

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

45477

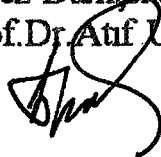
T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİ BESLEME DÜZENLERİNİN  
İNCELENMESİ, DEĞERLENDİRİLMESİ VE OPTİMİZASYONU

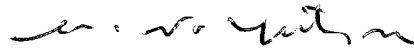
DOKTORA TEZİ  
Y.Müh. Oya Demirer

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 30.Ocak 1995  
Tezin Savunulduğu Tarih : 5.Ocak.1995

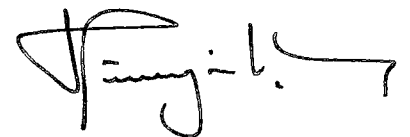
Tez Danışmanı  
Prof.Dr. Atif Ural



Üye  
Prof.Dr. Nusret Yükseler



Üye  
Prof.Dr. Hüseyin Çakır



# ELKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİ BESLEME DÜZENLERİNİN İNCELENMESİ, DEĞERLENDİRİLMESİ VE OPTİMİZASYONU

Oya Demirer

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Güç Sistemleri, Elektrikli Ulaşım Sistemleri, Optimizasyon

Özet: Bu çalışmaya öncelikle ulaşım sistemlerinin genel tanıtımı ve besleme düzenlerinin incelenmesi ile başlanmıştır. Elektrikli ulaşım sistemleri, elektrikli güç sistemlerinden bağımsız olarak düşünölemeyeceğinden bu konuya da yer verilmiştir. Burada temel kavramlar kısaca hatırlatılmıştır. Günümüzde bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler, daha kısa sürede, daha hassas sonuçlar elde etmemize yardımcı olmaktadır. Bu nedenle enerji iletim sistemlerinin modellenmesi, bu sistemlerdeki geçici olaylar buna uygun olarak araştırılmıştır. Optimizasyon konusu önce genel anlamda sonrada hem elektrikli güç sistemlerini hem de elektrikli ulaşım sistemlerini kapsayacak şekilde geliştirilmiştir. Elektrikli ulaşım sistemlerindeki simölasyon çalışmaları ve bu sistemlerde kullanılan güç elektronikli devreler de incelenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar belirtilmiştir.

# **DESCRIBING, EVALUATION and OPTIMIZATION of ELECTRICAL TRACTION SYSTEMS**

**Oya DEMIRER**

**Key Words: Electrical Power Sysytems, Electrical Traction Systems, Optimization**

In these working sheets; describing, evaluation and optimization of electrical traction systems and their power supply networks have been explained in details.

First of all, general aspects of traction systems and power supply networks are described. Electrical traction systems are not independent than the power systems concerned, examination has been made for both systems. Here only fundamental concepts are explained. Today, the developments in the area of computer made us to get more sensitive results in shorter time periods. Therefore, the modelling of electrical transmission systems and transient events related to these systems are studied. The subject of optimization has been improved first in general meaning then in the way covering electrical power systems and electrical traction systems. The study of simulation in the electrical traction systems and power electronic circuits used in these systems have been studied also in these working sheets. The results have been determined.

## ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Programı çerçevesinde gerçekleştirilen bu çalışmada, elektrikli ulaşım sistemleri için hangi algoritmaların kullanımının daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Çalışmalarımı yönlendiren, her konuda değerli bilgi ve yardımlarını esirgemeyen hocam ve tez danışmanım Sayın Prof.Dr. Atif URAL'a teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR .....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xiii
TABLOLAR LİSTESİ .....	xvii
BÖLÜM 1. GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2. ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNİN GENEL TANITIMI .....	5
2.1 Konvansiyonel Sistemler .....	5
2.1.1 Büyük Mesafelerde Kullanılan Sistemler .....	5
2.1.2 Küçük Mesafelerde Kullanılan Sistemler .....	6
2.2 Konvansiyonel Olmayan Sistemler .....	6
2.2.1 Uzak Mesafeler İçin .....	7
2.2.2 Yakın Mesafeler İçin .....	7
2.3 Yakın Mesafe Elektrikli Ulaşım Sist. ve Bunların Karşılaştırılması .....	8
BÖLÜM 3. ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNE ÖZGÜ BESLEME DÜZENLERİNİN GENEL İNCELENMESİ .....	14
3.1 Akım Cinsi Bakımından Sınıflandırma .....	14

3.1.1 Alternatif Akım .....	14
3.1.2 Doğru Akım .....	16
3.2 Besleme Şekli Bakımından Sınıflandırma .....	17
3.2.1 Seyr İletkenli .....	17
3.2.2 3.Akım Raylı .....	17
3.2.3 Akülü .....	18
<b>BÖLÜM 4. ELEKTRİKLİ GÜÇ DÜZENLERİNİN GENEL İNCELENMESİ,</b>	
<b>GENEL BÜYÜKLÜKLER .....</b>	<b>19</b>
4.1 DC Güç .....	19
4.2 AC Güç .....	20
4.2.1 Tek fazlı İletim .....	20
4.2.2 Üç fazlı İletim .....	29
4.3 Per-unit Sistem .....	34
<b>BÖLÜM 5. ENERJİ İLETİM HATLARININ İNCELENMESİ .....</b>	<b>36</b>
5.1 AC İletimi .....	37
5.1.1 Hat Direnci ve Kondüktansı .....	37
5.1.2 Hat Endüktansı .....	38
5.1.3 Hat Kapasitansı .....	47
5.1.4 n Uzunluğundaki Hatlar .....	53
5.2 DC İletimi .....	58
5.2.1 Doğrultma .....	60
5.2.2 Dönüştürme .....	63
5.2.3 Doğru Akım Hattı .....	64
<b>BÖLÜM 6. ENERJİ DÜZENLERİNİN MODELLENMESİ, GÜÇ AKIŞ ANALİZİ</b>	
6.1 Lineer Dönüştürme Teknikleri .....	69
6.2 Bir Fazlı Sistem Modellemesi .....	72
6.2.1 Sarım Oranı 1 olan Transformatörler .....	72

6.2.2 Sarım Oranı 1'den Farklı Olan Transformatörler .....	73
6.2.3 Faz Ötelemeli Transformatörler .....	75
6.3 Üç Fazlı Sistem Modellemesi .....	76
6.4 İletim Hatlarının Üç Fazlı Modelleri .....	81
6.4.1 Seri Empedans .....	81
6.4.2 Paralel Admitans .....	83
6.4.3 Karşılıklı Kuplajlı Üç fazlı Hatlar .....	84
6.4.4 Uç Bağlılarının Düşünülmesi .....	87
6.4.5 Paralel Elemanlar .....	88
6.4.6 Seri Elemanlar .....	88
6.5 Üç fazlı Transformatör Modellemesi .....	89
6.6 Hat Kesitlendirme .....	94
<b>BÖLÜM 7. ELEKTRİKLİ GÜÇ DÜZENLERİNDE GEÇİCİ OLAYLARIN</b>	
<b>GENEL İNCELENMESİ .....</b>	
7.1 Arızalı Sistem Çalışmaları .....	97
7.2 Üç fazlı Arızaların Analizi .....	97
7.2.1 Admitans Matris Denklemi .....	98
7.2.2 Empedans Matris Denklemi .....	99
7.2.3 Arıza Hesaplamaları .....	99
7.3 Dengesiz Arızaların Analizi .....	103
7.3.1 Admitans Matrisleri .....	104
7.3.2 Arıza Hesaplamaları .....	105
7.4 Program Tanımı .....	112
<b>BÖLÜM 8. ELEKTRİKLİ GÜÇ DÜZENLERİNDE OPTİMİZASYON .....</b>	
8.1 Temel Optimizasyon Metodları .....	114
8.1.1 Kısıtlamasız Optimizasyon .....	115
8.1.2 Kısıtlamalı Optimizasyon .....	121
8.2 Elektrikli Güç Sistemlerinde Optimizasyon Uygulamaları .....	130

8.2.1 Lineer Olmayan Problemin Tanımlanması .....	131
8.2.2 Artan Lagrangian .....	132
8.2.3 Sınır Şartı Lineerleştirme .....	133
8.2.4 x Değişkenlerinin Bölünmesi .....	134
8.2.5 Azalan Gradient Metodu .....	136
8.2.6 Lineer olarak Sınırlandırılmış Altproblem Opt. ....	138
8.2.7 Kontrol Değişkenleri Azalma Yönü .....	139
8.2.8 Quasi-Newton Azalma Yönü .....	139
8.2.9 Eşitlik Kısıtlaması için Yön Belirleme .....	140
8.3 Elektrikli Ulaşım Sistemlerinde Optimizasyon .....	140
8.3.1 Çekme Kuvveti .....	141
8.3.2 Hız Belirleme .....	143
8.3.3 Akım Belirleme .....	145
8.3.4 Taşıt Yeri ve Besleme Akımı Belirleme .....	145
8.3.5 Hat Gerilimi Belirleme .....	146

## BÖLÜM 9. ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNİN GÜÇ DÜZENLERİNİN

İNCELENMESİNDE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI .....	150
9.1 Yolun, Taşıtların ve Sinyalizasyonun Gösterimi .....	152
9.2 Taşıt Donanımının Modellenmesi .....	154
9.2.1 Hızlanma Sırasında Çekici kuvvet/Hız Karakt. ....	154
9.2.2 Frenleme Sırasında Çekici Kuvvet/Hız Karakt. ....	157
9.2.3 Hızlanma ve Frenleme Sır. Gerilim/Akım Kart. ....	157
9.3 Güç Sistemi Çözümü .....	160
9.3.1 İletimdeki Güç Merk. Çiftleri Arasında sistem Çözümü .....	160
9.3.2 Enerji Çekmemenin Güç Çözümündeki Sonuçları .....	161
9.3.3 Faydalı Frenlemede Aşırı Gerilim Sınırı .....	162
9.3.4 Güç Sistemi Çözüm Organizasyonu .....	213



<b>BÖLÜM 10. GÜÇ ELEKTRONİKLİ DEVRELERİN ULAŞIM SİSTEMLERİNDE ELEKTRİKLİ GÜÇ SİSTEMLERİNE OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ.....</b>	<b>163</b>
10.1 Gerilim Kontrollü Tristör Dönüştürücüler .....	164
10.2 Enerji Tasarrufu .....	170
10.3 Tesis Masraflarında Azalma .....	171
10.4 Mevcut Diyod Sistemlerini Yenileme .....	172
10.5 Enerji Yönetim Sistemleri .....	174
<b>BÖLÜM 11. SONUÇLAR .....</b>	<b>177</b>



## SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

AC	Alternative Current
DC	Direct Current
HVDC	High Voltage Direct Current
RTU	Remote Terminal Units
R	İletken direnci
p	Ortalama güç
I	Akım
V	Gerilim
w	Açısal frekans
P	Aktif güç
Q	Reaktif güç
Z	Empedans
Y	Admitans
L	Hat endüktansı
$\mu_0$	Boşluğun magnetik geçirgenliği
$\mu$	Ortamın magnetik geçirgenliği
M	Karşılıklı endüktans
$R_k$	k İletkeninin yarıçapı
$D_{kl}$	İki iletken arasındaki mesafe
d	Demet iletkenler arası mesafe
Q	Elektrik yükü
$\epsilon_0$	Boşluğun dielektrik sabiti
C	Kapasitans
$Z_{kd}$	Kısa devre empedansı
$Z_{ad}$	Açık devre empedansı
$V_{dd}$	Doğrultucu uçlarındaki doğru gerilim
$V_{de}$	Evirici uçlarındaki doğru gerilim
$y'_m$	Primer sargıları arasındaki karşılıklı admitans
$y''_m$	Farklı nüvelerdeki primer ve sekondersargıları arasındaki karşılıklı adm.

$y'''_m$	Sekonder sarguları arasındaki karşılıklı admitans
$V_k^f$	Arızalı bara gerilimi
$Z^f$	Arıza empedansı
$I^f$	Arıza akımı
${}^0Y$	Sıfır bileşen admitansı
${}^1Y$	Pozitif bileşen empedansı
${}^2Y$	Negatif bileşen empedansı
$W$	Dingil yükü
$n$	Dingil sayısı
$A$	Taşıt alai yüzeyi
$R$	Viraj yarıçapı
$h$	Bin metrede seviye farkı
$v$	Vagon hızı
$\mu$	Sürtünme katsayısı
$N$	Dingil basıncı
$I_0$	Rotor akımı
$D$	Teker çapı
$M$	Motor momenti
$k_m$	Motor moment
$\phi$	Manyetik akı
$m$	Toplam taşıt kütlesi
$p$	Kütle artırma katsayısı
$T$	Toplam taşıt çekme kuvveti
$TR_m$	Hızdan bağımsız direnç
$TR_h$	Hıza bağlı direnç
$J$	Döner kütlelerin teker miline indirgenmiş toplam atalet momenti
$w$	Teker açısal hızı
$B_j$	Tekerlekteki frenleme gücü
$I_m$	Motor akımı
$T_b$	Başlangıçtaki çekme kuvveti
$T_j$	Tekerlek çevresindeki çekme kuvveti

$T_r$	Aynı hızda kalmak için gereken kuvvet
$k$	Sabit
$s$	Güzergah mesafesi
$s_d$	Mümkün olan hat uzunluğu
$s_f$	Frenleme mesafesi
$s_{max}$	Duraklar arası mesafe
$t$	Zaman
$T_R$	Taşıtın toplam direnç kuvveti
$E$	Aracın harcadığı enerji
$\lambda, \mu$	Lagrange çarpanları
$v_1$	1 bölgesi sonundaki hız
$R'_q$	Tam güçte lokomotif donanımının eşdeğer direnci



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 4. 1. Generatör-Yük Ünitesi .....	19
Şekil 4. 2. Tek fazlı AC devresinde gerilim, akım ve güç değ. eğ. ....	22
Şekil 4. 3. Güç üçgeni .....	27
Şekil 4. 4. Çok uçlu devre .....	28
Şekil 4. 5. Senkron makina .....	29
Şekil 4. 6. Stator sargı bağlantısı .....	30
Şekil 4. 7. Yıldız bağlantı için fazör diagramı .....	31
Şekil 4. 8. Üçgen bağlantıdaki yük akımları .....	31
Şekil 4. 9. Dört iletkenli sistem .....	32
Şekil 4.10. Dengesiz yüklü üç fazlı sistem .....	33
Şekil 5. 1. Magnetik kuplajlı iki bobinli endüktif devre .....	39
Şekil 5. 2. n iletkenli hat .....	41
Şekil 5. 3. İlet. yatay bir düzleme yerleştirildiği üç fazlı iletim hattı .....	43
Şekil 5. 4. Demet iletkenli üç fazlı hat .....	45
Şekil 5. 5. Tek fazlı hat etrafındaki potansiyel .....	48
Şekil 5. 6. Demet iletkenli üç fazlı hat .....	52
Şekil 5. 7. Çok uzun tek iletkenli hattın devre elemanları ile gösterimi .....	54
Şekil 5. 8. Hat eşdeğer şeması .....	57
Şekil 5. 9. DC hat ve buna bağlı iki AC sistemin sembolik gösterimi .....	60
Şekil 5.10. Üç fazlı doğrultucu .....	61
Şekil 5.11. Komütasyon açısı 'nın etkisini gösteren akım ve ger. değişimi .....	62
Şekil 5.12. Gerilim dalga şekli .....	63

Şekil 5.13. Verilen gecikme açısı ile çalışan hat eşdeğer devresi .....	65
Şekil 5.14. Kontrol sistemi şematik gösterimi .....	66
Şekil 5.15. Dönüştürücü akım-gerilim karakteristiği .....	67
Şekil 5.16. Sabit akım komp. ile evirici-doğrultucu çalışma karakteristikleri .....	67
Şekil 6. 1. Gerçek sistem bağlantısı .....	70
Şekil 6. 2. Model sistem .....	71
Şekil 6. 3. Transformator eşdeğer devresi .....	72
Şekil 6. 4. 1'den farklı dönüştürme oranına sahip transformator .....	73
Şekil 6. 5. $\alpha$ ve $\beta$ olan pr. ve se. sargı. arası. kuplaj için eş devre .....	74
Şekil 6. 6. Üç fazlı seri admitans gösterimi .....	76
Şekil 6. 7. Kuplajlı altı admitansın model devresi .....	78
Şekil 6. 8. Kuplajlı iki bileşik admitans .....	79
Şekil 6. 9. Üç fazlı iletim empedans eşdeğerleri .....	82
Şekil 6.10. Üç fazlı bileşik admitans kullanımı .....	83
Şekil 6.11. Birbiri ile kuplajlı iki üç fazlı hat .....	84
Şekil 6.12. 6x6 boyutlu bileşik admitans gösterimi .....	86
Şekil 6.13. Karşılıklı kuplajlı paralel iletim hatları .....	87
Şekil 6.14. Paralel kapasitör ünitesi gösterimi .....	88
Şekil 6.15. Seri kapasitör gösterimi .....	89
Şekil 6.16. İki sargılı transformator gösterimi .....	90
Şekil 6.17. Model şebeke .....	91
Şekil 6.18. Kuplajlı iki bileşik sargılı üç fazlı transformator .....	92
Şekil 6.19. İletim sistemi .....	94
Şekil 6.20. İki kapılı devre gösterimi .....	95
Şekil 7. 1. Küçük güç sistemi örneği .....	98
Şekil 7. 2. Arıza öncesi sistemin Thevenin eşdeğer devresi .....	99
Şekil 7. 3. Arızalı sistemin Thevenin eşdeğer devresi .....	100
Şekil 7. 4. Arıza noktası gösterimi .....	106
Şekil 7. 5. Tek faz-toprak arızası .....	106

Şekil 7. 6. ${}^aZ$ , ${}^bZ$ veya ${}^cZ$ 'de açık-devre olabilen arızalı şebeke gösterimi .....	109
Şekil 7. 7. Arıza analiz programı akış diagramı .....	113
Şekil 8. 1. $f(x)$ fonksiyonunun grafiki gösterimi .....	115
Şekil 8. 2. $f'(x)$ fonksiyonunun grafiki gösterimi .....	118
Şekil 8. 3. $y = f(x)$ değişimi.....	119
Şekil 8. 4. Elektrikli güç sistemi optimizasyon algoritması .....	135
Şekil 8. 6. Elektrikli ulaşım sistemi akış diagramı .....	144
Şekil 9. 1. Simülatör yapısı .....	151
Şekil 9. 2. Hızlanma modunda çekici hız/kuvvet grafiği .....	155
Şekil 9. 3. 1 ve 2 böl. son. besleme gerilimi/hız değişimi .....	156
Şekil 9. 4. Lokomotif donanımının eşdeğer devreleri .....	158
Şekil 9. 5. Güç devresi genel gösterimi .....	161
Şekil 10. 1. Çift dönüştürücü yük akımı-çıkış gerilimi değişim eğrisi .....	164
Şekil 10. 2. Altı-darbeli diyod doğrultucu .....	165
Şekil 10. 3. Diyod doğrultucu ve tristör dönüştürücü çıkış gerilimi .....	166
Şekil 10. 4. Tristör dönüştürücülerin DC çıkış gerilimi .....	167
Şekil 10. 5. Tristör dönüştürücülerin AC hat akımı .....	168
Şekil 10. 6. 12-darbeli seri bağlı çift-dönüştürücü .....	168
Şekil 10. 7. Tristör dönüştürücülü yardımcı santral blok diagramı .....	169
Şekil 10. 8. Booster dönüştürücü .....	173
Şekil 10. 9. Diyod doğ. ve booster dön. çıkış gerilimi değişim eğrisi .....	174
Şekil 10.10. Ayarlanabilir parametreler .....	175

## ***TABLolar DİZİNİ***

Tablo 2.1. Yakın Mesafe Elektrikli Ulaşım Sistemleri .....	10
Tablo 4.1. Genel Yük Tipleri .....	25
Tablo 6. 1. Trf. admitans matris düzenlemesinde kullanılan altmatrisler .....	93
Tablo 6. 2. Bölge tipleri için ABCD parametre matrisleri .....	96
Tablo 7. 1. Kısa-devre arıza akımları .....	107
Tablo 7. 2. Açık-devre arıza akımları .....	111
Tablo 10.1. Diyod ve çift dönüştürücülü sistem karşılaştırılması .....	176



## 1. GİRİŞ

Tez konumuz elektrikli ulaşım sistemlerinin besleme düzenlerinin, incelenmesi, değerlendirilmesi ve optimizasyonudur.

İlk bölümde, elektrikli ulaşım sistemleri genel olarak tanıtıldı. Halen kullanılmakta olan yakın mesafe ve uzak mesafe ulaşım sistemleri inceleyip, bunların olumlu ve olumsuz yönleri belirledim. Artan trafiği karşılamak, daha hızlı ve daha ekonomik ulaşım sağlamak vs. nedenlerle gündeme getirilmiş, bir kısmı denenip yeterli bulunmayıp vazgeçilmiş, bir kısmı da henüz deney aşamasında olan sistemlerden örnekler verdim.

Elektrikli ulaşım sistemlerine özgü besleme düzenleri üçüncü bölümde anlattım. Elektrikli ulaşım sistemleri hem DC hem de AC beslemeli olabilmektedir. AC beslemeli sistemlerde bir fazlı ve üç fazlı sistemler olarak iki kısma ayrılmaktadır. Ayrıca besleme şekli bakımından sistemlerin incelemesini yaptım.

Elektrikli ulaşım sistemlerini, elektrikli güç sistemlerinden bağımsız düşünemeyeceğimizden, bu konuyu da araştırmakta yarar gördüm. DC güç, bir fazlı ve üç fazlı AC güç kavramlarını verip üç fazlı devrelerin analizine kısaca değindim. Güç devreleri analizinde bileşenlerin per-unit değerleri cinsinden ifadesini hatırlattım.

Beşinci bölümde, enerji iletim hatlarının incelenmesine yer verdim. İletim hat parametreleri, yani hat endüktansı, hat kapasitansı, hat direnci ve hat kondüktansı

ifadelerini en genel hal olan n-iletkenli durum için çıkardım. Uzun hat eşdeğer devrelerinin nasıl ifade edildiğini inceledim. Uzun mesafeli büyük güçlerin iletiminde AC'm yanında DC'da kullanılmaktadır. Hatların bazı kritik uzunluklarında DC kullanımı daha ekonomiktir. Bu nedenle, DC kullanımının avantaj ve dezavantajlarını belirledim. DC sistemler için doğrultma ve dönüştürme işlemlerinin nasıl gerçekleştiğine yer verdim.

Günümüzde, bilgisayar teknolojisindeki hızlı ilerlemeler, her alanda bilgisayar kullanımını yaygınlaştırmıştır. Daha kısa sürede, daha doğru sonuçlar elde edebilmekteyiz. Bir elektrikli güç sistemi çalışmasında veya bir elektrikli ulaşım sistemi araştırmasında bilgisayardan yararlanabilmemiz için sistemi buna uygun olarak modellememiz gerekmektedir. Bu nedenle altıncı bölümde, herhangi bir sistemin nasıl modelleneceğini inceledim. İncelemelerim bir fazlı ve üç fazlı sistem modellemelerini içermektedir.

Elektrikli güç düzenleri sürekli olarak kararlı durumda çalışan sistemler değildir. Herhangibir arıza veya ani yük değişimleri sonucunda sistemde geçici olaylar oluşmaktadır. İncelemelerim bu konuyuda kapsamıştır. Öncelikle dengeli arızaların analizine yer verdim. Şebeke simetrik olmayan bir arızaya sahipse veya yüklenmişse, ne faz akımları ne de gerilimi simetrik olmayacaktır. Bu durumda sistemin admitans matrisinin nasıl kurulacağını belirledim. Kısa devre veya açık devre arızalarında, akım ve gerilim ifadelerinin ne olacağını verdim. Hesaplamalarımızı bilgisayar yardımı ile gerçekleştirebilmek için geçici rejimde bulunan sistemlerin nasıl modelleneceğini de inceledim.

n değişkenli bir  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  fonksiyonunun optimum değerini (maksimum veya minimum) bulmak için kullanılan çeşitli metodlar mevcuttur. Fonksiyonumuzun değişken değerleri kısıtlamalı veya kısıtlamasız olabilmektedir. Herhangibir

optimizasyon probleminde üst üste çakışan durumlar vardır. Matematiksel fonksiyon ifademizi yazabilmek için öncelikle fiziksel durumumuza uygun bir modelleme yapmamız gerekmektedir. Daha sonra uygun bir metod seçilir. Elektrikli güç sistemleri olsun elektrikli ulaşım sistemleri olsun her ikisinde bazı sınırlamalara sahiptir. Yani fonksiyon değişkenlerimiz kısıtlamalıdır. Bu nedenle bu sistemlerin optimizasyon çalışmalarından kısıtlamalı optimizasyon metodlardan birini kullanabiliriz. Sekizinci bölümde öncelikle genel olarak optimizasyon metodlarını verdim. Daha sonra bir elektrikli güç düzeninde ve bir elektrikli ulaşım sisteminde optimizasyon çalışmasının nasıl yürütüleceğini inceledim.

$$\begin{aligned}
 & f \quad \text{amaç fonksiyonu} \\
 & g_j(j=1,2,\dots,n) < 0 \quad \text{eşitsizlik kısıtlaması} \\
 & h_j(j=1,2,\dots,m) = 0 \quad \text{eşitlik kısıtlaması} \\
 & \lambda \text{ ve } \mu \quad \text{Lagrange çarpanları olmak üzere} \\
 & \nabla f(x^*) + \lambda \nabla h(x^*) + \mu \nabla g(x^*) = 0 \\
 & \mu g(x^*) = 0, \quad \mu \geq 0
 \end{aligned}$$

denklemlerinden elde edilir. Çekilen enerjinin minimum olması için yol alma ve frenleme ivmeleri sonsuz olmalıdır. Ancak patinaj kısıtlaması ve konfor yönünden bir ivme kısıtlaması getirmeliyiz.

Dokuzuncu bölümde, elektrikli ulaşım sistemlerinin güç düzenlerinin incelenmesinde simülasyon çalışmalarının nasıl yürütüleceğini inceledim. Bir simülasyon çalışmasında öncelikle, tren hareketini ve aynı zamanda bu hareketler sonunda DC çekici güç sağlayan, güç kaynağında ortaya çıkan durumları modellemek zorunludur. Simülatör zamana bağlıdır ve zamanın, belirli periyotlardan oluşan basamaklar halinde ilerlediği varsayılır. Hesaplar, zamanı bir basamak arttırdıktan sonra, her tren için mevcut koşullar hesaplanır ve sonuçta tren davranışı bulunur. İncelemem, hızlı-transit demiryolunda tren hareketleri ile güç kaynağı büyüklükleri arasındaki ilişkileri araştırma yönünde olmuştur.

Güç elektronikli devrelerin, elektrikli ulaşım sistemleri motor kontrol devreleri, enerji dönüşümü işlemleri vb. gibi konularda artarak kullanılması bu konunun da incelenmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Onuncu bölümde diyod doğrultucu ve tristör dönüştürücülü güç besleme sistemlerinin avantaj ve dezavantajlarını araştırdım.



## 2. ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNİN GENEL TANITIMI

Elektrikle ulaşım, belli bir ağırlığın, belli bir mesafeye, istenilen süre ve koşullarda elektrik motoru kapsayan düzenlerle taşınmasıdır.

### 2.1 Konvansiyonel Sistemler

Halen kullanılmakta olan ulaşım sistemler konvansiyonel sistemler olarak isimlendirilirler.

#### 2.1.1 Büyük mesafelerde kullanılan konvansiyonel sistemler

Bu sistemler ray üzerinde, yol üzerinde ve deniz üzerinde uygulanan cer (ulaşım ve taşıma) diye üç kısımda incelenmektedir.

##### 2.1.1.1 Ray üzerinde yapılan cer

Demiryolları (trenler) , yer altı taşıtları (metrolar), tramvaylar (hızlı tramvay) gibi.

### 2.1.1.2 Yol üzerinde yapılan cer

Trolleybüs, dizel elektrikli otobüs, akümülatörlü taşıtlar (elektrikli otobüs) gibi.

### 2.1.1.3 Deniz üzerinde yapılan cer

Kıyı boyunca gemi çeken traktör, elektrikle tahrik pervaneli şilepler gibi.

Ray ve yol üzerindeki cer çeşitleri için tüm dünyadaki uzunluk yaklaşık olarak 250000 km dir.

## 2.1.2 Küçük mesafelerde kullanılan konvansiyonel sistemler

### 2.1.2.1 Havai taşıyıcılar

### 2.1.2.2 Dağ demiryolları

### 2.1.2.3 Asansörler

2.1.2.4 Troyler, transbordörler, gemi yükleme boşaltma işlemini gerçekleştiren makinalar.

## 2.2 Konvansiyonel Olmayan Sistemler

Konvansiyonel sistemlerin günümüzdeki trafik problemlerinin çözümünde yeterli olmaması nedeni ile yeni sistemlerin araştırılması yoluna gidilmiştir. Bunlardan bir

kısmı daha da geliştirilirken bir kısmı deneme aşamasında bırakılmıştır.

### 2.2.1 Uzak mesafeler için

Transrapid magnetik yastıklı , lineer elektrik motorlu taşıma sistemi. Denenip bırakıldı.

### 2.2.2 Yakın mesafeler için

Transurban magnetik yastıklı, lineer elektrik motorlu taşıma sistemi. Denenip bırakıldı.

H-Bahn. Üst yolda hareket eden magnetik yastıklı, lineer elektrik motorlu taşıma sistemi.

Bu iki sistem magnetik veya hava yastıklı lineer motorlu taşıtlardandır.

### 2.2.3 Rail jet

### 2.2.4 Elektrikli yürüyen kaldırım

### 2.2.5 Elektrikli otomobil

Bu alanda ikiyüz'e yakın öneri gelmiştir.

### 2.3 Yakın Mesafe Elektrikli Ulaşım Sistemleri ve Bunların Karşılaştırılması

Taşıt raylar üzerinde hareket ediyor ve tekerlekleri elektrik motoru ile tahrik ediliyorsa böyle bir ulaşım sistemine elektrikli raylı ulaşım sistemi denir.

Elektrikli raylı ulaşım sistemlerinin genel olarak ortak yönleri şunlardır.

1. Katar birden fazla üniteden meydana gelmiştir.
2. Motor besleme gerilimi genellikle 600V veya 750V DC (Doğru Gerilim) dir.
3. Küçük bir yapı hacmi ve kütlesine sahiptir.

Bu sistemlerin farklı yönleri ise şu şekildedir.

1. Yolcu kapasiteleri farklı farklıdır.
2. Ünite başına düşen motor sayısı, yani motor gücü farklıdır.
3. Frenleme ivmeleri farklılık gösterir.
4. Maksimum hızları farklılık gösterir.

Elektrikli raylı yakın mesafeli ulaşım sistemlerini genel olarak şu şekilde sınıflandırabiliriz.

1. Hızlı tramvay
2. Premetro (hafif metro)
3. Metro



#### 4. Banliyö

Başka bir tanıma göre yakın mesafe ulaşım sistemlerini şu şekilde sınıflandırabiliriz.

- a. Kısa duraklar arası mesafe
- b. Büyük yol alma ivmesi
- c. Büyük frenleme ivmesi
- d. Kısa durma süresi

Yakın mesafe trafiğinin gereklerine uyan 4 sistemi bir tabloda özetleyelim. Tablo 2.1'i inceleyerek sistemleri karşılaştıralım. [30]

##### 1. Hızlı tramvay

Bunların olumlu yönleri aşağıdaki gibidir.

- Hızlı tramvay şebekesi genelde oturma bölgelerine yakın yerlerden geçeceğinden ve yoğun bir şebeke ağı bulunacağından, sisteme erişme ve uzaklaşma (inme, binme) kısa süre ve mesafelerde gerçekleşmektedir.
- Yol yapımı kolay olduğu için yapısal bir esnekliğe sahiptirler.
- Taşıtların basit ve sağlam olması nedeni ile güvenilirliği fazladır.
- Durakların az yer kaplaması ve uygun donanımı nedeni ile kent yapısına iyi uyum sağlamaktadır.

Tablo 2.1 Yakın mesafe elektrikli, raylı, ulaşım sistemleri

	Hızlı tranvay	Hafif metro	Metro	Banliyö
<b>GENEL VERİLER</b>				
1.Duraklar arası mesafe (km)	0.4 - 0.6	0.6 - 1.2	0.6 - 1	2.5 - 3
2.Bir yönde 1 saatteki yolcu kap (1000)	10 - 20	30	35 - 40	50
3.Ortalama yolculuk hızı (km / h)	20 - 25	25 - 40	30 - 40	60
4.En büyük hız (km / h)	60 - 70	80 - 90	80 - 90	100
5.Özgül tahrik gücü (kw / t) (Boş iken)	10	14	15	17
6.Yolalma ivmesi (m / s <sup>2</sup> )	1.3	1.3	1	1.1
7.En büyük fren ivmesi (m / s <sup>2</sup> )	2.75	2.9	1.2	1.2
8.Katar kapasitesi ( min 4 kişi / m )	350	750	870	1330
9.İzleme süresi ( s )	60	90	90	90
10.Yol durumu	karşık	genelde özel	özel	
<b>TEKNİK VERİLER</b>				
1.Besleme sistemi ( v )	600 - 750	750	750	15 - 25
2.Vagon eni ( m )	2.4 - 2.65	2.65	3	3
3.Katar uzunluğu ( m )	21 - 26	27 - 37	37	67 - 90
4.Taban yük ( nun )	850	1000	1100	1300
5.Katarın boştaki ağırlığı ( t )	35	40 - 45	50	135
6.Ray aralığı (cm)	10 - 14.35	14.35	14.35	14.35
<b>ENERJİ İLE İLGİLİ VERİLER</b>				
1.Özgül enerji tüketimi ( wh / tkm )	60 - 80	50 - 75	40 - 60	30 - 35
2.Yüzde özgül enj tük (enerji/yolcu/km)	35	30	25	50

Olumsuz yönlerinide şu şekilde sınıflandırabiliriz.

- Yol trafiğinin yoğun olması hızı azaltmaktadır.
- Yine trafik nedeni ile istenilen programın yeterince uygulanamaması.
- Oturma yerlerinin sınırlı olması, gürültü, yetersiz havalandırma, kötü inme binme yapılması vs nedenlerden ötürü ulaşım konforunun istenildiği gibi gerçekleştirilememesi.
- Duraklardaki kötü koruma
- Personel sayısının ve giderlerinin fazla olması
- Düşük trafik hacmi

## 2. Premetro

Genelde hızlı tramvay dan daha iyi bir şekildedir. Bu nedenle aynı nitelikleri premetro için de sıralayabiliriz.

## 3. Metro

En büyük trafik potansiyellerini gerçekleştirecek taşıt türüdür. Genelde yer altında bazen de yer üstünde hareket eder. Yol kesişmesi yoktur, kendi içinde kapalı bir sistemdir ve bu kesimde sadece metro taşıtları çalışmaktadır. Başka araç giremez. Premetro ve banliyölerin olumlu yönlerine hemen hemen sahiptir. Olumsuz yönleri ise şu şekildedir.

- Bir çok yolcu için erişme ve uzaklaşma mesafelerinin büyük olması

- Arada aktarma yapma zorunluluğu oluşu ve bunun güçlüğü
- Şebekenin değiştirilmesi veya genişletilmesi gerektiğinde yapım çalışmalarının zaman alıcı ve pahalı oluşu
- Kent yapısına uygulamadaki zorluk

#### 4. Banliyö

Yoğun kent dışı yöre trafiğine ve varışlarına hizmet götürür. Genelde elektrikli yollarında işleyen bir sistemdir. Olumlu yönlerini şu şekilde sıralayabiliriz.

- Yolculuk için uygun yolculuk zamanları
- Büyük kullanım nedeni ile diğer ulaşım sistemlerinden daha az bekleme süresi
- Kendine özgü yolunun olması nedeni ile arızasız hareket ve gideceği yere zamanında erişebilme
- Daha az personel gereksinimi
- Sistemlerin otomatikleştirilmesi nedeni ile daha yüksek güvence
- Basit teknik kullanımı nedeni ile daha az bakım ve onarım giderleri
- Daha az özgül enerji tüketimi
- Çevreyi daha az kirletme
- Kaza oranının daha düşük oluşu

Olumsuz yönlerini de şu şekilde sıralayabiliriz.

- Hızın yüksek oluşu ve büyük yer gereksinimi nedeni ile büyük enerji tüketimi
- Alternatif akım elektrikli donanımının büyük oluşu ve oturma yeri talebinin yüksek olması nedeni ile büyük ağırlık
- Uzak mesafe elektrikli trenlerin kullanıldığı yollarda hareket ettiğinden seyr

durumunu azaltır, istenilen programın uygulanması oranını düşürür

- Alternatif gerilimli besleme sistemi nedeni ile daha büyük alan gereksinimi ve sistem kesiti
- Daha zor güzergah döşenmesi

Yukarıdaki olumlu ve olumsuz yönler dikkate alınarak, duruma, isteğe ve koşullara göre bu sistemlerden en uygun olanı seçilir. Sistemin işletme programına göre verilen ağırlık belli bir mesafeye istenilen süre ve koşullarda taşınacaktır.



### 3. ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNE ÖZGÜ BESLEME DÜZENLERİNİN GENEL İNCELENMESİ

#### 3.1 Akım Cinsi Bakımından Sınıflandırma

Elektrikli ulaşım sistemleri besleme düzenleri alternatif akımla besleme ve doğru akımla besleme diye iki kısımda incelenebilir.

##### 3.1.1 Alternatif akım

Bu da bir fazlı ve üç fazlı olarak iki gruba ayrılır.

##### 3.1.1.1 Bir Fazlı akım

###### a. Direkt motorlu sistem

Kollektörlü tek fazlı motor, doğru akım motorunun bütün olanaklarını sağlar. Ancak bir fazlı motor kullanımı komütasyon probleminide beraberinde getirir. Frekans arttıkça bu problem de artar. Çünkü komütasyon sargı reaktansı (kısa devredeki) frekansla orantılıdır. Bu nedenle 162/3 Hz veya 25 Hz frekansta çalışılmaktadır. Bugün artık kullanılmamaktadır.

Bir faz, doğru akım sistemlerindeki gibi iki iletkenlidir. 50Hz, 60Hz gibi endüstride kullanılan frekanslarla aynı olanakları gösterir. Bu nedenle 15 ila 25 kV luk yüksek gerilim altında 50 Hz lik bir fazlı akım kullanılmaktadır.

Enerji nakil hatları genellikle üç fazlı olduğundan, bir faz bunlardan birini kullanarak veya Scott bağlamaları ile elde edilir. Gerilimin artması güç merkezleri sayısının oldukça azalmasını sağlar.

Bu tip ilk hatlar, Almanya Höllental vadisinde ve Fransa'da Aix-les Bains-la Roche sür Feron'da yapılmışlardır. (1950-1951)

#### b. Tek, üç fazlı sistem

Üç fazlı sistemlerin avantajları, tek fazlı dağıtımına sahip üç fazlı motor düzenleri geliştirilmiştir. Bu özellikle Macar demiryollarının Kando sistemi ile gerçekleşir.

Bir fazlı sistemde dönen bir konvertisör, bir faz akımlı motorlar için gerekli olan üç fazlı akım'a dönüştürür. Bugün artık kullanılmamaktadır.

#### c. Tek fazlı doğru (Monofaze Kontinü) sistem

Bu sistemde doğru akım motorlar bir fazlı sistemden beslenmektedir. Bir fazlı akımı doğru akıma çevirmek için döner veya statik doğrultmaçlar kullanılmıştır. Bugün

sadece statik doğrultmaçlar kullanılmaktadır.

### 3.1.1.2 Üç Fazlı akım

Üç fazlı akım, büyük bir işletme stabilitesi sağlama olanağı verdiği için Kuzey İtalya'da asenkron motorlarla donatılmış düzenlerde kullanılmıştır. Tek sakıncası 3 iletkene ( 2 hava 1 ray iletkeni ) gerek göstermesidir. İletken sayısının fazlalığı kruazmanları ( 2 demiryolu hattının kesiştiğı yer) çok zorlaştırır. Bu nedenle yeni sistemler yapılmamıştır. Ancak üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

### 3.1.2 Doğru akım

Eskiden büyük hatlarda kullanılan tek sistemdi. Seri motorların yol almada istenen büyük yolalma momentini sağlaması, 1914-1918 den sonra doğru akımın kabul edilmesine yardımcı olmuştur.

Doğru akımın bir avantajı da sadece iki iletkene ihtiyacı olmasıdır. Bu iletkenlerden biri de ray olabilir.

Trolleybüs ve tramvayların DC gerilim değeri 500-600 V, uzak mesafe doğru akım taşıtlarının ise 500-600-800-1200-1500 V tur. Genellikle İtalya'da 5400-5000 V, İngiltere'de 750-1500 V, Amerika'da 6000 V kullanılmaktadır.

Yeraltı maden ocakları veya endüstri lokomotiflerinde gerilim 220 V, yer üstünde 1000-1200-1500 V tur.



Kullanılan doğru gerilim, motorların izolman olanakları ile sınırlanmıştır. Bu nedenle hattaki kayıpları azaltma ve hız kullanım alanını kolaylaştırmak için gerilim yükseltilir.

### 3.2 Besleme Şekli Bakımından Sınıflandırma

Seyr iletkenli, 3.cü akım raylı ve akülü diye üç kısımda sınıflandırabiliriz.

#### 3.2.1 Seyr iletkenli

Elektrik enerjisini dışarıdan bir akım alıcısı ile ( Seyr iletkeni veya Akım rayı) alan taşıtlar. Taşıtların çalışma bölgesi akım alıcılarının çalışma alanına bağlıdır.

Lokomotifler, uzak mesafe demiryolu lokomotifleri, dağ demiryolu lokomotifleri, yeraltında veya üstünde çalışan endüstri ve maden ocağı lokomotifleri, ototrenler, trolleybüsler bunlara örnek olarak verilebilir.

#### 3.2.2 3.Akım raylı

Enerjilerini 3. akım rayı yardımı ile temin ederler. Özel güzergaha sahiptirler. Metrolar gibi.

### 3.2.3 Akülü

Bu taşıtlar enerji kaynaklarını beraberlerinde taşırlar. Çalışma alanları enerji depolarının kapasitesine bağlıdır. Depolar bir akümülatör bataryası veya bir termik motoru besleyen yakıt deposu olabilir. Termik motor, dizel motor, buhar türbini veya gaz türbini olabilir. Burada termik motor bir elektrik generatörünü tahrik eder. Bunun sonucu oluşan gerilimle de elektrik motoru beslenmektedir. Elektrikli otomobil gibi. [30]

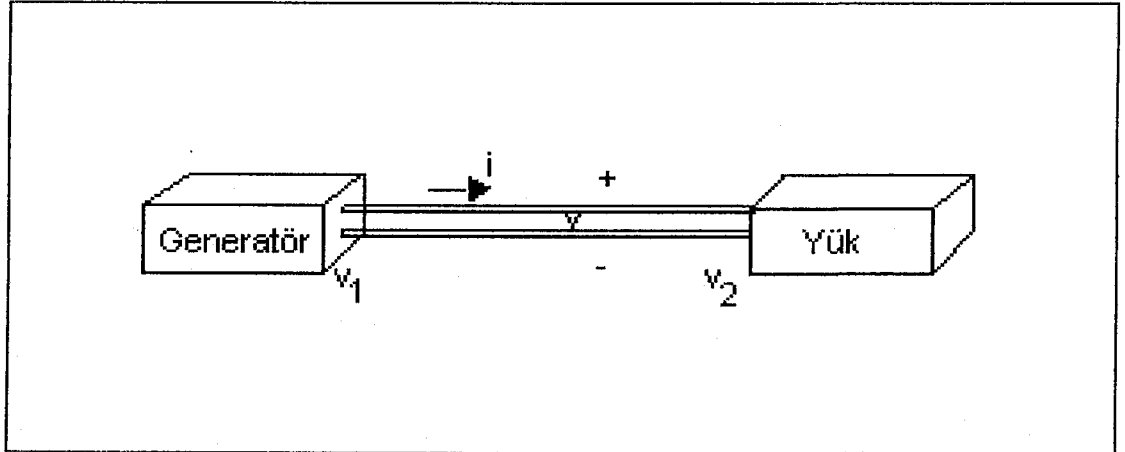


#### 4. ELEKTRİKLI GÜÇ SİSTEMLERİNİN GENEL İNCELENMESİ, GENEL BÜYÜKLÜKLER

Güç sistemlerinin incelenmesinden önce temel kavramlara kısaca değinilecektir. Bu incelemede DC ve AC güç, üç fazlı sistemlerin yapısı ve per-unit kavramı verilecektir.

##### 4.1 DC Güç

Yapısından dolayı DC iletim bazı ekonomik avantajlara sahiptir. Bu, onu sadece çok uzun mesafeler için değil, yeraltı ve deniz aşırı iletimler için de üstün kılar. Bu avantajlar onu ideal bir iletim ortamı haline getirir.



Şekil 4.1 Generatör-yük ünitesi

Şekil 4.1 deki akım ve gerilim ifadeleri DC şeklinde ise giriş ve çıkış güçleri için şu

ifadeleri yazabiliriz.

$$p_1 = v_1 i \quad 4.1$$

$$p_2 = v_2 i$$

sistemdeki akım için de

$$i = \frac{v_1 - v_2}{R} \quad 4.2$$

diyebileceğimize göre güç ifadelerimizi akımdan bağımsız olacak biçimde belirtirsek

$$p_1 = \frac{v_1^2 - v_1 v_2}{R} \quad 4.3$$

$$p_2 = \frac{v_1 v_2 - v_2^2}{R}$$

olacaktır. Formüllerimizdeki R değeri her iki iletkenin direncine eşittir. Genellikle  $p_1 \cong p_2$  ve iletilen ortalama güç değeri

$$p = \frac{p_1 + p_2}{2} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2R} \quad 4.4$$

formülü yardımı ile bulunur. Bu güç değerimiz sabit bir değerdedir. Yönü ise uçlardaki gerilim değerlerine bağlıdır. Güç akışını  $1 \rightarrow 2$  ye doğru gerçekleştirmek istediğimizde  $v_1 > v_2$  değerini korumamız gereklidir. Bunun tersi bir durumu sağlamak içinse  $v_1 < v_2$  şeklinde giriş çıkış gerilimlerimizi kontrol altına almalıyız.

## 4.2 AC Güç

### 4.2.1 Tek fazlı iletim

AC güç temel karakteristiklerinden bazılarını göstermek için aşağıdaki ifadeleri

kullanacağız.

Öncelikle Şekil 4.1 de verdiğimiz sistemdeki akım ve gerilim ifadelerinin sinusoidal olduğunu kabul edelim. Bunların değerleri

$$\begin{aligned} v &= V_{\max} \sin \omega t \\ i &= I_{\max} \sin(\omega t - \phi) \end{aligned} \quad 4.5$$

şeklinde olsun. Bildiğimiz gibi  $\omega = 2\pi f$  ve  $\phi$  akım ile gerilim arasındaki faz farkıdır.

$p = v \cdot i$  eşitliğini kullanarak iletilen güç için aşağıdaki ifadeyi elde ederiz.

$$p = V_{\max} I_{\max} \sin \omega t \sin(\omega t - \phi) \quad 4.6$$

veya bilinen trigonometrik dönüşümleri kullanarak

$$p = \frac{V_{\max} I_{\max}}{2} [ \cos \phi - \cos(2\omega t - \phi) ] \quad 4.7$$

elde ederiz. Akım ve gerilimin efektif veya rms değerlerini

$$|V| = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{\max} \quad |I| = \frac{1}{\sqrt{2}} I_{\max} \quad 4.8$$

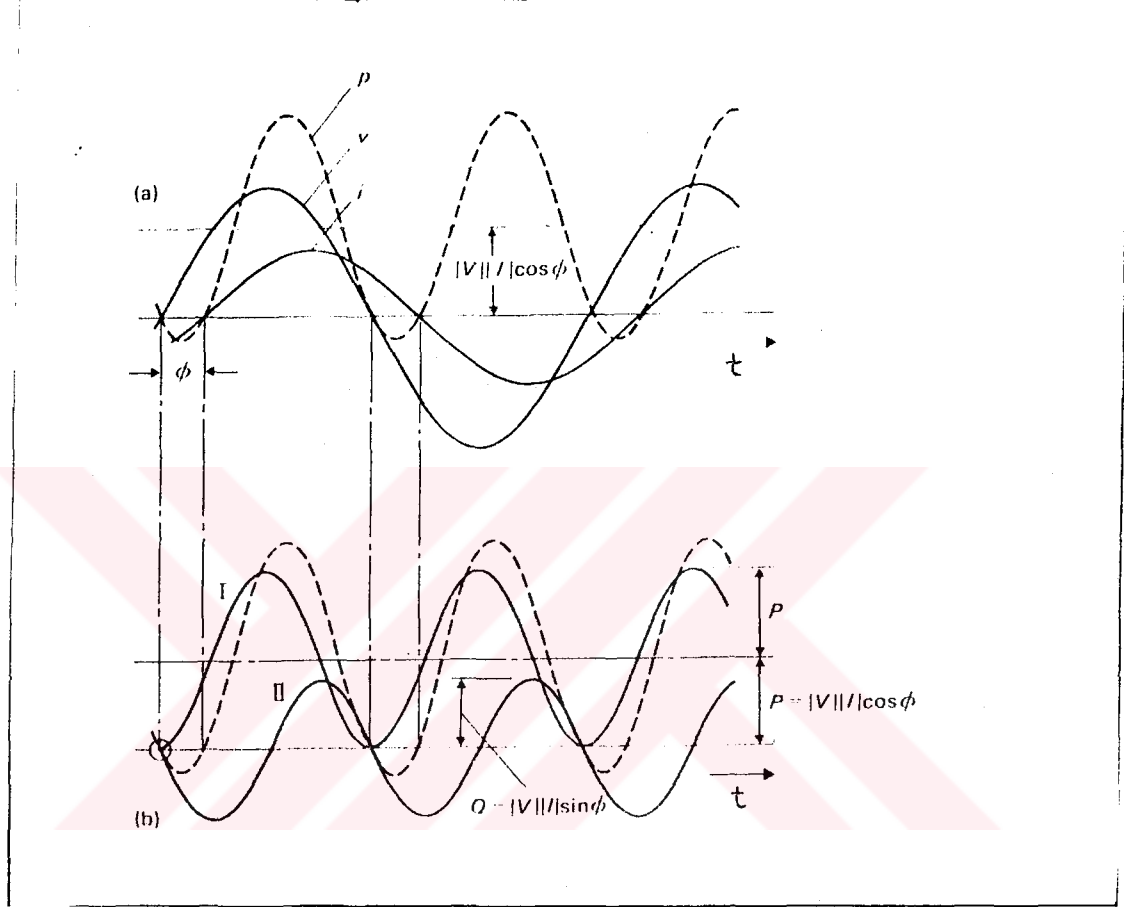
bağıntıları yardımı ile ifade edebiliriz. 4.7 bağıntısından yararlanarak güç için

$$P = |V| |I| \cos \phi - |V| |I| \cos(2\omega t - \phi) \quad 4.9$$

denklemini yazabiliriz.

İletilen güç eğrisi, ortalama bir güç değeri civarındadır ( Şekil 4.2) ve açısal frekansı  $2\omega$ 'ya eşittir. Belirli periyotlarda güç negatif değerler alır. Gücün negatif değerler alması enerji akışının bu esnada yükten generatöre doğru olduğunu gösterir.

Temel AC teori ve kavramların önceden bilindiğini kabul ederek sadece bir sembol karışıklığını önlemek açısından bu bilgilere kısaca değineceğiz.



Şekil 4.2 Tek fazlı AC devresinde gerilim, akım ve güç değişim eğrileri

Sinusoidal gerilim-zaman fonksiyonu

$$v = V_{\max} \sin(\omega t + \alpha) \quad 4.10$$

olsun. Euler formülü

$$e^{j(\omega t + \alpha)} = \cos(\omega t + \alpha) + j \sin(\omega t + \alpha) \quad 4.11$$

şeklindedir.  $\text{Im}\{\dots\}$  sembolü ile bir ifadenin imajiner kısmını gösterirsek gerilim ifadesini

$$v = \text{Im} \{ V_{\max} e^{j(\omega t + \alpha)} \}$$

$$v = \sqrt{2} \text{Im} \left\{ \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} e^{j\alpha} e^{j\omega t} \right\}$$
4.12

şeklinde verebiliriz. V gerilim fazörünü kompleks sayı olarak tanımlarsak

$$v = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} e^{j\alpha}$$
4.13

olur. V fazörünün modülü ve argümanı

$$|V| = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} \quad \angle V = \alpha$$
4.14

şeklinde ifade edilir.

#### 4.2.1.1 Aktif ve reaktif güç

4.9 denkleminde güç ifademizi

$$p = |V||I| \cos\phi - |V||I| (\cos 2\omega t \cos\phi + \sin 2\omega t \sin\phi)$$

$$p = |V||I| \cos\phi (1 - \cos 2\omega t) - |V||I| \sin\phi \sin 2\omega t$$
4.15

şeklinde yazarsak iki bileşene ayırabiliriz. (Şekil 4.2.b'de I ve II olarak verildi) İlk eğri (4.2.a) şeklindeki yaklaşık olarak aynı değere sahip bir ortalama değer civarında olacaktır. Ancak negatif değerler almaz. İkinci eğrinin ise ortalama değeri sıfır'dır.

Aktif ve reaktif güç ifadeleri

$$P = |V||I|\cos\phi \quad Q = |V||I|\sin\phi \quad 4.16$$

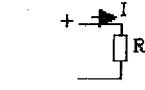
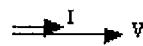
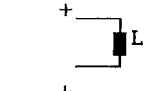
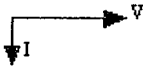


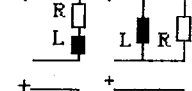
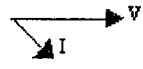
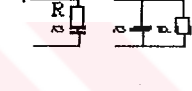
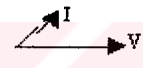
şeklinde tanımlanır. Bu ifadelerin önemi olduğundan anlamları hakkında biraz bilgi vermem uygun olur kanısındayım.

1. Aktif güç  $P$ ,  $p$  nin ortalama değeri olarak tanımlanmıştır ve bu nedenle fiziksel olarak iletimdeki faydalı güçtür. Büyüklüğü  $\cos\phi$  güç faktörüne bağlıdır.
2. Reaktif güç  $Q$ , hatta ileri geri hareket eden güç bileşenlerinin tepe değerine eşittir ve ortalama değeri sıfırdır. Bu nedenle faydalı iş kapasitesi yoktur.

$P$  ve  $Q$ 'nin her ikisinde boyutu watt'tır. Ancak reaktif gücü ifade etmek için volt amper reaktif birimi kullanılır. Bunun sembolü ise var'dır. Tablo 4.1 bazı yük tipleri için aktif ve reaktif güçleri beraberce belirtmiştir. Endüktif yük (+)  $Q$ , kapasitif yük (-)  $Q$  abzorbe eder.



Tablo 4.1 Genel yük tipleri

YÜK TİPİ	FAZÖR İFADESİ	FAZ AÇISI	YÜKÜN HARCADIĞI GÜÇ P Q
		$\phi=0$	$P>0$ $Q=0$
		$\phi=90$	$P=0$ $Q>0$
		$\phi=-90$	$P=0$ $Q<0$
		$0<\phi<90$	$P>0$ $Q>0$
		$-90<\phi<0$	$P>0$ $Q<0$

## 4.2.1.2 Görünen güç

Çok önemli bir güç kavramında voltamper (VA) veya görünen güç olarak ifade edilen güç tür. Bu güç bir devreden geçen rms akımı ve uçlarındaki rms gerilimi etkisi ile meydana geldiğinden

$$\text{Voltamper} = |V| |I| \quad 4.17$$

şeklinde tanımlanabilir. Bu ifadenin yardımı ile

$$\text{Voltamper} = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad 4.18$$

yazabiliriz.

### 4.2.3 Kompleks güç kavramı

Güç sistemi çalışmalarında kompleks güç kavramı büyük bir hesaplama kolaylığı verir. Gerilim ve akım fazörleri için

$$V = |V|e^{j\angle V} \quad I = |I|e^{j\angle I} \quad 4.19$$

yazabiliriz. Kompleks güç ifademiz

$$S = V I^* \quad 4.20$$

dir. Bu denklemden akım gerilim ifadelerini yerine yerleştirirsek

$$S = V I^* \quad 4.21$$

$$S = |V|e^{j\angle V} |I|e^{-j\angle I}$$

$$S = |V||I|e^{j\angle V - \angle I}$$

elde edilir.  $\angle V - \angle I$  faz açısı daha önce belirtilen  $\phi$  açısıdır ve böylece

$$S = |V||I|e^{j\phi}$$

$$S = |V||I|\cos\phi + j|V||I|\sin\phi \quad 4.22$$

$$S = P + jQ$$

bulunur.

$$V = Z I \quad \text{ve} \quad I = Y V \quad 4.23$$

bağıntılarını kullanarak denklem 4.20'yi iki farklı biçimde yazabiliriz.

$$S = V Y^* V^* \quad S = Y^* |V|^2 \quad 4.24$$

veya

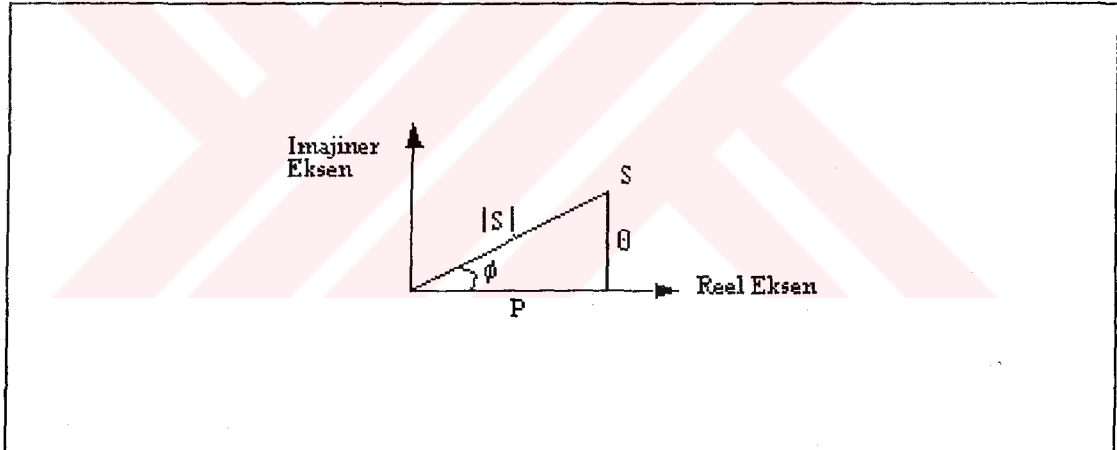
$$S = Z I I^* \quad S = Z |I|^2 \quad 4.25$$

Şimdiye kadar bulduğumuz güç ifadelerini toparlarsak, üç farklı güç ifadesi elde ederiz.

$$\begin{aligned} S &= P + jQ & S &= VI^* \\ S &= Z|I|^2 & S &= Y^*|V|^2 \end{aligned} \quad 4.26$$

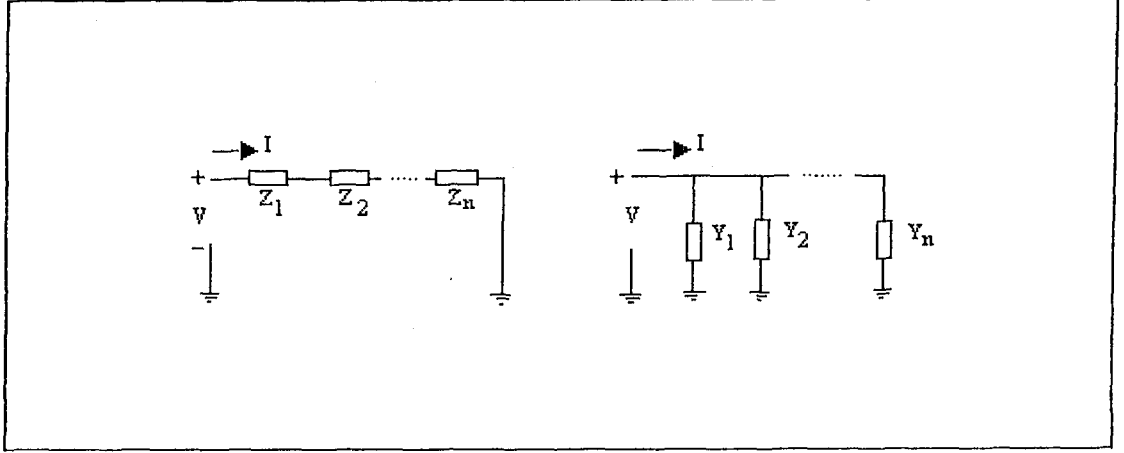
Bu ifadenin denklem 4.18 ile karşılaştırılması ile  $|S|$ 'in daha önce görünen güç olarak tanımlandığını görürüz.

$S$  kompleks bir sayı ise bunu kompleks düzlemde Şekil 4.3 de gösterildiği gibi belirtebiliriz. Aktif, reaktif ve görünen güçler, çizilen üçgenin kenar büyüklüklerine karşılık gelirler. Bu üçgene güç üçgeni denir.



Şekil 4.3 Güç üçgeni

Kompleks güç ifadesi kullanımı toplu bilgi verdiği için uygundur. Şimdi Şekil 4.4 de verilen iki devreyi düşünelim.



Şekil 4.4 Çok uçlu devreler

Seri devre için kompleks güç ifadesi

$$S_i = |I|^2 Z_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad 4.27$$

toplam güç ise

$$S_{top} = VI^* \quad 4.28$$

dir. Devremizdeki gerilim düşümü

$$V = IZ_1 + IZ_2 + \dots + IZ_n \quad 4.29$$

olduğundan toplam gücü

$$S_{top} = (IZ_1 + IZ_2 + \dots + IZ_n)I^*$$

$$S_{top} = |I|^2 Z_1 + |I|^2 Z_2 + \dots + |I|^2 Z_n \quad 4.30$$

şeklinde ifade edebiliriz. İfademizi kısaltılmış biçimde verirsek

$$S_{top} = \sum_{i=1}^n S_i \quad 4.31$$

olacaktır. Benzer olarak Şekil 4.4 deki paralel devre için denklemlerimizi yazarsak kompleks güç

$$S_i = |V|^2 Y_i^2 \quad i = 1, \dots, n \quad 4.32$$

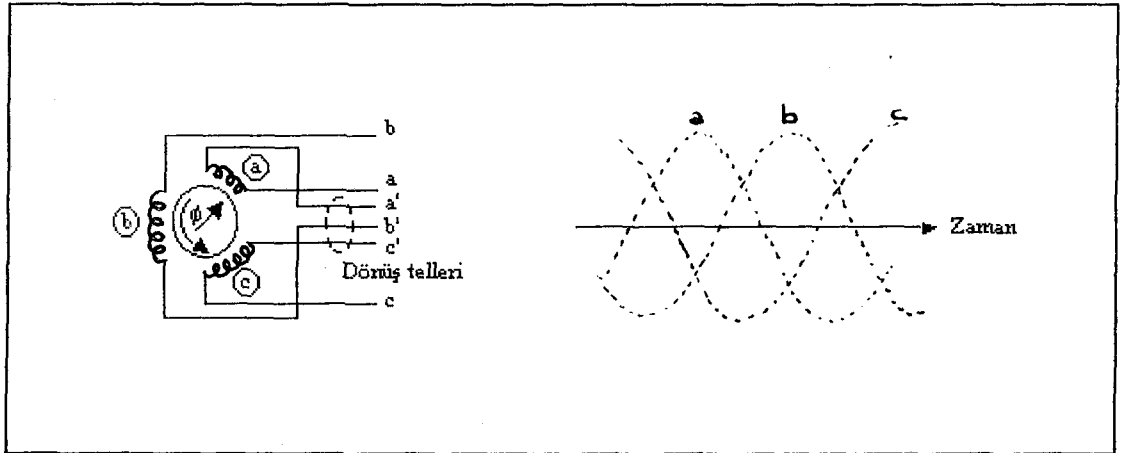
olacaktır. Sistemdeki toplam akım için

$$I = VY_1 + VY_2 + \dots + VY_n \quad 4.33$$

yazabileceğimize göre güç için Denklem 4.31'dekine benzer bir ifade bulabiliriz.

#### 4.2.2 Üç fazlı iletim

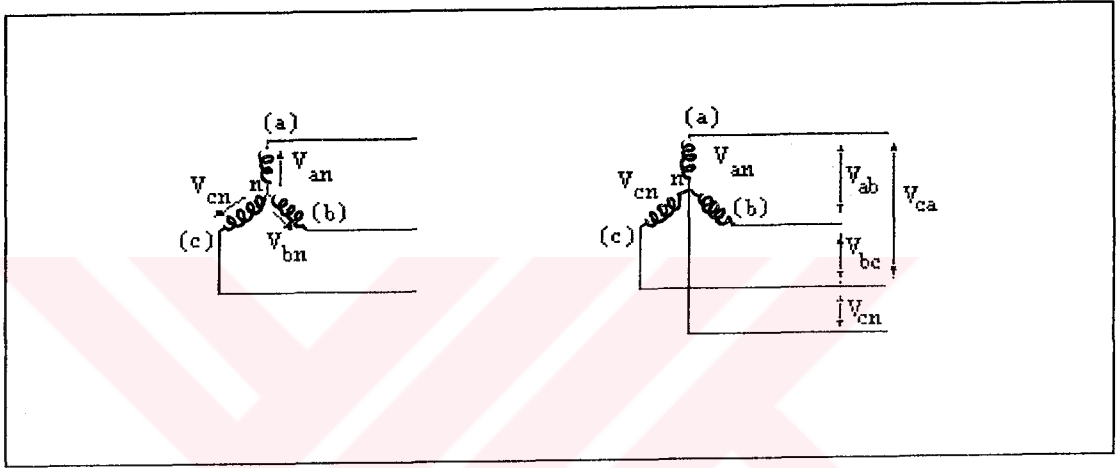
AC generatörünün rotor flüksi sinusoidal emk'ler meydana getirir. Bu tür tek fazlı bir makinada stator sargısını meydana getiren iletkenler stator çevresindeki oluklara yerleştirilmiştir. Sargı Şekil 4.5.a daki gibi birbirinin aynı üç ayrı sargıdan meydana gelecek şekilde yerleştirilirse iletkenlerin tümünün etkinliği artacaktır. Böylece belirli bir boyuttaki makinanın çıkış gücü oldukça büyüyecektir.



Şekil 4.5 Senkron makina

- Stator sargısı  $120^\circ$  lik faz farkı meydana getirecek şekilde üç ayrı sargıdan oluşan senkron makina
- Sargılarda üretilen emk lerin zamanla değişimi

a fazındaki gerilim maksimum değerine b fazından  $120^\circ$ , c fazından  $240^\circ$  önce ulaştığından faz sırası a - b - c dir. Faz gerilimlerinin cebirsel toplamı ( sargı akımları eşitse akımların toplamı ) her an sıfırdır. Yıldız bağlı bir üç fazlı sistem Şekil 4.6.a da gösterilmiştir. Sargılardan çekilen akımlar birbirine eşit değilse genel bağlantıya veya nötr noktaya Şekil 4.6.b de gösterildiği gibi dördüncü bir tel bağlanır.

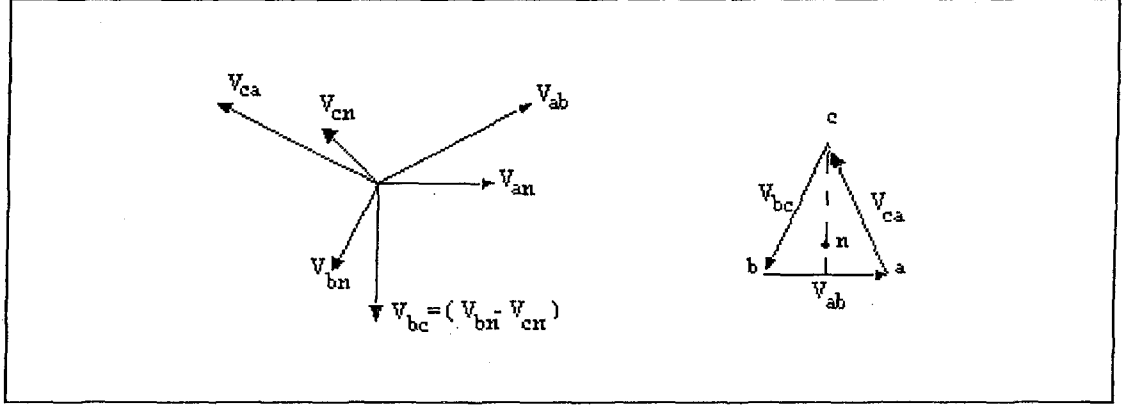


Şekil 4.6 a) Sargıların yıldız bağlantısı  
b) Nötr hatlı yıldız bağlantı

Bu bağlantıda iki grup gerilim mevcuttur.

a. Faz - nötr gerilimi yani  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$ ,  $V_{cn}$

b. Faz - faz gerilimi.  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ ,  $V_{ca}$ . Bunlara karşılık düşen fazör diagramı Şekil 4.7.a daki gibidir.  $V_{ab} = V_{bc} = V_{ca} = \sqrt{3}$  . faz gerilimi şeklinde gösterilebilir.

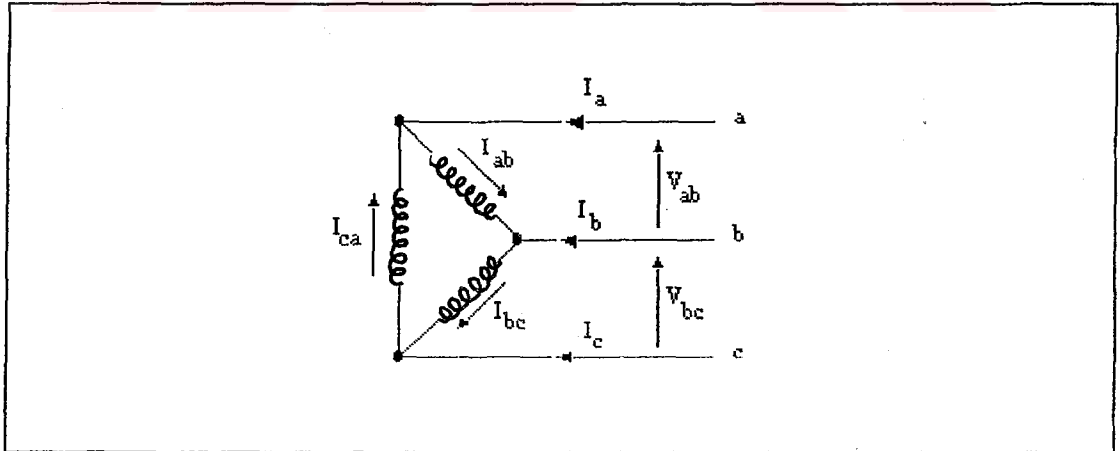


Şekil 4.7 a) Yıldız bağlantı için fazör diagramı  
b) Faz - faz gerilimlerinin düzenlenmesi. Nötr gerilimi n'dedir.

Başka bir sargı bağlama biçiminde Şekil 4.8 de gösterildiği gibidir. Bu üçgen bağlantı olarak bilinir. Faz akımları

$$\begin{aligned} I_a &= I_{ab} - I_{ca} & I_b &= I_{bc} - I_{ab} \\ I_c &= I_{ca} - I_{bc} \end{aligned} \quad 4.34$$

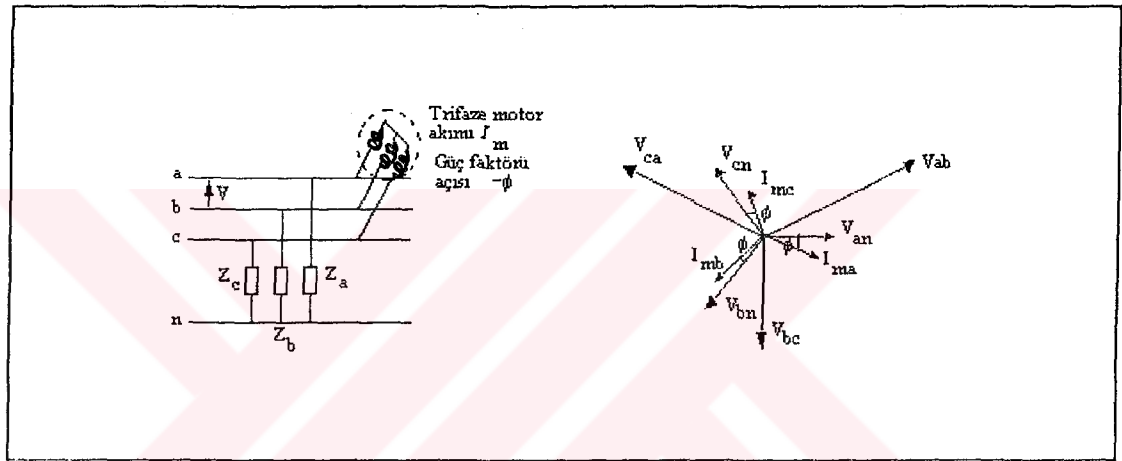
dır.



Şekil 4.8 Üçgen bağlantıdaki yük akımları

## 4.2.2.1 Basit üç fazlı devrelerin analizi

a. 4 iletkenli sistemler ----- Hatlarda endüktif gerilim düşümleri ihmal edilebiliyorsa her bir yük uçlarındaki gerilim, faz gerilimi veya kaynak hat gerilimidir. Bir fazlı yükler ve dengeli bir üç fazlı yük ( bir endüksiyon motor ) ile Şekil 4.9 daki devreyi düşünelim.



Şekil 4.9 a ) Dört iletkenli sistem.

b ) Fazör diagramı

Üç fazlı yükün güç faktörünün faz akım ve gerilimine göre ifade edildiğine dikkat edelim. Faz akımları aşağıdaki gibidir.

$$I_a = \frac{V}{\sqrt{3} Z_a} + Im(Cos\phi - jSin\phi)$$

$$I_b = \frac{V}{\sqrt{3} Z_b} (-0.5 - j0.866) + Im[-Cos(60 - \phi) - jSin(60 - \phi)] \quad 4.35$$

$$I_c = \frac{V}{\sqrt{3} Z_c} (-0.5 + j0.866) + Im[-Cos(60 + \phi) + jSin(60 + \phi)]$$

Nötr akımı

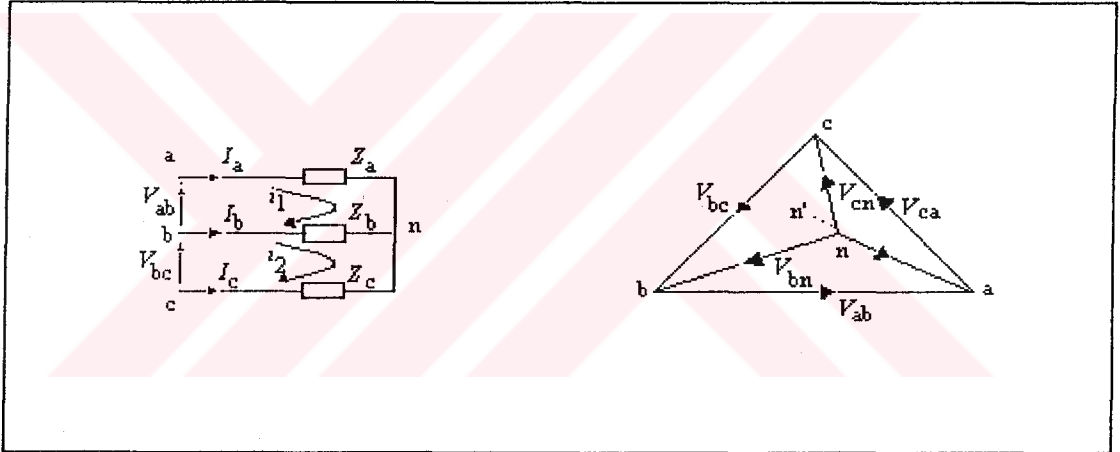


$$I_n = I_a + I_b + I_c$$

4.36

b. Dengeli üç fazlı sistem ----- Sistem bir fazlı sistemde kullanılan faz gerilimleri gibi davranır.

c. Dengesiz üç fazlı sistem ----- Karmaşık sistemlerde simetrik bileşenler metodu kullanılmıştır. Ancak basit sistemlerde konvansiyonel devre teorisi uygulanabilir. Yükün Şekil 4.10 da gösterildiği gibi olduğunu kabul edelim. Burada  $Z_a = Z_b = Z_c$  dir.



Şekil 4.10 a ) Dengesiz yüklü üç fazlı sistem.  $i_1, i_2$  göz akımları  
b ) Fazör diagramı

Çevre akımları metodu yardımı ile

$$\begin{bmatrix} Z_a + Z_b & -Z_b \\ -Z_b & Z_b + Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \\ V(-0.5 - j0.866) \end{bmatrix} \quad 4.37$$

denklemini yazabiliriz.  $i_1$  ve  $i_2$  belirlendikten sonra bunların yardımı ile  $I_a, I_b, I_c$  ve n noktası gerilimi hesaplanabilir.

Yıldız veya üçgen bağlı dengeli üç fazlı bir yükte harcanan aktif ve reaktif güç

$$P = \sqrt{3} VI \cos\phi \quad Q = \sqrt{3} VI \sin\phi \quad 4.38$$

dir.

### 4.3 Per-unit sistem

Güç devre analizinde bileşenlerin gerçek değerleri yerine bir referans değerine göre ifade edilmiş hali kullanılır. Böylece pekçok avantajlar elde edilir.

1. Per-unit veri gösterimi rölatif büyüklük verir.
2. Çeşitli transformasyon oranlarına sahip transformatörleri ihtiva eden sistemlerin analizini kolaylaştırır.
3. Devre parametreleri rölatif olarak bağlı değerler olarak sayıları azaltır. Farklı boyutlardaki cihazlar, kayıplar ve gerilim düşümleri olacaktır. Aynı tipteki cihazlar için pu gerilim düşümleri ve kayıplar boyut ne olursa olsun aynı cins kalacaktır.
4. Üç fazlı hesaplamalarda  $\sqrt{3}$  kullanımı azalacaktır.
5. Per-unit değerleri, hesaplamada kolaylık sağlar

Herbir bileşenin pu değeri

Gerçek değer ( herhangi bir birimde )  
Aynı birimdeki referans değeri

Direnç

$$R_{pu} = \frac{R(\Omega)}{\text{temel } R(\Omega)} \quad 4.39$$

$$R_{pu} = \frac{R(\Omega) I_b}{V_b} \quad 4.40$$

Burada  $V_b$ ,  $I_b$  temel gerilim, akım değerleridir.

Benzer olarak

$$\text{pu empedans} = \text{empedans} / ( (\text{temel gerilim}) / (\text{temel akım}) )$$

Bir pu faz gerilimi pu hat gerilimi gibi aynı nümerik değere sahiptir. pu sistemde akım, gerilim ve gücün üç faz değerleri yanlış  $\sqrt{3}$  çarpanının bulunma korkusu olmaksızın kullanılabilir.

$$I_b = \frac{\text{temel VA}}{\sqrt{3} V_b} \quad 4.41$$

temel

$$Z = \frac{V_b / \sqrt{3}}{I_b} \quad 4.42$$

yıldız bağlı bir sistemin kabulü ile

$$Z = ( \text{temel hat gerilimi} )^2 / \text{temel VA}$$

Sadece faz değerlerini kullanarak elde edilen  $Z_b$  için aynı değerlerin bulunduğuna dikkat edilmelidir. Bu nedenle

$$Z_{pu} = Z ( \Omega ) \text{ temel VA} / ( \text{temel gerilim} )^2$$

Böylelikle,

$$Z_{pu} (\text{yeni baz}) = Z_{pu} (\text{orjinal değer}) ( V_{\text{eski}} / V_{\text{yeni}} )^2 ( VA_{\text{yeni}} / VA_{\text{eski}} )$$

## 5. GÜÇ İLETİM HATLARI

İletim hatları bir elektrik enerji sisteminin ana yollarını meydana getirmektedirler. İyi geliştirilmiş, yüksek kapasiteli iletim hatları teknik ve ekonomik olarak uzak mesafelerden elektrik enerjisinin büyük bloklar halinde çekilmesini mümkün kılar. Elektrik iletimi aşağıdaki sıralamada yer alan sistemlerin herhangi biri ile DC veya AC şeklinde gerçekleştirilebilir.

1.Havai hatlar

2.Yeraltı kabloları

Dünyadaki güç hatlarının büyük çoğunluğu çıplak iletkenli, iletken ortam olarak etrafındaki havadan yararlanan üç fazlı havai hatlardır.Güvenlik veya diğer sebepler nedeni ile yoğun yerleşim merkezlerinde havai hatlar kullanılmazsa güç yeraltı kabloları ile iletilir. Faz iletkeni ve etrafındaki topraklanmış cidar arasındaki yakınlıktan dolayı paralel kapasite oldukça büyüktür ve bu nedenle kapasitif sızıntı " leakage " akımları aşırı değerlere yükselir. Bu nedenle AC kabloları birkaç kilometrelik kısa iletim mesafeleri için kullanılabilirler.

Şüphesizki yüksek-gerilim DC kullanıldığında ( HVDC ) kapasitif sızıntı problemi yoktur. 100 km uzunluğunda HVDC sualtı kabloları servise konulmuştur. ( Norveç ve Danimarka arasında ) Keza HVDC havai iletim hatları da kullanılmaktadır. Elektrik gücü çok büyük mesafeler boyunca ( 1000 km'den büyük ) iletilecekse AC hatlardan daha avantajlıdır.

Belli sınırlarda yalıtım için basınçlı gaz kullanılan iletim hatları ise çok kısa iletim mesafelerinde genellikle güç merkezlerinde kullanılırlar.

### 5.1 Alternatif Akım İletimi

Bir sistem mühendisi ilk önce iletim hattının elektrik performans karakteristikleri ile ilgilenmektedir. Bu karakteristikler aşağıda önem sırasına göre dizilmiş dört hat parametresi ile ifade edilmektedir.

- 1.Hat endüktansı
- 2.Hat kapasitansı
- 3.Hat direnci
- 4.Hat kondüktansı

Bu parametreleri sırası ile L, C, R ve G ile gösterip pratikte iletim hattı faz başına ifade edeceğiz. İletim hattı simetrik değilse parametreleri faz başına ifade etmemiz teorik olarak pek mümkün değildir. Ancak bazı yaklaşımlar yapmaya imkan verirse pratik bir uygunluk gerçekleştirilebilir.

#### 5.1.1 Hat direnci ve kondüktansı

R ve G'yi en az önemli bileşen olarak sınıflandırmamızın nedeni eşdeğer hat empedansını, buna bağlı olarak iletim kapasitesini önemsiz bir oranda etkilemesidir. Şüphesizki gerçek iletim kayıplarını ve ilgilendiğimiz enerji kaybını arttırdığından bu değerleri de dikkate almalıyız.

Direnç

$$R = \rho / A \quad \text{ohm/m-faz} \quad 5.1$$

formülü yardımı ile bulunur. Kondüktans için güvenilir bir formül yoktur. Kondüktans faz ve toprak arasında rezistivite akım sızıntısı için hesaba katılır. Normal çalışma durumunda ihmal edilebilecek büyüklükte olduğundan genellikle bu parametreyi hesaplarımıza dahil etmeyiz.

### 5.1.2 Hat endüktansı

Bir güç hattının endüktansı en önemli hat parametresidir. Endüktans en kolay

$$L = \phi / i \quad H \quad 5.2$$

formülü ile hesaplanabilir. Ancak akıyı bulmanın zor olduğu durumlarda önce depolanan magnetik alan enerjisi hesaplanıp daha sonra endüktans bulunur. Hat endüktansı için formüllerin çıkarılmasında magnetik alan geometrisini tam olarak bilmek gerekmektedir. İletkenlerin çeşitli tellerden yapıldığını düşünelim. Hat elektriki ve magnetik özelliklerinin iyi bilinmediği arazi üzerinden geçebilir. Bu gerçekler altında aşağıdaki kabülleri yapmak mümkündür ve test sonuçları bunun kabul edilebilir doğrulukta sonuç verdiğini onaylar.

1. İletkenler düz, paralel ve sonsuz kabul edilmektedir.
2. İletkenler dairesel kesitlidirler ve akım yoğunluğu düzgündür.
3. Toprağın bulunuşu magnetik alana etki etmeyecektir ve bu nedenle endüktans formüllerine etki etmez.
4. Toprağın bulunuşu kapasite formüllerininin modifiye edilmesi gerektiğinde bazen ölçülebilecek boyutta elektrik alanına etki edecektir.

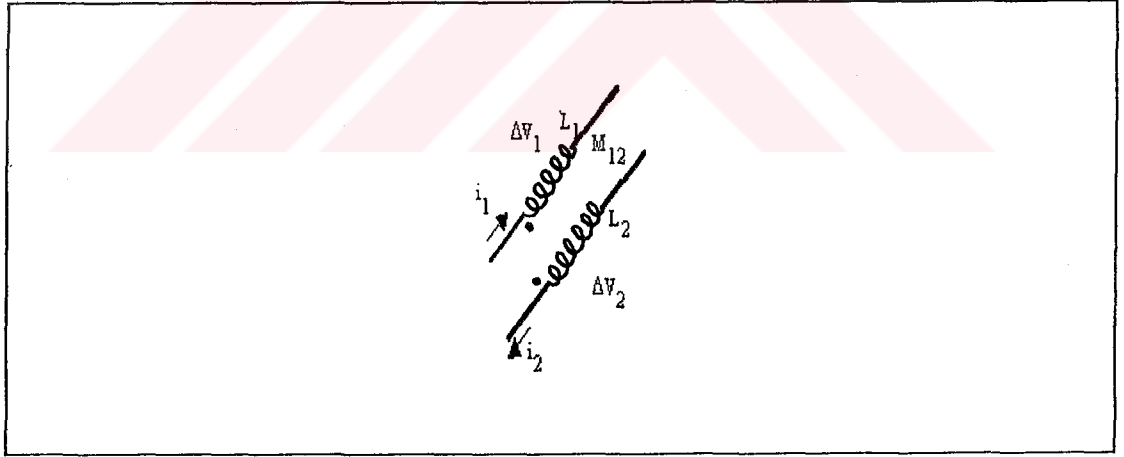
Tek fazlı hatta

$$L = \frac{\mu_o}{\pi} \left( \frac{\mu}{4} + \ln \frac{D}{\sqrt{R_1 R_2}} \right) \quad H/m \quad 5.3$$

Burada  $\mu_o = 4\pi 10^{-7}$  Boşluğun magnetik geçirgenliği  
 $\mu$  Ortamın magnetik geçirgenliği  
 dir. Magnetik olmayan bir hat için

$$L = \frac{\mu_o}{\pi} \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{D}{R} \right) \quad 5.4$$

Bir an için magnetik kuplajlı iki bobinli endüktif devreyi düşünelim. İki bobin  $L_1$  ve  $L_2$  self endüktansları ve  $M_{12}$  karşılıklı endüktans ile gösterilmektedir.



Şekil 5.1 Magnetik kuplajlı iki bobinli endüktif devre

Bobinleri seri olarak bağlar ve içinden akım geçirirsek  $\Delta V_1$  ve  $\Delta V_2$  endüktif gerilim düşümleri

$$\Delta v_1 = L_1 \frac{di}{dt} - M_{12} \frac{di}{dt}$$

$$\Delta v_2 = L_2 \frac{di}{dt} - M_{12} \frac{di}{dt} \quad 5.5$$

dir. Toplam gerilim düşümü

$$\Delta v_1 + \Delta v_2 = (L_1 + L_2 - 2M_{12}) \frac{di}{dt} \quad 5.6$$

Parantez içindeki ifade bobinlerin oluşturduğu toplam empedanstır. Magnetik polarite şekilde verildiği yönün ters yönünde ise son terim pozitif olur.

Yukarıdaki şekilde gösterilebilecek tek-fazlı hat için toplam endüktans

$$L = \frac{\mu_o}{2\pi} \left[ \left( \frac{\mu}{4} + \ln \frac{1}{R_1} \right) + \left( \frac{\mu}{4} + \ln \frac{1}{R_2} \right) - 2 \ln \frac{1}{D} \right] \quad H/m \quad 5.7$$

dir. Her bir iletkenin endüktif gerilim düşümleri denklem 5.5 den

$$\Delta v_1 = \frac{\mu_o}{2\pi} \left( \frac{\mu}{4} + \ln \frac{D}{R_1} \right) \frac{di}{dt} \quad V/m$$

$$\Delta v_2 = \frac{\mu_o}{2\pi} \left( \frac{\mu}{4} + \ln \frac{D}{R_2} \right) \frac{di}{dt} \quad V/m \quad 5.8$$

olacaktır.

AC durumunda v ve i ifadelerini V-I fazörleri, d/dt'yi de jw operatörü kullanarak gösterirsek

$$\Delta v_1 = \frac{\mu_o}{2\pi} jw \left( \frac{\mu}{4} + \ln \frac{D}{R_1} \right) I$$



$$\Delta v_2 = \frac{\mu_o}{2\pi} j\omega \left( \frac{\mu}{4} + \ln \frac{D}{R_2} \right) I \quad 5.9$$

olacaktır.

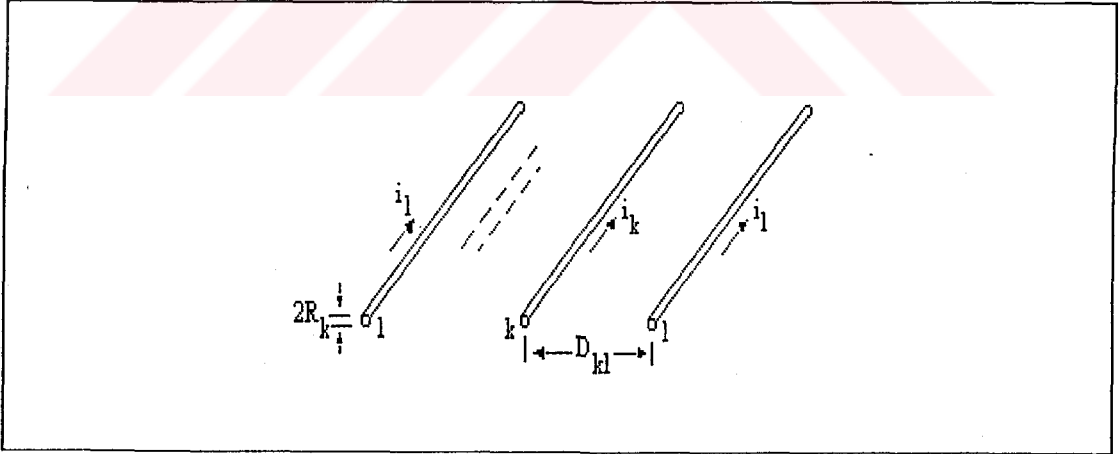
### 5.1.2.1 n-iletkenli durum

Şekil 5.2'de gösterilen n-iletkenli durum için self ve karşılıklı endüktans ifadeleri

$$L_k = \frac{\mu_o}{2\pi} \left( \frac{\mu_k}{4} + \ln \frac{1}{R_k} \right) H/m$$

$$M_{kl} = \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \frac{1}{D_{kl}} H/m \quad 5.10$$

şeklinde verilebilir.



Şekil 5.2 n-iletkenli hat

$L_k$  , k.cı iletkenin self endüktansı,  $M_{kl}$  de k. ve l. iletkenler arasındaki karşılıklı endüktanslardır. Bu endüktanslar cinsinden n tane paralel iletkenin her biri için endüktif gerilim düşümlerini belirleyebiliriz. Sinusoidal akımda ise

$$\Delta v_k = j\omega L_k I_k + \sum_{v=1}^n j\omega M_{kv} I_k \quad V/m \quad 5.15$$

yazılabilir.

### 5.1.2.2 Üç fazlı hatlar için endüktans hesaplamaları

Şimdi şekil 5.3 de verildiği gibi faz iletkenlerinin yatay bir düzeye yerleştirildiği üç fazlı hattın endüktansını çıkaralım. Bu pratikte kullanılan oldukça genel bir durumdur.[8]

a. ve b. durumundaki hatları mukayese edelim.

Durum a. Transpoze edilmemiş durum --- a fazında gerilim düşümü için 5.15 denklemini kullanarak

$$\Delta V_a = j\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{1}{R} \right) I_a + j\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \frac{1}{D} I_b + j\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \frac{1}{2D} I_c \quad 5.16$$

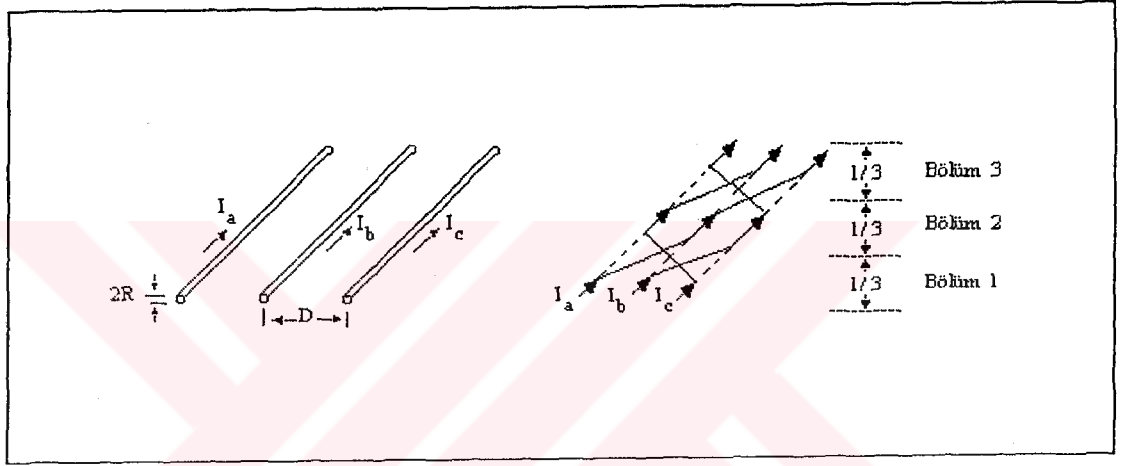
ifadesini yazabiliriz. Bu bağıntıda  $I_c$ 'yi indirgersek

$$\Delta V_a = j\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{2D}{R} \right) I_a + j\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \ln 2 I_b \quad V/m \quad 5.17$$

Benzer biçimde b ve c fazlarının metre başına gerilim düşümlerini hesaplırsak

$$\Delta V_b = j\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{D}{R} \right) I_b \quad 5.18$$

$$\Delta V_c = j\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{2D}{R} \right) I_c + j\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \ln 2 I_b \quad V/m \quad 5.19$$



Şekil 5.3 İletkenlerin yatay bir düzleme yerleştirildiği üç fazlı iletim hattı  
a. Transpoze edilmemiş durum  
b. Transpoze durum

elde ederiz. Bu denklemleri matrisyel olarak ifade edersek

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} = j\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \begin{bmatrix} \frac{1}{4} + \ln \frac{2D}{R} & \ln 2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4} + \ln \frac{D}{R} & 0 \\ 0 & \ln 2 & \frac{1}{4} + \ln \frac{2D}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad 5.20$$

Durum b. Transpoze edilmiş (veya faz simetrlili) hat --- Şimdi 5.3.b şeklindeki üç farklı bölümü ayrı ayrı inceleyelim.

1. bölümde yukarıdaki matrisyel biçimde ifade edilen denklem sonuçları bulunur.  
2. ve 3. bölümde aynı denklem Şekil 5.3.b'dekine uygun olarak değişik indekslerin transpoze edilmesi ile kullanılabilir.

Bölüm 2 için

$$\begin{bmatrix} \Delta V_c \\ \Delta V_a \\ \Delta V_b \end{bmatrix} = j\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \begin{bmatrix} \text{AYNI} \\ \dots \\ \text{denklem gibi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_c \\ I_a \\ I_b \end{bmatrix} \quad 5.21$$

Bölüm 3 için

$$\begin{bmatrix} \Delta V_b \\ \Delta V_c \\ \Delta V_a \end{bmatrix} = j\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \begin{bmatrix} \text{AYNI} \\ \dots \\ \text{denklem gibi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_b \\ I_c \\ I_a \end{bmatrix} \quad 5.22$$

Böylece a fazındaki gerilim düşümü

$$\Delta V_a = \frac{\Delta V_a^1 + \Delta V_a^2 + \Delta V_a^3}{3} \quad 5.23$$

$$\Delta V_a = j\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \left\{ \frac{1}{4} + \ln \frac{\sqrt{2}D}{R} \right\} I_a \quad V/m \quad 5.24$$

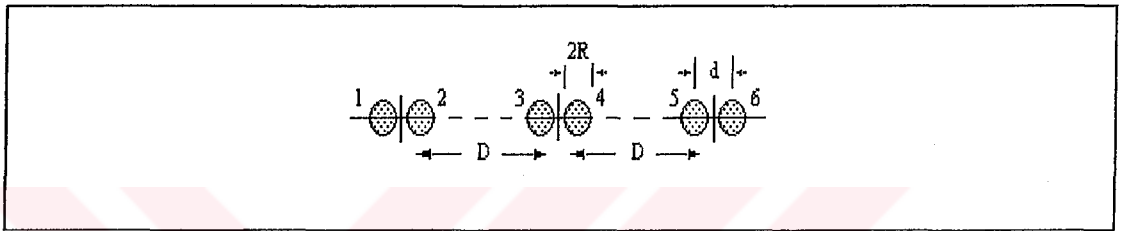
dir.  $\Delta V_b$  ve  $\Delta V_c$  için benzer ifadeleri türetip matrisyel olarak ifade edersek

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} = j\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \begin{bmatrix} \frac{1}{4} + \ln \sqrt{2} \frac{D}{R} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4} + \ln \sqrt{2} \frac{D}{R} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4} + \ln \sqrt{2} \frac{D}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad 5.25$$

elde ederiz. Burada iki hattı mukayese edersek

1. Transpoze hatta endüktans matrisi eşit diagonal elemanlıdır ve faz başına analize imkan verir.
2. Transpoze edilmeyen hatta endüktans matrisi diagonal değildir. Üç faz simetrisi mümkün değildir.

### 5.1.2.3 Demet iletkenli üç fazlı hatlarda endüktans hesaplamaları



Şekil 5.4 Demet iletkenli üç fazlı hat

Burada koronayı azaltmak için birbirine  $d$  mesafede yerleştirilmiş iki iletken kullanmaktayız. Hattın transpoze edildiğini kabul edelim.

Endüktif gerilim düşümünü hesaplamada fazdaki iki paralel iletken sadece birini düşünebiliriz. Gerilim düşümü her ikisinde de eşit olacaktır ve her bir iletkenin faz akımını eşit olarak taşıdığını düşünelim. 1. iletkeni seçelim ve 1. bölümde metre başına gerilim düşümü

$$\Delta V_1 = j\omega \frac{\mu_o}{4\pi} \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{1}{R} \right) I_a + j\omega \frac{\mu_o}{4\pi} \ln \frac{1}{d} I_a + \quad (1 \text{ ve } 2)$$

$$j\omega \frac{\mu_o}{4\pi} \ln \frac{1}{D} I_b + j\omega \frac{\mu_o}{4\pi} \ln \frac{1}{D+d} I_b + \quad (3 \text{ ve } 4) \quad 5.26$$

$$j\omega \frac{\mu_o}{4\pi} \ln \frac{1}{2D} I_c + j\omega \frac{\mu_o}{4\pi} \ln \frac{1}{2D+d} I_c \quad V/m \quad (5 \text{ ve } 6)$$

Bu ifadedeki altı terim altı iletkendeki akımın toplam gerilim düşümüne katkılarını gösterir.  $d \ll D$  olduğundan 3, 4 terimleri ile 5, 6 terimlerini pratiki olarak eşit deriz. İfade aşağıdaki şekilde indirgenir

$$\Delta V_1 = j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{1}{R} + \ln \frac{1}{d} \right) I_a + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{D} I_b + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{2D} I_c \quad V/m$$

5.27

Şimdi 3 ( veya 4 ) ve 5 ( veya 6 ) iletkenleri için bölüm 2 ve 3 deki gerilim düşümlerini bulursak

$$\Delta V_3 = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{1}{8} + \ln \frac{D}{\sqrt{Rd}} \right) I_a \quad V/m \quad 5.28$$

$$\Delta V_5 = j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{1}{R} + \ln \frac{1}{d} \right) I_a + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{2D} I_b + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{D} I_c \quad 5.29$$

$\Delta V_1$ ,  $\Delta V_2$  ve  $\Delta V_3$  ün ortalamasını alarak a fazında m başına toplam endüktif gerilim düşümünü elde ederiz.

$$\Delta V_a = \frac{\Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3}{3} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ \frac{1}{8} \ln \frac{\sqrt[3]{2D}}{\sqrt{Rd}} \right] I_a \quad V/m \quad 5.30$$

Faz başına reaktans

$$x = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \left[ \frac{1}{8} + \ln \frac{\sqrt[3]{2D}}{\sqrt{Rd}} \right] \quad ohm/m \quad 5.31$$

dir.

Şekil 5.3'deki tek-iletkenli hat için elde ettiğimiz değerlerle bu değerleri karşılaştırırsak demet iletkenin hat reaktansını azaltarak iletim kapasitesini arttırdığını görürüz.

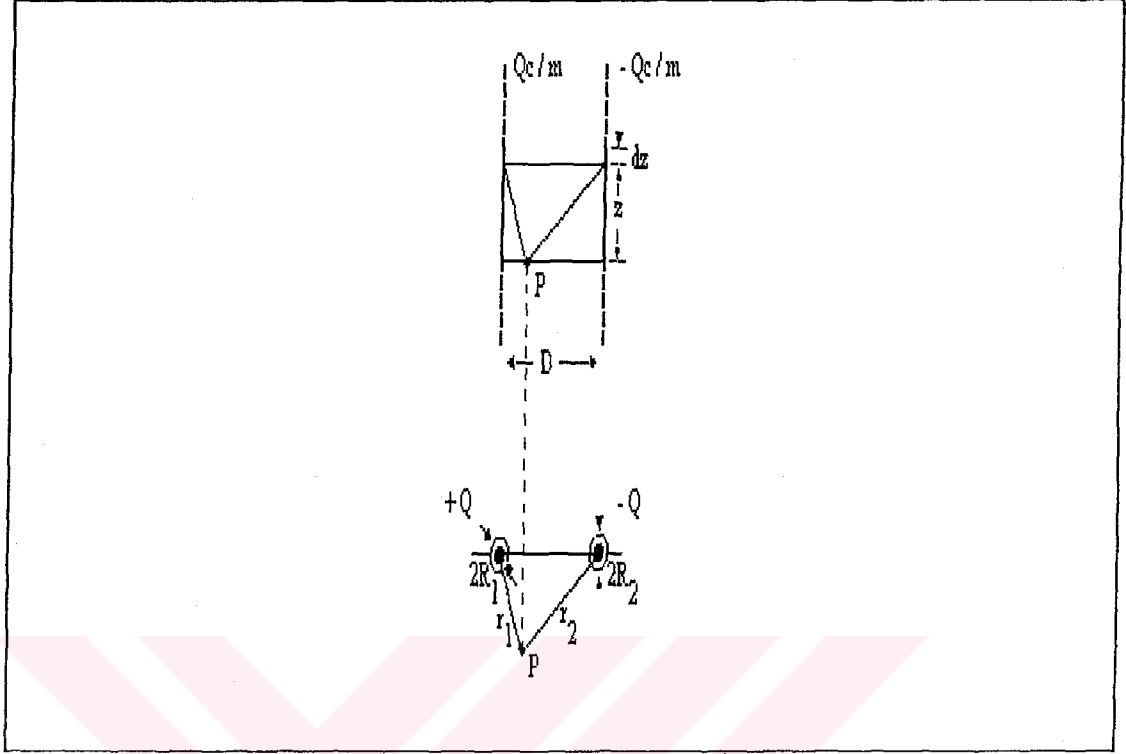
### 5.1.3 Hat kapasitansı

Hat direnci ve endüktansı iletim hattının seri elemanlarını oluşturan elemanlardır.

Şimdi inceleyeceğimiz kapasitans hat admitansına seri veya paralel biçimdedir. Endüktans şeklinde gösterilen seri elemanlar hat boyunca akan akım için bir sınır verirler ve bu nedenle fiziksel olarak güç iletmeye kapasitesini tayin ederler. Kapasitans biçiminde temsil edilen paralel elemanlar reaktif güç için bir kaynak şeklindedirler. Üretilen megavar'lar hat geriliminin karesi ile orantılıdır ve bu nedenle işletim geriliminin değeri ile bu paralel elemanların etkisi artar. 200 km den uzun hatta 300 - 500 kV luk hat gerilimleri için paralel elemanların etkisi sistem mühendislerinin ilk ilgilenecekleri şey olacaktır. Bir yüksek gerilim kablosunda iletkenlerin yakınlığı, bir havai hattınınkinin 20 ila 40 katı kadarlık bir paralel kapasitansa neden olur.

#### 5.1.3.1 Bir fazlı hattın kapasitansı

Hat endüktansı durumundaki gibi çalışmalarımıza bir fazlı hatla başlamak uygundur. İlk olarak iki uzun paralel iletken durumunu inceleyelim.



Şekil 5.5 Bir fazlı hat etrafındaki potansiyelin bulunması

İletkenler ters işaretli elektrik yükleri ile yüklenmişlerdir. Önce iki iletkenin  $r_1$  ve  $r_2$  mesafelerinde keyfi olarak seçilen bir P noktasındaki  $v_p$  elektrik potansiyelini bulalım. Temel elektrik alan teorisi kanununu q nokta yükünden r uzaklıktaki v potansiyelinin

$$v = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad V \quad 5.32$$

olduğunu belirtir. Burada  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  dir ve boşluğun dielektrik sabitidir. Hat elemanlarından uzaklıklar  $\sqrt{z^2 + r_1^2}$  ve  $\sqrt{z^2 + r_2^2}$  olduğundan P noktasındaki potansiyel

için



$$v_p = \int_{-L}^L \frac{Q dz}{4\pi\epsilon_0\sqrt{z^2 + r_1^2}} + \int_{-L}^L \frac{-Q dz}{4\pi\epsilon_0\sqrt{z^2 + r_2^2}} \quad V \quad 5.33$$

elde ederiz.  $L \rightarrow \infty$  için denkleminiz

$$v_p = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad V \quad 5.34$$

olur.

Bu sonuçlara bakarak bazı önemli sonuçlar çıkarırız.

1.  $r_2 / r_1$  oranındaki çevre boyunca  $v_p$  potansiyeli sabittir.
2.  $r_2 / r_1$  oranı çok büyük veya çok küçüktür. Pozitif telin yanında oran çok büyüktür ve  $r_2 / r_1 \approx D / r_1$  yazabileceğimizden  $v_p$  nin hemen hemen tamamı sadece  $r_1$  üzerindeki bağıdır.
3.  $R_1$  yarıçaplı silindirdeki  $v_1$  potansiyeli 5.34 denklemine göre

$$v_1 = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{R_1} \quad 5.35$$

Benzer olarak  $R_2$  yarıçaplı silindirdeki  $v_2$  potansiyeli

$$v_2 = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R_2}{D} \quad 5.36$$

dir. Bu iki silindirik yüzey arasındaki potansiyel farkı

$$v_1 - v_2 = \frac{Q}{\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{\sqrt{R_1 R_2}} \quad 5.37$$

4. Bu sonuçtan çok küçük silindirik yüzey arasındaki gerilimin limitsiz değerde olduğu sonucuna varırız. ( $R_1$  ve  $R_2 \rightarrow 0$ )

5. Sıfır olmayan  $R_1$ ,  $R_2$  çaplı fiziksel iletken telleri şekildeki gibi yerleştirirsek bunların dış yüzeyleri eş potansiyel yüzeyler oluştururlar ve bu nedenle bunların varlığı alan görünümünü değiştirmez.
6. İletken dış alanı iletkenin dahil edilmesi ile değişmeyeceğinden telin toplam yüzey yükünün  $QC/m$  değerinde kaldığı sonucuna varırız.
7. İletkenin metre başına  $Q$  yükünün ve aralarındaki  $v_1 - v_2$  geriliminin bilinmesi ile  $m$  başına kapasitansı kolayca bulabiliriz.

$$C = \frac{Q}{v_1 - v_2} = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \frac{D}{\sqrt{R_1 R_2}}} \quad F/m \quad 5.38$$

### 5.1.3.2 Çok iletkenli hatların kapasitansı

Tek iletkene ait kapasitans denklemlerini, çoklu iletken hatların kapasitans ifadelerinde genişleterek kullanabiliriz.  $+Q$  ve  $-Q$  yükünden  $v_p$  potansiyelini denklemin 5.34'e uygun olarak

$$v_p = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{1}{r_1} + \frac{-Q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{1}{r_2} \quad V \quad 5.39$$

yazabiliriz. Bu ifadedeki iki bileşen logaritmik potansiyeller olarak belirlenir ve her bir hat yükünün  $P$  noktasındaki toplam potansiyele etkileri olarak görülebilmektedir.

Şimdi  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$   $c/m$  hat yükleri taşıyan  $n$  tane paralel ve çok uzun iletkenli bir sistem düşünelim. İletkenlere  $r_1, r_2, \dots, r_n$  mesafeli bir  $P$  noktasındaki potansiyel

$$v_p = \sum_{v=1}^n \frac{Q_v}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{1}{r_v} \quad V \quad 5.40$$

Tüm hat yüklerinin cebrik toplamı ise sıfıra eşittir.

$$\sum_{v=1}^n Q_v = 0 \quad 5.41$$

Şayet bu doğru değilse sonsuz bir yükümüz olacak ( sonsuz uzunlukta iletkenler olduğundan ) ki bu da fiziksel olarak imkansızdır. Toprağa yaklaşma hat kapasitansında yükselmeye neden olur. Ancak toprağın bulunma etkisi önemsiz boyutlarda olduğundan bunu ihmal etmekteyiz.

### 5.1.3.3 Üç fazlı hatların kapasitansı

Demet iletkenli olmayan bir hat ile başlayalım ve toprağın etkisini ihmal edelim. 5.40 denklemini kullanarak ve P noktasını a, b, c faz iletkenlerinin yüzeyinde alarak

$$v_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left( Q_a \ln \frac{1}{R} + Q_b \ln \frac{1}{D} + Q_c \ln \frac{1}{D} \right)$$

$$v_b = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left( Q_a \ln \frac{1}{D} + Q_b \ln \frac{1}{R} + Q_c \ln \frac{1}{D} \right) \quad 5.42$$

$$v_c = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left( Q_a \ln \frac{1}{D} + Q_b \ln \frac{1}{D} + Q_c \ln \frac{1}{R} \right)$$

Denklemlerimizde gerekli indirgemeleri yapıp matris biçiminde ifade edersek

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \begin{bmatrix} \ln \frac{D}{R} & 0 & 0 \\ 0 & \ln \frac{D}{R} & 0 \\ 0 & 0 & \ln \frac{D}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix} \quad 5.43$$

Bu ifadenin inversini alırsak

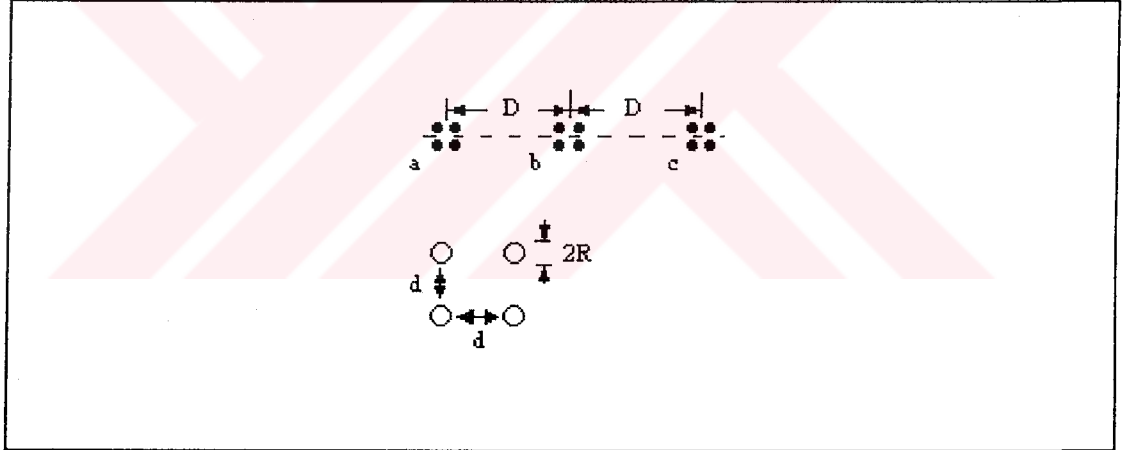
$$\begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(D/R)} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad 5.44$$

yazılabilir. Gerilimler simetrik üç faz meydana getirilirse faz başına kapasitans

$$C = \frac{Q_a}{v_a} = \frac{Q_b}{v_b} = \frac{Q_c}{v_c} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(D/R)} \quad F/m \quad 5.45$$

olur.

#### 5.1.3.4 Demet iletkenli üç fazlı hattın kapasitansı



Şekil 5.6 Demet iletkenli üç fazlı hat

Şekil 5.6 daki geometrik düzene sahip 765 kV luk hattı düşünelim. Hat her fazda dört iletken bulunacak şekilde dizayn edilmiştir. İnceleme için  $D \gg d \gg R$  kabul edelim. Ayrıca herbir fazda hat yükünün dört iletken arasında eşit olarak paylaşılacağını kabul edelim. Denklem 5.40'ı kullanarak ve P noktasını a fazındaki iletkenlerden birinin yüzeyine yerleştirerek

$$v_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{Q_a}{4} \left( \ln \frac{1}{R} + 2 \ln \frac{1}{d} + \ln \frac{1}{\sqrt{2d}} \right) + Q_b \ln \frac{1}{D} + Q_c \ln \frac{1}{2D} \right\} \quad 5.46$$

Uygun indirgemelerin yapılması ile denkleminiz

$$v_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left| Q_a \ln \left( \frac{2^{7/8} D}{R^{1/4} d^{3/4}} \right) + Q_b \ln 2 \right| \quad 5.47$$

olur. Benzer olarak b ve c fazları için

$$v_b = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} Q_b \ln \left( \frac{D}{R^{1/4} d^{3/4} 2^{1/8}} \right)$$

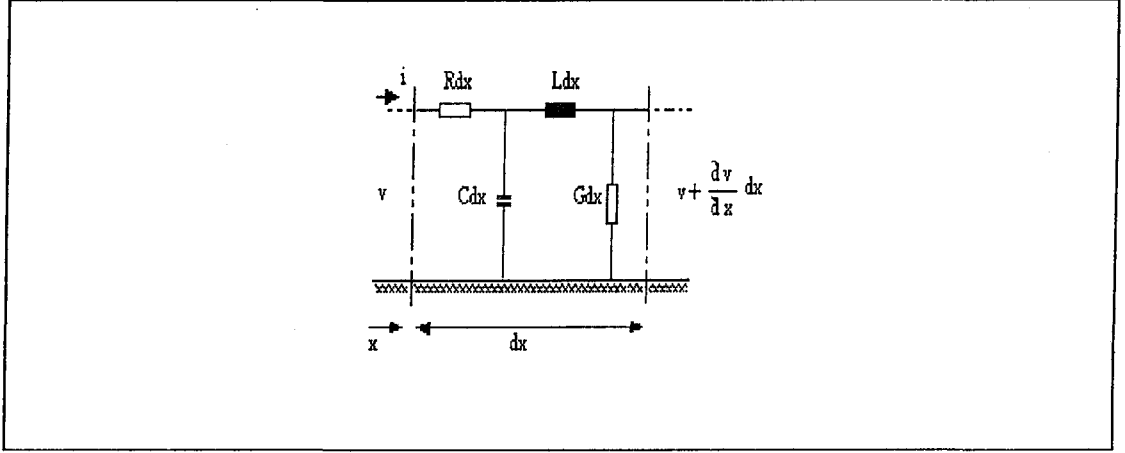
$$v_c = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left| Q_b \ln 2 + Q_c \ln \left( \frac{2^{7/8} D}{r^{1/4} d^{3/4}} \right) \right| \quad 5.48$$

elde edilir.

#### 5.1.4 n uzunluğundaki hatlar

Önceki bölümlerde verilen hat parametreleri faz başına çıkarılmışlardır ve hattın metresi başına elde edilmişlerdir. l uzunluğunda özel bir hattın performansı ile ilgilenmekteyse, hattın toplam parametre değerlerini elde etmek için gerçek hat uzunluğu ile bu parametreleri çarpmak gerekmektedir. Kısa hatlar için bunu yapmak mümkündür. Ancak uzun hatlarda bu işlemin doğruluğu parametrelerin verilen etkisini ihmalimiz nedeni ile bozular. Bu bölümde hattın verilen etkisini inceleyeceğiz. Keyfi uzunluktaki hatlar için kesin sonuç veren modelleri geliştireceğiz.

Çok uzun tek iletkenli bir hat düşünelim. Metre başına hat R ve L seri parametreleri ile G ve C paralel parametrelerine sahiptir. Hattın bir bölümü aşağıdaki şekildeki gibi dört devre elemanı ile gösterilebilir.



Şekil 5.7 Çok uzun tek iletkenli bir hattın devre elemanları ile gösterimi

$x$  koordinatı, çıkıştan hesaplanan hat boyunca durumu tanımlar. Hat boyunca akım ve gerilim  $x$  ve  $t$  nin fonksiyonudur ve  $v(x,t)$  ile  $i(x,t)$  şeklinde gösterilmektedir. Daha kısa ifade etmek için  $v$  ve  $i$  sembollerini kullanacağız.

$dx$  aralığında gerilim  $\partial v/\partial x \cdot dx$  kadar değişecektir. Bu değişme  $dx$  boyunca rezistif ve endüktif düşmeye karşındır. Bu matematiksel olarak

$$v - \left( v + \frac{\partial v}{\partial x} dx \right) = \left( Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \right) dx \quad 5.49$$

şeklinde ifade edilir. Benzer olarak iki paralel eleman uçlarındaki sızıntı nedeni ile akımdaki değişme

$$i - \left( i + \frac{\partial i}{\partial x} dx \right) = \left( Gv + C \frac{\partial v}{\partial t} \right) dx \quad 5.50$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu iki ifadeyi daha basitçe

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = Gv + C \frac{\partial v}{\partial t} \quad 5.51$$

biçiminde yazabiliriz.

Şekildeki devre modelimizi simetrik üç fazlı bir hattın tek fazını göstermede kullanalım. Böylece R, L, G ve C hattın faz başına parametrelerini gösterecektir. Sinusoidal kararlı durumda

$$v = V_2 e^{j\omega t} \quad i = I_2 e^{j\omega t} \quad 5.52$$

şeklindedir.  $V_2$  ve  $I_2$  değişen  $x$  aralığındaki fonksiyonların fazörleridir. Bu durumda türev ifadelerimiz

$$-\frac{dV_2}{dx} = (R + j\omega L) I_2 \quad -\frac{dI_2}{dx} = (G + j\omega C) V_2 \quad 5.53$$

olur.

$$\frac{d^2 V_2}{dx^2} = (R + j\omega L) (G + j\omega C) V_2$$

$$\frac{d^2 I_2}{dx^2} = (R + j\omega L) (G + j\omega C) I_2 \quad 5.54$$

olduğuna göre propagasyon sabiti ve  $z$  dalga empedansını aşağıdaki gibi tanımlayabiliriz.

$$Z_w = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad \text{ohm}$$

$$\gamma = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)} \quad 1/m \quad 5.55$$

5.54 denklemlerinin integralini alırsak

$$\begin{aligned} V_2 &= c_1 \text{Cosh}\gamma x + c_2 \text{Sinh}\gamma x \\ I_2 &= c_3 \text{Cosh}\gamma x + c_4 \text{Sinh}\gamma x \end{aligned} \quad 5.56$$

ifadelerini buluruz. Orjinal denklemler ikinci dereceden diferansiyel denklemler olduğundan  $c_1, \dots, c_4$  integrasyon sabitlerinden sadece iki tanesi bağımsız olarak bulunabilirler.  $x = 0$  için

$$V_1 = c_1 \cdot 1$$

$$I_1 = c_3 \cdot 1$$

elde ederiz. Böylece  $c_1 = V_1$  ve  $c_3 = I_1$  buluruz.

$c_2$  ve  $c_4$ 'ü bulmak için 5.56 denklem çözümlerini 5.53 orjinal denklemlerde yerine yerleştirelim.

$$\begin{aligned} c_1 \gamma \text{Sinh}\gamma x + c_2 \gamma \text{Cosh}\gamma x &= -(R+j\omega L)(c_3 \text{Cosh}\gamma x + c_4 \text{Sinh}\gamma x) \\ c_3 \gamma \text{Sinh}\gamma x + c_4 \gamma \text{Cosh}\gamma x &= -(G+j\omega C)(c_1 \text{Cosh}\gamma x + c_2 \text{Sinh}\gamma x) \end{aligned} \quad 5.57$$

[ ] Bu denklemlerde  $x = 0$  yerleştirilmesi ile

$$c_2 = -\frac{R+j\omega L}{\gamma} c_3 = -Z_w I_1$$

$$c_4 = -\frac{G+j\omega C}{\gamma} c_1 = -\frac{1}{Z_w} V_1 \quad 5.58$$

bulunur.  $V_1$  ve  $I_1$  cinsinden sonuçları matris biçiminde ifade edersek

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cosh}\gamma x & -Z_w \text{Sinh}\gamma x \\ -\frac{1}{Z_w} \text{Sinh}\gamma x & \text{Cosh}\gamma x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad 5.59$$

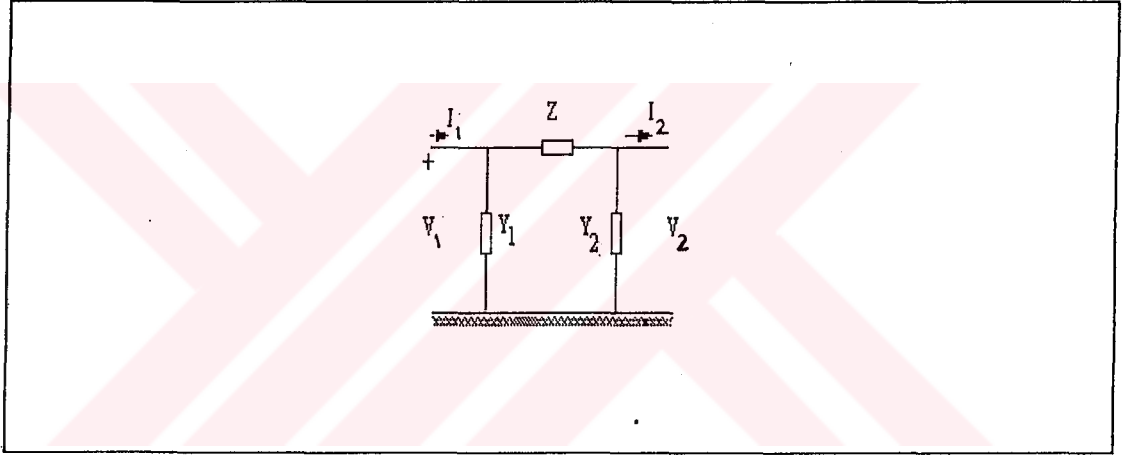
yazılabilir. Buradaki 2x2 matrisinin inversini alarak  $V_1$  ve  $I_1$ 'i,  $V_2$  ve  $I_2$  cinsinden ifade edebiliriz. Bunu en genel biçimde



$$\begin{aligned} V_1 &= AV_2 + BI_2 \\ I_1 &= CV_2 + DI_2 \end{aligned} \quad 5.60$$

ifade edebiliriz.

Güç iletim hatlarını Şekil 5.8 deki gibi bir  $\pi$  eşdeğer devresi ile gösterebiliriz. Şimdi şekildeki  $\pi$  devresinin  $Y_1$  ve  $Y_2$  admitansları ile  $Z$  empedansının seçimini görelim. Şekildeki  $V_1, I_1$  giriş değişkenleri ile  $V_2, I_2$  çıkış değişkenleri arasındaki bağıntının doğru olması için 5.59 denkleminde ifade edilenlerle aynı olmalıdır



Şekil 5.8 Uzun hat eşdeğer şeması

$$\begin{aligned} Z &= Z_w \operatorname{Sinh} \gamma x \\ Y_1 &= Y_2 = 1 / Z_w \cdot \tanh \gamma x / 2 \end{aligned}$$

Şekildeki akım ve gerilimler için aşağıdaki denklemleri yazabiliriz.

$$V_2 = (1 + ZY_1) V_1 - Z I_1$$

$$I_2 = -(Y_1 + Y_2 + ZY_1 Y_2) V_1 + (1 + ZY_2) I_1 \quad 5.61$$

Bu son denklem çiftini 5.59 denklemleri ile karşılaştırıp gerekli ara işlemleri gerçekleştirirsek

$$Z = Z_w \text{Sinh} \gamma x$$

$$Y_1 = Y_2 = \frac{1}{Z_w} \frac{\text{Cosh} \gamma x - 1}{\text{Sinh} \gamma x} = \frac{1}{Z_w} \tanh \left( \frac{\gamma x}{2} \right) \quad 5.62$$

buluruz.

## 5.2 Doğru akım iletimi

Uzun mesfeli büyük güçlerin iletimi için AC veya DC kullanma kararı ekonomiktir. Hatların bazı kritik uzunluklarında DC kullanımı daha ekonomiktir. ( Örneğin 750 Mw için kritik mesafe 550 - 750 km ) DC kullanımı maliyeti arttırmakta ancak sonuçta sistem daha ekonomik olmaktadır. DC kullanımının teknik nedenleri şunlardır.

a. Küçük kapasiteli hatlarla büyük sistemlerin bağlanması için. Bu sistem İngiltere-Fransa arasındaki karşılıklı hatların bağlanmasında kullanıldı. İki sistemdeki önemsiz frekans farklılığı küçük kapasiteli hatlarda önemli güç transfer kontrolü problemleri meydana getirir.

b. Uygun iletim mesafeleri için yüksek gerilim yeraltı kablolarının gerekli olduğu yerlerde. AC ile üretilen akıma uygun kablo sınırlamaları incelenmiş, uzunluğu arttırmak için DC veya artificial ( yapay ) reaktörlerin kullanımı önerilmiştir. Altı tane 275 kV, 3 in<sup>2</sup> ( 3 in<sup>2</sup> = 1935 mm<sup>2</sup> ) lik kablunun üçlü iki grup halinde kullanımında 1520 MVA lik bir AC kapasitesi vardır. 500 kV DC de ise iki kablo 1600 MW lık bir kapasiteye erişmektedir.

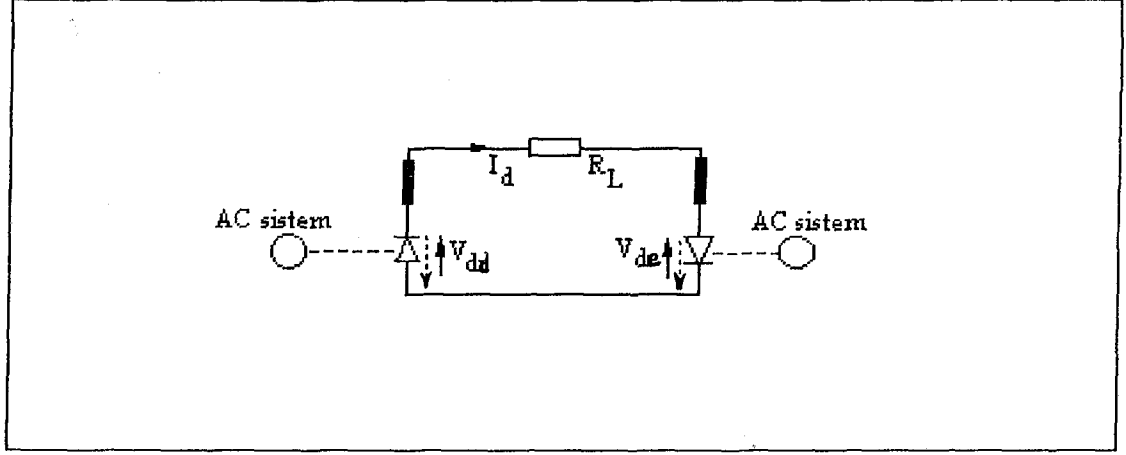
DC kullanımının diğer avantajları ise şöyledir. Eşdeğer alternatif akımın tepe değerine karşılık gelen DC hat işletiminde korona kayıpları AC hattakinden daha

azdır. Genellikle hat kayıpları eşdeğer AC hatlarındakinden daha azdır. Araştırmalar bir DC link ile işletilen sistemde eşdeğeri bir AC link ile işletilen sistemden daha az sayıda arıza olduğunu göstermiştir.

Dezavantajları ise aşağıdaki gibidir.

- a. DC enterkonnekte sistemlerinde sistemin T (tee-junction) bağlantılarla dizaynı zordur.
- b. Gerilim düşümü sistemin AC tarafında gerçekleştirilir.
- c. Doğrultucu'lar ve evirici'ler reaktif güç absorbe ederler.
- d. DC dönüştürme istasyonları konvansiyonel AC güç merkezlerinden çok daha pahalıdır.

Giriş ucunda AC ın doğrultulması ile elde edilen DC hat sonunda evirici'ye iletilmektedir. Burada tekrar AC'ye dönüştürülerek kendisine bağlı AC sistemi beslemektedir.



Şekil 5.9 Bir DC hattı ile buna bağlı iki AC sistemin sembolik gösterimi

$V_{dd}$  = Doğrultucu uçlarındaki doğru gerilim

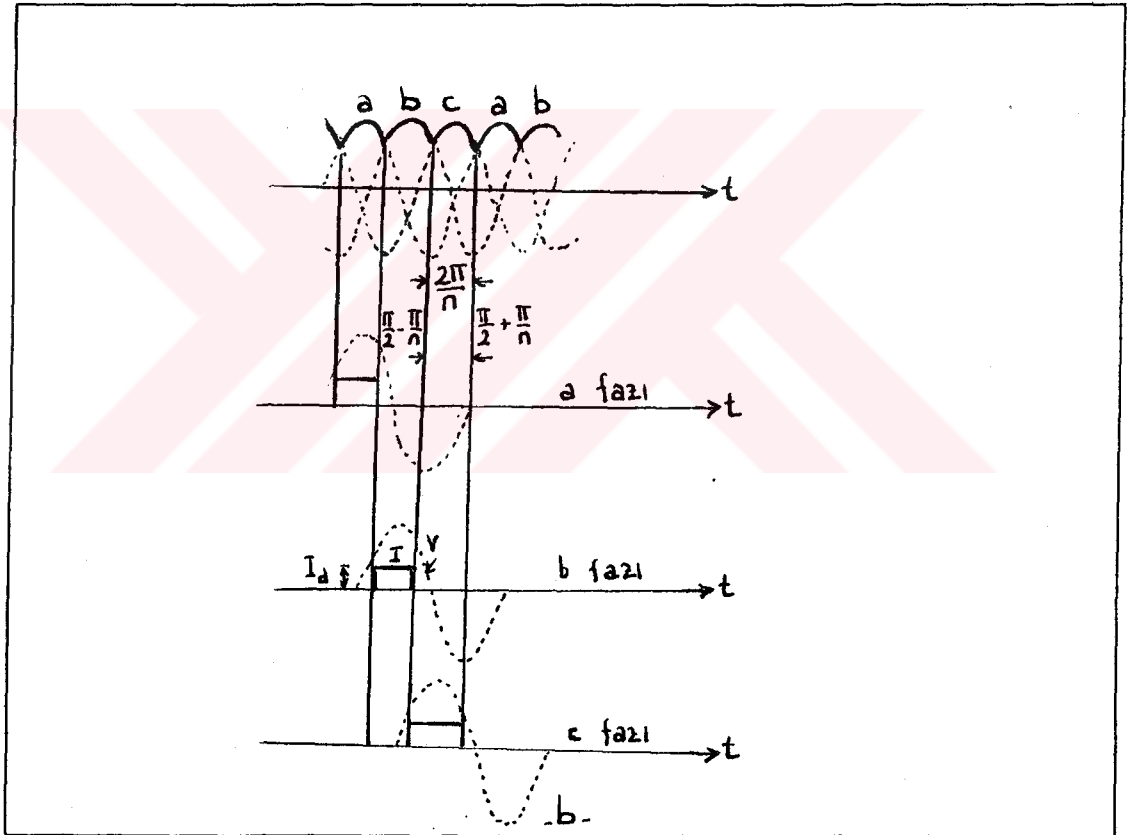
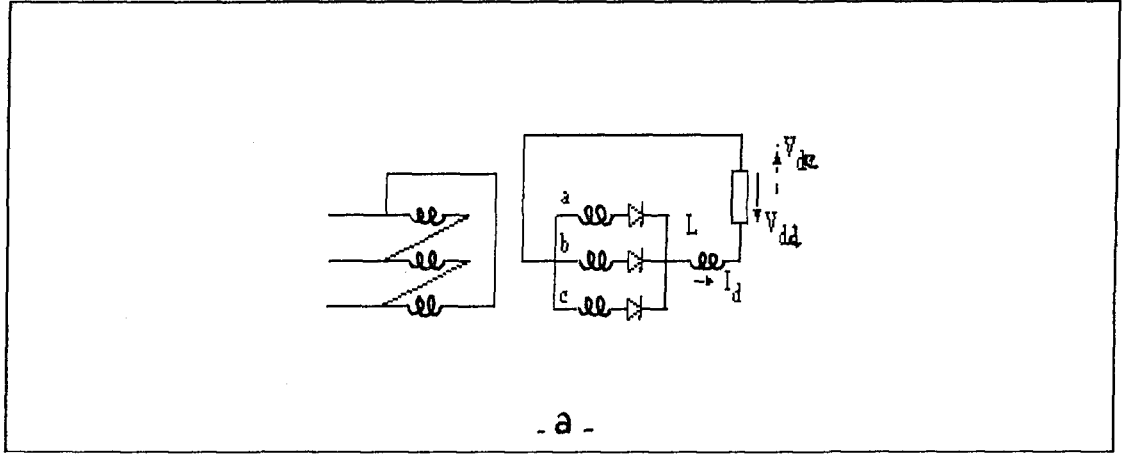
$V_{de}$  = Evirici uçlarındaki doğru gerilim

$\dot{i}$  = Güç akışı ters yöndeysse

AC çıkış ucundaki AC sisteme evirici ile iletilmiştir. Doğrultucu ile alınan AC kabaca ikizkenar yamuk şeklindedir. Böylece sadece bir sinusoidal dalga değil tristör sayısına bağlı harmonikler de meydana gelir. 6 tristörlü bir köprü için  $6n \neq 1$  yani 5, 7, 11, 13 vs harmonik meydana gelir. 25'in üzerindeki harmonikleri yok etmek için filitreler kullanılmıştır.

### 5.2.1 Doğrultma

Transformatör sekonder sargıları tristörlerin ihtiyacını karşılamak için çeşitli sayıda faz verecek şekilde ( üç, altı, oniki, vs ) düzenlenebilmektedir. En iyi çıkış karakteristiğini verdiğinden en çok altı fazlı olan kullanılmaktadır. Başlangıç olarak bir üç fazlı düzeni tanımlayıp analizi n faz için yapacağız.



Şekil 5.10 a) Üç fazlı doğrultucu  
b) Herbir fazdaki anod gerilimi ve doğrultulmuş akımın değişimi

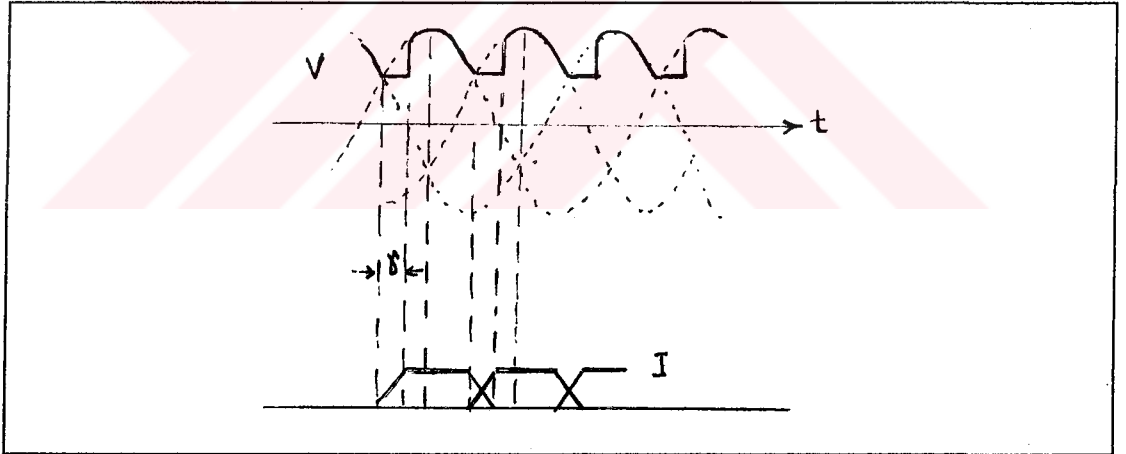
Şekil 5.10.a'da üç fazlı bir doğrultucu gösterilmiştir.  $n$  fazlı bir sistemde  $V \sin \pi/n$  geriliminde anod geçişi  $(\pi/2 - \pi/n)^0$  de meydana gelir ve çıkış geriliminin ortalama değeri

$$V_0 = \frac{1}{2\pi/n} \int_{(\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{n})}^{(\frac{\pi}{2}+\frac{\pi}{n})} V \sin \omega t d(\omega t) = \frac{V \sin(\pi/n)}{\pi/n} \quad 5.63$$

dir. Üç faz için

$$V_0 = \frac{V \sin 60}{\pi/3} = 0.83 V \quad 5.64$$

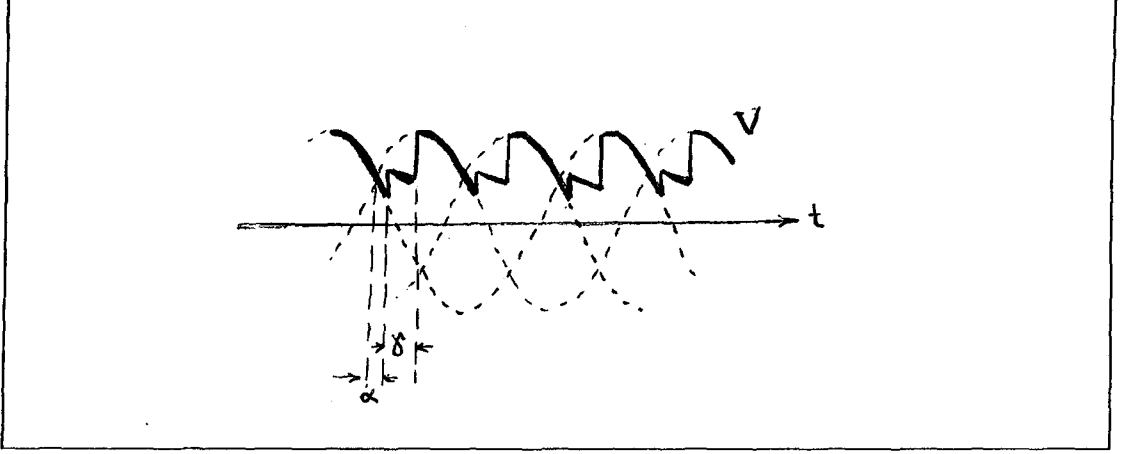
Devrede bulunan endüktans nedeni ile bir anotta akım  $I_d$  den 0'a bir sonrakinde 0'dan  $I_d$ 'ye aniden değişmez. Bu nedenle komütasyon süresi veya komütasyon açısı ( $\gamma$ ) olarak bilinen periyot boyunca iletimdedir. B tristörü iletime geçtiğinde a ve b kısa devredir. Sonunda kısa devre akımı a tristöründe 0, b'de  $I_d$  olur. Bunu aşağıdaki gibi gösterebiliriz.



Şekil 5.11 Komütasyon açısı  $\gamma$  nın etkisini gösteren akım ve gerilim değişim eğrileri. Endüktif bir güç faktörü elde edilmiştir

Tetikleme ucu kontrolü ----- Anod ve katod arasındaki tetikleme ucuna uygulanan pozitif darbe iletimin başlama anını kontrol eder ve iletim başladıktan sonra tetikleme ucuna başka uygulama yapılamaz. Gerilim dalga şekli aşağıda verilmiştir. Tristördeki iletim, tetikleme ucuna uygulanan gerilimin gecikmesine bağlı olarak bir

$\alpha$  açısı kadar gecikmeli olarak başlar.  $\gamma$  komütasyon açısının ihmal edildiği  $n$  fazlı sistemi düşünerek  $\alpha$  gecikme açılı yeni çıkış doğru gerilim



Şekil 5.12 Gerilim dalga şekli

$$V_0' = \frac{1}{2\pi/n} \int_{(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{n} + \alpha)}^{(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n} + \alpha)} V \sin \omega t d(\omega t) \quad 5.65$$

$$V_0' = \frac{nV}{2\pi} 2 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos \alpha \quad 5.66$$

O halde  $V_0' = V_0 \cos \alpha$  dir. Burada  $V_0$  5.64 denklemi ile tanımlanan çıkış doğru geriliminin maksimum değeridir. Pratikte tristörlerin köprü bağlantıları tercih edilmektedir.

### 5.2.2 Dönüştürme

Doğrultucu çalışmada  $I_d$  akımı  $V_d$  geriliminin oluşturduğu güç yük tarafından çekilir. Evirici çalışma için DC sistemden AC sistemlerine güç transferi gerekmektedir. Akım sadece anod'dan katod'a doğru akabildiğinden yardımcı gerilimin yönü ters

olmalıdır. Bir alternatif gerilim sistemi transformötörün primer kısmında olmalıdır ve dönüştürücülerin tetikleme ucu kontrolü şarttır.

Evirici çalışma esas itibarı ile doğrultucu gibidir. Ancak  $\alpha$  gecikme açısı  $90^\circ$  büyük iken  $V_d$  gerilimi belirli bir yöndedir,  $\alpha$  artarken  $V_d$  azaldığından ve  $\alpha = 90$  iken  $V_d = 0$  olduğundan  $\alpha$ 'daki artma ile  $V_d$  ters döndürülür ve evirici çalışma sağlanır. Bu nedenle doğrultucu dan evirici çalışmaya geçiş veya tersi  $\alpha$ 'nın kontrolü ile kolayca gerçekleştirilebilmektedir.

### 5.2.3 Doğru akım hattı

Kararlı rejim halinde çalışan DC iletim hattının eşdeğer devresi şekildeki gibidir. Evirici ve doğrultucunun her ikisinde sabit gecikme açılı çalışıyorsa iletilen akım

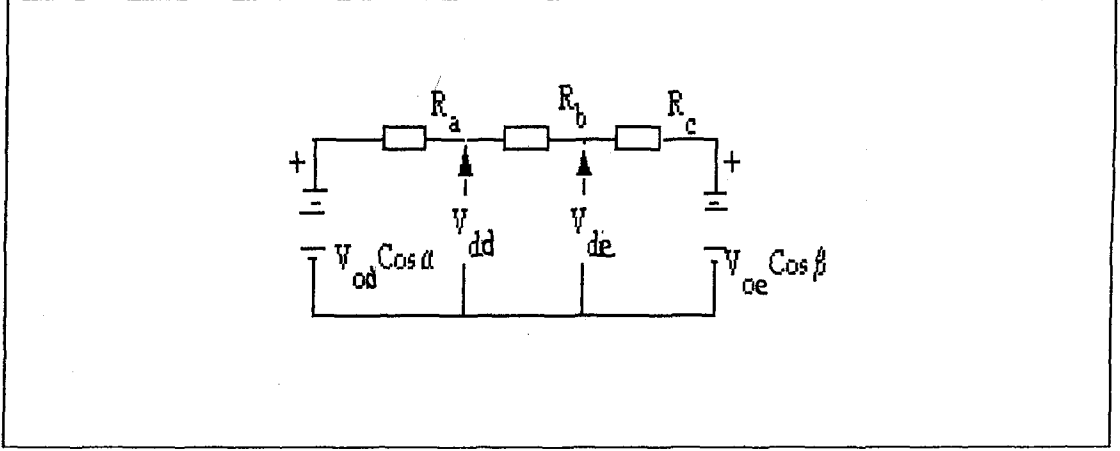
$$I_d = \frac{V_{dd} - V_{de}}{R_L} \quad 5.67$$

veya

$$I_d = \frac{V_{od} \cos \alpha - V_{oe} \cos \beta}{R_L + R_{cd} + R_{ce}} \quad 5.68$$

ifadeleri ile bulunur.





Şekil 5.13 Verilen gecikme açısı ile çalışan hattın eşdeğer devresi

Doğrultucu için  $V_{od} = V_0$

Evirici için  $V_{oe} = V_0$

Bu formüllerdeki  $R_L$  hattın veya kablonun toplam direnci,  $R_{cd}$  ve  $R_{ce}$  doğrultucu ve eviricinin efektif komütasyon direncidir.

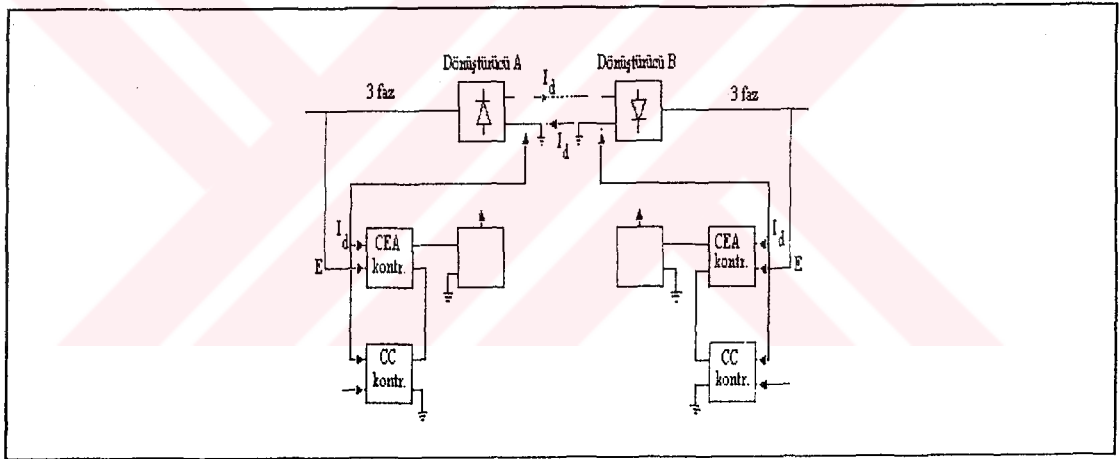
DC değeri  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $V_{od}$  ve  $V_{oe}$  değişimleri ile kontrol edilebilmektedir. ( $V_{od}$  ve  $V_{oe}$  transformatörde kademe değiştirme ile gerçekleştirilir.) Sabit gecikme açısı kullanarak evirici kontrolü bazı dezavantajlara sahiptir.  $\delta$  ve bundan dolayı  $\beta$  çok büyük olursa aşırı bir reaktif güç ihtiyacı ortaya çıkar. Keza eviricide doğru gerilimin azalması  $\gamma$  komütasyon açısının artmasına neden olur. Bunu karşılamak için  $\beta$  büyütülürse reaktif güç ihtiyacı tekrar artacaktır. Bu nedenle uygun kontrol sistemlerinin kullanımı ile gerçekleştirilen sabit bir  $\delta$  açısı ile evirici çalıştırma işlemi daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

Evirici işleyişini belirleyen denklem aşağıdaki gibi toparlanabilir.

$$V_d = \frac{3\sqrt{2}V_L}{\pi} (\cos\beta + \cos\gamma) \quad 5.69$$

Güç faktörü  $\cos\phi = (\cos\beta + \cos\gamma)/2$  ileri

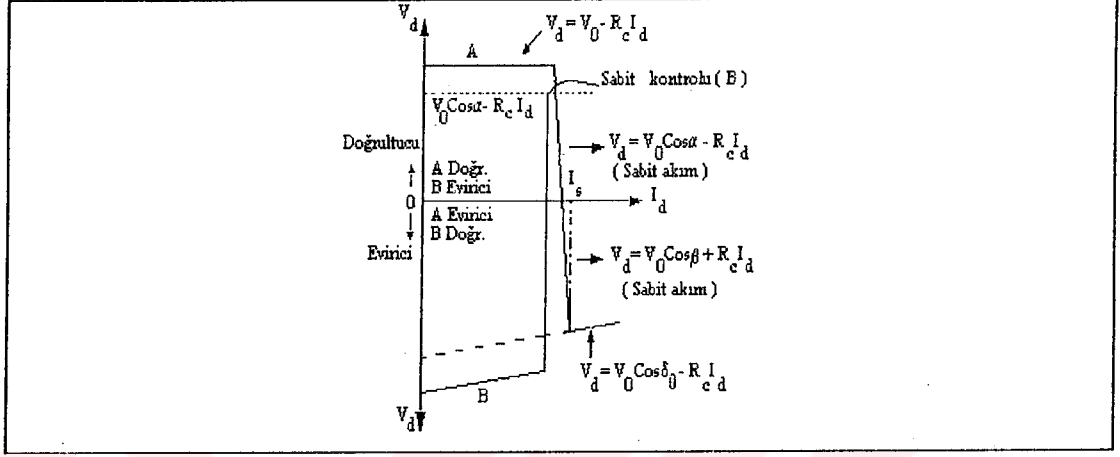
Mümkün olduğu kadar küçük ve belirli bir  $\delta$  açısı ile çalışmanın avantajları tartışılmıştır. Keza kolaylık sağladığı için sabit akım çalışmasında da tavsiye edilebilir. Gerekli güç akış yönüne göre doğrultucu ve evirici sistemdeki rollerini değiştirirler. Her bir cihazın iki kontrol sistemine sahip olması gerekmektedir.



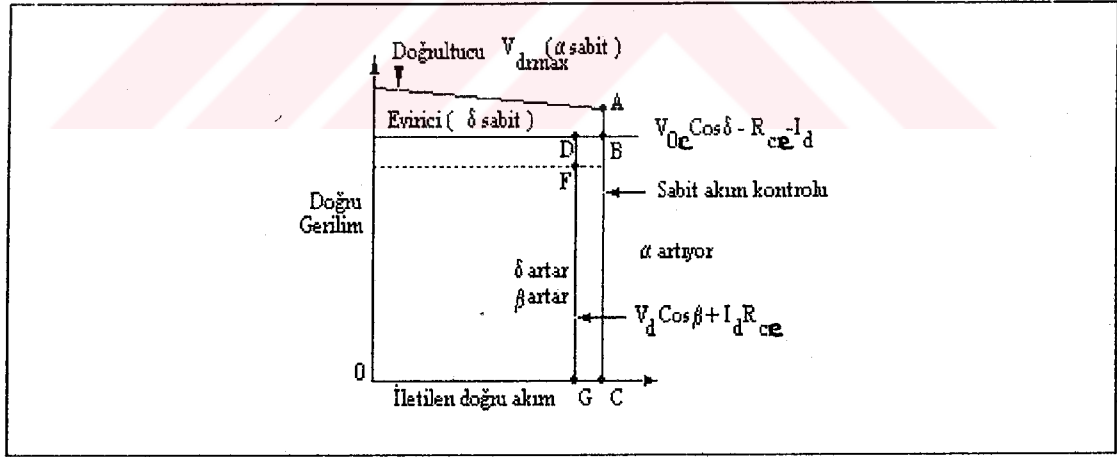
Şekil 5.14 Kontrol sistemleri şematik gösterimi

Kontrol sistemlerinin şematik gösterimi şekil 5.14'de verilmiştir. Her bir dönüştürücünün doğrultma ve evirme işleyişi ile bir hattın iki dönüştürücüsünün tüm karakteristikleri şekil 5.15'deki gibidir. Diagramın üst kısmında A dönüştürücüsü, bir doğrultucu gibi hareket eder ve  $\alpha$ 'nın sıfır olması ile optimum karakteristiği gösterilmiştir. Sabit akım kontrolü ile  $\alpha$  artırılmıştır. Çıkış akım-gerilim karakteristiği  $V_d = 0$  eksenini keser. Bu eksenin altında (A) evirici gibi davranır ve sabit  $\delta$  kontrolünde işletilebilmektedir. Benzer bir karakteristik (B) dönüştürücüsü için gösterilmiştir. B dönüştürücüsü başlangıçta doğrultucu gibi

hareket eder ve sabit akım kontrolü ile evirici çalışmaya döner. (  $\beta$  nın artması ) A için akım geçişi B' ninkinden daha fazladır.



Şekil 5.15 Dönüştürücü akım gerilim karakteristiği



Şekil 5.16 Sabit akım kompanzasyonu ile evirici ve doğultucu çalışma karakteristikleri. Çalışma noktası iki karakteristiğin kesiştiği yerdir.

Şekil 5.16'da A'dan B'ye bir güç akışı karakteristiği grafiğin üst yarısına çizilerek gösterilmiştir. Bu elde mevcut işlemlerin görüşülmesini kolaylaştıracaktır. Bu şekilden yararlanarak kontrol metodlarını şu şekilde özetleyebiliriz.

a. Doğrultucuda iletilen akım, gecikme açısının ve böylece  $V$  nin değişimi ile regüle edilmiştir. Bu, şekilde ABC ile gösterilmiştir. Doğrultucu kademe değiştirme transformatörü gecikme açısını istenen sınırlarda tutmak için kullanılmıştır. Aynı zamanda doğrultucu çıkış gerilimindeki ani düşüşleri karşılamak için evirici üzerinden gerilim vermede de kullanılır. Büyük gecikme açısının reaktif güç harcamasını arttırdığı hatırlanmalıdır.

b. Evirici, transformatör kademe değiştiriciler ile gerekli ters doğru gerilimi verir. Doğru gerilim ile gösterilen karakteristiği veren sabit akım kontrolü gerekmektedir. Akımın referans değeri doğrultucunununkinden daha küçüktür. ( Nominal akımın % 10 - 20 değerinde )

c. B noktası normal çalışma durumunu gösterir. İletilen akım  $I_d$ 'nin sıfıra düşmesini önlemek için doğrultucu gerilimi müsaade edilen değer altına düşmelidir. Ters doğru - gerilim ( yani negatif anod gerilimlerinin ortalama değeri ) azalacaktır ve çalışma DFG boyunca olacaktır. Ayrıca akım OG değerinde kalacaktır. Yani çalışma noktası F dir ve iletilen güç daha öncekinden azdır. Gerilimin sınır değeri evirici kontrol bölgesindeki çalışmalardan kurtulacak şekilde seçilmelidir.

Özetlersek normal çalışmada doğrultucu sabit akımda, evirici sabit  $\delta$ 'da çalışır. Acil durumlarda doğrultucu sıfır gecikmeli ateşlemeyle, evirici sabit akımla çalıştırılır.

Burada verilen evirici analizi sadece  $60^\circ$ 'den küçük  $\beta$  açıları için geçerlidir.  $\beta$ ,  $60^\circ$ 'den daha büyükse çalışma şekli çok farklı olmaktadır ve yeni bir analiz gerekmektedir.

## 6. ENERJİ DÜZENLERİNİN MODELLENMESİ

İletim sistemi bileşenleri, eşdeğer devreleri ile, endüktans, kapasitans, direnç cinsinden modellenenmektedir. İletim sistemlerini tanımlamada Kirchhoff kanunlarına uygun iki metod, bilindiği gibi çevre ve düğüm analizidir. Bu metodlar aynı zamanda bilgisayar ile hesaplamalara da uygundur.

Düğüm metodunun avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz.

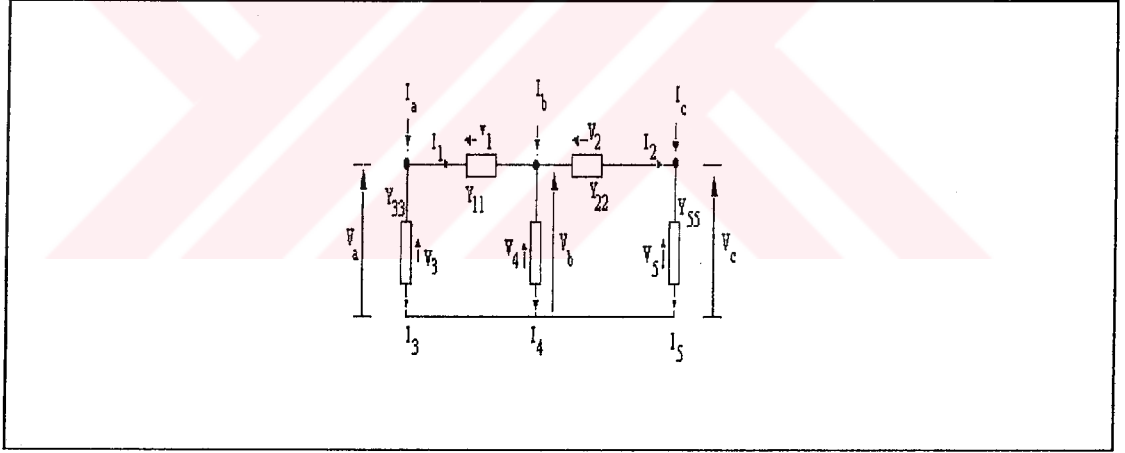
- Bir sistem diagramında doğrudan doğruya düğümleri numaralandırma mümkündür.
- Veri hazırlamak kolaydır.
- Değişken ve denklemlerin sayısı, aynı sistemin çevre metodu ile çözümünde kullanacak değişken ve denklemlerin sayısından genelde daha azdır.
- Sistemdeki kesişme noktaları bir problem teşkil etmez.
- Paralel kollar değişken ve denklem sayısını arttırmaz.
- Düğüm gerilimleri, denklemlerden doğrudan doğruya çözülür. Dal akımlarını hesaplamak kolaydır.
- Transformatör kademeleri kolayca ifade edilebilmektedir.

### 6.1 Lineer Dönüştürme Teknikleri

Lineer dönüştürme teknikleri herhangi bir enerji düzeninin admitans matrisini sistematik olarak bulunmasında kullanılmaktadır. Bu teknik yardımı ile şebeke admitans matrisini kurmak için aşağıda belirtilen işlemler gerçekleştirilmektedir.

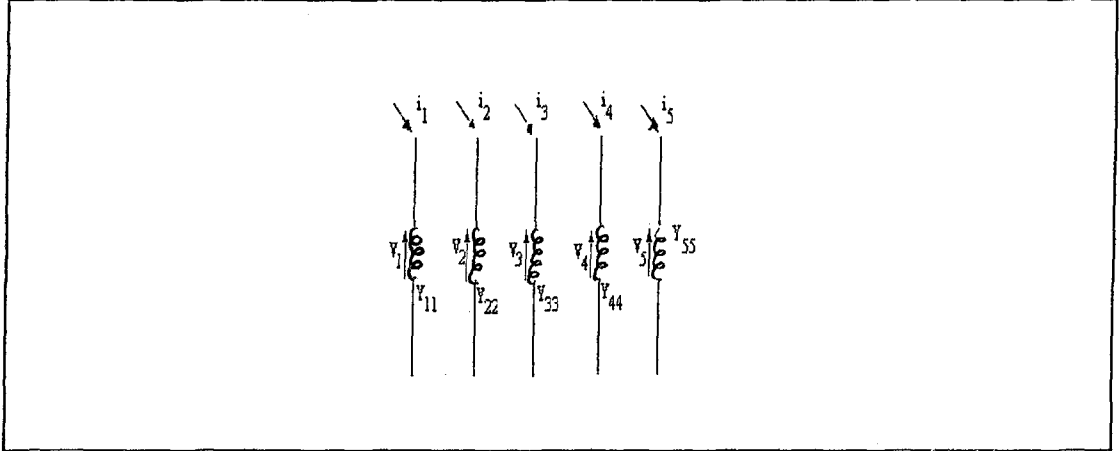
1. Dügümler belirlenerek numaralandırılır.
2. Dal ve dal admitansları numaralandırılır.
3. Tüm dallar ayrı ayrı düşünülerek elde edilen başlangıç sistem admitans matrisi kurulur.
4. Bağlantı matrisi C gerçekleştirilir.
5. Dügüm akımı ve gerilimlerine bağlı olarak gerçek sistem admitans matrisi elde edilir.

Elde edilen bu matris, sistem düğüm gerilimleri ile düğüme giren akımlara bağlıdır. Başlangıç sistemi, gerçek sistemimize uygun olarak çizilmektedir.



Şekil 6.1 Gerçek sistem bağlantısı

Model sistemimiz şekil 6.2'deki gibi gerçekleştirilecektir.



Şekil 6.2 Model sistem

Model admitans matris bağıntımız

$$[I_1 \ I_2 \ I_3 \ I_4 \ I_5]^T = [Y_m][V_1 \ V_2 \ V_3 \ V_4 \ V_5]^T \quad 6.1$$

şeklinde ifade edilecektir. Model sistem düğüm gerilimleri ile gerçek sistem düğüm gerilimleri arasındaki bağıntıları belirlersek

$$\begin{aligned} V_1 &= V_a - V_b & V_2 &= V_b - V_c \\ V_3 &= V_a & V_4 &= V_b & V_5 &= V_c \end{aligned} \quad 6.2$$

veya matris biçiminde

$$[V_1 \ V_2 \ V_3 \ V_4 \ V_5]^T = [C][V_a \ V_b \ V_c]^T \quad 6.3$$

yazabiliriz. Düğüm akım ve gerilimleri ile bağıntılı gerçek sistem admitans matrisi

$$[I_a \ I_b \ I_c]^T = [Y_{abc}][V_a \ V_b \ V_c]^T \quad 6.4$$

bağıntısından elde edilebilmektedir.

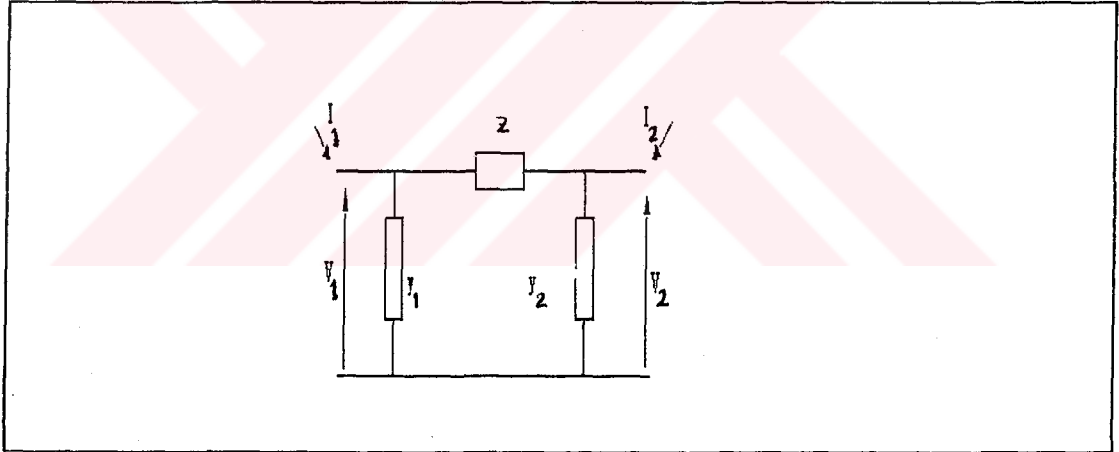
$$[Y_{abc}] = [C]^T [Y_m] [C] \quad 6.5$$

## 6.2 Bir Fazlı Sistem Modellemesi

Dengeli durumda, iletim sistemi bir fazlı modellerle gösterilebilmektedir ve genelde eşdeğer  $\pi$  devresi ile belirtilmektedir.  $\pi$  eşdeğer devresi, hattın direnç ve endüktif reaktansı seri kolda, kapasitif reaktansı da ikiye bölünerek paralel kolda olacak şekilde gerçekleştirilmektedir.

### 6.2.1 Sarım oranı 1 olan transformatörler

Transformatör  $\pi$  eşdeğer devresi Şekil 6.3 de verildiği gibidir.



Şekil 6.3 Transformatör eşdeğer devresi

Burada  $y_{oc}$  mıknatıslama empedansı ve  $y_{sc}$  de sızıntı empedansına karşılık gelir.  $z_{kd}$  ve  $z_{ad}$ , standart kısa devre ve açık devre testlerinden elde edilmektedir. Matris denkleminizi yazarsak

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{kd} & -y_{kd} + y_{ad/2} \\ -y_{kd} + y_{ad/2} & y_{kd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad 6.6$$

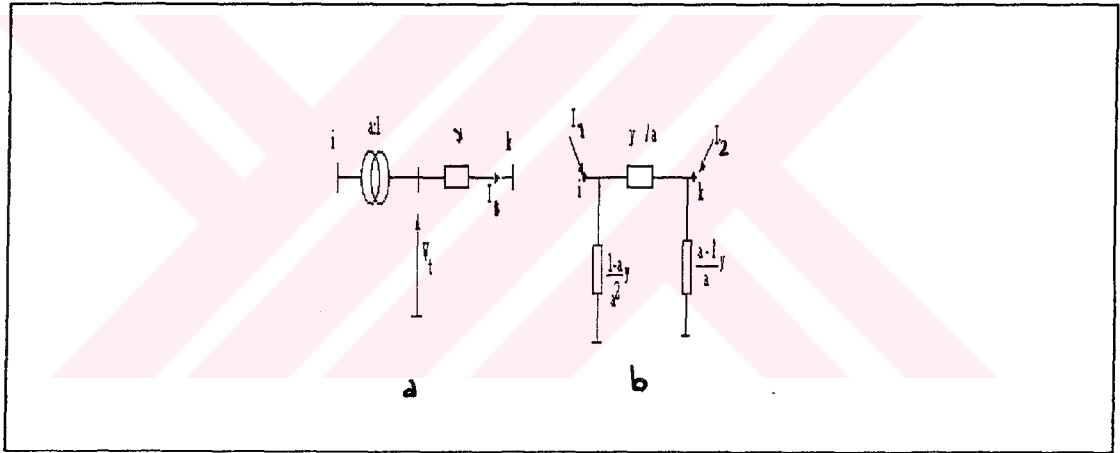


burada  $y_{kd}$  : Kısa devre admitansı

$y_{ad}$  : Açık devre admitansı

### 6.2.2 Sarım oranı 1 den farklı olan transformatörler

$i, k$  düğümlerine bağlı 'a' dönüştürme oranlı bir transformatör, nominal transformatör kısa-devre admitansı ile seri bağlı ideal bir transformatör olarak gösterilebilmektedir.



Şekil 6.4 1'den farklı dönüştürme oranına sahip transformatör

Transformatör nominal çalışmada ( $a = 1$ ) ise sistem dalı için per-unit cinsinden düğüm denklemleri

$$I_1 = y(V_1 - V_2) \quad I_2 = y(V_2 - V_1) \quad 6.7$$

Burada  $I_1 = -I_2$

1'den farklı dönüştürme ve ideal transformatörün k tarafı geriliminin  $V_1$  alınması ile

$$V_t = \frac{V_1}{a} \quad I_2 = y(V_2 - V_t) \quad I_1 = -\frac{I_2}{a} \quad 6.8$$

yazılabilmektedir. Denklemlerimizde  $V_t$  teriminin indirgenmesi ile akım denklemlerimiz için

$$I_2 = y(V_2 - \frac{1}{a}V_1) \quad I_1 = -\frac{y}{a}(V_2 - \frac{1}{a}V_1) \quad 6.9$$

elde ederiz. Bu denklemlerdeki gerilimlerin katsayıları basit bir  $\pi$  eşdeğer devresinin admittans ifadelerini verir. Bu devre Şekil 6.4.b de çizilmiştir.

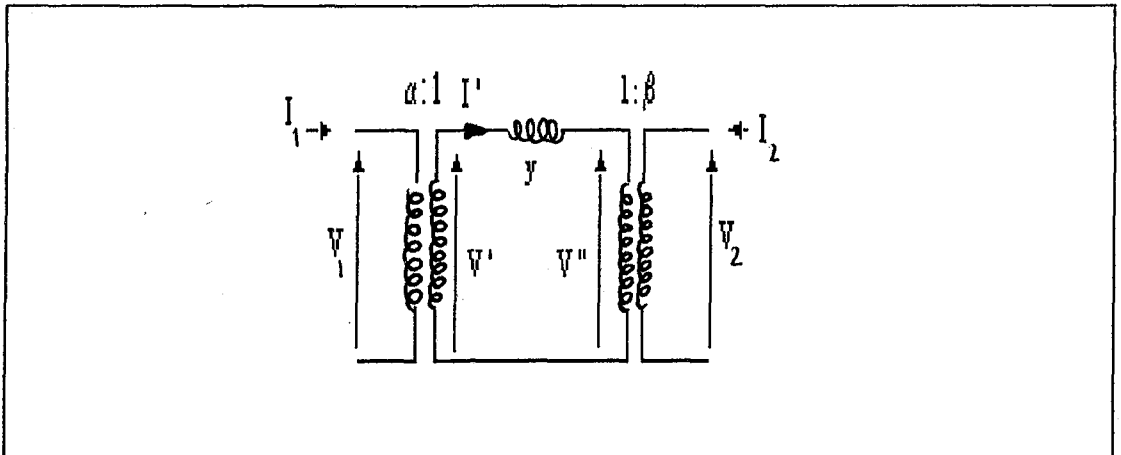
Şekil 6.5 deki devre için uç akımlarını

$$I_1 = \frac{I'}{\alpha} = \frac{y}{\alpha^2} V_1 - \frac{y}{\alpha \beta} V_2$$

$$-I_2 = \frac{I'}{\beta} = \frac{y}{\alpha \beta} V_1 - \frac{y}{\beta^2} V_2$$

6.10

elde ederiz.



Şekil 6.5 Dönüştürme oranı  $\alpha$  ve  $\beta$  olan primer ve sekonder sargılar arasındaki kuplaj için temel eşdeğer devre

### 6.2.3 Faz ötelemeli transformatörler

Faz ötelemesinin üstesinden gelmek için Şekil 6.5 deki transformatörde  $\alpha$  ve  $\beta$  dönüştürme oranları kompleks değerli olsun. Bu durumda

$$V_1 = \alpha V' = (a + jb) V'$$

$$I_1 = -\frac{I'}{\alpha^*} = -\frac{I'}{(a - jb)} \quad 6.11$$

dir. Böylece Şekil 6.5 deki devre iki farklı dönüştürme oranına sahip olur yani

$\alpha_v = a + jb$  gerilimler için

$\alpha_i = a - jb$  akımlar için

Modifiye edilen devrenin uç akımlarının çözümü

$$I_1 = \frac{I'}{\alpha_i} = \frac{y}{\alpha_v \alpha_i} V_1 - \frac{y}{\alpha_i \beta} V_2$$

$$-I_2 = \frac{I'}{\beta} = \frac{y}{\alpha_v \beta} V_1 - \frac{y}{\beta^2} V_2 \quad 6.12$$

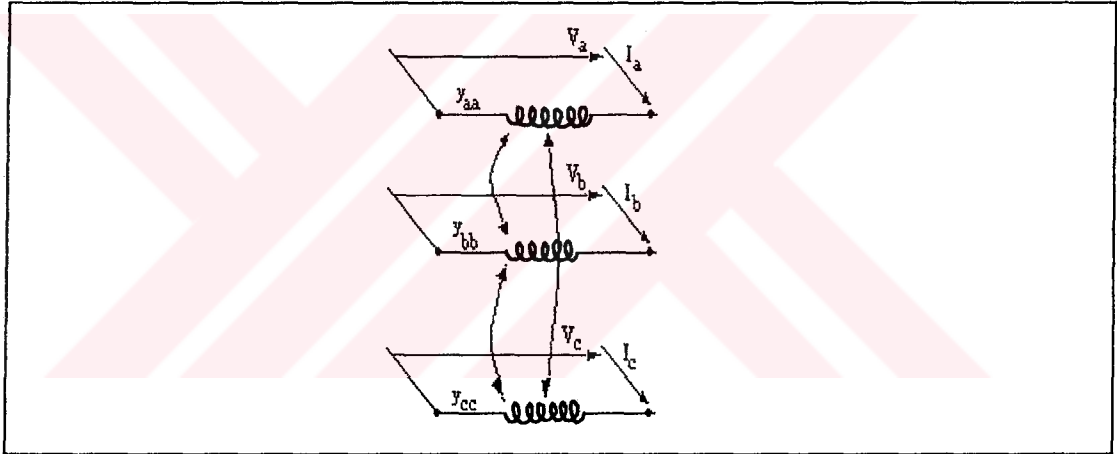
Böylece faz ötelemeye sahip bir transformatörün genel tek faz admitansı

$$[y] = \begin{bmatrix} \frac{y}{\alpha_i \alpha_v} & -\frac{y}{\alpha_i \beta} \\ -\frac{y}{\alpha_v \beta} & \frac{y}{\beta^2} \end{bmatrix} \quad 6.13$$

olacaktır.

### 6.3 Üç Fazlı Sistem Modellemesi

Dengeli ve dengesiz yük durumunda dengeli güç sisteminin uygun incelemesini gerçekleştirmek için dizi bileşenler yaygın olarak kullanılmaktadır. Simetrik bileşen transformasyonu, Fortescue tarafından geliştirilen genel bir matematiki tekniktir. Bununla birlikte,  $n$  vektörlü herhangi bir sistem,  $n$  farklı, simetrik  $n$  fazlı sistemler biçiminde yeniden çözülebilir. Üç fazlı akım veya gerilime sahip bir sistem herbiri üç vektörden oluşan üç simetrik sisteme dönüştürülebilmektedir. Üç fazlı bir transmisyon hattının seri admitansını göz önüne alalım.



Şekil 6.6 Üç fazlı seri admitans elemanı gösterimi

Burada üç karşılıklı kuplajlı sarım mevcuttur. Admitans matrisi

$$[I]_{abc} = [Y]_{abc} [V]_{abc}$$

dir. Burada

$$[I]_{abc} = [I_a \ I_b \ I_c]^T$$

$$[V]_{abc} = [V_a \ V_b \ V_c]^T$$

ve

$$[Y]_{abc} = \begin{bmatrix} y_{aa} & y_{ab} & y_{ac} \\ y_{ba} & y_{bb} & y_{bc} \\ y_{ca} & y_{cb} & y_{cc} \end{bmatrix} \quad 6.14$$

dir. Simetrik bileşen transformasyonunun kullanımı ile Şekil 6.6 daki sarımlar kuplajsız üç sarımla yer değiştirebilmektedir. Dönüştürülen bileşenler ( 012 indisindeki 0 sıfır, 1 pozitif, 2 negatif bileşeni gösterir)

$$[V_{012}] = [T_s]^{-1} [V_{abc}] \quad 6.15$$

$$[I_{012}] = [T_s]^{-1} [I_{abc}] \quad 6.16$$

$$= [T_s]^{-1} [Y_{abc}] [T_s] [V_{012}]$$

ile faz bileşenlerine bağlıdır. Buradaki  $[T_s]$  transformasyon matrisidir. Böylece dönüştürülen akım ve gerilimler transformasyon admitans matrisi ile bağlantılı olmaktadır.

$$[Y_{012}] = [T_s]^{-1} [Y_{abc}] [T_s] \quad 6.17$$

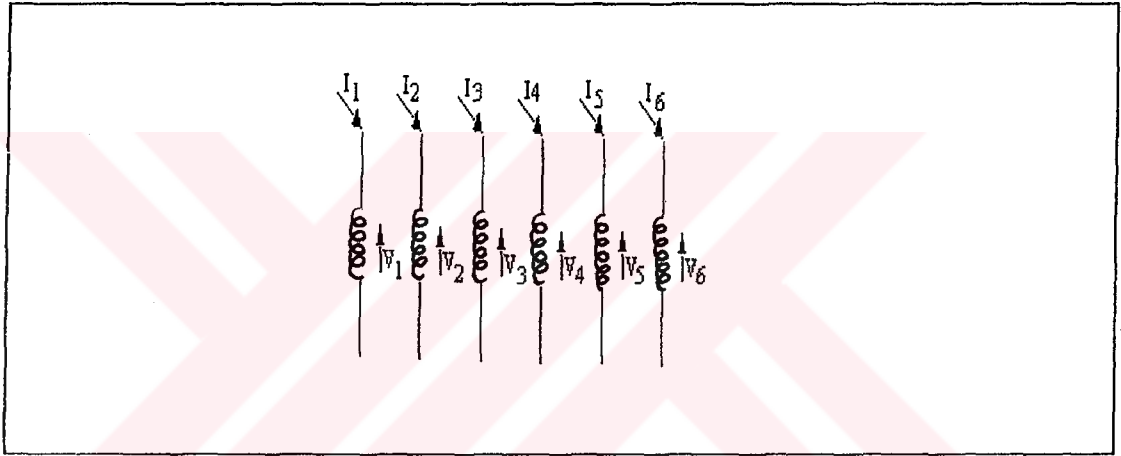
Bu durumda karşılıklı kuplajlı bir üç fazlı sistem, üç tane kuplajsız simetrik sistem ile yer değiştirmektedir. İlave olarak, üretim ve yük dengeli ise veya dengeli kabul edilebiliyorlarsa, sadece bir sistem, pozitif bileşen sistemi bir akım akışına sahip olmaktadır. Diğer iki bileşen ihmal edilmektedir. Bu metod sadece sistem elemanları dengeli olduğunda kullanılabilir. Simetrik olmayan sistemlerde bu methodan yararlanmak mümkün değildir.

Fazların koordine edilmesi ile aşağıdaki avantajlar elde edilir.

- Herhangi bir sistem elemanı birim değerini korur
- Simetrik olmayan empedanslar, fazlar ve farklı sistem elemanları arasındaki karşılıklı kuplajlar ve faz değişimleri kolayca alınmaktadır
- Mevcut transformatör faz kaymaları önemli değildir

Üç fazlı sistem analizinde, grafik olarak gösterimde, bileşik admitansın kullanımı oldukça basittir. Sistemin uygun matris ifadelerinin kullanımı ile tek tek bileşenler şeklinde basitleştirilmesi, genel kanun ve denklemlerin bileşik şebekeler için de kullanımını mümkün kılar.

Şimdi karşılıklı kuplajlı altı admitansı düşünelim. Bunu Şekil 6.7 de gösterelim.



Şekil 6.7 Kuplajlı altı admitansın model devresi

Akım ve gerilimlere bağlantılı model admitans matrisi

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & y_{16} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} & y_{26} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} & y_{36} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} & y_{45} & y_{46} \\ y_{51} & y_{52} & y_{53} & y_{54} & y_{55} & y_{56} \\ y_{61} & y_{62} & y_{63} & y_{64} & y_{65} & y_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad 6.18$$

şeklindedir. Bu denkleminizi 3x3 boyutlu matris ve 3x1 boyutlu vektör biçiminde

ifade edersek

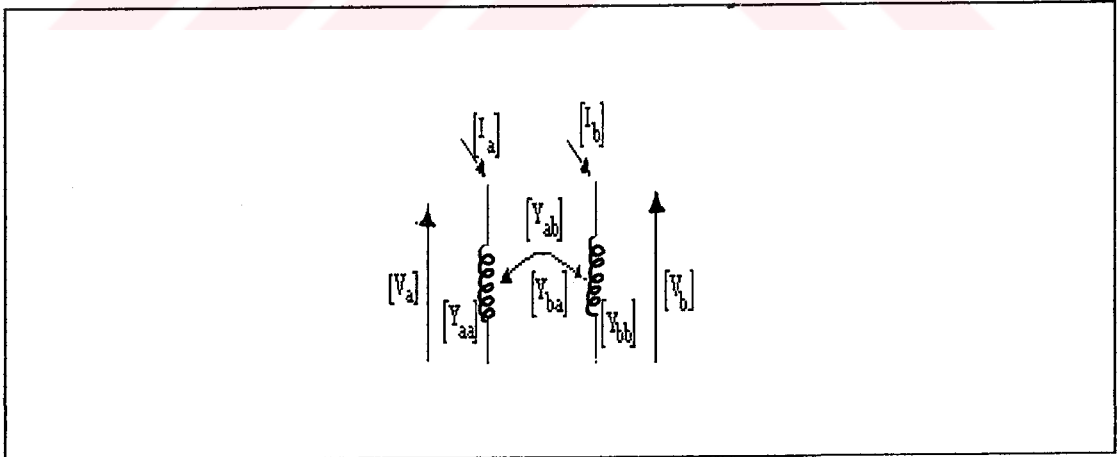
$$\begin{bmatrix} [I_a] \\ [I_b] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_{aa}] & [Y_{ab}] \\ [Y_{ba}] & [Y_{bb}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_a] \\ [V_b] \end{bmatrix} \quad 6.19$$

olur. Burada

$$\begin{aligned} [I_a] &= [I_1 \ I_2 \ I_3]^T & [I_b] &= [I_4 \ I_5 \ I_6]^T \\ [Y_{aa}] &= \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} & [Y_{bb}] &= \begin{bmatrix} y_{44} & y_{45} & y_{46} \\ y_{54} & y_{55} & y_{56} \\ y_{64} & y_{65} & y_{66} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad 6.20$$

$$\begin{aligned} [Y_{ab}] &= \begin{bmatrix} y_{14} & y_{15} & y_{16} \\ y_{24} & y_{25} & y_{26} \\ y_{34} & y_{35} & y_{36} \end{bmatrix} & [Y_{ba}] &= \begin{bmatrix} y_{41} & y_{42} & y_{43} \\ y_{51} & y_{52} & y_{53} \\ y_{61} & y_{62} & y_{63} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

6 sarımı, 2 bileşik sarımda gruplanacak şekilde gösterirsek, her biri üç admitanstan oluşacaktır.



Şekil 6.8 Kuplajlı iki bileşik admitans

$[Y_{ab}]$  ve  $[Y_{ba}]$  yı incelersek  $[Y_{ba}] = [Y_{ab}]^T$  görürüz. Sadece ve sadece  $i = 1, 2, 3$  ve  $k = 4, 5, 6$  için  $y_{ik} = y_{ki}$  dir. Herhangibir sayıdaki bileşik admitanslar için model şebeke tek admitanslı olana tamamen benzer biçimde kurulabilmektedir.

Ancak tüm bileşenleri bileşik admitanslara benzer biçimde matrislerdir.

Bileşik admitanslardan oluşturulan herhangi bir şebekenin gerçek admitans matrisi, lineer transformasyon metodunun kullanımı ile gerçekleştirilebilmektedir. Bağlantı matris elemanları şimdi  $n \times n$  boyutlu özdeş matrislerdir. Burada  $n$ , bileşik admitansların boyutudur. Devre admitans matrisi denklem 6.5 yardımı ile belirlenir.

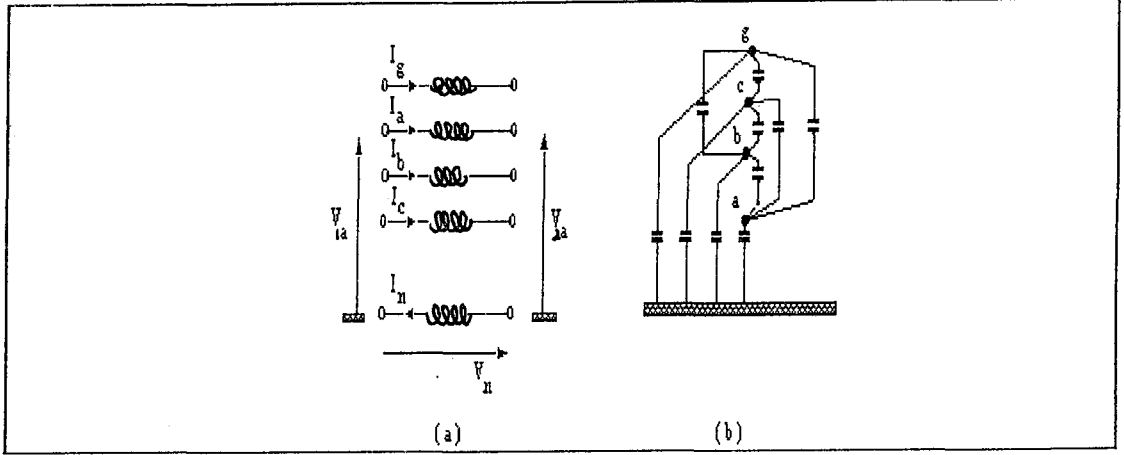
Transmisyon sistemini sistematik, uygun bir şekilde modellemek için sistem daha iyi yönetilebilen alt bölümlere ayrılır. Bunu şöyle tanımlayabiliriz. Bir alt sistem, sistemin, herhangi bir kuplaj oluşturmayacak şekilde bölünmesi ile elde edilen bir parçasıdır. Önce alt sistem admitans matrisi formüle edilip çözümlenir, daha sonra tüm alt sistemler, toplam sistem admitans matrisini oluşturmak için birleştirilirler.

#### 6.4 İletim Hatlarının Üç Fazlı Modelleri

##### 6.4.1 Seri Empedans

İletim hat parametreleri hat geometrik karakteristiklerinden hesaplanır. Bu hesaplanan parametreler hattın birim uzunluğu başına seri empedans ve paralel admitans olarak ifade edilir. Toprak akımlarının ve toprak telinin etkisi bu parametrelerin hesaplanmasında göz önüne alınır.





Şekil 6.9 a.Üç fazlı iletim seri empedans eşdeğeri  
b.Üç fazlı iletim paralel empedans eşdeğeri

Topraklama teli bulunan üç fazlı bir iletim hattını Şekil 6.9.a da gösterelim. ( a ) fazı için aşağıdaki denklemleri yazabiliriz.

$$V_{1a} - V_{2a} = (R_a + j\omega L_a)I_a + (j\omega L_{ab})I_b + (j\omega L_{ac})I_c + j\omega L_{ag}I_g - j\omega L_{an}I_n + V_n \quad 6.21$$

$$V_n = (R_n + j\omega L_n)I_n - j\omega L_{na}I_a - j\omega L_{nb}I_b - j\omega L_{nc}I_c - j\omega L_{ng}I_g \quad 6.22$$

$V_n$  ve  $I_n = I_a + I_b + I_c + I_g$  nin yerine yerleştirilmesi ve yeniden düzenlenmesi ile

$$\begin{aligned} \Delta V_a &= (R_a + j\omega L_a - 2j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n) I_a \\ &+ (j\omega L_{ab} - j\omega L_{bn} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n) I_b \\ &+ (j\omega L_{ac} - j\omega L_{cn} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n) I_c \\ &+ (j\omega L_{ag} - j\omega L_{gn} - j\omega L_{an} + R_n + j\omega L_n) I_g \end{aligned} \quad 6.23$$

veya

$$\Delta V_a = Z_{aa-n} I_a + Z_{ab-n} I_b + Z_{ac-n} I_c + Z_{ag-n} I_g \quad 6.24$$

Benzer denklemlerin diğer fazlar için yazılması ile aşağıdaki matris denklemini elde ederiz.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \\ \dots \\ \Delta V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa-n} & Z_{ab-n} & Z_{ac-n} & | & Z_{ag-n} \\ Z_{ba-n} & Z_{bb-n} & Z_{bc-n} & | & Z_{bg-n} \\ Z_{ca-n} & Z_{cb-n} & Z_{cc-n} & | & Z_{cg-n} \\ \dots & \dots & \dots & | & \dots \\ Z_{ga-n} & Z_{gb-n} & Z_{gc-n} & | & Z_{gg-n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ \dots \\ I_g \end{bmatrix} \quad 6.25$$

Faz iletkenlerinin performansı ile ilgilendiğimizden, iletim hattı için üç-iletkenli bir eşdeğer sistemin kullanımı daha uygundur.

#### 6.4.2 Paralel admitans

Şekil 6.9.b nin referans alınması ile faz iletkenlerinin potansiyelleri, iletken yükleri ile bağımlıdır.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} & P_{ag} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} & P_{bg} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} & P_{cg} \\ P_{ga} & P_{gb} & P_{gc} & P_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \\ Q_g \end{bmatrix} \quad 6.26$$

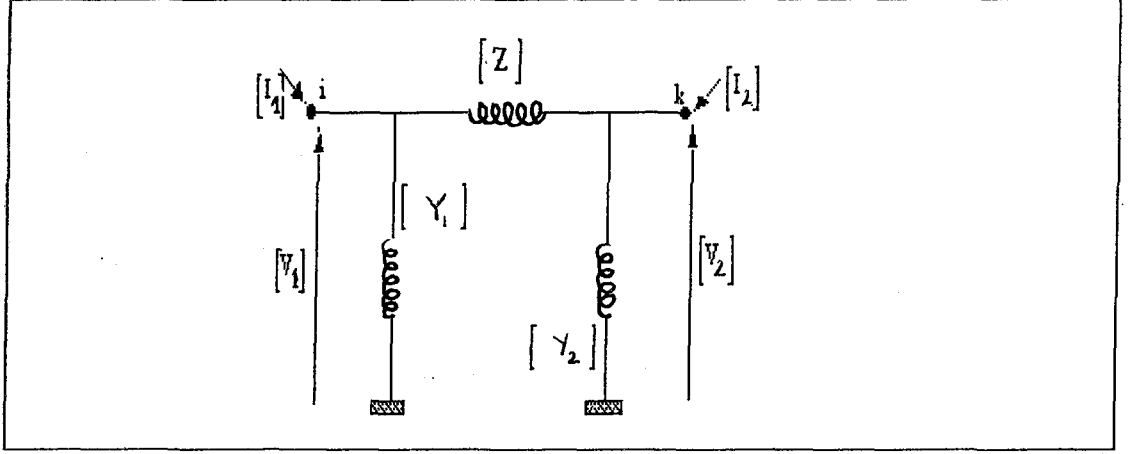
$$V_{abc} = P_{abc} Q_{abc} \quad 6.27$$

Bu denklemdeki  $P_{abc}$  topraklama telinin etkisini içeren 3x3 boyutlu bir matristir.

Şekil 6.9 daki hattın kapasitans matrisi

$$C_{abc} = P_{abc}^{-1} = \begin{bmatrix} C_{aa} & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ba} & C_{bb} & -C_{bc} \\ -C_{ca} & -C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \quad 6.28$$

ile verilmektedir. Üç fazlı hattın  $\pi$  eşdeğer devresi aşağıdaki gibidir.



Şekil 6.10 Üç fazlı bileşik admitans kullanımı

Burada

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad [Y_1] = [Y_2] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \quad 6.29$$

dir. Akım denklemlerimiz ise

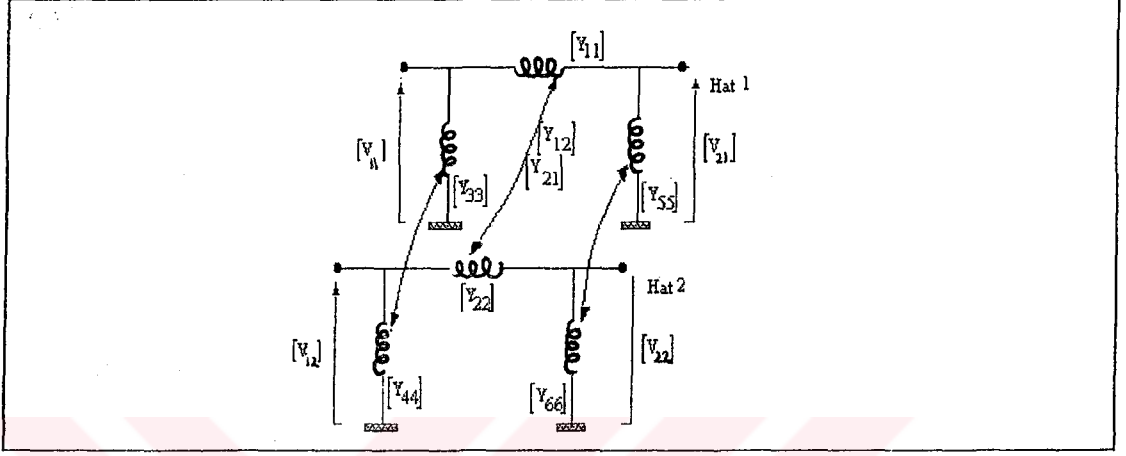
$$\begin{bmatrix} [I_1] \\ [I_2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z]^{-1} + [Y]/2 & -[Z]^{-1} \\ -[Z]^{-1} & [Z]^{-1} + [Y]/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_1] \\ [V_2] \end{bmatrix} \quad 6.30$$

şekindedir. Bu gösterim uzun iletim hatları için yeterli doğrulukta değildir. İletim hat ve dalga yayılımı teorisinin kullanımı ile daha iyi modeller geliştirilebilmektedir. Bununla birlikte, normal şebekelerde frekans analizi için, bir uzun hattın modeli, iki veya üç nominal  $\pi$  eşdeğer devrenin seri bağlantısı olarak düşünülebilmektedir.

#### 6.4.3 Karşılıklı kuplajlı üç fazlı hatlar

İletim hatları arasında elektrostatik ve elektromagnetik kuplaj mevcutsa, bu hesaba katılmalıdır. Bunu incelemek için karşılıklı kuplajlı üç fazlı iki hattı düşünelim.

Kuplajlı iki hat, dört sistem barasından oluşan bir alt sistem gibi düşünülmektedir. Bunu Şekil 6.11 de gösterelim. Burada bileşik admitans matrisi 3x3 boyutlu ve gerilim ile akımların tümü 3x1 boyutlu matrislerdir.



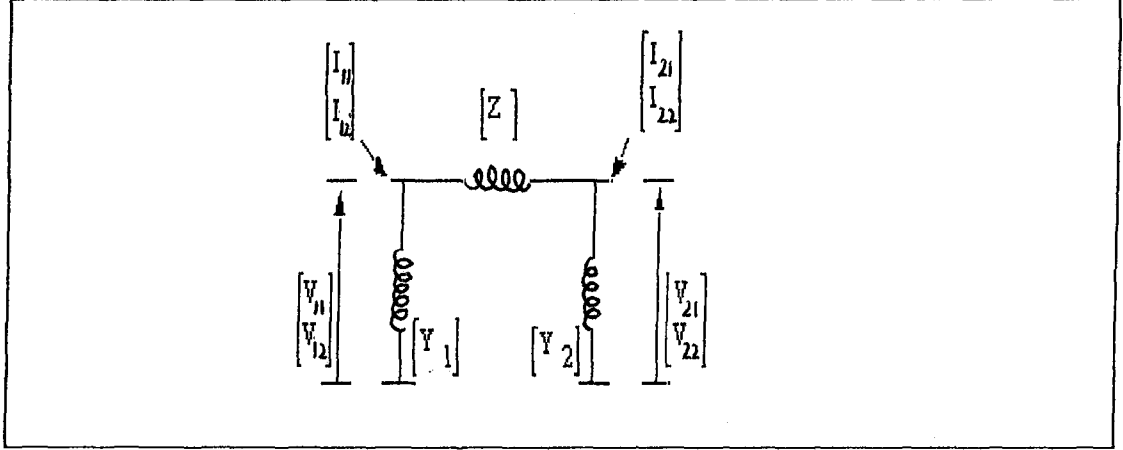
Şekil 6.11 Birbiri ile kuplajlı iki üç fazlı hat

Kuplajlı seri elemanlar, elektromagnetik kuplajı, paralel elemanlarda kapasitif veya elektrostatik kuplajı gösterir. Bu parametreler standart hat parametrelerine benzer bir yolla birleştirilmektedirler.

Şekil 6.11 deki devrede bileşik şebekeler için lineer transformasyon kurallarının uygulanması ile alt sistemin admitans matrisi

$$\begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{12} \\ I_{21} \\ I_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}+Y_{33} & Y_{12}+Y_{34} & -Y_{11} & -Y_{12} \\ Y_{12}^T+Y_{34}^T & Y_{22}+Y_{44} & -Y_{12}^T & -Y_{22} \\ -Y_{11} & -Y_{12} & Y_{11}+Y_{55} & Y_{12}+Y_{56} \\ -Y_{12}^T & -Y_{22} & Y_{12}^T+Y_{56}^T & Y_{22}+Y_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{12} \\ V_{21} \\ V_{22} \end{bmatrix} \quad 6.31$$

şeklinde olacaktır.



Şekil 6.12 6x6 boyutlu bileşik admitans gösterimi

Alt sistem Şekil 6.12 deki gibi yeniden çizilebilmektedir. Kuplajlı, 3x3 boyutlu bileşik admitans matris çifti şimdi 6x6 boyutlu bir admitans matrisi olarak gösterilmektedir. Buradan admitans matrisi

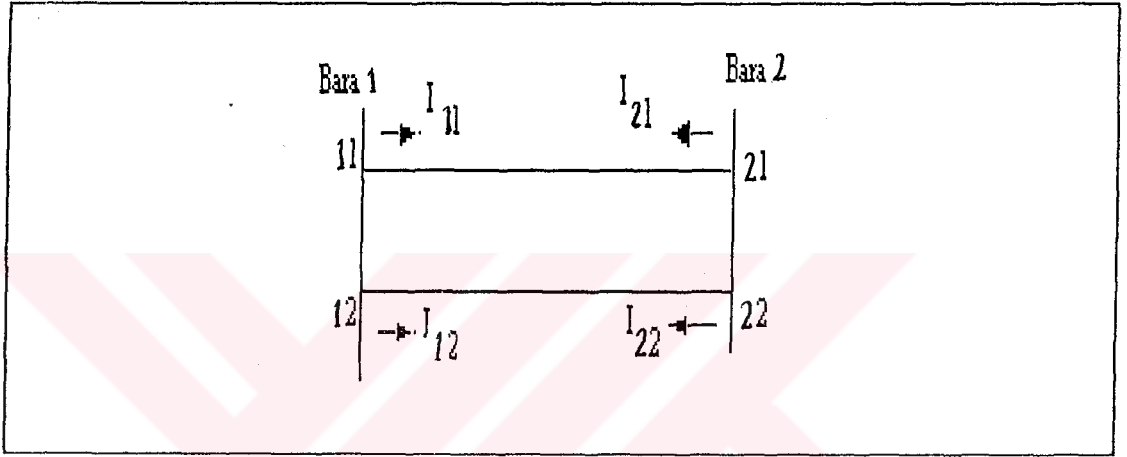
$$\begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{12} \\ I_{21} \\ I_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z]^{-1} + [Y_1] & -[Z]^{-1} \\ -[Z]^{-1} & [Z]^{-1} + [Y_2] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{12} \\ V_{21} \\ V_{22} \end{bmatrix} \quad 6.32$$

şeklinde yazılabilmektedir.

Kuplajlı hatları, normal hatlara benzer biçimde gerçekleştirmek için seri ve paralel admitans matrisleridir. Bu matrisler tek bir hat için 3x3, iki kuplajlı bir hat için 6x6, üç için 9x9 ve dört kuplajlı hat için 12x12 boyutludur. Önce [Z] ve [Y] matrisleri gerçekleştirilir. Alt sistem admitans matrisi 6.32 denkleminin uygulanması ile elde edilir.

## 6.4.4 Uç bağlantılarının düşünülmesi

Aynı baraya bağlı alt sistemde farklı elemanlar mevcutsa yukarıda elde edilen admitans matrisi küçültülmelidir. Örnek olarak Şekil 6.13 deki iki paralel iletim hattını düşünelim.



Şekil 6.13 Karşılıklı kuplajlı paralel iletim hatları

Burada A ve B barasındaki akımlar

$$I_1 = I_{11} + I_{12} \quad I_2 = I_{21} + I_{22} \quad 6.33$$

şeklindedir. Gerilimler için de

$$V_1 = V_{11} = V_{12} \quad V_2 = V_{21} = V_{22} \quad 6.34$$

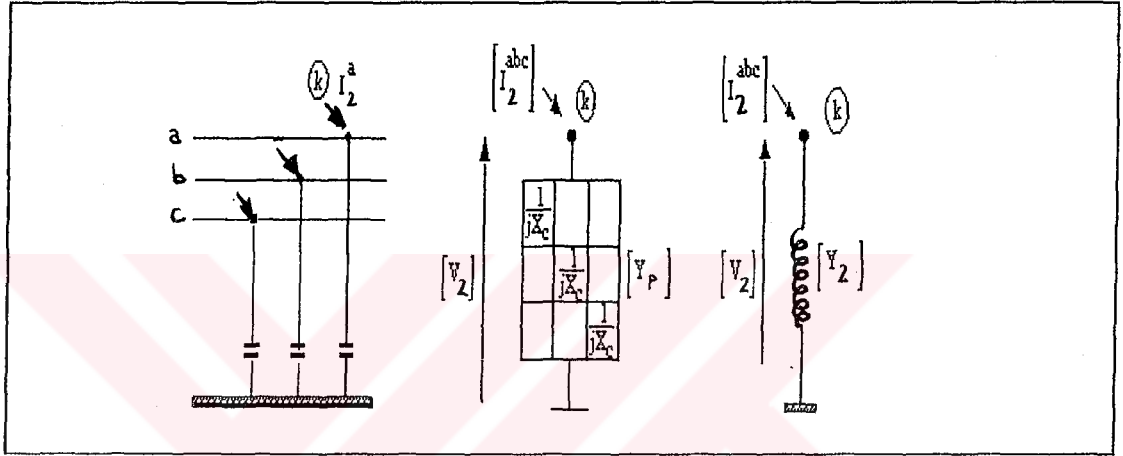
ifadelerini yazabileceğimizden

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [Y_{12}] \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad 6.35$$

olur.  $[Y_{12}]$  matrisi alt sistemi için gereken düğüm admitans matrisidir.

#### 6.4.5 Paralel elemanlar

Paralel reaktörler ve kapasitörler, bir güç sisteminde reaktif güç kontrolünü gerçekleştirmek için kullanılmaktadır. Bunların verileri MVA ve kV cinsindedir, pu cinsinden eşdeğer faz admitansı bu verilerden hesaplanmaktadır.

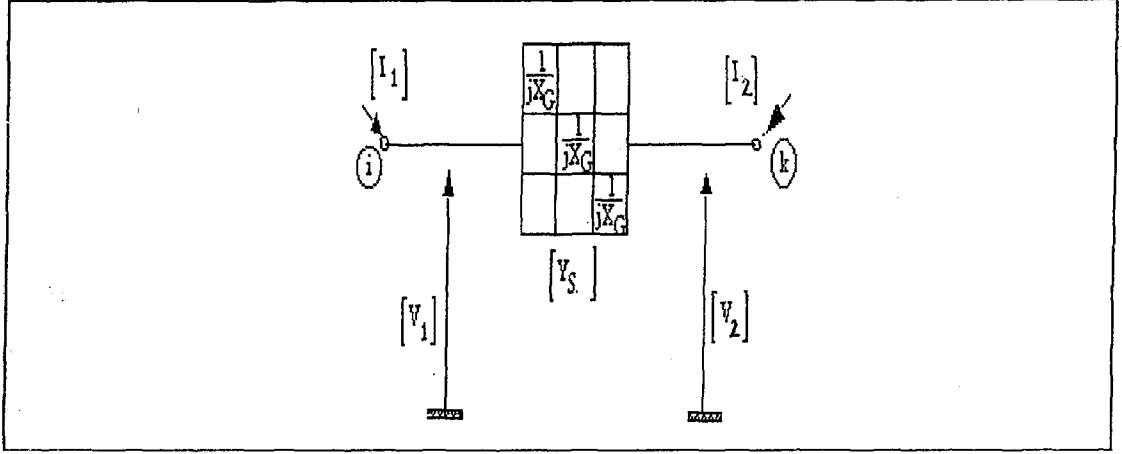


Şekil 6.14 Paralel kapasitör ünitesi gösterimi

Örnek olarak Şekil 6.14.a da gösterilen üç fazlı kapasitör ünitesini düşünelim. Bu tür paralel elemanlar için admitans matrisi genelde diagonaldir ve normalde bileşenler arasında kuplaj yoktur.

#### 6.4.6 Seri elemanlar

İki bara arasında doğrudan doğruya bağlanan herhangi bir eleman seri eleman olarak düşünülebilmektedir.



Şekil 6.15 i ve k düğümleri arasındaki seri kapasitör ünitesinin grafik gösterimi

Genelde kuplajsız olarak alınan seri kapasitans ünitesi tipik bir örnektir ve admitans matrisi diagonaldir. Bu, Şekil 6.15 de gösterilmiştir. Alt sistemin admitans matrisi

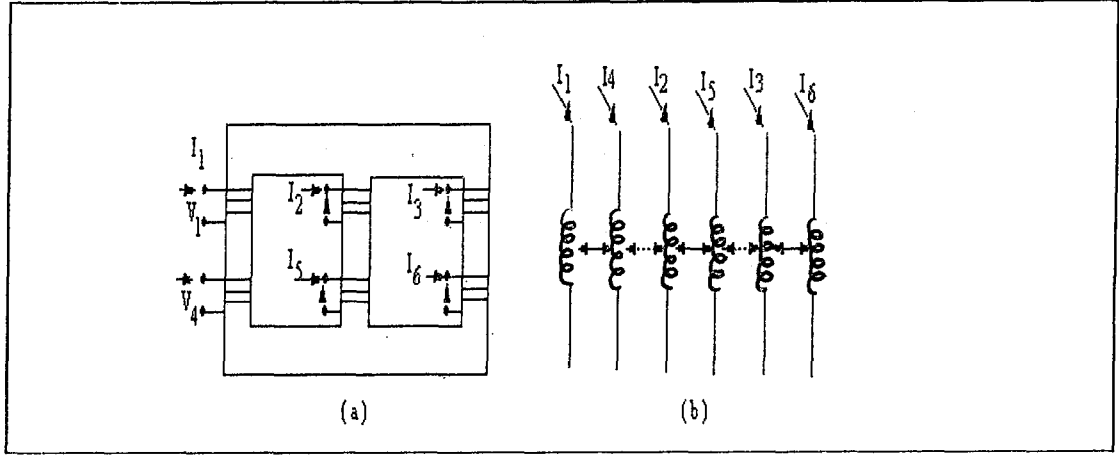
$$[Y] = \begin{bmatrix} [Y_s] & -[Y_s] \\ -[Y_s] & [Y_s] \end{bmatrix} \quad 6.36$$

biçiminde yazılabilmektedir

### 6.5 Üç Fazlı Transformatör Modellemesi

Transformatör, dengeli üç fazlı bir cihazdır ve eşdeğer dizi bileşenleri ile gösterilmektedir. Üç fazlı transformatörlerin pek çoğu, bir nüveye sarımlıdır ve bu nedenle tüm sargıları kuplajlıdır. Bunun için, genelde, iki sargılı üç fazlı transformatörler, altı kuplajlı sargıdan ibaret bir model veya bağımsız devreye sahiptir. Üçüncü bir sargı mevcutsa, model sistem 9 kuplajlı sargıdan ibaret olmaktadır. Şimdi Şekil 6.16.a daki iki sarımlı transformatörü düşünelim.





Şekil 6.16 a. İki sargılı transformatör dinamik gösterimi  
b. Model devre

Şekil 6.16.b deki model devre

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & y_{16} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} & y_{26} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} & y_{36} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} & y_{45} & y_{46} \\ y_{51} & y_{52} & y_{53} & y_{54} & y_{55} & y_{56} \\ y_{61} & y_{62} & y_{63} & y_{64} & y_{65} & y_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad 6.37$$

admitans matrisi ile gösterilebilmektedir.  $[Y]$  matris elemanları doğrudan doğruya ölçülebilmektedir yani  $[Y]$ 'nin  $i$  sütunu  $y_{ki} = I_k / V_i$  den hesaplanabilmektedir. 6.37 denkleminde karşılıklı kuplajı düşünelim. Admitans matrisini tamamlamak için 21 kısa devre ölçümü gerekmektedir. Böyle detaylı bir gösterim nadiren gerekmektedir. Flüks yollarının tüm sarımlar arasında simetrik yayıldığını kabul edersek Denklem 6.37 aşağıdaki gibi basitleştirilebilir.

$$\begin{bmatrix} I_1 & I_2 & I_3 & I_4 & I_5 & I_6 \end{bmatrix}^T = [Y_m] \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 & V_6 \end{bmatrix}^T \quad 6.38$$

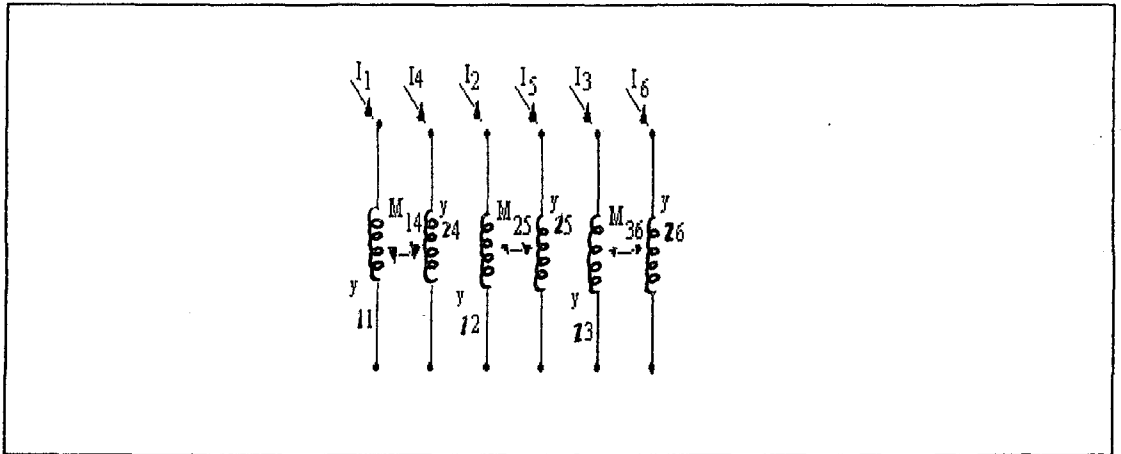
$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_p & y_m' & y_m' & -y_m & y_m'' & y_m'' \\ y_m' & y_p & y_m' & y_m'' & -y_m & y_m'' \\ y_m' & y_m' & y_p & y_m'' & y_m'' & -y_m \\ -y_m & y_m'' & y_m'' & y_s & y_m'' & y_m'' \\ y_m'' & -y_m & y_m'' & y_m'' & y_s & y_m'' \\ y_m'' & y_m'' & -y_m & y_m'' & y_m'' & y_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix}$$

Burada  $y_m'$  = Primer sarguları arasındaki karşılıklı admitans

$y_m''$  = Farklı nüvelerdeki primer ve sekonder sarguları arasındaki karşılıklı admitans

$y_m'''$  = Sekonder sarguları arasındaki karşılıklı admitans

Üç fazlı ünitelerde, faz arası kuplaj gösterimi, açık bir etkiye sahiptir. Bu etki simetrik bileşen eşdeğer devreleri yardımı ile açıklanabilir. Faz arası kuplaj ihmal edilebiliyorsa primer ve sekonder sargısı arasındaki kuplaj tek fazlı ünitelerdeki gibi modellenir. Model devre Şekil 6.17 de gösterildiği gibidir.



Şekil 6.17 Model şebeke

Yeni admitans matris denklemleri

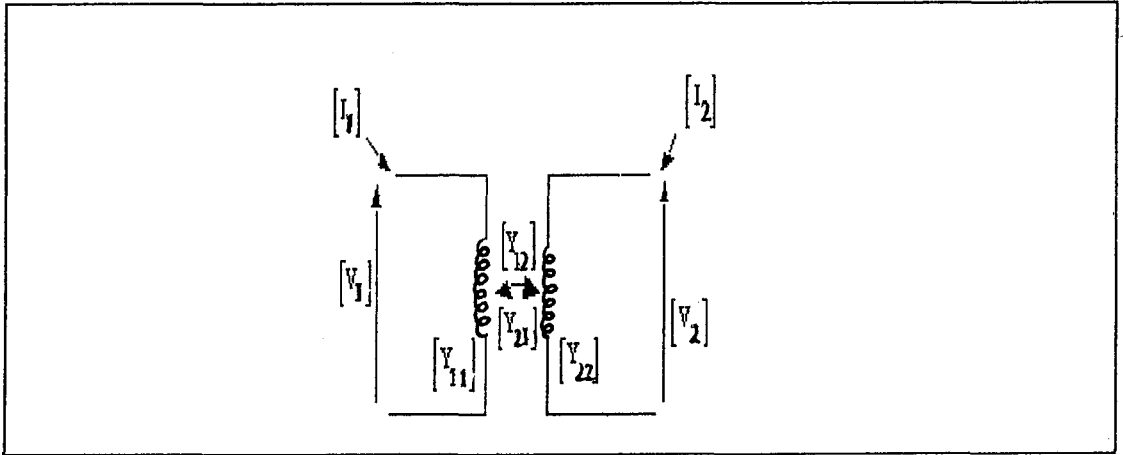
$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & 0 & 0 & M_{14} & 0 & 0 \\ 0 & y_{12} & 0 & 0 & M_{25} & 0 \\ 0 & 0 & y_{13} & 0 & 0 & M_{36} \\ M_{41} & 0 & 0 & y_{24} & 0 & 0 \\ 0 & M_{52} & 0 & 0 & y_{25} & 0 \\ 0 & 0 & M_{63} & 0 & 0 & y_{26} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad 6.39$$

Bu açıklamaların ışığı altında genel denklemlerimizi yazacak olursak

$$\bullet \quad [V]_{dal} = [C][V]_d \quad [Y]_d = [C]^T [Y]_m [C] \quad 6.40$$

elde ederiz. Burada  $[V]_d$  düğüm gerilimlerini gösterir.

Genelde herhangi bir iki sarımlı üç fazlı transformatör, kuplajlı iki bileşik sargının kullanımı ile gösterilebilmektedir. Bu gösterimin şebeke ve admitans matrisi Şekil 6.18 de verilmiştir.



Şekil 6.18 Kuplajlı iki bileşik sargılı üç fazlı transformatör

İki sarım arasındaki kuplaj bilateral olduğundan

$$[Y_{21}] = [Y_{12}]^T$$

olduğuna dikkat edilmelidir. Genelde, bu konu ile ilgili daha fazla detay gerekmemektedir. Tüm faz parametreleri dengeli kabul edilir. Bu durumda genel üç fazlı bağlantılar temel alt matrisler tarafından modellenmektedirler.

Genel bağlantılar için  $[Y_{11}]$ ,  $[Y_{12}]$  vs matrisleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1 Transformatör admitans matrisi düzenlemesinde kullanılan karakteristik altmatrisler

Transformatör Bağlantısı		Self admitans		Karşılıklı admitans
Bara P	Bara S	$Y_{11}$	$Y_{22}$	$Y_{12}$ , $Y_{21}$
W-G	W-G	$Y_I$	$Y_I$	$-Y_I$
W-G	W	$Y_{II/3}$	$Y_{II/3}$	$-Y_{II/3}$
W-G	Üçgen	$Y_I$	$Y_{II}$	$Y_{III}$
W	W	$Y_{II/3}$	$Y_{II/3}$	$-Y_{II/3}$
W	W	$Y_{II/3}$	$Y_{II}$	$Y_{III}$
Üçgen	Üçgen	$Y_{II}$	$Y_{II}$	$-Y_{II}$

Genel üç fazlı transformatör bağlantılarının düğüm admitans formülasyonunda kullanılan temel alt matrisler

$$Y_I = \begin{bmatrix} y_t & \cdot & \cdot \\ \cdot & y_t & \cdot \\ \cdot & \cdot & y_t \end{bmatrix} \quad Y_{II} = \begin{bmatrix} 2y_t & -y_t & -y_t \\ -y_t & 2y_t & -y_t \\ -y_t & -y_t & 2y_t \end{bmatrix}$$

$$Y_{III} = \begin{bmatrix} -y_t & y_t & \cdot \\ \cdot & -y_t & y_t \\ y_t & \cdot & -y_t \end{bmatrix}$$

6.41

dir.

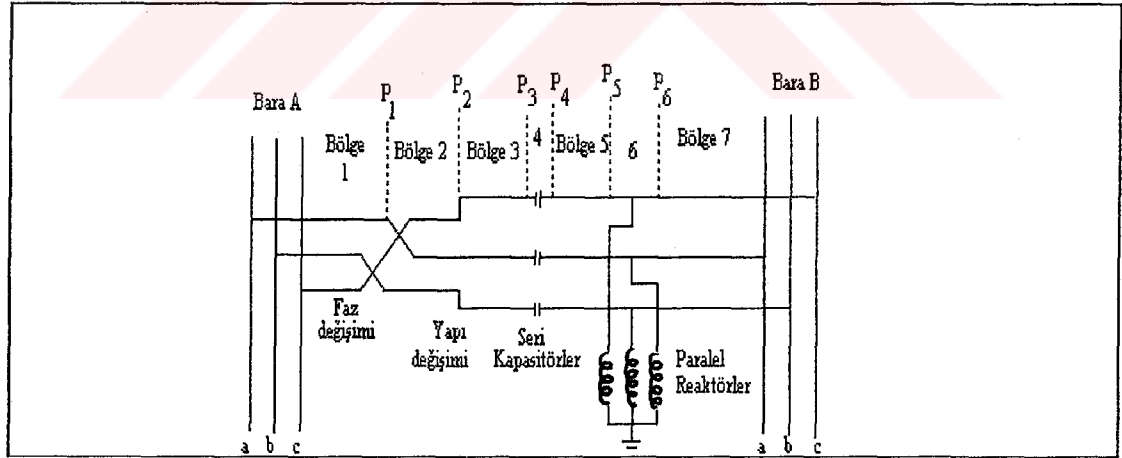
Sonuç olarak, 1'den farklı dönüştürme oranları için bu alt matrisler şu şekilde modifiye edilmelidirler.

1. Primer self admitansı  $\alpha^2$  ile bölünmeli
2. Sekonder self admitansı  $\beta^2$  ile bölünmeli
3. Karşılıklı admitans matrisleri ( $\alpha\beta$ ) ile bölünmeli

Ayrıca pu sistemde, bir üçgen sargı  $\sqrt{3}$  çarpanına sahip olduğuna dikkat edilmelidir.

### 6.6 Hat Kesitlendirme

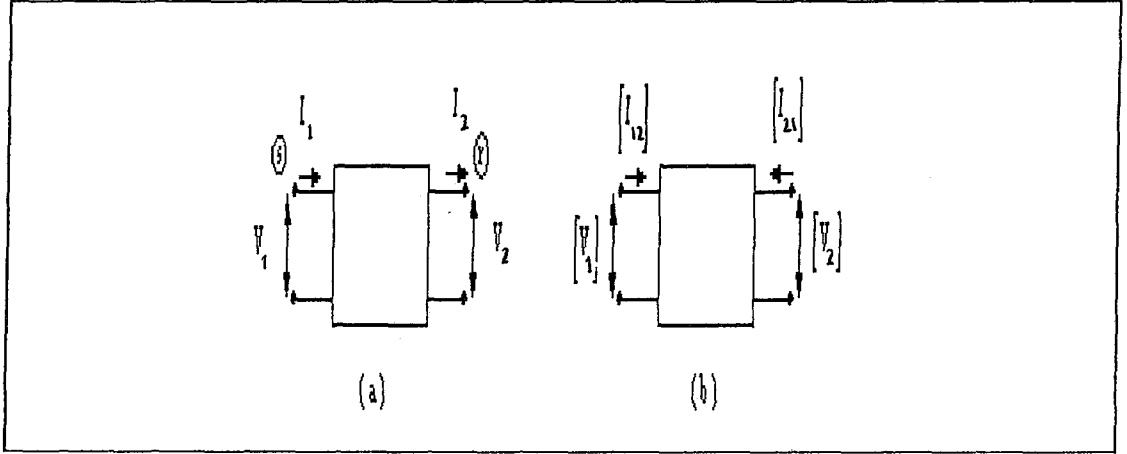
Tüm bunlardan başka hatların bölgelere ayırılma işlemindende yararlanılmaktadır. Şekil 6.19'u düşünelim.



Şekil 6.19 Bölümlere ayrılmış bir iletim sistemi örneği

Burada bir iletim sistemi 7 bölgeye ayrılmıştır. Bu sistemin A ve B baraları arasındaki eşdeğer admitans matris ifadesini bulmak için öncelikle her bir kesitin, ABCD veya transmisyon parametreleri bulunur. Daha sonra bu ifadeler uygun matris çarpımları ile birleştirilir. Gerekli dönüşümler gerçekleştirildikten sonra istenen

admitans parametreleri elde edilir. Bu işlem artık iki kapılı devre teorisini içermektedir.



Şekil 6.20 İki kapılı devrelerin gösterimi

- a. Normal iki kapılı devre
- b. Çoklu-iki kapılı devre

İki kapılı devre için

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad 6.42$$

dönüşüm parametrelerini ve

$$\begin{bmatrix} [V_1] \\ [I_{12}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [C] & [D] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_2] \\ [I_{21}] \end{bmatrix} \quad 6.43$$

matris dönüşüm parametrelerini yazabiliriz.

Matris parametrelerinin boyutları, 1,2,3 veya 4 karşılıklı kuplajlı fazl eleman için 3,6,9 veya 12 dir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus, kesitlendirmede tüm bölgelerin aynı sayıda karşılıklı kuplajlı fazl elemanlara sahip

olmasıdır.

Hatlarda karşılaşılan en genel bölge tiplerini ve bunlara karşılık düşen ABCD parametre matrislerini bir tablo da toplayalım.

Tablo 6.2 Bölge tipleri için ABCD parametre matrisleri

İletim hattı	$\begin{bmatrix} [u]+[Z][Y]/2 & -[Z] \\ [Y][u]+[Z][Y]/4 & -[u]+[Y][Z]/2 \end{bmatrix}$
Transformatör	$\begin{bmatrix} -[Y_{21}]^{-1}[Y_{22}] & [Y_{21}]^{-1} \\ [Y_{12}]-[Y_{11}][Y_{21}]^{-1}[Y_{22}] & [Y_{11}][Y_{21}]^{-1} \end{bmatrix}$
Paralel eleman	$\begin{bmatrix} [u] & [0] \\ [Y_p] & -[u] \end{bmatrix}$
Seri eleman	$\begin{bmatrix} [u] & -[Y_s]^{-1} \\ [0] & -[u] \end{bmatrix}$

Tabloda kullanılan  $[u]$  birim,  $[0]$  sıfır matristir. Burada tüm matris boyutlarının, bölgelerindeki kuplajlı fazl elemanların sayısında olduğuna dikkat edelim.

Alt sistem için eşdeğer düğüm admitans matrisinden bulunan ABCD parametreleri

$$[Y] = \begin{bmatrix} [D][B]^{-1} & [C]-[D][B]^{-1}[A] \\ [B]^{-1} & -[B]^{-1}[A] \end{bmatrix} \quad 6.44$$

denkleminde hesaplanabilmektedir.

## 7. ELEKTRİKLİ GÜÇ DÜZENLERİNDE GEÇİCİ OLAYLARIN GENEL İNCELENMESİ

### 7.1 Arızalı Sistem Çalışmaları

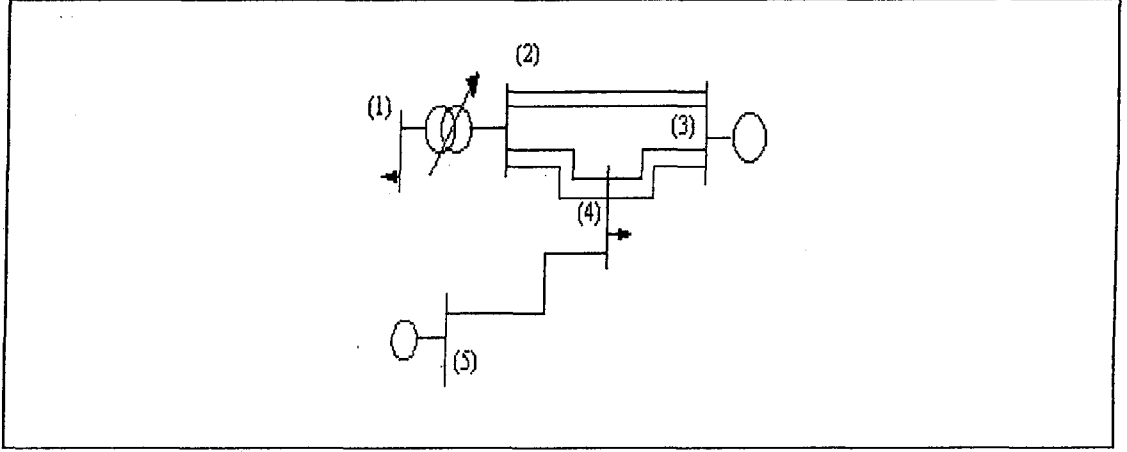
Arıza analizinin temel konusu, devre kesicilerinin kapasitesini ve koruma rölelerinin performansını tesbit etmek için arıza akım ve gerilimlerinin hesaplanmasıdır.

Öncelikle eşdeğer dizi empedans şebekeleri hesaplanmaktadır ve arıza tanımına uygun olarak birleştirilmektedir. Konvansiyonel devre analizi dizi gerilim ve akımlarını hesaplamak için kullanılmaktadır. Komputer kullanımı ile çözüm analizinde klasik yollarla kullanılan çeşitli tahminler ortadan kalkmaktadır. Daha önce incelediğimiz üç fazlı modeller, arızalı sistem admitans veya empedans matrisini belirlemede kolayca uygulanabilmektedir. Böylece AC sistem arızalarının analizi için bir model elde edilmektedir.

### 7.2 Üç Fazlı Arızaların Analizi

Analizdeki ilk adım , arıza öncesi gerilim , yüklenme, besleme şartları gibi sistemi tanımlayan uygun verinin toplanmasıdır. Bu veri daha sonra düğüm eşdeğer devresini kurmak için kullanılmaktadır.





Şekil 7.1 Küçük güç sistemi örneği

### 7.2.1 Admittans matris denklemleri

Referans olarak Şekil 7.1'deki basit sistemi ele alalım. Bu devrede elemanları düğüm eşdeğerine dönüştürüp gerekli basitleştirme işlemleri sonunda düğüm gerilimleri denklemlerini yazarsak

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{21} & Y_{31} & Y_{41} & Y_{51} \\ Y_{12} & Y_{22} & Y_{32} & Y_{42} & Y_{52} \\ Y_{13} & Y_{23} & Y_{33} & Y_{43} & Y_{53} \\ Y_{14} & Y_{24} & Y_{34} & Y_{44} & Y_{54} \\ Y_{15} & Y_{25} & Y_{35} & Y_{45} & Y_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} \quad 7.1$$

genel denklemlerini elde ederiz. Burada

$$Y_{ii} = \sum y_{ij}$$

$$Y_{ij} = -y_{ij} \quad i \neq j$$

Matris denkleminizi kısaca  $[I] = [Y][V]$  biçiminde ifade ederiz.

### 7.2.2 Empedans matris denklemleri

Herbir arıza tipi ve yeri için, komple bir iteratif çözüm gerektiğinden Düğüm Admittans Matrisi yetersiz kalmaktadır. Bunun yerine

$$[I] = [Y] [V]$$

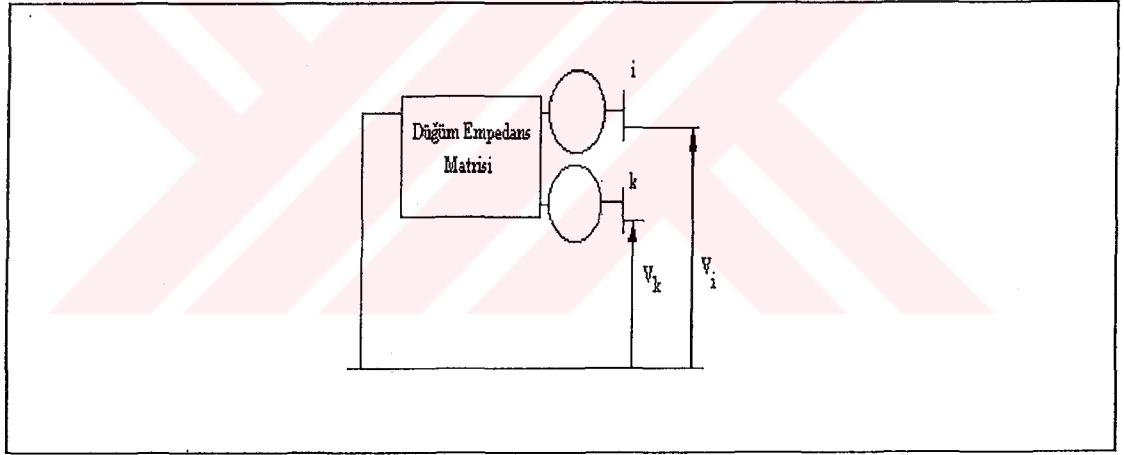
denklemleri

$$[V] = [Y]^{-1}[I]$$

7.2

$$= [Z] [I]$$

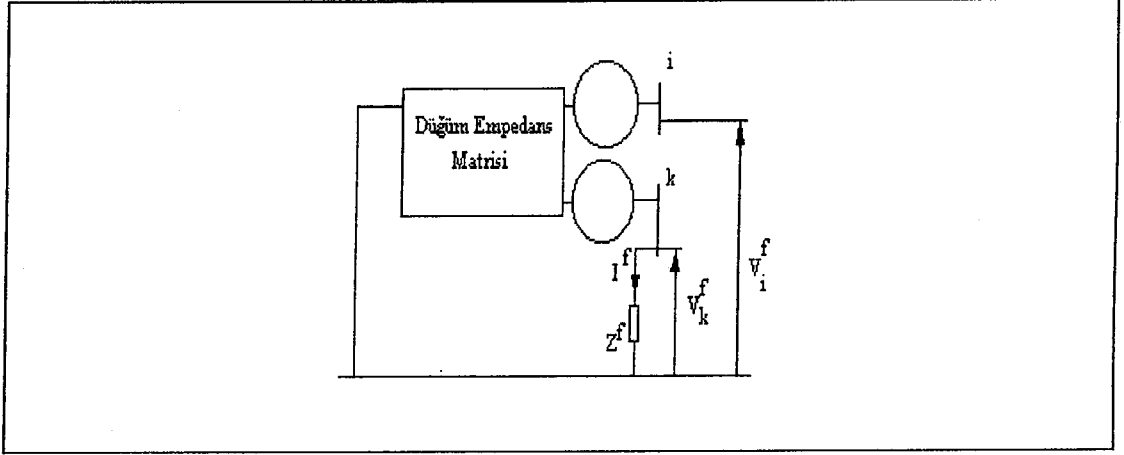
şeklinde yazılmaktadır. Bu denklem,  $[Z]$  bara düğüm empedans matrisini kullanmaktadır.



Şekil 7.2 Arıza öncesi sistemin Thevenin eşdeğer devresi

### 7.2.3 Arıza hesaplamaları

Makinanın ilk verilerinden,  $[I]$  akım değerlerini hesaplarız. Bunlar daha iyi bir  $[V]$  gerilim tahminini elde etmek için kullanılır. İlk veri bir yük akışından elde ediliyorsa, bu hesaplama herhangi bir farklılık oluşturmaz. Şimdi bir arıza anında, gerilim ve akımları hesaplamak için yeterli bilgiye sahibiz.



Şekil 7.3 Arızalı sistemin Thevenin eşdeğer devresi

Şekil 7.3'den k arıza barasındaki gerilim

$$V_k^f = Z^f \cdot I^f \quad 7.3$$

yazılabilir. Genel gerilim düşümü ifademizi verirsek

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_k \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2k} & \dots & Z_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ Z_{k1} & Z_{k2} & \dots & Z_{kk} & \dots & Z_{kn} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nk} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_k \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_n \end{bmatrix} \quad 7.4$$

dir. k satırı için ifademiz

$$V_k = Z_{k1}I_1 + Z_{k2}I_2 + \dots + Z_{kk}I_k + \dots + Z_{kn}I_n \quad 7.5$$

dir. Bu denklem arızadan önce k barasındaki gerilimi tanımlar. Bir arıza anında  $I^f$  arıza akımı k barasından dışarı akar. Arızadan sonra k barasındaki gerilim ifademiz için

$$V_k^f = Z^f I^f = Z_{k1} I_1 + \dots + Z_{kk} I_k + \dots + Z_{kn} I_n - Z_{kk} I^f \quad 7.6$$

veya

$$Z^f I^f = V_k - Z_{kk} I^f \quad 7.7$$

yazabiliriz. Arıza akımı

$$I^f = V_k / (Z_{kk} + Z^f) \quad 7.8$$

denklemleri ile doğrudan doğruya verilir. 7.4 denklemlerinden, herhangi bir j barasında arıza öncesi gerilim

$$V_j = Z_{j1} I_1 + Z_{j2} I_2 + \dots + Z_{jk} I_k + \dots + Z_{jn} I_n \quad 7.9$$

ve arıza anında

$$V_j^f = Z_{j1} I_1 + Z_{j2} I_2 + \dots + Z_{jk} I_k + \dots + Z_{jn} I_n - Z_{jk} I^f \quad 7.10$$

veya

$$V_j^f = V_j - Z_{jk} I^f \quad 7.11$$

7.8 ve 7.11 denklemlerinden, sistemde her bir baradaki arıza gerilimleri hesaplanabilir. Her bir hesaplama, admitans matrisinin sadece bir sütununu gerektirir. Empedans matrisinin, k. satırı 1, diğer satırları 0 olan bir vektör ile çarpılmasıyla elde edilir yani

$$\begin{bmatrix} Z_{1k} \\ Z_{2k} \\ \cdot \\ Z_{kk} \\ \cdot \\ Z_{nk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdot & Z_{1k} & \cdot & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdot & Z_{2k} & \cdot & Z_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{k1} & Z_{k2} & \cdot & Z_{kk} & \cdot & Z_{kn} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdot & Z_{nk} & \cdot & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ 1 \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} \quad 7.12$$

$Z_{kk}$  bilinmektedir. Daha sonra 7.8 denkleminde  $I^f$  hesaplanır.

$$\begin{aligned} I_j^f &= I_j & j \neq k \text{ için } & j = 1' \text{den } n' \text{e kadar} \\ I_k^f &= I_k - I^f & j = k \text{ için} & \end{aligned}$$

ile tanımlanan yeni bir  $[I^f]$  vektörünü belirlemek için  $I^f$ , ilk arıza öncesi düğüm akımlarından çıkarılır. Böylece arıza anındaki gerilimler empedans matrisine bağlı olarak ifade edilir.

$$[V^f] = [Z] [I^f] \quad 7.13$$

Denklemler 7.13, 7.11'ye eşdeğerdir. Çünkü

$$[I^f] = [I] - [0, 0, 0, \dots, I^f, \dots, 0]^T \quad 7.14$$

Buradan 7.13 denklemini

$$[V^f] = [Z] \{ [I] - [0, 0, 0, \dots, I^f, \dots, 0]^T \} \quad 7.15$$

veya

$$[V^f] = [V] - [Z] [0, 0, 0, \dots, I^f, \dots, 0]^T \quad 7.16$$

şeklinde genişletiriz. Arıza akımları bilinmektedir. Baralar arasındaki dal akımları, dal admitanslarından hesaplanabilir. Yani

$$I_{ij}^f = y_{ij} \{ V_i^f - V_j^f \} \quad 7.17$$

### 7.3 Dengesiz Arızaların Analizi

Şebeke simetrik olmayan arızaya sahipse veya yüklenmişse, ne faz akımları ne de faz gerilimi üç fazlı simetrik olmayacaktır. Analiz bir fazla ve herbir elemanın admitansı 3x3 boyutlu bir matristen oluşacak şekilde sınırlandırılır. Daha fazla indirgenemez. Admitans ifademiz

$$\begin{bmatrix} {}^{aa}Y & {}^{ab}Y & {}^{ac}Y \\ & {}^{aa}Y & {}^{ab}Y \\ & & {}^{aa}Y \end{bmatrix} \quad 7.18$$

şeklinde olacaktır. 7.18 matrisi bileşen eşdeğerinde simetrik bileşenler transformasyonu  $(T^*)^{-1} Y T$  ile diagonal hale getirilebilir.

$$\begin{bmatrix} {}^0Y & & \\ & {}^1Y & \\ & & {}^2Y \end{bmatrix} \quad 7.19$$

Burada

$$\begin{aligned} {}^0Y &= {}^{aa}Y + {}^{ab}Y + {}^{ac}Y \\ {}^1Y &= {}^{aa}Y + a ({}^{ab}Y) + a^2 ({}^{ac}Y) \\ {}^2Y &= {}^{aa}Y + a^2 ({}^{ab}Y) + a ({}^{ac}Y) \\ a &= e^{j 2\pi/3} \end{aligned} \quad 7.20$$

Bundan başka, dengeli bir sistemde elemanları için  ${}^{ab}Y$  ve  ${}^{ac}Y$  admitansları eşittir. 7.20 denklemleri aynı zamanda pozitif ve negatif dizi admitanslarının da eşit olacağını gösterir. Ayrıca döner makinaların pozitif ve negatif dizi admitansları, daha fazla basitleştirme için eşit kabul edilir. Bu kabul sadece geçici rejim öncesi admitanslar kullanıldığında mümkündür.

### 7.3.1 Admitans matrisleri

Sistemin herbir elemanını belirleyen veri, aşağıdaki düğüm denklemlerini şekillendirmek için kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned}
 {}^0I_i &= {}^0V_i {}^0y_{ii} + ({}^0V_i + {}^0V_1) {}^0y_{ii} + \dots + ({}^0V_i - {}^0V_n) {}^0y_{ni} \\
 {}^1I_i &= {}^1V_i {}^1y_{ii} + ({}^1V_i + {}^1V_1) {}^1y_{ii} + \dots + ({}^1V_i - {}^1V_n) {}^1y_{ni} \\
 {}^2I_i &= {}^2V_i {}^2y_{ii} + ({}^2V_i + {}^2V_1) {}^2y_{ii} + \dots + ({}^2V_i - {}^2V_n) {}^2y_{ni}
 \end{aligned}
 \tag{7.21}$$

Yukarıdaki denklemler

$$\begin{aligned}
 [{}^0I] &= [{}^0Y][{}^0V] \\
 [{}^1I] &= [{}^1Y][{}^1V] \\
 [{}^2I] &= [{}^2Y][{}^2V]
 \end{aligned}
 \tag{7.22}$$

şeklinde ifade edilebilir.

$${}^\gamma Y_{ij} = -{}^\gamma Y_{ji} \quad i = 1, \dots, n ; j = 1, \dots, n \text{ için } j \neq i \text{ ve } \gamma = 0, 1 \text{ veya } 2$$

ve

$${}^\gamma Y_{ii} = \sum_{k=1}^n {}^\gamma y_{ik} \quad i = 1, \dots, n ; \gamma = 0, 1 \text{ veya } 2$$

Şimdi bileşen-admitans matrislerini kartezyen koordinatlarda ifade edebiliriz. Üç admitans matrisi aynı yapıda olduğundan bunları aynı anda kartezyen koordinatlarda ifade edilmesi ile daha verimli yapılabilir.

### 7.3.2 Arıza hesaplamaları

Üç fazlı arızalar için zaten ifade edildiğinden, düğüm empedans matrisleri, doğrudan doğruya azalan admitans matrislerinden hesaplanabilmektedir ve aşağıdaki bileşen empedans matris denklemleri elde edilir.

$$[{}^0\mathbf{V}] = [{}^0\mathbf{Z}][{}^0\mathbf{I}] \quad 7.23$$

$$[{}^1\mathbf{V}] = [{}^1\mathbf{Z}][{}^1\mathbf{I}] \quad 7.24$$

$$[{}^2\mathbf{V}] = [{}^2\mathbf{Z}][{}^2\mathbf{I}] \quad 7.25$$

Arıza öncesi sistem dengeli kabul edildiğinden, sıfır ve negatif-bileşen akım vektörleri sıfırdır yani arıza öncesi negatif ve sıfır-bileşen gerilimleri yoktur.

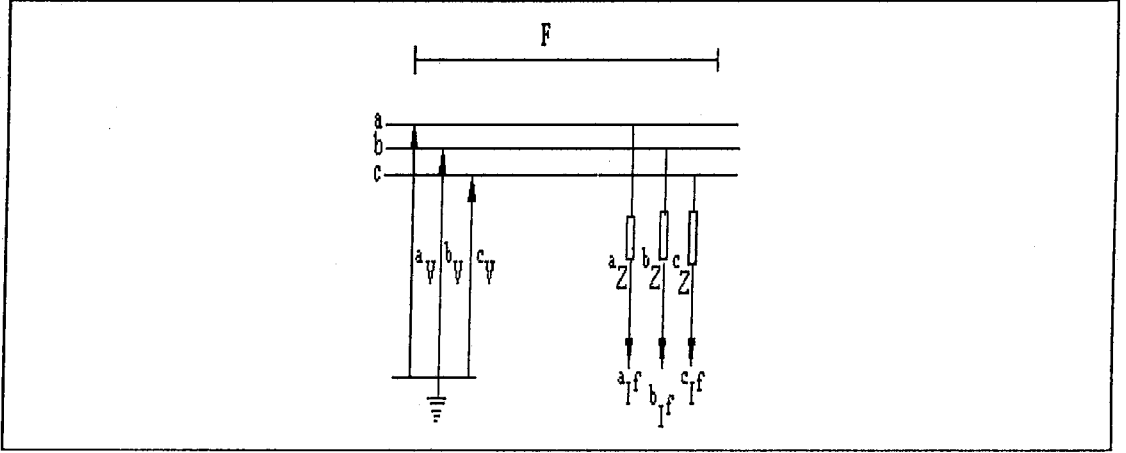
Arıza öncesi gerilimleri hesaplamada, arıza öncesi sistem durum ve 7.24 denklemi kullanılır. Makina modellerinde kullanılan gerilimler yük akış hesaplamasından elde edilmekteyse 7.24 denklemi kullanımı sonuçlarda farklılık yapmayacaktır. Bununla birlikte gerilimler sıfır açılı pu cinsinden kabul edilirse bu hesaplama daha doğru arıza öncesi gerilimleri verir.

Tek fazlı eşdeğer devre, incelenen arızanın tipine uygun olarak üç bileşen devresinin birleştirilmesi ile kurulur.

#### 7.3.2.1 Kısa devre

Kısa devre analizi için F arıza noktasını simüle etmenin uygun bir yolu Şekil 7.4'de gösterilmiştir.

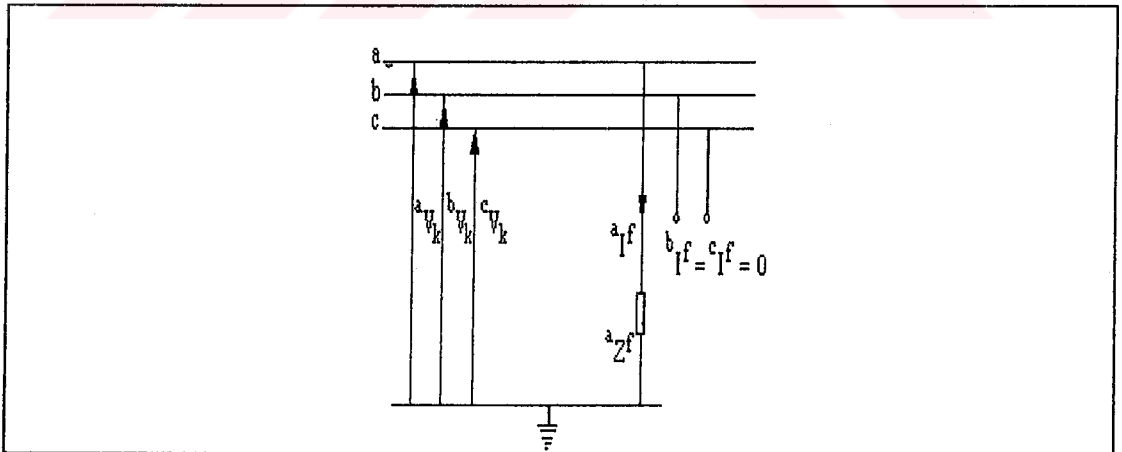




Şekil 7.4 Arıza Noktası

Şekilde  ${}^aZ$ ,  ${}^bZ$  ve  ${}^cZ$  arıza empedanslarını ve  ${}^aI^f$ ,  ${}^bI^f$  ve  ${}^cI^f$  arıza akımlarını belirtir.

Her tip arıza için, arıza noktasında akım ve gerilimler için " sınır şartları " nı yazmak mümkündür. Örneğin Şekil 7.5 , k barasında bir faz -toprak arızasını gösterir.



Şekil 7.5 Tek faz-toprak Arızası

Sınır şartları

$${}^bI_k^f = {}^cI_k^f = 0$$

7.26

ve

$${}^a\mathbf{V}_k^f = \mathbf{a}^Z \mathbf{I}^f \quad 7.27$$

7.26 ve 7.27 denklemleri ile dizi-bileşenler dönüşümünün kullanımı aşağıdaki bağıntıları verir.

$${}^0\mathbf{I}^f = {}^1\mathbf{I}^f = {}^2\mathbf{I}^f = \mathbf{I}^f / 3 \quad 7.28$$

ve

$${}^0\mathbf{V}_k^f + {}^1\mathbf{V}_k^f + {}^2\mathbf{V}_k^f = \mathbf{a}^Z \mathbf{I}^f = 3 (Z^f)^1 \mathbf{I}^f \quad 7.29$$

Arıza noktasındaki bileşen gerilimleri

$$\begin{aligned} {}^0\mathbf{V}_k^f &= - {}^0\mathbf{Z}_{kk} {}^0\mathbf{I}^f \\ {}^1\mathbf{V}_k^f &= {}^1\mathbf{V}_k - {}^1\mathbf{Z}_{kk} {}^1\mathbf{I}^f \\ {}^2\mathbf{V}_k^f &= - {}^2\mathbf{Z}_{kk} {}^2\mathbf{I}^f \end{aligned} \quad 7.30$$

denklemleri ile tanımlanabilmektedir. 7.28'den 7.30'a kadar olan denklemlerden

$${}^0\mathbf{I}^f = {}^1\mathbf{I}^f = {}^2\mathbf{I}^f = {}^1\mathbf{V}_k / ( {}^0\mathbf{Z}_{kk} + {}^1\mathbf{Z}_{kk} + {}^2\mathbf{Z}_{kk} + 3Z^f ) \quad 7.31$$

bağıntıları elde edilir.

Tablo 7.1 Kısa-devre için arıza akımları

Arıza	${}^1\mathbf{I}^f$	${}^2\mathbf{I}^f$	${}^0\mathbf{I}^f$
F-T	$\frac{V_i}{{}^1Z_{ii} + {}^2Z_{ii} + {}^0Z_{ii} + 3Z^f}$	${}^1\mathbf{I}^f$	${}^1\mathbf{I}^f$
F-F	$\frac{V_i}{{}^1Z_{ii} + {}^2Z_{ii} + Z^f}$	$-{}^1\mathbf{I}^f$	0
F-F-T	$\frac{V_i}{({}^2Z_{ii}' + {}^0Z_{ii}')({}^2Z_{ii}' + {}^0Z_{ii}') + {}^1Z_{ii}'}$	$\frac{-{}^1\mathbf{I}^f {}^0Z_{ii}'}{{}^2Z_{ii}' + {}^0Z_{ii}'}$	$\frac{-{}^1\mathbf{I}^f {}^2Z_{ii}'}{{}^2Z_{ii}' + {}^0Z_{ii}'}$
F-F-F-T	$\frac{V_i}{{}^1Z_{ii} + Z^f}$	0	0

Benzer nedenler, diğer kısa devreler için arıza akımlarını verir. Faz-toprak (F-T), faz-faz (F-F), 2 faz-toprak (F-F-T) ve 3 faz (F-F-F-T) arızaları için sonuçlar Tablo 7.1'de toplanmıştır. Burada

$$\begin{aligned} {}^1Z_{ii} &= {}^1Z_{ii} + 0.5 Z^f \\ {}^2Z_{ii} &= {}^2Z_{ii} + 0.5 Z^f \\ {}^0Z_{ii} &= {}^0Z_{ii} + 0.5 Z^f \end{aligned} \quad 7.32$$

Arıza noktasındaki arıza akımları,  $[{}^0I^f]$ ,  $[{}^1I^f]$  ve  $[{}^2I^f]$  arıza akım vektörlerini elde etmek için  $[{}^0I]$ ,  $[{}^1I]$  ve  $[{}^2I]$  akım vektörlerine ilave edilmektedir.  $k$  barasındaki bir arıza için

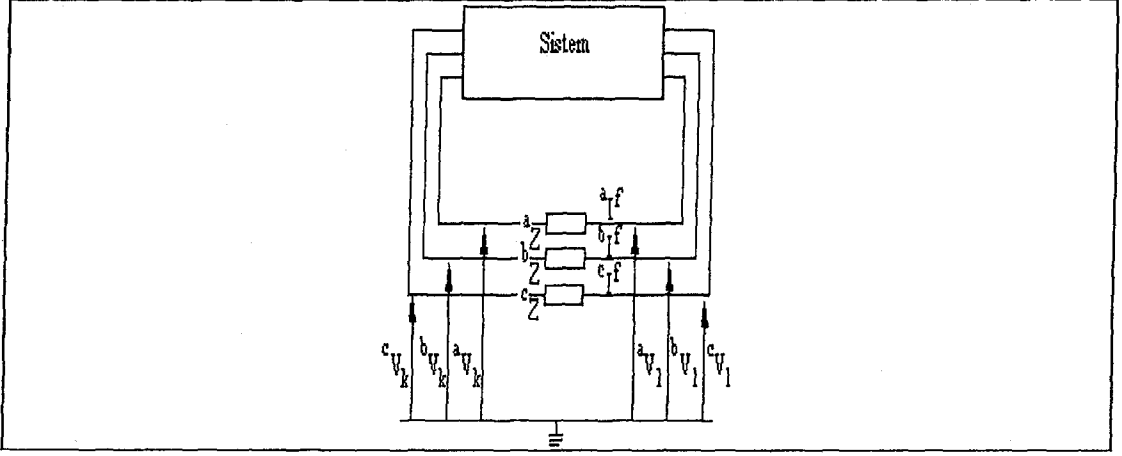
$$I_i^f = \begin{cases} 0 & i \neq k \text{ için} \\ -I^f & i = k \text{ için} \end{cases}$$

$$I_i^f = \begin{cases} I_i & i \neq k \text{ için} \\ I_k - I^f & i = k \text{ için} \end{cases} \quad 7.33$$

$$I_i^f = \begin{cases} 0 & i \neq k \text{ için} \\ -I^f & i = k \text{ için} \end{cases}$$

Daha sonra arıza gerilimleri, arıza öncesi akım vektörü için arıza akım vektörünün yerine yerleştirilmesi ile 7.23, 7.24 ve 7.25 denklemlerinden elde edilir yani

$$\begin{aligned} [{}^0V^f] &= [{}^0Z][{}^0I^f] \\ [{}^1V^f] &= [{}^1Z][{}^1I^f] \\ [{}^2V^f] &= [{}^2Z][{}^2I^f] \end{aligned} \quad 7.34$$



Şekil 7.6  ${}^aZ$ ,  ${}^bZ$  veya  ${}^cZ$  de açık devre olabilen arızalı şebeke gösterimi

### 7.3.2.2 Açık devre

Şimdi sistem, arızalı faz Şekil 7.6'daki gibi bağlanan bir iki kapılı devre ile gösterilir. b ve c fazlarındaki bir açık devre için sınır şartları

$$\begin{aligned} I_b &= I_c = 0 \\ ({}^aV_1 - {}^aV_k) &= {}^aZ {}^aI \end{aligned} \quad 7.35$$

Bileşen dönüşümü ile bu denklemlerin kullanımı aşağıdaki bağıntılar verir.

$${}^0I^f = {}^1I^f = {}^2I^f = {}^aI^f / 3 \quad 7.36$$

ve

$${}^0V_{kl}^f + {}^1V_{kl}^f + {}^2V_{kl}^f = {}^aZ {}^aI^f = 3 ({}^aZ) {}^1I^f \quad 7.37$$

burada

$$V_{kl} = V_1 - V_k \quad 7.38$$

7.36 ve 7.37 denklemleri, arıza akımlarını çözmeye arıza noktasındaki Thevenin eşdeğer bileşen devrelerinin bağlantısını tanımlar. Eşdeğer Thevenin gerilimi,

arızalan fazın ayrılması ile l ve k bara gerilimleri fark ile verilir.

Arıza sırasında  ${}^0V_{kl}^f$ ,  ${}^1V_{kl}^f$  ve  ${}^2V_{kl}^f$  bileşen gerilimleri 7.30 denklemlerindeki gibi ifade edilmektedir. Böylece faz-toprak kısa devre durumundaki gibi benzer şartlar, arıza akımları için aşağıdaki ifadeyi verir.

$$\begin{aligned} {}^0I^f = {}^1I^f = {}^2I^f &= {}^1V_{kl} / \{ {}^0Z_{cs} + {}^1Z_{cs} + {}^2Z_{cs} + 3({}^aZ) \} \\ Z_{cs} &= Z_{kk} + Z_{ll} - Z_{lk} - Z_{kl} \end{aligned} \quad 7.39$$

Bir açık-devre durumu benzer bir biçimde analiz edilebilir ve elde edilen denklemler Tablo 7.2`de gösterilmiştir.

Arıza akım vektörü aşağıdaki gibi şekillenmektedir.

$$\begin{aligned} {}^0I_i^f &= \begin{cases} 0 & i = 1, \dots, n \quad i \neq k \text{ veya } l \text{ için} \\ -I^f & i = k \text{ için} \\ I^f & i = l \end{cases} \\ {}^1I_i^f &= \begin{cases} I_i & i = 1, \dots, n \quad i \neq k \text{ veya } l \text{ için} \\ I_k - I^f & i = k \\ I_l + I^f & i = l \end{cases} \end{aligned} \quad 7.40$$

$${}^2I_i^f = \begin{cases} 0 & i = 1, \dots, n \quad i \neq k \text{ veya } l \text{ için} \\ -I^f & i = k \\ I^f & i = l \end{cases}$$

Tablo 7.2 Açık-devreler için arıza akımları

Arıza	$1_I^f$	$2_I^f$	$0_I^f$
1 Açık-devre	$\frac{V_1 - V_k}{(2Z'_{0Z'})/(2Z' + 0Z') + 1Z'}$	$\frac{1_I^f 0Z'}{2Z' + 0Z'}$	$\frac{1_I^f 2Z'}{2Z' + 0Z'}$
2 Açık-devre	$\frac{V_1 - V_k}{1Z + 2Z + 0Z + Z^f}$	$1_I^f$	$1_I^f$

Gerilim vektörü, 7.34 denklemleri ile verilir. Burada

$$\begin{aligned} 1Z &= 1Z_{kk} + 1Z_{ll} - 1Z_{lk} - 1Z_{kl} \\ 0Z &= 0Z_{kk} + 0Z_{ll} - 0Z_{lk} - 0Z_{kl} \\ 2Z &= 2Z_{kk} + 2Z_{ll} - 2Z_{lk} - 2Z_{kl} \end{aligned} \quad 7.41$$

$Z^f$ , arızalı devrenin, pozitif, negatif ve sıfır bileşen empedansları toplamıdır yani

$$\begin{aligned} Z^f &= 0Z^f + 1Z^f + 2Z^f \\ 0Z^f &= 0Z + 0Z^f \\ 1Z^f &= 1Z + 1Z^f \\ 2Z^f &= 2Z + 2Z^f \end{aligned} \quad 7.42$$

Arıza gerilimleri cinsinden dal akımları

$$\begin{aligned} 0I_{ij}^f &= 0y_{ij} (0V_i^f - 0V_j^f) \\ 1I_{ij}^f &= 1y_{ij} (1V_i^f - 1V_j^f) \\ 2I_{ij}^f &= 2y_{ij} (2V_i^f - 2V_j^f) \end{aligned} \quad 7.43$$

şeklinde elde edilir.

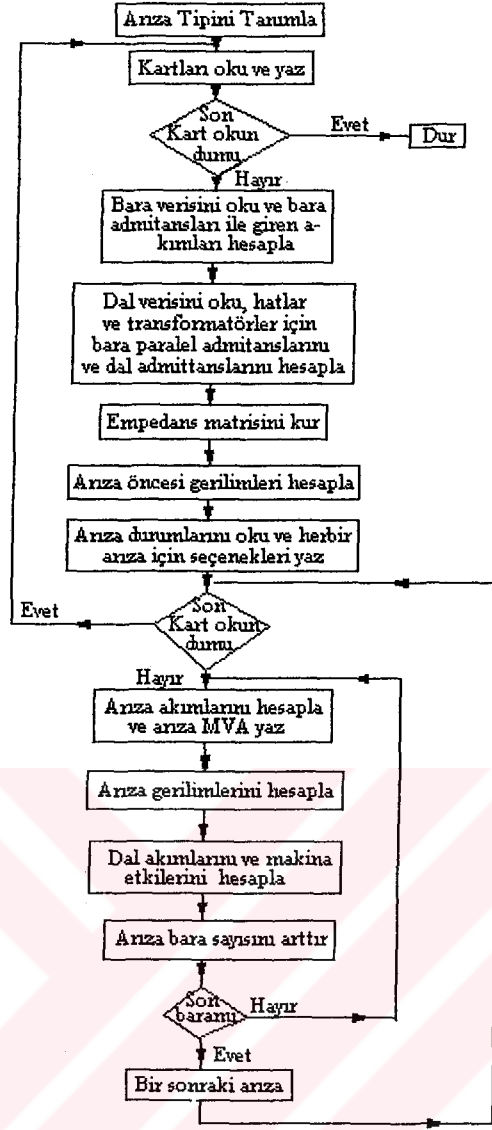
#### 7.4 Program Tanımı

T.C. DİJİTAL DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Bir arıza analiz programı aşağıdaki AC sistem arızalarının analizini yapabilir.

1. Faz - toprak
2. Faz - faz arızası
3. Faz - faz - toprak arızası
4. 3 Faz - toprak arızası
5. Tek faz açık - devre arızası
6. 2 faz açık - devre arızası

AC hatlarda kullanılan arıza analiz programları yüksek gerilim DC hatlarında benzer arızaların çözümlenmesinde genelde kullanılamazlar. Genel amaçlı bir arıza analiz programının akış diagramı Şekil 7.7 de verilmiştir.



Şekil 7. 7 Arıza analiz programı akış programı



## 8. ELEKTRİKLİ GÜÇ DÜZENLERİNDE OPTİMİZASYON

### 8.1 Temel Optimizasyon Metodları

Bu bölümde öncelikle  $n$  değişkenli bir  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  fonksiyonunun optimum değerini (maksimum veya minimum) bulmak için kullanılan çeşitli metodları kısaca inceleyeceğiz. Fonksiyon kar'a ait ise fonksiyonu maksimize etmek uygundur. Diğer taraftan fonksiyon maliyet'e ait ise işletimde fonksiyonumuzu minimize etmek isteriz.  $f$  maksimizasyonu -  $f$  minimizasyonuna eşdeğerdir. Değişken değerlerinin kısıtlamalı ve kısıtlamasız olmasına bağlı olarak optimizasyon metodları iki ana gruba ayrılırlar. Öncelikle kısıtlamasız optimizasyon metodlarına kısaca baktıktan sonra kısıtlamalı optimizasyon metodlarını inceleyeceğiz. Bunların güç sistemlerine nasıl uygulandığını araştıracağız. Ayrıca elektrikle ulaşımda besleme düzenlerinin optimizasyonu ile ilgilendiğimize göre, sistemimizde, maksimum çekme kuvveti, maksimum hızlanma, besleme gerilimi, yol gibi kısıtlamalarımız olacaktır. Bu nedenle optimizasyon problemimizin çözümünde bu kısıtlamaları dikkate almak mecburiyetindeyiz.

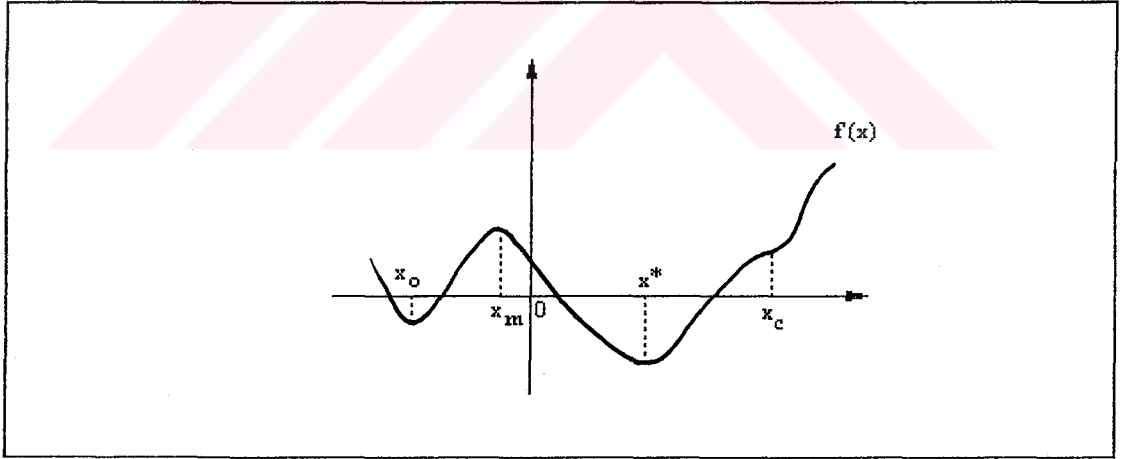
Herhangi bir optimizasyon probleminde üst üste çakışan durumlar vardır. Matematiksel fonksiyonumuzu minimize etmek için öncelikle fiziksel durumun uygun bir modellemesi gerçekleştirilmelidir. Daha sonra minimizasyon için uygun bir metod seçilecektir. Gerekli matematiksel işlemler bir bilgisayar yardımı ile gerçekleştirildikten sonra elde edilen sonuçlar tekrar fiziksel eşdeğerlerine dönüştürülürler.

### 8.1.1 Kısıtlamasız optimizasyon

#### 8.1.1.1 Klasik metodlar

$|x-x_0| < \delta$  şeklinde bir  $\delta$  pozitif değeri mevcutsa  $f(x)$  fonksiyonunun  $x_0$  da bir minimumu var denir.  $f(x) \geq f(x_0)$  yani  $x$ 'in tüm değerleri için bir  $x_0$  mevcutsa  $f(x)$ ,  $f(x_0)$  büyüklüğündedir.

$x$ 'in tüm değerleri için  $f(x) \geq f(x^*)$  ise  $f(x)$ , global bir minimuma sahiptir. Bir  $f(x)$  fonksiyonunun değişimi Şekil 8.1'deki gibi olsun. Bu fonksiyonun  $x_0$ 'da lokal,  $x^*$  da ise global bir minimuma sahip olduğunu gözleriz.



Şekil 8.1  $f(x)$  fonksiyonunun grafiki gösterimi

$x_0$  ve  $x^*$ ,  $f'(x) = 0$  denkleminin çözümleri olacaktır.  $x_m$  ve  $x_c$  değerleri'de bu denklemlerden elde edilir. Bu denklemler sadece bir minimum için gerekli durumdur. Ancak yeterli değildir. Bununla birlikte  $x_0$  ve  $x^*$ 'de  $f(x)$  negatiften pozitif'e doğru değişmektedir.  $x_c$ 'de türev,  $x$ ,  $x_c$  değeri boyunca değişirken, işaret değişimi yokken,  $x_m$  noktasında pozitif'ten negatif'e değişir. Bu nedenle bir

minimumda türev, artan bir fonksiyondur ve  $f'(x)$  artım oranını

$$f'(x_0) > 0, \quad f'(x^*) > 0 \quad f'(x_m) < 0 \text{ iken}$$

şeklinde bekleriz. İkinci türev sıfır ise durum belirsiz kalır. Yukarıdaki sonuçları Taylor serisine yerleştirirsek

$$f(x_0 + h) - f(x_0) = hf'(x_0) + \frac{h^2}{2!}f''(x_0) + \dots \quad 8.1$$

$x_0$  bir minimumu veriyorsa tüm  $h$  ( $|h| < \delta$ ) değerleri için eşitliğin sol tarafı negatif olmayacaktır. Bu nedenle  $f'(x_0)$  sıfır olmalıdır ve gerekli durumdur. Şayet türev pozitifse, yeterince küçük negatif bir  $h$  değeri eşitliğin sağ tarafını negatif yapar, türev negatifse, yeterince küçük pozitif bir  $h$  değeri eşitliğin sağ tarafını negatif yapar.

Bir sonraki terim  $h^2$ 'yi içereceğinden gerçekten bir minimum'a sahip olacağımızı görürüz.  $f'(x_m) = 0$  ve  $f''(x_m) < 0$  ise benzer olarak  $x_m$  bir maksimum verir.

$f'(x) = 0$  olduğu belirsiz durum Taylor serisi ifadesi ile halledilebilir.

$$f(x_0 + h) - f(x) = hf'(x_0) + \frac{h^2}{2!}f''(x_0) + \frac{h^3}{3!}f'''(x_0) + \frac{h^4}{4!}f''''(x_0) + \dots \quad 8.2$$

bunların ışığında aşağıdaki kuralı türetebiliriz.

$f(x)$  ve türevleri sürekli ise  $x_0$  bir extrim noktadır. ( max veya min ) Sadece ve sadece  $n$  tamsa,  $n$   $x_0$ 'da son bulmayan ilk türev tarzında ve  $f^{(n)}(x_0) < 0$  ise  $x_0$  bir maksimumu ve  $f^{(n)}(x_0) > 0$  ise  $x_0$  bir minimumu verir.

## 8.1.1.2 n değişkenli fonksiyonlar

n reel değişkenli fonksiyonu düşünelim.

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = f(x)$$

n boyutlu Euclidean uzayında  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  koordinatlı nokta  $x$  kolon vektörü ile belirtilir. Fonksiyon gradient'i yani  $(\partial f/\partial x_1, \partial f/\partial x_2, \dots, \partial f/\partial x_n)$  bileşenli vektör  $\nabla f(x)$  ile veya bazen  $g(x)$  ile belirtilmektedir.  $f(x)$ 'in Hessian matrisi  $G(x)$  ile belirtilir ve

$$G_{ij} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \quad 8.3$$

elemanlı  $n \times n$  boyutlu simetrik matristir. Bir  $x_0$  komşu değeri mevcutsa  $f(x)$ ,  $x_0$ 'da lokal bir minimum'a sahiptir. Yani  $|x - x_0| < \delta$ ,  $f(x) \geq f(x_0)$  için pozitif bir  $\delta$  değeri mevcuttur.

Tüm  $x$ 'lerde  $x^*$  global minimum'u için  $f(x) \geq f(x^*)$ 'dir. 8.1 denklemini genelleştirirsek

$$\begin{aligned} f(x_0 + h) - f(x_0) &= \sum_{i=1}^n h_i \frac{\partial f}{\partial x_i}(x_1, \dots, x_n) \\ &+ \frac{1}{2!} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_i h_j \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(x_1, \dots, x_n) + \dots \\ &= h^T \nabla f(x_0) + \frac{1}{2} h^T G(x_0) h + \dots \end{aligned} \quad 8.4$$

Bu durumda  $x_0$ ,  $f(x)$  için bir minimum verirse, birinci kısmi türev  $\partial f/\partial x_i$  ( $i=1, \dots, n$ )  $x_0$ 'da ortadan kalkmalıdır. Aksi takdirde  $h_i$  ile  $f(x_0 + h) - f(x_0)$  negatif yapılır.

Bu nedenle  $x_0$ 'da bir minimum için gerekli durum  $\nabla f(x_0) = 0$  yani  $\partial f(x_0)/\partial x_i = 0$  ( $i=1, \dots, n$ ) dir.  $f(x_0 + h) - f(x_0)$  işareti  $0,5h^T G(x_0) h$  ile tayin edilmektedir.

$G(x_0)$  pozitif belli bir değerse tüm  $h$ 'lar için pozitif olacaktır. Böylece bir minimum için yeterli ve gerekli koşullar

$$\nabla f(x_0) = 0, \quad G(x_0) \text{ pozitif belirli bir değer}$$

Bir maksimum için ise

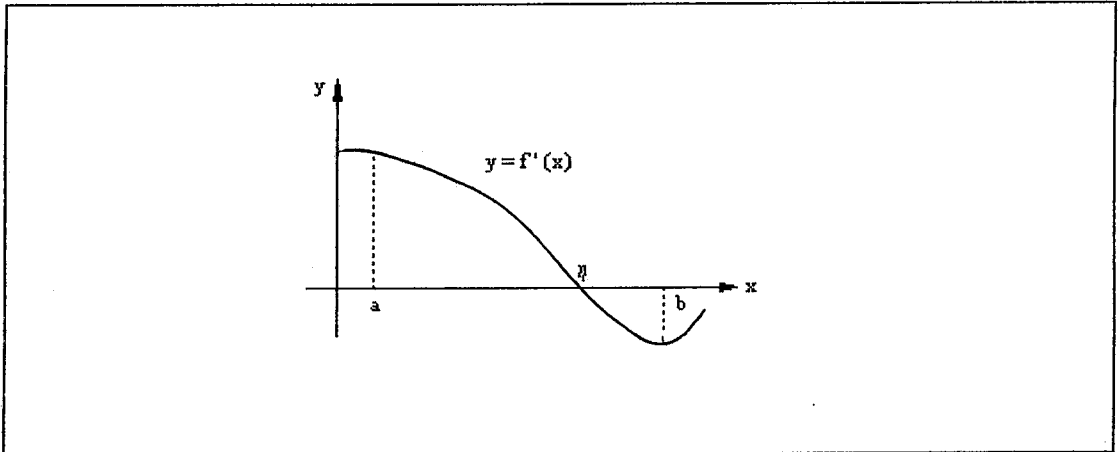
$$\nabla f(x_m) = 0, \quad G(x_m) \text{ negatif belirli bir değer}$$

### 8.1.1.3 Newton metodu

Bir değişkenli fonksiyonlar için klasik uygulama

$$f'(x) = 0$$

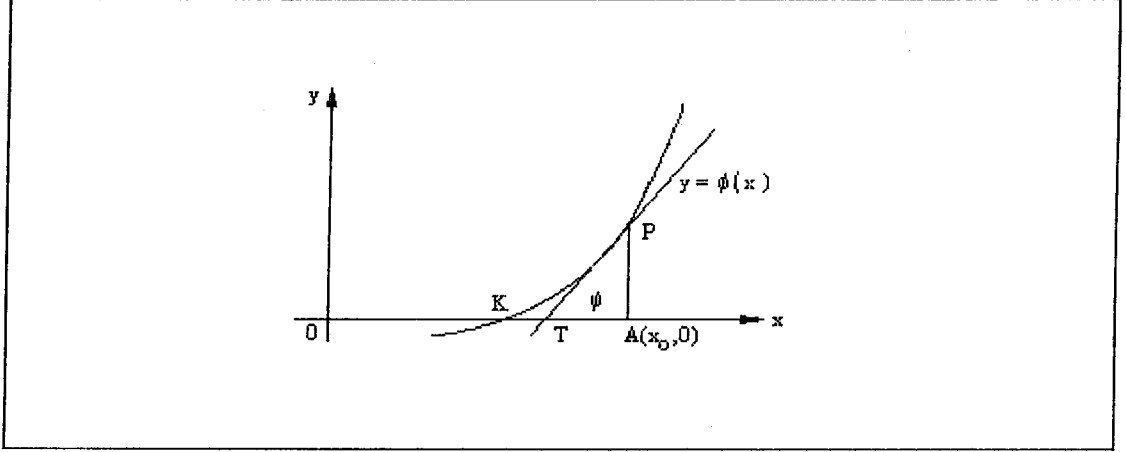
denklemi çözümü olarak  $f(x)$ 'in tüm noktalarında  $x$  değerlerini bulmaktır. Bu denklemi çözmek kolay olmayabilir. Bu nedenle çözüm için nümerik bir metod düşünürüz.  $y = f(x)$  eğrisinin kaba bir çizimi, tahmini bir çözüm elde etmemize yardımcı olur.  $f(a)$  ve  $f(b)$ 'yi veren  $a$  ve  $b$  değerlerini bulabilirsek denklemin  $a < \eta < b$  şeklinde bir kökü olacaktır.



Şekil 8.2  $y=f'(x)$  fonksiyonun değişim eğrisi

Newton metodu,  $\phi(x)$  denkleminin kökünü bulmak için yapılan tahmini rölaf olarak düzeltme imkanını verir. Problemlerimizin genelinde  $\phi(x) \equiv f(x)$  Şekil 8.3'de  $x_0$ ,

$\phi(x) = 0$ 'm kökü için bir tahmindir.



Şekil 8.3

Burada  $OT = OA - TA = x - TA$  Keza

$$\frac{PA}{TA} = \tan\phi = \phi'(x_0) \quad 8.5$$

O halde

$$TA = \frac{PA}{\phi'(x_0)} = \frac{\phi(x_0)}{\phi'(x_0)} \quad 8.6$$

$$x_1 = x_0 - \frac{\phi(x_0)}{\phi'(x_0)}$$

Benzer olarak uygularsak

$$x_2 = x_1 - \frac{\phi(x_1)}{\phi'(x_1)} \quad 8.7$$

ve genel olarak

$$x_{r+1} = x_r - \frac{\phi(x_r)}{\phi'(x_r)} \quad 8.8$$

Hesaplamalar, iki tahmin değeri istenen doğrulukta oluncaya kadar süremektedir. Genellikle herhangi bir  $x$  değeri için  $F = \phi(x)$ , 1000 alt işlemde,  $D = \phi(x)$ 'de 2000 alt işlemde hesaplanmaktadır. Doğru çözüm  $E$ 'nin yeterince küçük bir değerde verilmesi ile hesaplanabilmektedir.  $FF = f(x)$  [  $f(x) = \phi(x)$  ] , 3000 alt işlemde değerlendirilmektedir. Şayet kök için yeterince küçük bir ilk tahmin yapılamazsa Newton metodu yakınsama sağlayamayacaktır. Tek yol, iterasyonun yakınsamasını sağlamak için , kök ilk tahminini düzeltmektir. Minimum veya maksimumu bulmak için yararlanabileceğimiz bazı metodlar vardır.

#### 8.1.1.4 Araştırma metodları

Bir değişkenli fonksiyonlar. Bu tip araştırma metodları, Fibonacci araştırma metodu, en iyi bölge araştırma metodu, uygun eğri uygulaması, quadratik interpolasyon, kübik interpolasyon vs. dir.

#### 8.1.1.5 Doğrudan araştırma metodları

N değişkenli fonksiyonlar: Bunlardan bazılarını sıralarsak Hooke ve Jeeves metodu, Nelder ve Mead metodu.

### 8.1.1.6 Gradient metodları

Bunların bazıları da şöyledir. En dik azalma metodu, quadratik fonksiyonlar, Davidon - Fletcher - Powell Metodu, Fletcher - Powell metodu.

### 8.1.2 Kısıtlamalı optimizasyon

Bir  $z = f(x,y)$  fonksiyonunu minimize etmek için iki değişkenli problemi düşünelim. Buradaki  $x$  ve  $y$  değişkenleri

$$h(x,y) = 0 \quad 8.9$$

bağıntısı ile sınırlandırılmıştır. Prensip olarak  $y$ 'yi  $x$ 'in bir fonksiyonu şeklinde çözmek için  $h(x,y) = 0$  kısıtlamasını kullanabiliriz. Şüphesizki pratikte,  $s(x)$  için açık bir ifade bulmak zor hatta imkansızdır.  $y = s(x)$  fonksiyonunda türev alırsak

$$\frac{dy}{dx} = \frac{d}{dx} s(x) = -\frac{\partial h / \partial x}{\partial h / \partial y} \quad 8.10$$

elde ederiz.

$$z = f(x,y) = f|x,s(x)| \quad 8.11$$

Daha sonra bağımsız  $x$  değişkenli bir fonksiyon olarak hesaba katabiliriz.  $z$ 'nin bir minimumu için gerekli koşul

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{dy}{dx} = 0 \quad 8.12$$

yani

$$\frac{\partial f}{\partial x} + \left( \frac{-\partial f / \partial y}{\partial h / \partial y} \right) \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad 8.13$$

8.9 ve 8.13 denklemleri minimum'da  $x^*$  ve  $y^*$  değerlerini elde etmek için kullanılır.



Bu sonuçları bir fark denklemi biçiminde belirtirsek

$$\lambda = -\frac{\partial f}{\partial y}(x,y) / \frac{\partial h}{\partial y}(x,y) \quad 8.14$$

olacaktır.  $x = x^*$ ,  $y = y^*$  iken minimumda

$$h(x,y) = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x,y) + \lambda \frac{\partial h}{\partial x}(x,y) = 0 \quad 8.15$$

ve

$$\frac{\partial f}{\partial y}(x,y) + \lambda \frac{\partial h}{\partial y}(x,y) = 0 \quad 8.16$$

buluruz. Sonuçlar doğrudan doğruya 8.14 denkleminde bulunmaktadırlar. Gerekli üç durumun üretilme yolu Lagrange fonksiyonunu kullanmaktır. [2]

$$F(x, y, \lambda) = f(x, y) + \lambda h(x, y) \quad 8.17$$

$f(x, y)$  fonksiyonunun kısıtlı bir minimumu için gerekli şartlar

$$\frac{\partial F}{\partial x}(x,y,\lambda) = \frac{\partial f}{\partial x}(x,y) + \lambda \frac{\partial h}{\partial x}(x,y) = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial y}(x,y,\lambda) = \frac{\partial f}{\partial y}(x,y) + \lambda \frac{\partial h}{\partial y}(x,y) = 0 \quad 8.18$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda}(x,y,\lambda) = h(x,y) = 0$$

şeklinde yazılabilir. Bu  $x^*$ ,  $y^*$  ve  $\lambda^*$  için minimumda  $x$ ,  $y$  ve  $\lambda$  değerlerini temin etmektedir. Sonuç  $n$  değişkenli bir fonksiyon için genelleştirilebilir. Böylece minimizasyon problemini

$$z = f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad 8.19$$

şeklinde düşünürüz. Burada  $x$  değişkenleri

$$h_1(x) = 0, h_2(x) = 0, \dots, h_m(x) = 0 \quad 8.20$$

biçiminde kısıtlanmıştır.

Prensip olarak  $m$  değişkeni ifade etmek için kısıtlamaları kullanabiliriz. Bunları  $n - m$  bağımsız değişken olarak düşünebiliriz. Kısıtlandırılan minimumda  $f(x+s) - f(x) \geq 0$  tüm  $s$ 'ler için  $(h_i(x+s) - h_i(x) = 0 \quad i=1, \dots, m)$  diyebiliriz. Böylece

$$\sum_{j=1}^n h_j \frac{\partial f}{\partial x_j} = 0 \quad 8.21$$

$$\sum_{j=1}^n s_j \frac{\partial h_i}{\partial x_j} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

sahip olacağız. Bunu

$$\sum_{j=1}^n s_j \left( \frac{\partial f}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^m \lambda_i \frac{\partial h_i}{\partial x_j} \right) = 0 \quad 8.22$$

yazabiliriz. Burada  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$  Lagrange çarpanlarıdır.  $s_{m+1}, s_{m+2}, \dots, s_n$  bağımsız artanlar olduğundan katsayıları sıfır olmalıdır. Yani

$$\frac{\partial f}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^m \lambda_i \frac{\partial h_i}{\partial x_j} = 0 \quad j = m+1, \dots, n \quad 8.23$$

$s_1, s_2, \dots, s_m$  artımları bağımsız değildir ancak 8.22 denklemini  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$  seçimi ile sıfır yapabiliriz. Böylece 8.23 denklemini  $j=1, 2, \dots, m$  için sağlamada  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$  seçeriz. Sonuç olarak

$$\frac{\partial f}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^m \lambda_i \frac{\partial h_i}{\partial x_j} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad 8.24$$

elde ederiz. Lagrange fonksiyonunu tanımlarsak

$$F(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i h_i(x) \quad 8.25$$

$f(x)$ 'in kısıtlı minimumu için gerekli koşulları

$$\frac{\partial F}{\partial x_j} = \frac{\partial f}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^m \lambda_i \frac{\partial h_i}{\partial x_j} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad 8.26$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda_i} = h_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, m$$

şeklinde ifade edebiliriz.

#### 8.1.2.1 Eşitsizlik kısıtlamaları

Bu kısımda Lagrange çarpanları ifadelerini eşitsizlik kısıtlamaları için genişleteceğiz. Böylece genel matematiksel programlama problemini

$$\begin{array}{ll} \text{amaç fonksiyonu} & f(x) \\ m \text{ kısıtlaması} & g_i(x) \leq b_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \end{array} \quad 8.27$$

( Kısıtlama  $\phi(x) \geq c$   $-\phi(x) \leq -c$  şeklinde yazılabilir )

Başlangıçta, tüm durumlarda, ortaya çıkan problemin çözümü olmadığını söylemeliyiz. Verilen tipteki her problemin çözümü için garanti verilmiş metod geliştirilmemiştir.

Eşitsizlik kısıtlamaları

$$g_i(x) + u_i^2 = b_i \quad 8.28$$

yani  $g_i(x) + u_i^2 - b_i = 0$

elde etmek için her birine negatif olmayan bir  $u_i^2$  değişkeninin ilavesi ile eşitlik kısıtlamasına dönüştürülebilir. Böylece problem  $m$  tane  $g_i(x) + u_i^2 - b_i = 0$  denklem kısıtlamasına bağlı  $f(x)$ 'i minimize etmek olur.

Lagrange fonksiyonu biçiminde

$$F(x, \lambda, u) = f(x) + \sum_{i=1}^m \mu_i |g_i(x) + u_i^2 - b_i| \quad 8.29$$

Sabit bir noktada gerçekleştirilen gerekli durumlar

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x_j} &= \frac{\partial f}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^n \mu_i \frac{\partial g_i}{\partial x_j} = 0 & j = 1, 2, \dots, m \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda_i} &= g_i(x) + u_i^2 - b_i = 0 & i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad 8.30$$

$$\frac{\partial F}{\partial u_i} = 2\mu_i u_i = 0$$

Son durum  $u_i/2$  ile çarpıldığında  $\mu_i u_i^2 = 0$  yani

$$\mu_i |b_i - g_i(x)| = 0 \quad i=1, 2, \dots, m \quad 8.31$$

verir. Denklem 8.30 ve 8.31 kısıtlamalı bir  $x^*$  minimumu için gerekli denklemlerdir. Denklem 8.30  $g_i(x) \leq 0$  kısıtlamasının yeni bir ifadesidir. 8.31 şartı  $\mu_i$  veya  $b_i - g_i(x^*)$  ifadelerinden birinin sıfır olduğu durumdur.  $\mu_i$  sıfır değilse  $b_i = g_i(x^*)$  dir ve kısıtlama aktiftir ve bir denklem gibidir. Diğer taraftan kısıtlama  $b_i > g_i(x^*)$  eşitsizliği gibi gerçekleştiriliyorsa  $\mu_i$  Lagrange çarpanı sıfır olacaktır.  $b_i > g_i(x^*)$  ise ilgilenilen kısıtlamalı minimumdan uzaklaştıkça bu sınır inaktif olur ve ihmal edilebilir ve buna karşılık gelen  $\mu_i$  sıfırdır. Şüphesizki başlangıçta kısıtlamaların ihmal edilebileceğini bilmeyiz. Keza ekstra bir durum daha vardır. Bu da minimum da  $\mu_i \geq 0$  koşulunu yerine getirmektir. 8.30 ve 8.31 denklemleri  $(x^*, \mu^*, u^*)$  noktasında gerçekleştirilmektedir. Gerçek kısıtlama fonksiyon minimumu  $z = f(x^*)$  ise  $z$ 'yi  $b_i$ 'nin bir fonksiyonu olarak kabul edebiliriz.  $b_i$ 'nin değişiminde sınırlar modifiye edilecektir ve  $z$  değişecektir.

$$\frac{\partial z}{\partial b_i} = -\mu_i^* \quad 8.32$$

$$\frac{\partial z}{\partial b_i} = \sum_{j=1}^m \frac{\partial f}{\partial x_j} \frac{\partial x_j}{\partial b_i}$$

göstereceğiz. Burada kısmi türevler  $x^*$  de alınmıştır.  $g_k(x) + u_k^2 = b_k$  olduğundan

$$\begin{aligned} \frac{\partial g_k}{\partial b_i} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial g_k}{\partial x_j} \frac{\partial x_j}{\partial b_i} &= 0 & i \neq k & \text{ise} \\ &= 1 & i = k & \text{ise} \end{aligned} \quad 8.33$$

Böylece

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial b_i} + \sum_{k=1}^n \mu_k^* \frac{\partial g_k}{\partial b_i} &= \frac{\partial z}{\partial b_i} + \mu_i^* = \\ &= \sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial f}{\partial x_j} + \sum_{k=1}^n \mu_k^* \frac{\partial g_k}{\partial x_j} \frac{\partial x_j}{\partial b_i} \right) \end{aligned} \quad 8.34$$

Ancak bu denklem 8.30 nedeni ile sıfırdır. Buradan

$$\frac{\partial z}{\partial b_i} = -\mu_i^* \quad 8.35$$

$b$  arttığından, sınır bölgesi, daha büyük değerli bir  $z$ ,  $f(x)$ 'in minimumu olmayacak şekilde genişletilmiştir.

$$\frac{\partial z}{\partial b_i} \leq 0 \quad \text{yani} \quad \mu_i^* \geq 0 \quad 8.36$$

olur.  $f(x)$ 'in minimumunda sağlanan gerekli koşullar

$$\frac{\partial f}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^n \mu_i \frac{\partial g_i}{\partial x_j} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$g_i(x) \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\mu_i [g_i(x) - b_i] = 0 \quad 8.37$$

$$\mu_i \geq 0$$

Buradan  $x$  ve  $\mu$  yü bulabiliriz.  $\mu_i$  in işareti bir maksimum olarak gerçekleşiyorsa tersi olacaktır. Bu koşullar Kuhn - Tucker şartları olarak bilinmektedir.

Şimdi bazı kısıtlamalı optimizasyon metodlarına kısaca bakalım.

### 1. Modifiye edilmiş Hooke ve Jeeves metodu

Lineer olmayan bir problemin programlanması için ilk metod tek değerli fonksiyonları kullanmaktır. Kısıtlamayı, bir kuvvet olduğunu kabul ederek yapabiliriz. Objektif bir fonksiyonu çözmek için onu sınırlamak önem taşır. Ancak bu kısıtlama, problemin eşitliğini bozmayacak şekilde gerçekleştirilmelidir.

### 2. Kompleks metod

Çok zor çözümlü problemlerde kullanılmak üzere geliştirilmiş bir araştırma metodudur. Bu, basit metodlardan giderek kısıtlamayı gerçekleştirmektedir. Bu metodu basitten başlayarak kompleks hale getirenler Nedler ve Mead 'dır. Verilen problemde fonksiyonu,  $f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $x$  'e bağlı olarak açık ve kapalı

kısıtlamalarla gerçekleştirilmiştir.

$$\text{Açık kısıtlama} \quad : \quad l_j \leq x_j \leq u_j \quad (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad 8.38$$

$$\text{Kapalı kısıtlama} \quad : \quad g_i(x) \leq b_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m)$$

Eğer objektif  $f(x)$  fonksiyonu ve kapalı kısıtlamadaki  $g_i(x)$  fonksiyonu konveks ise bu problemin tek çözümü vardır. Buradaki  $l_j$  ve  $u_j$  değerleri,  $x$ 'in alt ve üst sınırlarıdır. Bu şekilde kısıtlama gerçekleştirilir.  $m$  ve  $n$  değerleri  $f(x)$  fonksiyonunun eleman sayısıdır. Bu fonksiyon  $k=2n$  olacak şekilde bir sayı aldığımda  $i$  katsayısının değişimi  $i = 2, 3, \dots, k$  olur. Buna göre  $l_j \leq x_j \leq u_j$  alıp,  $x_{ij}$  değişimini yazarsak

$$x_{ij} = l_j + r(u_j - l_j) \quad \begin{array}{l} j = 1, 2, \dots, n \\ i = 2, 3, \dots, k \end{array} \quad 8.39$$

olur. Bu formüllerden

$$x_i = \frac{x_i + x_c}{2} \quad 8.40$$

bulunur.

$$x+c = \frac{1}{i-1} \sum_{e=1}^{i-1} x_e \quad 8.41$$

dir. Bu formüllerde kısıtlama  $k > i$  oluncaya kadar yapılır.

### 3. Hemstitching (Yarılama) metodu

Roberts ve Lyvers, problemleri, verilen sayılarda kısıtladığı halde, iki değer arasında da kısıtlamayı sağlamışlardır. Verilen  $f(x)$  fonksiyonunun kısıtlama değerleri A, B, C olsun. Bu noktalar için  $f(x)$  ifadeleri

$$f(x) \rightarrow A \text{ için } F(A)$$

$$B \text{ için } F(B)$$

8.42

C için  $F(C)$

bulunur.  $F_A$  ile  $F_B$  değerlerini birbirleri ile karşılaştırsak

$F_B < F_A$  ise fonksiyon A ile C arasında

$F_B \geq F_A$  ise fonksiyon A ile B arasında kısıtlanmıştır.

#### 4. Gradient indüşümü metodu

$f(x)$  fonksiyonunun çözümünü bulmak için önce  $g_l(x) \geq 0$  olan bir fonksiyon seçilir. Gradyen vektörü olarak  $\nabla g_1, \nabla g_2, \dots, \nabla g_l$  ( $1 \leq m$ ) alınırsa ve  $\nabla g_k = [g_{1k}, \dots, g_{nk}]$  ise

$$N = \begin{pmatrix} g_{11} & \dots & g_{1l} \\ \vdots & & \vdots \\ g_{n1} & \dots & g_{nl} \end{pmatrix} \quad \text{buradan} \quad \sum_j g \mu_k^2 = 1 \quad (k = 1, \dots, l) \quad 8.43$$

ve  $g = r + s \quad g = r + N \mu$  ise

$$S = \sum_{k=1}^l \mu_k \nabla_{gk} = N \mu \quad N_r = 0 \quad 8.44$$

Buradan

$$N'g = N' N \mu$$

$$\mu = (N' N)^{-1} N' g$$

$$S = N (N' N)^{-1} N' g$$

8.45

$$r = g - N (N' N)^{-1} N' g = Pg$$

$$P = I - N (N' N)^{-1} N'$$

$$-r = -Pg \Rightarrow -r' \nabla f(x) = -r' g = -r' (r+s) = -r' r < 0$$

bulunur. Bu da kısıtlamayı gerçekleştirir.



### 5. Penalty fonksiyonları

Bu fonksiyonda önce bir  $z = f(x)$  alınır ve buna

$$P(x) = \sum_{i=1} k_i [g_i(x)]^2 \quad 8.46$$

eklenir ve

$$Z(x) = F(x) + \sum_{i=1} k_i [g_i(x)]^2 \quad 8.47$$

ifadesi elde edilir. Burada gradyen alınarak

$$\sum_j \left( \frac{\sigma F}{\sigma x_j} + 2 \sum_i k_i g_i \frac{\sigma g_i}{\sigma x_j} \right) \frac{\sigma g_j}{\sigma x_j} = 0 \quad 8.48$$

denklemini ile kısıtlama sağlanır.

### 8.2 Elektrikli Güç Sistemlerinde Optimizasyon Uygulamaları

Güç sistemlerinde optimal güç akış algoritmaları, yakıt maliyetleri veya şebeke kayıpları gibi bir performans fonksiyonunu optimize eden bir AC güç akış çözümünü bulmak için dizayn edilmiştir. Örneğin yakıt maliyetleri minimum yapıldığında generatör aktif güç çıkışları, transformatör kademe uçları ve kontrol edilebilir gerilim kademelerinin bir optimal programı belirlenmiştir. Bu aynı zamanda cihaz aşırı yüklenmelerinden kaçınılırken minimum işletme maliyetlerini gösterir.

1960'ların başlarında güç sistem optimizasyonu için sadece Gauss-Seidel metodundan yararlanılmaktaydı. 1968'de Dommel ve Tinney yakınlara kadar kullanılan tek algoritmayı geliştirmişlerdi.[7] Bu algoritma büyük sistemlerin

hesaplanmasına da uygundu ancak en hızlı azalma yönünde yavaş yakınsamaya ve eşitsizlik kısıtlamalarına bağlı penaltı fonksiyonlarından kötü durum sonucuna sahipti. Daha sonra geliştirilen algoritmalar bu dezavantajları ortadan kaldırmıştır.

Yeni bir optimizasyon metodunda, lineer programlamada ' temel ' çözümler olarak iyi bilinen ifade alanını genişleterek, geliştirilmiş lineer programlama teknolojisini kullanarak, lineer olmayan bir fonksiyon optimize edilebilmektedir. Lineerleştirilmiş alt problemler orjinal probleminden çok daha küçük bir alt alana düşürülmektedir. Alt problemler etkin bir algoritma ve azalma yönlerinden biri kullanılarak optimize edilir.

#### 8.2.1 Lineer olmayan problemin tanımlanması

Bir güç sistemi elektriki olarak kompleks bara gerilim vektörü ile tamamen belirtilebilmektedir. Bir güç sistemi optimizasyon problemi transformatör kademe uçlarını ve faz kayma açısı kadar gerilimleri de içermektedir.  $x$  durum vektörünün tanımlanması ile

$$x = \begin{matrix} t \\ v \\ t \end{matrix} \quad 8.49$$

olur. Burada  $t$  ve  $v$  bara gerilim fazörünün faz açısını ve genliğini,  $t$  ise transformatör çevirme oranını belirtir. Genel bir lineer olmayan optimizasyon problemi

$f(x)$  amaç fonksiyonu

$h(x) = 0$	eşitlik kısıtlaması	8.50
$g^{\min} \leq g(x) \leq g^{\max}$	eşitsizlik kısıtlaması	
$l \leq x \leq u$		

şeklinde tanımlanabilmektedir. Burada

$f(x)$  Yakıt maliyeti, aktif kayıplar, alan değişikliği, bölgesel fonksiyonlar, vs gibi optimizasyon amacını gösteren  $x$  vektörünün skaler bir fonksiyonudur.

$h(x)$  Geleneksel lineer olmayan güç akış fonksiyonlarının vektörü ( P, Q )

$g(x)$  Hat akışları, generatör reaktif gücü, kesişme noktası, vs gibi cihaz limitlerini gösteren lineer olmayan bir vektör fonksiyonudur.

$l, u$   $x$  durum vektörünün alt ve üst limitleri

### 8.2.2 Artan Lagrangian

Bu algoritmada ilk adım lineer olmayan sınırlara yakınsamaya neden olacak optimizasyon terimleri ile objektif fonksiyonu arttırmaktır. Bu terimler

- Çözümde sıfır olacak lineer bir Lagrangian Fonksiyonu
- Herhangibir noktaya yakınsamayan uygulamalarda yakınsama alanını genişletmek için kuadratik bir penaltı terimi ( sınır noktalarını belirleyen )

$$\hat{f}(x) = f(x) - \lambda^T (h - \hat{h}) + 0.5 \rho (h - \hat{h})^T (h - \hat{h}) \quad 8.51$$

Genellikle yakınsama için ilk terim yeterlidir ancak yakınsamayan problemler için başlangıç noktası çözüme yeterince yakın olmalıdır.  $\rho$  yu içeren ( kullanılmışsa )

ikinci terim yakınsama alanını genişletmek için düşünülmüştür. Lagrange çarpanları,  $\lambda$ ,  $h$  sınırlamalarına bağlı artan maliyetleri tayin etmektedir.  $\rho$  penaltı parametresi, optimizasyon sırasında sistematik olarak sifıra doğru azalan bir skalerdir.  $h$  terimi aşağıda gösterildiği gibi lineerleştirilmiş sınırların değerini gösterir.

### 8.2.3 Sınır şartı lineerleştirme

$k$ . iterasyonda,  $h(x)$  sınırları, bir yuvarlatılmış  $h$  Taylor dağılımı (yüksek dereceli bileşenler ihmal edilmiş) kullanılması ile lineerleştirilmiştir.

$$h(x, x_k) = h(x_k) + J(x_k)(x - x_k) = b \quad 8.52$$

$J$ ,  $h$ 'ın Jacobian matrisi olduğu bu lineerleştirme

$$h_k = h_k + J_k(x - x_k) = b \quad 8.53$$

veya

$$A_k x = b_k \quad 8.54$$

şeklinde yazılabilmektedir. Burada  $A_k = J_k$  ve sağ taraf  $b_k = (b - h_k + J_k x_k)$  şeklinde modifiye edilmiştir. Bu lineerleştirme, kelimelerle,  $x$  durum değişkenlerindeki küçük değişmelerin (gerilimler, açılar, kademeler) sınırlarda (güç ilaveleri, hat akışları, vs) lineer değişmeler vermesi durumudur. Bu uygulamanın bir avantajı, iteratif işlem süresince kısıtlamaları yerine getirmede zorlanmadan çok, konvansiyonel bir yük akışına benzer tarzda lineer olmayan sınırlara yakınsama algoritması olmasıdır. Her bir alt problem sınırlarının lineer yaklaşımlar olması nedeni ile orjinal sınırlar, genellikle algoritma çözüme yakınsayımca kadar yerine getirilememektedir. Penaltı fonksiyonlar kullanımı, ki genellikle bu yakınsamayı güçleştirir, lineerizasyondan kaçınmaktadır. Yakınsama oranı, tamamen Jacobian matrisi kullanıldığından, bir Newton - Raphson güç akışına çok benzemektedir.

Algoritmanın temel adımları şöyledir.

- h kısıtlamalarını lineerleştirme
- Yakınsama için test edilme, yakınsama sağlandıysa durma.
- Lineer olarak kısıtlanmış alt problemin optimize edilmesi
- i ' ye dönme

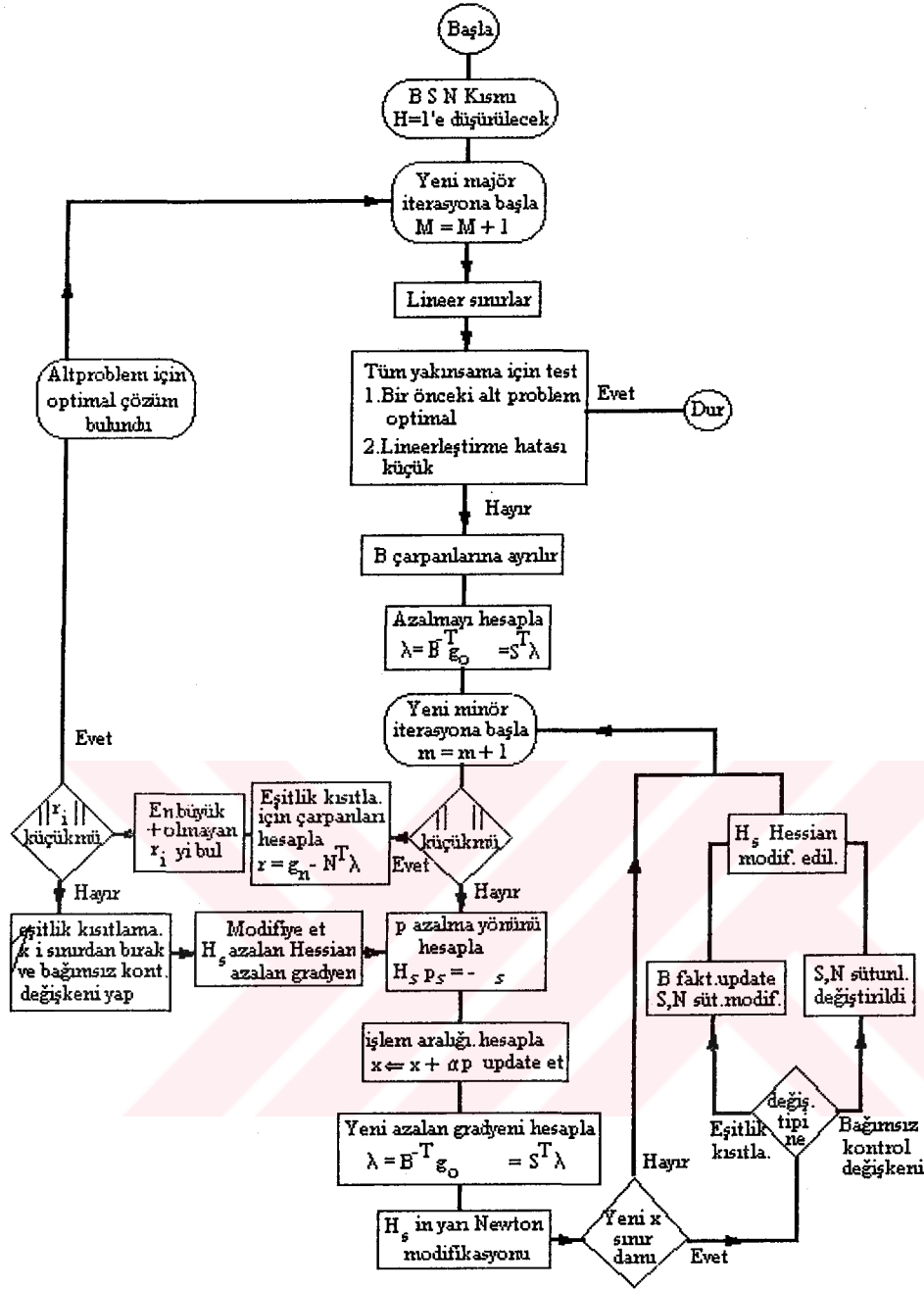
Lineerizasyon dizileri "majör iterasyonlar" diye isimlendirilir. Üçüncü adımdaki iterasyonlar ise "minör iterasyonlar" olarak isimlendirilir. Bu algoritmanın en önemli kısmı olan alt problemin optimize edilmesi, azalan bir  $\nabla$  gradient'i, bir p araştırma yönü ve interpolasyon'a bağlı bir araştırma işlemi içerir. Algoritmanın akış diagramı Şekil 8.4'de verilmiştir.

#### 8.2.4 x Değişkenlerinin bölünmesi

Azalan bir Gradient fonksiyonu durum değişkenlerinin bölünmesi ile üç bölümde elde edilmektedir.

- Eşitlik kısıtlaması değişkenleri  $x_b$  , bunlar kontrol değişkenlerinin belirlediği eğriyi takib ederler.
- Bağımsız kontrol değişkenleri  $x_s$ , optimizasyonda işletim gücüdür.
- Genellikle bir üst ve alt sınırdaki ( u veya l ) değişkenler eşitsizlik kısıtlanmalı değişkenler diye isimlendirilmektedir.  $x_n$

$x_b$  değişkenlerinin sayısı h'daki kısıtlamaların sayısına eşit olmalıdır.  $x_s$  ve  $x_n$  8.53 ve 8.54 denklemleri lineerleştirilmiş kısıtlamalarında aşağıdaki kısmı meydana getirecektir.



Şekil 8.4 Elektrikli güç sistemi optimizasyon algoritması

$$A_x = [B \ S \ N] \begin{bmatrix} x_b \\ x_s \\ x_n \end{bmatrix} = b \quad 8.55$$

Burada B tekil olmayan bir matristir. S ve N genellikle kare matris değildir. B boyutu sabittir ancak S ve N deki sütunların sayısı algoritma ilerledikçe değişir. Genellikle konvansiyonel bir güç akışında ( yani generatör gerilim genliği ve transformatör kademe sütunları ) gösterilmeyen Jacobian matrisinde S ve N sütunlar ihtiva ederken, B matrisinin tanıdık Newton - Raphson güç akış Jacobian matrisini içermektedir.

Dommel - Tinney azalan gradyen uygulamasında eşitlik kısıtlaması, yük barası gerilim genliği, gerilim faz açıları ve reaktif üretimdir. Kontrol değişkenleri ise generatör gerilimleri, transformatör kademeleri ve generatör çıkışlarıdır. Azalan gradyen uygulaması ve Dommel - Tinney azalan gradyen uygulaması arasındaki temel fark kontrol değişkenleri ve eşitlik kısıtlaması gruplarının algoritma ilerledikçe değişmesidir. B S N kısmı, değişkenler sınırlarına geldiği zaman veya limitlerinden uzaklaşınca, optimizasyon sırasında değişmektedir. Alt problemdeki kısıtlamalar lineer olduğundan kısım değişimleri ( sütun değişimleri ) Lineer Programlama teknolojisini kullanmayı oldukça etkili kılmaktadır.

#### 8.2.5 "Azalan Gradient" metodu

x kısmı, g gradient vektöründe benzer bir kısım gösterir. (f'in x'e göre kısmi türevi)

$$g = \begin{bmatrix} g_b \\ g_s \\ g_n \end{bmatrix} = \frac{\sigma f}{\sigma x} \quad 8.56$$

kontrol değişkenleri,  $x_s$ 'in azalan gradient'i

$$\nabla_s = g_s - S^T \pi \quad 8.57$$

dir. Burada  $\pi$ , lineer programlamadaki çift indisli değişkenlere çok benzeyen Lagrangian çarpımı kestirimlerinin vektörüdür.

$$B^T \pi = g_b \quad 8.58$$

Bunun

$$\nabla_s = g_s - (B^{-1}S)^T g_b \quad 8.59$$

e eşit olduğuna dikkat edelim.

$S^T B^{-1}$  matrisi Dommel ve Tinney tarafından ileri sürülen hassasiyet matrisine benzemektedir. Bu matris, eşitlik kısıtlamalarının kontrol değişkenlerine göre kısmi türevini içerir.

$$(B^{-1}S)^T = \sigma x_b / \sigma x_s \quad 8.60$$

$\nabla_s$  azalan gradient yeterince küçük olduğu zaman,  $x$ 'in o andaki durumu  $x$ 'in o andaki bölümlere ayrılması ile hemen hemen optimaldir. Bu durumda, objektif fonksiyonun,  $x_n$  de bulunan herhangi bir eşitsizlik kısıtlaması sınırından ayrılması ile daha fazla azalabilip azalamayacağını tesbit ederiz. Eşitsizlik kısıtlaması değişkenlerine göre objektifin hassasiyetinin hesaplanması ile

$$r = g_n - N^T \pi \quad 8.61$$

Burada  $r$  vektörü lineer programlamadaki "azalan maliyetler" e oldukça benzer. Şayet herhangi bir  $r$  negatifse (veya  $x_n$  üst sınırında iken pozitif), bu objektif



fonksiyonun, birleşik eşitsizlik kısıtlaması sınırından ayrılması ile daha fazla azalacağını gösterir. Bunu gerçekleştirmek için ayrılan eşitlik kısıtlaması  $x_s$  kontrol değişkenleri grubuna ilave edilmektedir. B, bu değişimden etkilenmemektedir.

B S N kısmı optimizasyon sırasında kontrol değişkeni veya eşitlik kısıtlaması bir limite zorlanıyorsa değişebilir. Kontrol değişkeni bir limite erişirse, kontrol grubundan ayrılıp, eşitsizlik kısıtlaması grubuna girmektedir. B matrisi bu değişimden etkilenmemektedir.

Eşitlik kısıtlaması bir limite eriştiğinde, eşitlik kısıtlaması grubundan ayrılıp eşitsizlik kısıtlaması grubuna girmektedir. B'nin silinen sütunu, S kontrol değişkenleri matrisinde uygun bir sütun ile yer değiştirmektedir. B faktörizasyonu daha sonra etkili bir lineer programlama algoritması kullanılarak update edilmektedir.

#### 8.2.6 Lineer olarak kısıtlanmış alt problem optimizasyonu

Şimdi lineer olarak kısıtlanmış alt problemlerin gerçek optimizasyonunu inceleyelim.  $f$  objektif fonksiyonunu geliştirmek için  $\alpha$  uzunluğunda bir adım mümkün olan bir  $p$  azalma yönünde değişkenler ile alınmaktadır.

$$x_{k+1} = x_k + \alpha p \quad 8.62$$

Uygun  $\alpha$  'yı seçmek için bir boyutlu problemde bir dizi kestirimi

$$\begin{array}{ll} f(x_k + \alpha p) & \text{Amaç fonksiyonu} \\ 0 \leq \alpha \leq \alpha_{\max} & \text{Kısıtlama} \end{array} \quad 8.63$$

üretilmiştir. Dizi  $f(x)$  de yeterli bir azalmaya eriştiğinde sonlandırılmaktadır.

Bu basit işlem,  $f$  ve onun gradient'i  $g$ 'nin değerlendirilmesine bağlı  $f$ 'in kapalı biçimde kübik bir değerinde (doğruya yakın) minimize edilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Maksimum  $\alpha$ , bir sınıra erişilmeden önce alınabilen en büyük adım uzunluğudur.

### 8.2.7 Kontrol değişkenleri azalma yönü

Herhangibir gradient tipi optimizasyonun tüm performansı,  $p_s$  azalma yönü ile oldukça bağlıdır. En basit azalma yönü "en dik azalma" yönüdür. Yön, objektif fonksiyonun lineerizasyonunda en büyük azalmayı verir. Bu yön

$$P_s = -\nabla_s \quad 8.64$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Her ne kadar hesaplama kolay olsada, bu azalma yönü, keyfi olarak yavaşlayacak, algoritma yakınsamasına neden olabilir.

### Conjugate gradient yönü

$$P_s = -\nabla_s + \beta P_s \quad 8.65$$

ile tanımlanmaktadır. Burada  $P_s$  ve  $p_s$  şu andaki ve bir önceki azalma yönleri ve  $\beta$  kullanılan conjugate gradient tipine bağlı olarak tesbit edilen bir skalerdir.

### 8.2.8 Quasi - Newton Azalma yönü

$p_s$  kontrol değişkenleri için bir Newton azalma yönü sistemin çözümlenmesi ile hesaplanmaktadır.

$$G_s P_s = -\nabla_s \quad 8.66$$

Burada  $G_s$ , 8.51 Denklemindeki artan objektif fonksiyonu  $f$ in azalan Hessian matrisidir.  $\nabla$ ,  $f$ in azalan gradient'idir. Bir Quasi - Newton formülasyonunda  $H_s$  Hessian için kesin bir pozitif değer (yaklaşım) kullanılmıştır. Bu yaklaşım

$$H_{k+1} = H_k + \gamma v v^T \quad 8.67$$

biçiminde seri bir vektör transformasyonu ile sistematik olarak modifiye edilen bir başlangıç matrisi tarafından yapılmaktadır. 8.67 Denkleminde  $\gamma$  bir skaler ve  $v$  birim boyutlu bir vektördür. Bu büyüklüklerin biçimi Quasi - Newton metodunun kullanımı ile tesbit edilmektedir. Azalan Hessian yaklaşım boyutu kontrol değişkenlerinin o andaki sayısıdır.  $H_s = R^T R$  biçiminde kalmaktadır. Burada  $R$  bir triangular matristir.

### 8.2.9 Eşitlik kısıtlaması için yön belirleme

Verilen herhangi bir  $p_s$  için eşitlik kısıtlaması yön değişimi

$$B p_s = -S p_s \quad 8.68$$

sistemi çözümü ile elde edilmektedir. Bu  $B$ 'nin bir  $L U$  ayrımını kullanarak başarılmaktadır. Aynı ayırım  $B^T \pi = g_b$  denkleminde  $\pi$ 'yi hesaplamada kullanılmıştır.

## 8.3 DC Taşıma Sistemlerinde Optimizasyon

Günümüzde bilgisayar teknolojisi, DC ulaşım sistemleri için güç besleme projesinin teknik ve ekonomik uygunluğunun kontrolünü gerçekleştirir. Bununla taşıt trafiğini

simüle etme, herhangi bir anda herhangi bir noktadaki akım ve gerilimleri hesaplama, doğrultucu veya dönüştürücü çıkışlarını tesbit etme ve güç merkezlerinin yerlerini kontrol etmekte mümkündür. Bu taşıtlar akım kollektöründe güce ihtiyaç gösterir. Kompüter programı ile doğrultucu çıkışını ve keza normal servis ve gruplardan birinin arızalı olması halinde çalışma şeklini tesbit etmek mümkündür. Hesaplama aynı zamanda kullanılan enerji ve ray toprak potansiyeli değeri bilgisini temin etmektedir. Ayrıca faydalı frenleme durumundaki enerji dengesini vermektedir. Hesaplamaları gerçekleştirebilmek için taşıt verisi bilinmelidir, yani, hızlanma ve frenleme sırasındaki motor karakteristiklerinin, ağırlığının ve boyutlarının ve ayrıca eğimler, virajlar ve maksimum hızlar gibi hat verilerinin bilinmesi gerekmektedir. Bağlantı teli ve dönüş devrelerinin verisi güç merkezlerinin yerleri ve tarifenin tamamı tesbit edilmelidir.

### 8.3.1 Çekme kuvveti

Önce hızdan bağımsız mekanik dirence bakalım. Bu dirençler viraj ve eğimlerin sonucu oluşur. DC serbest uyarmalı motorla tahrik edilen İstanbul hafif metrosu için denklemlerimizi kurarsak

$$TR_m = mg \left[ h + \frac{C_1 - C_2 R}{R - C_3} \right] \quad 8.69$$

dür. Bu ifadenin ilk bileşeni güzergah eğimi, ikinci bileşeni ise güzergah virajları sonucu ortaya çıkmaktadır.  $C_1, C_2, C_3$  deneysel katsayılarıdır ve değerleri  $C_1[.] = 800$   $C_2[.] = 0,4$   $C_3[.] = 40$  dir. Hıza bağlı direnç değerimiz ise Davis formülü olan

$$TR_h = k_0 + k_1 v + k_2 v^2 \quad 8.70$$

denklemini ile ifade edilir. Burada  $k_0, k_1$  deneysel katsayılar  $k_2$  ise aerodinamik katsayıdır. Bu katsayılar

$$k_0 = 9,81 (aW + b)n \quad k_1 = 9,81 c Wn \quad k_2 = 9,81 dA \quad 8.71$$

denklemleri yardımı ile belirlenir. Buradaki katsayı değerlerimiz ise  $a[.] = 0,65$   
 $b[.] = 13,2$   $c[.] = 0,00931$   $d[.] = 0,00453$  dür.

Toplam taşıt çekme kuvveti ise,

$$T = M \frac{2}{D} u \eta_d \quad \left( \frac{dv}{dt} = 0 \right) \quad 8.72$$

$$T = M \frac{2}{D \eta_d} u \quad \left( \frac{dv}{dt} < 0 \right)$$

denklemleri ile hesaplanır. Taşıtta kullanılan motorların uyarma ve rotor akımları eşit olduğundan ürettikleri momentlerde eşittir. Ancak tekerlerde farklı aşınma olması halinde, çapı küçük olan tekerde daha büyük bir çekme kuvveti oluşur. Çekme kuvveti belli bir değeri aşınca patinaj başlayacaktır. Bu nedenle patinajın olmaması için dingil başına maksimum olarak faydalanılan çekme kuvvetinin  $T \leq \mu N$  koşulunu sağlaması gerekir. Bildiğimiz gibi motor moment ifademiz

$$M = k_m \phi I_a \quad 8.73$$

dır. Rotor akımımız  $I_a$  yı belirlemek için motor eşdeğer devrelerinden yararlarız. Motor ve fren çalışma durumunda T tristörünün iletimde ve kesimde olması hali için denklemlerimiz biraz değişiklik göstermektedir.

Motorlara ait zıt emk ifadelerini

$$e(t) = k_e \phi(t) n(t) \quad 8.74$$

denklemini ile belirleyebiliriz. Bildiğimiz gibi manyetik akı ile uyarma akımı arasında analitik bir bağıntı mevcut değildir. Bu nedenle manyetik akı ile uyarma akımı ve rotor akımı ile manyetik akıdaki zayıflama arasındaki ilişkiyi en küçük kareler yöntemi ve motor mıknatıslanma eğrilerini kullanarak belirleriz.

## 8.3.2 Hız belirleme

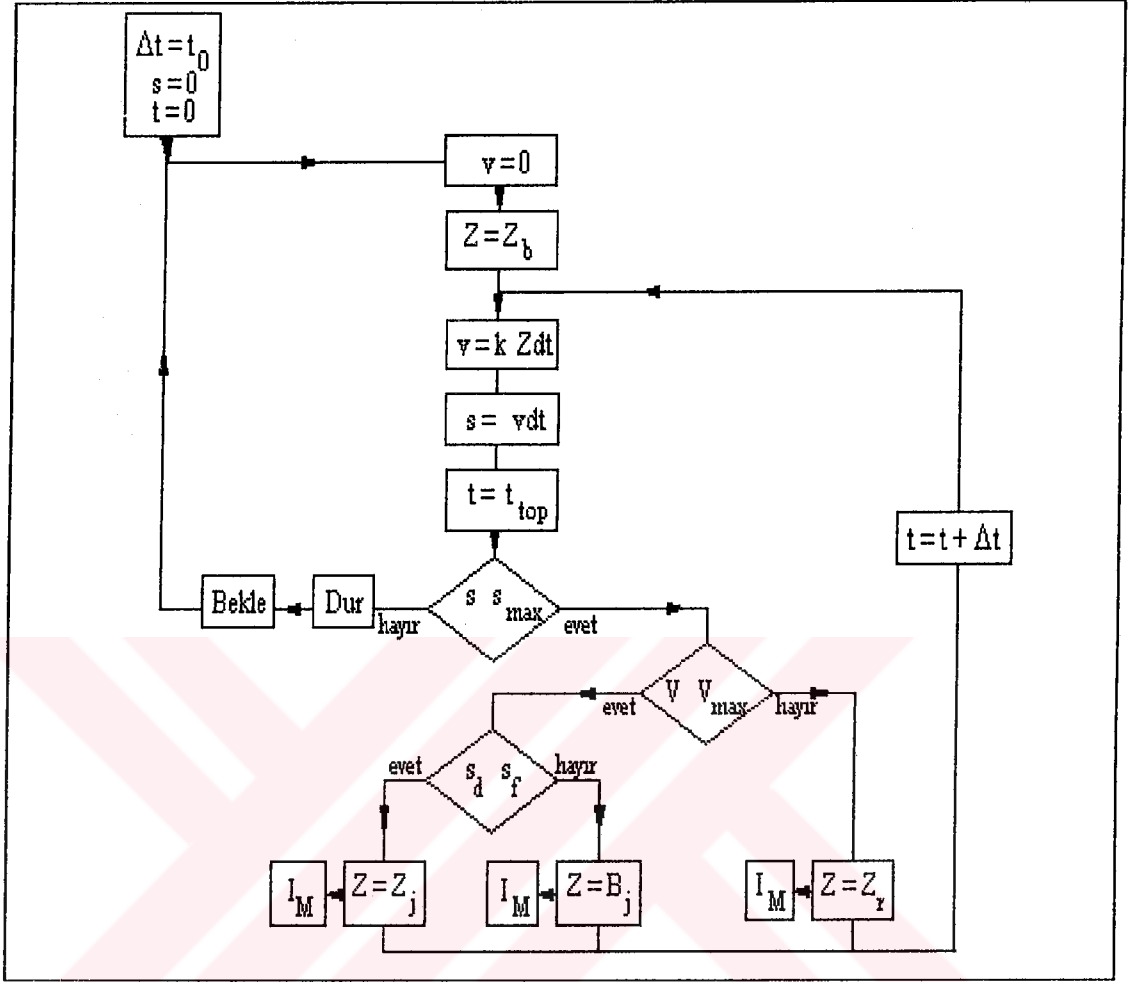
Bilgisayar programı lokal hızları belirler. Newton yasası gereği taşıt hareket denklemini

$$m(1+p)\frac{dv}{dt} = T_j - (TR_m + TR_h) \quad 8.75$$

dir.  $p$  kütle arttırma katsayısı, taşıtta dönen kütlelerin öteleme hareketine olan etkisini belirtir. Bu etkiyi enerji bilançosundan türetebiliriz ve

$$p = \frac{\sum J\omega^2}{mv^2} \quad 8.76$$

diyebiliriz. Sistem için basitleştirilmiş akış diagramı aşağıdaki gibidir.



Şekil 8.6 Elektrikli ulaşım sistemi akış diagramı

Akış diagramımız şu önemli sınırlamaları da beraberinde getirmektedir:

- Maksimum hızlanma
- Hareket başlangıcında hızlanmadaki maksimum değişme
- Maksimum gecikme
- Maksimum çekme kuvveti
- Uygun görülen hız

Hesaplama sırasında, gereken çekme kuvveti  $T_j$ 'nin motor verisini aşıp aşmadığı araştırılmaktadır. Bu araştırma verilen motor karakteristiği  $T_j = f(v)$  yardımı ile

hızın belirlenmesi sırasında olur. Hat traverslerinin hesaplanması ile maksimum rötari aşmaksızın trenin durmasına izin verecek şekilde bir sonraki durak için hat uzunluğunun yeterli olup olmadığı belirlenebilmektedir. Çekme kuvveti bir sonraki integrasyon adımı için tutulur. Hız, dönüş mesafesi ve zamanı hesaplanır. Hız ve hat mesafesinin zamanın fonksiyonu olarak belirlenmesi, hızın ve çekme kuvvetinin taşıt yeri ve travers mesafesinin fonksiyonu olarak çizilmesine imkan tanır. Bir hat bölümü ile hesaplama bir sonraki durağa uzaklık sıfır olduğunda bitirilmektedir. Program ile verilen bir bekleme süresinden sonra işlem bir sonraki hat bölümü ile tekrarlanır. Maksimum hıza izin verildiği hat bölümü için tekrarlanır. Maksimum hıza izin verildiği hat bölümü, en yüksek güç tüketimini gösterir ki buradan güç akışı tesbit edilmektedir.

### 8.3.3 Akım belirleme

Motor akımları belirlenmektedir. Aynı zamanda motorların çekme kuvveti hızın bir fonksiyonu olarak test edilmektedirler. Hız ile verilen  $T_j$  çekme kuvveti,  $T_j = f(I)$  diagramından elde edilen bir akımı gerektirmektedir. Hesaplama metodu ile akımlar taşıt yerinin fonksiyonu olarak elde edilmektedir.

### 8.3.4 Taşıt yeri ve besleme akımı belirleme

Hesaplamadaki bir sonraki adım hesaplanan bekleme süresi programa uyduğunda başlamaktadır. Programa uygun olarak taşıtlar hat boyunca çeşitli noktalarda bulunmaktadır. Gereken akım, zaten taşıt ile tesbit edildiğinden her bir noktada taşıtlar tarafından kullanılan akımı belirlemek mümkündür.



### 8.3.5 Hat gerilimi

Sabit tesisler, güç merkezleri, seyir hatları ve raylardan oluşur. Güç merkezleri, ideal bir gerilim kaynağı ve seri kaynak iç direnci ile temsil edilir. İki güç merkezi arasında birbirine paralel bağlı alt ve üst yol (gidiş ve dönüş) bulunmaktadır. Geçici olayları dikkate almazsak sistemi sadece dirençlerle modelleyebiliriz. Direnç değerlerimiz taşıt konumlarına göre değişir. Taşıtlar ise ideal akım kaynağı ile modellenir. Eşdeğer devre diagramımıza düğüm gerilimleri yöntemini uygularsak

$$[Y][V] = [I] \quad 8.77$$

genel denklemlerini yazabiliriz. Düğüm gerilimleri bilgisayar ile hesaplanmaktadır. Gerilim hesaplaması, elemanları sürekli olarak değişen bir devrenin yeniden düzenlenmesi ile herbir adımda tekrarlanmaktadır.

### 8.3.6 Enerji optimizasyonu

İki istasyon arasında belli bir s yolunu belli bir t süresinde kateden aracın harcadığı enerji

$$E = \int_0^s T ds = \int_0^t T_j v(t) dt \quad 8.78$$

ifadesi ile verilir. Eğer sistemimizde faydalı frenleme yapılamıyorsa hareket denkleminiz Newton yasası gereği

$$T_j = m \frac{dv}{dt} + T_R \quad T_R = k_0 + k_1 v_1(t) + k_2 v_1^2(t) \quad 8.79$$

dır. Hızlanma ve sabit hızda hareket durumunda enerji ifadelerimizi belirlersek

a) Hızlanma (  $0 < t < t_1$  ) sırasında: Yolalma sırasında sabit  $a_1$  ivmesi nedeni ile  $v(t) = a_1 t$  dir. Gerekli ara işlemlerin yapılmasından sonra maksimum seyir hızı  $v_1$  ve hızlanma süresi  $t_1$  e bağlı olarak ifademiz

$$E_1 = \frac{1}{2} k_0 t_1 v_1 + \left( \frac{1}{2} m + \frac{1}{3} k_1 t_1 \right) v_1^2 + \frac{1}{4} k_2 t_1 v_1^3 \quad 8.80$$

şeklinde belirlenir.

b) Sabit hızda hareket (  $t_1 < t < t_2$  ) modunda :  $v(t)$  sabit olduğundan enerji ifademiz

$$E_2 = k_0 (t_2 - t_1) v_1 + k_1 (t_2 - t_1) v_1^2 + k_2 (t_2 - t_1) v_1^3 \quad 8.81$$

Gerekli ara işlemlerin gerçekleştirilmesi sonunda toplam enerji ifademiz

$$E = k_0 \left( t_2 - \frac{1}{2} t_1 \right) v_1 + \left( k_1 t_2 + \frac{1}{2} m - \frac{2}{3} k_1 t_1 \right) v_1^2 + k_2 \left( t_2 - \frac{3}{2} t_1 \right) v_1^3 \quad 8.82$$

bulunur. Sistemimizde faydalı frenleme gerçekleştirilebiliyorsa ifadelerimiz

a) Hızlanma (  $0 < t < t_1$  ) sırasında

$$T_1 = m \frac{dv}{dt} + T_R \quad T_R = k_0 + k_1 v(t) \quad v(t) = \frac{v_1}{t_1} t \quad 8.83$$

$$E_1 = \int_0^{t_1} T_1 v(t) dt = \frac{1}{2} k_0 t_1 v_1 + \left( \frac{1}{2} m + \frac{1}{3} k_1 t_1 \right) v_1^2$$

b) Sabit hızda hareket (  $t_1 < t < t_2$  ) sırasında

$$T_2 = T_R \quad T_R = k_0 + k_1 v(t)$$

$$E_2 = \int_{t_1}^{t_2} T_2 v(t) dt = k_0 (t_2 - t_1) v_1 + k_1 (t_2 - t_1) v_1^2 \quad 8.84$$



$$f = k_0(t_2 - \frac{1}{2}t_1)v_1 + (\frac{1}{2}m + k_1t_2 - \frac{2}{3}k_1t_1)v_1^2 + k_2(t_2 - \frac{3}{4}t_1)v_1^3$$

$$h = S_1 + (\frac{1}{2}t_1 - t_2)v_1 \quad 8.88$$

$$g = t_1 = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial v_1} + \lambda \frac{\partial h}{\partial v_1} + \mu \frac{\partial g}{\partial v_1} = 0 \quad \frac{\partial f}{\partial t_1} + \lambda \frac{\partial h}{\partial t_1} + \mu \frac{\partial g}{\partial t_1} = 0 \quad 8.89$$

$$\frac{\partial f}{\partial \lambda} + \lambda \frac{\partial h}{\partial \lambda} + \mu \frac{\partial g}{\partial \lambda} = 0$$

denklem sisteminde yerleştirip ara işlemleri gerçekleştirdikten sonra  $v_1^* = S_1 / t_2$   
 $t_1^* = 0$  optimal çözümlerini buluruz.

Faydalı frenlemenin yapıldığı durumda amaç fonksiyonumuz ve kısıtlamalarımız

$$f = \frac{1}{2}k_0(-t_1 + t_2 + t_3)v_1 + \frac{1}{3}k_1(-2t_1 + 2t_2 + t_3)v_1^2$$

$$h = 2S + (t_1 - t_2 - t_3)v_1 = 0 \quad 8.90$$

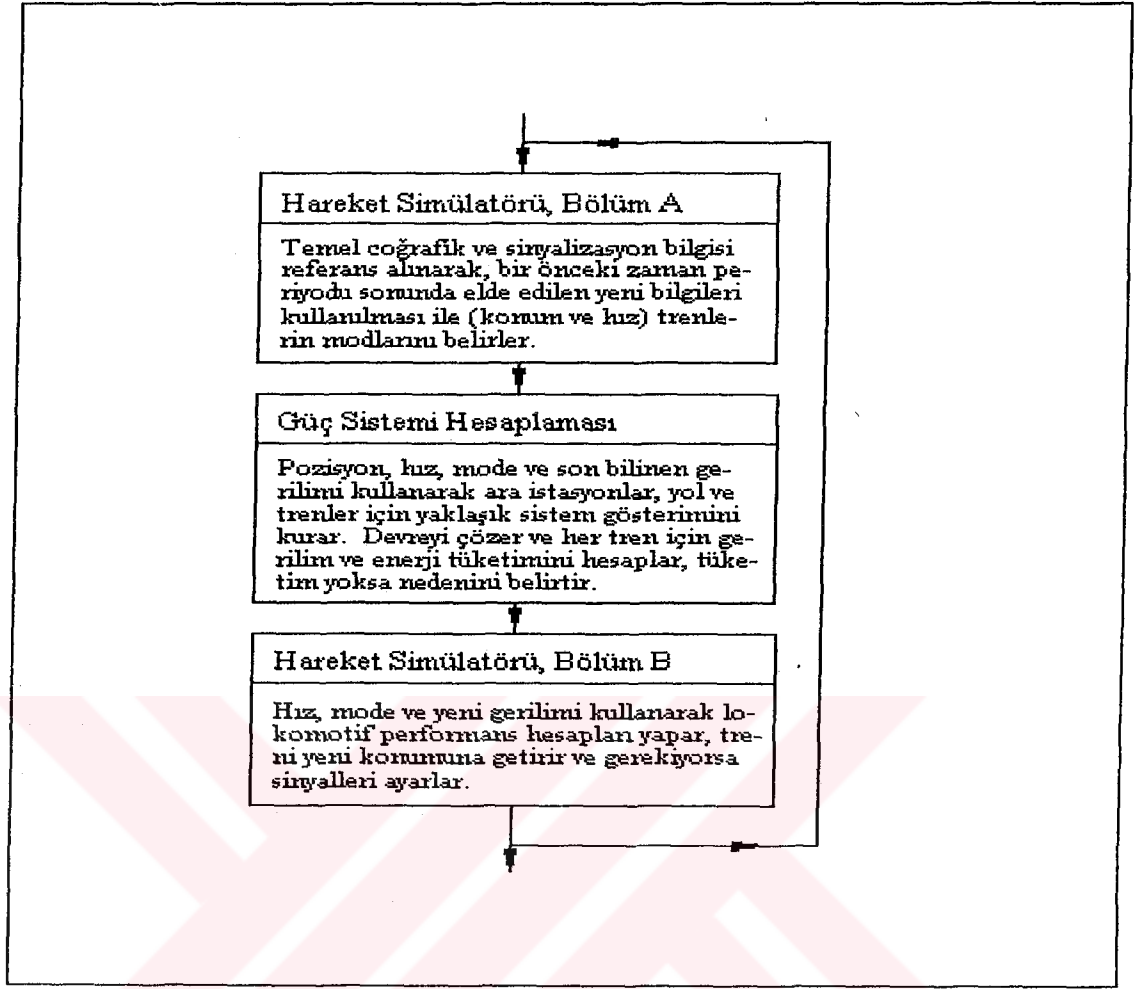
$$g_1 = t_1 = 0 \quad g_2 = t_2 - t_1 = 0 \quad g_3 = t_3 - t_2 = 0$$

dır. Faydalı frenlemenin yapılamadığı durumda yaptığımız işlemlere benzer işlemleri gerçekleştirdikten sonra  $t_1^* = t^*$   $t_2^* = t_3$   $t_1^* = t_3 - t_2 = 0$   $v_1^* = S / t_2$  optimal çözümlerini buluruz. İstanbul hafif metrosu hız-zaman diagramlarından yararlanarak yaptığım inceleme sonunda tam bir enerji optimizasyonundan bahsedemeyeceğimizi belirledim.

## 9.ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİ GÜÇ DÜZENLERİNİN İNCELENMESİNDE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Bu bölümde ulaşım sistemleri için simülatör çalışmasının nasıl gerçekleştirileceğini inceleyeceğiz. Hızlı-transit demiryolunda tren hareketleri ile güç kaynağı büyüklükleri arasındaki ilişkileri inceleyecek simülatör çalışması, yeni açılan bir hatta kıyıcı kontrollü lokomotifler için enerji-tüketim rakamlarının hesaplanması amacıyla başlatılmıştır. Böyle bir simülatörün temel özelliği, tren hareketi ile güç sistemleri arasında gerekli olan ara bağlantıyı kurmasıdır.

Simülatörde, tren hareketini ve aynı zamanda bu hareketler sonunda DC çekici güç sağlayan güç kaynağında ortaya çıkan durumları modellemek zorunludur. Simülatör zamana bağımlıdır ve zamanın, belirli periyotlardan oluşan basamaklar halinde ilerlediği varsayılmıştır. Böylece hesaplar, zamanı bir basamak arttırdıktan sonra, her tren için mevcut koşulların hesaplanması ve sonuçta tren davranışının bulunması şeklinde gelişir. Program, hareket simülatörü A, güç sistemi hesaplaması ve hareket simülatörü B diye başlıca üç bölümden oluşmaktadır. (Şekil 9.1)



Şekil 9.1 Simülator yapısı

Her yeni periyodun başında, tüm trenlerin konum ve hızlarının bilindiği ve tüm sinyallerin doğru olarak ayarlandığı varsayılır. Hareketin ilk kısmında simülator, bir sonraki zaman diliminde trenin mümkün olan dört çalışma modundan hangisinde olacağını belirleyebilmek için yol üzerindeki kontrol noktalarından yeni konum ve hızları araştırır. Trenin çalışma modları bilindiği gibi hızlanma, frenleme, sabit hızda hareket ve beklemedir. Bu sırada güç sistemi çözümünü kontrol eden alt program çağırılır. Bu alt program trenin konumu, hız modu ve gerilimini kapsayan ve her tren için ayrı ayrı belirlenen bir bilgi kümesi ile çalışmaya başlar. Bu bilgileri kullanarak besleme sisteminin elektrikli olarak izole edilmiş her bölgesi için bölgedeki her bir ara istasyon, tren ve yolların elektrikli devresi için yaklaşık bir lineer sistem elde eder. Elde edilen bu sistem çözülür ve sonuçlar doğrusal olmayan koşullara ve bunların getirdiği sınırlamalara karşı kontrol edilir. Bunlar güç

merkezlerinden hiç enerji çekilmemesi şartları ve frenleyen bir trenin hattı beslemesi sırasında aşırı gerilim limitidir. Bu koşul ve sınırlamalar ihlal ediliyorsa model değiştirilir ve sistem yeniden çözülür. Bu işlem tüm koşul ve sınırlamalar sağlanıncaya kadar devam eder. Son çözüm, o zaman aralığında enerji tüketiminin hesaplanmasını ve her tren için yeni bir gerilimin bulunmasını sağlar. Bu işlem her tren için ayrı ayrı yapılır ve yeni tren konumları hareket kontrol sinyallerinin yeniden ayarlanması için kullanılır. O periyottaki hesaplamalar artık bitmiştir. Aynı işlemler bir sonraki periyot için tekrarlanır. Simülatörün ikinci kısmı için gerekli olan tüm bilgiler son bilinen gerilim değeri hariç birinci kısmın sonunda hazırdır. Hareket simülasyonu için gerilimleri nominal değerlerine ayarlayarak güç sistemi hesabı tamamen devre dışı bırakılabilir. Bir çok tren-performans tipi hesaplarda bu yeterlidir. Örneğin aynı anda ard arda çıkış yapan tren incelemesi ve sinyalizasyon dökümü araştırmaları.

### 9.1 Yolun, Trenlerin ve Sinyalizasyonun Gösterimi

Hareket simülatörünün yararlı bir şekilde kullanılabileceği üç işlemsel özelliği vardır.

- a - Bilgi toplama : Simülatör önemli miktarda bilgi toplamayı gerektirir. Bilginin bir kısmı yol durumu, bir kısmı trenler ve kalanı güç besleme sistemi ile ilgilidir. Bundan başka, bazı bilgiler sabit kalırken bazıları simülasyon ilerledikçe değişir.
- b - Sinyalizasyon ve çalışma modları : Özellikle otomatik olarak tren trafiğinin düzenlendiği tipik hızlı-transit servislerde istasyonlar arası tren hareketi, hızlanma, sabit hızda hareket ve frenleme modları ile tanımlanır. Tren konumu bu üç durumun hangisinin geçerli olduğunu belirler. Buna rağmen simüle edilen trenler denetleyici emniyet sinyalizasyonuna da cevap vermelidir. Bu da kullanılan sinyalizasyon metodu ile frenleme noktalarının ve hız sınırlama komutlarının kullanılmasını zorunlu kılar.

c - Tren performans hesapları : Çalışma modu bulunduktan sonra her trenin performansı, yol koşulları, trenin hızı ve trene uygulanan besleme gerilimi dikkate alınarak hesaplanmalıdır. Bu hesaplamalar için yol eğimlerinin, sürtünme nedeniyle meydana gelen kayıpların ve trenlerin yük durumlarının ayrıntılı olarak bilinmesi gereklidir.

Yol, bir anda tek hat olarak işlem görür ve ard arda gelen sinyalizasyon blokları dizisi olarak gösterilmektedir. Bu andaki bilgi, istasyon yaklaşma kontrolunu da içine alan iki amaçlı sinyal sistemi ile oluşturulmuştur. Bu yapı çok amaçlı sinyalizasyon için kolaylıkla değiştirilebilir. Yol üzerindeki herhangi bir nokta, bir blok numarası ve blok içindeki uzaklık ile birlikte verilmektedir. Böylece kesin uzaklıklar kolaylıkla bulunabilmektedir. Her blok içine bir kontrol noktası yerleştirilmektedir.

Hareket hesapları için gereken bilgiler her trenin kendisi tarafından verilmektedir. Ard arda işlem için trenler yol boyunca ileri doğru numaralandırılırlar. Bunda biri trenin durumunu diğeri trenin numarasını gösteren iki sayı kullanılır.

Belirli parametreler tüm sisteme uygulanır ve genel olarak adlandırılır. Bu parametreler, temel zaman periyodu süresi, tren uzunluğu, ivmelenme hızları, nominal gerilim, DC hat direnci gibi parametreler olabilir. Trenlerin normal hızlarının ve her periyot süresince alınan yolun dikkate alınması periyot süresinin 1 saniyeden fazla olmaması gerektiğini göstermiştir. Periyot süresinin kısaltılması herhangi bir teorik problem yaratmaz ve doğruluğu arttırır ancak işlem süresini uzatır.

Simülatör verilen kontrol bilgisini kullanarak her tren için bir çekme modu belirler.



Çekme modu bilindikten sonra tren performansı aşağıda (Bölüm 9.2) belirtildiği gibi bulunulabilir. Hızlanma sırasında ivme için gerekli net kuvvet hesaplanmasında, trenin direnci ve tren üzerinde eğim nedeni ile etkiyen eşdeğer kuvvette hesaba katılmalıdır.

Frenleme için gerekli hesaplar hızlanma sırasındakine benzerdir, ancak eğim ve tren direnci kuvvetlerinin işaretleri farklıdır. Sabit hızla harekette çekici kuvvet sıfırlanır.

## 9.2 Taşıt Donanımının Modellenmesi

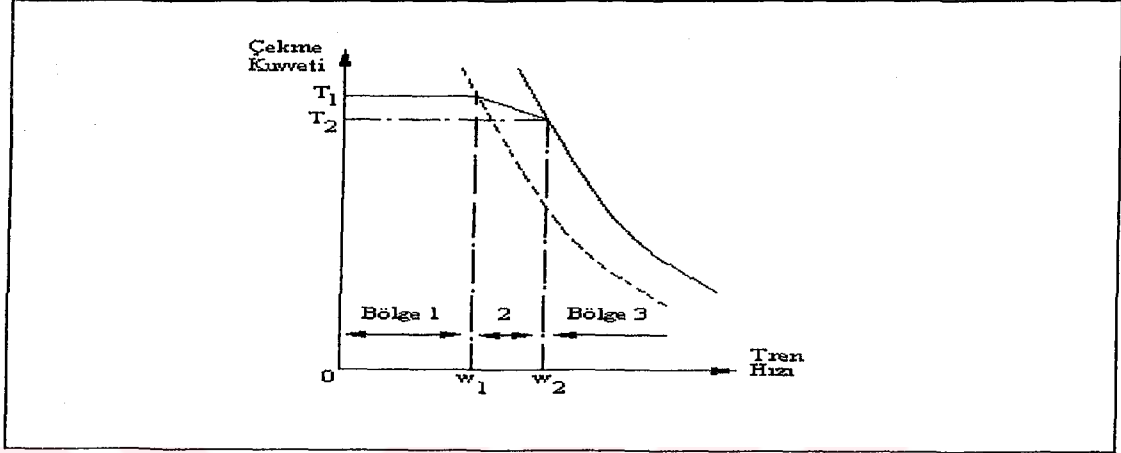
Kavramsal olarak, simülatör tren hareketi terimleri ve güç devresi parçalarından oluşmuştur. Hareket hesaplamaları için taşıt ekipmanı belirli bir tren hızı için üretilen çekici kuvvet cinsinden gösterilmektedir. Güç-sistem hesaplamaları için ise taşıt ekipmanı benzer olarak belirli bir tren hızı ve modu için eşdeğer devre cinsinden gösterilmektedir. Taşıt modelleme işlemini şu şekilde özetleyebiliriz.

- a. Tren hız ve DC besleme gerilimine bağlı motor çalışma bölgeleri tanımlanır.
- b. Her bir bölge için uygun elektriki ve çekme kuvvetleri modelleri belirlenir.
- c. Tanımlanan her bir bölge için kullanılan algoritmaların model bileşen değerleri seçilir.

### 9.2.1 Hızlanma sırasında çekme kuvveti / hız karakteristikleri

Lokomotif sürücü motorları için endüi gerilimi ve alan-şiddeti kontrolü birlikte kullanılır. Sonuçta oluşan karakteristik eğri Şekil 9.2'de gösterilmiştir. Çalışma bölgesi şeklindeki eğrilerin alt kısmında olmaktadır. Birinci bölgede sabit momentte,

ikinci bölgede sabit güçte, üçüncü bölgede ise sabit kayma frekansında çalışılmaktadır.



Şekil 9.2 Hızlanma modunda çekici kuvvet / hız grafiği

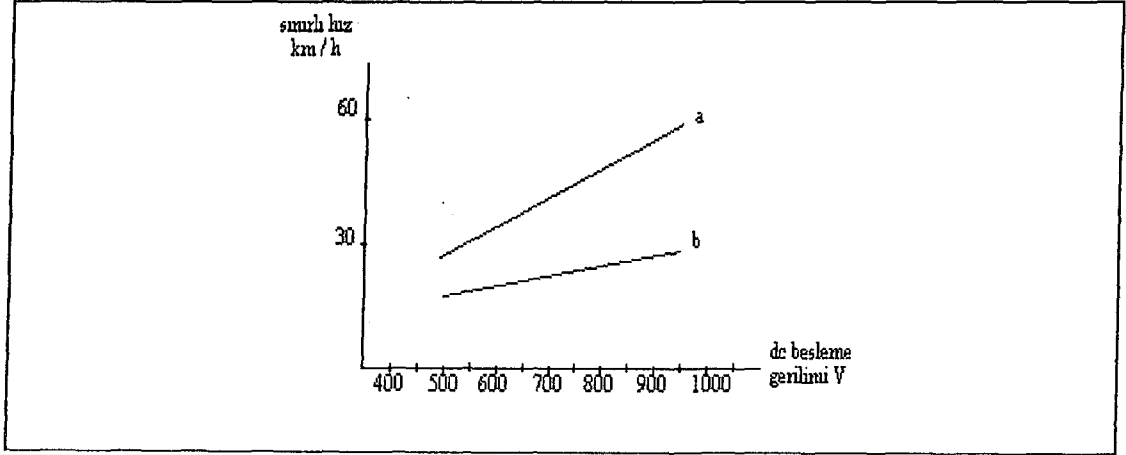
Bu üç bölgenin tanımlanması tren hızının bir fonksiyonu olarak üç çeşit çekici güç akışının sınıflandırılmasını sağlar. Motor karakteristikleri, genellikle, nominal gerilim  $V_{dn}$  için belirlendiğinden üç bölge arasındaki hız sınırları  $v_{1n}$  ve  $v_{2n}$ , nominal gerilim için belirli bir değer alır. Fakat, simülatörde uç gerilimi yükün bir fonksiyonudur ve sınır hızları  $v_1$  ve  $v_2$ , hat geriliminin fonksiyonudurlar.

Bölge 1'de endü akımı kontrolü ile motor momentü sabit tutulmaktadır. Bu bölgede stator akım değeri en büyük sınırlamadır. Bu bölge sonunda tren  $v_1$  hızındadır.  $v_1$  aşağıdaki denklem'le belirlenmektedir.

$$v_1 = v_{1n} (V_d - I_m R'_q) / (V_{dn} - I_m R'_q) \quad 9.1$$

Bölge 2 sabit güçte çalışma halidir. Sabit endü akımında alan şiddeti azaltılır. Stator gerilimi sabittir. Bu bölge  $v = v_1$  iken başlar ve tren hızı  $v_2$ 'yi geçince biter.  $v_2$  ise aşağıdaki denklem yardımı ile belirlenebilmektedir.

$$v_2 = v_{2n} (V_d - I_m R'_q) / (V_{dn} - I_m R'_q) \quad 9.2$$



Şekil 9.3 1 ve 2 bölgeleri sonunda besleme gerilimine bağlı olarak sınır hızlarının değişimi

- a . 2 bölgesi sonunda
- b . 1 bölgesi sonunda

Bu bölgede tren hızı arttıkça çekme kuvveti azalır. Sınır hızı ve çekme kuvveti değerleri arasında aşağıdaki lineer bağıntı kullanılır.

$$T = T_2 + \left[ \frac{T_1 - T_2 (v_2 - v)}{v_2 - v_1} \right] \quad 9.3$$

Bölge 3'de çekme kuvveti, trenin besleme gerilimi ve hızının fonksiyonudur. Bu bölgede sabit alan/endüi mmk oranında çalışılmaktadır. Stator frekansı hız ile artarken kayma frekansı sabit tutulmaktadır. Çekme kuvveti hızın karesine bağlı olarak azalmaktadır. Çekme kuvvetini belirlemede kullanılan yaklaşım, hat geriliminin kuadratik bir fonksiyonudur.

$$T = A + BV_d + CV_d^2 \quad 9.4$$

A, B ve C katsayıları herhangi bir lokomotif motoru için laboratuvar deney ve hesapları ile belirlenir. Bu hesaplar beklenen tren hızı ve hat gerilimi aralıklarında en az-kareler-hata ( least-squares-error ) metodu kullanılarak gerçekleştirilir.

Başka bir uygulama, çekme kuvvetini DC besleme gerilimi stator akımı, stator frekansı, tren hızı, taşıtın sabit mekaniki ve elektriki parametrelerinin fonksiyonu ise ifademiz

$$T = f(V_d, I_1, f_1, v) \quad 9.5$$

olacaktır.

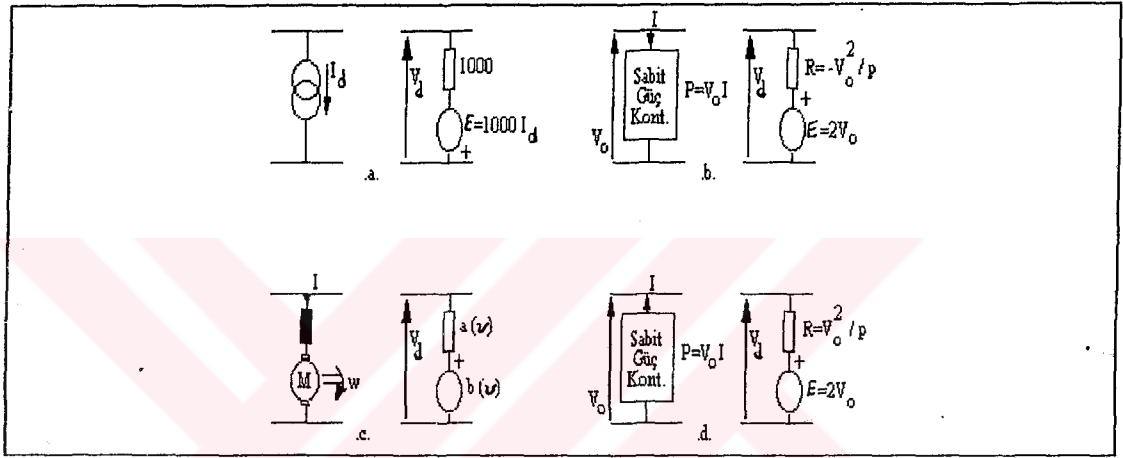
### 9.2.2 Frenleme Sırasında Çekme Kuvveti/Hız Karakteristikleri

Lokomotif donanımı tüm frenleme kuvvetini kullanacaksa, çekici karakteristikleri belirlemek için önceki bölümde anlatılanlara benzer hesaplamalar yapmak gerekmektedir. Ancak bu yaklaşım genelde gerekli değildir, çünkü hızlı transit uygulamalarının bir çoğunda elektrik freni toplam fren kuvvetinin yalnızca bir kısmını sağlar. Toplam frenleme karakteristiği, elektrik ve mekanik frenlerin karışımından oluşan bir kontrol sistemi tarafından sağlanır.

### 9.2.3 Hızlanma ve Frenleme Modlarında Gerilim/Akım Karakteristikleri

Güç sistemi simülatöründe hızlanan ve frenleyen trenler güç besleme sistemi üzerinde pozitif ve negatif güç talepleri ile gösterilirler. Tren uç gerilimleri genelde bilinmediğinden, sistem, her bir treni bir Thevenin eşdeğeri ile belirtilmesiyle çözülebilir. Sistemin doğrusallığının korunması gerektiğinden, genel matris çözümlerinin kullanılması ve bazı yaklaşık değerlerin kullanılması bu tip bir yaklaşımda gereklidir.

Belirli mekanik çıkış gücü veren bir sistemde, sistem kayıpları biliniyorsa giriş elektrik gücünü hesaplamak her zaman mümkündür. Pratikte bu kayıpların ölçümü ard arda hesaplamalar gerektirir. Alışıla geldiği gibi mekanik çıkış gücü karakteristiği, lokomotif-motor karakteristiği terimlerinde ifade ediliyorsa kayıpları açık olarak hesaplamak daima gerekli değildir. Şekil 9.4'de gösterilen gerilim-akım modellerini düşünelim.



Şekil 9.4 Lokomotif donanımının eşdeğer devreleri

- Sabit akım durumu
- Sabit güç durumu
- Güç durumunda bölge 3
- Frenleme durumu

Bölge 1  $0 < v < v_1$

Bu bölgede tren sabit bir oranda hızlanmaktadır. Bu bölgede verilen hızda, tren sabit bir güç yükü verir. Bu nedenle DC beslemeden alınan güç  $P_d = V_d I_d = \text{Sabit}$ 'tir.

a. Direnç Donanımı : Akım sınırlayıcı rölenin çalışmasıyla sabit bir akım talebi yaratılır. Giriş akımı bilindiğinden verim hesapları gerekmez ve Şekil 9.4.a'da gösterilen sabit akım modeli treni temsil etmek için kullanılır. Buradaki parametreler doğru bir lineer model temin etmek için hızın fonksiyonu olmalıdır. Modelde, sistem

eşdeğer direncine göre büyük bir değer olduğundan  $1000\Omega$  seçilmiştir.

b. Kısıtıcı Donanımı : Çekme kuvveti sabit olduğundan belirli bir tren hızı için mekanik çıkış gücü hesaplanabilir. Motorun verimi bilindiğinden giriş güç talebi hesaplanabilir. Simülatörde lineer şebeke çözümü için Şekil 9.4.b'deki ER modeline çevrildiğinde buna karşılık gelecek R direnci negatif olur. Bu pozitif ve gerçel değerler için matris denklemlerinin çözümünde stabilite problemlerine neden olur. Bu nedenle sabit akım modeli kullanmak uygundur.

Bölge 2  $v_1 < v < v_2$

Bu bölge sabit güç bölgesidir. Bu nedenle klasik ve kısıtıcı donanımının her ikisi için de hat akımı toplam motor akımına eşittir. Her iki durumdada sabit akım talebi, Şekil 9.4.a'da gösterildiği gibi bir gerilim kaynağı ve seri büyük değerli bir direnç ile ( $1000\Omega$ ) etkili bir şekilde temsil edilebilir. Bu bölgede çekme kuvveti hızla ters orantılı olarak düşer.

Bölge 3  $v_2 < v$

Bu bölgede uç gerilimi ve akımı arasındaki ilişkiler Şekil 9.4.c'de gösterilen lineer model ile temsil edilir. Frenleme özelliklerinin, rejeneratif frenleme nedeni ile elde edilen elektrik gücünün temsili çok kolaydır. Verim biliniyorsa sabit elektrik gücü terimi, Şekil 9.4.d'de gösterildiği gibi, küçük sinyal modelinin genişletilmesi ile temsil edilir.

### 9.3 Güç-Sistemi Çözümü

Her tren hareketi DC güç besleme sistemindeki güç dağılımını etkiler. İlgilenilen zaman aralığında, bir tren çalışma moduna bağlı olarak pozitif veya negatif güç talebi yaratır. Sistem çözümünde, her tren giriş akımı ve uç gerilimi arasındaki bağıntıyı kuran bir eşdeğer devre ile gösterilir. Her tren bir eşdeğer devre ile temsil edildikten sonra sistem, her tren için gerçek uç gerilim ve akımını bulmak için çözülür. Ancak lokomotif ekipmanlarından gelen doğrusal olmayan etkiler işi güçleştirir. Bu güçlük parçalı lineer modeller kullanılarak giderilir. Bu modeller sabit hız durumu göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşım ile her tren bir gerilim kaynağı ve seri bağlı bir direnç ile gösterilir ve tüm sistem doğrusal sistem teorisi kullanılarak çözülebilir. Sistemin ana köşegen ve iki komşu köşegeninde sıfır olmayan katsayılarla gösterildiği band matrisler kullanılarak standart test alma teknikleri ile verimli bir sonuç elde edilebilir. 2-kapılı bir merdiven devresi bu talepleri sağlar. Önerilen bu doğrusallaştırılmış sistem modeli yalnızca her güç merkezinde pozitif akım talebi olduğunda geçerlidir. Gerçek bir veya daha fazla güç merkezinde frenleyen trenler bulunabilir. Faydalı frenleme nedeni ile bu merkezler pozitif akım talep etmiyor olurlar. Bu koşulları sağlayabilmek için iletimde olmayan güç merkezlerini hesaba katmayan ard arda çözümler gereklidir. Bu da iletimde olan veya olmayan güç merkezlerinin program yapısının bir parçası olarak tanımlanmasını gerektirmektedir. Bundan başka, frenleyen bir trenin uç geriliminde bir sınırı aşmamak gerekmektedir. Bu nedenle ilgili trenlerin maksimum gerilim sınırlamalarını aşmaları durumunda ard arda sistem çözümleri gerekmektedir.

#### 9.3.1 İletimdeki güç merkezi çiftleri arasında sistem çözümü

Her tren bir gerilim kaynağı ve seri direnç ile temsil edildiğinde genel sistem Şekil 9.5'deki gibi gösterilebilir. İki güç merkezi arasında iki demiryolu hattı vardır.

## 10. GÜÇ ELEKTRONİKLİ DEVRELERİN ULAŞIM SİSTEMLERİNDE ELEKTRİKLİ GÜÇ SİSTEMLERİNE OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Dünyada elektrikli demiryolu ulaşım sistemlerinin çoğunluğu diod doğrultuculu güç beslemesinden ibarettir. Bir diyod doğrultucu basit ve limitleri olan, iyi bilinen bir elemandır.

Gerilim kontrollü tristör dönüştürücüler ise 20 yıldan daha uzun bir süredir ulaşım uygulamalarında ancak genelde taşıtlar ve AC güç beslemesi için kullanılırlar. Tüm dönüştürücülerin gerilim regülasyon karakteristiği

$$U_d = 1650 + 150 I_d / 13000$$

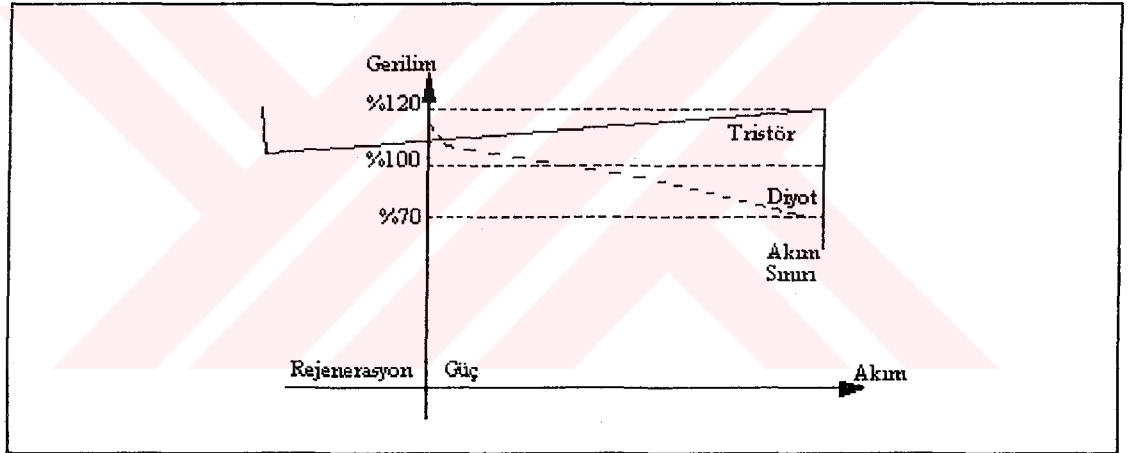
10.1

dir. Diyot doğrultucular AC / DC dönüşümünde kullanıldıklarında, DC gerilimi daima yük akımının fonksiyonu olarak ayarlanır. Dönüştürücü transformatörlerde ne yüksüz ne de yüklü kademe uçlarına gerek yoktur. Şekil 10.1 kontrollü bir çift dönüştürücü için yük akımının fonksiyonu olarak çıkış gerilimini vermektedir. Burada yüksüz iken gerilimin %110 olduğu, maksimum yük altında ise %120'ye lineer olarak arttığı görülmektedir. Bu karakteristikteki pozitif artışın nedeni akım alıcı/üçüncü ray ve taşıyıcı rayların rezistif gerilim düşümünü karşılamasıdır. Bu, DC cer devresindeki kayıpları azaltır. Böylece besleme istasyonları arası mesafe büyütülebilir. Bir çift-dönüştürücü oluşturmak için evirici köprülerin birleştirilmesi, taşıttan besleme AC devresine frenleme enerjisinin verilmesini sağlar.



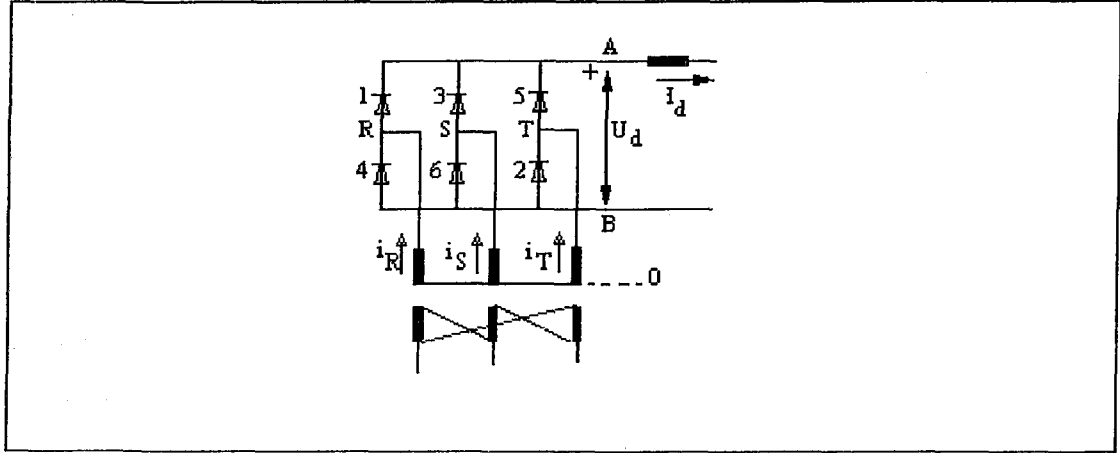
### 10.1 Gerilim Kontrollü Tristör Dönüştürücüler

Bir diyot doğrultucuda tüm kontrol edilemezler. Şekil 10.2'de altı-darbeleri diyod doğrultucu görülmektedir. Burada diyodlar tristörlerle yer değiştirirlerse, devre kontrol edilebilir altı-darbeleri tristör dönüştürücü olacaktır. Eğer tristörler anod-katod gerilimi pozitif olmaya başladığı anda tetiklenirse, tristör dönüştürücü, bir diyot doğrultucu gibi çalışacaktır. (Tetikleme darbe gecikme açısı sıfır derece)



Şekil 10.1 Çift dönüştürücü yük akımı-çıkış gerilimi değişim eğrisi

Transformatör sekonder gerilimi, diyod doğrultucu durumuna göre daha büyük seçilirse ve tetikleme darbeleri, anod-katod geriliminin pozitif olmaya başladığı ana göre belli bir zaman gecikmeli alınırsa, çıkış geriliminin ortalama değeri, diyod doğrultucularla aynı değerlerde kontrol edilebilir.

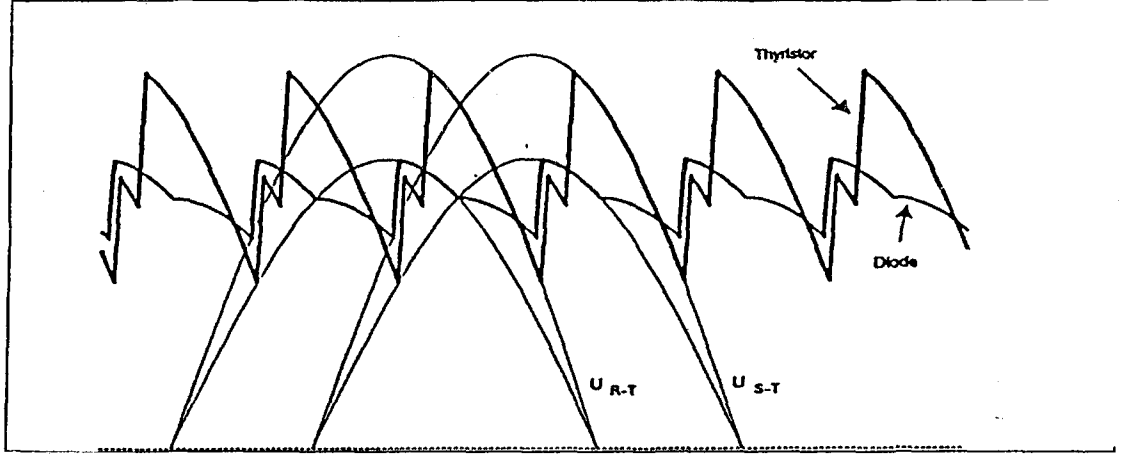


Şekil 10.2 Altı-darbeli diyod doğrultucu

Bir diyod doğrultucudaki komütasyon işlemi sırasında, bir tristör doğrultucudaki gibi, yük akımı bir valften bir sonrakine geçer. Komütasyon sırasında iki valf birlikte bağlanır.

Bir altı-darbeli diyod doğrultucu ve tristör dönüştürücü çıkış gerilimleri Şekil 10.3'teki gibidir. Burada iki faz faz gerilimi  $U_{R-T}$  ve  $U_{S-T}$  'de verilmiştir. Buradaki diyod doğrultucu ve tristör dönüştürücü gerilim-akım karakteristiği Şekil 10.1'deki gibidir ve nominal güçte yüklüdürler.

Şekil 10.3'de görüldüğü gibi çıkış gerilimindeki dalgalanma tristör dönüştürücüde, diyod doğrultucudakinden daha büyüktür. Altı-darbeli tristör dönüştürücü kullanıldığında, tepe tepe değeri verilen standart (IEC 146-3) değerinden %15 daha fazla olacağından alçak-geçişli DC filitrelerine ihtiyaç olacaktır.



Şekil 10.3 Diyod doğrultucu ve tristör dönüştürücü çıkış gerilimi  
Diyod  
Tristör

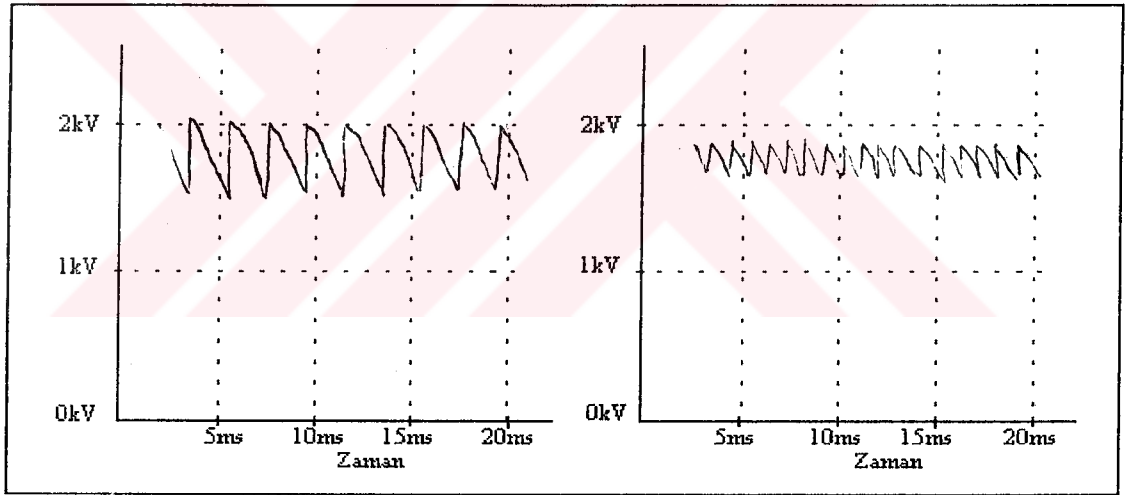
Transformatör yüksek gerilimi nedeni ile reaktif güç tüketimi tristör dönüştürücüde daha fazla olacaktır. Bu olumsuz etki dönüştürücü transformatörlerin yüksek gerilim kısmına filitrelerin konulması ile giderilir.

Fazla darbeli tristör dönüştürücülerin kullanımı, AC taraftaki harmonik akımları kadar DC gerilimindeki dalgalanmaları da epeyce azaltacaktır. Böylece DC ve AC filitrelerin karmaşıklığı ve boyutu azaltılmış olur. Hatta DC filtre ihtiyacı ortadan kalkabilir.

Şekil 10.4 1500 V, 12-darbeli ve 24-darbeli tristör dönüştürücülerin DC çıkış gerilimini gösteriyor. Buradan da görüldüğü gibi dönüştürücü darbe sayısının artması ile dalgalanma azalmaktadır. Şekil 10.5'de ise, tam yükte, 1500V, 12-darbeli ve 24-darbeli tristör dönüştürücülerin AC hat akımı değişimini verirsek burada da dönüştürücü darbe sayısını arttırınca AC hat akımı harmoniklerinin azaldığını görürüz.

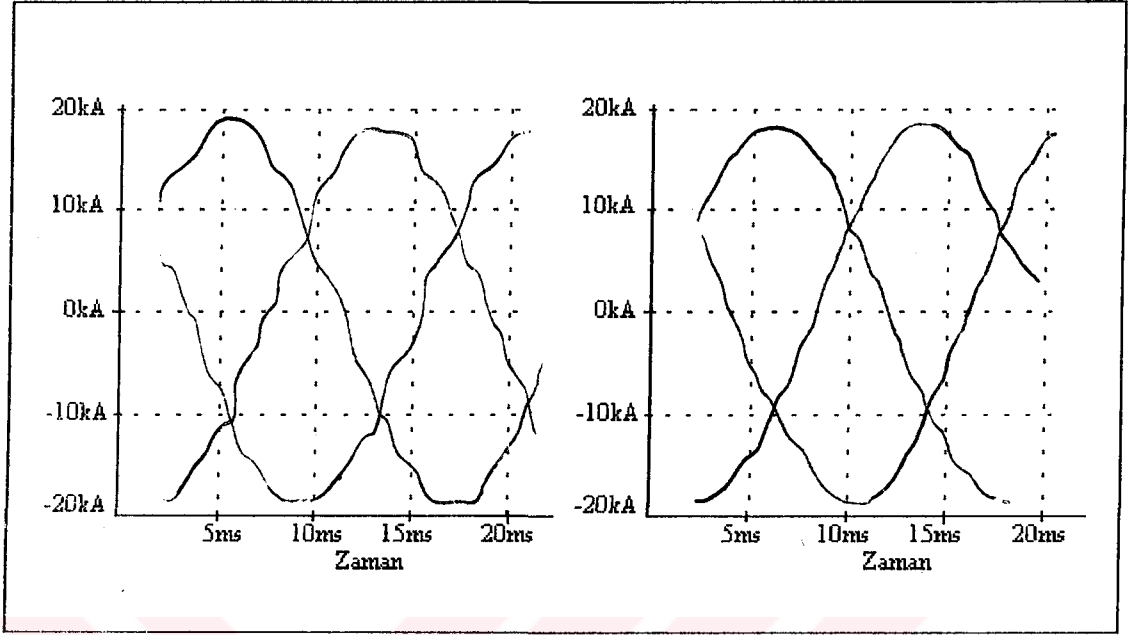
Standart altı-darbeleri tristör köprülerini kullanarak değişik tipte dönüştürücüler düzenlenebilir. Mesela 6-, 12- veya 24-darbeleri ve tek veya çift gibi. Keza, köprülerin seri veya paralel bağlanarak kullanılması ile 1 MW'tan 10 MW'tan da fazlası güç ihtiyacı karşılanabilir. Sistem 500 V- 3000 V DC'ye kadar kullanılabilir.

12-darbeleri bir tek-dönüştürücü ve 12-darbeleri bir çift-dönüştürücü, iki trifaze tam dalga tristör dönüştürücünün seri veya paralel bağlanması ile oluşturulabilir. Tristör köprüleri ters-paralel bağlı tristörler ile gerçekleştirilir. Bu şekildeki düzenleme ile hem doğrultucu hem de evirici olarak çalışma mümkün olur. Böylece DC cer devresinden, AC besleme devresine enerji verilmesi sağlanır.



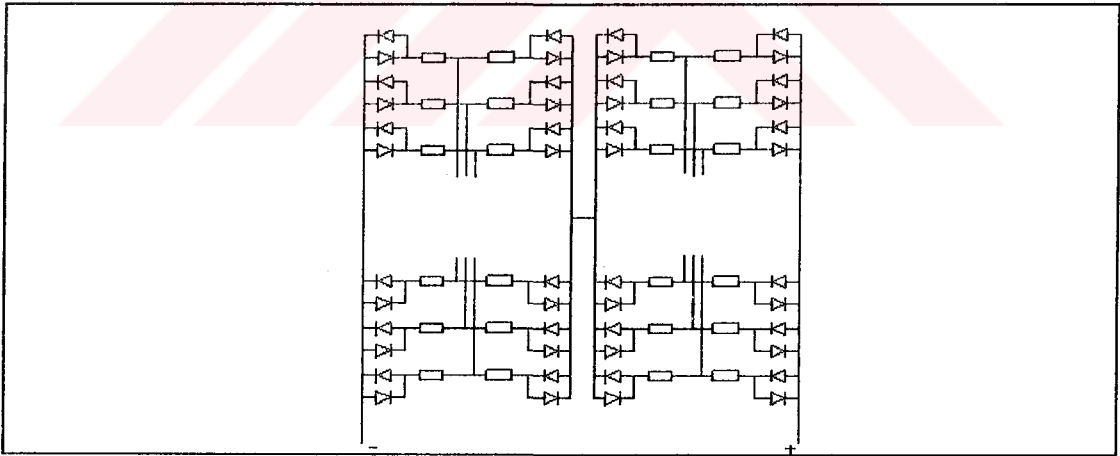
Şekil 10.4 Tristör dönüştürücülerin DC çıkış gerilimi

- a. 12-darbeleri
- b. 24-darbeleri



Şekil 10.5 Tristör dönüştürücülerin AC hat akımı

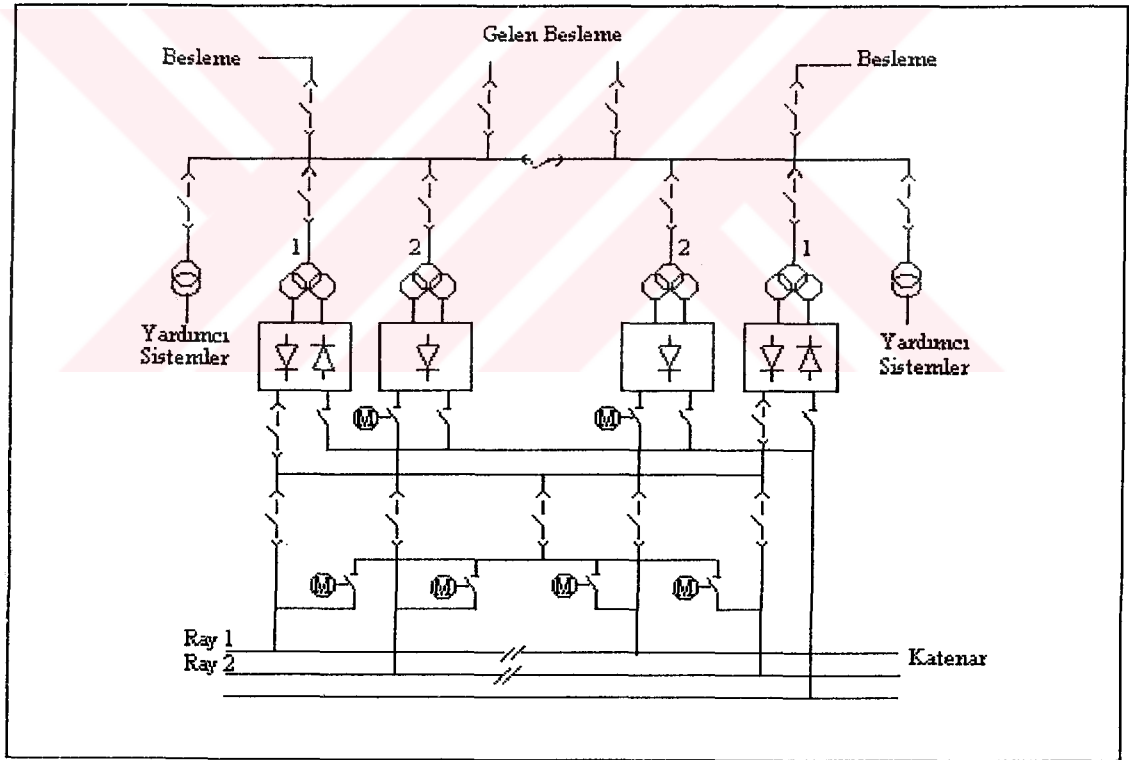
- a. 12-darbeli
- b. 24-darbeli



Şekil 10.6 12-darbeli seri bağlı çift-dönüştürücü

750 V DC sistemler için 12-darbeli paralel veya 6-darbeli dönüştürücüler mali olarak en uygun olanlardır. 1500 V DC sistemler için 12-darbeli seri dönüştürücü kullanımı daha ekonomiktir. Yeni tip tristör dönüştürücülerin kontrol ve regülasyon sistemi tam kompüterize edilmişlerdir. Röleler hala bazı dış cihazlara bağlantı için kullanılmaktadır.

Tristör dönüştürücülü güç merkezi blok diagramı Şekil 10.7'deki gibidir. Tepe değerlerin olduğu saatler dışında iki çift-dönüştürücü hattı paralel olarak besler. İki tek-dönüştürücü, sadece kalabalık saatlerde veya çift-dönüştürücülerden biri veya her ikisi birden servis dışı kaldığında çalışacaktır. Dört dönüştürücüden üçü güç gereksinimini sağlayabilir. Böylece %100'lük fazlalık karşılanmış olur. Eğer transformatörler, +7.5 , -7.5 lik bir faz kaymasına izin verecek şekilde yüksek gerilim sargılarına sahip olursa, iki çift-dönüştürücü tıpkı iki tek-dönüştürücü gibi, paralel çalıştığında 24-darbeleri dönüştürücü gibi davranacaktır.



Şekil 10.7 Tristör dönüştürücülü güç merkezi blok diagramı

1. Çift dönüştürücüler
2. Tek dönüştürücüler

## 10.2 Enerji Tasarrufu

Tristör dönüştürücülerin çıkış gerilimi Şekil 10.1'de görüldüğü gibi yük arttıkça artmaktadır. Ancak diyod doğrultucuların çıkış gerilimi yük arttıkça azalmaktadır. Aynı güç talebi için tristör dönüştürücüye göre daha büyük olan gerilim DC ulaşım şebekesinde daha düşük akıma neden olur. DC ulaşım devresindeki kayıplar akımın karesi ile orantılıdır. Bu nedenle, tristör dönüştürücüler kullanıldığında, kayıplar büyük ölçüde azalır.

Birbirinden 4km aralıkla bulunan iki güç merkezi için göz direnci 0.04 /km ve iki tren, 3MW gücünde olsun. Böyle bir sistemde güç merkezleri diyod doğrultucularla kurulmuşsa akım alıcı/üçüncü raydaki kayıplar iletilen gücün %13'ü kadardır. Eğer tristör dönüştürücüler kullanılmışsa, ulaşım devresindeki yaklaşık %11 daha düşük akım nedeni ile, kayıplar %10 civarında olacaktır. Tristör durumunda, trenler tarafından görülen DC gerilim, nominal gerilimin üzerinde, diyod durumunda ise nominal gerilimden yaklaşık %10 daha az olacaktır.

Pekçok hızlı taşıma sisteminde, DC ulaşım şebekesindeki geri besleme frenleme enerjisi, hareket eden trenler tarafından kullanılır. Bununla beraber, bu yakında hareket halinde tren yoksa veya frenleme akımı, yakın trenler tarafından çekilen akımdan fazla ise mümkündür.

Bir konvansiyonel diyod doğrultucu sistem, DC-er devresinden AC besleme devresine herhangi bir enerji iletemez ve bunu kullanamaz. Frenleyen trenlerin ürettiği enerji sadece diğer trenlerin güç tüketimi ile kullanılabilir. Eğer yeterince yakın bir tren mevcut değilse frenleme enerjisi, frenleme dirençlerinde veya mekaniki frenlerde harcanır.

Çift-dönüştürücülü bir sistem DC cer şebekesinden AC besleme devresine verilen enerjinin ana bölümünü iletebilir.

Şekil 10.1'de verdiğim akım-gerilim karakteristiği, üretilen akıma bağlı olarak DC geriliminin azaldığını gösterir. Bu, sistemi ilave enerjiye karşı daha alıcı yapar. Geniş bilgisayar simülasyonları, trafik yoğunluğuna bağlı olarak, toplam enerjinin %5 ila 25'inin tekrar elde edilebileceğini ve AC devresini besleyebileceğini göstermektedir.

Bir yeraltı demiryolunda frenleme enerjisinin bir kısmından yararlanılması ile elde edilen enerji tasarrufuna ilaveten sistem tünelde ısı yükselmesi önlediği için de enerji tasarrufu sağlar. Bu sistemde havalandırma ve klima cihazlarında enerji tüketimi en az düzeye iner.

Genel olarak belirtirsek tristör dönüştürücülü sistem, frenleme enerjisinden yararlanmayı sağlar. Bunun yardımı ile mekaniki frenlerde aşınma daha az olur dolayısı ile bakım-onarım masrafı azalır. Uzun yokuşlu sistemlerde, aşırı ısınma riski nedeni ile frenlerin kullanımı zordur. Elektrikli fren kullanımı emniyet açısından önemli bir özelliktir.

### 10.3 Tesis Masraflarında Azalma

Tristör dönüştürücülü güç besleme sistemleri, güç merkezi daha büyük çıkış gerilimi ve DC cer şebekesinde daha az kayıplar gösterir. Normalde ağır ulaşım sistemleri, gerilim-akım karakteristiğinin eğimine, DC cer devresindeki göz direncine ve trafik



yoğunluğuna bağlı olarak g¼c merkezleri arasında yaklaşık %35 ila 60 kadar daha uzun mesafe olmasma izin verir. Bunu gözönüne alarak, etkili bir enerji g¼c besleme sistemi dizaynında, g¼c merkezi sayısı normal olarak diyod doğrultuculu konvansiyonel sisteme göre %65 ila 75 daha az olur. Bu tesis maliyetinde önemli bir etkindir.

#### 10.4 Mevcut Diyod Sistemlerini Yenileme

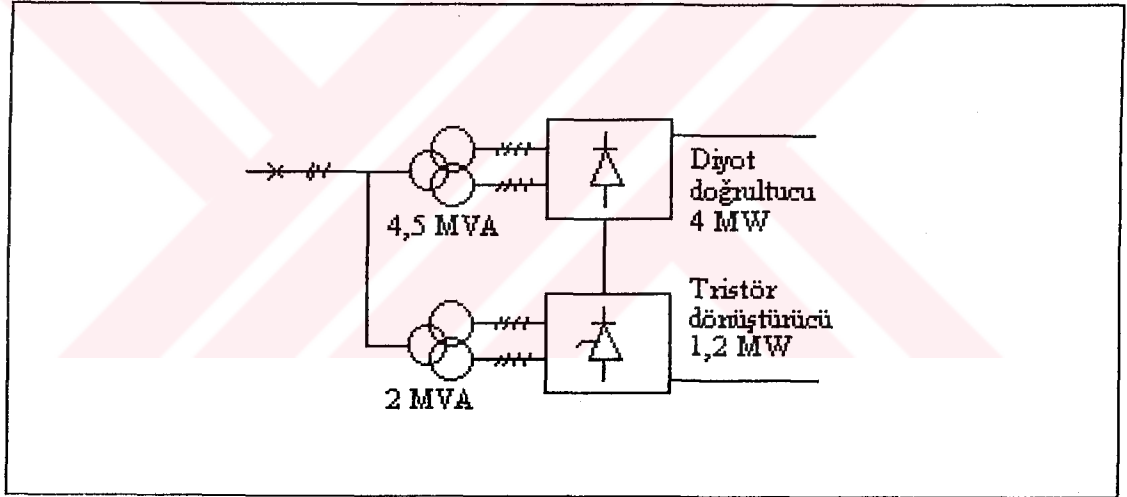
Tristör dönüştürücülerden DC çıkış gerilimi daima AC besleme devresi gerilim değişimlerinden bağımsız olarak kontrol edilir ve yük akımının fonksiyonu olarak artmaktadır. Böylece, g¼c merkezinden çıkış gerilimi, yüksek yükte, tristör dönüştürücülerde diyod doğrultuculardan daha fazla olacaktır. Aynı g¼c ihtiyacı için DC cer devresindeki akım, daha öncede belirttiğim gibi, nispeten daha yüksek DC gerilim nedeni ile daha az olacaktır. Trenlerin aldığı DC gerilim epeyce büyük olacaktır. DC cer şebekesinin g¼c iletim kapasitesindeki artış, g¼c merkezlerinden çıkış geriliminin artması ile orantılıdır.

Tüm dünyadaki pekçok operatör, özellikle yeni ve daha güçlü trenlerle, g¼c besleme sistemleri aşırı yükleri ile ilgili problemlerle karşılaşıyorlar. Genel problemler : Trenler tarafından alınan çok düşük gerilim ki bu tren performansını azaltır, aşırı yüklü g¼c merkezleri veya aşırı yüklü diğer DC cihazlar.

Diyod doğrultucular ile tristör dönüştürücülerin, doğrultucu transformatörlerin yenileri ile değiştirilmesi ve AC yüksek gerilim cihazında yenileme ile sistemin g¼c iletim kapasitesi, o andaki durumuna bağlı olarak %50 oranında arttırılabilir.

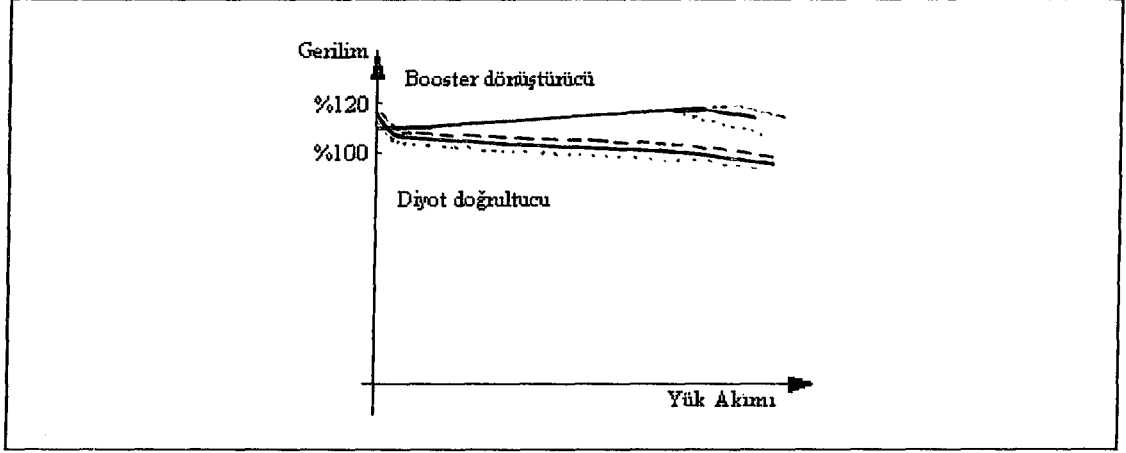
Mevcut güç besleme sistemi nispeten yeni ve yeterli ise, çok az yatırım maliyeti ile, düşük gerilim için, mevcut diyod doğrultucular yeni tristör dönüştürücüler ile birlikte kullanılırlar. Buna artık Booster dönüştürücü denir. Yeni tristör dönüştürücü ve transformatörlerin gücü, mevcut diyod doğrultucu ve transformatörlerin gücünün yaklaşık %25 ila 40'ı kadardır.

Booster dönüştürücüler, seri bağlı bir diyod doğrultucu ile tristör dönüştürücüye sahiptir. Diyod doğrultucu ve tristör dönüştürücü 6- , 12- veya 24-darbeleri olabilir. Burada verilen değerler bir 1500 V DC sistem için tipik değerlerdir.



Şekil 10.8 Booster dönüştürücü

Şekil 10.9 diyod doğrultucu ile booster dönüştürücü çıkış gerilimini gösterir. Düz çizgiler nominal AC geriliminde çıkış gerilimlerini, noktalı çizgiler nominal AC geriliminin %  $\pm 5$ 'lik değişimdeki çıkış gerilimlerini gösterir.



Şekil 10.9 Diyod doğrultucu ve booster dönüştürücü çıkış gerilimi değişim eğrisi

Booster dönüştürücü çıkış gerilimi, seri bağlı diyod doğrultucu ve tristör dönüştürücü çıkış gerilimleri toplamına eşittir. Mevcut doğrultucu transformatör kademe uçlarının ve tristör dönüştürücü çıkış geriliminin koordine edilmesi ile AC/DC dönüştürme sistem gücü %50 kadar arttırılabilir. Tristör dönüştürücüler negatif çıkış gerilimi verebilir. Bu nedenle ne besleme AC devresindeki pozitif gerilim değişimlerini ne de yüksüz halde AC tepe gerilimindeki artışı düşünmek gerekmez.

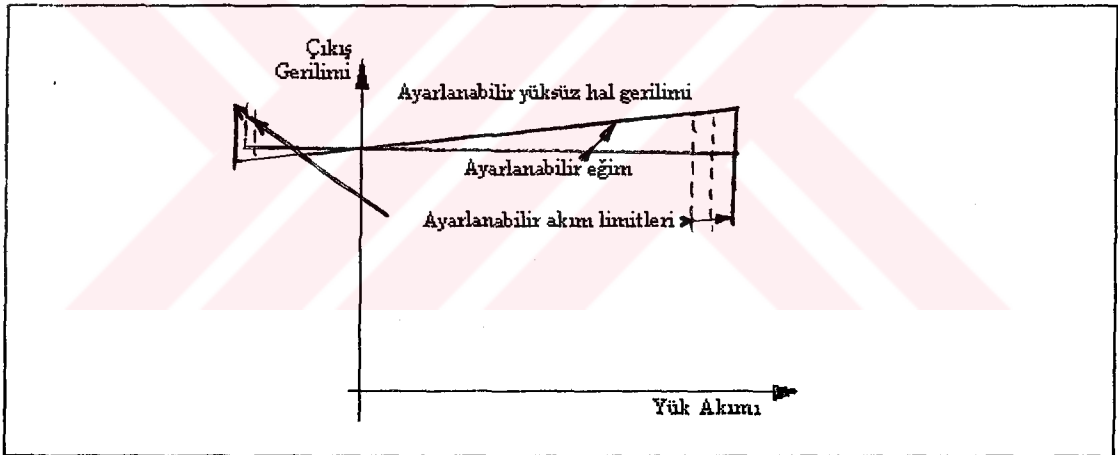
### 10.5 Enerji Yönetim Sistemleri

Enerji maliyeti, bir kütle taşıma sistemi için, en yüksek işletim maliyetidir. Modern kontrol üniteleri, sistemdeki aktif güç akışını değerlendirmede mevcut tüm bilgilere sahiptir. Güç tüketimini optimize etmek için yeni dönüştürücü parametrelerini hesaplar. Güç merkezlerinde ölçülen güç akışı ve akımları gerilimleri değerlendirir. Bu değerler, ölçme transformatörleri ve sezici elemanlar yardımıyla ölçülürler ve uzaktan kumandalı uç üniteleri (RTU) yoluyla ana bilgisayara iletilirler.

Ayrıca RTU'lar yoluyla dönüştürücülerde sayısal kontrol ederlerin bazı parametrelerine azalma veya artma komutlarını verebilirler. Bu komutlar önceden belirlenen artım

ve limit sınırları içinde değişiklik yaparlar. Değiştirilebilen parametreler yüksüz hal gerilimi, gerilim-akım karakteristiğinin eğimi ve akım sınırlarıdır. Yüksüz hal gerilimi ve eğim parametrelerinin ayarlanması ile birbirine yakın güç merkezleri arasında yük paylaşımı optimize edilebilir ve akım alıcı/üçüncü raydaki  $RI^2$  gerilim kayıpları minimuma düşürülebilmektedir. Akım sınırlarının ayarlanması ile aşırı yük sırasında çekilen yüksek güç sorunları ortadan kaldırılabilir. Şekil 10.10 uzaktan kontrolla ayarlanabilen parametreleri gösterir.

Diğer bir uygulama dönüştürücülerin sayısal kontrol ederlerde önceden programlanan farklı gerilim-akım karakteristiklerine sahip olmaktır. Bu karakteristiklerin herbiri



Şekil 10.10 Ayarlanabilir parametreler

sistemdeki farklı trafik örnekleri için optimumdur. Böylece, RTU'lar yardımı ile değişik zamanlarda hangi programlanmış karakteristiğin uygulanacağını emredilir.

İncelemelerimi özetlersem gerilim kontrollu tristör dönüştürücülü güç besleme sistemi diyod doğrultuculu konvansiyonel sistemlerden avantajlıdır. DC gerilimin tam kontrolü, az sayıda trenin kullanıldığı yoğun olmayan saatlerde yüksek gerilim ile veya çok yoğun trafikli saatlerde düşük gerilim ile fazla sayıda tren çalıştırırken hiç

bir sorun ile karşılaşılmamasına neden olur. Tristör dönüştürücüler sadece çıkış gerilimini değil çıkış akımını da kontrol edebildiğinden akım sınırlarımızla da oynayabiliriz. Bunun yardımıyla akım sınırlarımızı %300 hatta %450 arttırabiliriz. Ancak bunu %200 ile %300 sınırları arasında almamız daha emindir. Enerji açısından da tristörlü sistemler daha verimlidirler. Yoğun trafik sırasında, 1,5-2,5 dakika aralıkla taşıt çalışmasında tristörlü sistemler %5-7, az trafik sırasında, 4-8 dakika aralıkla taşıt çalışmasında ise %20-25 daha az enerji tüketirler. Tablo 10.1'de yoğun trafikli bir metro hattında bir diyod sistemi ile çift dönüştürücülü sistemi karşılaştıralım. Her gün yoğun trafikli 4 saat, normal trafikli 16 saat ve çalışma olmayan 4 saat olarak düşünüldü. Çalışma olmayan 4 saat süresince toplam enerji tüketimi 6MWh olarak alındı.

Tablo 10.1 Diyod ve çift dönüştürücülü sistem karşılaştırılması

Toplam enerji tüketimi	Diyod	Tristör
Yoğun trafikli 4 saat	399 MWh	373 MWh
Normal trafikli 16 saat	939 MWh	704 MWh
Çalışma olmayan 4 saat	6 MWh	6 MWh
Toplam 24 saat	1344 MWh	1083 MWh

Tabii olarak tristör dönüştürücülerle kurulan bir güç merkezi diyod doğrultucularla kurulanlardan daha pahalıdır. Yalnız gerekli güç merkezi sayısı %65-75 oranında azalacağından toplam yatırım maliyeti yine de diyodlu sistemlerden düşük olur.

## 11. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada, öncelikle Elektrikli Ulaşım Sistemlerinin genel tanıtımına yer verilmiştir. Elektrikli Ulaşım Sistemlerinin enerji düzenleri hem alternatif akım hem de doğru akım ile beslemeli olabilmektedirler. Ayrıca besleme bir seyriletkeni, bir akım rayı veya akü grubu ile gerçekleştirilebilmektedir. Sistem kurulmadan önce yürütülen fizibilite çalışmaları, fiziksel ortama ve isteğe göre hangi sistemin kullanılmasının daha uygun olduğunu göstermektedir.

Elektrikli ulaşım sistemleri, genel enerji sistemlerinden bağımsız olarak düşünülemez. Bu nedenle, incelemelerim bu konuyu da içermiştir. Temel kavramlar kısaca hatırlatılmıştır. Sistemlerin güç besleme projesinin teknik ve ekonomik uygunluğunun kontrolü gibi önemli analiz konularında ve sistem tasarımında yapılan çalışmalarda, bilgisayarlardan yararlanmak bize büyük kolaylıklar sağlamıştır. Enerji düzenleri modellemesi, sistemdeki geçici olayların çözümlenmesi, bilgisayar kullanımına uygun olarak geliştirilmiştir.

Bir elektrikli ulaşım düzeni, belirli bir güzergahta, belirli hızlarda hareket eden ve güç sisteminden akım çeken belirli sayıdaki ünitelerden oluşmaktadır. Elektrikli taşıtlar, elektromekanik enerji dönüştürücüleridirler. Çer motorları ve güç dönüştürücülerini ile belirlenen yürütücü güç karakteristiklerine sahiptirler. Dağıtım sisteminden çekilen güç, rayda hareketi sağlayan mekanik güce dönüştürülmektedir. İncelemede taşıt hareketlerinin, elektrikli taşıtla güç merkezi arasında, zamanla değişen, elektriki empedansa ve güç akışına neden olduğu gözlemlenmiştir. Çok üniteli bir model geliştirme çalışmasında, farklı taşıtlar arasındaki bağıntıyı tanımlayacak algoritmaları da kullanmamız gereklidir.

Öncelikle ulaşım modelinin tamamını bölümlere ayırırız ve modelin uygunluğu onaylanmadan önce her bir bölümü test ederiz. Bulduğumuz sonuçlar fiziksel değerlere yakın ise model kabul edilir. Alt modeller çekici güçler, ray kısımları, güç merkezleri besleme dönüştürücüleri ve ulaşım sinyalizasyon ekipmanları için geliştirilmektedir.

Ulaşım sistem modeli, aktif ve pasif elemanlara, zamana bağlı bileşen ve kaynaklara sahip, çok düğümlü büyük bir elektriki devredir. Lineer olmayan durumların incelenmesinde aktif elemanlar, bağımlı ve bağımsız gerilim, akım kaynaklarını içerecektirler. Kararlı durum ve geçici durum için de çözüm araştırılmalıdır. İstenmeyen ancak ortaya çıkan arızaları milisaniyeler mertebesinde bildirmek için hesaplama zaman aralığı yeterince küçük seçilmelidir. Yaptığım çalışmalar sonucunda ulaşım modelinin çözümünde, konvansiyonel analitik devre teorisini uygulamada çeşitli güçlükler saptanmıştır. Problemlerden biri, demiryolu rayı, güç rayı ve toprak arasındaki iletim hattı kuplajını ifade etmek ve incelemektir. Ray ve şebekenin bir lumped-parametre devresi şeklinde gösterimi, çevre ve düğüm denklemlerinin uygulanması büyük beceri gerektirir. Ayrıca bilgisayar ile hesaplamalarda yeterince kısa bir süreye sahip olmak için oldukça fazla sayıda basitleştirmeler gerekmektedir. Bu ise elde edilen sonuçların fiziksel değerlerden uzaklaşmasına neden olmaktadır.

Gürültü kaynağı-alıcı transfer fonksiyonunu tamamen belirlemek için frekans ve akım bağıntılı bileşenleri bulunan bir taşıt iletim hattı modeli gerekmektedir. Kullanılan malzeme ve geometrik şekli ile belirlenen hat sabitleri, her bir frekansta yayılma hızı ve zayıflama sabiti, akım ve gerilim ifadeleri ile bir tek-faz hat denklemlerinin herbirinin kurulması, hat empedans ve admitans matrislerini belirlemekte kullanılmaktadır. Ray bağlantı eşdeğer şebekeleri ile tesbit edilen tek tek yolların birleşimi, hat sınır şartlarını belirler. Çok iletkenli bir iletim hattının birleşimi, faz ve şekil değişiklikleri arasındaki dönüşümler de modelde ifade

edilmelidir.

Sistemin modelleme işlemi, tüm fiziksel koşullar ifade edilecek biçimde gerçekleştirildikten sonra karşımıza çıkan problem bu modele hangi çözüm algoritmasının uygulanacağıdır. Kullanılan algoritmanın kullanımında stabilite ve yakınsama problemlerinden kaçınılmalı, hesaplama zamanı ve bellek alanı yeterince küçük olmalıdır.

Devre çözüm algoritmalarının optimizasyonundaki araştırmalar güç sistemleri araştırmalarının gelişmesine öncülük etmiştir. Özel uygulamalar için gerçekleştirilen programların, genel kullanımlar için de kolayca uygulanabilirliği bulunmuştur. Çeşitli sistemlerde uygulanan simülasyon programlarını incelemem sonunda bunlardan ikisinin elektrikli ulaşım şebekelerinin simülasyon uygulamalarına daha uygun olduğunu gözlemledim. Bunlar

1. Fark denklemleri tekniği : Bu metod H.W.Dommel tarafından geliştirilmiştir. Çok iletkenli sistemler teorisine dayanmaktadır. Birinci dereceden diferansiyel denklemlerin cebrik fark denklemleri ile ifade edildiği, lumped parametre elemanlı, düğüm gerilimi devre analizinin kullanımına dayanmaktadır.

2. Lineer programlama tekniği : L.Nagel tarafından geliştirilen bu teknik ayrık bileşenli elektrikli şebekelerin düğüm analizine dayanmaktadır. Metod, devre modelinin kurulması ve kondüktans matrisinin çözümlenmesi ile lineer olmayan, zamana bağlı olarak değişen devrelerle ilgilenmektedir.

Elektrikli ulaşım sistemleri için optimizasyon metodlarını anlamadaki ilk adım,



kullanılacak algoritmaya karşı modelin rolüdür. Model daha öncedende bahsettiğimiz gibi fiziksel bir problemin matematiksel bir ifadeye dönüştürülmesidir. Algoritma ise modelin çözülmesi için bir metoddur. Özel bir problemi modellemede çeşitli yollar vardır. Karmaşık modellerde farklı algoritmaların kullanımı ile birden fazla çözüm bulmak mümkündür.

Gerçekleştirdiğim incelemeler sonunda, elektrikli ulaşım sistemlerinin optimizasyon araştırmalarını, üç grupta ifade etmeyi uygun bulmaktayım.

1. Yerel gelişme araştırmaları
2. Sistem akış algoritmaları
3. Sistemi bölümlere ayırma metodları

Yerel gelişme araştırmalarında, ulaşım sisteminin güzergahının, seyahat sırasında taşıtların hareketlerindeki değişikliklerin, bölgesel gelişmelerin optimum çözümleri araştırılmaktadır. Kısıtlamalarda bazı bölümlerin indirgenmesi, hızlı çalışmayı ancak yeterince hassas sonuç elde edemememizi sağlar. Yakınsama aralığının yüksek tutulması, sınır şartlarının iyi seçilmemesi gibi kontroldaki bazı indirgemeler ise küçük test problemlerinde iyi sonuç verir. Yalnız büyük problemlerin işletiminde bir sonuca varmak mümkün olmaz. Yerel gelişme araştırmalarının en büyük sınırlaması, gelişmeleri araştırmada karmaşık ilişkileri bulmadaki güçlüktür. Günümüzde 50 veya daha az sayıda taşıt kapasiteli sistemlerde yerel gelişme optimizasyonu gerçekleştirilebilmektedir. Daha büyük sistemler henüz çözümlenememektedir.

Belli problemler, sistem akış algoritmaları olarak bilinen işlemlerin bir kısmından yararlanılarak formüle edilebilmektedir. Bu metodların matematiği 1950 'lerden

beri bilinmektedir. Bilgisayar kullanımındaki artış son 20 yıldır büyük hesaplama ilerlemesini sağlamıştır. Son on yıldır kaydedilen gelişmeler ise optimizasyon algoritmalarında değil, sistemlerdeki fiziksel problemlerin modellenmesinde gerçekleştirilmiştir. Sistem algoritmaları çok büyük problemleri kabul edilebilir bir sürede çözebilmektedir.

Optimizasyonda en güçlü kavramlardan biri, problemlerin bölümlere ayrılarak formüle edilmesi ve çözümlenmesidir. Araştırılan problem kısmı lineer programlama tekniğini veya Lagrangian metodunu kullanarak çözümlenmektedir. Lagrangian metodu, kısıtlamaları hafifleten ve bu kısıtlamaların birini bozduğumuzda penalty sabitini ilave eden bilimsel bir uygulamadır. Buradaki zorluk penalty sabiti değerinin ne olacağıdır. Bu metod kabul edilebilir bir sürede iyi çözümler vermektedir. Optimal çözüme %5 değerinde bir sapma ile yakınsamak mümkündür. Lineer programlama tekniğinde, ticari lineer programlama paketleri kullanılmaktadır. 50 ila 100 taşıklı problemler için bu uygulama etkili olabilmektedir. Daha büyük sistem uygulamaları için sütun üretme tekniklerinden yararlanılmaktadır. Çok hızlı, modern iş istasyonları ve modern optimizasyon metodlarının kullanımı ile, büyük sistem problemlerini çözmede bazı başarılar elde edilmiştir. Ancak çözüm için kesin bir karara varmak henüz erkendir.

İstanbul hafif metrosunda sistemden çekilen enerjinin incelemesi sonunda tam bir enerji optimizasyonu yapılamadığını gözlemledim. Ancak faydalı frenleme sırasında sisteme verilen enerjiden yararlanabilmek için taşıt trafiğini yeniden düzenlemek gerekmektedir. Böylece optimum çözüme biraz daha yaklaşabiliriz.

Elektrikli ulaşım sistemlerinde, motor kontrolunun, enerji dönüşümlerinin gerçekleştirilmesi vb. gibi konularda güç elektronikli devrelerin artarak

kullanılması, bu yönde de inceleme yapma gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Dünyada, DC elektrikli ulaşım sistemlerinde çoğunlukla diod doğrultuculu güç besleme düzenleri kullanılmaktadır. Gerilim kontrollü tristör dönüştürücüler ise 1970 'lerin başlarından itibaren ulaşım uygulamalarında kullanılmıştır. Ancak genelde AC güç beslemeli sistemlerde yararlanılmaktadır. Çalışmalarımı gerilim kontrollü tristör dönüştürücülerin DC beslemeli ulaşım sistemlerinde kullanılması halinde herhangi bir avantaj veya dezavantaj elde edilip edilemeyeceğini araştırma yönünde geliştirdim. Sonuç olumludur. Gerilim kontrollü tristör dönüştürücüleri DC beslemeli ulaşım sistemlerinde kullanılmasıyla diyotlu sistemlere göre şu avantajları elde ederiz.

1. Bu sistemlerin kullanımı ile mevcut düzende daha az sayıda güç merkezine ihtiyacımız olacaktır. Bu da maliyeti belli bir oranda azaltacaktır.
2. DC şebekedeki kayıplar azalacaktır. Böylece enerji tasarrufu sağlanacaktır.
3. Faydalı frenleme ile taşıttan şebekeye enerji verilebilecektir. Böylece bir enerji tasarrufuna olanak tanınacaktır.
4. Güç iletim kapasitesine göre mevcut diod doğrultuculu güç besleme sistemlerini iyileştirmek mümkündür.
5. Gerilim kontrollü tristör parametrelerinin on-line kullanımı ile enerji yönetimi ve yük kontrol sistemini tanıtmak olasıdır.

Böylece, bu çalışma ile Elektrikli Ulaşım Düzenlerinin enerji sistemlerine yeni bir çözüm yöntemi ile yaklaşım ve değerlendirmeler yapılmıştır. Bu türdeki ilk çalışma olan bu tez bundan sonraki benzer çalışmalarda ışık tutacaktır.

## KAYNAKLAR

- 1- URAL, A., 1991. Modern elektrikli ulaşım sistemleri. Kocaeli Üniv., s.1-222, İstanbul.
- 2- URAL, A., 1970. Cer tekniğinde en mühim büyüklük olan A [kWh/km.sene]'nin analitik ifadesinin bulunması ve bu ifadelerin değişkenlerine bağlılığının etüdü. İTÜ Doktora tezi, s.1-90, İstanbul
- 3- ELGERD, O.I., 1971. Electric energy systems theory. McGraw-Hill, s.1-390, New York.
- 4- OSBORNE, M.R., 1985. Finite algorithms in optimization and data analysis. John Wiley Sons, s.1-295, London.
- 5- LUENBERGER, D.G., 1973. Introduction to linear and nonlinear programming. Addison -Wesley Publishing Company, s.1-320, New York
- 6- BUNDAY, B.D., 1984. Basic optimisation methods. Edward Arnold Ltd, s.1-128, London
- 7- ÇAKIR, H., 1986. Elektrik güç sistemleri analizi. Nesil Matbaacılık, s.1-340, İstanbul
- 8- DILLON, W.E. and CHEN, M.S., 1972. Transformer modelling in unbalanced three-phase networks. IEEE Summer Power Meeting, s. ,Vancouver.
- 9- HAPP, H.H., 1977. Optimal power dispatch. IEEE transaction on power apparatus and systems, s.841-854

- 10- CARPENTIER, J., 1979. Optimal power flows. Electrical and energy systems, s.3-15
- 11- SASSON, A.M. and MERRILL, H.M., 1974. Some applications of optimization techniques to power systems problems. IEE Proceedings V.62, s.959-972
- 12- DOMMEL, H.W. and TINNEY, W.F., 1968. Optimal power flow solutions. IEEE transaction on power apparatus and systems, s.1866-1876
- 13- TALUKDAR, N.S. and KAO, R.L., 1979. Multiobjective load management techniques for electrified transportation systems. IEEE transaction on power apparatus and systems, s.2099-2105
- 14- IYER, S.R. and RAMACHANDRAN, K., 1983. New technique for optimal reactive-power allocation for loss minimisation in power systems. IEE Proceedings, Pt.C, s.178-182
- 15- PRICKETT, B.R., 1981. Electrification of the Tyne and Wear Metro. IEE Proceedings, Pt.B, s.81-91
- 16- HOWARD, N., 1983. Electrification of the Midland suburban services. IEE Proceedings, Pt.B, s.109-120
- 17- WATERS, C.D. and FARREL, M., 1988. Dublin area rapid transit. IEE Proceedings, Pt.B, s.134-150
- 18- MORRISON, R.E. and CORCORAN, J.C.W., 1989. Specification of an overvoltage damping filter for the National Railways of Zimbabwe. IEE Proceedings, Pt.B, s.249-256

- 19- SONE, S. and HORI, Y., 1981. Microprocessor-Based universal thyristor switch and its application to a PWM inverter for traction. IEEE Transactions on industrial electronics and control instrumentation, s.162-167
- 20- MELLITT, B. and GOODMAN, C.J., 1978. Simulation studies of energy saving with chopper control on the Jubilee line. IEE Proceedings, V.125, s.304-310
- 21- PLUNKETT, A.B. and PLETTE, D.L., 1977. Inverter-induction motor drive for transit cars. IEEE Transactions Industrial Applications, s.26-37
- 22- PLUNKETT, A.B. and LIPO, T.A., 1976. New methods of induction motor torque regulation. IEEE Transactions Industrial Applications, s.47-55
- 23- KARVINEN, J., 1987. Three-phase AC traction drives: design and service experience. IEE Proceedings, Pt.B, s.135-140
- 24- PAMBUKWELLA, N.B. and GOODMAN, C.J., 1980. Modelling of traction motors for system studies. 15th Universities Power engineering conference.
- 25- STOTT, B., 1974. Review of load-flow calculation methods. IEE Proceedings, V.62-7, s.916-929
- 26- STOTT, B. and ALSAC, O., 1974. Fast decoupled load flow. IEEE transaction on power apparatus and systems, s.859-869
- 27- ANDERSON, P.M., 1973. Analysis of faulted power systems. Iowa State University Press.
- 28- PAMBUKWELLA, N.B. and GOODMAN, C.J., 1987. CAE for electrical design of urban rail transit systems. Computer in railway operation, s.174-193

- 29- KURTULAN, S.,1992. Bir elektrikli ulaşım sisteminin modellenmesi ve simülasyonu, İTÜ doktora tezi, s.1-102
- 30- UHER, R.A., 1987. Traction energy management model. Computer in railway operations, s.40-41
- 31- GILL, D.C. and GOODMAN, C.J., Automated search technique for optimising speed command levels in the London Underground Central Line Atc system. Computer in railway operations, s.287-310

T.C. YATAYIRIŞI VE ULAŞIM BAKANLIĞI  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

## ÖZGEÇMİŞ

1958 yılında Cizre'de doğdu. 1975 yılında Aydın Lisesini bitirdi. 1980 yılında Yıldız Üniversitesi Işık Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği bölümü'nden Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. Ekim 1980-Aralık 1982 yılları arasında Yıldız Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı.

Çalışma hayatına Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği bölümünde Şubat 1981 yılında asistan olarak başladı. 1986 yılında Öğretim Görevliliğine atandı. 1983-1987 yılları arasında Devre Teorisi, Devre Analizi ve Devre Sentezi derslerini yürüttü. Eylül 1987-Aralık 1990 yılları arasında Netaş AŞ Araştırma Geliştirme grubunda Yazılım Tasarım Mühendisi olarak çalıştı. Çalışmaları Sayısal Telefon Santralleri için yazılım modülleri tasarlamaktı. Intel 8086 Assembler, C, PL/M programlama dillerini bilmektedir. Halen Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği bölümünde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Bildiği yabancı dil İngilizcedir.