabilen alan yönlendirmeli kontrol yöntemi seçilmiştir. Sürücü tasarımı, çok hızlı ve karmaşık işlem yeteneğine sahip mikroişlemcilerle yapılmak zorundadır. Bundan dolayı Microchip firmasının sayısal sinyal işleme yeteneği yüksek olan dsPIC mikro denetleyicileri kullanılmıştır.

Sürekli mıknatıslı senkron motorların endüstride kullanılan yaygın adı AC senkron servo motordur. Bu motorların sanayide kullanımının gittikçe artması, kontrol mekanizmasının önemini arttırmaktadır. Bu sebeple sanayiye yararlı olabilmesi amacıyla bu motorların kontrol mekanizması üzerine çalışma yapılmıştır.

6.2 Genel Tasarım

SMSM' nin kontrolü için yapılan sürücü tasarımı temelde donanım ve yazılım olarak iki bölümden oluşmaktadır. Donanım olarak kullanılan devrelerden mikroişlemcinin bulunduğu kontrol devresi diğer donanım parçalarını yönetmektedir. İnverter devresi, DC gerilimin 3 faz AC'ye dönüştürülmesi için gereklidir. Güç katı devresi +15V, -15V, +5V, +9V üretmek için kullanılmaktadır. Tüm bu gerilimleri elde edebilmek için 220V AC giriş gerilimi 24V DC gerilime dönüştürülmüştür. Fazlardan gelen akım bilgileri ve hall sensor cihazından gelen motorun pozisyonunu bildiren bilgiler mikroişlemciye geri besleme arayüz devresi ile aktarılmaktadır. Güç devrelerinin ve zayıf akım devrelerinin besleme bölümleri optoizolatör devresi ile birbirlerinden yalıtılmıştır.

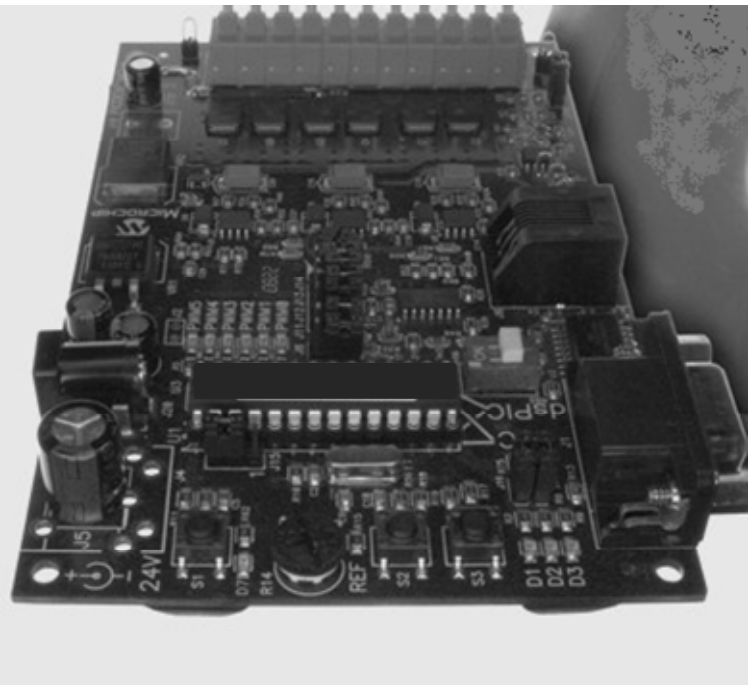


Şekil 6.1 Sistemin Genel Görünümü

Genel olarak yukarıda özetlenen ve aşağıda ayrıntılı olarak anlatılan donanım parçalarının kullanıldığı sürme devresinde mikroişlemci kontrolünün yapıldığı yazılım dili olarak "C" dili kullanılmıştır.

6.2.1 DsPIC Kontrol Devresi

Şekil 6.2' de görülen DsPIC kontrol devresi Microchip firmasına aittir ve mikroişlemcinin bulunduğu giriş ve çıkışların bulunduğu bir devredir. Bu devrede mikroişlemci PWM sinyallerini üreterek diğer devrelere bilgiyi aktarmaktadır. Geri beslemeli olan sistem, motordan gelen akım ve hall sensor bilgilerini mikroişlemciye aktararak alınan bu bilgilere göre mikroişlemcinin PWM sinyali üretmesini amaçlamaktadır.



Şekil 6.2 DsPIC Kontrol Devresi

Üretilen PWM sinyalleri uzay vektör PWM mantığıyla oluşturularak motor sürme devresine aktarılmaktadır. Ayrıca mikroişlemci devresinde mikroişlemcinin programlanabilmesi için usb ve seri port çıkışları bulunmaktadır.

Kontrol devresinde 3 faz sinüs dalgalı motorun kontrol edilebilmesi için Plug-in Modül(PIM) kısmın 60MHz frekans kapasitesine sahip olan mikrodenetleyicisi seçilmiştir. DsPIC30F3010 tipi PIM mikrodenetleyicisi kullanılan kontrol devresinde, motorun PWM sinyallerinin üretim modülü donanım olarak bu işlemcide bulunmaktadır. Mikrodenetleyicinin PLL ayarlarının (x16) değiştirilmesiyle kullanılan Dspic entegresinin hızı 60MHz'e çıkarılmıştır. Bu hıza çıkarılmanın sebebi izah edilirse işlemcinin 1 periyot boyunca yaptığı işlemlerin anlatılması yeterli olacaktır. Öncelikle; işlemcinin akım ve hall sensor bilgilerini 1 periyot boyunca sürekli ölçmesi ve bu esnada hatasız bir şekilde kesintiye uğramaksızın PWM sinyallerinin sürekli üretilmesi ile referans bilgilerin Analog- Dijital Dönüştürücü (ADC) tarafından ölçülmesi işlemleri bu hıza gereksinim duyulmasını açıklamaya yetecektir. PWM sinyallerinin bozulmaksızın üretilmesi kullanılan kesmeler sayesinde en kaliteli biçime ulaşmıştır. Çünkü mikrodenetleyicinin bir anda bir işlem yaptığı düşünülürse; işlemcinin o an başka bir bilgi ölçtüğü durumda PWM sinyalinin üretilmesi için

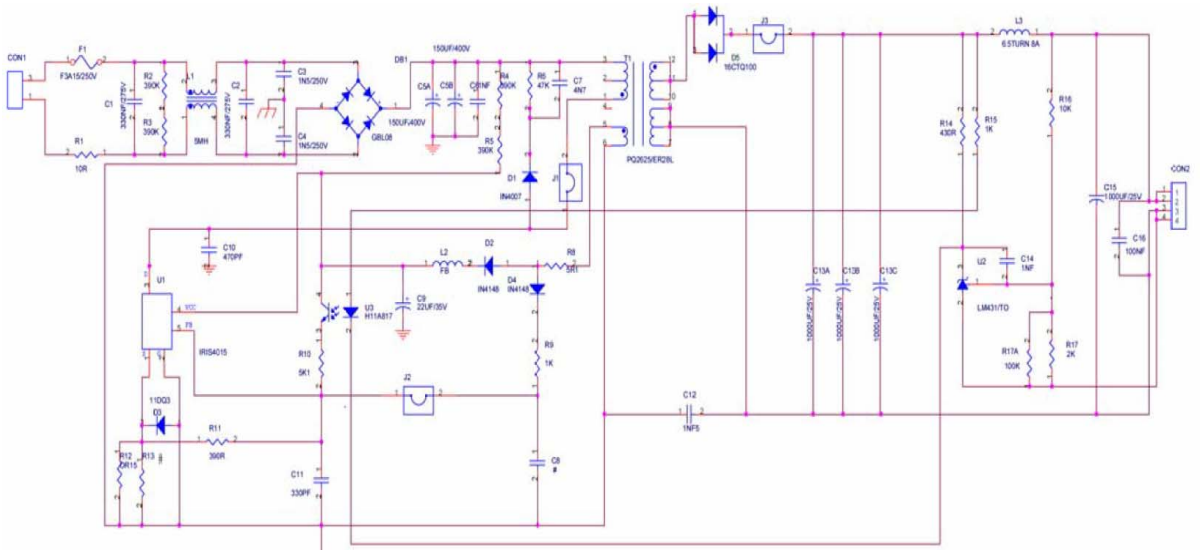
o işlemin kesime uğraması şarttır. Bundan dolayı işlemcinin kesme prosedürünün de kullanılması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

6.2.2 Güç Katı Devresi

Bu devrede 220V tek faz AC gerilim 24V DC' ye çevrilmiştir. Gerilimin düşürülmesi için trafo kullanılmış ve düşürülen gerilim köprü diyot ile DC' ye çevrilmiştir. Gerilimin anlık yükselmelerini üzerine alabilmesi için varistör kullanılmıştır. Güç katı devresi Şekil 6.3' te gösterilmektedir.



Şekil 6.3 Tek faz AC-DC' ye dönüştürme devresi



Şekil 6.4 Güç Devresi AC-DC Çevrim Bağlantı Şeması

Şekil 6.4’ te bağlantı şeması gösterilen güç katı devresinde elde edilen 24V luk DC gerilim, anahtarlanmak amacıyla inverter devresine gönderilmektedir.

6.2.3 İnverter Devresi

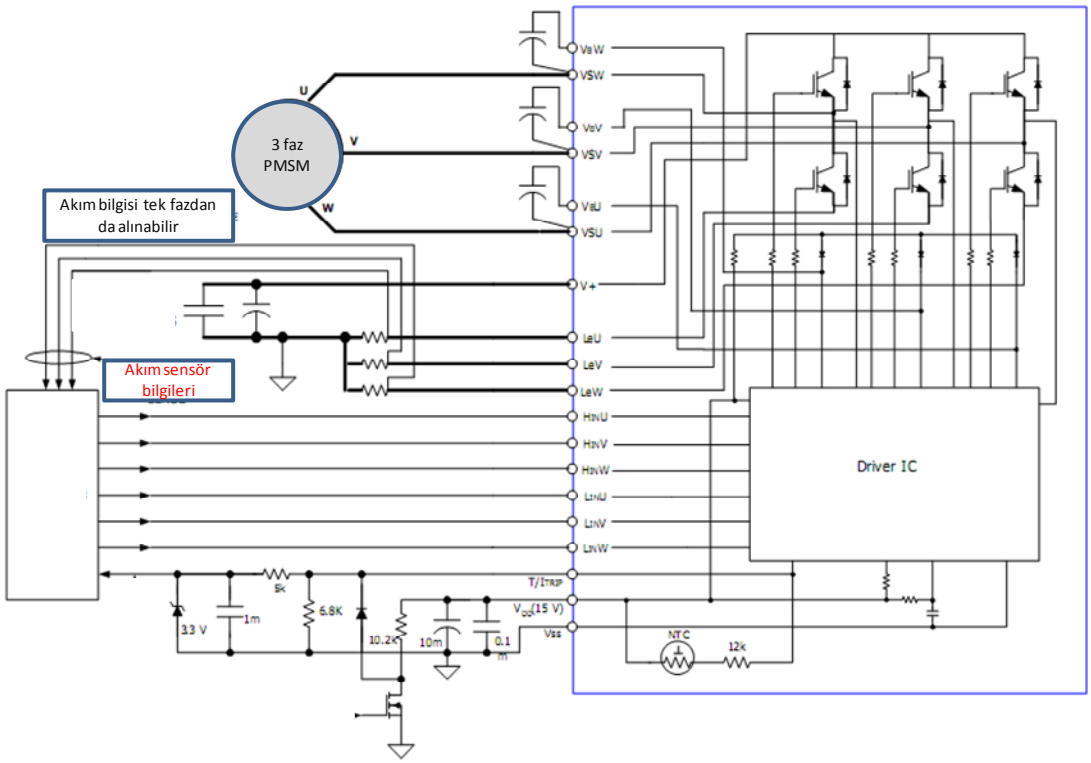
İnverter devresi güç katı devresinden gelen +15V DC gerilimle beslenmekte olup DC 24V gerilimi AC 3 faz gerilime çevirmektedir. Motor sürücüsü olarak şekil 6.5’ te görülen tümleşik bir yapıda olan IRAMS06UP60A kullanılmıştır. Maksimum 600V gerilim ve 6A akıma göre tasarlanmış olan güç modülü +150^{o}C sıcaklığa kadar çalışabilme şartlarına sahiptir.



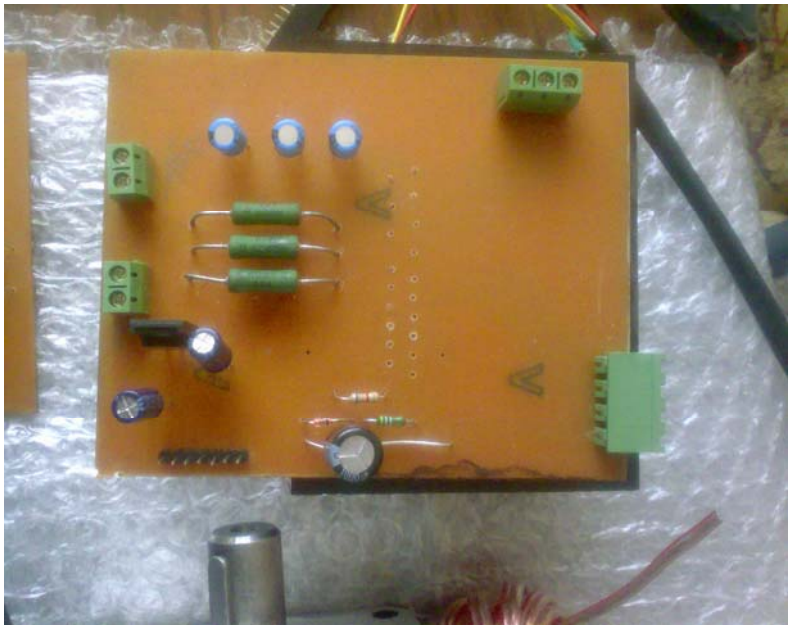
Şekil 6.5 IRAMS06UP60A Inverter Güç Modülü

Maksimum 500W güce sahip olan motorları sürebilme kapasitesine sahip sürücü devresi çok fazla ısınabileceğinden dolayı kullanılan güç IGBT modülü alüminyum soğutucu ve fanla soğutulmaktadır.

Mikroişlemciden optoizolatöre ve son olarak Şekil 6.7’ deki inverter devresine gelen PWM sinyalleri güç modülü tarafından işlenerek 3 faz sinuzoidal gerilim oluşturmaktadır. Güç modülüne gelen PWM sinyallerinin frekansı maksimum 20kHz mertebesinde olduğundan dolayı kısa devre ihtimali çok yüksektir. Ancak güç modülünde bulunan logic devreler sinyallerin kısa devreye olanak sağlamasına imkan vermezler. Şekil 6.6’ da güç modülünün genel bağlantı şeması görülmektedir.



Şekil 6.6 Güç modülünün genel bağlantı şeması



Şekil 6.7 İnverter Devresinin üstten görünüşü

Ayrıca programlamada kullanılmak istenirse güç IGBT entegresinin sıcaklığı da tespit edilebilmektedir. Ancak çok hızlı anahtarlama gerektiren frekanslarda mikroişlemcinin bu sıcaklıkla yavaşlamaması için sıcaklık ölçümü yapılmamıştır.

6.2.4 Geri Besleme Elemanları

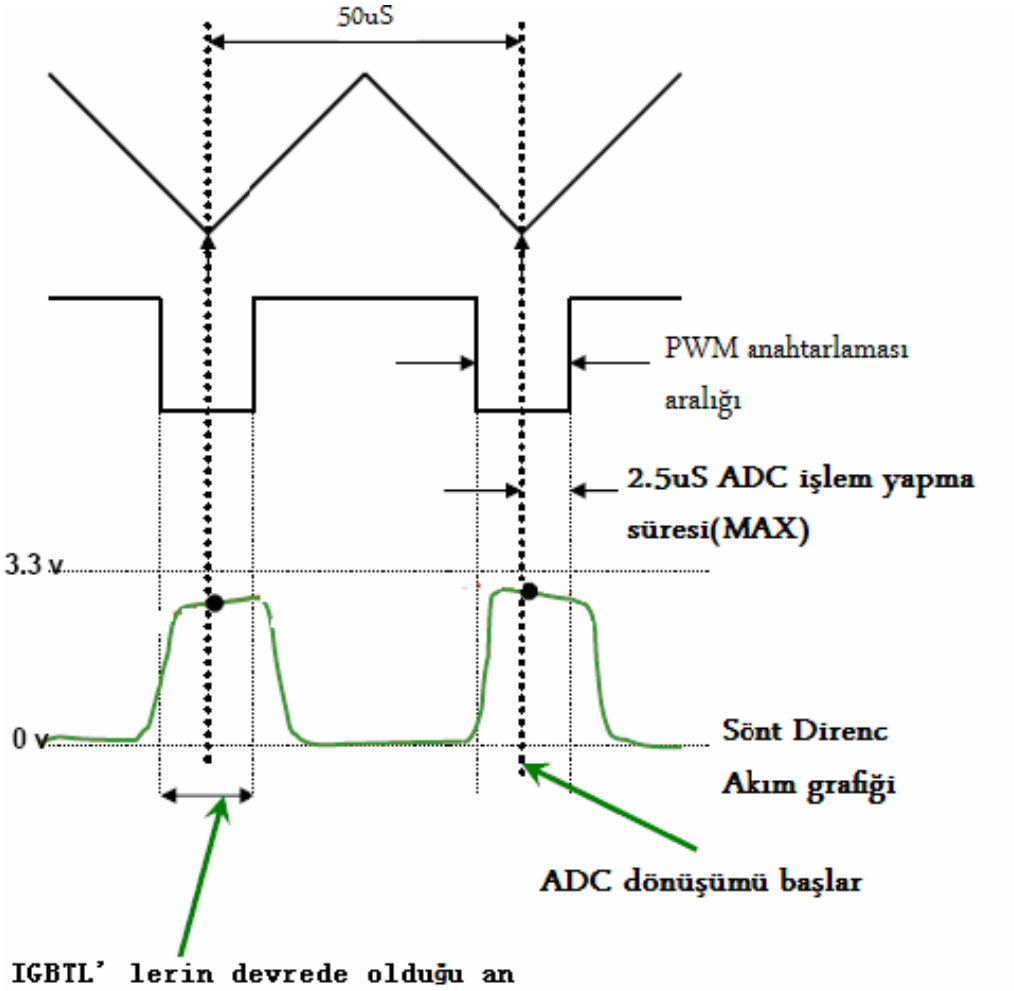
Akım ve hall sensör bilgileri sürme devresinde kullanılan geri besleme bilgileridir. Bu bilgilerin doğru ve sağlıklı bir şekilde mikroişlemciye ulaştırılabilmesi için ilave devreler tasarlanmıştır.

6.2.4.1 Karbon Dirençler (Akım Okuma)

Akım için IRAMS06UP60A sürücüsünden motora giden akım, 0.025 ohm direnç değerinde olan güç dirençleriyle ölçülmekte ve elde edilen milivolt(mv) seviyesindeki akım bilgileri opamplar ile kuvvetlendirilerek daha sağlıklı okunabilecek bir biçimde mikroişlemciye aktarılmaktadır. Şekil 6.7' de görülen akım ölçmede kullanılan karbon dirençler 4W güce, 0.025ohm dirence sahiptir.

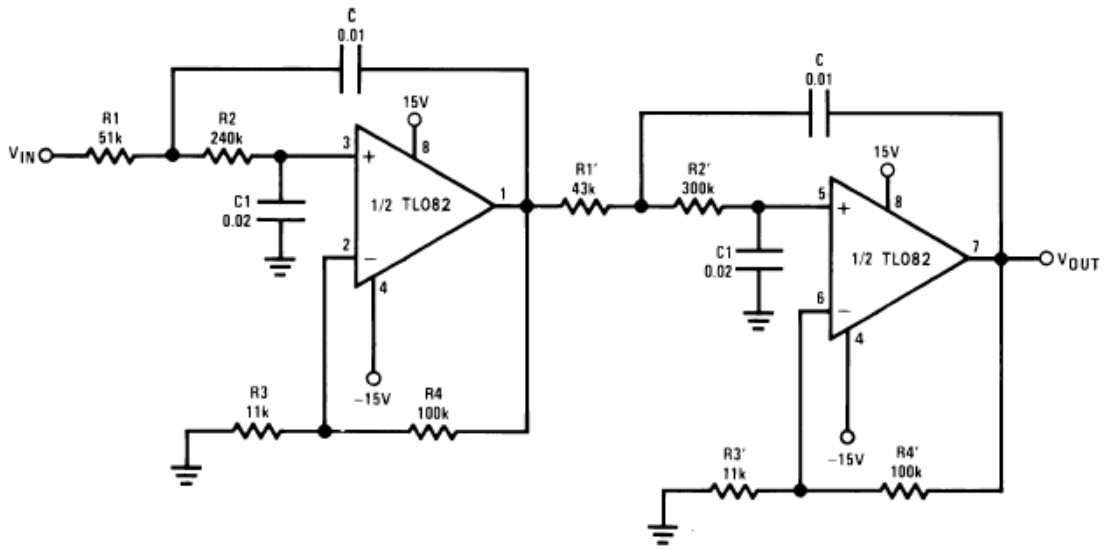
$I = \sqrt{\frac{P}{R}}$ formülüne göre karbon dirençlerin dayanabileceği maksimum akım 12.5A civarında bir seviyededir. Kullanılan motorun nominal yükteki akımının 3.6A olduğu düşünülürse; direncin uygun seviyede olduğu görülür. Nominal akım çeken bir motor için karbon dirençte oluşan gerilim 90mV olarak ölçülmektedir ve bu seviyedeki gerilim bir analog dijital dönüştürücü için çok küçük bir seviyedir. Maksimum 5V gerilime göre çalışan Dspic30 mikrodenetleyicisi için kullanılacak Opamp'ın kazancının 5000 / 90 = 55,5 olması gerekliliği hesap edilebilir. Opamp olarak TL082 entegresi kullanılmıştır.

Akım ölçümü yaparken dirençlerdeki gerilimin doğrultulması söz konusu değildir. Çünkü akım anlık olarak okunmaktadır. PWM sinyalleri üretilirken işlemcinin boşta kaldığı aralıklarda akım sürekli olarak ölçülmekte ve geri besleme olarak yeni PWM sinyallerinin üretilmesi sağlanmaktadır. Bu dönüşüm bu şekilde devam etmektedir.



Şekil 6.8. PWM Sinyalleri ve akım okuma işlemlerinin yapılma sırası

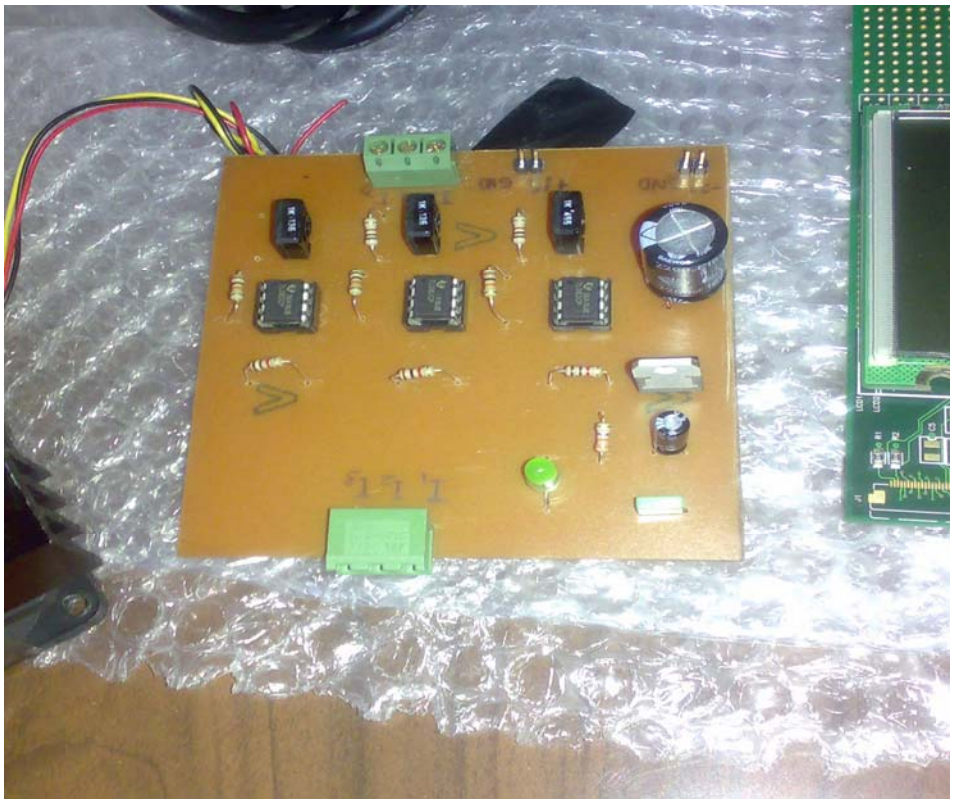
Şekil 6.8' de görüldüğü gibi akım bilgisinin alınabilmesi için güç modülündeki IGBT' lerin şönt dirençlere seri olanları devrede olması gereklidir. Bu anda akım dönüşümü başlamalıdır. Çünkü tam bu zamanda şönt dirençlerden akım geçer. Akım ölçümünün yapılabilmesi için bir zaman kısıtlaması vardır. Şekil 6.8' de sağ tarafta görülen ADC çevrim işleminde PWM anahtarlaması devreye girmek üzereyken işlemcinin bütün ADC çevrim işlemlerini bitirmesi gerekmektedir. Eğer işlemler bitirilemezse yazılımda hazırlanan kesmeler (interrupt) işlemi direkt sonlandıracak ancak akım sağlıklı bir şekilde ölçülememiş olacaktır. Şekil 6.9' da akım kuvvetlendirmek için gerekli opamp devresi görülmektedir.



Şekil 6.9 Akım kuvvetlendirme devresi şeması

6.2.4.2 Hall Sensör

Hall sensorde oluşan sinyaller direkt mikroişlemciye aktarılmıştır. Hall sensörün bilgi aktarımı A, B, C harfleriyle adlandırılan bilgi çıkışlarıyla sağlanmaktadır. A, B, C bilgi çıkışları arasında 120 şer derece faz farkı vardır. Motorun rotoruna bağlı ve hall sensöre ait bir mıknatıs sayesinde A, B, C çıkışlarına kare dalga bilgiler iletilmektedir. Bu şekilde motorun konumu ve hızı belirlenebilmektedir. İşlemci akım okuma işleminden sonra PWM anahtarlamasının olmadığı anda hall sensör bilgilerini okumuş ve böylece geri besleme bilgileri mikroişlemciye bildirilmiştir. Referans bilgilerle karşılaştırılarak PWM sinyallerinin üretimi sağlanmıştır. Akım kuvvetlendirme ve akım okumak için gerekli kuvvetlendirici devre Şekil 6.10’ da görülmektedir.

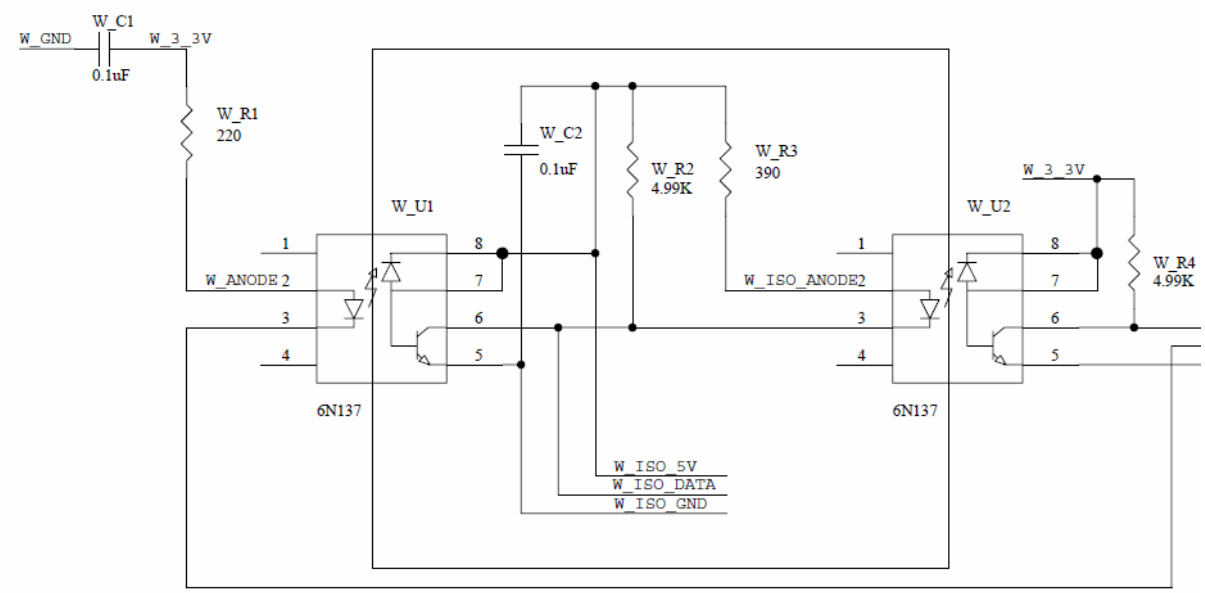


Şekil 6.10 Akım kuvvetlendirme devresi

6.2.5 Optoisolator Devresi

Optoizolatör devresinin amacı güç devresi ile sinyal devresinin birbiri arasındaki izolasyonunu sağlamaktır. Ayrıca üretilen PWM sinyallerinin mikroişlemciden direkt güç modülüne gitmesini önlenmektedir. Böylece güç modülünün anahtarlama akımları mikroişlemci tarafından sağlanmamış olur. Mikroişlemcinin üzerinden akım yükü alınmış olur.

Motorun çalışma esnasında oluşturacağı parazitler PWM sinyallerini bozucu etkide bulunduğundan dolayı yalıtım amaçlı 6N137 entegreleri kullanılmıştır. Bu entegre mikroişlemciden gelen PWM sinyallerini şekil 6.11’ de görüldüğü gibi ışık (led) sistemiyle



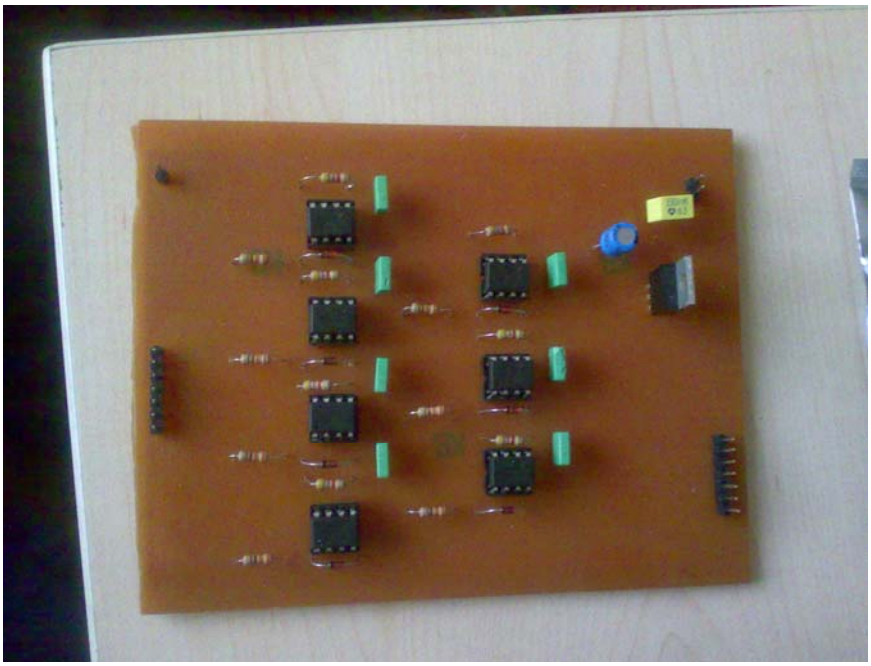
Şekil 6.11 Optoizolatör devresinin genel bağlantı şeması

yalıtıp çıkışa parazit bulunmayan doğru bilgiyi vermek amacıyla kullanılmaktadır. Yani bilgi transferi ledler sayesinde olmaktadır.

Şekil 6.12' de görülen optoisolatör devresinde 7 adet çok yüksek hızlı (10Mbit/s) cevap verebilme özelliğine sahip 6N137 devresi kullanılmıştır. Yapılan çalışmada anahtarlama frekansının "kHz" mertebesinde olması, 6N137 entegresinin hız bakımından sorunsuz olduğunu göstermektedir.

GİRİŞ	ENABLE	ÇIKIŞ
H	H	L
L	H	H
H	L	H
L	L	H

Tablo 6.1 6N137 Optoizolator Doğruluk Tablosu



Şekil 6.12 Optoizolatör Devresi

6.2.6 Tez Çalışmasında Kullanılan SMSM Etiket Bilgileri

Bu tez çalışmasında 24V, 3 fazlı SMSM kullanılmıştır. Motora ait etiket değerleri Tablo 6.2' de verilmiştir.

Tablo 6.2 Motor Etiket Bilgileri

Stator Direnci	0.79 ohm
Stator İndüktansı	1.17mV
Sabit Mıknatıs Akısı	17.666 m (volt.s/rad)
Kutup Sayısı	2p=10
Sigmoid Fonksiyon Eğimi	a=4
Kayma Kazancı	k1=1.2
Faz Gerilimi	3ph 24V AC
Faz Akımı	3.6A
Frekans Aralığı	1-250Hz
Nominal Hız/ Maksimum Hız	2500rpm/ 3000rpm

6.2.7 ICD2 Programlayıcı Devresi

ICD2; bilgisayarda hazırlanan yazılımın mikroişlemciye yüklenmesi görevini yerine getiren bir donanım parçasıdır. Yüksek hızlı program yükleyebilme özelliğine sahip ICD2

programlayıcısı Microchip firmasının ürettiği bir Programlayıcı/Derleyicidir. ICD2 Programlayıcısı; sistem devredeyken mikroişlemciye program yükleyebilme özelliğine sahiptir. Bu tezde yazılımın hazırlanması aşamasında MPLAB C30, Hi-Tech DspicC ve MicroC programları kullanılmıştır.

6.3 FOC Yöntemi Yazılımı

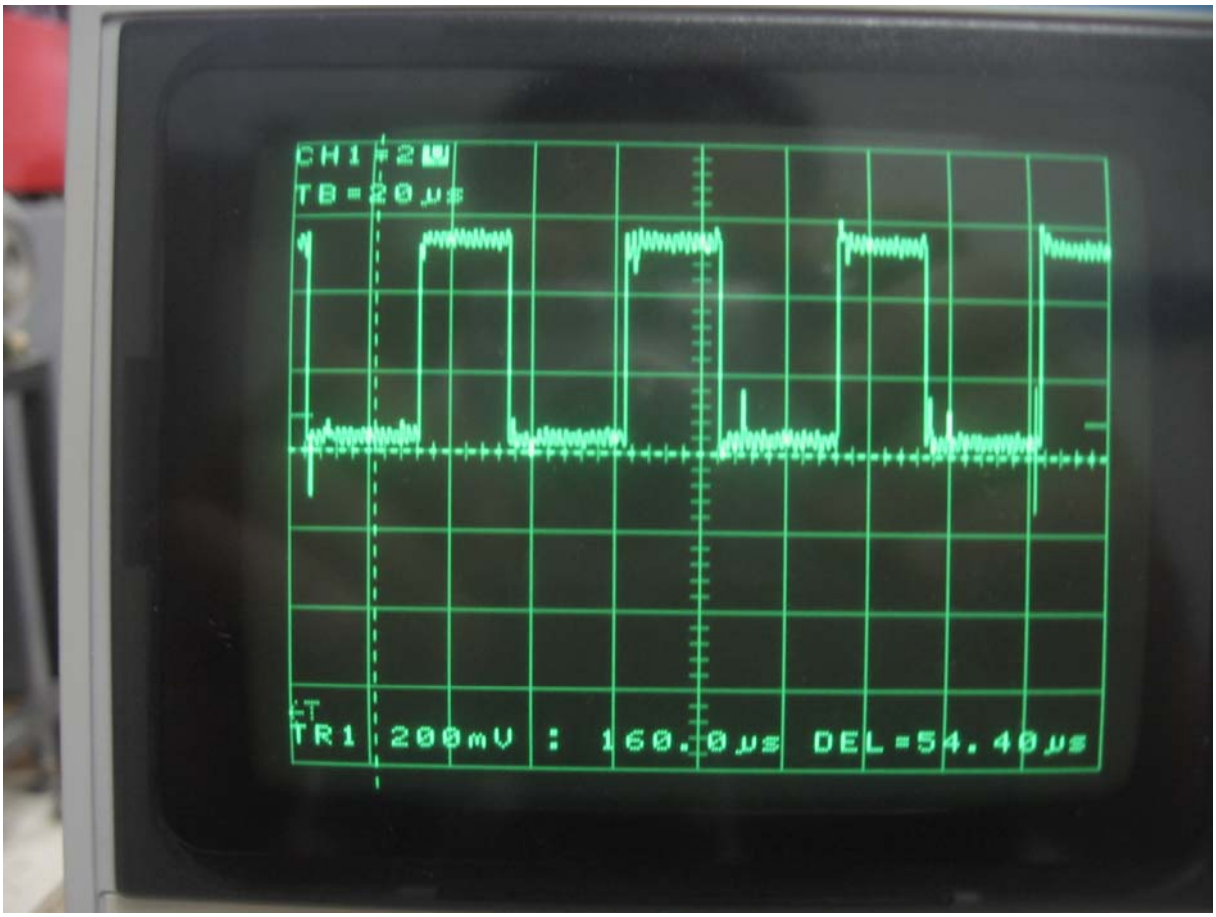
AC motor için kullanılan programın tasarlanabilmesi için çeşitli algoritmaların oluşturulması gerekmektedir. Bu yazılımın gerçekleşmesi için 3 faz AC servo motorun çalışma mantığının bilinmesi gerekir. Öncelikle Alan Yönlendirmeli Kontrol yöntemi yapılandırmasında Clarke ve Park dönüşümleri için gerekli yüksek işlem yapabilme özelliğine sahip bir programlama yapılmıştır. Elde edilen dönüştürülmüş akım bilgileri ile oluşturulacak PWM sinyallerinin 3 faz sinüzoidal çıkış sağlayacak mantıkta çalışması sağlanmıştır. PWM sinyalleri geri besleme elemanlarından sürekli bir şekilde beslenmiş ve referans bilgilerle geri besleme bilgileri karşılaştırılarak istenen PWM sinyalleri ve sonucunda istenen 3 fazlı sinüzoidal gerilim elde edilmiştir.

DsPIC kontrol devresinde bulunan POT ile motorun hızı ve yönü ayarlanmıştır.

6.4 Deneysel Çalışmanın Değerlendirilmesi

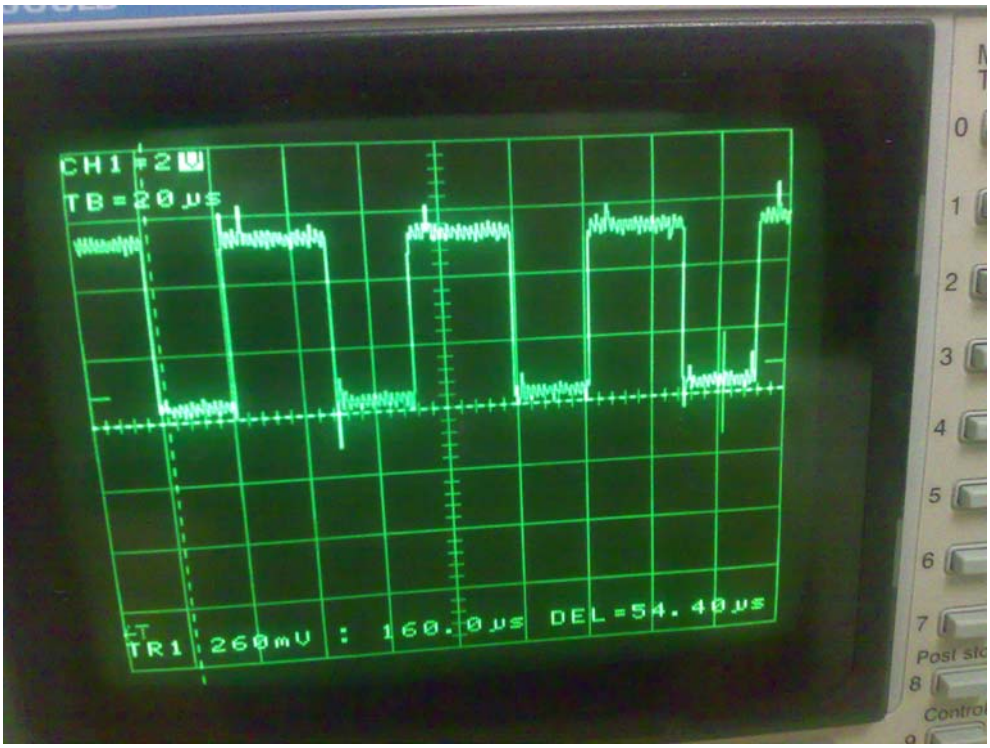
Yapılan çalışmada devrenin girişinde ilk olarak AC 220V tek faz şebeke gerilimi işlenmek amacıyla 24V DC gerilime dönüştürülmüştür. Bu gerilim IRAMS güç modülünün gerilim girişine uygulanmış ve PWM anahtarlaması ile sinüzoidal gerilime dönüştürülmüştür.

Şekil 6.13’ teki grafik; bir PWM sinyalinin optoizolatör girişinde elde edilen sinyalini oluştururken, osiloskopta her kare 20us’ yi göstermektedir. Grafikten bir peryodun 50us olduğu görülmektedir. fxT=1 formülünden frekans 20kHz civarında elde edilir. Bu değer mikroişlemcinin PWM anahtarlamasının maksimum frekansıdır.



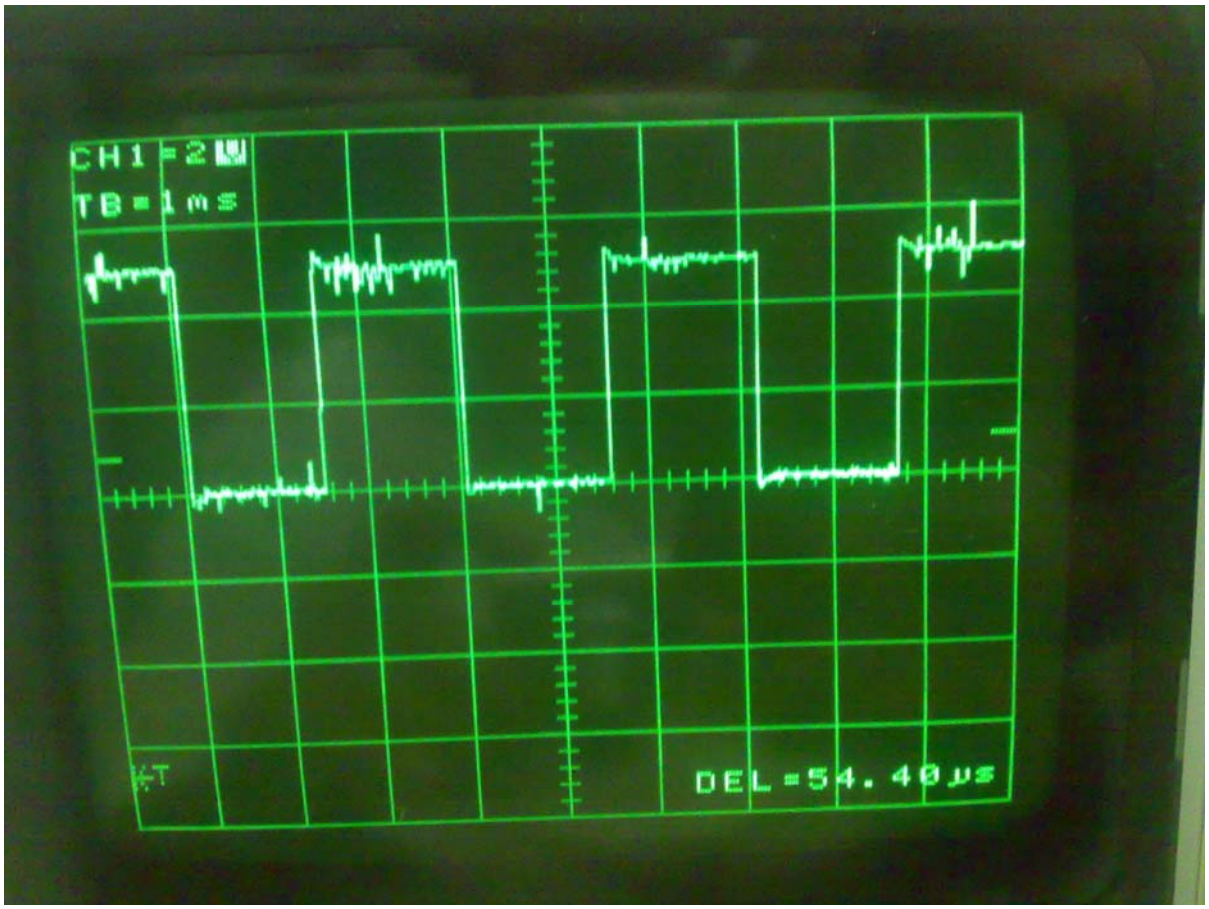
Şekil 6.13 PWM sinyallerinin optoisolatör girişindeki grafiği

Mikroişlemcide üretilen PWM sinyalleri terslenmiş olarak üretilmektedir. Mikroişlemci çıkışında Şekil 6.13' ten görüldüğü gibi 5V luk kare dalga PWM gerilimi söz konusu iken bu değer optoisolatör çıkışında da aynen korunmuştur. Şekil 6.14' te PWM sinyallerinin optoisolatör çıkışındaki grafiği görülmektedir. Motorun hızının değiştirilmesi ile PWM sinyallerinin darbe genişliklerinin değiştiği deneysel çalışma esnasında tespit edilmiştir. Motorun hızının arttırılması ile PWM sinyallerinin darbe genişliğinin osiloskoptan arttığı görülmüştür. Aynı şekilde motor hızının azaltılması ile de darbe genişliklerinin azaldığı tespit edilmiştir. Motora yüklenme esnasında motor hızının sabit tutulabilmesi için PWM sinyallerinin darbe genişliği artırılmaktadır. Bu tez çalışmasında motor kontrolünde Alan Yönlendirmeli Kontrol uygulanmışken referans bilgilerin motora uygulanması için PID kontrol uygulanmıştır.



Şekil 6.14. PWM sinyallerinin optoisolatör girişindeki grafiği

Bu çalışmada motorun hız ve konum bilgisinin alınabilmesi için hall sensör kullanılmıştır. Hall sensörün çıkışları birbirine 120’ şer derece faz farkı olan 3 sinyalden oluşmaktadır. Rotorun her bir tur dönüşünde hall sensör çıkışlarına altı adet sinyal gönderilir. Çünkü hall sensöre ait olan mıknatıs 2p =12, p= 6 kutupludur. Bu sebeple rotor dakikada 3000 devir dönerse hall sensör çıkışları da 18000 kere uyarılmış olur. Bu düşünceyle hall sensör sinyallerinin frekansı hıza göre hesaplanabilir veya motorun hızı, hall sensör frekansına göre hesaplanabilir. Motorun maksimum hızının 3000d/dk civarında olduğu düşünülürse maksimum hızda hall sensör sinyallerinin frekansının 300Hz mertebesinde olması gerektiği hesap edilir. Buradan; elde edilen hall sensör sinyallerinin yaklaşık olarak 0-300Hz arasında olması gerektiği anlaşılır. Motorun çalışması esnasında hall sensör çıkışlarından Şekil 6.15’ te görülen grafik elde edilmiştir.

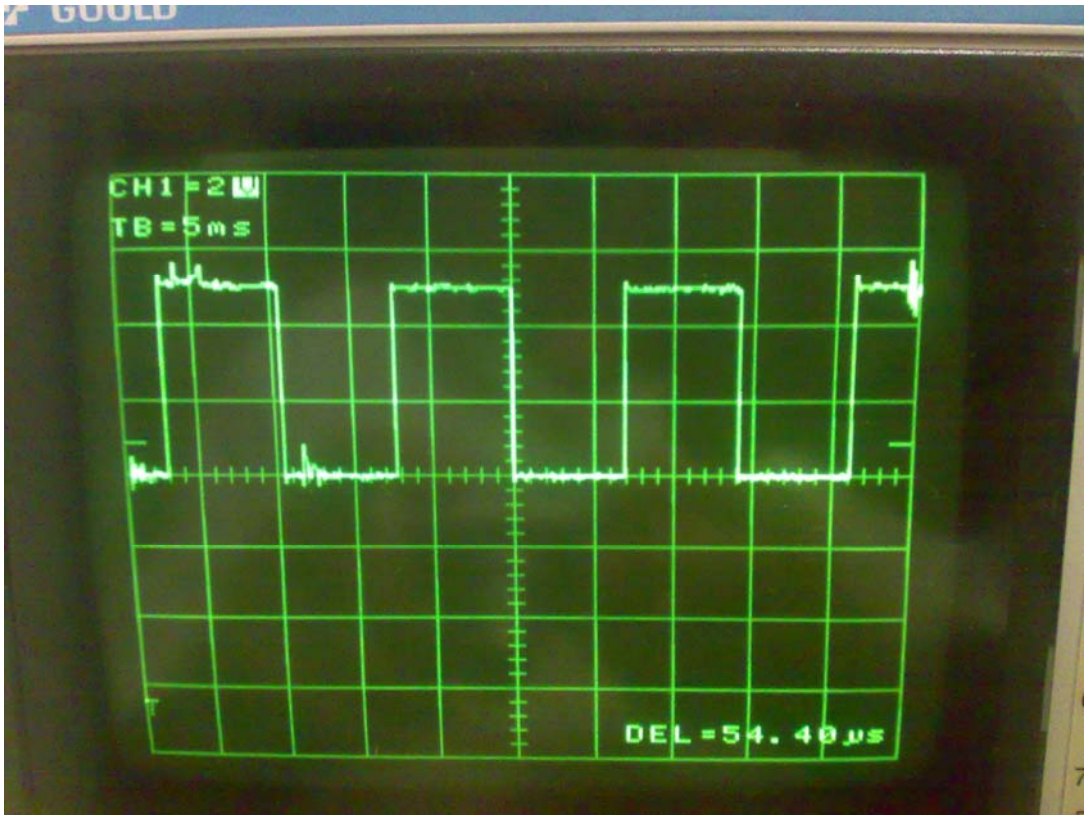


Şekil 6.15 Hall sensör çıkış sinyali grafiği

Şekil 6.15' te görüldüğü gibi bir peryot 3.2 ms olarak tespit edilebilir. Buradan hall sensör çıkışının frekansı f=1000 / 3.2 = 312.5 Hz olarak tespit edilebilir. Bu sinyal motor maksimum hızda iken elde edilmiştir. Bu frekanstan motorun deneysel çalışmadaki maksimum hızı hesaplanırsa;

$n = \frac{312.5}{6} x60 = 3125$ d/dk olarak hesaplanır. Elde edilen diğer bir hall sensör sinyalinden bu şekilde motorun hızı hesap edilebilir. Şekil 6.16' da görülen grafiğe göre motorun hızı hesap edilmek istenirse ilk önce sinyalin frekansı hesap edilmelidir. Şekle göre sinyalin frekansı 14 ms' dir. Buradan frekans f = 1000 / 14 = 71,43 Hz bulunur. Motor devri;

$n = \frac{71,43}{6} x60 = 714,3$ d/dk olarak hesap edilir.

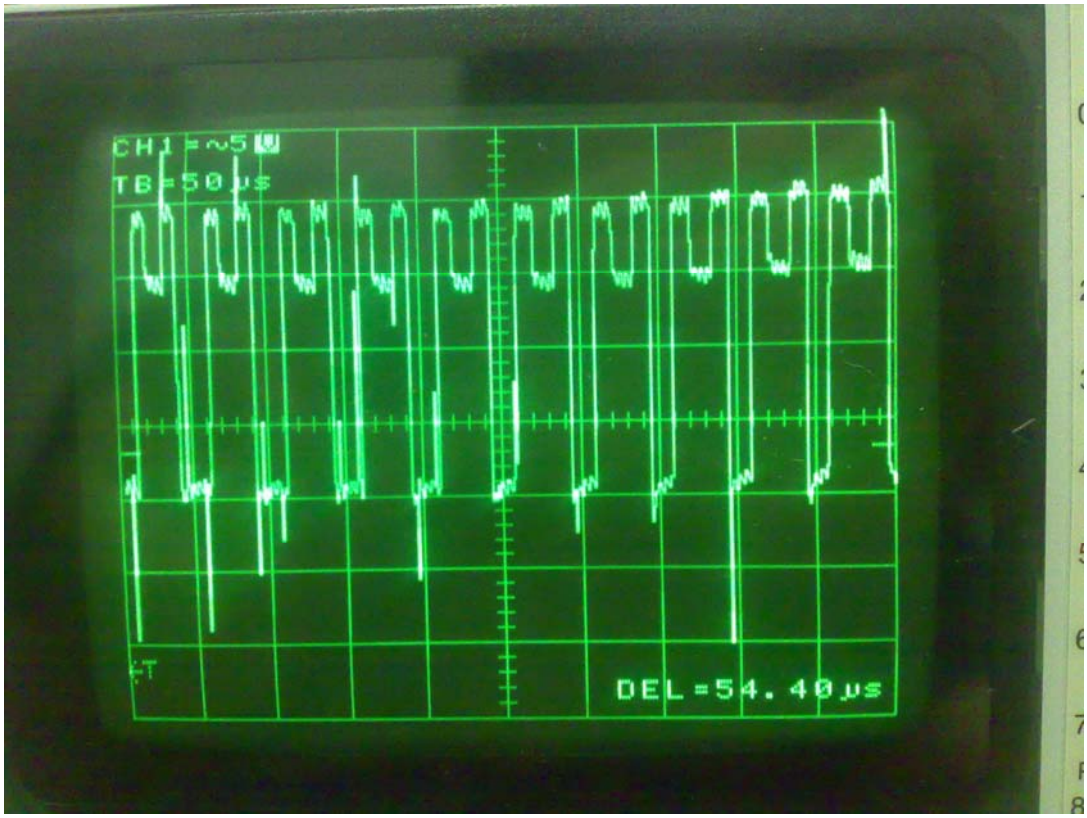


Şekil 6.16 Hall sensör çıkış sinyali grafiği

Motorun hızı grafikleri yorumlayarak yukarıda anlatıldığı gibi hesap edilebilirken mikroişlemcinin motor hızını hesaplaması başka bir mantıkla yapılmıştır. Mikroişlemci, programlama algoritmasına göre motor hızını hesaplamak için Hall sensörün B çıkışını kullanmaktadır. Mikrodenetleyicinin Timer3 özelliği kullanılarak söz konusu Hall sensör çıkışından okunan bilgi, 1 saniye boyunca üretilen yükselen kenarların sayılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Hall sensörün 12 kutuplu olması Hall sensörün 1 turda 12 kere çıkış vermesi demektir. Buradan 1 saniyede kaç yükselen kenar sayıldıysa bu sayının 12' ye bölünmesi, saniyedeki motor tur sayısını vermiştir. Böylece motor hızı bulunmuştur.

Rotor pozisyon hesabının yapılması 3 adet hall sensör çıkışının hepsinin karşılaştırılması ile yapılır. A, B, C çıkış bilgilerinin sırası ile mikroişlemciye gönderilmesi ve bu sıranın mikroişlemci tarafından hesap edilmesi ile pozisyon bilgisi öğrenilmiştir.

Şekil 6.17’ de PWM anahtarlama frekansının hesap edilmesi amacı ile alınan grafik motor maksimum hızda dönerken kayıt edilmiştir. Bu grafik motorun faz akımının ölçülmesinden elde edilmiştir. Şekilde bir faza ait sinüzoidal dalganın anahtarlama ile oluşturulması görülmektedir. Motorun maksimum hızda dönmesi anahtarlama frekansının en yüksek seviyede olması demektir. Bu sebeple bu tez çalışmasında uygulanan maksimum anahtarlama frekansı olan 20kHz değeri bu grafikten görülmelidir. Grafikten peryot hesap edilirse 50us değeri elde edilmiştir. Buradan frekans hesabından PWM anahtarlama frekansı 20kHz bulunur.



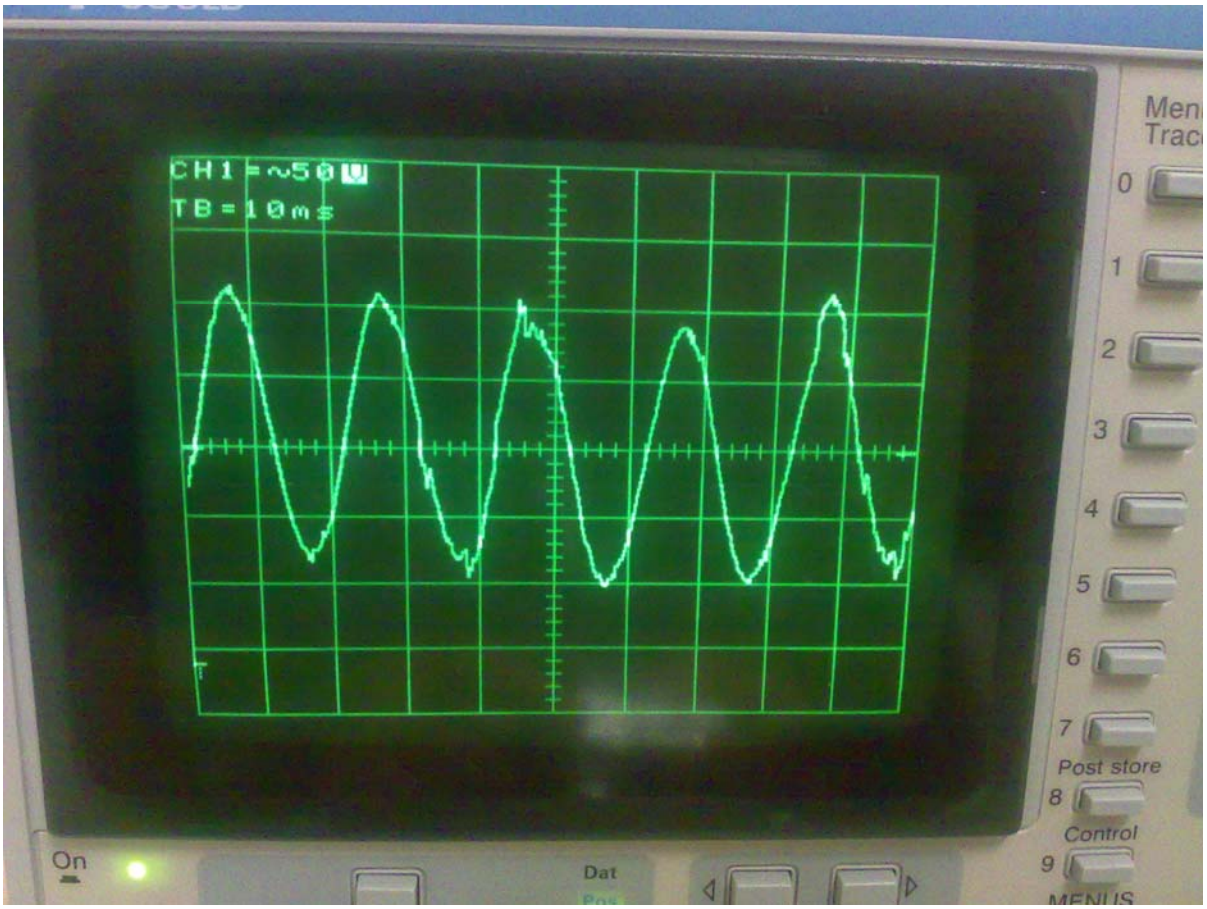
Şekil 6.17 Motor fazının sinüzoidal akımının PWM ile oluşturulmasından bir kesit

Şekil 6.18’ de örnekleme direncinden ölçülen motorun faz akımının sinüzoidal bir şekilde üretildiği görülmektedir. Maksimum 20kHz PWM anahtarlama frekansıyla oluşturulan sinüzoidal sinyal çok küçük bozulmalarla düzgün bir şekilde oluşturulmuştur. Kontrol edilen motor 2p=10 kutupludur. 10 kutuplu motorun yaklaşık olarak 3000 d/dk hızla dönmesi için gerekli frekans;

$$f = \frac{pxn}{60} \tag{6.1}$$

formülünden hesap edilir. Buradan f = 250Hz bulunur. Diğer bir deyişle; motora uygulanan gerilimin frekansı maksimum 250 Hz olmalıdır ki motor 3000d/dk hızla dönebilsin anlamı çıkarılabilir.

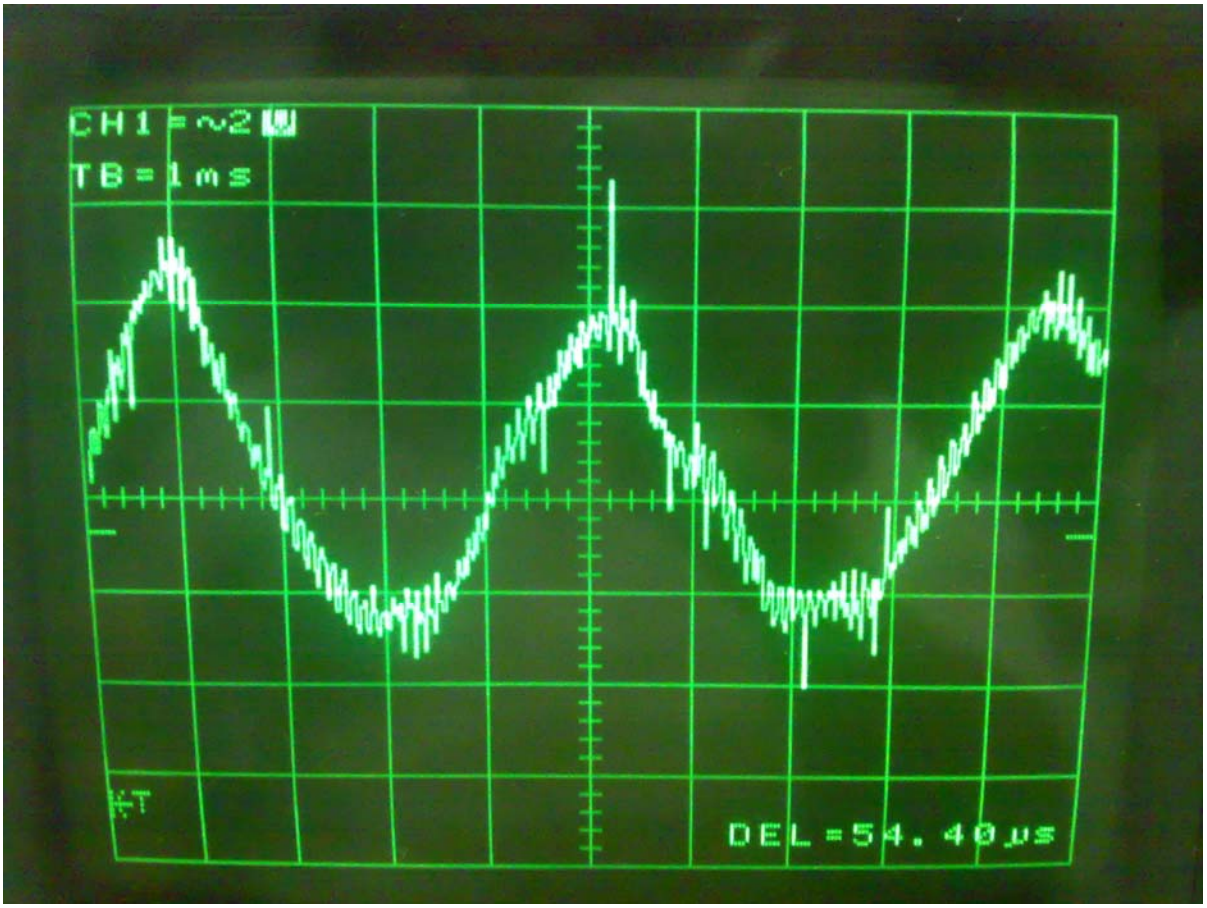
Şekil 6.18' deki grafiğe göre motora uygulanan gerilimin frekansı 50 Hz olarak hesaplanmıştır. Buradan Formül 6.1' den motorun hızının 600d/dk olduğu bulunmuştur.



Şekil 6.18 Motorun fazlar arası gerilimi

Şekil 6.19' da motora uygulanan sinüzoidal gerilim görülmektedir. Oluşturulan gerilimde PWM anahtarlama darbeleri görülmektedir. Bu grafik, motor maksimum hızda dönerken elde edilmiştir. Yukarıda hesap edildiği şekilde motorun maksimum hızında motor

geriliminin frekansı 250Hz mertebesinde olmalıdır. Şekil 6.19’ da görüldüğü gibi uygulanan gerilim frekansı 250 Hz olarak hesap edilebilir.



Şekil 6.19 Motor fazlar arası gerilimin PWM anahtarlaması ile oluşturulması

BÖLÜM-VII SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1 Sonuçlar ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu çalışmada sürekli mıknatıslı senkron motorların kontrolü üzerine durulmuştur. Kontrol yöntemi olarak Alan Yönlendirmeli Kontrol tipi seçilmiştir. Alan Yönlendirmeli kontrole göre yapılan çalışmada geri besleme elemanlarından alınan sinyallere göre motor kontrolü yapılmıştır.

Yapılan çalışmada motor çalışması için tek faz şebeke geriliminden faydalanılmıştır. 220V AC gerilim doğrultulmuş ve üç faz sinusoidal gerilime dönüştürülmek üzere güç modülü kısmına aktarılmıştır. Güç modülü olarak tümleşik yapıda 6 adet IGBT barındıran IRAMS modülü kullanılmıştır. Gerilimin 3 faz sinüs dalga şekline çevrilmesi için Uzay Vektör PWM tekniği kullanılmıştır. Bu teknikte güç modülüne gelen DC gerilim, PWM anahtarlama sinyalleriyle 3 Faz Sinüs dalgaya çevrilmiştir. Böylece motorun ihtiyacı olan 3 fazlı sinüs dalga üretilmiştir.

Motorun kontrolü için geri besleme elemanları olarak motorun akım bilgisini belirten şönt dirençlerden ve motorun konumunu belirten hall sensörden yararlanılmıştır. Akım bilgisini işlemcinin ölçebileceği seviyedeki gerilime yükseltebilmek için Opamp devresi kullanılmıştır.

Sistemin güç kısmı ve zayıf akım kısmı birbirlerinden soyutlanmak zorundadır. Güç kısmındaki bir parazit zayıf akım sinyallerini bozucu etki yapacağından bu çalışmada optoizolatör kullanılmıştır. Böylece güç kısmının şasisi zayıf akımdan ayrılmıştır. Optoizolatör olarak yüksek hıza sahip olan 6N137 entegresi kullanılmıştır. Ayrıca optoizolatör sayesinde güç modülüne giden PWM sinyallerinin akımı mikroişlemci üzerinden akmamaktadır.

Sistemin kontrolü için matematiksel olarak Bölüm IV' te anlatılan Park, Clarke ve Ters Park gibi dönüşümler kullanılmıştır. Park ve Clarke dönüşümlerinin kaynağı olan akım bilgileri şönt dirençle ölçülüp çevrimler yapılmış ve en sonunda Ters Park dönüşümü kullanılarak PWM tekniğine uygun değerler hesaplanarak çıkış sinyalleri elde edilmiştir.

Yapılan uygulamada sürekli mıknatıslı senkron motorun kontrolü için girilen referans bilgileri PID kontrol ile kontrol edilmiştir. Motora uygulanan 3 faz gerilim 0-250 Hz aralığında değişmektedir. PWM sinyalleri ile güç modülünün anahtarlanması maksimum 20kHz frekans ile yapılmıştır. 20kHz anahtarlama frekansında motor 3125 d/dk hızla dönebilmiştir. Motorun hızı bir potansiyometre yardımıyla kontrol edilmiştir. Bu şekilde motor ileri ve geri olarak çalıştırılmıştır. Motor hızının arttırılmasıyla PWM sinyallerinin darbe genişliğinin büyüdüğü osiloskoptan takip edilerek gözlenmiştir. Ayrıca motorun hızı artarken gerilim dalga boyunun da olağan bir şekilde arttığı belirlenmiştir.

Kullanılan motor kontrol tekniği sayesinde sıfıra yakın hızlarda dahi kontrol edilebilmiştir. Motora yüklenildiğinde geri besleme tekniğinin çalıştığı gözlenebilmiştir. Yüklenme esnasında osiloskoptan takip edilen PWM sinyallerinin darbe genişliğinin arttığı tespit edilmiş ve motorun sabit hızda kalabilmesi geri besleme ile sağlanmıştır.

Motora uygulanan 3 faz gerilimin dalga şeklinin istenen sinüzoidal dalga şekline uygun olduğu saptanmıştır. Küçük sapmalar haricinde sinüzoidal akım üretilebilmiş ve motor bu akımla beslenmiştir.

7.2 Öneriler

Sürücü tasarımında alan yönlendirmeli kontrol yöntemi, ileri teknoloji tasarımlar için en önemli basamaklardan biridir. Bundan dolayı bu sürücü tasarımının geliştirilmesi, yine bu yöntem temel alınarak geliştirilmelidir. Motorun daha hızlı bir şekilde kontrol edilebilmesi için daha yüksek frekans aralığında çalışabilen mikroişlemcilerin kullanılması performansı arttıracaktır. Ayrıca bu şekilde daha düzgün bir sinüzoidal akım üretilmiş olacaktır.

Geri besleme elemanlarının kullanılması maliyeti çok yükseltmektedir. Bu amaçla yeni bir kontrol yöntemi olan sensörsüz kontrol ile motor kontrolünün gerçekleştirilmesi maliyetin düşmesine büyük katkı sağlayacaktır.

PWM anahtarlama sinyalleri ile oluşturulan 3 faz sinuzoidal gerilim harmonikler oluşturmaktadır. Özellikle yüksek güçlü SMSM' lerin şebekeye aktaracağı harmoniklerin büyük sorunlar oluşturacağı düşünülürse harmonik eliminasyon sisteminin devreye ilave edilmesi faydalı olacaktır.

BÖLÜM-VIII KAYNAKLAR

Peter, V., (1996), "Electrical Machines And Drives-A Space-Vector Theory Approach"; Oxford, Usa

Surong, H.,Aydin M, Lipo T., (2001), "Torus Concept Machines:Pre-Prototyping Design Assessment For Two Major Topologies"

Bakan, A. F., (2002), "Asenkron Motorda Doğrudan Moment Kontrolünün İncelenmesi Ve Gerçekleştirilmesi", Doktora Tezi, Ytü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Bizot, C., Brottes, J., Lungeanu, M., Poulsen, B., Séra, D. Ve Sørensen, M. B., (2003), "Sensorless Control For SMSM", Power Electronics And Drives, Institute Of Energy Technology, Aalborg University, Denmark.

Ceylan, K., (1987), "Daimi Mıknatıslı Senkron Motor", Yüksek Lisans Tezi, İtü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Florence, L.,(2004), "Design, Optimization And Comparison Of Permanent Magnet Motors For A Low-Speed Direct-Driven Mixer" Royal Institute Of Technology Department Of Electrical Engineering Electrical Machines And Power Electronics Stockholm

Diril, O., (1990), "Daimi Mıknatıslı Senkron Makine", Yüksek Lisans Tezi, İtü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Slobodan N., (2007), "Digital Control Of Electrical Drives" The University Of Belgrade, Springer

Adnanes, A. K., (1991), "Torque Analysis Of Permanent Magnet Synchronous Motors", Ieee, İn Proc. Pesc, 695-701.

Ohm, D.Y., (1997), " Dynamic Model Of Pm Synchnorous Motors", Drivetech, Inc., Blacksburg, Virginia.

Aydin, M., Surong, H., Thomas A., Lipo, F.,(2003), "Performance Evaluation Of An Axial Flux Consequent Pole Pm Motor Using Finite Element Analysis"

Pillay, P. And Krishnan, R., (1989), "Modeling, Simulation, And Analysis Of Permanent-Magnet Motor Drives , Part I: The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive" Ieee Transaction On Industry Applications, Vol. 25, No. 2, Mar./April 1989 Pp. 265-273

Rashid, M. H., (1993), "Power Electronic: Circuits, Devices And Applications", 2nd Edition Isbn 0 13 334483 5 , Usa, Prentice Hall .Pp(16-17,)

Adam, A., A., (2007), "Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Moment Dalgalanması Ve Gürültünün Azaltılması", Yıldız Teknik Üniversitesi F.B.E Doktora Tezi

Luukko, J., Pyrhönen, J., (1998), "Selection Of The Flux Linkage Reference İn A Direct Torque Controlled Permanent Magnet Synchronous Motor Drive", Ieee, İn Proc. Amc '98-Coımbra, 198-203.

Buzcu İ., E., (2005), "Daimi Mıknatıslı Senkron Motorun Rotor Alan Yönlendirmeli Kontrolü Ve Pasif Filtre İle Harmoniklerin Azaltılması", Yıldız Teknik Üniversitesi F.B.E Yüksek Lisans Tezi

Kurt Ü, (2006), "Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Makineler İçin Yeni Tasarım Modeli Geliştirme", Ondokuzmayıs Üniversitesi, F.B.E, Doktora Tezi

Taskafa Ş, (2006), "Asenkron Motorların Yapay Sinir Ağları İle Vektör Kontrolü", Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi

Huang, S., Aydin, M., Lipo, T. A., (2002), "A Direct Approach To Electrical Machine Performance Evaluation: Torque Density Assessment And Sizing Optimization"

http://www.renishaw.com

http://www.fairchildsemi.com

http://www.microchip.com

http://www.ti.com

EKLER

EK-I Mikrodenetleyici Yazılımı (C Dili)

```
#include "p30f3010.h"
#include "svm.h"

//-------------------------ayarlama-----------------------
_FOSC(CSW_FSCM_OFF & XT_PLL16);
_FWDT(WDT_OFF);
_FBORPOR(PBOR_ON & BORV_20 & PWRT_64 & MCLR_EN);
//--------------------------------------------------------------------

//
// ----------------------|---------------------------------
//

typedef signed int SFRAC16;

#define CLOSED_LOOP      //
#undef  PHASE_ADVANCE    //

#define FCY  20000000     // kristal xtal = 5Mhz; PLLx16 -> 20 MIPS
#define FPWM 20000                  //
#define _10MILLISEC      10  //
                    //
#define _100MILLISEC 100 //

//
#define FAZ_0    57344
#define FAZ_1    ((FAZ_0 + 65536/6) % 65536)
#define FAZ_2    ((FAZ_1 + 65536/6) % 65536)
#define FAZ_3    ((FAZ_2 + 65536/6) % 65536)
#define FAZ_4    ((FAZ_3 + 65536/6) % 65536)
#define FAZ_5    ((FAZ_4 + 65536/6) % 65536)

#define MAX_FAZ_ADV_DEG 40  //
#define MAX_FAZ_ADV                     (int)(((float)MAX_FAZ_ADV_DEG / 360.0) * 65536.0)

#define HALLA  1          //
#define HALLB  2          //
#define HALLC  4          //
#define duz         0                   //
#define ters        1                   //
#define SWITCH_S2       (!PORTCbits.RC14) //



#define minperiyot          313                 //
#define maxperiyot          31250    //

//
//
#define SFloat_To_SFrac16(Float_Value)   \
       ((Float_Value < 0.0) ? (SFRAC16)(32768 * (Float_Value) - 0.5) \
       : (SFRAC16)(32767 * (Float_Value) + 0.5))
```

```
void InitADC10(void);     //
void InitMCPWM(void);  //
                    //
void InitTMR1(void);       //
                    //
void InitTMR3(void);       //
                    //
void InitUserInt(void);      //
                    //
void InitICandCN(void);   //
                    //
void motorstart(void);       //
                    //
                    //
void motorstop(void);       //
                    //
void hizkontrol(void);     //
                        //
void Guc_isleme(void); //
                        //
void ChargeBootstraps(void); //
                        //
int FAZ_Degeri[6] __attribute__((far,section(".const,r")))=
{FAZ_0, FAZ_1, FAZ_2, FAZ_3, FAZ_4, FAZ_5};


int FAZ_Ayar = 4100;


struct
{

}Flags;

unsigned int FAZ;
signed int FAZInc; //
signed int FAZAdvance; /
unsigned int HallValue;     //
unsigned int sektor;  //
unsigned int son_sektor; //
unsigned int motor_bayilma_say = 0; //

char tablo[] = {-1,4,2,3,0,5,1,-1};

unsigned char akim_yon;  //
unsigned char gerekli_yon;            //

unsigned int eski_yakalama, gercek_yakalama, Period;

SFRAC16 _minperiyot = minperiyot - 1;

SFRAC16 olculen_hiz, referans_hiz;

SFRAC16 kontrol_cikis = 0;


SFRAC16 Kp = SFloat_To_SFrac16(0.1);   // P
```

```
SFRAC16 Ki = SFloat_To_SFrac16(0.01);  // I
SFRAC16 Kd = SFloat_To_SFrac16(0.000); // D

SFRAC16 kontrol_farki[3] \
      __attribute__((__space__(xmemory), __aligned__(4)));
SFRAC16 PID_katsayilari[3]   \
      __attribute__((__space__(ymemory), __aligned__(4)));

//
SFRAC16 _MAX_PH_ADV = MAX_PH_ADV;

/*********************************************************************

*********************************************************************/

void __attribute__((__interrupt__)) _T1Interrupt (void)
{
          IFS0bits.T1IF = 0;
          Period = gercek_yakalama - eski_yakalama;  //


          if (Period < (unsigned int)minperiyot)  // MIN PERIOD or 6000 rpm
                    Period = minperiyot;
          else if (Period > (unsigned int)maxperiyot) // MAX PERIOD or 60 rpm
                    Period = maxperiyot;


          FAZInc = __builtin_divud(512000UL, Period);        //

          __asm__ volatile("repeat #17\n\t"
               "divf %1,%2\n\t"
               "mov w0,%0" : /* output */ "=g"(olculen_hiz)
                         : /* input */ "r"(_minperiyot),
                                   "e"(Period)
                         : /* clobber */ "w0");

          if (akim_yon == ters)
                    olculen_hiz = -olculen_hiz;

          hizkontrol();

#ifdef FAZ_ADVANCE


#if !defined(__C30_VERSION__) || (__C30_VERSION__ < 200) || defined(TEST_ASM)
      {  register int wreg4 asm("w4") = _MAX_PH_ADV;
         register int wreg5 asm("w5") = olculen_hiz;

         asm volatile("mpy %0*%1, A" :
                              : "r"(wreg4), "r"(wreg5));
         asm volatile("sac A, %0" : "=r"(FAZAdvance));
      }
#else
      {  register int a_reg asm("A");

         a_reg = __builtin_mpy(_MAX_PH_ADV, olculen_hiz, 0,0,0,0,0,0);
         FAZAdvance = __builtin_sac(a_reg,0);
      }
```

```
#endif

#endif

        motor_bayilma_say++;
   if ((motor_bayilma_say % _10MILLISEC) == 0)
        {
                Guc_isleme();
        }
        else if (motor_bayilma_say >= _100MILLISEC)
        {
                motorstop(); //
        }
        return;
}

void __attribute__((__interrupt__)) _CNInterrupt (void)
{
        IFS0bits.CNIF = 0;
        HallValue = (unsigned int)((PORTB >> 3) & 0x0007);
        sektor = tablo[HallValue];


        if (sektor != son_sektor)
        {

                motor_bayilma_say = 0;


                if ((sektor == 5) || (sektor == 2))
                        akim_yon = ters;
                else
                        akim_yon = duz;


                if (gerekli_yon == duz)
                {
                        FAZ = FAZValues[sektor];
                }
                else
                {

                        FAZ = FAZValues[(sektor + 3) % 6] + FAZOffset;
                }
                son_sektor = sektor;
        }

        return;
}

/*********************************************************************

*********************************************************************/

void __attribute__((__interrupt__)) _IC7Interrupt (void)
{
        IFS1bits.IC7IF = 0;          //
        HallValue = (unsigned int)((PORTB >> 3) & 0x0007);          //
```

```
	sektor = tablo[HallValue];//


	if (sektor != son_sektor)
	{

		eski_yakalama = gercek_yakalama;
		gercek_yakalama = IC7BUF;
		IC7BUF;
		IC7BUF;
		IC7BUF;


		motor_bayilma_say = 0;


		if ((sektor == 3) || (sektor == 0))
			akim_yon = ters;
		else
			akim_yon = duz;


		if (gerekli_yon == duz)
		{
			FAZ = FAZValues[sektor];
		}
		else
		{

			FAZ = FAZValues[(sektor + 3) % 6] + FAZOffset;
		}
		son_sektor = sektor; // Update last sektor
	}

	return;
}

/*****************************************************************************
  *****************************************************************************/

void __attribute__((__interrupt__)) _IC8Interrupt (void)
{
	IFS1bits.IC8IF = 0;		//
	HallValue = (unsigned int)((PORTB >> 3) & 0x0007);
	sektor = tablo[HallValue];

	if (sektor != son_sektor)
	{
		motor_bayilma_say = 0;


		if ((sektor == 1) || (sektor == 4))
			akim_yon = ters;
		else
			akim_yon = duz;


		if (gerekli_yon == duz)
```

```
                {
                        FAZ = FAZValues[sektor];
                }
                else
                {

                        FAZ = FAZValues[(sektor + 3) % 6] + FAZOffset;
                }
                son_sektor = sektor;
        }

        return;
}

/*********************************************************************

*********************************************************************/

void __attribute__((__interrupt__)) _PWMInterrupt (void)
{
        IFS2bits.PWMIF = 0;       //

        if (gerekli_yon == duz)
        {
                if (akim_yon == duz)
                        FAZ += FAZInc;    //
                    //
                //
                #ifdef FAZ_ADVANCE
                SVM(kontrol_cikis, FAZ + FAZAdvance);  //

                //
                #else
                SVM(kontrol_cikis, FAZ);
                #endif
        }
        else
        {
                if (akim_yon == ters)
                        FAZ -= FAZInc;      //

                #ifdef FAZ_ADVANCE
                SVM(-(kontrol_cikis+1), FAZ + FAZAdvance);//
                                                                        //
                #else
                SVM(-(kontrol_cikis+1), FAZ);
                #endif
        }
        return;
}

/*********************************************************************

*********************************************************************/

void __attribute__((__interrupt__)) _ADCInterrupt (void)
{
        IFS0bits.ADIF = 0;          //
```

```
        referans_hiz = ADCBUF0; //
        return;
}

/*********************************************************************

*********************************************************************/

int main(void)
{
        InitUserInt();      //
        InitADC10();      //
        InitTMR1();             //
        InitTMR3();             //
        InitICandCN();    //
        InitMCPWM();    //
        for(;;)
        {
                if ((SWITCH_S2) && (!Flags.motor_calis))
                {
                        while(SWITCH_S2);
                        motorstart();       //
                }
                else if ((SWITCH_S2) && (Flags.motor_calis))
                {
                        while(SWITCH_S2);
                        motorstop();//
                }
        }
        return 0;
}

/*********************************************************************

 *********************************************************************/

void motorstart(void)
{
        ChargeBootstraps();
        //
        kontrol_farki[0] = 0;       //
        kontrol_farki[1] = 0;       //
        kontrol_farki[2] = 0;       //
        PID_katsayilari[0] = Kp + Ki + Kd;          //
        PID_katsayilari[1] = -(Kp + 2*Kd);          //
        PID_katsayilari[2] = Kd;                    //

        TMR1 = 0;                           //
        TMR3 = 0;                           //
        gercek_yakalama = maxperiyot;    //
                                                                //(60 RPMs)
        eski_yakalama = 0;

        //
        //
        HallValue = (unsigned int)((PORTB >> 3) & 0x0007);          //
        son_sektor = sektor = tablo[HallValue];      //
                                //
```

```
        if (referans_hiz < 0)
        {
                kontrol_cikis = 0;          //
                akim_yon = gerekli_yon = ters;
                FAZ = FAZValues[(sektor + 3) % 6] + FAZOffset;
        }
        else
        {
                kontrol_cikis = 0;          //
                akim_yon = gerekli_yon = duz;
                FAZ = FAZValues[sektor];
        }

        motor_bayilma_say = 0;   //

        FAZInc = __builtin_divud(512000UL, maxperiyot);

        IFS0bits.T1IF = 0;          //
        IFS0bits.CNIF = 0;          //
        IFS1bits.IC7IF = 0;         //
        IFS1bits.IC8IF = 0;         //
        IFS2bits.PWMIF = 0;         //

        __asm__ volatile ("DISI #0x3FFF");
        IEC0bits.T1IE = 1;          //
        IEC0bits.CNIE = 1;          //
        IEC1bits.IC7IE = 1;         //
        IEC1bits.IC8IE = 1;         //
        IEC2bits.PWMIE = 1;         //
   DISICNT = 0;

        Flags.motor_calis = 1;      //
        return;
}

/*********************************************************************

*********************************************************************/
void motorstop(void)
{
        OVDCON = 0x0000;        //


        __asm__ volatile ("DISI #0x3FFF");
        IEC0bits.T1IE = 0;          //
        IEC0bits.CNIE = 0;          //
        IEC1bits.IC7IE = 0;         //
        IEC1bits.IC8IE = 0;         //
        IEC2bits.PWMIE = 0;         //
   DISICNT = 0;

        Flags.motor_calis = 0;      //
        return;
}
```

EK-II Kullanılan Malzeme Bilgileri

International
IOR Rectifier

IRAMS06UP60A
iMOTION™ Series
6A, 600V

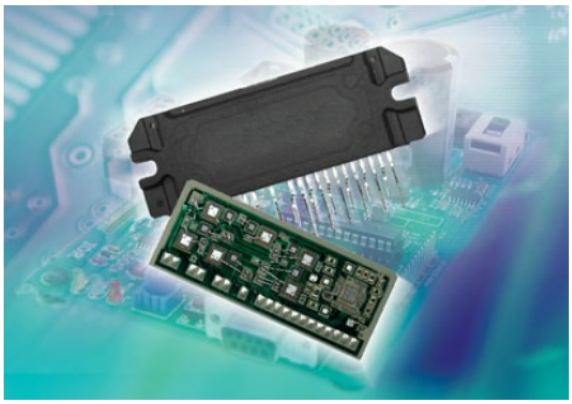
Plug N Drive™ Integrated Power Module for Appliance Motor Drive

Description

International Rectifier's IRAMS06UP60A is an Integrated Power Module developed and optimized for electronic motor control in appliance applications specifically for VF compressor drives for refrigerators and freezer or in heating and ventilation as electronic fan controls. The IRAMS06UP60A offers an extremely compact, high performance AC motor-driver in a single isolated package for a very simple design.
A built-in temperature monitor and over-current protection, along with the short-circuit rated IGBTs and integrated under-voltage lockout function, deliver high level of protection and fail-safe operation.
The integration of the bootstrap diodes for the high-side driver section, and the single polarity power supply required to drive the internal circuitry, simplify the utilization of the module and deliver further cost reduction advantages.

Features

- Integrated Gate Drivers and Bootstrap Diodes
- Temperature Monitor
- Overcurrent shutdown
- Fully Isolated Package.
- Low $V_{CE(on)}$ Non Punch Through IGBT Technology
- Undervoltage lockout for all channels
- Matched propagation delay for all channels
- Schmitt-triggered input logic
- Cross-conduction prevention logic
- Lower di/dt gate driver for better noise immunity
- Motor Power range 0.1~0.5kW / 85~253 Vac
- Isolation $2000V_{RMS}$/1min



Absolute Maximum Ratings

Parameter	Description	Max. Value	Units
V_{CES}	Maximum IGBT Blocking Voltage	600	V
V^+	Positive Bus Input Voltage	450	
I_o @ T_C=25°C	RMS Phase Current	6	A
I_o @ T_C=100°C	RMS Phase Current	3	
I_{pk}	Maximum Peak Phase Current (tp<100ms)	10	
F_p	Maximum PWM Carrier Frequency	20	kHz
P_d	Maximum Power dissipation per Phase	7.5	W
V_{iso}	Isolation Voltage (1min)	2000	V_{RMS}
$T_{J\ (IGBT\ \&\ Diodes)}$	Operating Junction temperature Range	-40 to +150	°C
$T_{J\ (Driver\ IC)}$	Operating Junction temperature Range	-40 to +150	
T	Mounting torque Range (M3 screw)	0.8 to 1.0	Nm

National Semiconductor

August 2000

TL082
Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier

General Description

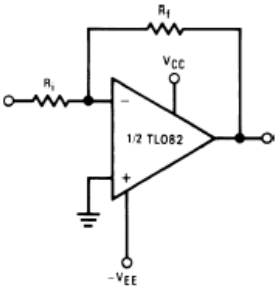
These devices are low cost, high speed, dual JFET input operational amplifiers with an internally trimmed input offset voltage (BI-FET II™ technology). They require low supply current yet maintain a large gain bandwidth product and fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The TL082 is pin compatible with the standard LM1558 allowing designers to immediately upgrade the overall performance of existing LM1558 and most LM358 designs.

These amplifiers may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample and hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth. The devices also exhibit low noise and offset voltage drift.

Features

- Internally trimmed offset voltage: 15 mV
- Low input bias current: 50 pA
- Low input noise voltage: 16nV/√Hz
- Low input noise current: 0.01 pA/√Hz
- Wide gain bandwidth: 4 MHz
- High slew rate: 13 V/µs
- Low supply current: 3.6 mA
- High input impedance: $10^{12}\Omega$
- Low total harmonic distortion: ≤0.02%
- Low 1/f noise corner: 50 Hz
- Fast settling time to 0.01%: 2 µs

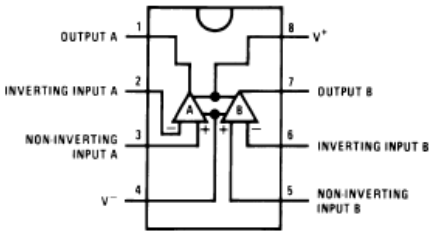
Typical Connection



00835701

Connection Diagram

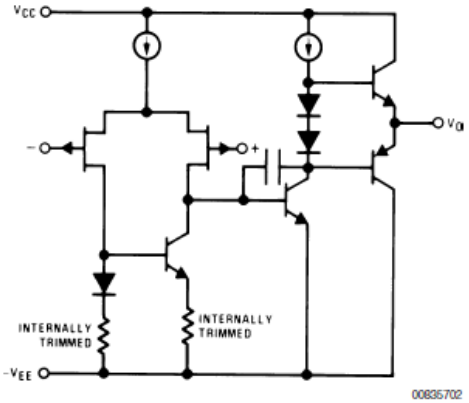
DIP/SO Package (Top View)



00835703

Order Number TL082CM or TL082CP
See NS Package Number M08A or N08E

Simplified Schematic



00835702

BI-FET II™ is a trademark of National Semiconductor Corp.

© 2004 National Semiconductor Corporation

TOSHIBA Photocoupler GaAℓAs Ired & Photo IC

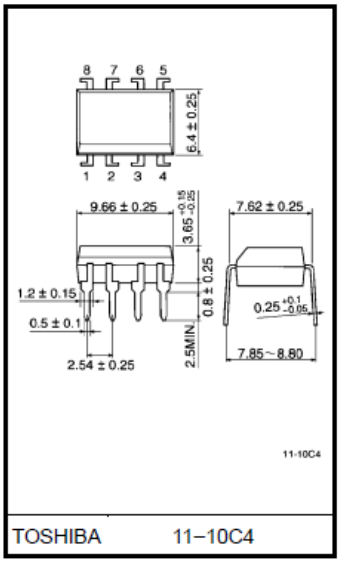
6N137

Degital Logic Isolation
Tele−Communication
Analog Data Equipment Control

The TOSHIBA 6N137 consist of a high emitting diode and a one chip photo IC. This unit is 8−lead DIP package.

- LSTTL / TTL compatible: 5V Supply
- Ultra high speed: 10MBd
- Guaranteed performance over temperature: 0°C to 70°C
- High isolation voltage: 2500Vrms min.
- UL recognized: UL1577, file no. E67349

Unit in mm

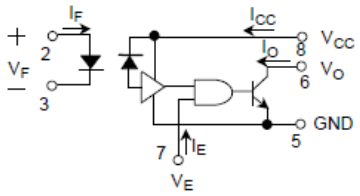


TOSHIBA 11−10C4

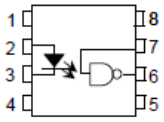
Weight: 0.54g

Truth Table

Input	Enable	Output
H	H	L
L	H	H
H	L	H
L	L	H



Pin Configurations (top view)



1 : N.C.
2 : Anode
3 : Cathode
4 : N.C.
5 : GND
6 : Output(Open collector)
7 : Enable
8 : V_{CC}