



# HVDC ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNİN BULANIK MANTIKLA KONTROLÜ

Ercan ÖLÇER

**Anahtar Kelimeler :** HVDC, HVDC Modeli, Benzetişim, Doğrultucu, Evirici, Kontrol, Bulanık Mantık, PID

**Özet :** AA iletim sistemleri üretimlerinin kolay olması, motor karakteristiklerine uygunlukları ve genliklerinin transformatör yardımıyla kolayca değiştirilmesi nedeniyle elektrik kaynakların-da önemli bir yer tutarlar. HVDC iletimi, daha hafif ve daha ucuz yapılan üç yerine bir veya iki iletken, ancak karmaşık ve pahalı uç bağlantıları gerektirir. Ancak, enerjinin uzun mesafelere iletilmesinin gerektiği yerlerde, ya havai hat ya da kablolarla, veya iki farklı frekanstaki sistemlerin birleştirilmesinde, HVDC sistemleri ekonomik hale gelebilir. Bu ise dünya üzerinde bir çok yerde megavatlar mertebesinde güçte ve  $\pm 500$  kV veya daha büyük gerilimlerde çalışan HVDC sistemlerinin kurulmasına neden olmuştur.

Bu çalışmada da HVDC sistemleri gerek kuramsal gerekse deneysel açıdan incelenmiştir. İşletim esnasında ortaya çıkabilecek sorunlar incelenmiş ve bu sorunların giderilmesi için çözüm önerileri verilmiştir. Bu amaçla HVDC sisteminin laboratuvar modeli tristörlerle gerçekleştirilmiş ve yazılım geliştirilmiştir. Sistemin güç ve frekans kontrolü için bilgisayar tabanlı kontrol sistemi geliştirilmeye çalışılmıştır.

Yeni bir kontrol tekniği olan bulanık mantık yöntemleri sistem modelinin benzetimi yapılmış ve geleneksel kontrol yöntemlerine göre üstünlükleri irdelenmiştir.

# FUZZY CONTROL OF HVDC ENERGY TRANSMISSION SYSTEMS

Ercan ÖLÇER

**Keywords:** HVDC, HVDC Model, Simulation, Rectifier, Inverter, Control, Fuzzy Logic Control , PID Control

**Abstract:** AC transmission dominates in electricity supplies by virtue of ease motor characteristics generation and the ability to change voltage magnitudes using transformers. HVDC transmission uses a lighter and cheaper construction, with one or two conductors instead of three, but requires complex and expensive terminal arrangements. However, where power is to be transmitted over long distances, either overhead or with cables, or when a connection is required between systems operating at different frequencies, HVDC may become economic. This has led to the installation, a number of world wide HVDC links operating at powers of giga watts with voltages of  $\pm 500$  kV DC or higher.

The main objective of this research work is to investigate the performance of HVDC systems both theoretic and experimentally. Possible problems, which can be faced during the system operation, were studied and solutions for these problems were suggested. For this purpose a computer program was developed and a laboratory model of HVDC system was implemented by using thyristor. Microcomputer base control system was developed to control the power and the frequency of the system.

A simulation of the system using fuzzy logic control is designed. The Traditional method and fuzzy logic method are compared.

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Endüstride ve günlük yaşantımızda enerji ve enerji tasarrufu oldukça önemlidir. En yaygın enerji, elektrik enerjisidir. Elektrik enerjisinin üretimi ve iletimi genelde alternatif akım ve gerilim şeklinde yapılmaktadır. Fakat iletim hattında meydana gelen kayıplar da toplam üretim içerisinde hiçte küçümsenemeyecek kadar fazladır. Bazı üstünlükleri nedeniyle büyük güçlerin uzak mesafelere iletilmesinde yüksek gerilimli doğru akım kullanılması daha ekonomik olabilir. Ancak bu enerji iletim sistemi farklı bir teknoloji gerektirmektedir.

Bu sistemin incelenmesinde, AA/DA ve DA/AA dönüştürücüler için tristör kullanılarak laboratuvar modeli gerçekleştirilmiştir. Tristörlü laboratuvar modelinde tüm kontroller bilgisayar destekli kontrol kartı aracılığı ile yapılmıştır. Bu kontrol sistemi ile tristörlerin tetikleme açısı değiştirilmekte ve şebekedeki genlik düşmesi, frekans değişimi gibi olaylarda tristörlerin iletme ve kesime girmeleri gerekli şekilde ayarlanabilmektedir. Ayrıca sistemin bulanık mantık kontrol yöntemleri kullanılarak bilgisayarda benzetimi yapılmış ve PID kontrol gibi geleneksel kontrol yöntemlerine göre karşılaştırması yapılmıştır.

Gelecek yıllarda, enerji tasarrufu için Türkiye’de de HVDC enerji iletim sistemi, yüksek gerilimli alternatif akım sistemine uzun mesafeli iletimlerde karşılık olarak düşünülebilir. Ayrıca Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti’nin enerji gereksiniminin Türkiye’den HVDC denizaltı kablosu ile karşılanması da gündeme gelebilir.

Bu konudaki çalışmalarım sırasında her türlü yardımı sağlayan sayın tez hocam Prof. Dr. Atif URAL’a, ayrıca çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen sayın Arş. Gör. Bülent KARAGÖZ, Öğr. Gör. Ercüment KARAKAŞ ve Öğr. Gör. Engin ÖZDEMİR’e teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR .....	iv
İÇİNDEKİLER .....	v
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ .....	xvi
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
1.1. HVDC Enerji İletim Sistemlerinin Gelişimi .....	3
1.2. HVDC Enerji İletim Sisteminin Avantajları .....	5
1.3. HVDC Sisteminin Yaygın Olarak Kullanılmama Nedenleri .....	8
1.4. DA İletim Hatlarının Mahzurları.....	9
1.4.1. DA İletim Sisteminden İstenen Özellikler.....	10
1.4.2. Genelde Görülen Problemler .....	10
1.4.3. Kontrol Sistemini Etkileyen Durumlar .....	10
BÖLÜM 2. HVDC ENERJİ İLETİM SİSTEMİ.....	11
2.1. HVDC İletim Hatlarının Tipleri .....	11
2.1.1. Tek Kutuplu Hatlar .....	11
2.1.2. İki Kutuplu Hatlar .....	12
2.1.3. Aynı Kutuplu İkili Hatlar .....	12
2.2 HVDC İletim Sistemindeki Ana Birimler .....	13
2.2.1. Dönüştürücüler ve Eviriciler .....	14
2.2.2. Söndürme Reaktörleri.....	14
2.2.3. Harmonik Filtreler .....	15
2.2.4. Reaktif Güç Kaynağı .....	15
2.2.5. Elektrotlar .....	15
2.2.6. DA Hatlar .....	15
2.2.7. Devre Kesiciler .....	16

2.2.8. Transformatörler .....	16
2.2.9. Tristörler .....	16
2.3. HVDC Sisteminin Kullanılabilirliği .....	17
2.4. Çok Terminalli HVDC Sistemleri.....	18
2.4.1. ÇTDA Ağ Yapısı .....	19
2.4.2 ÇTDA Sistemlerinin Kontrolü .....	20
2.4.3 Paralel Bağlı Sistemler .....	20
2.4.4. Seri Bağlı Sistemler .....	22
<b>BÖLÜM 3. ÜÇ FAZLI DÖNÜŞTÜRÜCÜLER.....</b>	<b>24</b>
3.1 Üç Fazlı Orta Nokta Bağlantılı Doğrultucu .....	24
3.2 Üç Fazlı Köprü Bağlantılı Doğrultucu .....	26
3.2.1 Direnç Yüğü .....	28
3.2.2 Doğru Gerilimin Ortalama Değeri.....	29
3.3. Direnç-Endüktans Yüğü (RL) .....	31
3.3.1. Doğru Gerilimin Ortalama Değeri.....	32
3.4. Doğrultucularda Gerilim Düşümü.....	33
3.5. Üç Fazlı Eviriciler .....	34
3.5.1 Gerilim Dalga Biçimleri .....	35
3.5.2 Akım Dalga Biçimleri .....	36
3.5.3 Devrenin Çalışması .....	36
3.5.3.1. 120 Derece iletim durumu .....	39
3.5.3.2. 180 Derece iletim durumu .....	39
3.6. AA / DA Dönüştürücünün Benzetişimi .....	43
3.7 DA/AA Eviricinin Benzetişimi .....	50
3.8. HVDC Enerji İletim Sisteminin Benzetişimi .....	55
<b>BÖLÜM 4. HVDC SİSTEMİNİN KONTROLÜ .....</b>	<b>59</b>
4.1. Kontrolün Temel Prensipleri .....	59
4.2. Kontrol Seçim Kriterleri.....	61
4.3. Kontrol Karakteristikleri .....	62
4.3.1. İdeal Karakteristikler .....	63
4.3.2. Gerçek Karakteristikler.....	63
4.4. Tam Doğrultucu ve Evirici Karakteristikleri.....	66

4.5. Alternatif Evirici Kontrol Modları .....	67
4.5.1 DA Gerilim Kontrol Modu .....	67
4.5.2 İleri Tetikleme Açısının ( $\beta$ ) Kontrolü .....	67
4.5.3 DA Kararlılığı.....	68
4.5.4. Kademe Değiştirici Kontrolü.....	69
4.5.5. Akım Sınırları .....	69
4.7 Güç Kontrolü.....	72
4.7.1 AA Sistem İçin Yedek Kontroller .....	73
4.7.2 Temel Kontrol Prensipleri .....	73
4.7.3 Kontrolün Gerçekleştirilmesi .....	74
4.8. Dönüştürücü Tetikleme Kontrol Sistemleri : .....	75
4.8.1 Bireysel faz kontrol sistemi (IPC): .....	76
4.8.2 Bireysel Faz Kontrol Sistemi (IPC) İle Sabit Söndürme Açısı (CEA) Kontrolü.....	77
4.8.3 Bireysel Faz Kontrol Sistemi (IPC) İle Sabit Akım Kontrolü .....	78
4.8.4 Eşit Aralıklı Darbe Kontrol Sistemi .....	80
4.8.5 Tetikleme Sistemi : .....	81
4.9 Tristörlerin Söndürülmesi .....	82
4.10 Çalıştırma , Durdurma ve Güç Akış Yönünü Değiştirme .....	82
4.11 Kararlılık Çalışmaları .....	84
4.11.1 Basit Modeller .....	84
4.11.2 Başarım Modelleri .....	85
4.11.3 Detaylı Esnek Model .....	86
<b>BÖLÜM 5. BULANIK MANTIK VE SİSTEMİN BULANIK MANTIKLA</b>	
<b>KONTROLÜ.....</b>	<b>90</b>
5.1. Bulanık Mantık.....	90
5.1.1. Bulanık Küme Teorisi .....	91
5.1.2. Bulanık Fonksiyonlar.....	93
5.1.3. Bulanık Kurallar .....	94
5.1.4. Bulanık Çıkarım .....	95
5.1.5. Durulaştırma Metodu.....	96
5.1.6. Bulanık Mantığın Uygulama Alanları .....	97

5.1.7. Bulanık İşlemler .....	98
5.2. Bulanık Denetim .....	102
5.3. Sistemin Bulanık Mantıkla Denetimi .....	106
5.3.1 Dönüştürücünün Benzetimi .....	106
5.3.1.1. Dönüştürücünün PID kontrolü .....	109
5.3.1.2. Dönüştürücünün bulanık mantıkla kontrolü .....	112
5.3.2. EVİRİCİNİN BENZETİMİ .....	118
<b>BÖLÜM 6. AA VE DA SİSTEM HATALARI .....</b>	<b>123</b>
6.1 DA Hattı Hataları .....	123
6.2 Normal Kontrol İşleminin Davranışı .....	123
6.3 Hızlı Değişim Etkilerinden Hattın Korunması .....	124
6.4. Dönüştürücü Hataları .....	125
6.5 AA Sistem Arızaları .....	125
6.5.1 Doğrultucu Tarafı AA Sistem Arızaları .....	126
6.5.2 Evirici Tarafı AA Sistem Arızaları .....	126
6.5.3 AA Sistem Arızalarının Giderilmesi .....	127
6.5.4 İyileşmeye Yardım Eden Özel Ölçümler .....	128
6.6 AA/DA Sisteminin AA Sistem Üzerindeki Etkileri .....	128
6.6.1 Reaktif Güç ve AA Sistem Dayanıklılığı .....	129
6.6.2 Düşük KDO Sistemleri İle İlgili Sorunlar .....	130
6.6.2.1 Yüksek Dinamikteki Aşırı Gerilimler .....	130
6.6.2.2 Kararlı Olmayan Gerilimler .....	131
6.6.2.3 Harmonik Rezonansı .....	131
6.6.2.4 Gerilim Dalgalanması .....	131
6.6.3 Zayıf Sistemlere İlişkin Sorunların Çözümleri .....	132
<b>BÖLÜM 7. DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE HVDC ENERJİ İLETİM SİSTEMİNİN</b>	
<b>UYGULANMASI .....</b>	<b>133</b>
7.1 HVDC Enerji İletim Sisteminin Dünyadaki Uygulamaları .....	133
7.2 HVDC Enerji İletim Sisteminin Türkiye'deki Uygulama İmkanları .....	140
7.2.1 ±500 kV HVDC Sistemi Yerine Neden 420 kV AA Sistemi	
Kullanıldı ? .....	141
7.2.2 HVDC Enerji İletim Sisteminin Türkiye'de Uygulama İmkanları ..	143



SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	145
KAYNAKLAR.....	147
EKLER.....	155
EK - A.....	156
EK - B.....	159
EK - C.....	172
EK - D.....	174
EK - E.....	193
EK - F.....	202



## SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

$E$	:Bağımsız gerilim kaynağı vektörü
$R_c$	:Dönüştürücü transformatörünün direnci
$L_c$	:Dönüştürücü transformatörünün endüktansı
$R_2$	:İletim hattı T eşdeğerindeki eşdeğer seri direnç
$L_2$	:İletim hattı T eşdeğerindeki eşdeğer seri endüktans
$C$	:İletim hattı T eşdeğerindeki eşdeğer paralel kapasite
$R_1$	:İletim hattı $\pi$ eşdeğerindeki eşdeğer seri direnç
$L_1$	:İletim hattı $\pi$ eşdeğerindeki eşdeğer seri endüktans
$C_1$	:İletim hattı $\pi$ eşdeğerindeki eşdeğer paralel kapasite
$R'_2$	:RLC yüklü AA/DA dönüştürücüde yük direnci
$L'_2$	:RLC yüklü AA/DA dönüştürücüde yük endüktansı
$C'$	:RLC yüklü AA/DA dönüştürücüde yük kapasitesi
$R''_2$	:RL yüklü AA/DA dönüştürücüde yük direnci
$L''_2$	:RL yüklü AA/DA dönüştürücüde yük endüktansı
$C''$	:Doğrultma kapasitesi
$R_s$	:Snubber devresi direnci
$C_s$	:Snubber devresi kapasitesi
$E_1$	:Dönüştürücü tarafındaki kaynak geriliminin genliği
$E_2$	:Evirici tarafındaki kaynak geriliminin genliği
$R_{ds}$	:Düzeltilme reaktörü direnci
$L_{ds}$	:Düzeltilme reaktörü endüktansı
$L_d$	:Anahtarlama elemanı (diyot, tristör) endüktansı
$V_{dor}$	:Dönüştürücü girişindeki eşdeğer doğru gerilim
$V_{doi}$	:Evirici girişindeki eşdeğer doğru gerilim
$R_{cr}$	:Dönüştürücü eşdeğer direnci
$R_{ci}$	:Evirici eşdeğer direnci

$R_L$	:İletim hattı direnci
$V_{dr}$	:Dönüştürücü çıkış gerilimi
$V_{di}$	:Evirici giriş gerilimi
$P_{dr}$	:Dönüştürücü terminali gücü
$P_{di}$	:Evirici terminali gücü
$I_d$	:İletim hattı akımı
$V_d$	:İletim hattı üzerindeki doğru gerilim
CEA	:Sabit söndürme açısı değeri
CC	:Sabit akım değeri
CIA	:Sabit tetikleme açısı değeri
$t_q$	:Tristörün ilettime girme süresi
$I_{ord}$	:Düzenleme akımı
$I_{dmax}$	:Maksimum hat akımı
$V_m$	:Maksimum faz gerilimi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.a) Mesafe ve maliyet ilişkisi .....	7
b) İletim hattı kayıpları .....	7
Şekil 1.2. İletim gerilimleri ve tel kesitleri .....	8
Şekil 2.1. Tek kutuplu hattın genel yapısı.....	12
Şekil 2.2. İki kutuplu hattın genel yapısı .....	12
Şekil 2.3. Aynı kutuplu iki hatlı sistemin genel yapısı .....	13
Şekil 2.4. İki kutuplu bir HVDC iletim sistemin ana birimleri (ABB,1996).....	14
Şekil 2.5. Tristörün sembolü.....	17
Şekil 2.6. Radial DA şebekede iki kutuplu paralel ÇTDA'nın blok gösterimi.....	19
Şekil 2.7. Mesh tipi DA şebekede iki kutuplu paralel ÇTDA'nın blok gösterimi.....	20
Şekil 2.8. Seri bağlı ÇTDA'nın blok gösterimi .....	20
Şekil 2.9. Bireysel dönüştürücü karakteristikleri .....	21
Şekil 2.10. Tüm karakteristiklerin gösterimi .....	22
Şekil 2.11.a) Seri sistemde bireysel kontrol karakteristikleri .....	22
b) Seri sistemde tüm kontrol karakteristiklerinin gösterimi .....	22
Şekil 3.1. Üç fazlı orta nokta bağlantılı doğrultucu .....	24
Şekil 3.2. Faz ve faz arası gerilimlerin zamanla değişimleri .....	25
Şekil 3.3. Üç fazlı köprü bağlantılı doğrultucu devresi .....	26
Şekil 3.4. Üç fazlı köprü doğrultucunun çalışma aralıkları .....	27
Şekil 3.5. $\alpha = 0^\circ$ için tetikleme darbelerinin konumu ve doğru gerilim.....	28
Şekil 3.6. Denetim eğrisi.....	30
Şekil 3.7. Üç fazlı köprü bağlantılı doğrultucuda direnç yükünde dalga biçimleri ...	31
Şekil.3.8. Denetim Eğrisi.....	32
Şekil 3.9. Üç fazlı köprü bağlantılı doğrultucu devresinde, endüktans yükünde dalga biçimleri .....	33
Şekil 3.10. Gerilim düşümleri.....	34
Şekil 3.11 Üç fazlı gerilim beslemeli evirici devresi.....	35
Şekil 3.12 Üç fazlı eviricinin üçgen bağlı yükte çıkış gerilimi dalga biçimleri.....	36
Şekil 3.13 Üç fazlı eviricinin üçgen bağlı direnç-endüktans yüküne bağlanması durumunda akım dalga biçimleri.....	38
Şekil 3.14. Üç fazlı evirici ilkesel devresi .....	39
Şekil 3.15. Üç fazlı evirici ilkesel devresi .....	40
Şekil 3.16. 120 derece iletim durumunda açılış dalga biçimleri.....	40
Şekil 3.17. 180 derece iletim durumunda çıkış dalga biçimleri.....	41
Şekil 3.18. Yıldız bağlı dengeli direnç yükünde 180 derece iletimde şekil 3.17 için gerilim ve akım dalga biçimlerinin belirlenmesi.....	42
Şekil 3.19. RLC yüklü 6 vuruşlu AA/DA dönüştürücü modeli .....	43
Şekil 3.20.a) RLC yüklü 6 vuruşlu AA/DA dönüştürücü modelinin benzetişim sonuçları .....	44
b) RLC yüklü 6 vuruşlu AA/DA dönüştürücü modelinin benzetişim sonuçları .....	45

c) RLC yüklü 6 vuruşlu AA/DA dönüştürücü modelinin benzetişim sonuçları .....	46
Şekil 3.21. RL yüklü 6 vuruşlu AA/DA dönüştürücünün modeli.....	47
Şekil 3.22.a) RL yüklü AA/DA dönüştürücünün çıkış eğrileri.....	48
b) RL yüklü AA/DA dönüştürücünün alfa=30 derece için çıkış eğrileri..	49
c) RL yüklü 6 vuruşlu AA/DA dönüştürücünün alfa=60 derece için çıkış eğrileri .....	50
Şekil 3.23. 6 vuruşlu DA/AA eviricinin modeli .....	51
Şekil 3.24.a) 6 vuruşlu DA/AA evirici modelinin benzetişim sonuçları Lc=20 mH, Rc=0.5 ohm, alfa=0.....	52
b) 6 vuruşlu DA/AA evirici modelinin benzetişim sonuçları Lc=1 H, Rc=0.5 ohm, alfa=0.....	53
c) 6 vuruşlu DA/AA evirici modelinin benzetişim sonuçları Lc=20 mH, Rc=100 ohm, alfa=0.....	54
d) 6 vuruşlu DA/AA evirici modelinin benzetişim sonuçları Lc=1 H, Rc=0.5 ohm, alfa=30.....	55
Şekil 3.25. HVDC enerji iletim sisteminin modeli.....	56
Şekil 3.26. HVDC enerji iletim sistemi modelinin benzetişim sonuçları.....	58
Şekil 4.1. Şematik gösterim .....	59
Şekil 4.2. Eşdeğer devre.....	60
Şekil 4.3. İletim hattındaki gerilim değişimi .....	60
Şekil 4.4. İdeal kararlı durum Akım-Gerilim karakteristiği.....	63
Şekil 4.5. Akım düzenleyicisinin gösterimi.....	64
Şekil 4.6. Dönüştürücü kararlı durum karakteristiği.....	64
Şekil 4.7. Her bir dönüştürücünün işletim karakteristiği. ....	66
Şekil 4.8.a) Evirici sabit gerilim kontrol modu .....	67
b) Evirici sabit $\beta$ kontrol modu.....	67
Şekil 4.9.a) İdeal çalışma.....	68
b) Kararsızlık bölgesinin gösterimi .....	68
Şekil 4.10.a) Mod kararlılığı için olması gereken gerilim-akım (V-I) karakteristiği değişimi.....	69
b) Geri beslemeli kontrol karakteristiği.....	69
Şekil 4.11.a) Alternatif gerilimin bir fonksiyonu olarak GBAKS .....	71
b) Doğru gerilimin bir fonksiyonu olarak GBAKS .....	71
Şekil 4.12. GBAKS'li sürekli hal karakteristiği, minimum akım.....	71
Şekil 4.13. HVDC sisteminin temel kontrolü.....	75
Şekil 4.14. İletim gerilimleri ve tristör akımları .....	78
Şekil 4.15. IPC'li dönüştürücü karakteristikleri .....	79
Şekil 4.16. Eşit aralıklı darbe kontrol sisteminde akım kontrolü.....	81
Şekil 4.17. Köprüleme tristörü ve anahtarı .....	82
Şekil 4.18. HVDC enerji taşıma sisteminin kontrol blok diyagramı. ....	88
Şekil 4.19. Ek E'de verilen gerçekleştirilmiş HVDC sisteminin blok şeması.....	89
Şekil 5.1. Klasik küme teorisi.....	91
Şekil 5.2. Bulanık küme teorisi.....	92
Şekil 5.3. Bulanık kümede örtüşüm.....	93
Şekil 5.4. Bulanık giriş değişkeninin üyelik derecesi .....	93
Şekil 5.5. Çeşitli tiplerde üyelik fonksiyonları .....	94
Şekil 5.6. Bulanık çıkarım .....	95

Şekil 5.7. İki bulanık kuralla bulanık çıkarım.....	96
Şekil 5.8. Orta alma durulaştırma metodu .....	97
Şekil 5.9.a) Geleneksel küme kullanarak sıcaklık gösterimi .....	99
b) Bulanık küme kullanarak sıcaklık gösterimi .....	99
Şekil 5.10.a) İki bulanık kümenin.....	101
b) birleşimi.....	101
c) kesişimi.....	101
d) tümleyeni .....	101
Şekil 5.11. Bulanık denetleyici temel yapısı.....	103
Şekil 5.12. Bulanık kontrolcü çıkarım mekanizması.....	104
Şekil 5.13. Bulanık kontrol sisteminin genel yapısı .....	105
Şekil 5.14. Dönüştürücünün PID kontrolü için düzenlenmiş basit kontrol diyagramı .....	107
Şekil 5.15. Dönüştürücünün bulanık mantık denetleyici için düzenlenmiş basit kontrol diyagramı .....	109
Şekil 5.16. Kontrolsüz dönüştürücünün açık çevrim ortalama çıkış eğrisi gerilim(Volt)/zaman(sn).....	110
Şekil 5.17. Vreq=300 volt için PID kontrollü dönüştürücünün ortalama çıkış eğrisi gerilim(Volt/sn).....	110
Şekil 5.18. Vreq=300 volt için PID kontrollü dönüştürücünün hata ve hata değişimi (keskin çizgili) gerilim (Volt/sn).....	111
Şekil 5.19. PID kontrolü esnasında doğrultulmuş çıkışın değişiminden bir periyot (volt/sn) .....	111
Şekil 5.20. Bulanık denetleyicinin blok diyagramı.....	112
Şekil 5.21. Bulanık mantık denetleyicisinin 'e' hata girişi için üyelik fonksiyonu(üyelik derecesi/volt) .....	112
Şekil 5.22. Bulanık mantık denetleyicisinin de 'hata' değişimi girişi için üyelik fonksiyonu(üyelik derecesi/volt) .....	113
Şekil 5.23. Bulanık mantık denetleyicisinin de çıkış üyelik fonksiyonu (üyelik derecesi/ms).....	113
Şekil 5.24. Bulanık mantık kontrollü sistemin 20 ms sürede hata değişimi(volt/s) .....	115
Şekil 5.25. Bulanık mantık kontrollü sistemin 20 ms sürede çıkış gerilimi (volt/s) .....	116
Şekil 5.26. Bulanık mantık kontrollü sistemin 1 s sürede çıkış gerilimi ve hata değişimleri (volt/sn) .....	116
Şekil 5.27. C=100uF için Ic akımı ve Vc gerilimi .....	117
Şekil 5.28. C=1000uF için Ic akımı ve Vc gerilimi .....	117
Şekil 5.29. Evirici Modeli.....	118
Şekil 5.30. Eviricinin giriş frekansının değişmesiyle çıkış frekans değişimini gösteren çıkış grafiği.(frekans(Hz)/s) .....	119
Şekil 5.31. Sabit frekans girişi için çıkış frekans değişimi .(frekans(Hz)/s).....	119
Şekil 5.32. Van A fazı-nötr gerilim eğrisi (Volt/sn).....	120
Şekil 5.33. Van B fazı-nötr gerilim eğrisi (Volt/sn) .....	120
Şekil 5.34. Van C fazı-nötr gerilim eğrisi (Volt/sn) .....	120
Şekil 5.35. Vab Afazı-Bfazı gerilim eğrisi (Volt/sn).....	121
Şekil 5.36. Vbc Bfazı-Cfazı gerilim eğrisi (Volt/sn).....	121
Şekil 5.37. Vca Cfazı-Afazı gerilim eğrisi (Volt/sn) .....	121
Şekil 6.1. DA hattı gerilim profili (1) Normal işletim (2). DA hat arızası ve normal kontrol (3). Hızlı hat korumalı .....	124

Şekil A.1. Deneysel olarak gerçekleştirilen programın akış diyagramı .....	156
Şekil A.2. Deneysel olarak gerçekleştirilen programın akış diyagramı (Devamı)...	157
Şekil A.3. Deneysel olarak gerçekleştirilen programın akış diyagramı (Devamı)...	158
Şekil D.1. Dengeli AA Şebekede $\alpha=0$ için doğrultucunun çıkışları $R=39$ ohm ..	174
Şekil D.2. Direnç yükünde dengesiz AA girişte $\alpha=10$ dereceden dönüştürücü çıkışları $R=39$ ohm .....	175
Şekil D.3. Direnç yükünde dengesiz AA girişli sinyalin $\alpha=15$ ve $\alpha=45$ derecede dönüştürücü çıkışları $R=39$ ohm .....	176
Şekil D.4. Direnç-endüktans yükünde dengesiz AA girişte $\alpha=10$ derecede dönüştürücü çıkışları $R=47$ ohm .....	177
Şekil D.5. Dengesiz AA şebekenin endüktans yükünde $\alpha=60$ derece için doğrultucunun çıkışları $L=82$ mH .....	178
Şekil D.6. Direnç yükünde R-Mp evirici çıkışları .....	179
Şekil D.7. R yükünde S-Mp evirici çıkışları $R=51$ ohm.....	180
Şekil D.8. Direnç yükünde T-Mp evirici çıkışları $R=51$ ohm .....	181
Şekil D.9. R yükünde R-S evirici çıkışları $R=47$ ohm.....	182
Şekil D.10. R yükünde S-T evirici çıkışı $R=47$ ohm .....	183
Şekil D.11. R yükünde T-R evirici çıkışı $R=47$ ohm.....	184
Şekil D.12. R yükünde RS-TS evirici çıkışı $R=39$ ohm .....	185
Şekil D.13. R yükünde RS-TS evirici çıkışı $R=39$ ohm .....	186
Şekil D.14. R yükünde TR-SR evirici çıkışı $R=39$ ohm.....	187
Şekil D.15. R yükünde RT-ST evirici çıkışı $R=39$ ohm.....	188
Şekil D.16. Endüktans yükünde $\alpha=5$ ve $\alpha=110$ derecede evirici çıkışı $L=82$ mH .....	189
Şekil D.17. $\alpha=0$ ve $\alpha=110$ derecede eviricinin filtreli çıkışları.....	190
Şekil D.18. $\alpha=0$ ve $\alpha=18$ derecede eviricinin filtreli çıkışları.....	191
Şekil D.19. $\alpha=0$ derecede filtreli evirici çıkışları.....	192
Şekil E.1. HVDC sisteminin güç kaynağı.....	193
Şekil E.2. HVDC sisteminin güç kaynağı 2.....	194
Şekil E.3. HVDC sisteminin karşılaştırma devresi.....	195
Şekil E.4. AA`dan DA`ya tristörlerin tetiklenmesi.....	196
Şekil E.5. DA giriş için geri besleme.....	197
Şekil E.6. Frekans ve gerilim kontrolü .....	198
Şekil E.7. DA`dan AA`ya tristörlerin tetiklenmesi.....	199
Şekil E.8. Evirici devresi .....	200
Şekil E.9. DA/AA ana dönüştürücü devresi .....	201
Şekil F.1. Dönüştürücü Blok diyagramı.....	202
Şekil F.2. Kesişim Noktası Yakalayıcısı.....	203



## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 7.1. Dünya üzerindeki HVDC Sistemlerinin dağılımı.....	135
Tablo 7.1. (Devamı) Dünya üzerindeki HVDC Sistemlerinin dağılımı .....	136
Tablo 7.1. (Devamı) Dünya üzerindeki HVDC Sistemlerinin dağılımı .....	137
Tablo 7.1. (Devamı) Dünya üzerindeki HVDC Sistemlerinin dağılımı .....	138
Tablo 7.1. (Devamı) Dünya üzerindeki HVDC Sistemlerinin dağılımı .....	139
Tablo 7.1. (Devamı) Dünya üzerindeki HVDC Sistemlerinin dağılımı .....	140





## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisinin üretim merkezlerinden tüketicilere ekonomik ve kaliteli olarak ulaştırılabilmesi için, özellikle çok uzak mesafelerde enerji iletimi mümkün olduğu kadar yüksek gerilimlerle yapılmalıdır.

Üretim aşamasında, generatör tasarımı açısından çok yüksek gerilim değerlerine çıkılması pratik ve ekonomik olmadığından üretimin orta gerilim düzeyinde tutulup, üretilen elektriğin genliğinin transformatörler yardımıyla üretimin ekonomik kılındığı gerilim seviyelerine yükseltilmesi yoluna gidilir. Sabit bir elektrik enerjisini, dolayısıyla sabit bir elektrik gücünü en az kayıp ile en verimli bir şekilde iletebilmek temel amaçtır. Bu sebeple gerilimi yükseltip, rezistif ve endüktif kayıplara sebep olan akım değerlerinin düşürülmesi de temel bir yöntem olmuştur. Ancak yalıtım problemleri, gerilim değerlerinin belirli sınırlar içinde kalmasını gerektirir. Elektrik enerjisine olan gereksinimin giderek artması ve iletilmesi gereken enerji miktarındaki artışlar, dünya enerji kaynaklarının giderek azalması ve buna paralel enerji kayıplarının da azaltılmaya çalışılması enerji iletimindeki yeni yöntemlerin geliştirilmesine neden olmuştur. Bu yöntemlerin en önemlisi yüksek gerilimli doğru akımla iletmektir.

Bu sistemde, elektrik enerjisi üretim merkezinde AA akım şeklinde üretilen üç fazlı gerilimin genliği, transformatörlerle yükseltilerek yüksek gerilimlere çıkarılır. Yüksek gerilim (YG) doğrultucularla doğrultularak doğru gerilim halinde iki hatlı enerji hattından yük merkezine iletilir. ((AA) enerji iletim sisteminde üç ya da altı iletim hattı kullanılmaktadır.) Yük merkezinde doğru gerilim alternatif gerilime çevrilip, transformatörlerle genliği düşürülerek dağıtılmaktadır. Enerji iletiminde, yüksek genlikli doğru gerilim kullanıldığından sisteme yüksek gerilimli doğru akım (HVDC) enerji iletim sistemi denilmektedir. Büyük güçlerin uzak mesafelere iletilmesinde HVDC enerji iletimi daha ekonomiktir. Ekonomiklik 500 km



uzaklıktan başlamaktadır. Bu uzaklık su altı için daha da kısadır (30-50 km arası değişir). Ayrıca geçici olay kararlılığındaki düzelme ve sistemdeki osilasyonların söndürülmesi gibi etkenlerle HVDC tercih edilebilir. Farklı frekanslarda veya senkron olmayan iki AA sistemi HVDC sistemiyle birleştirilebilir. (Kimbark, 1971)

HVDC sisteminin uygulanmasındaki artış sistemin problemlerinin incelenmesini gerektirmektedir. Sistemin incelenmesinde bilgisayar benzetiminin kullanılması, kontrolün bilgisayar yardımıyla gerçekleşmesi problemlerin çözümünü daha ekonomik kılmakta ve sistemin çalışmasını da daha güvenli kılmaktadır.

Bugüne kadar yapılan çalışmalar, HVDC enerji iletim sistemlerine oldukça büyük önem verildiğini göstermektedir. 1996 yılı sonuna kadar literatürde bu konu ile ilgili yaklaşık 1000 kadar bildiri görülmektedir. Bunların çoğu kontrole yönelik bildirilerdir ve genellikle doğrultucu ve evirici kısımların kontrolü ile uğraşmıştır. Kontrol teorileri oluşturulurken daha çok doğrultucu tekniğinden faydalanılmış ve genel olarak fazların sıfır geçişleri yakalanarak tetikleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Güvenlik sınırları akım ve gerilim karakteristiklerine göre belirlenmiştir. (Hingorani et al, 1968, Payidar and Sachhidanand, 1989)

Yüksek gerilim doğru akım (High Voltage Direct Current = HVDC) enerji taşıma sistemlerinde yüksek gerilimler ve güçler nedeniyle kontrol elemanı olarak tristörler kullanılmaktadır. Bu elemanların iletim, kesim tetikleme ve koruma düzenekleri oldukça problemlidir ve hassastır. Özellikle değişken gerilim ve frekanslarda bu sorunlar daha fazla kendini göstermektedir. Elemanların kendi iç kayıpları, hat kayıpları ve ortam etkileri de bu problemlerin artmasına sebep olmaktadır. Bütün bu etkiler kontrol sistemini oldukça fazla giriş-çıkış ile donatır. Bu nedenle kontrol işleminde A/D - D/A veri eldesi kartı (Data Acquisition Card ) kullanılmış ve bu kartın kontrolü C++ dilindeki bir yazılımla desteklenmiştir. Değişken gerilim ve frekanslarda oluşabilecek tetikleme hataları da fazların sıfır geçişleri yerine, kesişim noktalarının yakalanması ile en aza indirilmeye çalışılmıştır.

Günümüzde bulanık mantık kontrol uygulamalarının sayısı hızla artmaktadır. Özellikle bulanık mantık kontrolünün uygulandığı sistemler karmaşık, doğrusal

olmayan yapıdadır. Yüksek gerilim doğru akım enerji taşıma sistemleri de ikinci dereceden doğrusal olmayan bir yapıya sahip olduğundan, bulanık mantık kuralları ile bu sistemin kontrol edilebileceği düşünülerek bilgisayar benzetişimi de yapılmıştır.

### 1.1. HVDC Enerji İletim Sistemlerinin Gelişimi

Ekim 1879'da Edison'un ilk elektrik lambasını buluşu aydınlatma amacı ile ilk elektrik şebekelerinin kuruluşuna sebep olmuştur. 1882'de New York'ta Pearl Street denilen istasyon bölgesinde aydınlatma amacı ile kurulan ilk şebekede elektriksel özellikler: 3 iletken, 220/110 V doğru akım ve 30 kW idi. Görüldüğü üzere elektrik enerjisi iletiminde kullanılan ilk şekil doğru akımdır. Ancak 1890'da Edison'un bağlı bulunduğu 'General Electrics'e rakip kuruluş Westinghouse transformatörleri ve dolayısıyla AA akımı geliştirince DA akımın kullanılma olanakları birden kısıtlanmıştır. Bunun başlıca nedenleri, AA'da kolaylıkla gerilim ayarlama olanakları ve AA generatör ve motorlarının nispeten daha ucuz olmaları idi. Genelde AA uygulamalarının üstünlükleri günümüze kadar gelmektedir. DA ile iletim sistemi ise ancak 1954'te Gotland'ta kurulan ticari hat ile bir atılım gösterebilmiştir. Doğru akımla enerji iletimi üzerindeki ilk çalışmalar 1920'li yılların sonlarında araştırma düzeyinde başlamıştır. Bu çalışmalarda cıva arklı dönüştürücüler kullanılmıştır. 1944'te 10 kV düzeyinde gerilim değerlerine ulaşılmış ve ilk çalışmalara göre sistem kararlılığında da oldukça önemli gelişmeler kaydedilmiştir. İlk uygulama 1946'da Mellerud ve Irollhattan arasında uygulanmış ve 90 kV'luk gerilimle 60 km boyunca 6,5 MW'lık güç iletimi gerçekleştirilmiştir. İlk ticari uygulama ise 1954'te Gotland'ta kurulmuş ve 100 kV'ta 20 MW'lık güç iletimi gerçekleşmiştir. 1958 yılında, Gotland'ta kullanılan iki paralel anottan oluşan dönüştürücü elemanları yerine dört anotlu anahtarlama elemanları geliştirildi. Güç değerlerinin gittikçe artması beraberinde anahtarlama elemanlarının soğutma problemlerini de getirdi ve 1965 yılında Yeni Zelanda'da kurulan hatta hava soğutmalı yerine su soğutmalı anahtarlama elemanları kullanılmaya başlandı. Artık anma değerleri 1400 A ve

125 kV değerlerine ulaşmıştı.1970 yılında dört yerine altı paralel anotlu dönüştürücüler kullanılmaya başlanmış ve 1800 A, 133 kV anma değerlerine çıkılmıştır. 1970'lerde cıva arklı anahtarlama elemanlarının yerini tristörler almış ve dönüştürücü istasyonları da tristörlerle kurulmaya başlanmıştır.

Tristörlerin cıva arklı elemanlara göre çok üstün olmaları, daha pratik ve de ekonomik olmaları sistemin uygulanabilirliğini arttırmış ve HVDC enerji iletim sistemleri de daha hızlı gelişmeye başlamıştır.

Tristörlerin kullanılmaya başlanması ile hat gerilimi 150 kV'a ve hattan iletilen güçte 300 MW'a çıkmıştır. İlk hava soğutmalı tristör gurubu Norveç ile Danimarka arasında kullanılmış ve 250 kV, 1000 A değerleriyle çalışılmıştır. 1977 yılında Cabora Bassa'da yapılan iki kutuplu Itapu enerji nakil hattında 600 kV, 3150 MW değerlerinde çalışan su soğutmalı tristörler kullanılmıştır. Bu tristörlerin akım kapasiteleri ise 2,6 kA'dir. Akım kapasitesi Vermont - Quebec hattında ise 3,6 kA'dir.

Günümüzde de devam eden bu hızlı gelişim sonucunda doğru akımla enerji iletiminin giderek yaygınlaşacağı söylenebilir. Yarı iletken teknolojisindeki, g elektroniğindeki ve kontrol teorisindeki gelişmelerin neticesinde her geçen gün, seri ve paralel bağlanan eleman sayısı azalmakta ve sistem daha basit ve daha güvenli hale gelmektedir. Bütün bunların neticesi olarak da HVDC enerji iletim sistemi gelecekte sadece uzun mesafeler ve özel hatlar için değil, enerji iletim hatlarındaki problemlerin çözümünde de kolaylıklar sağlayacak ve AA hatlarının yerine kullanılabilir.

## 1.2. HVDC Enerji İletim Sisteminin Avantajları

Bu sistemin avantajlarını kısaca aşağıdaki maddelerde toplayabiliriz.

1. Alternatif akımdaki periyodik değişim sonucu ortaya çıkan endüktif gerilim düşümüne ve reaktif güç kayıplarına sebep olan, hat omik direnci yanında oldukça baskın olan hattın endüktif reaktansını etkisiz kılar, bu da işletme verimini artırır (Şekil 1.a ). Dönüştürücü istasyonlarında %1-1.5 oranında kayıplar olsa da bunlar AA hatlardaki toplam kayıplar yanında oldukça düşüktür.
2. Alternatif akım sistemlerinde olmayan kullanım ve tasarım özellikleri sağlanabilir. Güç akışının sürekli kontrolü ve karalılığı buna bir örnektir.
3. Yeraltı ve denizaltı iletiminin yapılması daha basit ve ekonomiktir. Kara da 500 km., denizaltında 30 km'den sonra hat maliyeti daha düşüktür (Şekil 1.b).
4. Farklı frekans ve işletme şartlarına sahip iki veya daha çok sayıdaki enerji iletim sistemlerinin enterkonnekte çalışması durumunda ve çok uzun enerji iletimi projelerinde, deniz altı enerji iletiminde alternatif akımda ortaya çıkabilecek uyumsuzluk ve kararsızlık problemleri, doğru akımın kullanılması ile daha ekonomik ve daha kolay çözülebilir.
5. Hat yapımı daha basittir. Alternatif akımda üç veya altı tel ile yapılması zorunlu olan iletim hatları; tek veya çift kutuplu, toprak geri dönüşlü veya dönüşsüz gibi daha esnek olarak tasarlanabilir. Böylece işletme ve ortam şartlarına en uygun, optimizasyona daha yakın bir enerji iletimi yapılmış olur (Şekil 1.2). DA hattın yapımı 1/3 daha ekonomiktir.
6. Çift kutuplu hatlarda, hatlardan birinde oluşabilecek arızalarda, enerjinin yarısı arızasız hat ve toprak dönüşü üzerinden iletilebilir. Bu özellik sisteme önemli bir üstünlük sağlar.
7. Kısa devre akımları en aza indirgenir.
8. Alternatif akımda görülen, frekans etkisi ile akımın iletken içerisinde homojen olmayan, iletken çeperlerinde yoğunlaşacak şekilde dağılması sonucu ortaya çıkan etkin dirençteki artış ve görülen kesit küçülmesi doğru akımda söz konusu değildir. Bu yolla aynı büyüklükteki akım daha düşük kesit ile taşınabilir.

9. Doğru akım enerji iletim hattının altındaki güvenlik bölgesi, alternatif akım hattına göre daha kısa mesafelerdedir. 400 kV AA hattın güvenlik bölgesi 96 metre iken,  $\pm 500$  kV'luk DC hattın güvenlik bölgesi 46 metredir.

10. Reaktif güç akışı DA iletkenlerinde olmayacağından kompanzasyon sorunu yoktur. DA ile iletimde şarj akımından ve hat reaktansından problemler doğmaz. Bunun sonucu olarak DA hatları ve kabloları AA hatları ve kablolarından daha ucuzdur.

11. HVDC sistemleri güç akış yönü, miktar ve hız olarak kontrol edilebilir. Bu da farklı AA şebekelerinin kararlılığının sağlanmasında kullanılır.

12. Doğru gerilim, alternatif gerilimin tepe değerine eşit olduğundan, doğru akımla iletilen güç, tek fazlı AA sisteminden iki kat, üç fazlı AA sisteminden %50 daha fazladır.

Bunu şöyle gösterebiliriz:

AA sisteminde;

$U_a$  = Faz-faz gerilimi

$V_A$  = Faz gerilimi

$I_a$  = Faz akımı

$\cos \varphi$  = Güç faktörü

$P_a$  = Güç ise

$$P_a = \sqrt{3} U_a \cdot I_a \cdot \cos \varphi \quad U_a = \sqrt{3} \cdot V_A$$

$$P_a = \sqrt{3} \sqrt{3} \cdot V_A \cdot I_a \cdot \cos \varphi$$

$$P_a = 3 \cdot V_A \cdot I_a \cdot \cos \varphi \quad (1.1)$$

olur.

DA sisteminde;

$V_d$  = Toprağa göre hat gerilimi

$I_d$  = Hat akımı

$P_d$  = Güç ise

$$P_d = V_d \cdot I_d \text{ dir.} \quad (1.2)$$

$$I_a = I_d \text{ ve } V_d = \sqrt{2} \cdot V_A$$

varsayımlarına göre

$$\frac{P_d}{P_a} = \frac{\sqrt{2} V_A I_a}{3 V_A \cdot I_a \cos \varphi} \cos \varphi = 0.943$$

alınırsa

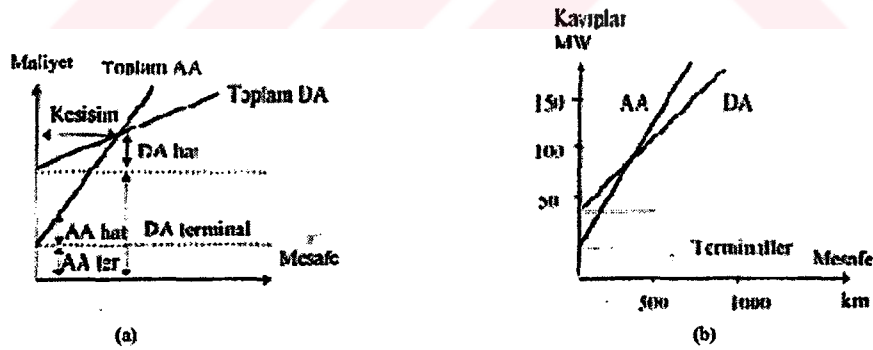
$$\frac{P_d}{P_a} = \frac{1.42}{2.829} = 0.5$$

$$P_d = P_a / 2$$

(1.3)

eşitliği elde edilir.

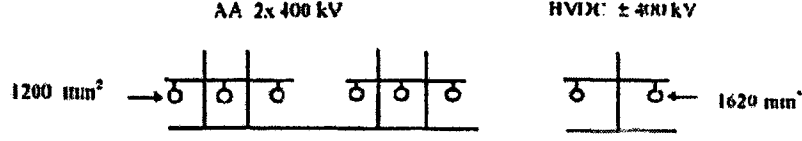
Üç fazlı AA sistemi yerine iki iletkenli ve toprak telli bir DA sistemi kullanılarak aynı gücün taşınabileceği yukarıdaki hesaptan görülebilmektedir. DA ile iletimdeki güç kaybı AA ile olan iletimdeki güç kaybının 2/3'ü kadar olacaktır. Ayrıca DA ile iletimde izolatör sayısında 2/3 oranında azalma, taşıma direklerinde ucuzluk, basitlik ve direklerin daha ince olmalarına imkan vardır. Isının etkisi yanında güç taşıma kapasitesini belirleyen diğer etkilerde göz önüne alınırsa, AA sisteminde bir iletkene, DA ile iletimdeki gücün dört katı kadar bir güç düşebilir.



Şekil 1.a). Mesafe ve maliyet ilişkisi

b). İletim hattı kayıpları





Şekil 1.2. İletim gerilimleri ve tel kesitleri

### 1.3. HVDC Sisteminin Yaygın Olarak Kullanılmama Nedenleri

Bu sistemin yaygın olarak kullanımını engelleyen sebepleri de kısaca şöyle sıralayabiliriz:

1. Çok uzun hatlar, farklı frekanslardaki hatlar ve özel hatlar dışında, yüksek teknoloji gerektirmesi bakımından ilk kuruluş maliyeti klasik hatlara göre daha fazladır.
2. Gerilim ve akım değerlerinin yüksek olması ve şu anki anahtarlama elemanlarının tek başlarına bu kontrol için yeterli olmayışı çok sayıda elemanın seri ve paralel bağlanmasını gerektirir. Bu ise kontrolün zorlaşması demektir. Ayrıca tasarım aşamasında fiziksel sistemin aslına en yakın şekilde yansıtıldığı modeller üzerinde tüm işletme şartlarının kapsamlı şekilde incelenmesi gerekir. Bu işletme şartları; açma kapama olayları, geçici ve sürekli hal davranışları, bağlantı yapılacak alternatif akım şebekelerine etkileri, kısa devre arızaları, dönüştürücülerde oluşacak arızalar, reaktif güç tüketimi ve kompanzasyonu olabilir. Bu inceleme de ancak üst düzeyde yazılım ve donanım imkanlarına sahip bilgisayar benzetimleri ile sağlanabilir.
3. Alternatif akım şebekelerinin doğru akım şebekeleri ile birleştirilmesi halinde doğru akımla enerji iletim sisteminin kontrolü, alternatif akım şebekesini önemli ölçüde etkilemekte ve kararlılık problemleri ortaya çıkmaktadır.
4. Bugüne kadar uygulamalarda görülen özel problemlerin çözümüne yönelik çalışmalar yapılmış, üretim ve uygulamadaki standartlaşmada yetersiz kalmıştır.
5. Kesicilerin akım kesmelerinin çok güç olması ve kesici gücünün büyük ölçüde sınırlanmasıdır.

6. Dönüştürücü guruplarındaki tristörlerin açma ve kapama sırasında oluşturduğu yüksek frekanstaki gerilimler radyo ve TV yayınlarını etkileyebilmektedir. Bunu önlemek için koruyucu ve ayırıcılarda metal topraklama gerekmektedir.

#### 1.4. DA İletim Hatlarının Mahzurları

DA enerji iletim hatlarının AA enerji iletim hatlarına göre daha az kullanılmasına rağmen, DA hatları kullanıldığında da bir takım sorunlarla karşılaşılır. Bu sakıncaları kısaca;

1. Yüksek maliyetli DA dönüştürücülerinden dolayı DA akım elde etmenin zorluğu.
  2. Yüksek gerilim seviyeleri elde etmek için transformatör kullanmanın mümkün olmaması
  3. Çevirici elemanların yüksek maliyeti
  4. AA ve DA filtreler gerektiren harmonik üretimin çevirici istasyonların maliyetine eklenmesi
  5. Kontrolün karmaşıklığı
- şeklinde sıralayabiliriz.

Bu dezavantajlar günümüzde aşağıdaki konuların geliştirilmesiyle kısmen giderilmiştir.

1. DA kıyıcıların gelişimi
2. Tristörlerin modüler hale gelmesi
3. Dönüştürücülerin 12 tristörlü yapılara dönüştürülmesi
4. Metal oksit yapıların kullanımı
5. Dijital elektroniğin uygulanması ve dönüştürücülerin kontrolünde fiber optik kullanımı

#### **1.4.1. DA İletim Sisteminden İstenen Özellikler**

1. Sistem gücünün sabit bir değere ayarlanması, sistemdeki güç akışının gerilim ve akımdaki dalgalanmalara rağmen değişmemesi
2. DA gücünün kontrolünü mümkün olduğunca hızlı sağlama
3. Güvenlik sınırları dahilinde hattı ve istasyonda kullanılan elemanları koruma
4. Akım ve gerilim karakteristiğine uyma
5. Ani yük değişimlerinden etkilenmeme
6. İletim hattı kayıplarını minimumda tutma

#### **1.4.2. Genelde Görülen Problemler**

1. DA hat hataları
2. AA hat hataları
3. Güç kesilmesi ve azalması

Bu nedenle çözüm için,

1. DA hat hataları hızlı bir şekilde iyileştirilmeli
2. Güç akışı ve kararlı çalışma sağlanmalı
3. AA geriliminin değişimiyle komütasyon hataları oluşabilir. Bu nedenle DA gücünün kaybolması engellenmeli
4. DA gücündeki artımın çok hızlı olması yüzünden AA geriliminin azalması ve komütasyon hatalarının oluşması engellenmelidir.

#### **1.4.3. Kontrol Sistemini Etkileyen Durumlar**

1. Komuta istasyonlarının değişim istekleri
2. Dinamik aşırı gerilim
3. Harmonik üretimi ve filtre tasarımı
4. Spikey akımları ile taşıyıcı frekansın girişimi

## **BÖLÜM 2. HVDC ENERJİ İLETİM SİSTEMİ**

HVDC, yüksek gerilim ve doğru akımla güç iletiminde kullanılan bir enerji iletim sistemidir. Alternatif akım enerji iletim sistemlerinin bir karşıtı olarak özellikle uzun mesafelerde kullanılan bir sistemdir. İletilecek enerjinin noktadan noktaya olması veya iletim esnasında değişik terminalere dağıtılıp dağıtılmaması ve hattın geçtiği güzergah ile işletim şartlarına göre değişik tiplerde kurulabilir.

AA sistem ile HVDC sistemi arasındaki en önemli fark DA hattı üzerindeki gücün miktar, hız ve yön olarak kontrol edilebilir olmasıdır. Bir HVDC enerji iletim sistemi çok karmaşık düzeneklerin birbirine bağlanması ve bütün bunların çok düzenli bir şekilde kontrolünü gerektirir. Bu işlemin düzgün bir biçimde yapılması sistemin kullanılabilirliğini ve dolayısıyla güvenliğini arttıracaktır. Ayrıca sistemin ticari boyutu da kullanılabilirliği ile direkt ilgilidir (Hingorani,1996)

### **2.1. HVDC İletim Hatlarının Tipleri**

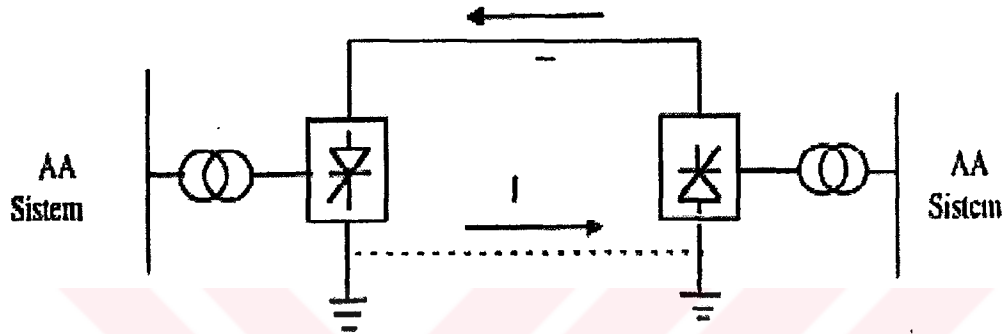
HVDC iletim sisteminde kullanılan hatları genelde üç kategoride toplamak mümkündür.

#### **2.1.1. Tek Kutuplu Hatlar**

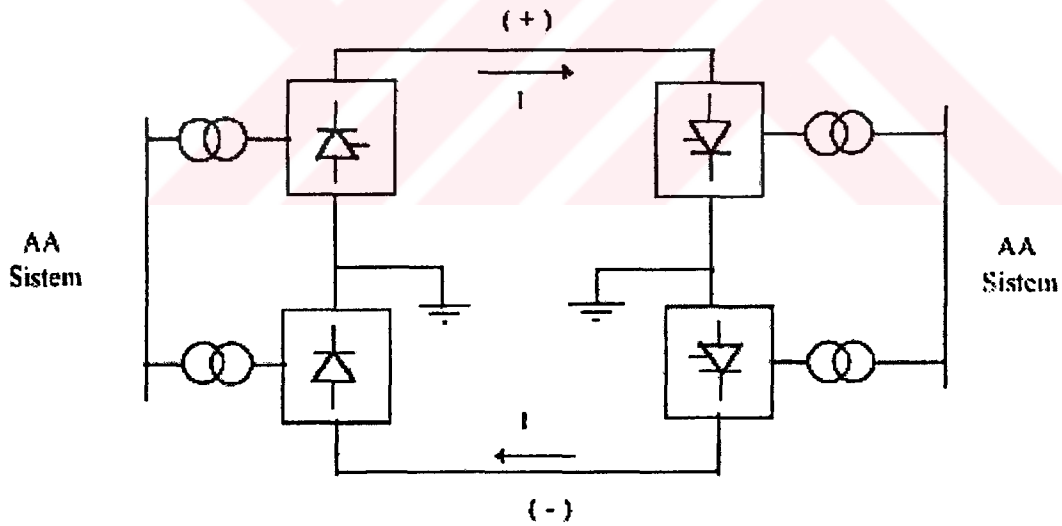
Bu tip bir DA hatta ilk grup tristörler uygun zamanlamada ateşlenerek alternatif gerilim doğrultulur ve doğru akım elde edilir. Elde edilen doğru akım uzun mesafelerde hat üzerinden taşındıktan sonra alıcı tarafta yine uygun tristör tetiklemeleriyle alternatif gerilim elde edilir. Tek kutuplu hat, tek iletkenli ve negatif işaretlidir, dönüş hattı olarak toprak veya denizi kullanır (Şekil 2.1).

### 2.1.2. İki Kutuplu Hatlar

Bu yapıda terminallerdeki dönüştürücüler seri bağlanmış ve her dönüştürücünün eşit oranda yüklenmesi sağlanmıştır. Ayrıca iki dönüştürücü arasındaki bağlantı da topraklanmıştır. Her iki kutupta istenirse birbirinden bağımsız çalıştırılabilir. Eğer kutuplardan biri arızalanırsa sistem yarım güçte diğeri üzerinden çalıştırılabilir (Şekil2.2).



Şekil 2.1. Tek kutuplu hattın genel yapısı

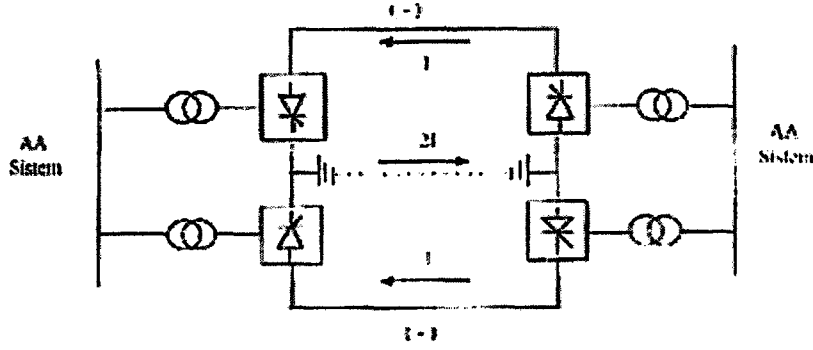


Şekil 2.2. İki kutuplu hattın genel yapısı

### 2.1.3. Aynı Kutuplu İkili Hatlar

Tek kutuplu hatlarda aynı işaretli iki veya daha fazla iletken kullanılır. İletim genellikle negatif işaretle yapılır. Dönüş yolu olarak toprak tercih edilir. Bu sistemde

hatlardan biri arızalandığında dönüştürücü istasyonlardan biri devre dışı bırakılıp yarım güçle sistemin çalıştırılması mümkündür.

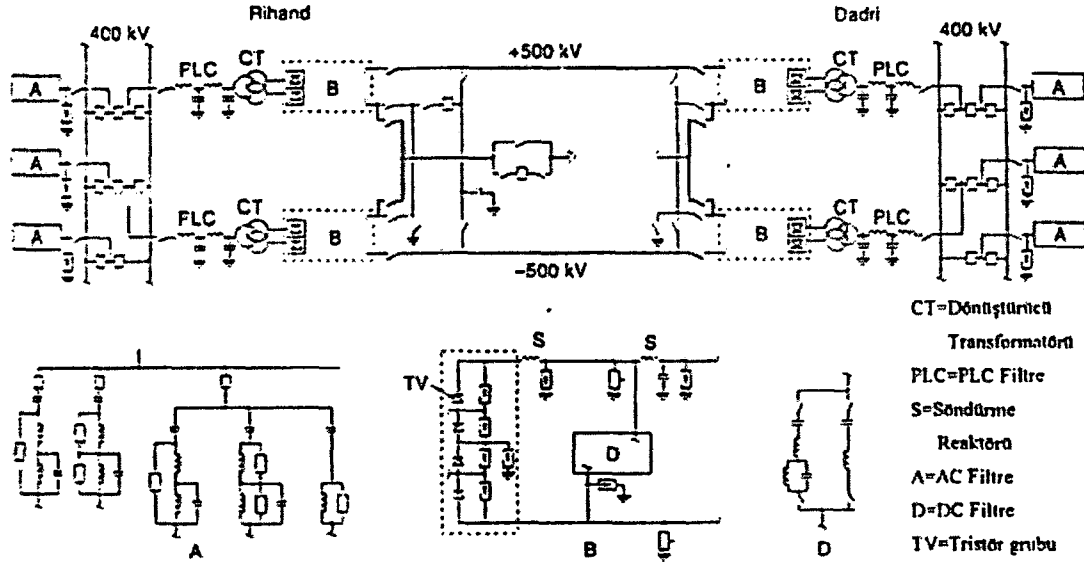


Şekil 2.3. Aynı kutuplu iki hatlı sistemin genel yapısı

Genelde ikili hatlar toprak üzerinden dönüş etkisi olmadığından daha çok kullanılır. Tek kutuplu hatların yalıtım maliyetlerin düşürülmesi nedeniyle avantajı vardır (Şekil2.3).

## 2.2 HVDC İletim Sistemindeki Ana Birimler

HVDC sisteminin ana kısımları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Bunlara kısaca göz atmakta sistemi tanımak açısından fayda vardır. Bu birimler Rihand-Dadri hattı için kurulan iki kutuplu bir hat için şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. İki kutuplu bir HVDC iletim sistemin ana birimleri (ABB,1996)

### 2.2.1. Dönüştürücüler ve Eviriciler

AA/DA ve DA/AA çevrimler için kullanılırlar ve tristör grupları ile transformatörlerden oluşurlar. 6 veya 12 vuruşlu olarak tasarlanırlar. Transformatörler AA/DA kısımda gerilimi yükseltirken, DA/AA kısımda da düşürmeye yararlar. DA hattı oluşturmak için de dönüştürücülerin (+) ve (-) kutupları birleştirilir (Nasar,1995).

### 2.2.2. Söndürme Reaktörleri

Bunlar dönüştürücü istasyonlarının her bir kutbuna seri olarak bağlanan endüktanslardır. Bunların amaçlarını şöyle özetleyebiliriz:

1. DA hattaki voltaj ve akımın harmoniklerini azaltmak,
2. Dönüştürücülerdeki komütasyon hatalarını önlemek,
3. Küçük yüklerde akımın sürekliliğini sağlamak,
4. DA hatlardaki kısa devrelerde dönüştürücülerden geçen yüksek akımları sınırlamak.

### **2.2.3. Harmonik Filtreler**

Dönüştürücüler AA ve DA hatların her ikisinde de harmonik voltaj ve akımlarını üretirler. Bu harmonikler generatör ve kapasitörlerde aşırı ısınmalara sebep olurlar. Filtreler hem AA hem de DA hat taraflarına koyulur (Rashid,1988).

### **2.2.4. Reaktif Güç Kaynağı**

Dönüştürücüler doğal olarak reaktif gücüde absorbe ederler. Normal şartlarda transfer edilen aktif gücün %50'sini reaktif güç içerir. Tüketilen reaktif güç geçiş durumlarında çok daha fazla olabilir. Bu yüzden sisteme reaktif güç kaynakları eklenmiştir. Güçlü AA sistemler için bunlar şönt kapasitörler şeklindedir. AA ve DA hattın ihtiyacına bağlı olarak, reaktif güç kaynağının bir kısmı senkron kapasiteler veya statik VAR kompanzatörler şeklinde olabilir. AA filtrelerde kullanılan kapasitörlerde reaktif gücün bir kısmını karşılar.(Bausiere,1993)

### **2.2.5. Elektrotlar**

DA hatların birçoğunda dönüştürücülerin orta noktaları toprağa bağlanarak sıfırlanır. Bağlantı noktaları akım yoğunluğunu azaltmak için toprakta mümkün olduğunca geniş yüzeylere yayılarak yapılır. Eğer toprağa akan akımın sınırlandırılması gerekiyorsa metal dönüş iletkeni DA hatların bir parçası olarak kullanılabilir.

### **2.2.6. DA Hatlar**

Bunlar yükün taşındığı hatlar veya kablolardır. Gerçekte AA hatlara oldukça benzerler.



### 2.2.7. Devre Kesiciler

Dönüştürücülerin kontrolü esnasında trafolarda oluşacak hatalardan hatları korumak için kullanılırlar.

### 2.2.8. Transformatörler

Transformatörler dört çeşit olarak üretilir. Bunlar;

1. 3 faz 3 sargılı
  2. 3 faz 2 sargılı
  3. 1 faz 3 sargılı
  4. 1 faz 3 sargılı
- şeklindedir.

Bu transformatör tipleri mekaniksel olarak farklı olsalar bile aralarında elektriksel olarak herhangi bir fark yoktur. Transformatörler AA ile DA arasında izolasyon görevi yaparlar ve de iletilecek DA gerilimin değerini kaba olarak ayarlama kullanılırlar.

### 2.2.9. Tristörler

Tristörler dönüştürücü sistemlerinin merkezini oluştururlar. HVDC iletim sisteminde kullanılan tristörler, çalışma prensibi olarak diğer güç elektroniği devrelerinde kullanılan tristörlerden farklı olmayan elektronik anahtarlardır. Bu tristörlerde diğerleri gibi küçük gerilimlerle kapıdan kontrol edilirler ve anot-katot yönündeki akımları iletirken, katot-anot yönündeki akımları iletmezler. (El-Hawary,1986)

Dünya üzerinde kullanılan HVDC sistemlerinde 1000 - 2000 A arası akımlarda çalışan ve 50-150 kV tepe gerilimlerine dayanabilecek tristör grupları kullanılmaktadır. Ancak bunların oldukça geniş bir yer kaplaması ve ağır olması (bir

tanesi yaklaşık 200 kg) dezavantajdır. Şu anda yeni uygulamalarda kullanılmak üzere 3000 A'e kadar akım geçirebilecek tristör grupları yapılmıştır. Tristörler yüksek akım veya gerilimleri taşımak için seri veya paralel bağlanabilir. Soğutma işlemleri de değişik biçimlerde yapılabilir. Bunlar: Hava soğutmalı, hava yalıtımlı; yağ soğutmalı, yağ yalıtımlı; su soğutmalı, hava yalıtımlı; freon soğutmalı, SF<sub>6</sub> yalıtımlıdır.(Ramshaw,1993)



Şekil 2.5. Tristörün sembolü

### 2.3. HVDC Sisteminin Kullanılabilirliği

Bir HVDC sisteminin kullanılabilirliği, verilen bir dönem (genellikle bir yıl) boyunca enerjiyi iletme kapasitesi olarak tanımlanabilir ve normal olarak tam güçte çalıştırıldığında, o dönemde iletebileceği enerjinin yüzdesi olarak ifade edilir. Böylece, programlanmış (örneğin planlı bakım) veya zorunlu (örneğin donanım arızasından kaynaklanan) olduğuna bakılmaksızın bütün kayıplar, kullanılabilirlikten çıkarılır.

Modern HVDC sistemlerinin (1975'ten buyana olanlar) kullanılabilirliği daha öncekilerden oldukça yüksektir. Bu HVDC teknolojisinin yerleştiğini ve hızla geliştiğini gösterir. Ayrıca tristör guruplarında çok sayıda tristörlerin olması nedeniyle, tristör arızalarından kaynaklanan kayıplar günümüzde oldukça azalmıştır. Bununla birlikte, proje kullanılabilirliği yalnızca çevirici istasyonu tasarımının bir fonksiyonu olmayıp, aynı zamanda hem koruyucu bakımın niteliğine ve sıklığına hem de benimsenen yedek parça politikasına da bağlıdır. Dönüştürücü transformatörleri ve düzeltici reaktörler gibi donanımın ana parçalarının arıza olasılığı çok düşüktür (Danahue and Fischer,1993).

Temin garantileri HVDC projelerinin şartnamelerinde giderek daha fazla yer almaktadır. Cross Channel projesinde GEC tarafından temin edilen dönüştürücü terminal donanımının bulunabilirliğinin %98'in üzerine çıkacağı öngörülmektedir. Bulunamama durumu da, bakımın, maksimum koruyucu bakım için gerekli süresinin üç veya dört günü içerisinde kalmaktadır.

Firmaların verdiği değerlere göre kullanılabilirlik, hattın yılda 10-15 kez devre dışı kaldığı varsayılırsa tek kutuplu bir hat için %98.5 ve %99.7 arasında değişebilmekte ancak uygulamada buna uymayan durumlarla da karşılaşılabilir. Örneğin kurulduğu günden buyana oldukça sorunlu olan Zaire'deki Inga-Shaba HVDC sisteminin devre dışı kalma yüzdesi isteneni bir türlü verememesi yüzünden oldukça yüksektir. Yine de ortalama olarak tek kutuplu bir çevirici istasyonunun devre dışı kalma süresi 16 saat/yıl (%0.2) ve çift kutuplu bir çevirici istasyonunun devre dışı kalma süresi %100 güçte 50 saat/yıl ve %50 güçte 2 saat/yıl (%0.02)'dir İstasyonun devre dışı kalma süresi ya da servis süresini yüzde cinsinden ifade edersek, servis yüzdesi:

$$\text{Servis yüzdesi} = (1 - \text{servis dışı olma süresi} / \text{toplam çalışma süresi} \times 100)$$

olarak tanımlanabilir.

#### **2.4. Çok Terminalli HVDC Sistemleri**

Çok terminalli HVDC sistemleri (ÇTDA), ekonomik ve teknik olarak HVDC sistemlerinin avantajlarını arttırmak için tasarlanmışlardır. Bu sistemle hat boyunca enerji ihtiyacı olan istasyonlara enerji sağlanır (Electric Power Development Co.,1991)

İlk ÇTDA sistemi Sardinya-Corsica-İtalya arasında gerçekleştirilmiş ve iki terminalli sisteme daha sonra üçüncü bir terminal eklenmiştir.

### 2.4.1. ÇTDA Ağ Yapısı

ÇTDA sistemlerinde iki tür bağlantı mümkündür:

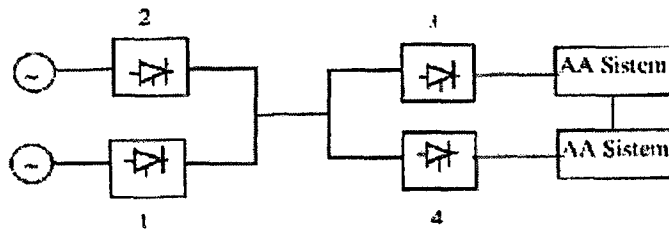
1. Sabit gerilim paralel bağlantısı
2. Sabit akım seri bağlantısı

Paralel bağlantıda dönüştürücüler, şekil 2.6'da gösterildiği gibi Radial veya 2.7'de gösterildiği gibi Mesh tipinde paralel bağlanır ve ortak bir gerilim değerinde çalıştırılır.

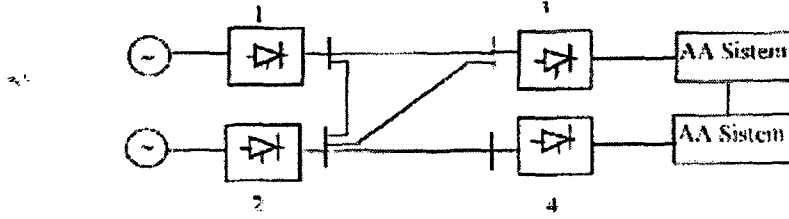
Seri bağlantılar, dönüştürücülerin, bütün terminallerinden ortak bir akım geçecek biçimde seri bağlanmasıyla oluşturulur. Bağlantı şekli 2.8'de verildiği gibidir.

Hem paralel hem de seri bağlı dönüştürücü istasyonlarını içeren ÇTDA sistemleri de oluşturulabilir. ÇTDA sistemlerinin büyük çoğunluğu şekil 2.6'da görüldüğü gibi radial tip paralel bağlı sistemlerdir.

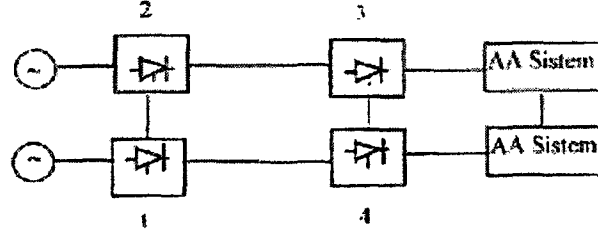
Seri bağlantılı ÇTDA sistemleri küçük güçlü sistemler için düşünülmüştür. Ancak daha az sorun çıkardığı için paralel bağlantı daha çok ilgi görmektedir. Seri bağlantı ile karşılaştırıldığında, kolay kontrol, daha az hat kaybı ve gelişmelere daha esnek olması bakımından paralel bağlantı daha avantajlıdır.(Nakajima,1993)



Şekil. 2.6. Radial DA şebekede iki kutuplu paralel ÇTDA'nın blok gösterimi



Şekil 2.7. Mesh tipi DA şebekede iki kutuplu paralel ÇTDA'nın blok gösterimi



Şekil 2.8. Seri bağlı ÇTDA'nın blok gösterimi

#### 2.4.2 ÇTDA Sistemlerinin Kontrolü

ÇTDA sisteminin temel kontrol prensibi, iki terminalli sistemin genelleştirilmesi ile elde edilebilir. Her bir dönüştürücünün kontrol karakteristiği, sabit akım ve sabit tetikleme açısı kontrollerini içerir. Ek olarak sabit gerilim kontrolü de eklenebilir. Dönüştürücü karakteristikleri DA ağ yapısı ile birlikte, sistemin işletim noktasını belirler (ElectricPower Development Co.,1991).

#### 2.4.3 Paralel Bağlı Sistemler

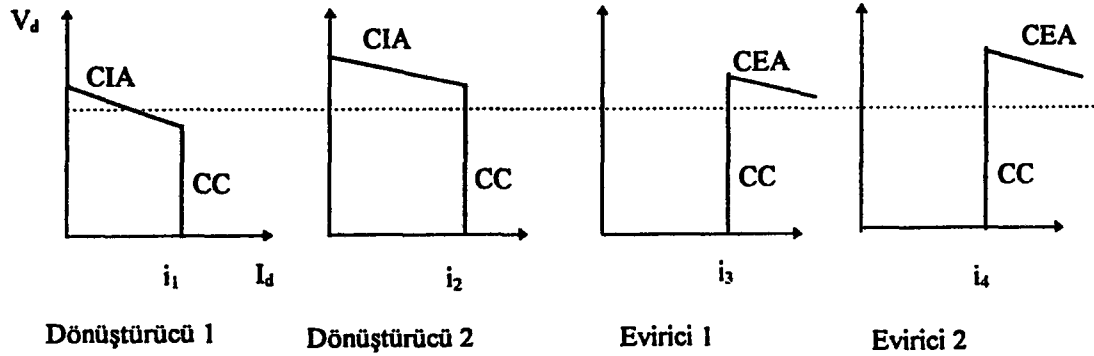
Paralel bağlı bir sistemde, terminallerden biri DA sisteminin işletim gerilimini belirler, diğer terminaller sabit akım kontrolü ile çalışır. Dört terminalli DA sistemi için gerilim-akım karakteristikleri şekil 2.9'da verilmektedir. Şekil 2.10'da ise bütün karakteristiklerin toplamı verilmiştir.

Şekil 2.9'da birinci doğrultucu gerilim ayarlayıcı terminal olarak kabul edilmiştir. Uç değiştirici açılar istenen aralıkta tutar. Bunun yanında karalı işletimi sağlamak için, pozitif akım sınırları da belirlenmelidir

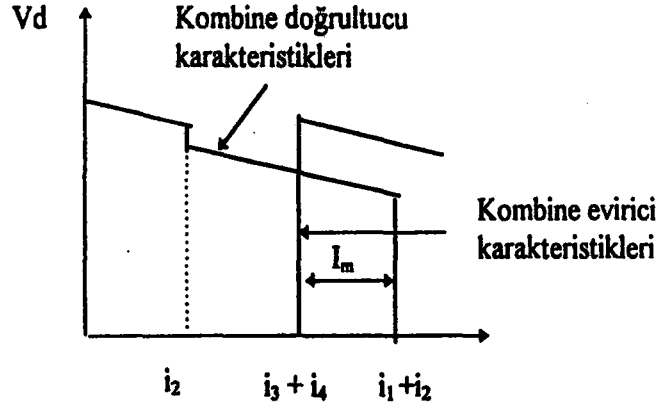
Eğer bir evirici gerilim kontrollü ise, aşırı yüklemekten kaçınılmalıdır. Çünkü, sistem bozulmaları ve yük değişimleri durumunda akımı kontrol etmek zordur. Diğer taraftan sistem gerilimini bir doğrultucu belirliyorsa, işletim daha kararlıdır. Bütün eviriciler akımı kontrol eder. Gerilim kontrollü doğrultucu diğer istasyonların aşırı yüklenmesine sebep olmadan kendini koruma kabiliyetine sahiptir. Sistem yüksek hızlı haberleşmeye daha az bağımlıdır. Bundan dolayı da daha güvenlidir. Genelde büyük doğrultucu terminallerindeki gerilim kontrolü daha iyi sonuç verir (CGEE uygulama notları)

Paralel bağılı ÇTDA sistemlerinin mahsurlarını ise şöyle sıralayabiliriz:

1. DA sistemindeki herhangi bir bozucu etki (hat arızası veya komütasyon arızası) tüm DA sistemini etkiler.
2. Herhangi bir terminaldeki gücün yön değişimi mekanik anahtar gerektirir.
3. İki veya daha fazla seri bağılı köprüden meydana gelen dönüştürücü istasyonundaki bir tek köprünün bloke edilmesi, tüm sistemin düşük gerilimde işletimini ya da etkilenen istasyonun devre dışı kalmasını gerektirir.
4. Bir eviricideki komütasyon arızası, diğer terminallerden akım çeker ve iyileşmeyi etkiler.



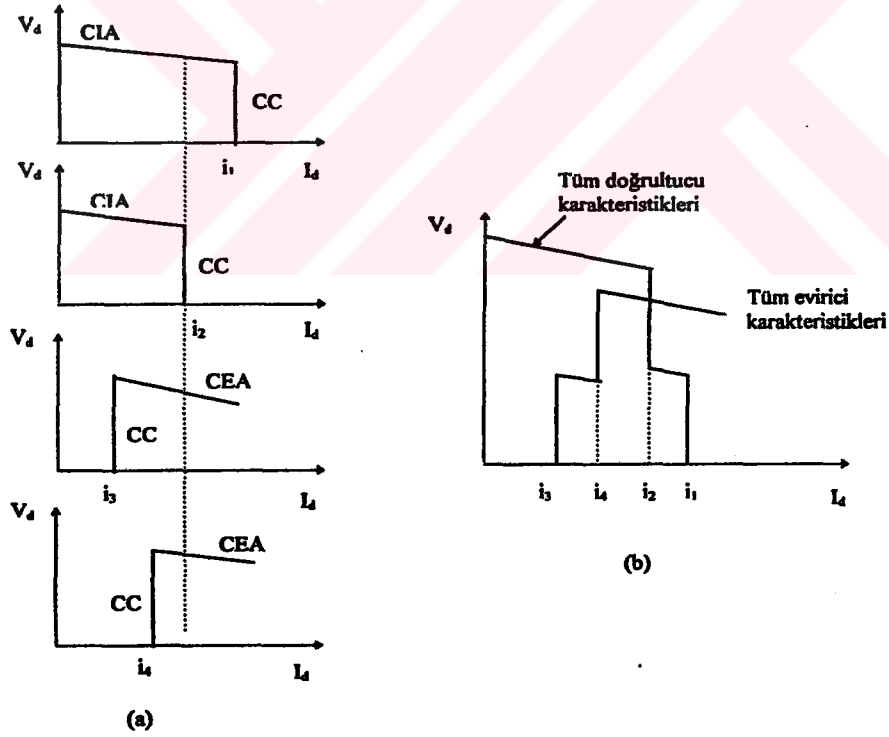
Şekil 2.9 Bireysel dönüştürücü karakteristikleri



Şekil 2.10 Tüm karakteristiklerin gösterimi

#### 2.4.4. Seri Bağlı Sistemler

Seri bağlı bir sistemde akım tek bir terminalden kontrol edilir ve diğer bütün terminaller sabit açı kontrolü ( $\alpha$  veya  $\gamma$ ) ile veya düzenlenmiş gerilimle işletilir.



Şekil 2.11.a) Seri sistemde bireysel kontrol karakteristikleri  
b) Seri sistemde tüm kontrol karakteristiklerinin gösterimi

Seri bağılı ÇTDA sistemlerinin mahsurlarını ise şöyle sıralayabiliriz:

1. Sistemin birçok bölümündeki toprağı karşı gerilim farklı olduğundan izolasyon koordinasyonu karmaşık ve pahalıdır. Düşük gerilimli bölümlerde kayıplar fazladır.
2. Geçici hat arızaları tüm sistemin kesintisine sebep olur.
3. İleriki gelişmeler için esneklik sınırlıdır.



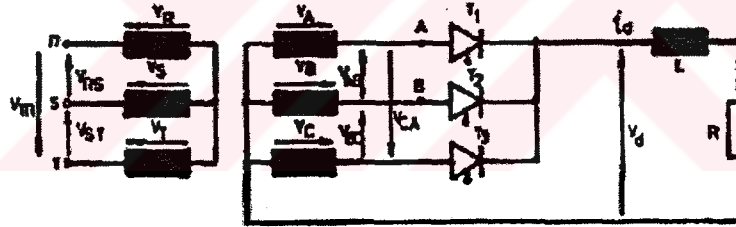


## BÖLÜM 3. ÜÇ FAZLI DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

Adından da anlaşılacağı gibi üç fazlı dönüştürücüler, üç fazlı gerilim kaynağından beslenerek doğru gerilim ya da alternatif gerilim dalga biçimleri üreten güç elektroniği devreleridir. Alternatif akımı doğru akıma çeviren devreler doğrultucu ve doğru akımı alternatif akıma çeviren devreler de evirici olarak incelenmiştir.

### 3.1 Üç Fazlı Orta Nokta Bağlantılı Doğrultucu

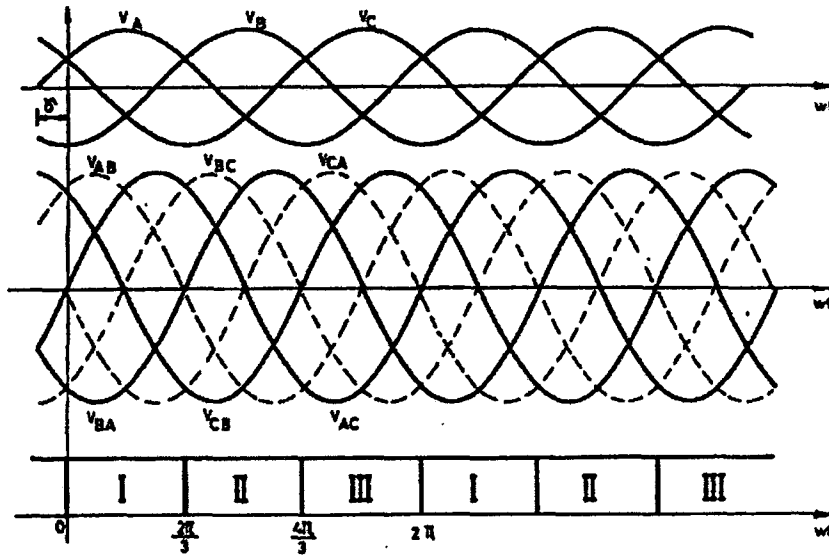
Üç fazlı orta nokta bağlantılı doğrultucu devresi şekil 3.1’de verilmiştir. Bu devre, her faz ucuna bağlanan birer tristör yardımıyla üç adet yarım dalga doğrultucunun paralel bağlanmasıyla elde edilir (Moahn et al.,1989).



Şekil 3.1. Üç fazlı orta nokta bağlantılı doğrultucu

Devrenin çalışma ilkesini açıklayabilmek için önce devrenin tristörler yerine diyotlardan oluştuğunu (ya da tristörlerin doğal ateşleme noktasında tetiklendiğini) varsayalım. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi devredeki yarı iletken elemanların katotları aynı potansiyelindedir. Bu durumda anot potansiyellerinin anlık değerleri hangi diyodun (ya da tristörün) iletme gireceğini belirler. Anot potansiyeli en artı olan eleman iletme girer. Elemanlar üzerindeki gerilim düşümleri yok sayılırsa, diyotların katotları da sözü edilen en artı potansiyele geleceğinden diğer iki diyodun anot katot potansiyeli eksi olur. Şekil 3.2’de doğrultucu girişindeki faz ve faz arası

gerilimlerinin zamanla değişimleri ve bunlara göre devrenin çalışma aralıkları verilmiştir.



Şekil.3.2 Faz ve faz arası gerilimlerin zamanla değişimleri

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi,  $0 < \omega t < 360^\circ$  dönemi boyunca devrenin üç ayrı çalışma aralığı söz konusudur.

I)  $0 < \omega t < 120^\circ$  aralığında  $V_A > V_B, V_C$  dir. Bu nedenle  $T_1$  tristörü iletme girecektir. Bu durumda çıkış gerilimi  $V_d = V_A$  ve  $T_1$  tristörü üzerine düşen gerilim  $V_{T1} = 0$  olur.

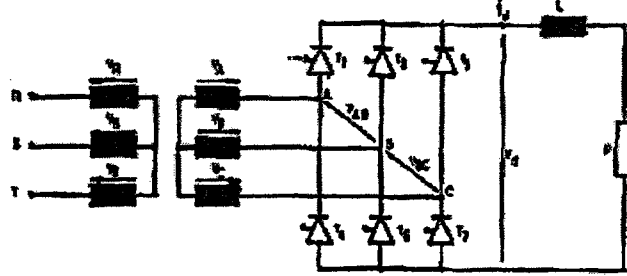
II)  $120 < \omega t < 240^\circ$  aralığında en büyük faz gerilimi  $V_B$ ’dir. II. aralıkta çıkış gerilimi  $V_d = V_B$ , tıkamaya giren  $T_1$  tristörü üzerinde düşen gerilim ise  $V_{T1} = V_A - V_B = V_{AB}$  olur.

III)  $240 < \omega t < 360^\circ$  aralığında ise,  $V_d = V_C$  ve  $V_{T1} = V_A - V_C = V_{AC}$  olur.

Görüldüğü gibi doğru gerilim, faz gerilimlerini izlerken, tıkalı durumdaki bir tristör (ya da diyot) üzerinde ters yönde faz arası gerilimler düşer.(Kasakian et al,1991)

### 3.2 Üç Fazlı Köprü Bağlantılı Doğrultucu

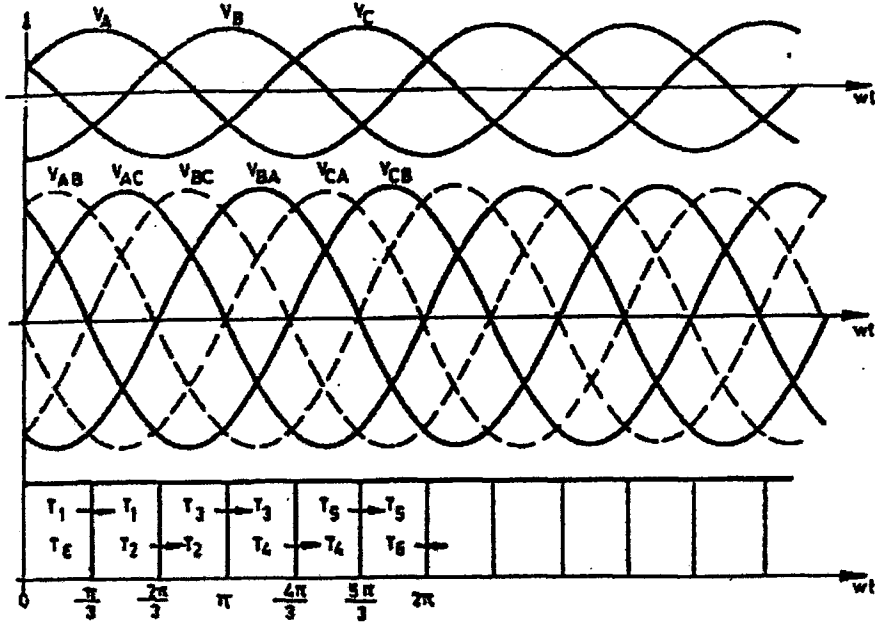
Üç fazlı köprü bağlantılı doğrultucu devresi şekil.3.3'te verilmiştir.



Şekil.3.3. Üç fazlı köprü bağlantılı doğrultucu devresi

Devrede  $T_1, T_3$  ve  $T_5$  tristörlerin katotları,  $T_2, T_4$  ve  $T_6$  tristörlerinin de anotları ortak olarak bağlanmıştır. Sözü edilen tristör grupları ayrı birer dalga doğrultucu gibi çalışmaktadır. Köprü doğrultucularda herhangi bir anda, katotları ortak tristörlerden yalnızca biri, anotları ortak tristörlerden de yalnızca biri iletimde olabilir. Devrenin çalışmasını daha kolay kavrayabilmek için önce tristörlerin doğal ateşleme noktasında ( $\alpha=0$ ) tetiklendiğini kabul edelim. Bu durumda devre diyotlu doğrultucu gibi çalışacaktır. A, B ve C noktalarının potansiyellerinin anlık değerleri, devredeki elemanların hangi anda iletime gireceklerini belirler (Gönen,1988). Şekil.25'te girişteki faz ve faz arası gerilimlerin zamanla değişimleri ve devrenin çalışma aralıkları gösterilmiştir.

$0 < \omega t < \pi/3$  aralığında katotları ortak olan tristör grubundan anot potansiyeli en artı olan  $T_1$  tristörü  $T_3$  ve  $T_5$  tristörlerine göre iletime girmeye daha elverişli olduğundan iletime girecektir.  $T_1$ 'in iletime girmesiyle, ortak katot noktası A noktasının potansiyeline yükselecektir. Anotları ortak olan tristörlerden, katot potansiyeli en küçük olan  $T_6$  tristörü de  $T_2$  ve  $T_4$  tristörlerine göre iletime girmeye daha elverişli olacağından iletime girecek ve ortak anot noktası B noktasının potansiyeline düşecektir. Bu durumda yük gerilimi  $V_d = V_{AB}$  olacaktır.

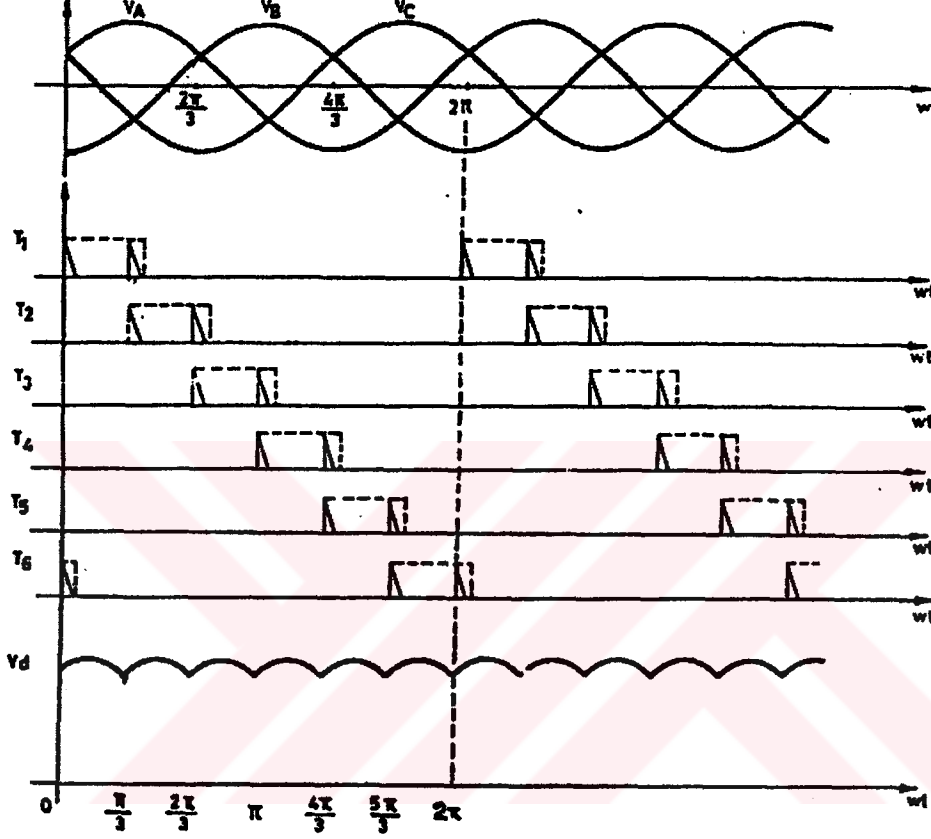


Şekil.3.4 Üç fazlı köprü doğrultucunun çalışma aralıkları

- $\pi/3 < wt < 2\pi/3$  aralığında da en artı potansiyel A noktasında olduğundan  $T_1$  tristörü iletimini sürdürecektir . Buna karşılık aynı aralıkta en eksi potansiyel C noktasının potansiyeli olduğundan,  $T_2$  tristörü  $T_6$  tristörüne göre iletime girmeye daha elverişli olduğu için akımı  $T_6$  tristöründen devralır. Bu aralıkta çıkış gerilimi  $V_d = V_{AC}$  olur.
- $2\pi/3 < wt < \pi$  aralığında benzer nedenlerle  $T_2$  ve  $T_3$  tristörleri iletir.  $V_d = V_{BC}$  olur.
- $\pi < wt < 4\pi/3$  aralığında,  $T_3$  ve  $T_4$  tristörleri iletimdedir.  $v_d = V_{BA}$  olur
- $4\pi/3 < wt < 5\pi/3$  aralığında,  $T_4$  ve  $T_5$  tristörleri iletimdedir ve  $V_d = V_{CA}$  olur.
- $5\pi/3 < wt < 2\pi$  aralığında,  $T_5$  ve  $T_6$  tristörleri iletimdedir ve  $V_d = V_{CB}$  olur.

Yukarıda anlatılanlardan da görüleceği gibi üç fazlı köprü bağlantılı doğrultucunun, giriş geriliminin bir periyodu içerisinde altı farklı çalışma durumu vardır. Bir başka deyişle çıkış işaretinin bir darbe dönemi, giriş işaretinin bir döneminin 1/6'sı kadardır. Devredeki tristörler (ya da diyotlar)  $120^\circ$  derece süresince iletimde kalırlar. Ancak bu sürenin ilk yarısında başka ikinci yarısında ise başka bir elemanla birlikte

iletimde olurlar. Bu nedenle devreyi denetleyecek olan tetikleme devresinin herhangi bir tristör için üreteceği kapı darbesinin ya  $60^\circ$  aralıkta yinelenen iki darbeden oluşması, yada en az  $60^\circ$  süreli olması gerekmektedir. Bu durum şekil 3.5'te  $\alpha=0$  için gösterilmiştir.



Şekil 3.5  $\alpha = 0^\circ$  için tetikleme darbelerinin konumu ve doğru gerilim

### 3.2.1 Direnç Yüğü

Üç fazlı köprü bağlantı doğrultucunun direnç yükünde dalga biçimleri şekil 3.7'de verilmiştir. Devrenin doğal ateşleme noktası orta nokta bağlantılı devre için tanımlanan noktadır. Yük direnç olduğundan,  $wt = 2\pi/3$  anında  $V_{AB} = I_d = 0$  olur. Bu nedenle  $\alpha > \pi/3$  ise,  $2\pi/3 < \alpha < \pi/3$  aralığında çıkış gerilimi  $V_d = 0$  olacaktır. Söz edilen durumun daha iyi gözlenmesi için şekil 3.7'de  $\alpha = \pi/6$  ve  $\alpha = \pi/2$  ateşleme açıları için dalga biçimleri verilmiştir.

### 3.2.2 Doğru Gerilimin Ortalama Değeri

Dalga biçimlerinden de görüldüğü gibi, yük üzerinde doğru gerilim faz arası gerilimlerin parçalarından da oluşmaktadır. Örneğin bu kesiksiz çalışmada  $\alpha < \omega t < \pi/3$  aralığında  $V_d = V_{AB}$

ya da kesikli çalışmada

$\alpha < \omega t < 2\pi/3$  aralığında  $V_d = V_{AB}$

$2\pi < \omega t < 4\pi/3$  aralığında  $V_d = 0$

değerlerini almaktadır. Yine dalga biçimlerinden yararlanarak  $V_d$ 'nin  $T = \pi/3$  dönemli bir değişim olduğu görülmektedir. Bu durumda doğal ateşleme noktasına göre;

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_A - V_B = \sqrt{2}V_2 \sin(\omega t + \pi/6) - \sqrt{2}V_2 \sin(\omega t + \pi/6 - 2\pi/3) \\ &= \sqrt{3} \sqrt{2}V_2 \sin(\omega t + \pi/6 + \pi/6) \\ &= \sqrt{6}V_2 \sin(\omega t + \pi/3) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$0 < \alpha < \pi/3$  aralığında

$$V_{d\alpha} = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi/3} \sqrt{6}V_2 \sin(\omega t + \pi/3) d\omega t = \frac{3\sqrt{6}V_2}{\pi} \cos\alpha \quad (3.2)$$

$\pi/3 < \alpha < 2\pi/3$  aralığında

$$V_{d\alpha} = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{6}V_2 \sin(\omega t + \pi/3) d\omega t = \frac{3\sqrt{6}V_2}{\pi} (1 + \cos(\alpha + \pi/3)) \quad (3.3)$$

$\alpha < 2\pi/3$  aralığında

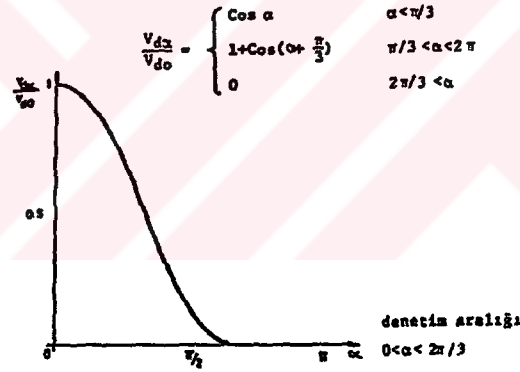
$$V_{d\alpha} = 0 \quad (3.4)$$

elde edilir.

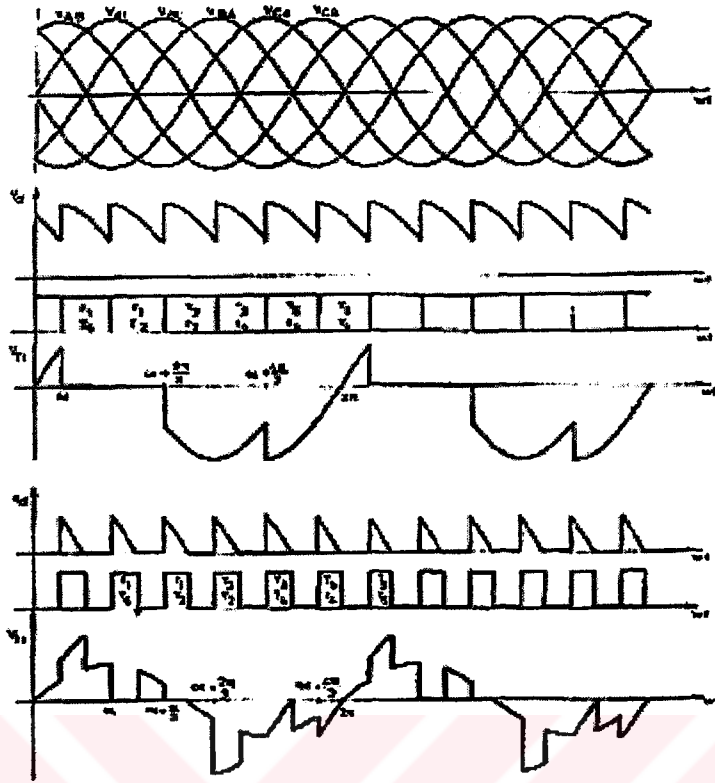
$\alpha = 0$  için

$$V_{d0} = V_{d\alpha} |_{\alpha=0} = 3\sqrt{6}V_2 / \pi \quad (3.5)$$

elde edilir. (3.1) ve (3.2) bağıntıları kullanılarak, üç fazlı köprü bağlantılı doğrultucunun denetim eğrisi elde edilir.



Şekil 3.6. Denetim eğrisi



Şekil 3.7 Üç fazlı köprü bağlantılı doğrultucuda direnç yükünde dalga biçimleri

### 3.3. Direnç-Endüktans Yüğü (RL)

Üç fazlı, köprü bağlantılı doğrultucunun, direnç-endüktans yükünde çalışmada ( $\omega L \gg R$  varsayımıyla) dalga biçimleri şekil 3.9'da gösterilmiştir.

Yük endüktans niteliğinde olduğundan, yük akımının dalga biçimi gerilimden bağımsızdır. Yani gerilimin sıfır geçişlerinde akım sıfır değerine düşmeyeceğinden tristör çiftleri doğal olarak tıkanmazlar. Ancak bir sonraki tetikleme anında iletme yeni giren tristör uygun tristörden yük akımını devralır. Endüktans nitelikli yükte çalışmada her tristör  $120^\circ$  süreyle iletimde kalır.(Rashid,1993)



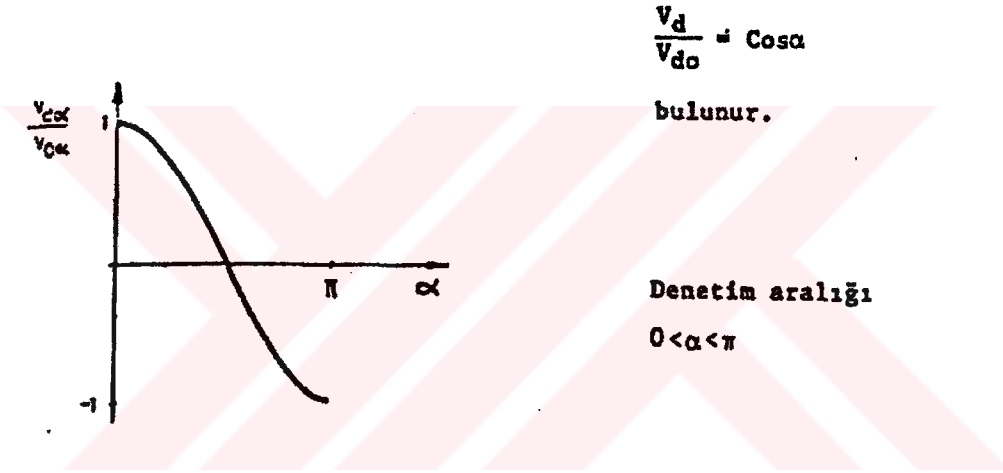
### 3.3.1. Doğru Gerilimin Ortalama Değeri

$$V_{d\alpha} = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi/3} \sqrt{6}V_2 \sin(\omega t + \pi/3) d\omega t = \frac{3\sqrt{6}V_2}{\pi} \cos\alpha \quad (3.6)$$

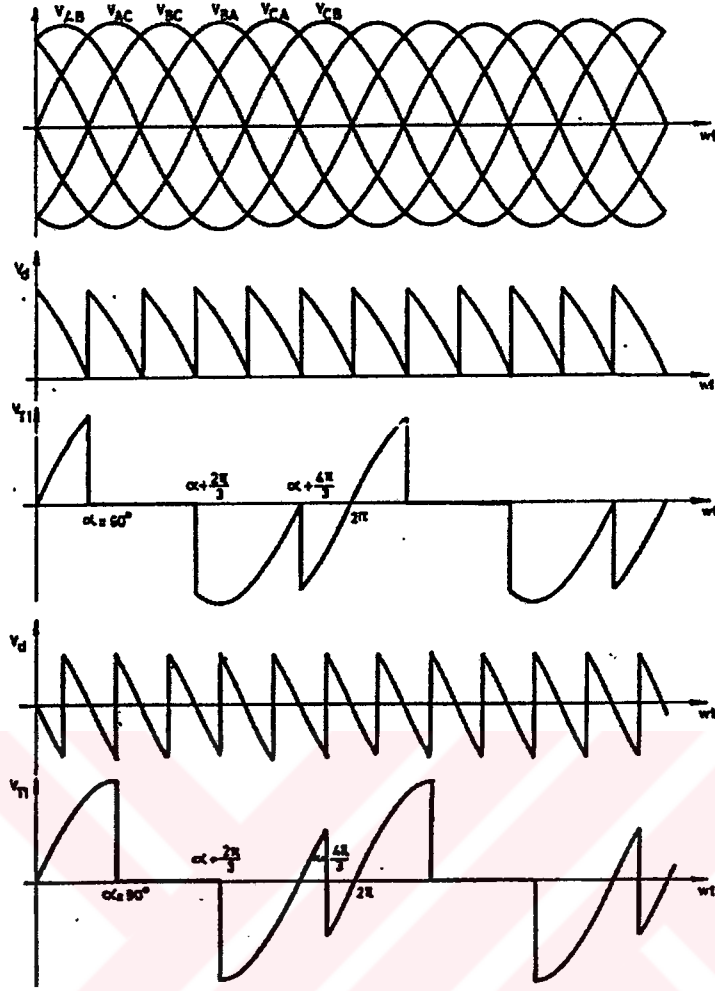
$\alpha = 0$  için

$$V_{d0} = V_{d\alpha}|_{\alpha=0} = 3\sqrt{6}V_2 / \pi \quad (3.7)$$

elde edilir. (3.4) ve (3.5) bağıntıları kullanılarak denetim eğrisi şekil 3.8'deki gibi olur.



Şekil.3.8 Denetim Eğrisi



Şekil 3.9 Üç fazlı köprü bağlantılı doğrultucu devresinde, endüktans yükünde dalga biçimleri

### 3.4. Doğrultucularda Gerilim Düşümü

Doğrultucularda oluşan gerilim düşümlerini üç ana grupta toplayabiliriz:

- Diyot ve tristörler üzerinde düşen eşik gerilimi  $V_f$ , akımından bağımsız olup yaklaşık olarak her eleman için 0.6V-1V olarak alınabilir
- Direnç gerilim düşümleri akıma bağlıdır. Elemanların iletim yönündeki dirençleri, bağlantılı dirençleri ve giriş transformatörlerinin sargı dirençlerinin tümünü oluşturduğu eşdeğer direnç  $R_k$  ise , direnç gerilim düşümü

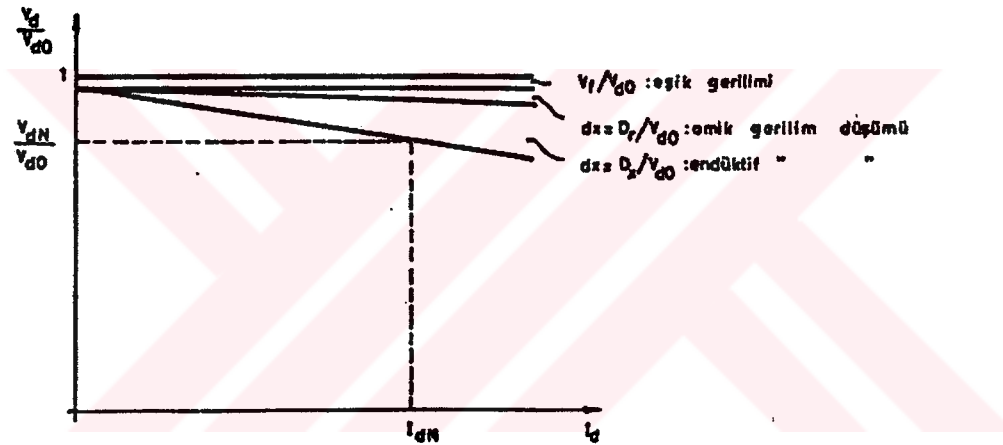
$$D_r = R_k \cdot I_d \quad (3.8)$$

olarak tanımlanabilir.

- Doğrultucularda gerilim düşümlerinin önemli bir bölümü aktarım sırasında endüktanslar üzerinde oluşan gerilim düşümüdür. Girişteki değişken gerilimin frekansı  $f$  ve giriş işaretinin bir dönemi boyunca devrede oluşan aktarım sayısı  $p$  ise, birim zamanda devrede  $p \cdot f$  kez aktarım olacaktır. Bu durumda aktarım gerilim düşümü,

$$D_x = p \cdot f \cdot L_k \cdot I_d \quad (3.9)$$

biçiminde tanımlanır.



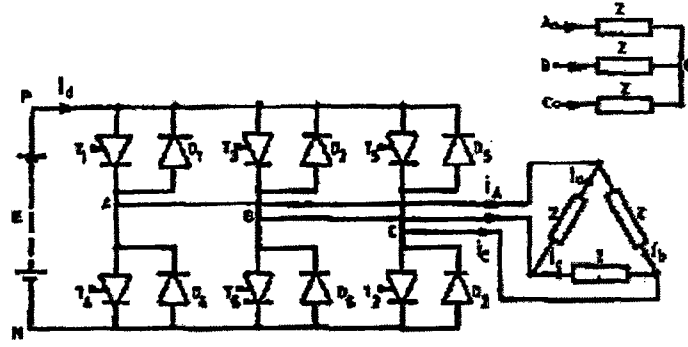
Şekil 3.10. Gerilim düşümleri

### 3.5. Üç Fazlı Eviriciler

Şekil 3.11'de tristörlü üç fazlı gerilim beslemeli köprü evirici devresi verilmiştir. Bu bağlantıda aktarım devreleri gösterilmemiş olup aktarım devresi bir fazlı evirici devrelerinde açıklanan devrelerden oluşur. Üç fazlı evirici devreleri, bir fazlı tam dalga köprü eviriciye bir paralel kol daha eklenerek elde edilmiştir.

Bu devrede  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$  tristörleri sırayla her biri  $120 - 180$  derece iletimde olacak biçimde tetiklenmektedir. Dolayısıyla evirici çıkış dalga biçimleri bu iletim

sürelerine göre değişmektedir. İletimde olan tristör öyle ayarlanmalıdır ki üç fazın gerilimleri toplamı her an sıfır olmalıdır. Köprünün altı tristöründen herhangi birinin yanlış tetiklemesi veya iletim zamanını uzatarak kendinden sonra iletme geçecek tristörün iletim zamanında da iletimde kalması eviricinin güç devresini oluşturan köprüde istenmeyen kısa devrelere yol açacaktır.(Payidar,1990)



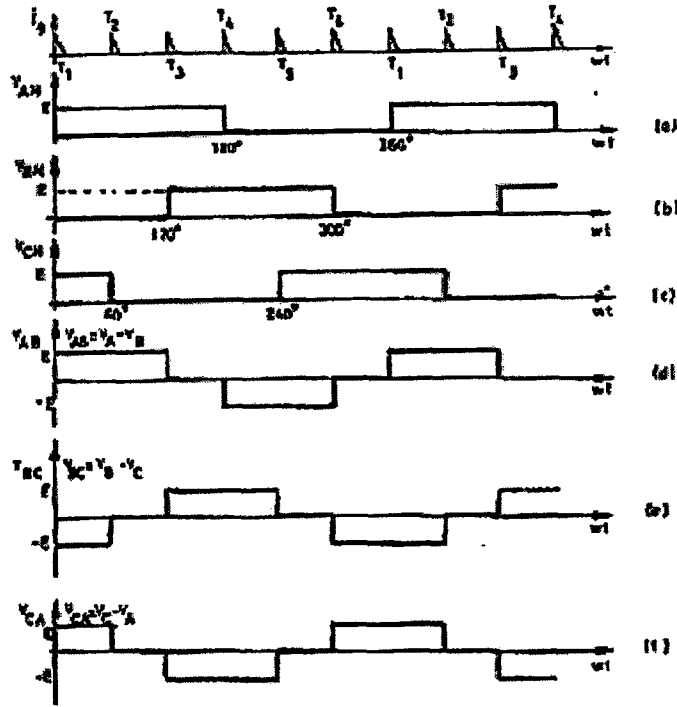
Şekil 3.11 Üç fazlı gerilim beslemeli evirici devresi

Üçgen bağlı direnç-endüktans yükü durumunda üç fazlı evirici devresi çalışması aşağıdaki şekillerde incelenebilir.

### 3.5.1 Gerilim Dalga Biçimleri

Aktarımın düşüncel olarak gerçekleştiği varsayımıyla  $V_{AN}, V_{BN}, V_{CN}$  gerilimleri şekil 3.12'de görüldüğü gibi olur geri beslenme diyotları yükte biriken enerjiyi kaynağa geri vermek için kullanılmıştır. Eviricinin çıkış frekansı, tristörlerin tetikleme frekansı ile belirlenir.

Fazlar arası gerilimler, faz gerilimlerinin birbirinden çıkarılması ile elde edilebilirler.



Şekil 3.12 Üç fazlı eviricinin üçgen bağlı yükte çıkış gerilimi dalga biçimleri

### 3.5.2 Akım Dalga Biçimleri

Dengeli üçgen bağlı, direnç-endüktans yük ve düşüncel olarak aktarımın gerçekleştiği varsayımıyla evirici devresinin akımları incelenebilir. Faz akımları, fazlara uygulanan gerilim basamağı değiştiğinde oluşan bir dizi üstel akımdan oluşmaktadır. Şekil 3.13'te üçgen bağlı bir direnç-endüktans yükünün faz ve hat akımlarının dalga biçimleri gösterilmiştir.

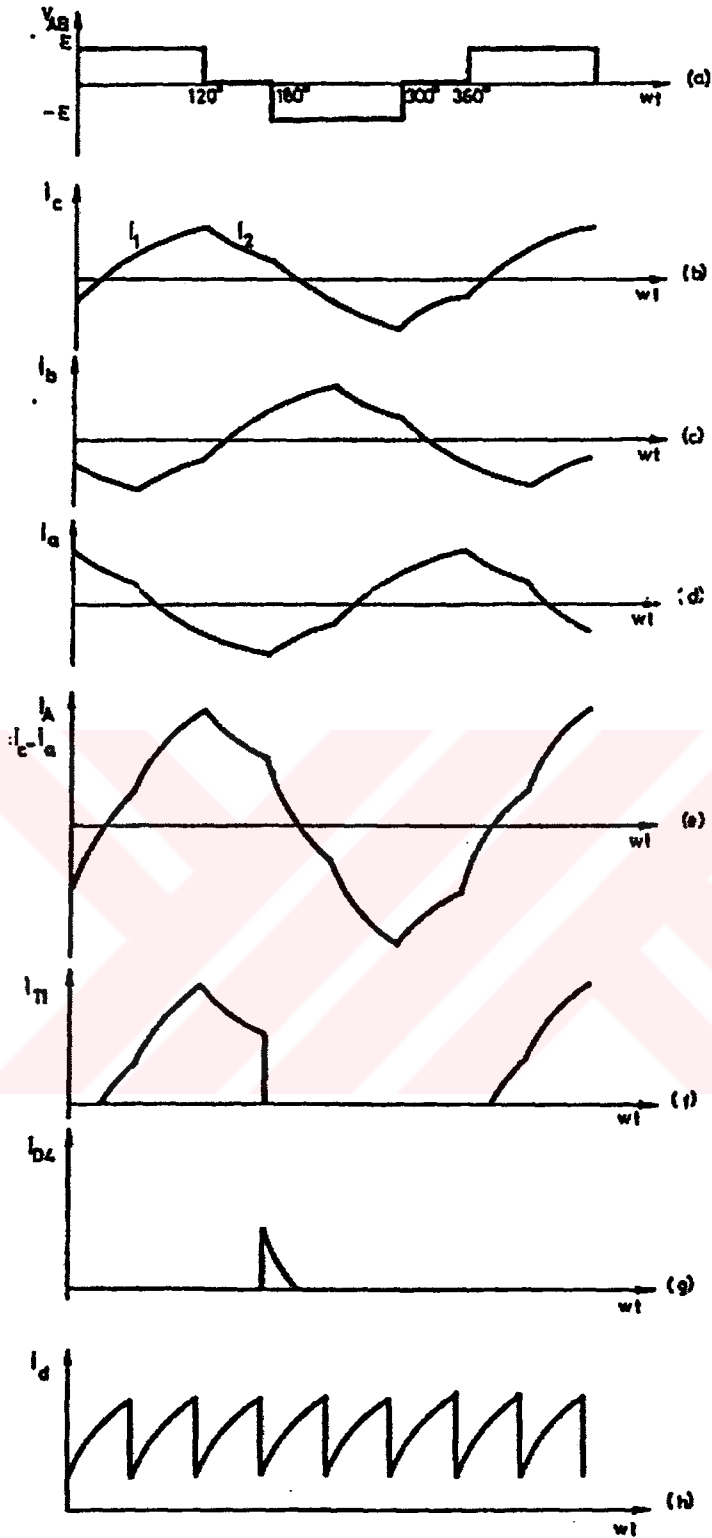
### 3.5.3 Devrenin Çalışması

$T_4$ ,  $T_5$ ,  $T_6$  tristörlerinin ilerimde olduğu varsayılırsa  $T_1$  tristörünün tetiklenip  $T_4$ 'ün susturulduğu an zaman başlangıcı olarak seçilebilir. O zaman, yükün C fazına uygulanan gerilim ilk  $120^\circ$  için  $+E$  olur (Şekil 3.13(a)). Bu, üstel olarak artan  $i_1$  akımını üretir (Şekil 3.13(b)). Yük zaman sabiti göz önüne alındığında  $T_3$  tetiklenip  $T_6$  susturulduğunda faz akımının akmakta olduğu görülür. Bu, C fazının her iki

ucunu da kaynağın (+) ucuna bağlar ve faz gerilimini sıfıra indirir. Bununla birlikte endüktif akım  $T_1$  ve  $D_3$  elemanları üzerinden dolaşımını sürdürür. Bunun sonucu olarak, faz akımı ( $i_2$ ) üstel olarak sıfıra doğru azalır (Şekil 3.13(b)). 180 derecede  $T_4$  tetiklenip yarı dönem sona erince C fazının uçlarına E gerilimi ters yönde uygulanır. Diğer fazların dalga biçimlerinde bu fazın dalga biçimlerinin 120 derece ve 240 derece kaydırılması ile çizilebilir. Hat akımı  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_A = \dot{I}_C - \dot{I}_A$  dan bulunur (Şekil 3.13 (e)).

Üç fazlı eviricide anahtarlama elemanlarının her birinin 120 derece iletimde olması veya 180 derece iletimde olması durumlarında, evirici çıkış dalga biçimleri değişmektedir. Bu iki çalışma durumunu ayrı ayrı inceleyelim.

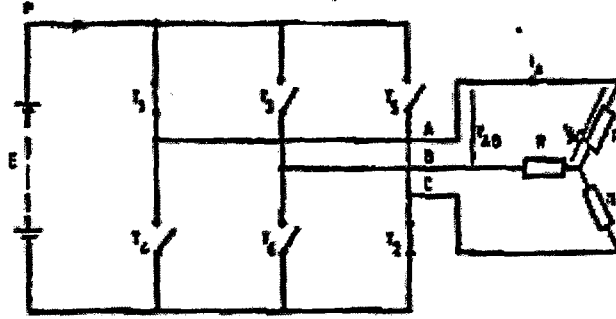




Şekil 3.13 Üç fazlı evericinin üçgen bağlı direnç-endüktans yüküne bağlanması durumunda akım dalga biçimleri

### 3.5.3.1. 120 Derece iletim durumu

Bu durumda her bir anahtarlama elemanı bir dönemde 120 derece iletimde kalmaktadır. Bu dönem süresince bir başka tümleşik anahtarlama elemanlarıyla 60 derece iletimde kalmaktadır. Şekil 3.14'te bu ilkeye göre çalışan üç fazlı evirici ilkesel devresi ve çıkış dalga biçimleri verilmiştir.



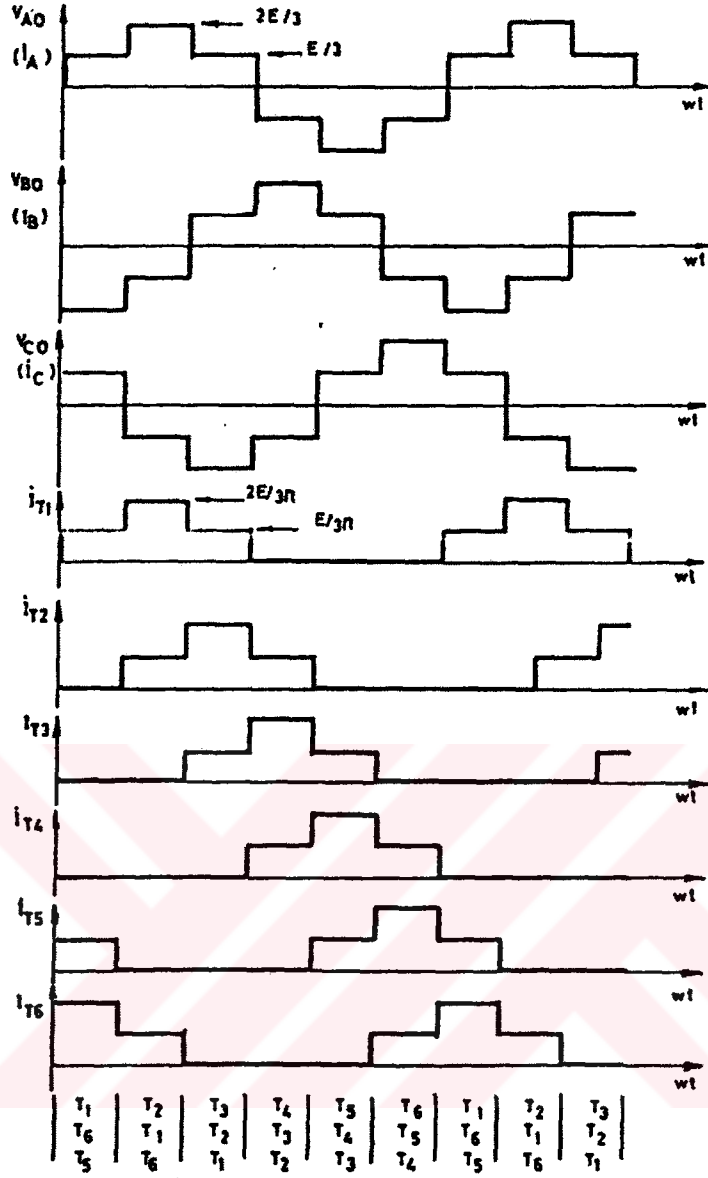
Şekil 3.14 Üç fazlı evirici ilkesel devresi

### 3.5.3.2. 180 Derece iletim durumu

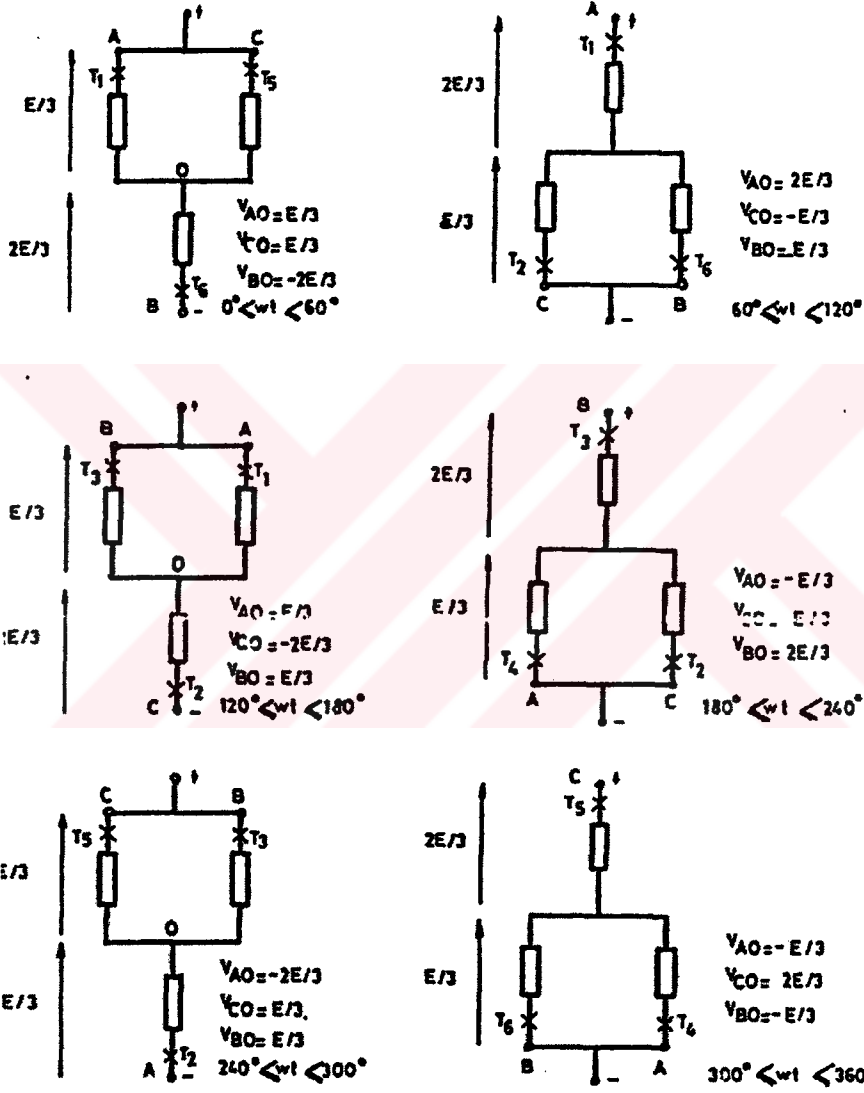
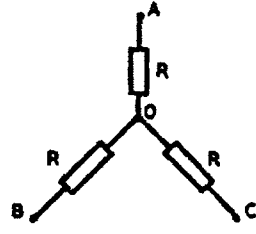
Her bir anahtarlama elemanı bir dönemde 180 derece iletimde kalmaktadır. Bu dönem süresince diğer tümleşik anahtarlama elemanlarıyla 120 derece iletimde kalmaktadır. Şekil 3.15'te bu ilkeye göre çalışan üç fazlı ilkesel devresi ve çıkış dalga biçimleri, şekil 3.16'da faz akım ve gerilim dalga biçimlerinin belirlenmesi için yapılan analiz verilmiştir.







Şekil 3.17. 180 derece iletim durumunda çıkış dalga biçimleri



Şekil 3.18. Yıldız bağlı dengeli direnç yükünde 180 derece iletimde şekil 3.17 için gerilim ve akım dalga biçimlerinin belirlenmesi

### 3.6. AA / DA Dönüştürücünün Benzetişimi

Şekil 3.19'da gösterilen RLC yüklü 6 vuruşlu bir AA/DA dönüştürücünün Tablo Yönteminden (TÜBİTAK EEAG-52, 1996) faydalanarak benzetişimi yapılmıştır. Bu devrede kullanılan eleman değerleri :

AA Kaynaklar :

$$e_{R1} = E_1 \sin \omega t, \quad e_{S1} = E_1 \sin(\omega t + 120^\circ), \quad e_{T1} = E_1 \sin(\omega t + 240^\circ), \quad E_1 = 42,8 \text{ kV}$$

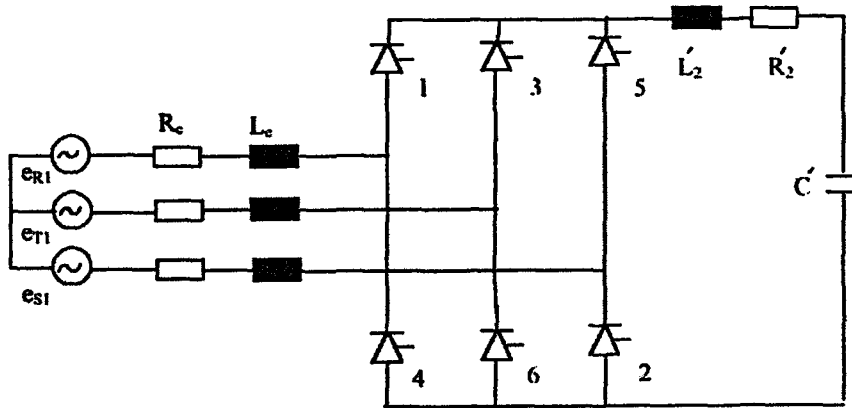
$$R_c = 0,5 \text{ ohm}, \quad L_c = 20 \text{ mH}$$

Tristör eşdeğer parametresi :  $L_d = 1 \text{ mH}$

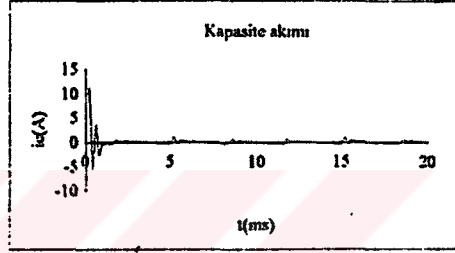
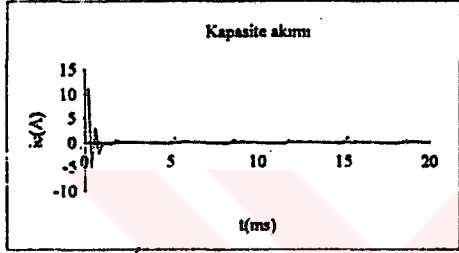
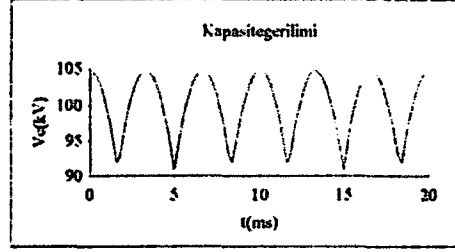
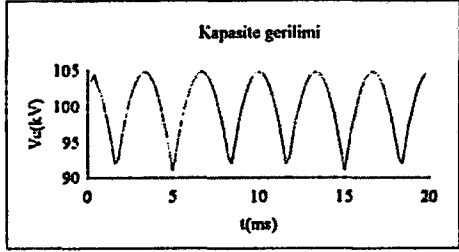
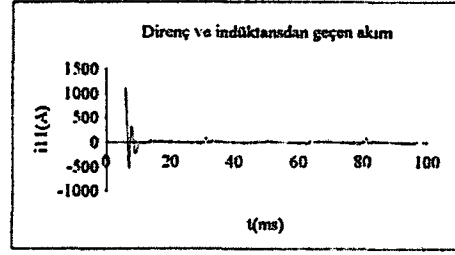
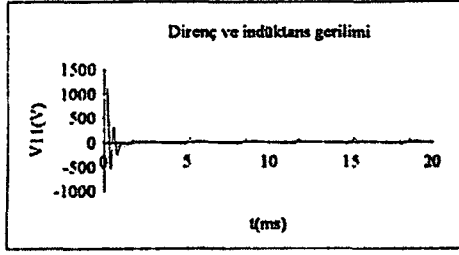
Yük :

$$R_2 = 2,16 \text{ ohm}, \quad L_2 = 13 \text{ mH}, \quad C = 21,6 \text{ } \mu\text{F}$$

Bazı devre parametreleri ve  $\alpha$  ateşleme açısı değiştirilerek çıkışlar hesaplanmıştır. Sonuçlar şekil 3.20'de verilmiştir.

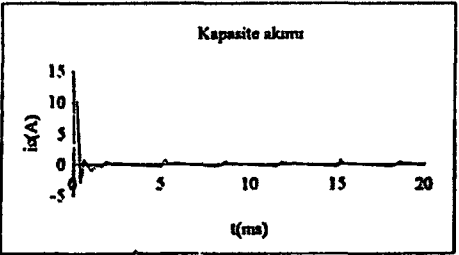
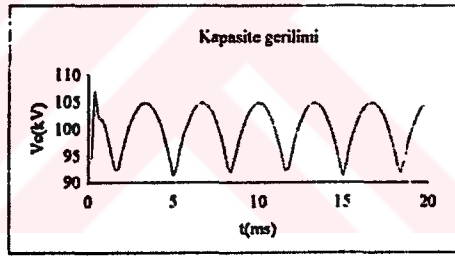
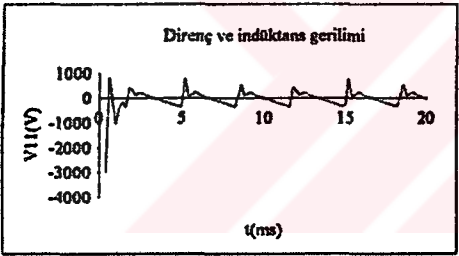


Şekil 3.19 RLC yüklü 6 vuruşlu AA/DA dönüştürücü modeli



R2=100 Ohm

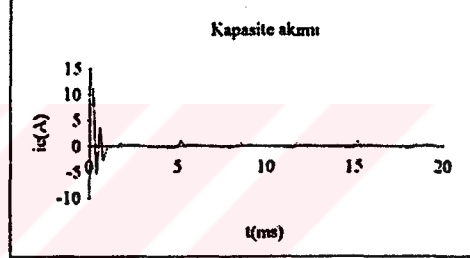
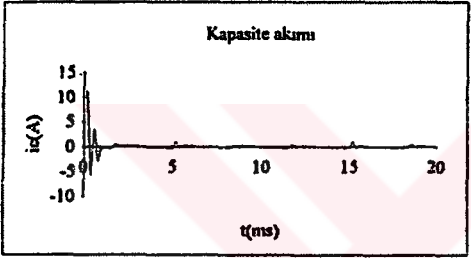
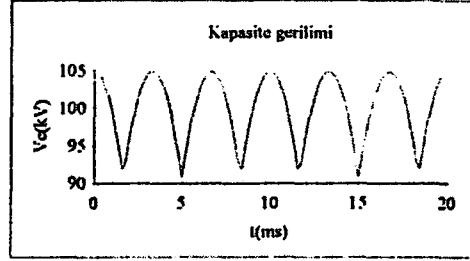
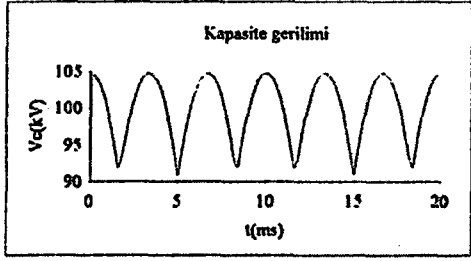
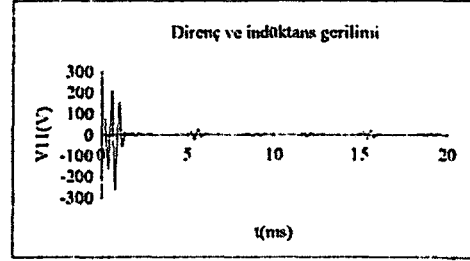
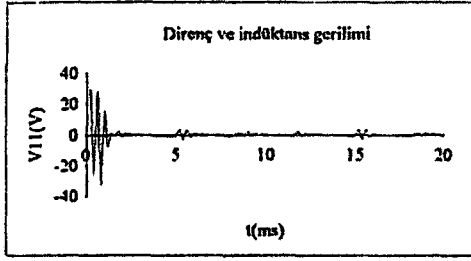
R2 =10 Ohm



R2=1000 Ohm

R2 =10 , 100 , 1000 Ohm  
L2 = 13mH , C=21,6 mikroF , alfa =0

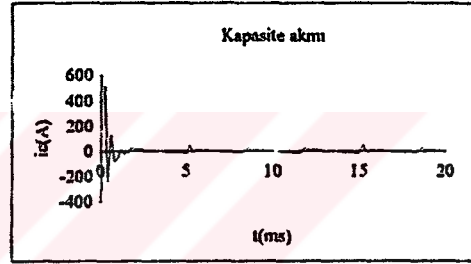
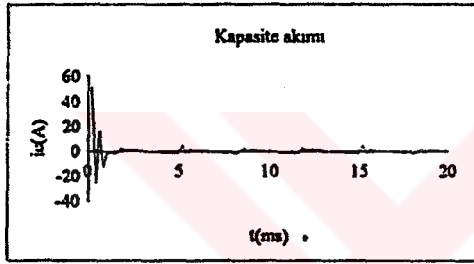
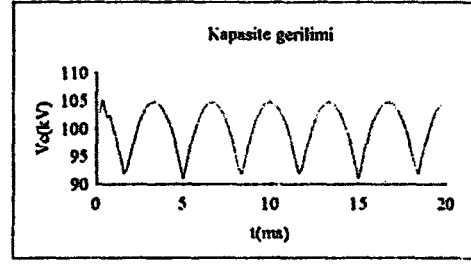
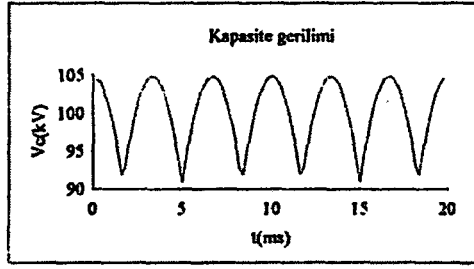
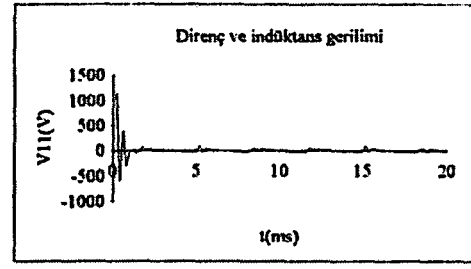
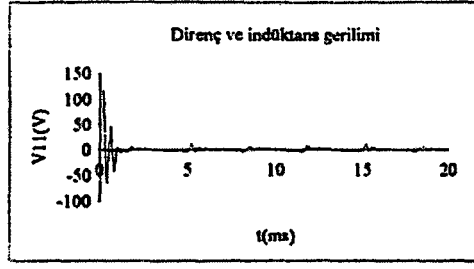
Şekil 3.20.a) RLC yüklü 6 vuruşlu AA/DA dönüştürücü modelinin benzetişim sonuçları



$L_2=100 \text{ mH}$

$L_2=1 \text{ H}$

Şekil 3.20.b) RLC yüklü 6 vuruşlu AA/DA dönüştürücü modelinin benzetişim sonuçları



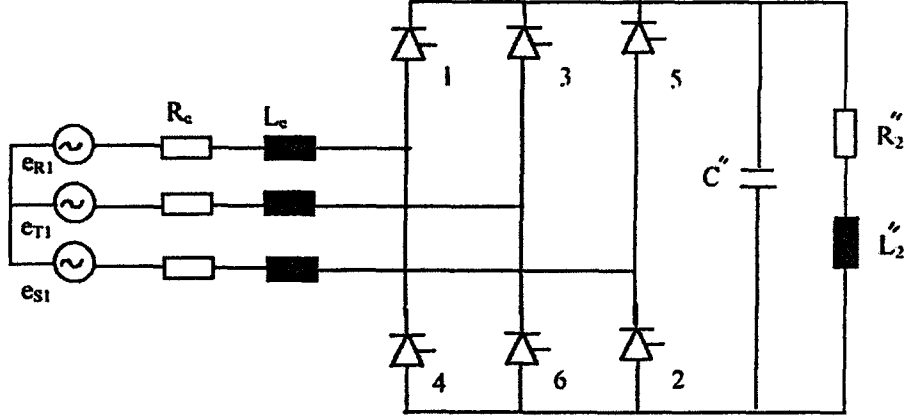
$C=100$  mikroF

$C=1000$  mikro F

$C_2 = 0,1$  ,  $1mF$  ,  $R=2,6$  Ohm ,  $L_2 = 13$  mH , alfa = 0

Şekil 3.20.c) RLC yüklü 6 vuruşlu AA/DA dönüştürücü modelinin benzetişim sonuçları

RL yüklü bir AA/DA dönüştürücüde şekil 3.21'de gösterilmiştir. Bu dönüştürücünün tablo denklemi ile çözümü yapılmış, sonuçlar şekil 3.22'de verilmiştir. Devrede değiştirilen parametreler şekillerde belirtilmiştir.  $L_2$  endüktansının değeri arttıkça yük akımındaki dalgalılığın azaldığı görülür.



Şekil 3.21. RL yüklü 6 vuruşlu AA/DA dönüştürücünün modeli

Bu devrede kullanılan eleman değerleri de şekil 3.19 ile aynıdır.

AA Kaynaklar :

$$e_{R1} = E_1 \sin \omega t, \quad e_{S1} = E_1 \sin(\omega t + 120^\circ), \quad e_{T1} = E_1 \sin(\omega t + 240^\circ), \quad E_1 = 42,8 \text{ KV}$$

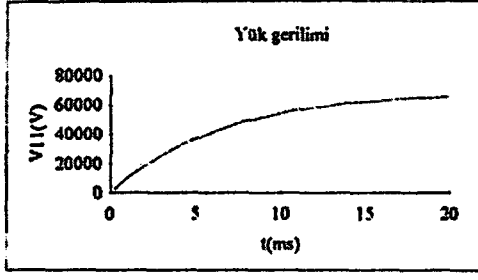
$$R_c = 0,5 \text{ ohm}, \quad L_c = 20 \text{ mH}$$

Tristör eşdeğer parametresi :  $L_d = 1 \text{ mH}$

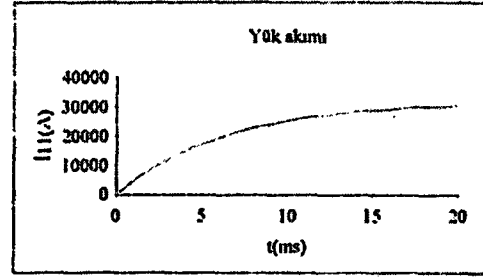
Yük :

$$R_2 = 2,16 \text{ ohm}, \quad L_2 = 13 \text{ mH}, \quad C = 21,6 \text{ } \mu\text{F}$$

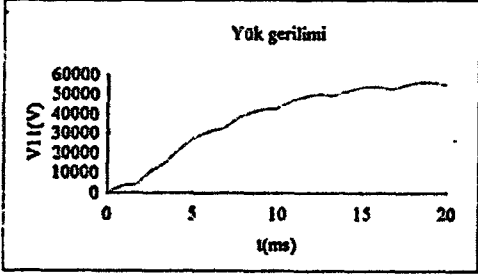




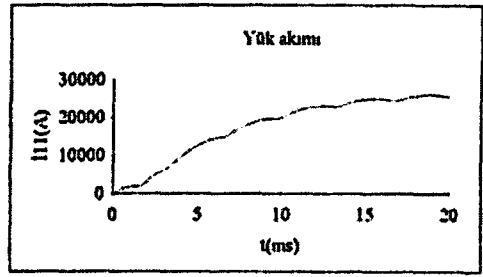
$\hat{L}2=10\text{ H}$  , alfa=0



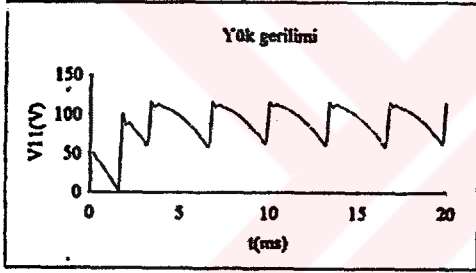
$\hat{L}2=10\text{ H}$  , alfa=0



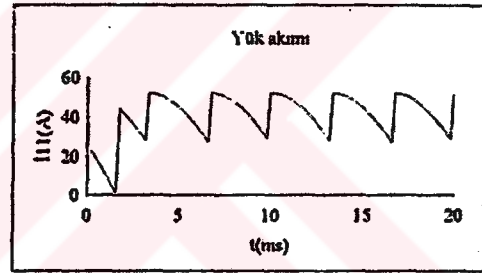
$\hat{L}2=10\text{ H}$  , alfa=30



$\hat{L}2=10\text{ H}$  , alfa=30

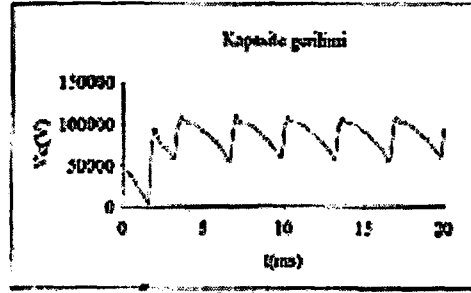


$\hat{R}2=1\text{K}$  , alfa=30

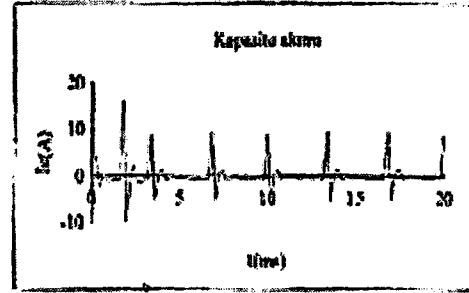


$\hat{R}2=1\text{K}$  , alfa=30

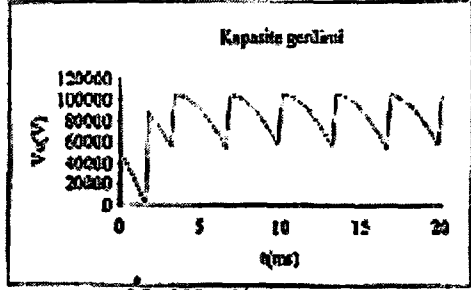
Şekil 3.22.a) RL yüklü AA/DA dönüştürücünün çıkış eğrileri



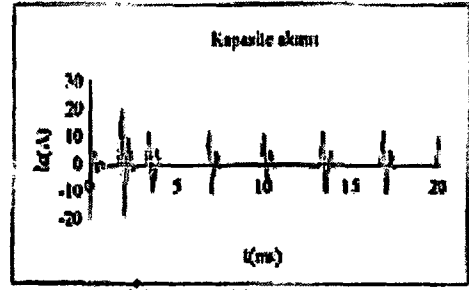
R2=1000 Ohm



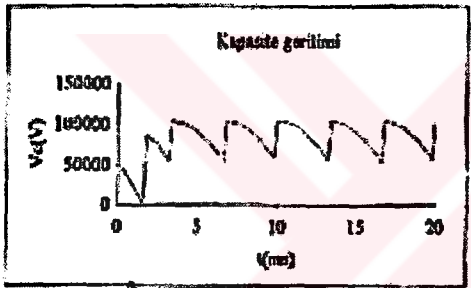
R2=1000 Ohm



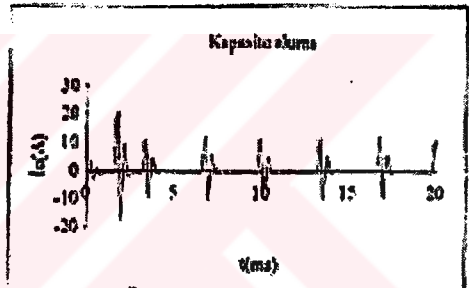
L2=100 mH



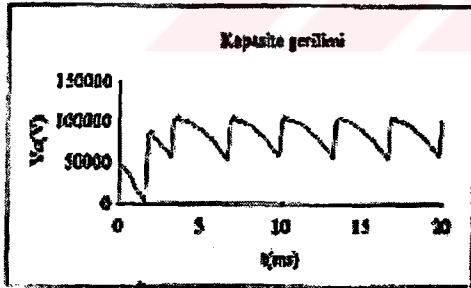
L2=100 mH



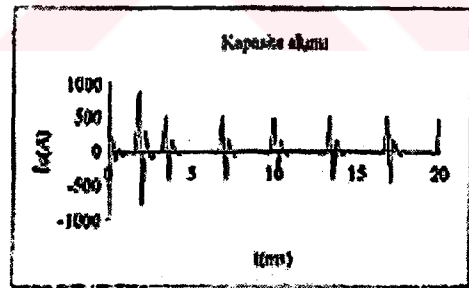
L2=1H



L2=1H

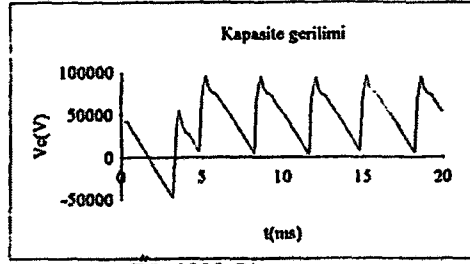


C=1000 mikroF

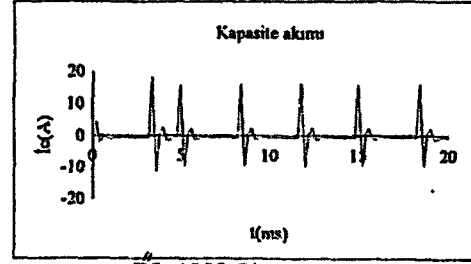


C=1000 mikroF

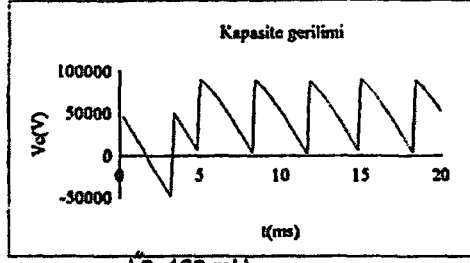
Şekil 3.22.b) RL yüklü AA/DA dönüştürücünün  $\alpha=30$  derece için çıkış eğrileri



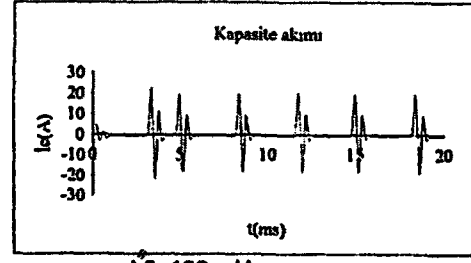
R2=1000 Ohm



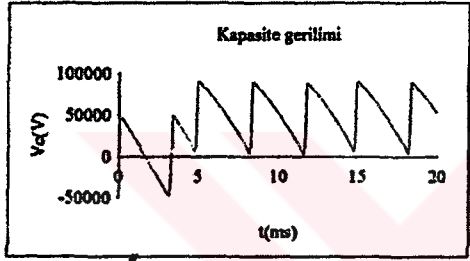
R2=1000 Ohm



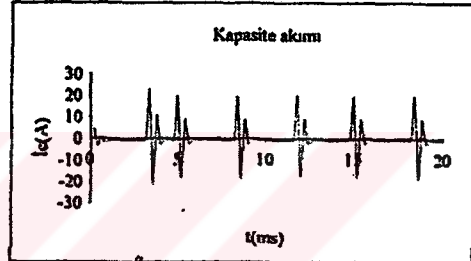
L2=100 mH



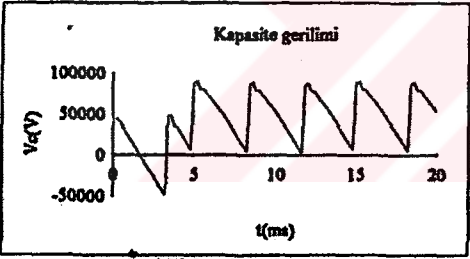
L2=100 mH



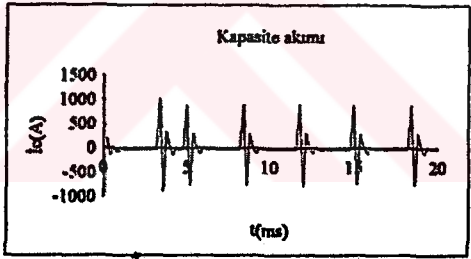
L2=1H



L2=1H



C=1000 mikroF



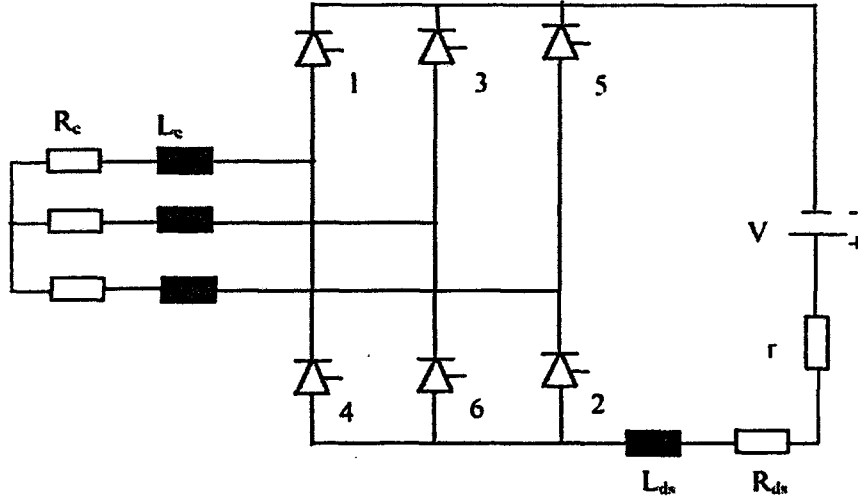
C=1000 mikroF

Şekil 3.22.c) RL yüklü 6 vuruşlu AA/DA dönüştürücünün  $\alpha=60$  derece için çıkış eğrileri

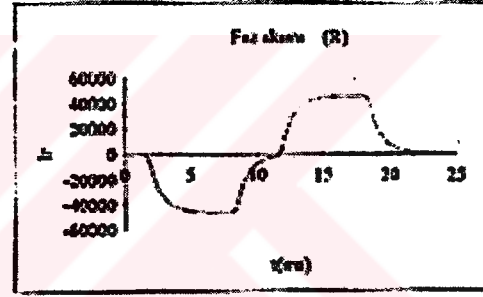
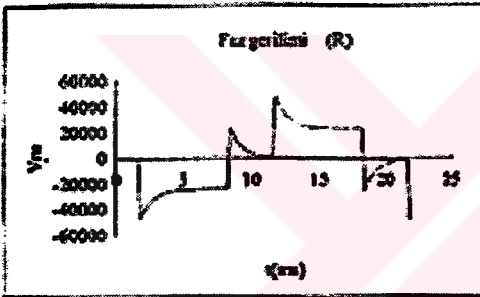
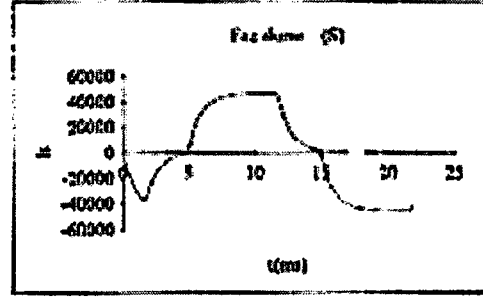
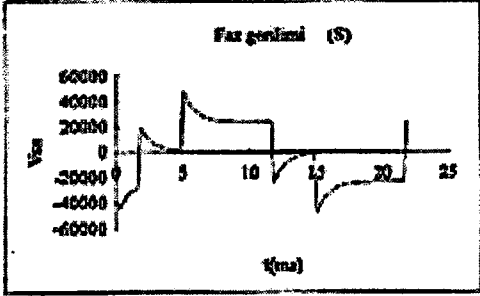
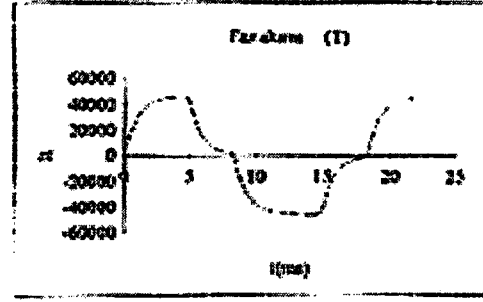
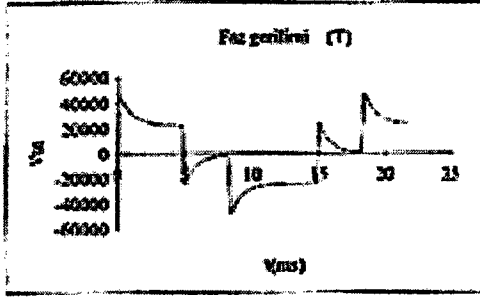
### 3.7 DA/AA Eviricinin Benzetişimi

Şekil 3.23'te görülen eviricinin tablo yönteminden faydalanarak benzetişimi yapılmıştır.

$R_{ds} = 2.16 \text{ ohm}$ ,  $L_{ds} = 13 \text{ mH}$ ,  $L_d = 1 \text{ mH}$  ve  $V = 100 \text{ kV}$  parametreleri sabit alınıp,  $R_c$  ve  $L_c$  değerlerini değiştirerek elde edilen çıkış gerilim ve akım sonuçları Şekil 3.24'te verilmiştir.

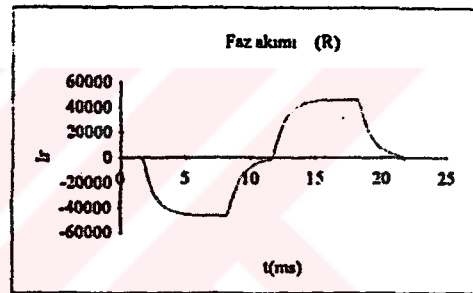
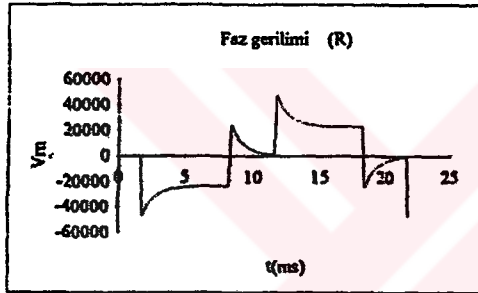
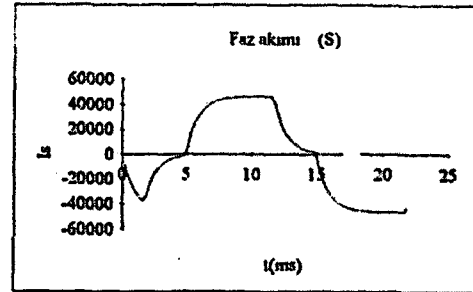
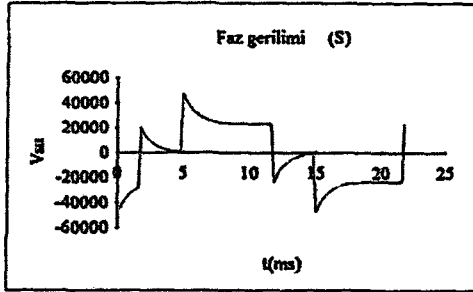
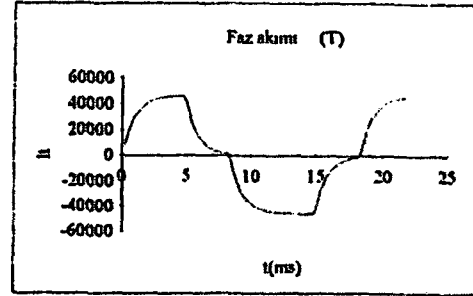
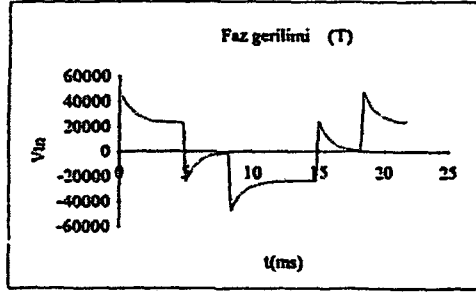


Şekil 3.23 6 vuruşlu DA/AA eviricinin modeli



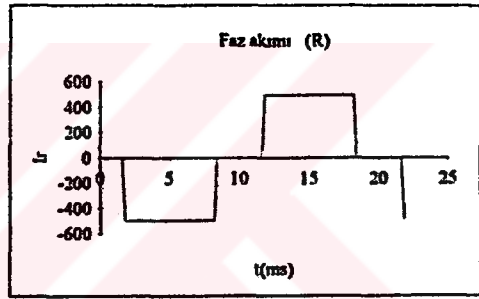
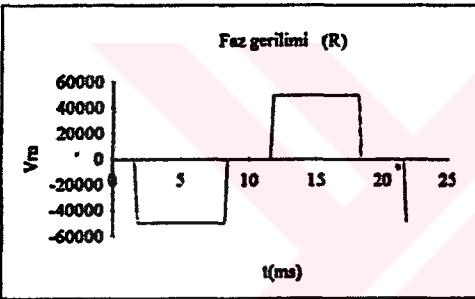
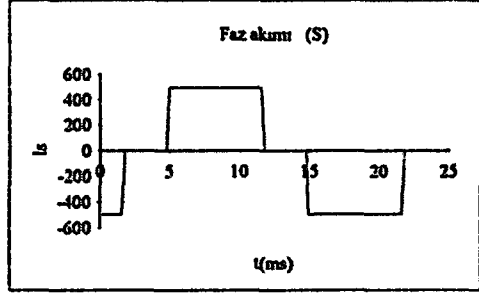
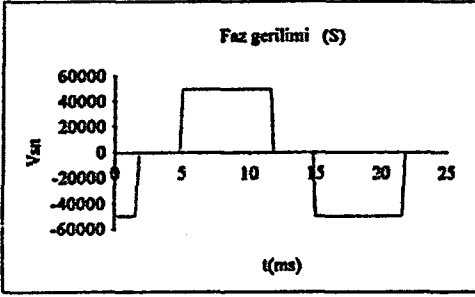
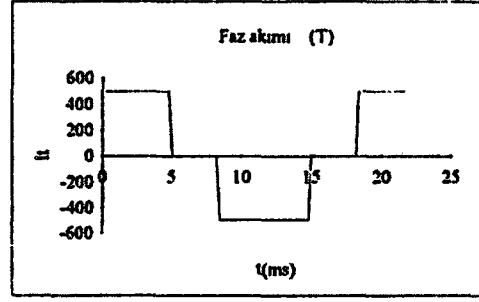
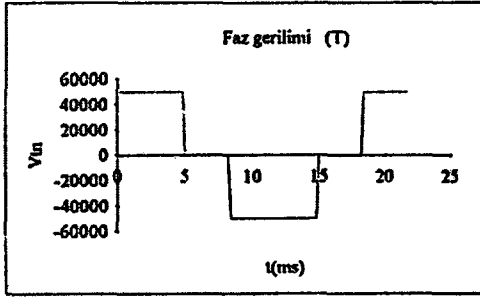
$L_c = 1H$  ve  $R_c = 0.5 Ohm$  ,  $\alpha = 0$

Şekil 3.24.a) 6 vuruşlu DA/AA evirici modelinin benzetişim sonuçları  $L_c = 20 mH$ ,  $R_c = 0.5 ohm$ ,  $\alpha = 0$



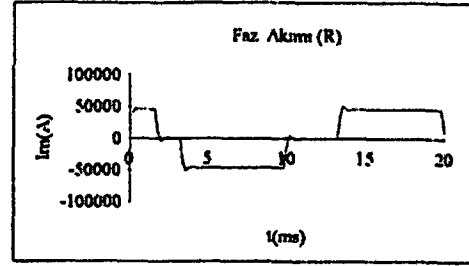
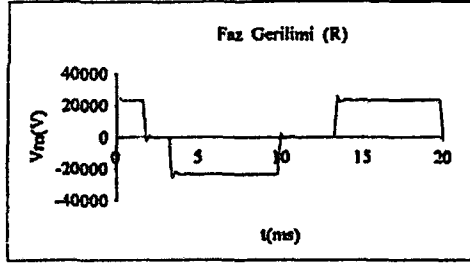
$L_c = 1\text{H}$  ve  $R_c = 0.5\text{ Ohm}$  ,  $\text{alfa} = 0$

Şekil 3.24.b) 6 vuruşlu DA/AA evirici modelinin benzetişim sonuçları  $L_c = 1\text{ H}$ ,  $R_c = 0.5\text{ ohm}$ ,  $\text{alfa} = 0$

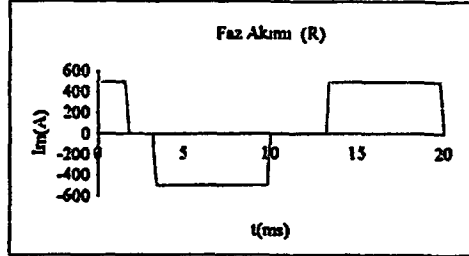
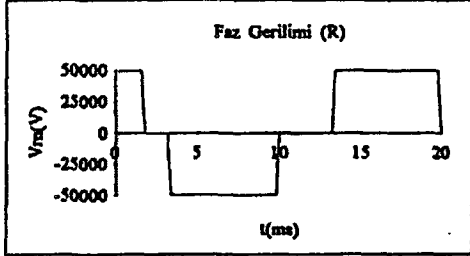


$L_c = 20\text{mH}$  ve  $R_c = 100\text{ Ohm}$  ,  $\text{alfa}=0$

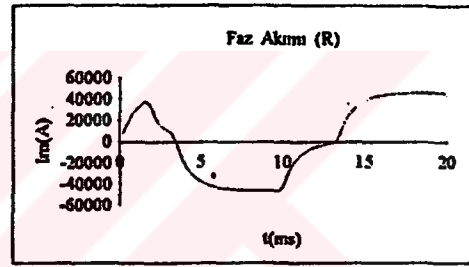
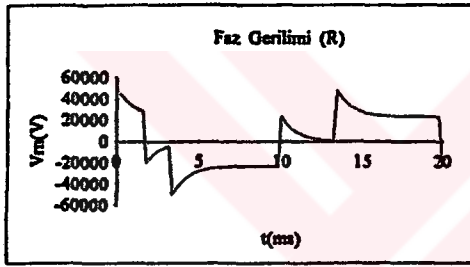
Şekil 3.24.c) 6 vuruşlu DA/AA evirici modelinin benzetişim sonuçları  $L_c=20\text{ mH}$ ,  $R_c=100\text{ ohm}$ ,  $\text{alfa}=0$



$L_c=20\text{mH}$  ve  $R_c=0,5\text{ Ohm}$



$L_c=20\text{ mH}$  ve  $R_c=100\text{ Ohm}$



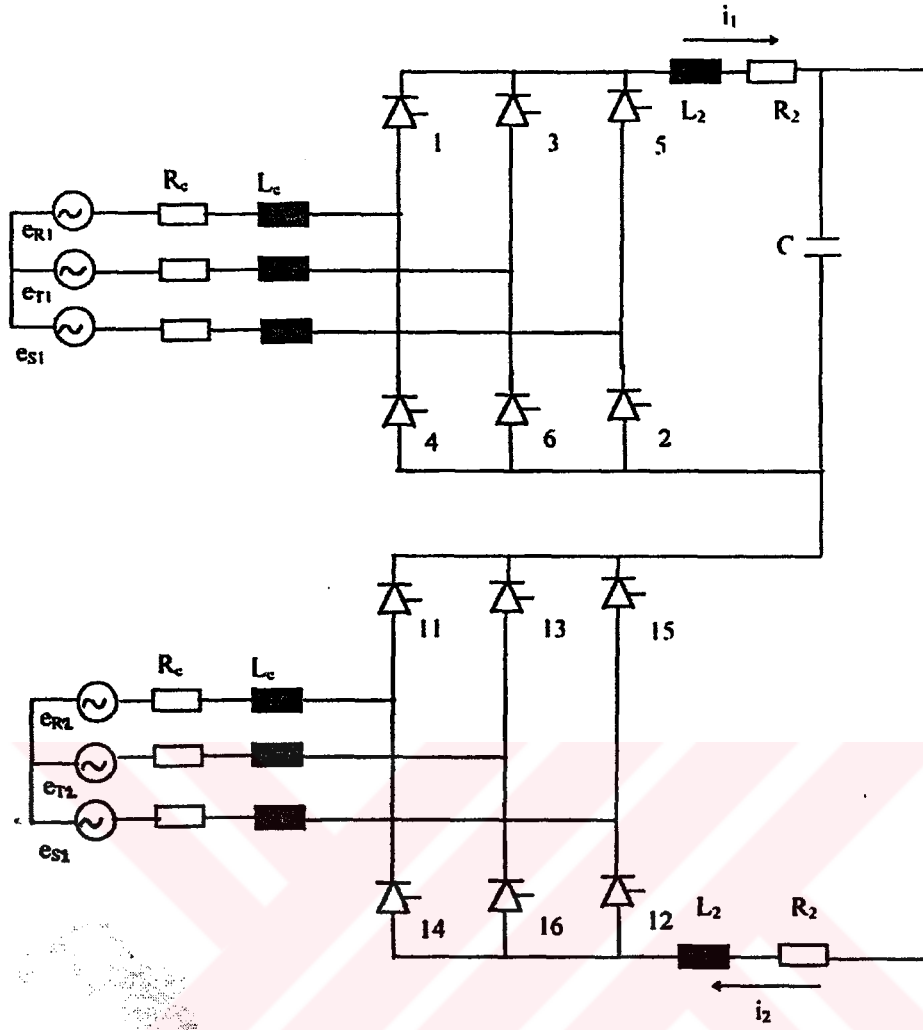
$L_c=1\text{ H}$  ve  $R_c=0,5\text{ Ohm}$

Şekil 3.24.d) 6 vuruşlu DA/AA evirici modelinin benzetişim sonuçları  $L_c=1\text{ H}$ ,  $R_c=0,5\text{ ohm}$ ,  $\text{alfa}=30$

### 3.8. HVDC Enerji İletim Sisteminin Benzetişimi

Şekil 3.25'te verilen HVDC sisteminin benzetişimi Tablo Yöntemi yardımıyla yapılmıştır. Benzetişim sonuçları ise şekil 3.26'da verilmiştir.





Şekil 3.25. HVDC enerji iletim sisteminin modeli

Şekil 3.25' teki eşdeğer devre parametrelerinin sayısal değerleri aşağıda verilmiştir.

Transformatör parametreleri :

Direnç :  $R_c = 0.5$  ohm

Endüktans :  $L_c = 20$  mH

Anahtarlama elemanı (anahtarlama elemanı olarak tristör alınmıştır) :

Endüktans :  $L_d = 1$  mH

Hat parametreleri :

Eşdeğer seri direnç :

$$R_2=2.16 \text{ ohm}$$

Eşdeğer seri endüktans :

$$L_2=13 \text{ mH}$$

Eşdeğer paralel kapasite :

$$C= 21.6 \text{ } \mu\text{F}$$

AA Kaynaklar :

AA/DA dönüştürücü için :

$$e_{R1}=E_1 \sin \omega t$$

$$e_{B1}=E_1 \sin(\omega t+120^\circ)$$

$$e_{T1}=E_1 \sin(\omega t+240^\circ)$$

$$E_1=42.78 \text{ kV}$$

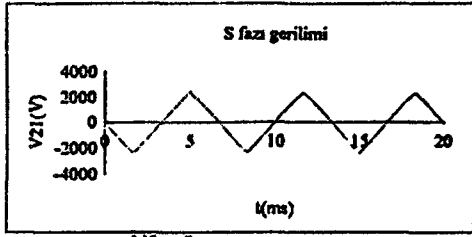
DA/AA dönüştürücü için :

$$e_{R2}=E_2 \sin \omega t$$

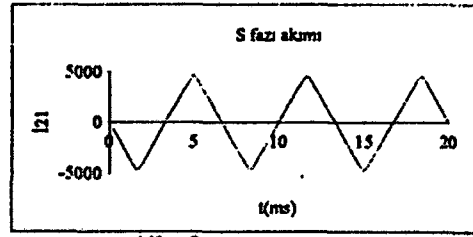
$$e_{S2}=E_2 \sin(\omega t+120^\circ)$$

$$e_{S2}=E_2 \sin(\omega t+120^\circ)$$

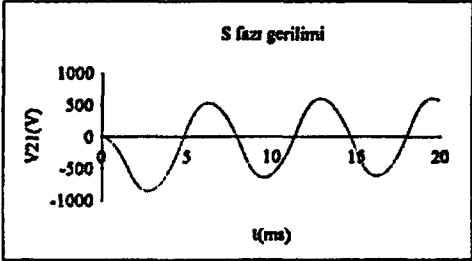
$$E_2=35.34 \text{ kV}$$



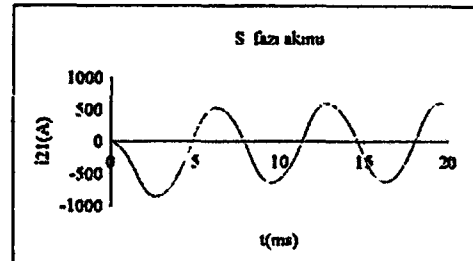
Alfa=0



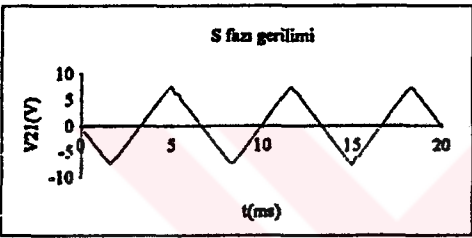
Alfa=0



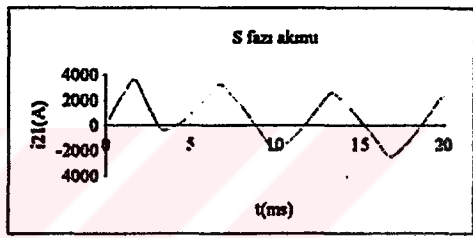
Lc=10 H , alfa=0



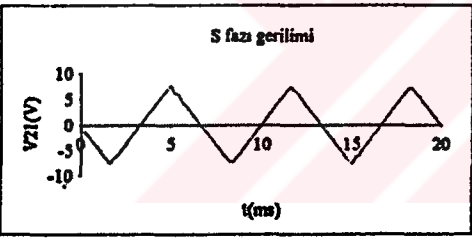
Lc=10 H , alfa=0



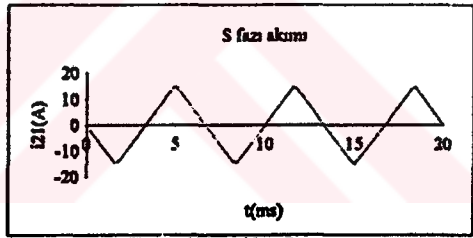
Lc=10 H , alfa=30



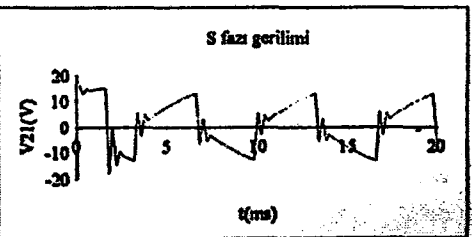
Lc=10 H , alfa=30



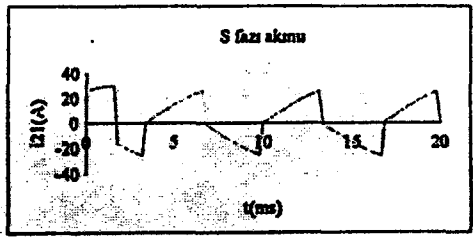
Rc =1K , alfa=0



Rc =1K , alfa=0



Rc =1K , alfa=30



Rc =1K , alfa=30

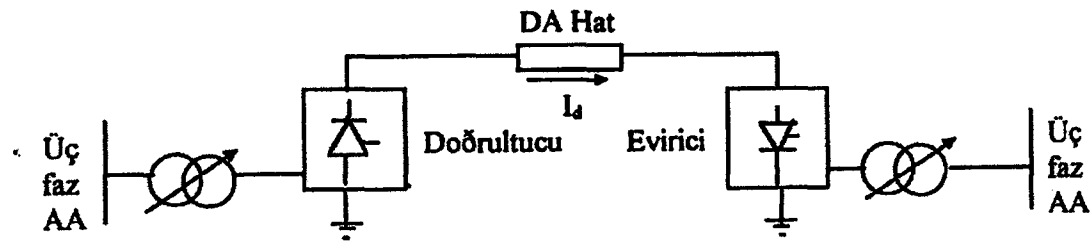
Şekil 3.26 HVDC enerji iletim sistemi modelinin benzetişim sonuçları

## BÖLÜM 4. HVDC SİSTEMİNİN KONTROLÜ

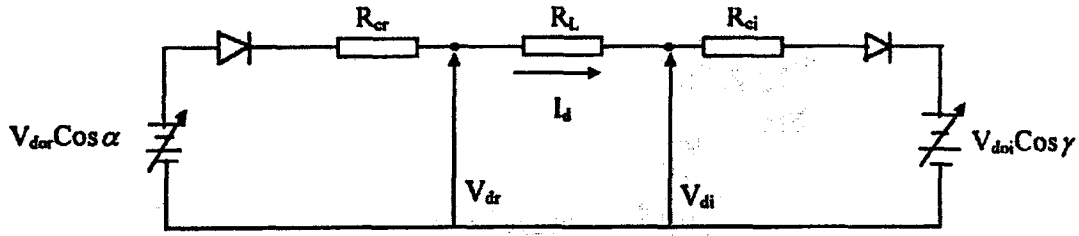
Bir HVDC enerji taşıma sisteminin kontrol edilebilirliği, sistemin güvenli çalışması için oldukça önemlidir. Sistemin efektif kullanımı güç sisteminin istenen başarımı sağlamak açısından, kontrolün uygun kullanımına bağlıdır. Kullanılan elemanların güvenliğini sağlamak, kontrolün değişim aralığını arttırmak, verimli ve kararlı bir işletim ortamı hazırlamak amacıyla çeşitli seviyelerde kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Bizim kontrol işlemimiz; devreden gelen verilerin bilgisayara yerleştirilen bir ADC ve DAC kartına gönderilmesi ve bu kartın C++ yazılımı ile desteklenmesiyle oluşturulmuştur. Bu yazılım EK-A' da gösterilen akış şemalarına göre EK-B' de verilmiştir. Bu işlemde kullanılan AD 1200 kontrol kartının özellikleri de EK-C' de belirtilmiştir.

### 4.1. Kontrolün Temel Prensipleri

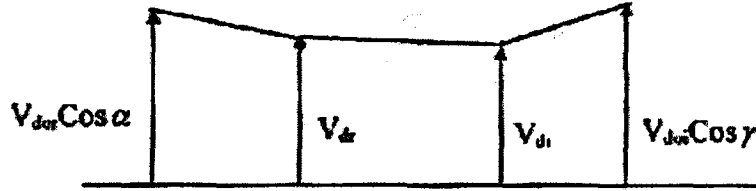
Şekil 4.1 tek kutuplu veya iki kutuplu hattın bir kutbunu temsil etmektedir. Bunlara karşılık gelen eşdeğer devre ve gerilim şekilleri şekil 4.2 ve 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Şematik gösterim



Şekil 4.2 Eşdeğer devre



Şekil 4.3 İletim hattındaki gerilim değişimi

Bu devrede doğrultucudan eviriciye akan doğru akım aşağıdaki gibidir.

$$I_d = \frac{V_{dor} \cdot \cos \alpha - V_{doi} \cos \gamma}{R_{cr} + R_L - R_{ci}} \quad (4.1)$$

Doğrultucu uçlarındaki güç ise

$$P_{dr} = V_{dr} I_d \quad (4.2)$$

Evirici uçlarındaki güç

$$P_{di} = V_{di} I_d = P_{dr} - R_L I_d^2 \quad (4.3)$$

şeklindedir.

Hat üzerindeki herhangi bir noktadaki doğru akım, gerilim veya güç,  $V_{dor} \cos \alpha$  ve  $V_{doi} \cos \gamma$  dahili gerilimleri ile kontrol edilebilir. Bu olay anahtar elemanı tetikleme

açılarının kontrolü ile veya dönüştürücü trafosu AA gerilimi değiştirilerek gerçekleştirilebilir.

Anahtarlama elemanının kontrolü oldukça hızlıdır (1-10 ms ), uç değiştirmek ise yavaştır (basamak başına 5-6 saniye).Ayrıca istenen değerlere ulaşmak ve daha hassas kontrol yapmak açısından anahtarlama elemanı kullanmak daha uygundur.

#### 4.2. Kontrol Seçim Kriterleri

Bunları kısaca aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz:

1. AA sistemdeki gerilim değişimleri nedeniyle doğru akımdaki büyük değişimlerin önlenmesi,
2. İstenen değerlerde doğru gerilim üretilmesi,
3. Alıcı ve verici taraflardaki güç faktörünün mümkün olduğunca büyük olması,
4. Eviricideki tristör komütasyon hatalarının önlenmesi.

HVDC hattının güvenli ve tatmin edici işletimi için doğru akımdaki büyük dalgalanmaları önlemek amacıyla dönüştürücülerin hızlı kontrolü oldukça önemli bir gereksinimdir. (4.1) eşitliği, hat ve dönüştürücü direncinin oldukça küçük olması sebebiyle  $V_{dor}$  veya  $V_{doi}$ 'deki küçük bir değişimin,  $I_d$ 'de büyük bir değişime neden olacağını gösterir. Eğer  $\alpha$  ve  $\gamma$  sabit tutulursa, her iki uçtaki alternatif gerilim, genlik değerlerinin küçük bir değişimine karşılık daha da fazla değişecektir. Bu değişimler de yeterli bir güç başarımını sağlamak için genellikle kabul edilemez. Ayrıca bu işlem akımın veya gerilimin tristörlere zarar verebilecek kadar artmasına sebep olabilir. Bu nedenle sistemin uygun işletimi için ve akım dalgalanmalarını önlemek üzere hızlı bir dönüştürücü kontrolü zorunludur. Böyle bir kontrol olmazsa HVDC sisteminin pratikliği kalmaz.(Varnavitsky, 1983)

Güç faktörünün yüksek tutulmaya çalışılmasının da sebepleri vardır:

1. Dönüştürücünün gücünü, trafo ve tristörlere girilen akım ve gerilim değerlerinden mümkün olduğunca yüksek tutmak,
2. Tristörlerdeki aşırı baskıları azaltmak,
3. Dönüştürücünün bağlı olduğu AA sistemindeki elemanların akım değerleri ve kayıplarını azaltmak,
4. Yük arttıkça AA terminalindeki gerilim düşümünü azaltmak,
5. Dönüştürücüyü besleyen reaktif gücün maliyetini düşürmek,

Bu nedenle yüksek güç faktörlerine ulaşmak için, dönüştürücüde  $\alpha$  ve eviricide  $\gamma$  değerlerinin mümkün olduğunca düşük tutulması gerekir. Dönüştürücüdeki tristörlere, tetiklemeden önce  $\alpha$  minimum  $5^0$  olacak biçimde bir gerilim uygulanır ve tristörlerin uçlarında iletme girebilmeleri için yeterli gerilim sağlanır. Ayrıca doğrultucu yaklaşık 15- 20 derece aralıklarda bir açı ile işletilmelidir.

Eviricide ise komütasyon hatalarını önlemek için minimum ateşleme açısını sağlamak gerekir.  $\gamma = 180^0$  veya  $\gamma = 0^0$  de komütasyon gerilimi yön değiştirmeden önce, belirli bir bölgede komütasyon tamamlanmış olmalıdır.

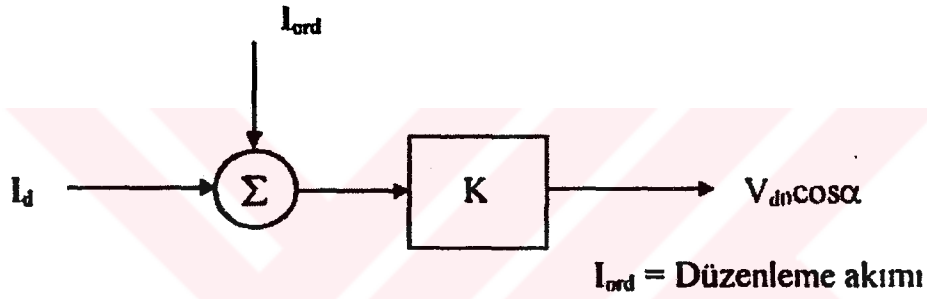
$\gamma$  ateşleme açısı,  $\beta - \mu$  değerine eşittir.  $\mu$  çakışma açısı ise  $I_d$  ve komütasyon gerilimine bağlıdır. Komütasyon başladıktan sonra, DA akım ve AA akımda mümkün olabilecek değişiklikler nedeniyle, minimum  $\gamma$  değerinin üzerinde gerekli komütasyon aralığı sağlanmalıdır. Genel olarak  $\gamma$  aralığı 50 Hz için  $15^0$  ve 60 Hz için de  $18^0$  dir.

### 4.3. Kontrol Karakteristikleri

Kontrol karakteristiklerini ideal ve gerçek karakteristik olarak iki şekilde inceleyebiliriz.

### 4.3.1. İdeal Karakteristikler

Yukarıda açıklanan temel şartları sağlamak için, öncelikle gerilim ve akımın düzenlenmesi gereklidir. Normal işletimde, doğrultucu sabit akım ve evirici de sabit tetikleme açısı ile çalışmaktadır. Bu kontrol tekniği şekil 4.4'te ideal gerilim ve akım karakteristiği ile verilmiştir. Burada koordinatları oluşturan  $V_d$  ve  $I_d$  değerleri DA hattı üzerinde ortak bir noktada ölçülebilmektedir. Bu nokta doğrultucu uçlarında seçilmiştir. İdeal gerilim-akım karakteristiği, herhangi bir işletim koşulunda hem doğrultucu ve hem de evirici karakteristiklerini içermek zorunda olduğundan, bu nokta her iki karakteristiğin kesişiminde tanımlanmak zorundadır ( E noktası ).



Şekil 4.4 İdeal kararlı durum Akım-Gerilim karakteristiği.

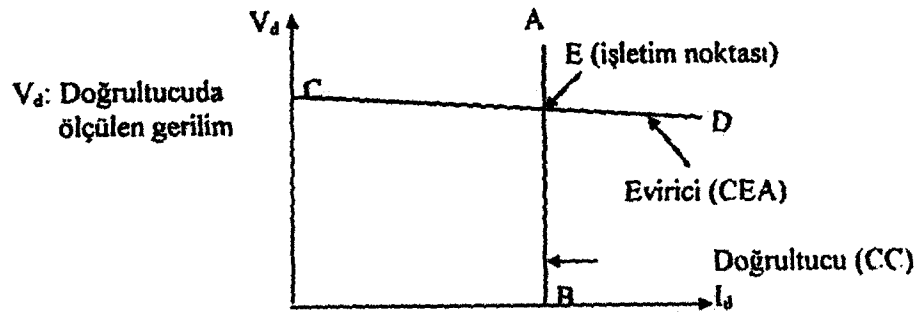
Eviriciyi sabit bir  $\gamma$  ile çalıştırmak için, tetikleme açısı gerilim ve akımın anlık değişimlerini algılayan bir bilgisayar yardımıyla kontrol edilmektedir. Bilgisayar,  $\gamma$  tetikleme açısını kontrol ederken tristörün  $t_q$  süresini de dikkate alır ve  $t_q$  süresinden daha büyük olacak şekilde tetikleme açısını kontrol eder.

### 4.3.2. Gerçek Karakteristikler

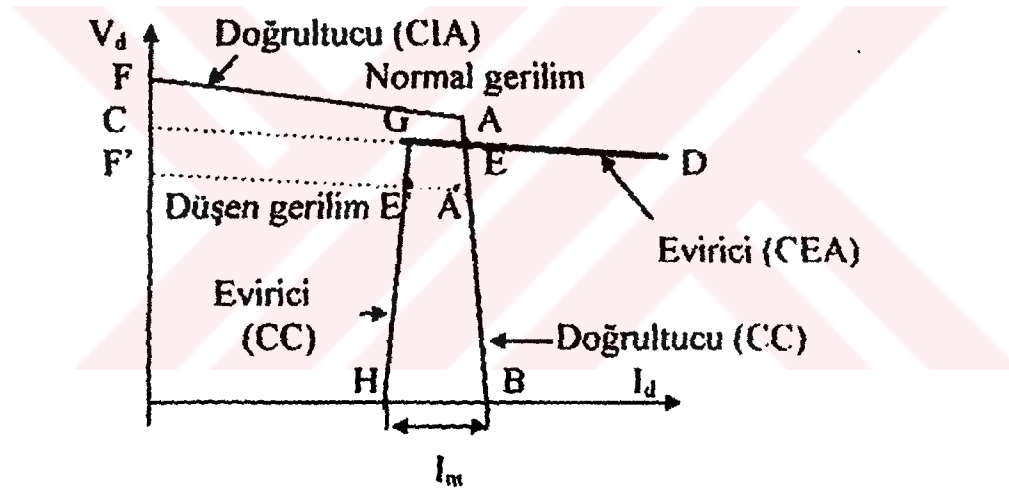
Doğrultucuda  $\alpha$  değiştirilerek sabit bir akım sağlanmaktadır. Bununla beraber  $\alpha$ ,  $\alpha_{min}$  değerinden küçük olamaz.  $\alpha_{min}$ 'a ulaşıldığında, gerilim artışı mümkün olmaz ve doğrultucu sabit tetikleme açısı ile çalışır. Bu nedenle, doğrultucu karakteristiği Şekil 4.6'da görüldüğü gibi gerçekte AB ve FA gibi iki bölgeden oluşur .FA bölümü



minimum tetikleme açısına karşılık gelirken, sabit tetikleme açısında kontrol modunu temsil eder ve AB bölümü de, normal sabit akım kontrol modunu gösterir



Şekil 4.5. Akım düzenleyicisinin gösterimi



Şekil 4.6 Dönüştürücü kararlı durum karakteristiği.

Şekil 4.5'te K, düzenleyici kazancı olmak üzere;

$$V_{do} \cos\alpha = K (I_{ord} - I_d) = V_d + R_{cr} I_d$$

ve buradan da

$$V_d = KI_{ord} - (K + R_{cr}) I_d \quad (4.4)$$

$$\Delta V_d = - (K + R_{cr}) \Delta I_d$$

veya

$$\Delta V_d / \Delta I_d = - (K + R_{cr}) \quad (4.5)$$

sonucuna varılır.

Pratikte, akım regülatörüne bağlı olarak sabit akım karakteristiği tam dikey değildir. Akım karakteristiği, oransal (P) denetleyici ile aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi, akım regülatörünün sonlu kazancı nedeniyle çok yüksek bir negatif eğime sahiptir.

Bir oransal entegral (PI) regülatör ile sabit akım karakteristiği (CC) oldukça dikey olur. Normal gerilimde, tam doğrultucu karakteristiği FAB ile tanımlanmaktadır. Düşük gerilimde ise bu kayma FAB ile gösterilir.

Eviricinin sabit tetikleme açısı (CEA), normal gerilim için E noktasında doğrultucu karakteristiği ile çakışmaktadır. Bununla birlikte, eviricinin sabit tetikleme açısı karakteristiği, FAB ile gösterilen düşük gerilim durumunda doğrultucu karakteristiği ile çakışmaz. Bu nedenle doğrultucu gerilimindeki büyük düşmeler, DA kondansatörüne bağlı olarak kısa bir süre sonra akım ve gücün sıfıra düşmesine sebep olabilir ve sistem bu yüzden kesintiye uğrayabilir. Bu tür problemlerden kurtulmak için, doğrultucunun akım değerinden daha küçük değere ayarlanabilen bir akım düzenleyiciye ihtiyaç vardır. DGH ile verilen evirici karakteristiği de sabit tetikleme açısı ve sabit akım olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır.

Doğrultucu akım kademesi ve evirici akım kademesi arasındaki fark güvenli akım aralığı olarak adlandırılmış ve  $I_m$  olarak şekil 4.6'da gösterilmiştir. Bu değer hangi hatadan kaynaklanırsa kaynaklansın, iki sabit akım karakteristiğinin birbiriyle çakışmaması için normal akımın %10'u veya %15'i düzeyinde tutulmaktadır.

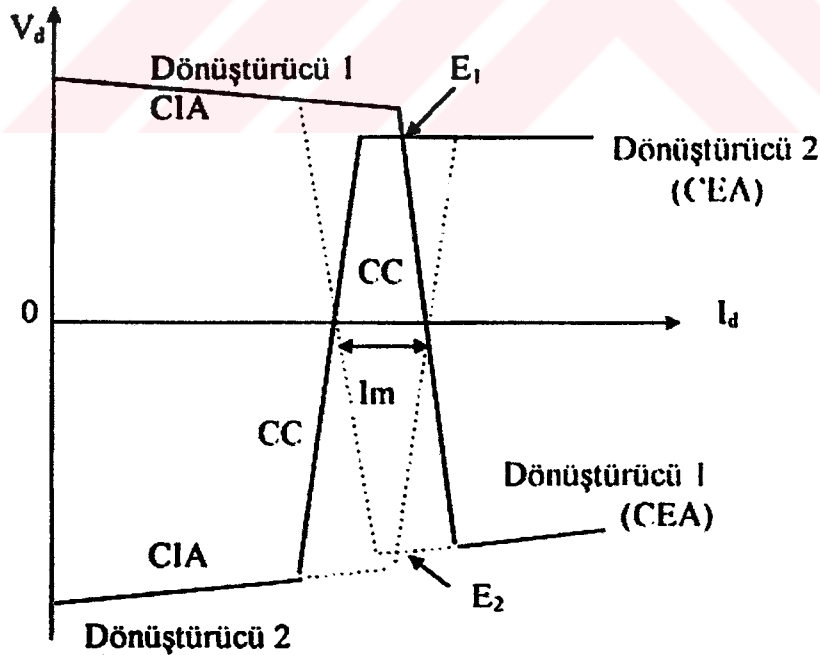
Normal işletim şartlarında ( E noktası ) doğrultucu, doğru akımı ( $I_d$  ) ve evirici de doğru gerilimi ( $V_d$  ) kontrol eder. Herhangi bir hata durumunda doğrultucu geriliminde bir düşme olması durumunda, işletim şartı E noktası ile gösterilir. Bu

durumda evirici aşırı akımları kontrol eder ve doğrultucu da gerilimi sabit tutmaya çalışır. Evirici ile doğrultucu yer değiştirdiği bu olaya aktarma modu adı verilir.

#### 4.4. Tam Doğrultucu ve Evirici Karakteristikleri

Birçok HVDC sisteminde, her bir dönüştürücünün, evirici kadar bir doğrultucu olarak ta çalışması gerekir. Burada her bir dönüştürücü Şekil 4.7'de gösterilen karakteristikle verilmiştir. Karakteristikler düz çizgi ile gösterildiği gibi olursa, güç aktarımı 1. dönüştürücünden 2. dönüştürücüye doğru olur. Her bir dönüştürücü karakteristiği,  $\alpha_{\min}$  için sabit tetikleme açısı, sabit akım ve sabit söndürme açısı adı verilen üç bölümden oluşur. Bu karakteristikteki işletme noktası  $E_1$  ile gösterilmiştir.

Güç akışı tersine döndüğünde karakteristik kesikli çizgi ile gösterilir. Bu olay güvenli çalışma aralığı tersine çevrilerek yapılır. Örneğin, 2 nolu dönüştürücünün akım ayarı 1. dönüştürücünden büyük yapılır. Bu durumda işletme şartları  $E_2$  ile gösterilir.  $I_d$  akımı önceki ile aynıdır, fakat gerilimin polaritesi değişmiştir.



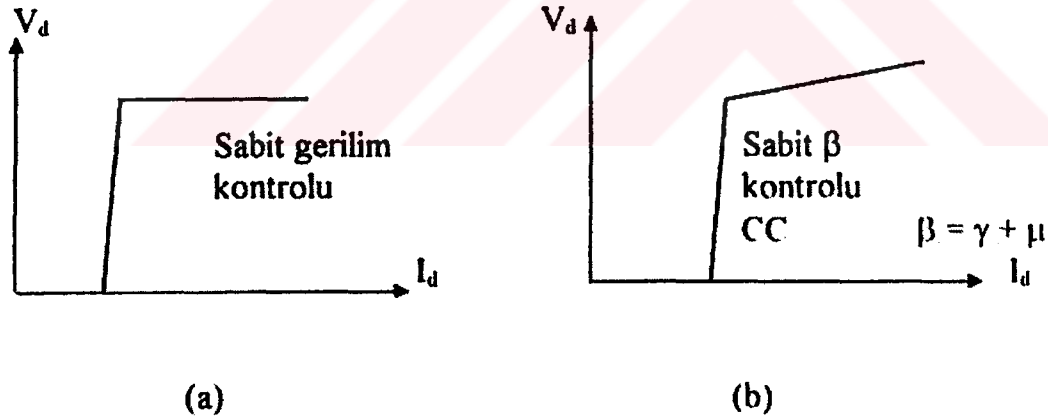
Şekil 4.7. Her bir dönüştürücünün işletim karakteristiği.

#### 4.5. Alternatif Evirici Kontrol Modları

Bu kontrol modları evirici için, sabit söndürme açısının kontrol metotlarını açıklamaktadır. HVDC sisteminin özel durumlarında bu kontrol modları bir takım avantajlar sağlayacaktır.

##### 4.5.1 DA Gerilim Kontrol Modu

Sabit  $\gamma$  değerini (CEA) düzenlemek yerine, kapalı çevrim kontrol yöntemiyle gerilimi sabit tutmak için kullanılır. İstenen DA gerilimini sürdürmek için gerekli evirici gerilimi hat üzerindeki gerilim düşümü de hesaplanarak tahmin edilir. Sabit  $\gamma$  kontrolü ile kıyaslandığında DA'daki gerilim kontrolünün Şekil 4.8 (a)'da görüldüğü gibi düz bir evirici kontrol karakteristiğine sahip olduğu görülür. Ayrıca gerilim kontrol modu yüksek değerlerde  $\gamma$  değerine sahiptir ve bunun sonucunda da komütasyon hatalarına daha az meyillidir.



Şekil 4.8. a) Evirici sabit gerilim kontrol modu  
b) Evirici sabit  $\beta$  kontrol modu

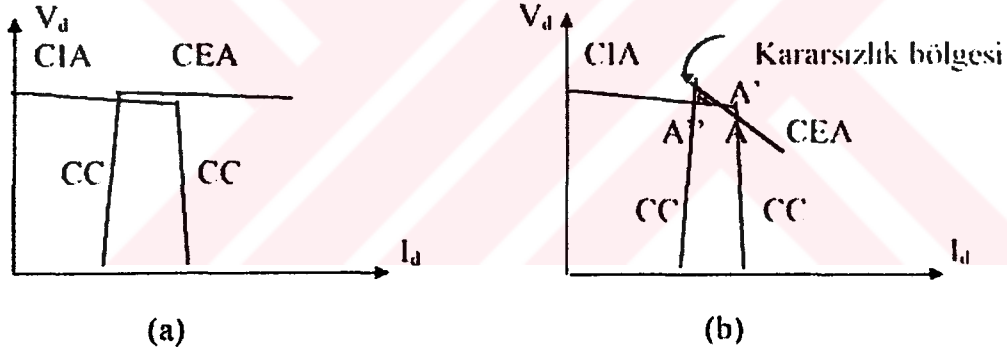
##### 4.5.2 İleri Tetikleme Açısının ( $\beta$ ) Kontrolü

Sabit  $\beta$ 'lı evirici karakteristiğinde şekil 4.8(b)'de görüldüğü gibi pozitif kayma vardır. Bu yüzden düşük yüklerde  $\beta$ 'nın sabit kalması, komütasyon hatalarının

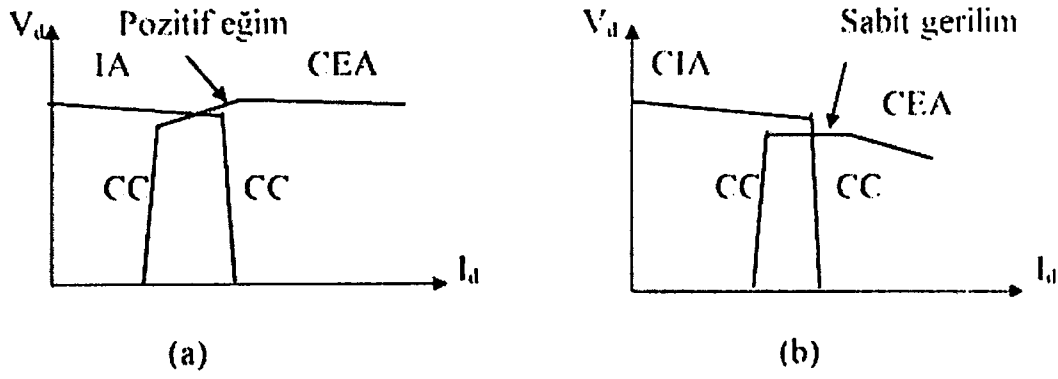
yanında başka güvenlik problemlerine de yol açar. Ancak yüksek akımlarda maksimum  $\gamma$  hesaplanabilir. Sabit  $\beta$  kontrol modu normal uygulamalarda kullanılmaz.

#### 4.5.3 DA Kararlılığı

Şekil 4.9'da görüldüğü gibi eviricinin CIA ve CEA karakteristikleri arasında gerilim farkı vardır. Bu bölgede AA gerilimdeki küçük bir değişiklik doğru akımda %10 kadar büyük bir değişikliğe sebep olur. Ayrıca çalışma modları veya kademe değişimi esnasında atlama etkileri de olacaktır. Bu durumdan sakınmak için CEA ve CC arasındaki geçiş bölgesinde, pozitif kayma ile (sabit  $\beta$ 'lı ) eviricinin kontrol karakteristiği Şekil 4.10 (a)'ya yaklaştırılmaya çalışılır. Şekil 4.10 (b)'de de bu işlemin geri beslemeli kontrol karakteristiği görülmektedir.



Şekil 4.9.a) İdeal çalışma  
b) Kararsızlık bölgesinin gösterimi



Şekil 4.10.a) Mod kararlılığı için olması gereken gerilim-akım (V-I) karakteristiği değişimi.

b) Geri beslemeli kontrol karakteristiği

#### 4.5.4. Kademe Değiştirici Kontrolü

Doğrultucu için  $\alpha$  ve evirici için de  $\gamma$ , belirlenen sınır değerlerini geçerse, kademe değiştirici kontrol sistemi devreye girip, açıları istenen sınır değerlerinde tutmaya çalışır. Normalde evirici sabit söndürme açısında çalıştığından, hat gerilimini sabit tutarak bindirme gerilimleri de kademe değiştirici ile kontrol edilir. Doğrultucu tarafında da sistemin  $\alpha = \alpha_{nominal}$  şartlarında çalışması kontrol edilir. Kademe değiştiricileri minimum ve maksimum kararlı hal geçişlerine izin verecek şekilde tasarlanmış olup, geçiş şartlarındaki gereksiz hareketler zaman gecikmeleri ile önlenmiştir.

#### 4.5.5. Akım Sınırları

Akım sınırlarını da üç temel noktada tanımlamak gerekir:

1. **Maksimum akım sınırı** : Bu sınır değeri, tristörleri ısıl zararlardan korumak için çok kısa süreli olarak, normal yük akımının 1,2 veya 1,3 katı ile sınırlanmıştır.
2. **Minimum akım sınırı** : Düşük akım değerlerinde, akımdaki dalgalanmalar kesilmelere neden olabilir. Bir periyot süresince, 6 vuruşlu da 6 kez, 12 vuruşlu da 12 kez akım kesilebilir. Bu durum, transformatör sargılarında yüksek gerilim

indüklenmelerinin ( $Ldi/dt$ ) yanında, DA reaktörde de yüksek oranda akım değişimlerine sebep olacağı için istenmez. Doğru akımın düşük değerlerindeki tristör tetikleme aralıklarından kaynaklanan çakışmalar çok küçüktür. Ancak buna rağmen çakışmalar neticesinde tristörler üzerinden aşırı yük akımları dolaşır ki, bu da köprüde atlama akımlarına sebep olur.

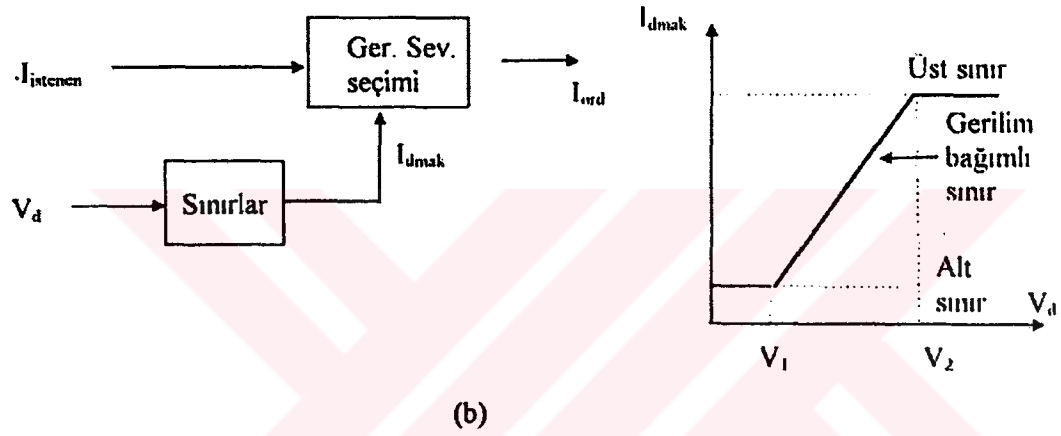
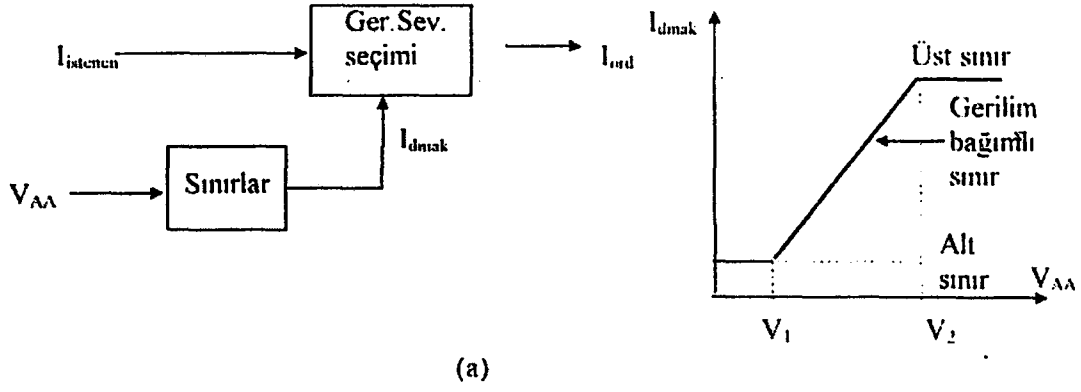
**3. Gerilim bağımlı, akım kontrollü sınır (GBAKS) :** Düşük gerilim şartlarında aşağıdaki nedenlerden dolayı istenen gücü veya akımı sağlamak mümkün olmayabilir.

a) Bir dönüştürücüde gerilim %30'dan daha fazla düştüğü zaman, diğer dönüştürücüdeki reaktif güç artar. AA sisteminde istenmeyen tepki akımları oluşabilir. Daha yüksek  $\alpha$  ve  $\gamma$  değerleri de reaktif güçteki akımın artmasına sebep olur. Eğer reaktif güçte azalma olursa, o zaman da filtreler ve kapasitörler yardımıyla dönüştürücüler için gerekli güç karşılanmaya çalışılır.

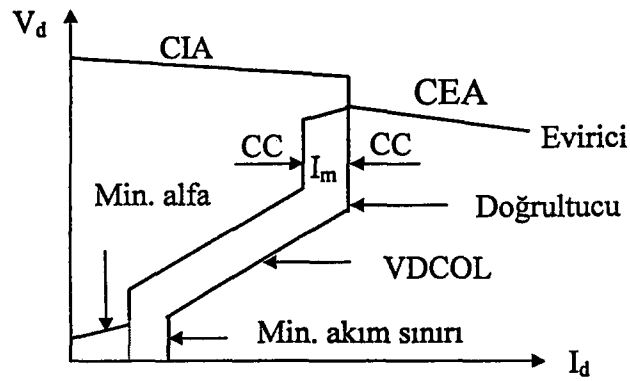
b) Azalan gerilimde komütasyon hataları ve kararsızlıklar ortaya çıkar.

Bu problemler GBAKS kullanılarak önlenabilir. İşlem için daha önceden hesaplanan gerilim değerleri referans olarak alınır ve gerilimin değişmeye başlamasıyla birlikte tetikleme açısı da otomatik olarak sınır değerlerine kadar çekilir. GBAKS karakteristikleri AA ve DA gerilimin fonksiyonu olarak aşağıdaki şekillerde verilmiştir. GBAKS işleminde ölçülen doğru gerilim öncelikle bir zaman gecikme elemanından geçirilir. Bu gecikmenin süresi gerilim şartlarına göre azaltılıp yükseltilebilecek şekilde ayarlanabilir. Örneğin gerilim düşerken gecikme süresi çok küçüktür ve hızlı bir GBAKS hareketi istenir. Ancak aynı zaman gecikmesi normal işletim şartlarındaki dalgalanmaları önlemek için kullanılırsa bu sefer de dalgalanmalara sebep olur.

Şekil 4.11 ve 4.12'de GBAKS'na bağlı dönüştürücü karakteristikleri görülmektedir.



Şekil 4.11.a) Alternatif gerilimin bir fonksiyonu olarak GBAKS  
b) Doğru gerilimin bir fonksiyonu olarak GBAKS



Şekil 4.12. GBAKS'li sürekli hal karakteristiği, minimum akım



Şekil 4.7’de görüldüğü gibi, DA hat üzerinden aktarılan güç akım büyüklüğü ve akım sınırları değiştirilerek kontrol edilebilir. Bu büyüklükler dönüştürücü istasyonlarına haberleşme hatlarıyla iletilir. İletişim anındaki herhangi bir hatadan dolayı veya DA hatta herhangi bir arıza meydana gelmesi durumunda evirici istasyonu doğrultucu moda dönüştürülebilir. Ancak bu sırada güç akışında ters yöne dönme olabilir. Bu tür sorunları meydana gelmeden gidermek için, eviricinin akım-gerilim karakteristiğinin en düşük bölümünü belirten  $\alpha$  minimum değeri ile evirici korunmalıdır. Bu da evirici tetikleme açısının  $90^{\circ}$ ’den daha fazla olmasını engellemektedir.

Tipik olarak 95 ile 110 derece arasındadır. Doğrultucudaki hata durumlarında ise, sisteme yardımcı olmak için evirici bölgesinde çalışmaya izin verilir. Sonuç olarak doğrultucunun tetikleme açısı 90 ile 140 derece arasındadır.

#### 4.7 Güç Kontrolü

Genelde HVDC hatlarının hesaplanan gücü iletimi beklenir. Böyle bir uygulamada  $P_o$  gücünün, ölçülen doğru gerilime bölümü iletilen güce karşılık gelen akım kademesini verir.

$$I_{ord} = P_o / V_d \quad (4.6)$$

Hesaplanan akım kademesi, akım kontrolünün giriş işareti olarak kullanılmaktadır. Ancak bu işlem, yüksek hızlı sabit güç kontrolünün AA sisteminin kararlılığına zarar vermesini engelleyemeye bilir. Bu yüzden sistem kararlılığı gerçekleştirilmeye çalışılırken, yüksek hızlı sabit akım kontrolü ve yavaşlatılmış güç kontrolünün birlikte yapılması tercih edilir. Bu da HVDC iletim sisteminin kararlılığı yönünden sabit akım kontrollü olarak çalışması demektir.

#### 4.7.1 AA Sistem İçin Yedek Kontroller

AA akım sisteminin başarımını artırabilmek için, AA akım sistem büyüklüklerinden türetilen işaretler, dönüştürücülerdeki kontrolün daha duyarlı yapılmasında kullanılabilir. Kontrol sistemi hem doğru akım, hem doğru gerilim veya her ikisini de kontrol edebilecek düzeyde olmalıdır. Ayrıca hatalardan sonra sistemi düzeltmek için özel kontrol yöntemleri de kullanılabilir.(Vadivel, 1991)

#### 4.7.2 Temel Kontrol Prensipleri

HVDC sistemleri aşağıdaki iki önemli nedenden dolayı sabit akımla kontrol edilmelidir.

1. Aşırı akımları sınırlamak ve çeşitli sorunlardan kaynaklanan hataları minimuma indirmek,
2. AA gerilim dalgalanmaları sebebiyle sistemin gerilim düşümünü önlemek.

Yüksek hızlı sabit akım kontrol karakteristiği nedeniyle HVDC sisteminin işletimi oldukça karardır. Temel kontrol sisteminin önemli özelliklerini de şöyle sıralayabiliriz:

a) Doğrultucu akım kontrollüdür ve  $\alpha$ 'nın limit değerleri arasında kontrol edilir. Başarılı bir tetikleme ve komütasyon sağlamak için tristör uçlarında yeterli pozitif gerilimin bulunması gerekir. Bunu gerçekleyebilmek için de tetikleme açısı  $\alpha$ , minimum  $5^0$ 'ye ayarlanmaktadır. Ayrıca  $\alpha$  değerimiz kapalı çevrim kontrollü geri besleme devremiz sayesinde, değişken yüklerde dahi akımı ve gerilimi kontrol etmek için otomatik olarak değişmektedir.  $\alpha$  değeri belirlenen sınır değerlerini aşacak olursa sistemin güvenliği açısından uyarı işareti ile birlikte sistem devre dışı kalıp kendini korumaya almaktadır.

b) Evirici sabit söndürme açısı kontrolüyle birlikte bir de akım kontrolüne sahiptir. Sabit söndürme açısının kontrolünde  $\gamma$ ,  $15^0$ 'ye set edilmiştir.

c) Normal şartlarda, doğrultucu akım kontrol modunda ve evirici de sabit söndürme açısı kontrol modundadır. Eğer doğrultucudaki AA geriliminde bir azalma olursa, doğrultucu tetikleme açısı  $\alpha$ , minimum limit değerine kadar azaltılır. Bu noktada doğrultucu limit değeri ile sınırlanır ve evirici de akım kontrol moduna geçer. Eğer girişteki AA gerilimi daha da azalırse güvenlik önlemleri tekrar devreye girip ya sistemi korumaya alır, ya da beslenebilecek yükten fazlası devre dışı bırakılıp sistem minimum değerinde çalıştırılır.

d) Sürekli ve kararlı bir işletimle birlikte eleman güvenliğini de sağlamak için birçok limit değerler tanımlanmıştır. Bunlar maksimum akım sınırı, minimum akım sınırı, gerilim bağımlı akım sınırı, maksimum ve minimum akım sınırları, maksimum ve minimum frekans değerleri vb.

e) Yukarıda açıklanan temel kontrol prensiplerinin yanında sistem performansını arttırmak için yüksek seviyede kontrol teknikleri de kullanılmalıdır.

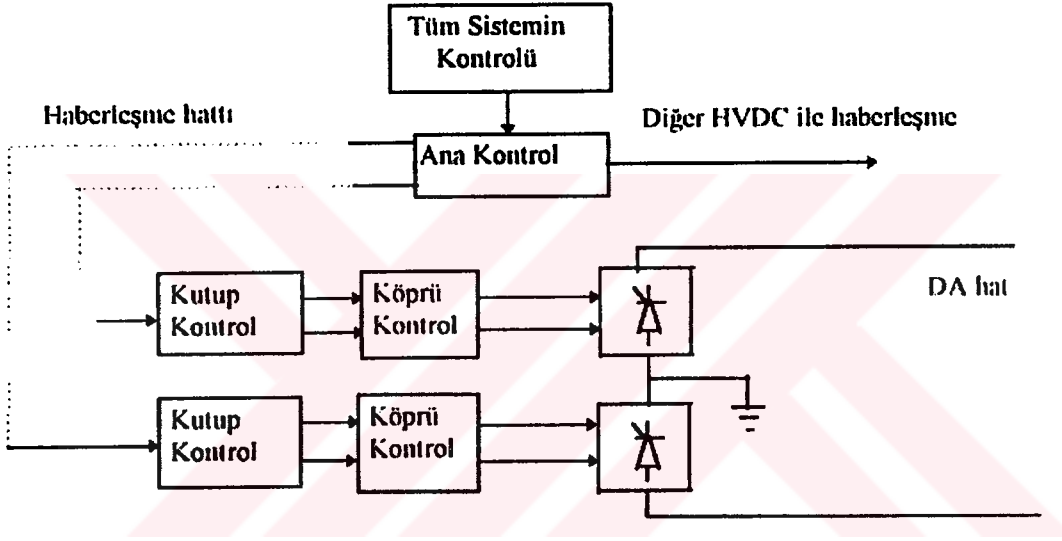
#### 4.7.3 Kontrolün Gerçekleştirilmesi

Uygulamalarda kutup başına 2 veya 4 seri bağlı dönüştürücü köprüsü vardır. Genellikle Yıldız-Yıldız veya Yıldız-Üçgen trafolar ile köprü, 6 veya 12 darbeli bir birim olarak kabul edilir. Kontrol akışı DA sisteminin yapısına göre değişirse de genel yapı ortaktır. Şekil 4.13 tipik bir iki kutuplu HVDC taşıma sisteminin kontrol yapısını göstermektedir. Kontrol sistemi; dönüştürücü birimlerin kontrolü, kutup kontrolü, ana kontrol ve tüm sistemin kontrolü olmak üzere dört bölüme ayrılmıştır.

Köprü veya dönüştürücü birim kontrolü,  $\alpha_{min}$  ve  $\gamma_{min}$  limitlerini tanımlar ve köprüdeki tristörlerin tetikleme aralıklarını belirler. Bu kontrol, tüm sistemde en hızlı cevap verme süresine sahiptir. Kutup kontrolü, bir kutup üzerindeki köprünün kontrolünü düzenler. Ana kontrol, akımı belirler ve tüm kutuplara eşgüdümlü akım işaretini gönderir.

Temel kontrol fonksiyonları birçok uygulamalarda benzerdir. Ancak yüksek seviyeli kontrol fonksiyonları her bir sistemin başarısına ve amacına göre belirlenmelidir. Güvenlik açısından da her bir sistem birbirinden bağımsız olmalıdır.

HVDC sisteminin kontrolü, uygun bir işletim için terminaller arasında iyi bir haberleşme gerektirmektedir. Güç seviyesindeki hızlı değişimler neticesinde, her iki uçta da sabit akımı sağlamak için bu haberleşmenin en az değişim kadar hızlı olması zorunludur. İletişim bilgisi, işletimci tarafından istenen sistemin genel bilgilerini ve terminaller arasındaki bazı hataların denetlenmesi için gerekli koruma bilgilerini içerir. Bu iletişim çeşitli yöntemlerle yapılabilir. Bunlar; özel hatlar veya telefon hatları yoluyla direk kablo çekilmesi, fiber optik kablolar veya mikrodalga sistemleri olabilir. İletilecek bilginin miktarına, gerekli cevap hızına, güvenlik derecesine ve gürültü yoğunluğuna göre bunlardan biri seçilebilir.



Şekil .4.13. HVDC sisteminin temel kontrolü

#### 4.8. Dönüştürücü Tetikleme Kontrol Sistemleri :

Dönüştürücü kontrol sistemi, dönüştürücünün istenen kontrol modunda çalıştırılması için (sabit akım, sabit tetikleme açısı, sabit söndürme açısı vb.) istenen anlık tetikleme işaretlerini belirler. Dönüştürücü tetikleme darbelerinin üretimi için iki temel kontrol tipi mevcuttur:

- Bireysel faz kontrolü

- Eşit aralıklı darbe kontrolü

#### 4.8.1 Bireysel faz kontrol sistemi (IPC):

İlk HVDC uygulamalarında bu sistem oldukça yaygın olarak kullanılmıştır. Tetikleme darbeleri her bir fazın sıfır geçiş noktaları tarafından belirlenir ve her bir tristör için ayrı üretilir. Faz gerilimi ,

$$V_{BA} = V_B - V_A = \sqrt{3} V_m \sin \omega t = 2L_c \frac{dI_3}{dt} \quad (4.7)$$

şeklinde ifade edilirse,

Şekil 4.14'te görüldüğü gibi iletim,  $\omega t$  ateşleme açısı,  $\alpha$  'ya eşit olduğunda başlar ve  $\omega t$  normal söndürme açısına ( $\pi - \gamma$ ) eşit olduğunda biter. Eğer iletim başlangıcında  $t = t_1$  ise, iletim sonunda  $t = t_2$ 'dir.

$$\int_{t_1}^{t_2} \sqrt{3} V_m \sin \omega t d\omega t = 2L_c \int_0^{I_d} dI_3$$

veya

$$-\sqrt{3} \frac{V_m}{\omega} (\cos \omega t_2 - \cos \omega t_1) = 2L_c I_d$$

buradan

$$-\sqrt{3} V_m [\cos(\pi - \gamma) - \cos \omega t_1] = 2\omega L_c I_d \quad (4.8)$$

bulunur.

Bu da kontrolün,  $\omega t = \omega t_1 = \alpha$  ve  $\omega t = \omega t_2 = \pi - \gamma$  aralığında mümkün olduğu sonucunu verir. Böylece,

$$-\sqrt{3} V_m \cos \omega t_1 - \sqrt{3} V_m \cos \gamma + 2X_c I_d = 0 \quad (4-9)$$

olduğu da görülür

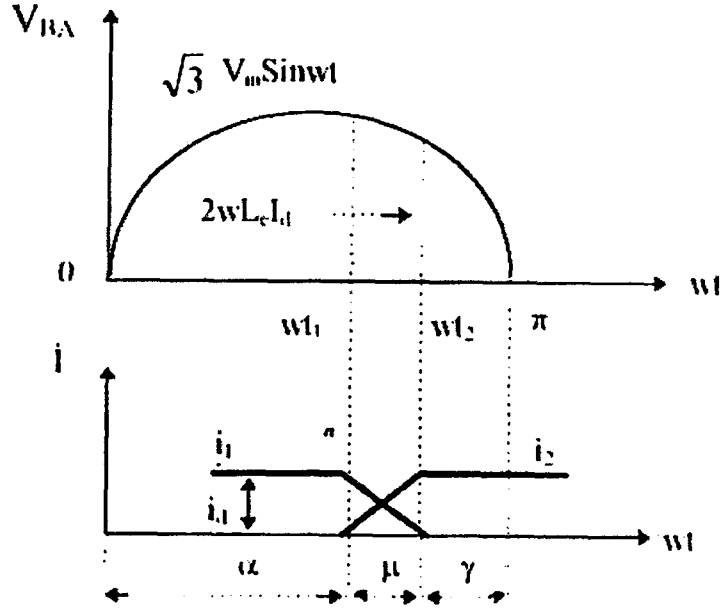
#### 4.8.2 Bireysel Faz Kontrol Sistemi (IPC) İle Sabit Söndürme Açısı (CEA) Kontrolü

Son eşitlikten görüldüğü gibi doğru akım ( $I_d$ ) ve iletim gerilimi ( $V_d$ ) işletim şartlarına göre değişir. Yukarıdaki son eşitlikten  $t = t_1$  anında,  $I_d$  ve  $V_d$  büyüklükleri tespit edilir.  $\gamma_c$  belirlenen söndürme açısına eşit olduğunda  $X_c = \omega L_c$ 'dir ve buradan aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$-\sqrt{3} V_m \cos \omega t_1 - \sqrt{3} V_m \cos \gamma_c + 2X_c I_d = 0 \quad (4.10)$$

İstenen  $t_1$  ateşleme zamanı yukarıdaki eşitlikten bulunabilir. Bu işlem daha önceki dönüştürücü kontrol uygulamalarında kullanılan analog devrelerle gerçekleştirilir. Kontrol sistemi,  $I_d$  doğru akımıyla orantılı bir DA çıkış veren birinci birim,  $V_m \cos \gamma_c$  ile orantılı çıkış veren ikinci birim ve iletim gerilimi ile orantılı, fakat faz gecikmesi  $90^\circ$  olan (örneğin  $V_m \cos \omega t$ ) alternatif gerilim üreten bir üçüncü birimden meydana gelir.

Üç çıkış toplanır ve toplam sıfırı geçtiğinde tetikleme darbesi üretilir. Kararlı durumlarda, böyle bir sistem, dengesiz yüklere ve gerilim dalgalanmalarına bakmaksızın her bir tristörü sabit iletim aralığında kontrol eder.



Şekil 4.14 İletim gerilimleri ve tristör akımları

#### 4.8.3 Bireysel Faz Kontrol Sistemi (IPC) İle Sabit Akım Kontrolü

Bu durumda kontrol sistemine hata akımı ile orantılı bir gerilim terimi ( $V_{sa}$ ) eklenir. Böylece,

$$-\sqrt{3} V_m \cos \omega t_1 - \sqrt{3} V_m \cos \gamma_c + 2X_c I_d + V_{sa} = 0 \quad (4.11)$$

olur.

$$V_{sa} = K (I_{ord} - I_d)$$

$I_{ord}$  = Düzenleme akımı

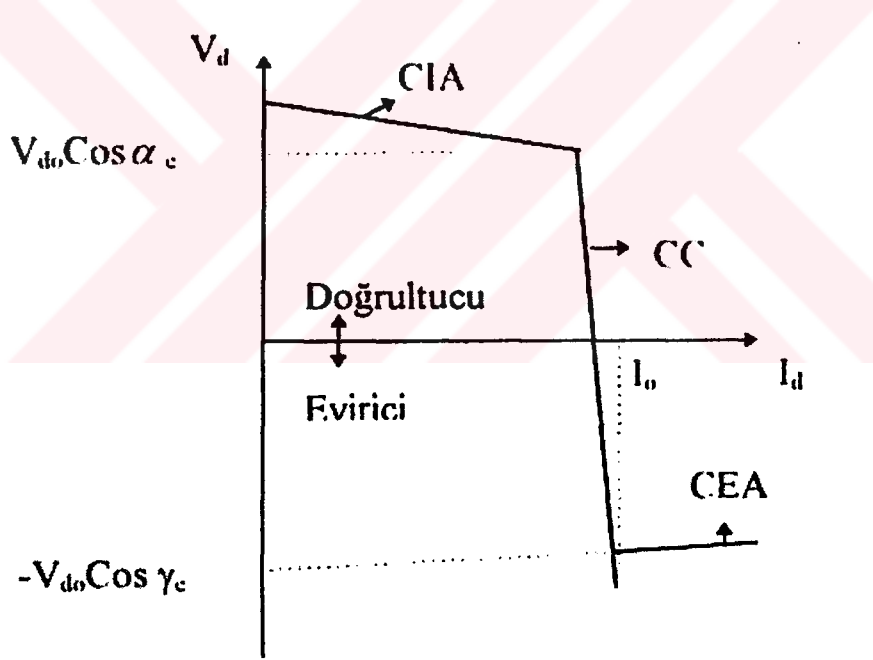
$I_d$  = Gerçek hat akımı

$K$  = Akım kontrol kazancı

Bireysel faz kontrol sistemi, her tristör için tetikleme aralığı birbirinden bağımsız olarak belirlendiği için, simetrik olmayan kaynak, dalga şeklinde mümkün olan en

büyük doğru gerilime ulaşabilme avantajına sahiptir. Buna rağmen, bireysel faz kontrol sistemi, kontrol işareti AA hat geriliminden üretildiği için geri beslemeli kontrol etkisine sahiptir. İdeal gerilim dalga şeklinden herhangi bir sapma, akım dalga şeklinin simetrisini bozar. Bu da ek bir bozulmaya sebep olur ve harmonikler ortaya çıkar. Eğer dönüştürücünün bağlandığı AA şebekesi zayıf ise (örneğin yüksek empedans), geri besleme etkisi, harmonik kararsızlığına neden olan AA geriliminin daha da bozulmasına yol açar.

Harmonik kararsızlığı problemi, AA şebekesinin harmonik karakteristiğini değiştirerek veya kontrol devresine ek filtreler ekleyerek azaltılabilir. Alternatif olarak da, AA sisteminin büyüklüğünden bağımsız bir tetikleme kontrol sistemi de kullanılabilir. Bu gibi nedenler de aşağıdaki eşit aralıklı darbe kontrol sistemini kullanmayı gerektirir.



Şekil 4.15 IPC'li dönüştürücü karakteristikleri



IPC'li dönüştürücü karakteristikleri şekil 4.15'te görüldüğü gibidir. Burada CIA eğrisinin değeri;

$$V_d = V_{d0} \cos \alpha_c - 3/\pi X_c I_d \quad (4.12)$$

CC eğrisinin değeri;

$$V_d = -V_{d0} \cos \gamma_c + 3/\pi X_c I_d + K(I_o - I_d) \quad (4.13)$$

ve CEA eğrisinin değeri de;

$$V_d = -V_{d0} \cos \gamma_c + 3/\pi X_c I_d \quad (4.14)$$

eşitlikleriyle bulunabilir.

#### 4.8.4 Eşit Aralıklı Darbe Kontrol Sistemi

Bu sistemde tristörler eşit zaman aralıklarında tetiklenmektedir ve istenen kontrol modunu sağlamak için bütün tristör tetikleme açıları eşittir. Yalnızca AA sisteminin geriliminde dolaylı bir senkronizasyon vardır.

Bu sistem, tetikleme darbelerini üretmek için faz kontrollü bir osilatör kullanmaktadır. 1960'lardan beri bütün HVDC sistemi üreticileri dönüştürücülerin tetikleme kontrolünde bu yöntemi kullanmaktadır. Şekil 4.16'da eşit aralıklı darbe kontrol tabanlı bir sabit akım kontrol sistemi görülmektedir. Sistemin temel bileşenleri gerilim kontrollü osilatör ve ring sayıcıdır. Gerilim kontrollü osilatör, giriş kontrol gerilimi ile doğrudan orantılı frekansta darbeler üretmektedir. Darbe dizisi 6 veya 12 basamaklı bir ring sayıcısını beslemektedir.

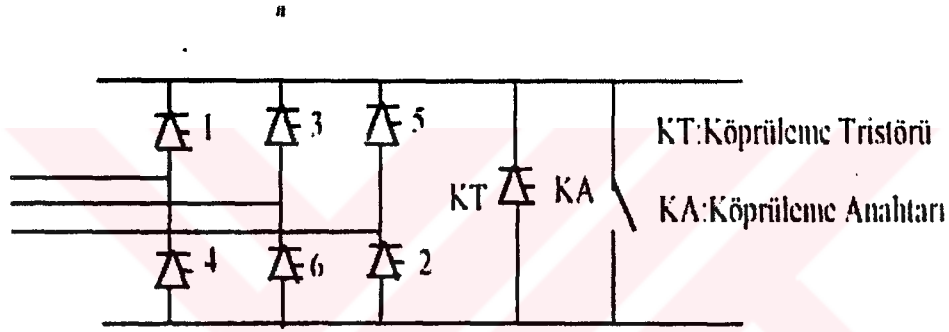
Kararlı hal durumunda  $V_2$  sıfırdır ve  $V_1$  gerilimi AA hat frekansı  $w$  ile orantılıdır. Bu olay hat frekansında darbelerin üretimini gerçeklerken sabit tetiklemede gecikme açısını ( $\alpha$ ) sağlamaktadır. Bu kontrol sistemi darbe frekans kontrol sistemine

dayalıdır. Alternatif bir eşit aralıklı darbe kontrol tetikleme yöntemi de darbe faz kontrolüne dayanır. Bu durumda kontrol işaretindeki bir değişiklik fazın kaymasına sebep olur. Sabit akım kontrolü için çizilen şekil 4.16'daki temel devreye sabit



#### 4.9 Tristörlerin Söndürülmesi

Tristörlerin söndürülmesi, köprü üzerindeki tristörlerin tetikleme işaretlerinin kesilmesi ile sağlanmaktadır. Ancak akım sönümü nedeniyle köprüde aşırı gerilimler oluşabilir. Bazı durumlarda eviricideki tristörler tam kesime gitmeyip sürekli iletimde kalabilirler. Bu nedenle, tristörleri kesime sokma esnasında köprüleme elemanları kullanılmıştır. Bu işlem şekil 4.17'de görüldüğü gibi bir tristör ve anahtar kullanılarak yapılmıştır. Tristör akımı köprüleme tristörü ile kesime götürülür ve sonra sürekli akım taşıyan köprüleme tristörünün yükünü almak için anahtar kapatılır (Ang,1995).



Şekil .4.17 Köprüleme tristörü ve anahtarı

#### 4.10 Çalıştırma , Durdurma ve Güç Akış Yönünü Değiştirme

Bu işlemler, sistemde kullanılan elemanların kabiliyetine, akım, gerilim ve gücün yükselme hızına göre değişim gösterebilir. Yapılan çalıştırma düzenini aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz:

1. Doğrultucu ya da eviriciden herhangi biri ilk olarak çalışmaya başlatılabilir. Çalıştırılan dönüştürücü, kendi tetikleme gerilimi ile birlikte, iletimin gerçekleşmesi için gerekli gerilimi de sağlar. Tetikleme 60-70 derece civarında yapıлып, gerilim düşük tutulur.
2. Belirli bir haberleşme gecikmesi sonrasında diğer dönüştürücünün tetiklemesi verilir. Tetikleme yine 60-70 derece civarında tutulur ve düşük bir akım akıtılır.

3. Başarılı bir çalıştırma sonunda, tetikleme açısının ( $\alpha$  veya  $\beta$ ) oranına bağlı olarak gerilim arttırılır. Başlangıçta düşük miktarda verilen akım, ayarlanan noktanın %80'ine ulaşıncaya kadar bekletilir. Daha sonra akımın istenen değerine yükseltilir.

4. Akım doğrultucu tarafından yükseltilirken, gerilim de evirici tarafından yükseltilir.

Bütün bu işlemler, AA sisteminin tanımlanan değerlerine ve güç oranına bağlı olarak, bir saniyeden birkaç dakikaya kadar değiştirilebilen sürelerde yapılabilir. Yükün artışı bu işlemler esnasında ya üstel ya da küçük sabit basamaklar şeklinde yapılabilir.

Durdurma işlemi için, AA sistemindeki gibi hattı bir kesiciyle ayırmanın tam tersine, DA hattı yavaş yavaş, kontrollü bir şekilde akımın azaltılmasıyla kapatılır.

Durdurma işlemlerinin sıralaması da aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

1. Akım veya gerilim 100 ile 200 ms arasında rampa biçiminde azaltılır. Doğrultucu evirici bölgesi civarında çalıştırılır. Bu işlem DA hat üzerindeki enerjiyi boşaltır.
2. Gerekliyse köprüleme anahtarları kapatılır.

Ters yöne güç akışı, HVDC sisteminin yapısı gereği en üstün özelliklerinden biridir. Bunun gerçekleşmesi de aşağıdaki işlemleri içerir:

1. Akımın değeri %10 ile %50 arasında bir değere basamak veya rampa şeklinde indirilir.
2. Akımın değerinin istenen değere getirilmesinin ardından, gerilim de istenen değere rampa veya üstel fonksiyon şeklinde çekilir.

Yapılacak temel işlem, AA akım sistemini dış etkilerden koruma kabiliyeti ve istenen zamanda güç akış yönünün değişmesi esnasında oluşabilecek ihtiyaçlara göre belirlenir. Tipik olarak, hızlı güç ters dönüşüm zamanı 20-30 ms civarındadır. Fakat bu süre daha çok AA sistem limitleri ve DA kablo tasarım parametrelerine bağlıdır. HVDC sistemi bütün bu gereklilikleri sağlamalıdır.

#### **4.11 Kararlılık Çalışmaları**

Bir kararlılık programında, AA şebekesinin eşitlikleri, pozitif sıralı büyüklüklerle ifade edilir. Bu da DA sistemlerinin modellenmesinde en önemli sınırlamadır. Özellikle komütasyon hataları, eviricide dengesizliklere veya dinamik aşırı gerilim durumlarında dönüştürücü trafosunun doyuma girmesine neden olur.

Yukarıdaki sınırlamalara bakmadan birçok sistem modeli, DA sistemini temsil etmek üzere kullanılmaktadır. DA sisteminin karakteristiğinin belirlenmesinde, sistemden beklenen özel ihtiyaçlarda etkilidir. Bu nedenle sabit yapıların standart modelleri, DA sisteminin kararlılık analizi gösterimi için geliştirilmemiştir. Bunun yerine modeller üç kısımda toplanmıştır:

- a) Basit modeller
- b) Başarım modeli
- c) Esnek modelleme kabiliyetine sahip detaylı model

##### **4.11.1 Basit Modeller**

Kararlılık analizindeki sonuçlarda pek fazla önemi olmayan uzun mesafe DA hatları için basit modeller genellikle yeterlidir. DA hatları dönüştürücülerin AA uçlarında sabit, aktif ve reaktif güç enjeksiyonu olarak temsil edilebilir.

#### 4.11.2 Başarım Modelleri

DA hat dinamiklerinin genel kararlılık analizi için kutup kontrolü ihmal edilmiştir. Kutup kontrol hareketi anlık olarak kabul edilmiş ve hatlar dirençleri ile temsil edilmiştir. Kontrol fonksiyonlarının birçoğu, fiziksel karakteristiklerinden çok, gerçek etkileri ile temsil edilmiştir. Tipik bir başarım modelinin özelliklerini şöyle sıralayabiliriz:

1. Sabit akımda doğrultucu ve sabit söndürme açısında evirici kontrolü,
2. Sabit tetikleme açısında doğrultucu ve sabit akımda evirici kontrolü,
3. Sabit tetikleme açısında doğrultucu ve sabit  $\beta$  açısında evirici kontrolü.

AA hatlarındaki kontrol hareketlerinin de, kararlılık çalışmalarında göze alınması gerekir. AA sistemindeki kontrol mantığını şöyle açıklayabiliriz:

Eğer, her iki uçtaki AA gerilim belirli bir sürenin dışında, belirlenen değerin altına düşerse, DA sıfıra çekilir. Akım belirtilen minimum değerin altına düşerse hat kapatılır. Doğru gerilim hat akımı, AA gerilim kabul edilebilir seviyeye ulaştıktan sonra tekrar verilir. Eğer gerilim, DA hat akımı minimum değerine ulaşmadan önce yükselirse, istenen akım gerçek değerine hemen yükseltilir. Hat akımı maksimum değerine arttırılır. Eğer, hat kapatıldıktan sonra gerilim yükselmesi olursa, bu yükselme belli bir süre geciktirilir. Sonra hat akımı tekrar gerçek değerine yükseltilir. Bu işlemler için iki değişik örnek verebiliriz.

1. Evirici tetikleme açısı  $90^0$  de tutularak, doğrultucuda  $\alpha$  değeri ile akım kontrolü yapılarak akım arttırılır. Akım istenen değere ulaştığında, evirici söndürme açısı, belirtilen değere istenen rampa fonksiyonu şeklinde azaltılır.
2. Akım, mümkün olan maksimum DA gerilimine çıkılıncaya kadar arttırılır ( $\gamma=\gamma_0$  veya  $\alpha=\alpha_{min}$ ).

Ayrıca DA modele, komütasyon hatalarına karşı, DA hat kapatma mantığı da ilave edilmiştir.

#### 4.11.3 Detaylı Esnek Model

Bir DA hattını detaylı şekilde gösteren her bir ayrı model veya basitleştirilmiş tek bir detaylı model bu esnekliği sağlamalıdır. DA hatları ile ilgili kontrollerin çeşitliliği nedeniyle, “kullanıcı kontrollü” kontrol modelleri, temel AA / DA kontrol modellerini de eklemeyi gerektirirler. Ancak yüksek seviyedeki modellerde aşağıdaki özellikler sağlanmalıdır.

1. DA hat : DA hattının direncini, endüktansını, ve kapasitif etkisini gösteren bir dinamik modelin gerçekleşmesi. Özellikle kablolar için kapasitif etki önemlidir.
2. Uygun dinamik modellerle gösterilen dönüştürücü kontrolleri:
  - Ana kontroller
  - GBAKS dinamikleri
  - Akım / güç kontrolü
  - Hızlı güç değişim mantığı
  - Sabit akım, sabit söndürme açısı, sabit AA ve DA gerilimi gibi farklı kontrol konumlarında kutup kontrolleri
  - Komütasyon hatası benzetim mantığı
  - HVDC sisteminin hatalardan korunması ve komütasyon hatalarının önlenmesi için kullanılan özel kontroller.
3. AA / DA ara birim : Bu modellerde, dönüştürücü açısı sınırları DA kontrolörlere yerleştirilir. Dönüştürücü karakteristikleri; AA ana dalga bileşeninin etkin değeri ve DA büyüklüklerin ortalama değerleri ile ilgili ifadelerle temsil edilirler.

Bu model “yarı kararlı hal modeli” olarak da isimlendirilir. Ayrıca bu model dengeli durumlarda kararlılık çalışmaları için HVDC sisteminin başarımını tam olarak temsil eder.

Akım ve gerilimin dalga şekli model içinde gösterilmediğinden, komütasyon hatası ile ilgili yalnızca bazı tahminler yapılabilir. Bu da komütasyon geriliminin büyüklüğüne veya evirici söndürme açısına bağlıdır.

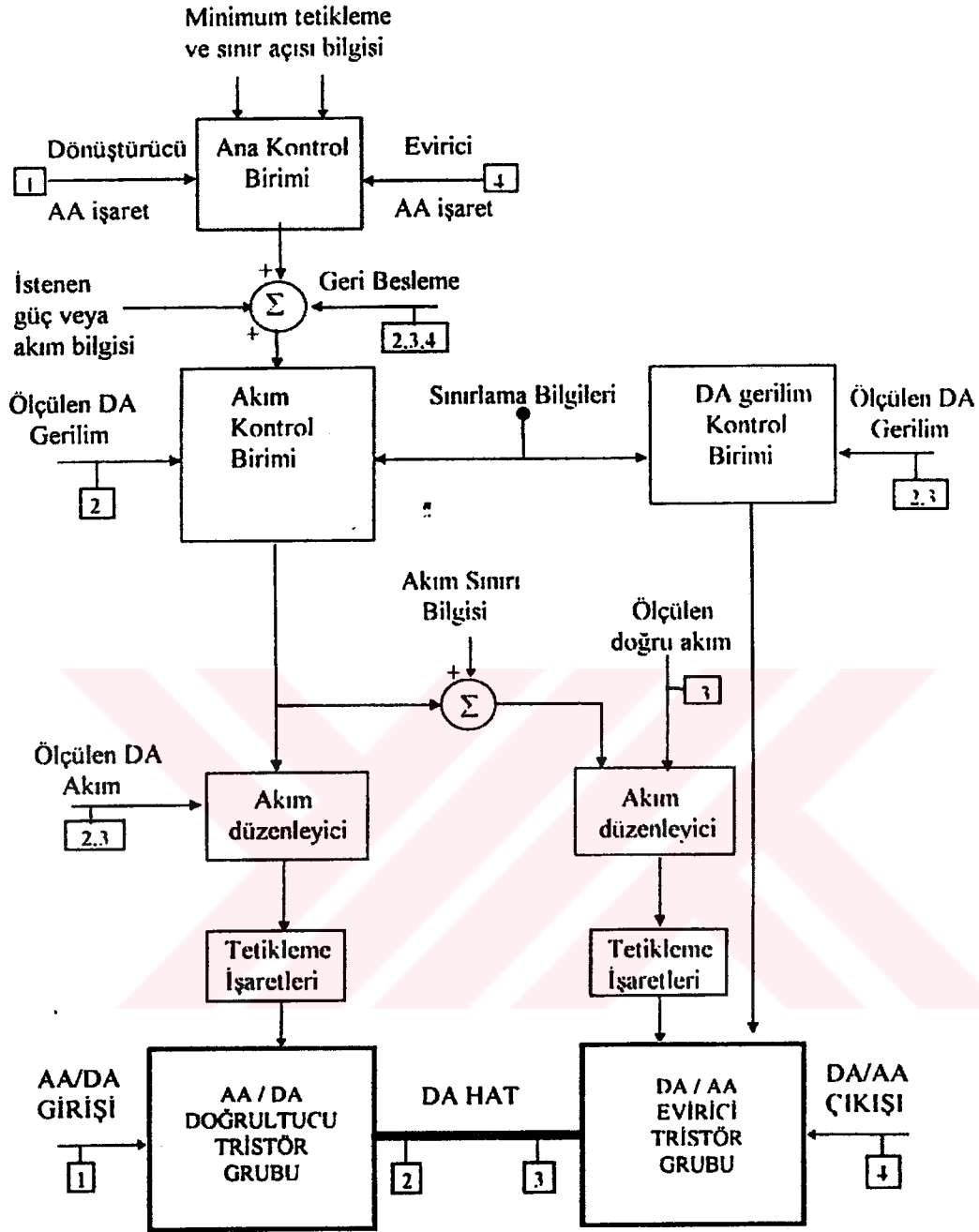
Detaylı HVDC sistem modelleri, AA sistem modellerinden daha hızlı dinamikler içerirler. Kararlılık çalışmalarında da DA eşitliklerini çözmek için, çok küçük entegrasyon basamakları gerektirirler.

Bütün bu özellikler dikkate alındığında, HVDC sisteminin genel yapısı ve kontrol işaretleri, şekil 4.18'de görüldüğü gibi olacaktır.

Buradaki temel amaç, hem dönüştürücü hem de eviricideki gücü olabildiğince sabit değerlerde tutmak ve iki birim arasındaki frekans uyumunu da sağlamaktır. Bu işlemlerin güvenli çalışma sınırları içinde olması için tetikleme açısı ve akımın sınır değerleri önceden girilmiştir. İstenen çıkış değerleri, geri besleme işaretleri ve yazılım yardımıyla sürekli kontrol edilerek sabit tutulmuştur. Bu işlemler esnasında bilgisayar D/A ve A/D kontrol kartının kullanılması da, istenen değerlere çok daha hassas yaklaşılmasını sağlamıştır. Sistemin girişindeki ve çıkışındaki frekansın uyumu da, evirici çıkışından alınan işaret ve doğrultucuya gelen işaretlerin karşılaştırılmasıyla kontrol edilmiştir. Bu işlemler için yapılan kontrolün genelleştirilmiş akış şemaları da ekte verilmiştir.

Dönüştürücüye gelen üç fazlı şebeke geriliminin her fazı veri eldesi kartı aracılığı ile ayrı ayrı örneklenerek bilgisayara gönderilmektedir. Bu örnekleme esnasında devreden gelen kesme işaretleri bulanık mantık alt programında değerlendirilerek kontrol işlemi gerçekleştirilmektedir. Yarı-iletken güç elemanlarının kontrolünde ise şebekenin sıfır geçişlerini yakalamak yerine fazların kesişim noktaları yakalanmaktadır. Bu kesişimler yine bilgisayar programında değerlendirilmekte ve tristörler için gerekli tetikleme açıları üretilmektedir. Böylece şebekedeki genlik düşmesi, frekans değişimi gibi olaylarda tristörlerin ilettime ve kesime girme noktalarının kaçırılması önlenmektedir.





Şekil 4.18. HVDC enerji taşıma sisteminin kontrol blok diyagramı.



## BÖLÜM 5. BULANIK MANTIK VE SİSTEMİN BULANIK MANTIKLA KONTROLÜ

### 5.1. Bulanık Mantık

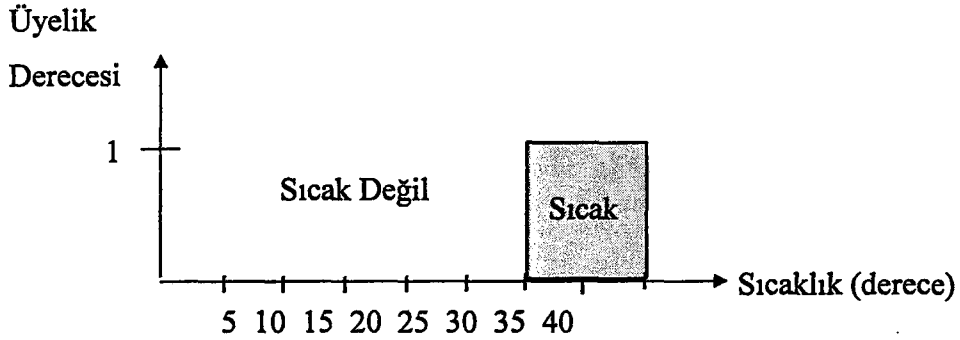
İnsan beyni sayısal bir işlemi birkaç dakikada yapmasına rağmen, idrak etmeye ait olayları birkaç saniyede çözebilecek kadar hızlıdır. Örneğin yolda giden şoför tehlike karşısında aniden fren yapar. Şoför o an hızının, yolun kayganlık derecesinin, önündeki tehlikeden uzaklaştığının vb. sayısal olarak kesin değerlerini bilmediği halde, geçmişte kazandığı deneyimlerden ve tehlikeyi idrak ettiğinden dolayı anında tehlikeye karşı koyar. Bilgisayarlar ise çok karmaşık sayısal işlemleri birkaç saniyede yapabilmelerine rağmen, idrak etmeye ve deneyimlerle kazanılmış bilmeye ait konularda yetersiz ve yavaşlardır. İnsan beyni, hesaplamalar yapan bilgisayarlardan farklı olarak, sinirsel algılayıcılar vasıtasıyla kazanılmış görelilik olarak sınıflandırılmış bilgileri kullanma temeline dayanır. İşte ilk defa 1965 yılında Lotfi A. Zadeh (California Üniversitesi'nden Azerbaycan'lı bir profesör) tarafından ortaya atılan bulanık mantık teorisi, düşünsel ve kavramsal işlev ve görelilik sınıflandırılmış üyelik fonksiyonları temeline dayandığından, bilgisayarlara ve bilgisayar destekli tasarımlara uygulanabilme açısından günümüzde oldukça değer kazanmıştır (Yager and Filev ,1994).

Bulanık mantık için, matematiğin gerçek dünyaya uyarlanması diyebiliriz. Çünkü gerçek dünyada her an değişen durumlardan değişik sonuçlar çıkabilir ve deneyimlerden yararlanmak gerekir. Bulanık mantık, bir kişinin diğeri ile konuşması veya diğeri açıklama yapmasına benzer olarak “soğuk”, “sıcak”, “yüksek”, “alçak” gibi dilsel değişkenleri kullanır. İkili durumları kullanan (sıcak-soğuk gibi) ikili mantıktan farklı olarak bulanık mantık, değişkenleri için ara durumları da (az sıcak, az soğuk gibi) kullanır. Bulanık mantığın özelliklerini şöyle sıralayabiliriz.

1. Bulanık küme dilsel değişkenleri göstermek için kullanılır.
2. Üyelik fonksiyonları bir bulanık kümede (sıcak, yüksek, hızlı) bir fiziksel değişkenin (ısı derecesi, basınç hız gibi) üyelik derecesini tanımlamak için kullanılır.
3. Bulanık operatörler bulanık ifadeler arasında mantıksal ilişkilere hız verir. Bunlarla EĞER-O HALDE (IF-THEN) türünden üretim kuralları, uzman sistemlerde kullanılan metoda benzer olarak, sembolik yoldan (yani dilsel olarak) formüle edilebilir.
4. Bulanık çıkarım, mevcut olan bilgiden, kurallara dayanarak yeni bilgiler elde etme yoludur (Smith,1994).

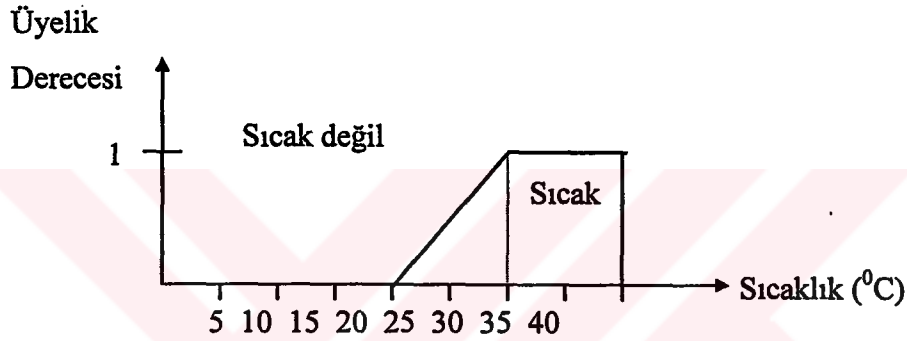
### 5.1.1. Bulanık Küme Teorisi

Klasik küme teorisinde bir eleman o kümenin ya elemanıdır ya da değildir. Kısmi üyelik olamaz. Şekil 5.1'de bu durum görülmektedir. Eğer sıcaklık 30 derecenin altına düşerse sıcak değildir. Yani klasik mantık teorisine göre 29.5 derece sıcak değildir. Doğal olarak bu mantığın hiçbir esnekliği yoktur. Gerçek dünyada ise sınırlar bu kadar keskin değildir. Tam tersine, olayların belli bir esneklikte olması istenir.



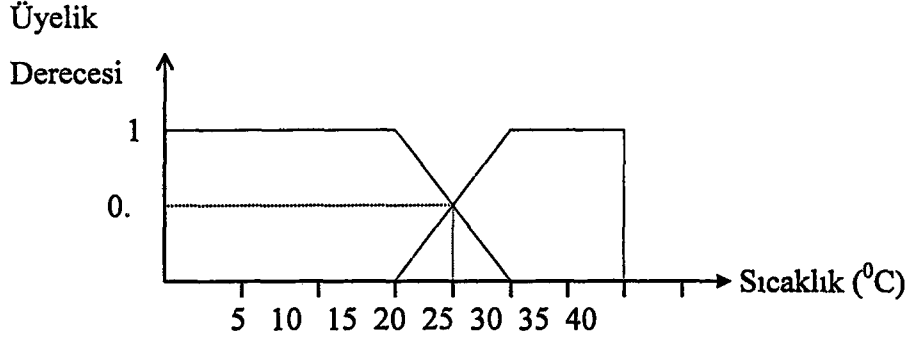
Şekil 5.1. Klasik küme teorisi

Bulanık mantık soğuk-sıcak, hızlı-yavaş, yüksek-alçak gibi ikili değişkenlerden oluşan dünyayı, az soğuk-az sıcak, az hızlı-az yavaş, az yüksek-az alçak gibi esnek niteleyicilerle yumuşatarak gerçek dünyaya benzetir. Şekil 5.2'de, sıcaklık gibi değişkenleri, gerçekte gözlenen değerine daha yakın veren bulanık küme teorisi görülmektedir. Buna göre 20 derece ile 40 derece arasındaki değerlerin, sıcak bulanık küme üyelik derecesi çıkmış olur. Burada sıcak bulanık küme üyelik derecesinde 30 derecede 1 olan maksimumdan, 20 derecede 0 olan minimuma doğru kademelendirilmiş bir azalma vardır.



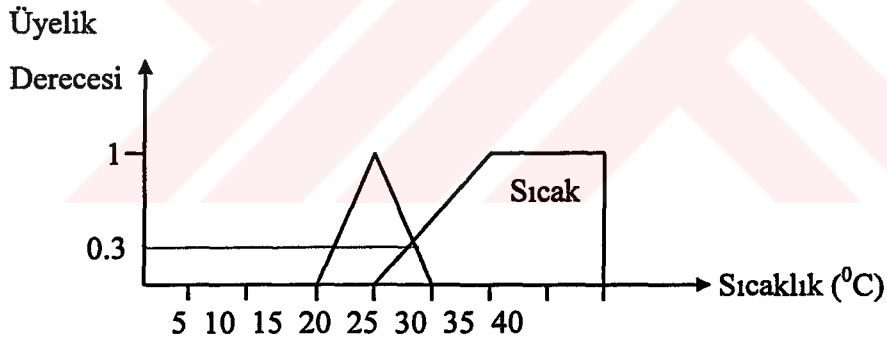
Şekil 5.2. Bulanık küme teorisi

Şekil 5.3'de ise bulanık mantık teorisinin bir adım daha ileri safhası görülmektedir. Sıcak bulanık küme üyelik derecesi, 0.5'de soğuk bulanık küme üyeliği kimliğini kazanır. Soğuk bulanık küme üyeliğinin derecesi, sıcaklık azaldığında artar. Buna göre 0'dan 15 dereceye kadar olan sıcaklık oldukça soğuk sayılır ve bu bölge soğuk bulanık küme tam üyeliğine sahiptir. 15 derece ile 25 derece arasında ise soğuk bulanık küme üyeliği vardır. 15 derece ile 25 derece arasında ise bulanık kümelerin birbirini kestiği durum olan örtüşüm ortaya çıkmaktadır. Örtüşüm bölgesindeki elemanlar hem sıcak hem soğuk kümenin elemanıdır.



Şekil 5.3. Bulanık kümede örtüşüm

Yukarıda verilen örnekler bulanık olmayan girişler için geçerli olmasına rağmen, bulanık mantık teorisinde bazen girişler de bulanık olabilir. Bu durumda bulanık küme üyelik derecesi, bulanık küme ve bulanık giriş değeri arasındaki kesişim bölgesinden belirlenir. Bu durum Şekil 5.4'de gösterilmiştir ve üyelik derecesi yaklaşık 0.3'dür.

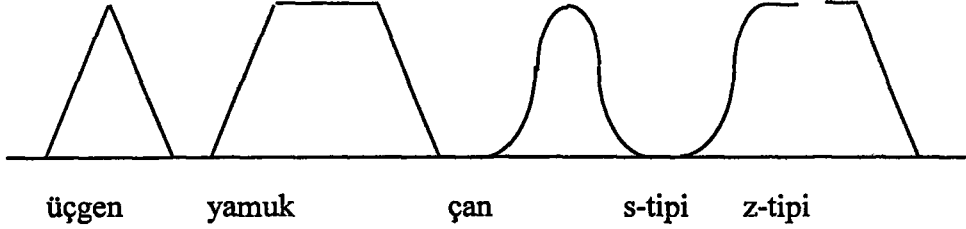


Şekil 5.4. Bulanık giriş değişkeninin üyelik derecesi

### 5.1.2. Bulanık Fonksiyonlar

Bir bulanık küme, izin verilen belli üyelik özelliğine sahiptir. Gerçekte, bir elemanın kümenin bir parçası olup olmadığı keskin veya konvansiyonel kümenin aksine, verilen bir eleman bulanık kümenin 0'dan bire kadar değişen bir üyelik derecesi

vardır (Sousa and Bose,1995). Bu üyelik fonksiyonu Şekil 5.5'de gösterildiği gibi üçgen (triangular), yamuk (trapezoidal), çan (singular), s tipi, z tipi olabilir.



Şekil 5.5. Çeşitli tiplerde üyelik fonksiyonları

### 5.1.3. Bulanık Kurallar

Bulanık kümeler sistem girişleri ve çıkışları için kullanılır, fakat bu giriş ve çıkışlar üzerine kurulu olan bulanık sistemi kurmak ve tanımak için bazı kuralları vermek zorunludur. Bulanık kuralların biçimi bazı açılardan geleneksel mantığa çok benzer biçimde aşağıdaki gibi verilebilir.

IF (EĞER)  $\Rightarrow$  1. giriş değeri

AND (VE)  $\Rightarrow$  2. giriş değeri

THEN (O HALDE)  $\Rightarrow$  çıkış değeri

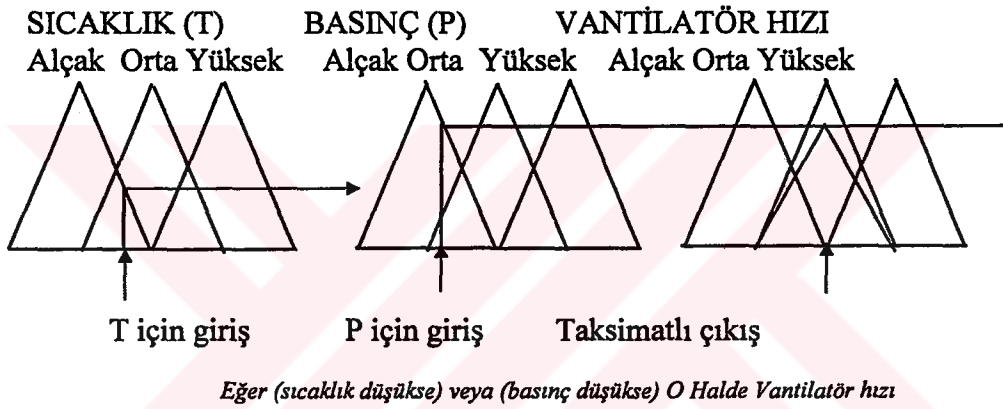
Geleneksel mantıktan farklı olarak bulanık mantıktaki kurallar kesinlikten uzak ve esnektir. Herhangi bir bulanık sistemde her biri “daha büyük veya daha küçük” veyahut da “doğru veya yanlış” ifadeleri üzerine kurulu önermeleri içeren bulanık kurallar vardır. Bir sonraki safha ise, okunan girişler üzerine kurulu olan her bir kural için bir çıkış değeri ifade etmeyi içerir. Kısaca girişlere kural uygulaması yapılır.

Bulanık mantığın, bulanık kümeleri ve kuralları bir araya toplamasıyla bir denetim yüzeyi oluşturmasından dolayı, bir sistemin matematiksel davranışı tam olarak belli olmadan da denetleyiciler rahatlıkla tasarlanabilir (Teixeira, and et al.,1994)..

#### 5.1.4. Bulanık Çıkarım

Klasik mantıkta, verilen önermelerden bir sonuca varmaya "Çıkarım" denmektedir. Klasik mantıkta önermeler kesin ve açıktır, çıkarım ise önermelerin birbirleriyle tam olarak uyduğu zaman yapılabilir.

Bulanık sistemlerde girişler orta, soğuk, yüksek gibi dilsel değişkenlerden oluştuğundan dolayı; bu girişler hakkında sonuca varma ve karar verme ancak EĞER - O HALDE (IF - THEN) türünden kuralların kullanılması ile mümkündür. Şekil 5.6'da bulanık çıkarımın nasıl yapıldığı görülmektedir.



Şekil 5.6. Bulanık çıkarım

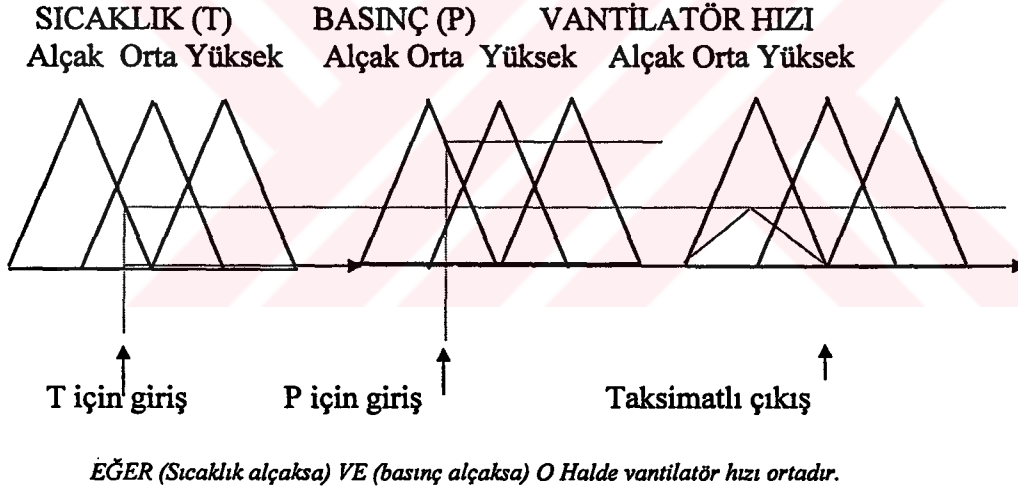
Gösterilen sistem sıcaklık ve basınç olmak üzere iki giriş değişkenine ve vantilatör hızı denilen çıkış değişkenine sahiptir. Her giriş değişkeni ise alçak, orta, yüksek olmak üzere üç bulanık kümeye sahiptir. Daha önce belirtildiği gibi herhangi bir sistem için çok sayıda kural olmasına rağmen burada sadece bir kural gösterilmiştir.

Bulanık sisteme gelen iki giriş (sıcaklık ve basınç) okunur. Kural girişlere uygulandıktan sonra bir çıkış değeri elde edilir. Kuralda uygulanan test eğer OR (VEYA) ise o zaman çıkış, girişin maksimum üyelik derecesine göre taksimatlandırılır.



Bu örnekte çıkış fonksiyonu sıcaklık için alçak bulanık kümede T giriş değerinin üyelik derecesine göre ve basınç için alçak bulanık kümede P'nin üyelik derecesine göre taksimatlandırılmıştır. Çünkü vantilatör hızı orta bulanık kümesine OR testinin uygulayan kuralın giriş üyeliğinin maksimum derecesine göre taksimatlandırılmıştır.

Şekil 5.7'de görüldüğü gibi ikinci kural bir VE (AND) testidir. Eğer bir VE testi uygulanırsa o zaman çıkış değeri, giriş üyelik derecesinin minimumuna göre derecelendirilir. Giriş değişkenlerinin üyelik derecesine göre, alçak bulanık kümenin çıkış değişkenleri taksimatlandırılmıştır. Bulanık mantık temeline dayanan bu çıkarımın net sonucu, harekete geçen her bir kural için, çok sayıda taksimatlandırılmış çıkış fonksiyonunun mevcudiyetine bağlıdır. Bu örnekte vantilatör hızının belirli bir değerde çalışması istenildiğinden; bu bulanık değerden kesin bir değere geçmek gerekir. Bu da bulanık değerden kesin değere geçme denilen "Durulaştırma" ile mümkündür (Schaefer,1993)..

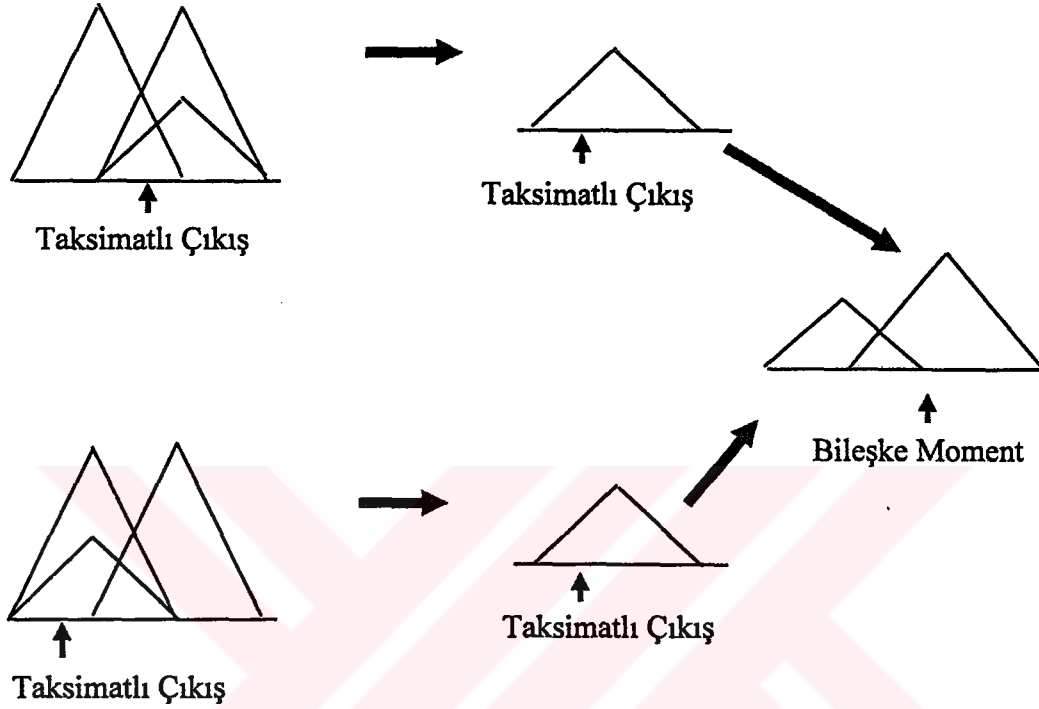


Şekil 5.7. İki bulanık kuralla bulanık çıkarım

### 5.1.5. Durulaştırma Metodu

Durulaştırmaya ilişkin birkaç metot olmasına rağmen, bunlardan en çok bileşke maksimum ve moment, yani orta alma metodu yaygındır. Durulaştırma işlemi bu örnekte orta alma metodu kullanılarak yapılmıştır. Orta alma metodunu kullanan

durulaştırma işlemi, uygulanan bulanık kuralların bir sonucu olarak elde edilen taksimatlandırılmış çıkışların birleşimi ve elde edilen bileşke alanın ağırlık merkezinin hesaplanması olarak düşünülür. Şekil 5.8'de orta alarak durulaştırma metodunu görülmektedir.



Şekil 5.8. Orta alma durulaştırma metodu

#### 5.1.6. Bulanık Mantığın Uygulama Alanları

Bulanık mantığın ilk uygulama alanları çimento sanayii ve su arıtma sistemleri olmuştur. Daha sonra buhar türbini, nükleer reaktör, asansör, ve vinç denetimi gibi değişik alanlarda da bulanık mantıktan yararlanılmıştır. Özellikle Japonya'da çok geniş uygulama alanı bulmuştur. Bir metro sisteminde kullanılan bulanık mantık çok başarılı olmuş ve bu olaydan sonra Japonya'da bulanık mantık çok rağbet görmüştür. 1990'da bulanık mantık fotoğraf makinelerinden ev aletlerine ve hatta borsaya kadar çok değişik alanlarda kullanılmıştır (Raviraj and Sen,1995)..

Günümüzde, bulanık mantık uygulamalarına yönelik yazılım ve donanımlar piyasada hazır şekilde kullanıcılara sunulmuştur. Hatta bulanık mikroişlemciler de

pazarlanmaktadır (Jamshidi et al.,1993). Panasonic firmasının tasarımını yaptığı video kayıt cihazının, elle tutulması durumunda çekim sırasındaki sarsıntıları ortadan kaldırması, Subaru ve Nissan firmalarının birlikte gerçekleştirdikleri otomobil vites sisteminde, araba kullanım sitalinin ve motor yükünün sezilerek uygun dişli oranının seçimi, yine Nissan tarafından gerçekleştirilen ABS fren sistemleri, Fujitsu, Toshiba, Hithachi ve Mitsubishi'nin gerçekleştirdikleri büyük asansör denetim sistemleri, Matsushita firmasının tasarımını yaptığı çamaşır makinesinde çamaşırın kirliliğine, ağırlığına ve kumaşın cinsine göre yıkama programı seçen sistemler bulanık mantığın kullanıldığı ilginç örneklerdendir.

NASA'da bir grup araştırmacı, bulanık mantıktan yararlanarak, uzay mekiğinin yakıt tüketimini üç kat azaltmayı ve sistem güvenilirliğinin artmasını sağlamışlardır. Bugün ABD, Japonya, Çin ve Batı Avrupa ülkeleri başta olmak üzere otuza yakın ülke bulanık mantık üzerine araştırmalar yapmaktadır. Uygulama açısından Japonya'nın daha önde olduğunu görüyoruz.

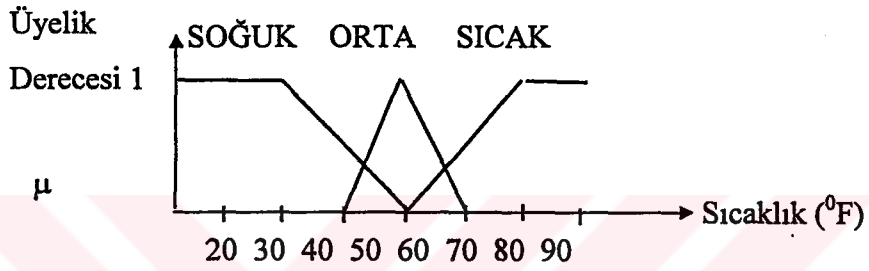
Kontrol edilecek sistem, klasik veya modern kontrol teknikleri ile iyi kontrol edilemediğinde, sürecin bulanık kontrolü bir alternatif oluşturmaktadır. Bu tip geleneksel teknikler, oldukça zor matematiksel modellere ve genellikle süreç şartlarındaki değişimleri gösterebilen ölçümlere bağlıdır.

Birçok süreçte, bu tip modeller çıkartmak ve doğru ölçümler yapmak oldukça zordur. Kontrolün zor olduğu bu tip karmaşık süreç örnekleri, çimento fırınları, çelik fırınları, atık su temizleme istasyonları, DNA üretimi, çok aşamalı çöp imha tesisleri, metal kesme makineleri ve üretim tesisleridir. Buna benzer durumlarda, kontrol kurallarının seçimi farklı olmak üzere, bulanık kontrol gerçekleştirilebilir.

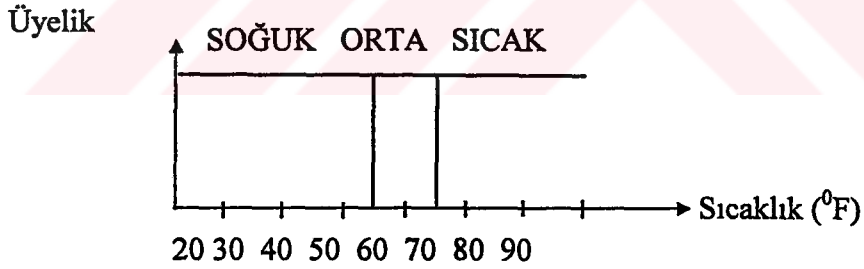
#### **5.1.7. Bulanık İşlemler**

Bir bulanık kümenin en belirgin özelliği kısmi üyeliğe izin vermesidir. Aslında klasik küme teorisinin tersine, bulanık küme teorisinde, verilen bir eleman 0 (üye değil) ile 1 (tam üye) arasında değişen bir üyelik derecesi ile bir bulanık kümenin elemanı

olabilir (Bose,1994a). Şekil 5.9'da faraziye bir sıcaklık kontrol sisteminde bu fark gösterilmektedir. Şekil 5.9a'da geleneksel sınıflama şöyle verilmektedir. Örneğin,  $T=67^{\circ}\text{F}$  sıcaklık değeri yalnızca SICAK kümenin bir elemanıdır. Tersine, Şekil 5.9b'de ise sıcaklık bir bulanık değişken olarak tanımlanmış ve  $T=67^{\circ}\text{F}$  her iki kümenin (ORTA ve SICAK) kısmi üyesi kabul edilmektedir. Dil bilginin aktarımında en temel yol olduğundan, bulanık değişkenler dilsel (linguistic) değişkenler olarak alınmaktadır (Örneğin, Şekil 5.9'de SOĞUK, ILIK ve SICAK gibi). Bir bulanık değişkenin tanımlandığı sayısal aralık genellikle "Tanım Uzayı" olarak isimlendirilir (Şekil 5.9'de [20,90]).



(a)



(b)

Şekil 5.9.a) Geleneksel küme kullanarak sıcaklık gösterimi

b) Bulanık küme kullanarak sıcaklık gösterimi

Bulanık kontrol teorisi oldukça yeni olduğundan bulanık mantık ve bulanık kontrol ile ilgili temel kavram ve işlemlerin açıklanması yararlı olacaktır.

*Birleşim:* X uzayında tanımlı A ve B iki bulanık küme verilmiş olsun, birleşim ( $A \cup B$ ) de üyelik fonksiyonu aşağıda verildiği gibi X'in bir bulanık alt kümesidir (Mendel,1995).

$$\mu_{A \cup B}(x) = \text{Max} [\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (5.1)$$

Burada x, X uzayının herhangi bir elemanıdır.

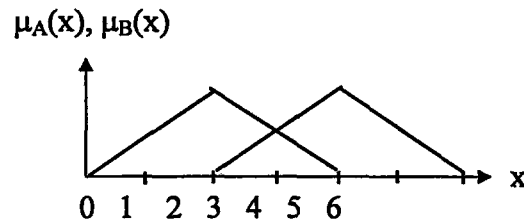
*Kesişim:* X uzayındaki A ve B iki bulanık kümenin kesişimi,  $A \cap B$  ile gösterilir ve aşağıdaki üyelik fonksiyonu ile temsil edilir.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \text{Min} [\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (5.2)$$

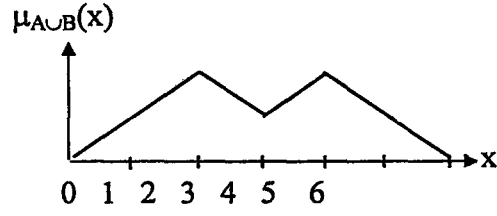
*Tümleyen (evrik, değil):* X uzayındaki bir A bulanık alt kümesinin tümleyeni  $\neg A$  ile gösterilir ve aşağıda verilen üyelik fonksiyonu ile temsil edilir.

$$\mu_{\neg A} = 1 - \mu_A(x) \quad (5.3)$$

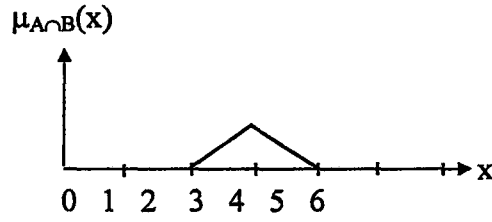
Şekil 5.10'da bu üç temel işlem gösterilmektedir.



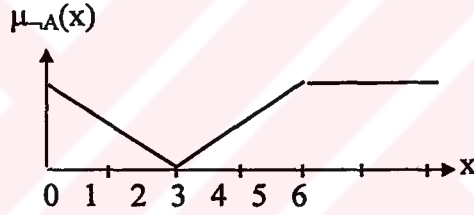
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.10. a) İki bulanık kümenin,  
b) birleşimi  
c) kesişimi  
d) tümleyeni

Bulanık kontrolde bulanık kurallar ve bulanık düzenlemeler önemlidir. Tipik bir EĞER - O HALDE (IF - THEN) kural düzeni aşağıdaki gibi olmaktadır.

IF (x = A AND y = B) THEN (z = C)

Burada x, y ve z bulanık değişkenler; A, B ve C ise X, Y ve Z uzayına karşılık gelen bulanık alt kümelerdir. Şart önce gelen IF kısmında verilirse, hareket veya sonuç ise

sonra gelen THEN kısmında ifade edilmektedir. Bir bulanık kontrol düzeneği tasarlamak için, birçok kuraldan meydana gelen bir bulanık kural tabanı oluşturulmalıdır. Örneğin; kontrol sinyali (DU) değişimini belirlemek için, hız hatası (E) ve hata değişiminin (CE) kullanıldığı bir hız kontrol sistemi düşünülebilir. Kural tabanı bir bölümü de aşağıdaki gibi olmaktadır (S=Sıfır, NK=Negatif Küçük, PK=Pozitif Küçük).

Kural 1: IF E = S AND CE = S THEN DU = S;

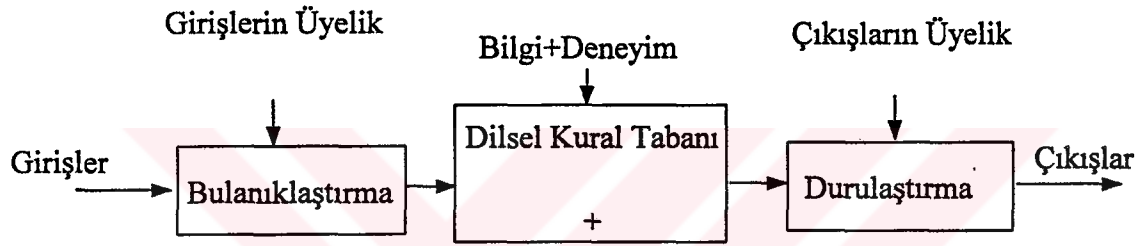
Kural 2: IF E = S AND CE = NK THEN DU = NK;

Kural 3: IF E = PK AND CE = NK THEN DU = S;

Bulanık kontrol; büyük, küçük, çok zayıf, çok sıcak, biraz soğuk, pozitif orta, negatif küçük gibi dilsel etiketler ile tanımlanan bulanık kümelere dayalı olarak gerçekleştirilir. Bu tür dilsel etiketlerin kullanımı, sistemin durumunu ifade etmeyi kolaylaştırdığı gibi istenen kontrol hareketini, günlük dille ifade etmeyi mümkün kılmaktadır. Sistemi tanımlamak için, her bir değişkenin tanım uzayı, daha önceden belirlenen referans bulanık kümeler ailesi ile kapsanır. Gerçek bir değer belirsizliği, bir bulanık kümede üyelik derecesi ile ifade edilir. Değişkenin tanım uzayında belirlenen bir bulanık kümenin büyüklüğü ile ilgili fonksiyonda "üyelik fonksiyonu" olarak isimlendirilir (Schwartz et al.,1994).

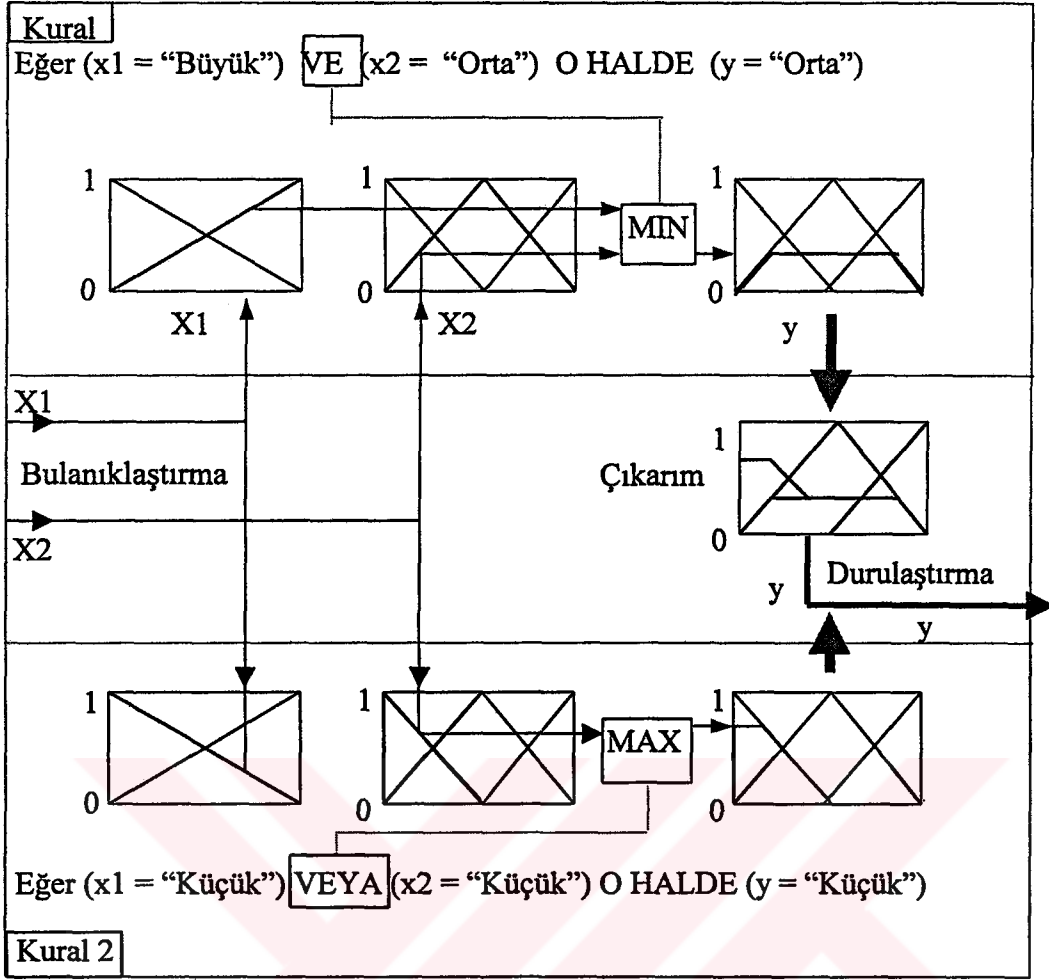
gerçekleştirmektedir. Durulaştırma bloğu, sonuçlandırılmış kontrol hareketini sürekli bir sinyale çevirmektedir (Qin,1994).

Sistem belirsizliği bulanıklaştırma ile kontrole girer ve üyelik fonksiyonları ile ifade edilir. Sistem davranış bilgisi, sistemin giriş/çıkış davranışını temsil eden ve bir bulanık ilişki ile temsil edilebilen dilsel kurallar yardımıyla sisteme aktarılır daha sonra bulanık çıkarımla da geliştirilir. Bulanık kontrol sisteminin giriş ve çıkışları keskin değerlerdir ve ilişkisi ise tamamıyla deterministiktir (karar tabanlı). Şekil 5.12de ise iki kurallı,  $x_1$  ve  $x_2$  adlı iki girişli, ve  $y$  çıkışlı bulanık kontrolcü çıkarım mekanizması görülmektedir.



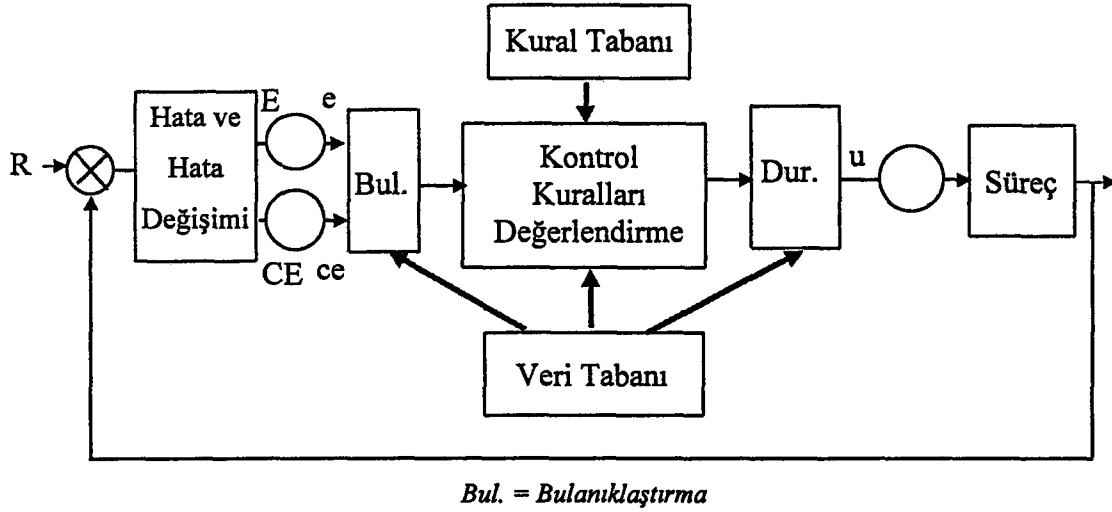
Şekil 5.11. Bulanık denetleyici temel yapısı





Şekil 5.12. Bulanık kontrolcü çıkarım mekanizması

Bulanık kontrol sisteminin daha genel yapısı Şekil 5.13'de verilmektedir. U kontrol sinyali, hata (e) ve hata değişimi (ce) (de/dt örnekleme aralığı) olarak iki değişkenden elde edilmektedir. e ve ce değerleri, gerçek E ve CE sinyallerinin kazanç faktörlerine bölünmesi ile türetilen per ünit (pu) sinyallerdir. Bütün klasik giriş işaretleri bulanık denetleyicide işlenmeden önce bulanık kümelerle dönüştürülmektedir. Bu işleme "Bulanıklaştırma" adı verilir. Aynı şekilde, bulanık denetleyici çıkışının da sistem tarafından istenen klasik (analog veya dijital) değere dönüştürülmesi gereklidir. Bu işlem de "Durulaştırma" adını almaktadır. Durulaştırma işlemi "Ağırlık Merkezi" veya "Yükseklik" gibi yöntemler ile gerçekleştirilir. Şekildeki veri tabanı bloğu, kontrol kurallarında bulanıklaştırma ve durulaştırma işlemlerinde kullanılacak bulanık alt kümelerin işlemsel tanımlamalarını vermektedir (Bose,1994b)



Şekil 5.13. Bulanık kontrol sisteminin genel yapısı

Bulanık kontrolün en önemli iki özelliği, insan deneyiminin sisteme kolayca eklenebilmesi ve bulanık mantık, üyelik fonksiyonları, kurallar ve durulaştırma sayesinde doğrusal olmayan bir ilişki sağlamasıdır. İnsan kullanıcı deneyimlerinin geçerli olduğu ve geleneksel kontrol teknolojilerinin yeterli olmadığı süreç kontrolleri için bulanık kontrol yukarıda açıklanan nedenlerle en ümit verici teknoloji olarak görülmektedir (Lin and Hwang, 1995).

Bulanık kontrolün insan düşünüş tarzına yakın olması, matematiksel modele ihtiyaç duymaması uygulamalarının hızlı ve ucuza mal olması gibi bazı avantajlarına rağmen en önemli sınırlaması kontrol sisteminin analizi ve tasarımı için sistematik bir yöntem bulunmamasıdır. Genellikle oldukça zaman alıcı bir yöntem olan deneme yanılma iteratif yöntemi kullanılır. Bulanık kontrol ile ilgili diğer bazı güçlükler aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir.

1. Tam bir kural tabanının olmaması. Denetleyici, sürecin her durumu için anlamlı bir kontrol işareti vermelidir. Kurallar deneyime bağlıdır.
2. Alt kümelerin üst üste çakışması (overlap), veri miktarı ve üyelik fonksiyonlarının biçiminin seçimi gibi konularda kesin bir ölçü veya kriter yoktur. Deneme en uygun yoldur.

3. Bulanıklığın tanımlanması, kontrol kurallarının açıklanması zordur.
4. Veri tabanı oluşturma ve durulaştırma işlemi zordur.
5. Kontrol edilen sistemin kararlılık analizi bilinen yöntemlerle yapılamaz.

Yapılacak tek şey benzetim çalışmasıdır. Bu yönde bazı çalışmalar yapılmaktadır. Güç elektroniğinde bulanık kontrol teorisi uygulaması çok yenidir. Bir güç elektroniği sistemi genelde, parametreleri değişen doğrusal olmayan karmaşık bir modele sahiptir ve kontrolün hızlı olması istenir (Calderon et al.,1994).

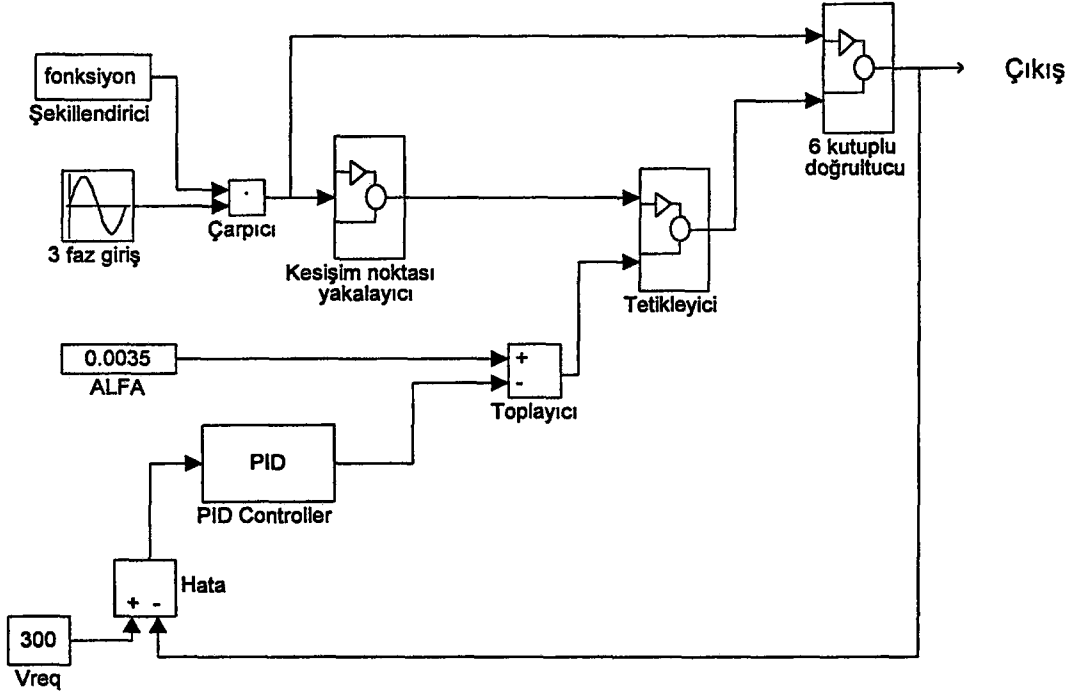
### **5.3. Sistemin Bulanık Mantıkla Denetimi**

Daha önceki bölümde sistemin geleneksel kontrol sistemleri kullanılarak denetimi PC aracılığıyla fiziksel gerçekleştirilmesi yapılmıştı. Bu bölümde sistem MATLAB programı kullanılarak SIMULINK ve FUZZY TOOL arabirim programları kullanılarak benzetimi gerçekleştirilecektir (Matlab Works Inc.,1995). Ayrıca aynı sistem PID kontrolü kullanılarak ta denetlenmiş ve bulanık denetimle karşılaştırma imkanı vermiştir.

HVDC sistemi iki ayrı kısımda düşünüldüğünde dönüştürücü ve evirci olarak ayırt edilebilir. Dönüştürücü kısmında çıkıştan örneklenen ortalama gerilim değeri kontrol girişi ile toplanarak hata değeri elde edilmiş ve bu hatanın azaltılması için PID ve bulanık kontrol denetleyicileri kullanılmıştır (Ölçer ve diğ., 1997c).

#### **5.3.1 Dönüştürücünün Benzetimi**

Dönüştürücünün benzetimi için tasarlanan sistem (EK-F)'de gösterildiği gibidir. Çıkış geriliminin ortalama değeri üzerinden alınan örnekler ile dönüştürücü çıkışında istenen değer arasındaki fark kapalı çevrimdeki hatanın bulunmasına neden olur. Hatanın azaltılması için sistemin doğrusal olmayan yapısını doğrusallaştırabilmek için PID kontrolör veya bulanık mantık denetleyici kullanılmaktadır.



Şekil 5.14. Dönüştürücünün PID kontrolü için düzenlenmiş basit kontrol diyagramı

1

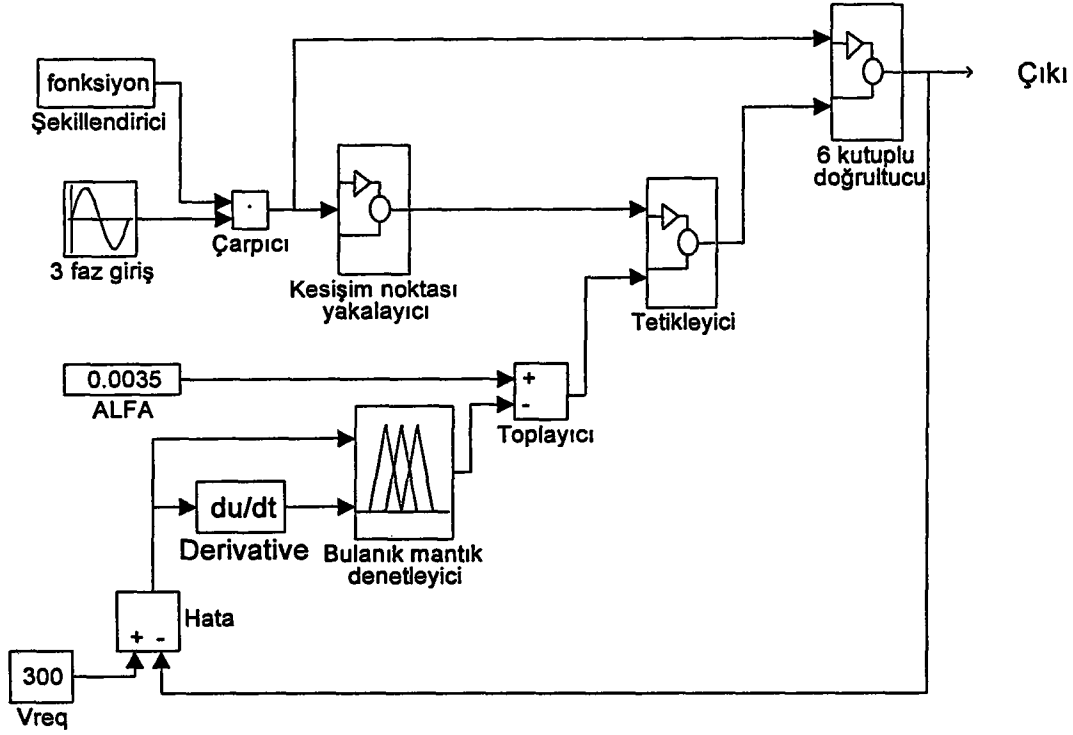
PID kontrolü kullanılarak düzenlenmiş basit diyagramda 3 fazlı gerilim girişi bir şekillendirici fonksiyonla çarpılarak kesişim noktasına gönderilmektedir. Şekillendirici 3 fazlı sinüzoidal giriş gerilimi üzerinde istenen genlik değişimlerini sağlamak amacıyla şekil bozucu veya düzenleyici olarak kullanılmıştır. Bu sayede faz genlikleri istenen şekilde fonksiyonel olarak değiştirilebilmektedir. Buradaki amaç kontrol yöntemlerinin giriş faz genliklerinde oluşacak değişimleri çıkışa yansıtıp yansıtmadığını kontrol edebilmektir. Ayrıca kesişim noktası yakalayıcı için faz kesişim noktalarının genliğinin istendiği şekilde değişmelerini sağlayarak faz kesişimlerinin yakalanıp yakalanmadığı gözlemlenmektedir.

Kesişim noktası yakalayıcı her fazın kesiştiği noktaları yakalayıp dönüştürücüdeki tristör grupları için tetikleme başlangıç noktalarını tespit eder. Bu ünite sayesinde fazlardaki kaymalar nedeniyle doğrultucudaki yanlış tetiklenmeler ortadan kaldırılmıştır. Herhangi bir fazdaki ani yükselme ve düşmeler fazlar arası kesişim noktalarını değiştireceğinden bu noktaların değişmesi ile doğrultucu çıkışında

oluşacak hatalar giderilmektedir. Bu aynı zamanda tristörlerin yanlış açılarda tetiklenmelerini de önleyeceğinden tristörlerin sağlıklı çalışmasına neden olur. Altı kutuplu doğrultucu bloğunda 6 adet tristör benzetimi yer almaktadır. Tristörlerin kapı girişlerine gelen uygun tetikleme darbeleri bir önceki kesişim noktası yakalayıcıdan gelmektedir. Bu tetikleme darbeleri ALFA tetikleme gecikme açısı için bir başlangıç noktası oluşturmaktadır. Tetikleme açısının büyük değerlere gitmemesi için EK-F'de gösterildiği şekilde bir sınırlandırılmıştır. Bu sayede büyük tetikleme açıları üretilmeyeceği için sistem çıkışında düzensizlikler olmaz.

Altı kutuplu doğrultucu çıkışında elde edilen çıkış genlik değeri örneklenerek istenen çıkış Vreq toplanmıştır. İstenen çıkış ile güncel çıkış arasındaki hata değeri PID denetleyici için girişi oluşturmaktadır. PID denetleyici hatayı en aza indirecek yeni tetikleme açısını üretir. Bu çevrim sayesinde Hata belli bir süre istenen hata aralığına kadar düşer.

Aynı sistem bulanık mantık denetleyici için aşağıdaki şekilde düzenlenir;

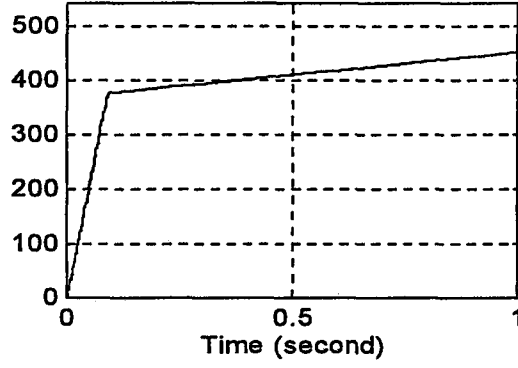


Şekil 5.15. Dönüştürücünün bulanık mantık denetleyici için düzenlenmiş basit kontrol diyagramı

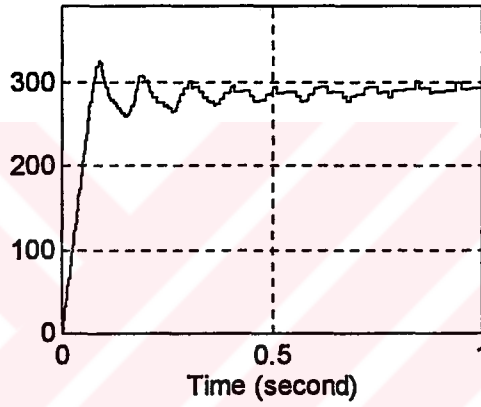
Bulanık mantık denetleyici PID kontrolü için tasarlanmış sistem gibi aynı ünitelerle tasarlanmıştır. Ancak bulanık kontrol için hatanın dışında hatanın değişimi de gerekeceğinden hatanın türevi alınmıştır. Yine, amaç, çıkış genlik hatasının en aza indirilmesidir.

### 5.3.1.1. Dönüştürücünün PID kontrolü

İstenen çıkış değeri ile o anki çıkış değeri arasındaki farkın en aza indirilmesi için hatanın oranı, türevi ve entegrali alınarak PID çıkışında bir değer üretilir. Bu değer tristörlerin tetiklenmesi için gerekli ateşleme açısını değiştirir. Böylece çıkışta hatanın azalması yönünde bir değişme gözlenir.  $V_{req} = 300$  v için elde edilen ortalama çıkış eğrisi aşağıdaki gibidir.

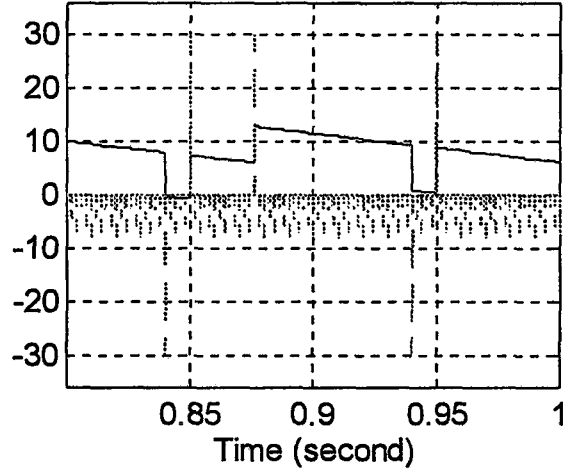


Şekil 5.16 Kontrolsüz dönüştürücünün açık çevrim ortalama çıkış eğrisi gerilim(Volt)/zaman(sn)



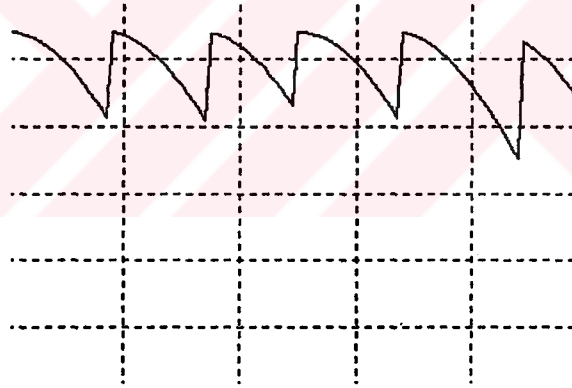
Şekil 5.17  $V_{req}=300$  volt için PID kontrollü dönüştürücünün ortalama çıkış eğrisi gerilim(Volt/sn)

İstenen değer 300 volta ortalama çıkış değerine oturması için istenen en fazla hata gerilimi aralığına oturması için  $[(-10;10)$  volt ] 1 sn`lik bir süre geçmektedir.



Şekil 5.18  $V_{req}=300$  volt için PID kontrollü dönüştürücünün hata ve hata değişimi (keskin çizgili) gerilim (Volt/sn)

$V_{req}=300$  volt değerine oturması için geçen sürenin son 20 ms'lik kısmının hata ve hata değişiminin çıkış eğrisi yukarıdaki gibidir. Hatanın son periyotta daha azaldığı görülmektedir. Hata değerinin +10 volt değerinin altına inmesi istenen durumdur.



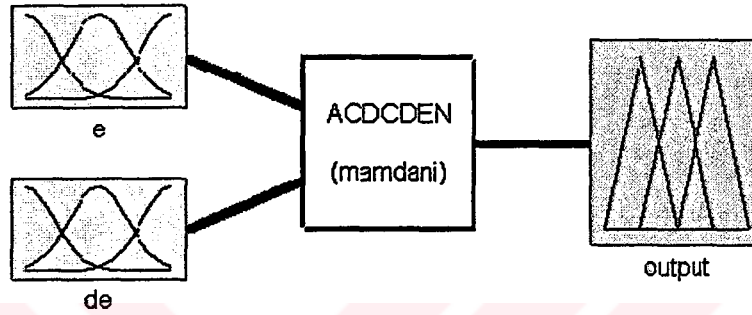
Şekil 5.19 PID kontrolü esnasında doğrultulmuş çıkışın değişiminden bir periyot (volt/sn)

Son periyot esnasında çıkış geriliminin küçük değişimleriyle ortalama hata değeri azaltılır. Tetikleme açısının değişimi grafikte gözüken çıkış değerinin azaltılmasında görülmektedir.



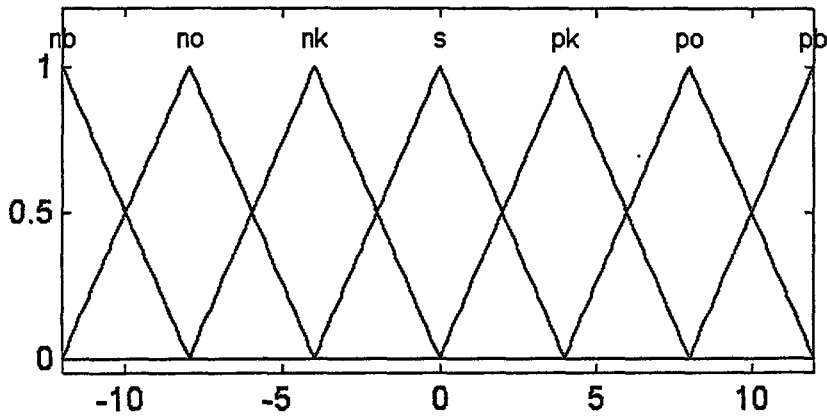
### 5.3.1.2. Dönüştürücünün bulanık mantıkla kontrolü

Sistemin PID denetleyicisi yerine bulanık mantık denetleyicisi yerleştirilirse girişinde hata ve hata değişimi için , denetleyici uygun alfa tetikleme açıları üretir. Ancak hata değeri ve hata değerinin değişiminin alfa tetikleme açısını nasıl değiştireceği ile ilgili denetleyicinin kurallarının tanımlanması gerekir. Sistemin genel yapısı ve kurallar aşağıdaki diyagramlarda gösterilmiştir.

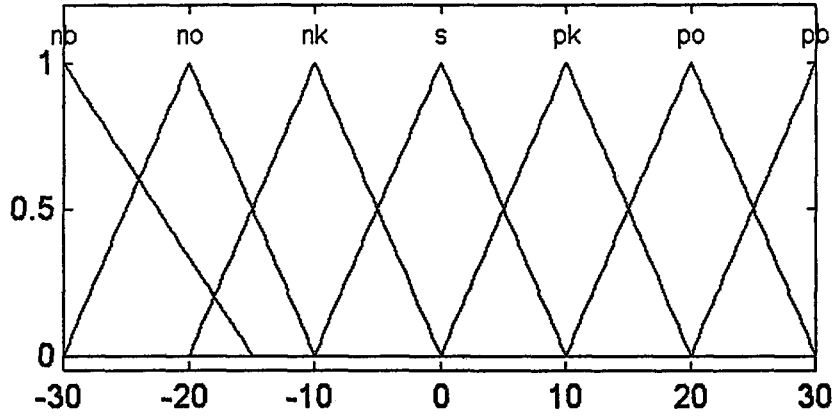


Şekil 5.20. Bulanık denetleyicinin blok diyagramı

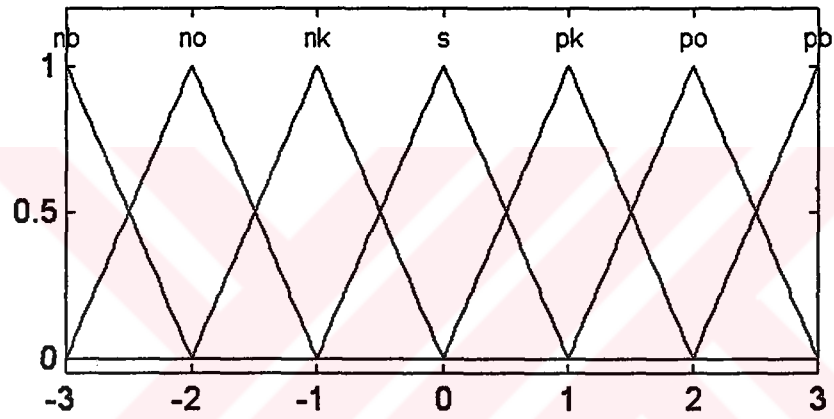
Bulanık mantık denetleyicisinin blok diyagramında e hatayı, de hata değişimini, output denetleyici çıkışı ifade etmektedir. ACDCDEN bulanık mantık kurallarını tutan matrisi tanımlar.



Şekil 5.21. Bulanık mantık denetleyicisinin 'e' hata girişi için üyelik fonksiyonu(üyelik derecesi/volt)



Şekil 5.22. Bulanık mantık denetleyicisinin de 'hata' değişimi girişi için üyelik fonksiyonu(üyelik derecesi/volt)



Şekil 5.23. Bulanık mantık denetleyicisinin de çıkış üyeliği fonksiyonu (üyelik derecesi/ms)

Sistemin giriş ve çıkış için üyelik fonksiyonların yanı sıra bulanık mantık kurallarında tanımlanması gereklidir. Bu kuralları da tanımlarsak:

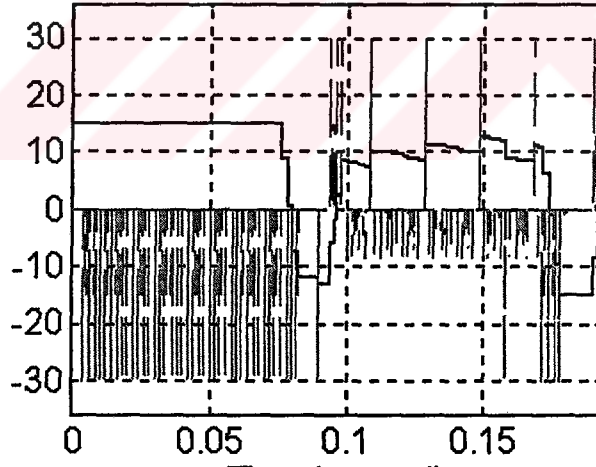
1. If (e is pb) and (de is nb) then (g is pb) (1)
2. If (e is pb) and (de is no) then (g is pb) (1)
3. If (e is pb) and (de is nk) then (g is pb) (1)
4. If (e is pb) and (de is s) then (g is pb) (1)
5. If (e is pb) and (de is pk) then (g is pb) (1)
6. If (e is pb) and (de is po) then (g is po) (1)
7. If (e is pb) and (de is pb) then (g is po) (1)

8. If (e is po) and (de is nb) then (g is pb) (1)
9. If (e is po) and (de is no) then (g is po) (1)
10. If (e is po) and (de is nk) then (g is po) (1)
11. If (e is po) and (de is s) then (g is po) (1)
12. If (e is po) and (de is pk) then (g is pk) (1)
13. If (e is po) and (de is po) then (g is pk) (1)
14. If (e is po) and (de is pb) then (g is pk) (1)
15. If (e is pk) and (de is nb) then (g is pk) (1)
16. If (e is pk) and (de is no) then (g is pk) (1)
17. If (e is pk) and (de is nk) then (g is pk) (1)
18. If (e is pk) and (de is s) then (g is pk) (1)
19. If (e is pk) and (de is pk) then (g is pk) (1)
20. If (e is pk) and (de is po) then (g is s) (1)
21. If (e is pk) and (de is pb) then (g is s) (1)
22. If (e is s) and (de is nb) then (g is no) (1)
23. If (e is s) and (de is no) then (g is no) (1)
24. If (e is s) and (de is nk) then (g is nk) (1)
25. If (e is s) and (de is s) then (g is s) (1)
26. If (e is s) and (de is pk) then (g is nk) (1)
27. If (e is s) and (de is po) then (g is nk) (1)
28. If (e is nk) and (de is pb) then (g is no) (1)
29. If (e is nk) and (de is nb) then (g is nb) (1)
30. If (e is nk) and (de is no) then (g is nb) (1)
31. If (e is nk) and (de is nk) then (g is no) (1)
32. If (e is nk) and (de is s) then (g is nk) (1)
33. If (e is nk) and (de is pk) then (g is nk) (1)
34. If (e is nk) and (de is po) then (g is s) (1)
35. If (e is nk) and (de is pb) then (g is s) (1)
36. If (e is no) and (de is nb) then (g is nb) (1)
37. If (e is no) and (de is no) then (g is nb) (1)
38. If (e is no) and (de is nk) then (g is no) (1)
39. If (e is no) and (de is s) then (g is nk) (1)

40. If (e is no) and (de is pk) then (g is nk) (1)
41. If (e is no) and (de is po) then (g is nk) (1)
42. If (e is no) and (de is pb) then (g is s) (1)
43. If (e is nb) and (de is nb) then (g is nb) (1)
44. If (e is nb) and (de is no) then (g is nb) (1)
45. If (e is nb) and (de is nk) then (g is nb) (1)
46. If (e is nb) and (de is s) then (g is nb) (1)
47. If (e is nb) and (de is pk) then (g is no) (1)
48. If (e is nb) and (de is po) then (g is no) (1)
49. If (e is nb) and (de is pb) then (g is nk) (1)

e ve de için yedi üyelik fonksiyonundan 49 adet kural yazılabilir. Bu kurallarda n : negatif, p : pozitif, s : sıfır, k : küçük, o : orta , b: büyük olarak tanımlanmaktadır.

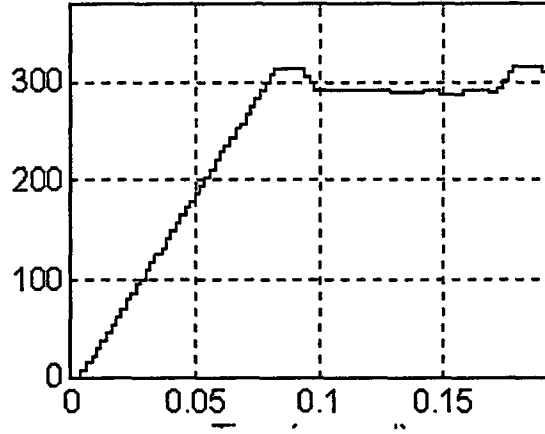
Bulanık kurallara göre kontrol yapıldığında PID için istenen  $V_{req}=300$ volt için aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.



Şekil 5.24. Bulanık mantık kontrollü sistemin 20 ms sürede hata değişimi(volt/s)

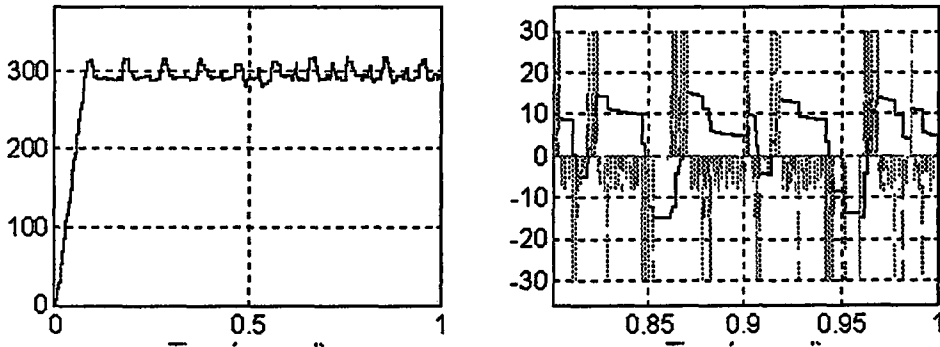
Hata ve hata değişimi dikkat edilirse istenen (+10,-10) volt arasına çok kısa bir sürede girmektedir. Dolayısı ile bulanık kontrollü sistemin PID kontrollü sisteme

göre daha iyi kontrol yapabildiği görülmektedir PID kontrolde maksimum hata aralığına girebilmek için çok daha uzun zaman gerekmektedir.



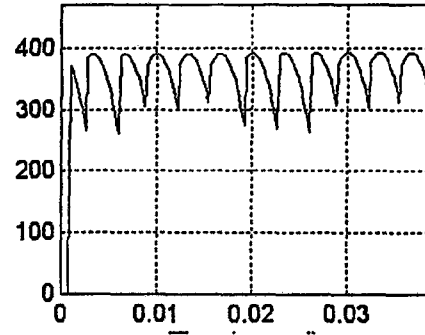
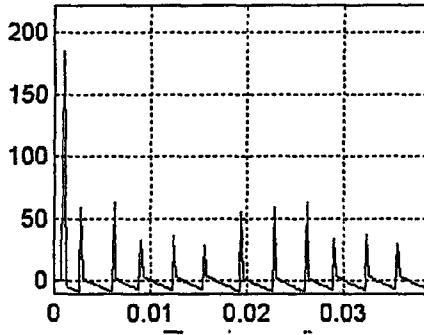
Şekil 5.25. Bulanık mantık kontrollü sistemin 20 ms sürede çıkış gerilimi (volt/s)

İlk 20 ms aralığında istenen çıkış gerilimi  $V_{req}=300$  volt değerine (10,-10) volt hata payı ile oturmaktadır. Burada dikkat edilecek diğer konu, üç fazlı giriş geriliminin faz genliklerinin her biri 1 sn boyunca 0.90 katsayısından 1.10 katsayısına doğru artan bir şekilde çarpılmasıdır. Buna rağmen bulanık denetleyici bu durumdan etkilenmemektedir.

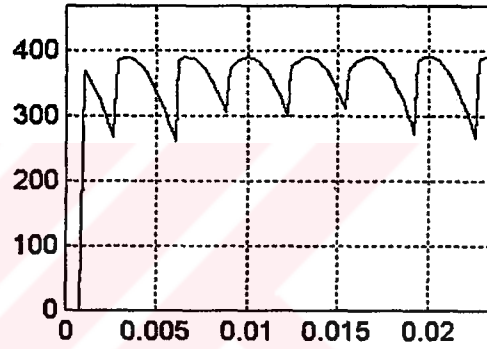
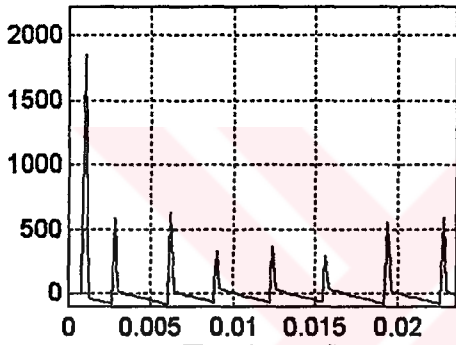


Şekil 5.26. Bulanık mantık kontrollü sistemin 1 s sürede çıkış gerilimi ve hata değişimleri (volt/sn)

Şekil 5.26`te ise bulanık denetleyici kontrollü dönüştürücünün çıkış ve hata/hata değişimleri gözlenmektedir. Dikkat edilirse çıkış genliği istenen aralıkta değişmekte ve iyi bir kontrol gerçekleştirilmektedir.



Şekil 5.27.  $C=100\mu\text{F}$  için  $I_c$  akımı ve  $V_c$  gerilimi



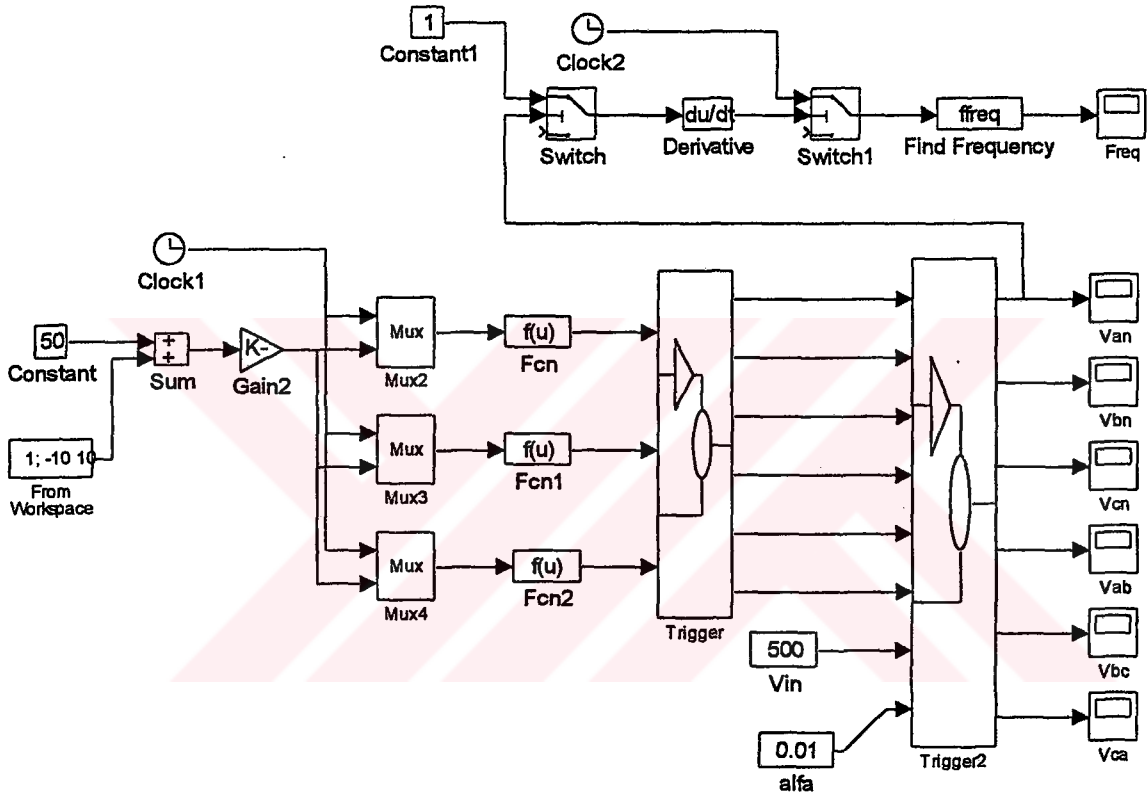
Şekil 5.28.  $C=1000\mu\text{F}$  için  $I_c$  akımı ve  $V_c$  gerilimi

Şekil 5.27 ve 5.28'de kapasitif bir yükte sistemin akım ve gerilim çıkış eğrileri görülmektedir.

Daha düşük oranda hata aralığı için bulanık denetleyici girişlerindeki üyelik fonksiyon sayısı arttırılmalı ve fonksiyonların aralıkları uygun şekilde değiştirilmelidir. Bunun için yapay sinir ağları kullanılarak üyelik fonksiyon sınırları düzenlenebilir (Ullah et al.,1995).

### 5.3.2. EVİRİCİNİN BENZETİMİ

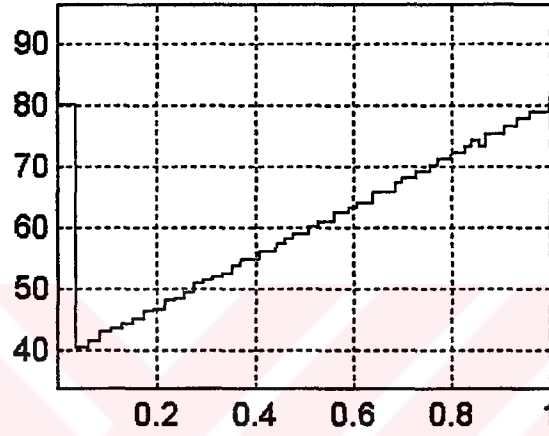
Sistemin evirici kısmının modellenmesi daha kolay gerçekleştirilmiştir. Doğru akım olarak sisteme gelen giriş, darbe uzunlukları ayarlanabilen 6 çıkışlı bir tetikleyici ile 6 kutuplu tristör anahtarlarının istenilen hızda ve istenilen açıda tetiklenebilmesi sağlanabilmektedir. Dolayısı ile eviricinin modeli aşağıdaki şekildedir.



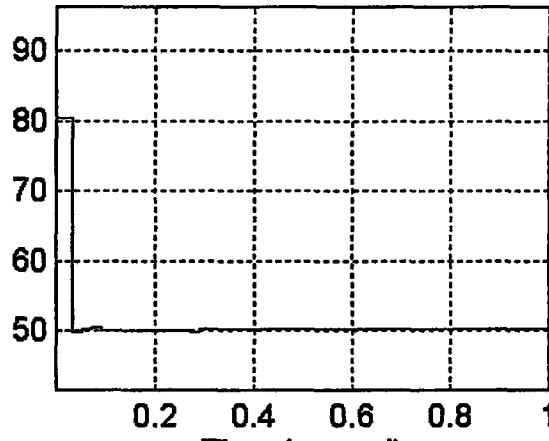
Şekil 5.29. Evirici Modeli

Geleneksel yöntemlerdeki gibi eviricinin kontrolü için darbe genişliği modülasyonuna tristör tetiklemeleri yapılmamaktadır (Holtz, 1994).. Dikkat edilirse sistem girişine 50 Hz periyodik bir üç fazlı sinüzoidal dalga verilmektedir ve bir başka giriş değeriyle toplama yapılarak frekansla değiştirilmektedir Bu yapı dönüştürücüde kullanılan kesişim noktaları yakalama işini görerek tristör gruplarına tetikleme darbeleri üreten

tetikleme (trigger) ünitesine gelmektedir. Buradan üretilen tetikleme darbeleri giriş genliği değiştirilebilen ve söndürme açısı alfa değeri ayarlanabilen tristör devre bloğuna gelmektedir. Elde edilen a,b,c fazlarının 'nötr' ucuna göre ve  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ ,  $V_{ca}$  fazlararası gerilimler olarak osiloskoplardan görülmektedir. Üç fazlı çıkış  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$ ,  $V_{cn}$  gerilimleri frekans kontrolü için sıfır geçişlerini yakalayarak "findfrequency" adlı bloğa gelerek frekansı bulunmaktadır. Bunun amacı sistemde oluşabilecek hataların en aza indirebilmek için çıkış frekanslarının gözlenmesidir.

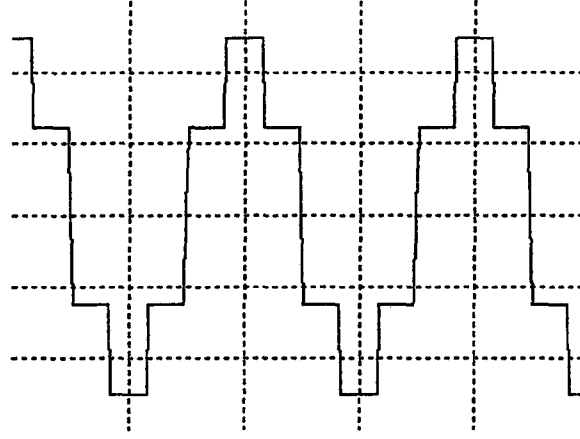


Şekil 5.30. Eviricinin giriş frekansının değişmesiyle çıkış frekans değişimini gösteren çıkış grafiği. (frekans(Hz)/s)

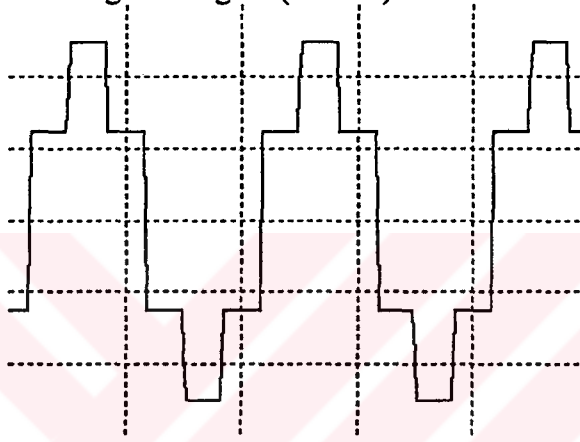


Şekil 5.31. Sabit frekans girişi için çıkış frekans değişimi. (frekans(Hz)/s)

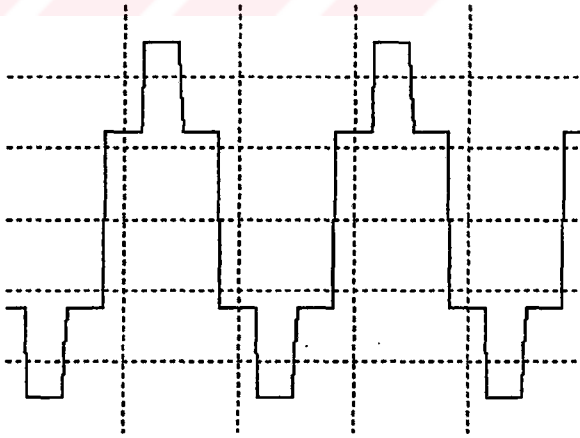




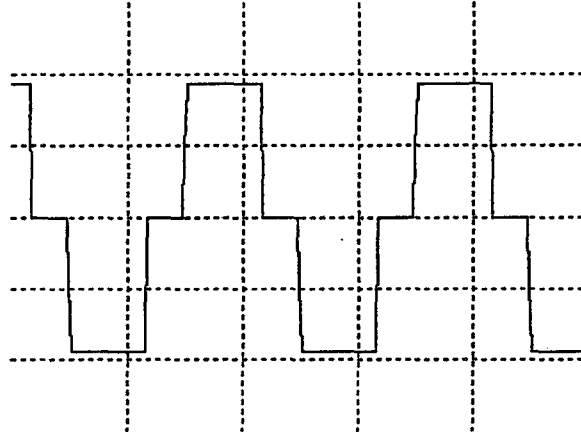
Şekil 5.32. Van A fazı-nötr gerilim eğrisi (Volt/sn)



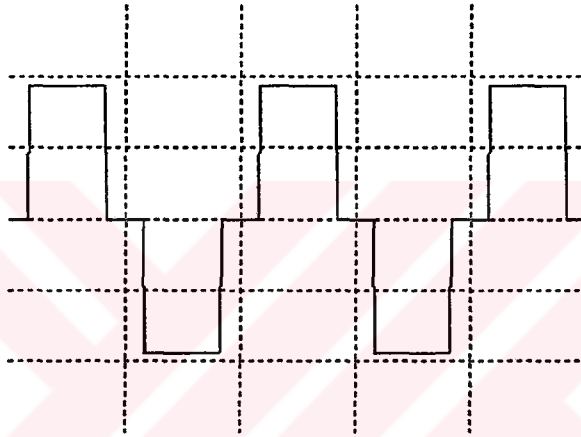
Şekil 5.33. Van B fazı-nötr gerilim eğrisi (Volt/sn)



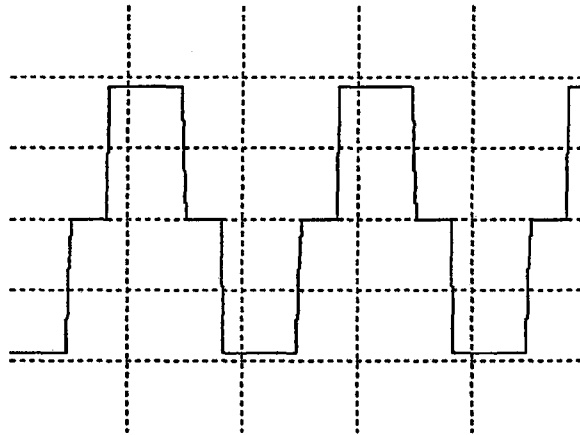
Şekil 5.34. Van C fazı-nötr gerilim eğrisi (Volt/sn)



Şekil 5.35. Vab Afazı-Bfazı gerilim eğrisi (Volt/sn)



Şekil 5.36. Vbc Bfazı-Cfazı gerilim eğrisi (Volt/sn)



Şekil 5.37. Vca Cfazı-Afazı gerilim eğrisi (Volt/sn)

Yukarıda görülen faz-nötr ve faz faz gerilim eğrileri tipik bir evirici çıkışını göstermektedir. Sistemin kontrolünüm kolaylığı nedeniyle kontrol yöntemlerinin uygulanmasına gerek duyulmamış sadece sistemin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Ancak giriş genliğinde oluşabilecek dalgalanmalar nedeniyle çıkışta istenmeyen durumların oluşmaması için genlik sınırlandırıcı bir eleman faz çıkışlarına eklenebilir.

Üst ve alt gerilim sınırlayıcı elemanı tepe genliklerini kırarak çıkışta oluşabilecek aşırı genlikleri kaldıracaktır. Bunun haricinde frekans değişimiyle orantılı olarak söndürme açılarının da sabitlenmesi için frekans ile açı arasında oranlama yapılarak periyoda uygun alfa söndürme açısı hesaplanabilir. Ancak bunlar görüldüğü gibi oldukça kolay yapılabilen işlemlerdir.



## BÖLÜM 6. AA VE DA SİSTEM HATALARI

HVDC enerji iletim hattının işletimi, AA hat, dönüştürücüler ve AA sistemde meydana gelen hatalardan etkilenir. Bu hataların etkileri dönüştürücülerin kontrollerine kadar etkir. AA sistemlerde hataları önlemek ve denetlemek için röleler ve devre kesiciler kullanılır. DA sistemdeki arızalar ise kendi kendine veya dönüştürücü kontrolleriyle giderilir. Dönüştürücü kontrolleri AA sistemde olduğu kadar DA sistemde de meydana gelebilecek hataları gidermede önemli bir rol oynar. Ancak bazı durumlarda tüm sistemi devre dışı bırakmak gerekebilir.

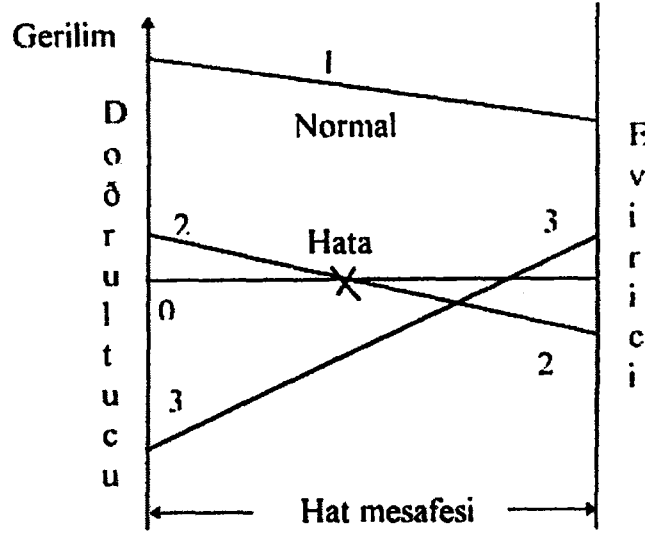
### 6.1 DA Hattı Hataları

DA hattında görülen hataların birçoğu kutup-toprak hatalarıdır. Kutup arızası iki kutbun fiziksel olarak birbirine dokunmasını gerektirdiğinden pek sık görülmez. Yıldırım düşmesi hiçbir zaman hataya neden olmaz. Bir kutup-toprak arızası, arızanın meydana geldiği kutuptaki güç tristörleri ile bloke edilir. Böylece diğer kutuplar bundan etkilenmez. Aşağıda anlatılacağı gibi AA sisteme bağlı olarak DA hatta meydana gelen arızalar, AA sistem hataları kadar bozucu değildir.

### 6.2 Normal Kontrol İşleminin Davranışı

Herhangi bir kısa devre, doğrultucu akımının artmasına ve evirici akımının da azalmasına neden olur. Doğrultucunun akım kontrolü, doğru gerilimi azaltmak ister ve akımı normalde ayarlanan değerine ( $I_{ord}$ ) geri çeker. Eviricide ise akım, akım kontrollü referans değerinin altına düşer ( $I_{ord} - I_m$ ). Sonuçta eviricinin işletim modu CEA' dan CC kontrolüne döner. Bu olay evirici geriliminin sıfıra düşmesine ve böylece şekil 5.1'de görüldüğü gibi ters polariteye neden olur. Gerilimler, her bir dönüştürücüden arızalı hatta kadar olan hat üzerinde I.R gerilim değerine eşittir.

Doğrultucu akımı  $I_{ord}$  ve evirici akımı da  $I_{ord} - I_m$  değerine eşittir. Kararlı hal arıza akımı böylece normal akımın %15'i kadar olan  $I_m$  akım sınırına eşittir.



Şekil 6.1. DA hattı gerilim profili (1) Normal işletim (2). DA hat arızası ve normal kontrol (3). Hızlı hat korumalı

### 6.3 Hızlı Değişim Etkilerinden Hattın Korunması

Dönüştürücülerdeki normal kontrol işlemi, hata akımını  $I_m$  ile sınırlarken arıza esnasında ark oluşmasını engelleyemez. Bu nedenle arıza akımını azaltmak ve gerilimi sıfıra indirmek için ek kontroller yapılır.

Arıza genelde doğrultucudaki DA gerilimin düşmesi ve eviricideki akımının azalması ile tespit edilir. Bu tespit esnasında gerilimin genliği ile birlikte, gerilimde meydana gelen frekans değişimleri, açı farklılıkları gibi değişmelerde kullanılabilir. Ancak DA hattın uzağında AA sistemde meydana gelen arızalar, gerilim üzerinde çok hızlı değişimler oluşturmazlar. Dolayısıyla bu tür arızalar hatanın geç fark edilmesi ve sistemin arızaya anında cevap veremeyip zarar görmesi gibi durumlar ortaya çıkarabilir.

Arızayı gidermek için evirici aynı modda, doğrultucu da evirici modunda çalıştırılır. Terminal gerilimlerini doğru polaritede tutmak için eviricinin  $\beta$  açısı yaklaşık  $80^\circ$

civarında maksimum limite ve doğrultucunun tetikleme açısı  $\alpha$ 'da  $90^\circ$  ileriye kaydırılır (yaklaşık  $140^\circ$  olur). Kutuptaki akım ters yöne dönmek ister. Ancak tristörlerin tek yönlü akım karakteristiğinden dolayı ters yöne dönemez. Bu nedenle akım hızla sıfıra düşer (10ms ). Gerilim profili şekil 6.1'deki 3. eğri ile verilmektedir.

DA hatlar ark etrafındaki havanın dağılmasından sonra tekrar çalıştırılır(60-200 ms içinde). Eğer arıza geçici ise ve yeniden çalıştırma başarılı ise gerilim ve akım rampa şeklinde arttırılır. Tipik olarak arızanın giderilmesi ve nominal güç transferine ulaşmak için 200-300 ms arasında bir süre gerekir. Bu süre zayıf AA sistemlere bağlı DA sistemlerde daha fazladır.

#### **6.4. Dönüştürücü Hataları**

Dönüştürücü istasyonlarındaki birçok arıza tristör gruplarının ya da kutbun kapatılmasını gerektirir ki bu da sistemin devre dışı kalmasıdır (Bausiere et al.,1993).

Bir tristör grubu arızası, küçük bir hata değilse tüm kutbu etkiler. Böyle bir durumda akımın hızla sıfıra inmesi istenir. Doğrultucunun tetikleme açısı en az  $90^\circ$  kaydırılır ve evirici bölgesine geçirilir. Kutup akımı da 30 ms içinde sıfıra iner. Ardından tristör grubunda izolatör arızası meydana gelmişse giderilir ve sistem devreye alınır.

#### **6.5 AA Sistem Arızaları**

AA sistemdeki geçici dış etkilere karşı DA sisteminin cevap süresi genelde AA sistemine göre daha hızlıdır. Komütasyon hataları ve AA sistem hatalarının giderilmesi ise DA sisteminin en önemli özelliklerinden biridir.

### 6.5.1 Doğrultucu Tarafı AA Sistem Arızaları

Doğrultucudan uzakta meydana gelen üç fazlı sistem arızalarında, doğrultucu komütasyon gerilimi biraz düşer. Bu da doğru gerilimin ve akımın düşmesi demektir. Akım regülatörü, gerilimi artırarak akımı düzeltmek için  $\alpha$ 'yı azaltır. Eğer  $\alpha$ ,  $\alpha_{\min}$  değerine kadar düşerse, doğrultucu CIA kontrol moduna geçirilir. Teoride, DA güç oldukça düşük doğru geriliminde iletilebilir. Ancak bu olay eviricinin  $\beta$ 'yı arttırıp gerilimi düşürmesiyle akım kontrolünü gerektirecektir.

Uzak tek faz ve faz-faz arızaları genelde DA hattın kapatılmasına neden olmazlar. Çünkü AA gerilimin ortalaması üç faz arızası durumundaki değerinden daha fazladır.

Dengesiz arızalar için, DA gerilimdeki harmonik dalgalanması normalden daha fazla olabilir. Bu DA üzerinde oldukça büyük ikinci Harmonik bileşenli dalgalanmalara neden olur. Harmoniklerin normal karakteristiklerini düzeltmek için tasarlanan hat reaktörleri ve filtreler, ikinci harmonik bileşenleri için etkili değildir. Yüksek akım dalgalanması ise akımın sönmesine sebep olur. Kullanılan tristör tetikleme sistemi tipine bağlı olarak, bu işlem hattın kapatılmasını gerektirebilir.

### 6.5.2 Evirici Tarafı AA Sistem Arızaları

Eviricide küçük gerilim çökmeleriyle sonuçlanan uzak üç faz hataları, doğru akımda artmaya neden olur. Ancak doğrultucu akım kontrolü ve evirici sabit söndürme açısı kontrolleri devreye girerek değişimlere cevap verir. Eğer gerilim düşmesi oldukça yüksek ise, komütasyon geriliminde azalma ve eviricide de geçici bir komütasyon hatasına neden olur.  $18^{\circ}$ 'lik  $\gamma$  evirici işletimi ile, komütasyon hatasına neden olacak %10-15'lik bir gerilim düşmesi olacaktır. Komütasyon hatasının düzeltilmesi 1 veya 2 periyot alır. Reaktif güçte artma sonucu doğru akımda da azalma görülür.

Hata giderildiğinde müsaade edilen değişim oranları AA sisteminin gücüne bağlı olarak tekrar belirlenir. Kontroller istenen güç oranını sağlamak için yeniden

ayarlanır. Bozulma sonrası tüm güç sisteminin başarımı aşağıda da açıklanacağı gibi AA/DA sisteminin başarımına bağlıdır.

### **6.5.3 AA Sistem Arızalarının Giderilmesi**

AA sistem hataları için hata sonrası sistem performansı, DA sistem hatalarına göre sistem parametrelerine bağlı olarak daha hassastır. AA hatası sonrası DA hattaki düzelme, AA sisteme göre daha kolay ve hızlıdır. Zayıf AA sistemler, DA hattaki arızanın hızlı düzeltilmesi için yeterli gücü sağlamada zorluk çıkartırlar. Bu tür sistemler geçici yüksek aşırı gerilimler ve gerilim distorsiyonu oluştururlar.

DA sisteminin hata öncesi durumunun %90'ına kadar düzelmesi için geçen süre, kullanılan kontrol sistemi ve AA/DA sistem karakteristiğine bağlı olarak yaklaşık 100-500 ms arasındadır. Bu süreyi etkileyen faktörler; hat endüktansı ve kapasitesi, DA reaktör ölçüleri, hattın rezonans harmonik frekansı, dönüştürücü trafo ve filtresi karakteristikleridir.

DA sisteminin tatmin edici bir şekilde çalışması için, kontrol işlemi rampa fonksiyonları şeklinde veya azaltılmış akım kademeleri şeklinde yapılır.

GBAKS fonksiyonu arızadan sonra sistemin düzeltilmesi için önemli bir rol oynar. Bu fonksiyon akımı ya DA gerilim ya da AA gerilim cinsinden sınırlar. Sonuçta bastırılmış gerilimde reaktif güç ihtiyacı azaltılır. Bu da AA sistem geriliminin azalmasını önler. AA sistem kararlılığı ve DA güç kesintisinin azaltılması bakımından, çok yavaş bir iyileşme istenmeyen bir durumdur. Kontrol sistemi, DA sistemin güvenli bir şekilde iyileşmesini engellemeden, iyileşme oranını yükseltmek için uygulamanın özel ihtiyaçlarını giderecek biçimde tasarlanmalıdır.



#### 6.5.4 İyileşmeye Yardım Eden Özel Ölçümler

HVDC sisteminin dış bozulmalardan sonra iyileşmesine yardım etmek ve tristörleri korumak için özel ölçümler yapılabilir. Bu ölçümler ya direk tetikleme açısını ya da akım kademesini etkiler. Bunlar özel uygulama gereksinimlerine bağlıdır. Bunlardan bazıları:

1. AA gerilim düşümü sırasında,  $\alpha_{\min}$  değerini  $5^{\circ}$ 'den  $30^{\circ}$ 'ye kadar çıkaran devreler.
2. Eviricide  $\gamma$  değerini  $\gamma_{\min}$  sınırının altına geçici olarak düşüren devreler.
3. Komütasyon hatalarını önlemek için, kutudaki ikinci tristör grubunun ilk çalıştırılması sırasında tetikleme açısı sınırını  $10^{\circ}$  kadar değiştiren devreler.
4. İyileşmeye yardımcı olmak ve komütasyon hatalarını azaltmak için ikinci tristör daha erken ateşlenmesin diye, komütasyon hatası sonrasında  $\beta$ 'nin hemen artırılmasını sağlayan devrelerdir. Tipik olarak  $\beta$ ,  $40^{\circ}$  -  $60^{\circ}$  arasında değiştirilip maksimum  $70^{\circ}$ 'ye çıkarılabilir.

#### 6.6 AA/DA Sisteminin AA Sistem Üzerindeki Etkileri

Bu etkiler daha çok DA sisteminin kapasitesine ve AA sisteminin dayanıklılığına bağlıdır. Bir AA sistem iki nedenden dolayı dayanıksız ya da zayıf olarak adlandırılabilir:

1. Yüksek empedans
2. AA sistemdeki mekanik aksamın uzunluğu

AA sisteminin dayanıklılığı kısa devre oranı (KDO) ile adlandırılır. KDO değeri;

$$\text{KDO} = \frac{\text{AA sisteminin kısa devre gücü, MVA}}{\text{DA dönüştürücünün çalışma gücü, MW}} \quad (6.1)$$

şeklinde ifade edilir. Kısa devre anındaki güç KDMVA ise,

$$KDMVA = \frac{E_{ac}^2}{Z_{th}} \quad (6.2)$$

şeklinde yazılır.

Burada,  $E_{ac}^2$  DA güçteki komütasyon hat gerilimi ve  $Z_{th}$  AA sisteminin Thevenin eşdeğeridir. KDO değerini değiştiren elemanlar arasında, tristörleri, filtreleri, şönt kapasitörleri ve senkron kondansatörleri sayabiliriz. Kontrol sisteminin bütünü de AA/DA etkileşiminde önemli bir rol oynar.

AA sistem dayanıklılığı genel olarak;

Eğer KDO, 5'ten büyükse yüksek,

Eğer KDO, 3-5 arasında ise orta,

Eğer KDO, 3'ten küçük ise düşük olarak ifade edilebilir.

### 6.6.1 Reaktif Güç ve AA Sistem Dayanıklılığı

Doğru gerilimin değeri ( $V_d$ ),

$$V_d = V_{do} \cos\alpha - R_c I_d$$

olarak verilmişti.  $R_c$  değeri ise ,  $R_c = 3/\pi \cdot X_c$  şeklinde ifade edilirse,

$$\cos\phi = \cos\alpha - \frac{I_d}{V_{do}} \frac{3}{\pi} X_c \quad (6.3)$$

yazılabilir.

Buradan her bir dönüştürücüden alınan güç arttıkça reaktif gücünde artacağı görülebilir. Yüksek reaktif güç akışını önlemek için  $\gamma$  15 ve 18<sup>0</sup>'de ve de komütasyon reaktansı da %15 fazlalıkla çalıştırılmalıdır.

Reaktif güç sağlamanın en kolay yollarından biri de şönt kapasitörler kullanmaktır. İletilen DA güce birlikte reaktif güçte değiştiğinden, anahtarlanarak devreye sokulan filtre kapasitörleri de uygun büyüklüklerde seçilmelidir. Böylece kararlı durumdaki AA gerilimi her yükte kabul edilebilir bir aralıkta tutulabilir. AA gerilimin değişme oranı yaklaşık  $\pm\%5$ 'tir.

Generatörler DA terminaline yakın olurlarsa reaktif güç ihtiyacının karşılanmasında ve istenen gerilimin ayarlanmasında yardımcı olabilirler. Zayıf AA şebekelerde statik VAR kompanzatörler ve senkron kondansatörlere de ihtiyaç duyulabilir.

## 6.6.2 Düşük KDO Sistemleri İle İlgili Sorunlar

Zayıf AA sisteme bağlı DA sistemlerde oluşabilecek problemleri genelde dört grupta toplayabiliriz.

1. Yüksek dinamikteki aşırı gerilimler
2. Kararlı olmayan gerilimler
3. Harmonik problemleri
4. Gerilim dalgalanması

### 6.6.2.1 Yüksek Dinamikteki Aşırı Gerilimler

Eğer DA güç iletiminde süreklilik yoksa, HVDC dönüştürücülerinin uçlarındaki gerilim sıfıra düşebilir. Zayıf KDO oranına sahip sistemlerde şönt kapasitörler ve harmonik filtreler nedeniyle AA'daki gerilim artışı çok yüksek olabilir. Bu terminaller de yüksek izolasyon direncini gerektirir.

### 5.6.2.2 Kararlı Olmayan Gerilimler

DA sistem zayıf AA sisteme bağlandığında, özellikle evirici tarafında, AA ve DA gerilimi yük değişimlerine çok duyarlı olur. DA'daki bir artış, AA gerilimde düşmeye sebep olur. Sonuçta güçteki artış çok küçük veya önemsizdir. Gerilimin kontrolü zorlaşır.

Bu gibi istemlerde DA sistemin kontrolü, gerilimin kararlılığına aşağıdaki gibi etki eder:

1. Gücün kontrolü, güç düzenlemesi için DA kontrolünü gerektirir.
2. Evirici  $\gamma$  açısı gerilim-zaman komütasyon sınırını korumak için artar.
3. Evirici, düşen gerilim ve şönt kapasitörlere bağlı olarak daha fazla VARs çeker, verimi de azalır.
4. AA gerilimi azalır.

### 6.6.2.3 Harmonik Rezonansı

Harmonik rezonansı ile ilgili problemlerin çoğu AA kapasitörler, filtreler ve düşük harmonikteki AA sistem arasındaki paralel rezonanstan kaynaklanır. Ancak devreye çok fazla kapasitör sokulursa 2., 3. Ve 4. harmoniklerde oluşabilir.

### 6.6.2.4 Gerilim Dalgalanması

Zayıf AA sistemlerin başka bir özelliği de, şönt kapasitör ve reaktörlerdeki anahtarlamanın beklenmedik çok yüksek gerilim değişimlerine sebep olmasıdır. Geçici gerilim dalgalanmaları, reaktif elemanlar arasındaki anahtarlamalardan oluştuğundan yüksek güç iletiminde artar.

### 6.6.3 Zayıf Sistemlere İlişkin Sorunların Çözümleri

Genelde bu sorunlar senkron kondansatör veya SVC'ler ile çözülür. Ayrıca HVDC kontrolleri de bu sorunların çözümlerinde kullanılır (Örneğin GBAKS).

Senkron kondansatörlerin kullanılması efektif sistemin empedansını azaltır ve rezonans frekansını yükseltir. Çünkü sistemin kontrolü, yüksek frekanslarda daha az sorun çıkarır. 12 vuruşlu köprü doğrultucu kullanılırsa 11. harmonikten aşağıda filtre olması olasılığı azalacaktır.

Başka bir çözümde, DA dönüştürücülerini kontrol etmektir. Şönt kapasitörler ve filtreler reaktif gücü karşılarlar. Dönüştürücü tetikleme açısının kontrolü de AA gerilimini düzenler.



## **BÖLÜM 7. DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE HVDC ENERJİ İLETİM SİSTEMİNİN UYGULANMASI**

Bu bölümde HVDC sisteminin dünya üzerindeki uygulamalarına kısaca göz atılmış ve halen kullanılmakta olan HVDC sistemlerinin yerleri ve önemli özellikleri, niçin tercih edildikleri gibi bilgiler tablo halinde verilmiştir. Durum Türkiye açısından da kısaca incelenmiş ve bu güne kadar niçin uygulanmadığı konusunda kısa bir araştırma yapılmış ve bundan sonra nelerin yapılabileceği üzerinde de durulmuştur.

### **7.1 HVDC Enerji İletim Sisteminin Dünyadaki Uygulamaları**

HVDC sisteminin şu anda dünyada otuz beş uygulaması bulunuyor. Proje aşamasındaki iki uygulamanın da 1997 yılında devreye girmesi bekleniyor. Dünya üzerindeki ilk uygulaması 1954 yılında Gotland'ta yapılmıştır. 20 MW gücündeki bu sistemin DA hat gerilimi 100 kV'tur. Her bir dönüştürücü istasyonu iki kutuplu yapılmıştır ve bunların her biri de 50'şer kV'tur. DA hat akımı 200 A olup, 96 km'lik hat tek kutuplu ve toprak dönüşlü yapılmıştır. Sabit frekansla işletilen bu hattın yapımçı firması ABD'dir.

Daha sonraki yıllarda taşınan güç artışındaki miktarlar gittikçe büyümüş ve 1990 - 1992 yılları arasında Quebec - New England ( ABD ) arasında yapılan HVDC hattında 2000 MW'a ulaşılmıştır. İki kutuplu olarak yapılan bu hat  $\pm 450$  kV'tur. Her istasyonda iki dönüştürücüsü bulunan bu sistemde dönüştürücü başına gerilim 450 kV'tur ve iletilen DA akım 2200 A'dir. Reaktif güç kaynağı olarak kapasitörlerin kullanıldığı sistemin AA gerilimi 315 kV'tur. 1480 km'lik DA hatta güç ve frekans kontrolü otomatik yapılmaktadır.

1997 yılında yine ABB tarafından yapılması planlanan biri Chandrapur - Padghe (Hindistan) arasında 1500 MW,  $\pm 500$  kV, 1500 A'lik, diğeri de Leyte - Luzon (Yeni

Zelanda) arasında 440 MW'lık 350 kV'luk ve 1260 A'lik ve 433 km'lik iki hat daha vardır.



Tablo 7.1. Dünya üzerindeki HVDC Sistemlerinin dağılımı

DÜNYA ÜZERİNDEKİ HVDC SİSTEMLERİNİN DAĞILIMLARI

BULUNDUĞU YER	GOTLAND I	İNGİLİZ KANALI	YENİ ZELANDA	KONTI-SKAN I	ŞAKILMA	SARDİNIA	VANCOLVER ADASI
Yapım Yılı	1954	1961	1965	1965	1965	1967	1968-1969
İstiflenen Güç, MW	20	160	600	250	300	200	312
Doğru Ger. kV	100	± 100	± 250	250	2x125	200	260
İki. Dön. Sayısı	2	2	4	2	2+2	2	2
Dönüştürücü Başına D.G., kV	50	100	125	125	125	100	130
DA, A	200	800	1200	1000	1200	1000	1200
Reaktif Güç Kıymetleri	Kapasiteler Senkron Kondan.	Kapasiteler	Kapasiteler Senkron Kondan.	Kapasiteler Senkron Kondan.	Kapasiteler AA Sığiremi	Kapasiteler Senkron Kondan.	Kapasiteler Senkron Kondan.
İstasyonların Yerl. AA Cezirlikleri	Västervik, 150 kV Västby, 30 kV	Lydd, 275 kV Echingen, 225 kV	Bennore, 16 kV Haywards, 110 kV	Gelienburg, 130 kV Aalborg, 150 kV	Sakuma, 275 kV	Codrongianos, 230 kV San Dalmasio, 220 kV	Armut, 230 kV V.I.T., 230 kV
Hareli DA Her Uzunluğu, km Kablo Sayısı	-	-	575 km	86 km	-	290 km	41 km
Kablo Uzunluğu DA Devrenin Topraklanması	1. Toprak Geri Dönüşü 96 km İki deniz elektrot istasyonu	Her kutupla 1 Her kutupla 1 Bir istasyonda orta nokta	Her kutupla 1 Yedek 1 Bir Toprak ve bir deniz elektrot istasyonu	1. Toprak Geri Dönüşü 87 km İki deniz elektrot istasyonu	Nöktü Topraklanıp	2 Paralel Toprak G. Dön. 116 km İki deniz elektrot istasyonu	1-3. Toprak Geri Dönüşü 28 km İki deniz elektrot istasyonu
AC Şebeke Bağlantıları Kontrol	Asenkron Sabit Frekans	Asenkron	Asenkron	Asenkron	50 - 60 Hz	Asenkron	a) Senkron b) Asenkron
Güç Akışının Açılı Değişimi HVDC Sisteminin Tercih Nedeni	Sabit Frekans	Her yönde sabit güç	Her yönde sabit güç	Her yönde sabit güç	Her yönde sabit güç	Sabit güç ve sabit frekans	a) AA hat göre akım kon b) Frekans kon c) Sabit akım kon
Dönüştürücü Ekipman Üreticisi	ABB	ABB	ABB	ABB	ABB	ABB, Ingelherc Elektrik	ABB



Tablo 7.1. (Devamı) Dünya üzerindeki HVDC Sistemlerinin dağılımı

BULUNDUĞU YER	ITAPU	GOTLAND 2	DÜRNROHR	PASİFİK İNTERTIE 2	CHATEAUGUAY	İNTER-MOUNTAIN	HIGHGATE
Yapım Yılı	1984-1985/1987	1983	1983	1985	1984	1986	1985
İletilen Güç, MW	3150+3150	130	550	(1600)+400	2x500	1920	200
Doğru Ger. kV	±600	150	145	±500	2x140.6	±500	57
İst. Dön. Sayısı	4+4	1	2	(6)+2	4	2	2
Dönüştürücü	300	150	145	100	140.6	500	57
Başına D.G., kV	2610	914	3790	2000	2x3600	1920	3600
DA, A	Kapasiteler	Kapasiteler	Kapasiteler	Kapasiteler	Kapasiteler ve SVC	Kapasiteler	Kapasiteler
Reaktif Güç Kaynağı	Senkron Kondan.	Senkron Kondan.					
İstasyonları Yeri, AA Gerilimleri	Foz do Iguaçu. 500 kV, Sao Roque. 345	Vastervik. 130 kV, Visby. 70 kV	Dürrohr. 420 kV, CSSR. 420 kV	Celilio. 230kV, Şylmar. 230 kV	Santral. 315 kV, U.S. 120 kV	Intermountain, 345 Adelanto 500	Highgate North 120 kV, South, 115kV
Havai DA Hat Uzunluğu, km	785 ve 805 km	7 km	-	1360 km	-	785 km	-
Kablo Sayısı	-	1, Toprak Geri Dönüşü	-	-	-	-	-
Kablo Uzunluğu	-	96 km	-	-	-	-	-
DA Devrenin Topraklaması	Her kutup için iki toprak elektrot istasyonu	İki deniz elektrot istasyonu	Bir nokta topraklaması	Bir deniz ve bir toprak elektrot istasyonu	Bir nokta topraklaması	İki Toprak elektrot istasyonu	Bir nokta topraklaması
AC Şebeke Bağlantıları	Foz do Iguaçu 50Hz, Sao Roque 60 Hz	Senkron	Senkron	Senkron	Senkron	Senkron	Senkron
Kontrol	Sabit güç ve sönüm kontrolü	Sabit Frekans	Her yönde sabit güç	Her yönde sabit güç ve küçük sinyal modülasyonu	Sabit güç	Sabit güç ve sönüm kontrolü	Her yönde sabit güç
Güç Akışının Acil Değişimi	-	-	-	Manuel veya otomatik	-	-	AA işaretin tetiklenmesiyle otomatik güç
HVDC Sisteminin Tercih Nedeni	Uzun mesafe 50/60 Hz çevrimi	Uzun deniz geçişi	Senkron bağlantı	Uzun mesafe Hızlı kontrol	Senkron bağlantı	Uzun mesafe	Senkron bağlantı
Dönüştürücü Ekipmanlarının Üreticisi	ABB	ABB	ABB-Siemens-AEG	ABB	ABB - Siemens	ABB	ABB

Tablo 7.1. (Devamı) Dünya üzerindeki HVDC Sistemlerinin dağılımı

BULUNDUĞU YER	PASİFİK İNTERTIE	GOTLAND	SKÄGERRAK	CAHORA-BASSA	INGA-SHABA	CU-PROJESİ	NELSON RIVER
Yapım Yılı	1970	1970	1976-1977	1977-1979	1982	1978	1978/1985
İletilen Güç, MW	1440	(20)+10	500	1930	560	1000	2000
Doğru Ger. kV	± 400	(100)+50	± 250	± 533	±500	±400	±500
İst. Dön. Sayısı	6	(2)+1	2	8	2	2	4
Dönüştürücü Başına D.G., kV	133	50	250	133	500	400	250
DA, A	1800	200	1000	1800	560	1250	2000
Reaktif Güç Kaynağı	Kapasiteler	Kapasiteler Senkron Kondan.	Kapasiteler Senkron Kondan.	Kapasiteler	Kapasiteler Senkron Kondan.	Kapasiteler Güç Generatörü	Kapasiteler
İstasyonları Yeri, A.A. Gerilimleri	Cellilo, 230 kV	Västervik, 130 kV	Kristiansand, 275 kV	Songo, 220kV	Inga, 220 kV	Coal Creek, 235	Henday, 230kV
Havai DA Hat Uzunluğu, km	1360 km	Visby, 70 kV	kV Tjelle, 150 kV	Apollo, 275kV	Kohvezi, 220 kV	Dickinson, 350 kV	Dorsey, 230kV
Kablo Sayısı	-	-	113 km	1420 km	1700 km	687 km	940 km
Kablo Uzunluğu	-	1, Toprak Geri Dönüştür	Her kumpda 1	-	-	-	-
DA Devrenin Topraklanması	Bir Toprak ve bir deniz elektrot istasyonu	96 km	127 km	İki Toprak elektrot istasyonu	İki Toprak elektrot istasyonu	İki Toprak elektrot istasyonu	İki elektrot istasyonu
AC Şebeke Bağlantıları Kontrol	Senkron	Asenkron	Asenkron	Asenkron	Asenkron	Senkron	Asenkron
Güç Akışının Acil Değişimi	Her yönde sabit güç ve küçük sinyal modülasyonu	Sabit Frekans	Her yönde sabit güç	Sabit güç	Sabit güç ve sabit frekans	Sabit güç ve sönüm kontrollü	Sabit güç
HVDC Sisteminin Tercih Nedeni	Manuel veya otomatik	-	Manuel veya otomatik	-	-	-	-
Dönüştürücü Ekipmanlarının Üreticisi	Uzun mesafe Hızlı kontrol ABB ve General Elektrik	Uzun deniz geçişi frekans kontrolü ABB	Deniz geçişi ABB	Uzun mesafe ABB - Siemens - AEG	Uzun mesafe ABB - GE	Mesafe, çevre ve kararlılık etkileri ABB	Uzun mesafe ABB - Siemens - AEG

Tablo 7.1. (Devamı) Dünya üzerindeki HVDC Sistemlerinin dağılımı

BULUNDUĞU YER	BLACKWATER	VINDHYACHAL	BROKEN HILL	GOTLAND 3	RIJHEND-DELHI	KONTI-SKAN	QUEBEC-NEW ENGLAND
Yapım Yılı	1985	1989	1986	1987	1990	1988	1990-1992
İletilen Güç, MW	200	2x250	40	130	1568	300	2000(Multiterm.)
Doğru Ger. kV	56.8	70	8.3	150	±500	285	±450
İst. Dön. Sayısı	2	2+2	2	1	2	1	2
Dönüştürücü Başına D.C., kV	56.8	70	8.3	150	500	285	±50
DA, A	3600	3600	2400	914	1568	1050	2200
Reaktif Güç Kaynağı	Kapasiteler	Kapasiteler	Kapasiteler Senkron Kondan.	Kapasiteler Senkron Kondan.	Kapasiteler	Kapasiteler	Kapasiteler
İstasyonları Yeri, AA Gerilimleri	New Mexico, 345 Texas 230 kV	Northern, 400 kV Western, 400 kV	22 kV 6.9 kV	Vasrevik, 130kV Visby, 70 kV	Rihand, 400 kV Dadri, 400 kV	Lindome, 130 kV Vester Hassing, 500 kV	Radisson, 315 Sandy Pond, 345 Nicolet, 230 kV
Haval DA Hat Uzunluğu, km	-	-	-	7 km	814 km	61 km	1480 km
Kablo Sayısı	-	-	-	1	-	1	-
Kablo Uzunluğu	-	96 km	-	96 km	-	88 km	-
DA Devrenin Topraklaması	Bir nokta topraklaması	Bir nokta topraklaması	Orta nokta topraklaması	İki deniz elektrot istasyonu	İki toprak elektrot istasyonu	İki deniz elektrot istasyonu	Bütün istasyonlar üç elektrot ist. ile topraklı
AC Şebeke Bağlantıları	Asenkron	Asenkron	Asenkron	Asenkron	Senkron	Asenkron	HQ Senkron NEH Asenkron
Kontrol	Sabit güç ve Reaktif güç kontrolü	Sabit güç ve hızlı kontrol	40 Hz sabit frekans	Gotland'ta sabit frekans	Sabit güç, hızlı kontrol	Her yönde sabit güç	Sabit güç, frekans kontrolü ve çoklu terminal
Güç Akışının Acil Değişimi	-	AA işaretin tetiklenmesiyle otomatik güç	-	-	Manuel veya otomatik	Manuel veya otomatik	Şiddetli AA sistem parazitlerinden Radisson'un yalıt
HVDC Sisteminin Tercih Nedeni	Asenkron bağlantı	Asenkron bağlantı	Frekans kontrolü	Uzun deniz geçişi	Uzun mesafe, parazitlik	Deniz geçişi Asenkron bağlantı	Asenkron bağlantı
Dönüştürücü Ekipmanlarının Üreticisi	ABB	ABB	ABB	ABB	Airiz - BHEL	ABB	ABB

Tablo 7.1. (Devamı) Dünya üzerindeki HVDC Sistemlerinin dağılımı

BULUNDUĞU YER	FENNO-SKAN	PASİFİK INTERKTIE 3	GEZHAUBA-SHANGHAI	Y. ZELANDA DA HİBRİT HAT	SKAGERRAK 3	BALTIK KABLOSU	KONTEK
Yapım Yılı	1989	1989	1989	1991-1992	1993	1994	1995
İletilen Güç, MW	500	1100	1200	560	440	600	600
Doğru Ger. kV	400	±500	±500	-350	350	450	400
İst. Dön. Sayısı	1	2	2	1	1	1	1
Dönüştürücü	400	500	500	350	350	450	400
Başına D.G., kV	1250	1100	1200	1600	1260	1364	1500
DA, A	Kapasiteler	Kapasiteler	Kapasiteler	Kapasiteler	Kapasiteler	Kapasiteler	Kapasiteler
Reaktif Güç Kaynağı							
İstasyonları Yeri, AA Gerilimleri	Dannebo, 400 kV Rauma, 400 kV	Celilo, 500 kV Sylmar, 230 kV	Gezhauba, 500 kV Nan Qiao, 230 kV	Benmore, 220 kV Haywards, 220 kV	Senkron Kondan. Kristiansand 300kV Tjele, 400 kV	Kruseberg- 400kV Herrenwyk,380kV	Bjaeverskov,400 Bentwisch,400kV
Havai DA Hat Uzunluğu, km	33 km	1360 km	1000 km	575 km	113 km	12 km	-
Kablo Sayısı	1			2. 1 yedek	1	1	1
Kablo Uzunluğu	200 km			42 km	127 km	250 km	170 km
DA Devrinin Topraklaması	İki deniz elektrot istasyonu	Bir toprak ve bir deniz elektrot istasyonu	İki toprak elektrot istasyonu	Bir toprak ve bir deniz elektrot istasyonu	İki toprak elektrot istasyonu	İki deniz elektrot istasyonu	İki deniz elektrot istasyonu
AC Şebeke Bağlantıları Kontrol	Senkron	Senkron	Asenkron	Asenkron	Asenkron	Asenkron	Asenkron
Güç Akışının Acil Değişimi	Sabit güç, sönüm kontrolü	Sabit güç ve her yönde küçük sıryal modülasyonu kontrol	Sabit güç ve reaktif güç kontrolü	Sabit güç, frekans ve sönüm kontrolü	Her yönde sabit güç	Sabit güç, frekans ve sönüm kontrolü	Sabit güç, frekans ve sönüm kontrolü
HVDC Sisteminin Tercih Nedeni	Manuel veya otomatik	Manuel veya otomatik	-	Wellington bölgesi frekans kontrolü	Manuel veya otomatik	Manuel veya otomatik	Manuel veya otomatik
Dönüştürücü Ekipmanlarının Üreticisi	ABB	ABB	ABB-Siemens	ABB	ABB	ABB	ABB

Tablo 7.1. (Devamı) Dünya üzerindeki HVDC Sistemlerinin dağılımı

BULUNDUĞU YER	CHANDRAPUR-PADGHE	LEYTE - LUZON
Yapım Yılı	1997	1997
İletilen Güç, MW	1500	440
Doğru Ger. kV	±500	350
İst. Don. Sayısı	2	1
Dönüştürücü	500	350
Başına D.G., kV		
DA, A	1500	1260
Reaktif Güç Kaynağı	Kapasiteler	Kapasiteler
İstasyonları Yeri, AA Gerilimleri	Chandrapur, 400 kV Padghe, 400 kV	Ormoc, 230 kV Nagge, 230 kV
Havai DA Hat Uzunluğu, km	736 km	433 km
Kablo Sayısı		1, 1 yedek
Kablo Uzunluğu		19 km
DA Devrenin Topraklanması	İki elektrot istasyonu	İki deniz elektrot istasyonu
AC Şebece Bağlantıları	Senkron	Asenkron
Kontrol	Sabit güç, frekans ve sınıtım kontrolü	Sabit güç ve frekans kontrolü
Güç Akışının Acil Değişimi	Manuel veya otomatik	Manuel veya otomatik
HVDC Sisteminin Tercih Nedeni	Uzun mesafe ve kararlılık	Uzun mesafe ve deniz geçişi
Dönüştürücü Ekipmanlarının Üreticisi	ABB-BHEL	ABB

## 7.2 HVDC Enerji İletim Sisteminin Türkiye'deki Uygulama İmkanları

Ülkemizde ilk defa elektrik enerjisi 1902'de Tarsus'ta kullanılmış, ilk büyük santral 1914'te İstanbul Silahtarağa'da servise alınmıştır. Osmanlıların son dönemi ile Cumhuriyetin ilk yıllarında yabancıların yaptığı, pahalı yakıta dayalı, geliştirmeye ve genişlemeye müsait olmayan küçük gruplardan kurulu tesislerin 1923'te, Cumhuriyetin ilanındaki kurulu güçleri 33MW, yıllık tüketimleri ise yaklaşık yılda 40-50 milyon kWh'tır.

Bilinen durumun mahsurlarını gidermek üzere 1935 yılında MTA, Etibank ve EIEI ile daha sonraki yıllarda İller Bankası ve DSI kurularak yabancı tesisler millileştirilip, işlerin merkezi bir otoriteden yürütülmesi sağlanmıştır.

1948 yılında Çatalağzı santrali yapılarak 154 kV'luk enerji taşınmaya başlanmıştır

TEK enterkonnekte Yüksek Gerilim(YG) ve Çok Yüksek Gerilim (ÇYG) sistemleri sırasıyla 154 kV ve 380 kV standart işletme gerilimine sahip olup bugün ülkenin tümünü kapsayan bir bütün teşkil eder. Anılan standart işletme gerilimlerine tekabül eden maksimum işletme gerilimleri 170 kV ve 420 kV'tur.

Zamanla daha büyük kapasiteli ve ana tüketim merkezlerinden çok daha uzakta olan üretim tesislerinin yapımının ele alınmasıyla, uzun mesafeler ve yüksek taşıma güçleri için 154 kV'luk YG iletim sisteminin yetersiz kalacağı düşünülmüş ve 1960'lı yılların başlarında projelendirme çalışmalarına geçilen Keban Baraj ve HES'nin (1330MV) Ankara, İstanbul ve İzmir gibi büyük tüketim bölgelerini 500-800 km'lik mesafeler üzerinden besleyeceği de göz önüne alınarak, gerilim seviyesinin, Avrupa standardına uygun olarak 380 kV'a çıkarılmasına karar verilmiştir.

Karakaya HES (6x300=1800 MW) ile İstanbul arasında büyük kapasiteye sahip HVDC hattı ilk olarak 1973-74 yıllarında, 420 kV ve 800 kV AA hatları ile birlikte teknik ve ekonomik yönden incelenmişti. Bu etüt 1979-80 yıllarında güncelleştirildi. 1984-85 yıllarında 420 ve 800 kV AA alternatifleri yeniden gözden geçirildi.

### **7.2.1 ±500 kV HVDC Sistemi Yerine Neden 420 kV AA Sistemi Kullanıldı ?**

Atatürk HES sistemiyle karşılaştırmaya alınan eşdeğer HVDC sisteminin ana parametreleri aşağıdaki gibi tespit edilmiştir:

Nominal iletim kapasitesi : 2x900 MW

Nominal gerilim : ±500 kV

Nominal akım :1800 A

Dönüştürücü istasyonlarının yeri :

Gönderici uç : Atatürk HES

Alıcı uç : Paşaköy (İstanbul)

Halen inşasına başlanacak olan 3'lü demet Pheasant (1272 MCM) iletkenli iki 420 kV maksimum işletme gerilimli iki hattan oluşan AA sistemiyle  $\pm 500$  kV HVDC sisteminin karşılaştırılmasından genelde şu sonuçlar elde edilmiştir :

1. Dönüştürücü istasyonları çok pahalıdır (200 \$/kW).
2. TEK'in amacı noktadan noktaya iletim değil, güzergah boyunca gerekli yerleşim yerlerinin ihtiyacını da karşılayabilecek ve yeni yapılan hatlarla da bağlantı kurabilecek şekilde enterkonnekte bir sistem kurmaktır.
3. Dönüştürücü istasyonlarının aşırı yüklenme kabiliyeti AA hatlarına göre daha azdır.
4. HVDC sistemlerinin güvenilirliği, AA sistemlere göre halen yeterli bulunmamıştır.
5. HVDC sistemindeki bozukluklar, işletme sorunları ve teçhizat hasarları oluşturabilmektedir. AA sistemde hasarlar ve arıza çözümü daha kolaydır.
6. GAP gibi büyük projeler uzun mesafe iletimini ortadan kaldırıp daha çok bölgesel iletimi ön plana çıkarabilir.
7. TEK bünyesinde AA hatlar konusunda uzmanlaşmış bir kadro mevcuttur. HVDC üzerinde uzman yetiştirmek uzun zaman alacaktır.
8. 420 kV teçhizatın hemen tamamı ülkemizde yapılabilmektedir. HVDC dışa bağımlılığı getirecektir.
9. TEK 420 kV AA sisteminin başlangıçtan beri özenli dizaynı nedeniyle kararlılık ve yük akışının kontrolünde büyük sorunlar çıkarmayacağı düşünülmektedir.
10. 2 kutuplu 3 ve 4 demet pheasant iletkenli ve 1 kutuplu 3 ve 4 demet pheasant iletkenli seçeneklerine bağlı olarak, 940 km'lik  $\pm 500$  kV HVDC sisteminin maliyeti 552 ile 616 milyon \$ arasında değişmektedir. 3 demet pheasant iletkenli 2 iletim hatlı, şalt, trafo ve seri kapasitör merkezleri de dahil 940 km'lik 420 kV'luk AA sisteminin maliyeti ise 353 milyon \$'dır.



11. 420 kV AA sisteminin yıllık bakım maliyeti 174.7 milyon \$ ve  $\pm 500$  kV HVDC sisteminin yıllık bakım maliyeti de 235.4 milyon \$'dır.

12. TEK tarafından yapılan incelemelerde, toplam kayıpların bugüne indirgenmiş değeri aradaki farkı kapatacak değerde bulunmamıştır. Tam yükte kayıplar, AA sisteminde 112 MW ve DA sisteminde 92 MW civarındadır.

Bütün bu sonuçlar neticesinde TEK,  $\pm 500$  kV HVDC sistemi yerine 420 kV AA sistemini tercih etmiştir. (TEK, 1996)

### **7.2.2 HVDC Enerji İletim Sisteminin Türkiye'de Uygulama İmkanları**

Türkiye Elektrik Kurumu (TEK) yapmış olduğu uzun vadeli gelişme planlarında, yeni yapılacak her Yüksek Gerilim Alternatif Akım (HVAC) enerji nakil hatlarının yanında, Yüksek Gerilim Doğru Akım (HVDC) enerji nakil hatlarını da maliyet ve güvenilirliğin yanında işletim şartları açısından da incelemiştir. Bu incelemelerin sonucunda TEK'in vardığı genel görüş, iyi tasarlanmış Türkiye enterkonnekte şebekesine bu sistemin uygun olmadığıdır. Hat uzunluğu bakımından incelendiğinde Atatürk Barajı ve İstanbul arasında böyle bir hattın kurulabileceği düşünülse de, hat boyunca dağıtım yapılması gerekleri bu işlemi zorlaştırmakta ve çok daha pahalı yatırımları gerektirmektedir. Ayrıca Türkiye'nin AA şebekelerde kullanılan malzemelerde dışarıya bağımlılığı her geçen gün azalırken, ilk yıllarda DA hatlarda dışarıya tamamen bağımlı kalması da uygun değildir. Yetişmiş eleman açısından bakıldığında da Türkiye'nin HVAC konusunda yeterli elemana sahip olduğu görülüyor. HVDC konusunda uzman kişilerin yetişmesi de yine zaman alacaktır.

Bütün bunlara rağmen enerji kaynaklarının gittikçe azalması, enerji maliyetinin artması ve bunun yanında yarıiletken teknolojisindeki hızlı gelişmelerle daha yüksek güçleri kontrol edebilme imkanları, gelecekte HVDC sistemlerinin çok daha fazla kullanılmasını kaçınılmaz hale getirecektir.



Gelişen dünya şartlarında Türkiye'nin komşu ülkelerle elektrik enerjisi alış-verişi ve doğu ya da batı komşularıyla enterkonnekte şebekeye bağlanması gündeme gelecektir. Bu durumda ülkelerin elektrik şebekelerindeki kararsızlıklar ve frekans uyumsuzlukları büyük sorun olacaktır. Bunları gidermek için en iyi çözümün, sistemin üstünlükleri göz önüne alındığında HVDC olacağı görülmektedir. Böyle bir uygulamadan, mevcut enerji kaynaklarının da iyi kullanılmasıyla Türkiye'nin karlı çıkacağı da söylenebilir.

Diğer bir uygulamada Türkiye ile KKTC arasında yapılabilir. Şu an için belki de en öncelikli uygulama yeri burasıdır. KKTC'nin elektrik ihtiyacını Kıbrıs Rum kesiminden sağlaması, KKTC için oldukça büyük bir sorun ve bağımlılıktır. Türkiye ile KKTC arasında yaklaşık 75 km'lik bir denizaltı kablosu ile HVDC iletimi yapılabilir. 30 km'nin üstündeki denizaltı iletiminde HVDC'nin, HVAC sistemlerine göre maliyet açısından da daha uygun olduğu göz önüne alınırsa, böyle bir projenin gerçekleştirilmesinin uygun olacağı sonucuna varılır. Bu hat, güvenilirlik ve ilerideki güç ihtiyaçlarını da karşılayabilmesi açısından iki iletkenli (iki kutuplu) olarak kurulmalıdır.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

HVDC Enerji iletim sistemi, özellikle uzun vadede ekonomik olması ve güç akışının kontrol edilebilmesi bakımından AA sistemlerine göre üstünlük göstermektedir. Ancak HVDC sisteminin geleceği şu koşulların sağlanması ile sıkı sıkıya bağlıdır:

- Dönüştürücü istasyonların maliyetlerinin hava hatlarının maliyetlerine göre düşürülmesi,
- Dönüştürücü istasyonlarında aktif kayıpların azaltılması,
- İki veya daha fazla terminal kapsayan ÇTDA bağlantılarında güç akış kontrolünün, daha kolaylıkla ve yüksek derecede güvenilirlikle sağlanması.

HVDC Enerji iletim sisteminin incelenmesinde bilgisayar benzetiminin kullanılması problemlerin çözümünü daha da kolaylaştırmakta ve kontrolün de daha güvenli olmasını sağlamaktadır. HVDC sisteminin bilgisayar benzetimi tablo yönteminden de faydalanarak yapılmış ve C++ yazılımı ile desteklenmiştir. Bu çalışmada geliştirilen bilgisayar yazılımı genel olarak her devreye (6 vuruşlu ve 12 vuruşlu sisteme) uygulanabilir.

Yapılan kontrol, sisteminin en önemli özelliği frekans, genlik, akım ve güç kontrollerinin geleneksel kontrol sistemlerine göre daha hassas ve daha hızlı gerçekleşmiş olmasıdır. Özellikle tristör tetiklemelerinin, diğer sistemlerdeki gibi herhangi bir fazın sıfır geçişinin yakalanarak yapılması yerine, fazların kesişim noktaları yakalanarak yapılmasıyla, şebekede her bir fazın genlik ve frekans değişimleri yanı sıra, şebekedeki üç faz arasındaki açılarının da sürekli olarak izlenmesi gerçekleştirilmiş ve kontrol değişkenlerinin bilgisayar programı yardımıyla otomatik olarak elde edilmesi sağlanmıştır. Yine kontrol esnasında girişte oluşacak beklenmedik aşırı düşük veya yüksek genlik frekans ve faz değerlerine karşı koruma

önlemleri alınmıştır. Bunun yanısıra, sistemin giriş ve çıkış değişkenleri monitörden izlenebilmekte ve değiştirilebilmektedir. Bu sayede çıkışta istenen akım, gerilim ve bunun sonucunda hesaplanan güç değerleri kolaylıkla elde edilebilmektedir.

PID Kontrolü ile deneysel olarak gerçekleştirilen devrenin kontrolünün daha iyi gerçekleştirilmesi için bulanık mantık denetleyicisi kullanılmıştır. Bu sistemin kontrolünü ciddi oranda arttırmıştır.

İleriye dönük araştırmalarda tristörlü modelin güç ve gerilim sınırı artırılarak, sistemler yeniden gerçekleştirilmeli ve sistem bir enerji nakil hattında denenmelidir. Sistemin kontrolünde bulanık mantık (Fuzzy Logic) kullanılması daha geniş incelenmelidir. Yapay sinir ağları yöntemleri kullanılarak bulanık denetleyicilerin (Neural-Fuzzy Kontrol) sisteme otomatik adaptasyonu değişen şartlara öğrenerek yaklaşımı sağlanabilecektir. Bunun yanında harmonik kontrolleri ve kararlılık problemleri de irdelenmelidir.

## KAYNAKLAR

1. ALVES, J.E.R, 1993. An Adaptive Digital Controller Applied to HVDC Transmission, IEEE Trans.on Power Delivery, Vol.8, No.4, pp 1851-1861
2. AMINZADEH, F., and JAMSHIDI, M., 1994. Soft Computing Fuzzy Logic, Neural Networks, and Distributed Artificial Intelligence, Printece Hall Inc.
3. ANG, S.S, 1995. Power Switching Converters, Marcel Dekker Inc., New York.
4. ARGİTİS, L.M., ZACHARİAS, T.,1988. Transient Simulation of Integrated AC/DC Systems PartI : Converter Modelling and Simulation, IEEE Trans. on Power Systems Vol.3, No.1, pp 166-172
5. AZEVEDO, H.R. and et al., 1993. A Fuzzy Logic Controller for DC Motor Position Control, IEEE 2nd Int. Workshop on Emerging Tech. and Factory Automation, USA.
6. B.E., and JACKSON, R.D., Computer-Aided Design of Thyristor Circuits: the Sparse-Network Tableau Approach
7. BALIGA, B.J.,1994. Power Semiconductor Devices for Variable-Frequency Drives, Proceedings of IEEE, Vol.82, No.8. pp. 1112-1121.
8. BAŞBUĞ, A., 1994. Bulank Teknoloji. Byte Dergisi.
9. BATUR, C., and et al., 1994. A Self-Tuning Fuzzy Controller with Switching Control Modes. Trans. of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. Vol.116, No.4. pp. 795-800.
10. BAUSIERE, R., et al., 1993. Power Electronic Converters. Springer-Verlag, Berlin.
11. BEZDEK, J., 1993. Editorial Fuzzy Models-What are They, and Why? IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol.1, No.1.
12. BODSON, M., 1996. Trends in Electronics for Electric Motor Control. IEEE Control System Magazine. pp. 88-96.
13. BOKHOVEN, W.M.G.V., 1975. Linear Implicit Differentiation Formulas of Variable Step and Order, IEEE Transaction On Circuit and System Theory, Vol.CAS-22, No.2, pp 109-115
14. BOLOGNANI, S., 1992. The Application of Fuzzy Controllers to Motor Drives. SPEEDAM, Italy.

15. BONISSONE, P.P., and et al., 1995. Industrial Applications of Fuzzy Logic at General Electric. Proceedings of IEEE, Vol. 83, No.3. pp. 450-463.
16. BOSE, B. K., 1978. A DC Motor Control System for Electric Vehicle Drive. IEEE Trans. on Ind. Application, Vol.14, No.6, pp. 565-567.
17. BOSE, B. K.,1994a. A Fuzzy Set Theory Based Control of A Phase-Controlled Converter DC Machine Drive, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.30, No.1.
18. BOSE, B.K., 1994b. Expert Systems, Fuzzy Logic, and Neural Network Applications in Power Electronics and Motion Control. Proceedings of IEEE, Vol. 82, No.8. pp. 1303-1316.
19. BRANCO, C., and et al., 1994. Automatic Modeling of an Electrical Drive System Using Fuzzy Logic. The Industrial Fuzzy Control and Intelligent Systems Conference. USA.
20. BRAYTON, R.K., GUSTOVSON, F.G., and HACHTEL, G.D., 1972. A New Efficient Algorithm for Solving Differential-Algebraic Systems Using Implicit Backward-Differentiation Formulas, Proc. IEEE, Vol.60, No.1, pp 98-108
21. BUJA, G.S., TODESCO, F., 1994. Neural Network Implementation of a Fuzzy Logic Controller. IEEE Trans. on Ind. Electronics, Vol.41, No.6. pp 663-665.
22. CALDERON, G.R., AVILA, M.C., MORFIN, F.J., 1994. Stable Adaptive Fuzzy Control of a DC Motor. NAFIPS'94 1. Int. Industrial Fuzzy Control and Intelligent Systems Conference. USA.
23. CAPONETTO, R., PRESTI, L.M., VINCI, C., 1995. Genetic Optimization for the Design of an n-step Fuzzy Controller. IEEE Int. Conference on Systems Man and Cybernetics. Vol.1.
24. DANAHUE, J.A., FISHER, D.A.,1993. Performance Testing of the Sundry Pond HVDC Converter Terminal IEEE Trans. on Power Delivery , Vol.8, No.1, pp 422-428
25. DANIEL, J.Lorden, 1992. A Digitally Based HVDC Firing-Pulse Synchronization Control-Description and Model Development, IEEE Trans.on Power Delivery, Vol.7, No.3, pp 1405-1416
26. DASH, P.K., 1993. High-Performance Controllers for HVDC Transmission Links, IEEE Trans.Proc.Gener. Trans.Distrib., Vol.141, No.5, pp 422-433
27. DOĞUERİ, A.K., 1996. Bulanık Mantık ve Bulanık İşlemciler. Otomasyon Dergisi, Şubat sayısı.
28. ELASSER, A., et al., 1996. Soft Switching Active Snubbers for DC/DC Converters. IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.11, No.5, pp. 710-721.

29. ELECTRIC POWER DEVELOPMENT CO., 1991. Technology on HVDC Converter Station, Tokyo, Japan
30. EL-SERAFI, A.M, SHEDATA, S.A., 1976. Digital Simulation of An AC/DC System, IEEE Trans. Vol. Pas-95, No.2, pp 731-741
31. EPDC, 1990,Hokaido-Honshu HVDC link, Tokyo Japan.
32. FRANK, P.M., 1996. More Robustness and Economy in Control Engineering Through Fuzzy Techniques, Kocaeli Üniversitesi Fuzzy Control Semineri (Yayınlanmamış).
33. GILES, M. and RAHMAN, S., 1994. Using Neural-Fuzzy in Control Applications. WESCON/94 Conference, New York.
34. GÖNEN, T.,1998. Electric Power Transmission System Engineering, John Wiley NY
35. GUILLEMIN, P., 1996. Fuzzy Logic Applied to Motor Control. IEEE Trans. on Industry Appl. Vol.32, No.1. pp. 51-56.
36. GULLEY, N. and JANG, J.S., 1995. Fuzzy Logic Toolbox for Use with Matlab. The Math Works Inc. München.
37. HALL, L.O., and HATHAWAY, R.J., 1996. Software Review, Fuzzy System Toolbox. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol.4, No.1, pp. 82-85.
38. HAMMAND, A., MINGHETTI, R, 1993. Controls Modeling and Verification for The Pacific Intertic HVDC 4 terminal Scheme, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No.1, pp 367-375
39. HANCTEL, G.D., BRAYTON, R.K., and GUSTAVSON F.G., 1971. The Sparse Tableau Approach to Network Analysis and Design, Transaction on Circuit and System Theory, vol. CT-18, No.1 , pp 101-113
40. HARASHIMA, F., 1994. Power Electronics and Motion Control-Future Perspective. Proceedings of IEEE, Vol. 82, No.8. pp. 1107-1110.
41. HASSAN, M.M., STANEK, E.K.,1983. Analysis Techniques in AC/DC Power Systems, IEEE Trans. on Industry App. , Vol.1A-17, No.5, pp 473-480
42. HINGORANI, N.G.,1996. High-Voltage DC Transmission A Power Electronics Workhorse, IEEE Spectrum, pp 63-72
43. HINGORANI, N.G., HAY, S.L., KITCHEN, R.H. and HAY, J.L., 1968. Dynamic Simulation of HVDC Power Transmission Systems on Digital Computer, IEEE Trans. Vol. PAS-87, No. 4, pp 989-996
44. HOLTZ, J., 1994. Pulse Width Modulation for Electronic Power Conversion. Proceedings of IEEE, Vol. 82, No.8. pp. 1194-1212.

45. JAMSHIDI, M., et al., 1993. Fuzzy Logic and Control, Software and Hardware Applications. PTR Prentice Hall Inc. New Jersey.
46. KANDEL, A., LANGHOLZ, G., 1994. Fuzzy Control Systems. CRC Press. London.
47. KASAKIAN, J.G., SCHLECHT, M.F., VERGHOSE, G.C., 1991. Principles of Power Electronics, Addison Wesley
48. KHAN, E., RAHMAN, S., 1995. Fuzz Logic Gets a Boost From Neural Nets. Electronic Design. Vol.43, No.13. pp. 128-132.
49. KIM, J. H., et. al., 1994. A Two Layered Fuzzy Logic Controller for System with Dead zones, IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol.41, No.2.
50. KIM, S.W., KIM, E.T., PARK, M., 1993. A New Fuzzy Adaptive Controller Using A Robust Property of Fuzzy Controller. IEEE Int. Conference on Intelligent Robots and Systems. Vol.2. pp. 891-897.
51. KIMBARK, E.W., 1971. Direct Current Transmission, Vol. I, Wiley-Interscience
52. LEE, C.K., CHAN, W.T., 1995. Utilisation of the Saturation Effect on a DC Motor Drive with a Fuzzy Controller. IEEE Int. Conference on Industrial Automation and Control. pp 342-349.
53. L-HAWARY, E.E., 1986. Principles of Electric Machines with Power Electronic Applications, Prentice-Hall Inc.
54. LI, C.K., LEE, W.L., CHOU, Y.W., 1995. Fuzzy Control of Power Converters Based on Quasilinear Modelling. Electronics Letters, Vol.31, No.7. pp 594-595.
55. LIN, P.H., ELLSWORTH, C., 1995. Design and Implementation of PC-Based Universal Fuzzy Logic Controller System. IEEE Int. Conference on Industrial Automation and Control.
56. LIN, P.H., HWANG, C.J., 1994. Comparison on Fuzzy Logic and PID Controls for a DC Motor Position Controller. IAS'94 Industry Applications Conference.
57. MAHARSI, Y., DO, V.Q., SOOD, V.K., CASARIO, BELANGER S., J., 1995. HVDC Control System Based on Parallel Digital signal Processors, IEEE Transection on Power Systems, Vol.10 No.2
58. MATLAB WORKS INC., 1996. SIMULINK, Toolbox User's Guide.
59. MATLAB WORKS INC., 1995. MATLAB, User's Guide.
60. MATTAVELLI, P., ROSETTO, L., TENTI, P., 1997a. Small-Signal Analysis of Dc-Dc Converters with Sliding Mode Control. IEEE Tran. on Power Electronics, Vol.12, No.1, pp.96-102.



61. MATTAVELLI, P., SPIAZZI, G., 1997b. General-Purpose Fuzzy Controller for Dc-Dc Converters. IEEE Tran. on Power Electronics, Vol.12, No.1, pp.79-86.
62. MENDEL, J.M., 1995. Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial. Proceedings of IEEE, Vol. 83, No.3. pp. 345-375.
63. MOAHN, N., UNDELAND, T.R., ROBBINS, W.P.,1989. Power Electronics, Converter Application and Design, NY, John Willey & Sons
64. MUNAKATA, T., and JANI, Y., 1994. Fuzzy Systems: An Overview. Communication of the ACM. Vol.37, No.3. pp. 69-76.
65. NAKAJIMA, F., 1993. Design and type test of a light triggered thyristor valve for back-to-back system, IEEE trans. on power delivery, Vol.8, Nol., pp 31-36.
66. NASAR, S.A., 1995. Electric Machines and Power Systems. McGraw-Hill Inc.New York, 1971
67. New achievements in high voltage direct current power transmission, CGEE Alstom uygulama ve tanıtım notu.
68. NEWTON, D.A., 1995. Advanced Traction and Braking Systems. GEC Review. Vol. 10, No. 2. pp. 72-80.
69. NYATI, S., GUETH, G.,1990. Investigation of HVDC Inverter with Series Compensation of Analogue Simulator, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.5, No.2, pp.668-674
70. ÖLÇER, E. ve diğ., 1997c. Yüksek Gerilimle DC Enerji (HVDC) iletiminde kayıpların Azaltılması,Türkiye 7. Enerji Kongresi, Ankara, 9.World Energy Council ,Türk Milli Kongresi
71. ÖLÇER, E., et al., 1996b. Fuzzy Control of Traction Motor in Light metro Vehicle. 1st Int. Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Mass Transit Systems COMPRAIL 96. Berlin, Germany
72. ÖLÇER, E., et al., 1997a. Fuzzy Logic Control of Converter in High Voltage DC Transmission System,IEEE ICIPS'9 IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems, Beijing-China
73. ÖLÇER, E., et al., 1997b. Design and Application of Fuzzy Controller for Traction Motor in Metro Vehicle. 8. IFAC Symposium on Transportation Systems. Chania, Greece
74. ÖLÇER, E., et al., 1997d. Modelling and Controlling of Chopper Driven DC Traction Motor with Fuzzy Logic. IASTED International Conference Modelling, Identification and Control. Innsbruck, Austria.



75. ÖLÇER, E., ve diğ., 1996c. HVDC Sisteminin Bulanık Mantık Kullanarak Bilgisayar Tabanlı Kontrolü, 4.Bilgisayar Haberleşme Sempozyumu, Bursa,1996, 11.TMMOB
76. ÖLÇER, E., ve diğ., 1996a. Hafif Metro Tahrik Sistemlerinin Bulanık Mantık Kullanılarak Kontrolü. 1. Ulusal Ulaşım Sempozyumu, Ayazağa, İstanbul. ss 415-421.
77. ÖLÇER., E., ve diğ., 1997e. Fuzzy Logic Control of High Voltage DC Transmission System,5<sup>th</sup> Fuzzy Days in Dortmund, Dortmund,Germany
78. PADİYAR, K.R.,1990. HVDC Power Transmission Systems, Technology and Systems Interactions,John Walley & Sons N.Y.
79. PAYIDAR, K.H., SACHCIDANAND,1983. Digital Simulation of Multiterminal HVDC System Using A Novel Converter Model, IEEE Trans. Vol. PAS-102 No 6., pp 1624-1632
80. PAYIDAR, K.R., SACHCHIDANAND KOTHARI, A.G., 1989. Study of HVDC Controls Through Efficient Dynamic Digital Simulation of Converters, IEEE Trans. on Power Delivery, No.4, pp 2171-2178
81. QIN, J. S., 1994. A Multiregion Fuzzy Logic Controller for Nonlinear Process Control", IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol.2, No.1.
82. RAMSHAW, R.S., 1993. Power Electronics Semiconductor Switches. Chapman & Hall Inc. London. pp. 296-320.
83. RASHID, M.H., 1988. Power Electronics Circuits. Devices, and Applications. Prentice-Hall Inc.
84. RASHID, M.H.,1993. Power Electronics Circuits,Devices and Application, 2<sup>nd</sup> ed. N.J. Printence Hall
85. RASHID, M.H.,1994. Spice for Power Electronics and Electric Power, N.S. Printice Hall 1994
86. RAVIRAJ, V.S.C., and SEN, P.C., 1995. Comparative Study of PI, Sliding Mode and Fuzzy Logic Controllers for Power Converters. IEEE IAS Meeting USA, pp. 1651-1655.
87. ROSTAMKOLAJ, N., WEGNER, C.A., PIWKO, R.J.,1993. Control Design of Santo Tome Back-to-Back HVDC Link, IEEE Trans., Vol.8, No.3, pp 1250-1256
88. RYFF, P.F., 1996. Electric Machinery. Prentice Hall Inc.
89. SCHAEFER, R., 1993. Design and Project Comparison: Conventional and Fuzzy Control. Fuzzy Logic'93. pp. 844-848.

90. SCHWARTZ, D.G., 1994. Applications of Fuzzy Sets and Approximate Reasoning, Proceedings of the IEEE, Vol.82, No.4.
91. SEN, P.C., 1989. Principles of Electric Machines and Power Electronics, John Willey & Sons Inc.
92. SHEPHERD, W., HULLEY, L.N., LIANG, D.T.W., 1995. Power Electronics and Motor Control. Cambridge University Press.
93. SLEMON, G.R., 1994. Electrical Machines for Variable-Frequency Drives. Proceedings of IEEE, Vol. 82, No.8. pp. 1123-1139.
94. SMITH, M.L., 1994. Sensors, Appliance Control, and Fuzzy Logic. IEEE Trans. on Industry Applications. Vol.30, No.2, pp. 305-309.
95. SOLIMAN, H.F., SHARAF, A.M., KANDIL, S.A., 1994. A Tunable Fuzzy Logic Controller for Chopper Fed Separately Excited DC Motor Drives. 7. Mediterranean Electrotechnical Conference.
96. SOUSA, G.C.D., and BOSE, B.K., 1995. Fuzzy Logic Applications to Power Electronics and Drives- An Overview. IEEE Int. Conference on Industrial Electronics and Instrumentation. Vol.1. pp. 57-62.
97. TANIGUCHI, K., OGIANA, Y., and IRIE, H., 1988. PWM Technique for Power Mosfet Inverter, IEEE Transaction On Power Electronics, Vol.3, No.3, pp 328-334
98. TEETER, J.T., and et al., 1996. A Novel Fuzzy Friction Compensation Approach to Improve the Performance of a DC Motor Control System. IEEE Tran. on Industrial Electronics. Vol.43, No.1. pp. 113-120.
99. TEETER, J.T., CHOW, M.Y., BRICKLEY, J.J., 1994. Use of A Fuzzy Gain Tuner for Improved Control of A DC Motor System with Nonlinearities. IEEE Int. Conference on Industrial Technology. pp. 258-262.
100. TEIXEIRA, E., and et al., 1994. The Use of Neuro-Fuzzy Networks in the Control of Nonlinear Systems. IECON/94 Conference, USA.
101. TEK, 1996
102. TÜBİTAK, 1996. EEAG-52 Araştırma projesi
103. ULLAH, Z., NEELY, W.S., KHAN, E., 1995. A Microcontroller Implementation of a Neu-Fuz Control Systems. IEEE Int. Conference on Fuzzy Systems. Vol.4. pp. 1785-1792.
104. VADIVEL, S., BHUVANESWARİ, G., and RAO, S., 1991. A Uniifed Approach to the Real-Time Implementation of Microprocessor-Based PWM Waveforms, IEEE Transaction On Power Electronics, Vol. 6, No.4, pp 565-567

105. VARNAVITSKY, M., 1983. A Microcomputer-Based Control Signal Generator for a Three-Phase Switching Power Inverter, IEEE Transaction On Industry Applications, Vol.1A-19, No.2, pp 228-234
106. VOVOS, N., GALANOS, G.,1983. A Mathematical Model for Dynamic Simulation of HVDC System, IEEE Trans. Vol. PAS-102, No.6, pp 1755-1763
107. WANG, F.H., and LEE, C.Q., 1994. Comparison of Fuzzy Logic and Current-Mode Control Technique in Buck, Boost and Buck-Boost Converters. IEEE PESC, pp.1079-1085.
108. WYK, J.D.V., 1994. Power Electronic Converters for Motion Control. Proceedings of IEEE, Vol. 82, No.8. pp. 1164-1188.
109. YAGER, R.R., FILEV, D.P., 1994. Essentials of Fuzzy Modeling and Control. John Willey and Sons Inc. New York.
110. YASUNOBU, S., and et al., 1992. Fuzzy Control for Automatic Train Operation Systems. Fuzzy Sets for Intelligent Systems. pp. 348-352



## EKLER

Ek A`da, yapılan kontrol programının genel akış şemaları verilmiştir.

Ek B`de, C++ dilinde yazılmış kontrol programı görülmektedir. Kontrol programı laboratuarda kurulan HVDC modelinin kontrolünde kullanılmıştır.

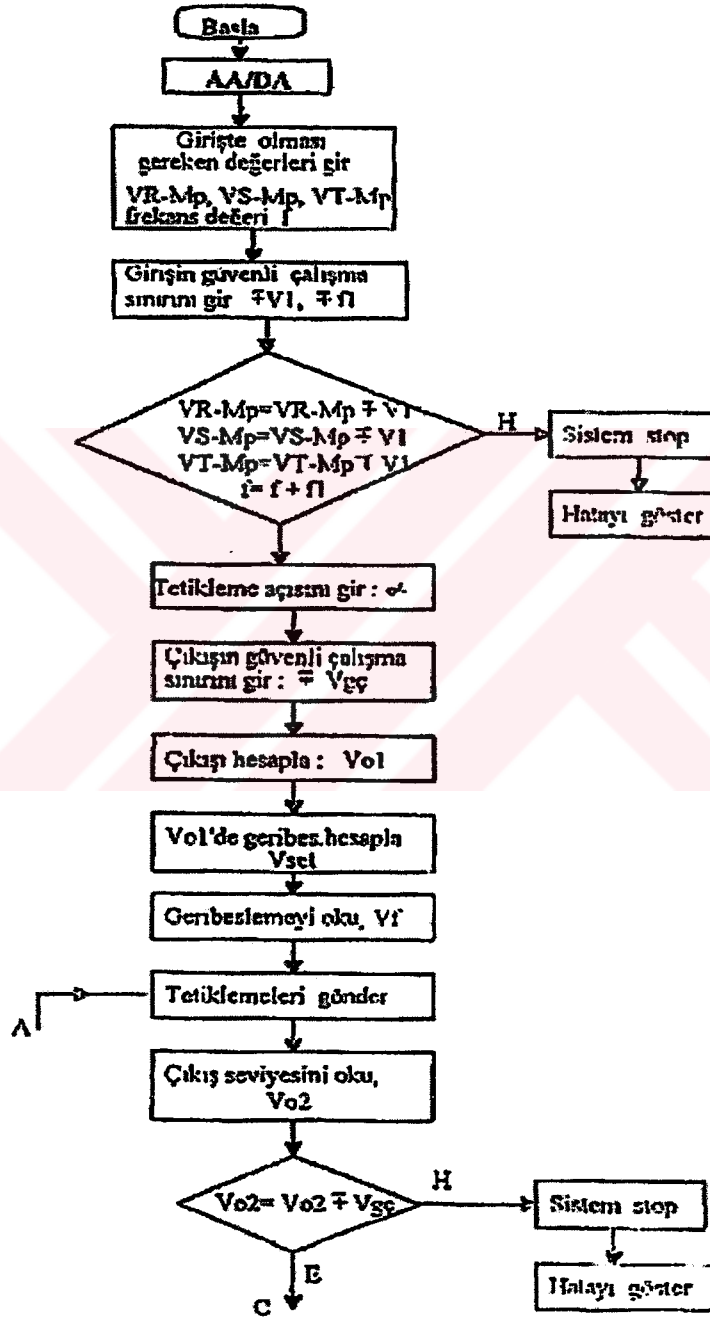
Ek C`de kontrol işleminde bilgisayar ile model devreler arasında iletişimi sağlayan AD1200 kontrol kartının özellikleri verilmiştir.

Ek D`de, laboratuarda kurulan modelden alınan fiziksel devre çıktıları verilmiştir. Bu çıktılar, sayısal osiloskoptan RS-232 yardımıyla bir seri haberleşme programı kullanılarak, bilgisayara aktarılmış ve böylelikle yazıcıdan alınmaları sağlanmıştır.

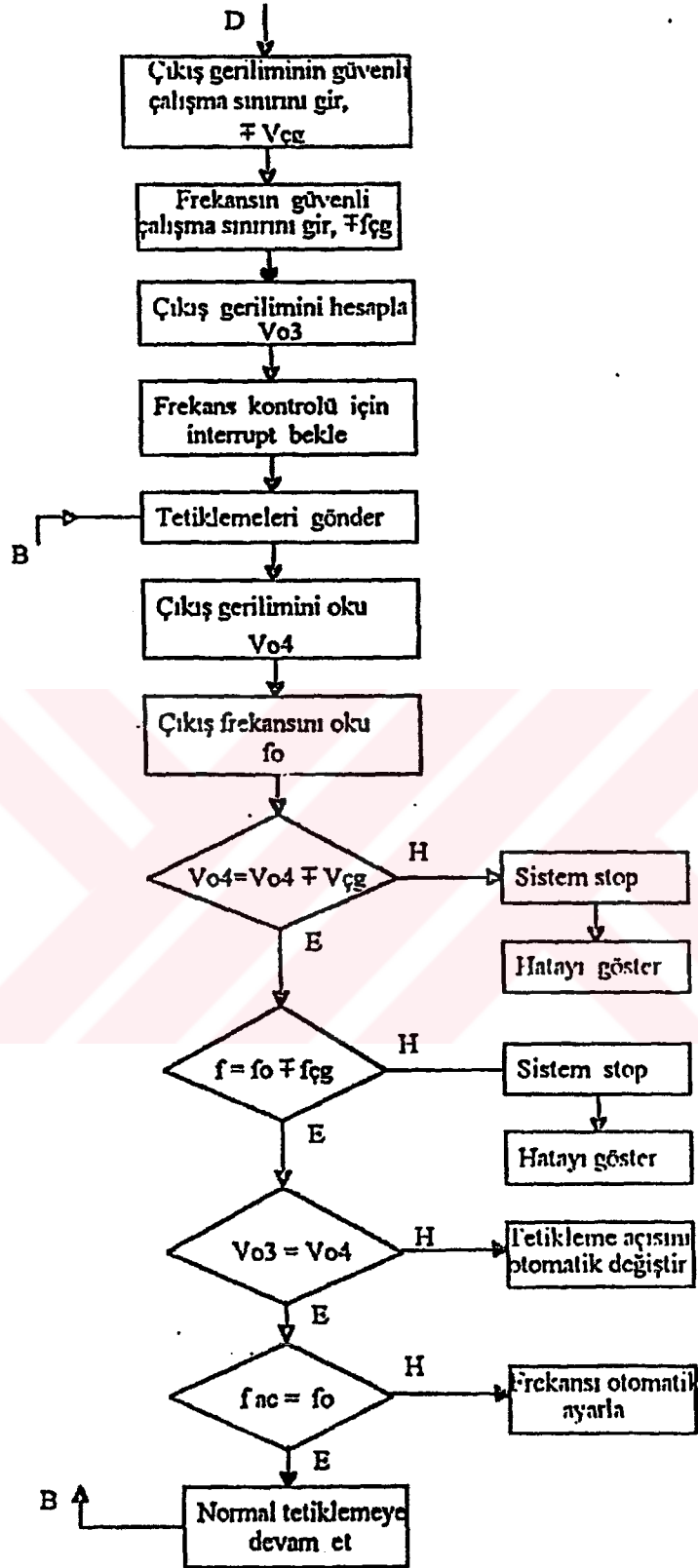
Ek E`de, yapılan pratik çalışmada kullanılan devre şemaları verilmiştir.

Ek F`de Bulanık mantık kullanılarak MATLAB`da hazırlanmış benzetim modeli verilmiştir.

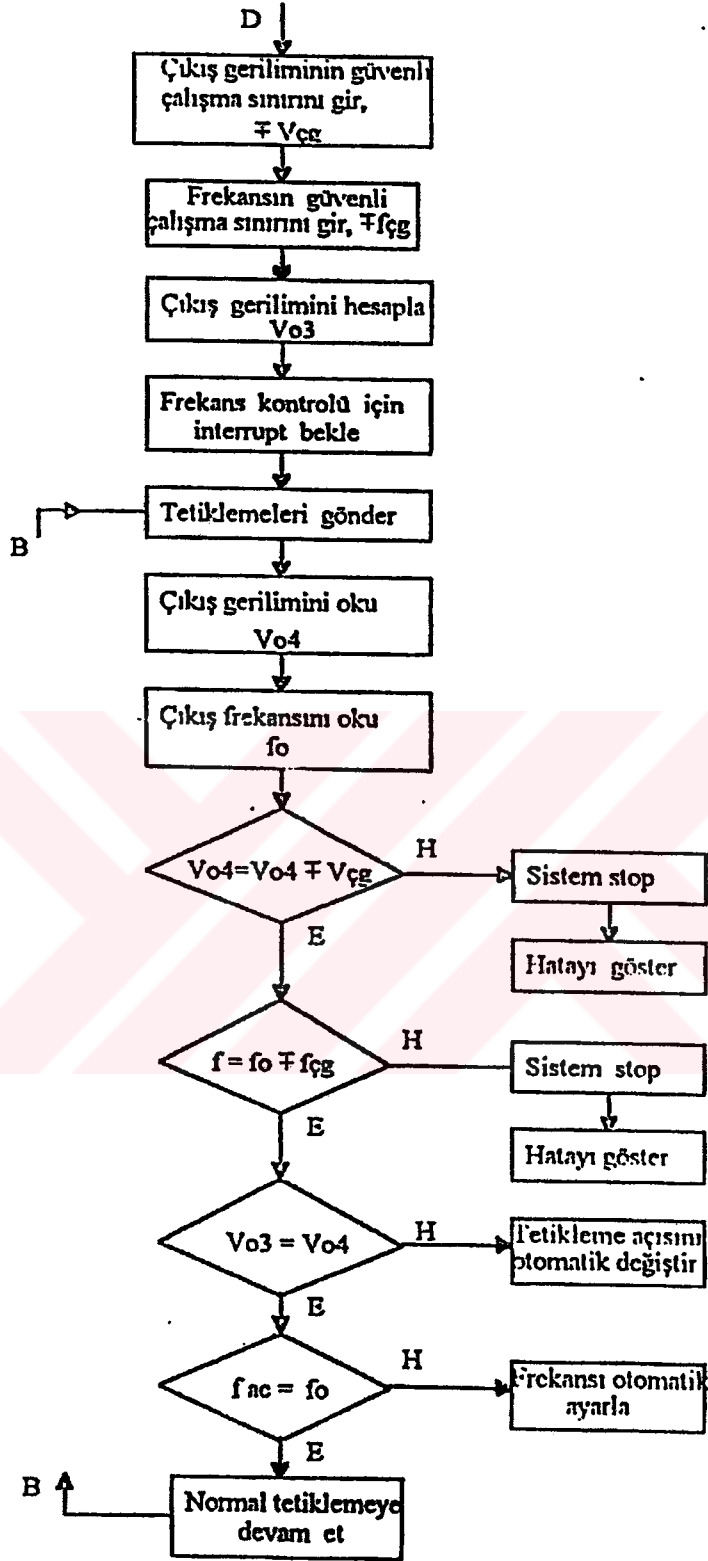
EK - A



Şekil A.1. Deneysel olarak gerçekleştirilen programın akış diyagramı



Şekil A.2. Deneysel olarak gerçekleştirilen programın akış diyagramı (Devamı)



Şekil A.3. Deneysel olarak gerçekleştirilen programın akış diyagramı (Devamı)

## EK - B

```
#include <dos.h>

#include <conio.h>

#include <stdio.h>

#include <string.h>

#include "AD1200.h"

#include "AD1200.inc"

unsigned char OldIMRMask, /* Interrupt Mask Register storage variable */

    IRQ, /* IRQ used to generate interrupts */

    tr1,tr2,td,flag;

unsigned int intper,alfa , dbuz; //tetikleme acısı,tetikleme darbe uzunlugu

float feedback;

void interrupt (*OldINT) (void); /* Original interrupt storage */

/*****

AToDConversion

The AToDConversion function samples from the specified channel and returns

the digitized value.

*****/

int AToDConversion(unsigned char Channel)

SetChannel(Channel); /* Set the channel from which to sample */

StartConversion(); /* Start a conversion */

while (ConversionDone() == 0); /* Wait until data is ready */
```



```
return(ReadData());  /* Return digitized value */
```

```
)
```

```
/******
```

```
ClearBitInIMR
```

This function clears a bit in the 8259 Interrupt controller that will enable interrupts on the appropriate IRQ line. For example to enable

interrupts from IRQ 3 bit 3 must be cleared. Remember that bits are numbered 0..7.

```
*****/
```

```
void ClearBitInIMR(unsigned char Bit)
```

```
{
```

```
unsigned char Twos[8] = { 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128};
```

```
unsigned char OldIMR, IMR;
```

```
OldIMR = inportb(0x21);  /* Read in current IMR */
```

```
IMR = OldIMR & (255 - Twos[Bit]); /* Clear desired bit */
```

```
outportb(0x21, IMR);  /* printf out new IMR */
```

```
}
```

```
*****/
```

```
SetBitInIMR
```

This function sets a bit in the 8259 Interrupt controller that will mask out interrupts on the appropriate IRQ line. For example to disable

interrupts from IRQ 3 bit 3 must be set. Remember that bits are numbered 0..7.

```

*****/

void SetBitInIMR(unsigned char Bit)

{

unsigned char Twos[8] = { 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128};

unsigned char OldIMR, IMR;

OldIMR = inportb(0x21);    /* Read in current IMR */

IMR = OldIMR | Twos[Bit];  /* Set desired bit */

outportb(0x21, IMR);      /* cprintf out new IMR */

}

```

```

/*****

```

**VectorInterrupt**

The VectorInterrupt function is used to assign a new vector for the designated interrupt.

```

*****/

```

```

void VectorInterrupt(int InterruptNumber, void interrupt (*ISR) ()

```

```

{

disable();    /* Don't want int called during revector */

setvect(InterruptNumber, ISR); /* Set the vector */

enable();     /* Reenable interrupts */

}

```

```

unsigned int ReadTimer(unsigned char Timer)

```

```

{

unsigned char LSB, MSB;

```

```

LSB = inportb(BaseAddress+ Timer);

MSB = inportb(BaseAddress+ Timer);

return( (MSB * 256) + LSB);

}

```

```

void SetTimer_B(unsigned char mode, float Rate)

{

ClockMode(TIMER_A-8, 2);

ClockDivisor(TIMER_A-8, 1); //4 MHz all time clock

ClockMode(TIMER_B-8, mode);

ClockDivisor(TIMER_B-8, Rate);

}

```

```

void SetTimer_C(unsigned char mode, float Rate)

{

ClockMode(TIMER_C-8, mode);

ClockDivisor(TIMER_C-8, Rate);

}

```

```

void tetikle(int iodegeri)

{

unsigned int i, say=2; //

while(say>0)

{

```

```

//WriteDigitalIO(2, 3);

WriteDigitalIO(0, iodegeri);

//WriteDigitalIO(2, iodegeri+3);

i=10*dbuz; while(i>0) i--; //gecikme sağla

WriteDigitalIO(0, 0); //darbeyi kaldır

i=10*dbuz; while(i>0) i--; //gecikme sağla

say--;

}

}

int tristorno(void)

{

float r,s,t;

unsigned char rst=0,trnum;

r=DigitalToReal(AToDConversion(0));if (r>2.5) rst=rst|1;

s=DigitalToReal(AToDConversion(1));if (s>2.5) rst=rst|2;

t=DigitalToReal(AToDConversion(2));if (t>2.5) rst=rst|4;

SetChannel(3); // Set channel 3

SetExternalTrigger(DISABLED); // Use internal/software trigger

StartConversion(); // Start a conversion

while (ConversionDone() == 0); // Wait until data is ready

feedback=DigitalToReal(ReadData()); //geribeslemeyi oku

if (rst==1) trnum=12; //T1,T2 (4+8) =(0000 1100)=12

if (rst==3) trnum=24; //T2,T3 (8+16) =(0001 1000)=24

```

```

if (rst==2) trnum=48; //T3,T4 (16+32)=(0011 0000)=48

if (rst==6) trnum=33; //T4,T5 (32+1)=(0100 0001)=33

if (rst==4) trnum=129; //T5,T6 (1+128)=(1000 0001)=129

if (rst==5) trnum=132; //T6,T1 (128+4)=(1000 0100)=132

return(trnum);

}

void interrupt NewISR(void)

{

disable(); //kesme izni verme

intper=65535-ReadTimer(TIMER_C); //o anki zam.C.yi oku

SetTimer_C(4,65535); //Zam.C'yi max değere set et

if (tr1>0)

{

if (ReadTimer(TIMER_B)>alfa) //Zam.B == 0 ? alfa kadar gecikme oldumu?

{

SetTimer_C(4,65535); tetikle(tr1); tr1=0;

if (tr2>0) //tr1 tetiklenme suresi içinde ikinci tetiklenme

{ //süresi başlatıldımı?

SetTimer_B(4,alfa-(65535-ReadTimer(TIMER_C)));

SetTimer_C(4,65535);

tr1=tr2; tr2=0;

goto a;

}

}

}

```

```

        goto a;
    }

    else { SetTimer_C(4,65535); tr2=tristorno(); goto a;}

    }

else {

        //kesme geldi!

    SetTimer_B(4,alfa); SetTimer_C(4,65535); //alfa deşeri Zam.B'ye

    tr1=tristorno(); //tristor tetik. nosunu bellekle!

    }

a:

outportb(BaseAddress + CLEAR_BOARD, 0); /* Clear Interrupt on AD1200 */

outportb(0x20, 0x20); /* End of interrupt command to controller */

enable(); //kesmelere izin ver!

}

```

/\*\*\*\*\*\*

The ConfigureIRQ procedure saves the startup Interrupt Mask Register (IMR) and the startup value of the interrupt vector, then sets the interrupt vector to point at the NewISR procedure. Remember to use the RestoreStartupIRQ procedure (below) before exiting your program to restore things to their original state.

\*\*\*\*\*/

```

void ConfigureIRQ(unsigned char IRQ)

{

    SetIRQStatus(ENABLED);

```

```
OldIMRMask = inportb(0x21); /* Save original IMR Mask */
```

```
OldINT = getvect(IRQ + 8); /* Save startup vector */
```

```
VectorInterrupt(IRQ + 8, NewISR); /* Set New vector */
```

```
}
```

```
*****
```

The RestoreStartupIRQ procedure restores the startup IMR and interrupt vectors that were saved in the ConfigureIRQ procedure. Do not call this procedure without first calling the ConfigureIRQ procedure.

```
*****/
```

```
void RestoreStartupIRQ(void)
```

```
{
```

```
disable(); /* Don't want interrupts occurring
```

```
while switching vectors */
```

```
outportb(0x21, OldIMRMask); /* Reset IMR to startup value */
```

```
VectorInterrupt(IRQ + 8, OldINT); /* Revector original interrupt */
```

```
enable(); /* Reenable interrupts */
```

```
}
```

```
*****
```

```
ProgramTitle
```

```
*****/
```

```
void ProgramTitle(char St[80])
```

```
{
```

```
gotoxy(1,1); clrscr();
```

```

printf("HVDC Inverter&Converter Program V6");

gotoxy(80 - strlen(St), 1);

printf(St);
}

void main(void)

{

float vset;

char c;

unsigned int max=0,min=65535,i;

IRQ = 3;

InitializeBoardSettings(592, 10.0, BIPOLAR); /* Set base address and volt range*/

clrscr();

ProgramTitle("Interrupt driven");

gotoxy(1, 25);

printf("Ercan Ölçer");

ResetBoard();      /* Reset the board */

ConfigureIOPorts(OUTPUT,INPUT);

ConfigureIRQ(IRQ);      /* setup the IRQ */

//SetUserClock(100);

SetExternalTrigger(DISABLED); /* Trigger from software */

ClearBitInIMR(IRQ);      /* Enable interrupts on specified IRQ */

tr1=0;

tr2=0;

```



```
td=1;
```

```
SetIRQStatus(ENABLED); /* Allow interrupts from AD1200 */
```

```
/*
```

The following loop displays the value read from the A-D board during the last interrupt. If you have a signal connected to channel 0 on your board you will see the voltage of that signal displayed. Note that ADValue is never updated inside of this loop yet its value changes with your signal.

This is because ADValue is updated in the interrupt routine.

```
*/
```

```
alfa=20000/2; //default alfa degeri 1000
```

```
dbuz=50; //default darbe uzunlugu 50
```

```
vset=1.9 ; // set value 20 volt
```

```
gotoxy( 20,10);
```

```
WriteDigitalIO(2,3);
```

```
printf("<q>uit");
```

```
gotoxy( 20,11);
```

```
printf("-----");
```

```
gotoxy( 20,12); printf("current <1>alfa= %6u",alfa*2);
```

```
gotoxy( 20,13); printf("current <2>dbuz= %6u",dbuz);
```

```
gotoxy( 20,14); printf("current <3>vset= %6.2f",vset);
```

```
gotoxy( 20,15); printf("Feedback Value = ");
```

```
gotoxy( 20,16); printf("Curr. Int Time = ");
```

```
gotoxy( 20,17); printf("Max Int Value = ");
```

```

gotoxy( 20,18); printf("Min Int Value = ");

gotoxy( 20,19); printf("Max Ovrflw Int = ");

gotoxy( 20,20); printf("Min Ovrflw Int = ");

while(c!='q')

    {

        if (!kbhit())

            {

                if (feedback>vset)

                    {

                        alfa=alfa+100;

                        if (alfa>12500) alfa=12500;

                    }

                else {

                    alfa=alfa-100;

                    if (alfa<7500) alfa=7500;

                }

            }

        if (max<intper) max=intper;

        if (min>intper) min=intper;

        if (min<(alfa-alfa*0.15)) { gotoxy(37,20); printf("%6u",min);}

        if (max>(alfa+alfa*0.15)) { gotoxy(37,19); printf("%6u",max);}

        if (i<1000) i++;

        else {

            gotoxy(37,15); printf(" ");

```

```

gotoxy(37,15); printf("%6.2f",feedback);

gotoxy(37,17); printf(" ");

gotoxy(37,17); printf("%6u",max);

gotoxy(37,18); printf(" ");

gotoxy(37,18); printf("%6u",min);

gotoxy(37,16); printf(" ");

gotoxy(37,16); printf("%6u",intper);

gotoxy(37,12); printf(" ");

gotoxy(37,12); printf("%6u",(alfa)*2);

max=0; min=65535; i=0;

}

}

else {

c=getch();

if (c=='1')

{

gotoxy( 20,12); printf("new ");

gotoxy( 38,12); scanf("%u",&alfa); alfa=alfa/2;

max=0;

gotoxy( 20,12); printf("current");

gotoxy(37,12); printf("%6u",alfa*2);

}

if ((alfa>0)&&(c=='2'))

```

```

        {

        gotoxy( 20,13); printf("new ");

        gotoxy( 38,13); scanf("%u",&dbuz);

        gotoxy( 20,13); printf("current");

        gotoxy(37,13); printf("%6u",dbuz);

        }

    if ((alfa>0)&&(c=='3'))

        {

        gotoxy( 20,14); printf("new ");

        gotoxy( 38,14); scanf("%f",&vset);

        gotoxy( 20,14); printf("current");

        gotoxy(37,14); printf("%6.2f",vset);

        }

    }
}

```

```
SetIRQStatus(DISABLED);
```

```
RestoreStartupIRQO; /* Restore interrupt system to startup
```

```
configuration */
```

```
clrscr();
```

```
}
```

**EK - C**

**AD 1200 KONTROL KARTININ ÖZELLİKLERİ**

Analog girişler :

16 giriş

Giriş direnci > 10 Mohm

Giriş aralığı  $\pm 5$ ,  $\pm 10$  V veya 0, +10 V

Çevrim hızı  $5\mu\text{sn}$

A/D Dönüştürücü :

Çözünürlük 12 bit

Çevrim hızı  $5\mu\text{sn}$

Hız 125 kHz

Sayısal Giriş / Çıkışlar :

16 giriş / çıkış

$V_H = 4.2 \text{ V, min}$

$V_L = 0.45 \text{ V, mak}$

Giriş yük akımı  $\pm 10 \mu\text{A}$

Sayısal / Analog Dönüştürücü

Analog çıkış 2 Adet

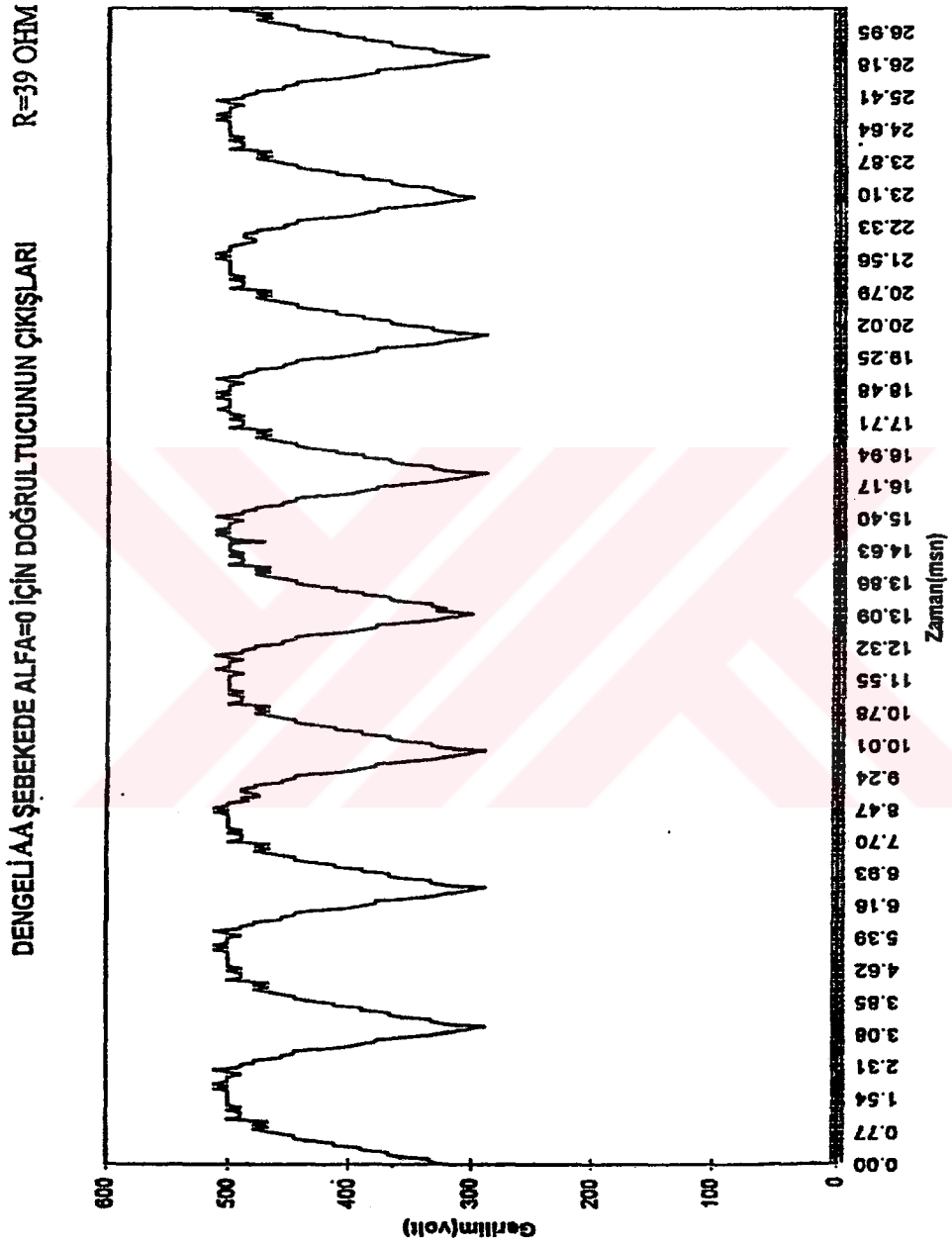
Çözünürlük 12 bit

Çıkış aralığı 0, +5,  $\pm 5 \text{ V}$  veya 0, +10 V

16 bit 3 adet Timer

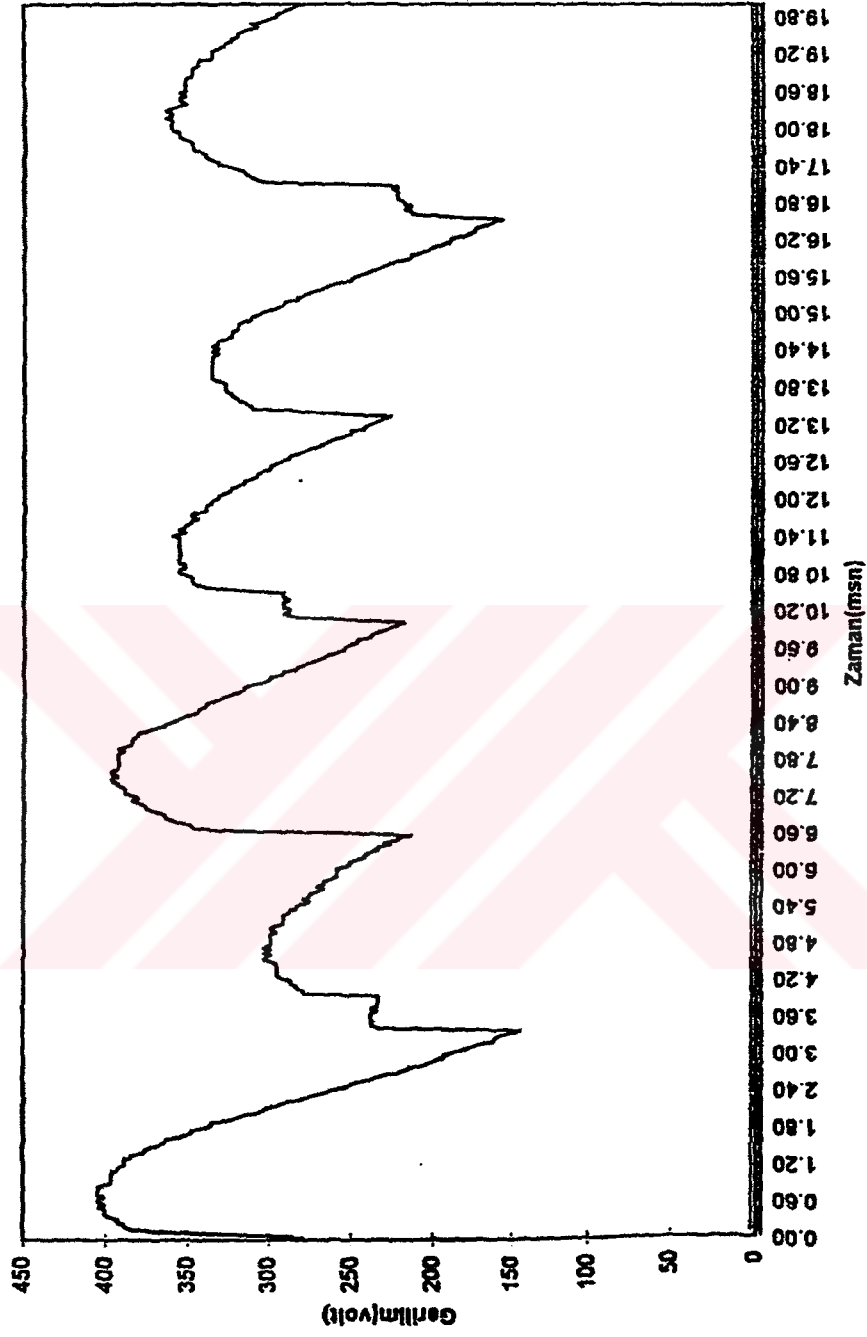
Dışarıdan ya da içeriden çalışabilen 8 Mhz sayıcı girişi

EK - D



Şekil D.1. Dengeli AA Şebekede alfa=0 için doğrultucunun çıkışları R=39 ohm

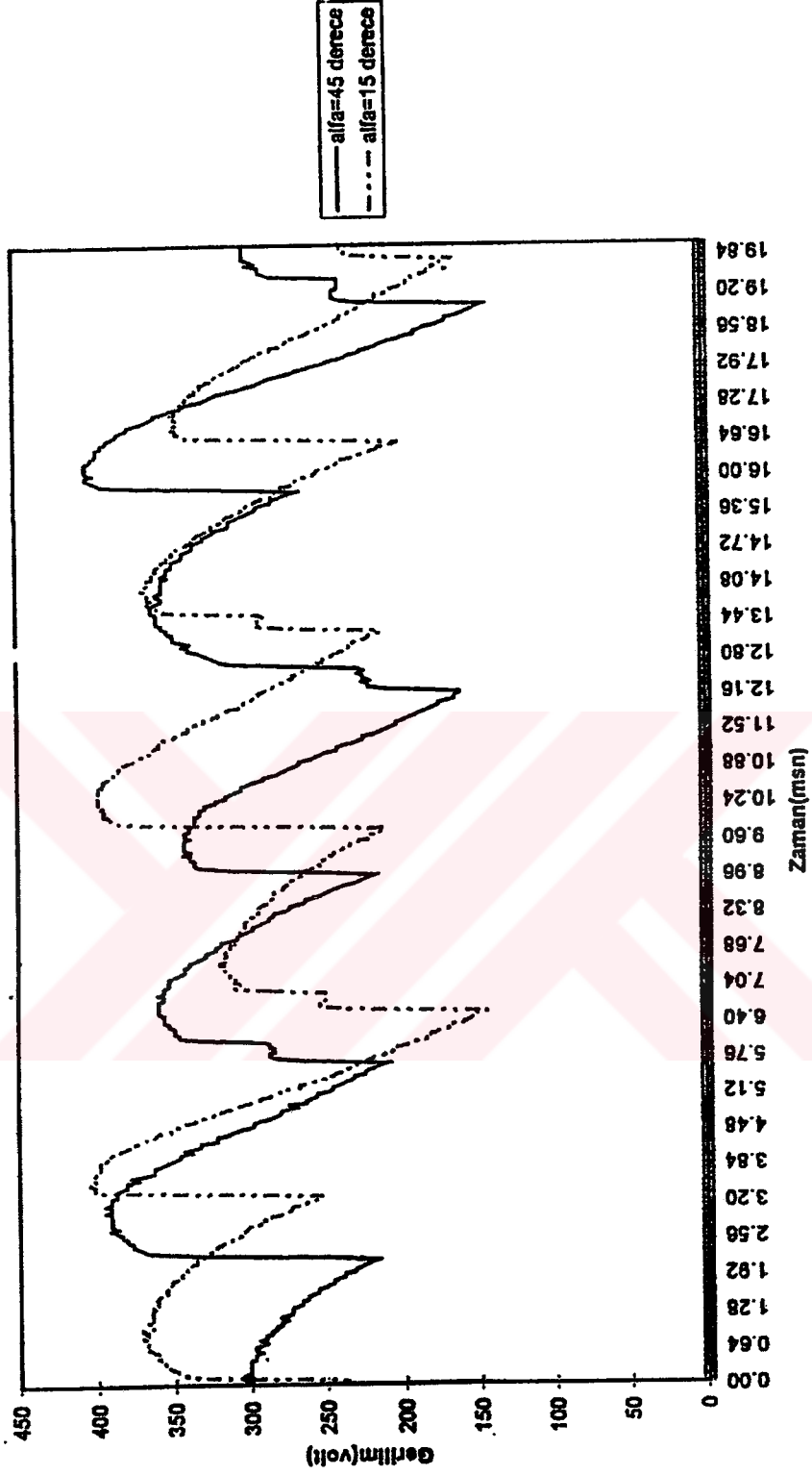
DİRENÇ YÜKÜNDE DENGESİZ AA GİRİŞTE ALFA=10 DERECEDE DÖNÜŞTÜRÜCÜ ÇIKIŞLARI R=39 OHM



Şekil D.2. Direnç yükünde dengesiz AA girişte alfa=10 dereceden dönüştürücü çıkışları R=39 ohm

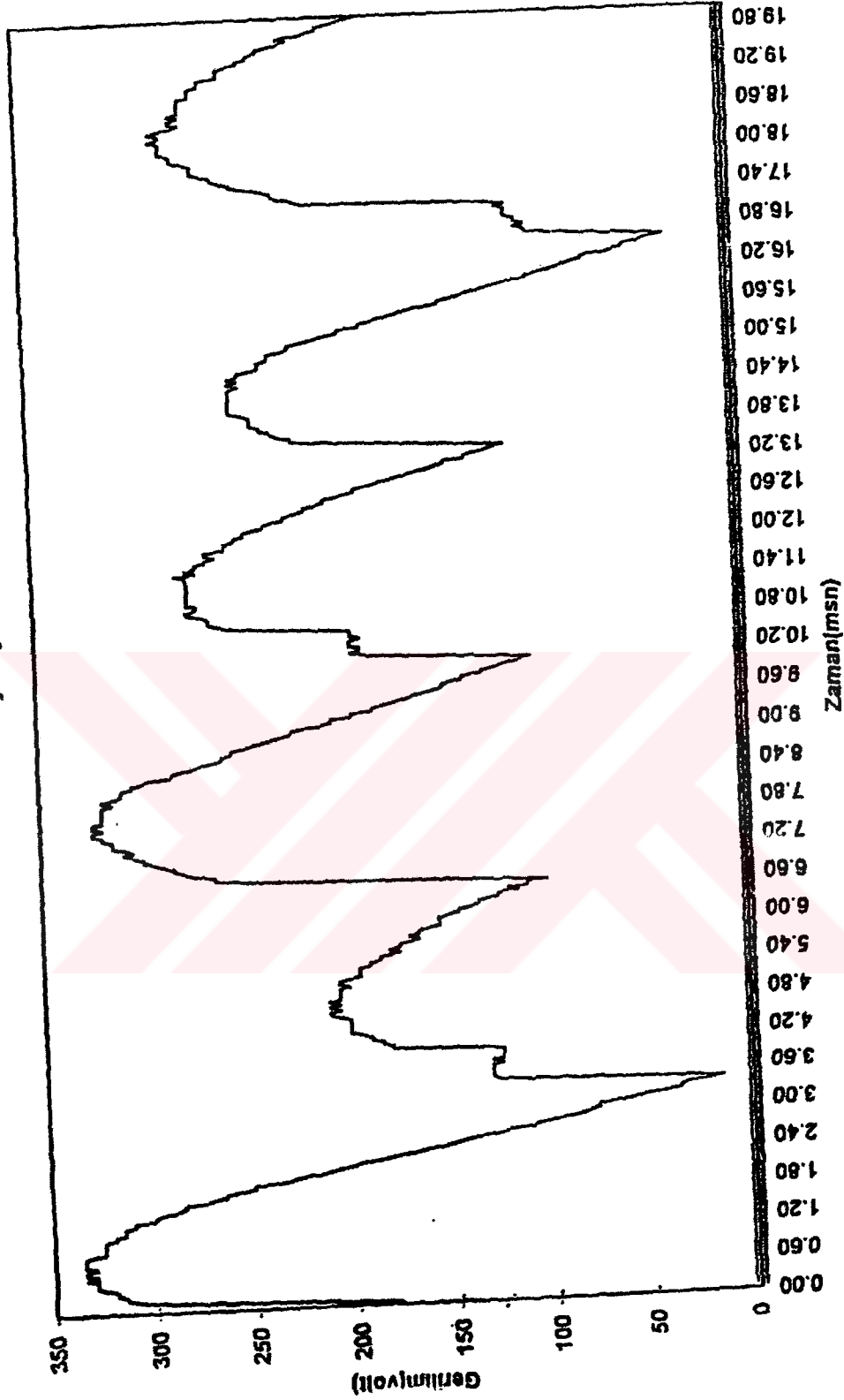


DİRENÇ YÜKÜNDE DENGESİZ AA GİRİŞLİ SINYALIN ALFA=15 VE ALFA=45 DERECEDE R=39 OHM DÖNÜŞTÜRÜCÜ ÇIKIŞLARI



Şekil D.3. Direnç yükünde dengesiz AA girişli sinyalin alfa= 15 ve alfa=45 derecede dönüştürücü çıkışları R=39 ohm

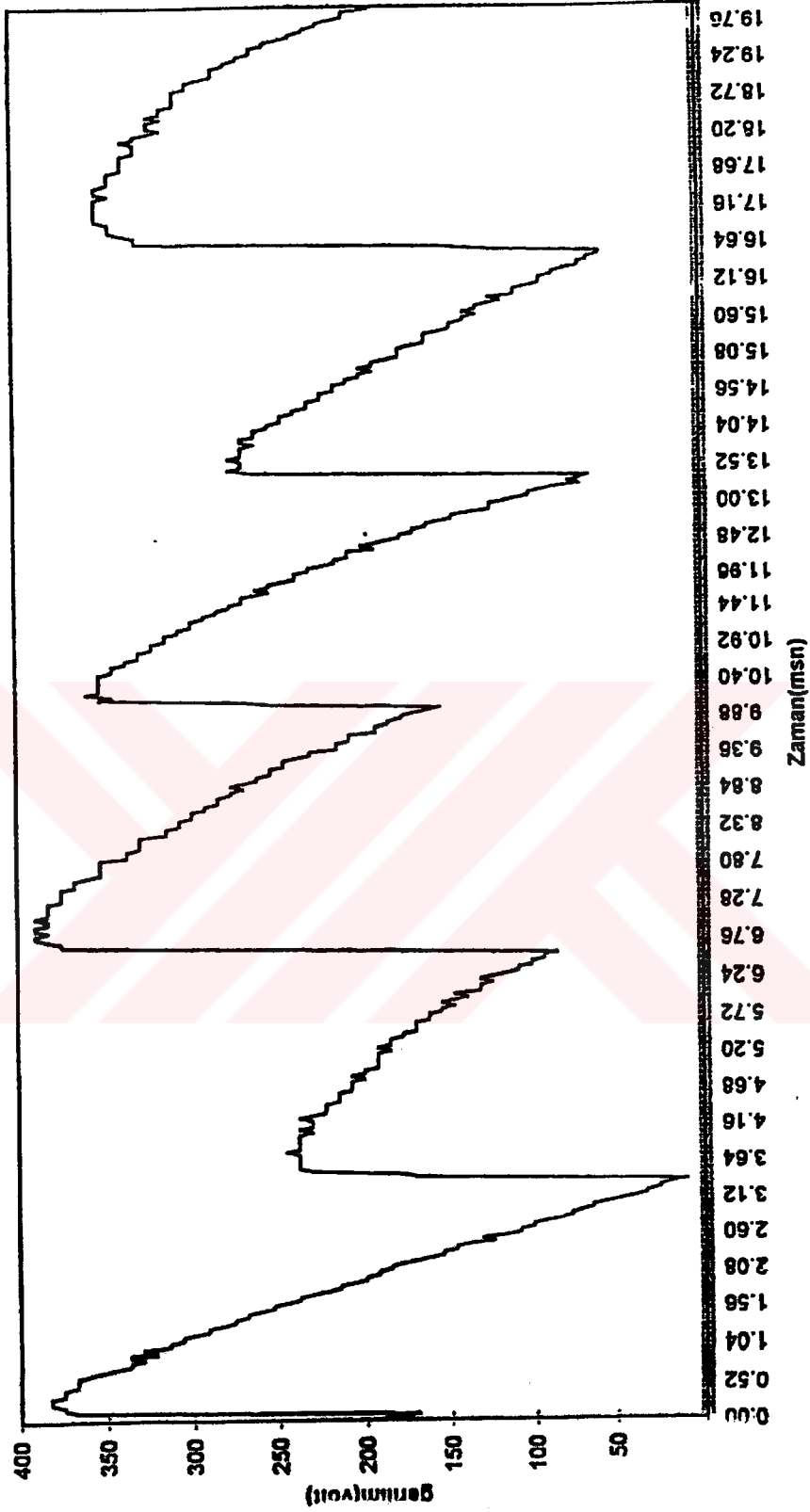
DİRENÇ-ENDÜKTANS YÜKÜNDE DENGESİZ AA GİRİŞTE ALFA=10 DERECEDE DÖNÜŞTÜRÜCÜ  
ÇIKIŞLARI R=47 OHM L=100 mH



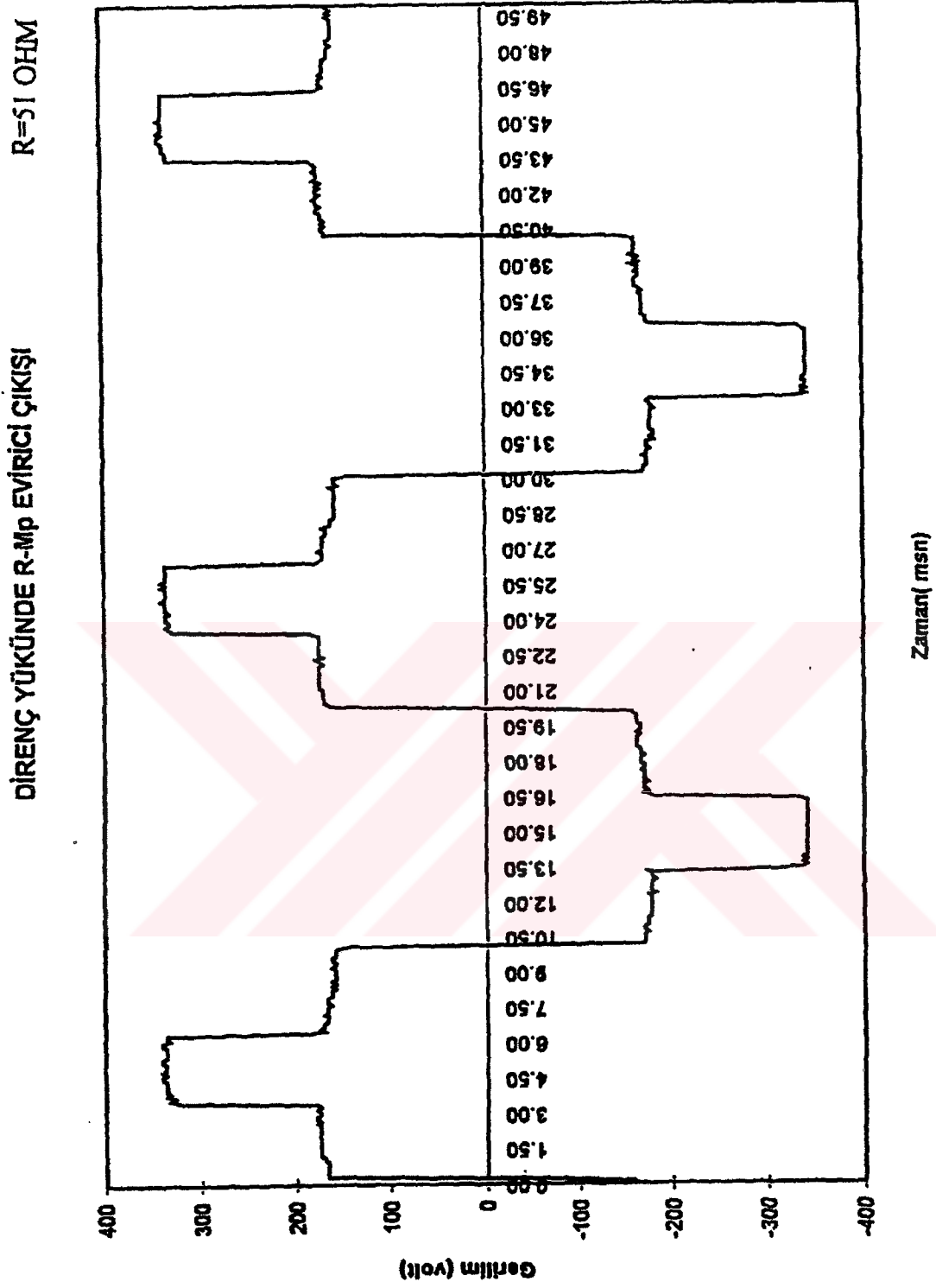
Şekil D.4. Direnç-endüktans yükünde dengesiz AA girişte alfa=10 derecede dönüştürücü çıkışları R=47 ohm

DENGESİZ AA ŞEBEKENİN ENDÜKTANS YÜKÜNDE ALFA=60 DERECE AÇIDA TETİKLENMİŞ  
DÖNÜŞTÜRÜCÜ ÇIKIŞI

L=82 mH



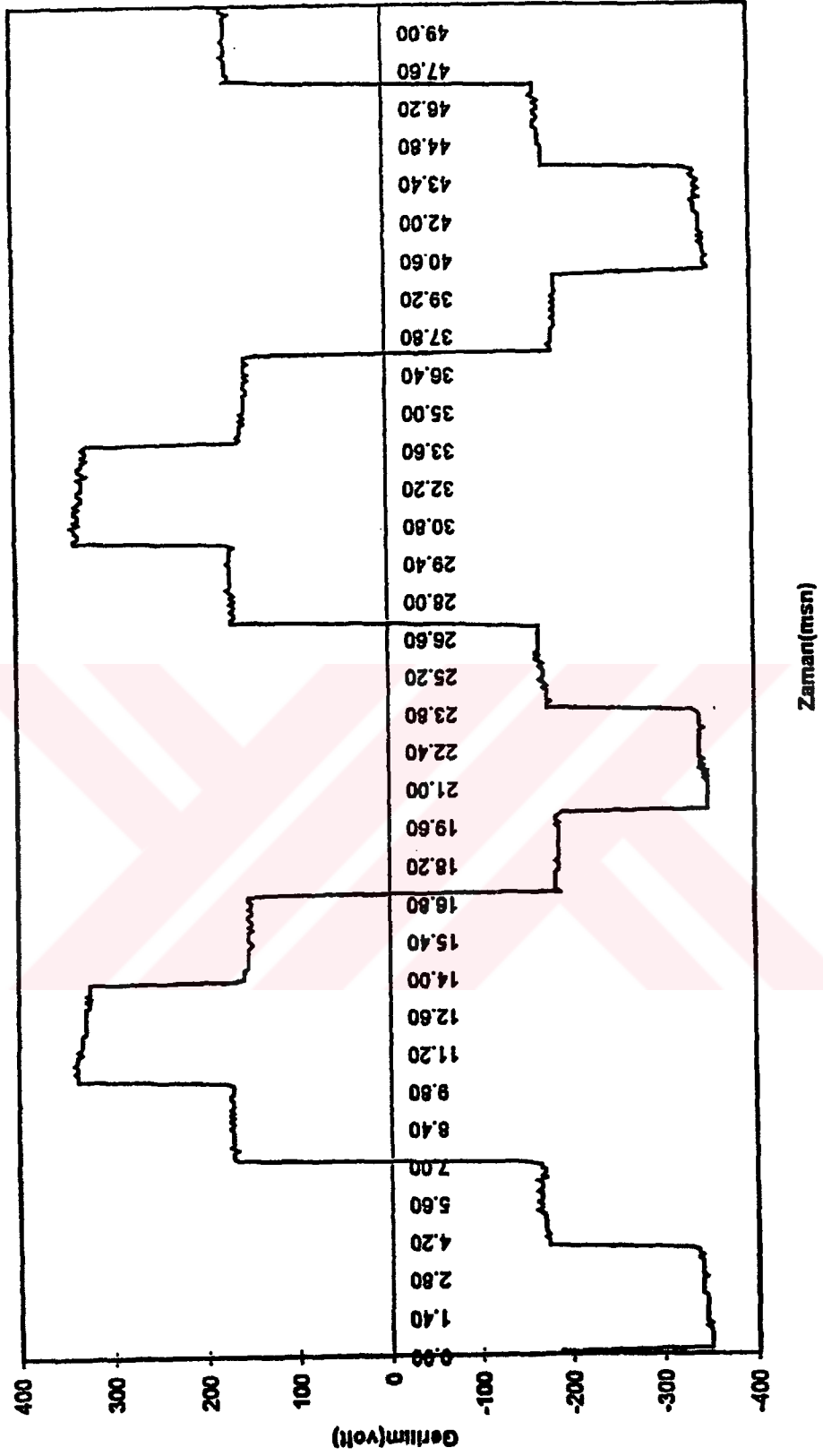
Şekil D.5. Dengesiz AA şebekenin endüktans yükünde alfa=60 derece için doğrultucunun çıkışları L=82 mH



Şekil D.6. Direnç yükünde R-Mp evirici çıkışları

R=51 OHM

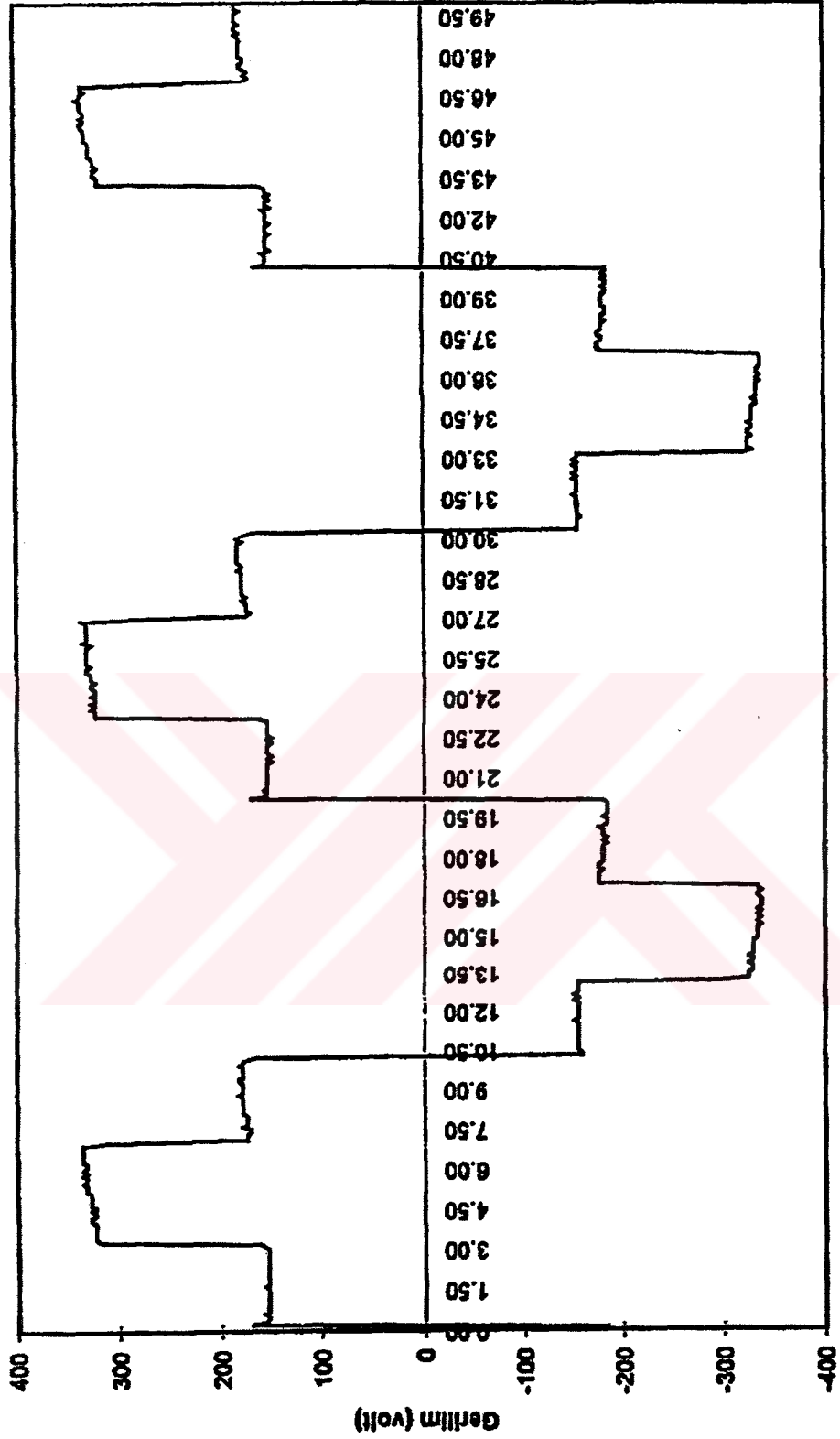
R YÜKÜNDE S-Mp EVİRİCİ ÇIKIŞI



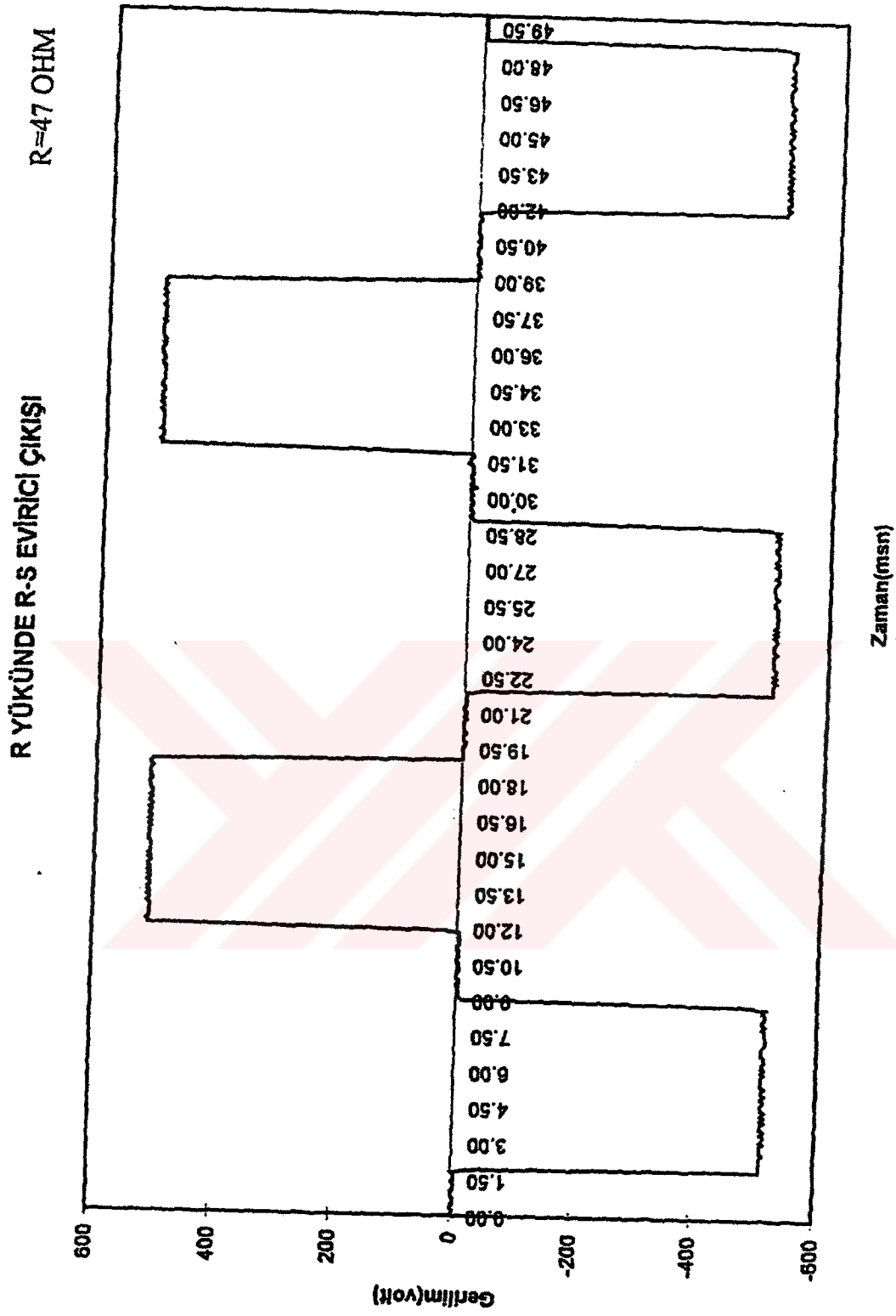
Şekil D.7. R yükünde S-Mp evirici çıkışları R=51 ohm

R=51 OHM

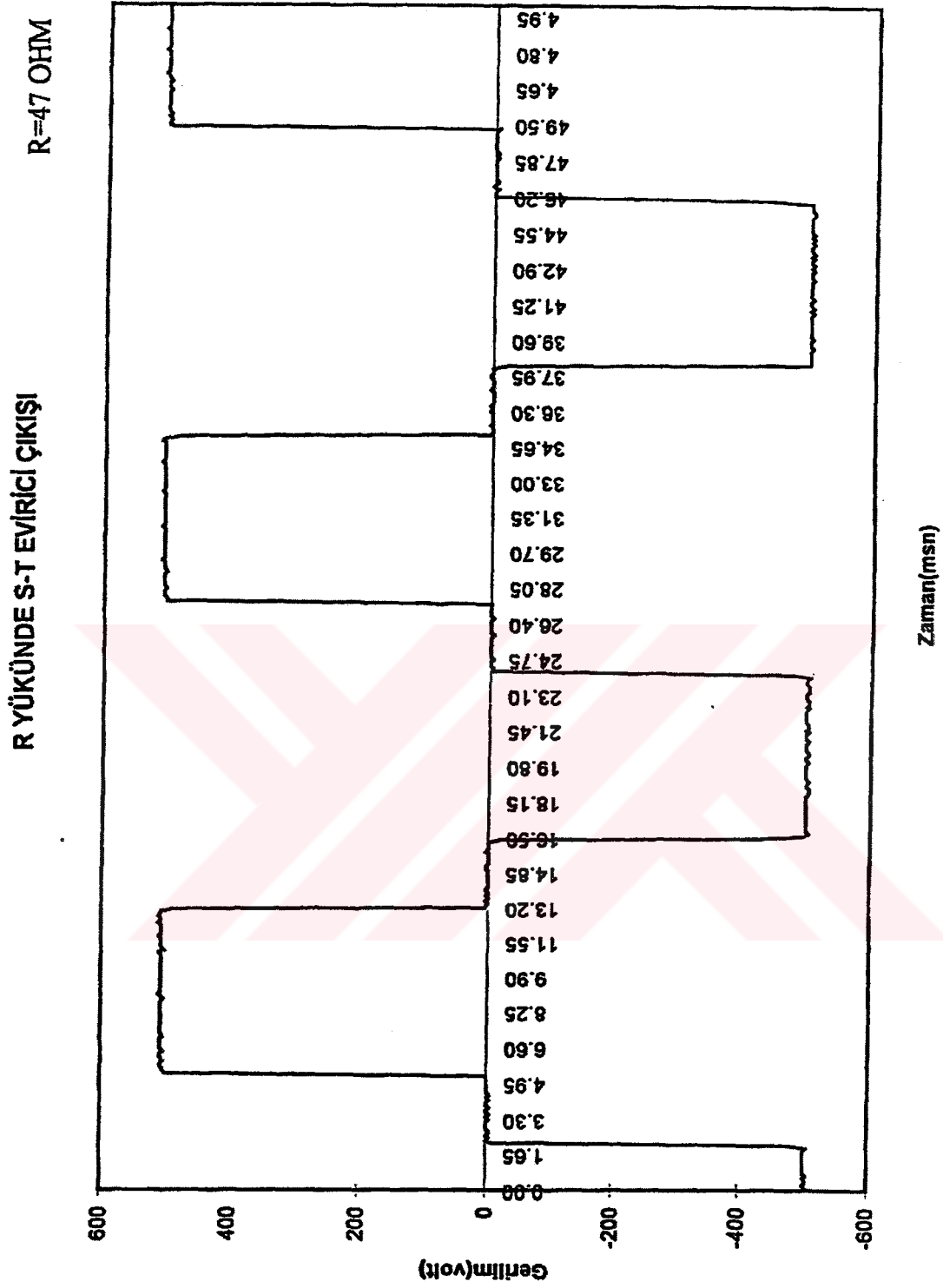
DİRENÇ YÜKÜNDE T-Mp EVİRİCİ ÇIKIŞI



Şekil D.8. Direnç yükünde T-Mp evirici çıkışları R=51 ohm



Şekil D.9. R yükünde R-S evirici çıkışları R=47 ohm

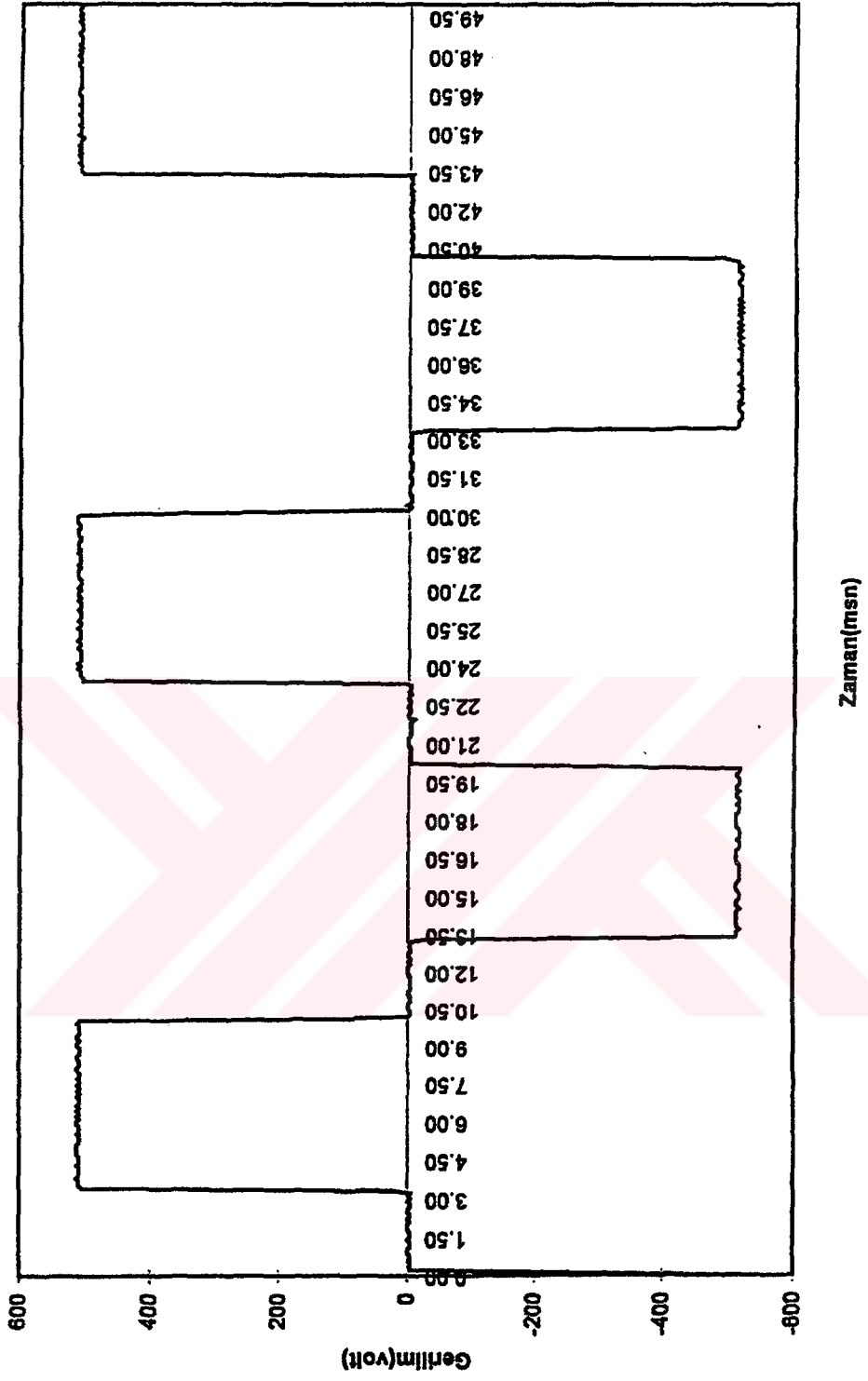


Şekil D.10. R yükünde S-T evirici çıkışı R=47 ohm

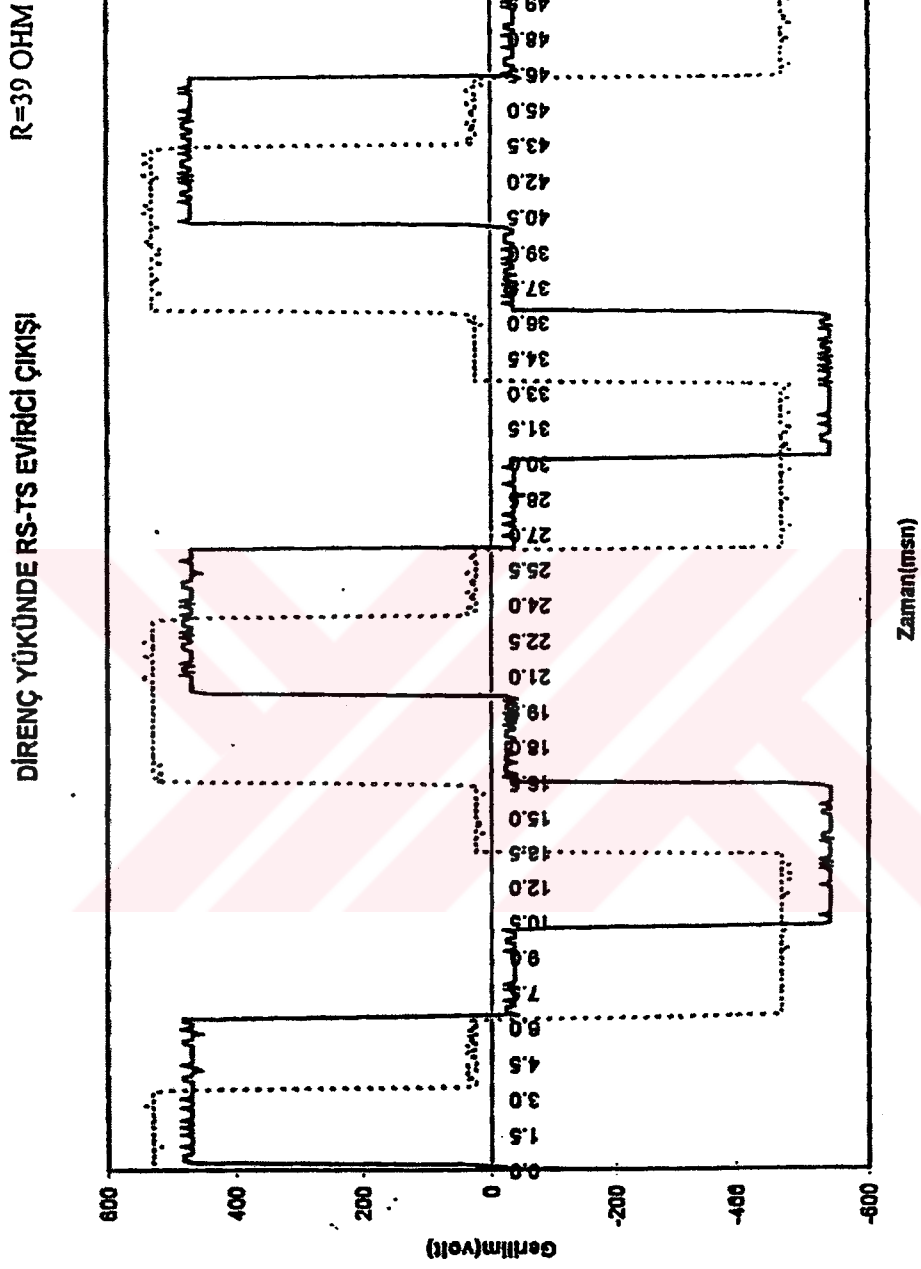


R=47 OHM

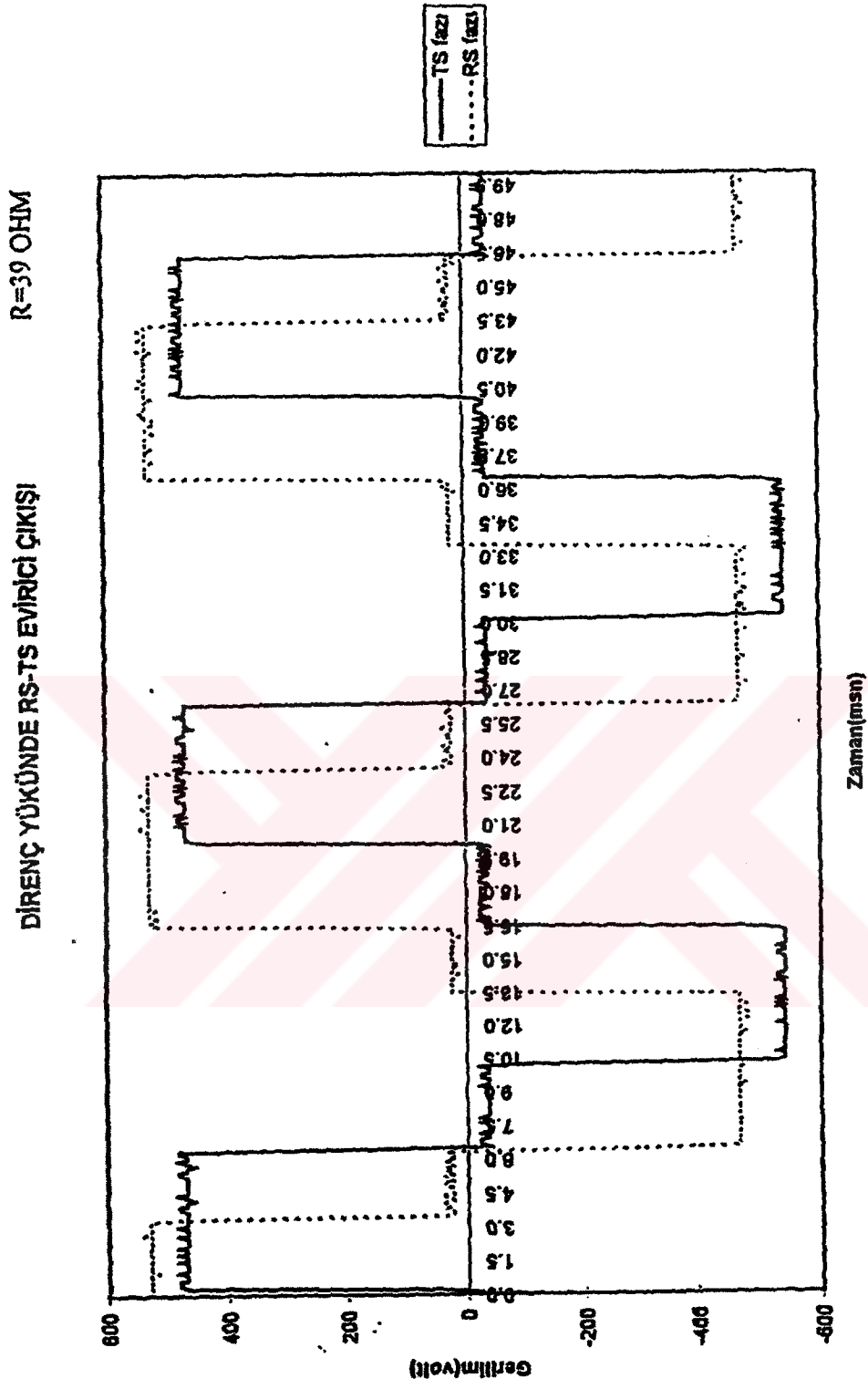
DİRENÇ YÜKÜNDE T-R EVİRİCİ ÇIKIŞI



Şekil D.11. R yükünde T-R evirici çıkışı R=47 ohm

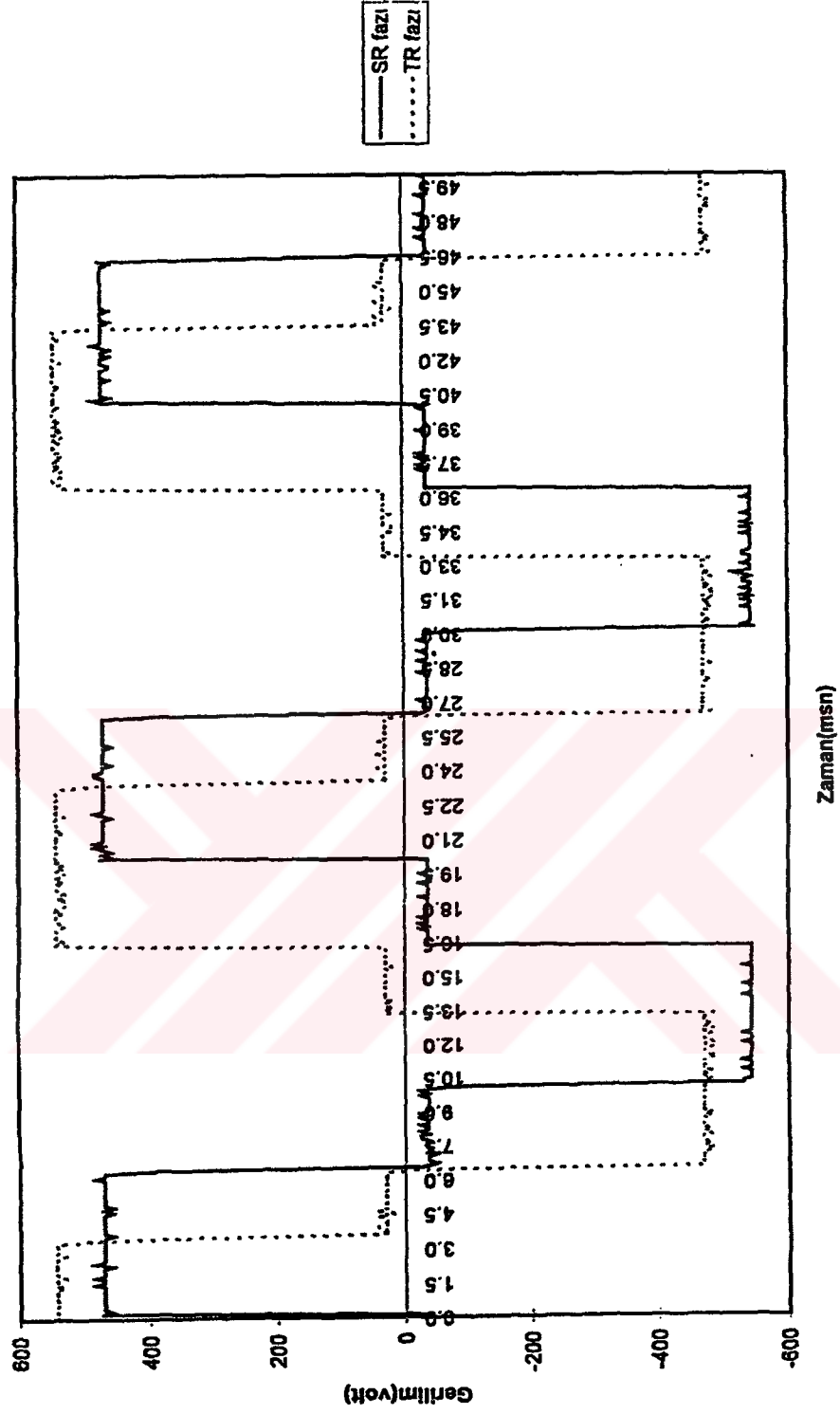


Şekil D.12. R yükünde RS-TS evirici çıkışı R=39 ohm

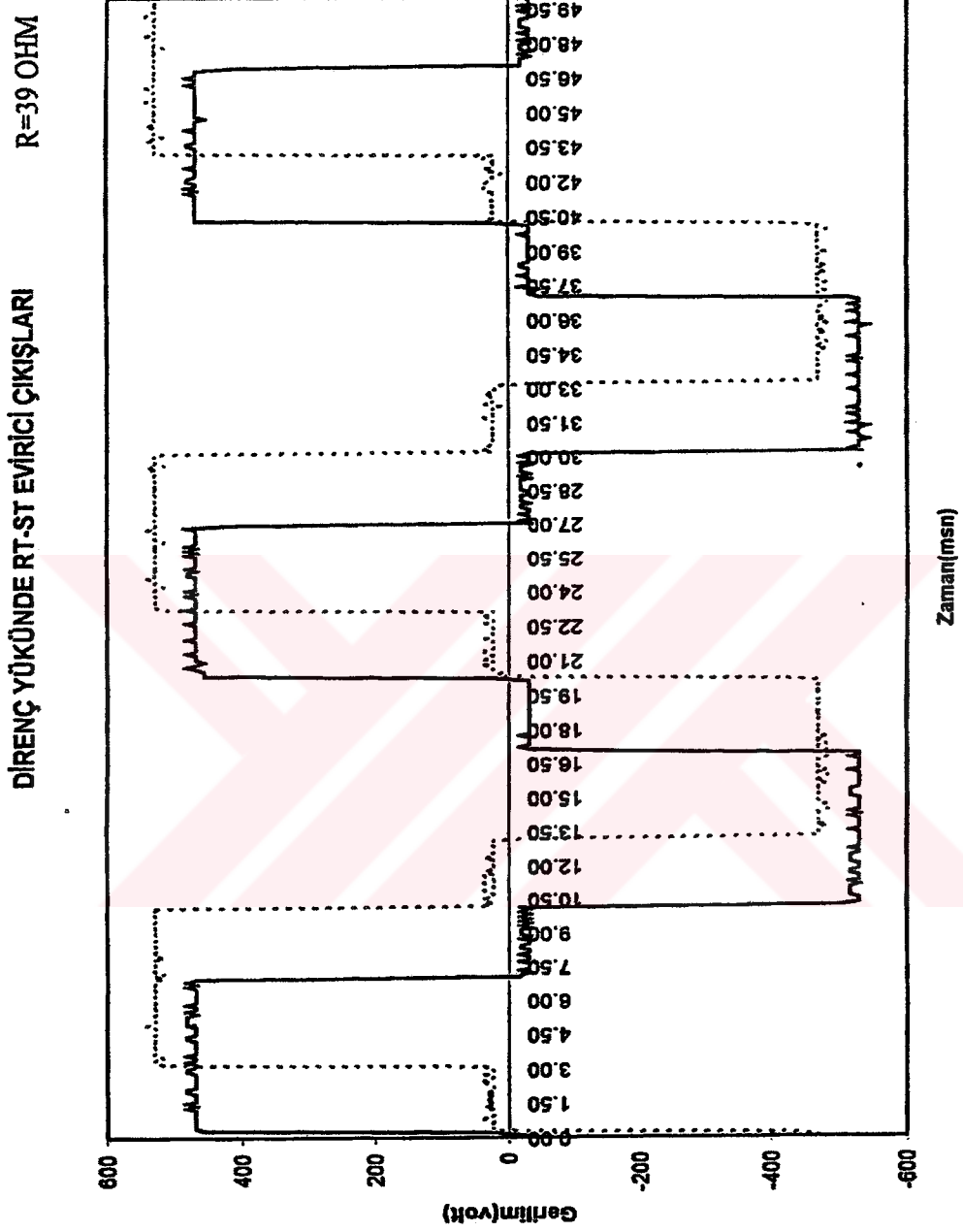


Şekil D.13. R yükünde RS-TS evirici çıkışı R=39 ohm

DİRENÇ YÜKÜNDE TR-SR EVİRİCİ ÇIKIŞLARI R=39 OHM

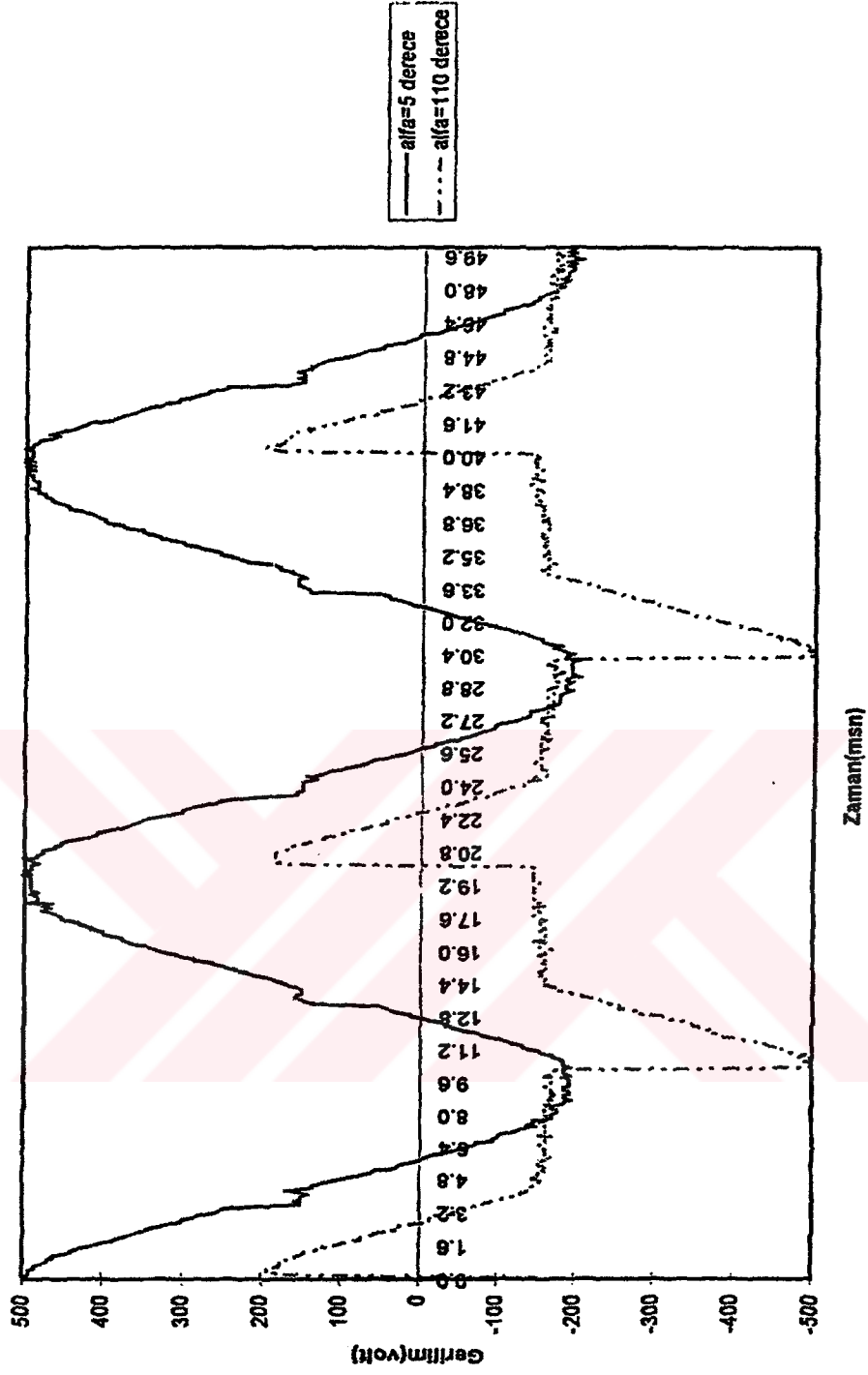


Şekil D.14. R yükünde TR-SR evirici çıkışı R=39 ohm



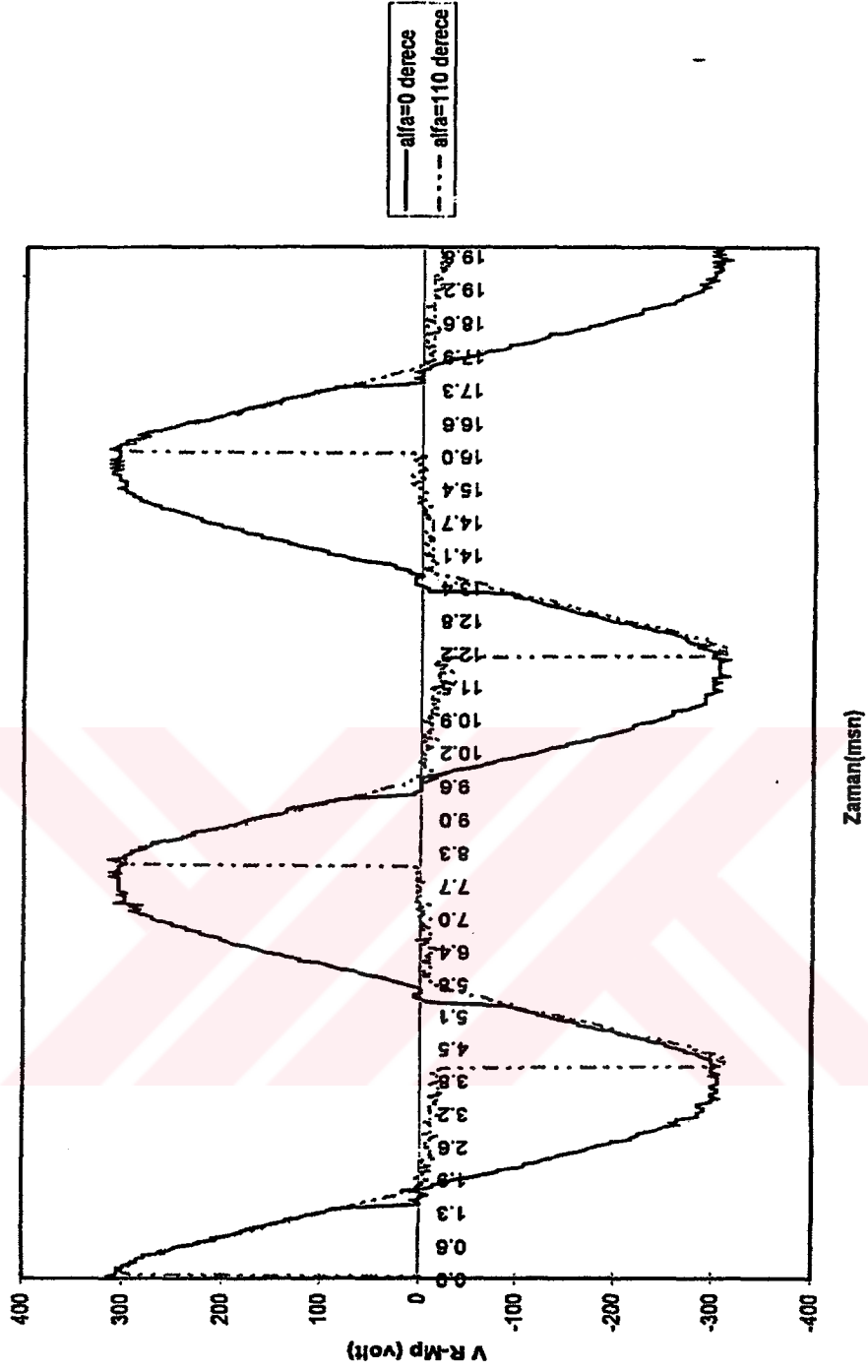
Şekil D.15. R yükünde RT-ST evirici çıkışı R=39 ohm

ENDÜKTANS YÜKÜNDE ALFA=5 VE ALFA=110 DERECEDE EVİRİCİ ÇIKIŞLARI  $L=82$  mH



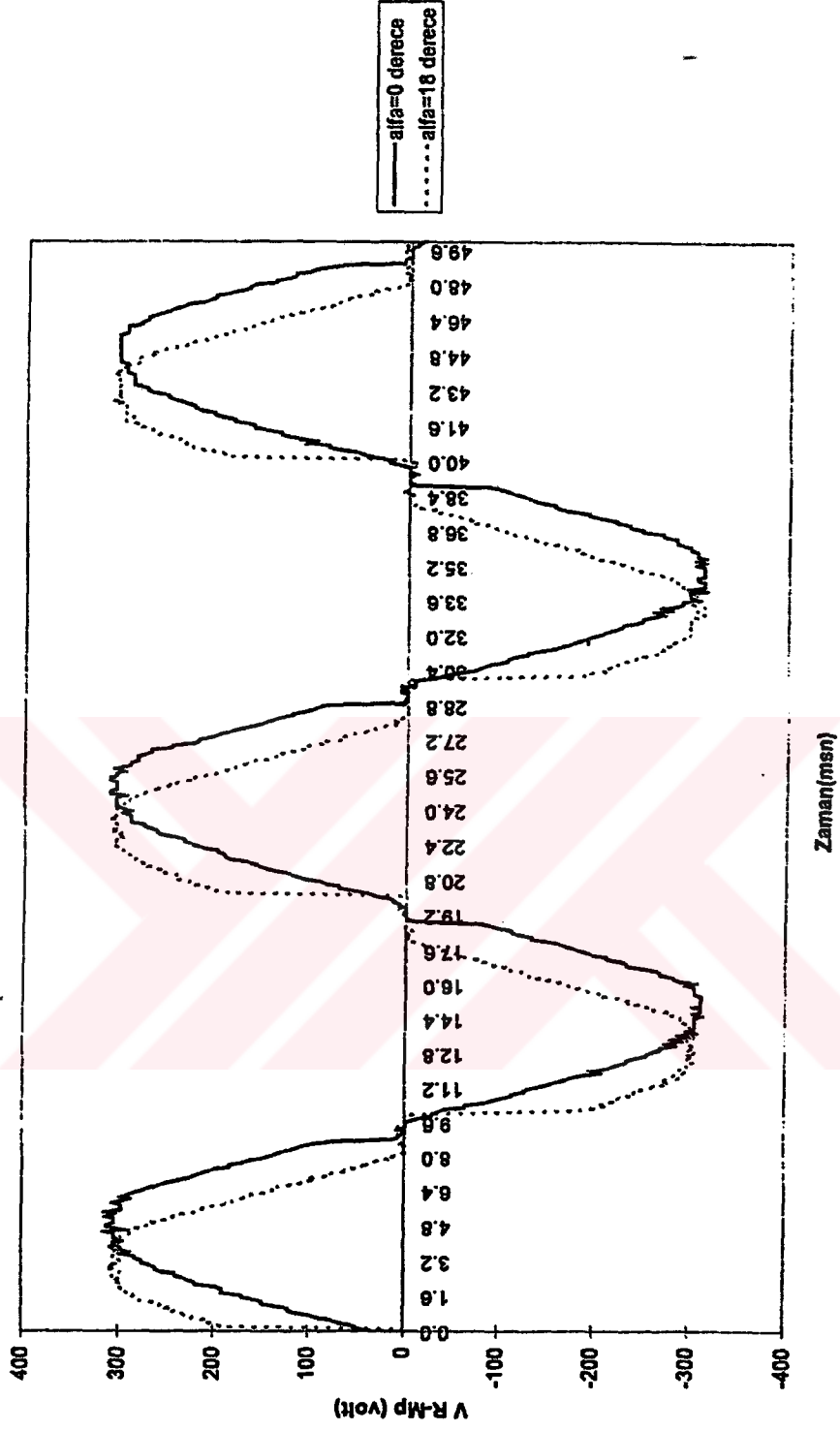
Şekil D.16. Endüktans yükünde alfa=5 ve alfa=110 derecede evirici çıkışı  $L=82$  mH

ALFA=0 VE ALFA=110 DERECEDE EVIRICININ FİLTRELİ ÇIKIŞLARI



Şekil D.17. Alfa=0 ve alfa=110 derecede eviricinin filtreli çıkışları

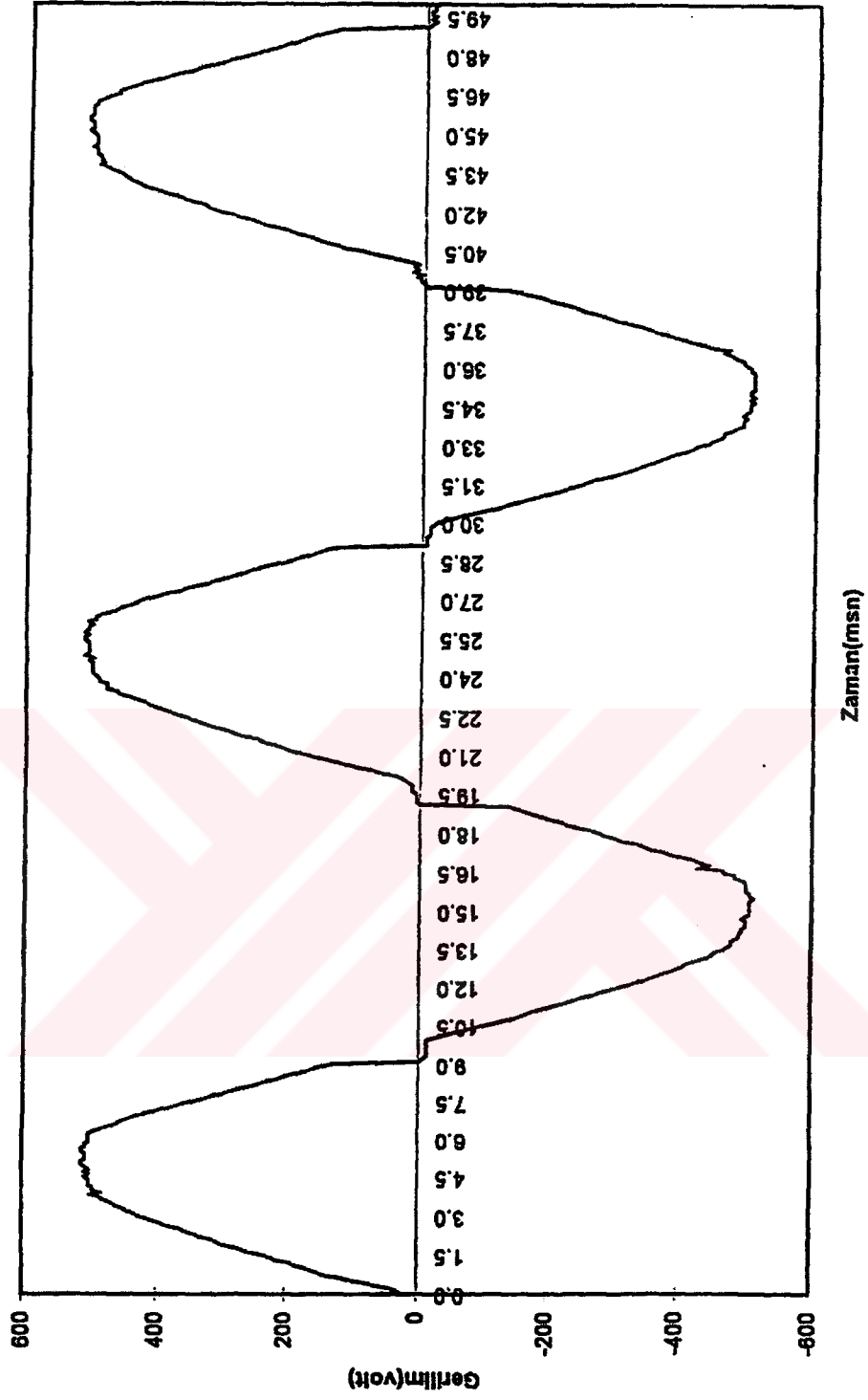
ALFA=0 VE ALFA=18 DEREEDE EVIRICININ FİLTRELİ ÇIKIŞLARI



Şekil D.18. Alfa=0 ve Alfa=18 derecede eviricinin filtreli çıkışları

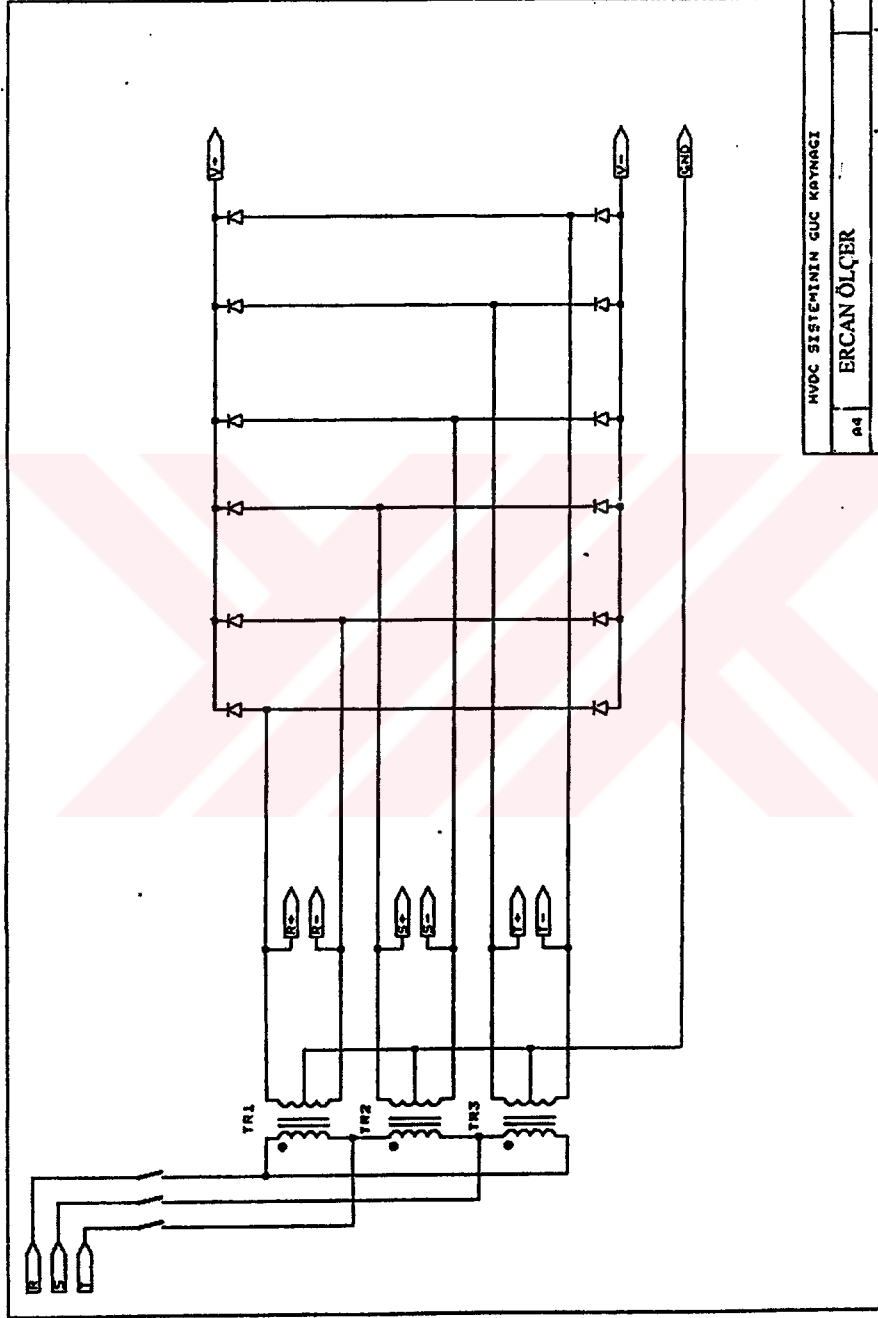


ALFA=0 DERECEDE FİLTRELİ EVİRİCİ ÇIKIŞI

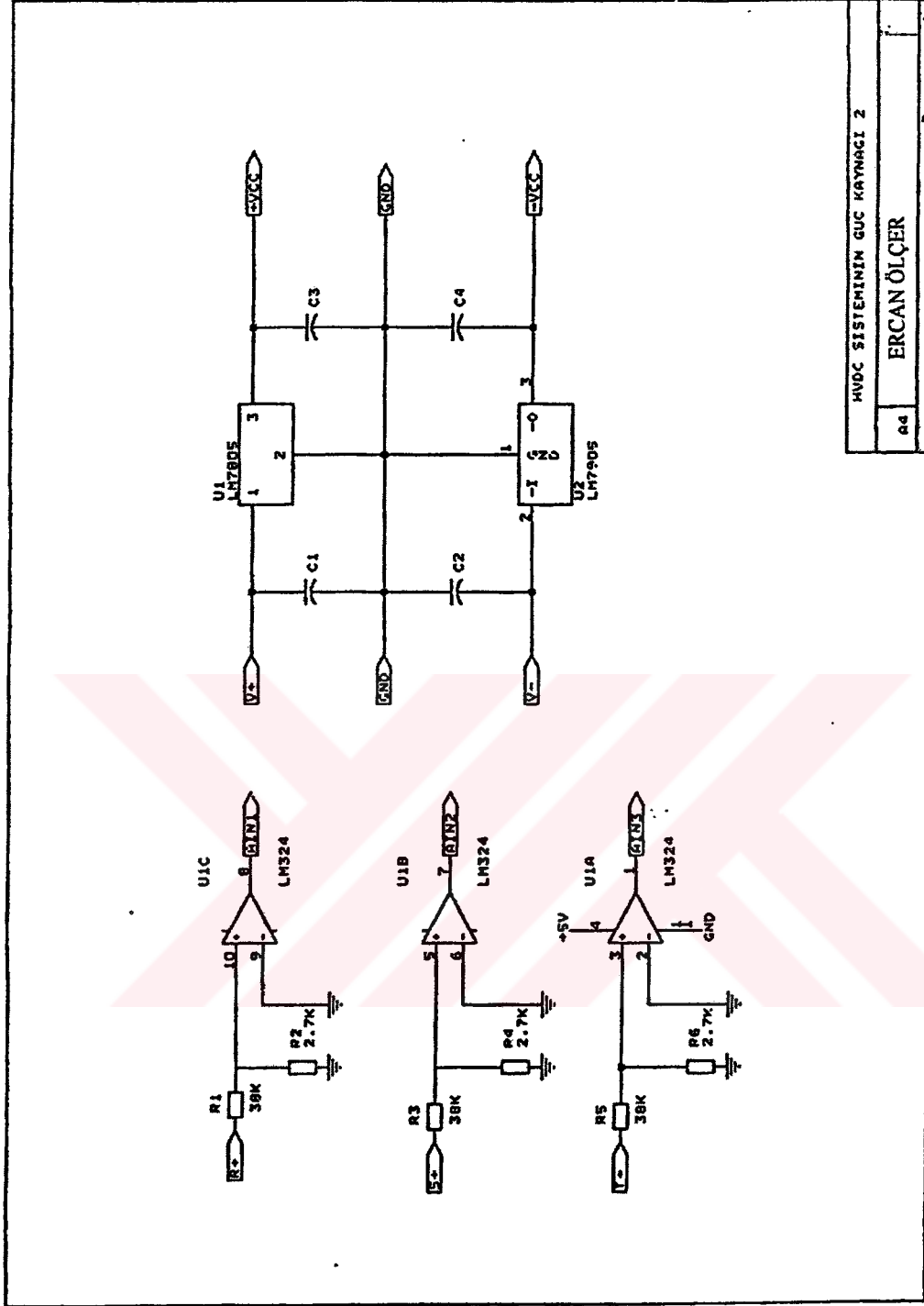


Şekil D.19. Alfa=0 derecede filtreli evirici çıkışları

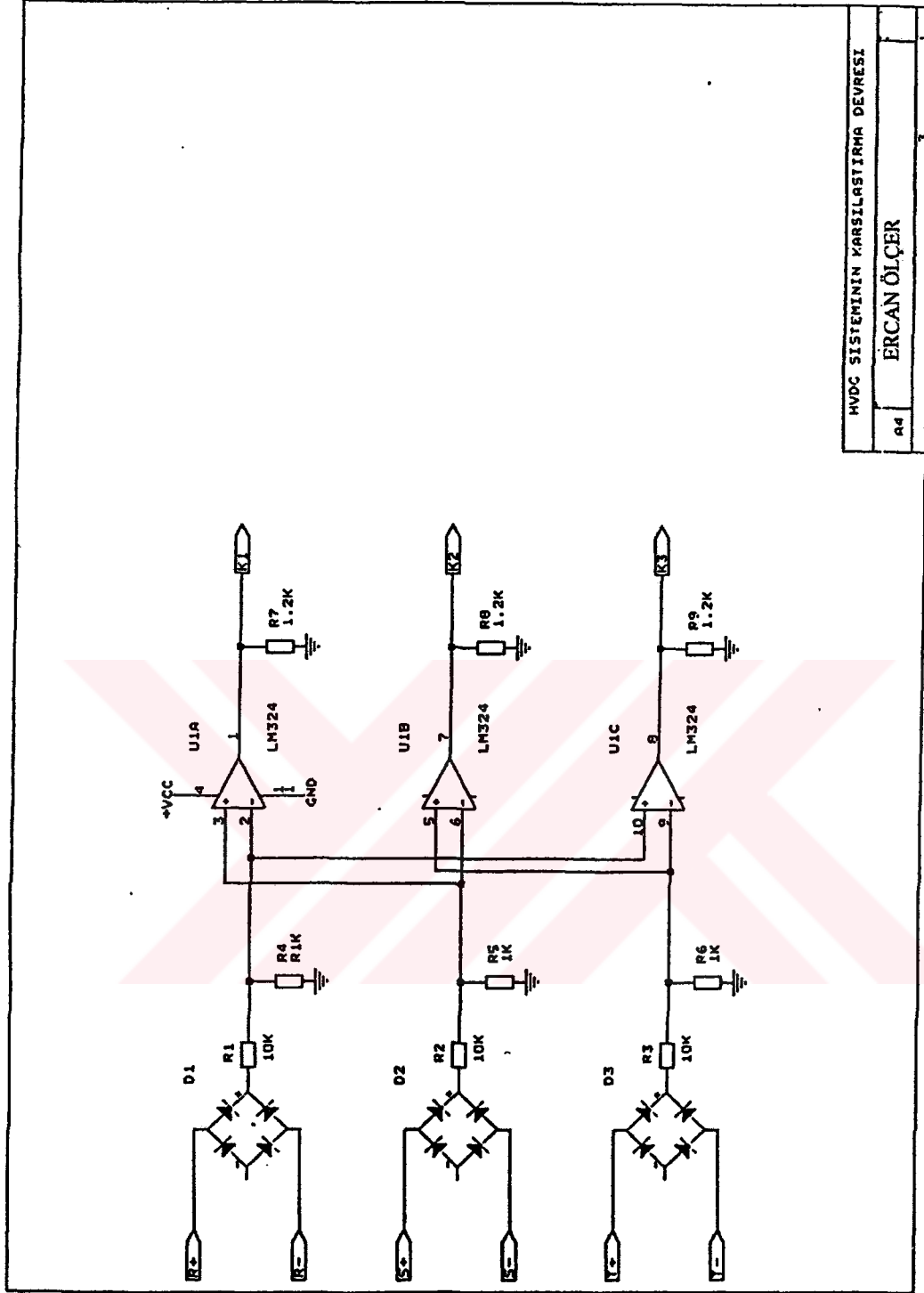
EK - E



Şekil E.1. HVDC sisteminin güç kaynağı



Şekil E.2. HVDC sisteminin güç kaynağı 2

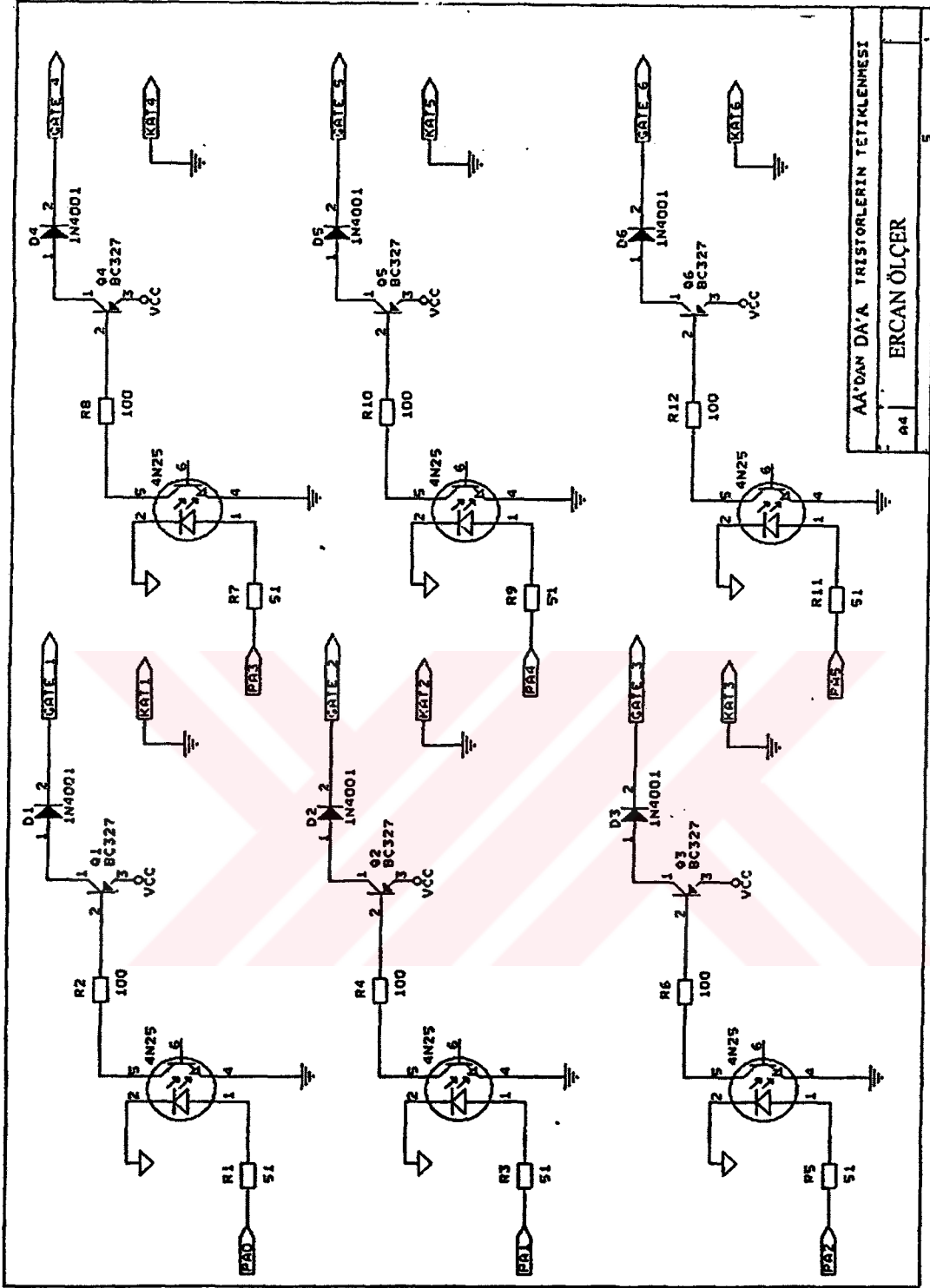


HVDC SİSTEMİNİN KARŞILAŞTIRMA DEVRESİ

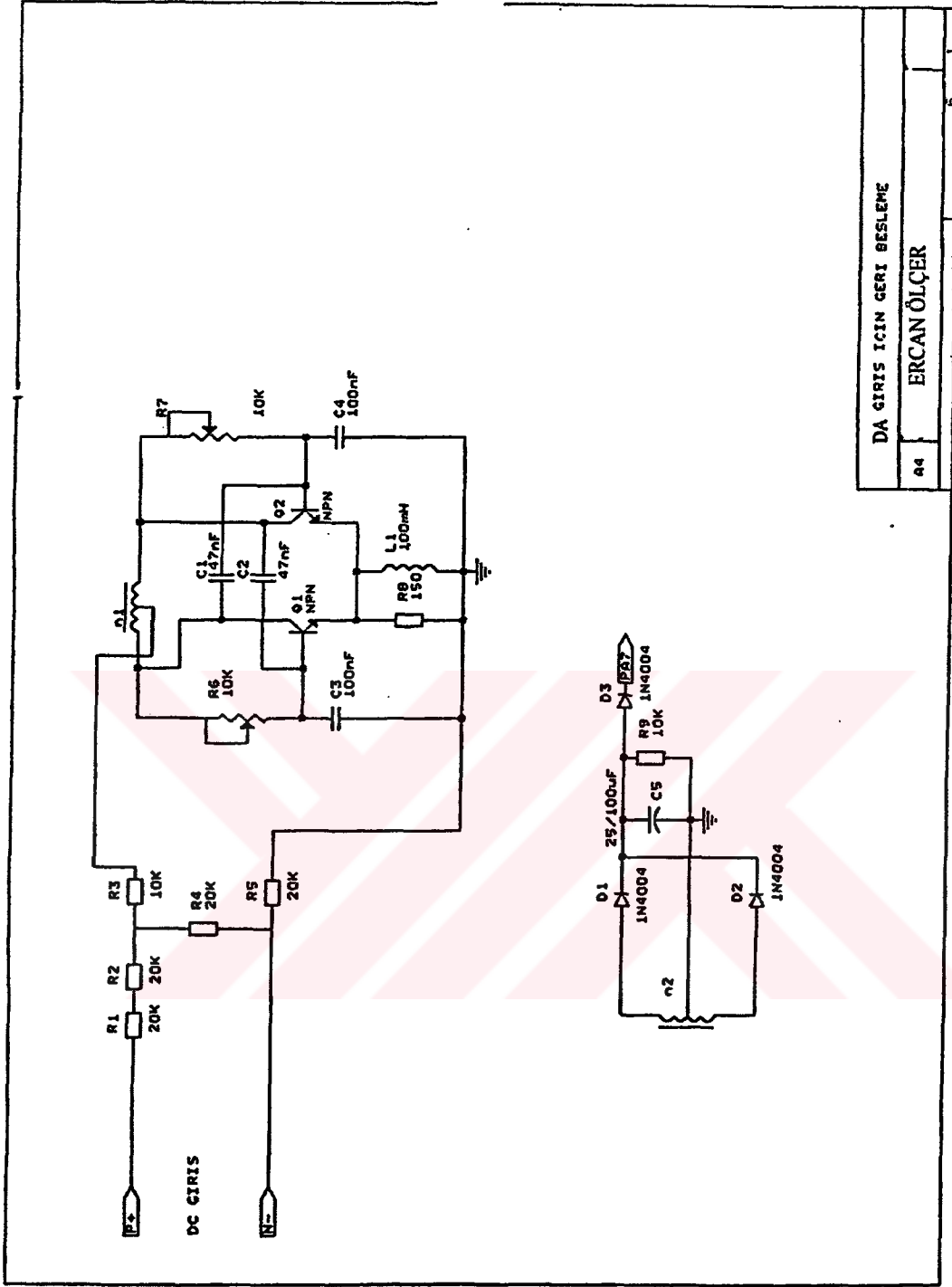
ERCAN ÖLÇER

3

Şekil E.3. HVDC sisteminin karşılaştırma devresi

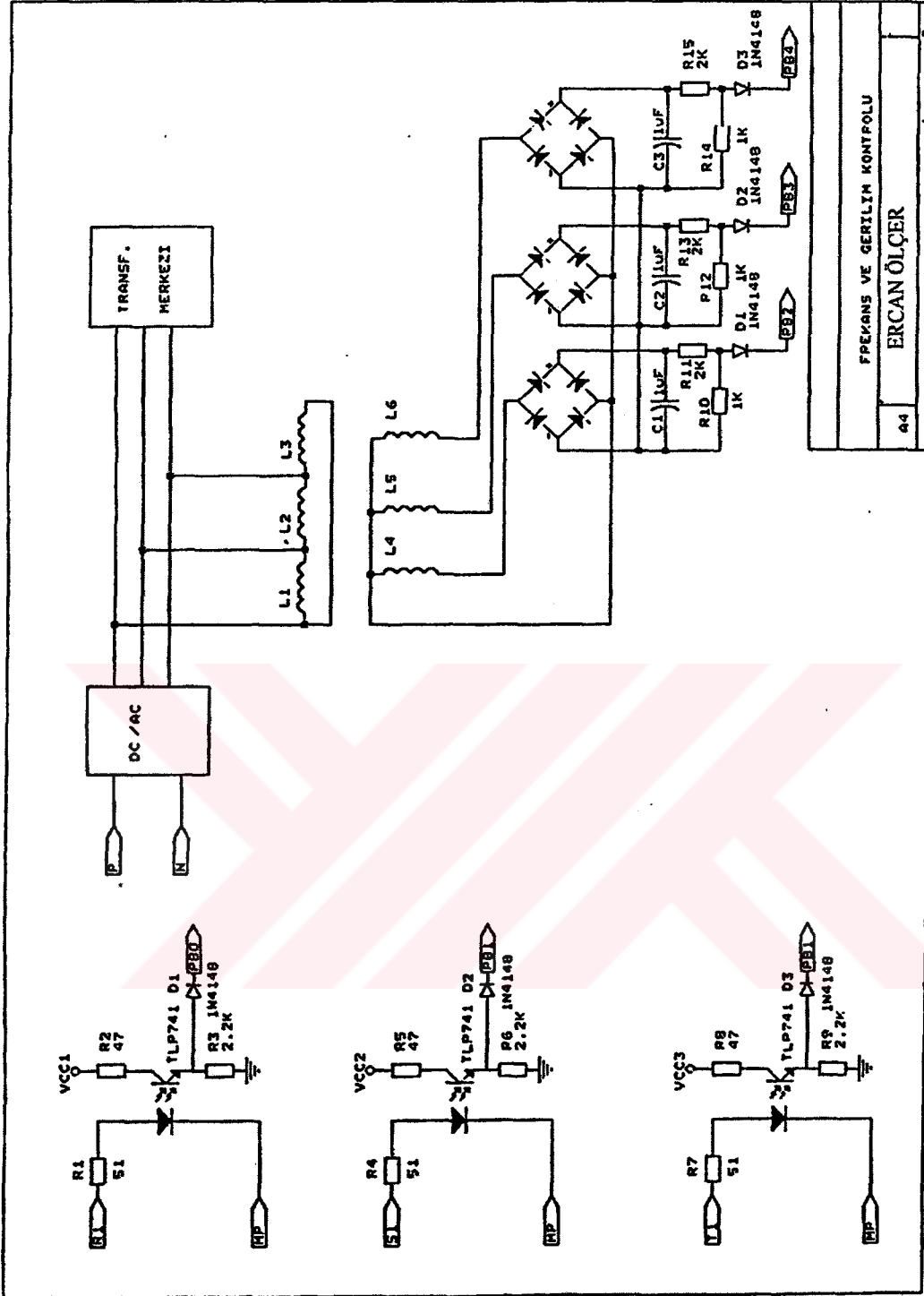


Şekil E.4. AA'dan DA'ya tristörlerin tetiklenmesi

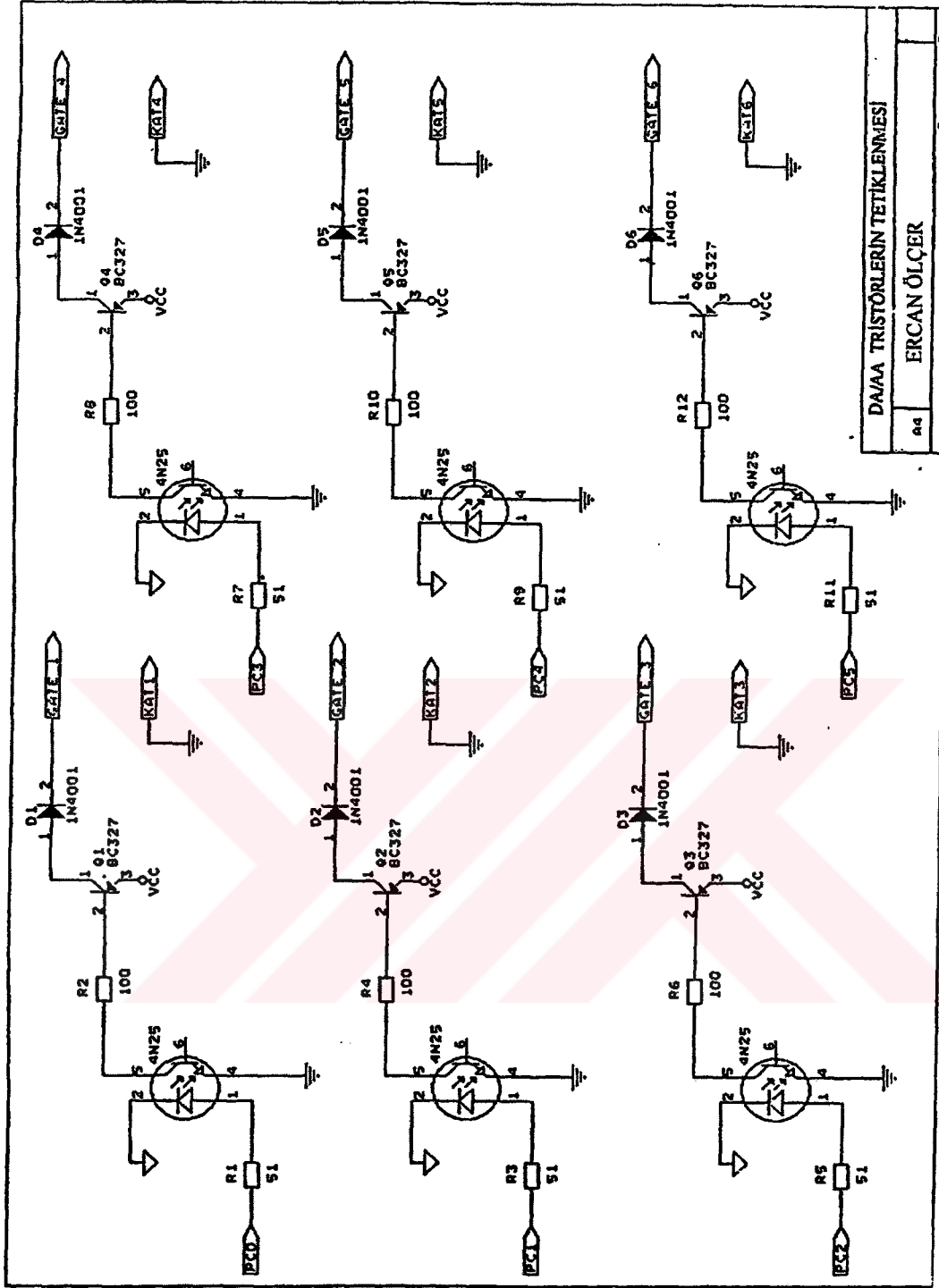


DA GİRİS İÇİN GERİ BESLEME  
44 ERCAN ÖLÇER

Şekil E.5. DA giriş için geri besleme

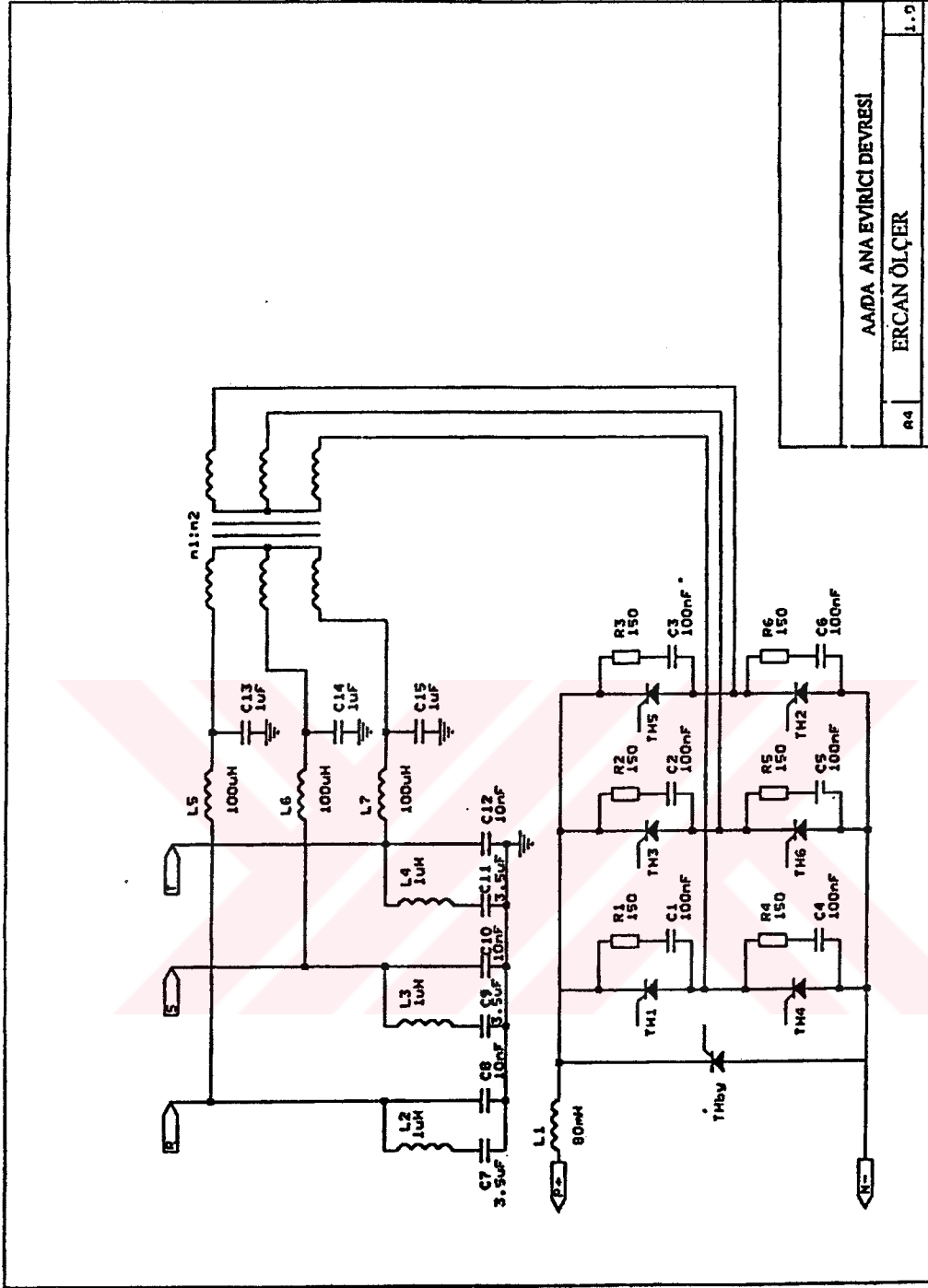


Şekil E.6. Frekans ve gerilim kontrolü



Şekil E.7. DA`dan AA`ya tristörlerin tetiklenmesi





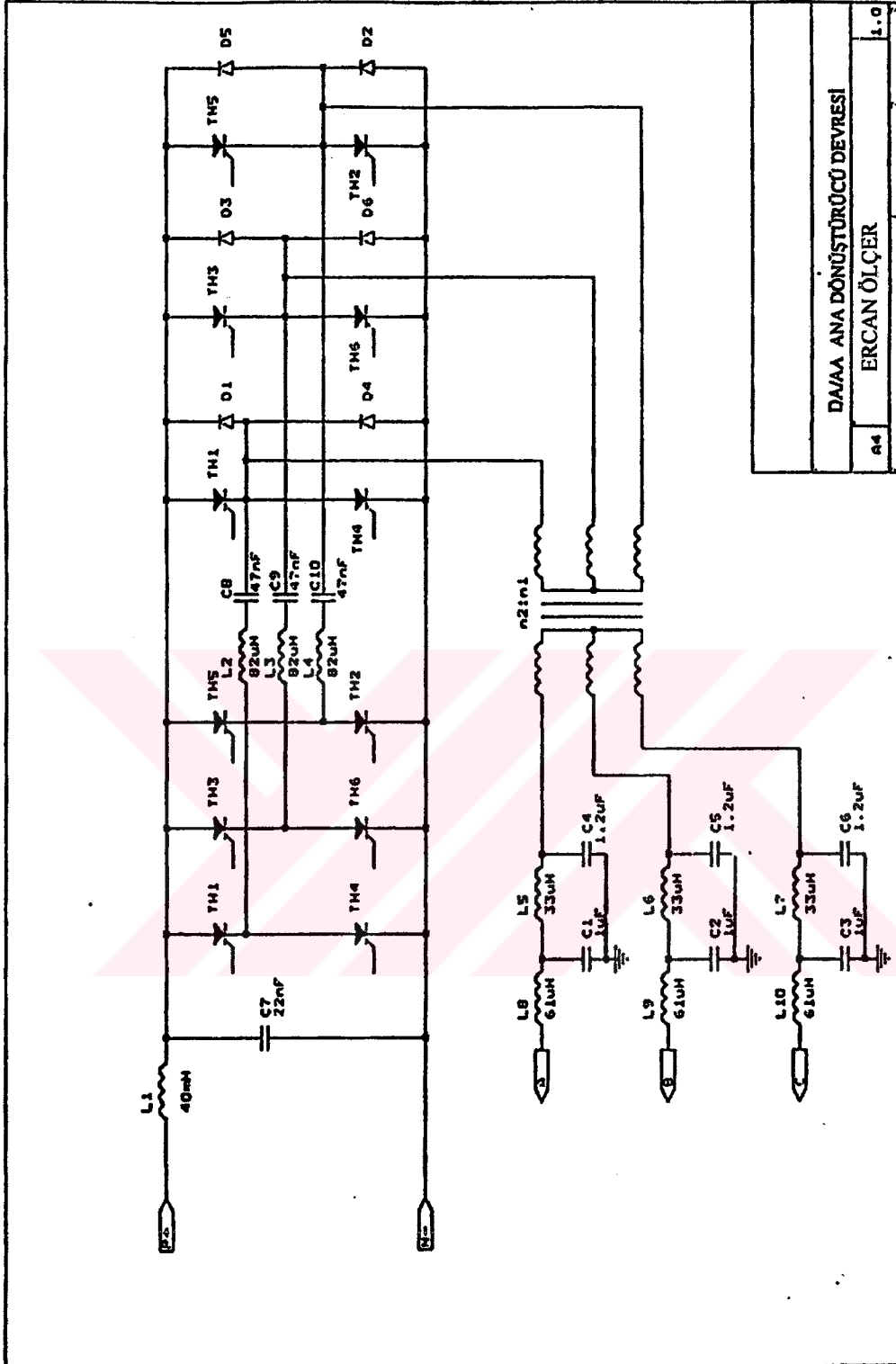
AAIDA ANA EVIRICI DEVRESİ

ERCAN ÖLÇER

R4

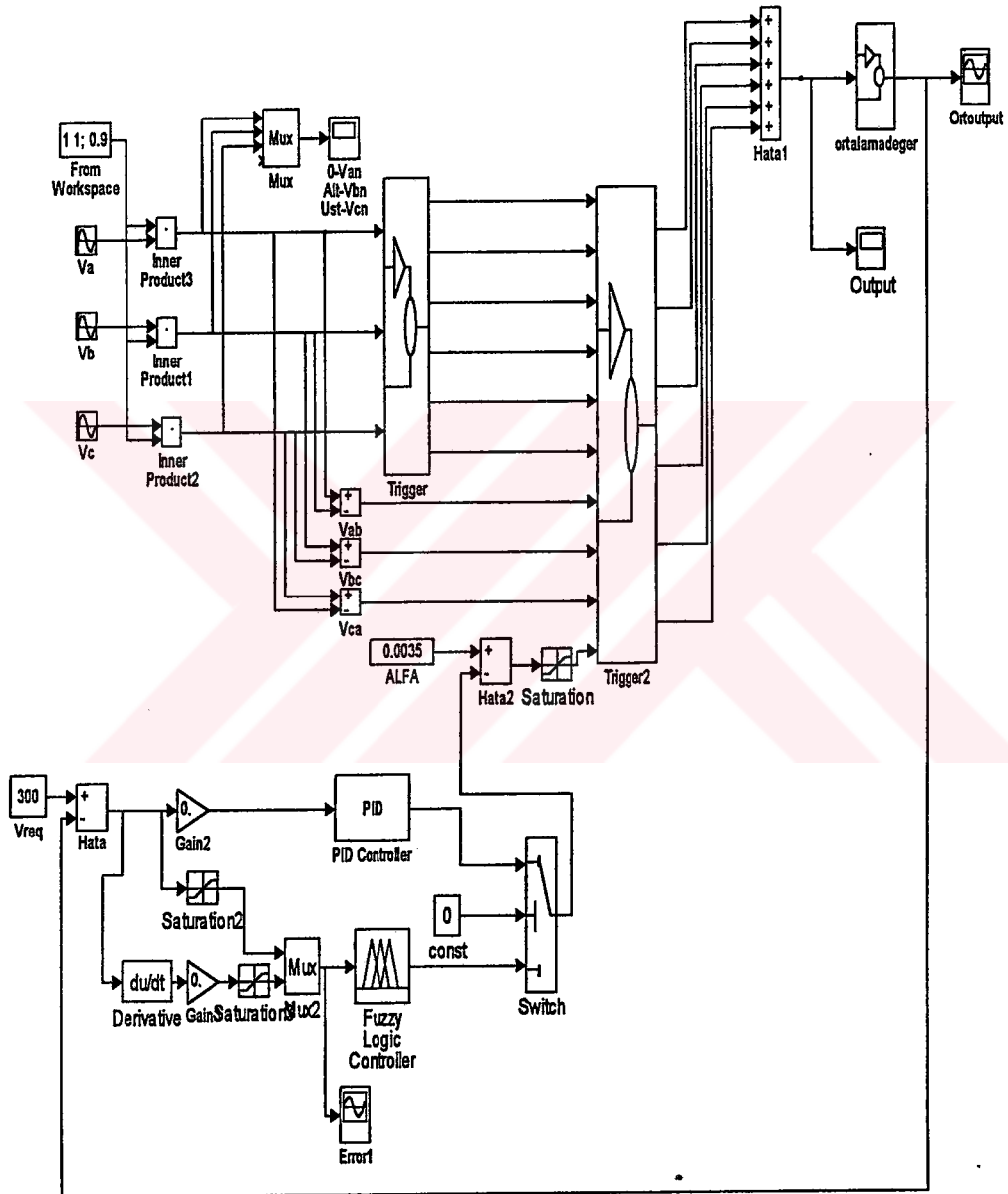
1.2

Şekil E.8. Evirici devresi

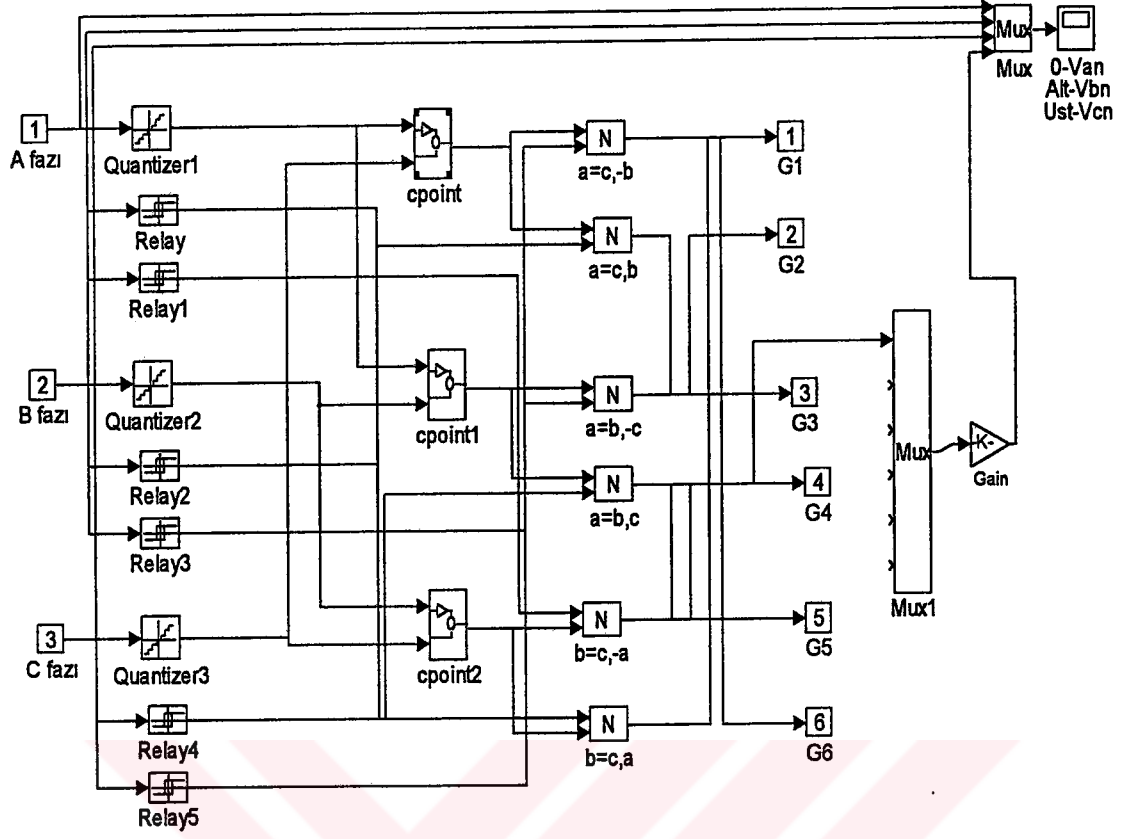


Şekil E.9. DA/AA ana dönüştürücü devresi

EK - F



Şekil F.1.Dönüştürücü Blok diyagramı



Şekil F.2. Kesişim Noktası Yakalayıcısı

## ÖZGEÇMİŞ

**Ercan ÖLÇER:** 1968 İstanbul doğumlu Lisansını Yıldız Üniversitesi Kocaeli Müh.Fak. Elektronik ve Haberleşme Mühendisliğinde tamamladı. Yüksek lisans eğitimini İ.T.Ü Kontrol ve Bilgisayar Mühendisliğinde bitirdi. Şu anda Kocaeli Üniversitesinde öğretim görevlisi olarak doktora çalışmalarına devam etmektedir. Lisans tezi “Analog işaretlerin bilgisayar ortamına geçirilip frekans ve genliklerinin tespit edilmesi”, yüksek lisans tezi “Türkçe’de konuşma tanıma” konusunda olmuştur.

