

T.C
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AC VE DC SERVO SİSTEM
EĞİTİM SETİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Fahrettin Hakan YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK- ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Konya, 2008

T.C
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AC VE DC SERVO SİSTEM
EĞİTİM SETİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Fahrettin Hakan YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK- ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 19/11/2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

.....

Yrd.Doç.Dr. Ramazan AKKAYA

(Danışman)

.....

Yrd.Doç.Dr. Abdullah ÜRKMEZ

(Üye)

.....

Yrd.Doç.Dr. Ömer AYDOĞDU

(Üye)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AC VE DC SERVO SİSTEM EĞİTİM SETİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Fahrettin Hakan YILMAZ

Selçuk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Yrd.Doç.Dr. Ramazan AKKAYA

2008, 126 Sayfa

Jüri : Yrd.Doç.Dr. Ramazan AKKAYA

Yrd.Doç.Dr. Abdullah ÜRKMEZ

Yrd.Doç.Dr. Ömer AYDOĞDU

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan elektrik motorları yapı olarak birbirlerine göre farklılıklar gösterirler. Bu motorların ortak yanı, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmeleridir. Bunun yanında konum ve hız kontrolü uygulamaları için servo motorlar daha uygundur. Günümüzde servo motorların çok çeşitli uygulamalarda kullanılmasının başlıca sebepleri; hassas ve hızlı çalışabilmeleridir.

Otomasyon sistemlerinde motorlar, bilgisayar tabanlı üniteler veya programlanabilir tek başına ünitelerle kontrol edilebilir. Bu tez çalışmasında deneysel amaçlı olarak AC ve DC servo sistemler gerçekleştirilmiştir. AC servo sistemde PLC ve PC birlikte kullanılarak AC servo motorun hareket kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışmada test düzeneği kurulmuş ve bir adet fırçasız AC servo motorun kontrolü için Visual Basic programı geliştirilmiştir. Programda, hedeflenen hız ve konum bilgileri girdi olarak alınmış, bu bilgiler PLC'ye aktarılmıştır. PLC ise gelen bilgileri yazılan programa göre değerlendirip gerekli

ıkışları sürücüye vererek sürücünün motoru istenildiği gibi kontrol etmesini sağlamıştır. Bu motor için hız ve konum eğrileri sonuçlarda verilmiştir.

DC servo sistemde ise DC servo motor kullanılarak dairesel hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Kontrolde, bellek ve gerekli olan I/O birimlerini içinde barındıran PLC kullanılmıştır. PLC, programlanabilmesi için gerekli olan donanımların azlığı, programlama kolaylığı ve ekonomik olduğu için tercih edilmiştir. İstenilen hız bilgisi, tasarlanan sisteme PC kullanılarak girilmektedir. Sistem çalıştığı zaman, istenilen ve gerçekleşen hız değerleri PC ekranından görüntülenmektedir. Gerçekleştirilen sistemin test edilmesi sonucunda, istenen ve gerçekleşen hız değerlerinin uyum içinde oldukları gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: I/O birimi, PLC, PC, Pozisyon kontrol, AC servo motor, DC servo motor, Servo motor kontrol, Servo sistem.

ABSTRACT

M.S. Thesis

REALIZING OF AC AND DC SERVO SYSTEMS EDUCATION SET

Fahrettin Hakan YILMAZ

Selcuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor : Assist.Prof.Dr.Ramazan AKKAYA

2008, 126 Pages

Jury : Assist.Prof.Dr.Ramazan AKKAYA

Assist.Prof.Dr.Abdullah ÜRKMEZ

Assist.Prof.Dr.Ömer AYDOĞDU

Electric motors that are used for industrial applications differ from each other as structural. The common property for these motors is converting electric energy to mechanical energy. Furthermore, servo motors are more suitable for the position and velocity control applications. At the present day, the main reasons of the usage of servo motors in different kind of applications are that they are able to operate accurate and fast.

In automation systems, motors can be controlled by the computer based units or stand alone programmable units. In this thesis study, AC and DC servo systems are realized for the purpose of education. In AC servo system, the motion control of AC servo motor is controlled by using the combination of PC and PLC. In this experimental study, test contrivance is established and Visual Basic program has been developed for the control of the brushless AC servo motor. By using this programs, desired velocity and position trends are taken as inputs and these inputs are transferred to PLC. PLC realizes these inputs in accordance with the written

program and provides the control of motor with driver by transferring the required outputs to driver. For this motor, velocity and position trends has been shown at the conclusion.

In the DC servo system, circular velocity control is realized by using DC servo motor. In the control system, PLC that has its own required I/O unit and memory is used. PLC is chosen for its economy, little hardware for programming and easy programming. Desired velocity datas are entered by the usage of PC. When the system works, desired and real velocity values are seen from the PC screen. After testing the realized system, it has been observed that desired and real values are in unison with together.

Key Words: I/O unit, PLC, PC, Position control, AC servo motor, DC servo motor, Servo motor control, Servo system.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, endüstrinin çeşitli alanlarında kullanılabilecek AC ve DC servo sistemler anlatılmış ve bu sistemlerin eğitim amaçlı prototipleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen her iki sistemde de PC tabanlı servo motor kontrol yazılımı gerçekleştirilmiştir. Kullanılan PLC' nin, PC ile seri haberleşmesinden yararlanılarak Visual Basic' te entegre yazılım geliştirilmiştir. Kontrol yazılımı, servo motorlara PLC kullanılarak uygulanmıştır. Servo motorların çalışması için gereken güç, servo sürücüler aracılığıyla sağlanmıştır. AC servo sistemde geri besleme sinyal bilgisi sürücüye, DC servo sistemdeyse PLC' nin hızlı sayıcı girişine uygulanmıştır. Ayrıca sürücülerde kontrol için motor kontrol parametreleri bulunmaktadır.

Gerçekleştirilen prototip sistemlerin gelişmişleri endüstride nümerik kontrollü makinelerde (CNC), robotlarda, pres makinelerinde, paketleme makinelerinde, tıbbi cihazlarda, matbaa makinelerinde, kağıt kesme makinelerinde, dolum makinelerinde, etiketleme makinelerinde, yarı iletken üretim makinelerinde, baskı makinelerinde, enjeksiyon makinelerinde, taşlama tezgahlarında, çeşitli test makinelerinde ve daha birçok makine ve sahada, yapılan işe uygun şekilde geliştirilerek uygulanmaktadır. Servo sistemler sayesinde üretim hızı, üretim kalitesi, hassasiyet ve dolayısıyla verim artmaktadır. Kullanım alanı oldukça büyük olan ve gün geçtikçe büyüyen AC ve DC servo sistem prototipleri, ilerde endüstride çeşitli sektörlerde çalışacak öğrencilere bu bağlamda temel oluşturmada ve ışık tutmada muhakkak çok faydalı olacaktır.

Yapılan çalışma sonucunda servo sistemlerin Visual Basic olanakları kullanılarak tasarlanıp analiz edilebileceği görülmüştür. Hareket analizinde belirlenen geri besleme bilgileri PLC aracılığıyla motor kontrolünde kullanılmıştır. Visual Basic ile kontrol edilebilen servo motor kontrol sistemi yazılımının, istenilen hareket değerleriyle bütünleştiği görülmüştür.

Yüksek lisans çalışmam boyunca, kıymetli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren danışmanım sayın Yrd.Doç.Dr.Ramazan AKKAYA'ya, değerli yardımlarını esirgemeyen eşime ve diğer çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu çalışmanın ileride hazırlanacak çalışmalara faydalı olmasını dilerim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
SEMBOLLER.....	ix
KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
3. SERVO SİSTEMLER VE SERVO SİSTEM ELEMANLARI.....	8
3.1. Giriş.....	8
3.2. Servo Sistem Elemanları.....	10
3.2.1. DC servo sürücüler.....	13
3.2.2. AC servo sürücüler.....	14
3.3. Servo Sürücü Temel Birimleri.....	16
3.3.1. Güç kaynağı.....	16
3.3.2. Güç dönüştürücü.....	19
3.3.3. Geri besleme elemanı.....	20
3.3.3.1. Potansiyometre.....	21
3.3.3.2. Mil pozisyon dönüştürücüleri ve sayısal kodlayıcılar.....	23
3.3.3.3. Takometre.....	30
3.3.3.3.1. Analog Takometre.....	30
3.3.3.3.2. Dijital Takometre.....	34
3.3.3.4. Resolver.....	35
3.3.3.5. Servo motorlarda kullanılan aktarma organları.....	37
4. SERVO MOTORLAR.....	39
4.1. Servo Motorun Yapısı.....	40
4.2. Servo Motor Çeşitleri.....	41
4.2.1. DC servo motor.....	42

4.2.1.1. DC servo motorun yapısı.....	43
4.2.1.2. DC servo motorun çalışması.....	45
4.2.1.3. DC servo motor çeşitleri.....	49
4.2.1.4. DC servo motorun özellikleri.....	49
4.2.2. AC servo motor.....	53
4.2.2.1. AC servo motorun yapısı	53
4.2.2.2. AC servo motorun çalışması	54
4.2.2.3. AC servo motorun çeşitleri	55
4.2.2.4. AC servo motorun özellikleri	57
4.2.3. Üç fazlı asenkron motorlar.....	59
4.2.4. Senkron motorlar.....	78
4.2.5. Fırçasız DC motor.....	84
4.2.6. Adım motorları.....	91
4.2.6.1. Adım motorlarına ait önemli parametreler	98
5. GERÇEKLEŞTİRİLEN SİSTEM.....	104
5.1. DC Servo Sistemin Gerçekleştirilmesi	104
5.2. AC Servo Sistemin Gerçekleştirilmesi.....	113
5.3. Uygulama Devrelerinden Alınan Deneysel Sonuçlar.....	120
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	123
6.1. Sonuçlar	123
6.2. Öneriler.....	124
7. KAYNAKLAR.....	126

SEMBOLLER

d/d	: Devir / Dakika
e	: Emk
V	: Gerilim
f	: Frekans
n	: Devir Sayısı
s	: Kayma Miktarı
p	: Motorun Kutup Sayısı
ω	: Açısal Hız
T	: Moment

KISALTMALAR

AC	: Alternative Current (Alternatif Akım)
BLDC	: Brushless Direct Current (Fırçasız Doğru Akım)
CNC	: Computer Based Numeric Control (Bilgisayar Tabanlı Sayısal Kontrol)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
EM	: Electro Magnet (Elektro Mıknatıs)
LCD	: Liquid Crystal Display (Sıvı Kristal Görüntü Birimi)
PC	: Personal Computer (Kişisel Bilgisayar)
PCI	: Peripheral Component Interconnect (Çevresel Komponent Bağlama)
PLC	: Programmable Logical Controller (Programlanabilir Lojik Kontrolör)
PM	: Permanent Magnet (Sabit Mıknatıslı)
PMDC	: Permanent Magnet Direct Current (Sabit Mıknatıslı Doğru Akım)
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
RPM	: Rotate Per Minute (Dakika Başına Devir)
SPR	: Step Per Revolution (Dönme Başına Adım)
VR	: Variable Reluctance (Değişken Relüktanslı)

1. GİRİŞ

Otomatik kontrol sistemleri veya kısaca kontrol sistemleri, günümüzde ileri toplumların günlük yaşantısına girmiş ve hemen hemen her alanda kullanılmaktadır. Evlerdeki otomatik çamaşır makineleri, otomatik bulaşık makineleri, termostatlı fırınlar veya diğer bir ifadeyle akıllı fırınlar, ütüler, endüstriyel ve araştırma alanında kullanılan robotlar, mikro işlemciler, bilgisayarlar, uzay taşıtları v.b. kontrol sistemleri, üretim ve yönetim kalitesini sürekli olarak arttırmakta olup, yaşam biçimimize olumlu bir şekilde etki etmektedirler. Kontrol sistemleri herhangi bir endüstri toplumunun tamamlayıcı bir parçası olup artan dünya nüfusunun ihtiyacı olan malzemeleri üretmek için gereklidirler. Kontrol sistemleri kısaca; enerji, malzeme veya diğer kaynakların akışını düzenleyen cihazlar olarak da tanımlanır. Bu cihazların düzenlenmesi; karmaşıklıklarına, görünüşlerine, kullanım amaçlarına ve işlevlerine göre değişir. Kontrol sistemleri, kontrol edilen büyüklüklerin değerlerini sabit tutarlar veya bu değerlerin, önceden belirlenmiş biçimde değişmesini sağlarlar.

Bilim ve teknoloji ilerledikçe insan kas gücünün üretimdeki payı azalmaktadır. Üretim, makine ile yapılan veya insan gücüyle yapılan üretim diye ayrılrsa, makine tarafı sürekli olarak artma eğilimindedir. Makinelerin kullanımı da yine insan denetimi yerine başka makineler veya teçhizatlar yardımıyla yapılmaya çalışılmaktadır. Makinelerle yapılan üretimde, neredeyse çalışan sistem üzerinde insan denetimi yok denecek düzeydedir. Otomatik kontrol sistemleri, çalışan sistemlerin insan gücüne gerek kalmadan kontrol edilmesini konu olarak ele alır. Dünyada emek yoğun üretim, pahalı bir üretim yöntemi haline gelmiştir. Otomasyon sistemi ile üretim, daha ekonomik olmaktadır. Otomasyon, üretimin her aşamasına hızlı bir şekilde girmeye devam etmektedir. Böylece daha ucuz ve standardı önceden belirlenen ölçülerde üretim yapılabilir. İyi yetişmiş bir kalifiye elemanın manüel tezgâhlarda 4 saatte ürettiği bir ürün, otomatik sistemlerde 7 dakika gibi kısa sürede üretilmektedir. Arada 34 kat gibi bir fark vardır. Bu fark, maliyet açısından kapatılamaz büyüklüktedir. Sağlık ve çevre koşulları dikkate alındığında bazı iş

alanlarında (örneğin; çok sıcak yerler, zehirli yerler, tehlikeli yerler gibi) insan çalıştırmak mümkün değildir.

Endüstriyel kontrol alanındaki teknolojik gelişmeler ve yukarıda da bahsedildiği gibi otomatik kontrolün ve otomasyonun hızla artan konumu, birçok özel motorun ortadan kalkmasına, uygulamaların çoğunun nispeten az sayıda motor tipiyle gerçekleşmesine, dikkatin servo motorlara, kaynak ve kontrol düzenlemelerine kaymasına neden olmuştur. Böylece üstün bir performans ve esneklik sağlanmıştır. Sabit hızlı bir motordan daha fazlasının gerekli olduğu pozisyonlama, yüksek kararlılık, periyodik çalışma, dinamik yük ve hız değişikliği gibi durumlarda servo sistem vazgeçilmez tercih olmaktadır. Günümüzde servo sistemler, endüstrinin farklı birçok alanında uygulama yeri bulmuştur. Özellikle endüstriyel otomasyonda; hız, moment, konumlandırma, çok eksenli hareket, ölçme ve bilgisayar destekli üretim gibi alanlarda sıklıkla servo sistemler kullanılmaktadır. Servo sistemler ile gerçekleştirilen bir uygulamada, yüksek düzeyde duyarlılık ve kontrol sağlanabilmektedir.

Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan elektrik motorları yapı olarak birbirlerine göre farklılıklar gösterirler. Bu motorlarının ortak yanı, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmeleridir. Konum ve hız kontrolü için her elektrik motoru uygun olmayabilir. Bu durumda kontrol edilmek istenilen büyüklüğe uygun bir motor seçimi yapılmalıdır. Konum kontrolü yapılması gereken uygulamalarda genellikle adım motoru ya da servo motor kullanılır. Adım motorları daha çok küçük güçlü sistemlerde ve düşük moment gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Bunun yanında büyük güç, yüksek moment ve hızlı tepki gerektiren sistemlerde ise daha çok servo motorlar kullanılır. Ayrıca motor kalkış ve duruş anında, motorun kontrolünü daha yumuşak bir şekilde yapmak kolaydır. Böylece motorun kalkış ve duruş sırasında, mile bağlı yükün ve ürünün zarar görmesi önlenebileceği gibi aynı zamanda motorun kalkış anında yüksek akım çekmesi de önlenmiş olur. Motor hızının değiştirilmesi, motora uygulanan gerilimin ayarlanması ile yapılır. Motora uygulanan gerilimin ayarlanmasında daha çok yarıiletken

elemanlar kullanılır. Bu yarıiletken elemanların kontrolü ise mikroişlemci, mikro denetleyici gibi donanım elemanları ve yazılım aracılığı ile yapılır (Coşkun 2004).

Bu tez çalışmasında servo sistemin tanımı, genel yapısı, kontrolü ve servo sistemde kullanılan elemanlar ayrıntılı bir şekilde tanıtılmıştır. Servo sistemde kullanılan elektrik makineleri verilmiş ve bu elektrik makinelerinin elektrik enerjisini en hızlı ve doğru şekilde mekanik enerjiye nasıl dönüştürebileceği açıklanmıştır. Bu bağlamda AC ve DC servo sistemler açıklanmış ve servo sistemde kullanılabilecek elektrik motorları arasındaki farklara değinilmiştir. Servo sistemde kullanılan elektromekanik sistemlerin, geri beslemeli otomatik kontrol sistemlerini kullanarak çalışması, genel prensipleri, kullanılan elemanlar ve bu sistemlerin tasarımı anlatılmıştır.

Konuya ilişkin kısa bir giriş verilen birinci bölümden sonra ikinci bölümde, yapılan kaynak araştırması sonucunda bu konuda daha önce yapılan bazı bilimsel çalışmalardan bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde, servo sistem elemanları ve servo sistemlerde kullanılan elektronik kontrolörlerindeki temel kavramlar hakkında bilgi verilmiştir. Servo motor kontrolörlerin çalışma prensipleri ve servo sistemlerde kullanılan geri besleme elemanları açıklanmıştır. Geri besleme elemanlarının özellikleri, çalışma şekilleri, farkları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Servo sistemde kullanılan DC ve AC motor sürücüler ve servo kontrolörlerdeki güç dönüştürücüler ile aktarma organları hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde ise servo sistemlerde kullanılan DC, AC ve adım motorların yapısı, çeşitleri, çalışma prensipleri ve farkları hakkında bilgiler verilmiştir.

Beşinci bölümde, gerçekleştirilen servo sistemler açıklanmış, sistemde kullanılan elemanlar ve programlar anlatılmış ve elde edilen deneysel sonuçlar verilmiştir.

Altıncı bölümde, bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve konuyla ilgili çalışma yapmak isteyebilecek araştırmacılar için öneriler yer almaktadır.

Yedinci bölümde, çalışmanın hazırlanmasında faydalanılan kaynaklar yer almaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Uzun ve Yıldız (2003) tarafından yapılan çalışmada, araba benzeri bir gezgin robotun donanımı, temel hareket yazılımı ve kullanıcı ara yüzü fiziksel olarak gerçekleştirilmiştir. Robotun hareket mekanizması, ileri-geri hareketi sağlayan DC motor kontrollü arka tekerlekler ile yön seçimini sağlayan DC servo motor kontrollü ön tekerleklerden oluşmuştur. Sistemin merkezinde çeşitli türde algılayıcıların bağlanabileceği çevre birimlerine sahip bir PIC18F458 mikrodenetleyici kullanılmıştır. Donanımın beynini oluşturan bu mikrodenetleyici devre içinden seri programlanabilme özelliğiyle sistem çalışırken denetim programının geliştirilmesine veya düzeltilmesine imkân vermektedir. Mikrodenetleyicinin içinde kişisel bilgisayar ile iletişimi için SCI çevre birimi ve dışarıda RS-232 seviyeye uygunlaştırma için MAX232 tümleşik devresi kullanılmaktadır. Sistemde, gezgin robotun dümen mekanizması için DC servo motor, hareket etmesi için ise DC motor denetim çıkışları vardır. Ayrıca ultrasonik algılayıcı modülü için giriş/çıkış denetimi uçlarına sahiptir. Hız, motor dönme yönü, fren ve ön tekerlek açısı kontrolü; robotun önündeki engelle olan mesafesinin okunması ile başlangıç değerine ilk koşullama işlemlerinin doğru bir şekilde yapıldığı ve sistemin güvenilirliği kanıtlanmıştır.

Coşkun ve Işık (2004) tarafından yapılan çalışmada, DC servo motor kullanılarak dairesel konum ve hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Kontrolde bellek ve gerekli olan I/O birimlerini içinde barındıran PIC16F877 mikro denetleyici kullanılmıştır. Bu mikrodenetleyici, programlama için gerekli olan donanımının azlığı, programlama kolaylığı ve ekonomik olduğu için tercih edilmiştir. İstenilen konum bilgisi sisteme monte edilen tuşlar yardımıyla girilmektedir. Sistem çalıştığı zaman, istenilen ve gerçekleşen konum değerler LCD ekran ve mile bağlı bir kadran ile görüntülenmektedir. Tasarlanan sistemin test edilmesi sonucunda, istenen ve gerçekleşen konum değerlerinin uyum içinde oldukları gözlenmiştir.

Özgür ve Taşkaya (2005) tarafından yapılan çalışmada, bilgisayar kontrollü kameralı robot kolu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, uygulanması istenen tüm fonksiyonlara cevap verebilecek nitelikte bir prototip robot kolu hazırlanmıştır. Hazırlanan prototipte kontrol uyumluluğu ve maliyet açısından RC servo motorlar kullanılmıştır. Servo motorların kontrolleri ve bilgisayar haberleşmesinde Atmel 89C52 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Bilgisayar arayüz programı Visual Basic 6.0' da oluşturulmuştur. Kamera olarak USB Webcam kullanılmıştır. Arayüz programının çalışması ile birlikte kamera aktif olmakta ve aldığı görüntüyü bilgisayar ekranında açılan pencereye iletmektedir. Bu aktarım sayesinde kullanıcı kolun bulunduğu ortamı görebilmekte ve bulunduğu ortamdaki bilgisayar üzerinden kola istediği hareketleri yaptırabilmektedir.

Gulabi (2007) tarafından yapılan çalışmada, Siemens servo motorlar, Simovort Masterdrive sürücü, S7-300 PLC, haberleşme modülü CP 343-1, haberleşme kartı CP5613 A2 kullanılarak, servo motorlar ve PC arasında data haberleşmesi ve servo motorların kontrolü yapılmıştır. Sistemde kullanılan malzemeler, Profibus DP ve ethernet ile haberleştirilmiştir. Sisteme internet aracılığıyla ulaşılabilir. Servo motorları kontrol etmek için yapılan SCADA yazılımı, Siemens S7 Java ve Java komponentleri kullanılarak, değerleri FTP protokolüyle server gibi çalışan CP 343-1 IT' ye yüklenmesiyle dizayn edilmiştir. PC (SCADA yazılımı) ve sürücüler arasında data akışını sağlamak için S7 programı kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonrasında, gerçekleştirilen sistemin çok verimli ve tasarıma çok açık bir sistem olduğu gerçeği ortaya konulmuştur.

Şahbaz (2007) tarafından yapılan çalışmada, ADLINK PCI hareket kontrol kartlarıyla servo ve adım motorların hareket kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışmada test düzeneği kurulmuş ve üç adet Omron marka fırçasız AC servo motorun kart üzerinden eş zamanlı kontrolü için VisualBASIC programları geliştirilmiştir. Programlarda, hedeflenen hız ve konum eğrileri girdi olarak alınmış ve ADLINK kontrol kartı komutlarının parametreleri belirlenmiştir. 3 eksenli bir robotun örnek hız ve konum eğrileri için sonuçlar verilmiştir. Ayrıca HSI firmasına ait adım motor sürücülü doğrusal motorun kontrolü de gerçekleştirilmiştir. Hassas

imalat ve tıp gibi alanlarda kullanılan 6 serbestlik dereceli bir paralel manip lat r olan hegzapodun eksenlerinin sonuçları verilmiştir. Bu çalışmada, otomasyon sistemlerindeki motorların, bilgisayar tabanlı üniteler veya programlanabilir tek başına ünitelerle kontrol edilebileceği vurgulanmıştır.

Turgut (2007) tarafından yapılan çalışmada, ADLINK PCI hareket kontrol kartıyla ile scara robot servo motorlarının kontrolü yapılmıştır. Bu  alı mada SolidWorks programıyla modellenen, CosmosWorks ve CosmosMotion programıyla analiz edilen 6 eksenli bir robotun servo motor kontrol yazılımı geliştirilmiştir. Hareket analizi ile bulunan motor açıları PC-tabanlı servo motor kontrolünde kullanılmıştır. Programların API (application program interface) olanakları ile Visual Basic' te entegre yazılımı geliştirilmiştir. Kontrol yazılımı, Mitsubishi Electric servo motorlarına ADLINK motor kontrol kartı kullanılarak uygulanmıştır. Değişik yapılara ve boyutlara sahip mekatronik sistemlerin bilgisayar destekli tasarımı ve analizi ile hareket kontrolünün değişik programlarla yapılabilen ği anlatılmıştır.

3. SERVO SİSTEMLER VE SERVO SİSTEM ELEMANLARI

3.1. Giriş

Servo, “servant – serv” den gelen hizmet eden demektir. Bir işi kendi başına ve yüksek doğrulukla yapan tüm elektronik veya mekanik nesneler birer "servo" dur. Bir motora yaptığı işi kontrol edebilecek bir mekanizma ekleyip, bir şekilde kontrol mekanizması yapıldığında servo elde edilir. Servo, kendisinden beklenen işe göre tasarlanır. Dolayısıyla kesin bir tarifi yoktur. Ancak işleyişinin tarifi kesindir. Makine iş yapar, yaptığı işi kontrol eder, istendiği gibi değilse istenen sonuca ulaşana kadar yeniden yapar.

Günümüzde servo sistemler, endüstrinin farklı birçok alanında uygulama yeri bulmaktadır. Özellikle endüstriyel otomasyonda; hız, moment, konumlandırma, çok eksenli hareket, ölçme ve bilgisayar destekli üretim gibi alanlarda sıklıkla servo sistemler kullanılmaktadır. Servo sistemler ile gerçekleştirilen bir uygulamada, yüksek düzeyde duyarlılık ve kontrol sağlanabilmektedir. Ancak servo sistemler, diğer klasik kontrol sistemlerine göre daha karmaşık ve maliyetlidirler.

Servo sistemlerin kullanımı günümüzde pnömatik, hidrolik ve özellikle de elektrik kontrollü sistemlerde, gün geçtikçe artmaktadır. Her kontrol tipinin kendine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Mekanik kapasitelerinin yanı sıra, çevresel özellikleri de değerlendirmede ele alınmalıdır. Örneğin elektriksel kontrol, patlayıcı gazların bulunduğu ortamlarda özel önlemler ile kullanılabilir. Bu tür ortamlarda genellikle hidrolik kontrol kullanılır. Diğer yönden hidrolik kontrolörler yağ kullanırlar ve bir sızıntı halinde çevre kirliliğine yol açabilirler. Bu yüzden yüksek derecede temizlik gerektiren ortamlarda pnömatik kontrolörler tercih edilebilir. Pnömatik kontrolörlerin de en genel kullanım uygulaması tutucuların açılıp kapatılmasıdır. Elektrik kontrollü servo sistemler, elektromekanik sistemlerdir.

Elektromekanik bir sistemin çıkış büyüklüğü, ya motor milinden alınan mekanik güç ya da generatör çıkış uçlarından alınan elektriksel güç niteliğinde olup bu büyüklüklerin istenilen özellikleri sağlayabilmeleri için başka uygun büyüklükler yardımı ile kontrol edilme olanakları vardır (Gulabi, 2007). Pek çok değişik karakterleri kapsayan elektromekanik sistem büyüklükleri arasında en önemli görülenleri kontrol nedenleri ile birlikte aşağıda özetlenmiştir.

Hız: Döner makinelerin dönüş hızının birçok durumlarda büyük bir duyarlılıkla kontrol edilmesi gerekir (Örneğin; kâğıt imalat makinelerinin çevirici motorları, hadde motorları gibi). Ayrıca birçok çevirici motoru bulunan iş makinelerinde, bu motorlar arasındaki hız uyumunun istenilen şartları sağlaması genellikle iş makinesinin çalışması yönünden gerekli olduğundan, değişik hızların istenilen duyarlılıkla istenilen sınırlar içinde tutulması, ancak bu hızların uygun geri besleme tertipleri yardımı ile kontrol altında tutulması ile mümkündür.

Moment: Halatın tambur üzerine sarılması veya tamburdan boşaltılması hallerinde gerilmenin kararlı bir değerde tutulabilmesi için, döndürme momentinin uygun geri besleme tertipleri ile kontrol edilmesi gerekir. Örneğin; kâğıt bobinde, bant sarma tezgâhlarında da aynı zorunluluk vardır.

Konum: Özellikle takım tezgâhlarında, tezgâh ile devamlı olarak periyodik bir işlem yapılması halinde, tezgâhın bazı elemanlarının doğrusal ve açısal konumlarının, hareket şartlarının uygun geri besleme tertipleri ile kontrol altında tutulması gerekir. Aynı bir örnek olarak uçakların ve mermilerin radar yardımı ile kontrolü ve radardan alınacak işarete göre savunma silahının otomatik olarak hedefe yönltilmesi yine uygun nitelikte geri beslemeli kontrol sistemleri ile sağlanabilir.

İvme: Değişik hızlarda çalıştırılan iş makinelerinde bir hızdan başka bir hıza istenilen konumda ve istenilen zaman süresi içinde geçilebilmesi için hız değişiminin veya diğer bir deyimle ivmenin kontrol edilmesi gereklidir.

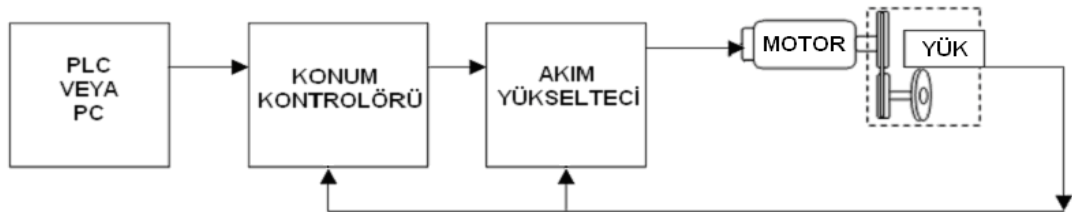
Gerilim: En belirgin örnek olarak alternatif akım güç kaynağı olarak kullanılan senkron generatörlerin uç geriliminin uygun geri besleme tertipleri ile devamlı olarak sabit tutulması olayı gösterilebilir.

Frekans: Senkron generatörleri çeviren buhar ve su türbini gibi çevrici makinelerin dönüş hızları, değişik çalışma şartları altında dahi uygun geri besleme tertipleri ile donatılan hız ayarlayıcılar yardımı ile sabit tutularak elektriksel enerji kaynağının frekansının değişmemesi sağlanır.

Kontrol sisteminin yeterlilik ve uygunluğunun seçilen makinenin temel özelliklerine bağlı bulunduğu açıktır. Örneğin; bir senkron motor yüke bağlı olmadan ve herhangi bir dış etkiye ihtiyaç kalmadan belirli ve değişmeyen bir senkron hız ile döner veya seri-paralel (kompunt) uyarmalı bir DC motorda uyarma devresi uygun şekilde bağlanarak hızının yüke bağlı olarak geniş sınırlar arasında değiştirilmesi sağlanır. Ancak sistemden beklenen davranış, makinenin özellikleriyle sağlanamıyorsa, bu durumda uygun kontrol yani geri besleme sistemleri uygulanır. Özellikle makine karakteristikleri, dışardan uygulanan büyüklüklerle uygun şekilde ayarlanarak sisteminin sade olmasına ve cevap hızının imkânlar ölçüsünde büyük olmasına dikkat edilir.

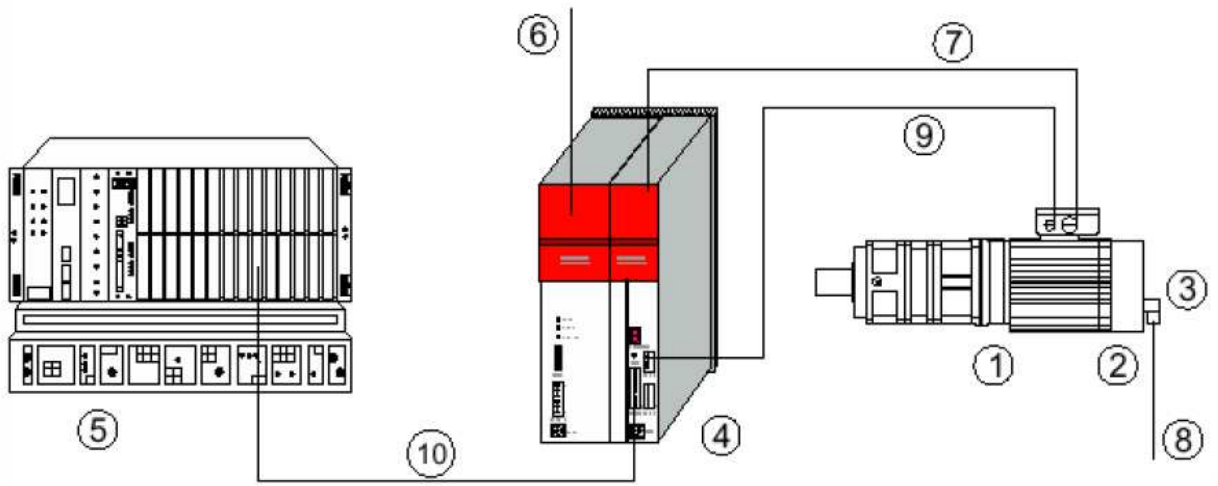
3.2. Servo Sistem Elemanları

Tipik bir servo sistemin blok diyagramı Şekil 3.1’ de görülmektedir. Servo sistemlerin çalışmasının anlaşılabilmesi için şekilde görüldüğü gibi; örnek bir uygulamada kullanılan elemanlara göre sistem, birimlere ayrılıp ayrı ayrı incelenmiştir.



Şekil 3.1. Bir servo sistemin blok diyagramı

Şekil 3.1’ de görüldüğü gibi bir PLC veya PC aracılığıyla yükün gitmesi istenilen ölçü, konum kontrolörüne bildirilmektedir. Konum kontrolü içerisindeki devrelerle üretilen düşük düzeyli sinyaller, akım yükselticiyle yükseltilerek motora uygulanır. Motor aldığı sinyale göre yükü hareket ettirir. Yükün konumunu tespit edebilen bir geri besleme elemanı ile yükün konumu, konum kontrolörüne iletilir. Konum kontrolörü aldığı geri besleme sinyaline ve yükün gitmesi gereken pozisyon bilgisine göre sinyal üreterek, en kısa sürede ve en yakın şekilde yükü istenilen konuma getirir. Şekil 3.2’ de pratik bir servo sistemin ilgili birimleri görülmektedir.



Şekil 3.2. Servo sistemin birimleri

- 1) Motor (redüktörlü/redüktörsüz)
- 2) Geri besleme elemanı
- 3) Fren sistemi (isteğe bağlı)
- 4) Servo sürücü/kontrolör
- 5) Kontrol sistemi PC/PLC
- 6) Güç kablosu (Besleme kablosu)
- 7) Motor kablosu
- 8) Frenleme kablosu
- 9) Enkoder kablosu (Sinyal kablosu)
- 10) Kontrol (Haberleşme) kabloları

Servo motor, aktarma organı ve yükten oluşan mekanik servo sistemin hız, moment veya pozisyon değişkenlerinden herhangi birinin bu değişkenle ilgili verilen referans değerine uygun olarak hareket ettirilmesini sağlayan elektrik makinesidir.

Servo sürücü/kontrolör bir servo motorun hız, pozisyon ve momentini kontrol eder. Günümüzde kullanılan servo kontrolörler sayısal kontrolörlerdir. Sayısal kontrolörlerin analog kontrolörlere oranla aşağıdaki üstünlükleri vardır.

- Bilgisayar destekli uygulamaları kolaydır,
- Diğer birimlerle haberleşmeleri kolay ve güvenilirdir,
- İşaret işlemleri kolaydır,
- Çalışma koşulları sınırlarında uzun ömürlüdürler.

Genel olarak bir servo sürücü iki ana birimden oluşur.

- Güç kaynağı birimi (power supply module)
- Eksen birimi (axis module)

Güç kaynağı birimi, sürücü için gerekli besleme gerilimlerinin yanı sıra, eksen kontrolleri için gerekli güçleri, servo motor frenleme gerilimini, sürücü ve sistemi koruyacak birçok koruma düzeneği ile standart bir haberleşme kapısına (RS 232 / RS 485) sahiptir.

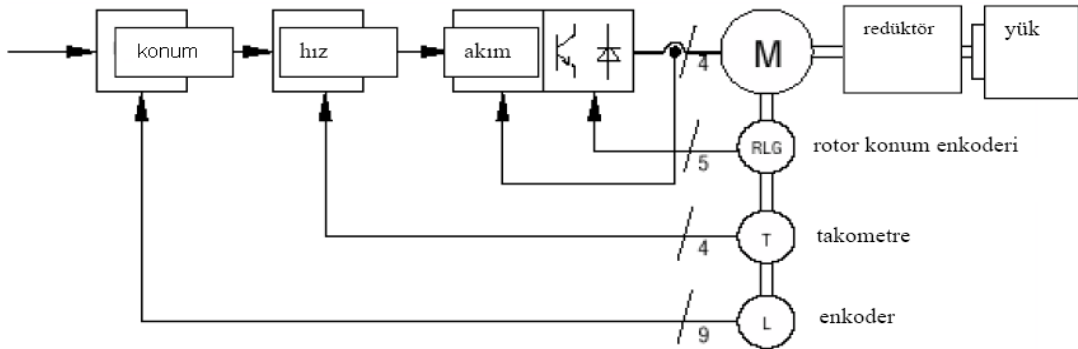
Eksen birimi ise servo motorun hız, pozisyon ve momentini kontrol eder. Bu kontrol için gerekli elektronik donanımı içerir. Günümüzde kullanılan birçok servo sistem, servo motorun yanı sıra bu sistemde kullanılabilecek diğer yardımcı motor, sensör, anahtar ve diğer elemanların da kontrolü için gerekli; sayısal giriş/çıkış, analog giriş/çıkış ve kontrol elektroniğine de sahiptirler. Başka bir deyişle ayrıca bir PLC' ye (Programmable Logic Controller = Programlanabilir sayısal kontrolör) gerek kalmaksızın sistemin kontrolünü yapabilecek elektronik donanım ve yazılıma sahiptirler.

Servo motor sürücüleri, DC servo sürücüler ve AC servo sürücüler olarak ikiye ayrılmaktadırlar. Günümüzde çeşitli üretici firmalar tarafından üretilen çok farklı işlevlere ve güçlere sahip servo motor sürücüleri bulunmaktadır. Her üretici firmanın kendine özgü geliştirdikleri teknik ve özellikleri olmasına rağmen, tipik bir servo sürücüde ortak özellikler bulunur.

3.2.1. DC servo sürücüler

Bir DC servo motorun hızı, gerilim değiştirilerek kontrol edilir. Geri besleme elemanları motor hızını tespit eder ve hızı set edilen değerde veya bu değere yakın tutmak için çıkış geriliminin artırılması veya azaltılması yoluyla kontrole bilgi gönderirler. Darbe genişlik modülasyonu (PWM) ile çalışan, genellikle analog ya da dijital sürücülerdir. Geri besleme olarak tako jeneratör, hall sensörü veya artırımli enkoder kullanılır. Dinamik performansı düşük, kullanımı kolay ve ucuz sürücülerdir.

Uygulanacak kontrol yöntemi, seçilen motor türüne doğrudan bağlıdır. Bir servo sistem ile kontrol edilen DC motorun blok diyagramı Şekil 3.3' deki gibidir.

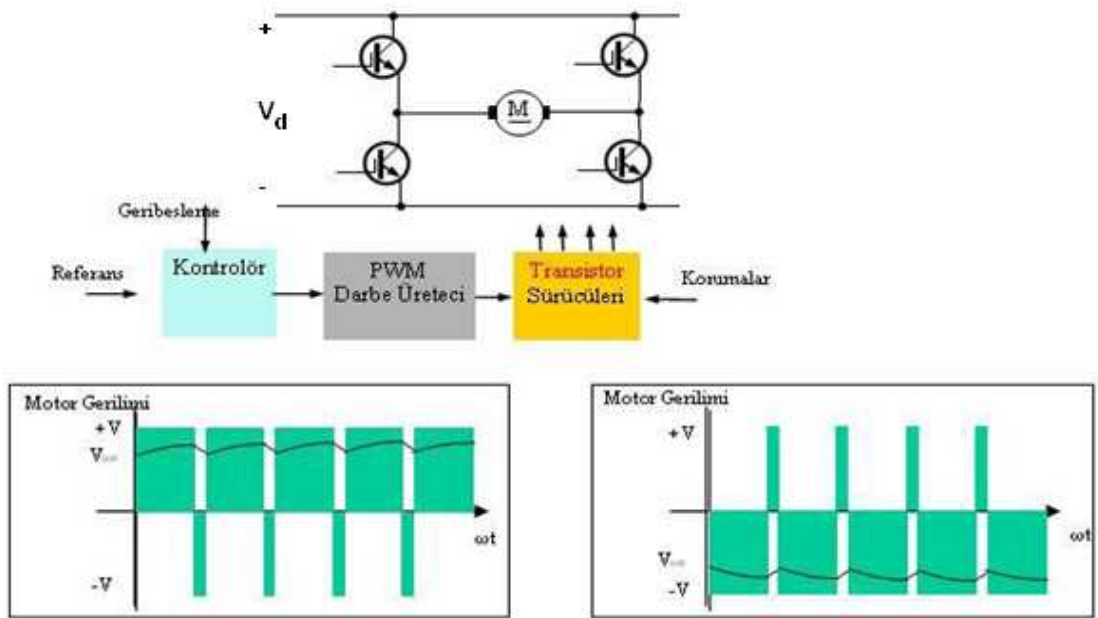


Şekil 3.3. DC servo motor kontrol blok diyagramı

Blok diyagramda da görüldüğü gibi, bir DC servo sistemdeki motorun iki temel büyüklüğünün bilinmesi ve kontrol edilmesi gerekir. Bunlardan biri motorun o andaki hızı, diğeri ise motor milinin konumudur. Motor hızı, birer takometre veya

enkoder ile ölçülür. Motor mili konumu ise motor konum enkoderi (resolver) ile ölçülür ve genellikle doğrudan motor miline akuple edilmiştir. Bazı uygulamalarda ise motor miline binen moment kontrol edilmek istenir. Bunun için ise motorun çektiği akım miktarı kullanılır.

Pratikte 0,1–250 kW ile 40.000 NM güçlerde servo motorlar üretilmektedir. Seçilecek motor gücü hareket ettireceği mekanik yük aracılığı ile hesaplanır. Şekil 3.4’ de PWM kontrollü dört bölgeli bir DC servo motor sürücü devre şeması ve gerilim dalga şekli görülmektedir.



Şekil 3.4. PWM kontrollü DC servo motor sürücü devre şeması ve gerilim dalga şekli

3.2.2. AC servo sürücüler

Sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu (SPWM) ile çalışan, analog veya dijital yapıda sürücülerdir. Geri besleme olarak hall sensörü, resolver, artırımı enkoder veya mutlak (sin/cos) enkoder kullanılır. Dinamik performansı yüksek, kullanımı bilgi gerektiren ve DC servo sürücülere göre daha pahalı sürücülerdir.

Bir AC servo motorun hızı aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$n = \frac{60 \times f}{p} \quad (3.1.)$$

Bu denklemde n, motorun devir/dakika olarak hızıdır. Tipik servo motorlar için bu değer 2000, 3000, 4500 d/d değerlerindedir.

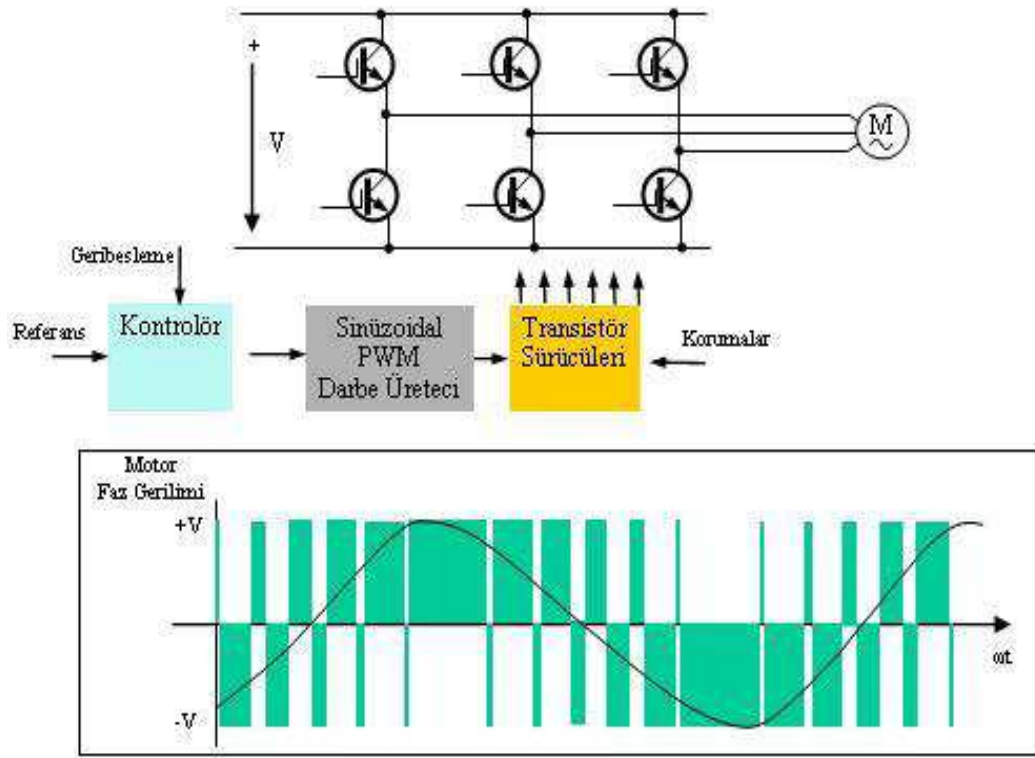
f: uygulanan gerilimin frekansıdır. Birimi hertz (Hz.) dir. Tipik bir uygulama için değeri 100, 150, 225 Hz. dir

p: Stator kutup çifti sayısıdır. 6 kutuplu bir servo motor için değeri 3' dür.

Bir asenkron servo motorun yapısı ve çalışma ilkesi klasik bir asenkron motor veya DC motor ile aynıdır. Asenkron servo motorunun statoruna uygulanan gerilim, rotora döndürme yönünde bir elektromanyetik etki yapar ve bu etki ile motor döner.

Servo motor hız kontrolü, diğer motorlarda olduğu gibi uygulanan gerilimin frekansı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle motor hızının kontrolü için sürücüler ile frekans değiştirme yöntemleri uygulanır. Motor hızının istenen değerde kararlı kalabilmesi için de P, PI, PID kapalı çevirim kontrol yöntemleri kullanılır.

Üç fazlı AC servo motor devre şeması ve faz gerilim dalgası değişimi Şekil 3.5' de verilmiştir. İnverterlerde kullanılan transistörler rotor konum bilgisine göre uygun sırada iletme veya kesime geçirilerek motor kontrolü yapılır.

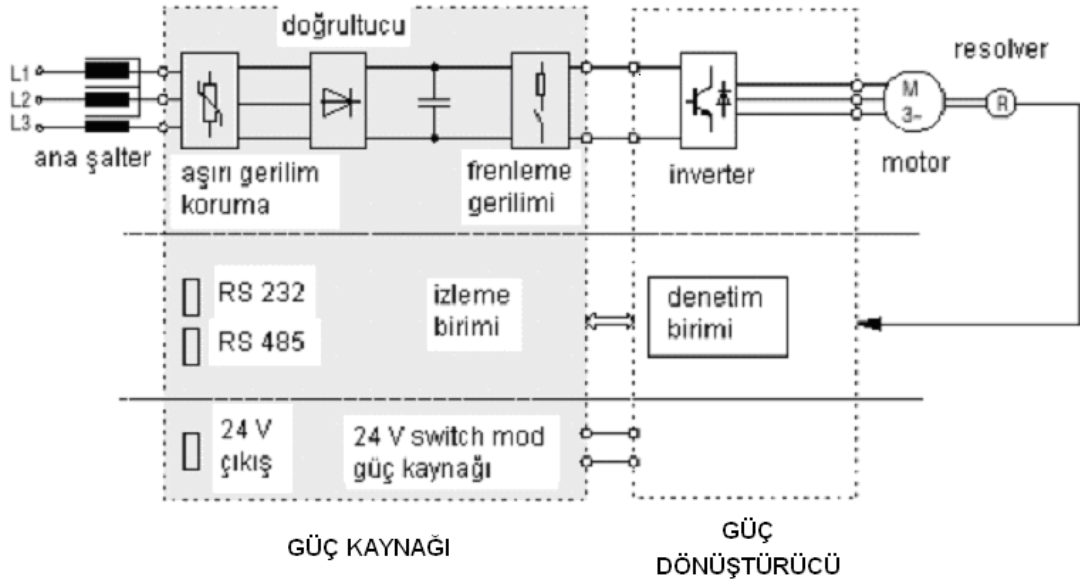


Şekil 3.5. Üç fazlı AC servo motor sürücüsünün devre şeması ve faz geriliminin değişimi

3.3. Servo Sürücü Temel Birimleri

3.3.1. Güç kaynağı

Servo motor sürücüsünün güç kaynağı, bir kontaktör veya şalter üzerinden ana besleme gerilimine bağlanır. Güç kaynağı biriminin genel blok diyagramı Şekil 3.6' daki gibidir.



Şekil 3.6. Bir servo sürücüsünün blok diyagramı

Şekil 3.6’ da da görüldüğü gibi bir servo sürücünün güç kaynağı biriminde;

Aşırı gerilim koruması: Besleme geriliminde oluşan gerilim dalgalanmalarına karşı sürücü sistemini korur,

Doğrultucu: Üç fazlı köprü doğrultucu devresidir. AC gerilim frekansının değiştirilmesi için öncelikle doğru gerilime çevrilir.

Frenleme gerilimi: Servo motorun durma anında ters gerilim verilerek, tam olarak istenen noktada durmasını sağlar. Verilen bu ters gerilimin sönmülendirilmesi için motora bir frenlenme omik direnci bağlanırsa daha iyi bir sonuç alınır. Özellikle yüksek güçlü ve ataletli sistemlerde bu bir zorunluluk haline gelir.

İzleme birimi: Bu birim çeşitli sürücü parametrelerinin merkezi bir kontrol noktasından izlenmesini sağlar. Örneğin; sürücü akımı, gerilimi, motor sıcaklığı gibi parametreler bu birim aracılığı ile izlenebilir.

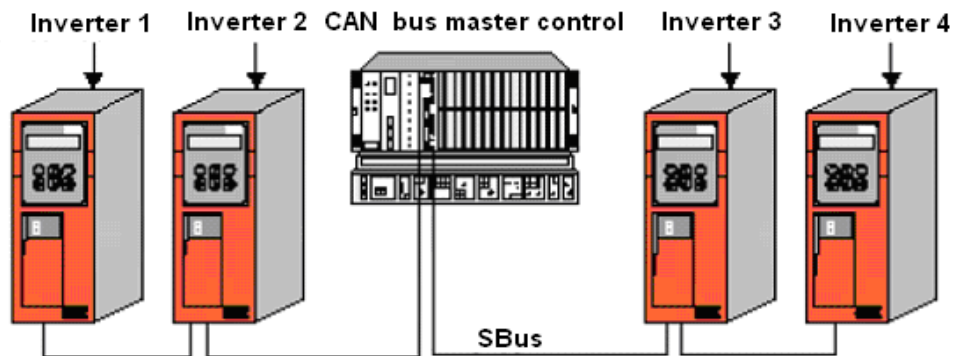
Anahtarlama güç kaynağı: Sistem gereksinimi olan 24 V' luk gerilimi anahtarlama mod olarak sağlayan birimdir. Uygulamada bu gerilim, sürücü dışındaki çeşitli birimlerin beslenmesi için de kullanılır.

RS 232-RS 485 haberleşme kapısı: Servo sürücünün merkezi bir kontrol birimine (PLC veya PC) bağlanması için kullanılır. Endüstriyel uygulamalarda 1500 V gerilim koruması sağlayan ve ağ desteği veren RS 485 haberleşme kapısı tercih edilir. Servo sürücü sistemleri üzerinde bulunan seri haberleşme kapıları kendilerine özgü haberleşme protokollerine sahiptirler. Üretici firmalardan bu haberleşme protokolleri öğrenilebilir.

Günümüzde kullanılan servo sistemler RS 232 seri haberleşme dışında endüstriyel uygulamalarda kullanılan aşağıdaki haberleşme protokollerini de desteklerler. Bu haberleşme protokolleri için genellikle ek bir birimin sisteme eklenmesi gerekir (www.mersin.edu.tr).

- PROFIBUS
- INTERBUS
- CANBUS
- DEVICENET
- SYSTEMBUS
- PROFINET

Şekil 3.7' de systembus ile gerçekleştirilmiş bir ağ yapısı görülmektedir.

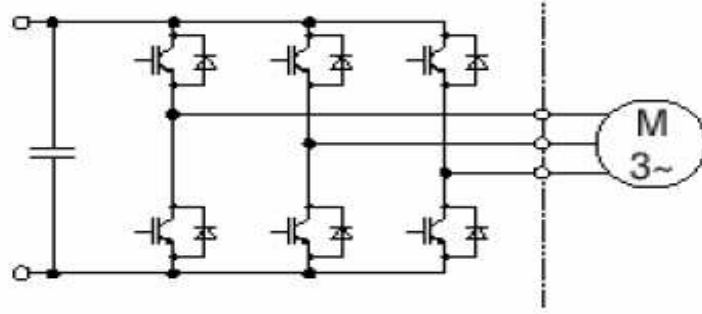


Şekil 3.7. Bir Systembus ağı

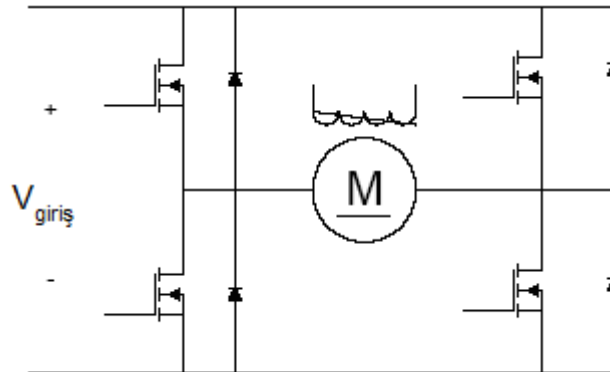
Çeşitli haberleşme protokolleri aracılığı ile bir servo sistem, bir otomasyon sistemin alt birimi olarak kullanılabilir. Birden çok servo sistem kullanılacak ise bunlar birbirlerine bağlanabilir.

3.3.2. Güç dönüştürücü

Bu birim, bir servo sistemde eksen kontrolü için gerekli gerilimi, geri besleme elemanı ve kontrol yöntemi aracılığı ile üretir. Bu birimde, güç biriminde doğrultucu ile DC' ye çevrilen gerilim tekrar AC gerilime çevrilir ve frekansı isteğe göre değiştirilir. Şekil 3.8' de DC gerilimi AC gerilime çevirme modülü (inverter) görülmektedir. Şekil 3.9' da ise bir DC servo motoru sürmek için kullanılan dört bölge bir DC-DC dönüştürücü devresi görülmektedir.



Şekil 3.8. DC gerilimi AC gerilime çevirme modülü



Şekil 3.9. DC gerilimi DC gerilime çevirme modülü

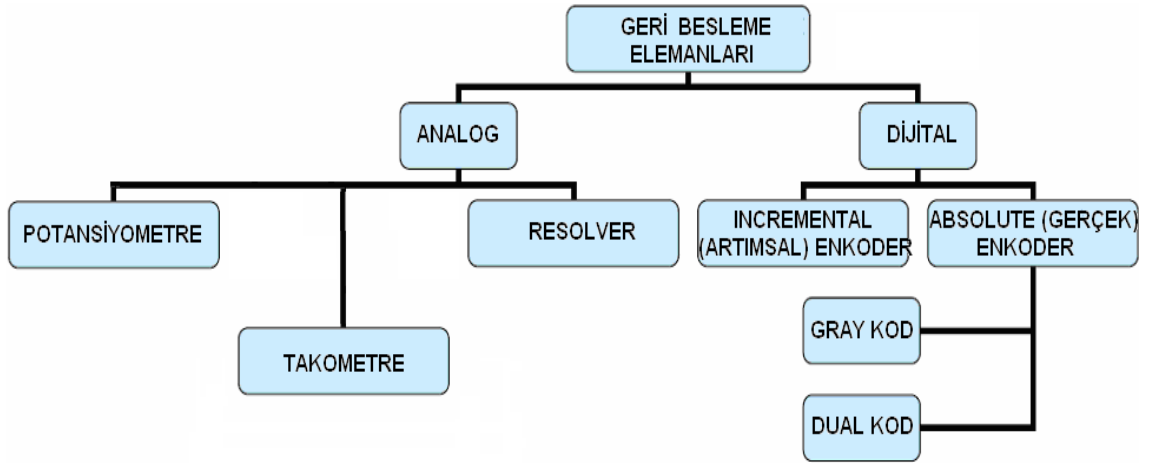
Yukarıda anlatılan donanımlara sahip sürücüler, çeşitli kontrol yöntemleri kullanırlar. Aşağıda, uygulamalarda sıkça kullanılan kontrol yöntemleri belirtilmiştir.

- Sistemde kullanılan motor parametreleri (motor türü, gücü, akımı, koruma yöntemi vb.),
- Referans işaret değerleri (sistemin başlangıç, bitiş ve sınır değerleri),
- Sistem bağlantıları ve hangi girişin ne amaçla kullanıldığı,
- Sistemde kullanılan ek birimlerin özellikleri (ağ haberleşme birimi, frenleme birimi gibi).

3.3.3. Geri besleme elemanı

Elektrik mühendisliği açısından bakıldığında büyüklükler, elektriksel büyüklükler (akım, gerilim, direnç) ve elektriksel olmayan büyüklükler olarak iki grupta toplanabilir. Üzerinde bir işlem yapmak ya da bir kontrol değişkeni olarak kullanabilmek için bu büyüklüklerin ölçülmeleri şarttır. Elektriksel olmayan büyüklükler çoğu zaman elektriksel büyüklüklere dönüştürülerek ölçülür. Elektriksel olmayan büyüklükleri elektriksel biçime dönüştürmek için dönüştürücülere ihtiyaç vardır. Enerjiyi bir biçimden başka bir biçime dönüştüren elemanlara “dönüştürücü” denir. Başka bir deyişle dönüştürücü (transduser), bir çeşit sezici eleman ya da cihazdır. Fiziksel veya kimyasal büyüklükleri elektrik, pnömatik, ya da hidrolik çıkışlara dönüştürür. Kullanım biçimine göre, dönüştürücüler genel olarak elektriksel ve mekaniksel dönüştürücüler olarak iki gruba ayrılır. Elektriksel etkiyle çalışan dönüştürücüler, girişlerine mekanik, kimyasal, ısı, elektromekanik vb. formlarda giriş yapılabilen ve bu formdaki giriş değişkenleri ile orantılı olarak elektriksel çıkış veren dönüştürücülerdir. Kontrol edilecek ya da ölçülecek fiziksel büyüklükleri sezen ve elektriksel forma dönüştüren çok sayıda dönüştürücü mevcuttur.

Geri besleme elemanı, bir servo sistemin hızını, motor milinin bulunduğu konumu ve yükün bulunduğu konumu ölçmek için kullanılır. Uygulamalarda kullanılan geri besleme elemanları Şekil 3.10’ daki diyagramda görülmektedir.

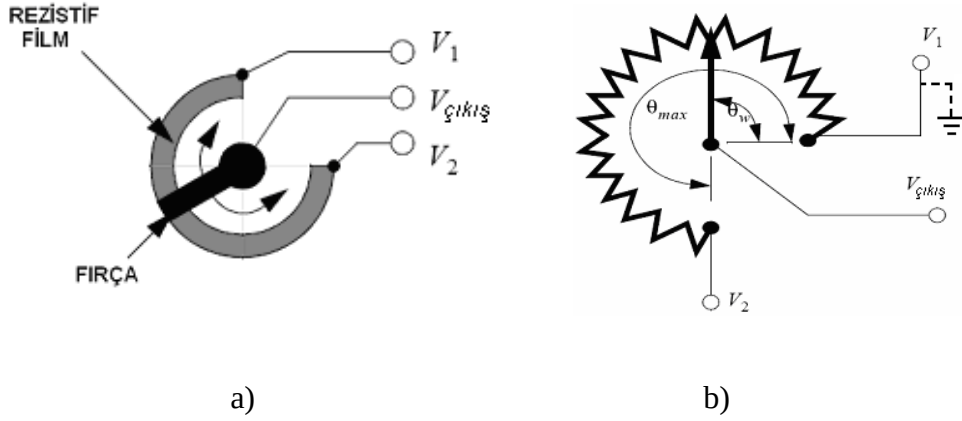


Şekil 3.10. Servo motor geri besleme elemanları

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, sisteme olumsuz yöndeki bu etkilerinin azaltılması gerekir. Pratik uygulamalarda aşırı hız nedeniyle ısınmanın önlenmesi için uygun dönme (yataklama) sistemleri, elektromanyetik alandan korunması için de uygun ekranlama yapılmaktadır.

3.3.3.1. Potansiyometre

Potansiyometreler, değişken bir direnç kullanarak milin açısal pozisyonunu bulmaya yararlar. Açısal potansiyometrenin yapısı Şekil 3.11’ de görülmektedir. Potansiyometre normalde ince rezistif bir filmten yapılmış bir direçtir. Bu rezistif film boyunca bir fırça hareket ettirilir. Fırça hareket ettikçe uzaklıkla orantılı olarak dirençte değişiklik olur. Dirence gerilim uygulandığı takdirde, fırçadaki gerilim, direncin sonundaki gerilim ile ara bir değerde olmaktadır.



Şekil 3.11. a) Açısal bir potansiyometrenin fiziksel gösterimi ve b) sembolik gösterimi

Potansiyometre bir gerilim bölücü olarak kullanılmıştır. Fırça döndükçe, çıkış gerilimi dönme açısına bağlı olarak değişecektir. Gerilim bölücü olarak açısal bir potansiyometrenin çıkışı,

$$V_{\text{çıkış}} = (V_2 - V_1) \frac{\theta_w}{\theta_{\text{max}}} + V_1 \quad (3.2.)$$

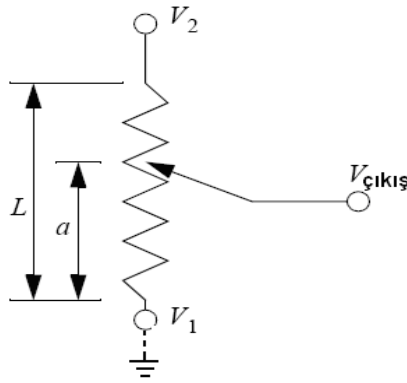
olarak bulunur. Burada, genellikle $V_1 \cong 0 \text{ V}$ ' dır.

Potansiyometreler pozisyon bulmada popülerlerdir çünkü ucuzdurlar ve özel sinyal sağlayıcılara gerek duymamaktadırlar. Ancak doğrulukta limitleri vardır. Normalde bu oran % 1' dir ve mekaniksel yıpranmaya açıktırlar.

Potansiyometreler mutlak pozisyonu ölçmektedirler ve monte halkalarını çevirerek ve yerlerine sıkıca oturduktan sonra kalibre edilmektedirler. Dönme açısı normalde 360° ' den aşağıya veya 360° ' nin katlarının aşağısına sınırlandırılmaktadır. Bazı potansiyometreler sınırsız dönebilirler ve fırça, direncin sonundan başına atlayabilir. Potansiyometredeki hatalar, hareket sırasının sonlarına hiçbir zaman ulaşamadığı şekli tasarlayarak bulunabilir. Eğer potansiyometreden gelen çıkış

gerilimi aralığın sonuna hiç ulaşamıyorsa, bir problem oluşur ve makine kapatılabilir. Buna sebep olabilecek iki durum; tellerin kopması veya potansiyometrenin boşa dönmesidir.

Açısal potansiyometrelerin yanında bir de lineer potansiyometreler mevcuttur. Şekil 3.12’ de gerilim bölücü olarak lineer potansiyometrenin çıkış gerilimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi çeşitli birimlerle, ölçülen çıkış geriliminin büyüklüğüne göre pozisyon bilgisi belirlenir.



Şekil 3.12. Lineer potansiyometre

Lineer bir potansiyometrenin çıkış gerilimi,

$$V_{\text{çıkış}} = (V_2 - V_1) \left(\frac{a}{L} \right) + V_1 \quad (3.3.)$$

olarak bulunur. Burada genellikle $V_1 \cong 0 \text{ V}$ ' dır.

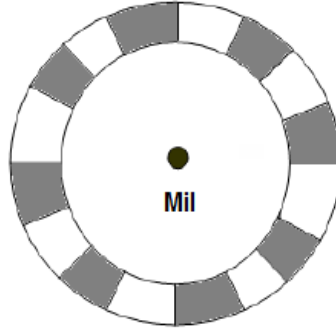
3.3.3.2. Mil pozisyon dönüştürücüleri ve sayısal kodlayıcılar

Hareket eden bir milin duruş pozisyonunu belirlemede kullanılan dönüştürücülere mil pozisyon dönüştürücüleri denir. Bu tip dönüştürücüler yapısı ve çalışması ile üç grupta toplanabilir.

- a) Fırça mil kodlayıcılar
- b) Manyetik mil kodlayıcılar
- c) Optik mil kodlayıcılar

a) Fırça Mil Kodlayıcılar

Bu tip kodlayıcılarda mil üzerinde dönen, mile tutturulmuş bir disk bulunur. Diskin üzeri, iletken ve yalıtkan kısımlara ayrılır. İletken kısımlara basacak şekilde uygun aralıklarda fırçalar yerleştirilmiştir. İletken kısımlar üzerine gerilim uygulanır. Fırçalar, iletken kısımlara geldiğinde 5 V, yalıtkan kısımlara geldiğinde 0 V olur. Fırçalara bağlı çıkışlarda kare dalga sinyaller üretilir. Elde edilen sinyallere göre mil pozisyonu belirlenir. Bu tip kodlayıcılar uygulamada fazla kullanılmamaktadır. Çünkü fırçalar dönen disk üzerine bastığında çabuk aşınmaktadır. Ömürleri oldukça kısadır. Şekil 3.13’ de bölünmüş disk görülmektedir.



Şekil 3.13. Bölünmüş Disk

b) Manyetik Mil Kodlayıcılar

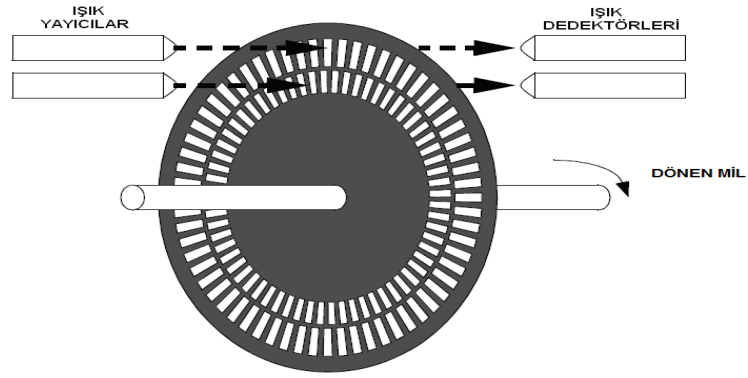
Bu tip kodlayıcılarda ise dönen disk üzerine manyetik ve manyetik olmayan parçalar yerleştirilir. Disk üzerine basan, manyetik alanlardan etkilenen bir başka sensörle mil pozisyonu belirlenir.

c) Optik Mil Kodlayıcılar (Enkoderler)

Bu tip mil kodlayıcıları üç kısımdan oluşmaktadır:

- 1) Diskin üzeri ışığı geçiren ve geçirmeyen kısımlara ayrılmıştır.
- 2) Işık kaynağı.
- 3) Işığı algılayan ışık sensörü.

Enkoderler, Şekil 3.14' de gösterildiği gibi optik pencereli dönen bir disk kullanırlar. Enkoder, üstünde ince pencerelerin oyulmuş şekilde bulunduğu optik bir disk içerir. Enkoder mili döndüğü zaman ışık demetleri kırılır. Burada gösterilen enkoder çeyrek daire bir enkoderdir.

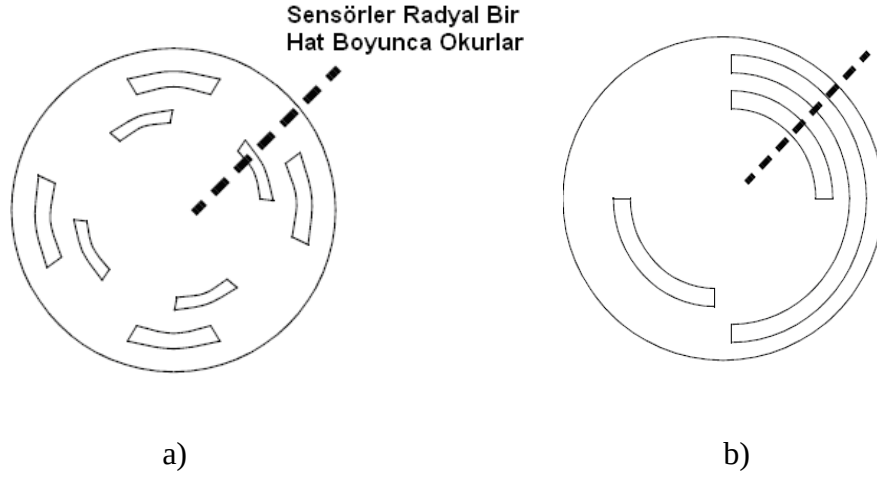


Şekil 3.14. Enkoderin temel yapısı

Temelde mutlak ve artımsal olmak üzere iki tip enkoder vardır. Mutlak enkoder milin pozisyonunu tek dönüşte ölçer. Aynı mil açısı, sürekli aynı okuma değerini doğurur. Çıkış genelde ikili (binary) veya gray kodlu sayılardır. Artımsal (veya bağıl) enkoder, yer değiştirmeyi belirlemek için iki tane darbe çıkışı verir. Lojik devre veya yazılım, dönme yönünü belirlemek için kullanılır ve yer değiştirmeyi belirleyebilmek için darbeleri sayar. Hız, darbeler arasındaki zaman ölçülerek tespit edilebilir.

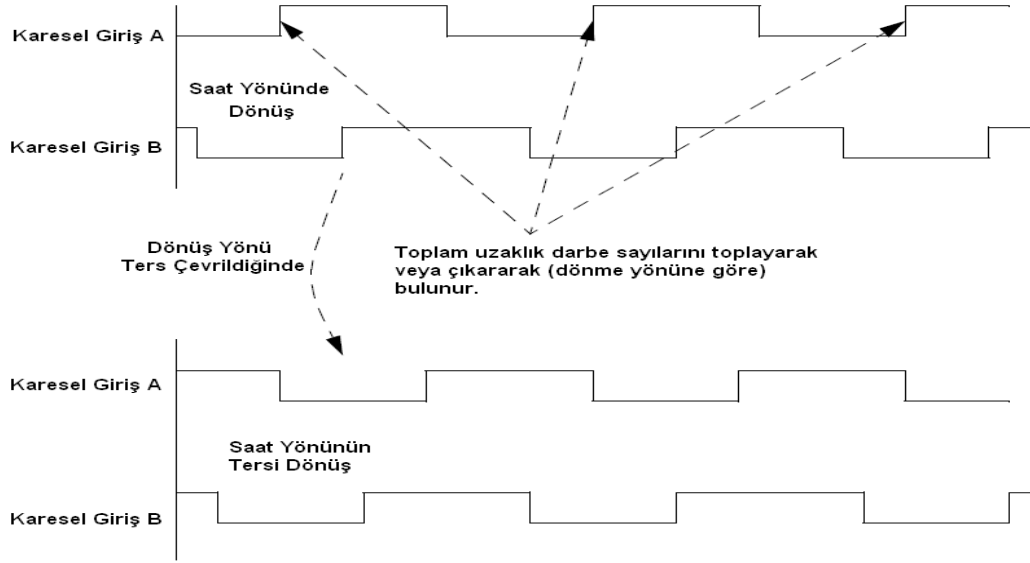
Enkoder diskleri Şekil 3.15' de gösterilmiştir. Mutlak enkoderin iki adet çemberi vardır. Dıştaki çember enkoderin en anlamlı, içteki çember ise enkoderin en az anlamlı hanesidir. Artımsal enkoderin, biri diğerinden birkaç derece ötede dönen

iki çemberi vardır. Diğer bir deyişle aynı şekilde dönen iki çemberi vardır. Her iki çember de çeyrek diske göre pozisyonu tespit ederler. Mutlak enkoderin doğruluğunu arttırmak için diske daha fazla çember, emiter ve detektör eklenmelidir. Artımsal enkoderin doğruluğunu arttırmak için mevcut iki çembere daha fazla pencere (boşluk) eklemek yeterlidir. Tipik olarak bu sayı çember başına ikiden, binlere kadar çıkmaktadır.



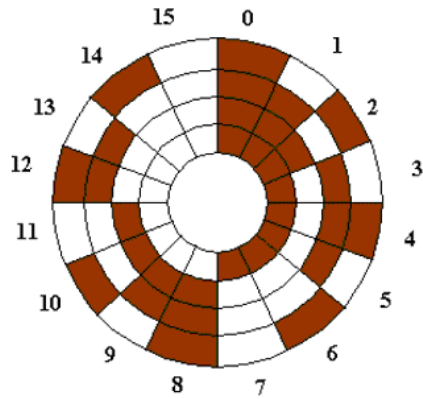
Şekil 3.15. Enkoder diskleri a) mutlak enkoder ve b) artımsal enkoder

Mutlak enkoderler kullanıldığında, tek bir dönüşteki pozisyon doğrudan ölçülür. Eğer enkoder birkaç kez dönerse, dönüş sayılarının toplamı ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Artımsal enkoder kullanıldığında ise dönüş uzaklığı, çemberlerden birisinin darbelerini sayma şekliyle belirlenir. Eğer enkoder sadece tek bir yönde dönerse, bir çemberdeki darbelerin basit bir sayımı, toplam uzaklığı belirler. Eğer enkoder iki yöne de dönebiliyorsa, darbeleri çıkarmak için ikinci bir çember kullanılmalıdır. Şekil 3.16' da iki çember kullanılan karesel şema gösterilmiştir. Sinyaller, biri diğerinin çıkışı olacak şekilde ayarlanmışlardır. Farklı yönlerdeki dönüşlerde, B girişinin A' nın ya arkasından geldiği ya da önünden gittiği görülmektedir.

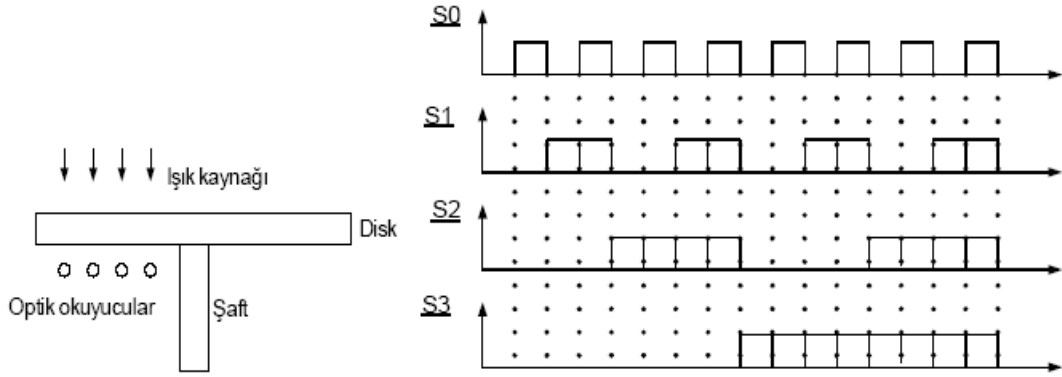


Şekil 3.16. Artımsal Enkoder

Şekil 3.17’ de gösterilen sayısallaştırılmış diskin bir tarafına ışık kaynağı, diğer tarafına da ışık sensörü yerleştirilir. Işık sensörü diskin şeffaf yerine geldiğinde üzerinde 1 değeri, opak kısmına geldiğinde ise 0 değeri oluşur. Şekil 3.18’ deki disk, ışığı geçiren ve geçirmeyen parçalara ayrılmıştır. Diske bakan ve yan yana duran 4 ışık sensörü bulunmaktadır. Sensörler diskin 0 bölümünde iken, tüm sensörler ışık geçirmeyen (opak) kısma geldiğinde hepsinin üzerinde 0 olacaktır ve sensör çıkışları sayısal olarak 0000 olacaktır. Mil hareket edip 1 bölümü optik sensörlerin önüne geldiğinde sensörlerde 0001 bilgisi olacaktır. 2 bölümünde ise optik sensörlerde 0010 bilgisi oluşacaktır. Disk üzerindeki düzenlemeden de anlaşıldığı gibi diskin duruş pozisyonuna göre sensör çıkışlarından 0 – 15 arasında değişen sayısal değerler alınarak milin duruş pozisyonu belirlenir (www.mersin.edu.tr).

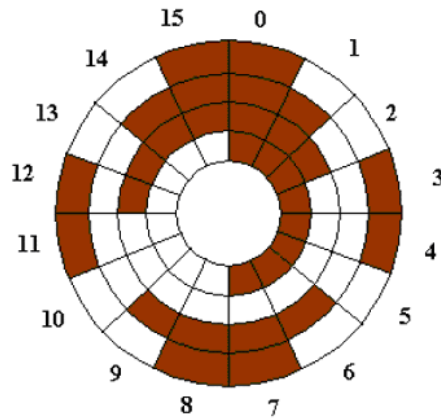


Şekil 3.17. Sayısallaştırılmış disk



Şekil 3.18. Optik okuyuculardan alınan sinyallerin ikili kod karşılığı

Uygulamalarda ikili kodlanmış diskler yanlışlıklara neden olabilmektedir. Ara geçiş noktalarında mil pozisyonu tam olarak algılanamamaktadır. Örneğin sensörlerin karşısında 7–8 arası bölüm kaldığını düşünelim. Bu durumda sensörlerden 1111 bilgisi okunur ki bu gerçek değerden çok farklı bir değerdir. İşte bu tip hataları ortadan kaldırmak için disk ikili kodlanmak yerine gray kodu ile kodlanmaktadır. Şekil 3.19’ da da görüldüğü gibi, gray kodunda her bölümün kodu bir önceki bölümün kodundan 1 bit değişiktir. Tam ara durumda kalan sensörler ya bir önceki durumu ya da bir sonraki konumu belirler, böylece oluşacak hata oldukça küçük olacaktır. Gray kodunu, ikili koda dönüştüren lojik devre ile mil pozisyonu daha doğru bir şekilde algılanabilmektedir.



Şekil 3.19. Gray kodlanmış disk

Disk üzerindeki bölümler artırılarak daha hassas pozisyon algılaması yapılabilir. Milin dönüş yönü, saymanın yukarı veya aşağı durumuna göre belirlenebilir. Çıkıştan elde edilen kare dalga, doğrultularak dış devreye alınır. Dış devrede dijital/analog dönüştürücüler sayesinde de dijital takometreler elde edilebilir.

Enkoderler, PLC, CNC kontrol sistemleri ve sürücü sistemleri ile birlikte kullanılabilirler. Enkoderlerin; flanş tipi, senkron ve sıkıştırma flanşlı olan montaj tipleri mevcuttur. Enkoderlerin elektriksel bağlantısı bir kablo ve soket kullanılarak veya direk flanşa monte edilmiş bir soket kullanılarak yapılır. Mil kaplinleri ve sıkıştırma aparatları, montaj aksesuarları olarak sağlanabilmektedir. Şekil 3.20' de enkoderlere ilişkin resimler verilmiştir.

Artımsal enkoderlerin; eş uzaklıklı ölçeklenmiş bir izi ve belirli bir artım sayısı vardır. Bu enkoderlerde, referans olarak işaretlenmiş bir sıfır izi bulunmaktadır. Referans işareti; belirgin olarak atanmış bir artım izi olup, makinenin mekanik sistemine belirgin bir görev atanmasına izin verir.



Şekil 3.20. Enkoderlerin genel resimleri

Yüksek seviyeli kontrol sisteminin farklı arabirimleri için çeşitli elektriksel arabirimler mevcuttur. Bunlara örnek olarak; RS 422 (TTL), HTL veya 1 VPP analog sinyalleri verilebilir. Farklı çalışma gerilimleri için değişik seçenekler mevcuttur. Mutlak değerli enkoderler; kontrol sistemi enerjilendikten hemen sonra (makine hareket etsin ya da etmesin) mutlak pozisyon değerini verir. Mutlak pozisyon değeri, bir disk üzerinde halka biçiminde iç içe yerleştirilmiş olan izlerin

opto-elektronik sistemle taranmasıyla hesaplanır. Tek turlu mil kodlayıcılar bir tur içindeki mutlak pozisyonu algılar. Çok turlu mil kodlayıcılar ise ilave olarak dönme sayısını da kodlar.

3.3.3.3. Takometre

Takometreler yapı ve çalışma bakımından iki tiptirler:

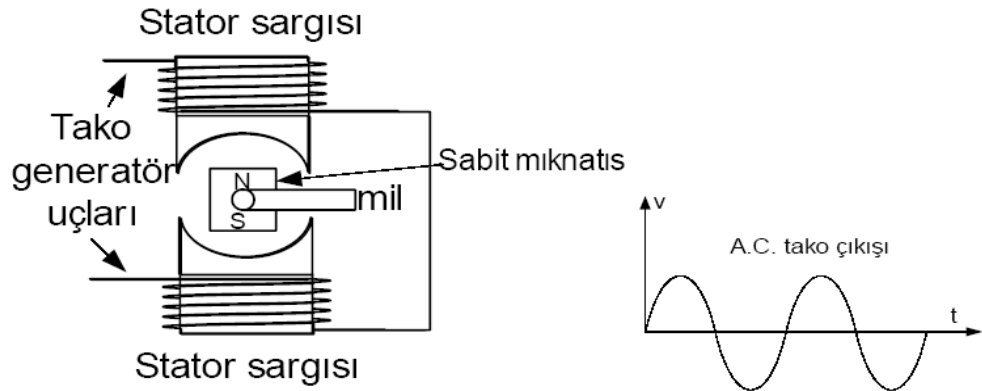
- 1) Analog takometreler
- 2) Dijital takometreler

3.3.3.3.1. Analog takometre

Bunlar aslında bir doğru akım ya da bir alternatif akım generatörüdür. En önemli özelliği Gerilim / Devir sayısı oranının sabit olmasıdır. Yani dönme sayısı ile ürettiği gerilim orantılı olarak değişir. Ölçme amaçlı olduğu için güçleri 5–10 watt civarındadır.

AC Takometreler

Yapı olarak bir fazlı alternatif akım generatörünün minyatürüdür. Ancak burada endüktör sargısı yerine sabit mıknatıs vardır. Gövde üzerinde stator sargıları mevcuttur.



Şekil 3.21. Alternatif akım tako generatörü ve sinyal çıkışı

Hızı ölçülecek makinenin miline içteki sabit mıknatıs mekanik olarak bağlıdır. Mil dönmezken N-S kutuplarının meydana getirdiği manyetik alan sabit bir değerde ve yöndedir. Sabit bir manyetik alan içinde kalan stator sargılarında hiçbir gerilim meydana gelmez. Manyetik alan içinde kalan bir iletkende gerilim oluşması için ya manyetik alanda bir değişme olmalı ya da iletken hareket etmelidir (www.mersin.edu.tr).

Manyetik alan içinde dönen bir iletkende meydana gelen gerilim aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$E = K \cdot \Phi \cdot n \text{ volt} \quad (3.4.)$$

Bu denklemde;

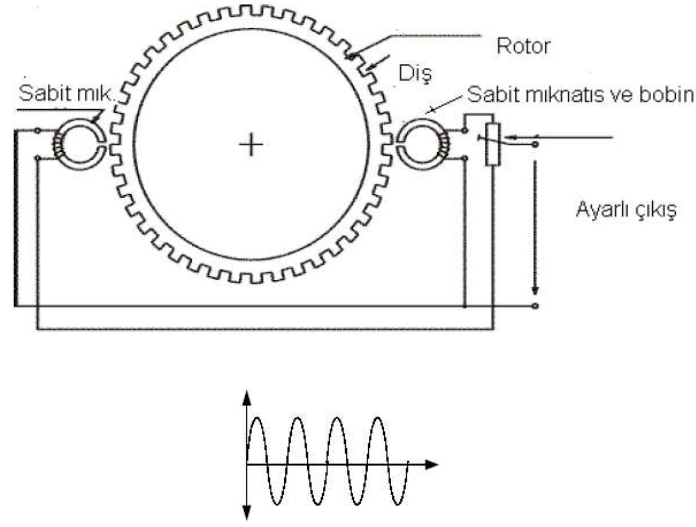
E = gerilim (volt)

K = generatörün stator sarımla ilgili katsayı

Φ = Bir kutup altındaki toplam manyetik akı (Maxwell)

n = İletkenin hızı (devir/dakika)

Hızı ölçülecek makinenin miline bağlı generatörün rotoru döndürülürse N-S kutupları da aynı hızda dönecektir. N-S kutuplarının meydana getirdiği manyetik akı stator sargıları üzerinde değişken bir alan oluşturacaktır. Değişken alan içinde kalan stator sargılarında bir gerilim meydana gelecektir. Meydana gelen gerilimin değeri hız ile doğru orantılıdır. Bu tip takometreler fırçasız tip olduklarından bakıma ihtiyaç göstermezler. Endüstri de çok fazla kullanılmaktadırlar. Bir başka alternatif akım takometresi de Şekil 3.22' deki gibidir.



Şekil 3.22. Değişken relüktanslı takometre ve sinyal çıkışı

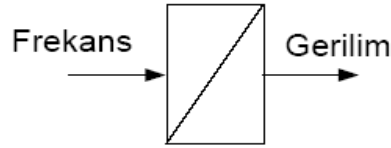
Şekil 3.22’ deki değişken relüktanslı takometre rotorunun üzerine dişler açılmıştır. 180 derece eksen üzerine iki adet sabit mıknatıs yerleştirilmiş ve üzerine stator sargıları sarılmıştır. Rotorun üzerindeki diş, tam sabit mıknatısın hava aralığını kapatacak şekle geldiğinde mıknatıs üzerindeki manyetik alanın miktarı artacaktır. Sabit mıknatısın hava aralığına boşluk geldiğinde mıknatıs üzerindeki manyetik alan azalacaktır. Manyetik alanın şiddeti, devresini tamamladığı yolun relüktansına bağlı olarak değişmektedir.

Rotor hareketsiz iken mıknatıs üzerindeki sargılar, sabit bir alan içinde olduklarından üzerinde bir gerilim indüklenmez. Ancak rotor döndürülünce, rotor dişlileri sabit mıknatıs önünden geçerken manyetik alan devresini, bir dişli-bir boşluk üzerinden tamamlamak zorunda kalacaktır. Yani sabit mıknatısın önüne rotorun dişi geldiğinde manyetik geçirgenlik yüksek olacak, boşluk geldiğinde manyetik geçirgenlik düşük olacaktır. Böylece manyetik direnç değişken olduğundan bobinler değişken şiddette manyetik alan içinde kalmış olacaktır. Değişken manyetik alan içerisinde kalan bobin de bir gerilim indükler. Rotor sargılarında, rotorun hızına bağlı olarak sinüzoidal bir gerilim meydana gelecektir. Stator sargılarında meydana gelen sinüzoidalın genliği potansiyometre ile ayarlanabilmektedir. Bu tür takometrelerde, rotor bir devir yaptığında, diş sayısı kadar devir sayısı meydana gelmektedir. Bir

saniyede ölçülen çevrim sayısı, dişli sayısına bölünürse saniyedeki devir bulunur. Burada devir sayısını, devir / dakika cinsinden bulmak için 60 ile çarpmak gerekir.

$$n = \frac{\text{Frekans} \times 60}{\text{Dişli Sayısı}} = \text{devir / dakika} \quad (3.5.)$$

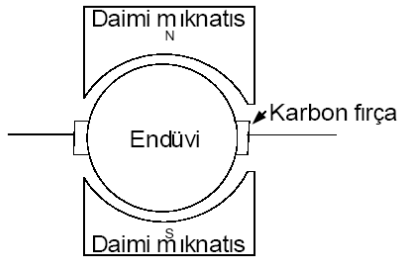
Bu tip takometrelerde elde edilen sinyalin frekansı Şekil 3.23’ de verilen frekans/gerilim dönüştürücülerle doğru gerilime dönüştürülerek ölçme işlemi yapılır. Elde edilen gerilim ile devir arasında doğrusal bir orantı vardır.



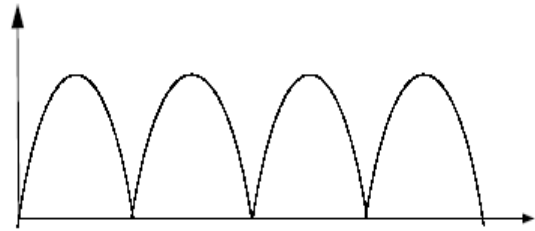
Şekil 3.23. Frekans / gerilim dönüştürücü blok şeması

DC Takometreler

Şekil 3.24.a’ da görüldüğü gibi endüvi ya da rotoru çepeçevre saran daimi mıknatıs kutupları ve ortada mile bağlı olarak dönen sargılı bir rotor vardır. Endüvinin dönüş hızına bağlı olarak, endüvi sargısında bir gerilim meydana gelir. Aslında, endüvi sargısında meydana gelen gerilim AC’ dir. Ancak dış devreye enerjinin alınması fırça ve kolektör sistemi ile yapıldığından DC’ ye dönüştürülür. Çıkış devresinde elde edilen DC gerilim, Şekil 3.24.b’ de görüldüğü gibidir.



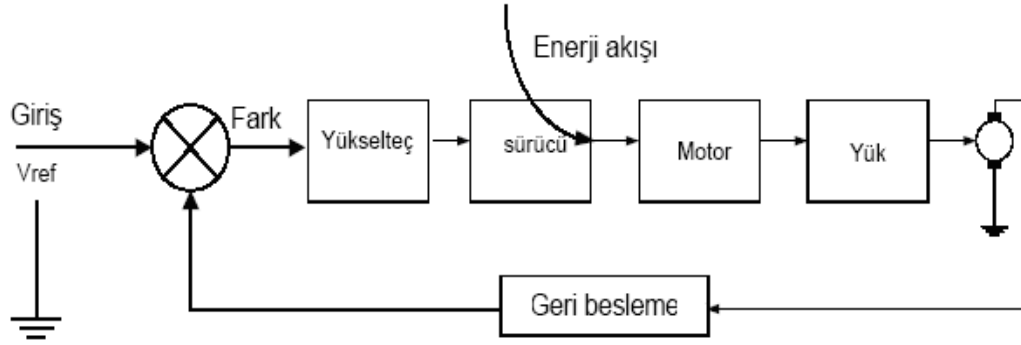
(a)



(b)

Şekil 3.24. a) Doğru akım takometresi, b) DC takometrede meydana gelen gerilim

Takometrenin çıkışı görüldüğü gibi tam doğru akım değildir. Tam doğru akıma dönüştürmek gerekirse filtre elemanları kullanılır. DC takometreler, fırça ve kollektör sistemine sahip olduklarından bakıma ihtiyaç gösterirler. Şekil 3.25’ de bir DC takometrenin hız kontrolünde kullanılmasına ilişkin blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.25. Bir tako generatörün hız denetiminde kullanılması

3.3.3.2. Dijital takometreler

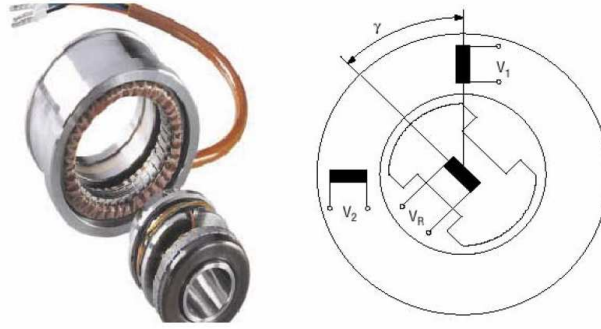
Yüksek devirli makinelerde takometrenin motora hiç yük etkisi yaratmaması istenir. Bu tür yerlerde dijital (sayısal) takometreler kullanılır. Motorun mili üzerine delikli bir disk yerleştirilir. Delikli diskin bir tarafında ışık kaynağı, diğer tarafında da ışık sensörü bulunur. Delikli diskin her hareketinde delikten geçen ışık, ışık sensörünü uyarır. Işık sensörüne gelen kesik kesik ışık, elektriksel sinyale dönüştürülür. Elde edilen elektriksel sinyal bir frekans/gerilim dönüştürücü ile doğru akıma çevrilerek ölçülür. Doğru akımın değeri ile devir sayısı arasında doğrusal bir ilişki olduğundan sonuçta devir ölçülmüş olur.

1) Bir önceki örnekteki gibi frekans / gerilim dönüştürücü arabirim ile ölçme yapılabilir.

2) Elde edilen frekans, bir tur başına milin verdiği darbe sayısına bölünür. Yine elde edilen sayı 60 ile çarpılarak dakikadaki devir sayısı bulunur.

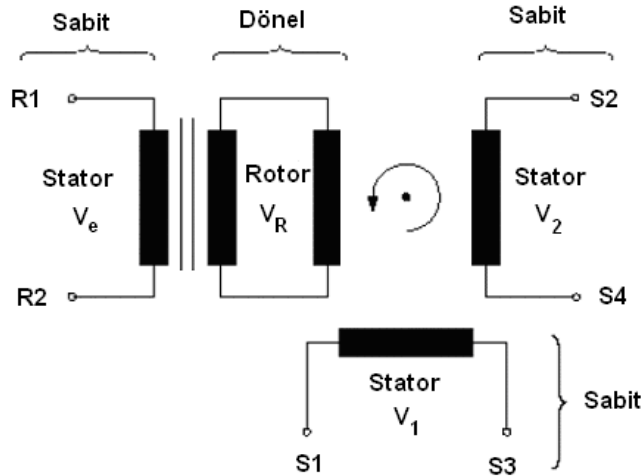
3.3.3.4. Resolver

Resolverler genellikle motorun soğutma fanı tarafındaki miline akuple olarak çalışırlar. Motorun bir dönüşünde, o andaki konumunun tespiti için kullanılan bir geri besleme elemanıdır. Resolver, motor mili ile eşzamanlı (senkron) dönen bir transformatör gibidir. Şekil 3.26’ da tipik bir resolver görülmektedir.



Şekil 3.26. Tipik bir resolver ve içyapısı

Resolverin stator ve rotor sargıları ikişer adettir. Statora uygulanan gerilim motorun dönüş hızına göre rotordan tekrar alınır. Bir resolverin stator ve rotor sargıları Şekil 3.27’ de görülmektedir.



Şekil 3.27. Bir resolverin sargı yapısı

V_1 ve V_2 çıkış gerilimlerinin V_e gerilimi ile olan bağıntısı aşağıdaki gibidir:

$$V_e = V_s \cdot \sin \omega t \quad (3.6.)$$

Çıkış gerilimleri;

$$V_1 = V_s \cdot \sin \omega t \cdot \cos \varphi \quad (3.7.)$$

$$V_2 = V_s \cdot \sin \omega t \cdot \sin \varphi \quad (3.8.)$$

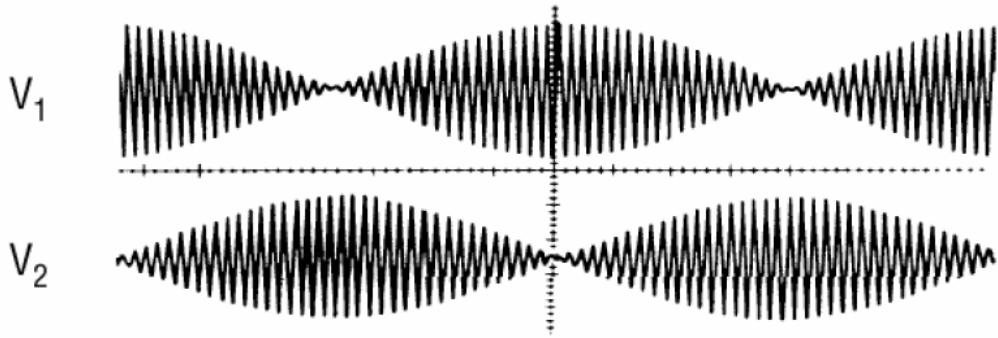
Bağıntılarda;

V_s : Giriş geriliminin tepe değeri,

φ : Rotor açısı,

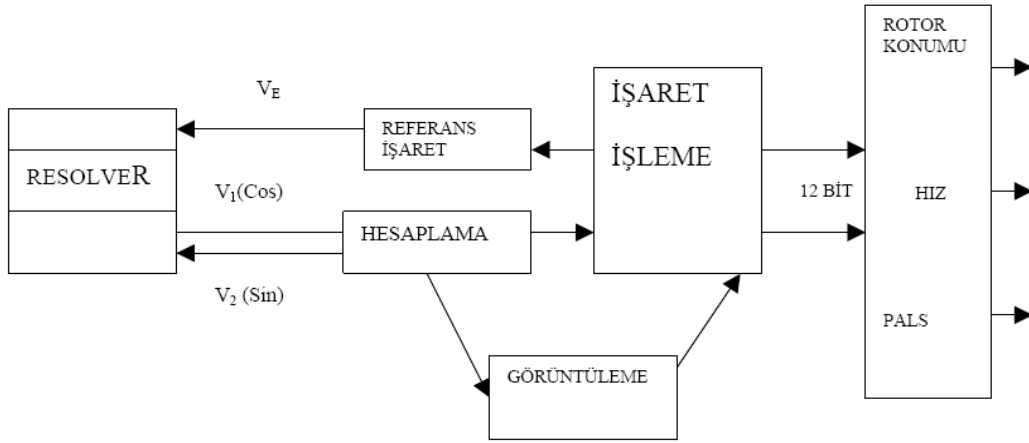
ω : V_s giriş geriliminin açısal hızıdır.

Bir resolveye uygulanan V_e giriş gerilimine karşılık elde edilen V_1 ve V_2 çıkış gerilimlerinin değişimi Şekil 3.28’ de görülmektedir.



Şekil 3.28. Resolver çıkış gerilimleri dalga şekillerinin değişimi

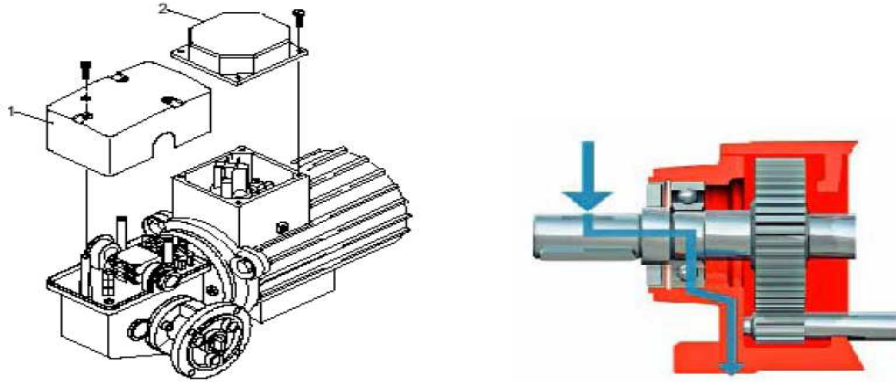
Resolverden elde edilen bu analog çıkış gerilimi, motor milinin o andaki konumu ve hız bilgisini verir. Elde edilen bu işaret sayısallaştırılarak servo motor konum ve hız kontrolü için kullanılır. Resolver işaretinin işleme aşamaları Şekil 3.29’ daki blok diyagramda görülmektedir.



Şekil 3.29. Resolver işaretini işleme aşamaları

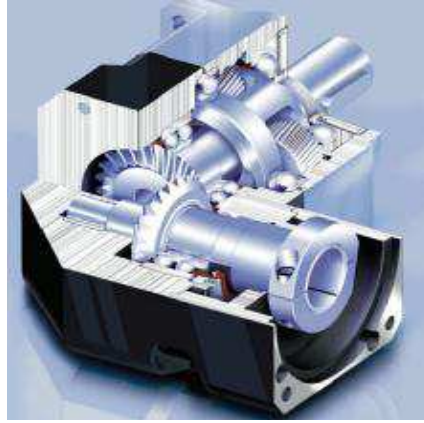
3.3.3.5. Servo motorlarda kullanılan aktarma organları

Kontrol edilecek ya da sürülecek herhangi bir mekanik etkiye veya dirence yük denir. Servo sistemin tasarımı bu yükün büyüklüğüne, ataletine, hızına ve konumlandırma gibi büyüklüklerine göre yapılır. Bu büyüklüklerin değerleri ve duyarlılıkları uygulanacak sisteme göre değişir. Örneğin; yük hızının ve hız kararlılığının ne olacağı, sürece göre tasarımcı tarafından belirlenmelidir. Uygulamada yükün türüne ve büyüklüğüne göre, özel mekanik yük dönüştürücüler (redüktörler) kullanılır. Bu yük dönüştürücüler, genellikle motora uygulanacak yükü azaltırlar ancak sistemin genel duyarlılığını azaltmamak için özel olarak tasarlanırlar. Şekil 3.30’ da bir mekanik yük dönüştürücüsü görülmektedir (www.ersin.edu.tr).



Şekil 3.30. Mekanik yük dönüştürücüsü (redüktör)

Servo motorlarda kullanılan aktarma organları genellikle moment arttırma amaçlı kullanılır. Motor gövdesine vidalarla tutturulur. Aktarma organları genellikle dişli sistemlerden oluşur. Aktarma organlarında kullanılan dişliler plastik ya da metalden olabilir. Bakıma ihtiyaç gösterirler. Zamanla dişlilerin aşınması gibi sorunlar nedeniyle aktarma organlarının yenisi ile değiştirilmesi gerekebilir. Şekil 3.31’ de aktarma organlarının içyapısı görülmektedir. Şekil 3.32’ de ise aktarma organlarında kullanılan çeşitli dişliler görülmektedir.



Şekil 3.31. Aktarma organlarının içyapısı



Şekil 3.32. Aktarma organlarında kullanılan çeşitli dişliler

4. SERVO MOTORLAR

Aslında servo motor diye bir şey yoktur. Servo, bir sistemdir. Motor, herhangi bir enerjiyi harekete dönüştüren araçtır. Motor kelimesi motorious-move-motion kelimelerinden türemiştir ve hareket eden anlamındadır. Motor bir makinedir. Elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren makinelere elektrik motorları denir. Her elektrik motoru biri sabit (stator) ve diğeri kendi çevresinde dönen (rotor ya da endüvi) iki ana parçadan oluşur. Bu ana parçalar; elektrik akımını ileten parçalar (örneğin; sargılar), manyetik akıyı ileten parçalar ve konstrüksiyon parçaları (örneğin; vidalar, yataklar) olmak üzere tekrar kısımlara ayrılırlar. Mekanik servo sistemlerin doğal olarak bir motoru olmak zorundadır ancak bu motorlar "servo motor" değil günümüzde en yaygın kullanılan şekilleriyle sıradan DC veya AC motorlardır (Dülger, Kireççi, Topalbekiroğlu 2001).

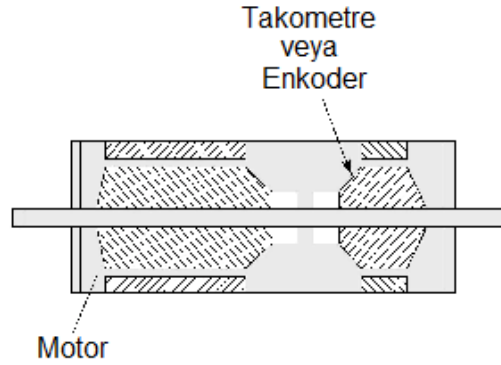
Servo motor, elektrik kontrolüyle gerçekleştirilen servo sistemin hareketini sağlayan birimdir. Pozisyon ve hız kontrolünün gerektiği uygulamalarda, pozisyon ve hız bilgisi, geri besleme ile bir karar verme ünitesine gönderilerek sistemin davranışı kontrol edilmektedir. İçinde adım motor kullanılmayan kapalı devre sistemler de servo sistem diye adlandırılmaktadır. Bu yüzden hız kontrolü yapılan basit bir asenkron motor da servo motor olarak adlandırılabilir. Servo sistemlerde çeşitli yapıda farklı elektrik motorları kullanılabilir.

Servo motorları normal motorlardan farklı kılan, çok geniş bir hız komutunu yerine getirecek şekilde tasarlanmış olmalarıdır. Servo motorlar kullanıcının komutlarını hassas ve hızlı bir şekilde yerine getiren motorlardır. Bu komutlar pozisyon, hız ve hız ile pozisyonun bileşimi komutlar olabilir. Bir servo motor şu özelliklere sahip olmalıdır;

- Geniş bir hız yelpazesinde kararlı olarak çalışabilmelidir.
- Devir sayısı, hızlı ve düzgün bir şekilde değiştirilebilmelidir.
- Küçük boyuttan büyük moment elde edilebilmelidir.

4.1. Servo Motorun Yapısı

Servo motorlar prensip olarak bir motor ve geri besleme ünitesinden meydana gelir. Motor DC ya da AC olabilir. Geri besleme ünitesi de bir tako generatör ya da enkoder (kodlayıcı) olabilir. Şekil 4.1’ de servo motorun prensip şeması görülmektedir.



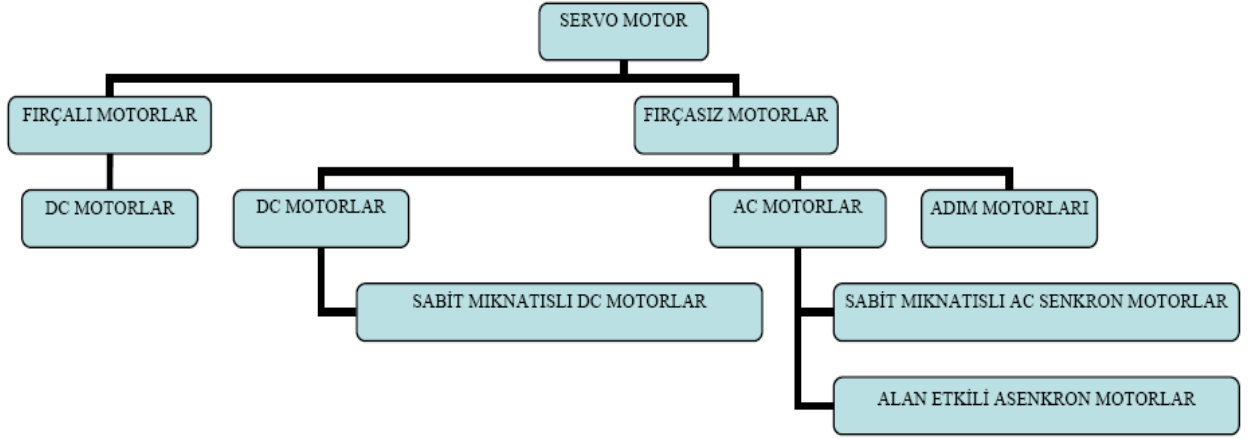
Şekil 4.1. Servo motor prensip şeması

Servo motorlar, 1 d/d’ lik hız bölgelerinin altında bile kararlı çalışabilen, hız ve moment kontrolü yapan motorlardır. Servo motorlar ile diğer motorlar arasındaki birinci fark, çok hızlı ivmelendirme ve frenleme yapabilmeleridir. Bunun için döndürme momentinin büyük, eylemsizlik momentinin olabildiğince küçük olması gerekir. Bunu sağlamanın da iki yolu vardır.

Birincisi; bir silindirde eylemsizlik momenti çapa bağlıdır. O halde rotor çapı küçük tutulmalıdır. Gerekirse uzunluk arttırılabilir. Çünkü eylemsizlik momentine uzunluk orantılı etki yaparken çap üstel olarak etkiler. Bu yüzden tüm servo motorların ortak özelliği çaplarının küçük, boylarının uzun olmasıdır.

İkincisi; eylemsizliği etkileyen diğer husus rotorun ağırlığıdır. Servo motorların rotorları hafif yapılır. Rotor demir yerine, daha hafif yalıtkan bir malzemeden yapılırsa, eylemsizlik momenti 8–10 kat azalır. Hızlanma-yavaşlama normal motorda saniyelerle ölçüldüğü halde, servo motorlarda milisaniye ile ölçülür. Servo sistemlerde ihtiyaca göre değişik tipte motor kullanılabilir. Fırçalı DC motor, fırçasız

DC motor, kısa devre rotorlu asenkron motor ve senkron motorlar servo motor olarak en çok tercih edilen motorlardır. Şekil 4.2’ de servo sistemlerde kullanılan fırçalı ve fırçasız elektrik motorları genel bir şekilde görülmektedir (www.mersin.edu.tr).



Şekil 4.2. Servo motor olarak kullanılan fırçalı ve fırçasız motorlar

4.2. Servo Motor Çeşitleri

Servo motorlar, AC servo motorlar ve DC servo motorlar olarak ikiye ayrılmaktadır. İlk zamanlarda servo motorlar genelde DC motorlardı. Çünkü uzun yıllar yüksek akımlar için tek kontrol yöntemi olarak tristör kullanılmaktaydı. Transistörler yüksek akımları kontrol etme yeteneği kazandıkça ve yüksek akımlar yüksek frekanslarda anahtarlandıkça servo motorlar daha sık kullanılmaya başlandı. İlk servo motor özellikle güçlendiriciler için tasarlanmıştı. Servo motor olarak tasarlanmış bir motorda yapılması gereken değişiklikler;

- ısınmadan belirli bir hız aralığında çalışma kabiliyeti,
- sıfır hızda çalışırken yükü belirli bir pozisyonda tutmaya yeterli momenti sağlama yeteneği,
- uzun süreler için aşırı ısınmadan çok düşük hızlarda çalışma kabiliyetidir.

Eski tip motorlarda doğrudan motor miline bağlanmış bir motor fanı bulunmaktadır. Motor düşük hızda çalışırken fan, motoru soğutmak için yeterli havayı sağlayamamaktadır. Daha yeni motorlarda ayrı bir fan monte edilmektedir.

Bu fan, ideal soğutucu havayı sağlamaktadır ve sabit bir gerilim kaynağıyla güçlendirilmiştir. Böylece fan, servo motorun hızından bağımsız olarak her zaman maksimum devirde dönmektedir.

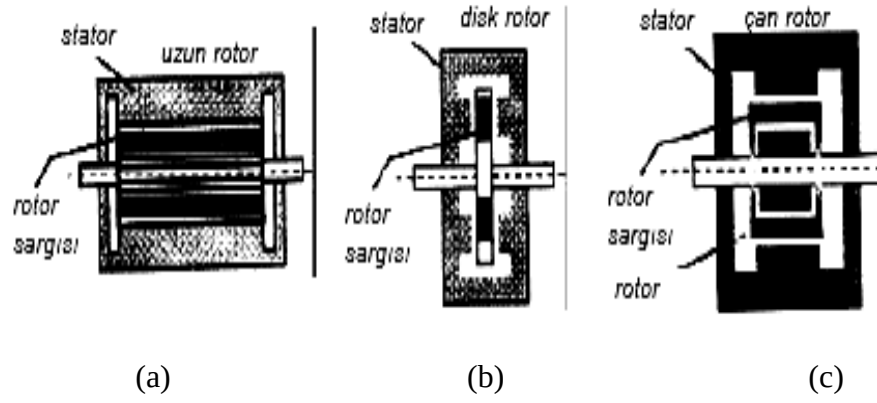
4.2.1. DC servo motor

DC servo motorlar, genel olarak bir DC motor olup, motor için gerekli olan DC akım aşağıdaki metotlarla elde edilir.

- Bir elektrikli yükselteçten,
- AC akımın doyumlu reaktörden geçirilmesinden,
- AC akımın tristörden geçirilmesinden,
- Amplidin, rototrol, regüleks gibi dönel yükselteçlerden elde edilir.

DC servo motorlar, çok küçük güçlerden çok büyük güçlere kadar imal edilirler (0,05 HP' den 1000 HP' ye kadar). Bu motorlar, klasik DC motorlar gibi imal edilir ancak küçük yapıdadırlar ve endüvileri (yükseklik x uzunluk/çap oranıyla), kutup atalet momentini minimum yapacak şekilde tasarlanır (Altunsaçlı 2003).

Şekil 4.3' de görüldüğü gibi DC servo motorların rotorları; uzun, disk ve çan şeklinde olabilmektedir. Disk rotorlu servo motorlar, kısa ve hafif oldukları için robot mafsallarında hareket elemanı olarak kullanılmaktadırlar. İnce ve uzun rotorlu servo motorlarda ise boyutlar çok küçük olduğundan bunları her ortama monte etmek kolaydır. Çan tipi rotorlu servo motorlar ise 3000 d/d gibi yüksek hızlara çok çabuk ulaşabilme özelliğine sahiptirler.



Şekil 4.3. a) Uzun, b) Disk, c) Çan rotorlu DC servo motorların yapısı

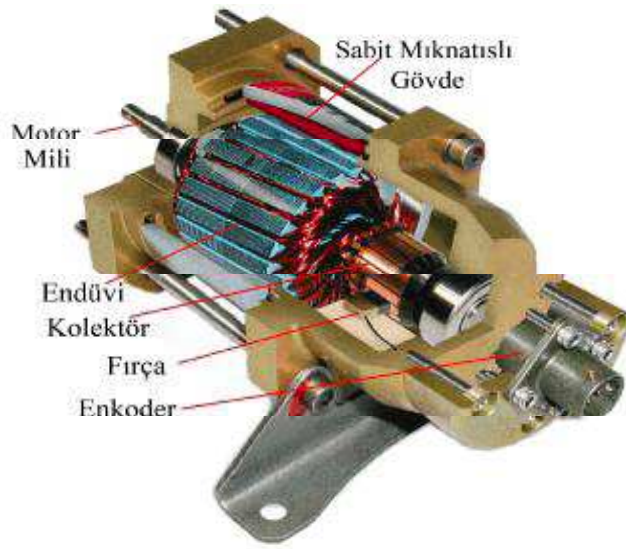
DC servo motorlarda, yüksek bir dönme momenti ve aşırı yüklenebilirlik elde etmek için özellikle şiddetli bir manyetik alan oluşturulmalıdır. DC servo motorun en büyük dönme momenti, düşük hızlı çalışmalar sırasında ve en küçük devir sayısında ise yaklaşık anma dönme momentinin dört katıdır. Özellikle hızlı tepkili servo motorlar için motorun milinde, içerisinde demir bulunmayan doğru akım motorları kullanılır.

4.2.1.1. DC servo motorun yapısı

Bu motorlar, klasik DC motorlar gibi endüktör, endüvi, gövde, fırça ve kolektörlerden meydana gelirler. Sabit mıknatıslı fırçalı bir DC servo motorun iç yapısı ve parçaları Şekil 4.4' de görülmektedir. Klasik tip DC motorlarda komütasyon (DC makinelerin endüvi sargılarında akımın yönünü değiştirme işlemi) için kullanılan komütatör ve fırçalardan kaynaklanan mekaniksel elektriksel problemleri ve sınırlamaları yenmek için Şekil 4.5' de yapısı verilen fırçasız DC motorlar tasarlanmıştır. Sonuçta klasik DC motorun performansını sağlaması hedeflenmiştir. Fırçasız motorlar stator, rotor, sürme devresi (sürücü) ve rotor konum algılayıcısından oluşur. Motor tek olarak ele alındığında, sürücü ve konum algılayıcı motor üzerinde olmayabilir. Fakat fırçasız motorun sürücüsüz ve konum algılayıcısız (geri besleme elemanı) olarak bir DC güç kaynağından çalışması mümkün değildir (www.megep.meb.gov.tr).

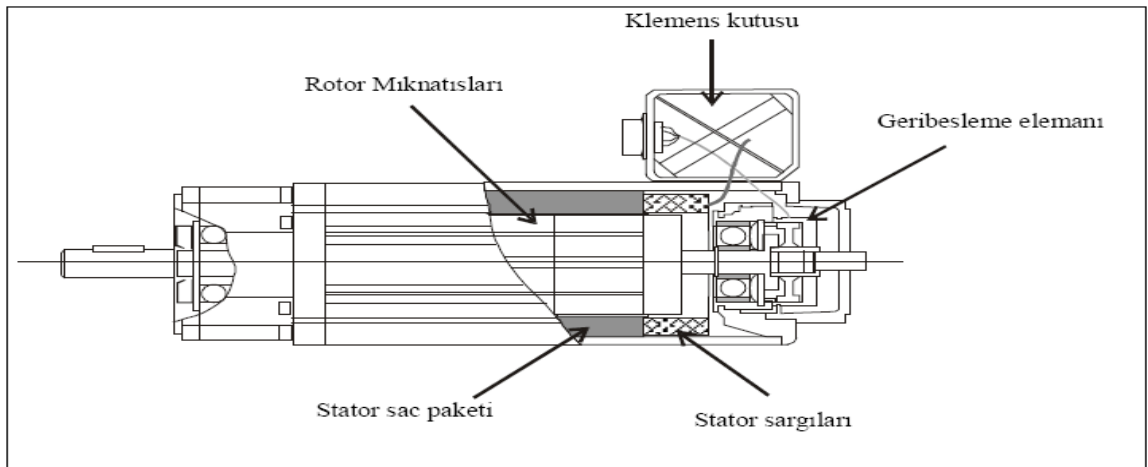


(a)



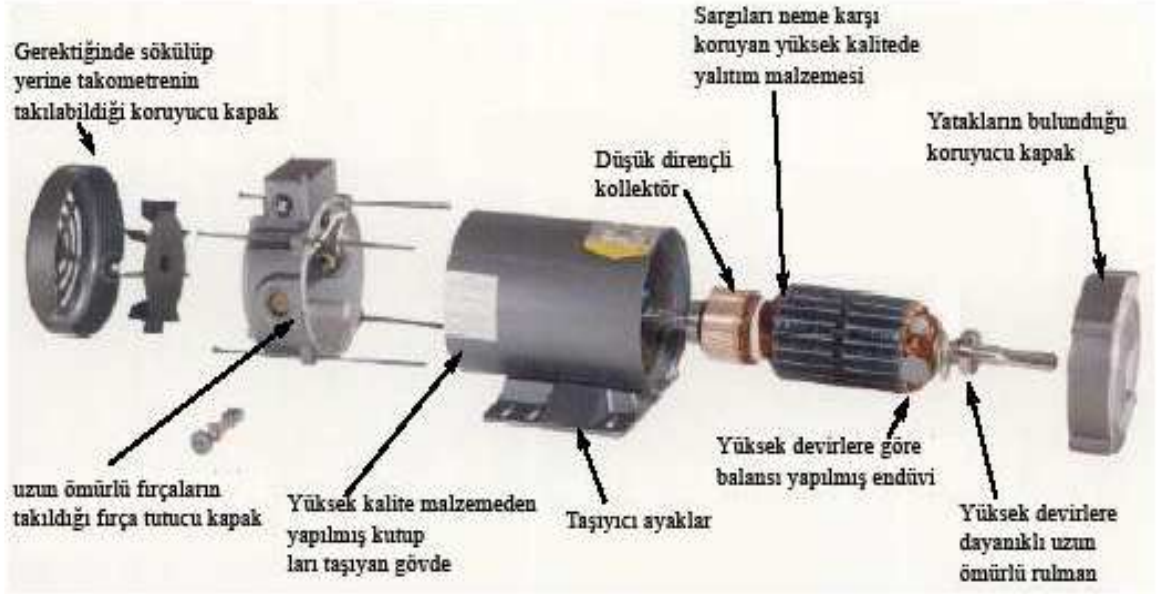
(b)

Şekil 4.4. Sabit mıknatıslı fırçalı bir DC servo motorun a) içyapısı, b) parçaları



Şekil 4.5. Fırçasız servo motorun yapısı

Şekil 4.6’ da parçaları verilen alan sargılı DC servo motorlar çok büyük yükler için kullanılırlar. Bu motorlarda sabit bir kutup manyetik alanı elde etmek için DC kaynak kullanılır. Endüviye ise değişken bir gerilim verilir. Bu iki gerilimin dolaştırdığı akımların oluşturduğu manyetik alanlar birbirini iterek dönüşü başlatır. Motor servo sistemde çalıştığında, alan ya da endüvi kontrollü olabilir.

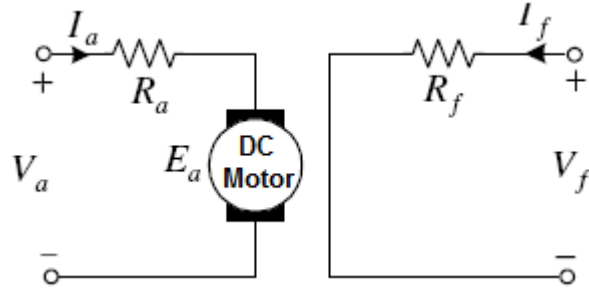


Şekil 4.6. Alan sargılı DC servo motor

4.2.1.2. DC servo motorun çalışması

DC servo motorların iki farklı sargısı vardır. Bunlar, statora konulan alan (endüktör) sargısı ve rotora konulan endüvi (armatür) sargısıdır. Her iki sargı da DC gerilim kaynağına bağlıdır. Motorun hızı alan sargısı, endüvi sargısı veya her ikisinin birleşimi olarak, alan ve endüvi sargılarıyla kontrol edilebilir. Servo uygulamalarda sargılar farklı DC kaynak tarafından beslenir.

Klasik DC motorların genel devre şeması Şekil 4.7’ de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.7. Klasik DC motor genel devre şeması

Şekilde görüldüğü gibi;

$$V_a = E_a + I_a R_a \quad (4.1.)$$

$$E_a = K_1 \phi n, \quad \phi \sim I_f \quad (4.2.)$$

$$V_f = I_f R_f \quad (4.3.)$$

$$n = \frac{V_a - I_a R_a}{K_1 \phi} \quad (4.4.)$$

$$T = K_1 \phi I_a \quad (4.5.)$$

E_a = elektromanyetik kuvvet

K_1 = motor sabiti

ϕ = alan akısı

n = endüvi (motor) hızı

V_f = alan gerilimi

V_a = endüvi gerilimi

R_f = alan devresi direnci

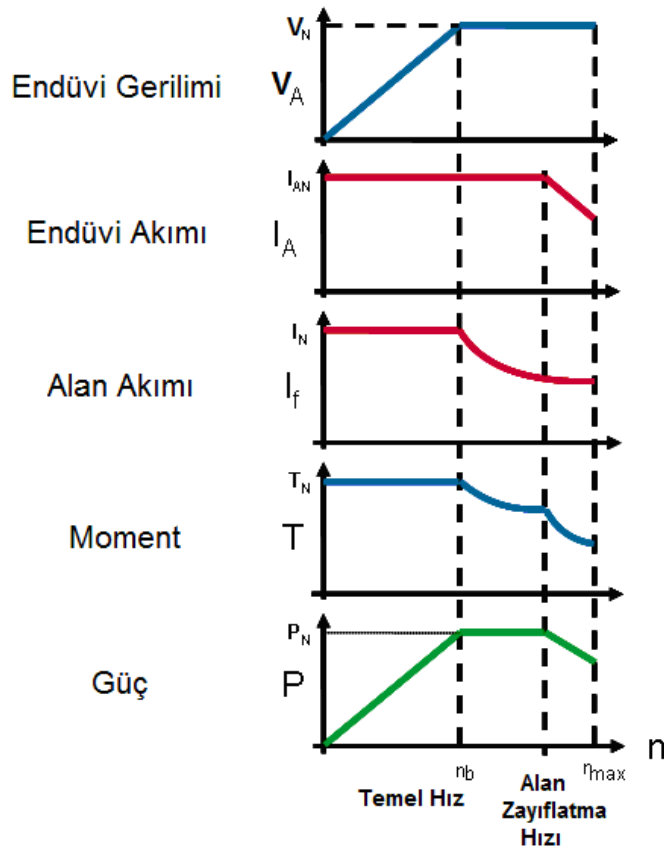
R_a = endüvi devresi direnci

I_f = alan devresi akımı

I_a = endüvi devresi akımı

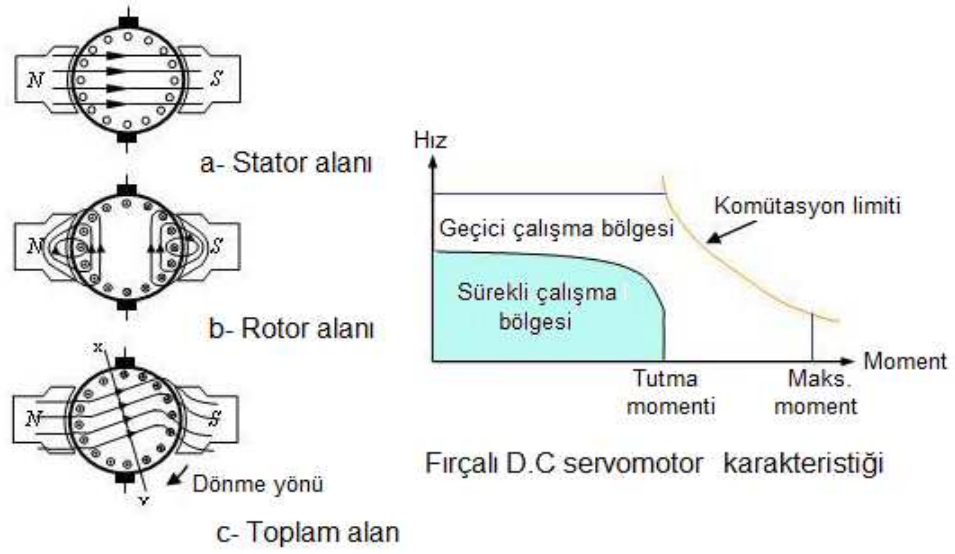
T = motorun çıkış momenti

olmaktadır. (4.4.) ifadesinde görüldüğü gibi, manyetik akı ve endüvi akımı kararlı durumdaysa (sabit yükte) motorun hızı, endüvi gerilimine bağlı olarak değişmektedir. Eğer endüvi gerilimi sabitse ve endüvi akımı kararlı durumdaysa hız, alan akımıyla ters orantılıdır. Ayrıca alan akısı sabitse, (4.5.) ifadesinde görüldüğü gibi motor momenti endüvi akımıyla doğru orantılı değişir. Şekil 4.8’ de serbest uyarımlı bir DC motorun hıza bağlı karakteristikleri görülmektedir.



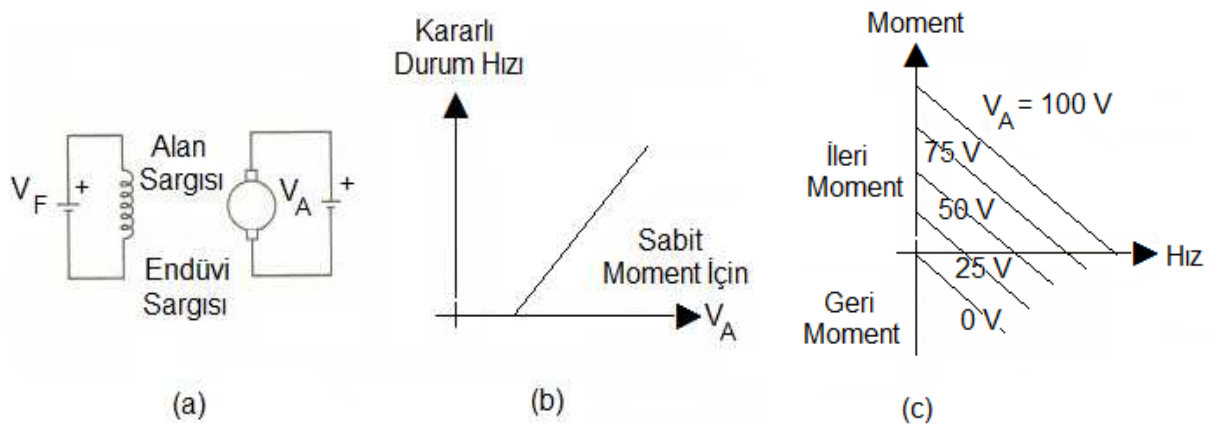
Şekil 4.8. Serbest uyarımlı DC motorun karakteristikleri

Motorun dönme hareketi, endüktör sargılarına uygulanan DC akımın oluşturduğu manyetik alan ile aynı DC akımının fırça ve kollektörden geçirilerek endüvi sargısına uygulanması sonucu oluşan endüvideki manyetik alanın etkisi sonucu meydana gelmektedir. Şekil 4.9’ da DC servo motorun prensip çalışma şeması görülmektedir.



Şekil 4.9. DC Servo motor çalışma prensip şeması

DC motorun alan sargısı genelde şematik olarak çekirdek biçiminde gösterilir. Şekil 4.10.a' da görüldüğü gibi alan sargısı, V_F ile gösterilen DC gerilim kaynağına bağlıdır. Endüvi sargısı ise şematik olarak iki kareyle temas eden bir daire ile gösterilir. Bu DC endüvinin silindir şeklinde olması ve yüzeyinde iki fırçanın baskı yapmasından dolayıdır. Endüvi sargısı da V_A ile gösterilen DC gerilim kaynağına bağlıdır.



Şekil 4.10. a) DC Servo motor alan ve endüvi sargısı b) Kararlı hız- V_A grafiği
c) Moment-hız grafiği

DC motorların çoğu, büyük yükler için kullanılan sabit mıknatıslı tiptir. DC motorun dönme yönü ve hızı, endüvi gerilimi ile belirlenir. Endüvi gerilimindeki artış, hızı da artırır. Motorun endüvi geriliminin yönünü değiştirmek motorun dönüş yönünü de değiştirir. DC servo motorların temel çalışma prensibi klasik DC motorlarla aynıdır. DC servo motor genellikle endüvi gerilimi ile kontrol edilir. Endüvi, büyük dirence sahip olacak şekilde tasarlanır. Böylece Şekil 4.10.b' de görüldüğü gibi moment-hız karakteristikleri doğrusal olmaktadır. Bu özellik, hızlı moment tepkisi sağlamaktadır. Çünkü moment ve akı birbirinden bağımsızdır. Bundan dolayı endüvi gerilimindeki ve akımındaki adım şeklindeki bir değişim sonucunda, rotorun hızında veya konumlamada hızlı değişiklikler gerçekleşmektedir (Paksoy 2004).

4.2.1.3. DC servo motor çeşitleri

DC servo motorlar, bir servo sistemde çalışırken ya endüvisinden ya da alanından (kutuplarından) kontrol edilir. Alan (kutuplar) ya gerilim kaynağından ya da akım kaynağından beslenir. Her iki tür uygulama farklı bir hız-moment karakteristiğinin ortaya çıkmasına sebep olur. Endüstride daha çok dört tip servo motor kullanılır. Bunlar:

- Alan kontrollü-sabit endüvi gerilim beslemeli servo motor
- Endüvi kontrollü-sabit alan beslemeli servo motor
- Sabit mıknatıslı- endüvi kontrollü servo motor
- Seri ayırık alanlı servo motor

'lardır.

4.2.1.4. DC servo motorun özellikleri

- Enerji kısımları, normal DC motorlara göre daha az enerjiye ihtiyaç gösterir.
- Motor çapı, normal DC motorlara göre daha küçüktür.
- DC servo motorların boyları uzundur.

- Rotorun dönme momenti, rotor çapına bağlı olarak değişir. (boylarının uzun olmasının sebebi budur).

- Atalet momenti küçüktür.

- DC servo motorlar düşük hızlarda yüksek moment üretirler.

• *Sabit Mıknatıslı (PM) DC Motorlar ve Uyartım Mıknatıslı DC Motorların Karşılaştırılması:*

Sabit mıknatıslı DC motorlar, tekerlekli sandalye ve güç aletleri gibi akümülatörden beslenen uygulamalardan, taşıyıcı (konveyör), kapı açıcı, kaynak ekipmanları, X-ray, tomografik sistemler, pompa ekipmanlarına kadar birçok sahada kullanılmaktadırlar. Bu motorlar kompakt ölçü, geniş çalışma hız aralığı ya da güvenlik düşüncesiyle düşük gerilimin önemli olduğu güç iletim uygulamalarında ve hareket kontrollerinde sıklıkla kullanılan en iyi çözümlerdir. Düşük hızda yüksek moment üretme kabiliyetleri, birçok uygulamada redüktör kullanmadan çalışmayı uygun hale getirmiştir. Lineer hız-moment eğrilerinden dolayı, özellikle 5000 d/d' dan daha düşük hızda çalışacak servo kontrol uygulamalarında ve ayarlanabilir hızlarda uygundur. Bu motorların içinde, bir akı dönüş halkasına bağlanan sabit mıknatıslar şönt motorlarda bulunan stator alan sargılarının yerini alırlar. Sarılmış bir endüvi ve mekanik fırça komütasyon sistemi motoru tamamlar. Sabit mıknatıslar, harici alan akımına gerek duymadan alan akısını kuşatarak ihtiyacı karşılarlar. Bu tasarım daha küçük, hafif ve enerji verimi artmış bir motor sağlar. Şekil 4.11' de sabit mıknatıslı ve alan sargılı DC motor gövde resimleri görülmektedir.



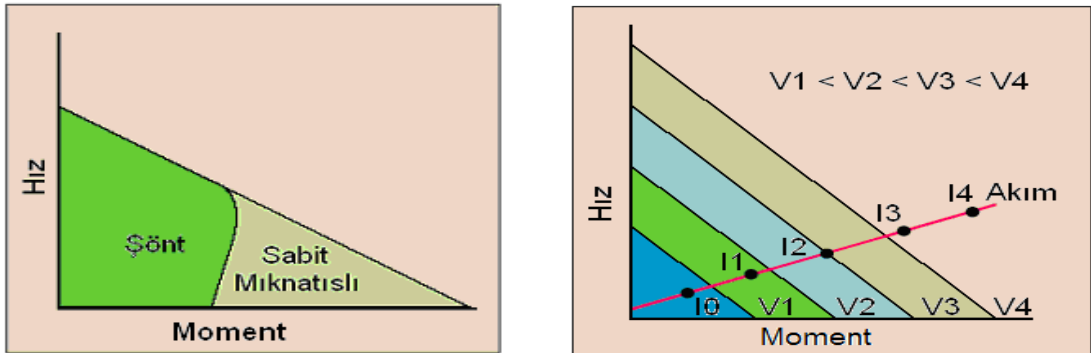
(a)



(b)

Şekil 4.11. a) Sabit mıknatıslı DC motor gövde resmi b) Alan sargılı DC motor gövde resmi

Şönt sargılı DC motorun tersine, sabit mıknatıslı (PM) bir motor, sabit mıknatıs alanıyla enine endüvi (armatür) mıknatıslığını giderme alanı arasındaki etkileşimden bağımsızdır. Şönt sargılı DC motorlar, endüvi ve alan arasında önemli bir etkileşim gösterirler. Yük arttığında statorun düşük manyetik dirençli (yüksek mıknatıs geçirgenliği) demir nüvesi nihayetinde alanı zayıflatır. Sonuçta hız-moment karakteristiğinde bazı noktalarda çarpıcı düşüşler meydana gelir. Sabit mıknatıslı (PM) motorun alanı, önemli endüvi etkileşimini yok eden yüksek bir manyetik dirence (düşük mıknatıs geçirgenliğe) sahiptir. Bu yüksek manyetik direnç, motorun mevcut hız-moment aralığının üstünde lineer çalışmaya izin vererek sabit bir alan meydana getirir. Sabit endüvi gerilimiyle çalışmada, Şekil 4.12.a' da görüldüğü gibi hız azaltıldığında elde edilen moment artmaktadır. Uygulanan endüvi gerilimi arttığında, lineer hız-moment eğrisi yukarılara kaymaktadır. Bu yüzden, değişik endüvi gerilimleri için paralel bir seri teşkil eden hız-moment eğrileri, Şekil 4.12.b' de görüldüğü gibi bir sabit mıknatıslı motorun hız-moment özelliklerini göstermektedir. Hız gerilimle, moment ise akımla orantılıdır.



(a)

(b)

Şekil 4.12. a) Yüksek manyetik geçirgenlikli sabit mıknatıslı DC motorlar, şönt sargılı motorlardaki moment düşüşlerine engellemektedirler, b) Sabit mıknatıslı bir DC motorda uygulanan endüvi gerilimi arttıkça, lineer hız-moment eğrisi yukarıya doğru kaymaktadır.

Pratikte, sabit mıknatıslı bir motora güç sağlamak için kullanılan gerilim kaynağı saf DC değildir. Uygulanan gerilim AC gerilim doğrultularak elde edilmiş DC gerilimdir. Bu yüzden, DC sürücü geriliminin, AC giriş frekansı ile alakalı bir dalgası veya dalga parçaları vardır.

I_{rms} 'nin I_{dc} 'ye oranı olan "form faktörü" motoru besleyen gerilimin saf DC'ye ne kadar yakın olduğunu göstermektedir. Bir pil gibi saf bir DC kaynak için form faktörü 1.0'dır. Bir güç kaynağının form faktörü 1.0'ın üzerine çıktıkça, saf DC'den daha da uzaklaşmaktadır. Tablo 4.1. yaygın olarak kullanılan gerilim kaynakları için tipik form faktörlerini göstermektedir.

Tablo 4.1. Farklı Gerilim Kaynakları İçin Form Faktörleri

Form Faktörü	DC Gerilim Kaynağı
1.0	Pil (saf DC)
1.05	Darbe genişlik modülasyonu (PWM)
1.11	Sinüs tam dalga doğrultma
1.15	Üçgen tam dalga doğrultma
1.9	Yarım dalga doğrultma

Çoğu sabit mıknatıslı DC motor (PMDC) üreticileri sürekli çalışma için form faktörünün 1.4'ü aşmamasını tavsiye etmektedir. Yarım dalga doğrultması tavsiye edilmemektedir çünkü tavsiye edilen form faktörü aşılmaktadır. Bir motoru tasarlanandan daha yüksek bir form faktörüyle sürmek daha erken fırça zayıflamalarına ve aşırı iç ısınmaya sebep olur. Eğer daha yüksek form faktörü kullanılırsa özel fırçalara ve komütatörlere, yüksek sıcaklık yalıtım sistemine veya daha büyük bir motora gereksinim duyulur. Bu da maliyeti yükseltir. Form faktörünü azaltan bir kontrol, motordaki ısınma etkilerini azaltır.

Sabit mıknatıslı (PM) motorlar endüvi reaksiyonundan yoksun olduğu için, tipik olarak maksimum vereceği momentin 10 ila 12 katı kadar bir anlık yüksek başlama ve ivmelenme momenti üretebilirler. Bu yüzden, yüksek başlama momentlerine veya geçici güce ihtiyaç duyulan yerler için uygundurlar. Ancak,

üretebildikleri yüksek seviyeli momentler sürekli çalışma için uygun değildirler. Bu şekilde çalışma, alan mıknatıslarının mıknatıslığını geri dönüşü olmayan bir şekilde yok eden aşırı ısınmaya sebep olabilir (Noorani 1990).

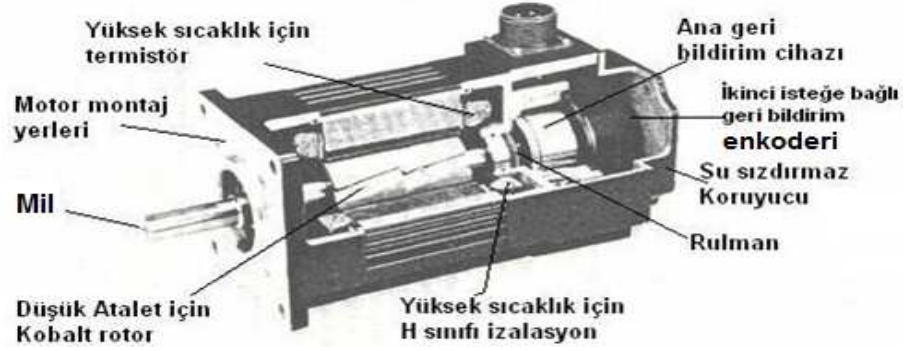
4.2.2. AC servo motor

Bu tip servo motorlar, genellikle iki fazlı sincap kafesli asenkron tipi motorlardır. İki fazlı asenkron motorlar, büyük güçlü yapılmakla birlikte çoğunlukla otomatik kontrol sistemlerinde servo motorlar olarak kullanılmak amacı ile küçük güçlü yapılır. Fırça ve kollektör olmadığından arıza yapma ihtimalleri az, bakımları kolaydır.

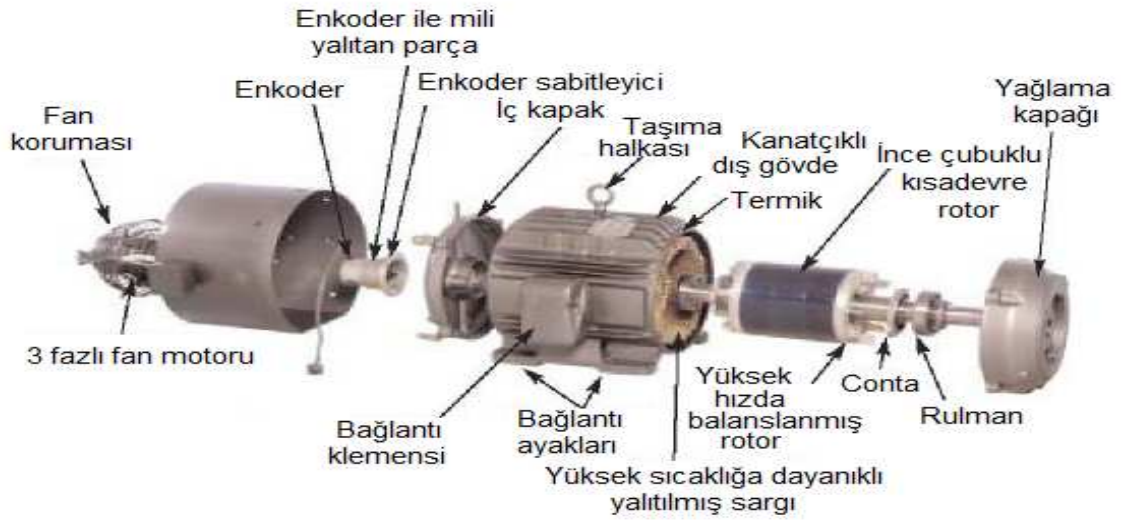
4.2.2.1. AC servo motorun yapısı

Büyük güçlü AC servo motorlar iki ya da üç fazlı olarak üretilmektedir. Bu tip motorların rotorları, doğal mıknatıslı ya da kısa devre çubuklu olmaktadır. İki ya da üç fazlı servo motorların çalışma prensibi, senkron ya da klasik asenkron tip motorlara çok benzemektedir. Üç fazlı servo motorların hız kontrolü, darbe frekans çevirici devresi üzerinden darbe genişlik modülasyonu (PWM) ile yapılmaktadır. Küçük güçlü (1–10 W) AC servo motorlar ise minik boyutlu olarak iki faz ile çalışabilecek şekilde üretilirler. Bunların içyapısında aralarında, 90° elektriksel açı yapacak şekilde yerleştirilmiş iki bobin ve sincap kafesine benzer rotor vardır. Servo motorların rotorları, savrulma ve atalet momentlerinin küçük olabilmesi için uzun; çapları ise küçük yapılır. Stator sargılarına uygulanan gerilimlerin frekansı 50–60–400–1000 Hz. olabilir

AC servo motorlarda rotor devresi, oldukça yüksek dirençte sahip olacak şekilde imal edilir. Bu işlem ya sincap kafes çubuklarında ya da çubukların bağlantı noktalarında yüksek dirençli maddeler kullanılarak yapılır. Şekil 4.13’ de komple AC servo motor kesiti ve parçaları, Şekil 4.14’ de ise AC servo motorun içyapısı görülmektedir.



Şekil 4.13. AC Servo motor kesiti



Şekil 4.14. AC servo motorun içyapısı

4.2.2.2. AC servo motorun çalışması

AC servo motorların çoğu ya iki fazlı ya da bölünmüş fazlı asenkron motor tipindedir. Temel olarak her ne kadar gerilimin genliğini belirli sınırlar içinde değiştirmek suretiyle hızı değiştirilebilse de bu motorlar sabit hızlı motorlardır.

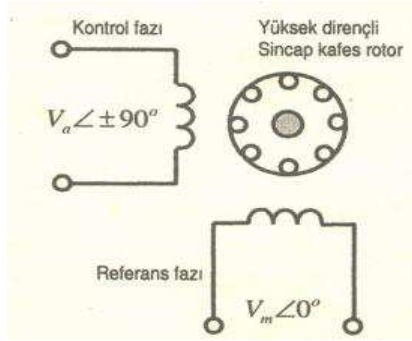
4.2.2.3. AC servo motor çeşitleri

AC servo motorlar, iki fazlı ve üç fazlı olmak üzere iki tipte incelenir.

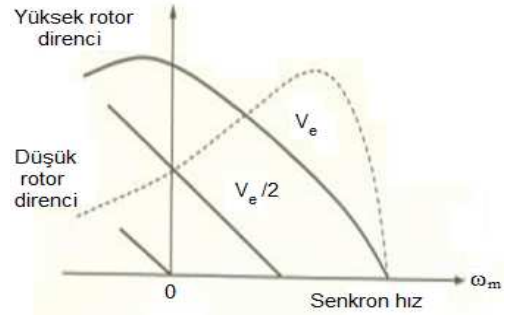
a) İki Fazlı Servo Motor

Kontrol sisteminde kullanılan çoğu servo motor, AC servo motorlar olup iki faz sincap kafesli asenkron makinelerdir. Frekansları normal olarak 50 Hz (60 Hz) veya 400 Hz olabilir. Yüksek frekans, hava yolu sistemlerinde kullanılmaktadır.

İki faz AC servo motorun şematik diyagramı Şekil 4.15.a' da gösterilmiştir. Stator birbirinden 90° elektriksel açıyla dağıtılmış iki sargıdan oluşur. Sargının biri, referans fazı veya sabitlenmiş faz olarak adlandırılır ve genliği sabit bir AC gerilim kaynağına ($V_m < 0$) bağlanır. Diğeri kontrol fazı olarak adlandırılır ve referans fazı ile aynı frekansa sahip genliği ayarlı bir AC gerilimle beslenir. Ancak kontrol fazı ile referans fazı arasında 90° elektriksel açı vardır. Kontrol fazının gerilimi genellikle bir servo yükselteçten sağlanır. Motorun dönüş yönü, kontrol fazı ile referans fazı arasındaki faz ilişkisinin ileri veya geri olmasına bağlıdır. Dengeli iki-faz geriliminin genlikleri eşit ($V_a = V_m$) olduğunda motorun moment-hız karakteristiği üç faz asenkron motora benzerdir. Şekil 4.15.b' deki gibi düşük rotor dirençlerinde bu karakteristik doğrusal değildir. Böyle bir moment- hız karakteristiği, kontrol sistemlerinde kabul edilemez. Ancak, rotor direnci yüksek ise moment hız karakteristiği Şekil 4.15.b.' deki gibi geniş bir hız aralığında; özellikle sıfır hız seviyelerinde aslında doğrusaldır. İki fazlı asenkron makineyi kontrol etmek için referans sargısı genliği sabit bir alternatif gerilim ile kontrol sargısı ise genliği ayarlanabilen ve 90° kaydırılmış alternatif gerilimle beslenir (Okumuş, Gümüşoluk 2004). İki sargıda oluşan manyetik alanlar sonucunda rotor döner.



(a)



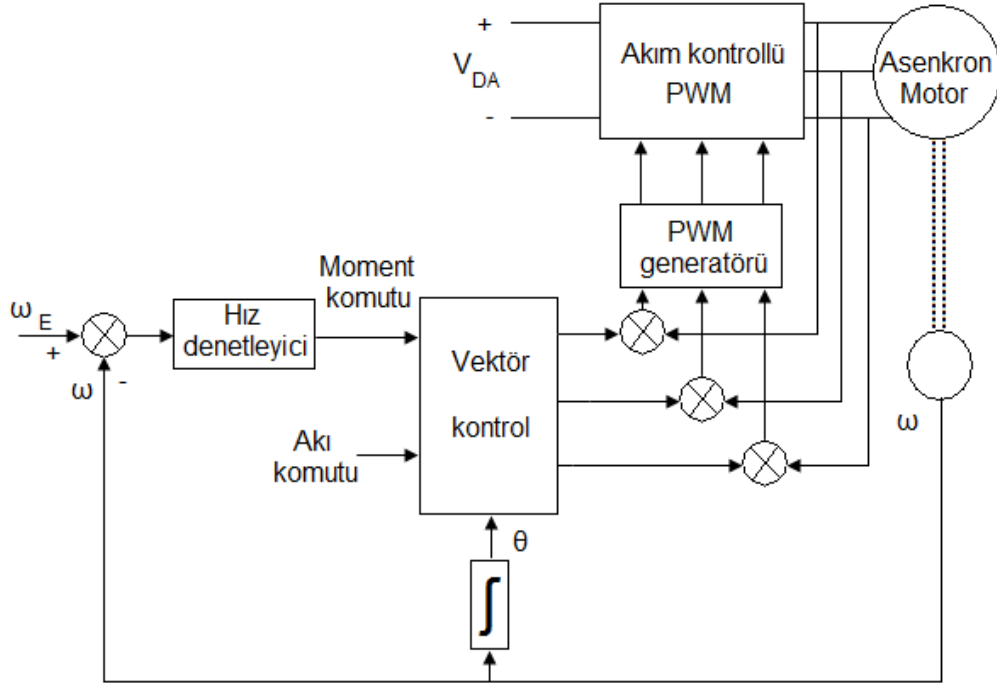
(b)

Şekil 4.15. a) İki fazlı AC Servo motor b) Motorun moment-hız grafiği

b) Üç Fazlı Servo Motor

Yüksek güçlü servo sistemlerin uygulama alanlarında DC servo motorlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak son yıllarda yüksek güçlü sistem uygulamalarında üç-faz asenkron motorun servo motor olarak kullanımı üzerine yapılan araştırmalar başarıya ulaşmış ve 3 fazlı asenkron motor, yüksek güçlü uygulamalarda hızlı bir şekilde yerini almaya başlamıştır. 3 fazlı asenkron motor yapı olarak dayanıklı olmakla beraber doğrusal olmayan bir özelliğe sahiptir ve bundan dolayı kontrolü karmaşıktır.

Son yirmi yıldaki çalışmalar, 3 fazlı asenkron motorun serbest uyarımlı DC motor gibi kontrol edilebileceğini göstermiştir. 3 fazlı asenkron motorun stator akım vektörünün, birbirine dik, birbirinden bağımsız iki bileşenle temsil edildiği ve dik bileşenlerden biriyle momentin, diğeriyle akının kontrol edileceği tekniğe vektör kontrol denir. Vektör kontrollü 3 fazlı asenkron motorun servo motor olarak kullanılmasına ilişkin blok diyagramı Şekil 4.16' da verilmiştir.



Şekil 4.16. Vektör kontrollü 3 fazlı asenkron motorun servo motor olarak kullanımı

4.2.2.4. AC servo motorun özellikleri

AC servo motorlar, motora kodlanmış bir sinyal gönderilerek pozisyonlanabilir bir çıkış miline sahiptirler. Motorun girişi değiştirildiğinde, çıkış milinin açısal pozisyonu da değişir. Genelde AC servo motorlar küçüktürler ancak boyutlarına göre güçlüdürler ve kontrol edilmeleri kolaydır. İndüksiyon ve dişli motorlu tipler AC servo motorların yaygın çeşididir. AC servo motorlar AC gerilim ve frekansa göre çeşitlilik gösterirler. 208–230/240, 460/480V ve 575/600 V aralıkları kullanılmaktadır.

AC servo motorlar ya iki fazlı ya da üç fazlıdır. Standart ticari ve mesken yerlerindeki gerilim tek fazlıdır. Yani bir sinüs dalga şekli veya gerilimi değiştiren başka bir dalga şekli demektir. Üç fazlı gerilim, tipik olarak birbirinden 120° faz farklı, eş zamanlı üç adet sinüs dalga şekli veya başka tip bir dalga şekli demektir. Üç fazlı çalışmayla daha yüksek verim ve daha düzgün çalışma doğruluğu mümkündür.

AC servo motorlar mil hızına, sürekli akıma, sürekli momente ve sürekli güç çıkışına göre değişiklik gösterirler.

- *Mil hızı*, göz önünde bulundurulan uç geriliminde yüksüzken milin dönme hızıdır.
- *Sürekli akım*, aşırı ısınmaya sebebiyet vermeden motor sargılarına uygulanabilecek maksimum akımdır.
- *Sürekli moment*, sabit çalıştırma koşullarında motorun verebileceği sürekli momenttir.
- *Sürekli çıkış gücü*, motor çıkışı aracılığıyla sağlanan mekanik güçtür.

Çoklu hıza sahip olan AC servo motorlar ile motor hızı sürekli değiştirilebilir veya çalışma aralığı içerisinde değişik hızlara ayarlanabilir. AC servo motorlar, hemen hemen aynı çalışma karakteristikleriyle hem saat yönünde hem de saat yönünün tersinde çalıştırılabilirler.

AC servo motorlar birkaç Watt' dan birkaç yüz Watt' a kadar olabilirler. AC servo motorlar, yüksek hız tepkisine sahiptirler. Bu özellik ise AC servo motorların düşük rotor ataletine sahip olmalarını gerektirir. Bu motorlar daha küçük çaplı ve daha uzundurlar. AC servo motor normal olarak düşük veya sıfır hızda çalışabilirler; bundan dolayı moment veya güç değerleri aynı olan klasik motorlara göre boyutları daha büyüktür. Hassas devir sayısı ayarı yapılabilir, ayrıca devir sayıcı gerekmez.

AC servo motorlar ya silindirik ya da kareseldirler. Çeşitli boyutlarda ve çaplarda bulmak mümkündür. AC servo motorların su geçirmeyen tiplerini de bulmak mümkündür. Bazı AC servo motorlar temiz yerler gibi özel çevreler için tasarlanmışlardır. Ayrıca radyasyona dayanıklı AC servo motorlar da üretilmektedir.

AC servo motorların kullanım alanı çok geniştir. AC servo motorlar; robotlar, radarlar, nümerik kontrollü makinelerde (CNC), otomatik kaynak makinelerinde, pres makinelerinde, paketlenme makinelerinde, yarı iletken üretim ünitelerinde,

yüksek hızlı çip yerleştiricilerinde, tıbbi cihazlarda, anten sürücülerinde vb. yerlerde kullanılır.

AC servo motorun avantajları:

- Yüksek güvenilirlik
- Bakımının az olması
- Hareket halinde elektrik kontaklarının olmayışı

AC servo motorun dezavantajları:

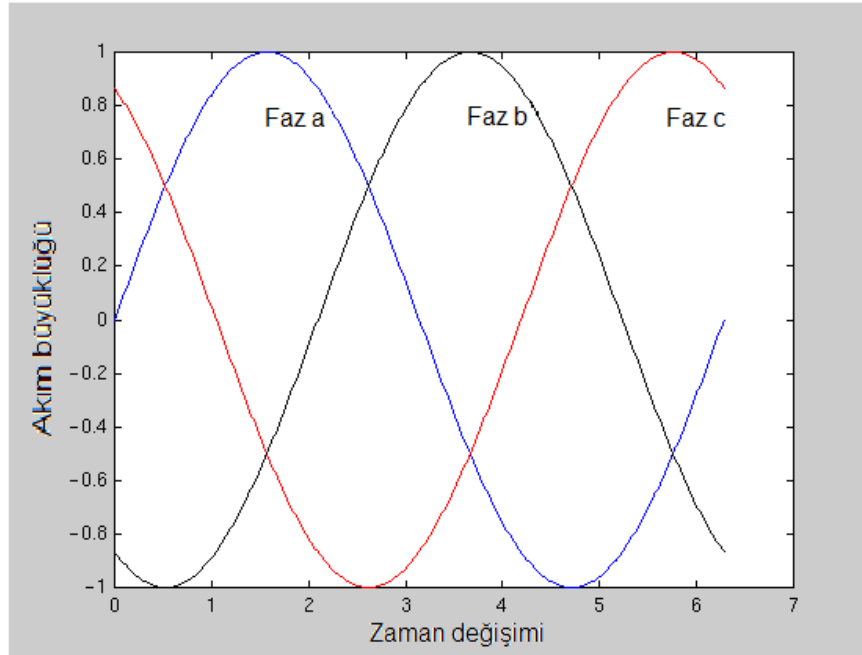
- Düşük verimlilik
- Yüksek ısı yayılımı - kafes ısınısını düşük tutmak için bir fan motoru genelde şarttır.
- AC kare dalga güç kaynağı ihtiyacı gibidir.

4.2.3. Üç fazlı asenkron motorlar

Asenkron motorlar endüstride en çok kullanılan motorlardır. Bu motorlar rotor yapısına bağlı olarak rotoru sargılı (bilezikli) ve kısa devre rotorlu (sincap kafesli) motorlar olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bu rotor tiplerinin fonksiyonu statordaki manyetik alanları değiştirerek birbiri üzerinden geçirmektir. Alanlar değiştiğinde rotorda akım indüklenir. Dönmekte olan bu akımlar bir moment üreterek statordaki alana zıt bir manyetik alan oluştururlar (Bal 2004).

Motor durmaktayken stator ve rotor sargıları bir transformatör gibi çalışır. Statorda oluşan döner alan, rotor sargıları üzerinde bir gerilim indükler. Rotor dönmezken üzerinde indüklenen bu gerilim rotor sükûnet gerilimi olarak adlandırılır. Rotor sükûnet gerilimi, motor etiketi üzerinde stator gerilimi ile birlikte verilir. Rotorda indüklenen gerilim, rotor sargı terminallerinin birbiriyle bağlanması sonucu bir akım ortaya çıkarmaktadır. Statorun döner alanı ile rotor üstünde ortaya çıkan bu akım bir döndürme momenti oluşturmakta ve bunun sonucu rotor dönmektedir. Bu prensibe dayanarak çalışan motorların hepsi indüksiyon motoru olarak tanınır.

İndüksiyon motorlarında rotor akımı indüksiyon sonucu oluşur. Yani rotor, elektrik enerjisini direkt iletimle değil statordan indüksiyon prensibine göre almaktadır. AC motorun çalışmasını anlayabilmek için döner manyetik alan prensibini anlamak gereklidir. Stator sargılarına üç fazlı gerilim uygulandığında, sabit büyüklükte döner bir manyetik alan üretilir. Bu döner alan, belirli zamanda yer değiştiren akımları taşıyan boşluklu faz sargılarının etkileşimiyle üretilmektedir. Birbiriyle 120° faz farkına sahip bu akımlar Şekil 4.17.' de gösterilmiştir.



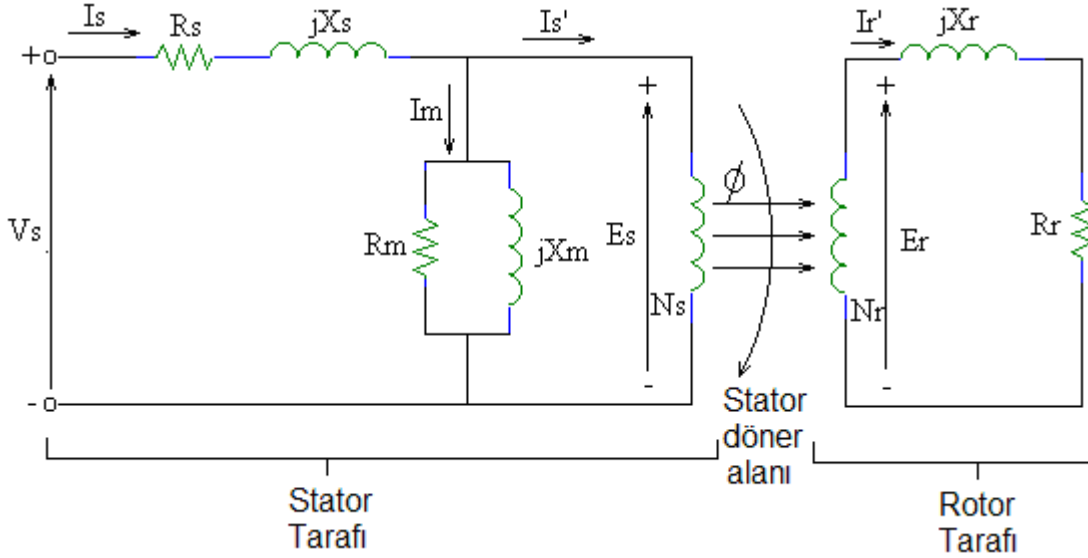
Şekil 4.17. 120° faz farklı akımlar

Zamana göre değeri değişen stator sargılarından geçen akımın oluşturduğu dönen akının bileşke vektörünün değeri (4.6.) ve (4.7.) ifadelerindeki gibidir.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (4.6.)$$

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot n_s \quad (4.7.)$$

Bileşke vektörün büyüklüğü tüm zamanlarda sabittir. Üç fazlı kaynak için, bu sabit büyüklük maksimum değerin 1,5 katıdır. $n_s (\omega_s)$, senkron hızdır. Stator döner alanının rotor devresinde indüklediği emk, kısa devre edilmiş rotor sargılarından akım geçirir. Rotor, sürekli olarak stator alan hızına ulaşmaya çalışır. Ancak bu mümkün değildir. Ancak başka bir tahrik motoru kullanılarak gerçekleştirilebilir. Rotor dururken, rotor akımının frekansı, kaynak frekansı ile aynıdır. Ancak rotor dönmeye başlayınca, rotor akımının frekansı kaynak frekansından bağımsız olarak değişmektedir. Şekil 4.18.' de bir transformatör gibi düşünülen AC motorun eşdeğer devresi görülmektedir (www.lmphotronics.com).



Şekil 4.18. AC motor tek faz stator ve rotor eşdeğer devresi

V_s = Statorun tek fazına uygulanan gerilim

I_s = Stator devresinden geçen toplam akım

I_s' = Stator devresinin yük kısmından geçen akım

I_m = Hava boşluğunda akıyı oluşturmak için gerekli mıknatıslanma akımı

I_r' = Rotor devresinden geçen akım

E_s = Stator sargılarından geçen akımın oluşturduğu emk

E_r = Rotorun dönmesini sağlayan emk

N_s = Statorun sarım sayısı

N_r = Rotorun sarım sayısı

R_s = Stator sargısının direnci

X_s = Stator sargısının reaktansı

R_m = Demir kayıplarını temsil etmek için kullanılan direnç

X_m = Mıknatıslanma reaktansı

X_r = Rotor sargısının reaktansı

R_r = Rotor sargısının direnci

Şekil 4.18.' deki eşdeğer devrede,

$$E_s = s.E_r \quad (4.8.)$$

olarak ifade edilir. Burada s, kayma olup

$$s = \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s} \quad (4.9.)$$

olarak ifade edilir. Burada ω_s , senkron hız ve ω_r , rotor hızıdır. Motor dururken rotor hızı $\omega_r = 0$ olacağından,

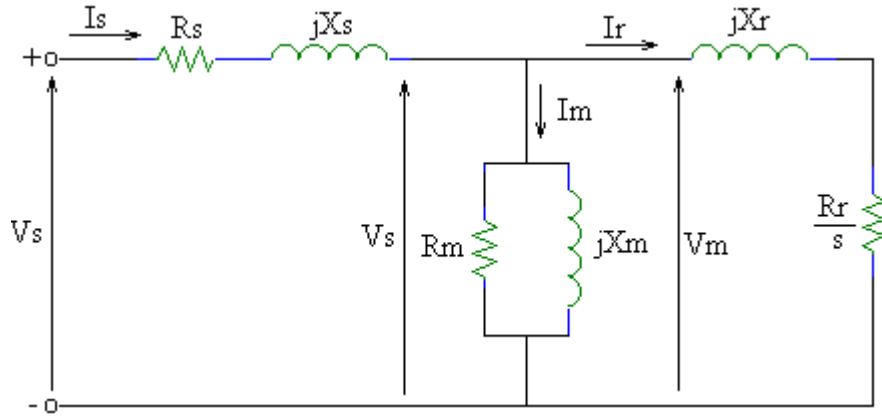
$$E_s = s.E_r = 1.E_r = E_r \quad (4.10.)$$

olur. Senkron hızda rotor hızı $\omega_r = \omega_s$ olacağından,

$$E_s = (0).E_r = 0 \quad (4.11.)$$

olur.

Şekil 4.18' deki devrenin hesaplamalardaki zorluğundan dolayı, asenkron motor tek faz eşdeğer devresi rotor kısmının statora göre değerlerinin değiştirilmesiyle şekil 4.19' da gösterildiği gibi sadeleştirilebilir.



Şekil 4.19. Sadeleştirilmiş tek faz stator ve rotor eşdeğer devresi

Üç fazlı bir asenkron motor için;

Giriş gücü,

$$P_{giriş} = 3.V_s . I_s . \cos \varphi \quad (4.12.)$$

Stator bakır kayıp gücü,

$$P_{sc} = 3.I_s^2 . R_s \quad (4.13.)$$

Nüve kayıp gücü,

$$P_c = \frac{3.V_m^2}{R_m} \cong \frac{3.V_s^2}{R_m} \quad (4.14.)$$

Rotora uygulanan güç,

$$P_g = 3.I_r^2 . \frac{R_r}{s} = P_{giriş} - P_{sc} - P_c \quad (4.15.)$$

Rotor bakır kayıpları,

$$P_{rc} = 3.I_r^2 \cdot R_r \quad (4.16.)$$

Üretilen mekanik güç,

$$\begin{aligned} P_m = P_g - P_{rc} &= 3.I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s} - 3.I_r^2 \cdot R_r = 3.I_r^2 \cdot R_r \cdot \frac{(1-s)}{s} \\ &= P_g \cdot (1-s) \end{aligned} \quad (4.17.)$$

Mil çıkışındaki güç,

$$P_{\text{çıkış}} = P_m - P_{fw} \quad (4.18.)$$

olur. P_{fw} sürtünme ve sargı kayıplarından oluşmaktadır. Eğer $P_g \gg P_{sc} + P_c$ ve $P_m \gg P_{fw}$ ise motorun verimi,

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} \cong \frac{P_m}{P_g} = \frac{P_g \cdot (1-s)}{P_g} = 1-s \quad (4.19.)$$

olarak verilebilir.

Üretilen moment,

$$M_e = \frac{P_m}{\omega_m} = 3.I_r^2 \cdot R_r \cdot \frac{(1-s)}{s \cdot \omega_m} \quad (4.20.)$$

olur. Burada $\omega_m = \omega_r$ olarak rotor hızıdır. Buna göre kayma ifadesinden,

$s = \frac{(\omega_s - \omega_m)}{\omega_s}$; $\omega_m = \frac{(1-s)}{\omega_s}$ olur. Bulunan ω_m ifadesi denklem (4.20.)' deki moment ifadesinde yerine yazılır ve yeniden düzenlenirse,

$$M_e = 3.I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s \cdot \omega_s} \quad (4.21.)$$

olur. Senkron hız olarak adlandırılan döner alan hızı, kutup sayısı ve kaynak frekansına bağlı olarak aşağıdaki gibi verilir.

$$\omega_s = \frac{\omega_e}{p} \quad (4.22.)$$

Sonuçta, moment ifadesi kaynak frekansına bağlı olarak,

$$M_e = 3.p.I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s \cdot \omega_e} \quad (4.23.)$$

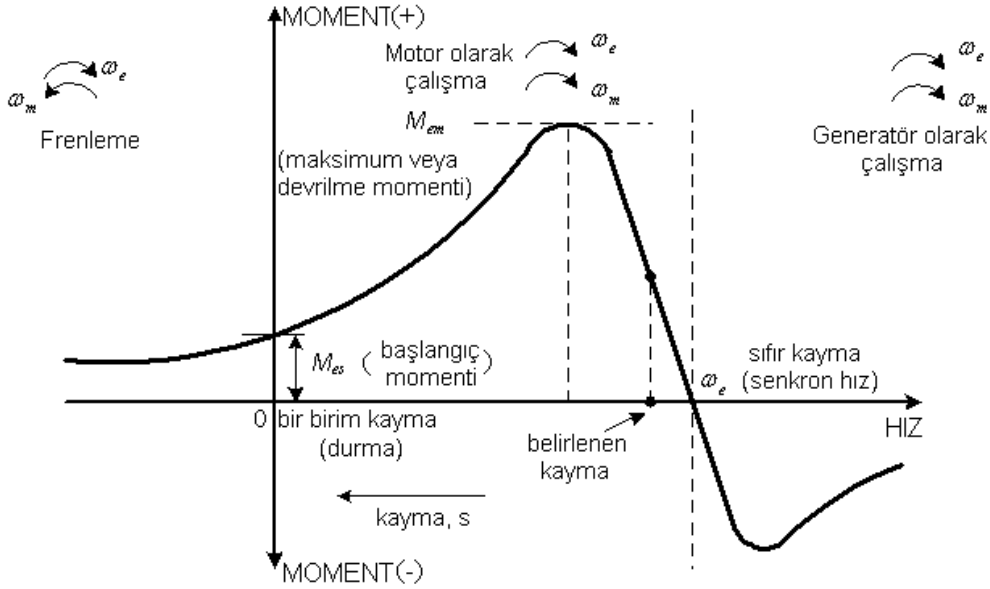
elde edilir. Burada eşdeğer devreden faydalanılarak rotor akımı,

$$I_r = \frac{V_s}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_s + X_r)^2}} \quad (4.24.)$$

olarak yazılabilir (Rashid 1988). I_r ' de (4.23.) ifadesinde yerine yazılırsa moment ifadesi,

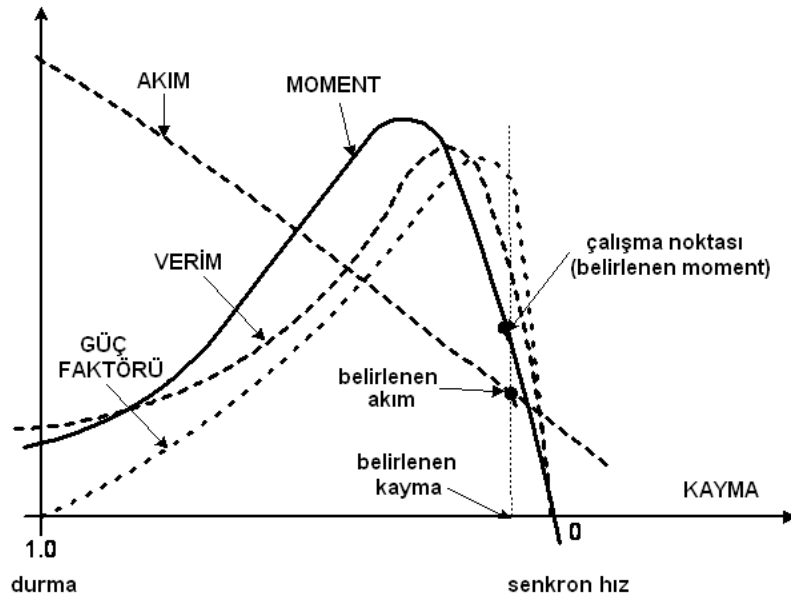
$$M_e = \frac{3.p.R_r}{s \cdot \omega_e} \cdot \frac{V_s^2}{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_s + X_r)^2} \quad (4.25.)$$

olur. Verilen herhangi bir ω_e değeri için, moment-hız karakteristiği şekil 4.20' deki gibi gösterilebilir. (4.9.) ifadesine göre, motor dururken $s = 1$, senkron hızda $s = 0$ olur.



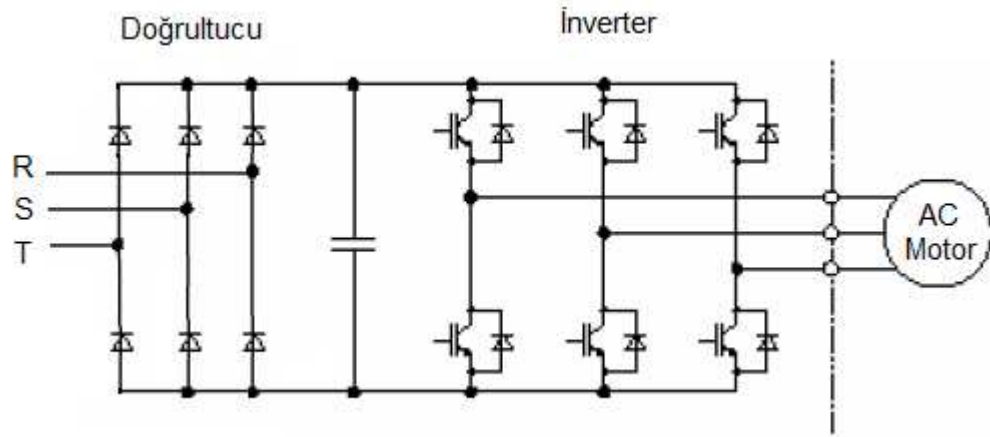
Şekil 4.20. Asenkron motorun hız-moment karakteristiği

Şekil 4.21' de ise asenkron motorun tek faz eşdeğer devresine göre elde edilen karakteristiklerin değişimleri görülmektedir.



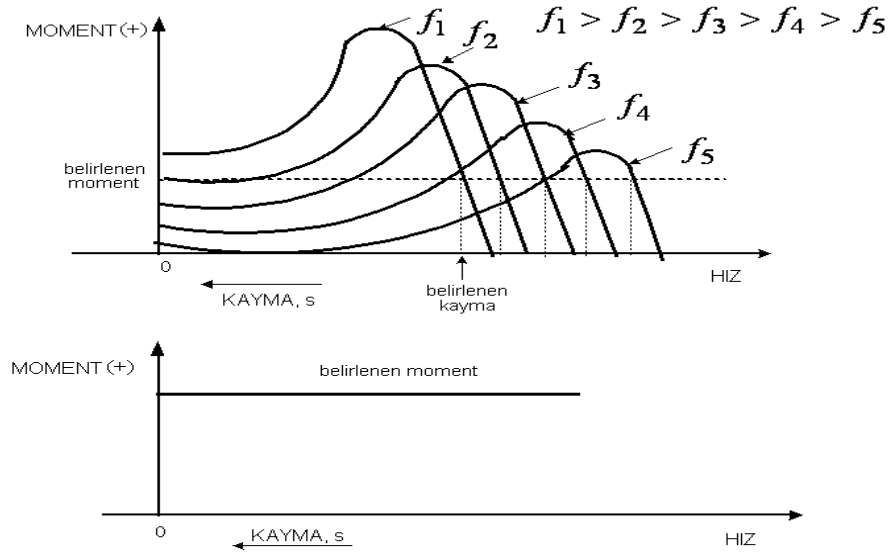
Şekil 4.21. Asenkron motorun tek faz eşdeğer devresi karakteristikleri

Şekil 4.21’ de görüldüğü gibi, kayma sıfırdan (senkron hız) bire (durma) doğru giderken moment hızlı bir şekilde maksimuma ulaşmakta ve belirli bir kayma değerinden sonra kaymanın sıfır olduğu yere kadar düşüşe geçmektedir. Senkron hızda moment yaklaşık sıfırdır. Motor dururken moment sıfır değildir ancak akım en yüksek değerindedir. Bu yüzden asenkron motoru düşük hızlarda çalıştırmak çok ekonomik ve verimli değildir. Kaymanın düşük olduğu yerlerde motor akımı düşüktür ve güç faktörü ile verim yüksektir. Tipik bir asenkron motorun genel sürücü sistemi devresi Şekil 4.22’ de görülmektedir.



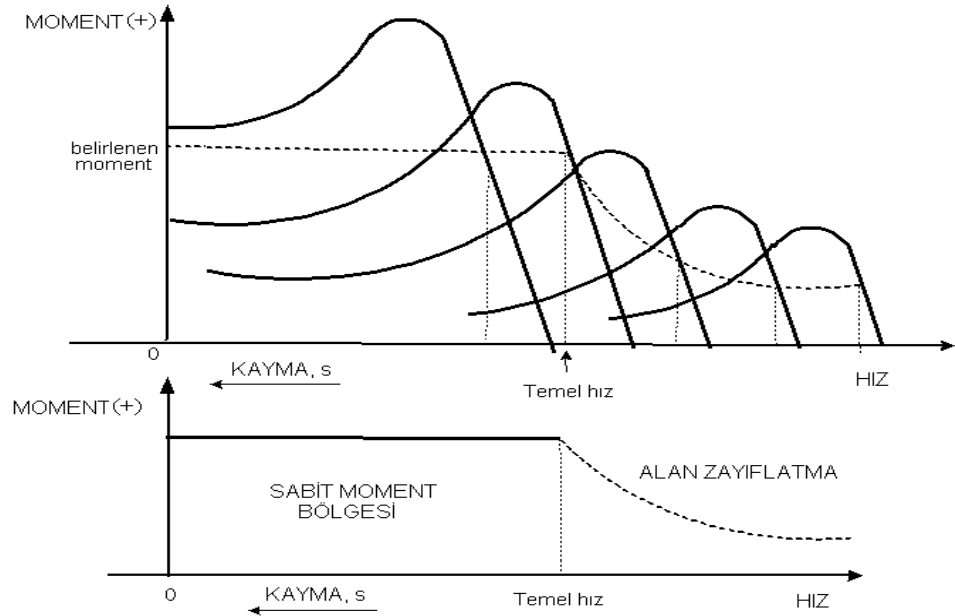
Şekil 4.22. Asenkron motorun genel sürücü sistemi devresi

Asenkron motoru değişik hızlarda çalıştırabilmek için kullanılan kaynak sürücüdür (inverter). Kaynak geriliminin frekansı asenkron motorun hızını belirlemektedir. Bu yüzden asenkron motorun hızını değiştirebilmek için kaynak geriliminin frekansını değiştirmek gereklidir. Sürücünün (inverter) çıkış frekansı motoru istenen hızda çalıştırmak için gerekli değere ayarlanabilmelidir. Sabit momenti elde edebilmek için kayma frekansı, kaynak frekansına göre ayarlanmalıdır. Şekil 4.23’ de sabit moment elde edebilmek için değişik kaynak frekanslarında belirlenen kayma değerleri görülmektedir.



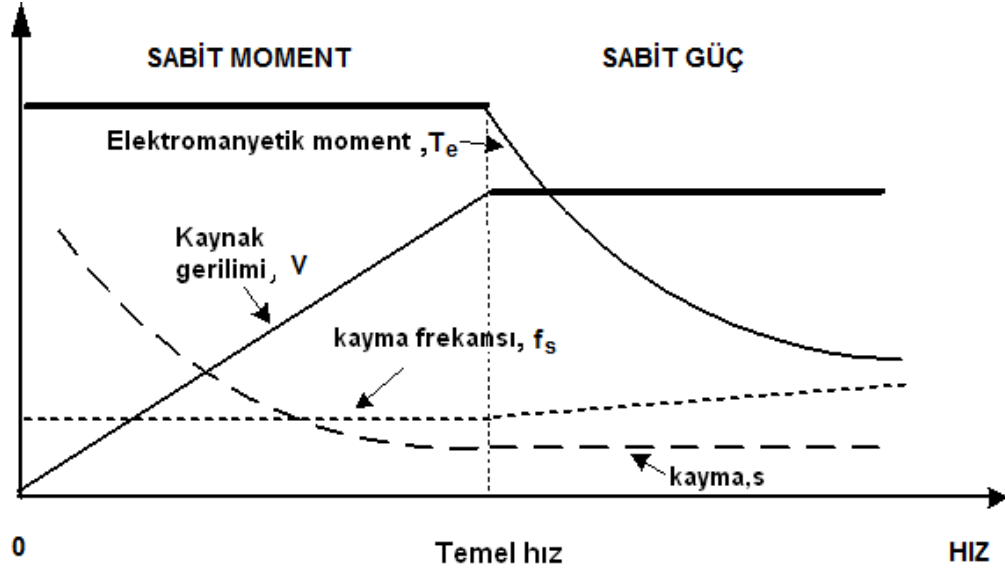
Şekil 4.23. Asenkron motorun sabit moment bölge karakteristikleri

Şekil 4.24' de görüldüğü gibi temel hızın üzerinde, stator belirlenen gerilim değerine ulaşmaktadır ve motor sabit güç bölgesine girmektedir. Bu bölgede, hava boşluğundaki akı miktarı düşmektedir. Bu yüzden sabit gerilimde hız yükselmektedir. Ancak kayma artmasına rağmen stator akımı sabit kalmaktadır. Bu model serbest uyarımlı DC motorun alanının zayıflatılmasıyla eşdeğerdir. Şekil 4.24' de sabit güç bölgesinin karakteristikleri görülmektedir.



Şekil 4.24. Asenkron motorun sabit güç bölge karakteristikleri

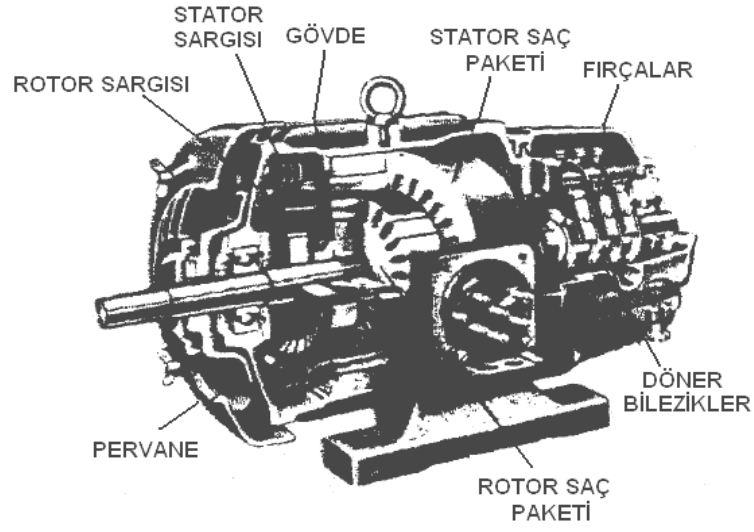
Şekil 4.25’ de sabit moment ve sabit güç bölge karakteristikleri birlikte görülmektedir.



Şekil 4.25. Asenkron motorun sabit moment ve sabit güç bölge karakteristikleri

a) Rotoru sargılı (bilezikli) asenkron motorlar

Bu motorun statoru; gövde, stator saç paketleri ve stator sargılarından oluşmuş olup, Şekil 4.26’ da görüldüğü gibi rotoru, stator içinde yataklanmıştır. Rotor mili üzerinde rotor saç paketi ve döner bilezikler bulunur. Rotor saç paketi üzerine açılmış oluklara rotor sargıları döşenmiştir. Rotor saçları da endüvileri gibi kanallı olarak preslenir. Kanallara 120° şer derece faz farklı üç fazlı AC sargıları yerleştirilir. Sargılar yıldız veya üçgen bağlandıktan sonra çıkarılan üç uç, rotor miline sabitlenmiş olan bileziklere tutturulur. Her bilezik, milden ve diğer bileziklerden yalıtılmıştır. Rotor sargılarına üç faz enerji taşıyan fırçalar bu bileziklere basar. Şekil 4.27’ de rotor bilezikleri ve sargılı rotor görülmektedir.



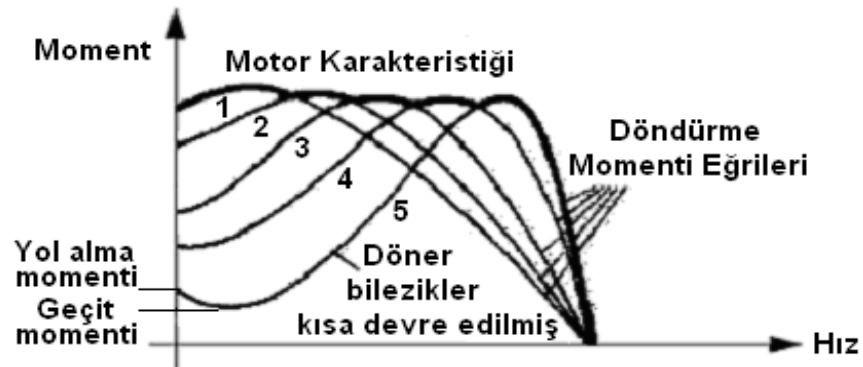
Şekil 4.26. Bilezikli asenkron motor



Şekil 4.27. Sargılı rotor bilezikleri ve rotor

Hemen hemen bütün rotorlarda üç sargı (üç faz sargısı) bulunmaktadır. Bu sargılar genellikle yıldız; ender olarak üçgen bağlanırlar. Bazı durumlarda rotorlarda, çift sargıya da (çift faz sargısı) rastlanmaktadır. Bu tür sargılar motor içinde V-devresi şeklinde bağlanırlar. İster çift, ister üç sargılı olsun sargı uçları, rotor üzerinde bulunan döner bileziklere bağlanır. Döner bileziklerle, akım devresi arasındaki bağlantı kömür fırçalar yardımıyla sağlanır. Üç sargılı motorların sargı uçları döner bilezikler üzerinden motor kutusundaki (u), (v) ve (w) terminallerine bağlantı halindedir.

Uygulamadaki asenkron motor talimatlarına göre, motoru sükûnet durumdan çıkarmak için gerekli moment, “ilk döndürme” ya da “yol alma momenti” ve en büyük döndürme momenti de, “devrilme momenti” olarak tanımlanır. Motorun anma devri ile dönmesi anında milinden uygulayacağı döndürme momentine, “anma momenti” denir. Devrilme momenti, anma momentinin en az 1,6 katı büyüklüğünde olmalıdır. Bazı motorlarda döndürme momenti, motorun yol almasından sonra ikinci kez düşmektedir. Motorun yol almasından sonra ortaya çıkan en küçük moment, “geçit momenti” olarak anılmaktadır. Şekil 4.28’ de bilezikli asenkron motorun farklı yol verme dirençleri için hız-moment karakteristiği görülmektedir. Rotor akım devresine yol verme dirençlerinin bağlanmasıyla, rotor devresinin etkin direnci büyütülmekte ve dolayısıyla akım ile gerilim arasındaki faz farkı küçük tutulmaktadır. Bunun sonucu, çok küçük devir sayılarında döndürme momenti büyük olur. Buna karşılık, devir sayısı yükseldikçe rotordan geçen akım şiddetle azalır.



Şekil 4.28. Çeşitli yol verme dirençler kullanmak suretiyle elde edilen hız-moment karakteristikleri

Motorun yol almasından sonra yol verme dirençleri teker teker devreden çıkartılırsa Şekil 4.28’ de kalın çizgiyle gösterilmiş motor karakteristiği elde edilir. Döner bilezik rotorlu-motorlarda, kömür fırçalar üzerinden rotor akımı geçerken, güç kayıpları oluşur. Ayrıca kömür fırçalar ve döner bilezikler devamlı aşınır. 20 kW gücün üstündeki motorlarda genellikle fırça kaldırma düzenekleri vardır. Çok yüksek devirler sonucu döner bilezikler arası dolarak kısa devreler ortaya çıkar. Bu gibi durumlarda fırça kaldırma düzenekleri çalışarak fırçaları döner bileziklerden ayırır.

Yol-verme dirençlerinin üzerinden geçen akım nedeniyle ısı kayıplarının ortaya çıkması istenmeyen bir oluşumdur. Dirençler yerine bobinlerin yol verme devresinde kullanılması daha büyük sorunlar getirir. Çünkü bobin üzerinde endüktans nedeni ile oluşan faz farkı motordaki faz farkını büyütmekte ve bunun sonucu yol – alma momenti düşmektedir. Bu avantajlardan dolayı direnç veya bobinli yol verme yerine güç elektroniği dönüştürücüleri kullanılmaktadır. Bir asenkron motor yüklendiğinde, rotorun devir sayısında düşme görülür. Döner alanın devir sayısına göre rotor devir sayısının düşmesi “kayma” olarak anılır. Kayma denklemlerde döner alan devir sayısının yüzdesi (%) halinde verilir ve kullanılır.

$$s = \frac{(n_s - n).100}{n_s} \quad (4.26.)$$

s = kayma (%)

n_s = döner alan devir sayısı (senkron hız, d/d)

n = rotor devir sayısı (d/d)

Kaymanın büyümesi, indüklenen gerilimi ve dolayısıyla rotor akımını yükseltir. Şekil 4.29’ da görüldüğü gibi büyük kaymalarda motorda daha büyük bir döndürme momenti ortaya çıkar ve rotor akımının frekansı yükselir (Şahbaz 2007).

$$f_R = \frac{f.s}{100} \quad (4.27.)$$

f_R = rotor frekansı (Hz)

f = stator frekansı (Hz)

Asenkron motorların anma devirlerinde ortaya çıkan anma kayması % 3 - % 8 arasındadır. Rotor akım devresine dirençlerin bağlanmasıyla kayma yükseltilebildiğinden, bilezikli motorların devir sayıları sınırlı olarak ayarlanabilmektedir.



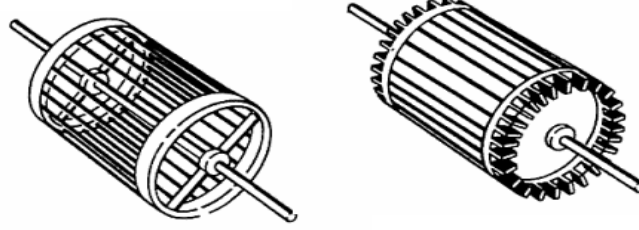
Şekil 4.29. Bilezikli bir motorun döndürme hız-moment karakteristiği

Bilezikli asenkron motorların ilk akım çekişleri, anma akımlarından çok büyük olmadığından, bu motorlar, örneğin; büyük su pompaları, taş kırma makineleri ve büyük takım tezgâhları gibi yüksek güç gerektiren makinelerin işletmesinde kullanılır. Bilezikli asenkron motorun ilk döndürme momenti çok büyük olduğundan, büyük vinçler gibi çok kuvvetli yükler altında devamlı çalışacak makinelerin kuvvet üreten kesimlerinde bu motorlardan yararlanılmaktadır. Ayrıca hızı ayarlanabildiğinden ayarlı makine tezgâhlarında sık sık kullanılmaktadır.

a) Kısa devre rotorlu (sincap kafesli) asenkron motorlar

Kısa devre-rotorlu motorlar, üç fazlı asenkron motorların en önemlilerinden olup kısa devre çekirdekli motorlar ve sincap kafes-rotorlu motorlar olarak da anılmaktadır. Ülkemizde bir benzetme nedeni ile kafes rotorlarına sincap kafesi deyimi yakıştırılmıştır. Bu motorların statoru, döner bilezik rotorlu motorlarda olduğu gibi yapılmıştır. Buna karşılık rotor saç paketi oluklarında sargılar yerine alüminyum ya da bakırdan yuvarlak veya kanatçık şeklinde çubuklar bulunur. Bu çubuklar Şekil 4.30.a' daki gibi, her iki ucundan kısa devre bilezikleriyle elektriksel olarak kısa devre edilmiştir. Bu şekilde oluşturulmuş bir düzen şekli, rotor saç paketi ile birlikte sincap kafesi olarak tanınır. Alüminyum kafes, doğrudan doğruya rotor saç paketi üzerinde pres - döküm yöntemi ile elde edilir. Bakır kafesin yapılması için; önce, rotor saç paketi oluklarına bakır dökümü yapılarak, çubuklar elde edilir, sonra bu çubukların her iki tarafına kısa devre bilezikleri sert lehim ile birleştirilir. Bu türde kısa devre edilmiş kafesli bir rotorun, bilezikleri dışarıdan kısa devre

edilmiş döner bilezikli bir rotora göre çalışma şekli bakımından bir ayrıcalığı yoktur. Şekil 4.30.b’ de, sincap kafesli rotor görülmektedir.



a)

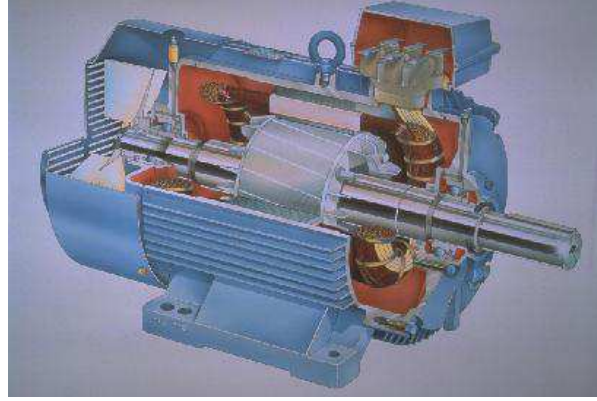


b)

Şekil 4.30. a) Çeşitli yapıdaki sincap kafesleri ve b) sincap kafesli rotor

Kısa devre-rotorlu motorlar işletme anında bilezikleri kısa devre edilmiş bilezikli motorlarla hemen hemen aynı özellikleri gösterir. Kısa devre rotorunun yol alma momenti daha küçük ve yol alma akımı çekişi daha büyüktür. Kısa devre-rotorlu motorların yol alma akımı, anma akımının 8–10 katı büyüklükte olmaktadır. Geçit - momentini küçük tutmak amacı ile rotor çubukları yatık ya da V - basamakları halinde tertiplenirler. Bazı kafes-rotorlu motorların rotorları ilk devreye bağlama anında yüksek bir etkin direnç ve motor yüksek devre geldikten sonra küçük bir etkin direnç gösterir. Bir tür kendinden yol-verme dirençli olan bu rotorlarda ilk devreye bağlama anında akım çekişi küçük ve yol alma momenti büyük olmaktadır. Bunun sonucu motor daha yumuşak yol alır. Motor yüksek devreye ulaştığında rotor direnci kendiliğinden küçülür ve yüklenmeler karşısında devir sayısı değişikliklerini büyük ölçüde önler. Bu tür otomatik direnç ayarlı bir rotor “Skin Efekt” prensibine

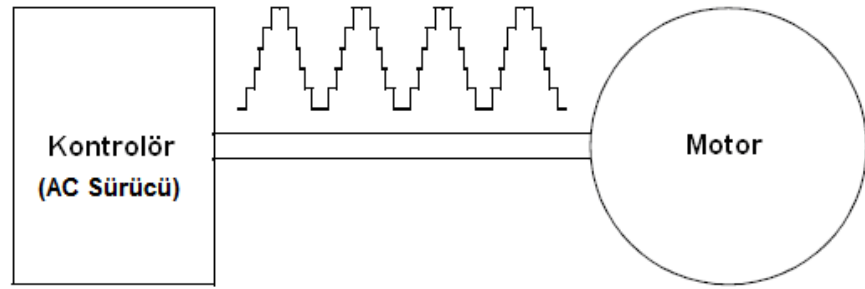
göre çalışır ve bunlara bu nedenle Skin efektli rotor da denir. Skin efektli rotorların saç paketi üzerinde alt alta iki sincap kafesi bulunur. Alttaki kafes işletme kafesi; üstteki kafes yol-verme kafesi olarak anılmaktadır. Üç fazlı alternatif akımın oluşturduğu döner alan içerisinde hareket eden sincap kafesli rotorun stator içerisindeki yeri Şekil 4.31’ de görülmektedir.



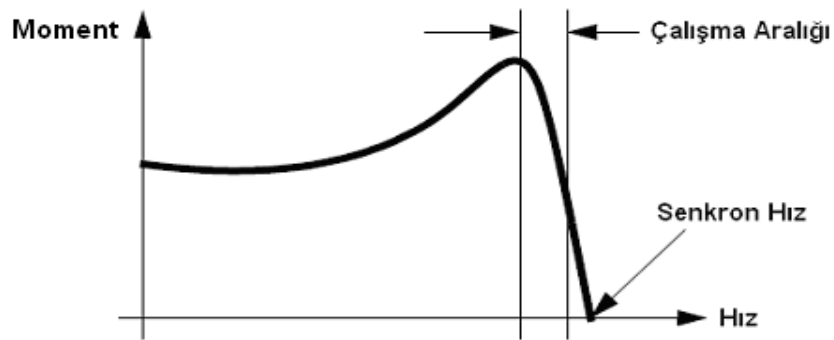
Şekil 4.31. Sincap kafesli AC motor

İlk devreye bağlama anında hem işletme kafesinin, hem de yol-verme kafesinin çubukları üzerinden alternatif akımlar geçer. Üzerinden akım geçiren çubuklar çevresinde manyetik alanlar oluşur. Her bir çubuğun manyetik alanı hem kendisine hem de komşu çubuğa etkiyerek çubuk dirençlerinin- yükselmesine neden olur (Skin efekti ve Proximity efekti). İşletme kafesinin çubukları altta bulunduğundan, bunların alan çizgileri daha çok demir üzerinden geçmekte ve manyetik akının büyük olmasından dolayı dirençleri büyük olmaktadır. Rotor devir sayısı arttıkça, rotor frekansı düşer ve skin efekti, akımın frekansı ile doğru orantılı olduğundan çubukların direnci küçülür. Skin-efektli rotorların yol alma momentleri (M_A) büyük ve yol alma akımları küçüktür. Bunların en büyük sakıncalı tarafı, oluk kesitlerinin, yani hava aralıklarının oldukça büyük olmasıdır. Bu nedenle bunlarda akı kaçakları büyük, güç faktörü ve verim küçük olmaktadır. Daha hafif ve ucuz olan kafes-rotorlu motorlar çok az bir bakıma gereksinim duyarlar ve fırçaları olmadığından kıvılcım; yani parazit oluşturmazlar. Bu üstünlüklerinden dolayı döner bilezik rotorlu motorlara göre daha çok tercih edilirler. Kafes – rotorlu motorlardan, örneğin: İş makinelerinde, kaldırma düzenlerinde ve tarım makinelerinde yararlanılmaktadır.

Asenkron motorların yukarıda da bahsedildiği gibi statorda sargıları vardır. Rotor normalde sincap kafesli olarak tasarlanır. Sincap kafes, manyetik alan değiştirildiğinde ters alan oluşturması için döküm alüminyum nüveden yapılmıştır. Stator bobinlerine AC gerilim uygulandığında AC manyetik alan oluşturur, sincap kafes, ters bir manyetik alan meydana getirir ve sonuç olarak motoru döndürmek için moment oluşur. Motor, uygulanan gerilimin frekansına yakın bir hızda dönecektir. Ancak her zaman için biraz kayma olacaktır. Şekil 4.32’ deki gibi bir sürücü kontrolör (kontrolör) ile AC gerilimin frekansı kontrol edilerek motorun hızı kontrol edilebilir. Bu sürücüler, sadece tek bir dönüş yönünün gerekli olduğu uygulamalar için kullanılmalıdır. Tipik bir asenkron motor için moment-hız eğrisi Şekil 4.33’ de görülmektedir.



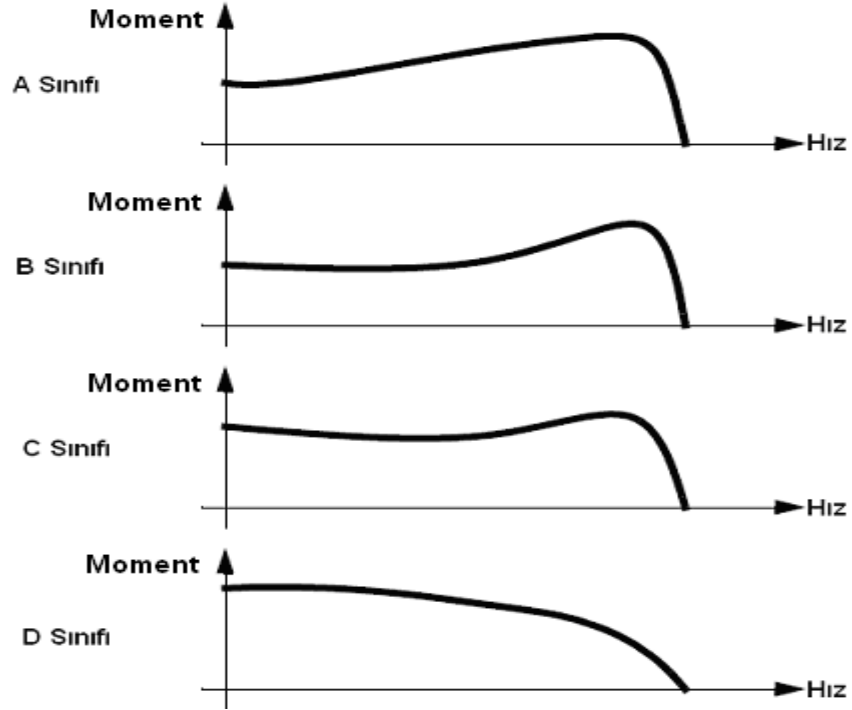
Şekil 4.32. Bir asenkron motor sürücüsü



Şekil 4.33. Bir asenkron motorun hız-moment karakteristiği

İki kutuplu bir motor ($2 \times 60 \times 60/2$) = 3600 d/d gibi bir senkron hıza sahip olması gerekirken 3520 d/d gibi bir hıza göre çalışır. Bir geri besleme kontrolörü

kullanıldığında, kayma olayı önemsiz olmaktadır. Şekil 4.34’ de sincap kafesli asenkron motorun NEMA standardında hız-moment karakteristikleri verilmiştir.



Şekil 4.34. NEMA standardında sincap kafesli AC motor moment - hız eğrileri

Rotoru sargılı asenkron motorlar, dirençlerin değerlerini değiştirerek motorun moment-hız eğrisinin değiştirilebilmesine olanak vermek için harici dirençler kullanırlar. Direnç değeri artırıldığında motor moment-hız eğrisi A sınıfından D sınıfına kayar. Aşağıdaki denklemler bir asenkron motorun hızıyla uygulanan güç, kayma ve kutup sayıları arasındaki bağıntıyı göstermektedir. Yüksüz, ideal bir motorun % 0 kaymaya sahip olması istenir.

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot \left(1 - \frac{s}{\%100} \right) \quad (4.28.)$$

$$P = 3 \cdot |I_R|^2 \cdot R_R \times \frac{1-s}{s} \quad (4.29.)$$

$$T = \frac{P}{(1-s).n_s} \quad (4.30.)$$

f = gerilimin frekansı (tipik olarak 50 Hz veya 60 Hz' dir)

p = çift kutup sayısı

n = motorun dakikadaki dönüş hızı

s = motorun kayması

I_R = rotor akımı

R_R = rotor direnci

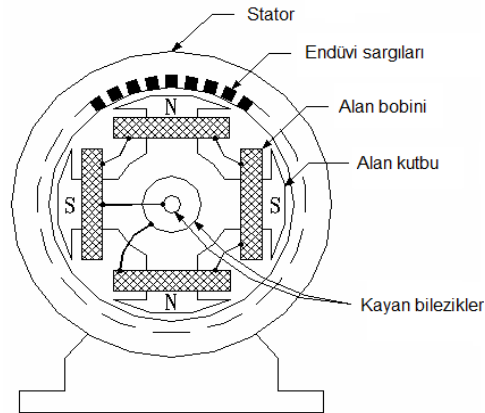
P = mekanik forma dönüştürülen güç

T = motor momenti

n_s = senkron hız

4.2.4. Senkron motorlar

Küçük güçlerde kutupları sabit mıknatıslı, büyük güçlerde elektromıknatıslı olarak imal edilen, kutup mili statorundaki döner alan hızıyla senkron dönen motorlara senkron motorlar denir. Şekil 4.35' de görüldüğü gibi, kutupları rotora yerleştirilmiş olup, statoruna (asenkron makinede olduğu gibi) çok fazlı alternatif akım sargısı yerleştirilmiştir.



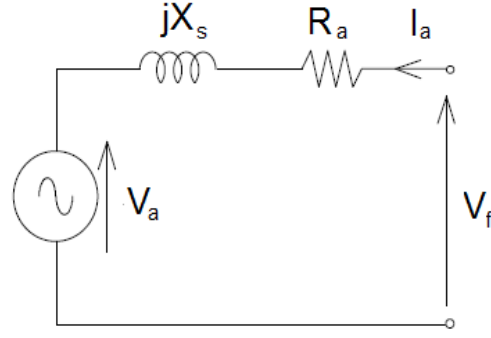
Şekil 4.35. Senkron motorun içyapısı

Yapı itibariyle doğru akım makinesinin tam tersidir. Doğru akım makinesinde kutuplar duran kısımdadır. Hareketli rotorda alternatif akım üretilirken (kollektör ile doğrultulmaktadır), senkron motorda alternatif akım üreten sargılar statora alınmış ve kutuplar ise hareketli olan rotora yerleştirilmiştir. Bunun nedeni orta gerilim üreten senkron generatörlerde yüksek güçlü, çok fazlı alternatif akım sargılarının rotorda izolasyonunun sağlanmasının güç olmasındandır. AC şebekeden alınan üç fazlı akım, motorun statorunda manyetik bir döner alan oluşturur. Statorda oluşan döner alan rotorun kutupları üzerine etkir. Rotorun kutupları üstünden hızlı bir şekilde geçen döner alan, kutuplar üstünde kuvvetler oluşturur. Ancak bu kuvvetler döner alanın dönme hızına bağlı olarak devamlı yön değiştirir. Bu nedenle rotor dönüş hareketine başlayamaz. Şayet rotor, döner alanın hızındaki bir değerde döndürülürse, döner alan tarafından sürüklenmeye başlar ve döner alanın devir sayısında dönmeye devam eder. Senkron motorun statorunun döner manyetik alan hızı aşağıdaki formülle gösterilir.

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (4.31.)$$

Senkron motorlara ilk hareket dışarıdan verilir. Rotor üstünde bir kısa devre sargısı ayrıca bulunuyorsa, senkron motor, asenkron motor gibi dönmeye başlayabilir. Uyarım devresi bağlandıktan sonra, bir senkron motor olarak dönüşüne devam eder ve rotor, statoru n_s hızında takip eder. Motorun asenkron olarak yol alması sırasında uyarım sargısı bir direnç üzerinden kapalı devre yapılmalıdır. Aksi halde sargılar üzerinde indüklenen gerilim izolasyonları patlatabilir. Kısa devre sargısı işletme sırasında rotorun darbe şeklindeki yüklenmeler karşısında yapacağı salınımları engeller. Bu nedenle amortisör sargısı olarak da anılır (www.megep.meb.gov.tr).

Senkron motorun tek faz eşdeğer devresi Şekil 4.36' da gösterilmiştir.



Şekil 4.36. Senkron motorun tek faz eşdeğer devresi

V_a = Statorun tek fazına uygulanan gerilim

V_f = Uyarım gerilimi

I_a = Stator devresinden geçen toplam akım

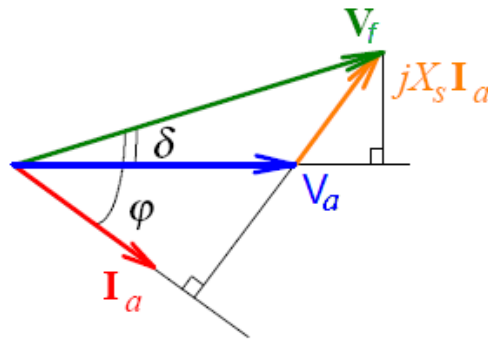
R_a = Stator sargısının direnci

X_s = Stator sargısının reaktansı

Eşdeğer devreye göre,

$$V_f = V_a - (R_a + jX_s) \cdot I_a \quad (4.32.)$$

olur. Senkron bir motorda güç faktörünün açısı statora uygulanan gerilim fazörü ile statordan akan toplam akımın fazörü arasındaki açıdır. Güç faktörü uyarım (alan) akımına bağlıdır. Aynı stator akımı için güç faktörü, uyarım akımı I_f ' ye bağlı olarak ileride veya geride olabilir. Güç faktörü açısının (ϕ_m) geride olduğu kabul edildiğinde, Şekil 4.37' de görülen senkron motor fazör diyagramı elde edilir.



Şekil 4.37. Senkron motor fazör diyagramı

Burada, $\varphi_m = \varphi - \delta'$ dır. Stator sargısının direncinin değeri küçük olduğu için ihmal edilirse (4.32.) ifadesi,

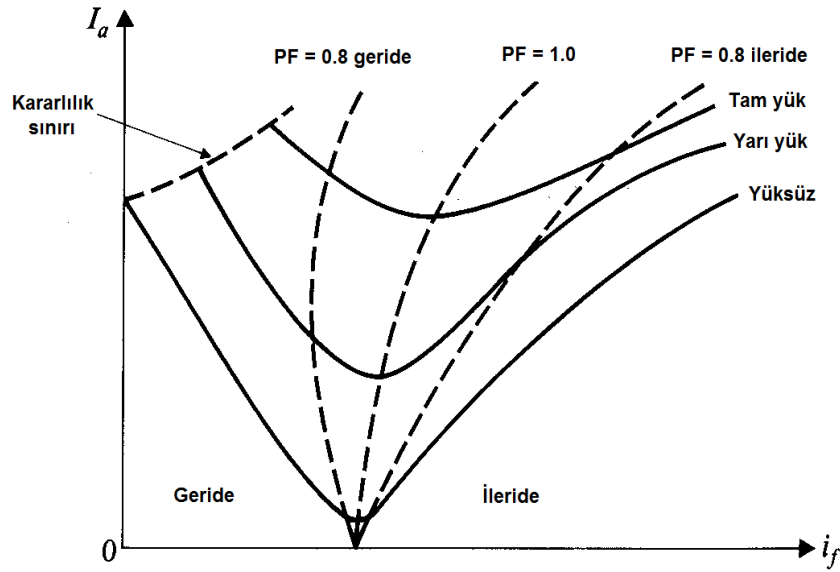
$$V_f = V_a - jX_s \cdot I_a \quad (4.33.)$$

şeklinde olur. Şekil 4.37' deki senkron motor fazör diyagramı kullanılarak,

$$V_a \cdot \sin \delta = X_s \cdot I_a \cdot \cos \varphi_m \quad (4.34.)$$

ifadesi bulunur.

Senkron motorda uyartım akımına karşı stator akımındaki değişimler, senkron motorun V-eğrisi olarak bilinmektedir. Şekil 4.38' de senkron motorun tipik V-eğrileri görülmektedir (www.lmphotronics.com).



Şekil 4.38. Senkron motorun tipik V-eğrileri

Üç fazlı bir senkron motor için;

Giriş gücü,

$$P_{giriş} = 3.V_a . I_a . \cos \varphi_m \quad (4.35.)$$

Stator bakır kayıp gücü,

$$P_{sc} = 3.I_a^2 . R_a \quad (4.36.)$$

Üretilen mekanik güç,

$$P_m = P_{giriş} - P_{sc} \quad (4.37.)$$

Mil çıkışındaki güç,

$$P_{çıkış} = P_m - P_{fw} \quad (4.38.)$$

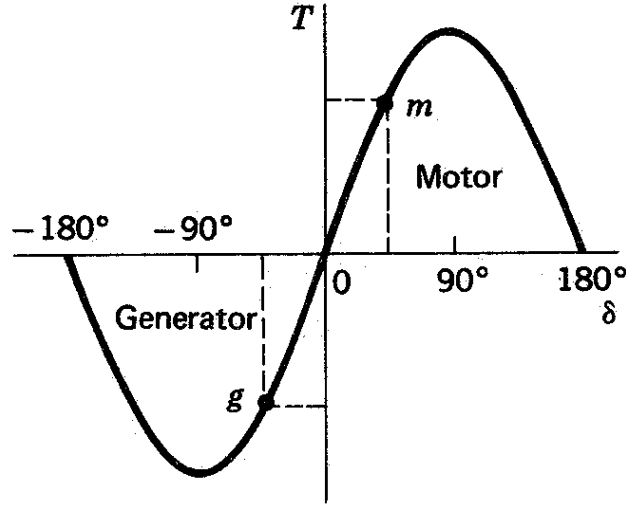
olur. P_{fw} sürtünme ve sargı kayıplarından oluşmaktadır. Eğer ω_s senkron hız olarak kabul edilirse, üretilen moment,

$$M_e = \frac{P_m}{\omega_s} \quad (4.39.)$$

olarak bulunur. Stator direnci ihmal edilirse (4.39.) ifadesi,

$$M_e = \frac{3.V_a . V_f . \sin \delta}{X_s . \omega_s} \quad (4.40.)$$

şeklinde bulunur. Bu ifadede δ , tork açısı veya yük açısı olarak adlandırılır. Stator sargısının direnci ihmal edildiğinde δ , rotor döner alanı ile stator döner alanı arasındaki açıyı temsil etmektedir. Senkron makine motor olarak çalıştığında, stator alanı rotor alanından öndedir. Senkron makinenin momenti, Şekil 4.38’ de gösterildiği gibi yük açısının sinüs fonksiyonu ile orantılıdır.



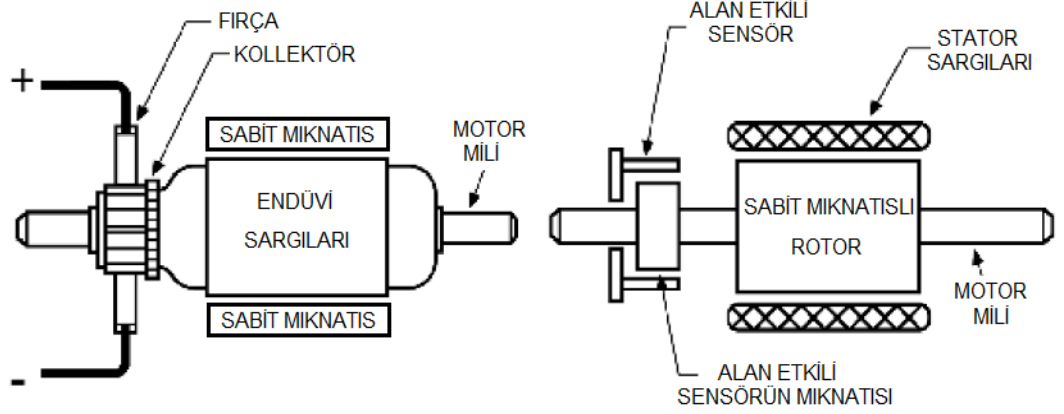
Şekil 4.38. Senkron makinenin momentinin uygulanan gerilimin açısıyla değişimi

Senkron motorlar yol aldıktan sonra döner alanın devir sayısında dönmeye devam eder. Motor yüklendiği zaman, rotor çarkının kutupları ile döner alanın kutupları arasındaki mesafe büyür. Bu durumda rotor çarkı yük açısı kadar döner alandan; yani, kendi yüksüz haldeki durumundan geri kalır. Yük açısı ne denli büyük olursa, döndürme momenti o denli büyük olur. Statorun iki kutbu arasında rotor kutup çarkının karşılaşacağı kuvvet çok büyüktür. Çünkü dönüş yönüne göre önde duran kutup, kutup çarkını çekecek, buna karşılık geride duran kutup, kutup çarkını itecektir. Çift kutuplu bir makinede yük açısı 90° iken, döndürme momenti en büyük değerine ulaşır. Bu en büyük döndürme momenti “devrilme momenti” olarak da anılır. Yük açısının 90° ’nin üstüne çıkması halinde önde duran kutbun, kutup çarkını çekmesi büyük ölçüde düşer.

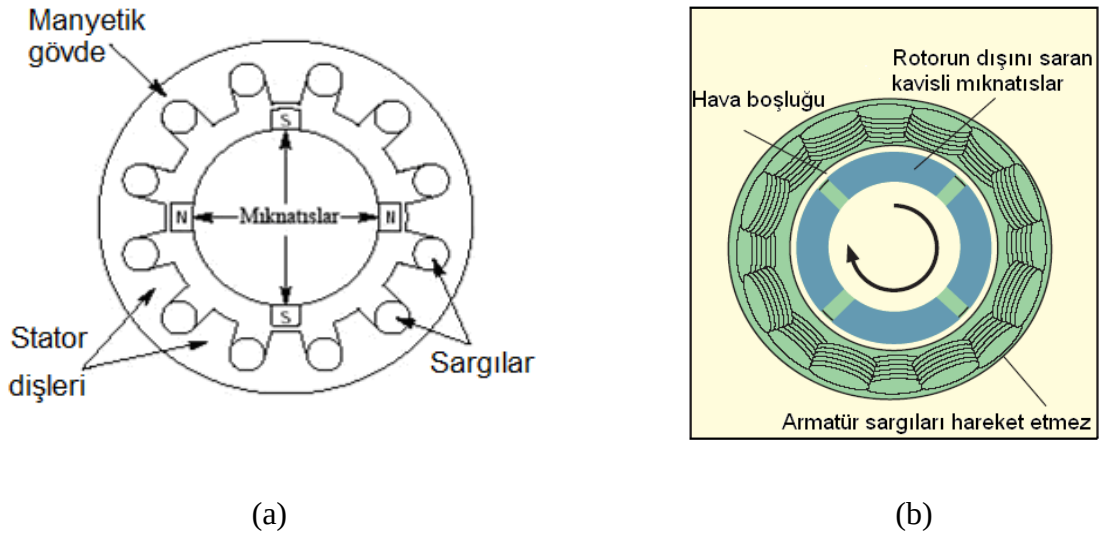
Şekil 4.38' de görüldüğü gibi motor miline (rotoruna) uygulanan momentin tepe değerleri -90 ve $+90$ derece açılarındadır. Yük açısı 90^0 ye yaklaştığında devrilme momenti en büyük değerine ulaşır. Senkron motorların genellikle devrilme momentleri vardır. Bu devrilme momentleri anma momentlerinin aşağı yukarı iki mislidir. Çok kuvvetli yüklenme halinde, motor devrilir ve yüklenme ortadan kalksa bile kendiliğinden yol alamaz. Senkron motorlar asenkron motorlara göre gerilim düşmelerine karşı daha az duyarlıdır. Senkron motorlarda döner alanın manyetik akısı ve döndürme momenti gerilimle doğru orantılıdır. Senkron motorlarının aşırı uyarılması senkron generatörlerde olduğu gibi endüktif tepkin gücün elde edilmesini sağlar. Bu nedenle aşırı uyarılmış senkron motorları yüksüz çalıştırılarak tepkin güç elde edilir. Bu tür motorlar faz kaydırma motorları olarak da anılmaktadır. Doğru akım uyarımlı ve üç fazlı akımla çalıştırılan senkron motorlar, örneğin; yüksek fırınlardaki kompresörlerin ve büyük pompaların döndürülmesinde kullanılırlar. Doğru akım uyarıları olmayan üç fazlı senkron motorlarda bir sürekli mıknatıs rotoru bulunur. Bu tür motorlar tekstil makinelerinde kullanılmaktadır. Tek fazlı alternatif akımda işletilen senkron motorlarda doğru akımlı uyarı kullanılmaz. Bu gibi motorlardan elektrikli saatlerin (senkron saatler) ve kaliteli pikapların işletilmesinde yararlanılmaktadır.

4.2.5. Fırçasız DC motor

Bu motorlara fırçasız denmesinin nedeni adından da anlaşıldığı üzere fırçaların ve kollektörün bulunmamasıdır. İngilizce, Brushless DC' nin kısaltması BLDC olarak da anılır. Temel prensip ve çalışma şekli fırçalı DC motorla aynıdır. Şekil 4.39' da da açıkça görüldüğü gibi tek fark bobinlerin motorun gövdesinde, sabit mıknatısların ise rotorda bulunmasıdır. Şekil 4.40.a' da fırçasız DC motorun prensip şeması ve Şekil 4.40.b' de içyapısı görülmektedir.



Şekil 4.39. Fırçalı ve fırçasız DC servo motorların yapıları

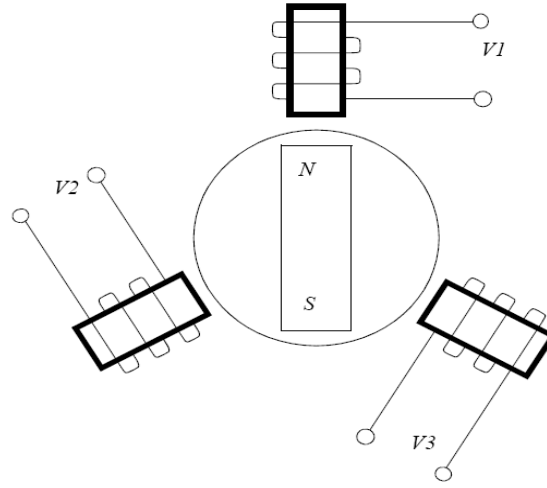


Şekil 4.40. a) Fırçasız bir DC motorun prensip şeması, b) içyapısı

Bu motorda rotor ve stator yer değiştirmiştir. Bunun avantajı, fırça ve kolektör sisteminin kalkması, dolayısı ile sürtünmeden ve fırça/kollektör ikilisinin oluşturduğu dirençten dolayı oluşan elektrik/mekanik kayıpların ortadan kalkmasıdır. Aynı zamanda bu tasarım, mekanik olarak kontrol edilmediği için bobinlerin sayısının artırılmasına da izin verdiği için, bu motorlardan çok yüksek moment almak mümkündür. Dezavantajı ise kolektörün yerini elektronik bir devrenin alması; yani motorun çalışabilmesi için ek donanımlar gerektirmesidir. Kollektör/Fırça

sistemi ile kolayca elde edilen bobinlerin sıralı enerjilendirilmesi, elektronik devreler tarafından yapılmalıdır. Bu da motoru kullanmak isteyen kişilere ek maliyet getirmektedir.

Fırçasız motorlar, AC veya fırçalı DC motorlardan farklı değildirler. Fırçasız DC motorların da hareketi dolayısıyla momenti üretebilmeleri manyetik alanların etkileşimine dayanmaktadır. Tipik bir fırçasız DC motor Şekil 4.41’ de görüldüğü gibi her birine gerilim uygulanmış üç stator kutbuna sahip olabilir. Bobinlerin her birisi ayrı ayrı kontrol edilir. Bobinler, sabit mıknatıslı rotoru çekmek veya itmek için anahtarlanırlar.

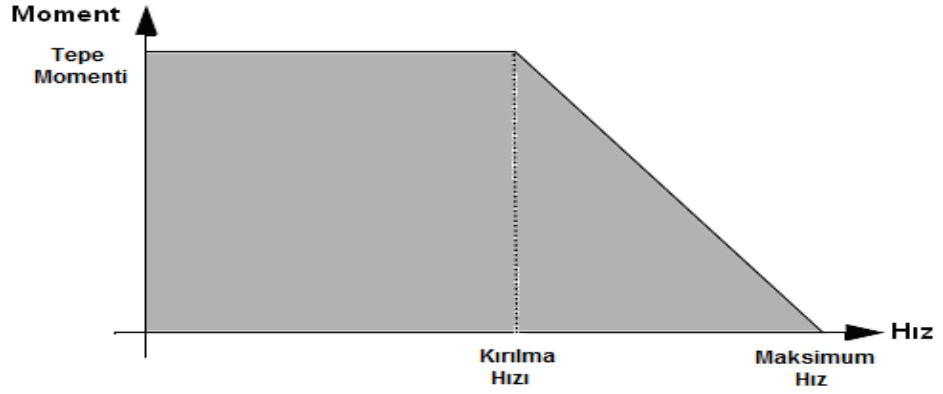


Şekil 4.41. Fırçasız bir DC motor

Fırçasız motorların çalışma prensibi, uygun zamanda rotor sargılarını döndürmek veya durdurmak için yarıiletken anahtarların anahtarlanma prensibine dayanmaktadır. İşlem, elektronik komütasyon olarak bilinmektedir. Mekanik komütasyonun yerine rotorla sargı akımlarını senkronize bir şekilde tutan yarı-iletken anahtarlı elektronik komütasyonla çalışmaktadırlar. Sonuç olarak, moment üretmek için kontrolör motorun pozisyonuna karşı hassas olmalıdır. Bunu yapmanın bir yolu, pozisyona yaklaşmak için maliyetli olmayan sensörler kullanmaktır. Bu metot “altı adımlı komütatör” olarak bilinmektedir. Biraz sağlam olmayan bir metottur ancak çalışmaktadır. Daha karmaşık olan metot, optik enkoderden geri besleme veya

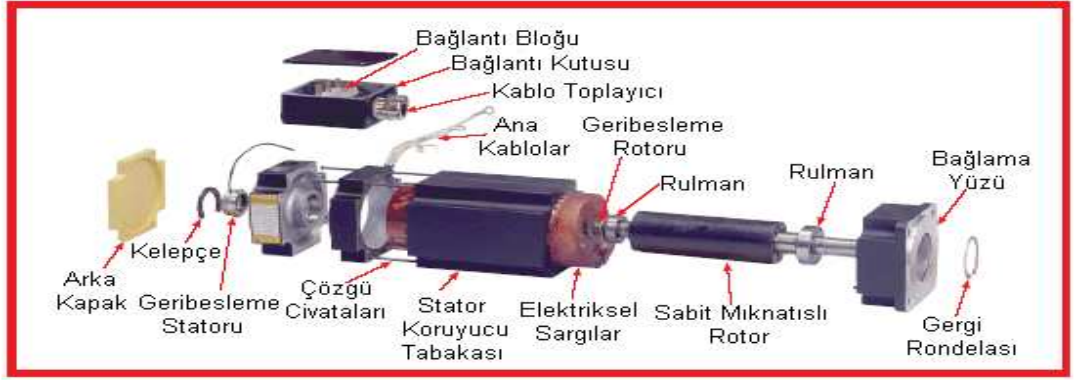
benzeri olan “sinüs dalga komütasyonu” ’ na dayanmaktadır. Burada, kontrolör çıkış momentini düzgün ve kusursuz bir şekilde koruyarak, motor akımını büyük bir çözünürlükte ayarlamaktadır.

Fırçasız DC motorları sürekli döndürebilmek için stator bobinlerindeki akım sürekli değiştirilmelidir. Eğer bobinlere uygulanan gerilim üç fazlı sinüs dalga şekilli AC bir gerilim ise motor sürekli döner. Uygulanan gerilim benzer bir etki yapan trapezoidal dalga şeklinde olabilir. Değişen dalga şekilleri, anahtarlama zamanlarını seçmek için motordan pozisyon geri beslemesi kullanan kontrolörlerdir. Motorun hızı, sinyalin frekansı ile orantılıdır. Fırçasız bir DC motorun moment-hız eğrisi Şekil 4.42’ de görülmektedir.



Şekil 4.42. Fırçasız bir DC motorun moment - hız eğrisi

Tipik bir fırçasız DC motorda rotor, 4 kutuplu sabit bir mıknatıstan ve daha küçük bir sensör mıknatısından oluşmaktadır. Diğer taraftan stator üç fazlı Y bağlı sargılar ve üç adet Hall etkili sensörler içermektedir. Sensör mıknatısı, milin pozisyonunu göstermek için Hall etkili sensörü kapatır ve açar. Bu bilgiyle, kontrolör optimum zamanlama noktalarında her bir sargıyı akımla anahtarlayabilir. Şekil 4.43’ de fırçasız bir DC motorun içyapısı görülmektedir.



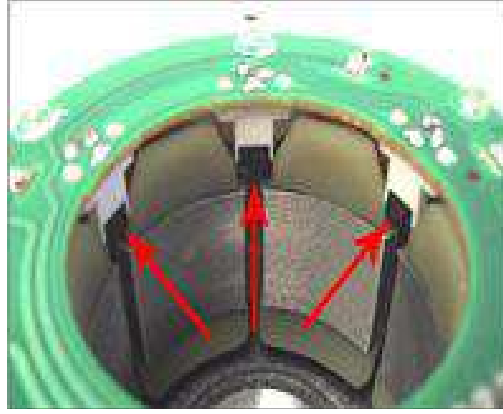
Şekil 4.43. Fırçasız bir DC motorun içyapısı

Fırçasız DC motorlar; sensörlerin, mıknatısların ve sargı akımını anahtarlamaya yarayan elektronik elemanların kombinasyonuna dayanır. Bu parçalar standart DC motorlarda kullanılan mekanik komütatörlerle benzer fonksiyonu gösterirler ancak arada fiziksel bir bağlantı yoktur. Onlar sadece sürtünmesiz olmayıp aynı zamanda temiz (karbon tozu yoktur), sessiz (elektrik gürültüsü yoktur) ve bakıma gereksinim duymazlar.

Fırçasız servo motorlarda rotorun pozisyonunun nerede olduğunun bilinmesi için sensörler kullanılır. Servo motorlarda milin nerede olduğunun; doğru sargıya doğru zamanda ve doğru yönde enerji uygulanması yönünden bilinmesi şarttır. Milin nerede olduğunun bilinmesi için genelde iki tip sensör kullanılır.

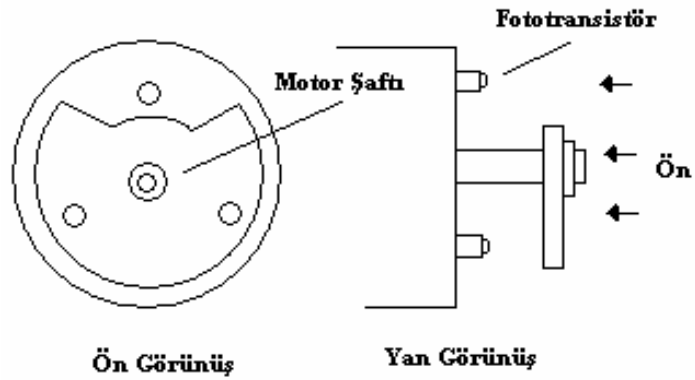
- Alan etkili sensörler (Hall effect sensors)
- Foto sensörler

Alan etkili bir sensöre manyetik bir eleman yaklaştırıldığında çıkışında bir gerilim üretilir. Bu gerilim 1 ya da 0 dır. Alan etkili sensörler genellikle pahalı elemanlar olduklarından daha ziyade küçük gerilim ve küçük güçlü uygulama alanlarında kullanılırlar. Şekil 4.44’ de alan etkili sensörün fırçasız DC motordaki yeri görülmektedir.



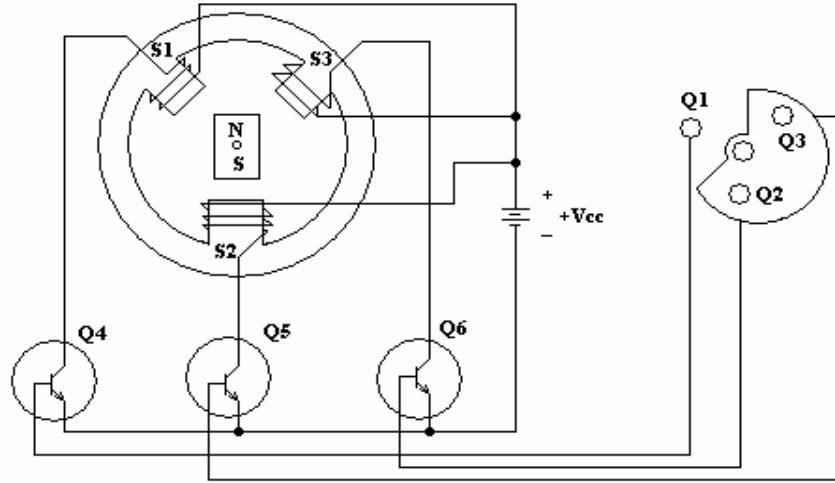
Şekil 4.44. Alan etkili sensörün BLDC motordaki yeri

Şekil 4.45' den de anlaşılacağı gibi ışık kaynağının, ışığı şaft miline bağlı özel bir biçimde şekillendirilmiş bir parça ile kesilir. Bu düzenek sayesinde uygun transistör uygun zamanda iletken yapılarak uygun bobinden gerekli akımın geçişi sağlanır.



Şekil 4.45. Foto transistörlü motorun şaft görünüşleri

Üç fazlı stator kutuplu bir servo motorun foto sensörlerle çalıştırılmasına ait devre Şekil 4.46' da verilmiştir. Bu devrede 3 adet foto transistör, motor arka kapağına 120'şer derece aralıklarla yerleştirilmiştir. Kaynaktan gelen ışığı kesen parça motor miline her durumda 2 transistörün ışığını kapatacak, sadece birine ışık gönderecek biçimde monte edilmiştir. Foto transistörler de kutup sargılarının enerjisini temin edecek diğer transistörleri ilettime geçirir.



Şekil 4.46. Fırçasız DC servo motorun foto transistörlerle çalıştırılması

Aynı güçteki bir motora oranla daha küçük, daha hafif olması, sağlıklı devir kontrolü yapılabilmesi, ek maliyeti affettirebilir. Buna rağmen elektronik sensörlerin, fırça/kollektör ikilisi kadar hassas olamaması bu tip motorların kullanım alanını kısıtlamıştır.

- *Fırçalı ve Fırçasız DC Motorların Karşılaştırılması*

Fırçasız motorların bir avantajı küçük boyutlarıdır. Fırçalı motorlar birçok nedenden dolayı oldukça büyüktürler. Bunlar,

- Komütatör düzenini çıkarmak alan kazandırmaktadır.
- Fırçasız motorlardaki sargılar direkt soğutmaya izin vermek için dışarıda sıkı bir şekilde iskelete tutturulmuşlardır.
- Fırçalı motorlar, fırça sürtünmeleri ve fırçalardaki gerilim düşümleri nedeniyle oluşan güç kayıplarından dolayı verimi düşürmektedirler. Ayrıca fırçasız motorlarda daha az rotor ataleti vardır çünkü dönen mıknatıs düzeni, fırçalı bir motorun endüvisinden daha hafiftir.

Fırçalı motorların bazı avantajları da vardır. Fırçasız motorlar daha fazla elemana ve kabloya gereksinim duymaktadırlar. Özellikle kontrolün, sistem maliyetinin daha büyük bir bölümü olduğu küçük güçlerde kontrolörden dolayı maliyet daha fazladır. Bazen fırçasız motorlar, fırçalı motorlar kadar düzgün moment üretememektedirler. Bunun nedeni çoğunlukla kullanılan sensördeki yaygın ofset hatasının sebebiyet verdiği moment dalgalanmalarıdır. Fırçalı motorlar daha kolay sürülebilirler, bir pozisyon sensörüne ihtiyaç duymazlar, kullanılan sensörün ofseti moment dalgalanmalarına neden olmaz ve özellikle düşük güçlerde daha ucuzdurlar. Fırçasız motorlar daha güvenilirlerdir ve bakımı azaltmışlardır. Ark yapmazlar, küçük boyutludurlar ve daha düşük rotor ataletine sahiptirler. Fırça sürtünmesi, gürültüsü ve karbon parçaları yoktur. Bu yüzden ivmenin ve sabit momentin önemli olduğu servo sistemlerde fırçasız motorlar daha çok uygulama alanı bulmuşlardır.

4.2.6. Adım motorları

Açısal konumu adımlar halinde değiştiren, çok hassas sinyallerle sürülen motorlara adım (step) motorları denir. Adından da anlaşılacağı gibi adım motorları belirli adımlarla hareket ederler. Bu adımlar, motorun sargılarına uygun sinyaller gönderilerek kontrol edilir. Herhangi bir uyarımda, motorun yapacağı hareketin ne kadar olacağı, motorun adım açısına bağlıdır. Adım açısı motorun yapısına bağlı olarak 90°, 45°, 18°, 7.5°, 1.8° veya daha değişik açılarda olabilir. Motora uygulanacak sinyallerin frekansı değiştirilerek motorun hızı kontrol edilebilir. Adım motorlarının dönüş yönü uygulanan sinyallerin sırası değiştirilerek saat ibresi yönü (CW) veya saat ibresinin tersi yönünde (CCW) olabilir. Motorun devir sayısı aşağıdaki denklemde verilir.

$$n = \frac{\alpha \cdot f_a}{360^0} \quad (4.41.)$$

n = devir sayısı (dev./s.)

α = adım açısı (°)

f_a = adım frekansı (Hz)

Adım motorlarının hangi yöne doğru döneceği, dönüş hızı gibi değerler mikroişlemci veya bilgisayar yardımı ile kontrol edilebilir. Sonuç olarak adım motorlarının hızı, dönüş yönü ve konumu her zaman bilinmektedir. Bu özelliklerinden dolayı adım motorları çok hassas konum kontrolü istenen yerlerde sıklıkla kullanılırlar. Adım motorlarının kullanıldıkları yerlere örnek olarak, endüstriyel kontrol teknolojisi içerisinde bulunan bazı sistemler, robot sistemleri, takım tezgâhlarının ayarlama ve ölçmeleri verilebilir. Ayrıca, adım motorları konumlandırma sistemlerinde ve büro makineleri ile teknolojisi alanında da kullanım alanı bulmaktadırlar (www.megep.meb.gov.tr).

Bant sürücüler, imalat tezgahları, printer (yazıcı), teyp sürücüleri, hafıza işlemlerinde, tıbbi cihazlarda, makine tezgahlarında, dikiş makinelerinde, kameralarda, taksimetrelerde, kart okuyucularında, ayar ve kontrol tekniğinde, uzaktan kumanda göstergelerinde kullanılır. Sonuç olarak adım motorları; her türlü hareket veya pozisyon kontrolünün gerekli olduğu yerlerde, dijital bilgileri mekanik harekete çeviren bir transduser olarak görev yapar.

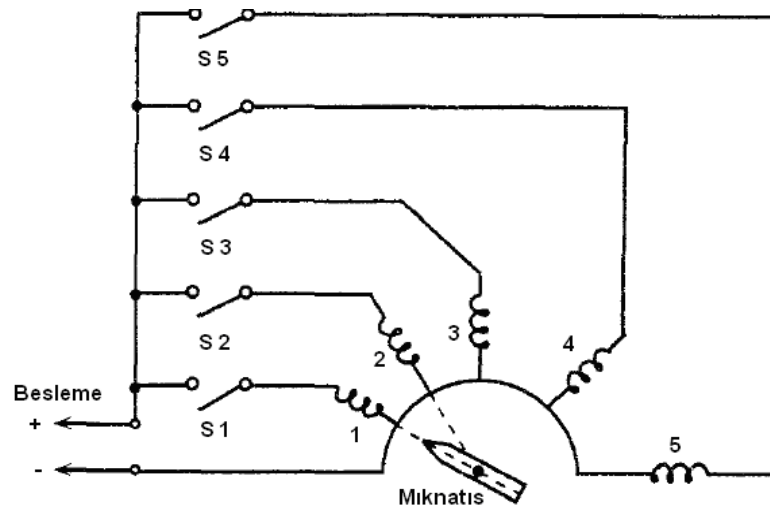
Adım motorlarının bu kadar çok kullanım alanı bulmasının nedeni bu motorların bazı avantajlara sahip olmasıdır. Bu avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Geri beslemeye ihtiyaç göstermezler. Açık çevrim olarak kontrol edilebilirler.
- Motorun hareketlerinde konum hatası yoktur.
- Sayısal olarak kontrol edilebildiklerinden bilgisayar veya mikroişlemci gibi elemanlarla kontrol edilebilirler.
- Mekanik yapısı basit olduğundan bakım gerektirmezler.
- Herhangi bir hasara yol açmadan defalarca çalıştırılabilirler.
- Hızı, programlama yoluyla ayarlanabilir.
- Çalışma sırasında hızı sabit kalır, değişmez.
- Kullanım ömrü uzundur.

Adım motorlarının bu avantajları yanında bazı dezavantajları da aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Adım açıları sabit olduğundan hareketleri sürekli değil darbelidir.
- Sürtünme kaynaklı yükler, açık çevrim kontrolde konum hatası meydana getirirler.
- Elde edilebilecek güç ve moment sınırlıdır.

Adım motorlarına giriş darbesi uygulandığı zaman belirli bir miktar döner ve dururlar. Bu dönme miktarı motorun yapısına göre belirli bir açı ile sınırlandırılmıştır. Adım motorlarında rotorun dönmesi, girişe uygulanan darbe adedine bağlı olarak değişir. Girişe tek bir darbe verildiğinde rotor tek bir adım hareket eder ve durur. Daha fazla darbe uygulanınca darbe adedi kadar adım hareket eder. Bütün adım motorlarının çalışma prensibi bu şekildedir. Adım motorun çalışması, bir daire içinde elektromanyetik alanların dönüşü ile açıklanabilir. Şekil 4.47’ deki 1 nolu anahtar kapandığı zaman sabit mıknatıs kendiliğinden 1. elektromanyetik alan ile aynı hizaya gelecektir. Bundan sonra 1 nolu anahtar açılıp 2 nolu anahtar kapatılırsa sabit mıknatıs 2. elektromanyetik alanın karşısına gelecektir. Bu olaylar sırasıyla tekrarlanırsa daimi (sabit) mıknatıs yani rotor bir daire içinde düzgün şekilde döner.



Şekil 4.47. Adım motorun prensip şeması

Kullanımda olan birçok elektrik motorunda olduğu gibi adım motorları da yapısına ve çalışmasına göre sınıflandırılabilir.

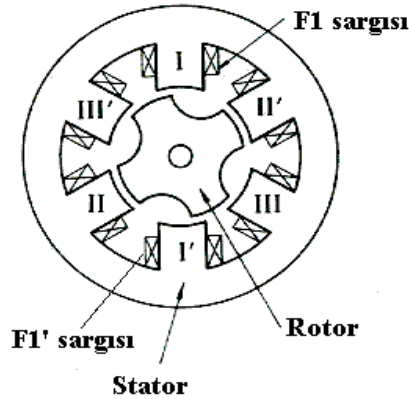
Adım motorlarının çeşitleri

1. Değişken relüktanslı adım motorları (VR)
2. Sabit mıknatıslı adım motorları (PM)
3. Hybrid adım motorları
4. Lineer adım motorları

Uygulamada en çok “değişken relüktanslı” ve “sabit mıknatıslı” adım motorları kullanılmaktadır.

1. Değişken Relüktanslı Adım Motorları

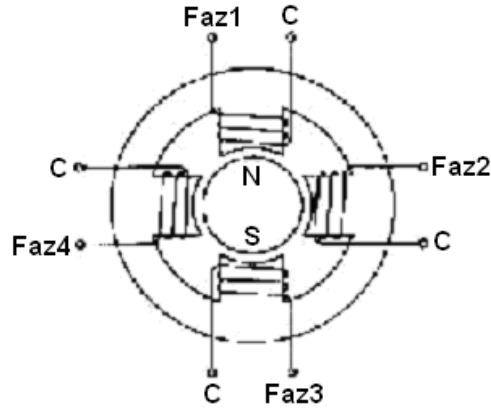
Değişken relüktanslı (VR) adım motoru en temel adım motoru tipidir. Bu motorun temel prensiplerinin daha iyi anlaşılabilmesi için kesit görünüşü Şekil 4.48’ de gösterilmiştir. Bu üç-fazlı motorun 6 adet stator kutbu vardır. Birbirine 180° açılı olan herhangi iki stator kutbu aynı faz altındadır. Bunun anlamı, karşılıklı kutupların üzerindeki sargıların seri veya paralel olması demektir. Rotor 4 adet kutba sahiptir. Stator ve rotor nüveleri genellikle ince tabakalı silisli çelikten yapılırlar. Düşük manyeto motor kuvveti (mmk) uygulansa bile, stator ve rotor malzemeleri yüksek geçirgenlikli ve içlerinden yüksek manyetik akı geçebilecek kapasitede olmalıdır.



Şekil 4.48. VR adım motoru

2. Sabit Mıknatıslı Adım Motorları

Rotorunda sabit mıknatıs (PM) kullanılan adım motoruna sabit mıknatıslı adım motoru adı verilir. 4-fazlı bir PM adım motorunun bir örneği Şekil 4.49’ da gösterilmiştir. Silindirik sabit mıknatıs, rotor gibi çalışır, etrafında ise her biri üzerine sargılar sarılı olan 4 adet kutbun bulunduğu stator vardır.



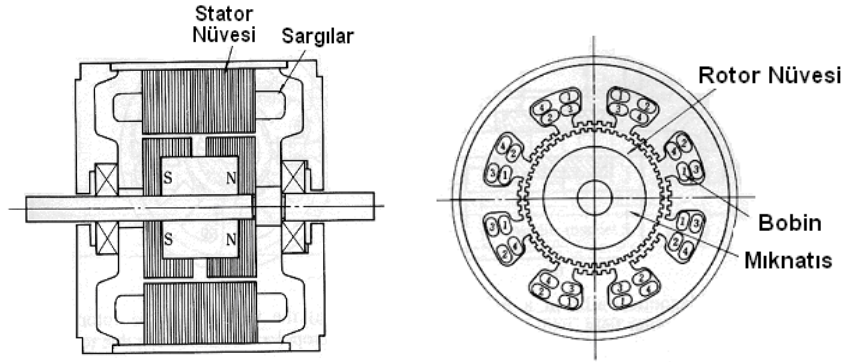
Şekil 4.49. 4 fazlı bir PM adım motoru

Burada C ile adlandırılan uç, her bir fazın birer uçlarının birleştirilerek güç kaynağının pozitif ucuna bağlandığı ortak uçtur. Eğer fazlar; Faz1, Faz2, Faz3, Faz4 sırasıyla uyarılırsa; rotor saat ibresi yönünde (CW) hareket edecektir. Bu motorda, adım açısının 90° olduğu açıkça görülmektedir. PM adım motorunda adım açısını azaltmak için, manyetik kutup sayısı ile birlikte stator kutup sayısı artırılmalıdır. Fakat her ikisinin de bir sınırı vardır. Buna alternatif olarak küçük adım açlarına sahip karışık yapıdaki PM adım motorları kullanılmaktadır.

3. Karışık Yapılı Adım Motorları

Rotorunda sabit mıknatıs bulunan bir diğer adım motoru da karışık yapı (Hybrid) adım motorudur. Hybrid kelimesi motorun sabit mıknatıslı ve değişken relüktanslı motorların prensiplerinin birleşmesinden dolayı verilmiştir. Günümüzde çok geniş bir kullanım alanına sahip olan Hybrid adım motorunun yapısı Şekil 4.50’ de verilmiştir. Statorun nüve yapısı değişken relüktanslı adım motorunun aynısı

veya çok benzeridir. Fakat sargıların bağlantısı değişken relüktanslı motorunkinden farklıdır. Değişken relüktanslı adım motorunda bir kutupta bir fazın iki sargısından sadece bir tanesi sarılmış iken, 4 fazlı karışık yapılı adım motorunda iki farklı fazın sargıları aynı kutupta sarılmıştır. Bundan dolayı bir kutup sadece bir fazın altında değildir. Karışık yapılı adım motorlarında moment, diş yapılarındaki hava aralıklarının manyetik alanlarının etkileşimi ile oluşturulur. Bu tip motorlarda sürekli mıknatıs, sürücü kuvveti oluşturmak için önemli rol oynamaktadır. Fakat karışık yapılı adım motorundaki rotor ve stator dişlerinin küçük adım açıları elde etmek için tasarlandığı bilinmelidir.



Şekil 4.50. Karışık yapılı adım motorunun yapısı

4. Lineer Adım Motorları

Mekanik hareketi, dairesel bir hareket olmayıp da yatay eksen (x veya y eksenleri) üzerinde hareket eden motorlara lineer motor denir. Lineer motorlar, X ve Y yönlerinde veya X ve Y düzleminde herhangi bir vektör yönünde hareket ederler. Bu tür motorların tasarımının temelinde motorun bir gövde üzerinde iki tane ortogonal elektromanyetik alanı içermesi yatmaktadır. Bu alanı tamamlamak için demir nüve kare şeklinde yapılır. Böylece iki eksenli lineer adım motoru oluşturulur. Bu tip adım motorlara örnek olarak 1969 yılında Kaliforniya’da gerçekleştirilen sawyer adım motoru gösterilebilir. Bu motor iki ana mekanik bileşenden oluşur. Birinci mekanik bileşen, gücü oluşturan hareketli endüvidir. Endüvinin statora sabitlendiği (demir nüve) kısım ikinci bileşendir. Endüvi ve stator arasında sabit bir

düşürülürse bu tür direkt sürücü motorlar için minimum eleman kullanılarak güvenilir uygulama alanları bulunabilir.

Adım motor seçiminde bir çok kriter mevcuttur. En iyi seçimi gerçekleştirebilmek için ekonomik olmasının yanında kapsamlı mekanik yapı, yükün durumu ve elektronik sürücü devre ihtiyaçlarının göz önüne alınması gerekir. En basit seçim, motorun moment ihtiyacı bakımından verimliliği esas alınarak yapılandır. Eğer bir motorun verilen bir t zamanında, arzulanan bir hıza yükselmesi gerekirse, açısal ivme şu formda ifade edilir:

$$A\text{çısal ivme} = \frac{SPS / t}{SA / 57.3} \text{ rad} / s^2 \quad (4.42.)$$

Adım Açısı (SA) : Bu derece cinsinden açısal bir dönme olup, sargı polaritesinin her bir değişiminde mil döner. Bu tek bir giriş darbesi ile sağlanır. Derece / adım veya sadece derece olarak ifade edilir.

Dönme Başına Adım (SPR) : Bu 360°' lik bir tam dönme için gerekli olan toplam adım sayısını gösterir.

$$SPR = \frac{360^0}{SA} \quad (4.43.)$$

Saniye Başına Adım (SPS) : Motorun gittiği 1 saniyedeki açısal adım sayısı, AC ve DC motorların dakika başına dönme hızı ile karşılaştırılabilir.

$$SPS = \frac{SPR(r / \text{min})}{60} \quad \text{veya} \quad w = 2\pi \frac{SPS}{SPR} \text{ rad} / s \quad (4.44.)$$

4.2.6.1. Adım motorlarına ait önemli parametreler

Çözünürlük: Bir devirdeki adım sayısı veya dönen motorlar için adım açısı (derece), lineer motorlar için ise adım uzunluğu (mm) olarak tanımlanır. Bu sabit değer, üretim sırasında tespit edilen bir büyüklüktür. Bir adım motorunun adım

büyüküğü, çeşitli kontrol düzenleri ile değıştirilebilir. Yarım adım çalışmada adım büyüküğü normal değerin (çözünürlüğünün) yarısına indirilir.

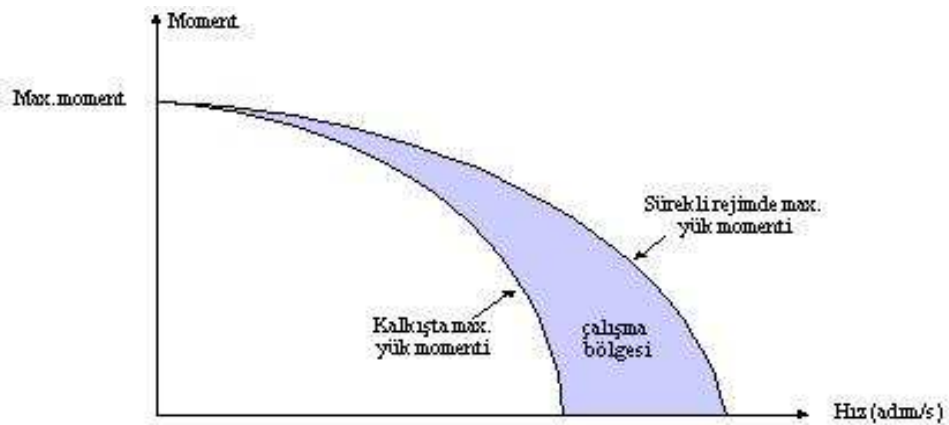
Doğruluk: Bir adım motorunun adım konumu, tasarım ve üretim sırasında bir araya getirilen birçok parçanın boyutları ile belirlenir. Bu parçaların boyutlarındaki toleranslar ve dahili sürtünmeler adımların nominal denge konumlarında da toleranslara neden olurlar. Bu durum adım motorunun doğruluğı olarak isimlendirilir ve belli bir konumdaki maksimum açısal hatanın nominal tek adım değerin yüzdesi olarak ifade edilmiş halidir. Klasik adım motorlarında bu hata $\% \pm 1$ ile $\% \pm 5$ arasında değışmektedir. Sürtünme momenti veya kuvveti nedeniyle oluşan konum hataları bu doğrulukla ilgisi olmayan, daha az veya çok olabilen rasgele hatalardır. Ancak her iki tip hata toplanarak sistemin toplam hatası elde edilir.

Tutma momenti: Bir adım motorunun en temel moment karakteristiğidir. Tutma momenti eğrisi, motorun ürettiğı tutma momentinin rotor konumuna bağılı olarak değışimini veren eğridir. Eğrinin merkezi motorun bir fazının uyarılmış olduğı durumda rotorun kararlı adım konumuna karşılık düşer. Bu eğri, rotor adım pozisyonundan uzaklaştırılırsa, motorda indüklenerek olan ve rotoru sıfır momentli adım pozisyonuna geri getirmeye çalışan momentin (tutma momenti) yönünü ve miktarını verir. Tutma momenti eğrisi, motorun tüm rotor konumları ve statik uyarma koşullarındaki ani momentini tam olarak tanımlamak için gereklidir. Diğer moment karakteristikleri (statik ve dinamik) bu eğri baz alınarak elde edilebilir.

Tek adım tepkisi: Motor fazlarından biri uyarılmış durumdaysa motor kararlı bir adım konumundadır. Bu fazın uyarımı kesilip yeni bir faz uyarılırsa motor bir adım atacaktır. Rotor konumunun zamana göre bu değışimi “tek adım tepkisi” olarak tanımlanır. Tek adım tepkisi, motorun adım hareketinin hızını, tepkinin aşım ve salınım miktarını, adım açısının hassaslığını veren önemli bir karakteristiktir. Adım motorlarından maksimum performans elde edebilmek için tek adım tepkisindeki aşım ve salınımların azaltılması ve yerleşme zamanının kısaltılması gerekmektedir. Bu nedenle tek adım tepkisinin iyileştirilmesi adım motorlarının kontrolünde çok büyük öneme sahiptir.

Sürekli rejimde maksimum yük momenti eğrisi: Sürekli rejimde maksimum yük momenti/hız eğrisi herhangi bir sabit dönüş hızında, rotor hareketinin giriş darbe dizisiyle olan senkronizasyonunu bozmadan ve rotorun durmasına neden olmadan sürekli halde motor miline uygulanabilecek maksimum yük momentini verir. Bu moment aynı zamanda, söz konusu hızda motorda meydana gelecek maksimum moment anlamına da gelmektedir. Klasik motorlarda bu eğriye karşılık gelebilecek bir karakteristik yoktur. Maksimum yük momenti eğrisi, çalışma noktalarını göstermediği gibi bir transfer fonksiyonu eğrisi de değildir. Sadece, çalışma bölgesini sınırlar. Bu eğrinin sınırladığı bölge içinde herhangi bir noktada motor giriş darbe dizilerini kaybetmeden ve durma tehlikesi olmadan ilgili hız ve yük momenti ile çalışır. Sınırların dışına çıkıldığında bu durum değişebilir.

Kalkışta maksimum yük momenti eğrisi: Özellikle açık çevrim sistemlerde, duran bir sistemi istenen pozisyona getirebilmek için motora uygulanan uyarım darbelerinin motor tarafından hiç kaçırılmadan takip edilmesini sağlamak çok önemlidir. Fakat uygulanan uyarım sinyallerinin sıklığı, motorun miline bağlı yükü sıfır hızından itibaren kaldırıp hızlandırmasına izin vermeyebilir. Bu yüzden adım motorları için, kalkışta maksimum yük momenti eğrileri tanımlanır. Şekil 4.52’ de sürekli rejimde maksimum yük momenti ve kalkışta maksimum yük momenti eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 4.52. Sürekli rejimde ve kalkışta max. yük momenti/hız eğrileri

Adım Motorlarının Uyartımı

1. Tek-faz uyartım

Motor sargılarının sadece birinin uyartıldığı uyartım cinsine tek-faz uyartımı adı verilir. Tablo 4.2’ de 4-fazlı adım motoru için tek-faz uyartım sırasındaki fazların durumu görülmektedir. Bu uyartım, metodunda rotor her bir uyartım sinyali için tam adımlık bir hareket yapmaktadır. Uyartım dönüş yönüne bağlı olarak sıra ile yapılır. Burada fazların uyartım sırası saat ibresi yönündeki (CW) dönüş için F1, F2, F3, F4, saat ibresinin tersi yönü (CCW) için F4, F3, F2, F1 şeklindedir.

Tablo 4.2. Tek-faz uyartımın faz uyartım sıralaması

Adım	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Faz 1	1				1				1
Faz 2		1				1			
Faz 3			1				1		
Faz 4				1				1	

2. İki-faz uyartım

Motor sargılarının ikisinin sıra ile aynı anda uyartıldığı uyartım cinsine iki-faz uyartımı adı verilir. Tablo 4.3’ de 4-fazlı adım motoru için iki-faz uyartım sırasındaki fazların durumu görülmektedir. İki faz uyartımlıda rotorun geçici durum tepkisi tek-faz uyartımlıya göre daha hızlıdır. Fakat burada güç kaynağından çekilen güç iki katına çıkmaktadır.

Tablo 4.3. İki-faz uyarımının faz uyarım sıralaması

Adım	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Faz 1	1	1			1	1			1
Faz 2		1	1			1	1		
Faz 3			1	1			1	1	
Faz 4	1			1	1			1	1

3. Karma uyarım

Bu uyarım yönteminde tek-faz uyarımı ile iki-faz uyarımı ardarda uygulanır. Burada rotor, her bir uyarım sinyali için yarım adımlık bir hareket yapmaktadır. Tablo 4.4’ de fazların uyarım sırası görülmektedir. Bu uyarım metodunda adım açısı yarıya düştüğünden adım sayısı iki katına çıkmaktadır.

Tablo 4.4. Yarım adım (karma) uyarımının faz uyarım sıralaması

Adım	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Faz 1	1	1						1	1
Faz 2		1	1	1					
Faz 3				1	1	1			
Faz 4						1	1	1	

Adım motorların birkaç genel karakteristiği ve geniş bir kullanım alanı bulmalarının nedeni aşağıdaki özellikleri taşımasındandır:

1. Adım motorların açık çevrim davranışlarının ± 1 adım doğruluk pozisyonuna sahip olmaları (rotorun açısal hızı yeterince küçük olduğundan hareket sırasında basamak kaybı olmaz). Yani kesin açısal mesafe tanımlanırsa motorun dönmesi uygun sayıda adımla (basamakla) kontrol edilebilir ve böylece mekanik sistemde milin hareketi yeterli ölçüde olur.

2. Adım motorların yüke yeterli momenti sağlayabilmeleri.

3. Adım motorlar, DC uyarıtımda geniş bir tutma momentine sahiptirler. Yani adım motorların rotor hareketi sabitken otomatik kilitleme özelliği vardır. Bu durumda rotor sadece, terminal gerilimi zamanla değiştiği sürece hareket eder.

Ayrıca bu özelliklerin yanında tasarımcıların, DC servo motor yerine adım motorları seçmelerinin aşağıdaki avantajları vardır.

- Adım motorların sayısal kontrollü sistemlere uygun olması sebebiyle sayısal kontrol ve/veya bilgisayarlı uygulamaları mümkündür.

- Hata, sadece adım hatasıdır.(Genellikle adım başına % 5' den daha azdır.) Bu nedenle birimsizdir. Adım motorların pozisyonlarında mükemmel doğruluğa sahip olmaları ve daha önemlisi hataları bir yerde toplamasıdır.

- Motorda açık-çevrim kontrolünün olması nedeniyle, takometre ve/veya enkoderin motorda kullanılması gereksizdir. Buna bağlı olarak tasarım maliyeti düşer. Geri besleme ile mil pozisyonunun tayin edilmesi elimine edilir.

- Sayısal işareti analog işarete çevirmek gerektiğinden, bir ara birim veya sayısal bilgisayar elimine edilebilir.

- Motor yapısının basit ve kuvvetli olması genellikle motorda iki duruş pozisyonu olması, motor bakımının kolay ve kullanım süresinin uzun olmasını sağlar. Bu nedenlerle maliyet düşmüş olur.

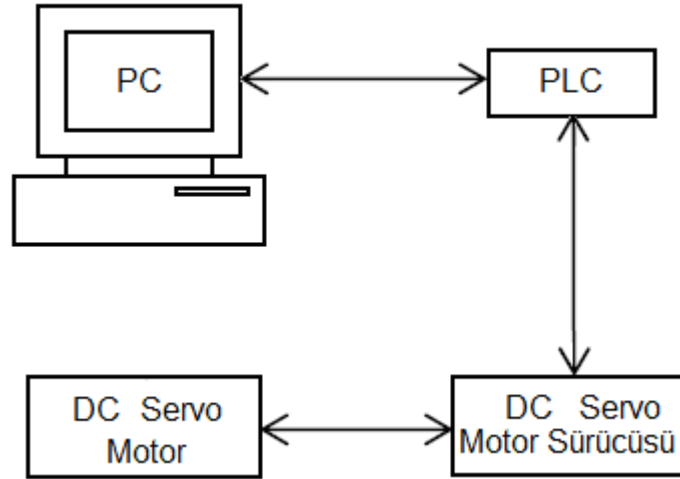
- Adım motorlarının ısınma gibi olumsuzluklardan gelen zararları azdır.

- Motor, bir güç kaynağı ve motor cevabını değerlendiren (dikte eden) sürücü bir devre ile kontrol edilebilir.

5. GERÇEKLEŞTİRİLEN SİSTEM

5.1. DC Servo Sistemin Gerçekleştirilmesi

Endüstride yüksek performanslı konum kontrolü gerçekleştirmek için servo motorlar tercih edilir. Bu çalışmada DC servo motoru kontrol etmek için bilgisayar tabanlı hareket kontrolü ele alınmış ve hareket kontrolünü sağlamaya yönelik bilgisayar programı geliştirilmiştir. Tasarlanan ve gerçekleştirilen sistemin blok diyagramı Şekil 5.1’ de görölmektedir.

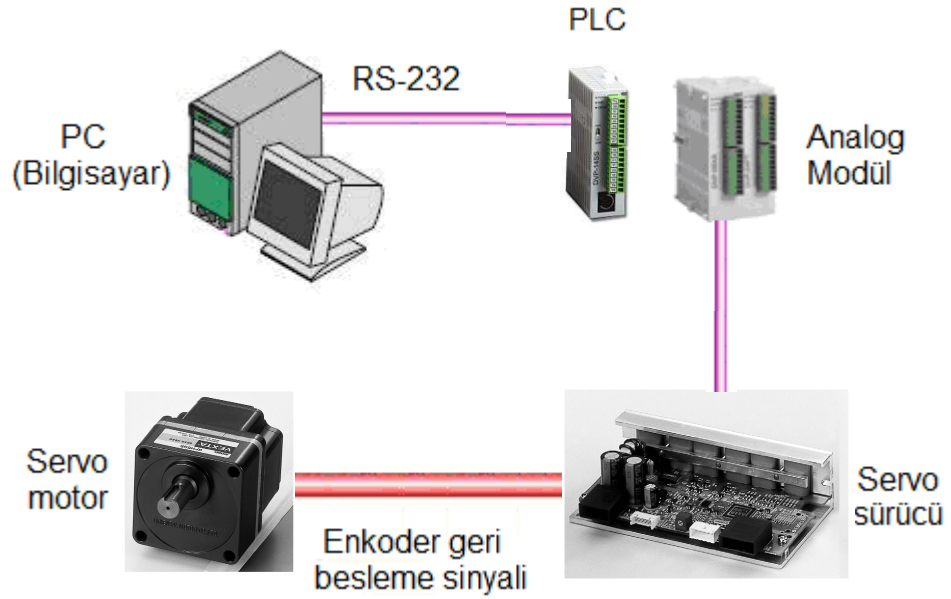


Şekil 5.1. Gerçekleştirilen DC servo sistemin blok diyagramı

Servo sistem sürücüleri, denetim için gerekli olan sinyalleri (dönüş yönü, hız vb.) PLC’ den almıştır. Geri besleme sinyali ise çeşitli sensörler ya da konum potansiyometreleri yardımıyla elde edilir. Alınan bu bilgiler, aynı zamanda denetleyiciye gerçek konum bilgisi olarak girilir. Denetleyici, yazılımla verilen verilere göre parametreleri hesaplar ve sürücü için gerekli olan sinyalleri üretir. Burada en önemli parametre hız-zaman ilişkisidir. Denetleyici bu hız-zaman parametresine bağlı olarak üretmiş olduğu sinyalleri sürücüye gönderir. Sürücü ise motorun gücünü ayarlayarak hız-zaman ilişkisinin gerçekleştirilmesini sağlar.

Gerçekleştirilen DC servo sistem PC, PLC, DC servo motor sürücüsü ve DC servo motor' dan oluşmaktadır. Sistemde, Delta firmasının DVP-SS serisi PLC' si, Delta firmasının DVP-SS serisi analog modülü, Oriental motor firmasının AXH serisi fırçasız DC servo motoru, Oriental motor firmasının AXH serisi fırçasız DC servo motor ile kombine satılan motor sürücüsü kullanılmıştır.

Bu çalışmada DC servo motor kullanılarak dairesel hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Kontrolde bellek ve gerekli olan I/O birimlerini içinde barındıran Delta firmasının DVP-SS serisi PLC' si kullanılmıştır. İstenilen hız bilgisi değerleri tasarlanan sisteme, PC' de yazılmış Visual Basic programı aracılığıyla aktarılmaktadır. Sistem çalıştığı zaman, istenilen ve gerçekleşen konum değerleri PC ekranından görülmektedir. Gerçekleştirilen DC servo sistemin şematik gösterimi Şekil 5.2' de görülmektedir.



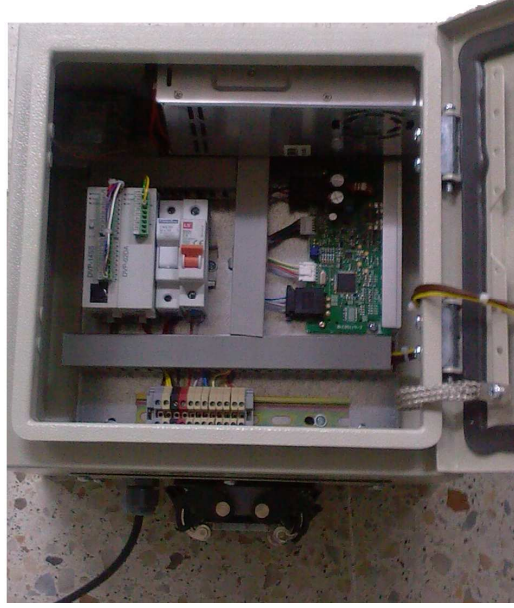
Şekil 5.2. Gerçekleştirilen DC servo sistemin blok şeması

Gerçekleştirilen DC servo sistemdeki DC servo motor, Şekil 5.3' de gösterildiği gibi çalıştırılmıştır. Motorun miline takılmış olan flanş sayesinde motor milinin hareketi daha net gözlenebilmektedir. Gerçekleştirilen sistemde dairesel

hareket uygulaması yapılmış olup, servo motorun konumu açısal olarak kontrol edilmiştir. DC servo motoru kontrol edebilmek için kullanılan sürücü, PLC, güç kaynağı v.b. malzemeleri sağlam, düzgün ve güvenli bir şekilde çalıştırabilmek için Şekil 5.4’ de görülen pano içine malzemeler yerleştirilmiştir. Cihazların birbirleriyle olan bağlantıları klemenslerle yapılmıştır. Motorun güç ve enkoder kabloları makine fişi aracılığıyla panoda sürücüye ve PLC’ ye bağlanmaktadır.



Şekil 5.3. Gerçekleştirilen DC servo sistemdeki DC servo motorun fotoğrafı



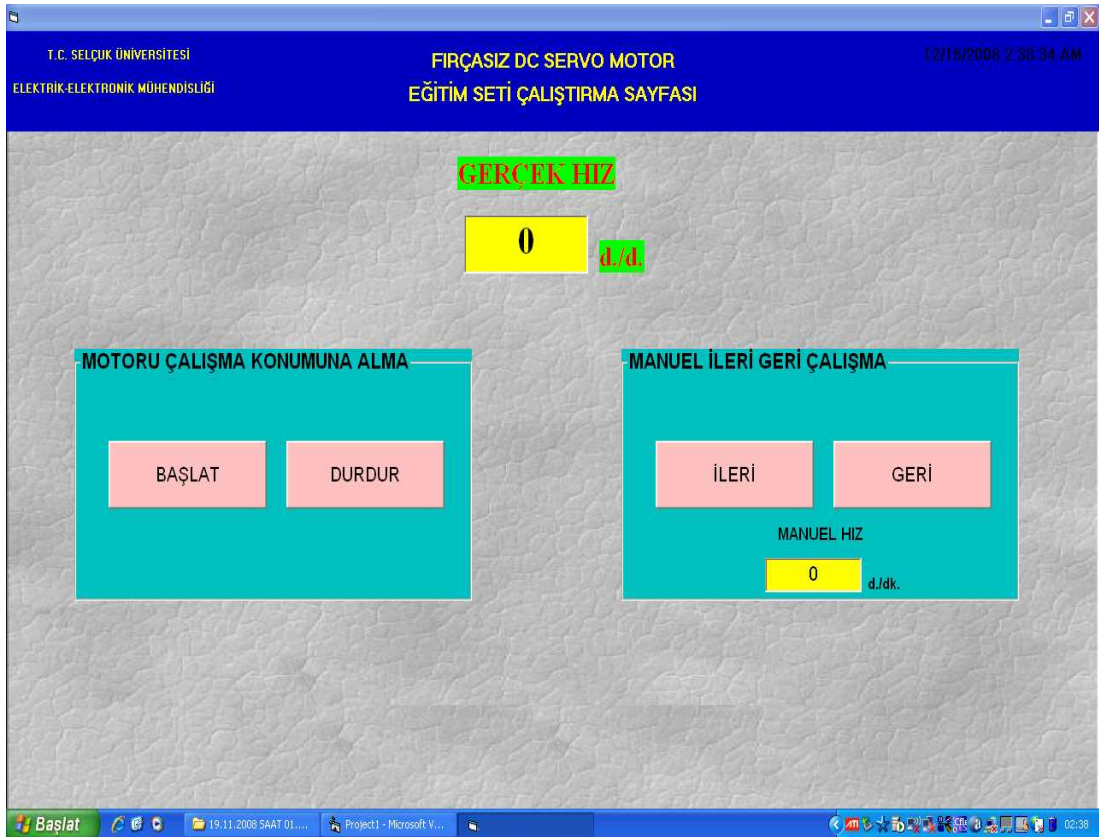
Şekil 5.4. Gerçekleştirilen DC servo sistemdeki panonun fotoğrafı

Çalışma kapsamında sistemde Şekil 5.5’ de görülen, donanımın beynini oluşturan bir adet Delta marka DVP-SS serisi, DVP14SS11R2 kod numaralı PLC kullanılmıştır. Bu PLC hem fiyatı hem de işlevi bakımından sağlamış olduğu yararlarından dolayı seçilmiştir. DVP-SS serisi PLC’ nin seçilmesindeki en önemli özelliği üzerinde RS 232 seri haberleşme portunun bulunmasıdır. Bu PLC yerine seri haberleşme portu bulunan başka bir PLC veya seri haberleşmesi bulunan bir mikrodenetleyici kullanılarak da sistem tasarlanabilir. PLC’ nin sistemdeki temel görevi bilgisayardan gelen seri bilgileri alıp servo motorların kontrol işaretlerine dönüştürmek ve bu kontrol işaretlerinin devamlılığını sağlayarak servo motorları istenen konumda sabit tutmak ve istenen hızda hareketi sağlamaktır.



Şekil 5.5. Delta marka DVP-SS serisi PLC

Gerçekleştirilen sistemde PLC, PC (bilgisayar) ile haberleşmeyi sağlamaktadır. PLC' nin üzerinde RS 232 ve RS 485 haberleşme portları bulunmaktadır. RS 232 portu aracılığıyla PC (bilgisayar) ile haberleşmektedir. Kullanılan PLC, Modbus RTU/ASCII haberleşme protokollerini desteklemektedir. PLC, PC (bilgisayar) ile ASCII protokolüyle haberleştirilmiştir. PLC' den PC' ye gelen bilgiler Şekil 5.6' da gösterilen Visual Basic 6.0 arayüz programı içinde yazılan program aracılığıyla alınıp ekranda gösterilmektedir. Aynı programla PC' den PLC' ye istenen bilgiler gönderilip ekranda gösterilmektedir. Şekil 5.6' da görüldüğü gibi DC servo motorun gerçek hızı, motorla ilgili alarmlar ve motoru çalıştırmak için istenilen hız bilgileri ekranda görülmektedir. Görülen düğmeler sayesinde motor ileri veya geri yönde çalıştırılıp durdurulabilmektedir.



Şekil 5.6. DC servo sistem için tasarlanan ara yüz programı

DC servo motorun hall sensöründen gelen geri besleme sinyalleri PLC' nin hızlı sayıcı girişine uygulanmıştır. PLC, servo motorun kontrolü için gereken ve ladder dilinde yazılmış olan programı da çalıştırmaktadır. PLC, PC' den gelen bilgiler ve DC servo sürücünden gelen geri besleme sinyalleri ve alarm sinyalini alarak içinde ladder dilinde yazılmış programa göre PC ve sürücüye tekrar bilgi göndermektedir. Böylece sistemde DC servo motor istenildiği gibi kontrol edilmektedir.

Sistemde Şekil 5.7' de görülen, PLC' nin yanına takılan ve motoru istenen hızda çalıştırmak için Delta marka DVP-SS serisi, DVP02DA-S kod numaralı analog modül kullanılmıştır. Bu modül 12 bit çözünürlüklü iki analog çıkışa sahip bir analog modüldür. Analog modül PLC' den gelen bilgiye göre, motorun gitmesi istenen hız için, DC servo motor sürücüsüne 0 ile 5 V DC arasında bir gerilim uygulamaktadır. 0 V DC gerilimde motor mili 0 d/d' lık hızla (minimum hız), 5 V DC gerilimde 2500 d/d' lık hızla (maksimum hız) dönmektedir.



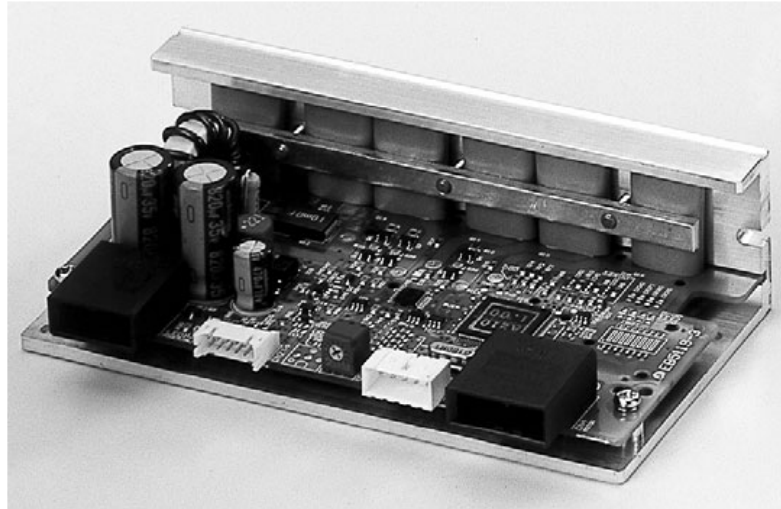
Şekil 5.7. Delta marka DVP-SS serisi analog modül

Çalışma kapsamında DC servo sistemde Şekil 5.8' de görülen bir adet Oriental Motor marka (VEXTA-AXHM5100KC-A model) fırçasız DC servo motor kullanılmıştır. Bu motor, 100 W, 3000 d/d' lık, 0.5 NM. , frensiz, fırçasız, sabit mıknatıslı DC servo motordur. Motora seri halde (motor gövdesinin içinde, motor milinin arkasına akupple) bir enkoder bağlıdır. Bu enkoder sayesinde motorun hız bilgisi sürücüye geri besleme olarak iletilmektedir. Motorun üzerinde güç ve sinyal (enkoder) kablo çıkışları mevcuttur. Güç ve sinyal kabloları, ilgili servo sürücüye bağlanmıştır. Motor küçük güçlü olduğu için fan soğutması yoktur.



Şekil 5.8. Oriental Motor marka fırçasız DC servo motor

Fırçasız DC servo motoru PC tabanlı olarak kontrol edebilmek için bilgisayardan çıkan sinyaller öncelikle PLC' ye, PLC' den motor sürücüsüne, oradan da motorlara iletilirler. Bu işlem için de proje kapsamında Şekil 5.9' da görülen Oriental Motor marka AXHD100K model servo sürücüsü (yükseltici) kullanılmıştır. DC servo motor sürücüsü 24 V DC gerilim ile beslenen, tek DC servo motor sürme kabiliyeti olan elektronik bir cihazdır (www.oriental.com).

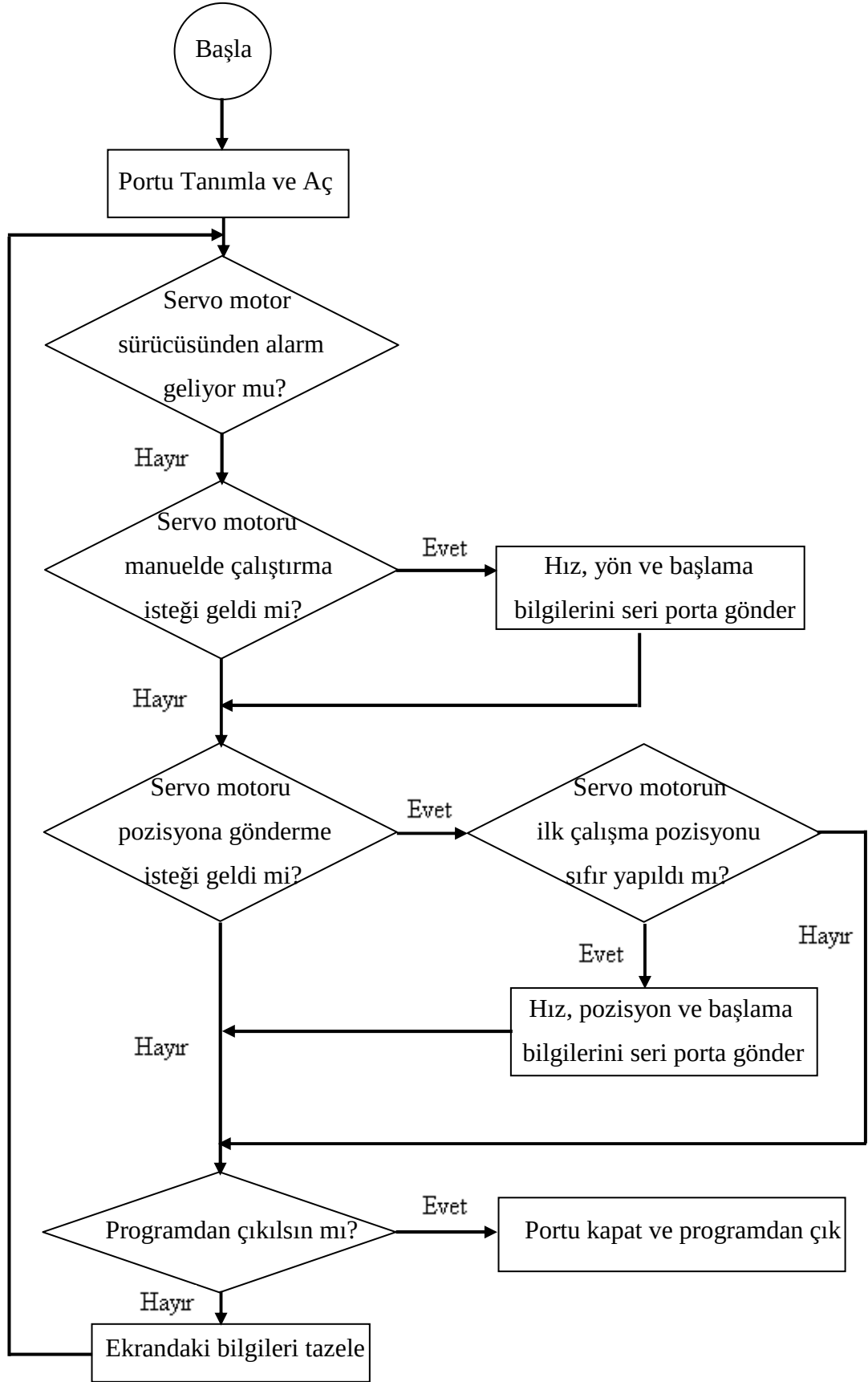


Şekil 5.9. Oriental Motor marka DC servo motor sürücüsü

DC servo motor sürücüsü üzerinde motoru beslemek için gerekli güç birimi bulunmaktadır. Bu güç birimi sayesinde DC servo motora darbeli 24 V DC gerilim uygulanmaktadır. Sürücü üzerinde motoru istenildiği gibi çalıştırabilmek için 5 adet dijital giriş, 2 adet dijital çıkış ve bir adet analog giriş mevcuttur. Girişlerden birincisi, motorun çalışması için izin girişidir. İkincisi, motoru yürüten veya frenleten giriştir. Üçüncüsü, motorun dönme yönünü belirleyen giriştir. Dördüncüsü, motorun hızının harici bir sinyalden veya sürücü üzerindeki dahili potansiyometreden ayarlanmasını belirleyen giriştir. Beşinci giriş ise sürücüde veya motorda oluşan ve nedeni giderildikten sonra silinmesine izin verilen, alarm reset girişidir. Çıkışlardan birincisi, hız geri bildirimidir. Sürücünün bu çıkışı motor milinin her bir dönüşünde 0,3 ms. genişliğinde 30 darbe üretmektedir. İkincisi, alarm çıkışıdır. Motorun hızı dışarıdan ayarlanmak istenildiğinde, analog girişe 0 ile 5 V DC arasında ayarlanabilen bir gerilim uygulanmalıdır.

DC servo motor sürücüsü kapalı devre çalışmaktadır. Motorun hız bilgisi, motorun arkasında, motor miline akuple edilmiş enkoder vasıtasıyla sürücüye iletilmektedir. Sistemimizde sürücü analog modülden gelen gerilimin değerini ölçmektedir. Ardından PLC' den dijital girişlerine gelen sinyallere göre istenilen hıza ulaşıncaya kadar motoru gereken darbelerle sürerek, hareket ettirmektedir. Sürücü, istenilen hız bilgisi ve motor enkoderinden gelen geri besleme sinyal bilgisini, motora gereken sıklıkta gerilim uygulayarak eşitlemektedir. Ayrıca motorun gerçek hızını da çıkış olarak sağlamaktadır. PLC' ye gelen hız bilgisi, PLC' de yazılan program aracılığıyla konum bilgisine dönüştürülmüştür. İstenilen konuma gitmesi istenildiğindeyse, PLC' nin içindeki program aracılığıyla sürücünden gelen hız geri besleme sinyal bilgisiyle öğrenilen konum ve istenilen konum karşılaştırılıp, ikisi de eşitleninceye kadar sürücünün dijital girişleri aracılığıyla motor hareket ettirilir. Yani sürücü PLC' den gelen, istenen değerleri (setpoints) ve geri besleme sinyal bilgilerini kullanarak motoru sürmektedir. Böylece istenilen hareket sağlanmış olur.

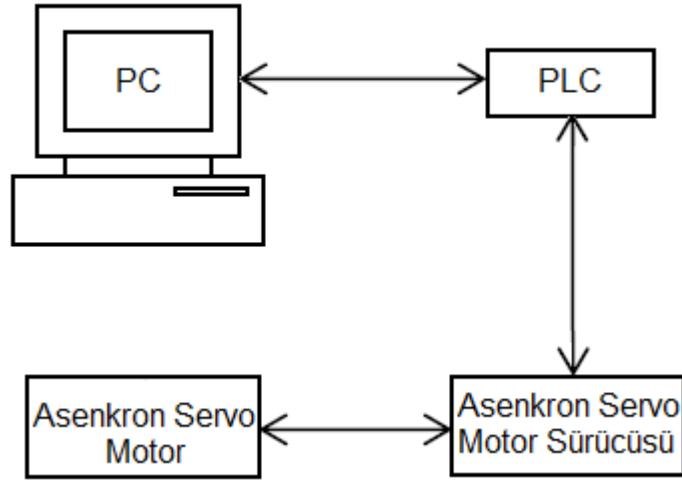
Gerçekleştirilen DC servo sistemin PC kontrol programı akış diyagramı Şekil 5.10' da gösterildiği gibidir.



Şekil 5.10. Fırçasız DC servo motor PC kontrol programı akış diyagramı

5.2. AC Servo Sistemin Gerçekleştirilmesi

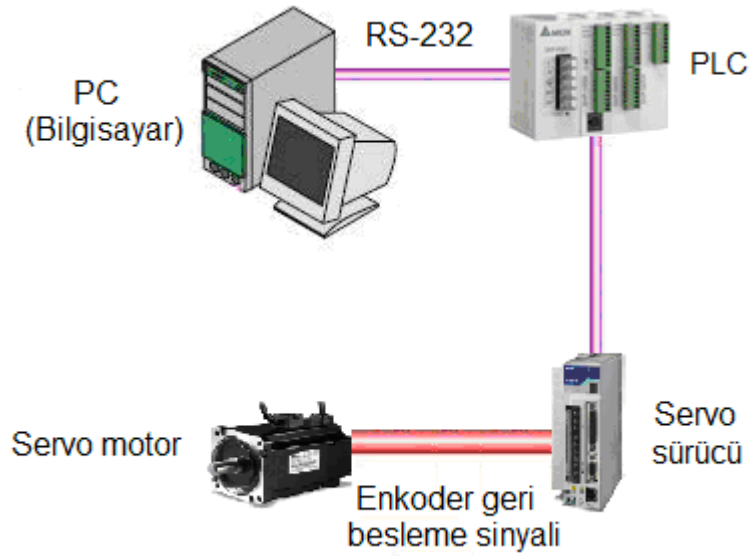
Teknolojideki hızlı ilerleme makinelerin daha hassas ve hızlı tahrik üniteleri ile donatılmasını gerekli kılmaktadır. Son yıllarda alışlagelmiş tahrik sistemlerinin yerini, programlanabilme ve hassas hareket kontrolüne uygulanabilme özelliklerinden dolayı servo ve adım motorlar almaya başlamıştır. Servo motorlar, yüksek hassasiyetleri ve moment kapasiteleri nedeniyle otomasyon uygulamalarında tercih edilmektedirler. AC servo motorlar, mikro işlemci teknolojisindeki çok hızlı gelişme nedeniyle sıklıkla kullanılmaya başlanılmışlardır. Servo ve adım motorların programlanması ve dolayısıyla yapılacak hareketin belirtilmesi tek başına üniteler veya PC' ler ile yapılmaktadır. Bu çalışmada AC bir servo motorun, bilgisayar tabanlı hareket kontrolü ele alınmış ve hareket kontrolünü sağlamaya yönelik bilgisayar programı geliştirilmiştir. Tasarlanan ve gerçekleştirilen sistemin blok diyagramı Şekil 5.11' de görülmektedir.



Şekil 5.11. Gerçekleştirilen AC servo sistemin blok diyagramı

Gerçekleştirilen AC servo sistemde bir PC, Delta firmasının DVP-SV serisi PLC' si, Delta firmasının Ecma serisi asenkron servo motoru, Delta firmasının ASD-B serisi asenkron servo motor sürücüsü kullanılmıştır.

Bu çalışmada AC servo motor kullanılarak lineer konum ve hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Kontrolde, bellek ve gerekli olan I/O birimlerini içinde barındıran Delta firmasının DVP-SV serisi PLC' si kullanılmıştır. İstenilen konum bilgisi, hız gibi değerler tasarlanan sisteme, PC' de yazılmış Visual Basic 6.0 programı aracılığıyla aktarılmaktadır. Sistem çalıştığı zaman, istenilen ve gerçekleşen konum ile hız değerleri PC ekranından görülmektedir. Gerçekleştirilen AC servo sistemin şematik gösterimi Şekil 5.12' de görüldüğü gibidir.



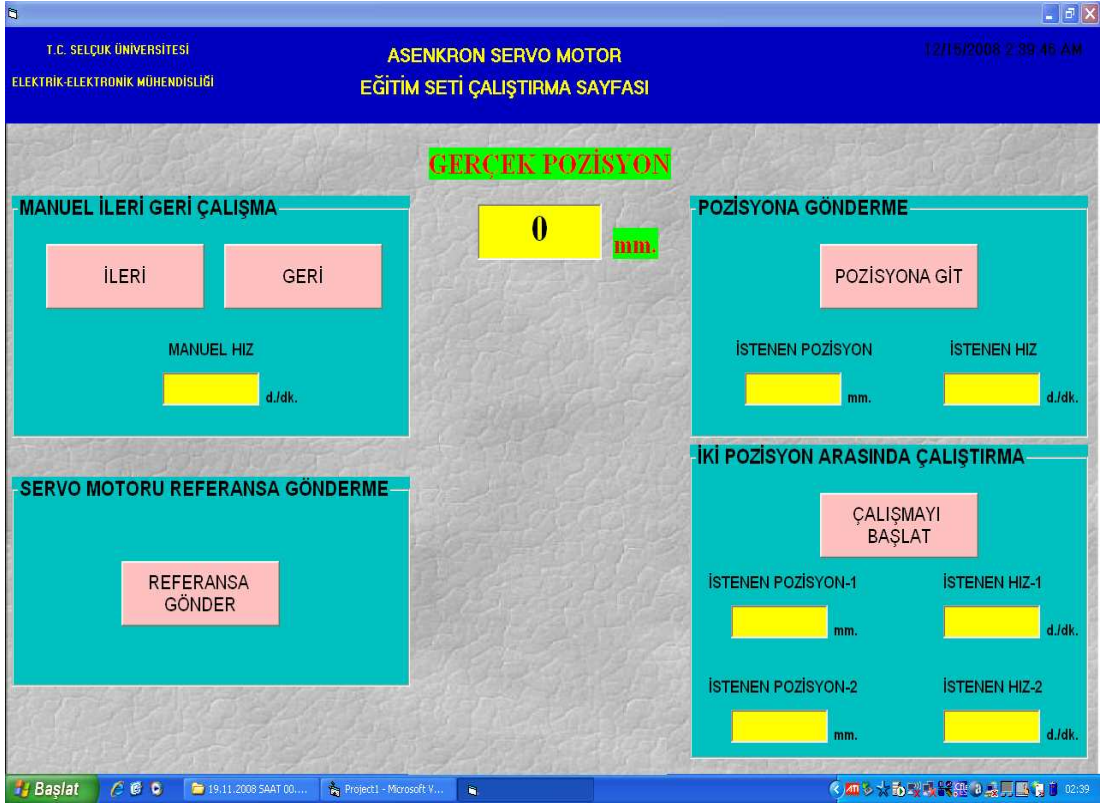
Şekil 5.12. Gerçekleştirilen AC servo sistemin şematik gösterimi

Gerçekleştirilen sistemdeki AC servo motor Şekil 5.13' de görüldüğü gibi vida milli lineer bir eksen ileri geri hareket ettirmek için kullanılmıştır. AC servo motora verilen komutlarla istenilen hızda ileri-geri vida mili hareket ettirilmektedir. Vidalı milin üstündeki sabit bir mile yataklanmış olan parça, vida mile yataklanmış parçayla bağlanmıştır. Yani vidalı mil hareket ettikçe, sabit mile yataklanmış parça da (yük) hareket ettirilmektedir. Vida milli eksen oldukça hassas pozisyonlamaya imkân vermektedir. Hem hassas pozisyonlamaya imkan vermesi hem de diğer mekanik sistemlere (kremayer dişli, kremayer pinyon vb.) göre daha ekonomik olduğu için tercih edilmiştir.



Şekil 5.13. Gerçekleştirilen AC servo sisteme ait mekanik sistemin resmi

Gerçekleştirilen sistemde PC' nin seri portu aracılığıyla, Şekil 5.14' de gösterilen Visual Basic programında yazılan görsel program kullanılarak, PLC' nin RS 232 portuyla ASCII protokolü kullanılarak PC ve PLC haberleştirilmiştir. Visual Basic programı kullanılarak, hem haberleşme sağlanmıştır hem de kullanıcının servo motoru çalıştırmak istediği hız, göndermek istediği pozisyon gibi değerler bu program aracılığıyla değerlendirilmiştir. Visual Basic' de girilen değer ve yapılması istenen komutlar, belirli bir haberleşme hızıyla (19200 Mbit/s.) PLC' ye iletilmektedir. PLC aldığı bilgileri, içinde ladder dilinde yazılmış program aracılığıyla değerlendirip, sonuçlara göre servo sürücüyü sinyal göndermektedir. AC servo motor sürücüsü, PLC' den gelen sinyallere göre, AC servo motoru istenen hızda, istenen pozisyona göndermekte veya durdurmaktadır. AC servo motor sürücüsü geri beslemeli çalışmaktadır. Motorun hız ve pozisyon bilgisi, motorun arkasında, motor miline akuple edilmiş enkoder vasıtasıyla sürücüyü iletilmektedir. Sürücü PLC' den gelen, istenen değerleri (setpoints) ve geri besleme sinyal bilgilerini kullanarak motoru sürmektedir. Servo motor sürücüsü, üzerindeki CN1 dijital giriş ve çıkış portu aracılığıyla servo motorun hız ve pozisyon bilgilerini PLC' ye giriş olarak göndermektedir. PLC de, belirli zaman aralıklarında, PC' ye servo motorun hız ve pozisyon bilgilerini iletmektedir. Böylece AC servo motor istenen hızda hareket ettirilip, istenilen konuma gönderilebilmektedir.



Şekil 5.14. AC servo sistem için tasarlanan ara yüz programı

Çalışma kapsamında AC servo sistemde Şekil 5.15’ de görülen bir adet Delta marka, DVP-SV serisi, DVP28SV11T kod numaralı PLC’ si kullanılmıştır. Gerçekleştirilen sistemde PLC, DC servo sistemde kullanılan PLC ile aynı görevi yapmaktadır. AC servo sistemde PLC, AC servo motoru istenilen hızda hareket ettirmek için kendi üzerindeki çıkışları kullanmaktadır. Sürücüye bu çıkışlardan PWM işaret uygulamaktadır. İstenilen hıza göre PWM işaretin frekansını değiştirerek sürücüyü sürmektedir.



Şekil 5.15. Delta marka DVP-SV serisi PLC

Çalışma kapsamında sistemde Şekil 5.16' da görülen bir adet Delta marka (ECMA-C30804G7 model) asenkron servo motor kullanılmıştır. Bu motor, 400 W, 3000 d/d' lık, 1.27 NM., frensiz bir asenkron servo motordur. Motora seri halde (motor gövdesinin içinde, motor milinin arkasına akuple) bir enkoder bağlıdır. Bu enkoder sayesinde motorun hız ve pozisyon bilgileri sürücüye geri besleme olarak iletilmektedir. Motorun üzerinde güç ve sinyal (enkoder) kablo çıkışları mevcuttur. Güç ve sinyal kabloları, ilgili servo sürücüye bağlanmıştır. Motor küçük güçlü olduğu için fan soğutması yoktur.



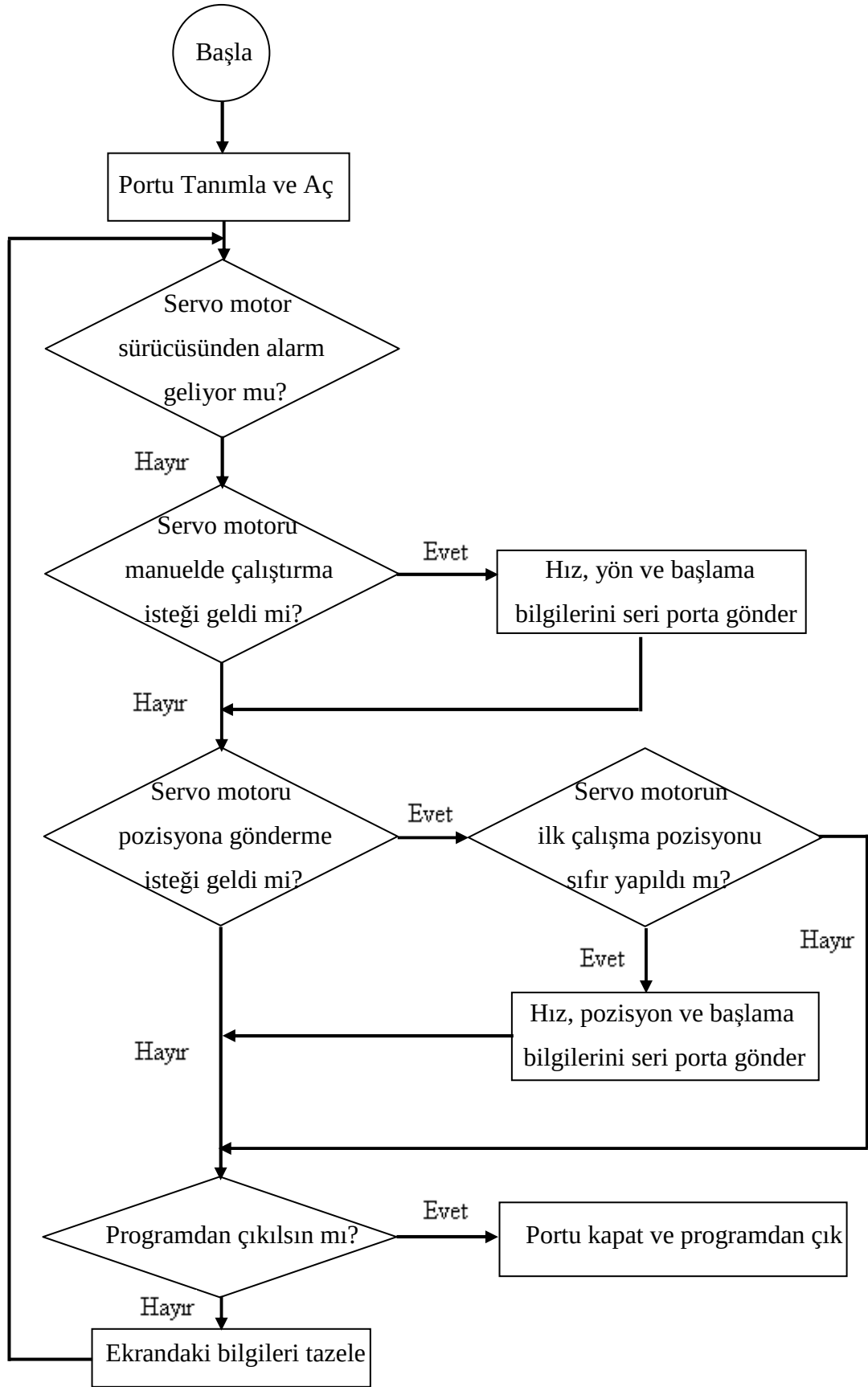
Şekil 5.16. Delta marka asenkron servo motor

Servo motorları PC tabanlı olarak kontrol edebilmek için bilgisayardan çıkan sinyaller öncelikle PLC' ye, PLC' den asenkron servo motor sürücüsüne, oradan da asenkron servo motora iletilir. Bu işlem için de proje kapsamında Şekil 5.17' de görülen Delta marka ASD-B0421-A model servo sürücü (yükselteç) kullanılmıştır (www.delta.com.tw). Servo motor sürücüsü 220 V tek fazla beslenen, tek asenkron servo motor sürme kabiliyeti olan, RS 232 haberleşme portu olan elektronik bir cihazdır.



Şekil 5.17. Delta marka asenkron servo motor sürücüsü

Gerçekleştirilen AC servo sistemin PC kontrol programı akış diyagramı Şekil 5.18' de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.18. AC servo motor PC kontrol programı akış diyagramı

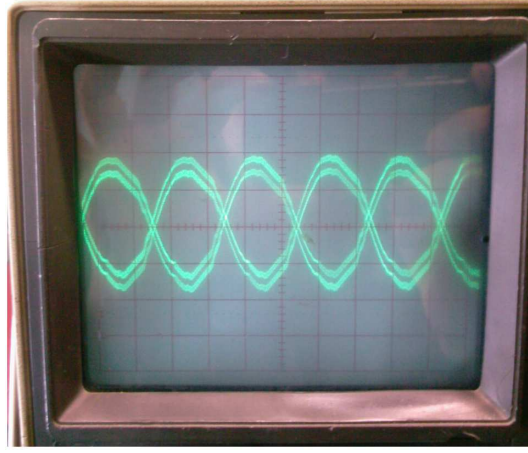
Asenkron servo motor sürücüsünün PLC ve motorla olan kablo bağlantılarını sağlam ve düzenli bir şekilde yapmak için Şekil 5.19’ da görülen bir pano tasarlanmış ve malzemelerin montajı düzgün bir şekilde yapılmıştır. Bu panonun içine 24 V DC güç kaynağı ve 1 adet yükselteç bir saç üzerinde monte edilip gerekli kablolama işlemi klemenslerle yapılmıştır. Kabloların herhangi bir zorlamaya karşı da yerlerinden çıkmamaları için panonun kenarlarına sabitlenmişlerdir.



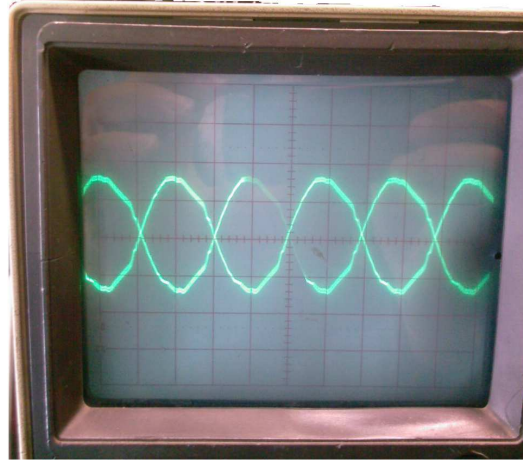
Şekil 5.19. Gerçekleştirilen AC servo sistemdeki panonun fotoğrafı

5.3. Uygulama Devrelerinden Alınan Deneysel Sonuçlar

Bir doğru akım ayarlayıcısına değişik yöntemlerle kumanda edilerek akım ayarlanabilir; Bu yöntemlerden birkaçı, darbe genişlik modülasyonu (PWM) ve darbe periyodu modülasyonu (PFM)’ dir. PWM ile PFM arasındaki fark; PWM’ de periyot (frekans) sabit tutularak darbenin genişliği ayarlanmakta iken PFM’ de ise darbe genişliği sabit tutulup periyot değiştirilmektedir. Tasarlanan sistemde gerilim, darbe genişlik modülasyonu tekniğine uygun olarak sürücü tarafından üretilmiştir. Motorun çalışma sırasındaki gerilimine ait dalga şeklinin değişimi Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’ de verilmiştir.

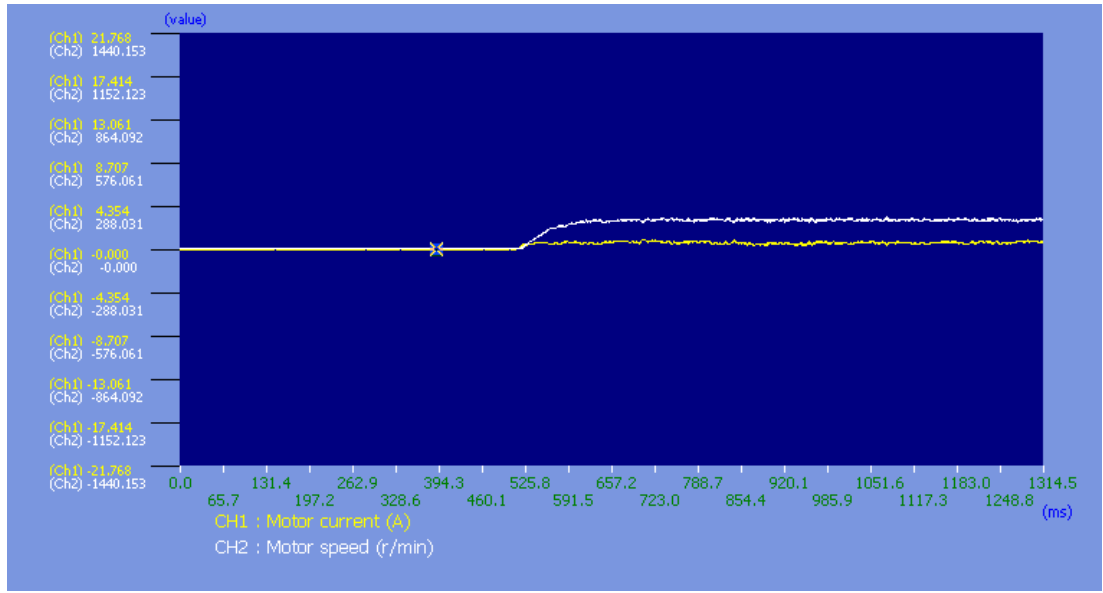


Şekil 5.20. DC servo motor 500 d/d hızla dönerken motora uygulanan gerilimin zamana göre değişimi

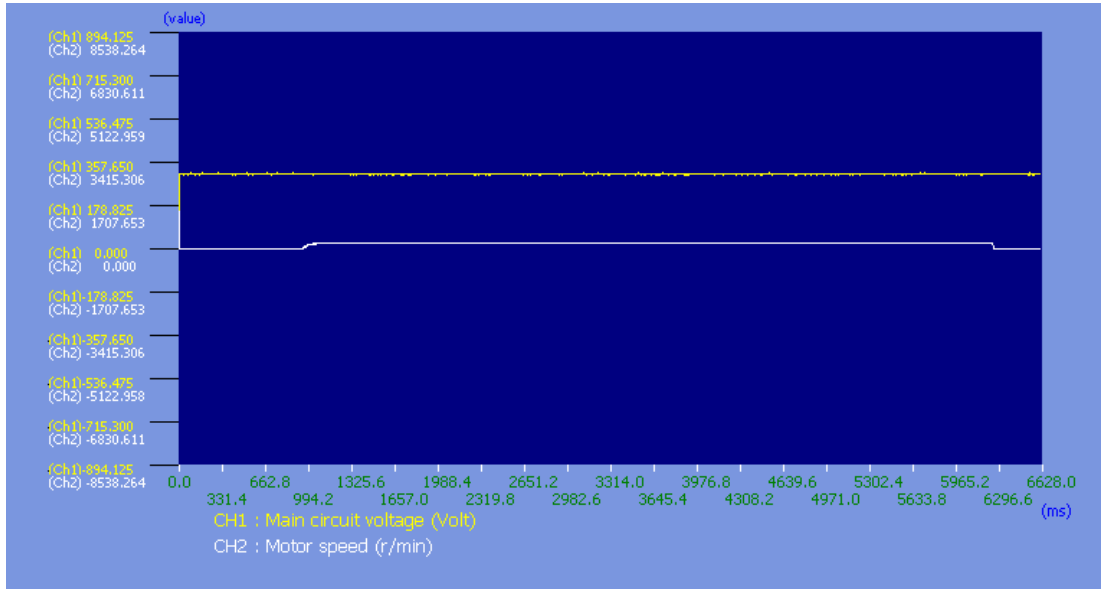


Şekil 5.21. DC servo motorun hızı 0 d/d iken motora uygulanan gerilimin zamana göre değişimi

Gerçekleştiren AC servo sisteme ait motor akımı ve motor hızının zamana göre değişimleri Şekil 5.22 ve Şekil 5.23' de verilmiştir. Şekil 5.18' de görüldüğü gibi motor 300 d/d' lık hızdayken yaklaşık 0,6 A akım çekmektedir. Şekil 5.23' de görüldüğü gibi motor 200 d/d' lık hızda çalışırken yaklaşık 300 V' luk gerilim uygulanmıştır.



Şekil 5.22. 300 d/d' lık çalışma hızında AC servo motora ait akım ve hız değerlerinin zamana göre değişimi



Şekil 5.23. AC servo motora ait akım ve hız değerlerinin zamana göre değişimi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, eğitim amaçlı DC ve AC servo motorların bilgisayar tabanlı kontrolü tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Fırçasız servo motorlar, DC servo motorların bakım gereksinimlerini ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilmiştir. Modern servo sistemlerde kullanılan fırçasız servo motorların en önemli üstünlüğü fırça ve komütatör elemanlarının bulunmamasıdır. Bu nedenle fırçaların bakımı diye bir olaydan bahsedilemez ve fırçalardan kaynaklanan birçok problem önlenmiş olur. Kollektörlü DC servo motorlarda oluşan problemler bazen çok açık bir şekilde belli olmaz. Bazen fırçalarda olan kirlenme bile problem oluşturabilir. Fırçaların performansı ve ömrü atmosferik şartlarla bile değiştiğinden farklı ortam koşullarında değişik yapılı fırçalar kullanılabilmektedir (Özkan 1999).

Fırçasız servo motorlarda verim, aynı ölçüdeki bir DC servo motora oranla daha yüksektir ve fırçaların sürtünme etkisi olmadığından dolayı sürtünme kuvveti verime katkıda bulunur. Kollektör ve fırça aksamının yokluğu motor boyunu düşürür. Bu sadece motor hacmini düşürmekle kalmaz rotor destek rulmanları arasındaki mesafe ve rotor boyunun kısalması dolayısıyla rotorun yanal rijitliği de arttırılmış olmaktadır. Bu özellik hız/eylemsizlik oranına gereksinim duyulan uygulamalarda önemlidir. Fırçasız konfigürasyonda sarımların sabit stator içine sarılması sebebi ile ısı yalıtımı için daha fazla en-kesit alanı sağlanabilmekte ve sargılarda oluşabilecek ısı artışı sensörler vasıtasıyla kolayca algılanabilmektedir.

Modern servo sistemlerde pozisyon sinyalinin belirlenmesi amacı ile bir kodlayıcı (encoder) veya resolver kullanılır. Kodlayıcı ve motorun tek bir ana iskelet üzerinde toplanması ile sistem daha kompakt bir yapıda olmaktadır. Bu motor yapısında manyetik akıyı üretmek için gerekli olan mıknatıs, rotora monte edildiğinden dolayı döner-alan tipli motor yapısındadır. Senkron motor tipli fırçasız

servo motorların yapılarının doğru akım servo motorlarından farklı olması nedeniyle bu tipteki servo motorlar, fırçasız DC servo motor olarak adlandırılır. DC servo motorlardaki kollektörün aksine fırçasız DC servo motorların akımı, yarı iletken güç elektroniği elemanları ile doğrultulur. Diğer yönden rotor manyetik alanının kodlayıcı vasıtası ile algılanıp, algılanan bu pozisyona uygun düşecek şekilde stator sarımlarına üç fazlı alternatif akım verilmesi dolayısı ile kalıcı mıknatıslı senkron motor tipindeki fırçasız servo motorlar aynı zamanda AC servo motorlar olarak da adlandırılır. Fırçasız servo motorlarda rotor manyetik alanı ile statora verilen akımlar dikey şekilde kontrol edildiği takdirde DC servo motorlarla aynı olan hız-moment karakteristikleri elde edilir.

Teknolojideki gelişmelere paralel olarak servo motor kontrol sistemlerinde de hızlı bir gelişme olmaktadır, bu sayede daha önce teoride gerçekleştirilebilen ancak pratikte uygulanamayan bazı sistemler gerçekleştirilebilmektedir. Servo motor sürücü devreleri de bunun en önemli örneklerinden sayılabilir çünkü bu sistemler özellikle güç elektroniği teorisindeki ilerlemeler sayesinde şimdiki hallerini almıştır (Turgut 2007).

Bu çalışmada PLC kullanarak DC servo sistemin PC aracılığıyla konum ve hız denetimi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistemden beklenen performansın yerine getirilebilmesi için PLC' nin program algoritması çıkarılarak gerekli program yazılmıştır.

AC servo motorla yapılan çalışmada da PLC kullanılarak sistemin PC aracılığıyla kontrolü yapılmıştır. Sistem hassas bir şekilde Visual Basic' te yazılan program ile PC ortamında kontrol edilmiştir.

6.2. Öneriler

Bundan sonra konuyla ilgili çalışma yapacak araştırmacılar, gerçekleştirilen sistemleri değişik kontrol algoritmaları ile daha hassas ve hızlı denetim sağlayabilirler.

PLC ile kontrol edilen sistemler, uygun kartlar (ADLINK gibi) kullanılarak değişik ara yüz programıyla çalıştırılabilir. Ayrıca Visual Basic' de yazılan program Delphi, Visual C gibi değişik programlarla geliştirilebilir.

7. KAYNAKLAR

1. Altunsaçlı, A., 2003, Elektrik Motorları ve Sürücüler, Nobel Yayınevi, K.Maraş
2. Bal, G., 2004, Özel Elektrik Makineleri, Seçkin Yayıncılık
3. Coşkun, İ., Işık M.F., 2004, Servomotorun Mikrodenetleyici İle Konum Ve Hız Denetimi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 17, No 3, 115-125
4. Dülger, L.C., Kireçci, A., Topalbekiroğlu, M., 2001, AC Servomotorların Modellenmesi Simülasyonu ve Hareket Denetiminde Kullanılması. 10. Ulusal Mak. Teo. Sempozyumu Bil. Kit., Cilt 1, 181-189
5. Gulabi, A., 2007, Development of an Embedded SCADA System with PLC and Java Application for Synchronous Operation of Standard Servo Drives. M.S. Thesis Hamburg University, Hamburg
6. Noorani, R.I., 1990, Microcomputer-Based Robot Arm Control, Mathematical and Computer Modelling Conference , Volume 14, pp. 450-455
7. Okumuş, M. Tuncer, GÜMÜŞOLUK, A., 2004, Elektrik Makineleri 3
8. Özkan, A., 1999, PLC Ve SCADA Destekli Pozisyon Kontrol. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri
9. Paksoy, M., 2004, Özel Elektrik Makineleri Ders Notları, Bursa
10. Rashid, M.H., 1988. Power Electronics, 3th ed., New Jersey
11. Şahbaz, H., 2007, Bir Hegzapod Uygulamasında Bilgisayar Tabanlı Hareket Kontrolü, sayfa 241-251, 13. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu, Sivas, 07-09 Haziran
12. Turgut, E., 2007, Adlink PCI-8366 İle Scara Robot Servo Motorlarının Kontrolü. Lisans Tezi, Mühendislik Fakültesi, İzmir
13. www.delta.com.tw
14. www.megep.meb.gov.tr
15. www.mersin.edu.tr
16. www.lmphotronics.com
17. www.orientalmotor.com