



T.C.  
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ED LABORATORY DENEY SETİ KULLANILARAK  
DA MOTORLARIN AÇIK ÇEVİRİM VE KAPALI  
ÇEVİRİMDEKİ DAVRANIŞLARININ SİMULASYON  
VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**MURAT ÇELEGEN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KAHRAMANMARAŞ 2022**

**T.C.**  
**KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ED LABORATORY DENEY SETİ KULLANILARAK  
DA MOTORLARIN AÇIK ÇEVİRİM VE KAPALI  
ÇEVİRİMDEKİ DAVRANIŞLARININ SİMULASYON  
VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**MURAT ÇELEGEN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**KAHRAMANMARAŞ 2022**

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

MURAT ÇELEGEN



Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bilgilerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

**ED LABORATORY DENEY SETİ KULLANILARAK DA MOTORLARIN AÇIK  
ÇEVİRİM VE KAPALI ÇEVİRİMDEKİ DAVRANIŞLARININ SİMULASYON VE  
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ  
(YÜKSEK LİSANS TEZİ)**

**MURAT ÇELEGEN**

**ÖZET**

Endüstrinin birçok alanında ve bilimsel çalışmalarda çok tercih edilmesinden dolayı DA motorlar için hız ve pozisyon kontrolü oldukça önemli olmaktadır. Bunun için birçok yöntem bulunmaktadır. Bunların bazıları; geleneksel PID, yapay sinir ağları ve doğrusal olmayan ileri beslemeli hesaplanmış moment denetim yöntemleridir. ED Laboratory deney setinde DA motorlarda hız kontrolünün yapılmasını sağlayan bir deney seti olarak bu çalışmamızda kullanılmıştır. Çalışmalarımız, bu deney setinde ki sabit mıknatıslı DA motorun miline yük uygulanmış durum için oluşturulmuştur. Bu çalışma ile diğer deney setlerine göre çok fazla bilinen bir deney seti olmayan ED Laboratory deney seti ile hem DA motorları kullanan hem de açık çevrim ve kapalı çevrim deneylerinin yapılabilmesi açısından bu deney setinin tanıtımının yapılması amaçlanmıştır. Bunu yaparken de deney setinde ki DA motorun modellemesi yapılmıştır. ED laboratory deney setini tanıtırken, oluşturduğumuz sistemi önce manyetik bir kesintiden beslenen yük altında çalıştırdık. Öncelikle Matlab/Simulink kullanarak çalışmayı simülasyon ortamında gerçekleştirip sonrasında ise deneysel olarak elde ettiğimiz sonuçlarla kıyaslamasını yaparak simülasyon ve deneysel sonuçların birbirleri ile örtüşükleri doğrulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kapalı çevrim DA motor hız kontrol sistemi, ED laboratuvarı motor kontrol deney seti

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Fen Bilimler Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Şubat/2022

Danışman : Dr.Öğretim Üyesi Metin SALİHMUHSİN

Sayfa Sayısı : 79

**SIMULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR  
OF DC MOTORS IN OPEN LOOP AND CLOSED LOOP USING THE ED  
LABORATORY EXPERIMENT SET  
(M.Sc. THESIS)**

**MURAT ÇELEGEN**

**ABSTRACT**

Speed and position control is very important for DC motors because it is preferred in many fields of industry and scientific studies. There are many methods for this. Some of these are; traditional PID, artificial neural networks and nonlinear feedforward computed moment control methods. The ED Laboratory experiment set was used in this study as an experimental set that enables speed control in DC motors. Our studies have been created for the case where a load is applied to the shaft of the permanent magnet DC motor in this experimental set. With this study, it is aimed to introduce the ED Laboratory experiment set, which is not a well-known set compared to other experimental sets, and this set of experiments, which uses DC motors and can be used for open-loop and closed-loop experiments. While doing this, the modeling of the DC motor in the experimental set was made. While introducing the ED laboratory experiment set, we first operated the system we created under a load fed by a magnetic interruption. Firstly, by performing the study in a simulation environment using Matlab/Simulink, and then comparing it with the experimental results, it has been verified that the simulation and experimental results overlap with each other.

**Keywords:** Brushed DC motor, Closed loop DC motor speed control system, ED laboratory motor control experiment kit

Kahramanmaraş Sütçü Imam University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Chemistry, February/2022

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Metin SALİHMUHSİN

Page number : 79

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve birikimlerinden faydalandığım, tez çalışmamın tüm safhalarında bilimsel desteğinin yanı sıra anlayış ve sabrını esirgemeyen, çalışmamın etkin bir şekilde ilerleyişi için fedakârlıklardan kaçınmayan, kendisiyle çalışmaktan onur duyduğum tez danışmanım Sayın hocam **Dr. Öğretim Üyesi Metin SALİHMUHSİN**'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Mesleki deneyimlerini paylaşarak tez çalışmama katkıda bulunan Sayın hocam **Öğretim Görevlisi Mehmet EKER**'e saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve birikimlerini bana aktaran **KSÜ Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü hocalarıma** saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen her koşulda yanımda olan çok değerli **ailem** ve **eşim Ayşe ÇELEGEN**' e sonsuz teşekkür ederim.

**Murat ÇELEGEN**

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa No

ÖZET .....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı.....	4
1.2. Önceki Çalışmalar.....	4
2. MATERYAL VE METOT .....	9
2.1. DA Motorları .....	9
2.1.1. Serbest Uyarmalı DA Motoru.....	12
2.1.2. Şönt DA Motoru .....	13
2.1.2.1. Şönt DA Motorların Hız Kontrolü .....	17
2.1.2.2. Alan Sargısı Direncinin Değiştirilmesi İle Hız Kontrolü.....	17
2.1.2.3. Armatür Voltaj Kontrolü Yöntemi.....	19
2.1.3. Sabit Mıknatıslı DA Motoru .....	22
2.1.4. Seri DA Motoru .....	24
2.1.4.1. Hız - Moment Karakteristiği .....	25
2.1.5. Kompunt DA Motoru .....	27
2.1.5.1. Hız - Moment Karakteristiği .....	29
3. ED LABORATORY DENEY SETİ .....	31
3.1. ED Laboratory Deney Seti Otomatik Kontrol Uygulamaları .....	34
3.1.1. Motor Hız ve Giriş Karakteristiği.....	34
3.1.2. Motor Hız ve Yük Karakteristiği.....	36
3.1.3. Motorun Geçici Durum Cevabı .....	38
3.1.4. Kapalı Çevrim Motor Hız Kontrol Teknikleri.....	40
3.1.5. Sistem Kazancı ve Motor Hız Kontrolü .....	42
3.1.6. İki Yönlü Motor Hız Kontrolü.....	46
3.1.7. Motor Hız Kontrolü Verimi.....	47
3.1.8. Pozisyon Kontrolünde Hata Sinyali.....	49
3.1.9. Kapalı Çevrim Pozisyon Kontrolü.....	51
3.1.10. Pozisyon Kontrolünde Geçici Durum Cevabı .....	52
3.1.11. Hız Geri Beslemesi İle Pozisyon Kontrolü.....	54

3.1.12. Kararsız Bir Pozisyon Kontrol Sisteminin Kararlı Hale Getirilmesi.....	56
3.1.12.1. Konum Kontrollü Servo Sistemle İlgili Bir Takım Sorunlar ....	57
3.1.12.2. Kararlı Konum Kontrol İşlemi İçin Gereksinimler .....	57
3.1.13. Pratik Bir Pozisyon Kontrol Sisteminin Kurulması.....	58
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	59
4.1. Fırçalı DA Motor Teorisi.....	60
4.2. Yük Altında Kapalı Çevrim DA Motor Hız Kontrol Sistemi.....	61
4.3. Deneysel Hesaplamalar.....	71
5. SONUÇ.....	76
KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	79



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$SR$	: Hız regülasyon katsayısı
$W_{n1}$	: Motorun yüksüz durumdaki hızı
$W_{f1}$	: Motorun tam yük altındaki hızı
$K$	: Makine parametrelerine bağlı katsayı
$\emptyset$	: Manyetik akı
$W$	: Açısal hız
$T_e$	: Elektriksel moment
$E_A$	: Rotor sargılarında endüklenen voltaj (Zıt emk)
$I_A$	: Rotor sargılarından geçen akım
$I_f$	: Alan akımı
$V_T$	: Terminal yada çıkış voltajı
$R_A$	: Armatür direnci
$W_0$	: Sabit mil hızı
$N_f$	: Alan sargısı
$F_{net}$	: Magnetomotiv net kuvvet
$F_{AR}$	: Armatür reaksiyonu
$R_{F2}$	: İkinci durum alan sargı direnci
$R_{F1}$	: İlk durum alan sargı direnci
$R_F$	: Alan sargı direnci
$T_{max}$	: Maksimum moment

$I_{Amax}$	: Maksimum armatür sargı akımı
$P$	: Motorun çıkış gücü
$P_{max}$	: Maksimum güç
$B_{res}$	: Artık akı yoğunluğu
$H$	: Manyetik akı yoğunluğu
$H_c$	: Manyetizasyon yoğunluğu
$T_{ind}$	: İndüklenen moment
$R_s$	: Uyarma sargı direnci
$I_s$	: Uyarma sargı akımı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 2.1 DA Motorun Kısımlarını Gösteren Basitleştirilmiş Hali .....	10
Şekil 2.2 Ferromanyetik Malzemenin Mıknatıslanma Eğrisi.....	11
Şekil 2.3 DA Makinanın Mıknatıslanma Eğrisi .....	12
Şekil 2.4 Serbest Uyarmalı DA Motor Eşdeğer Devresi .....	13
Şekil 2.5 Şönt DA Motorun Eşdeğer Devresi.....	13
Şekil 2.6 Şönt DA Motorun Moment - Hız Karakteristiği .....	15
Şekil 2.7 Endüvi Reaksiyonunun Mevcut Olduğu Motorun Moment - Hız Karakteristiği.	15
Şekil 2.8 Bir Şönt Motorun Moment-Hız Karakteristiğinde Uyarma Direnci Hız Kontrolünün Etkisi.....	18
Şekil 2.9 Boştan Durmaya Kadar Olan Tüm Aralıkta Motorun Uç Karakteristiklerini Gösteren Grafik.....	19
Şekil 2.10 Bir Şönt veya Serbest Uyarımlı DA Motorun Endüvi Gerilim Kontrolü.....	19
Şekil 2.11 Bir Şönt Motorun Moment-Hız Karakteristiği Üzerinde Endüvi Gerilimiyle Hız Kontrolünün Etkisi.....	20
Şekil 2.12 Şönt DA Motor İçin Güç ve Moment Sınırları.....	22
Şekil 2.13 Ferromanyetik Malzemenin Mıknatıslanma Eğrisi.....	23
Şekil 2.14 Sabit Mıknatıslarda Ferromanyetik Malzemenin Mıknatıslanma Grafiği .....	23
Şekil 2.15 Bazı Malzemelerin Mıknatıslanmalarının İkinci Bölgesi .....	24
Şekil 2.16 Seri DA Motor Eşdeğer Devre .....	25
Şekil 2.17 Seri DA Motorun Moment - Hız Karakteristiği .....	27
Şekil 2.18 Uzun Şönt Bağlantılı Kompunt DA Motor .....	28
Şekil 2.19 Kısa Şönt Bağlantılı Kompunt DA Motor.....	28
Şekil 2.20 Eklemeli Kompunt DA Motorun Moment-Hız Karakteristiğinin Kıyaslanması	29
Şekil 2.21 Diferansiyel Kompunt DA Motorun Moment-Hız Karakteristiği.....	30
Şekil 3.1 ED Laboratory Deney Seti .....	31
Şekil 3.2 ED Laboratory Deney Seti Modülleri .....	32

Şekil 3.3 Deney Seti DA Motor .....	33
Şekil 3.4 Giriş Voltajından Kaynaklı Motor Hızı.....	34
Şekil 3.5 Motor Hız ve Giriş Karakteristiği Deneyi İçin Bağlantı Şeması.....	36
Şekil 3.6 Motor Hız ve Giriş Karakteristiği Eşdeğer Devre Şeması .....	36
Şekil 3.7 Motor Hızı ile Motora Uygulanan Yük Arasındaki İlişki .....	37
Şekil 3.8 Motor Yük ve Hız Karakteristiği Deneyi Bağlantı Şeması.....	38
Şekil 3.9 Motor Yük ve Hız Karakteristiği Deneyi Eşdeğer Devre Şeması.....	38
Şekil 3.10 Motor Hızı-Zaman (Küçük Atalet) .....	39
Şekil 3.11 Motor Hızı-Zaman (Büyük Atalet) .....	39
Şekil 3.12 Motor Giriş ve Yatay Kontrol İşlemler .....	39
Şekil 3.13 Motorun Geçici Durum Cevabi İçin Eşdeğer Devre Şeması .....	39
Şekil 3.14 Motorun Geçici Durum Cevabi İçin Bağlantı Şeması.....	40
Şekil 3.15 Motor Yük/Hız Karakteristikleri.....	41
Şekil 3.16 Kapalı Çevrim Motor Hız Kontrol Teknikleri Deneyi İçin Bağlantı Şeması.....	41
Şekil 3.17 Kapalı Çevrim Motor Hız Kontrol Teknikleri Deneyi İçin Eşdeğer Devre Şeması .....	42
Şekil 3.18 Basit Bir Kapalı Çevrim Hız Kontrol Devresi. ....	42
Şekil 3.19 Yük, Hata ve Motor Hızı Arasındaki İlişkiler.....	44
Şekil 3.20 Sistem Kazancı ve Motor Hız Kontrolü Eşdeğer Devre Şeması.....	45
Şekil 3.21 Sistem Kazancı ve Motor Hız Kontrolü Bağlantı Şeması.....	45
Şekil 3.22 İki Yönlü Bir Motorun Kare Dalga Giriş Cevabı.....	46
Şekil 3.23 İki Yönlü Motor Hız Kontrolü Deneyi İçin Bağlantı Şeması .....	47
Şekil 3.24 Motor Hız Kontrol Karakteristikleri.....	48
Şekil 3.25 Hata Kanalında Zaman Gecikmesi Etkisi .....	48
Şekil 3.26 Mekanik Bir Yüke Karşı Motorun Cevabı.....	48
Şekil 3.27 Elektriksel Bir Gecikmenin Etkisinin Osiloskop Görüntüsü .....	49
Şekil 3.28 Motor Hız Kontrolü Verimi Deneyi İçin Bağlantı Şeması.....	49

Şekil 3.29 Potansiyometreler Kullanılarak Açısal Hata Sinyalini Veren Uygulama Devresi .....	50
Şekil 3.30 Pozisyon Kontrolünde Hata Sinyali Deneyi İçin Bağlantı Şeması .....	51
Şekil 3.31 Kapalı Çevrim Pozisyon Kontrolü .....	51
Şekil 3.32 Kapalı Çevrim Pozisyon Kontrolü İçin Deney Bağlantı Şeması .....	52
Şekil 3.33 Geçici Durum Cevabi Uygulaması İçin Sistem Şeması.....	53
Şekil 3.34 Pozisyon Kontrol Sisteminin Geçici Durum Cevabı.....	53
Şekil 3.35 Pozisyon Kontrolünde Geçici Durum Cevabi Deneyi Bağlantı Şeması .....	54
Şekil 3.36 Kapalı Çevrim Hız Geri Beslemesinin Sistem Cevabına Etkisi .....	55
Şekil 3.37 Pozisyon Kontrol Kapalı Çevrimine Hız Geri Beslemesinin Eklenmesi .....	55
Şekil 3.38 Pozisyon Kontrol Kapalı Çevrimine Hız Geri Beslemesi Uygulaması Deneyi İçin Bağlantı Şeması .....	56
Şekil 3.39 Kararsız Bir Pozisyon Kontrol Sisteminin Karalı Hale Getirilmesi Deneyi İçin Bağlantı Şeması .....	57
Şekil 3.40 Pratik Bir Pozisyon Kontrol Sisteminin Kurulması Deneyi İçin Bağlantı Şeması .....	58
Şekil 4.1 Ayrı Olarak Uyarılmış Bir Fıçalı DA Motorun Eşdeğer Devresi. ....	60
Şekil 4.2 Bir DA Motorun Kapalı Döngü Hız Kontrolünün Blok Şeması .....	61
Şekil 4.3 Bir DA Motorun Simülasyon Ortamında ki Modelin Blok Şeması. ....	63
Şekil 4.4 (A) Kapalı Çevrim DA Motor Hız Kontrol Sisteminin Simulink Modeli. (B) DA Motor Bloğunun Modeli .....	65
Şekil 4.5 Volt Cinsinden Motor Referans Voltajı İçin Simülasyon Sonuçları.....	66
Şekil 4.6 NM Cinsinden Uygulanan Tork. ....	66
Şekil 4.7 AMP Cinsinden Motor Armatür Akımı. ....	67
Şekil 4.8 RAD/SN Cinsinden Motor Mili Hızı. ....	68
Şekil 4.9 ED Laboratuar Deney Kitinin Tork Hızı Karakteristiği.....	69
Şekil 4.10 Deney Düzenliğinin Blok Şeması.....	69

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1. Motor parametrelerinin değerleri.....	64
Tablo 2. Deneysel çalışmadan elde edilen referans voltajı, motor armatür akımı ve şaft hızı değerleri.....	70
Tablo 3. Deneysel çalışmadan elde edilen referans voltajı, motor armatür akımı ve şaft hızı değerleri.....	71
Tablo 4. Deneysel çalışmadan elde edilen referans voltajı, motor armatür akımı ve şaft hızı değerleri.....	73
Tablo 5. Deneysel çalışmadan elde edilen referans voltajı, motor armatür akımı ve şaft hızı değerleri.....	74

## 1. GİRİŞ

DA motorları 18. yüzyılın ortalarında geliştirilen ilk motor türüdür. Birkaç yıldır endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmasına rağmen asenkron motorların icadı ile kullanımları azalmıştır. Bunun temel nedeni asenkron motorların doğrudan şebekede mevcut olan AC voltajı ile çalıştırılması, yüksek güç uygulamaları için daha uygun olması ve çok daha az bakım gerektirmesiydi. Ancak PV panellerin icadı, DA voltajın pratik olarak her yerde kullanılabilirliğini sağladı. O zamandan beri DA motorları, DA kaynaklarının doğrudan varlığı ve DA' dan AC' ye dönüştürme işlemi ile ilgili güç kayıpları nedeniyle PV panel ile ilgili birçok uygulamada önem kazanmaktadır. (Chapman, 2005) (Dorf, 2014)

Günümüzde insan hayatında elektrik önemli bir enerji kaynağı olmuştur ve ekonomiye kattığı etki ile neredeyse yaşam alanımızın tamamında kullanılmaktadır. DA makinelerde, elektriğin bir kullanım alanı olmasından dolayı günlük hayatımızda elektrik enerjisi ile mekanik enerji arasında ki dönüşümlerin yapıldığı jeneratör ya da motor olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümünün yapıldığı duruma motor, mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünün yapıldığı duruma ise jeneratör denilmektedir. Bu şekilde DA motorları ya da jeneratörler endüstrinin ulaşım, iletişim, ev elektroniği, askeri, havacılık ve uzay teknolojileri gibi sayabileceğimiz birçok alanda kullanılmaları için tasarlanmışlardır. Bu kullanım alanlarının fazlalığına göre birçok DA motor çeşitleri üretilmiştir. (Yıldız, T. 2009) DA motorları; serbest uyartımlı, sabit mıknatıslı, seri, şönt ve kompunt DA motorları olmak üzere beş çeşittir. (Chapman, 2020)

Sabit mıknatıslı DA motorları, DA akım üzerinde çalışma durumunun olduğu bir tür elektrik motordur. ( Laughton M A and Warne D F Editor, 2003) Sabit mıknatıslı malzemelerde ki gelişmeler sabit mıknatıslı DA motorların kullanımını arttırmıştır. Sabit mıknatıslı DA motor içerisinde, akı sabitlenmiş ve içerisinde dönen sabit bir mıknatıs bulunmaktadır. Bu sabit mıknatıslar ise elektrik makinenin ihtiyaç duyduğu manyetik alanı üreterek, ikinci bir uyartım kaynağına olan bağıllığı ortadan kaldırıp, olası güç kayıplarını yok etmesinden dolayı önemli bir fayda sağlamaktadır. Sabit mıknatıslı makinelerde alan sargılarının olmaması serbest uyartımlı çeşitlerine göre daha fazla verimlerinin olması ve daha az malzeme içermesiyle daha az yer kaplamış ve dolayısıyla ucuz maliyetli olmuştur. (Bal, 2001) Alan sarımının armatür sargısına seri bağlanan motorlara seri DA motoru denilmektedir. Seri DA motorları ilk önce sağladıkları yüksek

tork ile tren ya da asansör gibi sistemlerin çalışmasında kullanılır. Kullanıldıkları bu tarz sistemlerde taşınan yüklerin farklılık göstermesinden dolayı sabit bir hızın bulunduğu durumlarda kullanılmazlar. Bunun sebebi ise motorda ki hızın farklı yükler altında değişkenlik göstermesidir. Dolayısıyla seri DA motorların düşük maliyetli, tasarımının ve bakımının kolay yapılabilirliği gibi bir takım avantajları bulunmaktadır.

Alan sargısının paralel olacak şekilde DA güç kaynağının bulunduğu bir armatüre bağlanmasından dolayı oluşan motor türü ise şönt DA motorudur. Bu tarz motorların hız ayarı gayet iyi bir şekilde sunulmakta olup seri DA motorlarda ki gibi iyi bir başlangıç torkuna sahip değildirler. Motorun yüksüz durumundan tam kapasiteli yüklü durumda bulunması halinde dahi sahip olduğu hızda çok bir değişiklik söz konusu değildir. (Laughton M A and Warne D F Editor, 2003)

Kompant DA motorları, seri ve şönt DA motorların birlikte bulunduğu bir DA motor türüdür. Kompant DA motorları, armatüre seri olarak bağlanmış bir seri uyarım bölgesi ile bu kısımdan ayrı olarak uyarılmış bir şönt alanına sahiptir. Bu özellik ile hem seri DA motorun hem de şönt DA motorun özelliklerini gösterir. Kompant DA motorları, seri DA motor özelliği ile iyi bir başlangıç torkunu, şönt DA motor özelliği ile iyi bir hız ayarı sağlamaktadır. Son yıllarda DA motorlara ait kontrol sistemlerinin uygulamaları da artmıştır.

DA motorların kontrol edilebilmesi için birçok yöntem bulunmaktadır. Bunların bazıları geleneksel PID, bulanık mantık tabanlı, yapay sinir ağları, model referans uyarlamalı kontrol, uyarlanır değişken yapı, doğrusal olmayan, ileri beslemeli hesaplanmış moment denetim yöntemleridir. DA motorları yüksek hızlarda bulunmaları, P, PI ve PID gibi kontrolörler ile kontrol edilebilmelerinden dolayı geniş alanda kullanılmaktadır. Bu sistemlerin çalışma prensiplerine göre açık çevrim ve kapalı çevrim hız kontrol yöntemleri bulunmaktadır.

Açık çevrim hız kontrol sistemi, sistemi kontrol altında tutan bölümün sistemin çıkışından etkilenmemesi durumudur. Bu hız kontrol sistemi istenilen referans değerine göre çıkış işleminin gerçekleştiği bir kontrol mekanizmasıdır. Bu kontrol sisteminde kontrol ve sistem olmak üzere iki adet mekanizma mevcuttur. Açık çevrim hız kontrol sisteminde olumsuz etmenler ya da verilerdeki değişimler sebebiyle meydana gelebilecek değişiklikler düzeltilemediği gibi mevcut sistemi etkileyen olaylar öngörülerle tespit

edilmektedir. Dolayısıyla hem bu sebeplerden hem de DA motorun hızının yüke bağlı olarak değişmesinden dolayı açık çevrim hız kontrol sistemi istenilen bir yöntem değildir.

Kapalı çevrim hız kontrolünü gerçekleştirebilmek için temel olarak sistemin girişindeki sinyali geri beslemek gerekmektedir. Kapalı çevrim hız kontrol sisteminde sisteme verilen referans gerilimi ile geri besleme yöntemiyle çıkış sonunda alınan değer karşılaştırılmaktadır. Burada geri besleme yapılarak oluşabilecek bir hata düzeltilip istenilen çıkış değerine ulaşabilmek için sistemin giriş kısmı ayarlanabilmektedir. Bu kontrol sistemi daha kararlı bir sistem olması nedeniyle, açık çevrim hız kontrol sistemine göre daha çok tercih edilmektedir. (Aydoğmuş, Ö. 2006) (Bodur, A., 2011)

DA motorun hız kontrolleri, motora verilen gerilimin farklı değerleri alınarak, alan sargısından kaynaklanan manyetik alanın değiştirilmesi ya da rotor devresine ekstra bir direnç eklenerek yapılabilmektedir. Bu yöntemlerden motora verilen gerilimin farklı değerlerinin alınarak yapılan hız kontrol yönteminde, motor boşta çalışmaktayken motorun hızı da kontrol altında tutularak değişken gerilimlerde motora ait hız-moment karakteristiğindeki eğim sabit kalmaktadır. Bu durumda motorun hızı sıfır ile istenilen değer arasında ki durum için kolaylıkla ayarlanabilmektedir. Rotor devresine direnç eklenerek yapılan hız kontrolleri ise basit ve ucuz bir yöntemdir. Bu yöntemin güç kayıpları, motor hızının düşük bir yük altında bile dar aralıklarla değişmesi, motorun hızının istenilen hızın üzerinde bir hızda bulunamaması ve dolayısıyla hız-moment karakteristiğinde oluşan eğimin büyük bir oranda artmasından kaynaklı, motor hızının istenilen hızın altında bir hıza ayarlanamaması gibi birçok dezavantajları bulunmaktadır. Alan sargısından kaynaklı manyetik alanın değiştirilmesi ile yapılan hız kontrollerinde, istenilen hız değerinin üzerinde ayarlanabilir olmasından dolayı motorda ki mevcut yük değişmez ise motor fazla yüklenecektir. Motorun fazla yüklenmemesi için ise motorun karakteristiğine uygun özel bir yük altında çalışması gerekecektir. Bu bahsedilen yöntemler arasında bir DA motorunun moment-hız kontrolü için en uygun yöntemin açıklanan sebeplerden dolayı motora uygulanan gerilimin değiştirilmesi yöntemidir. (Aydoğmuş, Ö. 2006)

Bu açıklamalar da bizlere göstermiştir ki DA motorları, yapıları ve kontrol yöntemlerine göre birçok alanda kullanılmaktadır. Sabit mıknatıslı DA motorları, otomobil sanayisinde, kalorifer kazanlarının fan bölgelerinde, otomobillerin sileceklerinde ve koltuk ayarlamalarının yapılması işleminde sıklıkla kullanılmaktadır. Otomobil sanayisinin dışında ise diş fırçaları, elektrikli tıraş makineleri, el ve ev aletleri ile

oyuncaklar gibi birçok alanda kullanılmaktadır. (Bal, 2001) Şönt DA motorları ise, büyük bir akım üretmediği için başlangıç torku çok düşük olmaktadır. Motor devir sayısının az olması ve devir aralıklarının yüksek olmasından dolayı genellikle sanayilerde tercih edilmektedir. Kompunt DA motorları, seri ve şönt DA motorların kullanım alanlarında yani asansör, vinç, sanayi gibi ortamlarda kullanılabilir. (Laughton M A and Warne D F Editor, 2003) Böylelikle DA Motorları günümüzde hassas konumlandırma makineleri ile endüstriyel alanlar gibi birçok alanda ve genel olarak robotlar, elektrikli araç çalışmalarında, disk sürücüler, makine kısımları ve servo valfler gibi sistemlerin hız kontrollerinde kullanılmaktadır. (Ertuğrul, İ., Ülker, O., 2015)

Anlatılan bu bilgiler doğrultusunda kullanmış olduğumuz deney setinde ki DA motorun miline elektromanyetik akım uygulayarak bir elektromanyetik alan oluşması ile dönen mil şaftının yavaşlaması sağlanmış, deneysel ve simülasyon durumlarının karşılaştırılması amaçlanarak, DA motor modeli ile kapalı çevrim DA motor hız kontrol sistemi geliştirilmiştir.

### **1.1. Tezin Amacı**

Yapmış olduğumuz bu çalışma ile DA motorlar hakkında bilgi sahibi olup, ED Laboratuvarı deney setinin daha iyi tanıtılması, deney seti ile otomatik kontrol deneylerinin yapılmasından dolayı kontrol konularının ve ED Laboratuvarı deney seti ile açık çevrim ve kapalı çevrim kontrolünün daha iyi anlaşılması amaçlanmaktadır.

### **1.2. Önceki Çalışmalar**

Karaca (2004), tarafından yapılan bu çalışmada, fırçasız bir DA Motorunun sensör kullanılmadan yapılan kontrolü, geri besleme entegrasyon yolu kullanılarak uygulamalı olarak oluşturmuştur. Oluşturulan bu sistemde geri besleme için zıt emk entegrasyonuna göre kontrol sinyalleri üreten ML4425 tüm devresi kullanılmıştır. Ayrıca motor hızının sabit durum hatasını sıfırlamak ve daha hızlı tepki süresi elde etmek için PIC16F877 mikro denetleyicisini kullanarak sisteme bir oransal- integral (PI) dış kontrol çevrimi ilave etmiştir.

Aydoğdu (2006) tarafından geliştirilen bu çalışma ile fırçasız DA motorlar da genetik tabana sahip bulanık denetleyiciyle sensör bulundurmeyen bir sistemde, hız kontrolünü simülasyon ortamında yaparak uygulamalı bir şekilde gerçekleştirmiştir. 4. mertebeden Runge - Kutta metoduyla motoru yamuk arka EMF dalga formu ile tekrar

modelleyerek simüle edilme durumlarındaki hesaplamalarda ortaya çıkan hata verilerini düşürmüştür. Geliştirilmiş olan bu kontrol sistemini en iyi şekilde uygun hale getirmek üzere birden çok amaca yönelik performans indeksleri ile tanımlayarak 4 genetik algoritma için azaltılması amaçlanmış ve fonksiyon şeklinde kullanmayı sağlamıştır. Deneysel çalışma ile simülasyon sonuçlarının birbirleriyle örtüşüklerini sunmuştur.

2012 yılında (Kaliappan ve Chellamuthu, 2012) tarafından yapılan bu çalışma ile sensör bulundurmeyen sabit mıknatıslı fırçasız DA motoru basit bir şekilde modellenmiş ve simüle edilerek, deneysel uygulamaları ile elde ettikleri sonuçları kıyaslamışlardır. Oluşturulan bu model ile gerilim, akım ve hız ile torkun izlenerek kontrol altında tutulmasını sağlamışlardır. Sensör bulunmayan bu modelde dinamik karakteristiklerin kontrol altında tutulabilmesi için direkt olarak Zıt Emk' lı sıfır algılamalı yöntemi kullanmışlardır.

Ghosh ve ark. (2013), DA motor hız kontrol uygulamasını PID kontrol yöntemi ile simüle ederek deneysel olarak uygulamışlardır. Mikro denetleyici kontrol uygulamasında tasarım ile esneklik ve sağlamlık bakımından önemli adımlar atmışlardır. Elde edilen simülasyon ve deneysel sonuçlar birbirleriyle örtüşmüş ve bu sistemin gelişmiş kontrol uygulamalarında da kullanılabileceğini göstermişlerdir.

Bu çalışmada Jogalekar ve ark. (2013) FPGA ile DA motoru için hız kontrolünü PID algoritma sistemine uygun modellemesini ve deneysel çalışmasını göstermişlerdir. Modellenen bu kontrolörün çalışmasını denemek için farklı yük şartlarında kapalı döndü basamak yanıtını gözlemlemişlerdir. Farklı yük durumların da motor hızının sabit halde bulunması araştırıldığında kapalı çevrim sisteminin açık çevrim sistemine kıyasla daha üstün olmasını göstermişlerdir. Simülasyon ve deneysel uygulamaların örtüşmeleri ise bu modelin, veriminin fazla olmasını ispatlamıştır.

(Al-Jazaeri ve ark., 2014), yaptıkları bu çalışma ile otonom elektrikli araçlar için hız kontrolör olarak Tip-2 bulanık mantık denetleme cihazını kullanmışlardır. Bu sistemde, gerçek zamanlı kontrol donanımını uygulamışlardır. Araç dinamiğini ise çevrim içersinde ki bir sistemle modellenmesini sağlamışlar ve uçuca birleşik fırçasız DA motoru ile kontrolünü sağlamışlardır. Testi gerçekleştirilen bu model ile integral hata oranını minimize etmeyi amaçlamışlardır. Tüketilen enerji ile yüksek güç isteğinde ki kıyaslamaları, NEDA ve ARTEMIS sürücülerini tarafından yapılmıştır.

(Varghese ve ark., 2014), birden fazla uygulama gerçekleştirerek fırçasız DA motorların asenkron motorlara kıyasla daha çok kullanılmasını sağlamışlardır. Birbirinden farklı koşullarda çalışan sensör çeşitleri ve çok rahat bir şekilde kullanılmaya uygun kontrolörlerle fırçasız DA motora bir hız kontrol uygulamasını yapmışlardır. Yapılan uygulamalar Matlab ile simüle edilmiş, sistemi birçok hız ve yük şartlarında incelemişlerdir.

(Hassani ve Zarei, 2015) seri ve şönt bağlantılı DA motorları, aralıklı tip-2 bulanık sitemiyle inceleyerek bir hız kontrol yöntemi geliştirmişlerdir. Lineer durumda bulunmayan sistemler için bulanık mantık kontrol yönteminin gerçekleştirilmesi, diğer kontrol sistemleriyle karşılaştırıldığında daha etkin sonuçlar elde etmişlerdir. Bu çalışma da seri ve şönt motorları lineer bir yapıda olmadıklarından dolayı tercih etmişlerdir. Sisteme yük vermediklerinde ortaya çıkan sonuçlarla bulanık kontrollerin her ikisiyle de geçerli bir performans sunmuşlardır. Yüklü durumda ise tip-2 bulanık kontrol yöntemi ile daha etkili sonuç üretmişlerdir.

Rubaai ve Young (2016), bu çalışmalarında bulanık sinir ağı metodunu birbirinden farklı 4 algoritma ile çalıştırarak fırçasız DA motor hız kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Kullanılan bu metotlar; geri yayılım (BP), genişletilmiş kalman filtresi (EKF), genetik (GEN) ve parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) şeklindedir. Denemelerde EKF algoritmasında ki yöntemin daha iyi sonuçlar verdiği, BP' nin en iyi ikinci sonucu verdiğini göstermişlerdir. GEN ile PSO metotlarının ise yapılan bu denemelerde yetersiz kaldıklarını tespit etmişlerdir. Bunların yanı sıra EKF metodunun hesaplama noktasında daha çok işlem yaptığı belirlenmiş ve bu durumun ise bir dezavantaj olduğunu göstermişlerdir. BP ise performans anlamında EKF' ye göre iyi olmasa da daha az işlem yaptığını göstermişlerdir.

Sarma ve Bordoloi (2017), çalışmalarında DA motorunun hız kontrolünü PLC uygulaması ve deneysel olarak yapmıştır. Sonuçlar incelendiğinde PLC' nin iyi bir şekilde programlanması durumunda elektrikli malzemelerin kontrol edilebilmesi için uygun olduğunu göstermiştir. Motor hız kontrolünün deneysel çalışmasında, motora herhangi bir geri besleme uygulanmayıp kontrol altında tutulmadan çalıştırıldığında yükün artmasıyla hızın %54 oranında azaldığını gözlemleyip kayıt altına almıştır. Kontrol makinesi yokken geri besleme sisteme verildiğinde hız düşüşünün %48' lere kadar azaldığını göstermiştir. Sisteme geri beslemenin eklenmesi durumunda hızın değişen yüke karşı etkilenmeyip sabit olduğunu göstermiştir.

Wang ve arkadaşları 2017 yılında DA motorunun matematiksel ve bulanık kontrolün temel teorisine bağlı olarak çift kapalı döngü kontrol sistemini, bulanık PID kontrolör ile modellemişlerdir. Motor hız kontrol sistemini Matlab/Simülink ile simüle etmişlerdir. Deneysel sonuçlarıyla DA motor kontrol uygulamasında tavsiye edilen kontrol sisteminin, sistem dinamiğinin iyi ve dengeli performans özellikli olduğunu sunmuşlardır.

Orçan ve Salihmuhsin 2017 yılında yayınladıkları çalışmada kalıcı mıknatıslı fırçalı DA motora kapalı çevrim hız kontrolü uygulamasını yapmışlardır. Öncelikle, DA motor tasarlanmış ve tasarlanan modelin Matlab/Simulink'te kapalı çevrim hız kontrol sistemini simüle etmişlerdir. Daha sonra ise bu sistem, ED laboratory DA motor kiti ile laboratuvar ortamında yüksüz durum için gerçekleştirilmiştir. Alınan deneysel verilerin, simülasyon da alınan verilerle örtüşüklerini göstermişlerdir.

Açıkgöz (2018), yapmış olduğu bu çalışma ile DA motorunun hız kontrolünü Matlab/Simulink ile gerçekleştirmiştir. Tip-2 bulanık mantık denetleyiciyi kullanarak hız kontrol için tasarlama belirsizliğinde etkili bir performans sağlamıştır. Simülasyon çalışmalarını farklı referans hızları ile yük durumlarında yaparak ortaya çıkan sonuçları yorumlamıştır. Bu sonuçlara göre, tip-2 bulanık mantık kontrolör, PI kontrolöre kıyasla daha güzel sonuçlar ortaya çıkarmıştır.

Rex ve arkadaşları 2018 yılında  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$ ' nin en uygun seviyede ki verileriyle ateş böceği algoritmasını kullanarak, PID kontrolöründe kullanıldığı DA motor hız kontrol sistemini göstermişlerdir. DA motor hız kontrolü için PIC mikro denetleyici ile DA – DA amplifikatör dönüştürücü modellemişlerdir. Geliştirilen bu sistem de PWM kullanmışlar ve çevrimin oranı yükseldikçe motorda ki devir sayısının her saniyede arttığını göstermişlerdir.

Aridome ve ark. (2018), alçak geçiren filtreleri barındıran PID sisteminde ki mevcut kontrol yöntemi için tasarım yöntemi tavsiyesinde bulundular. Öncelikle transfer fonksiyonunun 1. Dereceden gecikme sisteminin bulunduğunu ayrıca bu PID kontrol sisteminin ise kapalı döngü transfer fonksiyonunu oluşturduğunu düşündüler. Sonuçta tavsiye ettikleri metotla kapalı döngü sistemin kararlı bir cevap oluşturduğunu doğrulamışlar ve bu yöntemin motor hız kontrol sisteminde uygulanmasıyla çok güzel sonuçların oluştuğunu göstermişlerdir.

Bhate ve ark. (2018), birbirinden farklı voltaj verilerinde DA motor hız kontrolünü otomatik bir şekilde kararlı ve hatanın minimize edilmiş haliyle bir sistem modellemişlerdir. Anahtarlama fonksiyonunun düzgün bir şekilde kontrolünün sağlanabilmesi için FPGA' nın bulunduğu PID kontrol sistemi ile hız kontrolünü gerçekleştirmişlerdir.



## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. DA Motorları

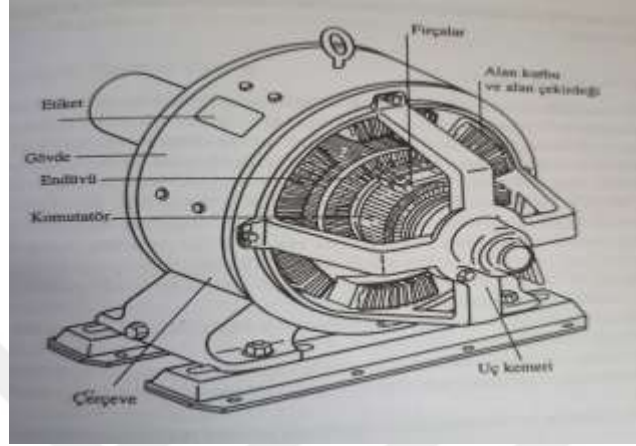
Amerika Birleşik Devletlerinde ilk geliştirilen enerji sistemleri ve bu enerji ile çalışan bunlara bağlı makineler DA sistemleriydi. 1890'lara gelindiğinde AC enerji sistemleri her ne kadar DA enerji sistemlerine üstünlük sağlamaya ve yerlerini almalarına rağmen DA enerji ile çalışan DA motorları 1960'lı yıllara kadar AC enerji ile çalışan AC motorlardan çok daha fazla satılıyordu. 1960'lardan sonra transistör ve diğer yarı iletken devre elemanlarının geliştirilmesi sebebiyle AC motorlar, DA motorların yerini almaya başladılar. Bunun başlıca sebeplerinden birisi araba, tren, kamyon ve uçak gibi çok yaygın olarak kullanılan araçların içerisinde ki güç sistemlerinin DA enerjiye dayalı sistemler olmasıydı. Tabii araçların içerisinde DA enerji sisteminin olması sebebiyle araçlarda kullanılan motorlarda DA motor oluyordu. İkinci sebebi ise DA motorların, özellikle şönt DA motorların moment hız grafiklerinin diğer motor çeşitleriyle kıyaslandığında neredeyse doğrusal bir karakteristiğe sahip olmalarıdır. Bu ise motor milinde oluşan momentin geniş bir hız aralığında değişmeden kalmasının sağlanabilmesine olanak tanımaktaydı.

Bir DA motoru, fiziksel olarak bakıldığında stator (sabit duran kısım) ve rotor (dönen kısım) olmak üzere 2 temel kısımdan oluşur.

Stator, motorun dış kısmını ifade eden hareketsiz aksamıdır. Makineye manyetik akıyı sağlayan manyetik kutuplar, bunlar üzerine sarılı stator veya alan sargıları olarak adlandırılan sargılar ile bu kutupları çevreleyen dairesel çelik aksamdan oluşmaktadır. Sargıların statorda bulunması, sargılarda meydana gelen ısının dış ortama verilmesini sağlayarak motorun hızlıca soğumasını sağlamaktadır. Statordaki manyetik kutuplar mıknatıslarla yapıldığı gibi kutuplara sargı sarılarak ve bu sargılara enerji verilerek mıknatıs özelliği kazandırılan elektromıknatıslardan da oluşabilmektedir. DA motorlarda statordaki kutup sayısı motorun gücü ile devir sayısına göre 2, 4, 6, 8 etc şeklinde değişkenlik gösterebilmektedir.

Rotor kısmı rotor sargılarının olduğu kısımdır. Fırça, komütatör düzeneği, rotor mili ve nüve gibi aksamları içermektedir. Rotor mili (shaft olarak adlandırılır) kalın bir çelik çubuk şeklinde olup bunun üzerine nüve adı verilen ve rotor sargılarını tutmak için dış yüzeyinde oluklar bulunan perslenmiş ince çelik plakalardan oluşan bir yapı yerleştirilmiştir. Komütatör (bilezik olarak adlandırılır) nüvenin uçlarının birinde rotorun

şaftına montelenmiştir. Rotor sargıları nüvedeki oluklara yerleştirilerek komütatör segmentlerine bağlantıları yapılır. Fırça düzeneği ise komütatörün yüzeyine degecek şekilde rotor üzerine yerleştirilerek rotor sargılarına gerilim uygulanması veya rotor sargılarında oluşan gerilimin terminallere aktarılması görevlerini yerine getirmektedir. Şekil 2.1 adı geçen bu kısımları göstermektedir.



Şekil 2.1 DA motorun kısımlarını gösteren basitleştirilmiş hali (Chapman, 2005)

Statordaki manyetik kutuplarda, motorda oluşan histeris ve eddy akımları kayıplarını azaltmak için lamine edilmiş ince metal levhalar buraya getirilip sıkıştırılarak elde edilirler. Statorda kullanılan ve motorda ki ana manyetik akıyı sağlayan bu dışarıya doğru çıkık şeklindeki kutup yapısı salient kutup olarak adlandırılır.

DA motorlar genellikle birbirleri ile karşılaştırılırken hız regülasyon katsayılarına göre karşılaştırılırlar. Bir motorun hız regülasyonu aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$SR = \frac{W_{nl} - W_{fl}}{W_{fl}} \times 100\%$$

Bu formülde  $W_{nl}$  motorun yüksüz durumdaki hızını,  $W_{fl}$  ise motorun tam yük altında ki hızını belirtmektedir. Bu katsayı bize motorun moment - hız karakteristiğinin eğimi konusunda bir fikir vermektedir. Bir motor için pozitif hız regülasyon katsayısı yük arttıkça motorun hızının azaldığını, negatif hız regülasyon katsayısı ise yük arttıkça motor hızının arttığını belirtmektedir.

Genel olarak bakıldığında 5 çeşit DA motoru olduğu söylenebilir.

- 1-Serbest Uyarımlı DA Motor
- 2-Şönt (paralel bağlı) DA Motor
- 3-Sabit Mıknatıslı DA Motor

#### 4-Seri Bağlı DA Motor

#### 5-Kompunt (karışık bağlı) DA Motor

Bu çeşitlerden ilki olan serbest uyarımlı DA motoru ilk geliştirilen ve en temel yapı olduğundan DA motor teorisi açıklanırken bu yapı anlatılacak, tezimizin asıl konusunu oluşturan sabit mıknatıslı DA motorların ise bu temel yapıdan farklarına değinilecektir.

Bir DA motorunun iç bölgesinde üretilen gerilim denklemi;

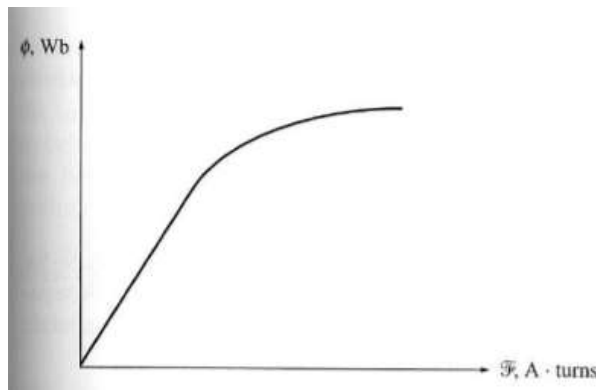
$$E_A = K\phi W \text{ olarak verilmektedir.}$$

Burada K, makine parametrelerine bağlı bir katsayı,  $\phi$  stator alan sargısının oluşturduğu manyetik akı ve W ise rotor milinin rad/sn olarak açısal hızını belirtmektedir. DA motorunun milinde endüklediği elektriksel moment değeri ise;

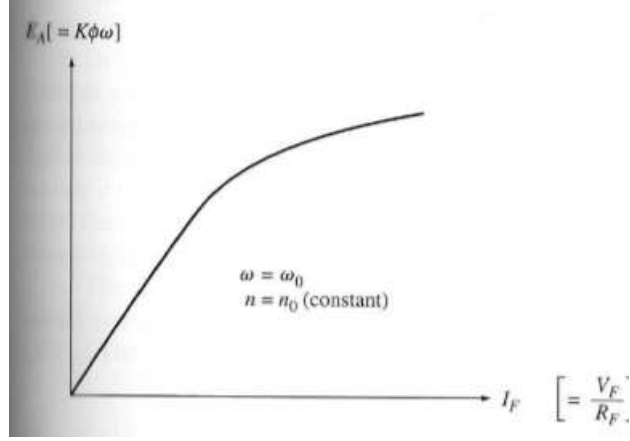
$$T = K\phi I_A \text{ şeklindedir.}$$

Bu eşitlikte ise K ve  $\phi$  değerleri  $E_A$  formülünde ki parametrelerle aynı,  $I_A$  ise rotor sargılarından geçen akımı göstermektedir. Rotor sargılarında endüklenen voltaj;

$E_A = K\phi W$  olduğundan  $E_A$  voltajının stator alan sargısının ürettiği manyetik akı  $\phi$  ve rotor mili (kolu) hızı W ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. DA motorunda uyarma akımı  $F=N_f \cdot I_f$  şeklinde manyetomotor kuvvet oluşturmaktadır. Bu manyetomotor kuvvet mıknatıslanma eğrisine uyumlu olacak şekilde motorda Şekil 2.2' de görüldüğü gibi bir akı oluşturacaktır.  $E_A$  voltajının neden  $\phi$  ile doğru orantılı olduğunu anlamak için aşağıdaki iki şekile bakalım.



Şekil 2.2 Ferromanyetik malzemenin mıknatıslanma eğrisi (Chapman, 2005)

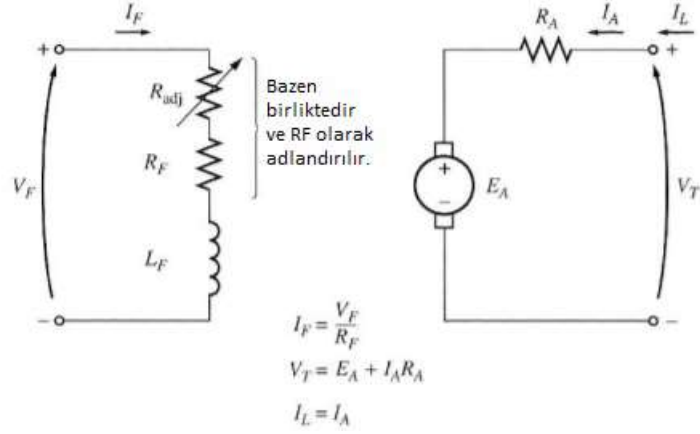


Şekil 2.3 DA makinanın mıknatıslanma eğrisi (Chapman, 2005)

Şekil 2.2' de ferromanyetik malzemededen oluşan bir elektromıknatısın histerisis veya magnetizasyon eğrisinin bir kısmı verilmiştir. Görüldüğü gibi elektromıknatısın etrafında ki sargılardan geçen akım ferromanyetik malzeme içerisinde bir manyetik akı oluşmasını sağlamıştır. Oluşan akı başlangıçta uygulanan akım ile doğru orantılı olarak artmış ancak bir süre sonra saturasyona uğramıştır. Saturasyona yakın bölgelerde ise akıda az bir miktar artış elde edebilmek için akım da çok yüksek artış miktarlarına gerek olduğu görülmektedir. Benzer bir yaklaşımla DA motorunun zıt emk voltajı  $E_A'$  'nın manyetik akı  $\Phi$  ile doğru orantılı olduğu göz önüne alınır ve motor mil hızı  $\omega$  'nın sabit kaldığı düşünülürse  $E_A$  voltajının alan sargısı  $I_f$  'ye göre grafiğin şekil 2.2' de ki ile benzer olması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu ise Şekil 2.3' te gösterilmiştir. Bu prensiple çalışan elektrik makinalarının tamamında olduğu gibi DA makinalarda da motordan akım başına maksimum verimi elde edebilmek için makina magnetizasyon eğrisinin saturasyona yakın bölgesinde (eğrinin doğrusal olan kısmının sonuna doğru olan bölgede) çalıştırılır. Bu sebeple de makina tasarlanmış olduğu bu anma akım değerinde çalışırken makinada oluşan zıt emk  $E_A'$  da az bir artış değeri elde edilmek istenmesi durumunda bunun oransal olarak çok daha fazla  $I_f$  akım değerine karşılık geleceği görülmektedir.

### 2.1.1. Serbest Uyarımlı DA Motoru

Bu DA motor çeşidi alan devresi dışında harici başka bir devreden sabit voltaj ile beslenen bir motordur. Serbest uyarımlı DA motor eşdeğer devresi aşağıda görülmektedir.

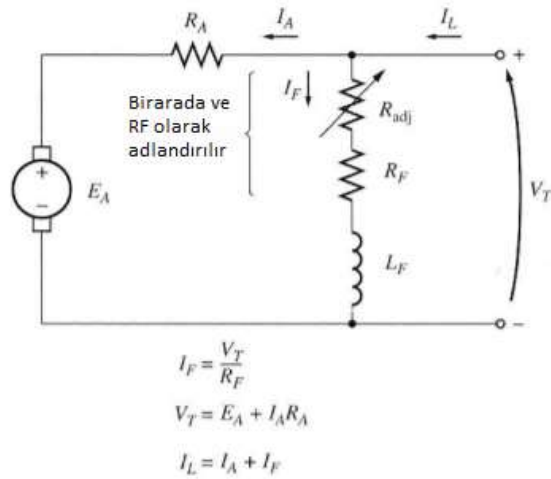


Şekil 2.4 Serbest Uyarımlı DA Motor Eşdeğer Devresi (Chapman, 2005)

Serbest uyarımlı bir DA motoru incelediğimiz de şönt DA motorla arasında bir farkın olmadığı görülecektir. Aşağıda açıklayacağımız şönt DA motorlar konusunda açıklanan durumlar, aksi bir durum belirtilmediği sürece serbest uyarımlı DA motor içinde geçerli olacaktır.

### 2.1.2. Şönt DA Motoru

Serbest uyarımlı bir DA motorda alan sargısı ile rotor (armatür) sargısına aynı gerilimin uygulanması ile DA şönt motor elde edilir. Bu benzerlik sebebi ile DA şönt motor için yapılan analizler serbest uyarımlı DA motor içinde aynen geçerlidir.



Şekil 2.5 Şönt DA motorun eşdeğer devresi (Chapman, 2005)

Şekil 2.5' te belirtilen şönt motorun armatür devresine Kirchhoff'un voltaj kanunu uygulanırsa;

$$V_T = E_A + I_A R_A \text{ formülü elde edilir.}$$

Bir makinanın terminal karakteristiği makinanın çıkış parametrelerinin birbirine göre grafiğine denir. Bir motor için çıkış parametreleri milde endüklenen elektriksel moment ve mil hızıdır. Yük altında ve sabit hızda çalışan bir şönt DA motor da motor miline bağlı olan yük aniden arttırılırsa motor mili yavaşlamaya başlar. Motor yavaşlamaya başlayınca  $E_A = K\phi W$  formülü gereğince rotor sargılarında endüklenen zıt emk azalır.  $E_A$ 'nın azalması  $I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A}$  formülü gereğince  $I_A$  akımının artmasına neden olur.  $I_A$  artınca  $T = K\phi I_A$  formülü gereğince motorun ürettiği moment, yük momentine eşit olana kadar artar. Bu durumda motor daha düşük bir mil hızı ve daha yüksek bir armatür akımı değerinde tekrar kararlı duruma gelir. Bir DA şönt motorun çıkış yada terminal karakteristiği şu şekilde elde edilir.

$$V_T = E_A + I_A R_A \quad (1)$$

$$E_A = K\phi W \quad (2)$$

Denklem (2), denklem (1)' de yerine bırakılırsa;

$$V_T = K\phi W + I_A R_A \text{ elde edilir.} \quad (3)$$

$$T = K\phi I_A \quad (4)$$

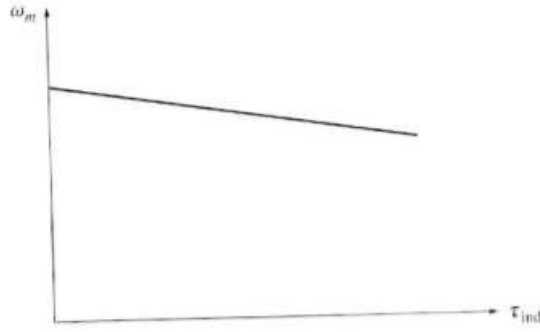
$$I_A = \frac{T}{K\phi} \quad (5) \text{ elde edilir ve denklem (3)' te yerine yazılırsa;}$$

$$V_T = K\phi W + \frac{T}{K\phi} R_A \quad (6) \text{ elde edilir.}$$

Denklem (6)' dan W değeri çekilirse;

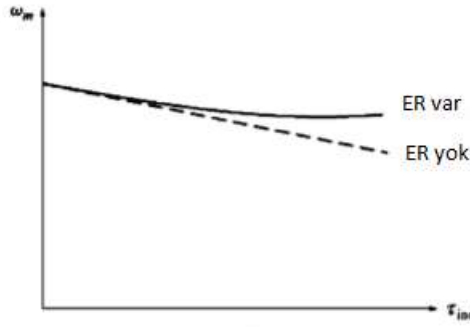
$$W = \frac{V_T}{K\phi} - \frac{R_A}{(K\phi)^2} T \text{ elde edilir.} \quad (7)$$

Bu formüle bakıldığında formülün negatif eğime sahip bir doğru denklemi olduğu görülür. Tabi bu denklemin bir doğru denklemi olabilmesi için W ve T dışındaki değişkenlerin sabit olduklarının kabul edilmesi gerekir. Şekil 2.6 bir DA şönt motorun çıkış yada terminal karakteristiği grafiğini göstermektedir.



Şekil 2.6 Şönt DA motorun moment - hız karakteristiği (Chapman, 2005)

Çıkış karakteristiğinde göz önünde bulundurulması gereken bir diğer faktör armatür sargılarında oluşan armatür reaksiyonu etkisidir. Armatür reaksiyonu etkisi ile motor miline bağlı yük arttığında motor içerisindeki manyetik akı üzerinde alan zayıflatma etkisi görülmektedir. Bu ise motor hızının bir miktar artmasına sebep olmaktadır. Şekil 2.7 armatür reaksiyonu etkisi göz önüne alınarak çizilen bir moment-hız grafiğini göstermektedir.



Şekil 2.7 Endüvi reaksiyonunun mevcut olduğu motorun moment - hız karakteristiği (Chapman, 2005)

Motorda kompensatör sargıları olması durumunda armatür reaksiyonu ve dolayısıyla da alan zayıflatma etkisi ortadan kalkmaktadır. DA motor içerisindeki manyetik akı  $\Phi$  ve buna bağlı olarak üretilen  $E_A$  voltajı ile motora uygulanan magnetomotiv kuvvet arasında ki bağıntı, doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. (magnetik akı ile onu oluşturan  $I_f$  akımı arasında ki bağıntının doğrusal olmaması sebebiyle) Dolayısıyla motora uygulanan magnetomotiv kuvveti değiştirecek her etken makine içerisinde üretilen  $E_A$  voltajını doğrusal olmayan bir şekilde etkileyecektir. Ancak böyle durumlarda oluşan  $E_A$  voltajını analitik olarak veren bir formül olmadığından stator

kutuplarının magnetizasyon yada histerisis eğrileri bu gibi durumlarda makine içerisinde oluşan  $E_A$  voltajını (bu durumdaki magnetomotiv kuvvete karşılık gelen) bulmak için kullanılabilir. Bu gibi durumlarda makinaya uygulanan magnetomotiv kuvvetini etkileyen en temel bileşenler alan akımı ve armatür reaksiyonu etkisidir.

Bir DA makinası için magnetizasyon eğrisi  $E_A$  voltajının  $I_f$  akımına göre sabit bir mil hızı  $W_o$  değerinde ki direkt çizimi olduğundan, yukarıda bahsedilen etkilerin  $I_f'$  ye ve dolayısıyla da motorda üretilen  $E_A$  voltajına etkisi, eğri üzerinden bulunabilir.

Bir DA makinada kompensatör sargısı yokken armatür reaksiyonu var ise makina içerisinde ki akı motor milinde ki yükün artması durumunda azalacaktır (armatür reaksiyonu etkisi). Bu durum da toplam magnetomotiv kuvvet alan akımı  $I_f'$  den dolayı oluşan magnetomotiv kuvvet ile armatür reaksiyonu, dolayısıyla oluşan magnetomotiv kuvvetin farkı şeklinde gösterilebilir. Yani;

$$F_{net} = N_f \cdot I_f - F_{AR} \quad (N_f : \text{Alan sargısı sayısı})$$

Bu durumda armatür reaksiyonu sonrasında makina içerisinde oluşan  $E_A$  voltajı, armatür reaksiyonunun  $I_f$  akımı üzerine etkisi düşünülerek hesaplanacak yeni bir  $I_f^*$  akımı bulunarak elde edilebilir. Bu durumda;

$$I_f^* = I_f - \frac{F_{AR}}{N_f} \text{ olacaktır.}$$

Makina içerisinde üretilen  $E_A$  voltajını etkileyen kuvvetlerin doğrusal olmayan analizi yapılırken göz önüne alınması gereken bir diğer durum şudur;

Magnetizasyon eğrisi makinanın sabit bir hızı (genellikle anma hızı) için çizilmektedir. Peki anma hızı dışında ki bir hız da  $I_f$  akımının  $E_A'$  ya etkisi nasıl bulunabilir. Makina içerisinde üretilen  $E_A$  voltajının denklemine bakıldığında;

$$E_A = K\phi W \text{ ' dır.}$$

Makinada ki alan akımı  $I_f'$  nin değişmediği durumlarda, iki farklı hız değerinde  $E_A$  voltajları:

$$E_{A1} = K\phi W_1$$

$$E_{A2} = K\phi W_2 \quad \text{olacaktır.}$$

Bu iki denklemi oranladığımız zaman;

$$\frac{E_{A1}}{E_{A2}} = \frac{W_1}{W_2} \quad \text{eşitliği elde edilecektir.}$$

Dolayısıyla  $E_{A1}$  ve  $W_1$  anma hızı ve bu hızda oluşan voltajı temsil ediyorsa, istenilen bir diğer makina hızında ki  $E_A$  voltajı yukarıda ki denklem ile bulunabilecektir.

### 2.1.2.1. Şönt DA Motorların Hız Kontrolü

Şönt DA motorlarının hız kontrolü için uygulanan 2 adet yaygın kullanılan ve 1 adet az kullanılan yöntem bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan yöntemler;

- 1) Alan sargısı direnci  $R_f'$  nin değiştirilmesi ile alan akısı  $\phi'$  nin değiştirilmesi.
- 2) Armatür sargısına uygulanan  $V_a$  voltajının değiştirilmesi.

Az kullanılan yöntem ise;

- 3) Armatür sargısına seri bir direnç eklenmesi.

### 2.1.2.2. Alan Sargısı Direncinin Değiştirilmesi ile Hız Kontrolü

Alan sargısı direncinin Şönt DA motor üzerine etkisini anlamak için bir DA motorda ki alan sargısı direncinin motor sabit bir hızda dönerken arttırıldığını düşünelim. Bu durumda, ilk durumda ki alan sargısı direnci  $R_{F1}$  olarak gösterilirse;

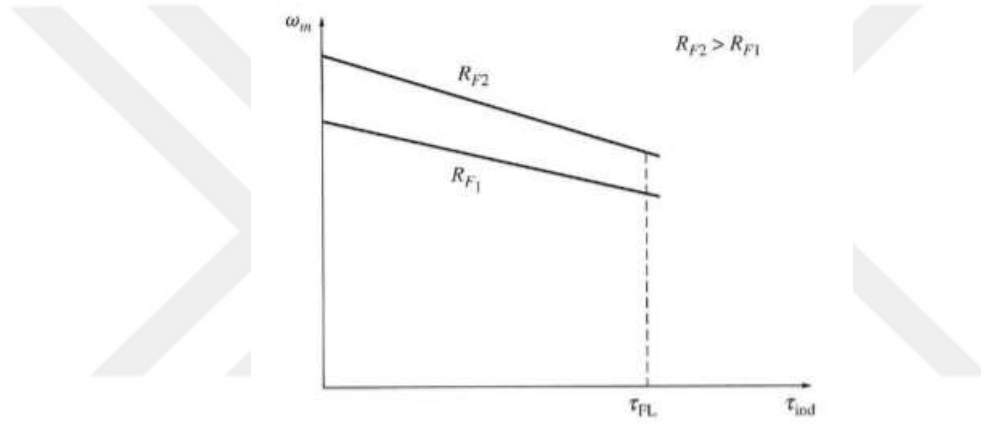
$$R_{F2} > R_{F1} \quad \text{olacaktır.}$$

Bu durumda;  $I_f = \frac{V_T}{R_F}$  olduğundan alan akımı  $I_f$  azalır. Alan akımında ki azalma,

alan akısı  $\phi'$  yi azaltır.  $\phi'$  azaldığında  $E_A = K\phi W$  olduğundan  $E_A$  azalır.  $I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A}$

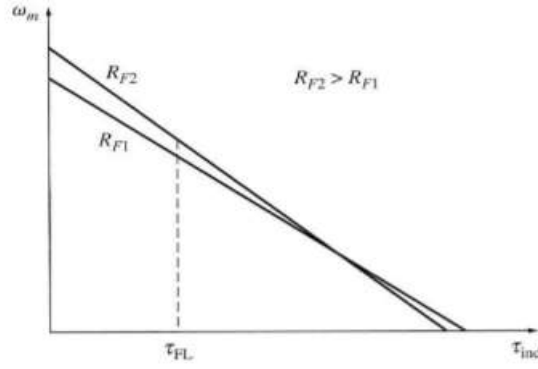
olduğundan ve DA motorlarda armatür sargı direnci  $R_A$  çok küçük değerler aldığından  $E_A'$  daki az bir azalış  $I_A'$  da oransal olarak çok daha fazla bir artışa neden olur. Makine milinde

endüklenen moment ise;  $\tau = K\phi I_A'$  dır. Bu ifade de  $\phi$  azalmış,  $I_A$  ise artmıştır. Ancak oransal olarak  $I_A'$  da ki artış daha fazla olduğundan makinanın ürettiği moment artmış olur. Motorda ki bu moment artışı motor hızı  $W'$  nun artmasını sağlar.  $W'$  nun artması ise  $E_A = K\phi W$  olduğundan  $E_A'$  nin artmasına sebep olur. Ancak  $E_A$  artmaya başlayınca  $I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A} =$  olduğundan  $I_A$  azalmaya başlar.  $I_A'$  nin azalmaya başlaması ise momentin azalmaya başlamasına neden olur. Bu durumda motor, yeni bir denge durumuna ulaşır ve motor hızı başlangıç durumuna göre daha fazla ve motorun ürettiği moment ise yük momentine eşit olacak şekilde kararlı duruma gelir.



Şekil 2.8 Bir şönt motorun moment-hız karakteristiğinde uyarma direnci hız kontrolünün etkisi (Chapman, 2005)

Bir DA şönt motorun alan direncinin arttırılması durumunda motorun yüksüz durumdan tam yük durumuna kadar alan moment - hız grafiğini göstermektedir. Görüldüğü gibi alan direncinin arttırılması motorun yüksüz durumda ki hızının artmasına neden olmuş ve motorun bu durumda ki moment - hız grafiğinin eğimi de artmıştır. Ancak motorun moment - hız grafiği yüksüz durumdan sıfır hız (durma) durumuna kadar çizilecek olursa farklı bir durum ortaya çıkar. Bu durum ise şekil 2.9' da gösterilmiştir.

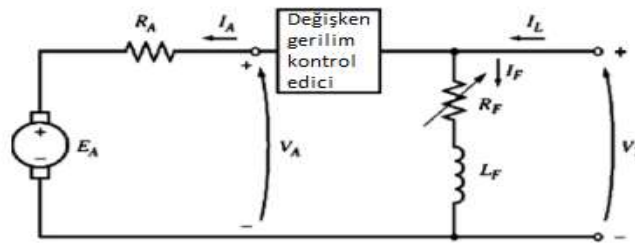


Şekil 2.9 Boştan durmaya kadar olan tüm aralıkta motorun uç karakteristiklerini gösteren grafik (Chapman, 2005)

Şekilden de görüldüğü gibi motor düşük hızlarda çalıştırılıyor ise  $R_F$  direncinin artırılması motor hızının azalmasına neden olmaktadır. Kontrol amaçlı kullanılan bazı DA motor çeşitleri düşük hızlarda çalıştırılırlar. Bu sebeple bu motorların hızını kontrol etmek için alan sargı direnci yöntemi uygulanırsa,  $R_F$ ' nin artırılması motor hızının daha da azalmasına neden olur. Bu yüzden bu motorlar da armatür voltaj kontrolü metodu uygulanır.

### 2.1.2.3. Armatür Voltaj Kontrolü Yöntemi

Bu kontrol yönteminde motorun alan sargısına uygulanan voltaj sabit tutulurken, armatür sargısına değişken değerlikli bir voltaj uygulanır. Alan sargısına uygulanan voltajın sabit tutulması gerektiğinden bu yöntem sadece serbest uyarımlı DA motorlara uygulanabilir.

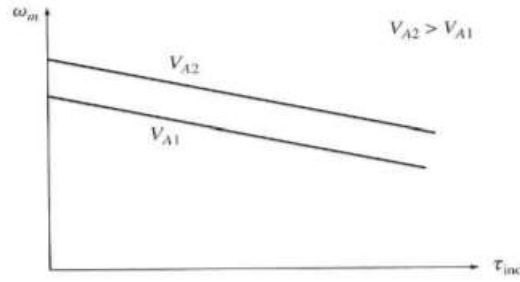


Şekil 2.10 Bir şönt veya serbest uyarımlı DA motorun endüvi gerilim kontrolü (Chapman, 2005)

Bu kontrol yönteminde armatür voltajı  $V_A$  arttırıldığı zaman  $I_A = \frac{V_A - E_A}{R_A}$

olduğundan  $I_A$  artar.  $I_A$  artınca  $T = K\phi I_A$  olduğundan motorun ürettiği moment artar.

Momentin artışı motor hızı  $W'$  'yu arttırır. Ancak  $W'$  'yu artınca  $E_A = K\phi W$  olduğundan  $E_A$  artmaya başlar.  $E_A$  artmaya başlayınca  $I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A}$  olduğundan  $I_A$  azalmaya başlar. Motor bu şekilde bir süre çalıştıktan sonra başlangıç hızından daha yüksek bir hızda ve ürettiği moment yük momentine eşit olacak şekilde kararlı duruma geçer. Armatür voltaj kontrolü metodu için motorun moment - hız grafiği şekil 2.11' de verilmiştir.



Şekil 2.11 Bir Şönt motorun moment-hız karakteristiği üzerinde endüvi gerilimiyle hız kontrolünün etkisi (Chapman, 2005)

Şekil 2.11' de görüldüğü gibi  $V_A$  'nın arttırılması oluşan yeni karakteristikte motorun yüksüz durumda ki hızını arttırmış ancak yeni oluşan karakteristiğin eğimi değişmemiştir.

DA motor hız kontrolü için daha önce bahsettiğimiz üçüncü metot olan armatür devresine seri direnç ekleme yöntemi hem kayıpları arttırdığı hem de motorun çok daha yavaş çalışmasına neden olduğu için pek kullanılmaz.

Hız kontrolü için bahsedilen ilk iki metodun birbirini tamamlayıcı bir özellikleri bulunmaktadır. Alan direnci ile kontrol metodunda düşük alan akımları motorun daha hızlı dönmesine, yüksek alan akımları ise motorun daha yavaş dönmesine neden olur. DA motordan en yüksek verimin alındığı çalışma bölgesinin anma akım ve geriliminin olduğu çalışma noktası göz önüne alınırsa, alan direnci ile kontrol yöntemi bu durumda çalışan bir DA motorun anma hızından daha yüksek hızlarda çalıştırmak için uygulanır. Ancak anma hızından daha düşük hızlarda çalıştırmak için tavsiye edilmeyen ve hatta alan sargılarına aşırı yükleme ile zarar verebilecek bir metottur.

Armatür sargısına uygulanan voltaj ile yapılan kontrol metodun da ise armatür voltajı arttırıldıkça motorun hızı artmakta, voltaj azaltılınca da motorun hızı azalmaktadır. Armatür voltajı en fazla anma gerilimine kadar arttırılabildiğinden, bu metot anma

hızından daha düşük hızlarda motoru verimli bir şekilde kontrol etmek için kullanılan bir metottür. Bu sebeple bu iki metot birbirini tamamlayıcı özelliktedir.

DA motora uygulanan güç ve motorun ürettiği moment limitleri açısından bu iki kontrol yöntemine baktığımızda, iki metot arasında bariz farklar olduğu görülmektedir. Moment ve güç limitlerini etkileyen en önemli etken armatür sargılarının aşırı ısınmasıdır ve bu durum armatür sargılarına uygulanan  $I_A$  akımının üst limitini belirler.

Armatür voltaj kontrolü yapılırken motor içerisinde ki akımın sabit tutulduğu kabul edilir. Bu durumda motorun üreteceği maksimum moment;

$$T_{\max} = K\Phi I_{A\max} \quad \text{olur.}$$

Bu maksimum moment değeri anma hızına kadar motorun hızından bağımsız olarak sabit kalır. Motorun çıkış gücü ise;

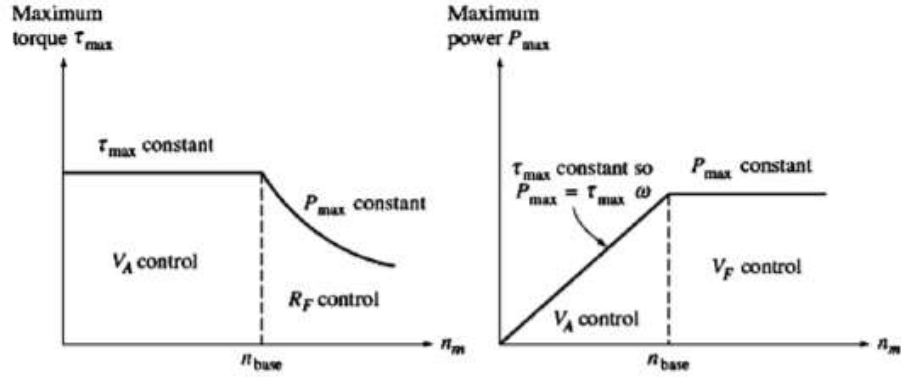
$$P = T.W \quad \text{olduğundan,}$$

herhangi bir hız değerinde motor milinden elde edilen maksimum güç (armatür voltaj kontrolü için);

$$P_{\max} = T_{\max} \cdot W \quad \text{şeklinde olur.}$$

Dolayısıyla motordan elde edilebilecek maksimum güç motor hızı ile doğru orantılı olmaktadır.

Diğer taraftan alan direnci ile kontrol yönteminde makine içerisinde ki akı direnci değeri ile değiştirilebilmektedir. Bu metotla makinanın hız artışı makinada ki akımın azaltılması ile sağlanır. Bu durumda armatür sargısına uygulanabilecek maksimum akım değerinin aşılması için milde oluşan moment azalırken makina hızının artması gerekir. Makinanın çıkış gücü;  $P = T.W$  olduğundan, alan direnci yönteminde makinadan elde edilen maksimum güç sabit kalırken makina milinde oluşan maksimum moment değeri motor hızı değeri ile ters orantılı olarak değişecektir. Şönt DA motoru için çıkış gücü ve milde oluşan moment limitlerinin motor hızına göre değişimini gösteren grafik (güvenli çalışma aralıkları için) şekil 2.12' de verilmiştir.

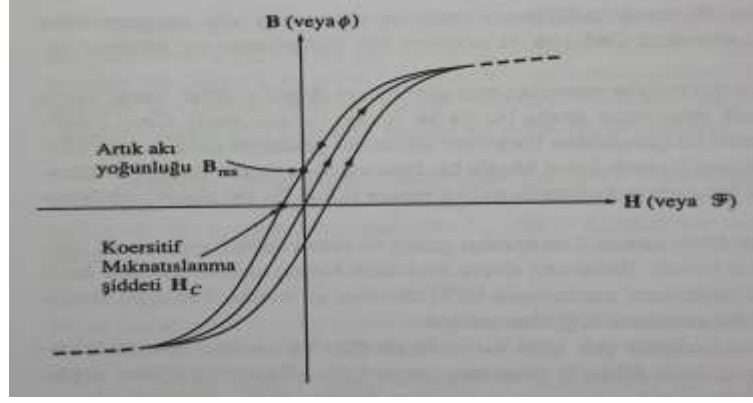


Şekil 2.12 Şönt DA motor için güç ve moment sınırları (Chapman, 2005)

### 2.1.3. Sabit Mıknatıslı DA Motoru

Stator kutuplarının sabit mıknatıslardan oluştuğu motor türüne sabit mıknatıslı DA motor denilmektedir. Sabit mıknatıslı DA motorları, şönt DA motorlarla karşılaştığımızda daha faydalı oldukları görülmektedir. Daha yararlı olmalarının sebebi ekstra bir uyarma devresine ihtiyaç duymamasından dolayı şönt DA motorlarda ki uyarma devresinin sebep olduğu bakır kayıplarının, sabit mıknatıslı DA motorlar da olmayışıdır. Aynı sebepten dolayı şönt DA motorlara göre daha az yer kapsamaktadırlar.

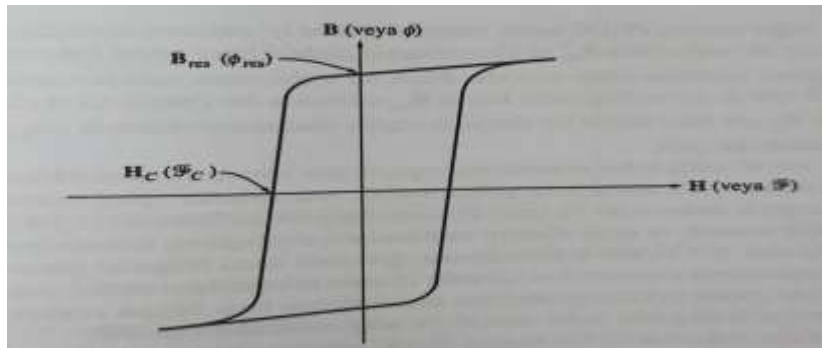
Ancak sabit mıknatıslı DA motorların avantajlarının yanı sıra bazı olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Sabit mıknatıslı DA motorların en önemli dezavantajı, şönt DA motorların ürettiği yüksek akı yoğunluklarını oluşturamamalarıdır. Dolayısıyla sabit mıknatıslı DA motorların, kapsam ve şekil yönünden benzer olan şönt DA motorlara göre amper başına  $I_A$  akımında  $T_{ind}$  olarak tanımlanan daha az bir momentleri vardır. Bununla birlikte sabit mıknatıslı DA motorlar heran bir mıknatıssızlık durumu oluşacakmış gibi risk barındırırlar. Yani sabit mıknatıslı DA motorların kutup akısı, sabit mıknatıslanmadan geriye kalan bir akı olması sebebiyle ve endüvi akımının aşırı derece fazla olması durumunda, endüvi mmk' sı kutuplarda ki akının yeniden uyumunu sağlayarak kalıcı olacak şekilde düşürür ve böylelikle bu DA motor türü mıknatıssızlaştırılırken bir risk durumu oluşumunu sağlamaktadır. Tabi bu mıknatıssızlaştırılma süreci uzun zaman alan fazla yük periyotlarında çok yüksek ısınmalarda da görülebilmektedir.



Şekil 2.13 Ferromanyetik Malzemenin mıknatıslanma eğrisi (Chapman, 2005)

Şekil 2.13' te bir manyetik malzemenin mıknatıslanma eğrisi görülmektedir. Bu grafik akı yoğunluğunun manyetik alan şiddetine göre gösterilişidir. Malzemeye güçlü bir harici manyetomotor kuvvet uygulanıp kaldırıldıktan sonra geriye kalan artık akı yoğunluğu  $B_{res}$  kalır. Artık akıyı sıfıra yöneltmek için, başlangıçta üretilen manyetik alan şiddeti  $H$  polaritesinin zıt kutupluluğu ile çekirdeğe uyumlu manyetizasyon şiddeti  $H_c$ ' nin uygulanması gerekmektedir. Makina da bulunan stator ve rotor gibi kısımlarda yapılacak uygulamalar için seçilen ferromanyetik malzemelerde küçük histerezis kayıplarına rastlanılacağından bu tür malzemeler mümkün olduğunca küçük  $B_{res}$  ve  $H_c$  değerlerin de tercih edilmelidir.

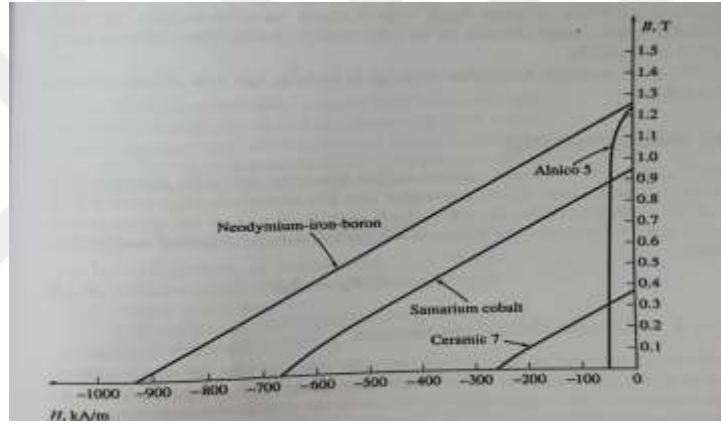
Sabit mıknatıslı DA motor kutup noktaları için olabilecek en iyi malzeme türü, mümkün olduğu kadar büyük bir artık akı yoğunluğuna sahip  $B_{res}$  ile birlikte mümkün olduğu kadar büyük bir kohersitif magnetizasyon şiddeti içermelidir. Bu tarz malzemenin mıknatıslanma grafiği şekil 2.14' te gösterilmektedir.



Şekil 2.14 Sabit mıknatıslarda ferromanyetik malzemenin mıknatıslanma grafiği (Chapman, 2005)

Bu grafiğe göre sabit mıknatıslı DA motorlar da ferromanyetik malzemelerin kullanılması tercih edilebilmektedir. Fazla artık akı yoğunluklu  $B_{res}$  ve bağıl bir şekilde yüksek koersitif mıknatıslanma şiddetine sahip  $H_c$ ' ye dikkat edecek olursak, bu tarz malzemelerin sahip olduğu mıknatıslanma eğrileri ve nadir element içerikli maddelerden oluşan malzemelerin mıknatıslarının yüksek artık akı ile birlikte büyük koersitif mıknatıslanma şiddetine sahip oldukları görülmektedir.

Şekil 2.15' te bazı malzemelere ait mıknatıslanma eğrilerinin ikinci bölgeleri gösterilmiştir. Bu karşılaştırmaya göre, en iyi nadir element mıknatıslarının, en iyi ferromanyetik alaşımlar kadar artık akıya sahip olabilecekleri halde, armatür reaksiyonunun neden olduğu demanyetizasyon problemlerine karşı duyarlı olduğunu göstermektedir.

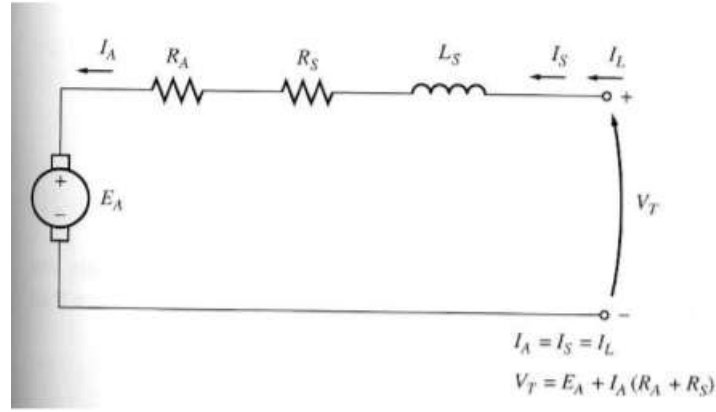


Şekil 2.15 Bazı malzemelerin mıknatıslanmalarının ikinci bölgesi (Chapman, 2005)

Sabit mıknatıslı DA motoru, motor akısının kalıcı olması haricinde tamamen şönt DA motoru ile aynıdır. Bu nedenle, uyarma akımını veya akısını değiştirerek sabit mıknatıslı bir motorun hızı kontrol edilememektedir. Sabit mıknatıslı DA motorunda endüvi gerilimi yada direnç kontrolü yapılarak motorun hız kontrolü yapılabilir.

#### 2.1.4. Seri DA Motoru

Bu tür motorlarda uyarma sargıları, rotor devresine seri olarak bağlanmıştır. Seri DA motorda rotor, uyarma ile birlikte hat akımlarının eşit oldukları şekil 2.16' da verilen eşdeğer devrede görülmektedir.



Şekil 2.16 Seri DA motor eşdeğer devre (Chapman, 2005)

Seri DA motorun eşdeğer devresine Kirchoff' un gerilim kanunu uygularsak;

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) \text{ elde edilir.}$$

$E_A = K\Phi\omega$  olduğunu biliyoruz ve bu DA motorda indüklenen moment ise  $T_{ind} = K\Phi I_A$  şeklindedir.

Ayrıca Şekil 2.16' da ki devreye göre  $I_A = I_S$  olduğundan doyum bölgesine kadar  $\Phi$ ,  $I_A$  ile doğru orantılı olmasından dolayı;

$$\Phi = K_f \cdot I_A \text{ olur.}$$

$T_{ind} = K\Phi I_A$  denkleminde  $\Phi$  değeri yerine yazılır ve  $K_s = K_f \cdot K$  olduğu düşünülürse;

$$T_{ind} = K_f \cdot K \cdot I_A \cdot I_A = K_s \cdot I_A^2 \text{ elde edilir.}$$

İndüklenen moment, armatür akımının karesiyle orantılı olmaktadır. Bu ise akım başına daha fazla moment elde edilmesini sağlar. Başlangıçta marş motoru, asansör yada lokomotif gibi yüksek moment gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Seri DA motoru, hem DA hemde AC enerji gerektiren uygulamalarda kullanılabilirdiği için üniversal motor çeşidi olarakta bilinmektedir.

#### 2.1.4.1. Hız - Moment Karakteristiği

Lineer mıknatıslanma motorda ki akımın  $\Phi = K_f I_A$  şeklinde oluşan denklem ile uygulanacağını göstermektedir. Bu denklem ise seri DA motorun moment - hız karakteristik grafiğinin oluşmasını sağlamaktadır.

Seri DA motorun moment - hız karakteristik grafiği Kirchhoff ' un gerilim yasası ile oluşmaktadır. Bu yasa gereğince oluşan gerilim;

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) \quad \text{şeklindedir.}$$

İndüklenen moment ise  $T_{ind} = K_S \cdot I_A^2$  şeklinde bulunmuştu. Bu denklemden endüvi akımı olan  $I_A'$  yı bulacak olursak;

$$I_A = \sqrt{\frac{T_{ind}}{K_S}} \quad \text{olarak bulunacaktır.}$$

$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S)$  denkleminde;  $E_A = K\phi W$  ile  $I_A = \sqrt{\frac{T_{ind}}{K_S}}$  denklemlerini yerine yazarsak;

$$V_T = K\phi W + \sqrt{\frac{T_{ind}}{K_S}} (R_A + R_S) \quad \text{elde edilir.}$$

Akıyı bu ifadeden tamamen çıkartabilirsek o zaman motorda moment ile hız arasında bir bağıntı kurulabilmektedir. Akının denklemden çıkartılabilmesi için;

$I_A = \frac{\phi}{K_f}$  olduğunu biliyoruz. Dolayısıyla indüklenen moment ifadesini aşağıdaki denklem şeklinde yazarsak;

$$T_{ind} = \frac{K_S}{K_f} \phi^2 \quad \text{olarak elde edilir.}$$

Dolayısıyla akıya ait denklem;

$$\phi = \sqrt{\frac{K_f}{K_S}} \sqrt{T_{ind}} \quad \text{şeklinde olur.}$$

Akının bu değerini  $V_T = K\phi W + \sqrt{\frac{T_{ind}}{K_S}} (R_A + R_S)$  şeklinde elde edilen bu denklemde yerine koyarsak;

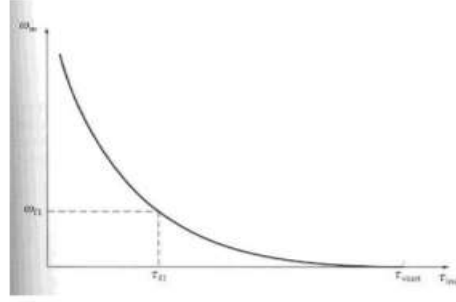
$$V_T = K \sqrt{\frac{K_f}{K_S}} \sqrt{T_{ind}} W + \sqrt{\frac{T_{ind}}{K_S}} (R_A + R_S) \quad \text{elde edilecektir.}$$

Oluşan bu denklemi hız ( W ) için çözecek olursak;

$$W = \frac{V_T}{K_S \sqrt{\frac{T_{ind}}{K_S}}} - \frac{(R_A + R_S)}{K_S} \text{ olur ve } W = \frac{V_T}{\sqrt{T_{ind}} \sqrt{K_S}} - \frac{(R_A + R_S)}{K_S} \text{ en son şekliyle moment - hız}$$

bağıntısı elde edilir.

Doymamış seri DA motoru için, motorun hızının, torkun karekökünün tersi ile değiştiği elde edilen bu denklem ile görülmektedir. Bu denkleme ait seri DA motorlarda ki moment - hız karakteristiğinin grafiği şekil 2.17' de görülmektedir.



Şekil 2.17 Seri DA motorun moment - hız karakteristiği (Chapman, 2005)

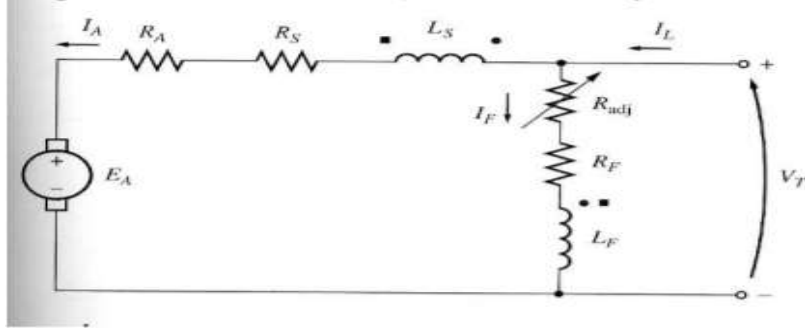
Seri DA motorun olumsuz tarafı yukarıda çıkartılan hız (W) denkleminde kolay bir şekilde görülebilmektedir. Denkleme göre indüklenen moment sıfıra doğru gittikçe hız sonsuza yaklaşmaktadır. Mekanik ve nüve gibi kayıpların karşılanabilmesi için tork tamamen sıfıra gitmeyecektir. Bir diğer dezavantajı ise, motor farklı bir yük ile yüklenmemişse, kendini yok edecek şekilde hızlanabilir.

Dolayısıyla seri DA motorlarında hız kontrolü;  $W = \frac{V_T}{\sqrt{T_{ind}} \sqrt{K_S}} - \frac{(R_A + R_S)}{K_S}$  denklemine bağlı olarak;

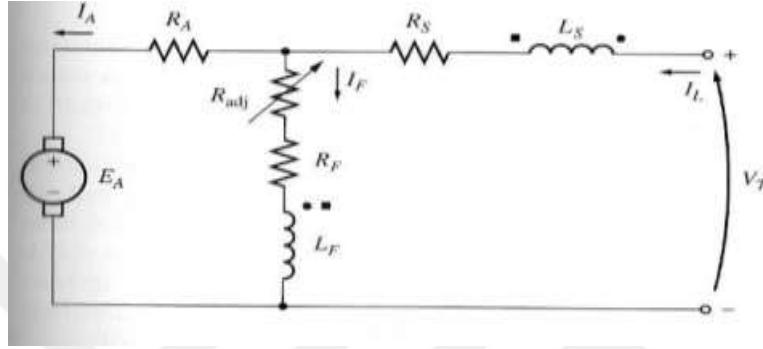
- a) Terminal gerilimi değiştirilerek
- b) Seri direnç eklenerek yapılabilir.

### 2.1.5. Kompant DA Motoru

Bu tarz motor, hem şönt hem de seri DA motorların bir arada bulunduğu bir tür DA motor çeşitidir. Bu motor türüne ait eşdeğer devre şekil 2.18' de görülmektedir. Şekil 2.18' de görülen noktalar transformatör üzerinde ki noktalar ile aynı anlama sahiptir.



Şekil 2.18 Uzun şönt bağlantılı kompunt DA motor (Chapman, 2005)



Şekil 2.19 Kısa şönt bağlantılı kompunt DA motor (Chapman, 2005)

Noktalara gelen akımlar sayesinde manyetomotor kuvvet oluşur. Akım devrede ki her bobin üzerinde bulunan noktalara doğru giderse burada oluşan manyetomotor kuvvetler toplamda çok büyük manyetomotor kuvvet oluşturacağından eklemeye yapılır ve bu şekilde ki motora eklemeli kompunt DA motoru denilir. Diferansiyel kompuntta ise akım bobinde noktaya yönelir, diğer bobinde ise dışa doğru giderse bu seferde manyetomotor kuvvet çıkartılır. Şekil 2.18 ve 2.19' da görülen noktalar eklemeli kompuntı, kareler ise diferansiyel kompuntı ifade etmektedir.

Uzun şönt bağlantılı kompunt DA motorunda Kirchoff ' un voltaj yasasını uyguladığımızda;

$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S)$  denklemi yine elde edilecektir. Bu motor da;

$$I_A = I_L - I_F \text{ dir.}$$

Aynı zamanda;

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \text{ dir.}$$

Kısa kompun için denklemleri Kirchoff kanunlarını uygulayarak yazacak olursak;

$$V_T = E_A - I_L R_S + I_A R_A \text{ elde edilir.}$$

$$I_L = I_A + I_F \text{ dir.}$$

Aynı zamanda;

$$I_F = \frac{V_T - I_L R_S}{R_F} \text{ dir.}$$

Kompunt motorda ki şönt uyarma akımı ile net manyetomotor kuvveti hesaplayacak olursak;

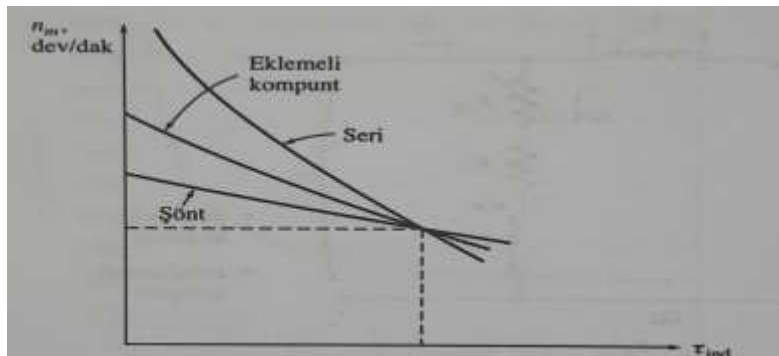
$$F_{net} = F_F \pm F_S - F_{AR} \text{ ve}$$

$$I_F^* = I_F \pm \frac{N_S}{N_F} I_S - \frac{F_{AR}}{N_F} \text{ şeklindedir.}$$

Yukarıda ki ;  $F_{net}$  denkleminde (+) işareti eklemeli kompuntı, (-) işareti ise diferansiyel kompunt olduğunu ifade etmektedir.

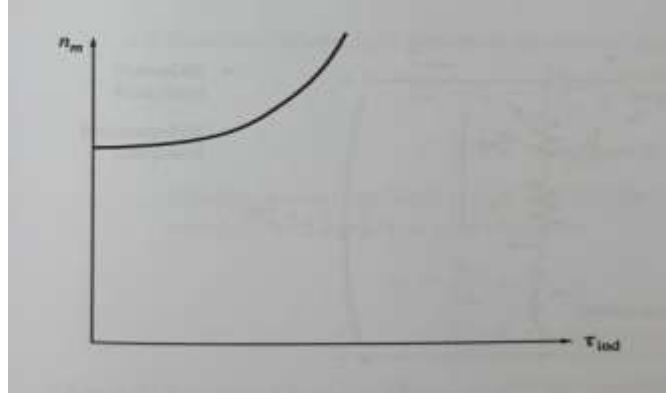
### 2.1.5.1. Hız - Moment Karakteristiği

Eklemeli kompunt motor, şönt ve seri motorların iyi özelliklerini bir araya toplar. Şekil 2.20' de aynı yük değerine sahip seri ve şönt DA motorlar ile eklemeli kompunt DA motora ait moment ile hız karakteristiklerinin kıyaslanması görülmektedir.



Şekil 2.20 Eklemeli kompunt DA motorun moment-hız karakteristiğinin kıyaslanması (Chapman, 2005)

Şekil 2.20' de ki grafiğe baktığımız da kompunt DA motor, seri motor gibi başlangıçta yüksek momente sahip olmakla birlikte şönt motor gibi boşta çalışırken aşırı hıza neden olmamaktadır.



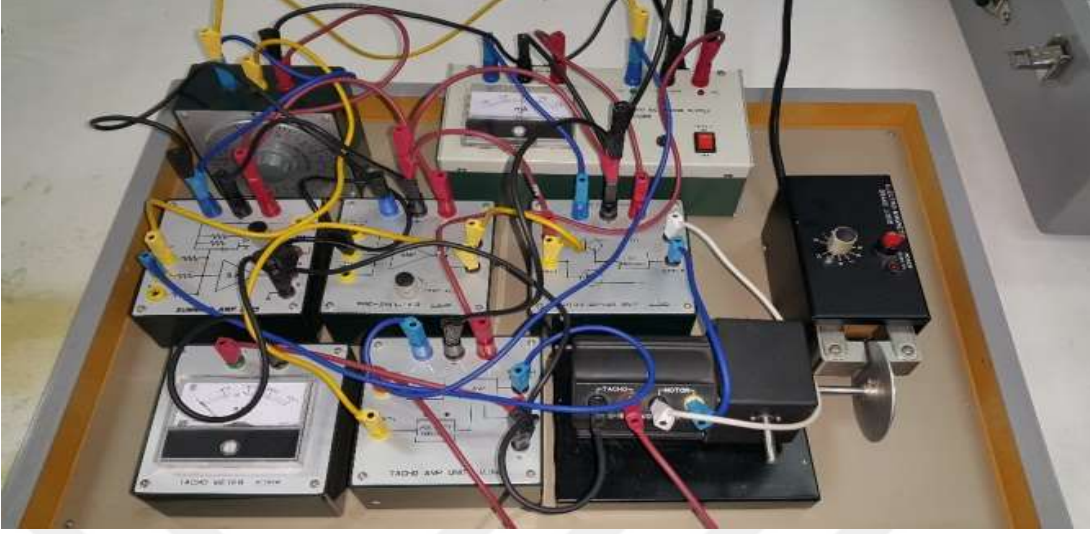
Şekil 2.21 Diferansiyel kompunt DA motorun moment-hız karakteristiği (Chapman, 2005)

Şekil 2.21' de ki grafiğe göre yük miktarı artış gösterirken  $I_A$  artarak motordaki akının azalması sağlanmaktadır. Ancak azalan akının etkisiyle motorun hızı artacaktır. Motorda ki bu hızın yükselmesi ise  $I_A$ 'nın tekrar artmasına, yine  $I_A$ 'nın artmasıyla akının daha da azalması ve sonuçta motor hızının daha fazla artmasına neden olarak bu şekilde artışa devam etmektedir. Buradan anlaşılan ise diferansiyel kompunt motorun kararsız olması sebebiyle tercih edilmemesidir.

Eklemeli kompunt DA motora ait hız kontrol yöntemleri şönt DA motorun da kullandığımız yöntemler ile aynı olmaktadır. Yani;

- a)  $R_F$  direncinin değiştirilmesi,
- b)  $V_A$  voltajının değiştirilmesi,
- c)  $R_A$  direncinin değiştirilmesi yöntemleri kullanılabilir.

### 3. ED LABORATORY DENEY SETİ



Şekil 3.1 ED Laboratory Deneysel Seti

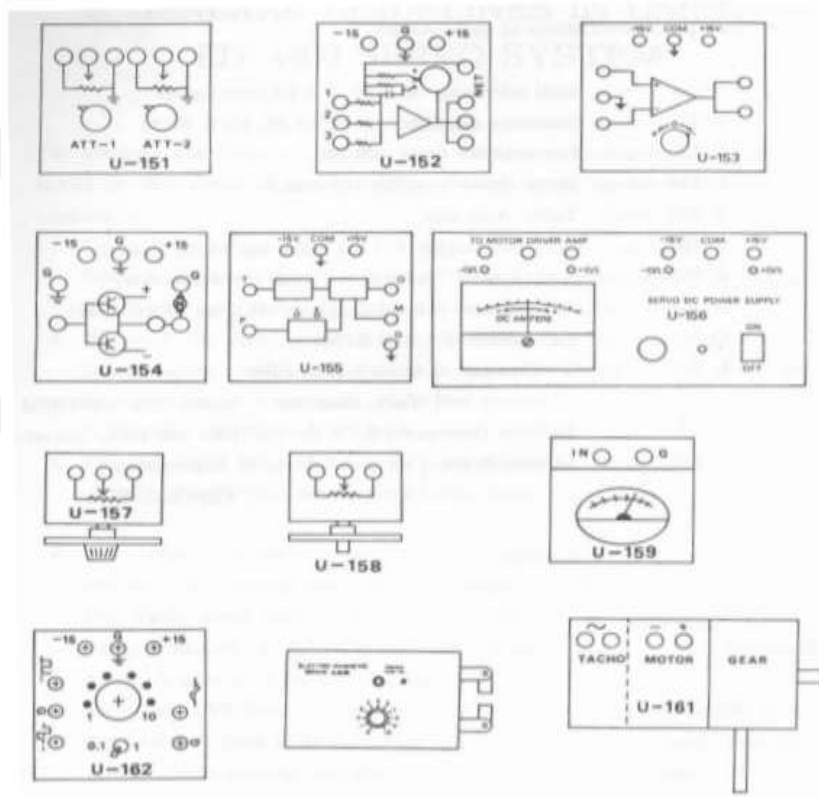
ED Laboratory deney seti, temel anlamda otomatik kontrol derslerinde gösterilen kuramsal bilgilerin, özellikle kapalı çevrim ve açık çevrim hız kontrolü ve pozisyon kontrolü konularının deneysel ortamda gerçeklemlerini sağlayarak daha iyi anlaşılmasına yardımcı olmak için tasarlanan bir deney setidir. Deney setinin modüler yapısı deneylerin yapılışını basitleştirmekte ve uygulamaların kolay bir şekilde kurulmasına izin vermektedir. Burada yapılacak olan tek şey deneylerde verilen eşdeğer devrelerdeki bağlantı şemaları yardımıyla gerekli bağlantıların yapılması olacaktır. Bu deney setini kullanırken dikkat edilmesi gereken bazı önemli durumlar aşağıda belirtilmiştir.

- Şekil 3.1' de görülen deney setine ait parçaların bağlantılarının kolay bir şekilde yapılabilmesine olanak sağlayacak şekilde yerleştirilmelidir.
- DA motor ile U-158 potansiyometresinin bağlantısı motorun düşük hız milinde yapılmalıdır. Bu hız ayarı ise motor hızının 1/60 'i kadardır.
- Motorun yüksek devirli miline monte edilecek disk elemanları ile manyetik fren modülünün birlikte kullanımı motor için farklı yük durumlarını oluşturmaktadır. Manyetik fren için sıfır konumu manyetik frenin yük etkisinin olmadığı durumdur.
- Takometre, servo motor içerisinde mekanik bir şekilde motora bağlıdır. Cihaz motor milinin rpm (devir/dakika) ile belirtilen hızı ile orantılı olacak şekilde bir

frekans ve voltaja sahip bir AC sinyal üretmektedir. Tako amplifikatör modülü U-155, takometrenin oluşturduğu bu sinyali eşdeğer bir gerilime dönüştürmektedir. Bu gerilim deney setimizde geri besleme sinyali şeklinde kullanılmaktadır.

- e) U-156 güç kaynağında aşırı yük durumunda modül üzerinde ki göstergeler yanarak sistemden aşırı derecede akım çekildiği uyarısını vermektedir. Bu durumda sistemin çalışması sonlandırılarak, aşırı akım çekilmesine sebep olan sorun giderilmelidir.

Laboratuar çalışmalarımız da kullandığımız ED Laboratory deney setinin modülleri aşağıda gösterilmektedir.

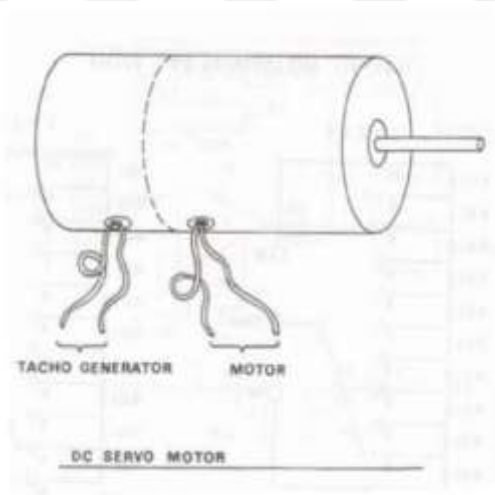


Şekil 3.2 ED Laboratory Deney Seti Modülleri

Yukarıda görselleri verilen otomatik kontrol laboratuvarı deneylerinde kullandığımız deney setimiz DA Servo Motorumuzla birlikte 13 kısımdan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla;

- 1) U-151 Çift zayıflatıcı (0,9/10,1/10 zayıflatma)
- 2) U-152 Toplayıcı yükselteç (kazanç: 0 dB, EXT, NET)
- 3) U-153 Ön yükselteç (Kazanç: 20 dB)

- 4) U-154 Motor sürücü yükselteç (10 Watt)
- 5) U-155 Tako işareti yükselteci
- 6) U-156 DA güç kaynağı (  $\pm 15V$  0.2 A ve Motor Güç)
- 7) U-157 Potansiyometre (Referans) (1 k $\Omega$  veya 10 k $\Omega$  5 Watt )
- 8) U-158 Potansiyometre (Motor miline monteli) (1 k $\Omega$  veya 10 k $\Omega$  5 Watt )
- 9) U-159 Takometre FS 4000 RPM)
- 10)U-160 PID Modülü
- 11)U-161 Servo motor ( Motor: 12V, 4,5 Watt; Tako üretici: yaklaşık 3Vp-p/4000RPM)
- 12)U-162 Fonksiyon üretici ( 0.1 Hz- 1Hz, 1 Hz-10 Hz ve rampa çıkışı)
- 13)U-163 Manyetik Fren ( Hava aralığı: 4 mm, 10 adım değişkenli; Giriş: AC 110/220V, 60 Hz)



Şekil 3.3 Deney seti DA motor

Şekil 3.1'de anlık görüntüsü verilen ED Laboratory deney setimiz; güç kaynağı (U-156), referans potansiyometre (U-157), takometre sinyalini toplayıp çıkarttığımız toplayıcı bloğu (U-152), kazancımızı ayarladığımız P inverter bloğu (U-153), referans geriliminden gelen voltajın bire bir kazançla akıma dönüşmesini sağlayan sürücü devresi (U-154) ve DA motorumuzdan (U-161) oluşmaktadır. Burada DA motorumuzun iki tane mili vardır. Bu millerden biri hız deneylerinde diğeri ise pozisyon deneylerinde kullanılmaktadır. Hız deneylerinde kullanılan mil yüksek rpm'lere çıkmaktayken pozisyon deneylerinde kullanılan mil ise nispeten çok daha yavaş dönmektedir.

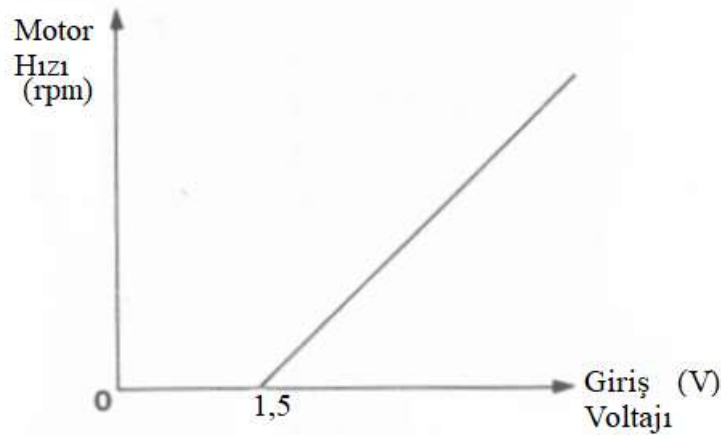
Kullanılan DA motorda kare dalga oluşturan bir Ncoder bulunmaktadır. Bu kare dalganın frekansına göre takometre tarafından bir voltaj üretilmekte ve üretilen bu voltaj toplama çıkarma bloğuna gönderilir. Burada referans voltajımız ve takometreden gelen geri besleme sinyali olmak üzere iki tane voltaj değeri bulunmaktadır. Bu voltaj değerlerinin farkı alınarak bir hata sinyali elde edilmektedir. Hata sinyali, P kontrolöre gönderilerek belirlenen kazanç kadar yükseltilmesi sağlanarak sürücü devresine gönderilir.

Tezimizde açıklamasını yaptığımız deney seti sayesinde, analog ya da dijital olarak kullanılan haberleşme teknolojileri ve bu teknolojiye ait teknikler, ED Laboratory deney seti kullanılarak açıklamalarını yapacağımız otomatik kontrol uygulamalarının ana temaları üzerine kurulmuştur.

### 3.1. ED Laboratory Deney Seti Otomatik Kontrol Uygulamaları

#### 3.1.1. Motor Hız Ve Giriş Karakteristiği

Daha önce DA motorunu, elektriksel ve mekanik enerji arasındaki enerji dönüşümlerini yapan makine şeklinde tanımlamıştık. Burada DA motorunun en önemli iki kısmı alan sargısı ve armatür sargısıdır. Elektrik akımı bu iki sargının oluşturduğu manyetik alanlar arasında bir tork kuvveti oluşturmaktadır. ED Laboratory deney seti stator sargıları yerine sabit mıknatıslardan oluştuğu için bu mıknatıslar düzgün ve kalıcı bir manyetik akı oluştururlar. Motor hızı armatür sargılarına uygulanan gerilim sayesinde oluşmaktadır. Şekil 3.4' te deneysel çalışmamızda giriş voltajından kaynaklı motor hızına ait grafik görülmektedir.

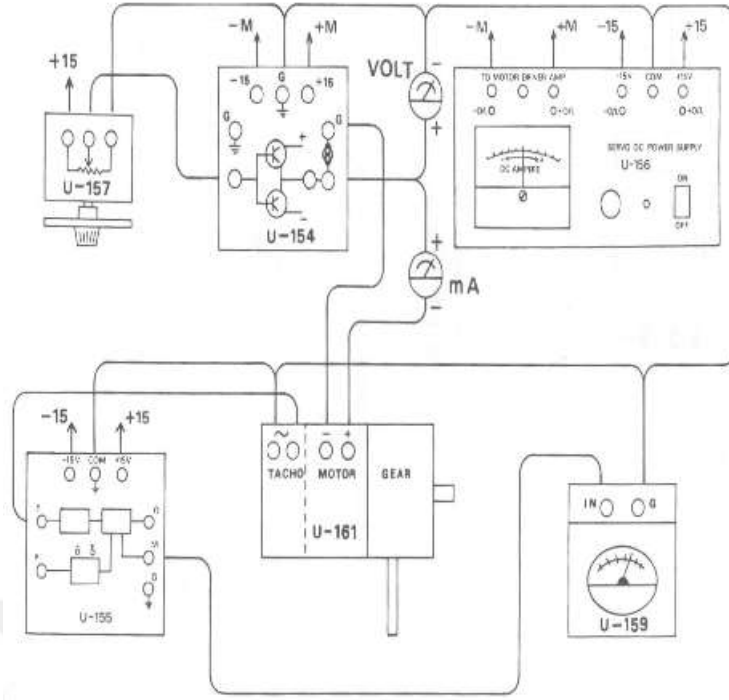


Şekil 3.4 Giriş voltajından kaynaklı motor hızı

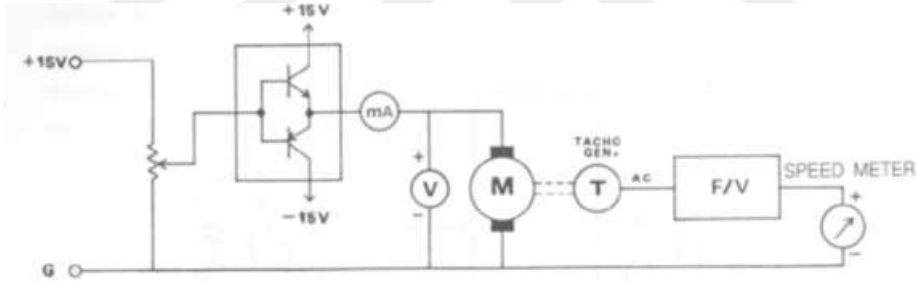
Şekil 3.4' ten de anlaşılacağı üzere ED Laboratory deney setinde 1,5 V noktasına kadar motorun çalışmasını engelleyici motorun fırça, dişli ya da hareketli parçalarından kaynaklı mekanik sürtünmeler bulunmaktadır. Burada ki 1,5 V noktası ise mekanik sürtünmeyi aşan ya da bu sürtünmeyi devre dışı bırakacak voltaj değeridir. Görüldüğü gibi bu voltaj değeri aşıldıktan sonra motora ait hız değeri armatür sargısına uygulanan voltaj ile doğrusal olacak bir şekilde artmaktadır. Bu artış devam ettikçe sistemde bir de zıt emk kuvveti motorun hızına karşı koyacak şekilde motor tarafından oluşturulmaktadır. Voltaj ve hız arasındaki bu doğrusal değişim motor iöerisindeki akının saturasyona ulaştığı bölgeye kadar bu şekilde devam etmekte sonrasında ise doğruol olmayan bir şekilde dönüşmektedir.

Deney setinde kullanılan DA motoru, armatür sargısına uygulanan voltajı kontrol etmek amacıyla U-151 kod nolu çift zayıflatıcı ve U-154 motor sürücü amplifikatörü birlikte sürülmektedir. Motorun tako çıkışı, U-155 F/V (Frekans/Voltaj) tako işaret yükseltici modülü sayesinde frekans/hız dönüşümüne tabi tutularak motor hız tespiti yapılmaktadır. Bu şekilde dönüşümü yapılan tako çıkışına karşılık gelen hız değeri U-159 takometresi kullanılarak r.p.m olarak görülebilmektedir. Bu amaçla tako çıkışında oluşan AC sinyal U-155 tako işaret yükseltisinde motorun hızıyla orantılı olacak şekilde DA sinyale dönüştürülmektedir.

Bu deneyde dikkat edilmesi gereken en önemli durum motorun doyum noktasında çalışmasından kaçınılması olacaktır. Çünkü doyuma ulaşan motorumuzun hızı, giriş voltajı artsa bile artmayacaktır. Aşağıda şekil bu deneyi yapabilmemiz için kullandığımız deney setinin bağlantı şemasını göstermektedir.



Şekil 3.5 Motor hız ve giriş karakteristiği deneyi için bağlantı şeması



Şekil 3.6 Motor hız ve giriş karakteristiği eşdeğer devre şeması

### 3.1.2. Motor Hız Ve Yük Karakteristiği

Sabit mıknatıslı DA motorlar genellikle düşük güçlerde çalışarak ideal bir güç verimi oluşturmaktadır. Bilindiği üzere sabit mıknatıslı DA motorlarda bulunan mıknatıslar motordaki manyetik akı ( $K\phi$ ) sağlamaktadırlar. Bu sebeple DA motorda giriş akımından ( $I_a$ ) kaynaklı bir tork ( $T$ ) kuvveti oluşmaktadır. Bununla birlikte motor hızı ( $\omega_m$ ) ile orantılı olacak şekilde zıt elektromotor kuvveti ( $E_a$ ) üretilmektedir. Oluşan bu parametreler aşağıdaki formüllerle tanımlanmaktadır.

$$K\phi = \text{sabit}$$

$$E_a = K\phi \omega_m$$

$$T = K\phi I_a$$

$K\phi$  : Kalıcı Mıknatısın Oluşturduğu Manyetik Akı

$E_a$ : Zıt Elektromotor Kuvvet (V)

$\omega_m$ : Motor Hızı (rad/sn)

T: Tork (N.m)

$I_a$ : Giriş Akımı (A)

Giriş voltajı ve hız, diğer parametreler ile aşağıdaki denklemlerle birleştirilebilmektedir.

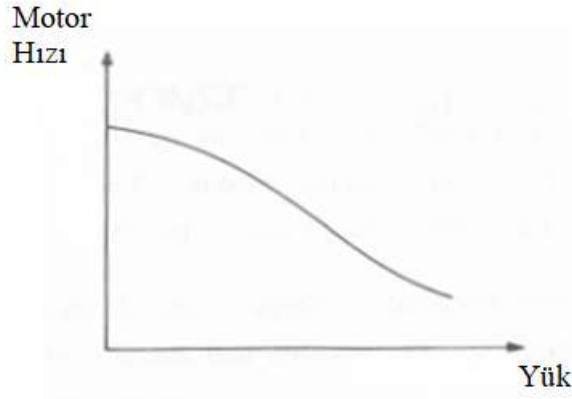
$$V_t = E_a + R_a I_a$$

$$\omega_m = \frac{V_t}{K\phi} - \frac{R_a T}{(K\phi)^2} \text{ (rad/sn)}$$

$V_t$ : Giriş Voltajı (V)

$R_a$ : Armatür Sargı Direnci ( $\Omega$ )

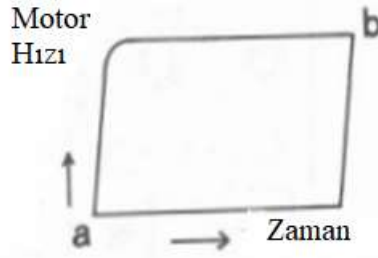
Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus motora verilen yük değeri arttıkça, akım değeri artmakta ve dolayısıyla motorun harcadığı güç artmaktadır. Motor hızı ve motora verilen yük arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 3.7' de görülmektedir.



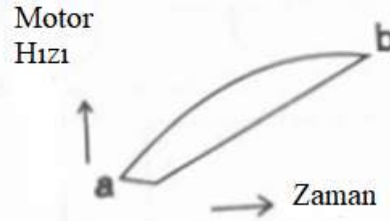
Şekil 3.7 Motor hızı ile motora uygulanan yük arasındaki ilişki

Bilindiği üzere bir motorun yükü artarsa motor hızı azalır ve giriş akımı artar. Dolayısıyla motordaki yükün çok fazla arttırılması, sargılarda yüksek akımların oluşmasına sebep olacaktır. Bu ise motorda ki voltaj ile akımın çarpımından doğacak gücün aşırı derecede yüksek olması anlamına gelmekte ve sonucunda motorun ısısının artacak olmasıyla motora zarar verilebilmektedir.



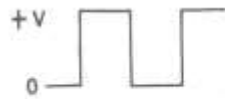


Şekil 3.10 Motor hızı-zaman (Küçük atalet)

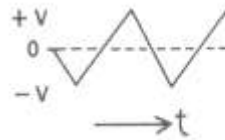


Şekil 3.11 Motor hızı-zaman (Büyük atalet)

Şekil 3.10 ve 3.11' de, “a” noktaları motorun harekete geçtiği andaki durumu, “b” noktaları ise motora ait giriş sinyalinin kesilmesi ile hızının azalmaya başladığı anlık durumu göstermektedir.

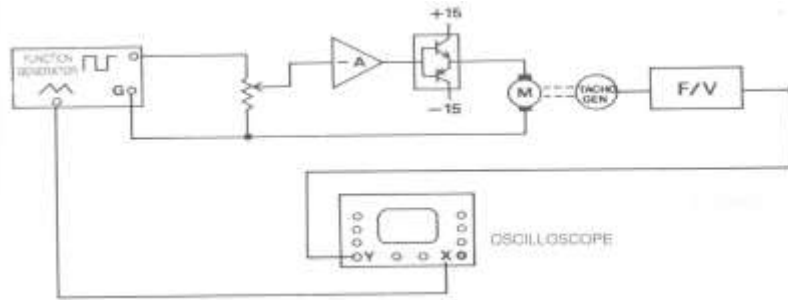


(a) Motor Input

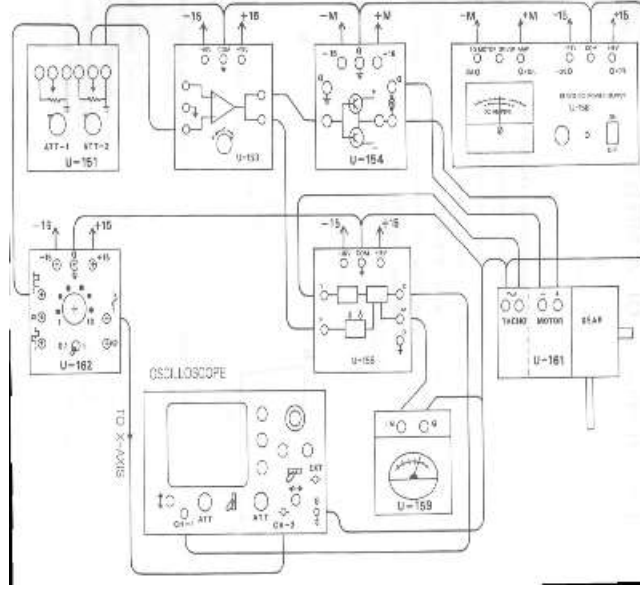


(b) Ramp Signal Applied to X-Input of an Oscilloscope

Şekil 3.12 Motor giriş ve yatay kontrol işlemler



Şekil 3.13 Motorun geçici durum cevabı için eşdeğer devre şeması

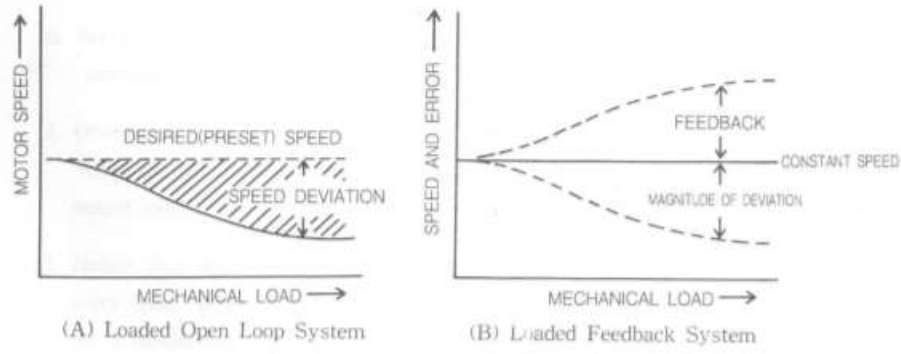


Şekil 3.14 Motorun geçici durum cevabı için bağlantı şeması

### 3.1.4. Kapalı Çevrim Motor Hız Kontrol Teknikleri

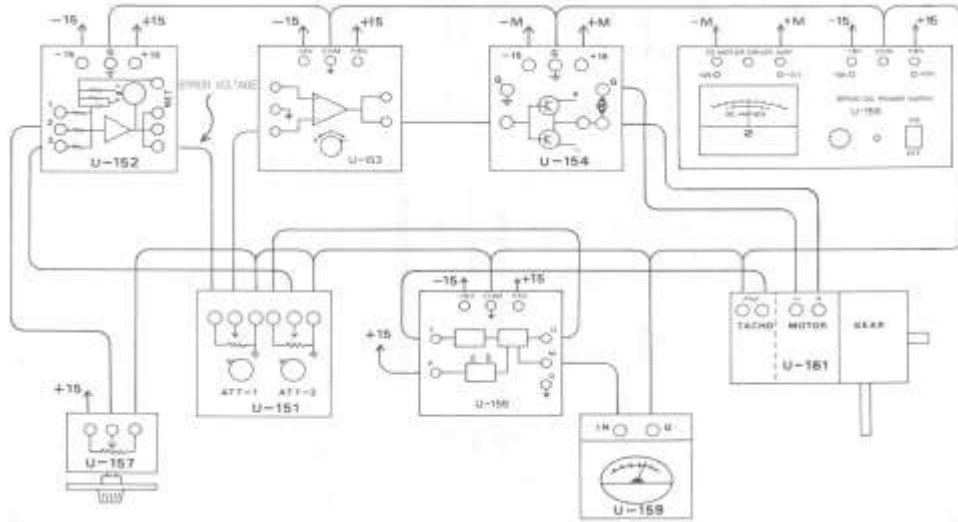
Genel olarak motor mekanik bir güç faktörü olarak kullanıldığında, yükteki değişikliklerden bağımsız olarak hızının sabit kalmasının sağlanması arzu edilir. Kapalı çevrim hız kontrol sistemi motor devrini ölçerek, öncesinde tespit edilen bir değerle kıyaslama yapar. Bu ise meydana gelen hata çıkışının düzeltilmesini sağlayan bir sistemdir. Oluşan bu hata sinyali anlık motor hızı ile önceden ayarlanmış hız arasında ki farkı telafi edecek şekilde kontrol devresine geri beslenir. Bu düzeltme işlemi hata sinyali azalarak sıfır yakın veya sıfır olunca sona ermektedir. Böylelikle son durumdaki anlık hız referans değeri ile belirlenen hız değeri ile aynı olmakta ve motorumuz yeni belirlenen (referans değeri ile) hız değerinde sabit hız ile çalışmasını sürdürmektedir.

Bu ve önceki deneyde deney setimizle yapılan uygulamalar, kapalı çevrim hız kontrolü ile kıyasladığında, açık çevrim sistemler olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3.15' te açık çevrim ile kapalı çevrim sistemlerinin Hız-Yük karakteristiklerindeki farklılıklar gösterilmektedir.

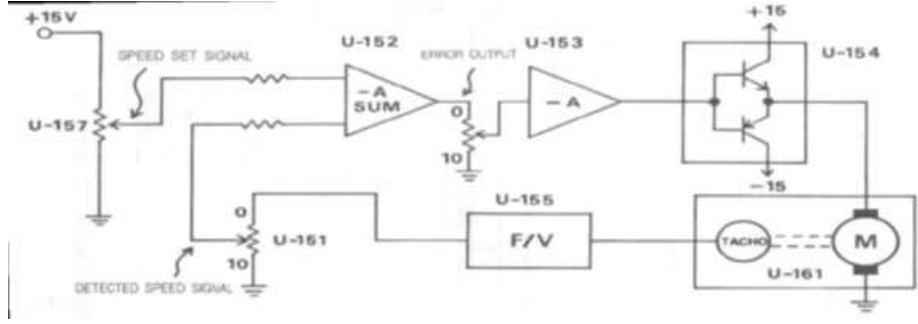


Şekil 3.15 Motor Yük/Hız Karakteristikleri

Şekil 3.15' te ki grafiklere baktığımızda farklı yük değerlerinde motor hızının sabit olması durumunda kapalı çevrim sisteminin açık çevrim sisteme göre daha üstün olduğu anlaşılmaktadır. Kapalı döngü sisteminde önemli noktalardan biri, hata sinyalinin genliğinin motorun hareket etmeye başladığı voltaj değeri olan (daha önce Hız-Zaman grafiğinde 1.5 V noktası olarak gösterilen) voltaj değerini aşabilecek bir ön seviyeye taşımak olacaktır. Motorun girişine bir voltaj uygulanmasına rağmen sürtünmelerin etkisiyle daha hareket etmeye başlamadığı bu voltaj aralığına durağan bölge adı verilir. Bu nedenle, hata sinyali motor sürücünün (U-154) giriş kısmına gelmeden önce bu ön seviye noktasına taşınmalıdır.



Şekil 3.16 Kapalı çevrim motor hız kontrol teknikleri deneyi için bağlantı şeması

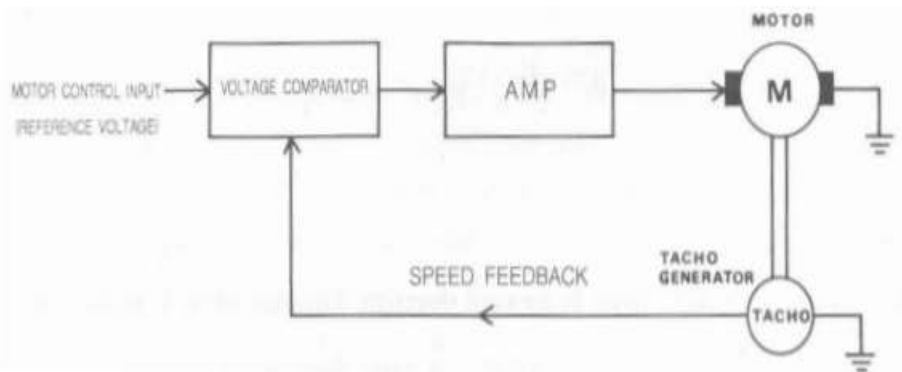


Şekil 3.17 Kapalı çevrim motor hız kontrol teknikleri deneyi için eşdeğer devre şeması

Kapalı çevrim bir sistemde, yük artışı ile motor hızındaki düşüş, motorun geçici durumdaki hızıyla orantılı şekilde meydana gelen bir hata sinyaline neden olmaktadır. Motorun düzgün bir şekilde çalışabilmesi için oluşan bu hata sinyalinin belirli sınırlar arasında kalması gerekmektedir. Genliği çok yüksek geri besleme sinyalleri, negatif geribesleme nedeni ile referans sinyalinde gereğinden daha fazla bir azaltıcı bir etkiye sebep olabilir. Bu nedenle, geri besleme sinyali sisteme sağlanan yük ve amplifikatör kazancı için uygun bir seviyede bırakılmalıdır.

### 3.1.5. Sistem Kazancı Ve Motor Hız Kontrolü

Şekil 3.18' de Kapalı Çevrim Hız Kontrol Sistemini ifade eden basit bir şekil görülmektedir. Bu şekle göre referans voltajı ya da motor hızıyla orantılı voltaj sinyalini oluşturan tako çıkışı, geri besleme ile karşılaştırıcının giriş kısmına uygulanmıştır. Burada önceden belirlenen referans sinyali ile motorun o andaki hızıyla orantılı geri besleme sinyali arasındaki fark hata sinyalini oluşturmaktadır. Hata sinyalinin bir süre sonra azalarak sabit bir değere gelmesi ise motor hızının sabit olmasını sağlamaktadır. Referans voltajının artırılması yerine amplifikatör kazancının azaltılması durumunda da aynı motor hızını elde edebilmekteyiz. Ancak bu durum geri besleme sinyal seviyesinin azalmasını sağlayacak ve dolayısıyla sistemin kontrol etkisini azaltacaktır.



Şekil 3.18 Basit bir kapalı çevrim hız kontrol devresi.

Bir DA Motorda, motorun hızı ve hata sinyali arasındaki ilişki aşağıdaki denklemlerde gösterilmektedir.

$$\Theta_0 = KE$$

$\Theta_0$  : Motor hızı

E: Hata sinyali

K: Sistem Kazancı

Hata sinyali aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$E = V_{ref} - K_g \Theta_0$$

$V_{ref}$  : Referans voltaj

$K_g \Theta_0$  : Tako üretici çıkışı

$$\Theta_0 = K(V_{ref} - K_g \Theta_0)$$

$$\Theta_0 = (K \times V_{ref} - K \times K_g \Theta_0)$$

$$1 = \frac{K \times V_{ref}}{\Theta_0} - K \times K_g$$

$$1 + K \times K_g = \frac{K \times V_{ref}}{\Theta_0}$$

$$\Theta_0 = \frac{K \times V_{ref}}{1 + K \times K_g}$$

K değerinin ileri yönde çok fazla olması durumunda denklemi aşağıdaki gibi sadeleştirebiliriz.

$$\Theta_0 = \frac{V_{ref}}{K_g}$$

Bu ifadeye göre seçilecek büyük bir  $K_g$  sabit değeri için motor hızının sadece  $V_{ref}$  sinyali ile doğrusal orantılı olarak değişeceği ve sistem kazancındaki değişimlerden az etkileneceği görülmektedir.

Benzer durumlar kapalı çevrimde oluşan hata sinyali içinde yapılabilmektedir.

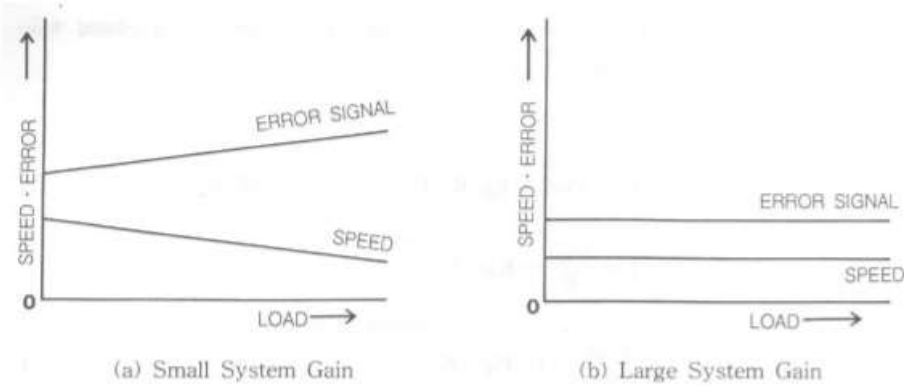
$$E = V_{\text{ref}} - K_g \times K \times E$$

$$1 = \frac{V_{\text{ref}}}{E} - K \times K_g$$

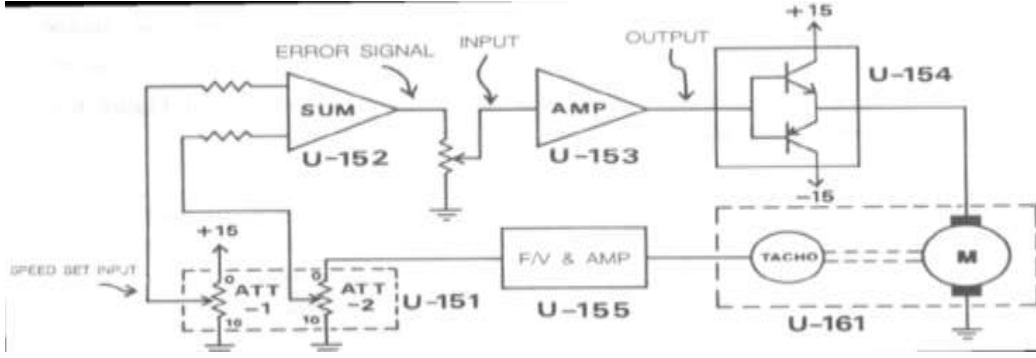
$$\frac{V_{\text{ref}}}{E} = 1 + K \times K_g$$

$$E = \frac{V_{\text{ref}}}{1 + K \times K_g}$$

Bu ifadeye göre  $K$  kazancının artırılmasıyla hata sinyalini azaltılabileceği gösterilmektedir. Bu şekilde basit bir sistemde elde edilen sistem kazancının yükseltilerek devam ettirilmesi, durağan bandının (deadband) düşük seviyelere kadar azaltılmasını sağlar. Buna ek olarak motor hızının yük değişikliklerine hassas olmasında sağlanmaktadır. Buradan da anlaşılacağı üzere sistem kazancının yüksek olması, istenilen bir durum olsa da sistemin kabul edeceği bir seviyede sınırlandırılması gerekmektedir. Çünkü kazanç değerinin sistemin kabul edebileceği seviyenin üzerine çıkmaya devam etmesi durumunda geçici durum karakteristiğinde kalitenin azalması gerçekleşecektir. Dolayısıyla motorda uyumsuz sapsmalara sebep olacaktır. Şekil 3.19' da farklı kazanç seviyelerinde yük, hata ve motor arasındaki durumlar görülmektedir.

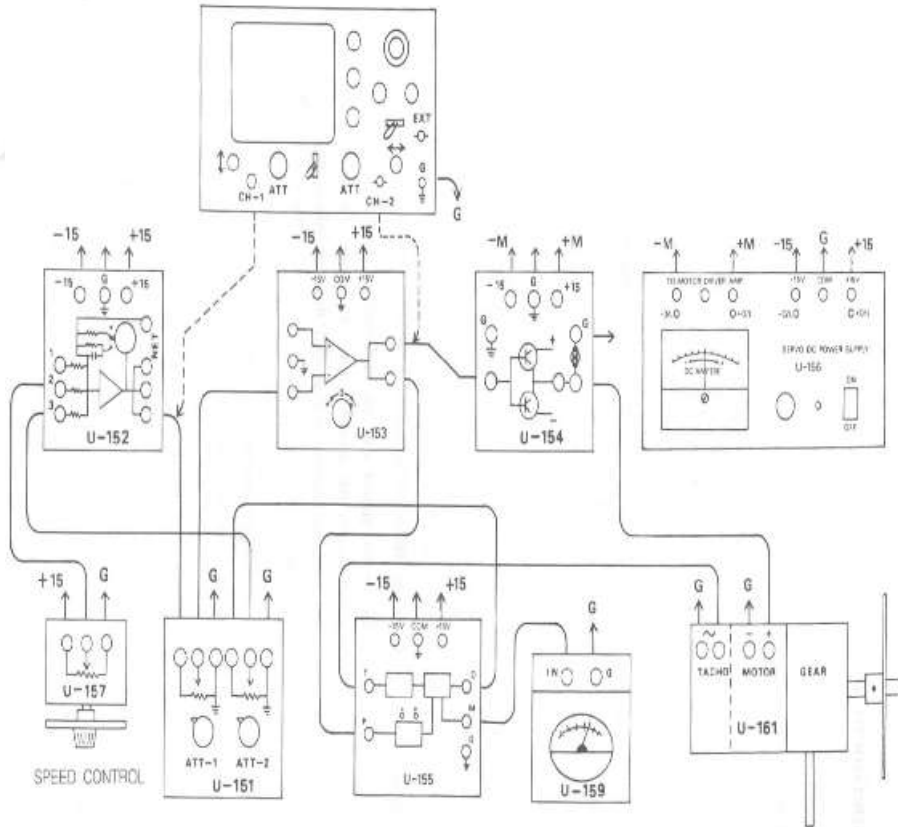


Şekil 3.19 Yük, hata ve motor hızı arasındaki ilişkiler.



Şekil 3.20 Sistem kazancı ve motor hız kontrolü eşdeğer devre şeması

Şekil 3.20' de görülen devre de U-155 kodlu tako sinyal yükseltecinin çıkışı, geri besleme sinyalinin sağlanabilmesi açısından uygun seviyelerde yeterince büyük olmalıdır. Bunun olmaması durumunda ise motorun dönmesi sabit hızda gerçekleşmeyecektir. Bununla birlikte U-153 numaralı ön yükseltecin düşük kazançta olması sistemin cevabını geciktirecektir. Bu ise durağan bant tesirinin daha olumsuz bir hal almasını sağlayarak, yüksek kazanç durumunda sistemi kararsızlaştıracaktır.



Şekil 3.21 Sistem kazancı ve motor hız kontrolü bağlantı şeması

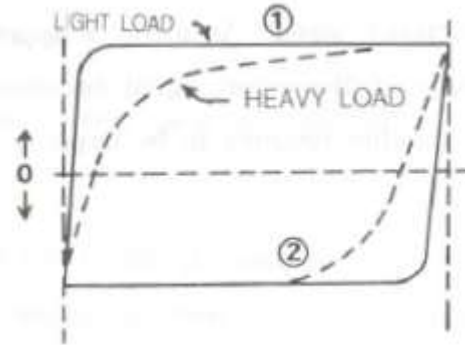
Kapalı döngülü bir kontrol sisteminde kazancın düşük olması, yüksek hata sinyali oluşmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla oluşan yüksek hata sinyali, motor hızının sabit bir

şekilde kontrol edilmesini zorlaştıracaktır. Sabit motor hızı ise referans hız ve motor hız sinyallerinin aynı olması durumunda gerçekleşmektedir. Motorun sabit hızda olmasının en olumlu tarafı hata sinyalinin düşük seviyelerde olmasını sağlamaktadır. Bu sebeple hata amplifikatörünün kazancının yüksek olması gerekmektedir.

### 3.1.6. İki Yönlü Motor Hız Kontrolü

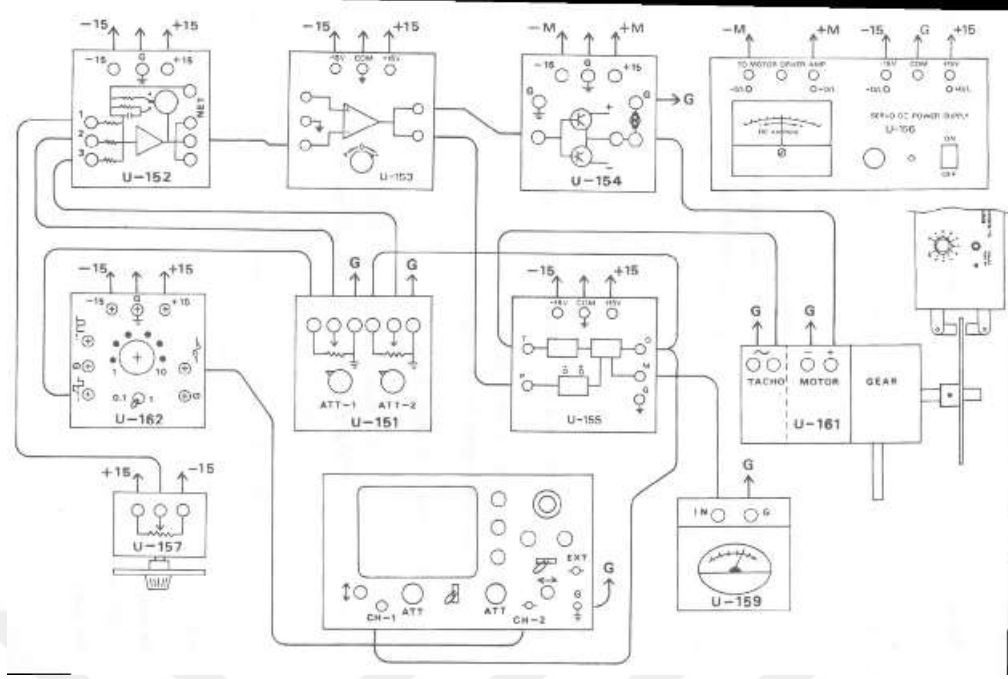
Kapalı çevrim DA motor hız kontrolü negatif geri besleme ile yapılan bir kontrol sistemidir. Böyle bir kontrol sisteminde referans sinyalinin işaretinin değişmemesi durumunda hız kontrolü tek yönlü olmaktadır. Ancak pratikte DA motor hızının kontrolünün ileri ve geri olmak üzere iki taraflı kontrol uygulamasının yapılması gerekmektedir. ED Laboratory deney setinde kullanmış olduğumuz DA motorun giriş polaritesi değiştiğinde yönü de değişmektedir. Dolayısıyla oluşan hata sinyaline ait polarite DA motorun giriş polaritesine değişebilmektedir. Yani DA motorun giriş polaritesi hangi yönlü ise hata sinyalinin de polaritesi buna uygun hale getirilebilmektedir.

Şekil 3.22' de sisteme bir kare dalga sinyali gönderdiğimizde farklı yüklerde motorun oluşturduğu cevaplar görülmektedir. “1” ile belirtilen eğri düşük ve yüksek yük altında DA motorun ileri yönlü olduğunu belirtir. “2” ile belirtilen eğri ise yine düşük ve yüksek yük altında oluşan ve ters yöne doğru verilen cevabını göstermektedir.



Şekil 3.22 İki yönlü bir motorun kare dalga giriş cevabı

Motorumuzun takometre çıkış noktası aslında bir AC sinyal üretmektedir. Dolayısıyla bu AC sinyal ile motora ait yön tespiti yapılamamaktadır. Bu nokta da yapılması gereken AC sinyalin DA sinyale dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüştürme işlemi için ise U-155 kodlu tako işaret yükselteci kullanılır. Böylelikle DA sinyale dönüşme işlemi gerçekleştirilerek giriş polaritesi doğru bir şekilde tespit edilmiş olunur.



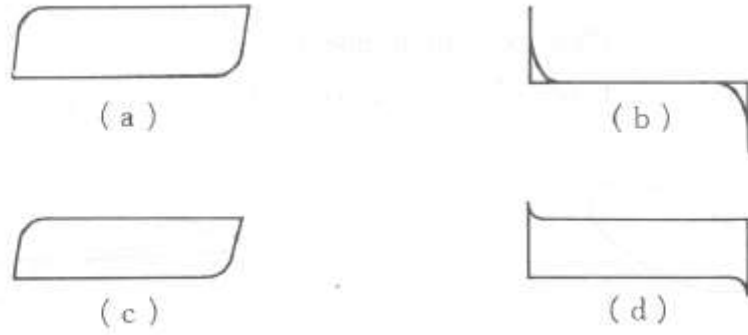
Şekil 3.23 İki yönlü motor hız kontrolü deneyi için bağlantı şeması

### 3.1.7. Motor Hız Kontrolü Verimi

Yukarıda açıklamış olduğumuz gibi, deney çalışmalarında kazanç değerinin yüksek seçilmesinin durağan bant tesirini en alt seviyeye düşürdüğü ve sisteme ait cevap süresini daha iyi seviyelere getirdiği belirtilmişti. Dolayısıyla kullanılan bu tarz sistemlerde zaman sabitleri oluşan gecikme üzerine eklenebilmektedir. Bazı durumlarda hata sinyalinin oluşum yolunda meydana gelebilecek gecikmeler, sistemin çıkış sinyalindeki değişimleri takip edememesine sebep olabilmektedir. Bu durum aşağıda gösterilen şekil 3.24' (b) de görülmektedir.

Kapalı Çevrim DA motor hız kontrol deneylerinde hız karakteristikleri laboratuvar ortamında osiloskop ekranında kolaylıkla görülebilmektedir. Bir takım motor hız kontrol karakteristikleri Şekil 3.24' te görülmektedir. Eğer kontrol sisteminin kazanç değeri yüksek ise oluşacak sisteme ait cevapta oldukça iyi olacaktır. Sistem kazancının yüksek olması nedeniyle alınan cevabın iyi olması Şekil 3.24 (a)' da görülmektedir. Şekil 3.24 (b)' de ise böyle bir sistemdeki hata sinyalinin şekli gösterilmektedir. Görüldüğü gibi hata sinyali sadece değişimin başlangıcında ve sonunda belirgindir. Şekil 3.24 (c)' de ise sistemin kazancı yeterli seviyede olmaması durumu gösterilmiştir. Bu durumda sistem çıkışının hata sinyaline verdiği cevap gecikmekte ve önceki çıkış değerinde önceki değerinden daha az bir seviyeye düşmektedir. Bu durumda hata sinyali dealacağı şekil şekil 3.24 (d)' de

görülmektedir. Görüldüğü gibi hata sinyali çok daha belirginleşmiş ve çalışma süresi boyunca yayılmıştır.



Şekil 3.24 Motor hız kontrol karakteristikleri

Hata sinyalinin oluşum yolunda oluşacak bir zaman gecikmesinin sistem çıkışına etkisi Şekil 3.25 (a) ve (b)' de gösterilmektedir. Şekillere bakarak hata sinyalinden kaynaklı bir gecikmenin sistemde salınımlara sebep olacağını açık bir şekilde ifade edebiliriz.

Bir DA motorun mekanik bir şekilde yüklenmesini, manyetik fren kullanarak sağlamaktayız. Motor yüksüz durumda kararlı hıza Şekil 3.26 (a)' da görüldüğü gibi daha hızlı ulaşacaktır. Şekil 3.26 (b)' de ise bu durumdaki hata sinyali görülmektedir. DA motoru, yüklü olursa yine kararlı hıza ulaşacaktır ama şekil 3.26 (c)' da görüldüğü gibi bu sefer daha yavaş bir şekilde bunu gerçekleştirecektir. Şekil 3.26 (d)' de ise bu durumda oluşan hata sinyali görülmektedir. Manyetik yükün belirli bir yük değerini geçmesinde ise sistemde bulunan güç kaynağı çok fazla yüklenmiş olacaktır.



Şekil 3.25 Hata kanalında zaman gecikmesi etkisi

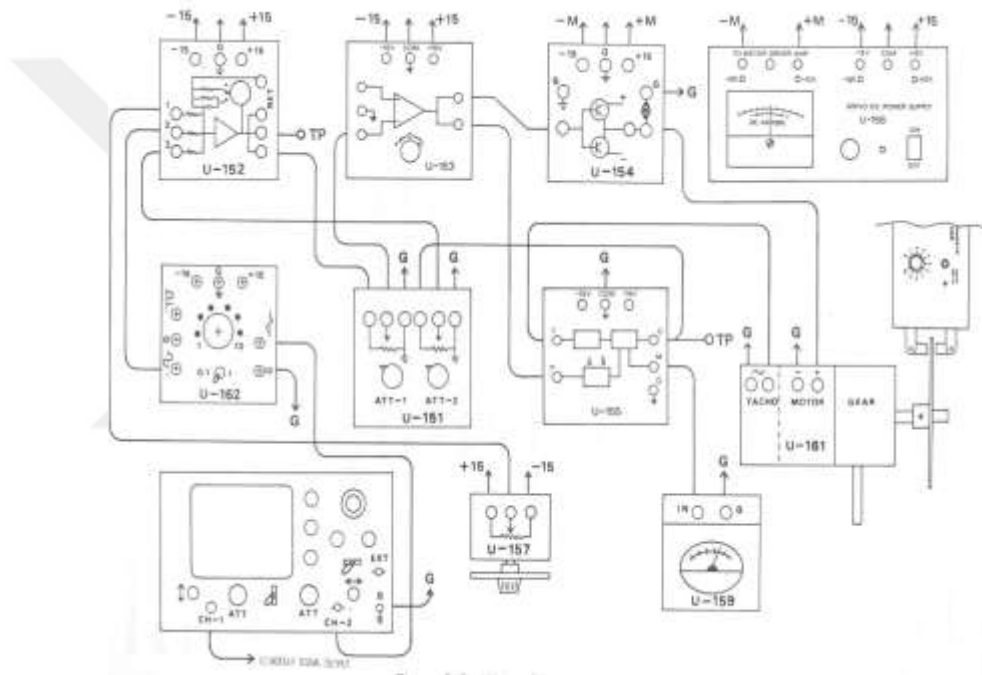


Şekil 3.26 Mekanik bir yüke karşı motorun cevabı

Sistemde hata sinyalinden dolayı oluşan gecikmenin U-152 modülü seçme düğmesinin 'b' yapılarak osiloskop ekranında görüntülenmesi Şekil 3.27 (a) ile (b)' de görülmektedir.



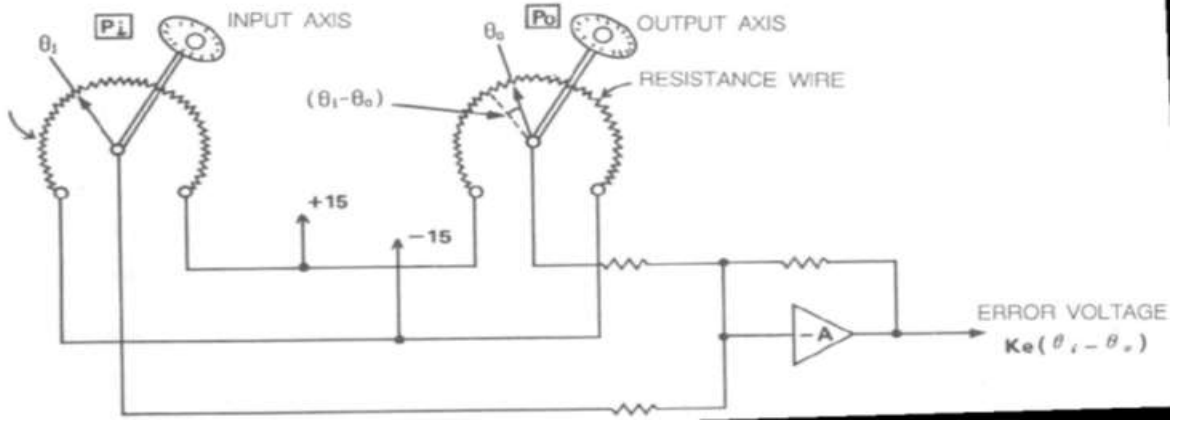
Şekil 3.27 Elektriksel bir gecikmenin etkisinin osiloskop görüntüsü



Şekil 3.28 Motor hız kontrolü verimi deneyi için bağlantı şeması

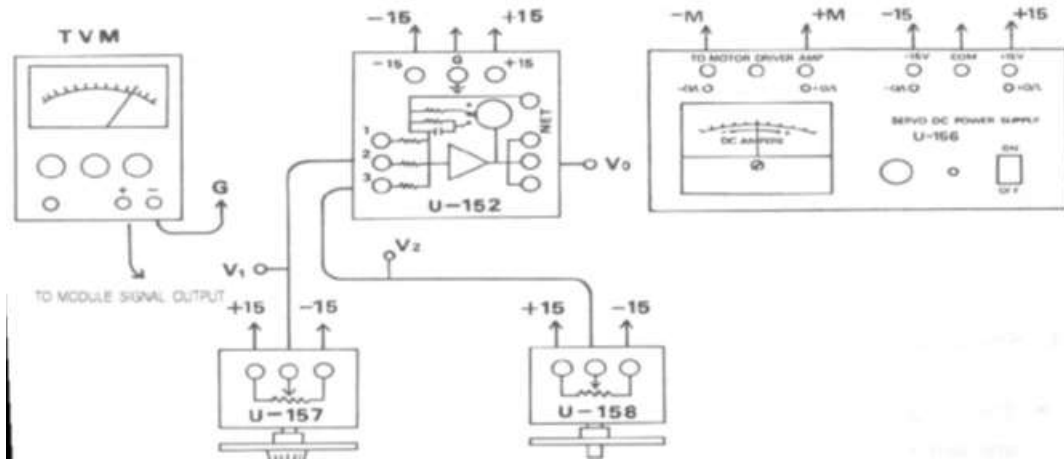
### 3.1.8. Pozisyon Kontrolünde Hata Sinyali

Açısal konum kontrol sisteminin ana işlevinin amacı, çıkış açısal konum sinyalinin, giriş açısal konum sinyalini tam bir şekilde takibini sağlamaya yöneliktir. Motorun kontrol işlevini yerine getirmek için; motor konum sinyali, referans veya giriş konum sinyali ile aynı olacağı noktaya kadar döndürülmelidir. Şekil 3.29' da pozisyon referans açının voltaja dönüştürülmesini sağlayan potansiyometrelerin bulunduğu devre şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.29 Potansiyometreler kullanılarak açısal hata sinyalini veren uygulama devresi

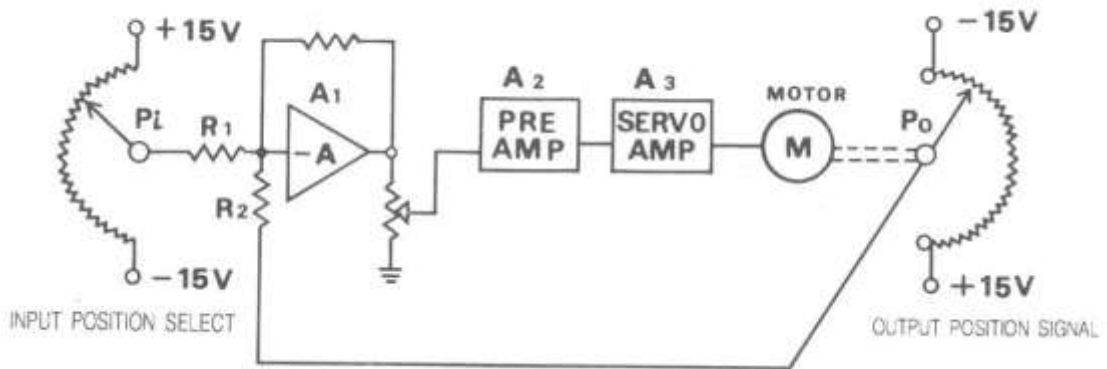
Şekildeki  $P_i$  girişteki ve  $P_o$  ise çıkıştaki potansiyometredir. Yükselteç (-A) eviren yükselteç olacak şekilde hazırlanmıştır.  $P_i$  ve  $P_o$ ' da geçerli olan polaritede bulunan değerler temel alındığında giriş ile çıkıştaki konumlarının aynı olmasından kaynaklı yükselteçteki çıkış değerinin sıfır olduğu açık bir şekilde görülmektedir.  $P_i$ ' nin açısal pozisyonu  $\theta_i$  olmakla birlikte  $P_o$ 'ın açısal pozisyon  $\theta_o$  olmaktadır. Bununla birlikte  $P_i$  ile  $P_o$  'dan kaynaklı bağıl açısal pozisyon hatası  $(\theta_i - \theta_o)$  şeklinde ifade edilmektedir. Oluşan bu hata değerinin yükselteç vasıtasıyla yükseltilecek elde edilen çıkış değeri  $K_e \times (\theta_i - \theta_o)$  şeklinde elde edilmektedir. Burada  $K_e$  dönüştürme katsayısıdır ve yükselteç ile elde edilen çıkış değerinin belirlenmesi ile tespit edilebilir. Oluşan hata sinyalinin değeri yükseltilecek DA motora verilmesiyle kapalı çevrim pozisyon kontrol sistemi gerçekleştirilebilir. DA motor hata sinyalinin etkisiyle çalışmaya başladığından ve dolayısıyla motora ait pozisyondan kaynaklı çıkışında elde edilen  $P_o$  ile bütünleşmesinden dolayı sistem kapalı çevrim kontrol sistemidir. Bu sistemin kapalı çevrim kontrol sistemi olması ve hatanın belirlenmesi ile motorun bu hataya göre hareket fonksiyonu hata sinyalinin sıfırlanmasına kadar sürecektir.



Şekil 3.30 Pozisyon kontrolünde hata sinyali deneyi için bağlantı şeması

### 3.1.9. Kapalı Çevrim Pozisyon Kontrolü

Kapalı döngü konum kontrol sisteminde çıkıştan gelen  $P_o$  konum bilgisi mekanik bir şekilde motor ile bağlantılı hale getirilmiştir. Bu bağlantı ise kontrol sisteminde geri bildirim oluşturur. Böylelikle  $P_i$  referans konum girişi, amplifikatör girişindeki geri besleme sinyali ile birleşecektir. Amplifikatör ise  $P_o$  ve  $P_i$ ' den gelen sinyallerden kaynaklı fark ile orantılı olacak şekilde motorun çalışmasını sağlayacaktır.  $P_o$  ve  $P_i$  konumlarının aynı olması durumunda amplifikatör çıkışı sıfır olacaktır.

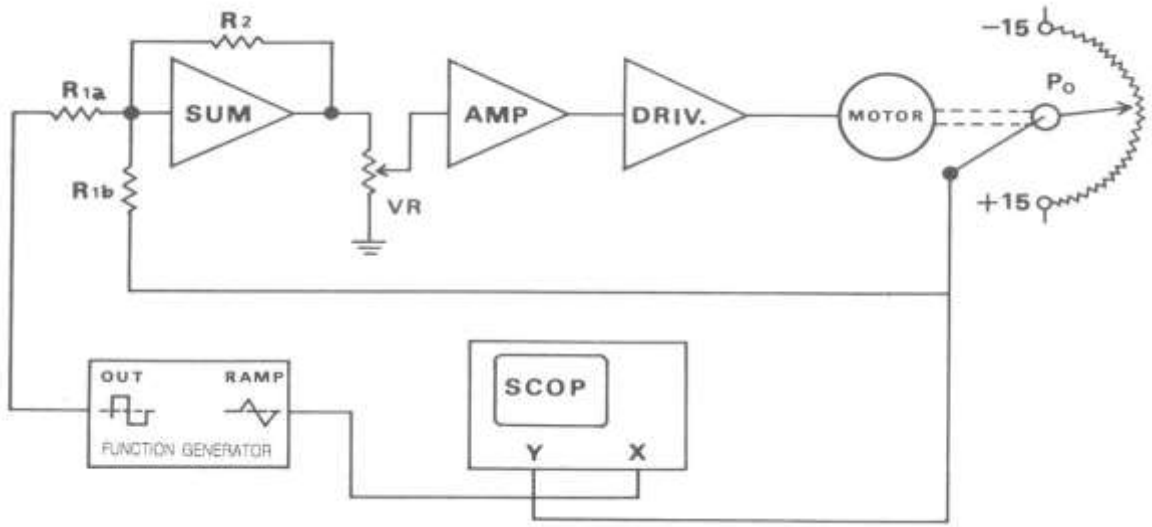


Şekil 3.31 Kapalı Çevrim Pozisyon Kontrolü

Şekil 3.31' de üç adet yükselteç görülmektedir. Hata sinyalinin oluşturulduğu A1, hata sinyalinin yükselteci A2 ve son olarak A3 ise M motoruna ait sürücü kısmıdır.  $P_i$ ,  $P_o$  konumuyla uzaklaştıkça  $P_i$  ve  $P_o$  gerilimlerinin farkı A1' in giriş kısmında ortaya çıkacak hata sinyalini oluşturacaktır. Bu şekilde oluşan hata sinyali A2 ve A3 ile çok fazla güçlendirilerek motorun,  $P_i$  ve  $P_o$  arasındaki farktan kaynaklı hata sinyalini düşürecek

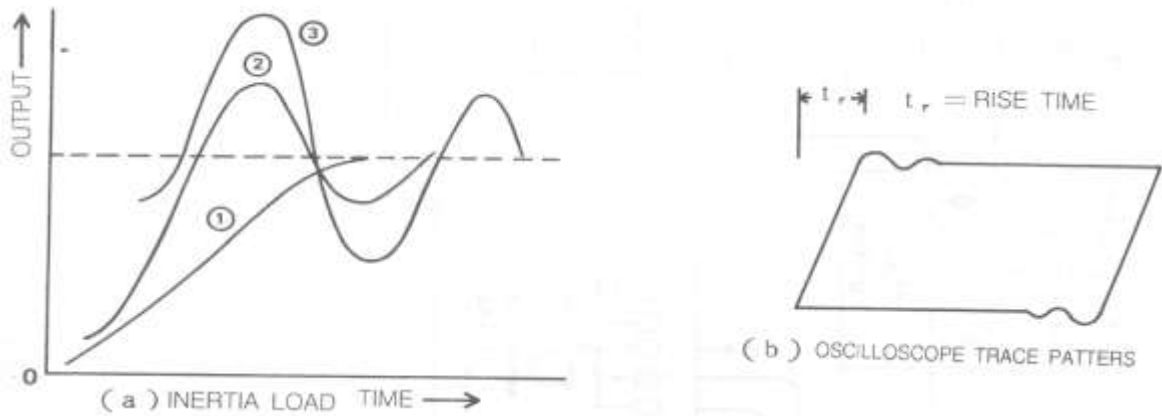


sefer de çıkışta olmasını istemeyen salınım veya osilasyonlar oluşabilmektedir. Böyle bir sisteme ait şema Şekil 3.33' de görülmektedir.

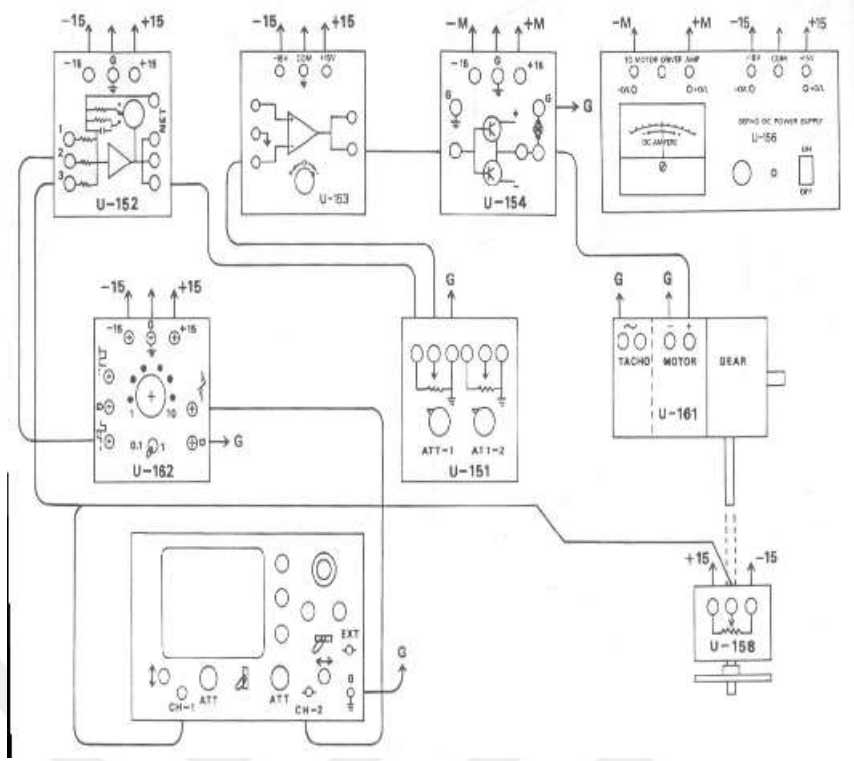


Şekil 3.33 Geçici durum cevabı uygulaması için sistem şeması

Şekil 3.33' de ki bu sistem şeması aynı zaman diliminde kare dalga ile rampa sinyalini sağlamaktadır. Rampa sinyali osiloskoba ait X kanal girişinde kullanılmaktadır. Po' ın çıkış sinyali Y kanalına verildiğinde Şekil 3.34' de ki gibi cevap eğrileri oluşabilmektedir. Burada en güzel sonuçlar kare dalganın frekans değerinin 1 Hz' den düşük olması durumlarında gerçekleşmektedir.



Şekil 3.34 Pozisyon kontrol sisteminin geçici durum cevabı



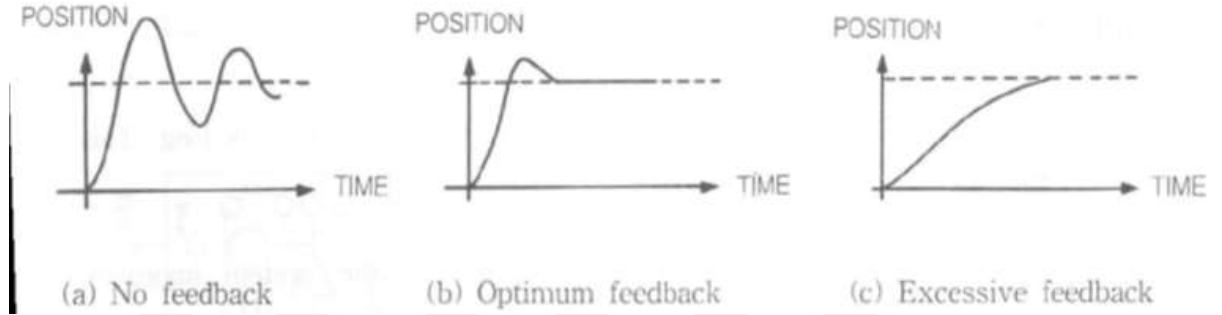
Şekil 3.35 Pozisyon kontrolünde geçici durum cevabı deneyi bağlantı şeması

Sistem kazancı düşük bir değerde ise Şekil 3.34' de ki artış süresi uzun olacaktır. Bu, sistem cevabının yavaş olduğu anlamına gelir. Sistem kazancını artırmak, sistem yanıtını daha iyi bir duruma getirir. Aynı zamanda, kazanç çok fazlaysa, bu çıkışta bir takım ani yükselmeler oluşmasında etkili olacaktır. Motora uygulanan mekanik yükte atalet durumu varsa, o zaman geçici sistem yanıtının yavaşlaması sağlanacaktır. Sinyallerin iletim yolunda gecikme olursa bu gecikme sistem yanıtında salınımların meydana gelmesine neden olabilir.

### 3.1.11. Hız Geri Beslemesi İle Pozisyon Kontrolü

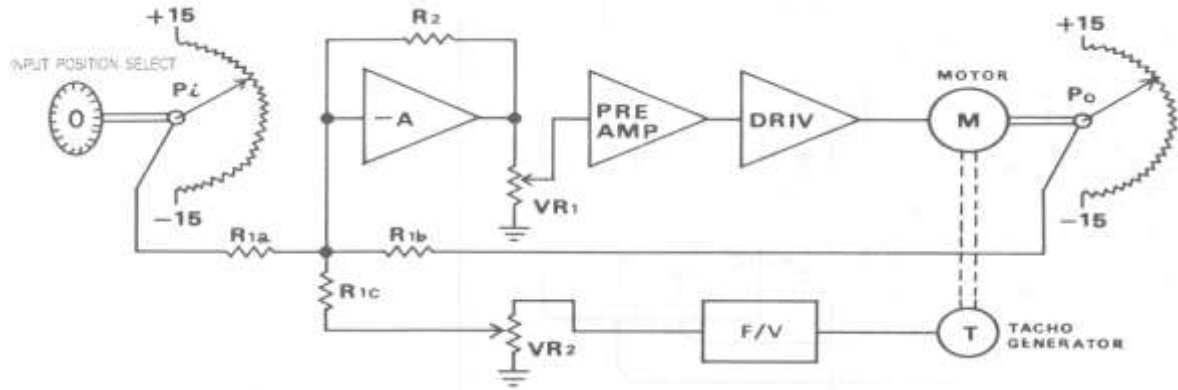
Pozisyon kontrol sisteminde bağıl hata sinyallerinden kaynaklı oluşan durağan bantı dediğimiz olumsuzlukları azaltmak amacıyla kazanç değerini arttırmaktayız. Sonuç olarak kapalı çevrim kontrol sisteminde hızlı değişiklikler gösteren ve olmasını istemediğimiz salınımlar şekilde bir sistem cevabı oluşacaktır. Oluşan bu salınım ya da sıçramaları azaltmak için ise mil hızına etkiyecek ve hız ile paralel değerlerde bir fren etkisinin sisteme etki etmesini sağlayabilmekteyiz. Ancak bu frenleme etkisi güzel sonuçlar verse de güç ihtiyacının artması, yük sisteminin hızlanmasını yavaşlatan bir sonucu da beraberinde getirmektedir.

Salınım ve sıçramalardan kurtulmanın en güzel yöntemlerinden biri de mevcut sisteme ekstra bir çevrim sistemini ilave etmektir. Hız kontrol döngüsü, tako üretici çıkışından motor hızıyla orantılı olacak bir negatif geri besleme sağlar. Takometre çıkışının sisteme ayrı bir negatif geri besleme sinyali olarak eklenmesi ile istenen ekstra çevrim elde edilebilir. Eklenen bu çevrim sisteminden kaynaklı oluşan sistem cevapları Şekil 3.36 (a), (b) ve (c)' de görülmektedir.



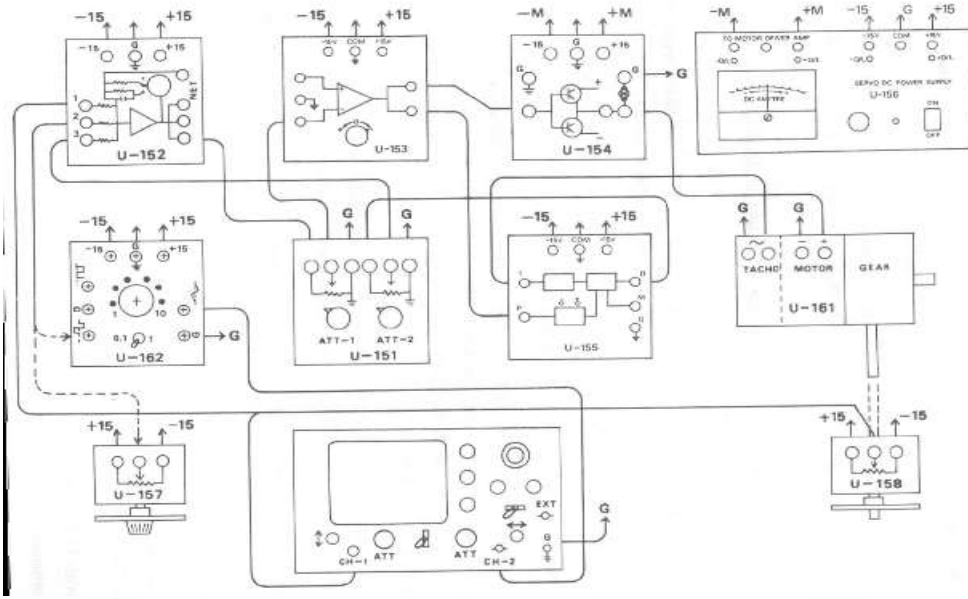
Şekil 3.36 Kapalı çevrim hız geri beslemesinin sistem cevabına etkisi

Pozisyon kontrol kapalı çevrimine hız geri beslemesinin eklenmesini gösteren sistem şeması şekil 3.37' de görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere tako generator dediğimiz takometre devresi VR<sub>2</sub>' yi üreterek ekstra bir çevrim sistemi sunmaktadır.



Şekil 3.37 Pozisyon kontrol kapalı çevrimine hız geri beslemesinin eklenmesi





Şekil 3.39 Kararsız Bir Pozisyon Kontrol Sisteminin Kararlı Hale Getirilmesi deneyi için bağlantı şeması

### 3.1.12.1. Konum kontrollü servo sistemle ilgili bir takım sorunlar;

- Hata yükselticisinin kazancı istenilen düzeyden yetersiz kalmışsa, sistem cevabının gecikmesi ile birlikte artan pozisyon hatası oluşmaktadır.
- Sistemde ki gecikmelerin artışı nedeniyle sistem çıkışında salınımlar, sistem yanıtının gecikmesi ile fazla miktarda konum hataları oluşur.
- Geçici zaman diliminde meydana gelen hızlı salınımlardan dolayı titreşimler meydana gelmektedir.
- Bir motora atalet yükü uygulandığında sistem yanıtı gecikecektir. Bununla birlikte geri besleme sinyalinde ki faz kayması sebebiyle sistem kararsız bir hale gelecektir.

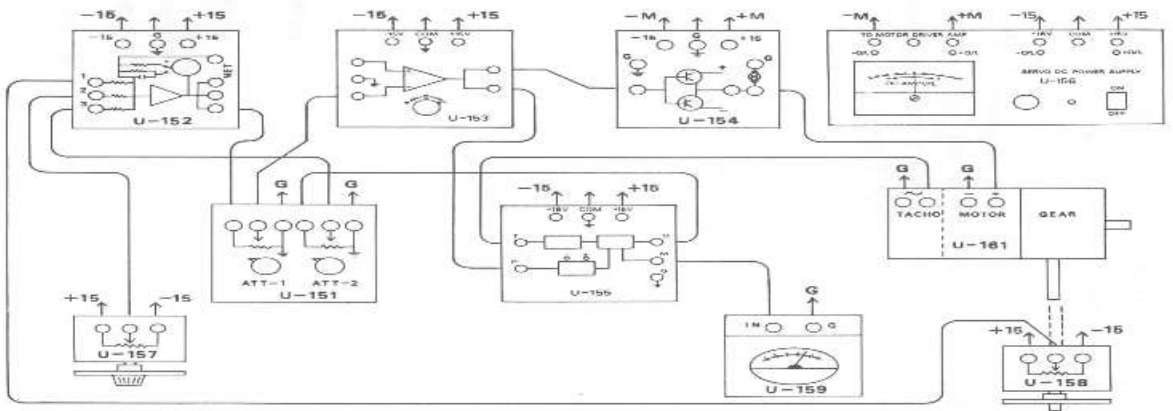
### 3.1.12.2. Kararlı konum kontrol işlemi için gereksinimler;

- Sistemin uygun bir kazanç sağlaması
- Elverişli bir geri beslemenin oluşması
- Atalet yüklerinden kaçınmak
- Sistemde ki gecikmelere sebep olan parametrelerin sayısının azaltılması

### 3.1.13. Pratik Bir Pozisyon Kontrol Sisteminin Kurulması

ED Laboratory deney setiyle yapabileceğimiz bu son kısım ise daha önce açıklamış olduğumuz uygulamalara ait bir sonuç anlamı taşımaktadır. Kullanışlı ve işleyen bir sistem bu kısımda oluşturularak kararlı bir sistemde olması gereken başlıca temel öğeler aşağıda sıralanmıştır:

- Sistem tarafından sağlanan kazancın çok fazla olmaması,
- Yaklaşık olarak ortalaması alınan geçici durum cevabının süresi arasında en ideal uygun değer durumunda sisteme ait düzenlemelerin yapılması,
- Sistem kazancının az olması durumlarında oluşan hata sinyalinin aşırı derecede artmasını önleme,
- Sistem tarafından sağlanan geçici durum cevabı, süresi ve gecikmeye sebep olan değişkenler,
- Atalet ile oluşan tork kuvvetinin DA motora olan tesiri,
- Kontrol sisteminin girişinde sağlanan sinyal ve geri besleme sinyalinin birbirleri ile bağlantılı fazların aynı olması durumunda oluşabilecek salınımlar



Şekil 3.40 Pratik Bir Pozisyon Kontrol Sisteminin Kurulması deneyi için bağlantı şeması

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

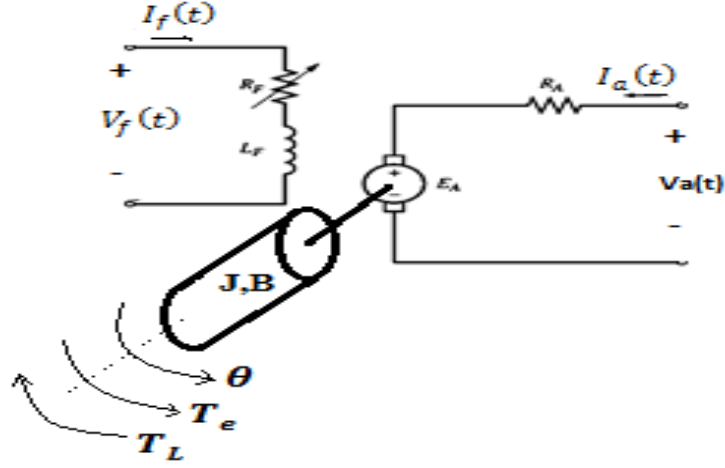
Deneysel çalışmalarımızda açık çevrim ve kapalı çevrim hız ve pozisyon kontrolü deneyleri yapıldı. Bu deneylerden yük altında kapalı çevrim hız kontrol deneyi seçilmiştir. Bu deney aynı zamanda Matlab/Simulink kullanılarak simülasyon ortamında da gerçekleştirildi. Simülasyon sonucu elde edilen verilerle deneysel ortamda elde edilen veriler karşılaştırılarak yapılan modellemelerin doğruluğu teyit edildi. Simülasyon için kapalı çevrim hız kontrol deneyinin seçilmesinin nedeni, bu deneyin deney setindeki en kapsamlı deneylerden birisi olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla bu deneyin simülasyon ortamında modellenmesi ve ED Laboratory deney setiyle elde edilen verilerle uyum göstermesi neticesinde diğer deneyler de rahat bir şekilde modellenebilecektir.

Yük altında kapalı çevrim hız kontrol deneyini simülasyon ortamında yapabilmek için öncelikle diferansiyel denklemlerden yola çıkarak motorun hem elektriksel tarafının hem de mekanik tarafının Laplace uzayındaki modellenmesi yapıldı. Daha sonra deney setindeki diğer bloklar içinde bu modelleme işlemi gerçekleştirildi. Elde edilen bu modeller kullanılarak hız kontrol deneyinin Matlab/Simulink simülasyonu oluşturuldu. Oluşturulan bu simülasyon dosyası çalıştırılarak simülasyon ortamında deney setimizdeki deneylere ait veriler elde edildi.

Simülasyon ortamında yapılan bu çalışmalardan sonra yük altında kapalı çevrim hız kontrol deneyi ile diğer otomatik kontrol laboratuvarı uygulamaları ED Laboratory deney setiyle deneysel olarak yapıldı. Daha sonra laboratuvar ve simülasyon ortamında elde edilen verilerin karşılaştırılması yapılarak, yapılan uygulamanın ve modellemenin doğruluğu gerçekleştirildi.

#### 4.1. Fırçalı DA Motor Teorisi

Fırçalı DA motor teorisi daha önce de anlatılmıştı. Bu teoriye göre serbest (ayrı) uyarımlı DA motorun eşdeğer devre şeması Şekil 4.1' de görülmektedir.



Şekil 4.1 Ayrı olarak uyarılmış bir fırçalı DA motorun eşdeğer devresi.

Bu motorun terminal özellikleri aşağıdaki denklemler şeklinde elde edildi.

$$V_a(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + E_b(t)$$

$$E_b(t) = K \phi(t) \omega(t)$$

$$\phi(t) = f(I_f(t))$$

$R_a$  = Bobin Direnci ( $\Omega$ )

$L_a$  = Bobin İndüktansı (H)

$K$  = Motor Sabiti (volts – sec/rad)

$\phi(t)$  = Makinedeki Akı (Weber)

Mekanik tarafta ise, rotor milinde üretilen tork ve mile etkiyen ataleti temsil eden denklemler aşağıdaki gibi elde edildi.

$$J \frac{dw(t)}{dt} + Bw(t) + T_L - T_e(t) = 0$$

$$T_e(t) = K\phi(t)I_a(t)$$

$$J = \text{Motor Ataleti (kg} \cdot \text{m}^2/\text{sec}^2)$$

$$B = \text{Sürtünme Katsayısı (N} \cdot \text{m} \cdot \text{sec)}$$

$$w = \text{Açısal Hız (rad/sec)}$$

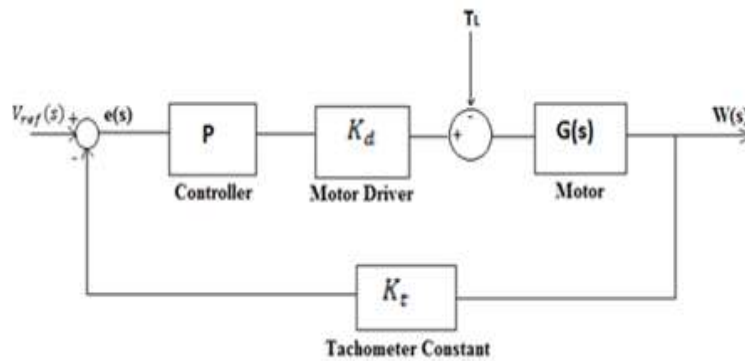
$$T_e = \text{Elektriksel Tork (Nm)}$$

$$T_L = \text{Yük Torku (Nm)}$$

Sabit mıknatıslı DA motorlarda makinedeki akı sabit mıknatıs tarafından sağlanır. Akı sabit olduğundan, bu tür motorların terminal özellikleri, ilgili denklemlerde  $K\phi(t)$  teriminin tek bir sabit,  $K_b$  ile değiştirilmesi dışında yukarıdaki ile aynıdır.

#### 4.2. Yük Altında Kapalı Çevrim DA Motor Hız Kontrol Sistemi

Bu çalışma için otomatik kontrol deneylerinde uygulanan kapalı çevrim DA motor hız kontrolü uygulaması yüklü durum için incelendi. Çalışma simülasyon ortamında gerçekleştirildi. Oluşturulan kapalı çevrim hız kontrol sisteminin blok diyagramı Şekil 4.2' de verilmiştir. Sistem, bir P tipi kontrolör, bir motor sürücüsü, motorun atalet ve viskoz sürtünmesini içeren bir DA motor modeli ve bir geri besleme yolundan oluşturuldu. Sistem, çeşitli yük koşulları altında çalışacak şekilde tasarlandı.



Şekil 4.2 Bir DA Motorun Kapalı Döngü Hız Kontrolünün Blok Şeması

Şekil 4.2' de DA motoru temsil eden  $G(s)$  transfer fonksiyonunu elde etmek için, Şekil 4.1' de verilen serbest (ayrı) uyarımlı DA motor modelindeki elektriksel ve mekaniksel kısımları birlikte çözümlenerek bir transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Aynı uyarılmış bir motorun terminal özelliklerinin elektriksel ve mekaniksel kısımlar için aşağıdaki gibi olduğu daha önce ifade edilmişti:

$$V_a(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + E_b(t)$$

(Elektriksel kısım)

$$J \frac{dw(t)}{dt} + Bw(t) + T_L - T_e(t) = 0$$

(Mekaniksel kısım)

Ayrıca  $E_b(t) = K\phi(t)w(t)$  ve  $T_e(t) = K\phi(t)I_a(t)$  şeklinde olduğunu biliyoruz.

Bu durumda DA motorunun Laplace uzayındaki transfer fonksiyonu elde edebilmek için önce yukarıda verilen denklemlere Laplace dönüşümü uygulanır:

$$V_a(s) = r_a I_a(s) + L_a s I_a(s) + E_b(s)$$

$$J s w(s) = T_e(s) - B w(s) - T_L(s)$$

Bu denklemlerden yola çıkarak;

$$V_a(s) - E_b(s) = I_a(s)(r_a + L_a s)$$

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - E_b(s)}{r_a + L_a s}$$

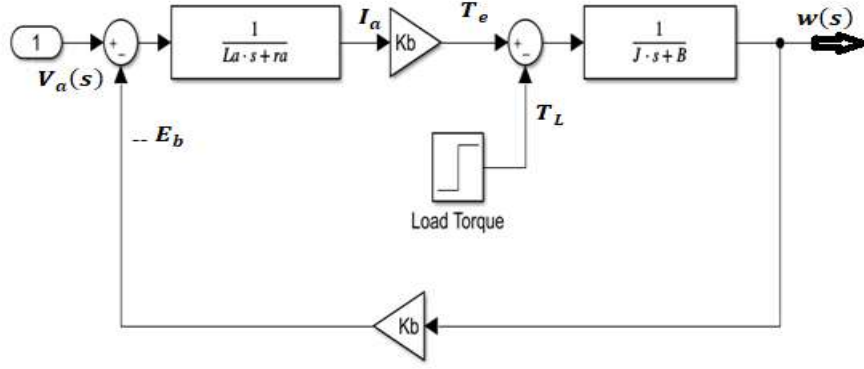
ve

$$J s w(s) + B w(s) = T_e(s) - T_L(s)$$

$$w(s)(J s + B) = T_e(s) - T_L(s)$$

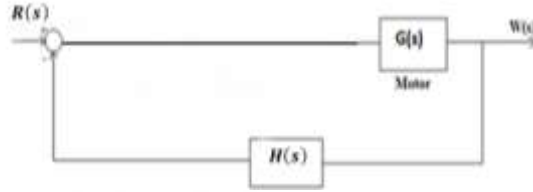
$$w(s) = \frac{T_e(s) - T_L(s)}{J s + B}$$

formülleri elde edilir. DA motoru temsil eden bu formüller Şekil 4.3' te blok diyagram üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Bir DA motorun simülasyon ortamında ki modelin blok şeması.

Yukarıdaki şekil sabit mıknatıslı bir DA motorun Laplace uzayındaki modellemesini göstermektedir. Görüldüğü gibi motor bloğu kendi içerisinde bir negatif geri besleme çevrimi içermektedir. Bu durumda DA motorun giriş gerilimi  $V_a(s)$  ile çıkış hızı  $w(s)$  arasındaki transfer fonksiyonu şu şekilde elde edilir (yük torku  $T_L$ 'nin sıfır olduğu kabul edilerek):



$$T(s) = \frac{w(s)}{R(s)}$$

$$T(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

$$G(s) = \frac{K}{(L_a s + R_a)(J s + B)}$$

$$T(s) = \frac{\frac{K}{(L_a s + R_a)(J s + B)}}{1 + K \left( \frac{K}{(L_a s + R_a)(J s + B)} \right)}$$

$$T(s) = \frac{K}{(L_a s + R_a)(J s + B) + K^2}$$

$$T(s) = \frac{\frac{K}{(L_a \cdot J)}}{s^2 + \frac{L_a B + J r_a}{(L_a \cdot J)} s + \frac{r_a B + K^2}{(L_a \cdot J)}}$$

olacak şekilde transfer fonksiyonumuz oluşturuldu.

Deneysel çalışmamızda, ED Laboratory DA motorunda ki parametreleri bulmak için deneysel ortamda ayrı bir çalışma yapıldı. Yukarıda bulunan  $T(s)$  transfer fonksiyonu Şekil 4.2'de verilen blok diyagramdaki  $G(s)$  motor bloğuna karşılık gelmektedir.  $T(s)$  fonksiyonundaki  $L_a$ ,  $r_a$ ,  $J$  ve  $B$  katsayılarının değerlerinin bulunması ve denkleme yazılması ve  $K_b$  değerinin 1 alınması ile deney setindeki DA motorun aşağıda verilen Laplace uzayındaki  $T(s)$  transfer fonksiyonu elde edilmektedir. Bu katsayıların bulunmasının detayları daha sonraki kısımlarda verilecektir.

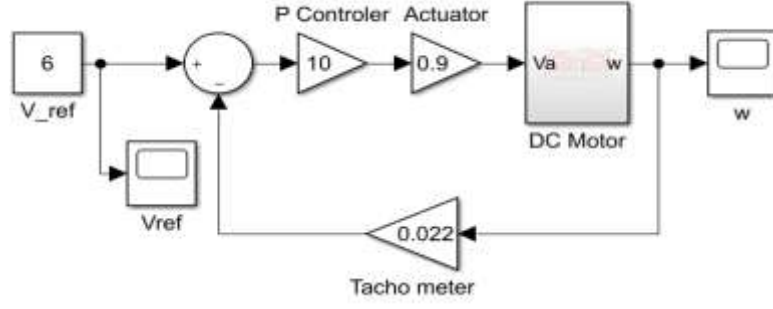
Tablo 1. Motor parametrelerinin değerleri

<b>B</b>	$R_a$	$L_a$	$K_b$	$J$	$K_t$
<i>(Nm · sec)</i>	<i>(Ω)</i>	<i>(H)</i>	<i>(V/(rad/sec))</i>	<i>(kg · m<sup>2</sup>/sec<sup>2</sup>)</i>	<i>(V/(rad/sec))</i>
<b>2e-5</b>	<b>4</b>	<b>5e-3</b>	<b>0.022</b>	<b>33e-5</b>	<b>0.021</b>

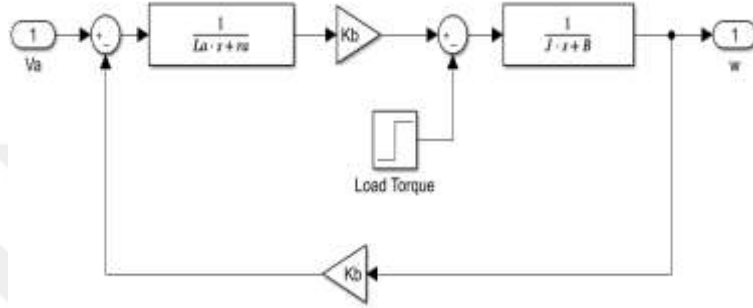
$$G(s) = \frac{13333}{s^2 + 800s + 341.81}$$

Yük torku manyetik bir kırılma ile sağlandı. Setteki motor sadece 4,5 Watt DA motor olduğu için başka yük kaynakları ile deneme yapılmadı. Bu deney seti sadece manyetik bir kesinti yapmak için uygundu. Manyetik kırılma tarafından sağlanan tork miktarı, deneysel olarak toplanan veriler üzerinde bazı sayısal hesaplamalardan elde edildi. Geri besleme yolu, bir takometre tarafından oluşturuldu ve blok diyagramda sabit bir kazanç olarak gösterildi.

Şekil 4.2' de verilen blok diyagramı simüle etmek için Matlab/Simulink kullanıldı. Simülasyon dosyası Şekil 4.4' te görülmektedir. Simülasyonda, P kontrolörünün ve motor sürücüsünün modelleri ayrı kazanç blokları olarak temsil edildi. Şekil 4.4 (b)'de ki DA motor bloğu, DA motorun elektriksel ve mekanik denklemlerinden oluşan modelini göstermektedir. Yük torku da bu blokta sisteme tanıtılmıştır. Motor bloğunun girişi uygulanan armatür gerilimi  $V_a$ ' dır. Çıkışı ise rad/sn cinsinden motor şaft hızı,  $w$  değeridir. Simülasyon sonrasında, motor armatür akımı  $I_a$ , şaft hızı  $w$ ,  $V_{ref}$  voltajı ve yük torku  $T_L$  değerleri grafik olarak gösterilmiştir.



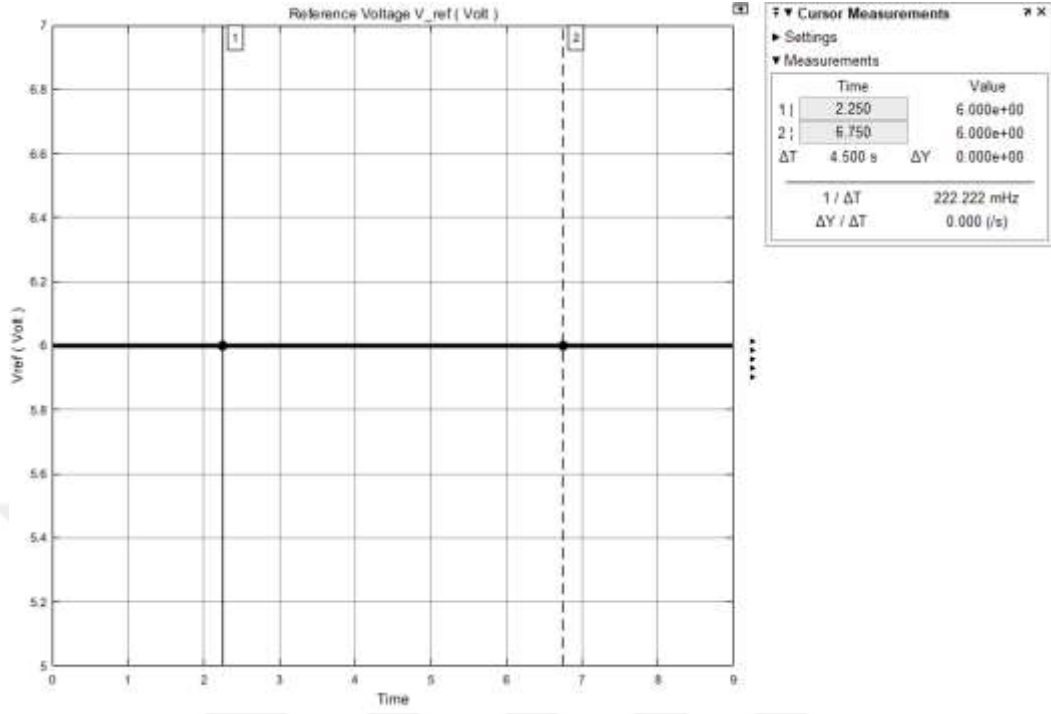
(a)



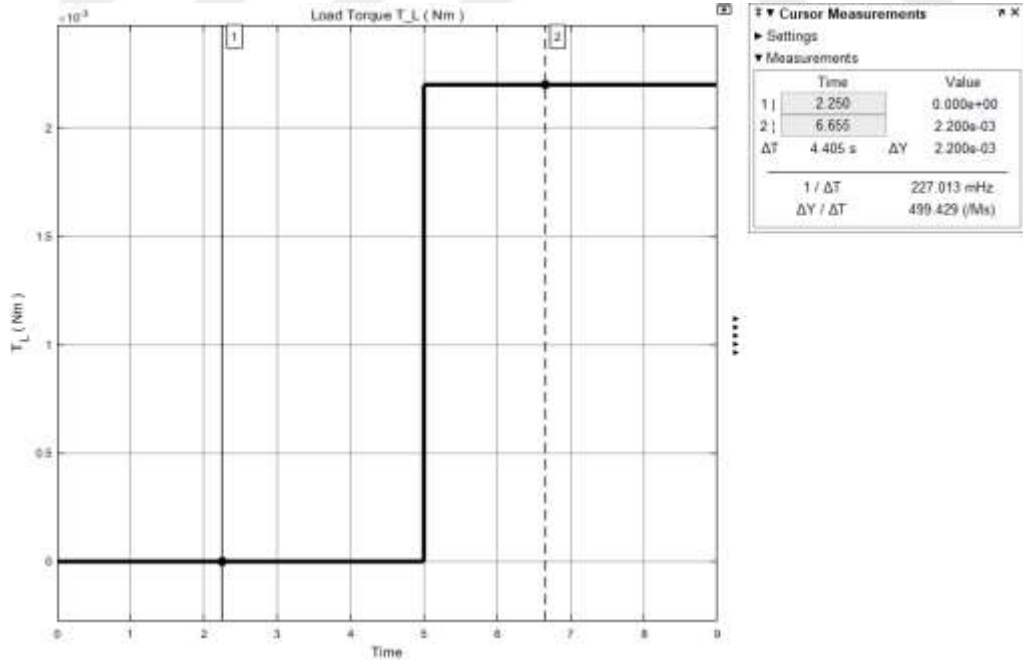
(b)

Şekil 4.4 (a) Kapalı çevrim DA motor hız kontrol sisteminin simulink modeli. (b) DA motor bloğunun modeli

Yüklü ve yüksüz durumlar için referans voltajımız 6 V olarak şekil 4.5' te görülmektedir.

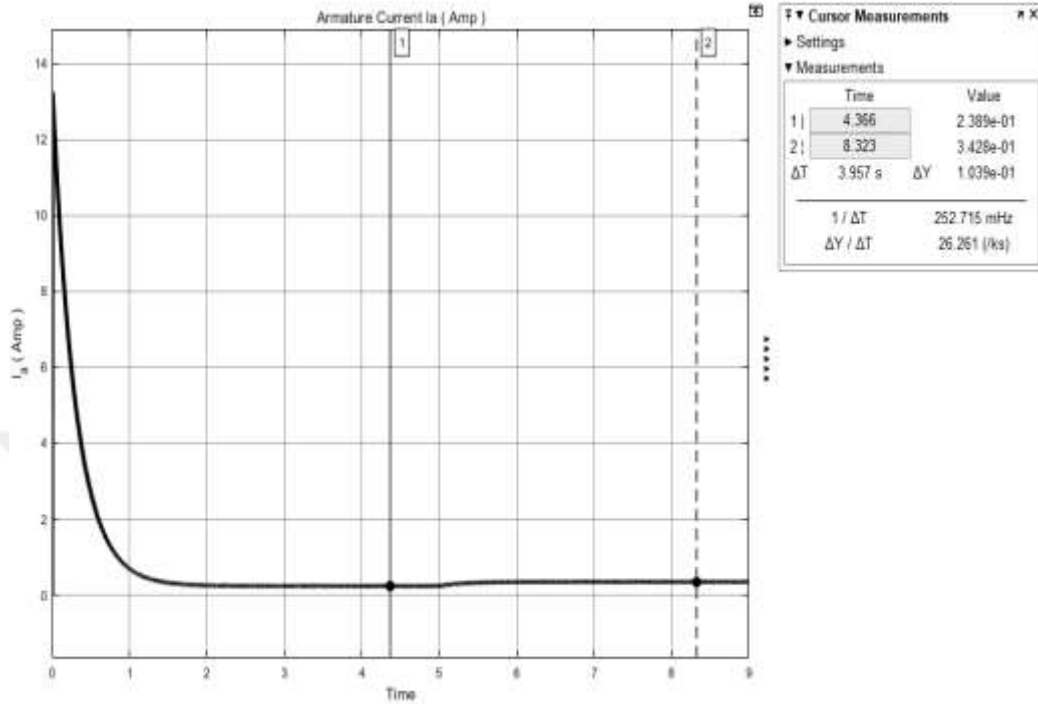


Şekil 4.5 Volt cinsinden motor referans voltajı için simülasyon sonuçları.



Şekil 4.6 Nm cinsinden Uygulanan Tork.

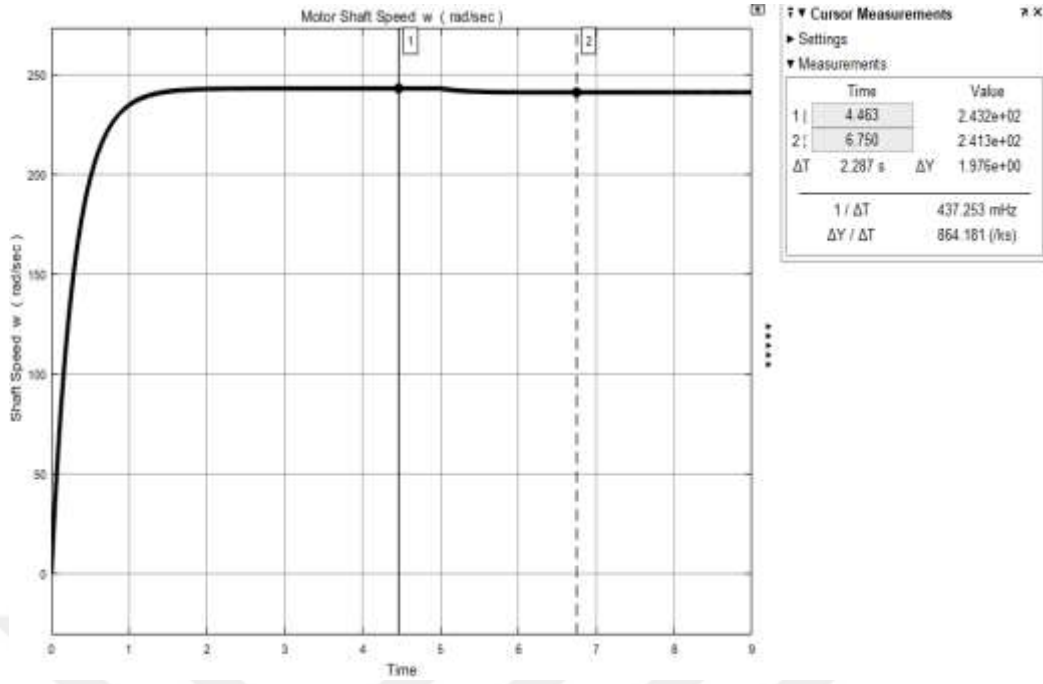
Şekil 4.6' ya göre 5.inci saniyeye kadar sisteme yük uygulanmayarak, sistem boşa çalıştırıldı. 5.inci saniyeden 9. saniyeye kadar  $2,2 \times (10)^{-3}$  Nm' lik bir yük momenti uygulandı.



Şekil 4.7 Amp cinsinden motor armatür akımı.

Şekil 4.7 motorun çektiği akımı göstermektedir. İlk anda motor dönmediği için çok yüksek bir akım görülmektedir. Tabi bu değer simülasyonda bu şekildedir. Deneysel olarak sürtünmelerin etkisiyle bu kadar yüksek bir akım çekilememektedir. Şekil 4.7' ye göre sistem ilk başlarda çok yüksek bir akım çekmekte ancak boşa çalışırken yaklaşık 2. saniyeden sonra sistem kararlı hale gelmektedir. Bunun sebebi ilk başlarda motor henüz dönmeye başlamadığı veya çok yavaş dönüyor olduğu durumlarda zıt-emk voltajı daha tam oluşmadığından armatür akımının çok yüksek değerler alıyor olmasıdır. Motor dönmeye başlayıp kararlı hız değerine yaklaştığında ise oluşan zıt-emk voltajının etkisiyle armatür akımı da azalarak kararlı haldeki değerini almaktadır.

Şekil 4.7' de sistem boşa çalışırken 4.5' nci saniyede ki değere karşılık gelen akım için 1 nolu scope görüntüsüne baktığımız da akım değerinin 238 mA olduğu görülmektedir. Daha sonra sisteme 5. saniyede  $2,2 \times 10^{-3}$  Nm' lik bir yük uyguladığımızda 5. saniye ile 6. saniye arasında geçici bir durum olduğu ve bu geçici durumdan sonra akım değerinin hemen hemen sabitlendiği görülmektedir. 8.inci saniyede motorun çekmiş olduğu armatür akımı 342 mA olarak tekrar kararlı hale gelmektedir.



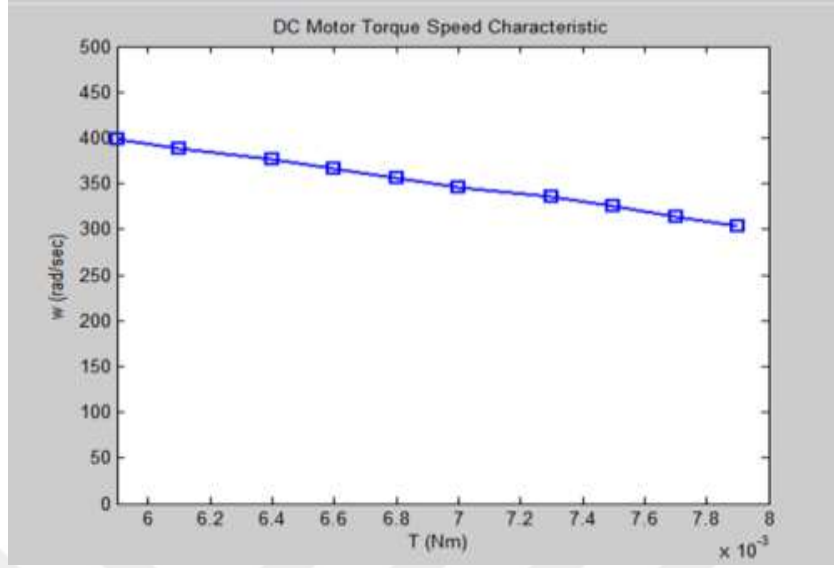
Şekil 4.8 Rad/sn cinsinden motor mili hızı.

Şekil 4.8' e göre motor hızımız 0 rad/sn değerinden başlamaktadır. Sonrasında ise hızlı bir şekilde yükselmektedir. 1 ile 2. saniye arasında kararlı bir hale gelmektedir. Hızın 4,5. saniyedeki değerinin 243 rad/sn civarında olduğu görülmektedir. Daha sonrasında motora 5. saniyede yük uygulanması sebebi ile 6. saniyeye kadar geçici bir durum oluşmaktadır. Oluşan bu geçici durumdan sonra ise hızın yine sabitlendiği görülmektedir. Şekle bakıldığında motor hızı değeri 6,75. saniye de 241 rad/sn olarak sabit değerini almaktadır.

Simülasyonda görüldüğü gibi motora negatif geri besleme uygulandığı durumda motor miline bağlı yükte meydana gelen artış motorun çektiği akımı 238 mA'den 342 mA'e çıkarmış ancak motor milinin hızı 243 rad/sn'den 241 rad/sn'ye azalmıştır. Bu negatif geri beslemeli kapalı çevrim bir döngünün motor hızı üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu sebeple de negatif geri besleme, değişken yük durumları olması halinde hızın sabit kalması istenen uygulamalarda çok yaygın olarak kullanılmaktadır.

Simülasyonu yapılan bu kapalı çevrim DA motor hız kontrolü uygulamasının ED Laboratory deney seti ile deneysel ortamda gerçekleştirilmesine geçmeden önce deney setindeki DA motorun tork-hız karakteristiği deneysel olarak elde edilmiştir. Bu karakteristik elde edilirken motora önce sabit bir referans voltajı uygulanarak sabit bir hızda dönmesi sağlanmıştır. Sonrasında ise sette bulunan manyetik fren kullanılarak motora 10 ayrı kademede frenleme uygulanmış ve bu frenlemeler sonrasında motor hızının

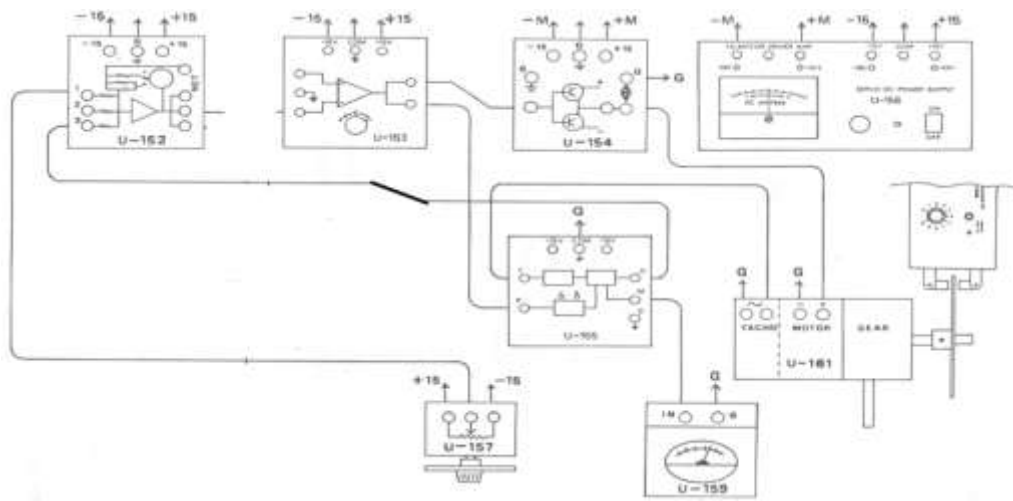
aldığı değerler kaydedilmiştir. Elde edilen bu tork-hız karakteristiği, Şekil 4.9' da verilmiştir.



Şekil 4.9 ED Laboratuvar deney kitinin tork hızı karakteristiği

Şekil 4.9' da görüldüğü gibi, ED Laboratory fırçalı DA motorunun tork-hız karakteristiği, beklendiği gibi normal bir fırçalı DA motorun karakteristiğine benzer çıkmıştır. Motorun shaftındaki tork, mil hızı arttıkça doğrusala yakın şekilde azalmaktadır.

Bu aşamadan sonra yukarıda simülasyonu yapılan çalışmanın deneysel kısmına geçilmiştir. Anlık görüntüsü Şekil 3.1' de ve Laplace uzayındaki blok diyagramı Şekil 4.3' te verilen kapalı çevrim hız kontrol sistemi, ED Laboratory DA motor seti ile deneysel olarak oluşturulmuştur. Deneysel sistemin blok şeması Şekil 4.10' da verilmiştir.



Şekil 4.10 Deney düzeneğinin blok şeması.

Deney seti kullanılarak oluşturulan sistem başarıyla çalıştırıldı. Motor milinin hızı, belirli bir referans voltajı için bazı geçişlerden sonra sabit bir değere yaklaştı. Daha önce simülasyonda gösterildiği gibi motor, kapalı çevrimde çalıştığında yük torku uygulandıktan sonra shaft hızı değerinin önemli ölçüde değişmediği gözlemlendi. Tablo 2, yüksüz durum ve motorun  $2,2 \times (10)^{-3}$  Nm sabit yük torku uygulandığı durum için motor armatür akımlarının ve shaft hızlarının değerlerini göstermektedir.

	<i>No Load</i>	<i>Loaded</i>
<i>V<sub>ref</sub> (Volt)</i>	6	6
<i>I<sub>a</sub> (Amp)</i>	0.275	0.350
<i>w (rad/sec)</i>	220	199

Tablo 2. Deneysel çalışmadan elde edilen referans voltajı, motor armatür akımı ve shaft hızı değerleri.

Tablo 2' de görüldüğü gibi yüksüz ve yüklü durumlarda 6V referans gerilimi için motor mil hızları 220 rad/sn ve 199 rad/sn' dir. Simülasyon sonuçlarından elde edilen ve karşılık gelen değerler 243 rad/sn ve 241 rad/sn' dir. Simüle edilen değerlere bakıldığında, bir negatif geri beslemeli motor hız kontrol uygulanmasında shaft hızının yaklaşık olarak sabit kaldığı veya hızdaki değişimlerin az olduğu bilgisi ile örtüşmektedir. Ancak bu değerler için deneysel olarak elde edilen veriler, yüksüz ve yüklü durumlar için hızda 21 rad/sn düşüş olduğunu göstermektedir. Bunun sebebine motor akımındaki değişimlere bakıldıktan sonra değinilecektir.

Deneysel çalışmada elde edilen motor armatür akımları, yüksüz ve yüklü durumlar için 275 mA ve 350 mA olarak bulunmuştur. Şekil 4.7' de karşılık gelen simüle edilmiş değerlerin 239 mA ve 342 mA olduğu gösterilmiştir. Görüldüğü gibi bu değerler nisbi olarak hızdaki farklardan daha yakın bir yaklaşıklıkla simülasyonda elde edilen akım değerlerini temsil etse de arada yine bir miktar hata payı bulunmaktadır.

Hem armatür akımı hem de mil hızı için deneysel ve simüle edilmiş değerler arasındaki farkların iki temel sebepten kaynaklandığını düşünmekteyiz. Birincisi simülasyonda kullanılan gerek DA motor ve gerekse diğer tüm elemanların ideal olduğu kabul edilmektedir. Ancak pratikte deney setinde kullanılan direnç, kondansatör, yükselteç ve benzeri devre elemanları ve DA motorun ideal olmayan devre elemanları ile gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu ise simülasyon ve deneysel sonuçlar arasında bir fark oluşmasına neden olmaktadır. İkinci ve daha önemli olduğunu düşündüğümüz sebep ise şudur. Deney seti ile yapılan pek çok deneylerde gözlemediğimiz bir olgu şu olmuştur. ED

Laboratuvarı deney setini kullanarak aynı deneyi tekrar ettiğimizde veya farklı zamanlarda yaptığımızda motor hızı ve armatür akımı değerlerinde çok bariz farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Pek çok deneyde gözlemlendiğimiz bu olgunun sebebinin DA motor ve/veya motor sürücü yükselteci bloğunun ısınma, devre elemanlarının parametre değişimi veya hassasiyeti gibi sebepleri ile devrelerdeki çalışma noktasının değişimlerinden kaynaklanıyor olabileceği düşünülmektedir.

### 4.3. Deneysel Hesaplamalar

Laboratuvar çalışmalarımızda, deney setiyle yüksüz ve yüklü durumlarda çeşitli referans gerilimleri ile elde edilen değerler tablo 3' te gösterilmektedir. Laboratuvar ortamında elde edilen bu değerler kullanılarak  $E_b(t) = K\Phi(t)\omega(t)$  ve  $T_e(t) = K\Phi(t)I_a(t)$  formülleri ile verilen zıt-emk katsayısı  $K\Phi$  ve motor milinde oluşan elektriksel moment  $T_e$  değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

	$V_{ref} = 1,5 \text{ V}$		$V_{ref} = 3 \text{ V}$		$V_{ref} = 4,5 \text{ V}$		$V_{ref} = 6 \text{ V}$		$V_{ref} = 7,5 \text{ V}$		$V_{ref} = 9 \text{ V}$	
	YÜKSÜZ	YÜKLÜ	YÜKSÜZ	YÜKLÜ	YÜKSÜZ	YÜKLÜ	YÜKSÜZ	YÜKLÜ	YÜKSÜZ	YÜKLÜ	YÜKSÜZ	YÜKLÜ
$I_a$ (mA)	175	200	225	250	250	300	275	325	300	370	375	475
$n$ (rpm)	100	50	700	650	1300	1100	1800	1750	2400	2150	2800	2450
$V_a$ (V)	1,5	1,5	3	3	4,5	4,5	6	6	7,5	7,5	9	9
$R_a$ (ohm)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
$L_a$ (mH)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Zıt-emk ve tork katsayılarının hesaplanması: ( $K\Phi = K_b = K_t$  olarak tanımlanmıştır )

$V_{ref} = 7,5 \text{ V}$  Yüksüz durum için  $K_b$  değerlerini bulacak olursak;

$$V_a(t) = R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + E_b(t) \quad \text{Bu formüle göre, kararlı durumda bobin kısa devre}$$

olmaktadır.

$$V_a = E_b + I_a \cdot R_a \quad \text{denkleminde}$$

$$7,5 = E_b + 4 \times (0,3)$$

$$E_b = 7,5 - 1,2 = 6,3 \text{ V}$$

$n$  = rpm olarak motor mili hız değeri

$\omega$  = rad/sn olarak motor mili hız değeri

$$E_b = K_b \cdot \omega \quad \text{ve} \quad \omega = \frac{(2\pi) \times n}{60}$$

$$\omega = 2400 \times \frac{(2\pi)}{60} = 251,2 \text{ rad/sn}$$

$$K_b = \frac{E_b}{\omega}$$

$$K_b = \frac{6,3}{251,2} = 0,0251 \quad (K_b = K_t)$$

$$T_e = K_t \cdot I_a$$

$$T_e = (0,0251) \times (0,3) = 0,00753 = 7,53 \times (10)^{-3} \text{ N.m}$$

$V_{ref} = 3 \text{ V}$  Yüklü durum için  $K_b$  değerlerini bulacak olursak;

$$V_a = E_b + I_a \cdot R_a \quad \text{denkleminde}$$

$$3 = 4 \times (0,25) + E_b$$

$$E_b = 3 - 1 = 2 \text{ V}$$

$$E_b = K_b \cdot \omega \quad \text{ve} \quad \omega = \frac{(2\pi) \times n}{60}$$

$$\omega = 650 \times \frac{(2\pi)}{60} = 68,07 \text{ rad/sn}$$

$$K_b = \frac{E_b}{\omega}$$

$$K_b = \frac{2}{68,07} = 0,0293 \quad (K_b = K_t)$$

$$T_e = K_t \cdot I_a$$

$$T_e = (0,0293) \times (0,25) = 0,0073 = 7,3 \times (10)^{-3} \text{ N.m}$$

Atalet momenti ve sürtünme katsayısının hesaplanması aşağıdaki denkleme göre yapılmaktadır.

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = T_e(t) - B\omega(t) - T_L$$

Yüksüz durumda bu denklem;

$$J \frac{dw(t)}{dt} = T_e(t) - Bw(t) \text{ şeklinde elde edildi.}$$

Atalet momentini bulmak için yüksüz çalışma durumunda ve sabit bir  $V_a$  geriliminde hızın birim zamandaki artış miktarına bakıldı. Elde edilen doğrunun eğimi kullanılarak  $J$  atalet momenti elde edildi.

Sürtünme katsayısı  $B'$  nin bulunması;

$$J \frac{dw(t)}{dt} = T_e(t) - Bw(t) \text{ eşitliği kararlı durumda } \frac{dw(t)}{dt} = 0 \text{ eder. Bu durumda;}$$

$$0 = T_e(t) - Bw(t) \text{ denkleminde;}$$

$$B = \frac{T_e(t)}{w(t)} \text{ eşitliği elde edildi.}$$

Dolayısıyla tablo 2' de yüksüz çalışma deneyinde  $V_a = 7,5 \text{ V}$  için;

$$B = \frac{T_e(t)}{w(t)} \text{ formülünde yukarıda elde ettiğimiz değerler yerine yazılırsa;}$$

$$B = \frac{7,53 \times (10)^{-3}}{251,2} = 2,99 \times (10)^{-5} \text{ sonucu elde edildi.}$$

Biraz beklendikten sonra deney tekrar edildi ve tablo 4' de ki sonuçlar alındı.

Tablo 4												
	$V_{ref} = 1,5 \text{ V}$		$V_{ref} = 3 \text{ V}$		$V_{ref} = 4,5 \text{ V}$		$V_{ref} = 6 \text{ V}$		$V_{ref} = 7,5 \text{ V}$		$V_{ref} = 9 \text{ V}$	
	YÜKSÜZ	YÜKLÜ	YÜKSÜZ	YÜKLÜ	YÜKSÜZ	YÜKLÜ	YÜKSÜZ	YÜKLÜ	YÜKSÜZ	YÜKLÜ	YÜKSÜZ	YÜKLÜ
$I_a$ (mA)	150	175	175	200	200	275	250	325	300	375	325	425
$n$ (rpm)	100	50	900	750	1300	1200	1900	1800	2350	2200	3000	2600
$V_a$ (V)	1,5	1,5	3	3	4,5	4,5	6	6	7,5	7,5	9	9
$R_a$ (ohm)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
$L_a$ (mH)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Tablo 4' te ki sonuçlar elde edildikten sonra deneyimiz 3. kez tekrar edilerek tablo 5' te ki sonuçlar elde edilmiştir.

	$V_{ref} = 1,5 \text{ V}$		$V_{ref} = 3 \text{ V}$		$V_{ref} = 4,5 \text{ V}$		$V_{ref} = 6 \text{ V}$		$V_{ref} = 7,5 \text{ V}$		$V_{ref} = 9 \text{ V}$	
	YÜKSÜZ	YÜKLÜ	YÜKSÜZ	YÜKLÜ	YÜKSÜZ	YÜKLÜ	YÜKSÜZ	YÜKLÜ	YÜKSÜZ	YÜKLÜ	YÜKSÜZ	YÜKLÜ
$I_a$ (mA)	150	200	180	220	225	275	250	300	375	425	350	425
$n$ (rpm)	75	50	750	675	1300	1200	1900	1750	2500	2000	3000	2700
$V_a$ (V)	1,5	1,5	3	3	4,5	4,5	6	6	7,5	7,5	9	9
$R_a$ (ohm)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
$L_a$ (mH)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Yukarıda yapmış olduğumuz hesaplamalar, tablolarda elde edilen herbir değer için aynı şekilde tekrar edilebilir.

Deneysel olarak bulduğumuz bu sonuçlar neticesinde rotor döndüğünde, makina içerisindeki sabit manyetik alandan dolayı armatür sargısında bir voltaj endüklenmektedir. Bu voltajı ise zıt-emk olarak adlandırıp  $E_b$  olarak göstermekteyiz. Dolayısıyla elde edilen sonuçlara göre zıt-emk, bulunan  $I_a$  akımlarının değerlerinden de anlaşılacağı üzere sınırlayıcı bir etken olmaktadır. Zıt-emk' nın bu şekilde  $I_a$  akımını sınırlamasıyla, başlangıçta DA motoru boşa çalışarak çok yüksek akım çekmekte ve bu yüksek akımdan dolayı motor yanabilmekteyken zıt-emk sayesinde bu olumsuz durumdan sistem kurtulabilmektedir. Yüksüz durumlarda elde edilen motor hızı ( $\omega$ ) yüklü duruma göre daha hızlı olmaktadır. Yüklü durumlarda motor hızı daha yavaş olmakla birlikte zıt-emk' da azalacaktır. Sonuçta  $V_a - E_b$  voltajı ne kadar yüksek olursa akım o kadar artmaktadır. Zıt-emk ( $E_b$ ) ne kadar az olursa;  $V_a - E_b$  ifadesine göre voltaj değeri artacağından daha çok akım oluşmaktadır. Motorun ürettiği momenti ise  $T_e = K_t \cdot I_a$  ifadesiyle artan akımla birlikte artış göstermektedir.

Genellikle motor miline bağlı yükler atalet momenti ve bir sürtünme katsayısıyla temsil edilmektedir. Dolayısıyla DA motorunun o an ki durumu için  $J$  ve  $B$  katsayıları, deneysel olarak bulduğumuz verilerden elde edilerek modellenmektedir. Motor

modelindeki diğler parametrelerden  $R_a'$  yı ohmmetre,  $L_a$  self endüktansı değeri ise LCR dediğimiz bir cihazla bulundu. Dolayısıyla bu parametreleri bulduktan sonra oluşan iki diferansiyel denklem kullanılarak DA motorunun hem zıt-emk katsayısını, hem bu DA motorunun ürettiği momenti, hem de rotorun ne kadar hıza ulaştığını bulabilmekteyiz. Dolayısıyla, DA motoruyla ilgili olarak istenilen birçok şeyi tabloda ki verileri kullanıp oluşan iki diferansiyel denklemi çözerek bulabilmekteyiz. ED Laboratory deney setinde bu sonuçları bulurken, kapalı çevrim hız kontrolünü negatif geri besleme ile oluşturup sistem kararlı hale getirilerek elde edildi. Pozitif geri besleme ile yapılmış olsaydı sistem kararsız bir hale gelecekti.

Deneysel olarak yapılan çalışmamızda her tablo değeri, deney bir süre beklendikten sonra elde edildi. Tablolar arasında verilerde meydana gelen hem armatür akımı hem de mil hızı için deneysel ve simüle edilmiş değerler arasındaki farklar, ED Laboratory deney setinde kullanılan DA motorun çalışma sırasındaki parametre ve sıcaklık değişimleri gibi koşullara çok duyarlı olduğunun gözlenmesinden kaynaklanmaktadır.

## 5. SONUÇ

Kullandığımız bu deney setiyle birçok otomatik kontrol uygulamalarına ait deneyler yapılabilmekte ancak bu deneyler simülasyon ortamında gerçekleştirilememektedir. ED Laboratory deney setinde de açık çevrim ve kapalı çevrim hız ve pozisyon kontrolü uygulamaları gibi birçok deneylerin simülasyon ortamında yapılarak elde edilen verileri, laboratuvar ortamında elde edilen veriler ile karşılaştırmak istedik. Dolayısıyla ED Laboratory deney seti öncelikle simülasyon ortamında oluşturuldu ve deney setindeki DA motor ve diğer modüllerin Laplace uzayındaki modellenmesi yapıldı. Daha sonra ise laboratuvar ortamında motor miline yüksüz ve yüklü durumların uygulandığı kapalı çevrim hız kontrol uygulaması gerçekleştirildi. DA motorla yük birbirine bağlı olduğundan elektriksel model ile mekaniksel model birlikte çözümlenerek, DA motorun Laplace uzayındaki modellenmesi yapıldı. Gerçekleştirdiğimiz bu çalışma ile ED Laboratory deney setinin daha iyi tanıtılması, deney seti ile otomatik kontrol uygulamalarına ait deneylerin yapılmasından dolayı kontrol konularının daha iyi anlaşılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda bu deney setinin öğrencilere laboratuvar uygulamalarında fayda sağlayacağı düşünülmekte olup ED Laboratory deney seti ile açık çevrim ve kapalı çevrim DA motor hız ve pozisyon kontrolünün daha iyi anlaşılması hedeflenmektedir.

## KAYNAKLAR

- Aydoğmuş, Ö. (2006). Pic Mikrodenetleyici Yardımı ile DC Motorun Hız Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 13-14
- Bal, G., (2001). Doğru Akım Makinaları ve Sürücüleri, Seçkin Yayınevi, pp. 205.
- Bayraktar, H.C. (2014). *Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Kontrolü*. Seminer Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bista, D. (2016). Understanding and design of an Arduino – based PID controller. (Master Thesis), Virginia Commonwealth University, Physics Department, ABD.
- Bodur, A. (2011). Kontrol Sistemleri Notları: Giriş (1. Kitap). TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, 344 s, Ankara.
- Carroll, J.J.Jr., Dawson, D.M. (1995). Integrator Back stepping Techniques for the Tracking Control of Permanent Magnet Brush DC Motors IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 31, No 2, pg 248-255.
- Chapman S.J., (2020). *Electric Machinery Fundamentals*. 5th edition, ISBN: 978-0-07-352954-7, McGraw-Hill Global Education Holding, New York, 680 pp.
- Chapman, S., (2005), “Electric Machinery Fundamentals”, 4th Edt, McGraw Hill Publication, New York, USA.
- Çırak, C.R. (2019). Kontrol Teorisi Uygulamaları ile Zaman Serisi Öngörülerinin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 32.
- Dorf, R.C., Bishop R.H. (2014). “Modern Control Systems”, 12th Edt, Pearson Education, UK.
- ED Laboratory, (1998). Telecommunication Experimental Manual with ED-4400B, ED CO., LTD.,78s
- Ertuğrul, İ., Ülkir, O. (2015). PIC 18F2550 mikrodenetleyici kullanarak DC Motorpozisyon ve Hız Kontrolü. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 74-76.
- Gezici, H. (2014). Pnömatik sistemlerde konum geri beslemesi yapılarak basınç ayarlaması ile hassas konum kontrolü. (Yüksek Lisans Tezi), Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı. Karabük.
- Hemati, N., Leu, M.C., A. (1992). Complete Model Characterization of Brushless DC Motors, IEEE Trans. on Ind. Applications, 28, 1, pp. 172-180.
- Johns, T.M., and Soong, W.L. (1996). Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet ac motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 43(2), 321-329.

- Kaçar, S., Boz, A.F., Arıcıoğlu, B., Tekin, H. (2017). PID Denetleyici Uygulamaları için yeni bir online deney seti tasarımı. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 34-46.
- Kingsley, C., Fitzgerald A.E.Jr. (2014). “Electric Machinery”, 7th Edt., McGraw Hill Publication, New York, USA.
- Laughton, M.A. and Warne D.F. Editor (2003). *Electrical Engineering Reference Book*. 16th edition, ISBN: 0-7506-46373, Elsevier Science, London, 1488 pp.
- Nasar, S.A. (1981). *Electric Machines and Electromechanics*, Schaum’s Outline Series, pp. 63
- Orçan, İ., Salihmuhsin M. (2017). Model Verification for a Brushed DC Motor Running in Closed Loop with Speed Feedback, *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Science and Engineering*, Vol 20, Issue 2, 2017.
- Otomatik Kontrol Laboratuvarı ED-4400B Deney Seti Uygulamaları, K.Maraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Kahramanmaraş.
- Özel, E. (2009). PWM yöntemi ile DC motorun PC üzerinden kontrolü. (Yüksek Lisans Tezi). Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim dalı. Van.
- Şahin, Y., (2006). Scara tip bir robotun yörünge kontrolünde PID kontrol Uygulaması. (Yüksek Lisans Tezi), Selçuk Üniversitesi, Makine Anabilim Dalı, Konya.
- Tekin, E., (2008). Kontrol sistemlerinde bozucuların giderilmesi yöntemleri. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği, İstanbul.
- Topal, M. (2019). Fırçasız Doğru Akım Motorunun Üç Farklı Yöntemle Hız Kontrolü ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Ankara*, 23-24.
- Xia, C.-L. (2012). *Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls* (First edition). Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 191,235.
- Yedamale, P. (2003). Brushless DC (BLDA) Motor Fundamentals. *Microchip, Application Note, AN885*, USA.
- Yedamale, P., (2003). Brushless DC (BLDA) Motor Fundamentals, Microchip Technology Inc., Application Notes, AN885, USA.
- Yıldız, T. (2009). *Fırçasız doğru akım motorlarının modellenmesi ve kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 1-11