

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENERJİ İLETİM HATTI PARAMETRELERİNİN
KESTİRİMİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Esra KARAER

Anabilim Dalı: Elektrik Mühendisliği

Programı: Elektrik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa BAĞRIYANIK

MAYIS, 2005

**ENERJİ İLETİM HATTI PARAMETRELERİNİN
KESTİRİMİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Esra KARAER

(504021004)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 4 Mayıs 2005

Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Mayıs 2005

Tez Danışmanı Doç. Dr. Mustafa BAĞRIYANIK

Diğer Jüri Üyeleri Prof. Dr. Hasan DAĞ (İ.T.Ü)

Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ (İ.T.Ü)

MAYIS, 2005

ÖNSÖZ

İTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü Yüksek Lisans öğrenciliğim süresince danışmanım olma talebimi kabul eden ve desteğini bir an esirgemeyen; bana bu tez çalışmasını yapma olanağı sağlayan ve bu süre zarfında büyük bir sabır ve özenle çalışmalarımı takip ederek karşılaştığım zorlukları aşmada bana yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. Mustafa BAĞRIYANIK ile çalışmanın ilerlemesinde büyük katkısı bulunan eşi Dr. Fatma Gül BAĞRIYANIK' a; öğrenim süresi boyunca bana emeği geçen tüm değerli hocalarıma; bilgilerini paylaşan ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Dz. Ütğm. İzzet Emre AFACAN ve Araş. Gör. Suna BOLAT' a teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman benimle birlikte olduğunu bilmekten büyük mutluluk duyduğum aileme minnettarlığımı belirtirim.

Esra KARAER

Mayıs, 2005

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
KISALTMALAR.....	v
TABLO LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
SEMBOL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiv
SUMMARY.....	xvi
1 GİRİŞ.....	1
2 ELEKTRİK ENERJİ İLETİM SİSTEMİ	4
2.1 ENERJİ İLETİM HATLARI PARAMETRELERİ	6
2.1.1 Direnç (R).....	7
2.1.2 Endüktans (L).....	8
2.1.3 Kapasite (C)	9
2.1.4 Kaçak İletkenlik (G)	10
2.2 KARAKTERİSTİK EMPEDANS VE YAYILMA SABİTİ	11
2.2.1 Karakteristik Empedansın Frekansla Değişmesi.....	12
2.2.2 Yayılma Sabitinin Frekansla Değişmesi.....	12
2.2.3 Carson Hattı	13
2.2.4 Üç Fazlı Hat Empedansı.....	15
3 ENERJİ İLETİM HATTI MODELLERİ.....	17
3.1.1 Kısa İletim Hattı Modeli.....	17
3.1.2 Orta Uzunluktaki İletim Hattı Modeli.....	19
3.1.3 Uzun İletim Hattı Modeli.....	21
3.2 ENERJİ İLETİMİNDE DENGESİZ DURUMLAR.....	22
3.2.1 Sistemde Dengesiz Durumlar	24
3.2.2 Modal Dönüşümler	27
4 ENERJİ İLETİM HATLARI PARAMETRE KESTİRİMİ	33
4.1 ANALİTİK YÖNTEM	33
4.1.1 Alçak Frekans 0-500 Hz	36
4.1.2 Yüksek Frekans 2-5 kHz.....	36
4.1.3 Paralel Admitans Matrisinin Hesaplanması	37
4.2 PARAMETRE KESTİRİMİ	39
4.2.1 Zaman Domeninde Parametre Kestirimi	41
4.2.2 Fazör Domeninde Parametre Kestirimi	44
5 ÖRNEK SİSTEM İNCELEMESİ.....	52
5.1 154 kV' LUK İLETİM HATTI İÇİN ÖRNEK SİSTEM TASARIMI	53
5.1.1 İletken Seçimi	53
5.1.2 Kısa İletim Hattı Olması Durumu	54

5.1.3	100 km Uzunluğunda İletim Hattı Olması Durumu	57
5.1.4	150 km Uzunluğunda İletim Hattı Olması Durumu	58
5.2	PARAMETRE KESTİRİMİ	59
5.2.1	Zaman Domeni için Sunulan Adaptif Parametre Kestirimi ile Elde Edilen Veriler	60
5.2.2	Fazör Domeni için Sunulan Parametre Kestirimi ile Elde Edilen Veriler.....	71
6	SONUÇ ve ÖNERİLER	97
	KAYNAKLAR.....	100
	EK-A: LYAPUNOV TEORİSİ.....	103
A.1	GİRİŞ	103
A.2	KARARLILIK KAVRAMI.....	103
A.2.1	Lyapunov Kararlılığı.....	103
	EK-B: ADAPTİF PARAMETRE KESTİRİMİ	107
B.1	KISA HAT UYGULAMASI.....	107
B.2	UYGULAMA SONUÇLARI	107
	EK-C: K MATRİSİNİN ELEMANLARININ BULUNMASI	111
C.1	EŞZAMANLI ÖRNEKLEME İLE PARAMETRE KESTİRİMİ	111
C.2	EŞZAMANLI OLMAYAN ÖRNEKLEMELERLE PARAMETRE KESTİRİMİ	113
C.2.1	Doğrusal Kestirimci.....	113
C.2.2	Doğrusal Olmayan Kestirimci.....	116
	EK-D: EŞZAMANLI OLMAYAN ÖRNEKLEME İÇİN HAZIRLANAN MATLAB DOSYASI	118
	EK-E: MATLAB-SİMULİNK' TE OLUŞTURULAN ÖRNEK SİSTEM MODELİ.....	121
	ÖZGEÇMİŞ	122

KISALTMALAR

EMTP	: Electro Magnetic Transient Program
ATP	: Alternative Transient Programs
MATLAB	: Matrix Laboratory
GPS	: Global Position System
GOES	: Geostationary Operational Environmental System
DFR	: Digital Fault Recorder
DFT	: Discrete Fourier Transform
GSCG	: Global Synchronism Clock Generator
ACSR	: Aluminum Conductor Steel Reinforced
LCC	: Line Constants and Cable Constants
LCP	: Line Constants Program
det(K)	: K matrisinin determinanı
exp	: e tabanında yazılım
Li	: Sistem dengesizliğinin yaratıldığı yer
Fj	: Sistemdeki dengesizliğin kaynağı
G	: Generatör
Max	: Maksimum
Min	: Minimum

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 5.1: Hen İletkeninin Fiziksel Özellikleri	53
Tablo 5.2: ATP-EMTP Programı ile Bulunan İlgilenilen Kısa İletim Hattı Parametreleri	54
Tablo 5.3: Kaynak Özellikleri	55
Tablo 5.4: Hat Parametreleri	57
Tablo 5.5: Kaynak İç Empedansı	57
Tablo 5.6: Hat Parametreleri	58
Tablo 5.7: Kaynak İç Empedansı	58
Tablo 5.8: Hat Parametreleri	58
Tablo 5.9: Kaynak İç Empedansı	58
Tablo 5.10: Göz Önüne Alınan Senaryoların Sistemdeki Konumları.....	59
Tablo 5.11: Göz Önüne Alınan Dengesiz Çalışma Durumları.....	59
Tablo 5.12: 20kHz ile 100kHz Örnekleme Frekansı Sonuçlarının Karşılaştırılması	65
Tablo 5.13: 0.001Ω ile 50Ω Arıza Direncinin Parametre Kestirimine Etkisi	67
Tablo 5.14: Dengesiz Arızalarda Hat Parametre Kestirimi.....	69
Tablo 5.15: İlgilenilen Hatta Anahtarlama Durumunda Hat Parametre Kestirimi	71
Tablo 5.16: Kısa İletim Hattı Pozitif Dizi K Matrisi Elemanları	72
Tablo 5.17: Kısa İletim Hattı Pozitif Dizi Parametreleri	72
Tablo 5.18: L2 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları.....	75
Tablo 5.19: L2 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri	75
Tablo 5.20: L3 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları.....	75
Tablo 5.21: L3 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri	76
Tablo 5.22: L4 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları.....	76
Tablo 5.23: L4 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri	76
Tablo 5.24: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (50Ω).....	77
Tablo 5.25: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (50Ω)	77
Tablo 5.26: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (0.001Ω).....	77
Tablo 5.27: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (0.001Ω)	78
Tablo 5.28: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (Eşzamanlı Olmayan).....	78
Tablo 5.29: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (Eşzamanlı Olmayan)	79

Tablo 5.30: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (Eşzamanlı).....	79
Tablo 5.31: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (Eşzamanlı)	79
Tablo 5.32: 100 km' lik İletim Hattı Pozitif Dizi K Matrisi Elemanları	80
Tablo 5.33: 100 km' lik İletim Hattına Ait Bilgiler.....	81
Tablo 5.34: 100 km' lik İletim Hattına Ait Parametreler	81
Tablo 5.35: L2 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları.....	81
Tablo 5.36: L2 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri.....	81
Tablo 5.37: L2 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri	82
Tablo 5.38: L3 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları.....	82
Tablo 5.39: L3 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri.....	83
Tablo 5.40: L3 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri.....	83
Tablo 5.41: L4 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları.....	83
Tablo 5.42: L4 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri.....	84
Tablo 5.43: L4 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri	84
Tablo 5.44: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (50Ω).....	85
Tablo 5.45: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri (50Ω)	85
Tablo 5.46: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (50Ω)	85
Tablo 5.47: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (0.001Ω).....	86
Tablo 5.48: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri (0.001Ω)	86
Tablo 5.49: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (0.001Ω)	86
Tablo 5.50: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri (Eşzamanlı Olmayan)	87
Tablo 5.51: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (Eşzamanlı Olmayan)	87
Tablo 5.52: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (Eşzamanlı).....	87
Tablo 5.53: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri (Eşzamanlı)	88
Tablo 5.54: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (Eşzamanlı)	88
Tablo 5.55: 150 km' lik İletim Hattı Pozitif Dizi K Matrisi Elemanları	89
Tablo 5.56: 150 km' lik İletim Hattına Ait Bilgiler.....	89
Tablo 5.57: 150 km' lik İletim Hattına Ait Parametreler	89
Tablo 5.58: L2 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları.....	89
Tablo 5.59: L2 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri.....	90
Tablo 5.60: L2 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri	90
Tablo 5.61: L3 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları.....	90
Tablo 5.62: L3 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri.....	91

Tablo 5.63: L3 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri	91
Tablo 5.64: L4 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları.....	91
Tablo 5.65: L4 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri.....	92
Tablo 5.66: L4 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri	92
Tablo 5.67: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (50 Ω).....	93
Tablo 5.68: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri (50 Ω)	93
Tablo 5.69: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (50 Ω)	93
Tablo 5.70: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (0.001 Ω).....	94
Tablo 5.71: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri (0.001 Ω)	94
Tablo 5.72: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (0.001 Ω)	94
Tablo 5.73: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri.....	95
Tablo 5.74: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri	95
Tablo 5.75: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (Eşzamanlı).....	95
Tablo 5.76: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri (Eşzamanlı)	96
Tablo 5.77: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (Eşzamanlı)	96
Tablo B.1: R ve L Değerleri.....	109

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 : Elektrik Enerji Sistemi [14]	5
Şekil 2.2 : Toprak Dönüşlü Carson Hattı [18]	13
Şekil 2.3 : Toprak Dönüşlü Üç Fazlı Hat [18].....	15
Şekil 3.1 : Kısa İletim Hatları İçin Eşdeğer Devre [4]	17
Şekil 3.2 : Endüktif ve Kapasitif Vektör Diyagramı [4].....	18
Şekil 3.3 : İki Kapılı Hat Gösterimi.....	19
Şekil 3.4 : Nominal π Devresi [4].....	20
Şekil 3.5 : Nominal T Devresi [4]	20
Şekil 3.6 : Uzun İletim Hatları [4]	21
Şekil 3.7 : Çaprazlanmış Hat [11].....	23
Şekil 3.8 : Tek Faz-Toprak Arızası [18]	25
Şekil 3.9 : Faz-Faz Arızası [18]	25
Şekil 3.10 : İki Faz-Toprak Arızası [18].....	25
Şekil 3.11 : Üç Faz-Toprak Arızası [18].....	26
Şekil 3.12 : Tek Faz Açma [18]	27
Şekil 3.13 : İki Faz Açma [18].....	27
Şekil 4.1 : Carson Hesaplamalarında Kullanılan Görüntü Yöntemi [21]	34
Şekil 4.2 : $n = 2$ için İletken [21]	36
Şekil 4.3 : İletkenler Arası Uzaklık [25]	37
Şekil 4.4 : İletim Hattı Geometrisi [25]	38
Şekil 4.5 : R ve L Elemanlarından Oluşan Kısa İletim Hattı	42
Şekil 4.6 : Enerji İletim Hattı İki Kapılı Modeli [7]	44
Şekil 5.1 : Örnek Sistem Şeması.....	52
Şekil 5.2 : Seçilen Tek Devre A2 Direk Tipinin Özellikleri	54
Şekil 5.3 : 20kHz Örneklem Frekansında Hatbaşı Gerilimleri	61
Şekil 5.4 : 20kHz Örneklem Frekansında Hatbaşı Akımları	62
Şekil 5.5 : 20kHz Örneklem Frekansında Hatsonu Gerilimleri	62
Şekil 5.6 : Modal Dönüşüm Sonrasında Hatbaşı Gerilimleri	63
Şekil 5.7 : Modal Dönüşüm Sonrasında Hatbaşı Akımları	63
Şekil 5.8 : Modal Dönüşüm Sonrasında Hatsonu Gerilimleri	64
Şekil 5.9 : Pozitif Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi (20 kHz Örneklem Frekansı)	64
Şekil 5.10 : Negatif Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi (20 kHz Örneklem Frekansı)	65
Şekil 5.11 : Pozitif Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi (100 kHz Örneklem Frekansı)	66
Şekil 5.12 : Negatif Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi (100 kHz Örneklem Frekansı)	66
Şekil 5.13 : Sıfır Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi	67
Şekil 5.14 : Pozitif Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi	68
Şekil 5.15 : Negatif Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi.....	68
Şekil 5.16 : Sıfır Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi	69
Şekil 5.17 : Pozitif Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi	70
Şekil 5.18 : Negatif Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi.....	70
Şekil 5.19 : Hatbaşı Gerilimleri (Kısa Hat, L2F1)	73

Şekil 5.20 : Hatbaşı Akımları (Kısa Hat, L2F1)	73
Şekil 5.21 : Hatsonu Gerilimleri (Kısa Hat, L2F1)	74
Şekil 5.22 : Hatsonu Akımları (Kısa Hat, L2F1)	74
Şekil A.1 : Kararlılık [27].....	104
Şekil A.2 : Asimptot Kararlılık [27]	105
Şekil B.1 : R ve L Elemanlarından Oluşan Kısa İletim Hattı	107
Şekil B.2 : Örnek İletim Hattı	107
Şekil B.3 : 4.5 MW' lık Yük için Çıkışta Elde Edilen Sistem Hatası	108
Şekil B.4 : 120 MW' lık Yük için Çıkışta Elde Edilen Sistem Hatası	108
Şekil B.5 : Direnç Değerlerinin Karşılaştırılması	110
Şekil B.6 : Endüktans Değerlerinin Karşılaştırılması	110
Şekil E.1 : Örnek Sistem Modeli.....	121

SEMBOL LİSTESİ

R	: Direnç (İletkenin alternatif akıma karşı gösterdiği direnç)
Ω	: Ohm, direnç birimi
L	: Endüktans
H	: Henry, endüktans birimi
C	: Kapasite
F	: Farad, kapasite birimi
G	: Kondüktans (Kaçak iletkenlik)
P	: Güç
I_i	: i fazına ait akım
A	: İletken kesidi
l	: İletken uzunluğu
ρ	: İletken öz direnci
DA	: Doğru akım
R_{DA}	: Doğru akım direnci
α_t	: Sıcaklık katsayısı
μ	: Manyetik geçirgenlik
D	: İletkenlerin eksenleri arasındaki uzaklık
D_s, r	: İletkenin yarıçapı
GMD	: İletkenler arası geometrik ortalama uzaklık
GMR	: İletkenlerin geometrik ortalama yarıçapı
V_i	: i . iletkenin toprağa göre potansiyeli
Q_i	: i . iletkenin taşıdığı elektrik yükü
ϵ_0	: Havanın dielektrik sabiti
Z	: Empedans
z	: Birim uzunluğun empedansı
Z_c	: Karakteristik empedans
Y	: Paralel admitans
y	: Birim uzunluğun paralel admitansı
γ	: Yayılma sabiti
ω	: $2 \times \pi \times f$
f	: Frekans
Hz	: Hertz
α	: Zayıflama katsayısı
β	: Faz sabiti
D_{at}	: Dönüş iletkeninin toprağın altındaki derinliği
s	: Hat uzunluğu
r_t	: Toprak direnci
z_{ab}	: a ve b fazları arasındaki empedans
z_{at}	: a ve t toprak fazı arasındaki empedans
ϕ_V	: Gerilimin faz açısı
ϕ_i	: Akımın faz açısı
V_S	: Hatbaşı gerilim vektörü
V_R	: Hatsonu gerilim vektörü
I_S	: Hatbaşı akım vektörü
I_R	: Hatsonu akım vektörü

A, B, C, D	: 4 uçlu devre sabitleri
Z_{ij}, Z_i	: i letkeninin empedansı
Z_{ik}	: i ve k iletkenleri arasındaki karşılıklı empedans
Z_t	: Toprak empedansı
Z_f	: Arıza direnci
V_{faz}	: Faz gerilimi
V_{mod}	: Mod gerilimi
I_{faz}	: Faz akımı
I_{mod}	: Mod akımı
T_V	: Gerilim dönüşüm matrisi
T_I	: Akım dönüşüm matrisi
Λ	: Öz vektör matrisi
S	: Simetrik bileşenler dönüşüm matrisi
A	: Simetrik bileşenler operatörü
M	: Karrenbauer dönüşüm matrisi
T_{CL}	: Clarke dönüşüm matrisi
$[T_{CL}]^{-1}$	: Clarke dönüşüm matrisinin tersi
$[T_{CL}]^T$	: Clarke dönüşüm matrisinin traspozesi
$0, \alpha, \beta$	: Modlar
Z_{geo}	: Hattın geometrik yapısının empedansa olan etkisi
Z_{earth}	: Toprağın empedansa olan etkisi
Z_{skin}	: Deri etkisinin empedansa etkisi
h_i	: i iletkeninin yerden yüksekliği
D_{ij}	: i iletkeni ile j iletkeninin görüntüsü arasındaki uzaklık
n	: İletkendeki toplam tel sayısı (damar sayısı)
n_0	: Örgülü iletkenlerin dış tabakasındaki alüminyum damar sayısı
r_c	: Örgülü iletkenin yarıçapı
r_{gm}	: Örgülü iletkenin geometrik ortalama yarıçapı
k	: Düzeltme katsayısı
μ_r	: Bağıl manyetik geçirgenlik
d_{min}	: İletkenler arası en küçük uzaklık
u	: Sistemin giriş büyüklüğü
x	: Sistemin durum değişkeni
a, b	: Bilinmeyen parametreler
$\hat{a}$	: a parametresinin kestirimi
$\hat{b}$	: b parametresinin kestirimi
$\hat{x}$	: Kestirilen durum değişkeni
ϵ	: Kestirim hatası
a_m	: Tasarım sabiti
$\tilde{a}$	: a parametresinin kestirimine ilişkin hata
$\tilde{b}$	: b parametresinin kestirimine ilişkin hata
V'	: V fonksiyonunun türevi
K	: $ABCD$ elemanlarından oluşan matris
Z_K	: Kısa devre giriş empedansı
Y_L	: Açık devre giriş admitansı
G	: Ağırlık matrisi
H	: Jacobien matrisi
σ_i	: i . değere ilişkin standart sapma
Y_{ij}	: Admitans matrisinin i . satır ve j . sütununda bulunan eleman
I_a	: Akımın aktif bileşeni
I_r	: Akımın reaktif bileşeni
$\Delta\phi$	: Akımın ve gerilimin açıları arasındaki fark
σ_v	: Gerilimin standart sapması

σ_i	: Akımın standart sapması
$\sigma_{V, \text{mod}}$	: Mod geriliminin standart sapması
$\sigma_{I, \text{mod}}$	: Mod akımının standart sapması
M	: Kullanılan örnek sayısı
σ_R	: Direncin standart sapması
σ_L	: Endüktansın standart sapması
Z_0	: Sıfır dizi empedansı
Z_1	: Pozitif dizi empedansı
Y_0	: Sıfır dizi paralel admitansı
Y_1	: Pozitif dizi paralel admitansı
mho	: 1/ohm
km	: kilometre
kHz	: kilo Hertz
t	: Zaman
sn	: Saniye
kVA	: kilo Volt Amper
kW	: kilo Watt

ENERJİ İLETİM HATTI PARAMETRELERİNİN KESTİRİMİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Gelişen teknolojiye bağlı olarak hız kazanan sanayileşme ile elektrik enerjisine olan gereksinim büyük ölçüde artmıştır. Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımı ile sorumlu bulunan kuruluşların başlıca amacı, üretilen enerjiyi tüketicilere sürekli bir koordinasyon ile ve arz güvenilirliği, ekonomik, verimlilik, iyi bir çevre performansı, sosyal hedefler gibi sorumlulukları taşıyarak sağlamaktır [1].

Elektrik üretim merkezlerinde üretilen elektrik enerjisinin, tüketicilere ulaştırılması amacıyla elektrik enerji iletim sistemleri tesis edilmektedirler. Enerji iletim sistemleri üretilen elektrik enerjisini tüketiciye, yeraltı kabloları ile veya iletim hatları ile olmak üzere iki şekilde iletilir. Enerjinin iletim hatları yoluyla iletiminin yeraltı kabloları ile iletilmesine göre daha çok tercih edilmesinin nedeni daha ekonomik olmasıdır [2]. Buna karşılık elektrik enerjisinin iletim hatları ile iletilmesinde bir takım problemler ile karşılaşmaktadır. Enerji iletim hatlarının değişen bölgesel, atmosferik ve çalışma koşullarından etkilenmeleri ve parametrelerinin bu faktörlerle değişmesi, karşılaşılan problem arasında en önemli olanıdır.

Sistem planlaması ve işletmesi, sistemi kurmak ve güvenilir ve ekonomik işleyişini sağlamak amacını içermektedir ve bu amaçla uygulanan çalışmaların farklılığına gereksinim duymaktadır. Kısa devre çalışmaları, yük akışı çalışmaları, geçici durum çalışmaları, kararlı durum çalışmaları, bu çalışmalar arasında yer almaktadır [2]. Bu çalışmalar ile, gerçekte varolan enerji iletim sisteminin, yük ve üretim miktarına, yalıtım maliyetlerine, iletim sistemi elemanlarının kapasitelerine, iletim koridorlarına ilişkin kısıtlamalara ve öngörülen güvenilirlik kriterine bağlılığı test edilmektedir. Test aşamasında, bilgisayar programları ve benzetimlerden yararlanılmaktadır. Değişik çalışma koşulları altında ortaya çıkabilecek problemlere çözüm bulmada iletim hattı parametrelerini kestirebilmek çok önemlidir. Parametrelerin kestirimi ile, hassas arıza analizlerinde ve arıza bölgelerinin belirlenmesinde hatanın en aza indirilmesi, sayısal koruma aygıtlarının koruma işlevlerini yerine getirmesi, en doğru ve en kısa sürede gerekli müdahalenin yapılabilmesi ile elektrik enerji sisteminin güvenli ve güvenilir çalışması sağlanmaktadır.

İletim hattını oluşturan temel birimler, hattı meydana getiren iletkenlerin birim uzunluğunun direnci (R) ve endüktansının (L) yanı sıra; birbirine paralel ve izole edilmiş bu hat iletkenleri arasında varolan kapasite (C) değeri ile yalıtkan maddenin mükemmel olmaması nedeniyle küçük de olsa varolan kondüktans (G)'dır. R , L , C , G parametreleri hat iletkeninin fiziksel özelliklerine, boyutlarına, yapılış biçimine göre hesaplanıp; frekansla ve çevre koşullarıyla (hat üzerindeki bir bölümün bakım nedeniyle yeni bir iletkenle değişiminin gerekmesi, eklenen hatlar, arazi koşulları nedeniyle hattın güzergahının değişimi, atmosferik koşullar, vb.) değişmektedir [3].

Enerji iletiminde önemli yer tutan bu parametrelerin hesaplanmasının yanında en etkin şekilde kestirilebilmeleri için ulusal ve uluslararası bir takım çalışmalar

yapılmaktadır [4-10]. Analitik yolla elde edilen parametrelerde kullanılan eşitliklerin çok sayıda veriye ve ek ölçüm aletlerine duyduğu gereksinim nedeniyle yaşanan zorluk aşılmaya çalışılmaktadır. Teknolojinin gelişimi ve bu gelişim ile birlikte kullanılabilen bilgisayar programları ve benzetimleri ile değişik çalışma koşulları altında ortaya çıkabilecek sorunların eşzamanlı olarak belirlenmesi ve sorunlara çözüm bulunması amacıyla ele alınan iletim hattı parametrelerinin kestirebilmesi konusu önem kazanmıştır. Bu nedenle zaman ve fazör domende çözümler elde etmeye dayalı yöntemler geliştirilmektedir.

Tez çalışmasının amacı, enerji iletim hattı parametrelerinin kestiriminin incelenmesidir. İletim hattı parametreleri özellikleri ve etkilendikleri faktörlerle birlikte ele alınarak, iletim hatlarının modellenme şekilleri ve iletim sisteminde meydana gelebilecek simetrisizlikler ile dönüşüm yöntemleri açıklanmıştır. Elektrik enerji iletim hattı parametrelerinin analitik olarak hesaplanması ve göz önüne alınan çeşitli parametre kestirim yöntemlerine ait teorik bilgiler verilmiştir. Analitik yolla parametreleri hesaplanarak oluşturulmuş bir örnek sistem üzerinde, iletim hattı parametre kestirimi için biri zaman domeninde, diğeri fazör domenindeki verileri kullanan, göz önüne alınan iki yöntemin çeşitli çalışma koşullarını içeren uygulamalara ilişkin sonuçlara yer verilmiştir. 154 kV' luk örnek sisteme ait iletim hattı parametrelerinin analitik yolla hesaplanması EMTP-ATP programıyla, çeşitli senaryolar şeklinde ele alınarak incelenen sistem çalışma koşulları altında ilgilenilen iletim hattına ait parametrelerin kestirimi MATLAB-Simulink programıyla gerçekleştirilmiştir. Örnekleme frekansının değişiminin sistem benzetimi üzerindeki etkisi, arıza yerinin etkisi, arıza direncinin büyük bir değer seçiminin parametre kestirimine olan etkisi, ilgilenilen hatta açma durumlarında parametre kestiriminin gerçekleşip gerçekleşmemesi, örneklemin eşzamanlı olması gerekliliğinin araştırılması gibi durumlar incelenmiştir. Kestirim sonucunda elde edilen sonuçlar tablolar halinde analitik değer ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tez çalışmasının içerdiği incelemeler neticesi elde edilen sonuçlar ve öneriler son bölümde sunulmuştur.

AN EXAMINATION OF POWER TRANSMISSION LINE PARAMETERS' ESTIMATION

SUMMARY

Rapidly increasing industrialization due to the improvements in the technology has increased the demand for electrical energy which is differentiated from other types of energies with its discrete characteristics. Having a daily and seasonal cyclical demand, impossibility of mass storage, difficulty of ensuring a stable production-capacity ratio, having long life facilities with high initial investment needs, and the importance for the community are some of these discrete characteristics [1]. Keeping these characteristics in mind, companies who are responsible for production or distribution of electrical energy has additional responsibilities such as supplying the energy with perfect coordination, security, economy, efficiency and supplying it to the exact demand in the cleanest way possible. The fact that these responsibilities should be fulfilled for each and every demand point makes it a very complex system and increases the importance of the energy transmission system.

Energy transmission systems are the connection between the electric producing plants and the electricity demanding customers. These systems use two different ways to transmit the energy which are underground or overhead transmission lines. The overhead transmission lines are preferred more than the underground lines due to the economical concerns [2]. Even if the costs are lower in transmitting through aerial transmission lines some other problems comes up. The effects of rapidly changing regional, atmospheric and other conditions on the transmission lines and the parameters changing accordingly are main problems that can be faced in the design of these systems.

In the planning stage of a system the goal is to set up the system and in the operating stage the goal is to provide a secure and cost-efficient service. Different working conditions should be considered to achieve this goal. Such conditions are short circuit, power flow, transient analysis and stability analysis [2]. Other than these conditions, the system should also be tested with other criteria in mind such as the actual load and the production quantities of the transmission system, isolation costs, element capacities, several environmental restrictions and other criteria for improving security. Computer and simulation technology is used in the initial testing stage. The estimation of the transmission system parameters is crucial in solving problems in the system which can be seen in different working conditions. Correctly determining these parameters is important for making an accurate fault determination, minimizing fault location errors, using the protective elements effectively and acting quickly and accurately to the problems in the system hence having a secure and trusted working condition.

The main elements of a transmission line are the resistance (R) and the inductance (L) of a unit length of the line; capacity (C) between two isolated parallel lines and

finally, even if it is very small, the conductance (G) due to imperfect isolation of the materials. R , L , C and G parameters are calculated by looking at the physical characteristics, length and production method of the transmission lines and they are effected by the frequency and the working conditions such as the need of changing a part of the line for improvement, addition of new lines to the system, rerouting the lines due to territorial restrictions, environmental considerations and so on [3].

Other than the current calculation methods, several national and international projects are going on for the estimation of such important parameters [4-10]. Scientists are working on methods for overcoming the problems of the analytical calculations which are mainly caused by the excessive input variables and different measurement techniques. With the improvements in technology and newly born computer programs and simulation capabilities as a result of these improvements, it is now possible to simulate the system with different working environments and finding solutions to upcoming problems hence to estimate the parameters more efficiently.

Philippot and Maun's works on estimation of the impedance and the admittance of an excess loaded transposed transmission line using the current and voltage on both ends of the line is one of the documents that can be found in the literature today [5].

Koglin and Schmidt have suggested a new concept of estimating the parameters using the fault logs of the digital relays on the line terminals during the single-pole autoreclosing, possibly caused intentionally and during an event outside the line section like short circuit current of a phase-to-ground fault [6].

Fault determination and location of fault determination techniques using Phasor Measurement Unit (PMU) also includes line parameter estimation algorithms [7]. The used parameter estimation algorithm is developed for solving the uncertainty in the parameter values caused by the aging of the transmission line.

The method by Gapalakrishnan can estimate adaptive parameters by using the signs of the current and voltage on the both ends of a short transmission line in the time domain [10]. This method uses the measured data for the normal working condition and fault outside of the line to make the estimation of the line modal parameters.

The goal of the thesis is to analyze the estimation of the energy transmission line parameters. The factors effecting the transmission line parameters are analyzed in the second section of the thesis. Third section is made up of the transmission line models and transformation methods for possible transmission system asymmetries. Some theoretical information is given in the fourth section about the analytical calculation method and about two considered methods for estimating transmission line parameters. Fifth section includes the results of two different methods which are using time domain and the phasor domain, for estimating transmission line parameters for an analytically calculated sample system. The sixth section -the final section- includes the analysis of the solutions gathered from previous studies in the thesis and recommendations.

In the actual systems it is not possible to accurately calculate the parameters due to unknown values of the factors that effect the transmission system. Especially frequency, ground resistance, saturation effect are some factors that changes the transmission line parameters' values [11]. The transmission line parameter estimation which is analyzed in this thesis is done using two methods which time

and phasor domain methods via current and voltage values at both line terminals. Lyapunov [10] Theory is used in the estimation which called adaptive parameter estimation using the time domain. In the phasor domain however, current and voltage values in the synchronized and unsynchronized line terminals from the digital relays records are used for estimation [6].

EMTP-ATP program is used to calculate the transmission line parameters of the 154kV sample system. The parameter estimation is done using MATLAB-Simulink program by testing the system with different working conditions in different scenarios. The effects of the sampling frequency used in the simulation, determination the fault location, selection of a high fault resistance on the parameter estimation, possibility of estimating the parameters when single-pole autoreclosing occurs in the line, and the necessity for a simultaneous sampling were analyzed. The estimation results were compared with the analytical values in the form of tables.

As it can also be seen from the results gathered from both time and phasor estimation methods were very accurate. In despite of this, the last section includes recommendations about both methods on possible improvements for their application areas.

1 GİRİŞ

Teknolojinin gelişimi ve sanayileşmenin hız kazanması, elektrik enerjisine olan gereksinimi büyük ölçüde arttırmıştır. Buna paralel olarak günümüzde her an elektrik enerjisinin kullanıma hazır olmasına duyulan gereksinim de, elektrik enerjisinin üretim yerlerinden tüketicilere ulaştırılmasındaki önemi arttırmaktadır.

Elektrik enerji iletim sistemleri, elektrik üretim merkezlerinde üretilen elektrik enerjisinin, tüketicilere ulaştırılması amacıyla tesis edilmektedirler. Üretilen elektrik enerjisi, yeraltı kabloları veya hava iletim hatları ile iletilerek tüketime sunulmaktadır. Elektrik enerjisinin iletimi genellikle yeraltı kablolarına göre daha ekonomik olan hava iletim hatları ile yapılmaktadır [1,2]. Ancak elektrik enerjisinin hava iletim hatları ile iletilmesinde bazı problemler ile karşılaşmaktadır. Bunlardan en önemlisi, enerji iletim hatlarının değişen bölgesel, atmosferik ve çalışma koşullarından etkilenmeleri ve hat parametrelerinin bu faktörlerle değişmesidir.

Sistem planlaması ve işletmesi, sistemi kurmak ve güvenilir ve ekonomik işleyişini sağlamak amacını içermektedir. Enerjinin kaliteli olması ve beslemenin güvenilir olması için sistem planlanması ve işletimi aşamalarında yapılan benzetimlerinde yük ve üretim oranı, yalıtım maliyeti ve iletim sistemi elemanlarının kapasiteleri araştırılmaktadır [1]. Bu nedenle iletim hattının parametrelerinin varolan değerlerine en yakın şekilde kullanılmaları önemlidir. Özellikle sayısal koruma aygıtlarının koruma işlevini yerine getirmesinde, hassas arıza analizleri ve arıza bölgelerinin belirlenmesinde hatanın en aza indirilmesi, elektrik enerji sisteminin güvenli ve güvenilir çalışması açısından gerekli olmaktadır.

İletim hattını oluşturan iletkenlerin birim uzunluğunun direnci (R) ve endüktansı (L) vardır. Ayrıca birbirine paralel ve yalıtılmış olan hat iletkenleri arasında bir kapasite (C) varolduğu gibi yalıtkan maddenin mükemmel olmaması nedeniyle küçük de olsa bir kondüktans (G) mevcuttur. Bu parametreler hattın yapıldığı maddenin fiziksel özelliklerine, boyutlarına, yapılış biçimine göre hesaplanıp; frekansla ve çevre koşullarıyla (atmosferik koşullar, hat üzerindeki bir bölümün bakım nedeniyle yeni bir iletkenle değişiminin gerekmesi, eklenen hatlar, arazi koşulları nedeniyle hattın güzergahının değişimi vb.) değişmektedir [2,3].

Enerji iletiminin yapıtaşı olan hat parametrelerinin hesaplanmasının yanında sistem güvenilirliğinin devamlılığını sağlamak amacıyla hat parametrelerinin zaman ve doğruluk açısından en verimli şekilde kestirilebilmeleri gerekmektedir. Bu amaçla iletim hat parametrelerinin kestirimi konusunda çalışmalar yapılmaktadır [4-9,10]. Teknolojik gelişmeler sayesinde, bu çalışmalarda veriyi işleme bölümü öncesinde verinin merkezi sisteme eşzamanlı hale getirilerek iletilmesi sağlanabilmektedir. Verinin kaydedilmesi ve iletilmesi sırasında GPS (Global Position System), yüksek frekans radyo yayını, düşük frekans radyo yayını, GOES (Geostationary Operational Environmental System) gibi sistemlerden yararlanılmaktadır. GPS sistemi tüm kürede yaygın oluşu ve mikro saniye mertebelerinde duyarlılığı sayesinde kullanışlıdır [4,5,12]. GPS sistemi sayesinde kurulmuş olan 24 uydu sistemi ile dünyanın herhangi bir yerinde en doğru zaman belirlenebilmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte ortaya çıkan bu sistemler, bilgisayar programları ve benzetimlerinden yararlanılarak iletim hattında değişik çalışma koşulları altında ortaya çıkabilecek sorunlara çözüm bulunması amacıyla iletim hattı parametrelerinin en doğru şekilde kestirebilmesi konusunda araştırmalar yapılmaktadır [4-10].

İletim hattı parametre kestirimi konusunda yapılan araştırmalar arasında, Philippot ve Maun tarafından sunulan aşırı yüklü iletim hattının parametre kestiriminin ele alındığı çalışma, çaprazlanmamış bir hattın iki ucunda sayısal olarak ölçülen akım ve gerilim değerlerinin kullanılmasıyla empedans ve admitansların kestirilebildiği bir yöntem içermektedir [5]. Bu yöntem kısa iletim hatları için uygundur. Toplu parametrelili sistem olarak modellenen iletim hattının normal çalışma durumu ve tek fazlı arıza durumu ele alınmıştır.

Yaygın asimetrik enerji sistemi koşulları arasında tek kutuplu anahtarlama ya da harici tek faz-toprak arızaları yer almaktadır. Bu koşullar altında hat terminallerindeki sayısal rölelerden alınan arıza kayıtları, iletim hattı parametrelerinin kestirimine ilişkin Koglin ve Schmidt tarafından verilen bir diğer yöntemde temel alınmıştır [6]. İletim hattının normal koşulları altında ek ölçüm aletleri kullanılmadan hattın dizi parametrelerinin elde edilebilmesi, yöntemin sağladığı avantajdır. Çalışmanın eksikliği, çaprazlanmamış iletim hatlarının ele alınmamasıdır.

Aynı zamanda bir hat parametre kestirimi algoritmasını da içeren fazör ölçüm (PMU-Phasor Measurement Unit) temelli arıza algılama ve yerini belirleme tekniğine ilişkin çalışma, araştırmalar arasında yer almaktadır [7]. Yer alan parametre kestirim algoritması, arıza yeri belirlenmesinde hatayı arttırması nedeniyle önem taşıyan iletim hattının parametre belirsizliğini çözmek amacıyla geliştirilmiştir. Parametre

belirsizliğinin kaynakları arasında ısı değişimi, hatların simetrisizliği, yk akışındaki değişim yer almaktadır. PMU tekniği harmoniklerin, gürültü ve nominal frekans çalkantılarının fazörlerin hesabı üzerindeki etkilerinin giderilmesi amacıyla DFT (Discrete Fourier Transform-Ayrık Fourier Dönüşümü) filtreleme içermektedir.

Hat uçlarındaki akım ve gerilim işaretlerini ele alarak kısa iletim hattı için adaptif parametre kestirimi gerçekleştiren yöntem [10] ise hat mod parametrelerinin kestiriminde, normal çalışma ve hat dışındaki bir arıza için ölçülecek verileri kullanmaktadır.

Bu tez çalışmasında iletim hattı parametrelerinin kestiriminin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde iletim hattı parametreleri ve özellikleri açıklanarak, parametreleri etkileyen faktörler incelenmiştir. İletim hatlarının modellenme şekilleri, hatlara ait empedans matrislerinin elde edilmesi ve iletim sisteminde meydana gelebilecek simetrisizlikler ile dönüşüm yöntemleri üçüncü bölümde ele alınmıştır. Elektrik enerji iletim hattı parametrelerinin analitik olarak hesaplanması ve göz önüne alınan çeşitli parametre kestirim yöntemlerine ait teorik bilgiler dördüncü bölümde verilmiştir. Beşinci bölümde, analitik yolla parametreleri hesaplanarak oluşturulmuş örnek sistem üzerinde, iletim hattı parametre kestirimi için biri zaman domeninde, diğer i fazör domenindeki verileri kullanan göz önüne alınan iki yöntemin çeşitli çalışma koşullarını içeren uygulamalara ilişkin sonuçlar yer almaktadır. Uygulama sonuçları tablolar şeklinde verilmiştir. Altıncı bölümde ise tez çalışmasının içerdiği incelemeler neticesi elde edilen sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

2 ELEKTRİK ENERJİ İLETİM SİSTEMİ

Yapı, teknoloji, maliyet karakteristiği ve fonksiyon; elektrik enerji sistemlerinin birbirlerinden farklı özelliklere sahip olan dört ana bölümden oluşmasını sağlayan faktörlerdir [11]. Belli başlı dört ana bölüm;

1. Santraller (Elektrik enerjisi üretilmektedir.)
2. Ulusal ağ (enterkonnekte) şebeke (Santrallerin birbirleriyle olan bağlantısı sağlanmaktadır.)
3. İletim şebekesi (Üretilen elektrik enerjisi dağıtılacak bölgeye taşınmaktadır.)
4. Dağıtım şebekesi (Elektrik enerjisinin belirli bir bölgede tüketicilerin kullanımına sunulması sağlanmaktadır.)

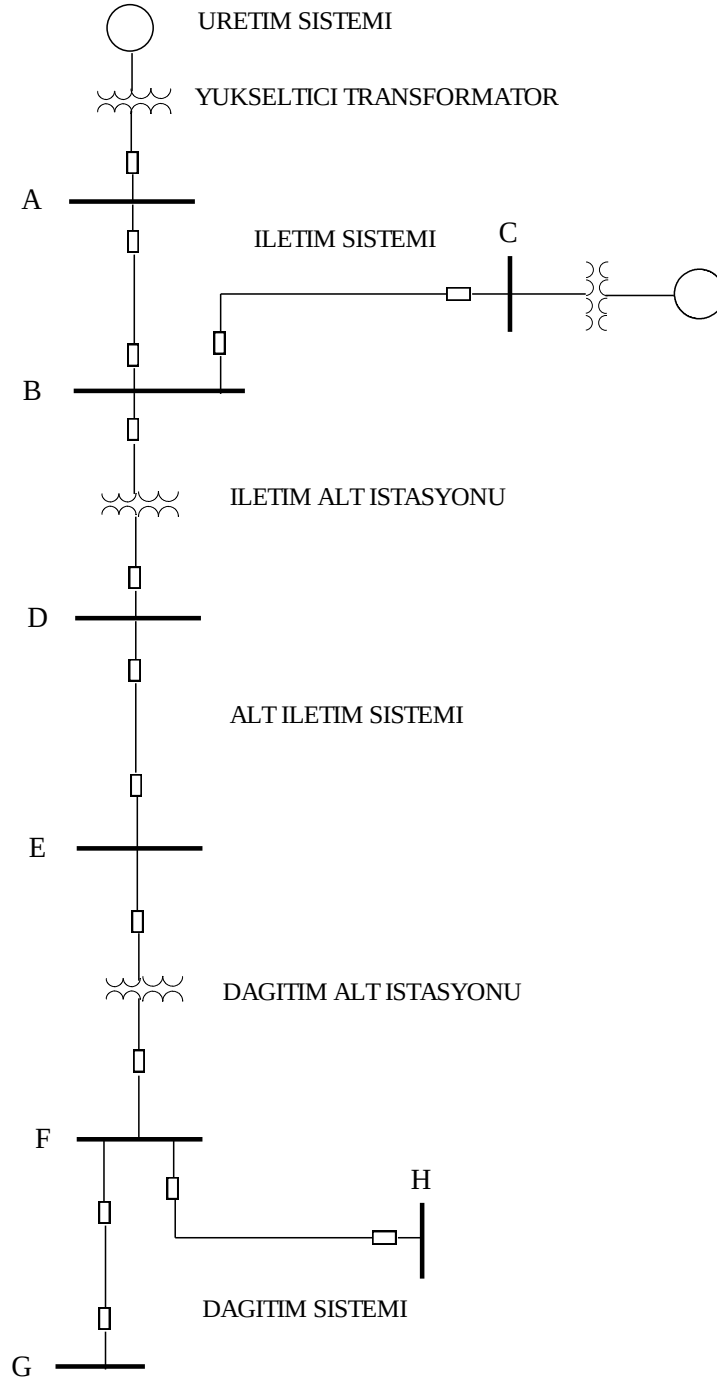
olarak belirtilmektedir.

Genel olarak enerji iletim hatları, enerji kurumunun servis bölgesi içerisindeki elektrik enerjisini üretim merkezlerinden yük merkezlerine iletmek ve farklı enerji kurumları arasında elektrik enerjisi alışverişini gerçekleştirmek gibi, iki temel işlevi yerine getirmektedirler. Farklı servis bölgelerini birbirine bağlayarak, enerji alışverişini sağlayan enerji iletim hatları, enerji alışverişini yapan kurumların işlettikleri sistemlerin uyumlu çalışan bir grup oluşturabilmelerine olanak vermektedir.

Santrallerdeki generatör uçlarında orta gerilim kademelerinde üretilen elektrik enerjisi, Avrupa'da olduğu gibi yurdumuzda da 380 kV' luk ulusal ağ şebeke ve 154 kV' luk iletim hatları vasıtasıyla enerji gereksinimi bulunan bölgelere taşınmaktadır [11]. Ana indirici merkezlerde orta, dağıtım trafo merkezlerinde ise alçak gerilim kademelerine dönüştürülerek tüketicilere ulaştırılmaktadır.

İletim şebekelerinin tasarımına, tüketicilerin bu şebekeden neler beklendiği göz önünde tutularak başlanmalıdır. Bu beklentiler; enerjinin kaliteli olması (gerilim ve frekansın sabit olması), beslemenin güvenilir olması, enerjinin ucuza sağlanmasıdır. Tüketicilerin bu şekilde özetlenebilen beklentileri daha tasarım aşamasında işletme

elemanlarının standartlaştırılması, gerilim seviyelerinin seçimi, uygun iletim şebekesi şeklinin seçimi ile karşılanabilmektedir [1]. Enerji iletim sisteminin optimal seçiminin belirlenmesi oldukça güç ve önemli bir işlemdir. Bu güçlük, herhangi bir sistem planlaması ve işletmesi yapılırken göz önüne alınması gereken çeşitli kısıtlamaların matematiksel olarak tanımlanması ve analiz edilmesinde karşılaşılan zorluklardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.1 : Elektrik Enerji Sistemi [14]

Elektrik enerji sistemlerinin planlama ve kurulmasında mühendislik yönünden başlıca iki etkenin olduğu söylenebilmektedir. Bunlar yeterlilik (güvenlilik) ve güvenilirliktir. Yeterlilik, puant yükte tüm tüketici merkezlerinin güç gereksinimlerini karşılayabilmek için yeterli üretim ve iletim kapasitesinin sağlanması, güvenilirlik ise herhangi bir arıza sonucu sisteme gelecek bir darbenin, bir zincirleme arızalar dizisine yol açmasının ve böylece sistemin çökmesinin önlenmesi şeklinde açıklanabilmektedir [1].

Sistem planlaması ve işletmesi, sistemi kurmak ve bu zorlukları aşarak sistemin güvenilir ve ekonomik işleyişini sağlamak amacıyla uygulanan çalışmaların farklılığına gereksinim duymaktadır. En tipik çalışmalar; kısa devre çalışmaları, yük akışı çalışmaları, geçici durum çalışmaları, kararlı durum çalışmalarıdır [2]. Çalışmalar ile, mevcut enerji iletim sisteminin, yük ve üretim miktarına, yalıtım maliyetlerine, iletim sistemi elemanlarının kapasitelerine, iletim koridorlarına ilişkin kısıtlamalara ve öngörülen güvenilirlik kriterine bağlılığı test edilmektedir. Bu aşamada, bilgisayar programları ve benzetimlerinden yararlanılmaktadır [4-10]. Değişik çalışma koşulları altında ortaya çıkabilecek problemleri uygun şekilde yansıtmak ve çözüm bulmak üzere iletim hattı parametrelerini kestirebilmek çok önemlidir. Parametrelerin kestirimi ile, hassas arıza analizlerinde ve arıza bölgelerinin belirlenmesinde hatanın en aza indirilmesi, sayısal koruma aygıtlarının koruma işlevlerini yerine getirmesi, en doğru ve en kısa sürede gerekli uygulamanın yapılabilmesi sağlanmaktadır.

Bu nedenle, sistemin işletilmesi sırasında sorun yaşanmaması için yani besleme sürekliliğinin sağlanması, hattın denetlenmesi, bakımının ve onarımının kolaylıkla yapılabilmesi, oluşabilecek enerji ve ekonomik kayıpların engellenmesi için iletim şebekelerinin parametre kestirimi önemle ele alınmalıdır.

2.1 ENERJİ İLETİM HATLARI PARAMETRELERİ

Bir enerji iletim hattında akım, gerilim ve güç gibi çeşitli elektriksel büyüklükler arasındaki bağlantıları belirlemek ve bu büyüklükleri hesaplamaya yarayan, hattın hat parametreleri olarak adlandırılan büyüklükler vardır. İletim hatlarını oluşturan iletkenlerin her birim uzunluğunun bir direnci (R) ve bir endüktansı (L) vardır [2]. Bunun yanı sıra birbirine paralel ve araları yalıtılmış olan hat iletkenleri arasında bir kapasite (C) varolduğu gibi yalıtkan maddenin mükemmel olmaması nedeniyle küçük de olsa bir kaçak iletkenlik (kondüktans) (G) de bulunmaktadır. Bu hat

parametreleri direnç, endüktans, kapasite ve kondüktans bir yerde toplu olmayıp hat boyunca eşit dağılmıştır. Bu nedenle iletim hatlarına dağılmış parametrelili sistemler denir.

İletim hatlarının diferansiyel denklemlerini çözerken hat parametreleri adı verilen R, L, C ve G' nin hattın yapıldığı maddenin fiziksel özelliklerine, (iletkenlik, manyetik geçirgenlik, dielektrik sabiti gibi) boyutlarına ve yapılaş biçimine bağlıdır, frekans ve çevre koşulları tarafından etkilenmektedir. Özellikle direnç, öz endüktans ve kaçak iletkenliğin sabit olmayıp frekansla ve çevre koşullarıyla (örneğin atmosferik koşullarla) değiştiği önemle belirtilmektedir [3]. Belirli frekansta ve çevre koşullarındaki R, L, C, G değerleri alınarak, hat denklemlerinin çözümü elde edilmektedir ve bu denklemlere dayanılarak varılan sonuçlar büyük değişime uğramamaktadır.

2.1.1 Direnç (R)

İletim hatlarında, gerilim düşümüne ve güç kaybına neden olduğu için hat direncinin en doğru şekilde hesaplanması önemlidir. Etkin direnç değeri, iletkende meydana gelen güç kaybının akımın karesine bölünmesine ilişkin

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (2.1)$$

eşitliği ile bulunmaktadır. İletkenin doğru akıma karşı gösterdiği direnç ise

$$R_{DA} = \frac{\rho \times l}{A} [\Omega] \quad (2.2)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada $A [m^2]$ iletken kesiti, $l [m]$ iletken uzunluğu ve $\rho [\Omega m]$ iletkenin öz direncidir [15].

Hava hatlarında kullanılan çelik alüminyum (St-Al) iletkenler eşeksenli bir yapıya sahip olduklarından, damarlar eksene paralel olmayıp eksen boyunca spiral şeklinde bir yol izlerler. Bu durum iletkenlerin direncini %2 arttırmaktadır [3].

Bir iletkenin direnci yapısal özellikleri yanında sıcaklık derecesi ile de değişmektedir. Herhangi bir t_2 sıcaklığındaki direnci, aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$R_{t_2} = R_{t_1} (1 + \alpha_{t_1} (t_2 - t_1)) [\Omega] \quad (2.3)$$

R_{t1} : t_1 sıcaklığındaki direnç değeri

R_{t2} : t_2 sıcaklığındaki direnç değeri

α_{t1} : t_1 sıcaklığındaki sıcaklık katsayısı

Bir iletken içinde akımın, iletkenin merkezi yerine, iletken kesitinin çevresine yayılması olayına deri etkisi denir. Deri etkisi nedeniyle akım iletimi yönünden iletken kesiti küçülmüş olacağından ve direnç de kesitle ters orantılı olduğundan, alternatif akımda direncin değeri büyümektedir. Çok yüksek frekanslarda hemen hemen bütün akım telin yüzeyine yakın çok az derinlikteki silindirik bir borudan akmakta, tüm kesiti kullanmamaktadır.

Yanyana yakın iletkenlerden akan akımlar birbirleri üzerinde çekme kuvveti üretmektedirler. Böylece birbirlerini manyetik alan ve kuvvet bakımından etkilemektedir ve birbirlerine yakın yerlerde akım yoğunluğu artmakta, uzak noktalarında ise azalmaktadırlar [2]. Her biri için akımın aktığı kesit küçülmektedir. Buna yakınlık etkisi denir.

Çok sayıda iletken içeren kablolarda her iletkeniden geçen akım civarındaki iletkenlerde Foucault akımları doğurmaktadır. Bu da ek bir enerji kaybına neden olmaktadır. Sonuçta iletkenin efektif direncin artmış olduğu görülmektedir. Bu olaya radyasyon etkisi denir. İletim hatlarında teller arasındaki uzaklık tel çapına oranla büyük olduğundan, yakınlık ve radyasyon etkisi kablolarinkine göre çok daha az olmaktadır [3].

2.1.2 Endüktans (L)

Uzayda tek başına bulunan silindirik bir iletkenin alternatif akıma karşı gösterdiği empedans saf omik bir direnç ve reaktif bir bileşen olan iletkenin endüktansından oluşmaktadır. İletkenden geçen akımın iletken içinde ürettiği manyetik akımın değişmesi ile oluşan bu 'iç endüktans' frekansla değişmektedir. Bunun sebebi, deri etkisi olayı nedeniyle iletken içinde akım dağılışının değişmesi, yüksek frekanslarda akımın iletken yüzeyine doğru iletilmesidir. Bunun sonucu olarak iletken içindeki magnetik alanın şekli değişmektedir ve iç endüktans frekansın bir fonksiyonu olmaktadır. İletken dışındaki magnetik alana deri etkisi olayının bir etkisi yoktur. Bu nedenle iletken dışındaki magnetik akı değişmelerinin doğurduğu 'dış endüktans' frekanstan bağımsızdır [3]. Manyetik geçirgenlik $\mu [H / m]$ ve iletkenin uzunluğu

l [m] bilgilerinin kullanılmasıyla direncin frekans ile değişimindeki gibi çeşitli frekans aralıklarında endüktansın değişimi de incelenebilmektedir.

Bir iletim hattının endüktansı malzemenin cinsine, iletkenlerinin örgü şekline ve faz iletkenlerinin birbirlerine göre konumlarına bağlıdır. Üç fazlı bir hava hattının endüktansı, (2.4) formülü ile hesaplanabilmektedir. D , iletkenler arası uzaklık, D_s ise iletkenin yarıçapıdır. $\mu_r \approx 1$ ' dir.

$$L = \left(0.2 \ln \frac{D}{D_s} \right) 10^{-7} \text{ [mH / km]} \quad (2.4)$$

GMD , iletkenler arası geometrik ortalama uzaklığıdır. GMR iletkenlerin geometrik ortalama yarıçapıdır. Eğer direkte 3 fazın konumu bir eşkenar üçgen oluşturuyorsa çaprazlama yapmaya gerek duyulmaz ve GMD fazlar arası uzaklığa eşit olmaktadır. Faz iletkenlerinin konumu, eşkenar bir üçgen oluşturmuyorsa 50 km' i aşan hatlarda çaprazlama yapılarak geometrik ortalama uzaklık aşağıdaki denklemlerle bulunmaktadır [15].

$$GMD = \sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ac}} \quad (2.5)$$

$$L = \left(0.2 \ln \frac{GMD}{GMR} \right) 10^{-7} \text{ [mH / km]} \quad (2.6)$$

2.1.3 Kapasite (C)

İki iletken arasındaki efektif kapasite, aralarındaki potansiyel farkının bunlardan birinin taşıdığı elektrik yüküne bölünmesine eşittir, bu ifade (2.7) denklemi ile gösterilmektedir.

$$C = \frac{V_i - V_k}{Q_i} \text{ [F]} \quad (2.7)$$

Burada V_i ve V_k i ve k iletkenlerinin toprağa göre potansiyelleri, Q_i iletkenlerden birinin elektrik yükü, C ise onlar arasındaki efektif kapasitedir. (2.7) denkleminde yola çıkarak r , telin yarıçapı, D eksenleri arasındaki uzaklık ϵ_0 havanın dielektrik sabiti olmak üzere, iletim hattı kapasitesi,

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} [F / m] \quad (2.8)$$

dır. Demet iletken durumunda, d iletkenler arasındaki uzaklık ve r iletkenin yarıçapı olmak üzere denklem [15]

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{r_b}} [F / m] \quad (2.9)$$

şeklini almaktadır.

$$r_b = \sqrt{r \times d} \quad (2.10)$$

Üç fazlı sistemlerde yarıçapları r olan üç iletkenin faz başına oluşturduğu kapasite, çaprazlanmış hatlarda

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{r}} [F / m] \quad (2.11)$$

denklemleri ile tanımlanmaktadır. GMD , iletkenler arası geometrik ortalama uzaklıktır.

2.1.4 Kaçak İletkenlik (G)

İletim hatlarındaki enerji kaybı, hat iletkenlerinin omik direncindeki ısı kaybından başka, iletkenleri birbirinden ayıran yalıtkan ortamlardaki kayıplardan da ileri gelmektedir. Yalıtkanadaki enerji kayıplarının başlıca nedenleri kısaca şunlardır: hiçbir yalıtkanın direnci sonsuz değildir. Çok küçük de olsa her yalıtkanın kendine göre bir iletkenliği vardır. Bunun neden olduğu enerji kaybına ‘yalıtkanlık kaybı’ denilmektedir [16].

İletim hatlarının tutturuldukları porselen ya da cam izolatörler zamanla tozlanmaktadır, kirlenmektedir. Yağmur yağınca ıslanan bu toz ve kir içindeki eriyen madeni maddeler ve tuzlar oldukça iletken bir yol oluştururlar. Böylece her direkte hatları toprağa ve birbirlerine bağlayan bir kaçak iletkenlik meydana gelmektedir [2]. Bunların etkisi ile iletim hattının yalıtkanlığı yağmurlu havalarda kötüleşir. Kar yağdığında ise yalıtkanlık daha da düşer yani iletkenler arası kaçak iletkenlik artmaktadır. Bu yüzden oluşan ek enerji kaybına ‘yüzey kaçağı kaybı’ denilmektedir.

Ne kadar mükemmel yalıtılırsa yalıtılsın, her iletim hattının sıfırdan farklı bir kaçak iletkenliği (G) mevcuttur. G ' nin değeri kullanılan yalıtkanın cinsine, boyutlarına, atmosferik şartlara, frekansa göre değişmektedir. İletim hatlarında hava şartlarının etkisi büyüktür. İyi yapılandırılmış bir iletim hattının kaçak iletkenliği kuru havada $G = 1\mu [1 / \Omega km]$ mertebesinde [3]. Kablolarda G ' nin değeri alçak frekanslarda göz ardı edilebilecek kadar küçüktür. İyi korunmuş kabloların kaçak iletkenliğine hava şartlarının etkisi yoktur. Buna rağmen, kablolarda kullanılan kağıt, polietilen gibi yalıtkanların dielektrik kaybı frekans yükseldikçe büyük değerler almaktadır. İletim hatlarının kaçak iletkenliği frekansla hemen hemen değişmez.

2.2 KARAKTERİSTİK EMPEDANS VE YAYILMA SABİTİ

Birer gerçel büyüklük olan R , L , C , G hat parametrelerinden oluşan iletim hattının seri empedansı

$$Z = R + j\omega L \quad (2.12)$$

ve paralel admitansı

$$Y = G + j\omega C \quad (2.13)$$

dir. İletim hatları için iki önemli parametreden birisi iletim hattının karakteristik empedansı Z_c [17]

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.14)$$

ve değeri ise yayılma sabiti γ ,

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.15)$$

dir.

Bir hattın karakteristik empedansı ve yayılma sabitinin, hattın ilkel parametrelerinden başka hatta uygulanan güç kaynağının frekansı ile değişen büyüklükler olduğu görülmektedir. Frekansa bağlı olan değişim incelenirken hat parametrelerinin frekansla ve diğer fiziksel koşullarla değişmeyip sabit kalması ele alınmaktadır. Z_c

ve γ' nin özel bir değeri hesaplanacağı zaman R, L, C ve G' nin o frekansta ve fiziksel koşullardaki değeri alınarak yapılan bu yaklaşıklığın sebep olacağı hata önlenemez.

2.2.1 Karakteristik Empedansın Frekansla Değişmesi

Doğru akımda $\omega = 0$ olduğu için (2.12) denkleminde

$$Z_{\infty} = (Z_c)_{\omega=0} = \sqrt{\frac{R}{G}} \quad (2.16)$$

elde edilmektedir, bu sırf omik bir dirençtir. Frekans yükseldikçe (2.2.1) denkleminde Z_c için gerçel bileşenin yanında bir de sanal bileşen bulunmaktadır [17]. Çok yüksek frekanslarda $R \ll \omega C$, $G \ll \omega L$ olduğundan ωL yanında R, ωC yanında G göz ardı edilerek $\omega = \infty$ için

$$Z_{c_{\infty}} = (Z_c)_{(\omega) \rightarrow \infty} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.17)$$

bulunmaktadır, omik bir direnci göstermektedir. Böylece, çok alçak ve çok yüksek frekanslarda hatların karakteristik empedansları saf omik birer direnç gibi davranmaktadır.

2.2.2 Yayılma Sabitinin Frekansla Değişmesi

Doğru akım durumunda $\omega = 0$

$$\alpha_0 = \sqrt{RG} = \gamma_0, \beta_0 = 0 \quad (2.18)$$

olmaktadır. Böylece, alçak frekanslarda α zayıflama katsayısının değeri frekansla değişmez ve β faz sabiti ise yaklaşık olarak sıfırdır. Başka bir deyişle, alçak frekanslarda hattın her noktasındaki gerilimler ve akımlar aynı fazdadır.

Yayılma sabitine ilişkin eşitlik tekrar düzenlenirse,

$$\gamma = \sqrt{j\omega L \left(1 + \frac{R}{j\omega L}\right) j\omega C \left(1 + \frac{G}{j\omega C}\right)} \quad (2.19)$$

$$= \sqrt{j^2 \omega^2 LC \left(1 + \frac{R}{j\omega L}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{G}{j\omega C}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

elde edilir [13]. Yüksek frekanslarda $\omega L \gg R$, $\omega C \gg G$ büyüklüğü oluşmaktadır.

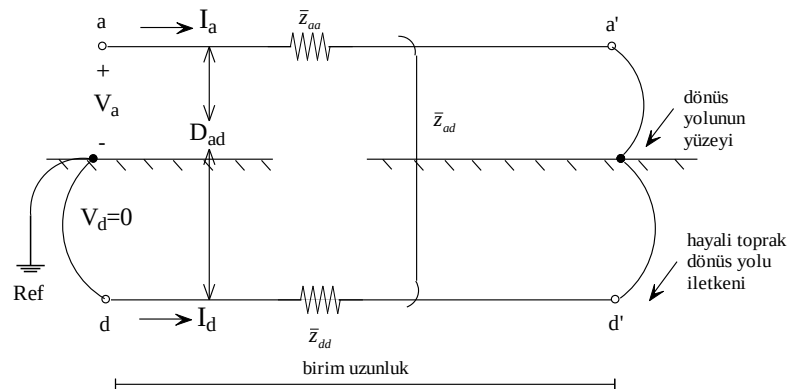
$Z_C \approx \sqrt{\frac{L}{C}}$ olduğu da hatırlanırsa varılan sonuç (2.19) olarak ifade edilmektedir [17].

Yüksek frekanslarda α sabit (frekansa bağlı olmayan) bir değere ulaşmakta, β ise frekansla orantılı olarak artmaktadır.

$$\alpha \approx \frac{R}{2Z_C} + \frac{GZ_C}{2}, \beta \approx \omega\sqrt{LC} \quad (2.20)$$

2.2.3 Carson Hattı

Toprak dönüşlü yerden yüksekte bir iletkenin empedansının tanımlandığı bilimsel çalışma 1923 yılında Carson tarafından yapılmıştır. Bu çalışma, akımın toprak üzerinden dönüşü durumlarını ele alarak, belirli değişikliklerle, iletim hattı empedans hesaplamalarının temelini oluşturmaktadır. Carson birim uzunluğunda toprağa paralel bir iletken göz önüne almıştır (Şekil 2.2). Toprak yüzeyindeki iki nokta olan $d - d'$ yolundan geri dönerek devresini tamamlayan bir I_a akımının iletken üzerinde aktığı kabul edilmiştir. Toprağın sonsuz büyüklükte olduğu ve eşit dağılımlı bir dirence sahip olduğu varsayılırsa, I_a akımı, en kısa (yani en düşük dirençli) dönüş yolu üzerinde akarak, Kirchoff' un gerilim düşümü yasasını doğrular [18].



Şekil 2.2 : Toprak Dönüşlü Carson Hattı [18]

Carson hattının GMD değeri bire eşit olan tek bir dönüş iletkeninden oluştuğu, bu dönüş iletkeninin D_{ad} mesafesi kadar uzaklıkta toprağın altında yer aldığı ve bu D_{ad} uzaklığının ρ toprak direncinin bir fonksiyonu olduğu varsayılır. Carson hattı için olan denklem,

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{dd'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a - V_{a'} \\ V_d - V_{d'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{aa} & \bar{Z}_{ad} \\ \bar{Z}_{ad} & \bar{Z}_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ -I_a \end{bmatrix} \left[\frac{V}{\text{birim uzunluk}} \right] \quad (2.21)$$

olarak yazılabilir. Burada $V_a, V_{a'}, V_d, V_{d'}$ aynı referansa göre ölçülmüş değerlerdir. $V_d = V_{d'} = V_{a'} = 0$ olduğundan, (2.21) denkleminde ,

$$V_a = (\bar{Z}_{aa} + \bar{Z}_{dd} - 2\bar{Z}_{ad})I_a = z_{aa}I_a \quad (2.22)$$

elde edilir. Burada öz endüktans ve ortak endüktans denklemlerinin kullanımı ve deri etkisinin göz ardı edilmesi ile hattın öz empedansı,

$$\bar{Z}_{aa} = r_a + j\omega L_a = r_a + j\omega \times 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{2s}{D_s} - 1 \right) \left[\frac{\Omega}{\text{birim uzunluk}} \right] \quad (2.23)$$

ve toprağın öz empedansı

$$\bar{Z}_{dd} = r_{da} + j\omega \times 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{2s}{D_{sd}} - 1 \right) \left[\frac{\Omega}{\text{birim uzunluk}} \right] \quad (2.24)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada $s [m]$, hattın uzunluğu, D_s , geometrik ortalama yarıçap ve D_m ise geometrik ortalama uzaklıktır.

Carson, $D_{sd} = 1$ alarak, toprak direnci r_d ' nin frekansın fonksiyonu olduğunu bulmuş ve

$$r_d = 1.588 \times 10^{-3} f \left[\frac{\Omega}{\text{mil}} \right] = 9.869 \times 10^{-4} f \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (2.25)$$

ampirik formülü elde etmiştir. Ortak (mutual) empedans ise,

$$\bar{Z}_{ad} = j\omega m_{ad} = j\omega \times 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{2s}{D_{ad}} - 1 \right) \left[\frac{\Omega}{\text{birim uzunluk}} \right] \quad (2.26)$$

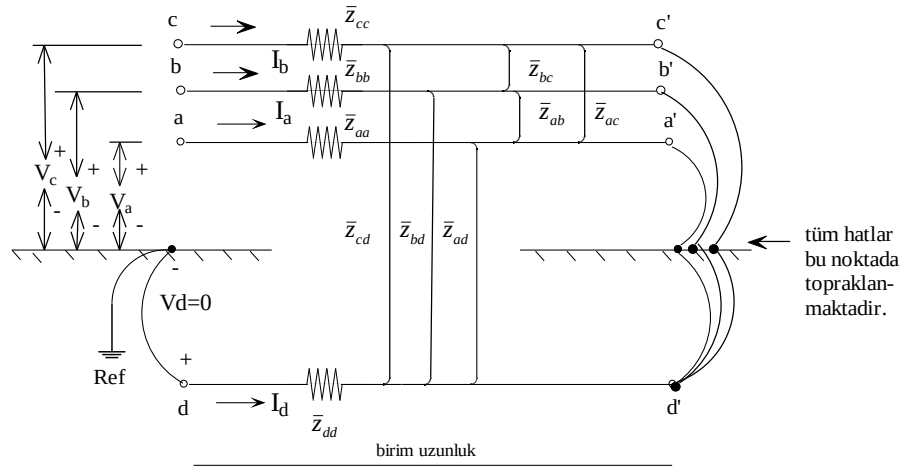
dir ve toprak dönüşlü iletim hattının empedansı,

$$z_{aa} = \bar{z}_{aa} + \bar{z}_{dd} - 2\bar{z}_{ad} = r_a + r_d + j\omega \times 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{ad}^2}{D_{sa}} \left[\frac{\Omega}{\text{birim uzl.}} \right] \quad (2.27)$$

olarak yazılır [18].

2.2.4 Üç Fazlı Hat Empedansı

Üç fazlı iletim hattının empedansı bir önceki bölümde açıklanan tek hat için izlenen yol takip edilerek bulunur. Şekil 2.3' de toprak dönüşlü üç fazlı hat gösterilmiştir [18].



Şekil 2.3 : Toprak Dönüşlü Üç Fazlı Hat [18]

Bu hattın a' , b' ve c' noktalarında hatların topraklanması nedeniyle

$$I_d = -(I_a + I_b + I_c) \quad (2.28)$$

yazılabilir. Gerilim düşümleri, akım ve empedans cinsinden ilkel gerilim denklemleri adı verilen

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \\ V_{dd'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a - V_{a'} \\ V_b - V_{b'} \\ V_c - V_{c'} \\ V_d - V_{d'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{z}_{aa} & \bar{z}_{ab} & \bar{z}_{ac} & \bar{z}_{ad} \\ \bar{z}_{ab} & \bar{z}_{bb} & \bar{z}_{bc} & \bar{z}_{bd} \\ \bar{z}_{ac} & \bar{z}_{bc} & \bar{z}_{cc} & \bar{z}_{cd} \\ \bar{z}_{ad} & \bar{z}_{bd} & \bar{z}_{cd} & \bar{z}_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \end{bmatrix} \left[\frac{V}{\text{birim uzunluk}} \right] \quad (2.29)$$

denklemleriyle ifade edilmektedir. Hatsonu topraklı olduğundan,

$$V_{a'} = V_{b'} = V_{c'} = V_{d'} = 0 \quad (2.30)$$

yazılabilir. Böylece

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ab} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ab} & z_{bc} & z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \left[\frac{V}{\text{birim uzunluk}} \right] \quad (2.31)$$

elde edilir. Bu doğrusal, pasif ve iki taraflı bir sistemde ortak empedansın karşılıklılık taşıdığı kabul edilmektedir, $z_{ab} = z_{ba}$. (2.30) denklemindeki empedans matrisinin elemanları

$$\begin{aligned} z_{aa} &= \bar{z}_{aa} - 2\bar{z}_{ad} + \bar{z}_{dd} \\ z_{bb} &= \bar{z}_{bb} - 2\bar{z}_{bd} + \bar{z}_{dd} \\ z_{cc} &= \bar{z}_{cc} - 2\bar{z}_{cd} + \bar{z}_{dd} \end{aligned} \left[\frac{\Omega}{\text{birim uzunluk}} \right] \quad (2.32)$$

ve

$$\begin{aligned} z_{ab} &= \bar{z}_{ab} - \bar{z}_{ad} - \bar{z}_{bd} + \bar{z}_{dd} \\ z_{bc} &= \bar{z}_{bc} - \bar{z}_{bd} - \bar{z}_{cd} + \bar{z}_{dd} \\ z_{ac} &= \bar{z}_{ac} - \bar{z}_{ad} - \bar{z}_{cd} + \bar{z}_{dd} \end{aligned} \left[\frac{\Omega}{\text{birim uzunluk}} \right] \quad (2.33)$$

denklemlerinden bulunur [18].

3 fazlı Carson hattının yukarıda ifade edilen empedans matrisi elemanlarının, 3 fazlı sistem sırasında kullanımları ve açık ifadeleri 4. bölümde belirtilecektir. Hesaplamalar sırasında gereken bilgiler, göz ardı edilen değerler ve formülasyonun açık hali 4. bölümün analitik olarak hesaplama alt başlığında yer almaktadır.

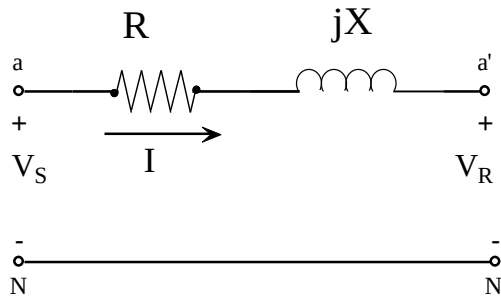
3 ENERJİ İLETİM HATTI MODELLERİ

Enerji iletim hatlarının kurulmasında ve işletilmesinde önemli olan konu, hattın elektriksel karakteristiklerinin doğru olarak saptanarak, diğer elektriksel bilgilerin hesaplanmasıdır. Hattın herhangi bir noktasındaki akım ve gerilim bilindiği zaman, diğer noktadaki akım ve gerilim ya da güçlerin hesaplanabilir. Hatların belli noktalarındaki bilinen akım ve gerilim esas alınarak diğer noktadaki akım ve gerilimlerin bulunması için düzenlenen denklemlere hat denklemleri denir [2]. Hat denklemleri oluşturulurken hat parametreleri kullanılmaktadır.

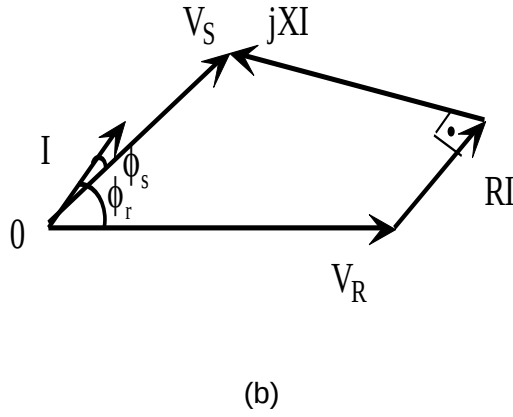
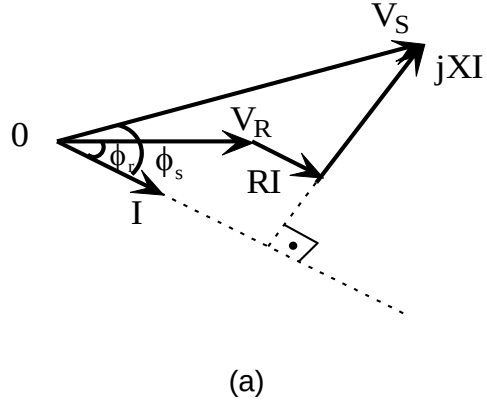
Enerji iletim hatlarının hat denklemlerini basitleştirerek inceleyebilmek için, 80 km uzunluğa kadar ya da kapasitesi göz ardı edilebilecek küçük olan hatlar kısa iletim hatları ve 80 km' den uzun, kapasitesi göz ardı edilemeyen hatlar da orta ve uzun iletim hatları olarak incelenmektedir [11]. Ayrıca denklemlerde gönderme ve alma ucu değerleri göz önünde tutulmaktadır. Üç fazlı sistemlerde, normal işletme şartlarında sistemin dengeli olduğu yani her fazın eşit yüklendiği düşünülerek denklemler bir faz için çıkarılmaktadır. Genel olarak gerilim-akım-güç ve kayıpların hesaplanması alma ucundaki şartların bilinmesine göre hesaplanabilmektedir.

3.1.1 Kısa İletim Hattı Modeli

Kısa iletim hattı modeli, uzunluğu 80 km' e kadar olan hatlara güvenle uygulanabilir. Kısa hatlar için eşdeğer devre, seri haldeki toplu empedans ile basit bir şekilde Şekil 3.1' de gösterilmiştir [4].



Şekil 3.1 : Kısa İletim Hatları İçin Eşdeğer Devre [4]



Şekil 3.2 : Endüktif ve Kapasitif Vektör Diyagramı [4]

Hatsonuna veya yükün güç faktörü açısı ϕ_r ' e bağlı olarak fazör diyagram değişmektedir. Bir kısa iletim hattı için endüktif ve kapasitif çalışmaya ilişkin fazör diyagramı, Şekil 3.2' de verilmiştir. Paralel eleman göz ardı edildiği için hatbaşı ile hatsonu arasındaki akım aynı kalmaktadır. Şekil 3.2' de V_R , hatsonu gerilim vektörü; V_S , hatbaşı gerilim vektörü; I ise hat üzerinde akan akım vektörüdür.

Dengeli iletim hatlarında, işlemler bir faz için yapılmaktadır. Fakat dengesiz iletim hatlarında, her faz ayrı ayrı dikkate alınarak işlem yapılmalıdır. Şekil 3.2' de verilen sistem dengeli kabul edilerek bir faz için hat denklemleri matrisel biçimde yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

elde edilir.



Şekil 3.3 : İki Kapılı Hat Gösterimi

Şekil 3.3' de gösterilen bu iki kapılı hat gösterimine ilişkin hat sabitleri A, B, C, D kısa hat modeli için

$$A = 1, B = Z, C = 0, D = 1 \quad (3.2)$$

dir [4]. Ayrıca

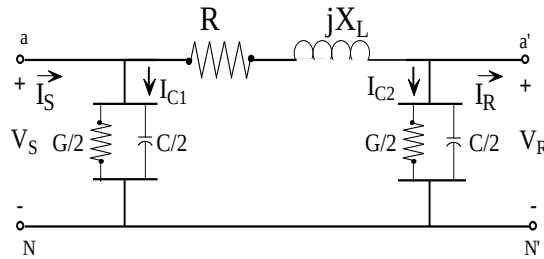
$$AD - BC = 1 \quad (3.3)$$

olmaktadır.

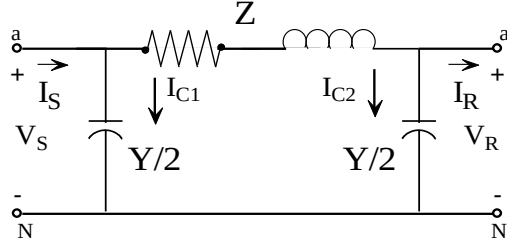
3.1.2 Orta Uzunluktaki İletim Hattı Modeli

Uzunluğu 80 km' i aşan hatlar için paralel admitans tamamen göz ardı edildiğinde basit seri empedans gösterilimi hatalı sonuç vermektedir. İletkenlerin birbirlerine koruma iletkenine ve toprağa göre kapasitelerinden dolayı bir takım akımlar akmaktadır. Hat uzunluğunun artması ile bu akımlar göz ardı edilemeyecek kadar büyük olur. Orta uzunluktaki (uzunluğu 80 ila 240 km arasında) hatları modellemek için, paralel admitansın göz önüne alındığı, nominal π ya da T devreleri kullanılır [4].

π devresinde (Şekil 3.4) hattın uzunluğu ile birim uzunluk başına z' nin çarpımı olarak seri Z empedansı göz önüne alınmaktadır. Hattın toplam uzunluğu için faz-nötr başına toplam paralel admitansı ise hat başlarına yarıya bölünerek yerleştirilmiştir. Kaçak iletkenlik (G), genellikle göz ardı edilmektedir [4].



(a)



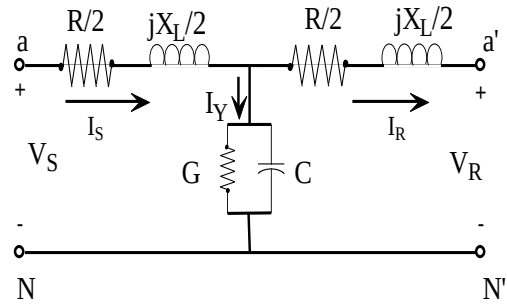
(b)

Şekil 3.4 : Nominal π Devresi [4]

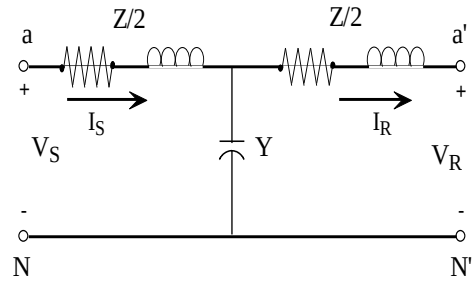
Nominal π devresi için A , B , C , D sabitleri,

$$A = 1 + \left(\frac{ZY}{2} \right) \quad B = Z \quad C = Y + \left(\frac{ZY^2}{4} \right) \quad D = 1 + \left(\frac{ZY}{2} \right) \quad (3.4)$$

dir [4].



(a)



(b)

Şekil 3.5 : Nominal T Devresi [4]

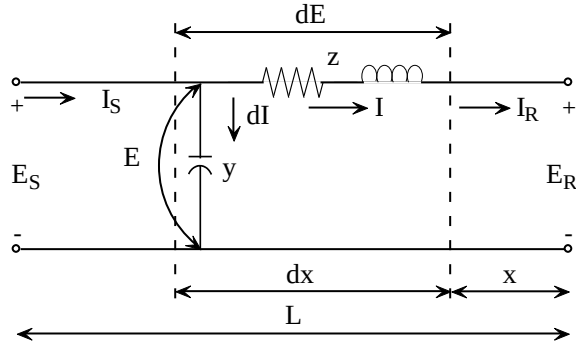
Nominal T devresi, toplam paralel admitansının her iki yanına $Z / 2$ seri empedans gelecek biçimde Şekil 3.5' deki gibi düzenlenmektedir.

Nominal T devresi için A, B, C, D sabitleri,

$$A = 1 + \left(\frac{ZY}{2} \right) \quad B = Z + \left(\frac{Z^2 Y}{4} \right) \quad C = Y \quad D = 1 + \left(\frac{ZY}{2} \right) \quad (3.5)$$

3.1.3 Uzun İletim Hattı Modeli

Uzunluğu 240 km' den fazla olan hatlar için dağılmış parametrelili hat modeli kullanmak gerekmektedir. Şekil 3.6' da alıcı uçtan bir x uzaklığındaki dx uzunluğunda sonsuz küçük hat parçası gösterilmektedir [4]. Burada z , birim uzunluğun empedansı ve y , birim uzunluğun admitansdır.



Şekil 3.6 : Uzun İletim Hatları [4]

dx hat parçası üzerindeki gerilim,

$$dV = I \times z \times dx \quad (3.6)$$

ile ifade edilmektedir. y ' den akan akım,

$$dI = V \times y \times dx \quad (3.7)$$

olarak gösterilmektedir. Bu denklemlerin x ' e göre türevleri alındıktan sonra; V ve I çözülmektedir. Başlangıç koşulları; $x = 0$ ' da $I = I_R$ ve $V = V_R$ olmaktadır. Denklemlerin Laplace dönüşümünün yapılmasının ardından $V(s)$ ifadesi çözülerek ve dönüşüm tablosundan ters dönüşüm ifadeleri alınmaktadır. x değişkenine göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmektedir.

$$V(x) = \left(\cos \sqrt{zy}x \right) V_R + \left(\sqrt{\frac{z}{y}} \sin \sqrt{zy}x \right) I_R \quad (3.8)$$

$$I(x) = \left(\sqrt{\frac{Y}{Z}} \sinh \sqrt{ZY}x \right) V_R + \left(\cosh \sqrt{ZY}x \right) I_R \quad (3.9)$$

γ , birim uzunluğun yayılma sabiti ve Z_c , hattın birim uzunluğunun karakteristik empedansıdır. $x = l$ olduğunda; Z , faz başına toplam seri empedans, Y , faz başına toplam paralel admitans olmaktadır [4].

$$V_S = (\cosh \gamma l) V_R + (Z_c \sinh \gamma l) I_R \quad (3.10)$$

$$I_S = (Y_c \sinh \gamma l) V_R + (\cosh \gamma l) I_R \quad (3.11)$$

Matris formunda yazılırsa [4];

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_c \sinh \gamma l \\ Y_c \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

elde edilmektedir. Z_c karakteristik empedans değeri, yayılma sabiti γ ve eşdeğer π devresinin seri hat empedansına (Z) ve toplam paralel admitansına (Y) göre ifade edilebilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \sqrt{ZY} & Z \left(\frac{\sinh \sqrt{ZY}}{\sqrt{ZY}} \right) \\ Y \left(\frac{\sinh \sqrt{ZY}}{\sqrt{ZY}} \right) & \cosh \sqrt{ZY} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

3.2 ENERJİ İLETİMİNDE DENGESİZ DURUMLAR

İletim hattının çok iletkenli olduğunu düşünüldüğünde, bir iletkende oluşan gerilim hem bu iletkendeki alana hem de diğer iletkenlerdeki akımlara bağlıdır [19]. Bir çok iletkenli sistemde akım ile gerilim arasındaki ilişki,

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1-1} & Z_{1-2} & \cdot & Z_{1-n} \\ Z_{2-1} & Z_{2-2} & \cdot & Z_{2-n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Z_{n-1} & Z_{n-2} & \cdot & Z_{n-n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

ile verilir. Burada iletkenler faz iletkenleri, toprak hatları, toprak dönüş akımlarını taşıyan iletkenler olabilmektedir ve V_i , endüktif ve rezistif etkilerden kaynaklanan boylam gerilim düşümüdür. I_i , i . iletkenindeki akımdır. Z_{ii} , i iletkeninin empedansı ve Z_{ik} , i ve k iletkenleri arasındaki karşılıklı empedans olmaktadır. Toprak hattı dalga boyundan çok daha küçük aralıklarda topraklanması nedeniyle matematiksel olarak elimine edilebilmektedir [20].

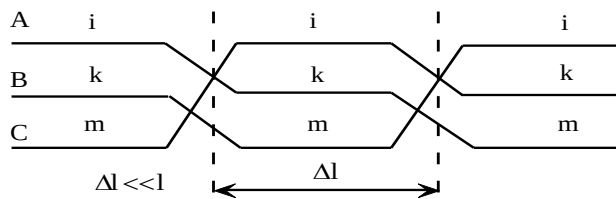
İki veya daha fazla hat aynı yönü veya direği paylaştığında, empedans matrisinden görülebilecek endüktif kuplaja sahip olmaktadır. Bir üç fazlı iletim hattı için (3.14) denklemi,

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

şeklini alır. Çaprazlanmamış hat, geometrideki farklılık nedeniyle simetrik değildir; örnek olarak iletkenler arasındaki uzaklığının farklılığı, toprak veya toprak iletkeni ile iletkenler arasındaki uzaklığının farklılığı verilebilmektedir [15]. Eğer farklılıklar küçük ise o zaman hat simetrik olarak nitelendirilebilmektedir.

Çaprazlama için aşağıdaki kabuller yapılmaktadır [11]:

- Çaprazlama bölgeleri tahmini olarak eşit uzunluktadır.
- Tam çaprazlama devresinin uzunluğu (her bir devre için 3 bölümden oluşmaktadır.), çalışılan frekansın dalga uzunluğundan çok daha kısadır.



Şekil 3.7 : Çaprazlanmış Hat [11]

Hat tamamen çaprazlanmış ise,

$$Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc}, Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} \quad (3.16)$$

olur. Böylece empedans matrisi

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ab} \\ Z_{ab} & Z_{aa} & Z_{ab} \\ Z_{ab} & Z_{ab} & Z_{aa} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

olarak yazılabilir.

Simetrik olmayan bir arıza ya da dengesiz yüklü bir sistemde, akımlar ya da gerilimler üç faz simetrisine sahip değildirler. Generatör, transformatör ya da hatların empedans matrislerinin hepsi, köşegen matris olmayacaktır. Dolayısıyla incelemeler bir faz ile sınırlandırılmayacaktır, yani sadece bir faz üzerinde inceleme yapılamamaktadır. Bunun nedeni üç faz arasında kuplaj olmasıdır [19]. Bundan dolayı tüm fazları tek tek incelemek gerekmektedir. Bu incelemeyi yapabilmek için dengesiz faz akım ve gerilimlerinin çözümünü çeşitli simetri özelliğine sahip bileşen takımına dönüştürmek gerekmektedir. Önce dengesizliğin kaynağı olan durumlar daha sonra sistemi dengesizlikten dengeli duruma dönüştüren modal dönüşümler ele alınmaktadır.

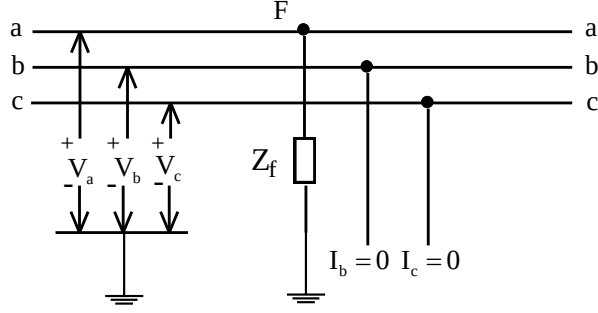
3.2.1 Sistemde Dengesiz Durumlar

3.2.1.1 Paralel arızalar

Arıza tipleri arasında önemli bir yere sahip olan paralel arızalar dengesiz yük durumları ile kısa devre durumlarını içermektedir [18]. Tez çalışmasında benzetim senaryoları hazırlanırken kullanılan arıza durumlarına ait devre diyagramları ve sınır koşulları verilmektedir.

3.2.1.1.1 Tek faz-toprak arızası

Devre diyagramı:

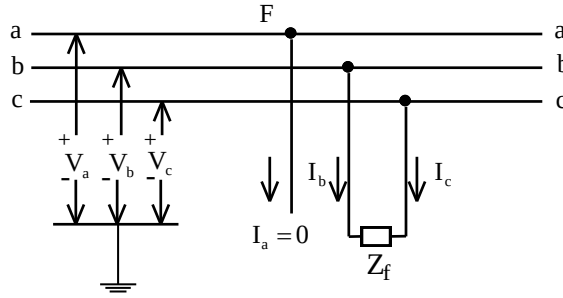


Şekil 3.8 : Tek Faz-Toprak Arızası [18]

Sınır koşulları: $I_b = I_c = 0$, $V_a = Z_f I_a$ olmaktadır.

3.2.1.1.2 Faz-faz arızaları

Devre diyagramı:

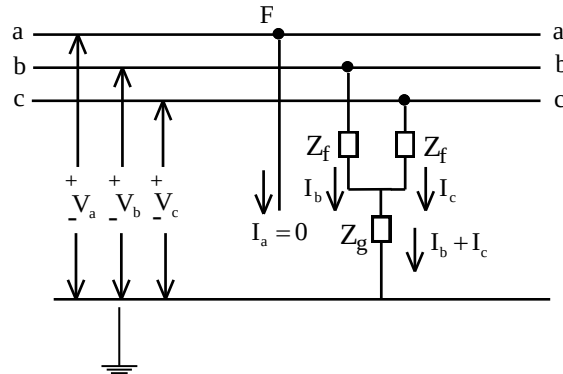


Şekil 3.9 : Faz-Faz Arızası [18]

Sınır koşulları: $I_a = 0$, $I_b = -I_c$ ve $V_b = V_c = Z_f I_b$ olarak verilmektedir.

3.2.1.1.3 İki faz-toprak arızaları

Devre diyagramı:

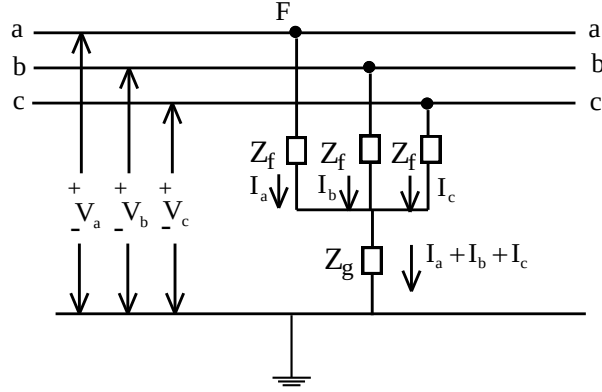


Şekil 3.10 : İki Faz-Toprak Arızası [18]

Sınır koşulları: $I_a = 0$ ve $V_b = (Z_f + Z_g)I_b + Z_g I_c$, $V_c = (Z_f + Z_g)I_c + Z_g I_b$ olmaktadır.

3.2.1.1.4 Üç faz-toprak arızası

Devre diyagramı:



Şekil 3.11 : Üç Faz-Toprak Arızası [18]

Sınır koşulları: $V_a = I_a Z_f + (I_a + I_b + I_c) Z_g$ ve

$V_b = I_b Z_f + (I_a + I_b + I_c) Z_g$, $V_c = I_c Z_f + (I_a + I_b + I_c) Z_g$ olmaktadır.

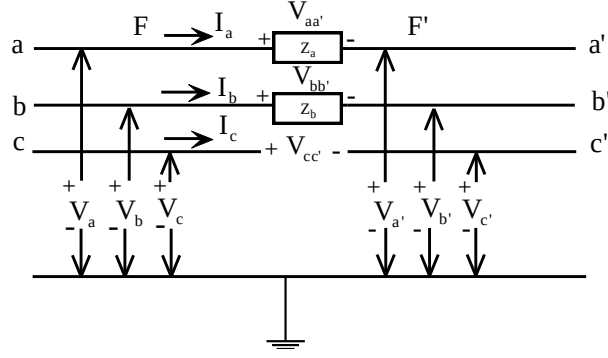
3.2.1.2 Seri arızalar

Fazlara ait empedans değerlerinin birbirinden farklı olduğu durum yani eşit olmayan seri empedansları ve fazların açılması ile yük akışında oluşan dengesizlikler bu gruba girmektedir [18]. Tez çalışmasında hatbaşında veya hatsonunda kasıtlı tek taraflı açma durum incelemesi yapılmaktadır. Bu durumlara ait devre diyagramı ve sınır koşulları verilmektedir.

3.2.1.2.1 Tek hat açma

Açılan hatta ait direnç sonsuz olarak düşünülmektedir.

Devre diyagramı:

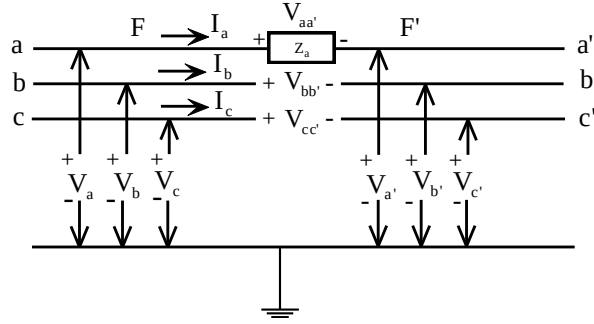


Şekil 3.12 : Tek Faz Açma [18]

Sınır koşulları: $I_c = 0$ ve $V_{aa'} = Z_a I_a$, $V_{bb'} = Z_b I_b$ olarak verilmektedir.

3.2.1.2.2 İki hat açma

Devre diyagramı:



Şekil 3.13 : İki Faz Açma [18]

Sınır koşulları: $I_b = I_c = 0$ ve $V_{aa'} = Z_a I_a$ olarak verilmektedir.

3.2.2 Modal Dönüşümler

Üç fazlı hatlarda meydana gelen ve fazlar arası oluşan manyetik kuplajların giderilebilmesi ve böylelikle tek faz ele alınarak işlemlerin yapılması amacıyla modal dönüşüm kullanılmaktadır.

Frekans domenindeki dalga yayılım denklemleri

$$-\left[\frac{dV_{faz}}{dx}\right] = [Z'_{faz}][I_{faz}] \quad (3.18)$$

$$-\left[\frac{dI_{faz}}{dx}\right] = [Y'_{faz}][V_{faz}] \quad (3.19)$$

olmaktadır [15]. İkinci türevin alınmasıyla akım ya da gerilim vektörü elimine edilebilmektedir.

$$-\left[\frac{d^2V_{faz}}{dx^2}\right] = [Z'_{faz}]\left[\frac{dI_{faz}}{dx}\right] = -[Z'_{faz}][Y'_{faz}][V_{faz}] \quad (3.20)$$

$$-\left[\frac{d^2I_{faz}}{dx^2}\right] = [Y'_{faz}]\left[\frac{dV_{faz}}{dx}\right] = -[Y'_{faz}][Z'_{faz}][I_{faz}] \quad (3.21)$$

Öz vektör analizleri, diyagonal matrislerin üretimi için oluşturularak faz domenindeki kuplajlı denklemlerden modal domendeki kuplajsız denklemlere geçişi sağlamaktadır. Modal domendeki her bir denklem mod seyahat süresi ve modal dalga empedansı kullanılarak çözülmektedir [15]. Faz ve modal değerler arasındaki dönüşüm matrisi akım ve gerilim için farklıdır;

$$[V_{faz}] = [T_V][V_{mod}] \quad (3.22)$$

$$[I_{faz}] = [T_I][I_{mod}] \quad (3.23)$$

(3.21) denkleminde yer alan ifade (3.19) denkleminde yazılarak

$$-\left[\frac{d^2[T_V] V_{faz}}{dx^2}\right] = [Z'_{faz}][Y'_{faz}][T_V][V_{faz}] \quad (3.24)$$

elde edilmektedir. Bu ifade

$$-\left[\frac{d^2V_{faz}}{dx^2}\right] = [T_V]^{-1}[Z'_{faz}][Y'_{faz}][T_V][V_{faz}] = [\wedge][V_{mod}] \quad (3.25)$$

olarak da yazılmaktadır. $[Z'_{faz}][Y'_{faz}]$ matris çarpımını köşegenleştiren T_V matrisini bulmak için $[Z'_{faz}][Y'_{faz}]$ matrisinin öz değer ve öz vektörlerinin bulunması gerekmektedir [21].

Böylece modal domende empedans matrisi,

$$[Z_{\text{mod}}] = [T_V]^{-1} [Z_{\text{faz}}] [T_I] \quad (3.26)$$

ve modal domende admitans matrisi,

$$[Y_{\text{mod}}] = [T_I]^{-1} [Y_{\text{faz}}] [T_V] \quad (3.27)$$

olarak elde edilir. Burada $[Z_{\text{mod}}]$ ve $[Y_{\text{mod}}]$ köşegen matrislerdir. Modal karakteristik empedans ise,

$$[Z_{c-i}] = \sqrt{\frac{Z_{\text{mod}-i}}{Y_{\text{mod}-i}}} \quad (3.28)$$

denklemleri ile elde edilebilir [21].

$[Z'_{\text{faz}}][Y'_{\text{faz}}]$ ve $[Y'_{\text{faz}}][Z'_{\text{faz}}]$ matris çarpımlarının sonuçları farklı olduğu gibi öz vektörleri de farklıdır ancak özdeğerleri özdeştir.

$$[T_I] = ([T_V]^T)^{-1} \quad (3.29)$$

ilişkisi vardır.

n adet iletkenin n adet doğal modu bulunmaktadır [15].

3.2.2.1 Simetrik bileşenler dönüşümü

Simetrik bileşenler dönüşümü üç fazlı dengesiz güç sistemlerinin analizi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu dönüşüm, karmaşık sayı operatörleri içermektedir [19] ve sadece kararlı durum akım ve gerilim değerlerini kullanmaktadır. Simetrik bileşenler dönüşümü, üç fazlı fazörleri

$$V_{0,+,-} = S V_{a,b,c} \quad (3.30)$$

$$I_{0,+,-} = S I_{a,b,c}$$

denklemleri ile sıfır, pozitif ve negatif bileşenlere dönüştürmektedir. Dönüşüm matrisi

$$S = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

dir [11]. Simetrik bileşenler operatörü a

$$1 + a + a^2 = 0 \quad (3.32)$$

denklemleri ile bulunmaktadır. Dönüşüm matrisi

$$S = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j2\pi/3} & e^{j4\pi/3} \\ 1 & e^{j4\pi/3} & e^{j2\pi/3} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

olarak ifade edilmektedir.

3.2.2.2 Karrenbauer dönüşümü

Clarke ve Karrenbauer dönüşümleri, simetrik bileşenler dönüşümüne alternatiftir. Bu dönüşümler aynı özelliklere sahiptirler. Gerçek sayılardan oluşmaktadır ve üç fazlı sistemin faz akım ve gerilimlerinin (decoupling) kuplajlanmış değerlerini dönüştürürler. Bu dönüşümlerin ana yararı ise gerilim ve akımların ani değerlerini kullanabilmeleridir. Bunun sonucu olarak sayısal röleler ve benzetim programları tarafından kullanılmaktadırlar. Karrenbauer dönüşümü akım ve gerilimlerin faz değerlerini 012 modlarında yazmak için kullanılmaktadır.

$$V_{0,1,2} = M V_{a,b,c} \quad (3.34)$$

$$I_{0,1,2} = M I_{a,b,c}$$

Dönüşüm matrisi M ,

$$M = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

dir [15].

3.2.2.3 Clarke (0-α-β) dönüşümü

Enerji iletim hattının elektriksel parametreleri tam olarak her bir faz için hesaplandıktan sonra istenilen benzetimlerin yapılması için mod bileşenleri ile çalışılmaktadır [22]. Kolay, gerçek ve frekanstan bağımsız çalışma için yeterli bir yol

olan mod yaklaşımı ile çalışılarak karmaşık sayılar içermesi nedeniyle geçici analizlere uygun olmayan simetrik bileşenler dönüşümüne gerek kalmamaktadır.

Bir iletim sisteminde faz gerilimleri V_{faz} ve faz akımları I_{faz} olmak üzere

$$\begin{aligned} [V_{a,b,c}] &= [T_{CL}] [V_{0,\alpha,\beta}] \\ [I_{a,b,c}] &= [T_{CL}] [I_{0,\alpha,\beta}] \end{aligned} \quad (3.36)$$

denklemlerinde Clarke matrisi kullanılarak modal domene dönüştürme ile, modal domende gerilim ve akım

$$\begin{aligned} [V_{0,\alpha,\beta}] &= \begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \\ [I_{0,\alpha,\beta}] &= \begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.37)$$

olur. Ele alınan tüm hatlar için tanımlanan dönüşüm matrisi tektir. Mod dönüşümü çok karışık gibi görünmesine rağmen bazı basitleştirmeler yapılarak belirli frekans aralığında her frekans için tek bir dönüşüm matrisi kullanılmaktadır. Bu dönüşüm matrisi

$$[T_{CL}] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

dir [21]. Kullanılan $[T_{CL}]$ matrisi ortogonal olduğundan tersi

$$[T_{CL}]^{-1} = [T_{CL}]^T \quad (3.39)$$

eşitliği ile bulunabilmektedir. Dönüşüm matrisinin tersi

$$[T_{CL}]^{-1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

olmaktadır.

Clarke matrisi gerçel sayılardan oluşması nedeniyle tüm çaprazlanmış hatlarda kullanılabilir. Çaprazlanmamış ve manyetik kuplajların bulunduğu 3 fazlı sistemlerde, belirli frekans aralığı dışındaki frekans değerleri için frekansa bağlı, öz vektör bazlı dönüşüm matrisleri kullanılmaktadır (Bölüm 3.2.2) [21,22].

0- α - β dönüşümü gerçel bir dönüşüm olduğu için dalga formuna ve DFT (Ayrık Fourier Dönüşümü) hesaplamalarına doğrudan uygulanabilmektedir [22]. Bu nedenle bu dönüşüm, daha kolay yorum yapabilmek ve daha doğru sonuçlar elde edebilmek açısından yararlı olmaktadır. Karmaşık sayı işlemleri gerilim ve akımın faz açılarında hatalara neden olabilmektedir. 0- α - β dönüşümünün harmonik empedans hesaplamalarında belirgin iki yararı vardır. İlk yararı, harmonik akımların varlığının dizi karakteristikleri üzerindeki etkisinden sonuçların doğruluğunun etkilenmemesidir. α ve β modlarının dizilerle doğrudan ilişkisi yoktur. Diğer bir yararı ise, Clarke dönüşümünün sadece iki faz gerilim ölçümleri durumlarında empedanslara karar verebilmesidir. Dönüşüm faz-faz gerilimini modal değerlere çevirebilmektedir. Oysa eğer bir faz ya da hat gerilim ölçümü eksik ise, simetrik bileşenler dönüşümü uygulanamamaktadır [22].

Genel olarak ele alınan bu dönüşümlerden belirtilen yararlar nedeniyle tez çalışmasında modal dönüşüm olan Clarke dönüşümü kullanılmaktadır.

4 ENERJİ İLETİM HATLARI PARAMETRE KESTİRİMİ

Enerji iletim hattı parametrelerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan iki yöntem vardır. Bunlar, Carson formülüne göre yapılan hesaplamalar ve açık devre-kısa devre için hatbaşı ve hatsonunda gerilim ve akımlarının ölçümlerine dayanarak yapılan parametre kestirimidir. Ayrıca zaman ve fazör domen olmak üzere kendi içlerinde iki gruba ayrılan yöntemlerde fazör domeninde gerçekleştirilenler temel frekansı ele alarak harmoniklerin giderilmesine çalışmakta ve arıza bilgisine gereksinim duymaktadır. Zaman domeninde gerçekleşen yöntemler için ise sinyallerin eşzamanlı olması büyük önem taşımaktadır [23]. Zaman ve fazör domeninde ölçümlerin elde edilmesi ve sayısal olarak anında elde edilen verilerin bilgisayar ortamında hesaplama ve benzetim yoluyla değerlendirilmesini içeren hat parametre kestirimi, efektif çalışma alanı ve zamandan kazanç anlamında önemini koruyarak literatürdeki yerini almıştır [4-10].

4.1 ANALİTİK YÖNTEM

Enerji iletim hatlarının parametreleri hattın fiziksel bilgilerine bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Bu bilgiler, hat güzergahı, direk konfigürasyonunda iletkenlerin yerleşim düzeni, iletken tipi ve kesit büyüklükleri, toprak dönüş yolunun direnç bilgisi, demet iletken olup olmaması, hattın çaprazlanıp çaprazlanmaması, frekans bilgisidir [24]. Hat empedansı genel olarak

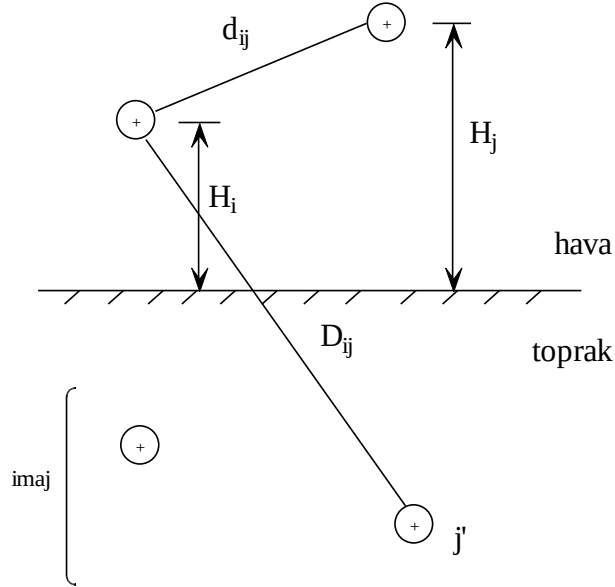
$$Z = \underbrace{Z_{geo}}_{\text{hatta geometrik yapısının etkisi}} + \underbrace{Z_{earth}}_{\text{toprağın etkisi}} + \underbrace{Z_{skin}}_{\text{iletkenin içindeki alanın etkisi}} \quad [\Omega / km] \quad (4.1)$$

biçiminde tanımlanmaktadır [15]. Toprağın etkisi, bir takım kabuller altında Carson yaklaşımı ile hesaplanabilmektedir [21]. Bu kabuller,

- İletkenlerin yeterli uzunlukta ve toprağa tam olarak paralel olması kabulü ile 3 boyutlu hatsonu etkilerinin göz ardı edilerek alan probleminin 2 boyuta indirgenmesi. (Sehim topraktan ortalama yüksekliğin ele alınmasıyla dolaylı olarak hesaba katılır.)

- Hava boşluğunun kayıpsız ve homojen olduğu kabul edilmektedir. μ_0 havanın manyetik geçirgenliği ve ε_0 öz iletkenliğidir.
- Toprak homojendir ve eşit dağılımlı ρ öz direncine sahiptir. μ_r toprağın bağıl manyetik geçirgenliği ve ε_r bağıl dielektrik sabitidir. Toprağın sonsuz büyüklükte düzgün bir yüzeye sahip olduğu ve toprağın tabaka oluşturmadığı kabul edilir.
- İletkenler arası uzaklık en azından iletkenin yarıçapından genlik olarak büyük olmalıdır, böylelikle yakınlık etkisi göz ardı edilebilmektedir.
- Topraktan akan akımın hat boyunca aktığı varsayılır.
- Düzlem dalga yayılımı, yani iletim hattının z eksenini boyunca devam ettiği kabul edilir.

Genel anlamda hat parametrelerinin frekansa bağıllığı incelenirken, toprağın hatlara olan etkileri ve toprak frekansı ele alınmaktadır. Şekil 4.1’de Carson yaklaşımında kullanılan model gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Carson Hesaplamalarında Kullanılan Görüntü Yöntemi [21]

Carson kabulleri göz önüne alındığında, Z empedans matrisinin elemanları aşağıdaki şekillerde ifade edilebilmektedir [21].

$$\begin{aligned}
z_{ij} &= j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} + \frac{\omega\mu_0}{\pi} \int_0^\infty (\sqrt{\gamma^2 + j} - \gamma) \cos q_{ij} \gamma e^{(p_{ij}\gamma)} d\gamma \\
p_{ij} &= \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho_e}} (H_i + H_j) \quad i \neq j \\
q_{ij} &= \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho_e}} \sqrt{d_{ij}^2 - (H_j - H_i)^2}
\end{aligned} \tag{4.2}$$

$$z_{ii} = j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2H_i}{R_{ii}} + \frac{\omega\mu_0}{\pi} \int_0^\infty (\sqrt{\gamma^2 + j} - \gamma) e^{(-r_{ii}\gamma)} d\gamma \tag{4.3}$$

iletkenlerarasında
magnetikalandan
dolay olusan empedans
toprak yolu empedansı

Burada $\rho_e [\Omega m]$ toprağın öz direncidir ve $R_{ii} [m]$, i . iletkenin yarıçapıdır.

Carson formülünün kısa bir gösterimi olarak

$$\begin{aligned}
Z_e &= R_e + j\omega L_e = \frac{\omega\mu_0}{\pi} (P + jQ) \\
L_e &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}} \right)
\end{aligned} \tag{4.4}$$

yazılmaktadır [25]. Şu ana kadar verilen formüller $\mu_r = 1$ (toprağın bağıl manyetik geçirgenlik değeri) olduğu durum için geçerli olmaktadır. Bu değer farklılaştığında aşağıdaki formüller kullanılmaktadır.

$$z_{ii} = j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2H_i}{R_{ii}} + j \frac{\omega\mu_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{\mu_r}{\mu_r \alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} e^{(-2H_i \alpha)} d\alpha \tag{4.5}$$

$$z_{ij} = j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} + j \frac{\omega\mu_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{\mu_r \cos \left[\alpha \sqrt{d_{ij}^2 - (H_j - H_i)^2} \right]}{\mu_r \alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} e^{(-\alpha(H_i + H_j))} d\alpha \tag{4.6}$$

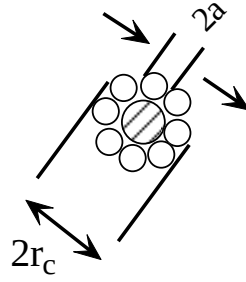
$$\beta^2 = j\omega\mu_r \frac{\mu_0}{\rho_e} \tag{4.7}$$

İletkenler genel olarak demet iletken olduğu için frekansa göre endüktansın ayrı ayrı hesaplanması yararlıdır [11].

4.1.1 Alçak Frekans 0-500 Hz

$$Z_c = \left[\frac{\rho_e}{n\pi a^2} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_c}{r_{gm}}\right) \right] u \quad (4.8)$$

a [m], dış tabakadaki telin yarıçapı ve n , iletkendeki tellerin toplam sayısıdır. ρ_c , örgülü iletkenin öz direnci; r_c , örgülü iletkenin yarıçapı ve r_{gm} , örgülü iletkenin geometrik ortalama yarıçapı olmaktadır [25].



Şekil 4.2 : $n = 2$ için İletken [21]

4.1.2 Yüksek Frekans 2-5 kHz

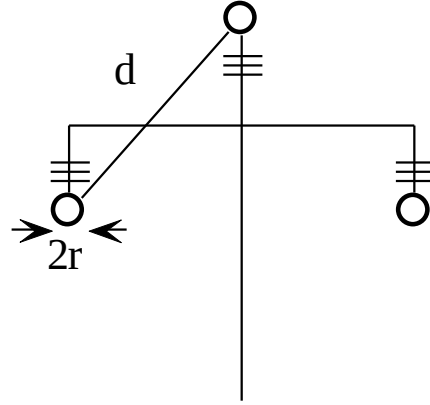
$$Z_c = \frac{k\sqrt{j\omega\mu_0\mu_r\rho_c}}{\pi a(2 + n_0)} u \quad (4.9)$$

k , düzeltme katsayısıdır. n_0 , örgülü iletkenlerin dış tabakasındaki alüminyum damarların sayısı ve μ_r , dış tabakadaki tellerin bağıl magnetik geçirgenliği olmaktadır.

$$Z = R_e + R_c + j\omega(L_e + L_c + L) \quad (4.10)$$

R_e , toprak direnci matrisi ve R_c , (diyagonal) iletken direncidir. L_e , toprak endüktans matrisi; L_c , (diyagonal) iletken iç endüktans matrisi; L , iletkenin dış endüktans matrisi olmaktadır [25].

4.1.3 Paralel Admitans Matrisinin Hesaplanması



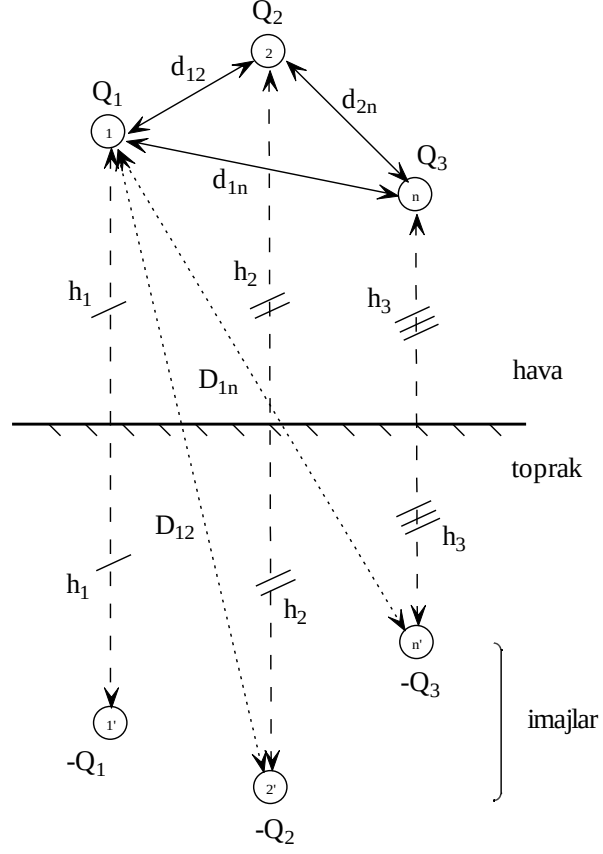
Şekil 4.3 : İletkenler Arası Uzaklık [25]

$\frac{d_{\min}}{r} > 10$ ise iletkenler arasındaki yakınlık etkisi çok küçüktür [25]. Paralel admitans hesaplamalarında ele alınan kabuller aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

1. Yakınlık etkisi göz ardı edilebilmektedir.
2. Deri etkisi göz ardı edilebilmektedir. İletken içindeki akım dağılımını düzgün kabul etmek mümkündür.
3. İletkenlerin burulma etkisi göz ardı edilebilmektedir. Burulma arttıkça iletken uzunluğu dolayısıyla direnç artmaktadır.
4. Deplasman akımları yüksek frekansta göz ardı edilebilmektedir.

İletim hattındaki iletkenlerin katı, silindrsel ve her fazda tek bir iletken olması kabulü ile [15],

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \begin{bmatrix} \ln 2 \frac{h_1}{r_1} & \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} & \cdot & \cdot & \ln \frac{D_{1n}}{d_{1n}} \\ \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} & \ln 2 \frac{h_2}{r_2} & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \ln \frac{D_{1n}}{d_{1n}} & \ln \frac{D_{2n}}{d_{2n}} & \cdot & \cdot & \ln 2 \frac{h_n}{r_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ Q_n \end{bmatrix} \quad (4.11)$$



Şekil 4.4 : İletim Hattı Geometrisi [25]

elde edilir. Buradan,

$$V_i = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} Q_i$$

$$Q_i = 2\pi\epsilon_0 \left[\ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \right]^{-1} V_i \quad (4.12)$$

$$C_{ij} = 2\pi\epsilon_0 \left[\ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \right]^{-1}$$

olarak bulunur [25]. Paralel admitans ise

$$Y = j\omega C = j\omega 2\pi\epsilon_0 \left[\ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \right]^{-1} \quad \begin{matrix} i = 1, \Lambda, n \\ j = 1, \Lambda, n \end{matrix} \quad (4.13)$$

olmaktadır.

4.2 PARAMETRE KESTİRİMİ

Arıza yeri belirleme algoritmaları, hesaplamalarda kullanılan iletim hattı parametrelerine çok duyarlıdır. Bu nedenle, parametre bilgilerinin doğruluğu, arıza yerinin doğruluğunda büyük önem taşımaktadır. Hat parametrelerinin hesaplanması için analitik yöntem olarak Carson formülasyonu uygulanmaktadır. Bu yöntem bir çok kabul ve iletim hattına ilişkin bilgiye gereksinim duymaktadır. Bu bilgilerden dikkate değer olanı; yeryüzünün nemi ile değişme gösteren ve toprak özelliklerine bağlı olarak değerinde çeşitlilik gösteren toprak direncidir [20]. Değişen şartlara bağlı olan hesaplama yöntemine dayanan bilgileri elde etmek için hem hassas ölçüm aletlerine hem de geniş hesaplama zamanına gereksinim duyulmaktadır. Bu nedenle istenilen anda hat parametrelerindeki ve hat özelliklerindeki değişime ulaşılamamaktadır.

Parametrelerin anında tanımlanması için bir çözüm yöntemi olan parametre kestirimi, hattın uçlarındaki akım ve gerilim ölçümlerine dayanmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte enerji iletim sistemi çalışır durumda iken parametre kestirimi gerçekleştirilebilmektedir. Eşzamanlı olarak elde edilen hatta ait akım ve gerilim işaretlerinden sistemdeki ve hat parametrelerindeki değişim izlenebilmektedir [4,5,10]. Sistemde oluşan dengesizlik ve bu dengesizliğin etkilerini anında görebilmek hem sistemi koruma hem de bakım ve onarım çalışmalarının yapılmasını sağlama açısından önem taşımaktadır. Parametre kestirimi, doğru arıza yeri için arıza yeri kestiriminde hatanın en aza indirilmesini ve en doğru müdahalenin en kısa sürede yapılmasını sağlayarak büyük kayıpları engellemektedir.

Enerji iletiminde önemli yer tutan bu parametrelerin hesaplanmasının yanında en etkin şekilde kestirilebilmeleri için ulusal ve uluslararası bir takım çalışmalar yapılmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte bilgisayar programları ve sistem benzetimlerinden yararlanılarak değişik çalışma koşulları altında ortaya çıkabilecek sorunları uygun şekilde yansıtmak ve çözüm bulmak üzere iletim hattı parametrelerinin kestirilebilmesi konusuna önem verilmektedir [4-10,26].

İletim hattı parametre kestirimi konusunda gerçekleştirilen araştırmalar arasında, aşırı yüklü iletim hattının parametre kestiriminde hattın iki ucunda sayısal olarak ölçülen akım ve gerilim değerlerini kullanarak çaprazlanmamış bir hattın empedans ve admitanslarının kestirimi için bir yöntem Philippot ve Maun tarafından sunulmuştur [5]. İletim hattının normal çalışma durumu ve tek fazlı arıza durumu için ölçüm değerleri ile elde edilen eşzamanlı gerilim ve akım fazörleri her bir durum için

incelenmiştir. Hat toplu parametrelili sistem olarak modellenmiştir. Bu yöntem kısa iletim hatları için uygundur.

Tek kutuplu anahtarlama ya da harici tek faz-toprak arızaları gibi yaygın asimetric enerji sistemi koşulları sırasında, hat terminallerindeki sayısal rölelerden bulunan arıza kayıtlarının temeline dayanan iletim hattı parametrelerinin kestirimine ilişkin bir yöntem Koglin ve Schmidt tarafından verilmiştir [6]. Önerilen bu yöntemin yararı, kasıtlı olarak arıza yada tek kutuplu anahtarlamaya gereksinim duymadan sayısal röle kayıtlarını kullanarak kestirim işlemini gerçekleştirmesidir. Bu yöntemde, sayısal rölelerden elde edilen arıza verileri ile seri iletim hattı parametreleri, normal koşullar altında ek ölçüm aletleri kullanılmadan elde edilmektedir. Çaprazlanmamış iletim hatlarının ele alınmaması çalışmanın eksikliğidir.

Fazör ölçüm (PMU) temelli arıza algılama ve yerini belirleme tekniğine ilişkin çalışma aynı zamanda bir hat parametre kestirimi algoritmasını da içermektedir [7]. Kullanılan parametre kestirim algoritması, iletim hattının yaşlanmasından kaynaklanan parametre belirsizliğini çözmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu parametre belirsizliği problemi, arıza yeri belirlenmesinde hatayı arttırdığı için büyük önem taşımaktadır. Ayrıca ısı değişimi, hatların simetrisizliği, yük akışındaki değişim gibi nedenler de parametre belirsizliği yaratabilmektedir. Harmoniklerin, gürültü ve nominal frekansın iniş çıkışlarıyla olan frekans çalkantılarının fazörlerin hesabı üzerindeki etkileri gidermek için DFT (Discrete Fourier Transform) filtreleme kullanılmıştır. Önerilen yöntemlerin verdikleri sonuçlar, saha testleri ile sınanmıştır. GSCG (Global Synchronism Clock Generator) zamanlama cihazı kullanılmıştır. Sonuçlar, frekans çalkantısı ve harmoniklerin varlığında, eşzamanlı fazör ölçüm tekniğinin varlığıyla tam doğru fazörler elde edilebildiğini göstermektedir.

Kısa hat için Gopalakrishnan tarafından [10] önerilmiş olan yöntem, iletim hattı uçlarındaki akım ve gerilim işaretlerini ele alarak adaptif parametre kestirimini gerçekleştirmektedir. Yöntem hat mod parametrelerinin kestiriminde, normal çalışma ve hat dışındaki bir arıza için ölçülecek verileri kullanmaktadır.

Bu tez çalışmasına konu teşkil eden parametre kestirimi için biri zaman domeninde [10] diğeri fazör domeninde [7] olmak üzere iki yöntem göz önüne alınarak ayrıntılı olarak incelenmiştir.

4.2.1 Zaman Domeninde Parametre Kestirimi

Enerji iletim hattının her iki ucundaki akım ve gerilim bilgilerini zaman domeninde kullanarak, kısa hat için parametrelerin kestirimi gerçekleştirilebilmektedir [10]. Adaptif parametre kestirimi olarak adlandırılan yöntemde kestirim süresince Lyapunov teorisinden yararlanılmaktadır.

4.2.1.1 Lyapunov teorisi

Rus matematikçisi Lyapunov, diferansiyel denklemlerin çözümünün kararlılığı üzerine iki önemli yöntem açıklamıştır. 1892 yılında açıklanan bu iki yöntem, uygulamada kullanma açısından şu biçimde açıklanabilir: Birinci yöntem, diferansiyel denklemin çözümünü kullanır ve dinamik sistemin kararlı olup olmadığını saptamaya yarar. İkinci yöntem ise dinamik sisteme ilişkin diferansiyel denklemin çözümünü bulmadan sistemin kararlılığını inceleme olanağını vermektedir. Doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin analitik çözümleri elde edilemediğinden böyle sistemlerin kararlılığı, Lyapunov' un ikinci yöntemi ile incelenebilmektedir [27, 28]. Böylece, Lyapunov' un ikinci yöntemi daha önemlidir. Bu yöntemler Ek-A' da verilmektedir.

4.2.1.2 Adaptif parametre kestirimi

Adaptif kestirim şeması,

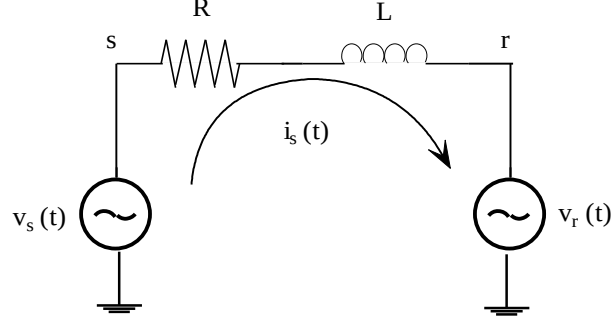
$$\dot{x} = ax + bu, \quad x(0) = x_0 \quad (4.14)$$

ile ifade edilebilir. Burada x , sistemin durum değişkeni ve u , giriş büyüklüğüdür. a ve b bilinmeyen parametrelerdir. x_0 , $t = 0$ anındaki başlangıç koşuludur. Kestirim süreci a ve b için $\hat{a}$ ve $\hat{b}$ olmak üzere kestirimlerle başlar. Bu kestirimler yeni durum değişkeni $\hat{x}$ ' in hesaplanmasında kullanılmaktadır. Aradaki fark, kestirim hatası ε olarak ifade edilmektedir.

$$\varepsilon = x - \hat{x} \quad (4.15)$$

adapte edilmiş kural kullanılarak $\hat{a}$ ve $\hat{b}$ değiştirilmektedir. $t \rightarrow \infty$ olduğunda $\varepsilon \rightarrow 0$ ve $\hat{a} \rightarrow a$ ve $\hat{b} \rightarrow b$ olmaktadır. Diğer bir ifadeyle parametreler kendi değerlerine yaklaşmaktadırlar [10].

İletim hattının parametre kestirimi için yöntem uygulandığında ilk adım 3 fazlı ortak kuplajlı devrelerin 3 tek fazlı kuplajsız devrelere modal dönüşüm ile dönüştürülmesidir.



Şekil 4.5 : R ve L Elemanlarından Oluşan Kısa İletim Hattı

Şekil 4.5' te gösterilen sadece seri direnç (R) ve endüktans (L) elemanlarının göz önüne alındığı bir kısa iletim hattı için hatbaşı gerilimi,

$$v_s(t) = Ri_s(t) + L \frac{di_s}{dt} + v_r(t) \quad (4.16)$$

dir. Bu eşitlik, (4.17) denkleminde düzenlenebilir:

$$\frac{di_s}{dt} = -\frac{R}{L} i_s + \frac{1}{L} (v_s - v_r) \quad (4.17)$$

Böylece, (4.16) ve (4.17) eşitliklerinden, kısa iletim hattı için a ve b parametreleri ile x ve u değişkenleri arasındaki ilişki,

$$a = -\frac{R}{L}, \quad b = \frac{1}{L} \quad (4.18)$$

$$x = i_s \quad u = v_s - v_r$$

olarak elde edilmektedir. Lyapunov teoremine dayanan kestirim tekniğinde, öncelikle sistemin kestirilen durum parametresi $\hat{x}$,

$$\dot{\hat{x}} = a_m \hat{x} + (\hat{a} - a_m)x + \hat{b}u \quad (4.19)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır [10]. $a_m < 0$ olacak şekilde tasarım sabiti, $\hat{a}$ ve $\hat{b}$ sırasıyla a ve b 'nin kestirimleridir. (4.15) ve (4.19) eşitliklerinden kestirim hatası ε için,

$$\dot{\varepsilon} = a_m \varepsilon - \tilde{a}x - \tilde{b}u \quad (4.20)$$

(4.20) eşitliğindeki $\tilde{a} = \hat{a} - a$ ve $\tilde{b} = \hat{b} - b$, parametre kestirimlerindeki hatalardır. (4.20) eşitliği denge durumun $\varepsilon_e = 0, \tilde{a}_e = 0, \tilde{b}_e = 0$ olması halidir. Lyapunov aday fonksiyonu olarak

$$V = \frac{1}{2}(\varepsilon^2 + \tilde{a}^2 + \tilde{b}^2) \quad (4.21)$$

alındığında, fonksiyonun zamana göre türevi,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \varepsilon \dot{\varepsilon} + \tilde{a} \dot{\tilde{a}} + \tilde{b} \dot{\tilde{b}} \\ &= \varepsilon(a_m \varepsilon - \tilde{a}x - \tilde{b}u) + \tilde{a} \dot{\tilde{a}} + \tilde{b} \dot{\tilde{b}} \\ &= a_m \varepsilon^2 - \tilde{a} \varepsilon x - \tilde{b} \varepsilon u + \tilde{a} \dot{\tilde{a}} + \tilde{b} \dot{\tilde{b}} \end{aligned} \quad (4.22)$$

(4.20) eşitliğinin denge durumu durağanlığı için gereken koşul, $\dot{V} \leq 0$ 'dır. Eğer (4.22) eşitliğinde $\dot{\tilde{a}} = \varepsilon x$ ve $\dot{\tilde{b}} = \varepsilon u$ olması durumları seçilirse

$$\dot{V} = a_m \varepsilon^2 \leq 0 \quad (4.23)$$

olmaktadır. (4.20) eşitliğinin denge sabiti, durağandır. Bu durum $t \rightarrow \infty$ olduğunda

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &\rightarrow 0 \\ \dot{\tilde{a}}(t) &\rightarrow 0 \\ \dot{\tilde{b}}(t) &\rightarrow 0 \end{aligned} \quad (4.24)$$

ile ifade edilmektedir [10]. (4.24) eşitlikleri, a ve b parametrelerinin adaptif kestirimine ilişkindir. Tek başına kısa hat için uygulama ve sonucu Ek-B' de yer almaktadır.

4.2.2 Fazör Domeninde Parametre Kestirimi

Gerçek sistemlerde sayısal mesafe rölelerinin koruması ve arıza yeri kestirimi alanındaki önemli problem iletim hattı parametre hesabıdır. Çoğunlukla değeri belirlenemeyen sistemi etkileyen faktörlerle, yeterli doğrulukla parametre hesabı yapmak mümkün olamamaktadır [7]. Özellikle frekans, toprak direnci, doyma etkisi gibi bir takım faktörler, hat parametre değerlerini etkilemektedir. Ayrıca akım ve gerilim transformatörleri hesaplanan değerlerde farklılık yaratabilmektedir. Bu durum özel ölçüm aletleri ile her bir iletim hattı parametrelerinin tek tek belirlenmesini gerektirmektedir. İletim hattı izolasyonu nedeniyle bu işlem pahalı ve zaman kaybettiricidir. Bu nedenle sayısal rölelerden elde edilen arıza verileri ile iletim hattı pozitif dizi devre parametreleri, normal koşullar altında ek ölçüm aletleri kullanmadan elde edilebilmektedir. Ayrıca paralel iletim hatlarının sıfır dizi bileşenlerini de bulmak mümkün olabilmektedir [29]. Böylelikle mesafe rölesi ve arıza yeri belirleyicileri ile hesaplama yapılabilir. Sıfır dizi devre parametrelerinin belirlenebilmesi ancak simetrisizlik durumunda gerçekleştirilebilmektedir. Günümüzde koruma elemanları arıza meydana geldiğinde; çok kısa sürede çok sayıda arıza verileri kaydedilebilmektedir. Göz önüne alınan hattın dışında meydana gelen arızalara ilişkin veriler kullanıldığında, 3 fazlı sistem 3 adet tek fazlı sisteme dönüştürülebilmektedir. Böylece her bir tek fazlı sistemin hat parametreleri bağımsız olarak elde edilebilmektedir [7].

4.2.2.1 İletim hatlarının matematiksel ifadesi

Tek fazlı iletim hattı pasif, karşılıklı, iki uçlu bir sistem olarak düşünülebilir. Böylece sistemin geri kalan kısmı Z_B ile ifade edilerek sınırlandırılabilir [7]. Enerji iletim hattının iki kapılı modeli Şekil 4.6' da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : Enerji İletim Hattı İki Kapılı Modeli [7]

Bu sistem için hatbaşı ile hatsonu gerilim ve akımları arasındaki ilişki,

$$\begin{bmatrix} V_A \\ I_A \end{bmatrix} = K \times \begin{bmatrix} V_B \\ I_B \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

olarak verilir. Burada K , bir karmaşık sayılardan oluşan matristir ve

$$K = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

olarak tanımlanır. İletim hattı uzunluğu l , karakteristik empedans Z_c ve yayılma sabiti γ ile tanımlanmaktadır. İki kapılı modelin kısa devre giriş empedansı Z_K

$$Z_K = \lim_{Z_B \rightarrow 0} Z_A = Z_c \tanh(\gamma l) = \frac{B}{A} \quad (4.27)$$

olarak ve açık devre giriş admitansı Y_L ise

$$Y_L = \lim_{Z_B \rightarrow \infty} Z_A = \frac{1}{Z_c} \tanh(\gamma l) = \frac{C}{A} \quad (4.28)$$

olarak ifade edilmektedir.

4.2.2.2 Kestirim prensipleri

İletim hattı parametreleri vektörü x ve türetilen parametrelerinin oluşturduğu y vektörü arasındaki ilişki doğrusal veya doğrusal olmayan şekilde

$$y = h(x) + r \quad (4.29)$$

olarak ifade edilmektedir [7]. r , normal dağılımlı bilinmeyen ölçüm hatalarıdır. Parametre kestirimi yapılırken doğrusal veya doğrusal olmayan, aşırı-belirli bir sistem çözülmelidir. Bu çözüm işleminde,

$$GHx = Gy \quad (4.30)$$

Jacobian matris H , [30]

$$H = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \quad (4.31)$$

dir. M , karşılıklı türetilmiş değerlerin sayısı olmak üzere, ağırlık matrisi G ,

$$G = diag\left(\frac{1}{\sigma_1}, \Lambda, \frac{1}{\sigma_M}\right) \quad (4.32)$$

olmaktadır. Burada σ_i , i nci değere ilişkin standart sapmadır.

4.2.2.2.1 Eşzamanlı örnekleme ile parametre kestirimi

Eğer hattın iki ucundan elde edilen akım ve gerilim örnekleri eşzamanlı ise, iletim hattı parametreleri, sadece bir olay değeri biçilerek doğrudan kestirilebilmektedir [7]. Hattın iki ucunda ölçülen akım ve gerilim değerlerinden oluşan kompleks fazörler giriş değerleri olmaktadır. Hatsonu gerilim ve akım değeri,

$$\begin{bmatrix} V_B \\ I_B \end{bmatrix} = K^{-1} \times \begin{bmatrix} V_A \\ I_A \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

ile bulunur. (4.25) eşitliği ve sistemin iki kapılı pasif bir sistem olduğu kabulü ile

$$\det(K) = 1 \quad (4.34)$$

ve buradan

$$A = D \quad (4.35)$$

elde edilir. Bu koşullar altında,

$$A = \frac{V_A I_A + V_B I_B}{V_A I_B + V_B I_A} \quad (4.36)$$

$$B = \frac{V_A^2 - V_B^2}{V_A I_B + V_B I_A} \quad (4.37)$$

$$C = \frac{I_A^2 - I_B^2}{V_A I_B + V_B I_A} \quad (4.38)$$

elde edilir (Bu denklemlerin eldesi Ek-C' de verilmiştir.). Böylece elde edilen 3 denklemden, K matrisinin değerleri hesaplanabilir.

K matrisinin elemanları kullanılarak, iletim hattı iki kapılı gösterimine ilişkin kısa devre giriş empedansı ve açık devre giriş admitansı

$$Z_K = \frac{B}{A} = \frac{V_A^2 - V_B^2}{V_A I_A + V_B I_B} \quad (4.39)$$

$$Y_L = \frac{C}{A} = \frac{I_A^2 - I_B^2}{V_A I_A + V_B I_B} \quad (4.40)$$

ile hesaplanabilir [7].

Birden fazla durum göz önüne alınarak yapılan değerlendirmelerde doğruluk payı artmakta ve daha büyük oranda kesinlik kazanmaktadır. Bu durumda (4.30) denkleminde göre ağırlıklı ortalama değer hesaplanmalıdır. Bunun göz önüne alınmasının nedeni, ağır yüklü durumlarda yapılan ölçümlerin kısa devre giriş empedansını belirlemede uygun olmasıdır. Bununla beraber ölçümler hafif yük durumlarının açık devre giriş admitansının belirlenebilmesi için daha uygun olmaktadır. En az 3 olay ile sonuç değerlendirilmektedir.

4.2.2.2.2 Eşzamanlı olmayan örneklenmiş verilerle parametre kestirimi

Sayısal röleler bir merkezden idare edilmeden yani merkezileştirilmemiş biçimde özerk bir şekilde çalıştığında bu durum olur. Her iki uçta eşzamanlı olmayan örneklemeden elde edilen veriler kullanıldığında iletim hattı parametrelerinin kestirimi yine mümkündür. Empedanslar, gerilim genlikleri, aktif ve reaktif akımlar, ayrı olarak ölçülen akım ve gerilimler kullanılarak hesaplanabilmektedir [7].

Doğrusal kestirimci

Giriş büyüklükleri, her bir ölçüm noktasındaki, empedans değerleri,

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} \quad (4.41)$$

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B}$$

dir. Eğer iletim hattı parametreleri olarak kısa devre giriş empedansı ve açık devre giriş admitansı kullanılırsa,

$$Z_A = \frac{Z_B \cosh(\gamma l) + Z_c \sinh(\gamma l)}{\frac{Z_B}{Z_c} \sinh(\gamma l) + \cosh(\gamma l)} \quad (4.42)$$

olur. Aynı zamanda

$$Z_A = \frac{Z_B A + B}{Z_B C + A} \quad (4.43)$$

denkleminde Z_K ve Y_L ifadeleri kullanılırsa ve oluşan denklem düzenlenirse

$$Z_K = Z_A - Z_B + Z_A Z_B Y_L \quad (4.44)$$

denklemini elde edilmektedir. Açık devre giriş admitansı esas olarak çok az değişime uğrayan iletim hattı kapasitesine bağlıdır. Bu yüzden Y_L ' e standart bir değer vermek mümkündür. Yükteki artış, Y_L ' deki hata oranının küçülmesini ve Z_K ' nın doğruluğu aynı oranda etkilemektedir. Birden fazla durum için elde edilen verileri kullanarak kestirim de mümkündür. Bu durumda,

$$\begin{bmatrix} 1 & -Z_{A1}Z_{B1} \\ 1 & -Z_{A2}Z_{B2} \\ \cdot & \cdot \\ 1 & -Z_{AM}Z_{BM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_K \\ Y_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{A1} - Z_{B1} \\ Z_{A2} - Z_{B2} \\ \cdot \\ Z_{AM} - Z_{BM} \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

Karmaşık sayılardan oluşan doğrusal denklemleri yazılabilir (Bu denklemlerin eldesi Ek-C' de verilmiştir, denklemin örnek sistemde kullanımı Ek-D' de yer almaktadır.). Alt indis M , göz önüne alınan durum sayısıdır. (4.45) denklemini $2 \times M$ adet denklem ve 4 adet bilinmeyenli bir denklem sistemine dönüştürülebilir. Prensip olarak en az 2 durum gereklidir ve en az 3 durum için veri varsa, ağırlıklı küçük kareler yöntemini kullanarak hesaplama yapılabilir.

Doğrusal olmayan kestirimci

Bu yöntemde giriş büyüklükleri eşzamanlı örneklemeden bağımsız olan her iki uçtaki gerilim genliği, aktif ve reaktif akımlardır. Hattın iki kapılı gösterimi için admitans parametreleri kullanılırsa,

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} \\ -Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

$$\begin{aligned} I_A &= CV_B + DI_B \\ V_A &= AV_B - BI_B \end{aligned} \quad (4.47)$$

elde edilir. Bu denklemlerden, admitans matrisinin elemanları Y_{11} ve Y_{12}

$$\begin{aligned} Y_{11} &= \frac{A}{B} \\ Y_{12} &= \frac{1}{B} \end{aligned} \quad (4.48)$$

olarak bulunur (Bu denklemlerin eldesi Ek-C' de verilmiştir.). Gerilimler ve akım fazörleri,

$$\begin{aligned} V &= V \exp(j\phi_V) \\ I &= I \exp(j\phi_I) \end{aligned} \quad (4.49)$$

dir. Aktif ve reaktif akımlar 'a' ve 'r' indisleri ile tanımlanırsa,

$$\begin{aligned} I_a &= I \cos(\phi_I - \phi_V) \\ I_r &= I \sin(\phi_I - \phi_V) \end{aligned} \quad (4.50)$$

dir. Açılar ile

$$\Delta\phi = \phi_{VB} - \phi_{VN} \quad (4.51)$$

tanımlaması yapılırsa,

$$\begin{aligned} I_{Aa} + jI_{Ar} &= Y_{11}V_A - Y_{12}V_B \exp(j \times \Delta\phi) \\ I_{Ba} + jI_{Br} &= -Y_{12}V_A \exp(-j \times \Delta\phi) + Y_{11}V_B \end{aligned} \quad (4.52)$$

yazılabilir [7].

Sonuç olarak, ağırlıklı küçük kareler yöntemine göre iterasyon yapılarak çözülen doğrusal olmayan denklemlerden oluşan bir sistem elde edilir. En az 2 durum için ölçülen veriler ile hesaplamaların yapılması mümkün olmaktadır.

4.2.2.3 Ağırlıkların hesaplanması

Gerilim ve akım örnekleri kullanılarak bir seri hesaplama sonucu büyüklükler elde edilir. Bu hesaplamalar, modal dönüşüm, Fourier temelli yöntemler ile fazörlerin belirlenmesi ve empedans, gerilim genliği, aktif ve reaktif akımların hesaplanmasını içerir. Bu büyüklüklerin standart sapması, Gauss' un hata yayılım kuralının uygulanmasıyla hesaplanabilir [30]. Gereksinim duyulan veriler, yüzde olarak gerilimin standart sapması σ_v ve akımın standart sapması σ_i ' dir.

Modal dönüşüm (örneğin Clarke dönüşümü), her bir moddaki standart sapmaları azaltmaktadır. 'Mod' ile gösterilen standart sapmalar; standart sapmaların $\sqrt{3}$ ' e bölünmesi şeklinde gösterilmektedir [7].

$$\begin{aligned}\sigma_{v, \text{mod}} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_v \\ \sigma_{i, \text{mod}} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_i\end{aligned}\tag{4.53}$$

Karmaşık sayılardan oluşan V_{mod} ve I_{mod} fazörlerinin hesaplanması ile

$$\begin{aligned}\sigma_{V, \text{mod}} &= \sigma_{v, \text{mod}} \sqrt{\frac{2}{n}} \\ \sigma_{I, \text{mod}} &= \sigma_{i, \text{mod}} \sqrt{\frac{2}{n}}\end{aligned}\tag{4.54}$$

olur. Burada n , kullanılan örnek sayısıdır. Doğrusal kestirimci için, karmaşık sayı olan empedans $Z = R + jX$ ' nin hesabı

$$\sigma_R = \sigma_X = z \sqrt{\left(\frac{\sigma_{V, \text{mod}}}{V_{\text{mod}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I, \text{mod}}}{I_{\text{mod}}}\right)^2}\tag{4.55}$$

verir. y vektörünün lokal empedansların farkını içermesi nedeniyle R ve X parametreleri için elde edilen standart sapmalar,

$$\begin{aligned}\sigma_R &= \sqrt{(\sigma_{RA})^2 + (\sigma_{RB})^2} \\ \sigma_X &= \sqrt{(\sigma_{XA})^2 + (\sigma_{XB})^2}\end{aligned}\tag{4.56}$$

olur [7]. Doğrusal olmayan kestirim için gerilim modülünün standart sapması (4.54) numaralı denklemlerde verilmektedir. Aktif ve reaktif akımların hesaplanmasındaki standart sapmalar ise,

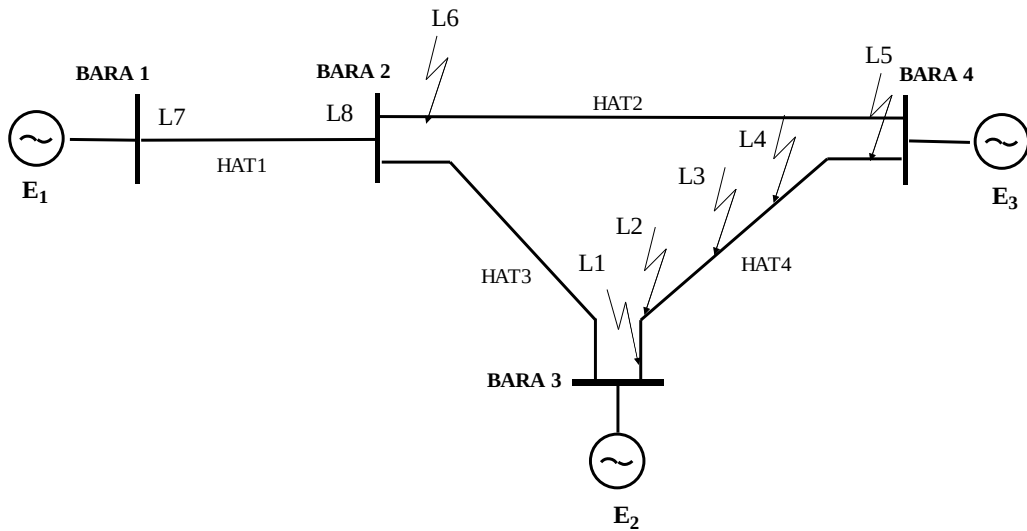
$$\begin{aligned}\sigma_{I_{a,\text{mod}}} &= \sqrt{\sigma_{I,\text{mod}}^2 + \left(I_{r,\text{mod}} \frac{\sigma_{I,\text{mod}}}{V_{\text{mod}}} \right)^2} \\ \sigma_{I_{r,\text{mod}}} &= \sqrt{\sigma_{I,\text{mod}}^2 + \left(I_{a,\text{mod}} \frac{\sigma_{I,\text{mod}}}{V_{\text{mod}}} \right)^2}\end{aligned}\tag{4.57}$$

dir. Böylece ağırlık matrisinin elemanları, her bir durum için her ölçüm noktasında hesaplanabilmektedir. Bu elemanlar, ölçüm sisteminin doğruluğuna, gerilim ve akımlarının genliklerine ve kullanılan örnek sayısına bağlıdır.

5 ÖRNEK SİSTEM İNCELEMESİ

Sistemi korumak, bakım ve onarım çalışmalarını yapmak amacıyla sistem dengesizliğini anında fark edebilmek ve olumsuz etkilerini en kısa sürede giderebilmek açısından parametre kestirimi önem taşımaktadır. Parametre kestirimi, arıza yeri kestiriminde doğru arıza yeri için hatanın en aza indirilmesini ve en kısa sürede en doğru müdahalenin yapılmasını sağlayarak büyük kayıpları engellemektedir.

Tez çalışmasına konu teşkil eden parametre kestirimi için sunulan biri zaman domeninde [10] diğeri fazör domeninde [7] iki yöntemin örnek sistem üzerinde uygulaması ve uygulama sonucu olarak elde edilen verilerin doğruluk oranı sunulmuştur. Çeşitli inceleme durumları ve çalışma koşulları için iki yöntem için de tekrarlanan benzetim senaryoları alt başlıklar olarak hazırlanmıştır. Şekil 5.1’ de gösterilen örnek sistem, 3 generatör grubuyla beslenen 4 baralı bir sistemdir.



Şekil 5.1 : Örnek Sistem Şeması

İncelemelerde ilk olarak örnek sisteme ait hat verileri, iletken özellikleri ve direk konfigürasyonu gibi bilgileri kullanan ve Carson formülüne dayalı olarak analitik yolla hesaplamaları gerçekleştiren EMTP-ATP programında yer alan LCC (Line Constants and Cable Costants) alt programı ile oluşturulmuştur [21]. Daha sonra

dengeli ve dengesiz çalışma koşullarında sistemde göz önüne alınan hatta ilişkin hat parametrelerinin kestirimi zaman domenindeki ve fazör domenindeki yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Yöntemlerin uygulanabilirliği çeşitli kriterlerin araştırılmasıyla incelenmiştir.

5.1 154 kV' LUK İLETİM HATTI İÇİN ÖRNEK SİSTEM TASARIMI

5.1.1 İletken Seçimi

154 kV gerilim kademesinde iletim yaptığı varsayılan, örnek sistemdeki iletim hatları için ACSR (çelik destekli alüminyum iletken) iletkenlerden “Hen” iletkeni seçilmiştir. ACSR tipi iletkenler, uzun mesafe yüksek gerilim ile dağıtımdaki alt sistemlerdeki farklı gerilim kademelerinde hava iletim hatları için tercih edilmektedir [32,33]. Seçilen iletkene ilişkin fiziksel özellikler Tablo 5.1’ de verilmiştir.

Tablo 5.1: Hen İletkeninin Fiziksel Özellikleri

İletken bilgileri						
Kod adı	Boyut (AWG veya cmil)	Boyut (mm ²)	İletkenlerin sayısal dağılımı (alüminyum/çelik)	Dış Yarıçap (cm)	R _{DC} (Ω/km)	Ağırlık (kg/mil)
Hen	477.000	242	30/7	1.1214	0.1342	1112

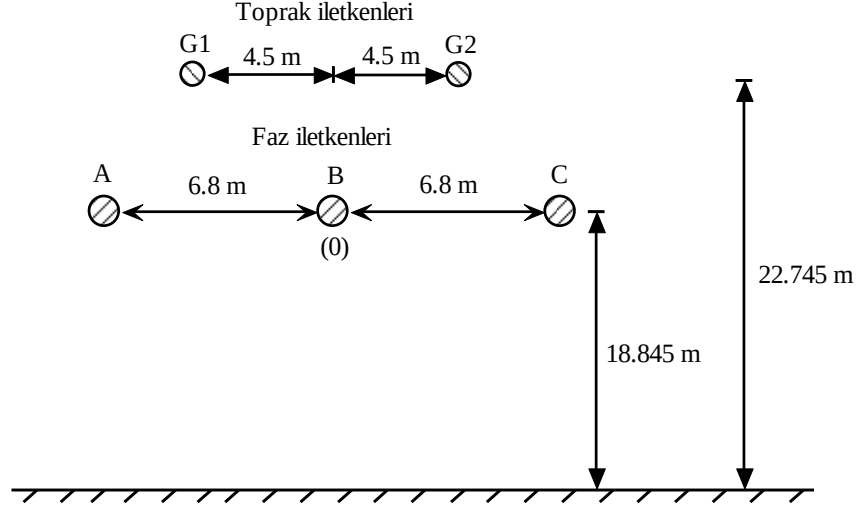
Çelik iletken olarak seçilen toprak iletkeninin özellikleri ise aşağıda verilmiştir;

$$\text{Çap: } 5/16 [\text{inç}] = 0.7938 [\text{cm}]$$

$$\text{Yarıçap: } 0.3125 / 2 [\text{inç}] = 0.3969 [\text{cm}]$$

$$\text{Direnç: } 4 [\Omega / \text{mil}] = 2.4855 [\Omega / \text{km}]$$

Türkiye enerji iletim sisteminde kullanılan A2 tipi direk esas alınarak oluşturulan direk konfigürasyonuna ilişkin veriler ise Şekil 5.2’ de şekil üzerinde gösterilmiştir [34]. Direk konfigürasyonunda yer alan iletkenlerin toprak ile olan uzaklıkları, iletkenlerin yerleşim düzeni, direk yüksekliği, toprak iletkenlerinin özellikleri ve Hen iletkeninin değerleri yani seçilen faz iletkeni ve toprak iletkenine ait özellikler sistem bilgisi olarak EMTP-ATP programına giriş verisi olmaktadır. Hat modelinin, hat uzunluğunun, sistemin frekans ve gerilim değerlerinin, deri etkisinin göz önüne alınmasının, hattın çaprazlanmasına ait seçimin kullanıcı tarafından yapıldığı, LCC (Line Constants and Cable Constants) alt programında yapılan hesaplamalarla hat parametreleri değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.2 : Seçilen Tek Devre A2 Direk Tipinin Özellikleri

5.1.2 Kısa İletim Hattı Olması Durumu

154 kV' luk 4 baralı örnek sistem için Bara1 ve Bara2 arasında yer alan hat incelemelerde parametreleri kestirilecek hat olarak göz önüne alınmıştır. Hat1 olarak adlandırılan bu hattın ilk olarak 20.5 km uzunluğunda bir kısa iletim hattı olduğu farz edilerek parametreleri hesaplanmıştır. EMTP-ATP programı ile bulunan Hat1 parametreleri Tablo 5.2' de verilmektedir.

Tablo 5.2: ATP-EMTP Programı ile Bulunan İlgilenilen Kısa İletim Hattı Parametreleri

Hat no.	Hat uzun. (km)	Pozitif dizi empedansı [Ω]	Sıfır dizi empedansı [Ω]	Pozitif dizi reaktif güç [MVar]	Sıfır dizi reaktif güç [MVar]
Hat1	20.5	2.79+j8.831	9.005+j24.32	j1.303	j0.9106

$$Z_{hat} = 2.79 + j8.831 = 9.261 \angle 72.47^\circ$$

5.1.2.1 Kaynak eşdeğerleri

Sistem dengesini korumak amacıyla yer alan generatörlerin yüklenme özelliklerine dayanarak iç empedans değerleri ilgilenilen hattın uzunluğuna ve hat parametrelerine bağlı olarak değiştirilmektedir. Sistemde yer alan kaynaklar, kendi içlerinde sistemdeki önem derecelerine göre sıralanmaktadır. Pozitif ve sıfır dizi

kaynak empedansları kaynakların önem derecelerinden ileri gelen katsayılar ile hesaplanmaktadır [35]. Tablo 5.3’ te kaynak özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 5.3: Kaynak Özellikleri

Kaynak tipi	$\frac{ Z_1 }{ Z_{hat} }$	Z_1 ' in açısı	$\frac{ Z_0 }{ Z_1 }$	Z_1 ' in açısı - Z_0 ' ın açısı
Güçlü	0.08	89°	1.5	-1°
Orta	0.3	87°	1	-3°
Zayıf	1	85°	2	-5°

Orta dereceli kaynak:

$$|Z_1| = |Z_{hat}| \cdot 0.3 = 2.7783$$

$$Z_1 = 2.7783 \angle 87^\circ \quad (5.1)$$

$$R_1 = 0.1454$$

$$X_1 = 2.7745, L_1 = 8.8315 \cdot 10^{-3}$$

$$\frac{|Z_0|}{|Z_1|} = 1, |Z_0| = 2.7783, \angle Z_0 = 84^\circ$$

$$Z_0 = 2.7783 \angle 84^\circ \quad (5.2)$$

$$R_0 = 0.2904$$

$$X_0 = 2.763, L_0 = 8.7993 \cdot 10^{-3}$$

$$S_{k.d} = \frac{154^2}{2.7783} = 8562 [MVA] \quad (5.3)$$

Zayıf kaynak:

$$|Z_1| = |Z_{hat}| \cdot 1 = 9.261$$

$$Z_1 = 9.261 \angle 85^\circ \quad (5.4)$$

$$R_1 = 0.8071$$

$$X_1 = 9.2258, L_1 = 2.938 \cdot 10^{-2}$$

$$\begin{aligned}\frac{|Z_0|}{|Z_1|} &= 2, |Z_0| = 18.522, \angle Z_0 = 80^\circ \\ Z_0 &= 18.522 \angle 80^\circ\end{aligned}\tag{5.5}$$

$$\begin{aligned}R_0 &= 3.2163 \\ X_0 &= 18.2406, L_0 = 5.809 \cdot 10^{-2}\end{aligned}$$

$$S_{k.d} = \frac{154^2}{9.261} = 2572.23 [MVA]\tag{5.6}$$

Güçlü kaynak:

$$\begin{aligned}|Z_1| &= |Z_{hat}| \cdot 0.1 = 0.9261 \\ Z_1 &= 0.9261 \angle 89^\circ \\ R_1 &= 0.0162 \\ X_1 &= 0.926, L_1 = 2.949 \cdot 10^{-3}\end{aligned}\tag{5.7}$$

$$\begin{aligned}\frac{|Z_0|}{|Z_1|} &= 1.5, |Z_0| = 1.3892, \angle Z_0 = 88^\circ \\ Z_0 &= 1.3892 \angle 88^\circ\end{aligned}\tag{5.8}$$

$$\begin{aligned}R_0 &= 0.0485 \\ X_0 &= 1.3884, L_0 = 4.421 \cdot 10^{-3}\end{aligned}$$

$$S_{k.d} = \frac{154^2}{0.9261} = 25611.23 [MVA]\tag{5.9}$$

5.1.2.2 İletim hattı parametreleri

$$\begin{aligned}R_1 &= 0.1361 [\Omega / km] \\ X_1 &= 0.43078 [\Omega / km] \\ R_0 &= 0.43927 [\Omega / km] \\ X_0 &= 0.18634 [\Omega / km]\end{aligned}\tag{5.10}$$

olarak elde edilen iletim hattı parametrelerinden oluşan seri empedans ve paralel admitans değerleri aşağıda verilmektedir.

$$Y_{1(20.5)} = \frac{1.303}{154^2} = 54.9418 \cdot 10^{-6} [mho]$$

(5.11)

$$Y_1 = 2.6801 \cdot 10^{-6} [mho / km]$$

$$Y_{0(20.5)} = \frac{0.9106}{154^2} = 38.3968 \cdot 10^{-6} [mho]$$

(5.12)

$$Y_0 = 1.873 \cdot 10^{-6} [mho / km]$$

Sistemde yer alan tüm iletim hatlarının özellikleri Tablo 5.4' te, kaynakların özellikleri ise Tablo 5.5' de verilmiştir.

Tablo 5.4: Hat Parametreleri

Hat no.	Hat uzun. (km)	Pozitif dizi empedansı [Ω]	Sıfır dizi empedansı [Ω]	Pozitif dizi admitansı [1/Ω]	Sıfır dizi admitansı [1/Ω]
Hat1	20.5	2.79+j8.831	9.005+j24.32	j54.942*10 ⁻⁶	j38.392*10 ⁻⁶
Hat2	40	5.444+j17.2312	17.5708+j47.4536	j107.204*10 ⁻⁶	j74.92*10 ⁻⁶
Hat3	60	8.166+j25.8468	26.3562+j71.1804	j160.806*10 ⁻⁶	j112.38*10 ⁻⁶
Hat4	30	4.083+j12.9234	13.1781+j35.5902	j80.403*10 ⁻⁶	j56.19*10 ⁻⁶

Tablo 5.5: Kaynak İç Empedansı

Kaynak no.	Kaynak gerilimi (V) [p.u.]	Pozitif dizi empedansı [Ω]	Sıfır dizi empedansı [Ω]
Kaynak1	1.0058∠8°	0.1454+j2.7745	0.2904+j2.763
Kaynak2	0.996∠4°	0.8071+j9.2258	3.2163+j18.2406
Kaynak3	1.03∠0°	0.0162+j0.926	0.0485+j1.3884

5.1.3 100 km Uzunluğunda İletim Hattı Olması Durumu

Göz önüne alınan iletim hattının 100 km uzunluğunda iletim hattı olması durumu için örnek sistem hat ve kaynak verileri, kısa hat durumu için yapılanlara benzer şekilde elde edilmiştir. Sistem hat verileri Tablo 5.6, kaynaklara ilişkin veriler ise Tablo 5.7' de verilmiştir.

Tablo 5.6: Hat Parametreleri

Hat no.	Hat uzun. (km)	Pozitif dizi empedansı [Ω]	Sıfır dizi empedansı [Ω]	Pozitif dizi admitansı [1/Ω]	Sıfır dizi admitansı [1/Ω]
Hat1	100	13.76+j43.29	44.88+j119.7	j268.63*10 ⁻⁶	j188.31*10 ⁻⁶
Hat2	40	5.444+j17.2312	17.5708+j47.4536	j107.204*10 ⁻⁶	j74.92*10 ⁻⁶
Hat3	60	8.166+j25.8468	26.3562+j71.1804	j160.806*10 ⁻⁶	j112.38*10 ⁻⁶
Hat4	30	4.083+j12.9234	13.1781+j35.5902	j80.403*10 ⁻⁶	j56.19*10 ⁻⁶

Tablo 5.7: Kaynak İç Empedansı

Kaynak no.	Kaynak gerilimi (V) [p.u.]	Pozitif dizi empedansı [Ω]	Sıfır dizi empedansı [Ω]
Kaynak1	1.0058∠8°	0.71319+j13.5527	1.4241+j13.5527
Kaynak2	0.996∠4°	3.9590+j45.2512	7.8878+j44.7344
Kaynak3	1.03∠0°	0.0793+j4.5417	0.1585+j4.5397

5.1.4 150 km Uzunluğunda İletim Hattı Olması Durumu

Göz önüne alınan iletim hattının 150 km uzunluğunda iletim hattı olması durumu için örnek sistem hat ve kaynak verileri, kısa hat durumu için yapılanlara benzer şekilde elde edilmiştir. Sistem hat verileri Tablo 5.8, kaynaklara ilişkin veriler ise Tablo 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5.8: Hat Parametreleri

Hat no.	Hat uzun. (km)	Pozitif dizi empedansı [Ω]	Sıfır dizi empedansı [Ω]	Pozitif dizi admitansı [1/Ω]	Sıfır dizi admitansı [1/Ω]
Hat1	150	20.94+j65.37	69.24+j181.7	j4.04452*10 ⁻⁴	j2.8445*10 ⁻⁴
Hat2	40	5.444+j17.2312	17.5708+j47.4536	j107.204*10 ⁻⁶	j74.92*10 ⁻⁶
Hat3	60	8.166+j25.8468	26.3562+j71.1804	j160.806*10 ⁻⁶	j112.38*10 ⁻⁶
Hat4	30	4.083+j12.9234	13.1781+j35.5902	j80.403*10 ⁻⁶	j56.19*10 ⁻⁶

Sistemde yer alan kaynakların özellikleri aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

Tablo 5.9: Kaynak İç Empedansı

Kaynak no.	Kaynak gerilimi (V) [p.u.]	Pozitif dizi empedansı [Ω]	Sıfır dizi empedansı [Ω]
Kaynak1	1.0058∠8°	1.0777+j20.5638	2.15245+j20.479
Kaynak2	0.996∠4°	5.9823+j68.378	23.838+j135.19440
Kaynak3	1.03∠0°	0.11979+j6.86295	0.3593+j10.289

5.2 PARAMETRE KESTİRİMİ

Zaman domeninde ve fazör domeninde olmak üzere sunulmuş olan iki yöntemin örnek sistem uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Enerji iletim hattı modellenmesinde parametreleri kestirilecek hattın kısa hat (paralel elemanın göz ardı edildiği) ve uzun hat (100 ve 150 km; paralel elemanın göz ardı edilemediği) olması durumunda yöntemlerin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Örnek sistem verileri kullanılarak sistemin benzetim modeli MATLAB-Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Hatların negatif dizi empedansı pozitif dizi empedansı ile aynı değerde alınmıştır.

Sistemin dengeli ve dengesiz çalışma koşulları için yapılan parametre kestiriminde göz önüne alınan çeşitli çalışma koşulları senaryolar olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.1' de verilen örnek sistem şemasında senaryolarda kullanılacak durumların kodlanması için yer bilgileri yer almaktadır. Dengesiz durumlar için yapılan benzetimlerin tanımlanması olarak LiFj gösterimi seçilmiştir. Li dengesizliğin yaratıldığı yerleri; Fj ise dengesizliğin kaynağı olan durumu belirtmektedir. Örnek olarak L1F1 verildiğinde, Şekil 5.1' de gösterilen L1 noktasındaki F1 tipi arıza durumu anlaşılmaktadır. Şekilden takip edilebilecek arıza yerleri Tablo 5.10' da göz önüne alınan dengesiz çalışma durumlarının listesi Tablo 5.11' de sunulmaktadır.

Tablo 5.10: Göz Önüne Alınan Senaryoların Sistemdeki Konumları

Yer Li	Sistemdeki konumu
L1	D noktası, Hat4 iletim hattının başı
L2	Hat4 iletim hattının başından %20' lik hat uzunluğu mesafesi
L3	Hat4 iletim hattının orta noktası
L4	Hat4 iletim hattının başından %80' lik hat uzunluğu mesafesi
L5	D noktası, Hat4 iletim hattının sonu
L6	P noktası, Hat2 iletim hattının başı
L7	İlgilenilen iletim hattı Hat1' in başı
L8	İlgilenilen iletim hattı Hat1' in sonu

Tablo 5.11: Göz Önüne Alınan Dengesiz Çalışma Durumları

Fj (Sistem dengesizliği)	Dengesizlik durumu
F1	A faz-toprak arızası
F2	B faz-toprak arızası
F3	C faz-toprak arızası
F4	AB iki faz-toprak arızası
F5	AC iki faz-toprak arızası
F6	BC iki faz-toprak arızası
F7	A fazında açma
F8	B fazında açma
F9	C fazında açma

Ayrıca arızasız durumda örnekleme frekansının değişiminin benzetimi üzerindeki etkisi, arıza yerinin etkisi, arıza direncinin büyük bir değer seçiminin parametre kestirime etkisi, ilgilenilen hatta açma durumlarında parametre kestirimin gerçekleşip gerçekleşmemesi, örneklemenin eşzamanlı olması gerekliliğinin araştırılması gibi durumlar da incelenmiştir.

5.2.1 Zaman Domeni için Sunulan Adaptif Parametre Kestirimi ile Elde Edilen Veriler

Adaptif kestirim yöntemi MATLAB-Simulink programı ile ele alınmaktadır [36]. Hazırlanan benzetimde hatbaşı gerilimi $v_s(t)$, hatsonu gerilimi $v_r(t)$ ve hatbaşı akımı $i_s(t)$ verileri giriş değerleri olarak alınmaktadır. v_s ve v_r farkı kontrol değişkeni $u(t)$ ' i bulmak, $i_s(t)$ ise durum değişkeni $x(t)$ ' i bulmak için kullanılmaktadır. Kestirilen durum değişkeni $\hat{x}$ ' nin üretilmesi için, durum denklemleri ele alınarak yapılan toplama işleminin üç giriş elemanı, $\hat{b}$ ve u çarpımının çıkışı, katsayı olarak kullanılan ve verim için değeri $a_m < 0$ olacak şekilde tasarım sabiti a_m ve $\hat{x}$ çarpımının çıkışı ve x ile $\hat{a} - a_m$ çarpımının çıkışıdır. $\hat{x}$ değeri (4.18) denklemindeki değeri ile aynıdır. İntegral operatörü sistemin kestirilen durum parametresi $\hat{x}$ değerinden $\hat{x}$ ' nin elde edilmesini sağlamaktadır. Böylelikle ε kestirim hatası hesaplanmaktadır. ε , geri besleme ile $u \times \varepsilon = \hat{b} \otimes$ çarpımının ve $x \times \varepsilon = \hat{a} \otimes$ çarpımın elde edilmesini sağlamaktadır. $\hat{a}$ ve $\hat{b}$ integral bloğundan geçirilerek $\hat{a}$ ve $\hat{b}$ elde edilmektedir. Sonuçlar grafiksel olarak gösterilebilmektedir. Kestirilen $\hat{a}$ ve $\hat{b}$ kestirim parametrelerinden R (direnç) ve L (endüktans) olmak üzere kısa iletim hattı parametreleri elde edilmektedir. Kısa iletim hattı için a ve b parametreleri ile x ve u değişkenleri arasındaki ilişki, (4.18) denklemi ile ifade edilmiştir.

$$a = -\frac{R}{L}, \quad b = \frac{1}{L} \quad (4.18)$$

$$x = i_s \quad u = v_s - v_r$$

Sistem çalışır durumda iken yani dengeli veya dengesiz çalışma koşulu altında iken sistem parametre kestirim hatasının grafiğine bakılarak bu hata değerinin küçük olması ile parametre kestiriminin doğruluğu kabul edilmektedir. Bu durumda $\hat{a}$ ve $\hat{b}$

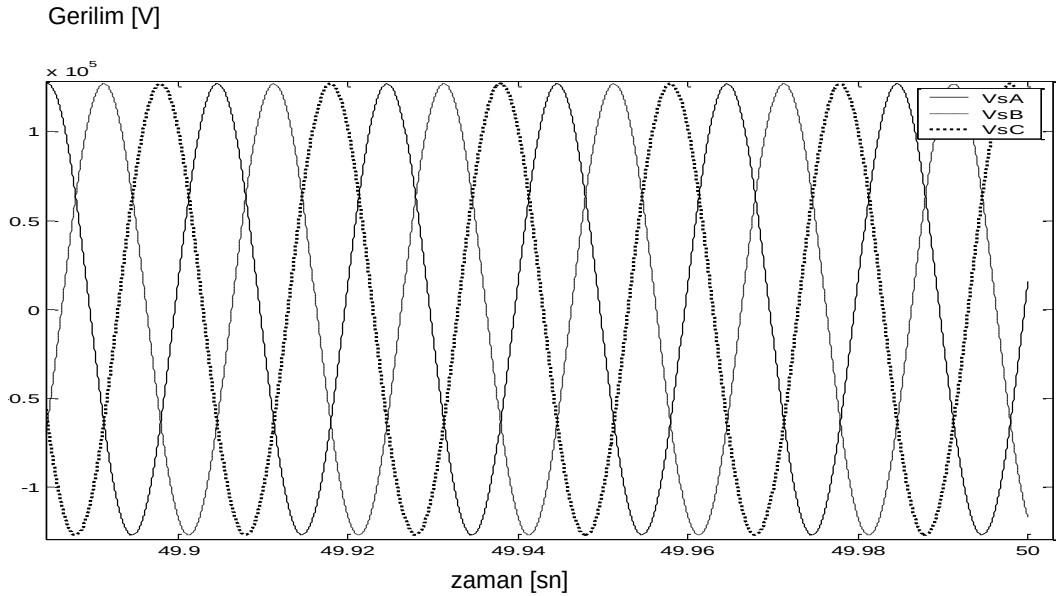
parametrelerinin a ve b parametreleri olduğu bilinmektedir. Buradan matematiksel ifade olan R ve L kısa hat parametreleri matematiksel veya grafiksel olarak anında elde edilmektedir [10].

Bu çalışmada yöntemin uygulanabilirliği MATLAB-Simulink programı ile hem arızasız durum yani normal çalışma, hem de dengesiz durumlar için incelenmiştir. Arızasız durum ile pozitif mod parametreleri, dengesiz durum ile sıfır mod parametreleri elde edilmektedir. Her iki durumda da hatbaşındaki ve hatsonundaki gerilim ile hatbaşındaki akım sinyalleri kullanılmıştır.

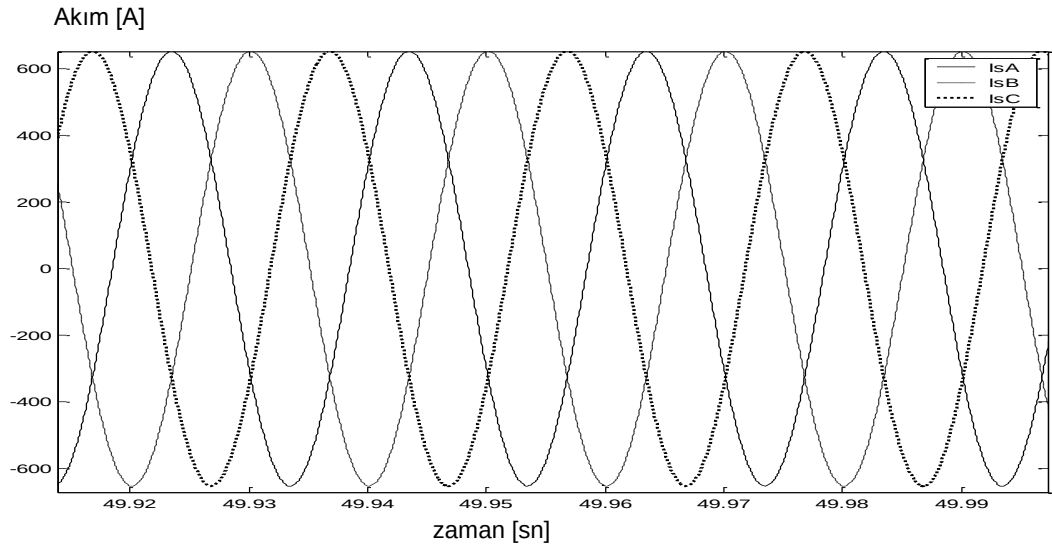
Örnekleme Frekansının Etkisi

Sistemin örnekleme frekansının değişimi ile benzetimlerin hassasiyeti, doğruluk payı ve benzetim süresi değişmektedir. Arızasız durum için önce örnekleme frekansı 20kHz olarak ele alınmış, daha sonra aynı sistem çalışma koşulları için 100kHz' lik örnekleme frekansında benzetimler yapılmıştır.

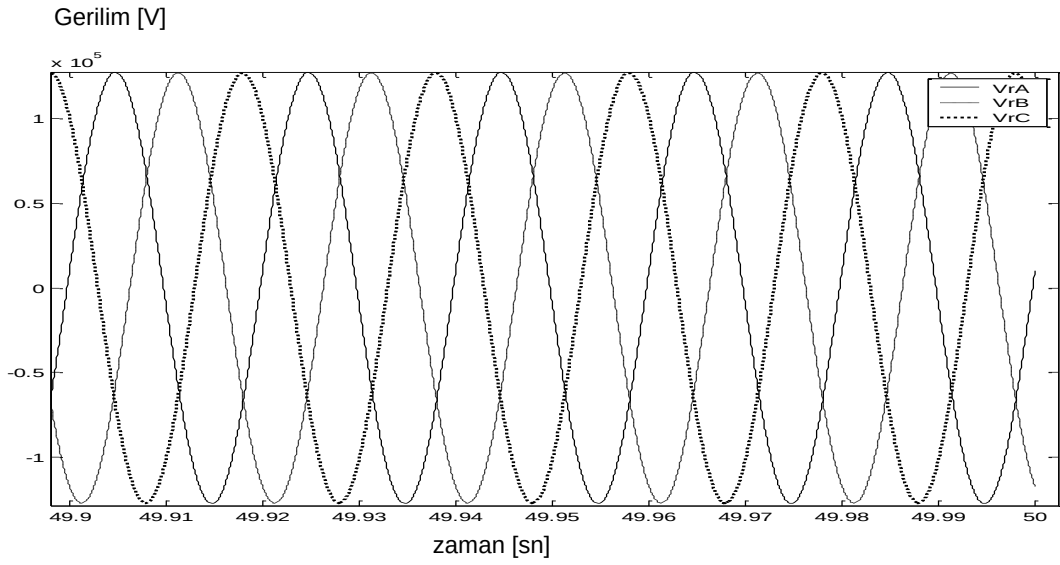
20kHz' lik örnekleme frekansında benzetim süresi 50 sn olarak alınmıştır. Aşağıda 3 fazlı sinüzoidal hatbaşı ve hatsonu akım ve gerilim grafiklerle Şekil 5.3-Şekil 5.5' te verilmektedir. 120° faz farkı olan bu eğriler sistemin dengeli olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.3 : 20kHz Örnekleme Frekansında Hatbaşı Gerilimleri

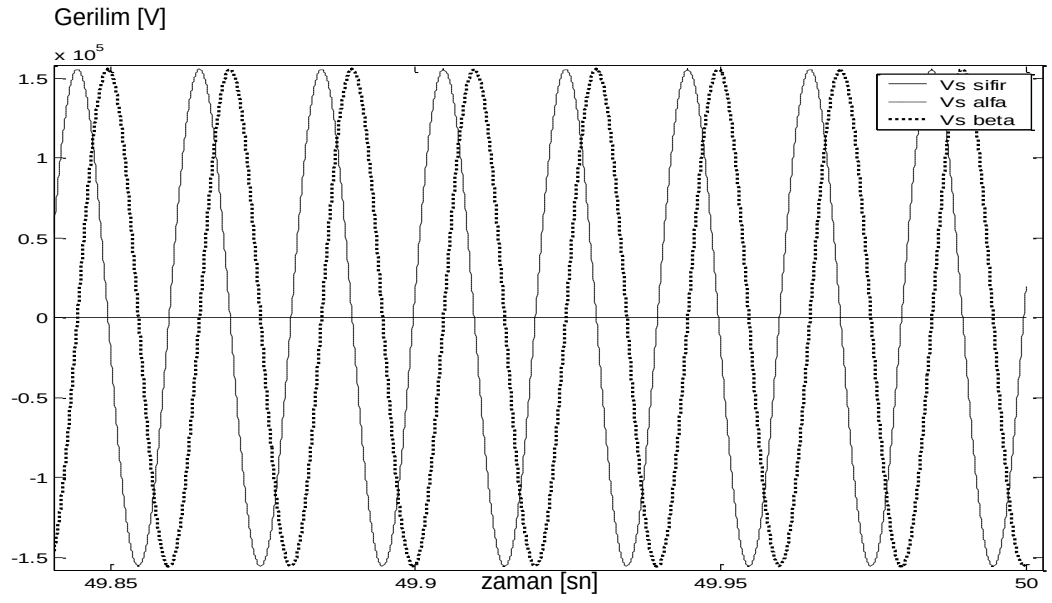


Şekil 5.4 : 20kHz Örnekleme Frekansında Hatbaşı Akımları

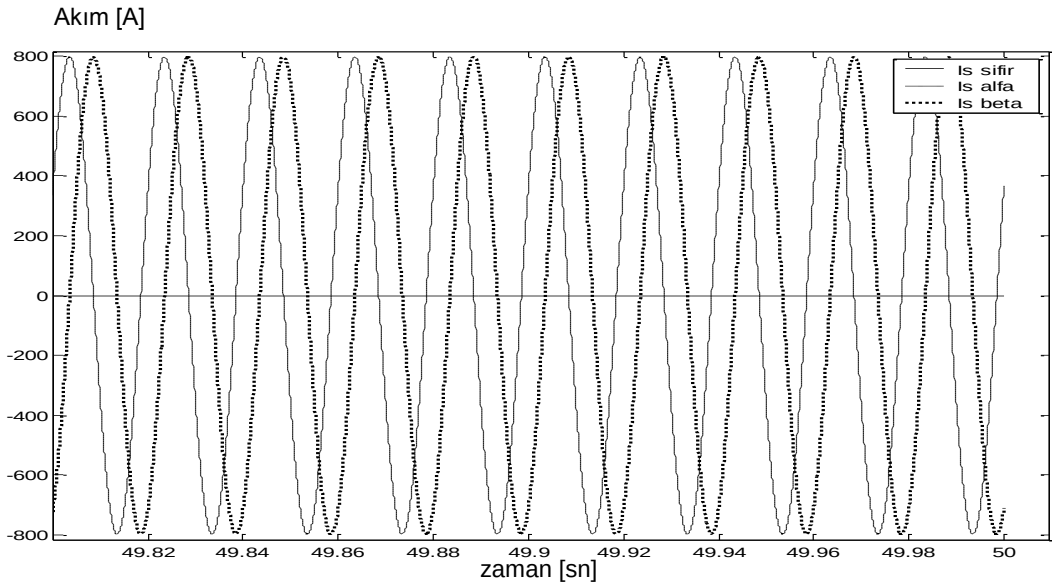


Şekil 5.5 : 20kHz Örnekleme Frekansında Hatsonu Gerilimleri

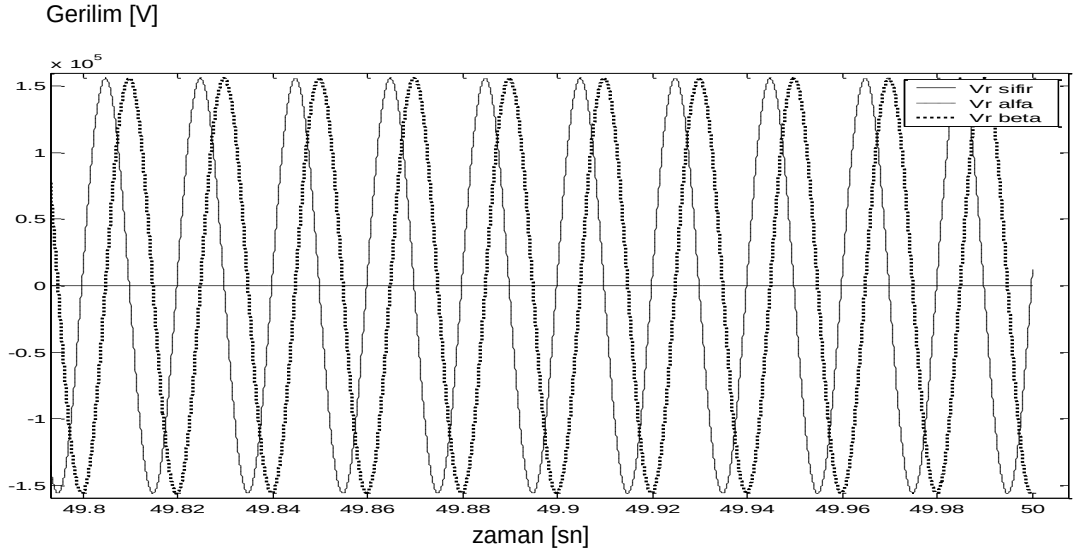
Modal dönüşüm sonrası elde edilen gerilim ve akım değişimi eğrilerinin verildiği Şekil 5.6-Şekil 5.8' de görüldüğü üzere çalışma durumu dengeli olduğu için sıfır devresi gerilimi ve akımı sıfırdır.



Şekil 5.6 : Modal Dönüşüm Sonrasında Hatbaşı Gerilimleri



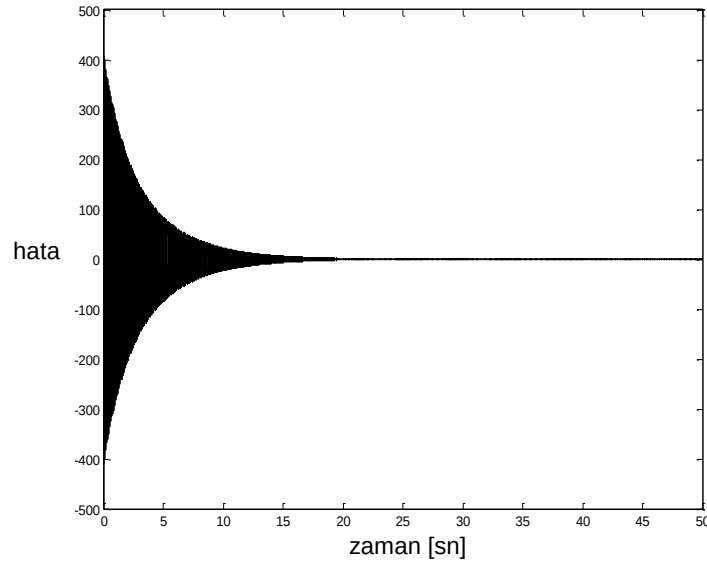
Şekil 5.7 : Modal Dönüşüm Sonrasında Hatbaşı Akımları



Şekil 5.8 : Modal Dönüşüm Sonrasında Hatsonu Gerilimleri

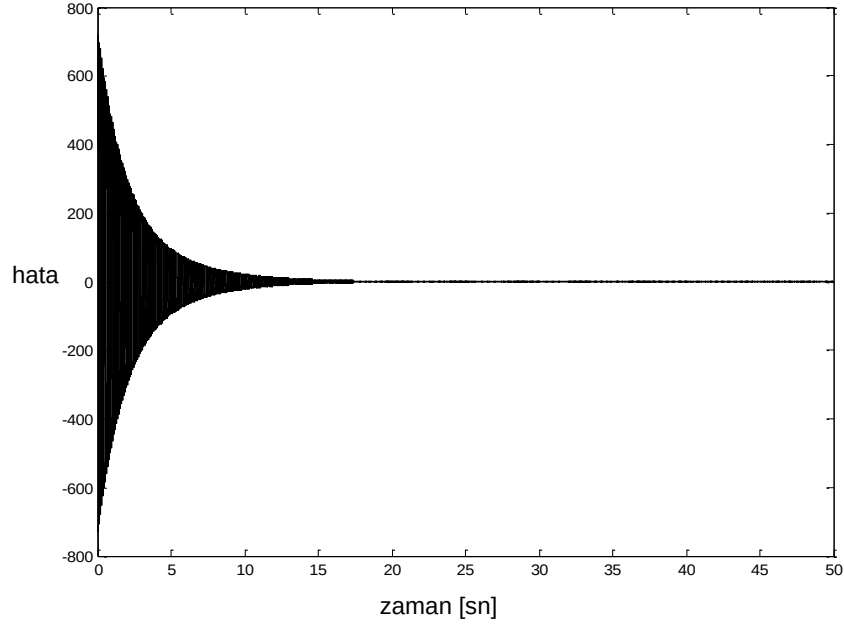
Adaptif yöntemin uygulanması ile her bir mod için hat parametreleri kestirilmiştir. Hat parametrelerinin gerçek değerleri ile adaptif parametre kestirimi sonucunda elde edilen değerleri arasındaki fark yani doğruluktan sapma değeri eğrilerle Şekil 5.9 ve Şekil 5.10' da gösterilmiştir.

Şekil 5.9 pozitif dizi parametrelerinin kestiriminde kestirim hatasını vermektedir. Salınımlardan sonra 17 sn içinde sıfır değerine oturan sistem hatası pozitif dizi parametrelerinin kestirim değerlerinin gerçek değerlerine ulaştığını göstermektedir.



Şekil 5.9 : Pozitif Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi (20 kHz Örneklem Frekansı)

Şekil 5.10 ile verilen negatif dizi parametrelerinin kestirim hatası pozitif dizi parametrelerinin kestirim hatası ile aynı sürede sifıra oturmakta yani parametrelerin kestirim değeri ile gerçek değerleri arasında fark olmamaktadır.

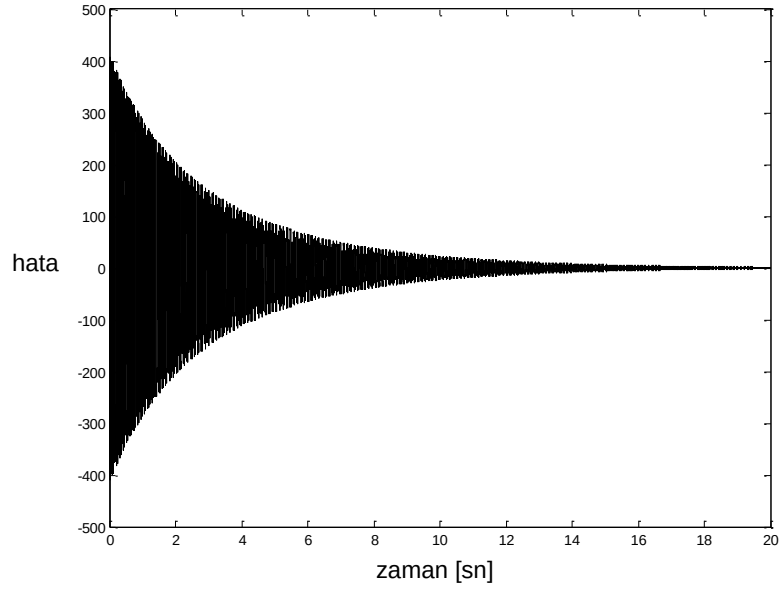


Şekil 5.10 : Negatif Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi (20 kHz Örneklem Frekansı)

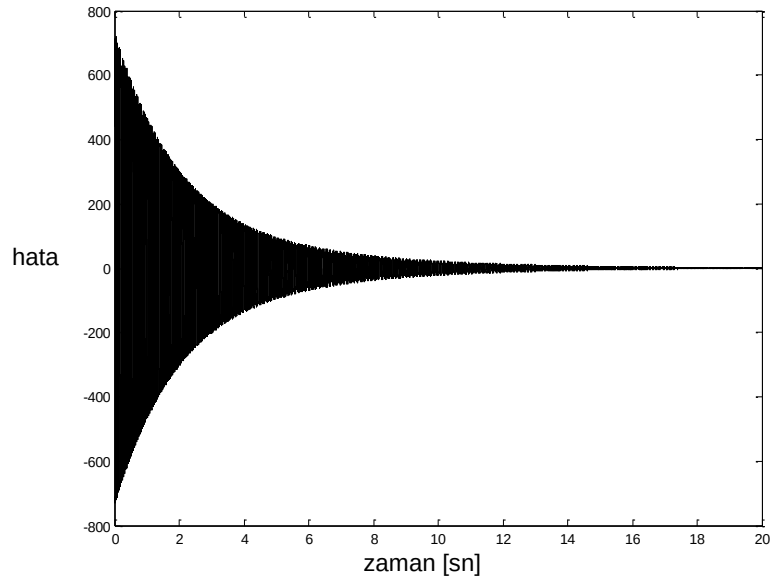
Tablo 5.12: 20kHz ile 100kHz Örneklem Frekansı Sonuçlarının Karşılaştırılması

Örneklem Frekansı	R değerleri [Ω]			L değerleri [H]		
	R_sıfır	R_pozitif	R_negatif	L_sıfır	L_pozitif	L_negatif
20 kHz	9.0120	2.85	2.85	0.0776	0.0285	0.0285
100 kHz	9.0113	2.79	2.79	0.0775	0.028	0.028
Analitik değerler	9.005	2.79	2.79	0.0774	0.0281	0.0281

100kHz' lik örneklem frekansının benzetime olan etkisinin çok fazla olmadığı, hatanın ve çözümün oturma süresinin biraz azaldığı gözlenmiştir. Her iki örneklem frekansı için elde edilen sonuçların karşılaştırıldığı Tablo 5.12' deki değerler incelendiğinde, en yüksek kestirim hatası 20kHz çalışmasında R_pozitif değerinin kestirimindedir. Bu kestirim hatası değeri %2.1505 olarak hesaplanmıştır. Parametre kestiriminde daha iyi sonuçlar vermesi nedeniyle, diğer senaryoların uygulanması sırasında örneklem frekansı 100kHz alınmıştır. Bu değer kullanıldığında oluşan sistem parametreleri kestirim hataları her bir mod için Şekil 5.11 ve Şekil 5.12' de verilmektedir.



Şekil 5.11 : Pozitif Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi (100 kHz Örneklem Frekansı)



Şekil 5.12 : Negatif Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi (100 kHz Örneklem Frekansı)

Arıza Direncinin Etkisi

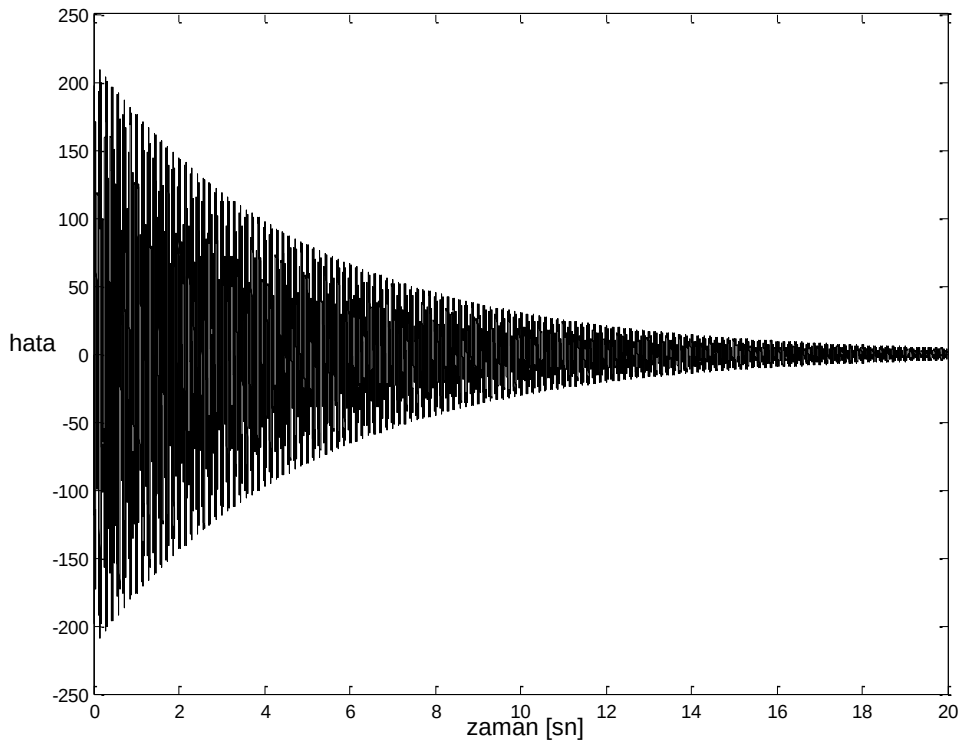
L1F1 durumu oluşturulmuştur ve arıza direncinin hem 0.001Ω olan küçük bir değer için hem de 50Ω gibi büyük bir değeri için benzetimler gerçekleştirilmiştir. Arıza

direncinin değişiminin parametre kestirimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Benzetimler sonucunda elde edilen değerler Tablo 5.13’ te verilmiştir. Her iki arıza direnci durumunda da kestirilen parametreler arasında görülen farkın küçük olması ile arıza direncinin değişiminin uygulanan yöntemle etkisinin çok küçük olduğu ve bu etkinin doğrusal bir etki olmadığı gözlenmiştir.

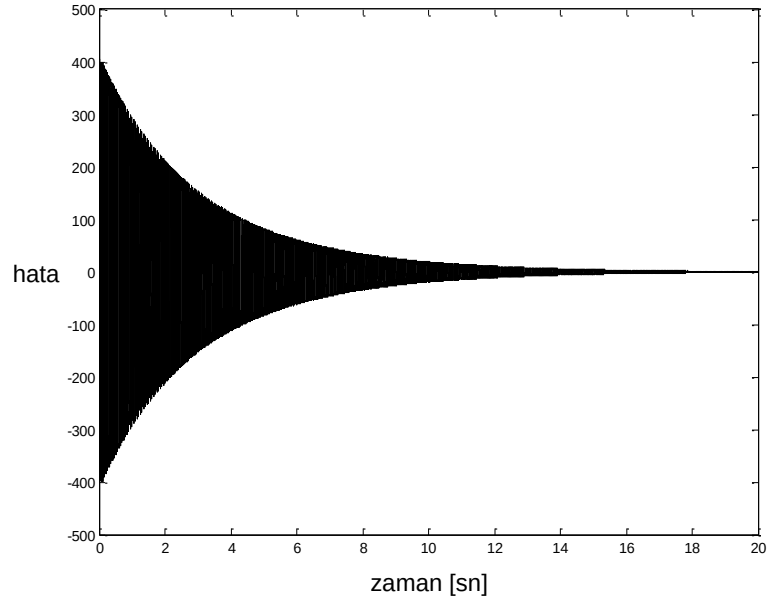
Tablo 5.13: 0.001Ω ile 50Ω Arıza Direncinin Parametre Kestirimine Etkisi

Arıza Direnci	R değerleri [Ω]			L değerleri [H]		
	R_sıfır	R_pozitif	R_negatif	L_sıfır	L_pozitif	L_negatif
0.001Ω	9.012	2.78	2.87	0.0775	0.0279	0.0288
50Ω	9.004	2.768	2.873	0.0775	0.0276	0.0288
Analitik değerler	9.005	2.79	2.79	0.0774	0.0281	0.0281

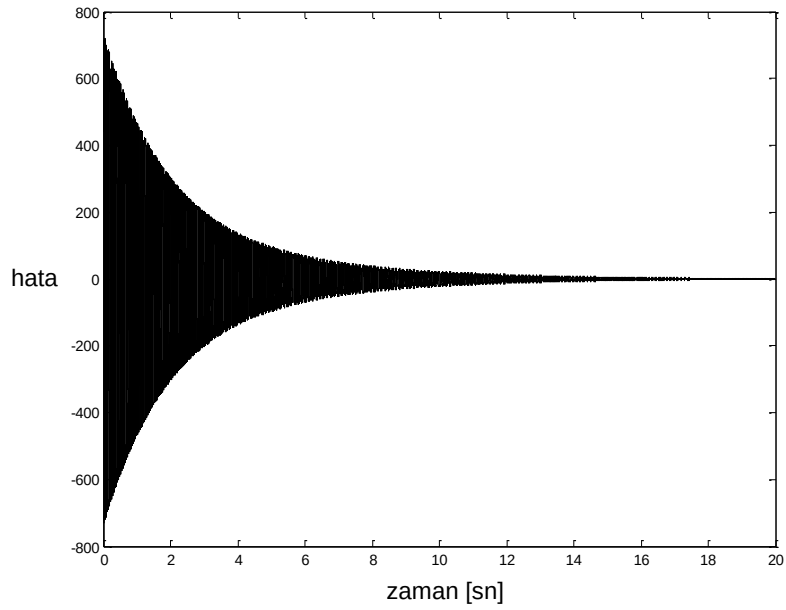
Dengesiz arıza olması nedeniyle bulunabilen sıfır dizi parametreleri ile diğer iki moda ait ilişkin dizi parametrelerinin kestiriminde hata değişimleri, Şekil 5.13-Şekil 5.15’ den görülebilir. Her üç modun sistem hata eğrisinin benzetim süresi sonunda salınım yaparak sıfır değerine oturduğu yani parametre kestiriminin doğruluk payının yüksek olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.13 : Sıfır Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi



Şekil 5.14 : Pozitif Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi



Şekil 5.15 : Negatif Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi

Arıza Tipinin Etkisi

İncelenen parametre kestirimi yöntemi üzerinde verilerin toplandığı arıza tipinin sonuçlara etkisini görmek amacıyla L1 noktasında farklı tipte arızalar oluşturulmuştur. Benzetimleri sonucunda alınan sonuçlar ile analitik sonuçların

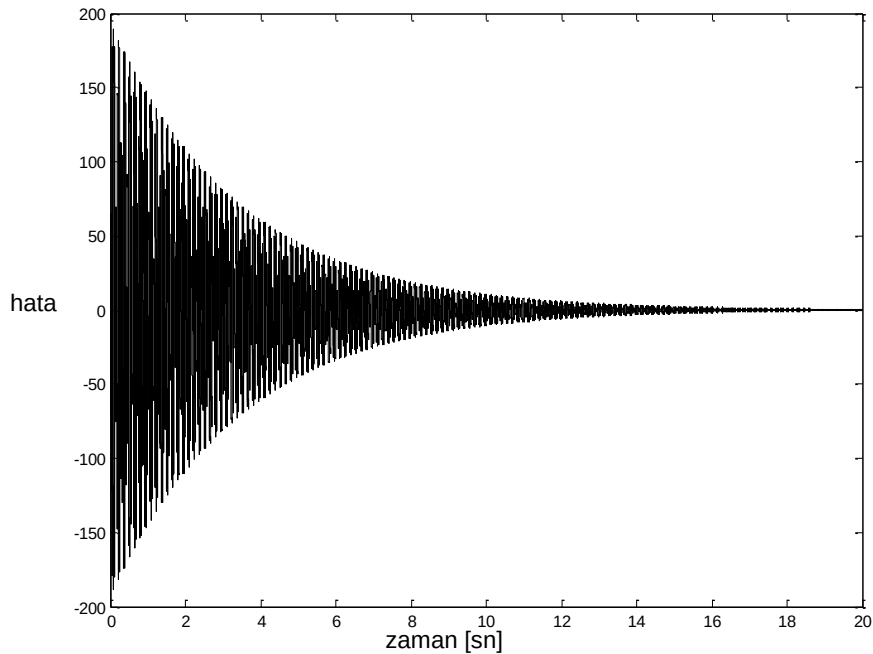
karşılaştırılması Tablo 5.14' te verilmiştir. Bu tablodan görüleceği üzere, parametre kestiriminde en büyük hata %1.4235 ile L1F1 durumunda olmuştur.

Tablo 5.14: Dengesiz Arızalarda Hat Parametre Kestirimi

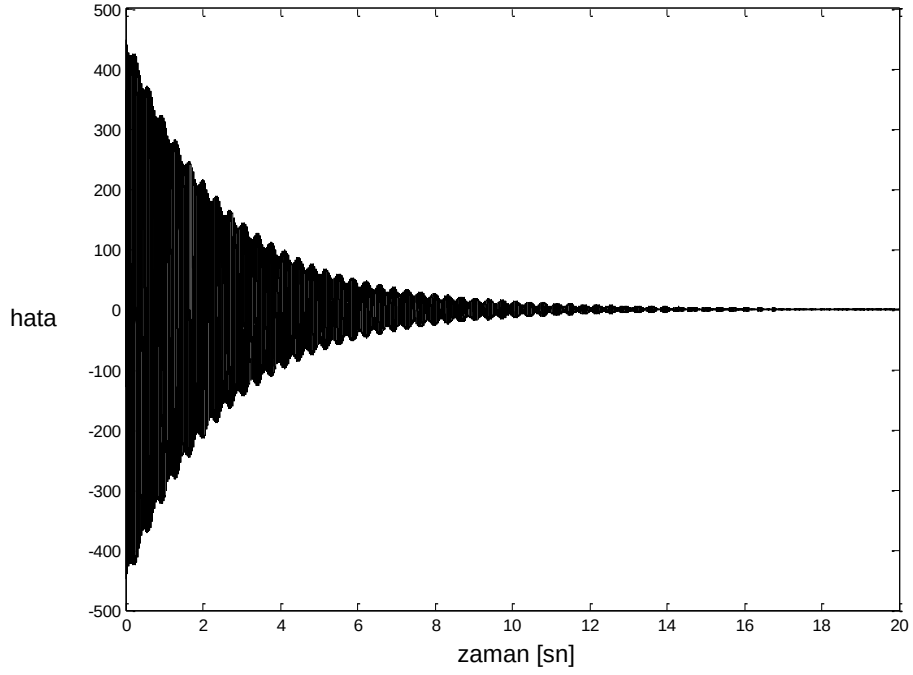
Arıza Tipi	R değerleri [Ω]			L değerleri [H]		
	R_sıfır	R_pozitif	R_negatif	L_sıfır	L_pozitif	L_negatif
L1F1	9.012	2.78	2.77	0.0775	0.0279	0.0285
L1F2	9	2.78	2.78	0.0769	0.028	0.028
L1F3	9.003	2.77	2.78	0.0772	0.0285	0.0285
L1F4	9.0114	2.8	2.8	0.0775	0.0280	0.0280
L1F5	8.9935	2.79	2.78	0.078	0.028	0.0279
L1F6	9.007	2.8	2.81	0.0771	0.0282	0.0287
Analitik değerler	9.005	2.79	2.79	0.0774	0.0281	0.0281

Dengesiz Çalışma Olarak Simetrik Olmayan Hat Açmalarının Etkisi

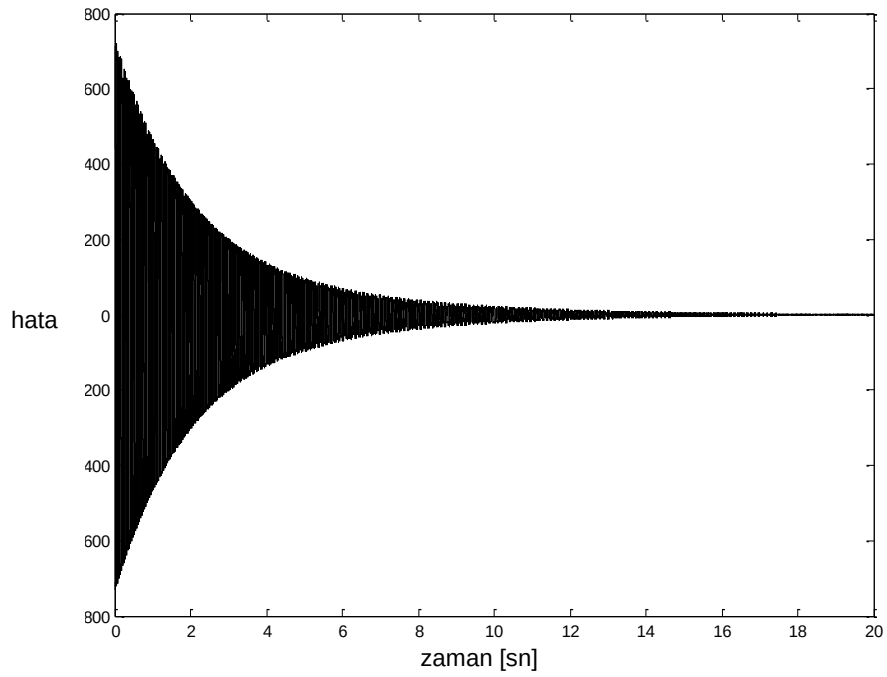
İncelenen hattın tek fazının açması sonucunda ortaya çıkan dengesizliğin parametrelerinin kestirimi üzerinde etkilerini görmek amacıyla L7 ve L8 noktalarında F7, F8 ve F9 dengesizlikleri oluşturulmuştur. Modal dönüşüm sonrasında elde edilen zaman domen verileri adaptif parametre kestirimi yöntemine uygulanarak hat parametreleri kestirilmiştir. Sistem hatasının değişimi Şekil 5.16-Şekil 5.18' de verilmiştir



Şekil 5.16 : Sıfır Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi



Şekil 5.17 : Pozitif Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi



Şekil 5.18 : Negatif Dizi Parametrelerinin Kestiriminde Hata Değişimi

Benzetimleri sonucunda alınan sonuçlar ile analitik sonuçların karşılaştırılması Tablo 5.15' te verilmiştir. Bu tablodan görüleceği üzere, parametre kestiriminde en büyük hata %4.3011 ile L8F9 durumunda olmuştur.

Tablo 5.15: İlgilenilen Hattı Anahtarlama Durumunda Hat Parametre Kestirimi

Anahtarlama	R değerleri [Ω]			L değerleri [H]		
	R_sıfır	R_pozitif	R_negatif	L_sıfır	L_pozitif	L_negatif
L7F7	9.005	2.78	2.81	0.0768	0.0283	0.0285
L8F7	9.15	2.8	2.869	0.0769	0.03	0.0288
L7F8	9	2.8	2.795	0.078	0.0281	0.028
L8F8	9.009	2.75	2.769	0.0759	0.0257	0.029
L7F9	8.92	2.8355	2.7647	0.0708	0.0285	0.0281
L8F9	9.032	2.91	2.957	0.0761	0.0292	0.028
Analitik değerler	9.005	2.79	2.79	0.0774	0.0281	0.0281

5.2.2 Fazör Domeni için Sunulan Parametre Kestirimi ile Elde Edilen Veriler

154 kV' luk 3 fazlı sisteme zaman domeninde uygulanan adaptif parametre kestiriminin ardından fazör domeninde uygulanan parametre kestirimi yöntemi ile hem arızasız yani sistemin dengeli çalıştığı durum ve hem de faz-toprak ve iki faz-toprak arızalarının içerildiği dengesiz durumlarda ilgilenilen iletim hattı parametrelerinin kestiriminin doğruluğu araştırılmıştır.

5.2.2.1 Kısa iletim hattı olması durumu

Zaman domeninde adaptif parametre kestiriminin sınırlamalarından biri olan, hattın kısa iletim hattı olması durumu göz önüne alınarak ve her iki yöntemi karşılaştırmak amacıyla bu yöntem için de ilgilenilen iletim hattı Hat1 aynı özelliklere sahip olacak şekilde kısa iletim hattı seçilmiştir.

Yöntem, ilgilenilen iletim hattının hatbaşı ve hatsonu olmak üzere her iki ucunda ölçülen akım ve gerilim işaretlerini giriş verileri olarak kabul etmektedir. Ölçülen akım ve gerilimlerin fazör değerleri ve modal dönüşüm sonucu elde edilen modal akım ve gerilim değerleri parametre kestirimi için giriş büyüklükleri olarak kullanılmaktadır. Sonuçta hattın iki kapılı gösterimine ilişkin K matrisinin elemanları A , B ve C ' nin değerleri hesaplanmaktadır.

Hat1 kısa iletim hattı olarak seçildiği için; $A = 1$ ' dir. B ise sistemin arızasız olduğu durumda hattın seri empedansına eşittir. C ise kısa iletim hattı olması nedeniyle kısa iletim hattının paralel admitansı olmadığından sıfırdır.

Arızasız Çalışma Durumu;

Sistemde arızasız çalışma durumu için hatbaşı ve hatsonunda ölçülmüş olan akım ve gerilim değerleri fazör dönüşümünün ardından parametre kestirimi yöntemi için giriş bilgisi olarak kullanılmıştır. Algoritma sonucunda ilgilenilen kısa iletim hattına ait pozitif dizi K matrisi elemanları Tablo 5.16’ da verilmiştir. Kestirilen değerler ile analitik değerlerin karşılaştırılması da bu tabloda gösterilmiştir.

Tablo 5.16: Kısa İletim Hattı Pozitif Dizi K Matrisi Elemanları

Arızasız Durum	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
Kestirilen değer	1	$2.79+j8.831$	0
Analitik değer	1	$2.79+j8.831$	0

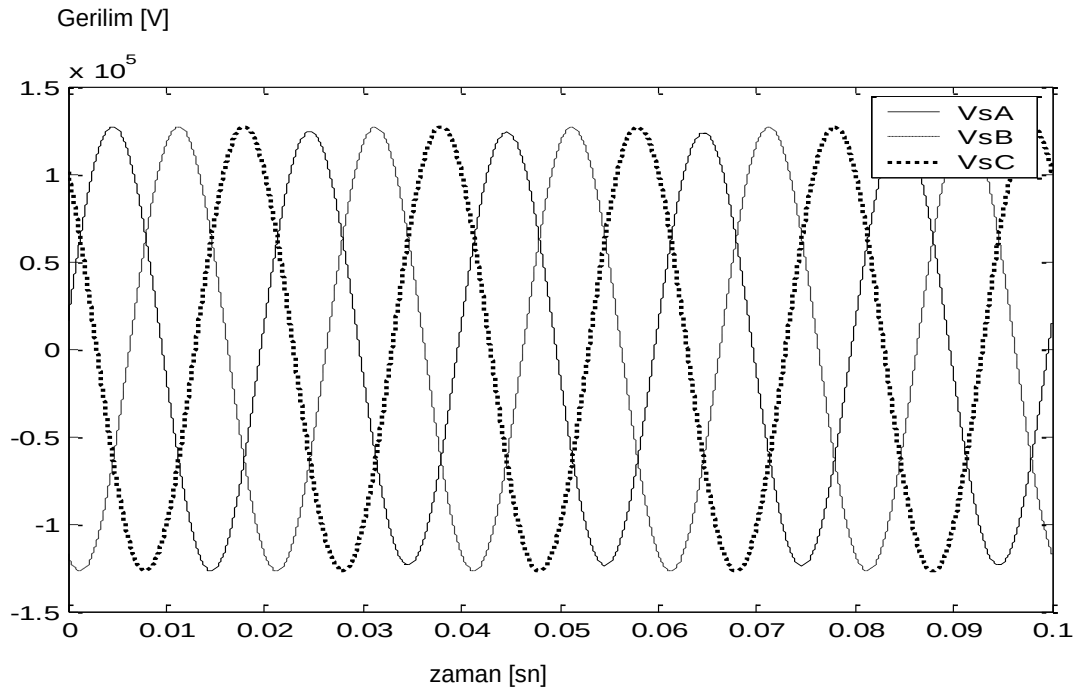
Kısa iletim hattı modeli için, B sistemin arızasız olduğu durumda hattın pozitif dizi empedansını verdiği için hat parametrelerini doğrudan bulmak mümkündür. Elde edilen hat parametreleri ise Tablo 5.17’ de verilmektedir.

Tablo 5.17: Kısa İletim Hattı Pozitif Dizi Parametreleri

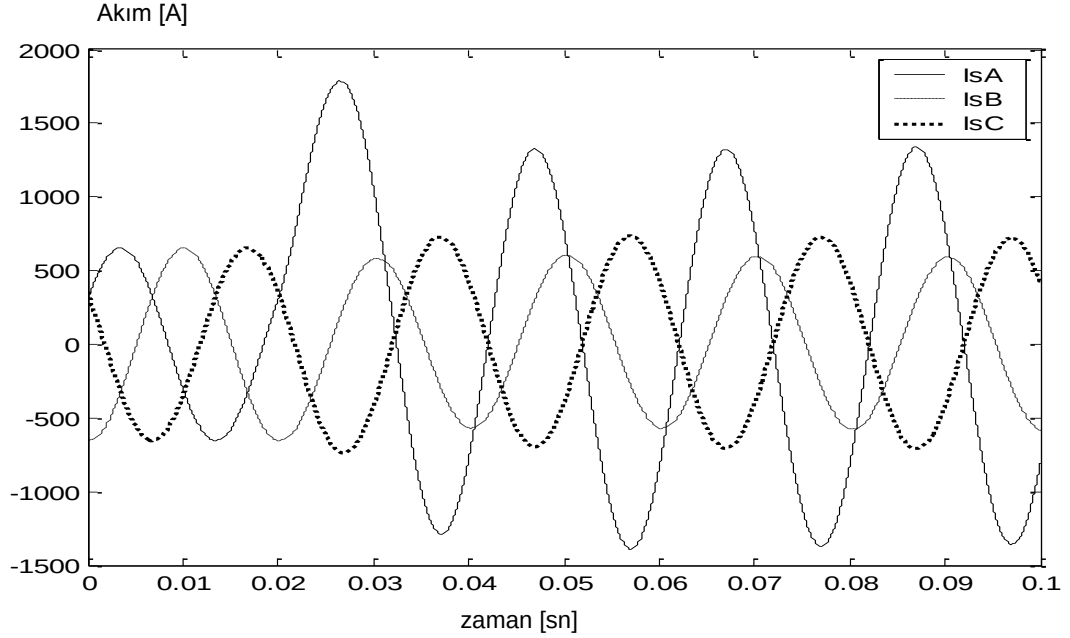
Arızasız Durum	Hat parametreleri	
	$R_{\text{pozitif}} [\Omega]$	$L_{\text{pozitif}} [H]$
Kestirilen değer	2.79	0.0281
Analitik değer	2.79	0.0281

Arıza Yeri ve Tipinin Etkisi

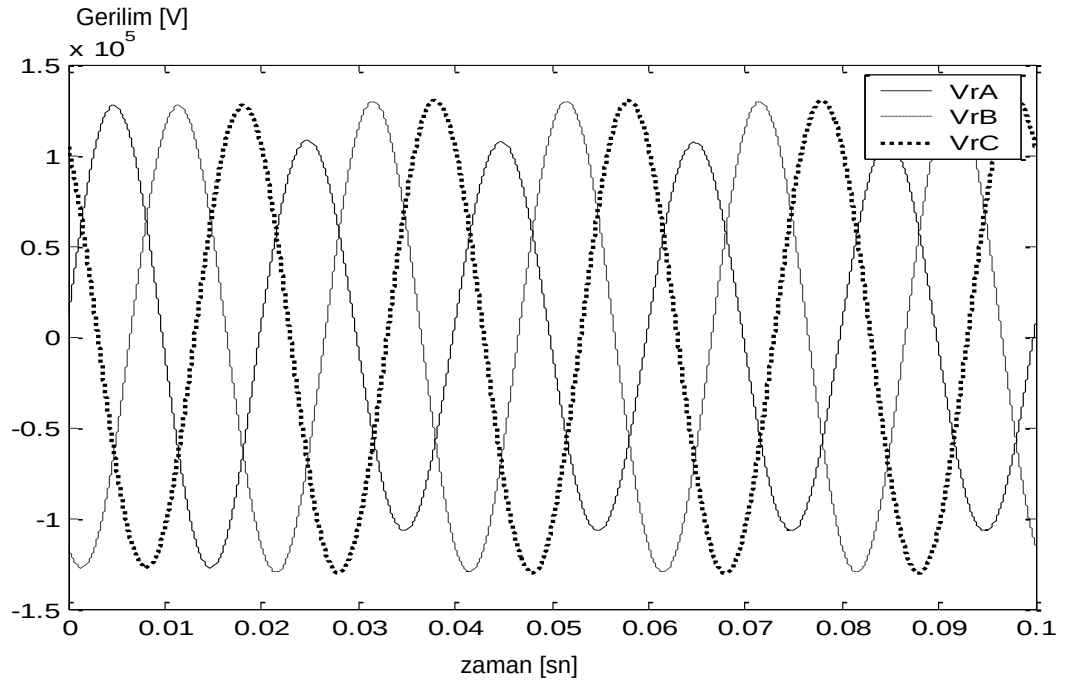
Kısa iletim hattının L2F1, L2F2, L2F3, L2F4, L2F5, L2F6 dengesiz durumlarında çalışması için sıfır dizi parametre kestirimleri gerçekleştirilmiştir. Bu arıza tipleri için benzetimi sonucunda elde edilen veriler ile analitik değerler arasındaki karşılaştırmalar yapılmıştır. Göz önüne alınan dengesiz çalışma durumlarından L2F1’ e ilişkin, ilgilenilen kısa iletim hattının her iki ucunda ölçülen akım ve gerilimlerin değişimi Şekil 5.19-Şekil 5.22’ de gösterilmiştir. Bu şekillerden, L2F1 durumunda sistemde arıza olduğunda arızalı faz olan A fazına ait akım değerinde artış görülebilir.



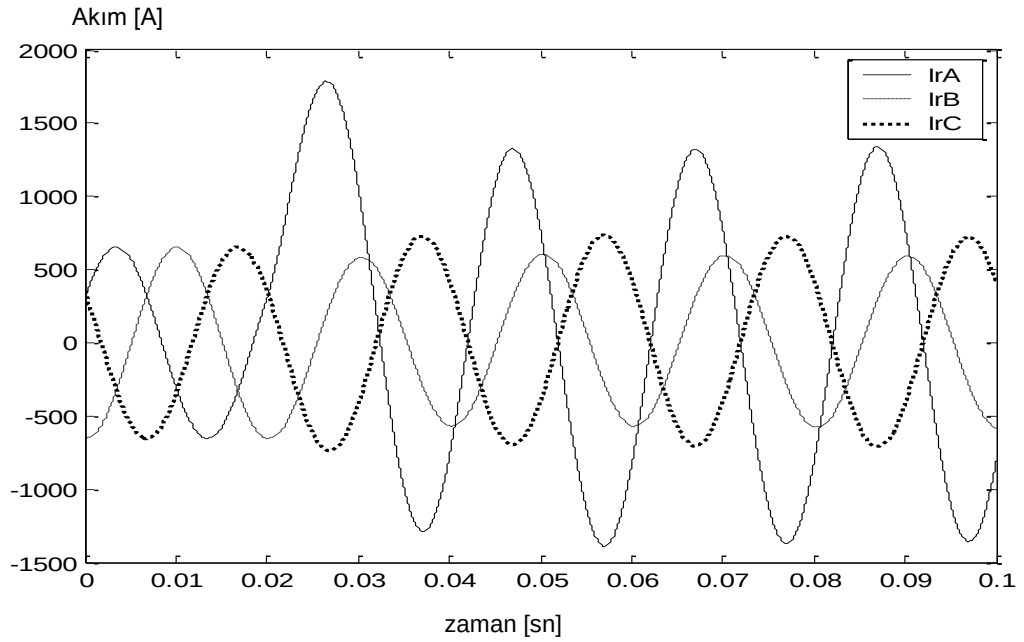
Şekil 5.19 : Hatbaşı Gerilimleri (Kısa Hat, L2F1)



Şekil 5.20 : Hatbaşı Akımları (Kısa Hat, L2F1)



Şekil 5.21 : Hatsonu Gerilimleri (Kısa Hat, L2F1)



Şekil 5.22 : Hatsonu Akımları (Kısa Hat, L2F1)

Farklı arıza durumları için elde edilen veriler kullanılarak parametre kestirim algoritması ile Hat1' e ait K matrisinin parametreleri elde edilerek değerleri Tablo 5.18' de verilmiştir. L2 noktasındaki çeşitli arıza tipleri için kestirim ile elde edilen değerlerin analitik yolla hesaplanmış değerlerle karşılaştırılması da bu tablodan görülebilir. Sonuçlara göre, arıza tipleri açısından kestirim sonuçlarındaki değişme

küçük olmaktadır. Belirlenen kestirim hatası değeri en yüksek olan L2F2 durumunda %1.2182' dir.

Tablo 5.18: L2 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
L2F1	1	8.9947+j24.325	0
L2F2	1	8.7541+j24.512	0
L2F3	1	8.9987+j24.316	0
L2F4	1	8.9936+j24.312	0
L2F5	1	9.0045+j24.326	0
L2F6	1	8.987+j24.329	0
Analitik değerler	1	9.005+j24.32	0

Tablo 5.19: L2 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri

Senaryo	Hat parametreleri	
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]
L2F1	8.9947	0.0774
L2F2	8.7541	0.078
L2F3	8.9987	0.0774
L2F4	8.9936	0.0774
L2F5	9.0045	0.07741
L2F6	8.987	0.07742
Analitik değerler	9.005	0.0774

Farklı arıza yerlerinde meydana gelecek arıza durumlarında parametre kestirimi sonuçları üzerinde etkileri görmek için L3 ve L4 noktalarında da benzetimler gerçekleştirilmiştir. L3 noktası için yapılan benzetimlerle elde edilen *K* matrisinin elemanlarının kestiriminin sonuçları Tablo 5.20 ve Tablo 5.21' de yer almaktadır.

Tablo 5.20: L3 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
L3F1	1	8.9781+j24.334	0
L3F2	1	8.6869+j24.563	0
L3F3	1	8.9872+j24.308	0
L3F4	1	8.9869+j24.309	0
L3F5	1	9.0047+j24.328	0
L3F6	1	8.9786+j24.334	0
Analitik değerler	1	9.005+j24.32	0

Tablo sonuçlarına bakıldığında L3 noktası için kestirim hatalarının L2 noktası için olan kestirim hatalarından çok farklı olmadığı görülmüştür. En büyük hata değerinin %1.5435 ile L3F2 durumunda olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 5.21: L3 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri

Senaryo	Hat parametreleri	
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]
L3F1	8.9781	0.0775
L3F2	8.6869	0.0782
L3F3	8.9872	0.0774
L3F4	8.9869	0.0774
L3F5	9.0047	0.07741
L3F6	8.9786	0.0775
Analitik değerler	9.005	0.0774

Benzer şekilde L4 noktası için benzetimler gerçekleştirilmiştir. K matrisinin elemanlarına ait sonuçlar Tablo 5.22 ve Tablo 5.23' te verilmektedir. En büyük kestirim hatası değeri %0.3022 ile L4F2 durumunda olmuştur.

Tablo 5.22: L4 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
L4F1	1	8.9652+j24.341	0
L4F2	1	8.9274+j24.331	0
L4F3	1	9.0172+j24.33	0
L4F4	1	9.0135+j24.326	0
L4F5	1	9.0052+j24.318	0
L4F6	1	9.0164+j24.315	0
Analitik değerler	1	9.005+j24.32	0

Tablo 5.23: L4 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri

Senaryo	Hat parametreleri	
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]
L4F1	8.9652	0.0775
L4F2	8.9274	0.07745
L4F3	9.0172	0.07741
L4F4	9.0135	0.0774
L4F5	9.0052	0.0774
L4F6	9.0164	0.0775
Analitik değerler	9.005	0.0774

Arıza Direncinin Etkisi

Arıza direncinin etkisi görmek için ise L5 noktasında F1' den F6' a kadar tüm dengesizlik durumları için arıza direncinin artırılması durumunda Hat1 parametrelerinin kestirimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Arıza direnci bu çalışmadaki benzetimlerde kullanılan 0.001Ω değerinin yanı sıra büyük bir değer olarak 50Ω alınmış ve benzetimler gerçekleştirilmiştir. Benzetimi sonuçları 50Ω için Tablo 5.24 ve 5.25' de 0.001Ω için Tablo 5.26 ve 5.27' de sunulmaktadır.

Tablo 5.24: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (50Ω)

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
L5F1	1	$9.0112+j24.34$	0
L5F2	1	$9.0083+j24.321$	0
L5F3	1	$8.9932+j24.333$	0
L5F4	1	$8.9931+j24.333$	0
L5F5	1	$9.0083+j24.321$	0
L5F6	1	$9.0111+j24.34$	0
Analitik değerler	1	$9.005+j24.32$	0

Tablo 5.25: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (50Ω)

Senaryo	Hat parametreleri	
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]
L5F1	9.0112	0.0775
L5F2	9.0083	0.0774
L5F3	8.9932	0.0775
L5F4	8.9931	0.0775
L5F5	9.0083	0.0774
L5F6	9.0111	0.0775
Analitik değerler	9.005	0.0774

Tablo 5.26: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (0.001Ω)

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
L5F1	1	$9.0076+j24.321$	0
L5F2	1	$9.0039+j24.319$	0
L5F3	1	$9+j24.325$	0
L5F4	1	$9.0042+j24.31$	0
L5F5	1	$9.001+j24.33$	0
L5F6	1	$9.009+j24.351$	0
Analitik değerler	1	$9.005+j24.32$	0

Tablo 5.27: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (0.001Ω)

Senaryo	Hat parametreleri	
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]
L5F1	9.0076	0.0774
L5F2	9.0039	0.0774
L5F3	9	0.0775
L5F4	9.0042	0.0775
L5F5	9.001	0.0774
L5F6	9.009	0.0775
Analitik değerler	9.005	0.0774

Arıza direncinin değişiminin parametre kestirimi üzerinde etkinin küçük olduğu ve doğrusal bir etki olmadığı gözlenmiştir. 50Ω için en büyük hata değerinin %0.0807 ile L5F6 durumunda olduğu, 0.001Ω için en büyük hata değerinin %0.0107 ile L5F1 durumunda olduğu gözlenmektedir.

Eşzamanlı Olmayan Örnekleme için Sonuçlar

L6 noktasında eşzamanlı olmayan akım ve gerilim örnekleri ele alınarak yapılan kestirim sonuçlarının incelenmesi amacıyla F1' den F6' a kadar çeşitli dengesizlik durumları oluşturulmuştur. Hatbaşı akım ve gerilim örnekleri ile hatsonu akım ve gerilim örnekleri arasında yarım periyotluk bir zaman farkı yaratılmıştır ve eşzamanlı olmayan durum için öne sürülen kestirim algoritması uygulanmıştır. Benzetim sonuçları Tablo 5.28 ve Tablo 5.29' da yer almaktadır

Tablo 5.28: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (Eşzamanlı Olmayan)

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
L6F1	1	9.1227+j24.273	0
L6F2	1	8.9932+j24.309	0
L6F3	1	9.0893+j24.386	0
L6F4	1	9.0727+j24.371	0
L6F5	1	9.0067+j24.307	0
L6F6	1	9.0952+j24.282	0
Analitik değerler	1	9.005+j24.32	0

Eşzamanlı olmayan bu senaryo durumu için kestirim hatası hesabı eşzamanlı parametre kestiriminde elde edilen analitik değerler göz önüne alınarak

yapılmaktadır. Buna rağmen en büyük kestirim hatası %0.3774 değeri ile L6F1 durumunda oluşmaktadır.

Tablo 5.29: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (Eşzamanlı Olmayan)

Senaryo	Hat parametreleri	
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]
L6F1	9.1227	0.0773
L6F2	8.9932	0.0774
L6F3	9.0893	0.0776
L6F4	9.0727	0.0776
L6F5	9.0067	0.0774
L6F6	9.0952	0.0773
Analitik değerler	9.005	0.0774

Tablo 5.30 ve Tablo 5.31’ de senaryonun eşzamanlı olması halinde elde edilen sonuçlar yer almaktadır. En büyük kestirim hatası %0.1622 değeri ile L6F6 durumunda oluşmaktadır.

Tablo 5.30: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (Eşzamanlı)

6.Senaryo	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
L6F1	1	9.0022+j24.313	0
L6F2	1	8.9979+j24.311	0
L6F3	1	9.003+j24.36	0
L6F4	1	9.012+j24.334	0
L6F5	1	9.0049+j24.318	0
L6F6	1	9.042+j24.3	0
Analitik değerler	1	9.005+j24.32	0

Tablo 5.31: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (Eşzamanlı)

Senaryo	Hat parametreleri	
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]
L6F1	9.0022	0.0774
L6F2	8.9979	0.0774
L6F3	9.003	0.0775
L6F4	9.012	0.0775
L6F5	9.0049	0.0774
L6F6	9.042	0.0773
Analitik değerler	9.005	0.0774

5.2.2.2 100 km uzunluğunda iletim hattı olması durumu

İlgilenilen iletim hattı Hat1' in kısa iletim hattı olması durumu göz önüne alındıktan sonra 100 km uzunluğunda paralel elemanların göz ardı edilmediği iletim hattı için fazör domen parametre kestirimi yöntemi uygulanmıştır. Kısa iletim hattı olduğunda uygulanan LiFj dengesizlikleri bu hat için de incelenmiştir. Hat1' in uçlarında ölçülen akım ve gerilim işaretleri giriş verileridir. Parametre kestirimi ile Hat1' e ait K matrisinin elemanları olan A , B ve C elemanlarının değerleri bulunacaktır.

Göz önüne alınan uzun hat modeli ile hattın iki kapılı gösterimine ilişkin K matrisinin elemanlarından (4.26 eşitliği) iletim hattının Z_c karakteristik empedans ve γ yayılma sabiti değerleri kestirilebilmektedir. Karakteristik empedansın ve yayılma sabitinin bulunmasının ardından Hat1' e ait seri empedans ve paralel admitans değerleri bulunmaktadır. Empedansı oluşturan hat direnci ve reaktansı ile admitansı oluşturan kapasite değerlerine de ulaşılabilir.

Arızasız Çalışma Durumu

Sistemde arızasız çalışma durumu için hatbaşı ve hatsonunda ölçülmüş olan akım ve gerilim değerleri fazör dönüşümünün ardından parametre kestirimi yöntemi için giriş bilgisi olarak kullanılmıştır. Algoritma sonucunda ilgilenilen 100 km' lik iletim hattına ait pozitif dizi K matrisi elemanları Tablo 5.32' de verilmiştir. Kestirilen değerler ile analitik değerlerin karşılaştırılması da bu tabloda gösterilmiştir. Analitik yolla hesaplanan değerler ile karşılaştırıldığında K matrisinin elemanlarının kestiriminde %0.1871 hata payı olduğu gözlenmiştir.

Tablo 5.32: 100 km' lik İletim Hattı Pozitif Dizi K Matrisi Elemanları

Arızasız Durum	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
Kestirilen değer	0.9942+j0.00183	13.72+j43.215	j0.00026749
Analitik değerler	0.9942+j0.0018	13.76+j43.29	j0.00026723

Bu matris elemanları ile iletim hattına ait karakteristik empedans ve yayılma sabiti Tablo 5.33' de hatta ait parametre bilgileri ise Tablo 5.34' te verilmiştir.

Tablo 5.33: 100 km' lik İletim Hattına Ait Bilgiler

Arızasız Durum	Hat bilgileri			
	Z_c	γ	Z	Y
Kestirilen d.	406.81+j63.163	0.016895+j0.10904	13.72+j43.215	j265.43*10 ⁻⁶
Analitik d.	407.39+j63.38	0.016936+j0.10908	13.76+j43.29	j268.63*10 ⁻⁶

Tablo 5.34: 100 km' lik İletim Hattına Ait Parametreler

Arızasız Durum	Hat parametreleri		
	R pozitif [Ω]	L pozitif [H]	C pozitif [F]
Kestirilen değer	13.72	0.1376	8.4489*10 ⁻⁷
Analitik değerler	13.76	0.1378	8.5508*10 ⁻⁷

Arıza Yeri ve Tipinin Etkisi

İletim hattının L2F1, L2F2, L2F3, L2F4, L2F5, L2F6 dengesiz durumlarında çalışması için sıfır dizi parametre kestirimleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.35' te Hat1' e ait parametre kestirim sonuçları olan K matrisinin elemanları yer almaktadır.

Tablo 5.35: L2 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
L2F1	0.98881+j0.0041765	44.518+j119.33	j0.0001865
L2F2	0.9884+j0.0046	43.82+j110.47	j0.00020868
L2F3	0.9878+j0.0044	42.982+j111.43	j0.00021667
L2F4	0.988+j0.0036	44.935+j119.62	j0.00019524
L2F5	0.9884+j0.0042	44.471+j119.93	j0.00019252
L2F6	0.989+j0.0041879	44.473+j119.35	j0.00018448
Analitik değerler	0.9888+j0.0042	44.88+j119.7	j0.0001865

Tablo 5.36: L2 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri

Senaryo	Hat bilgileri			
	Z_c	γ	Z	Y
L2F1	812.9+j147.58	0.027532+j0.1522	44.518+j119.33	j188.31*10 ⁻⁶
L2F2	739.12+j154.505	0.0297+j0.15498	43.82+j110.47	j209.4*10 ⁻⁶
L2F3	726.81+j143.43	0.0278+j0.1588	42.982+j111.43	j217.56*10 ⁻⁶
L2F4	788.17+j137.72	0.0231+j0.1568	44.935+j119.62	j196.04*10 ⁻⁶
L2F5	800.22+j146.48	0.0272+j0.1549	44.471+j119.93	j193.27*10 ⁻⁶
L2F6	816.78+j143.95	0.0278+j0.151	44.473+j119.35	j185.16*10 ⁻⁶
Analitik d.	812.54+j148.66	0.027684+j0.1524	44.88+j119.7	j188.31*10 ⁻⁶

L2 noktasında elde edilen bu veriler tabloda analitik yolla hesaplanan değerlerle karşılaştırılabilir. Hat1' e ait parametre kestiriminde arıza tipi açısından en yüksek kestirim hatası %6.6374 ile L2F3 durumunda sıfır dizi empedans bilgisine aittir.

Tablo 5.37: L2 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri

Senaryo	Hat parametreleri		
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]	C_sıfır [F]
L2F1	44.518	0.3798	$5.9941 \cdot 10^{-7}$
L2F2	43.82	0.3516	$6.6654 \cdot 10^{-7}$
L2F3	42.982	0.3547	$6.9251 \cdot 10^{-7}$
L2F4	44.935	0.3808	$6.2401 \cdot 10^{-7}$
L2F5	44.471	0.3817	$6.1520 \cdot 10^{-7}$
L2F6	44.473	0.3799	$5.8938 \cdot 10^{-7}$
Analitik değerler	44.88	0.381	$5.9941 \cdot 10^{-7}$

Farklı arıza yerlerinde meydana gelecek arıza durumlarında parametre kestirimi sonuçları üzerinde etkileri görmek için L3 ve L4 noktalarında da benzetimler gerçekleştirilmiştir. L3 noktası için yapılan benzetimlerle elde edilen K matrisinin elemanlarının kestiriminin sonuçları Tablo 5.38 ve Tablo 5.39' da yer almaktadır. İletim hattı parametreleri ise Tablo 5.40' da verilmiştir.

Tablo 5.38: L3 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
L3F1	0.9862+j0.0052666	44.116+j119.43	j0.00023149
L3F2	0.98381+j0.006506	44.414+j121.49	j0.00026892
L3F3	1.004+j0.0036306	43.651+j121.11	j0.00029318
L3F4	0.98858+j0.0039743	44.032+j118.97	j0.00019023
L3F5	0.98885+j0.0039957	44.572+j118.89	j0.0001862
L3F6	0.98885+j0.0041346	44.384+j119.39	j0.000018638
Analitik değerler	0.9888+j0.0042	44.88+j119.7	j0.0001865

Tablo sonuçlarına bakıldığında L3 noktası için kestirim hatalarının L2 noktası için olan kestirim hatalarından farklı olmadığı; en büyük hata değerinin %1.4631 ile L3F3 durumu olduğunda sıfır dizi empedansında olduğu gözlenmektedir.

Tablo 5.39: L3 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri

Senaryo	Hat bilgileri			
	Z_c	γ	Z	Y
L3F1	729.09+j135.9	0.0313+j0.1692	44.116+j119.43	j232.55*10 ⁻⁶
L3F2	682.89+j129.41	0.03564+j0.1836	44.414+j121.49	j270.36*10 ⁻⁶
L3F3	811.48+j93.625	0.02888+j0.15243	43.651+j121.11	j293.55*10 ⁻⁶
L3F4	800.81+j151.27	0.026+j0.1535	44.032+j118.97	j190.97*10 ⁻⁶
L3F5	809.93+j152.66	0.02764+j0.1518	44.572+j118.89	j186.9*10 ⁻⁶
L3F6	812.11+j146.13	0.027319+j0.1519	44.384+j119.39	j187.07*10 ⁻⁶
Analitik d.	812.54+j148.66	0.027684+j0.15238	44.88+j119.7	j188.31*10 ⁻⁶

Tablo 5.40: L3 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri

Senaryo	Hat parametreleri		
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]	C_sıfır [F]
L3F1	44.116	0.3802	7.4023*10 ⁻⁷
L3F2	44.414	0.3867	8.6058*10 ⁻⁷
L3F3	43.651	0.3855	9.344*10 ⁻⁷
L3F4	44.032	0.3787	6.0788*10 ⁻⁷
L3F5	44.572	0.3784	5.9492*10 ⁻⁷
L3F6	44.384	0.38	5.9546*10 ⁻⁷
Analitik değerler	44.88	0.3810	5.9941*10 ⁻⁷

Benzer şekilde L4 noktası için benzetim sonuçları Tablo 5.41-5.42' de verilmiştir.

Tablo 5.41: L4 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
L4F1	0.98878+j0.004157	44.233+j119.46	j0.00018751
L4F2	0.9896+j0.0047012	45.398+j115.13	j0.00018391
L4F3	0.98741+j0.0045028	43.151+j116.22	j0.00021552
L4F4	0.98912+j0.0045331	45.827+j120.18	j0.00018286
L4F5	0.98878+j0.0034704	44.524+j119.66	j0.00018333
L4F6	0.98883+j0.0042225	45.007+j119.08	j0.00018
Analitik değerler	0.9888+j0.0042	44.88+j119.7	j0.00018726

Tablo 5.42: L4 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri

Senaryo	Hat bilgileri			
	Z_c	γ	Z	Y
L4F1	809.86+j144.75	0.027377+j0.15241	44.233+j119.46	j182.21*10 ⁻⁶
L4F2	807.58+j132.76	0.0319+j0.1478	45.398+j115.13	j184.54*10 ⁻⁶
L4F3	744.49+j181.6	0.028+j0.1613	43.151+j116.22	j216.15*10 ⁻⁶
L4F4	825.39+j138.74	0.0302+j0.1507	45.827+j120.18	j183.52*10 ⁻⁶
L4F5	814.69+j147.77	0.023+j0.15166	44.524+j119.66	j184.03*10 ⁻⁶
L4F6	809.63+j147.58	0.0279+j0.15217	45.007+j119.08	j187.96*10 ⁻⁶
Analitik d.	812.54+j148.66	0.027684+j0.15238	44.88+j119.7	j188.31*10 ⁻⁶

Tablo 5.43: L4 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri

Senaryo	Hat parametreleri		
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]	C_sıfır [F]
L4F1	44.233	0.3803	5.799*10 ⁻⁷
L4F2	45.398	0.3665	5.8741*10 ⁻⁷
L4F3	43.651	0.3699	6.8803*10 ⁻⁷
L4F4	43.151	0.3825	5.8416*10 ⁻⁷
L4F5	44.524	0.3809	5.8579*10 ⁻⁷
L4F6	45.007	0.379	5.983*10 ⁻⁷
Analitik değerler	44.88	0.3810	5.9941*10 ⁻⁷

İletim hattı parametreleri Tablo 5.43’ de görülmektedir. L4 noktasında elde edilen en büyük kestirim hatası değeri %3.0397 ile L4F3 durumunda sıfır dizi empedans değerinde oluşmuştur.

Arıza Direncinin Etkisi

Arıza direncinin etkisi görmek için ise L5 noktasında F1’ den F6’ a kadar tüm dengesizlik durumları için arıza direncinin artırılması durumunda Hat1 parametrelerinin kestirimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Arıza direnci, yapılan benzetimlerde 0.001 Ω değerinde alınmıştır. Bu senaryo için büyük bir değer olarak 50 Ω alınmıştır. Benzetim sonuçları Tablo 5.44 ve Tablo 5.45’ te sunulmaktadır. Arıza direncinin değişiminin parametre kestirimi üzerinde etkisinin olmadığı benzetim sonuçlarından görülmektedir. Sıfır dizi empedansının kestiriminde en büyük hata oranı %1.4777 olarak L5F3 durumunda görülmektedir.

Tablo 5.44: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (50Ω)

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
L5F1	0.98819+j0.004202	44.56+j119.35	j0.00019638
L5F2	0.99+j0.0043933	44.332+j117.98	j0.00017279
L5F3	0.9879+j0.0042788	43.5+j118.41	j0.000188
L5F4	0.98756+j0.0044328	44.532+j119.35	j0.00020688
L5F5	0.98731+j0.004195	44.567+j119.31	j0.00020928
L5F6	0.9888+j0.0041754	44.546+j119.32	j0.00018735
Analitik değerler	0.9888+j0.0042	44.88+j119.7	j0.000186

Tablo 5.45: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri (50Ω)

Senaryo	Hat bilgileri			
	Z_c	γ	Z	Y
L5F1	789.93+j148.69	0.0273+j0.1562	44.56+j119.35	j197.16*10 ⁻⁶
L5F2	842.18+j139.09	0.0305+j0.15481	44.332+j117.98	j173.35*10 ⁻⁶
L5F3	681.68+j146.12	0.0272+j0.1581	43.5+j118.41	j156.9*10 ⁻⁶
L5F4	816.63+j147.87	0.0278+j0.1603	44.532+j119.35	j207.52*10 ⁻⁶
L5F5	763.04+j152.7	0.0261+j0.1616	44.567+j119.31	j210.18*10 ⁻⁶
L5F6	809.9+j146.15	0.02752+j0.1523	44.546+j119.32	j187.96*10 ⁻⁶
Analitik d.	812.54+j148.66	0.02768+j0.1523	44.88+j119.7	j188.31*10 ⁻⁶

Tablo 5.46: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (50Ω)

Senaryo	Hat parametreleri		
	$R_{\text{sıfır}} [\Omega]$	$L_{\text{sıfır}} [H]$	$C_{\text{sıfır}} [F]$
L5F1	44.56	0.3799	6.2758*10 ⁻⁷
L5F2	44.332	0.3755	5.5179*10 ⁻⁷
L5F3	43.5	0.3769	4.9943*10 ⁻⁷
L5F4	44.532	0.3799	6.6056*10 ⁻⁷
L5F5	44.567	0.3798	6.6902*10 ⁻⁷
L5F6	44.546	0.3798	5.983*10 ⁻⁷
Analitik değerler	44.88	0.381	5.9941*10 ⁻⁷

0.001Ω değerinde alınan arıza direnci için benzetim sonuçları Tablo 5.47-Tablo 5.49' da sunulmaktadır. Kestirimde en büyük hata oranı %1.2889 ile L5F3 durumundadır.

Tablo 5.47: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (0.001Ω)

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
L5F1	0.9889+j0.0041816	44.625+j119.2	j0.00018604
L5F2	0.98864+j0.0041118	44.825+j121.07	j0.0001882
L5F3	0.98857+j0.0041901	43.73+j120.88	j0.00018904
L5F4	0.98973+j0.004858	44.438+j119.25	j0.00017761
L5F5	0.98875+j0.0049836	44.587+j118.97	j0.00020928
L5F6	0.98874+j0.0044707	45.892+j118.37	j0.00019049
Analitik değerler	0.98883+j0.0041776	44.618+j119.29	j0.000186

Tablo 5.48: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri (0.001Ω)

Senaryo	Hat bilgileri			
	Z_c	γ	Z	Y
L5F1	812.6+j145.96	0.0277+j0.1517	44.625+j119.2	j186.73*10 ⁻⁶
L5F2	816.26+j149.04	0.0269+j0.1532	44.825+j121.07	j187.51*10 ⁻⁶
L5F3	811.02+j140.12	0.0274+j0.1538	43.73+j120.88	j189.77*10 ⁻⁶
L5F4	835.81+j113.85	0.0331+j0.1472	44.438+j119.25	j178.19*10 ⁻⁶
L5F5	800.1+j120.64	0.0326+j0.1536	44.587+j118.97	j193.72*10 ⁻⁶
L5F6	801.58+j146.15	0.0293+j0.153	45.892+j118.37	j191.21*10 ⁻⁶
Analitik d.	812.54+j148.66	0.02768+j0.1523	44.88+j119.7	j188.31*10 ⁻⁶

Tablo 5.49: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (0.001Ω)

Senaryo	Hat parametreleri		
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]	C_sıfır [F]
L5F1	44.625	0.3794	5.9438*10 ⁻⁷
L5F2	44.825	0.3854	5.9686*10 ⁻⁷
L5F3	43.7	0.3848	6.0404*10 ⁻⁷
L5F4	44.438	0.3796	5.6721*10 ⁻⁷
L5F5	44.587	0.3787	6.1662*10 ⁻⁷
L5F6	45.892	0.3768	6.0863*10 ⁻⁷
Analitik değerler	44.88	0.381	5.9941*10 ⁻⁷

Eşzamanlı Olmayan Örnekleme için Sonuçlar

L6 noktasında eşzamanlı olmayan akım ve gerilim örnekleri ele alınarak yapılan kestirim sonuçlarının incelenmesi amacıyla F1' den F6' a kadar çeşitli dengesizlik durumları oluşturulmuştur. Benzetim sonuçları Tablo 5.50 ve Tablo 5.51' de verilmiştir.

Tablo 5.50: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri (Eşzamanlı Olmayan)

Senaryo	Hat bilgileri	
	Z_k	Y_l
L6F1	45.078+j118.96	j247.64*10 ⁻⁶
L6F2	45.569+j120.45	j374.9*10 ⁻⁶
L6F3	45.115+j119.3	j380.23*10 ⁻⁶
L6F4	45.127+j119.28	j378.58*10 ⁻⁶
L6F5	45.135+j119.34	j510.33*10 ⁻⁶
L6F6	45.16+j119.24	j408.23*10 ⁻⁶
Analitik değerler.	45.902+j120.86	j188.1*10 ⁻⁶

Eşzamanlı olmayan durum için elde edilen kestirim hatası değerleri de küçük olmuştur. Kısa devre empedansının kestiriminde en büyük hata oranı %0.5992 olarak L6F1 durumunda görülmektedir.

Tablo 5.51: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (Eşzamanlı Olmayan)

Senaryo	Hat parametreleri		
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]	C_sıfır [F]
L6F1	45.078	0.3787	6.2077*10 ⁻⁷
L6F2	45.569	0.3834	6.2774*10 ⁻⁷
L6F3	45.115	0.3797	5.7862*10 ⁻⁷
L6F4	45.127	0.3797	6.3439*10 ⁻⁷
L6F5	45.135	0.3799	6.2029*10 ⁻⁷
L6F6	45.16	0.3796	5.9594*10 ⁻⁷
Analitik değerler	45.902	0.3847	5.9874*10 ⁻⁷

Eşzamanlı durum için elde parametreler Tablo 52-Tablo 54' te verilmektedir. En büyük kestirim hatası %0.4056 olarak L6F5 durumunda görülmektedir.

Tablo 5.52: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (Eşzamanlı)

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
L6F1	0.988+j0.004189	44.575+j119.13	j0.0001994
L6F2	0.988+j0.0042322	44.549+j119.29	j0.00019942
L6F3	0.989+j0.004217	44.607+j119.37	j0.00018522
L6F4	0.99+j0.0041849	44.583+j119.35	j0.00016976
L6F5	0.9881+j0.004183	44.55+j119.3	j0.00019767
L6F6	0.99+j0.004185	44.67+j119.29	j0.0001698
Analitik değerler	0.9888+j0.0042	44.88+j119.7	j0.000186

Tablo 5.53: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri (Eşzamanlı)

Senaryo	Hat bilgileri			
	Z_c	γ	Z	Y
L6F1	782.68+j150.33	0.0267+j0.1573	44.575+j119.13	j200.21*10 ⁻⁶
L6F2	783.44+j148.66	0.027+j0.1574	44.549+j119.29	j200.22*10 ⁻⁶
L6F3	816.88+j143.78	0.028+j0.1511	44.607+j119.37	j185.22*10 ⁻⁶
L6F4	853.64+j136.86	0.0291+j0.1445	44.583+j119.35	j170.32*10 ⁻⁶
L6F5	786.86+j149.72	0.0268+j0.1567	44.55+j119.3	j198.46*10 ⁻⁶
L6F6	1309.5+j382.94	0.0291+j0.1445	44.607+j119.29	j170.36*10 ⁻⁶
Analitik d.	812.54+j148.66	0.02768+j0.1523	44.88+j119.7	j188.1*10 ⁻⁶

Tablo 5.54: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (Eşzamanlı)

Senaryo	Hat parametreleri		
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]	C_sıfır [F]
L6F1	44.575	0.3792	6.3727*10 ⁻⁷
L6F2	44.549	0.3797	6.3733*10 ⁻⁷
L6F3	44.607	0.38	5.8959*10 ⁻⁷
L6F4	44.583	0.3799	5.4215*10 ⁻⁷
L6F5	44.55	0.3797	6.3172*10 ⁻⁷
L6F6	44.67	0.3797	5.4228*10 ⁻⁷
Analitik değerler	44.88	0.381	5.9941*10 ⁻⁷

5.2.2.3 150 km uzunluğunda iletim hattı olması durumu

100 km iletim hattı için gerçekleştirilen incelemeler hat boyunun değişiminin parametre kestirimi üzerindeki etkisini görmek amacıyla Hat1' in 150 km uzunlukta iletim hattı olması durumu için tekrarlanmıştır. Çeşitli senaryolarda elde edilen Hat1' in hatbaşı ve hatsonu olmak üzere her iki ucunda ölçülen akım ve gerilim işaretlerini kullanılarak Hat1' e ait K matrisinin elemanları olan A , B ve C elemanlarının değerleri bulunmuştur.

Arızasız Çalışma Durumu

İletim hattına ait pozitif dizi K matrisi elemanları Tablo 5.55' te verilmiştir. Analitik yolla hesaplanan değerler ile karşılaştırıldığında K matrisinin elemanlarının kestiriminde % 0.388 hata payı bulunmaktadır.

Tablo 5.55: 150 km' lik İletim Hattı Pozitif Dizi K Matrisi Elemanları

Arızasız Durum	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
Kestirilen değer	0.9868+j0.0042	20.87+j65.113	j0.00040428
Analitik değerler	0.98681+j0.004216	20.94+j65.37	j0.00040436

Bu matris elemanları ile iletim hattına ait karakteristik empedans ve yayılma sabiti olarak elde edilerek hatta ait parametre bilgilerine ulaşılmış olmaktadır (Tablo 5.56). Pozitif dizi empedans değerinin kestirilmesinde hata oranı %0.388 olmaktadır.

Tablo 5.56: 150 km' lik İletim Hattına Ait Bilgiler

Arızasız Durum	Hat bilgileri			
	Z_c	γ	Z	Y
Kestirilen d	405.38+j63.67	0.0256+j0.1646	20.87+j65.113	j406*10 ⁻⁶
Analitik değer	405.39+j62.74	0.0257+j0.1646	20.94+j65.37	j404.4*10 ⁻⁶

Kestirilen iletim hattı parametreleri Tablo 5.57' de verilmiştir.

Tablo 5.57: 150 km' lik İletim Hattına Ait Parametreler

Arızasız durum	Hat parametreleri		
	R_pozitif [Ω]	L_pozitif [H]	C_pozitif [F]
Kestirilen değer	20.87	0.2073	1.2923*10 ⁻⁶
Analitik değer	20.94	0.2081	1.2872*10 ⁻⁶

Arıza Yeri ve Tipinin Etkisi

İletim hattının L2F1, L2F2, L2F3, L2F4, L2F5, L2F6 dengesiz durumlarında çalışması için sıfır dizi parametre kestirimleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.58 ve 5.59' da Hat1' e ait parametre kestirim sonuçları yer almaktadır.

Tablo 5.58: L2 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
L2F1	0.97437+j0.0096565	67.949+j180.42	j0.00028291
L2F2	0.97052+j0.009828	68.95+j181.47	j0.00031828
L2F3	0.96946+j0.009536	67.982+j181.43	j0.00032803
L2F4	0.97077+j0.009823	68.657+j180.69	j0.0003172
L2F5	0.9745+j0.0091529	68.71+j180.37	j0.00027948
L2F6	0.97431+j0.0096673	68.834+j180.48	j0.00028298
Analitik değerler	0.97425+j0.009763	69.24+j181.7	j0.00028203

Tablo 5.59: L2 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri

Senaryo	Hat bilgileri			
	Z_c	γ	Z	Y
L2F1	808.8+j146.52	0.0422+j0.2306	67.949+j180.42	j285.35*10 ⁻⁶
L2F2	761.07+j155.37	0.0402+j0.2467	68.95+j181.47	j321.48*10 ⁻⁶
L2F3	747.76+j156.55	0.0384+j0.2508	67.982+j181.43	j331.47*10 ⁻⁶
L2F4	760.94+j154.72	0.0404+j0.2457	68.657+j180.69	j320.4*10 ⁻⁶
L2F5	812.38+j156.99	0.0402+j0.2298	68.71+j180.37	j281.89*10 ⁻⁶
L2F6	808.81+j150.18	0.0422+j0.231	68.834+j180.48	j285.43*10 ⁻⁶
Analitik d.	813.09+j149.69	0.0426+j0.2313	69.24+j181.7	j284.45*10 ⁻⁶

İletim hattı parametreleri Tablo 5.60' da verilmiştir. L2F1 durumuna ait %0.935 kestirim hatası gözlenen en büyük hata değeridir.

Tablo 5.60: L2 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri

Senaryo	Hat parametreleri		
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]	C_sıfır [F]
L2F1	67.949	0.5743	9.083*10 ⁻⁷
L2F2	68.95	0.5776	1.0233*10 ⁻⁶
L2F3	67.982	0.5775	1.0551*10 ⁻⁶
L2F4	68.657	0.5752	1.0199*10 ⁻⁷
L2F5	68.71	0.5741	8.9728*10 ⁻⁷
L2F6	68.834	0.5745	9.0855*10 ⁻⁷
Analitik değerler	69.24	0.5784	9.0543*10 ⁻⁷

Farklı arıza yerlerinde meydana gelecek arıza durumlarında parametre kestirimi sonuçları üzerinde etkileri görmek için L3 ve L4 noktalarında da benzetimler gerçekleştirilmiştir. K matrisinin elemanlarının kestiriminin sonuçları L3 noktası için Tablo 5.61-Tablo 5.63' te yer almaktadır.

Tablo 5.61: L3 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
L3F1	0.96828+j0.00876	68.725+j180.02	j0.00033815
L3F2	0.97528+j0.009747	68.84+j180.123	j0.00027445
L3F3	0.97873+j0.009486	68.981+j181.11	j0.00023914
L3F4	0.9784+j0.00897	68.817+j180.97	j0.00023946
L3F5	0.97405+j0.00936	67.89+j181.45	j0.00028352
L3F6	0.97429+j0.00988	67.96+j180.52	j0.00028435
Analitik değerler	0.97425+j0.009763	69.24+j181.7	j0.00028201

Tablo 5.62: L3 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri

Senaryo	Hat bilgileri			
	Z_c	γ	Z	Y
L3F1	729.52+j170.21	0.0347+j0.2549	68.725+j180.02	j341.87*10 ⁻⁶
L3F2	821.77+j146.52	0.0433+j0.2269	68.84+j180.123	j276.72*10 ⁻⁶
L3F3	885.86+j136.94	0.0452+j0.2114	68.981+j181.11	j240.8*10 ⁻⁶
L3F4	760.94+j154.72	0.0425+j0.2125	68.817+j180.97	j241.17*10 ⁻⁶
L3F5	809.091+j150.71	0.0407+j0.2319	67.89+j181.45	j286.01*10 ⁻⁶
L3F6	807.43+j143.41	0.0431+j0.2312	67.96+j180.52	j286.81*10 ⁻⁶
Analitik d.	813.09+j149.69	0.0426+j0.2313	69.24+j181.7	j284.45*10 ⁻⁶

Sonuçların incelenmesinin ardından L3 noktasında olan kestirim hatalarının L2 noktasında olan kestirim hatalarından çok farklı değerde olmadığı görülmektedir. Sıfır dizi empedansına ait en büyük hata değerinin %0.7061 ile L3F5 durumuna ait olduğu gözlenmektedir.

Tablo 5.63: L3 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri

Senaryo	Hat parametreleri		
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]	C_sıfır [F]
L3F1	68.725	0.573	1.0882*10 ⁻⁶
L3F2	68.84	0.5733	8.8083*10 ⁻⁷
L3F3	68.981	0.5765	7.6649*10 ⁻⁷
L3F4	68.817	0.576	7.6767*10 ⁻⁷
L3F5	67.89	0.5776	9.104*10 ⁻⁷
L3F6	67.96	0.5746	9.1294*10 ⁻⁷
Analitik d.	69.24	0.5784	9.0543*10 ⁻⁷

Benzer şekilde L4 noktası için benzetimler yapılmıştır. K matrisinin elemanlarına ait sonuçlar Tablo 5.64 ve Tablo 5.65' te, iletim hattı parametreleri Tablo 5.66' da verilmiştir.

Tablo 5.64: L4 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
L4F1	0.97437+j0.009592	68.728+j180.27	j0.00028247
L4F2	0.973+j0.009922	68.91+j180.68	j0.00029614
L4F3	0.9656+j0.0095814	68.88+j180.59	j0.00036574
L4F4	0.977+j0.00978	69.276+j189.88	j0.00024604
L4F5	0.97412+j0.009428	68.89+j180.69	j0.0002836
L4F6	0.974+j0.00956	69.12+j180.24	j0.00028573
Analitik değerler	0.97425+j0.009763	69.24+j181.7	j0.00028201

Tablo 5.65: L4 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri

Senaryo	Hat bilgileri			
	Z_c	γ	Z	Y
L4F1	808.94+j150.86	0.0419+j0.2307	68.728+j180.27	j284.91*10 ⁻⁶
L4F2	790.3+j149.9	0.0423+j0.2366	68.91+j180.68	j298.84*10 ⁻⁶
L4F3	702.53+j162.83	0.0365+j0.2655	68.88+j180.59	j370.1*10 ⁻⁶
L4F4	892.45+j133.04	0.0449+j0.2195	69.276+j189.88	j247.9*10 ⁻⁶
L4F5	807.52+j154.28	0.0411+j0.2316	68.89+j180.69	j286.08*10 ⁻⁶
L4F6	803.7+j153.92	0.0415+j0.2322	69.12+j180.24	j288.24*10 ⁻⁶
Analitik d.	813.09+j149.69	0.0426+j0.2313	69.24+j181.7	j284.45*10 ⁻⁶

Tablo 5.66: L4 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri

Senaryo	Hat parametreleri		
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]	C_sıfır [F]
L4F1	68.728	0.5738	9.069*10 ⁻⁷
L4F2	68.91	0.5751	9.5124*10 ⁻⁷
L4F3	68.88	0.5748	1.1781*10 ⁻⁶
L4F4	69.276	0.6044	7.8909*10 ⁻⁷
L4F5	68.89	0.5752	9.1062*10 ⁻⁷
L4F6	69.12	0.5737	9.175*10 ⁻⁷
Analitik değerler	69.24	0.5784	9.1816*10 ⁻⁷

En büyük kestirim hatası %0.7811 değeri ile L4F1 durumunda oluşmuştur.

Arıza Direncinin Etkisi

L5 noktasında gerçekleştirilen F1' den F6' a kadar tüm dengesizlik durumları için benzetimlerde 0.001 Ω olarak alınan arıza direncinin değerinde arttırılmaya gidilip parametrelerinin kestirimi incelenmiştir. Bu senaryo için arıza direnci büyük bir değer olan 50 Ω olarak alınmıştır. Benzetim sonuçlarından arıza direncinin değişiminin parametre kestirimi üzerindeki etkisinin büyük bir değerde olmadığı görülmektedir. Kestirimdeki en büyük hata oranı %0.62 ile L5F5 durumunda görülmektedir. Benzetim sonuçları Tablo 5.67-Tablo 5.69' da sunulmaktadır.

Tablo 5.67: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (50Ω)

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
L5F1	0.9756+j0.009457	69.199+j180.36	j0.00026982
L5F2	0.95+j0.009573	69.314+j181.89	j0.00051061
L5F3	0.9697+j0.009244	69.187+j182.51	j0.00032221
L5F4	0.9756+j0.0086319	69.157+j180.53	j0.00026657
L5F5	0.97494+j0.009917	68.912+j180.54	j0.00027775
L5F6	0.97442+j0.009686	68.958+j180.42	j0.00028201
Analitik değerler	0.97425+j0.009763	69.24+j181.7	j0.00028201

Tablo 5.68: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri (50Ω)

Senaryo	Hat bilgileri			
	Z_c	γ	Z	Y
L5F1	828.97+j151.43	0.0423+j0.2253	69.199+j180.36	j272.03*10 ⁻⁶
L5F2	585.67+j161.26	0.0305+j0.319	69.314+j181.89	j519.59*10 ⁻⁶
L5F3	755.91+j163.89	0.0374+j0.2496	69.187+j182.51	j325.57*10 ⁻⁶
L5F4	831.89+j164.39	0.0387+j0.2247	69.157+j180.53	j268.77*10 ⁻⁶
L5F5	817.7+j144.9	0.0438+j0.2285	68.912+j180.54	j280.08*10 ⁻⁶
L5F6	810.24+j150.18	0.0424+j0.2305	68.958+j180.42	j284.44*10 ⁻⁶
Analitik d.	813.09+j149.69	0.0426+j0.2313	69.24+j181.7	j284.45*10 ⁻⁶

Tablo 5.69: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (50Ω)

Senaryo	Hat parametreleri		
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]	C_sıfır [F]
L5F1	69.199	0.5741e	8.659*10 ⁻⁷
L5F2	69.314	0.5791	1.6539*10 ⁻⁶
L5F3	69.187	0.5809	1.0363*10 ⁻⁶
L5F4	69.157	0.5746	8.5552*10 ⁻⁷
L5F5	68.912	0.5747	8.9152*10 ⁻⁷
L5F6	68.958	0.5743	9.054*10 ⁻⁷
Analitik değerler	69.24	0.5784	9.0543*10 ⁻⁷

Arıza direnci 0.001Ω olarak alındığında kestirilen değerler Tablo 70-Tablo 72' de yer almaktadır. Kestirimdeki en büyük hata oranı %0.4165 ile L5F5 durumunda görülmektedir.

Tablo 5.70: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (0.001Ω)

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
L5F1	0.9747+j0.00977	69.21+j180.14	j0.00027989
L5F2	0.9656+j0.00961	69.289+j181.5	j0.00036396
L5F3	0.9719+j0.0098	69.194+j180.91	j0.00030571
L5F4	0.9741+j0.00923	69.178+j181.45	j0.00028188
L5F5	0.9743+j0.00987	68.96+j180.94	j0.00028313
L5F6	0.97421+j0.009856	68.99+j181.1	j0.00028616
Analitik değerler	0.97425+j0.009763	69.24+j181.7	j0.00028201

Tablo 5.71: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri (0.001Ω)

Senaryo	Hat bilgileri			
	Z_c	γ	Z	Y
L5F1	813.22+j149.44	0.043+j0.2294	69.21+j180.14	j282.27*10 ⁻⁶
L5F2	706.09+j163.596	0.0366+j0.2655	69.289+j181.5	j368.3*10 ⁻⁶
L5F3	776.79+j154.8	0.041+j0.2411	69.194+j180.91	j308.62*10 ⁻⁶
L5F4	811.07+j157.92	0.0402+j0.2315	69.178+j181.45	j284.35*10 ⁻⁶
L5F5	810.14+j147.39	0.0431+j0.2312	68.96+j180.94	j285.57*10 ⁻⁶
L5F6	809.55+j147.84	0.0429+j0.2315	68.99+j181.1	j286.16*10 ⁻⁶
Analitik d.	813.09+j149.69	0.0426+j0.2313	69.24+j181.7	j284.45*10 ⁻⁶

Tablo 5.72: L5 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (0.001Ω)

Senaryo	Hat parametreleri		
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]	C_sıfır [F]
L5F1	69.21	0.5734e	8.984*10 ⁻⁷
L5F2	69.289	0.5777	1.1723*10 ⁻⁶
L5F3	69.194	0.5759	9.8237*10 ⁻⁷
L5F4	69.178	0.5776	9.0512*10 ⁻⁷
L5F5	68.96	0.5759	9.0901*10 ⁻⁷
L5F6	68.99	0.5765	9.1088*10 ⁻⁷
Analitik değerler	69.24	0.5784	9.0543*10 ⁻⁷

Eşzamanlı Olmayan Örneklemeye İçin Sonuçlar

L6 noktasında eşzamanlı olmayan akım ve gerilim örnekleri ele alınarak yapılan kestirim sonuçlarının incelenmesi amacıyla F1' den F6' a kadar çeşitli dengesizlik durumları oluşturulmuştur. Benzetim sonuçları Tablo 5.73 ve Tablo 5.74' te verilmiştir.

Tablo 5.73: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri

Senaryo	Hat bilgileri	
	Z_K	Y_L
L6F1	70.399+j180.72	j938.38*10 ⁻⁶
L6F2	69.83+j179.92	j443.33*10 ⁻⁶
L6F3	70.3997+j180.723	j449.47*10 ⁻⁶
L6F4	70.033+j180.18	j549.89*10 ⁻⁶
L6F5	69.859+j179.92	j452.16*10 ⁻⁶
L6F6	69.964+j179.85	j458.05*10 ⁻⁶
Analitik d.	72.932+j185.77	j289.43*10 ⁻⁶

Eşzamanlı olmayan durum için elde edilen kestirim hatası değerleri de küçük olmuştur. Kısa devre empedansının kestiriminde en büyük hata oranı %3.3179 olarak L6F1 durumunda görülmektedir. (Eşzamanlı olmayan örnekleme için hazırlanan MATLAB dosyası Ek-D' de yer almaktadır)

Tablo 5.74: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri

Senaryo	Hat parametreleri		
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]	C_sıfır [F]
L6F1	70.399	0.5752	8.9143*10 ⁻⁷
L6F2	69.83	0.5727	8.8987*10 ⁻⁷
L6F3	70.3997	0.5752	8.9143*10 ⁻⁷
L6F4	70.033	0.5735	9.0158*10 ⁻⁷
L6F5	69.859	0.5727	8.892*10 ⁻⁷
L6F6	69.964	0.5725	8.8926*10 ⁻⁷
Analitik değerler	72.932	0.5913	9.2128*10 ⁻⁷

Eşzamanlı olması halinde kestirilen değerler Tablo 75-Tablo 77' de yer almaktadır.

Tablo 5.75: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametre Kestirim Sonuçları (Eşzamanlı)

Senaryo	K matrisinin elemanları		
	A	B	C
L6F1	0.981+j0.0096728	69.229+j180.32	j0.0002189
L6F2	0.977+j0.009805	69.09+j180.39	j0.00025771
L6F3	0.972+j0.009751	69.215+j180.47	j0.00030519
L6F4	0.978+j0.00966	69.172+j180.43	j0.00033324
L6F5	0.969+j0.00951	68.98+j180.4	j0.00028313
L6F6	0.9735+j0.00974	68.77+j180.35	j0.00029122
Analitik değerler	0.97425+j0.009763	69.24+j181.7	j0.00028201

En büyük kestirim hatası %0.7352 ile L6F6 durumunda olmuştur.

Tablo 5.76: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Hat Bilgileri (Eşzamanlı)

Senaryo	Hat bilgileri			
	Z_c	γ	Z	Y
L6F1	925.98+j121.35	0.0484+j0.2011	69.229+j180.32	j259.67*10 ⁻⁶
L6F2	706.09+j163.596	0.045+j0.2195	69.09+j180.39	j368.3*10 ⁻⁶
L6F3	776.44+j155.65	0.0409+j0.2406	69.215+j180.47	j308.10*10 ⁻⁶
L6F4	868.85+j138.8	0.0453+j0.2149	69.172+j180.43	j249.3*10 ⁻⁶
L6F5	738.94+j161.82	0.0381+j0.2525	68.98+j180.4	j336.79*10 ⁻⁶
L6F6	796.28+j150.97	0.0419+j0.2344	68.77+j180.35	j293.83*10 ⁻⁶
Analitik d.	813.09+j149.69	0.0426+j0.2313	69.24+j181.7	j284.45*10 ⁻⁶

Tablo 5.77: L6 Noktasındaki Çeşitli Arıza Verileri ile Elde Edilen Sıfır Dizi Parametreleri (Eşzamanlı)

Senaryo	Hat parametreleri		
	R_sıfır [Ω]	L_sıfır [H]	C_sıfır [F]
L6F1	69.09	0.5742	8.2656*10 ⁻⁷
L6F2	69.289	0.5777	1.1723*10 ⁻⁶
L6F3	69.215	0.5745	9.8070*10 ⁻⁷
L6F4	69.172	0.5743	7.9354*10 ⁻⁷
L6F5	68.98	0.5742	1.072*10 ⁻⁶
L6F6	68.77	0.5741	9.353*10 ⁻⁷
Analitik değerler	69.24	0.5784	9.0543*10 ⁻⁷

6 SONUÇ ve ÖNERİLER

Enerji sistemlerinde yer alan yüksek gerilim iletim ve dağıtım hatları, üretim merkezleri ile son kullanıcılar arasında temel sürekliliği sağlayan yaşamsal bağlantılardır. Ekonomik açıdan enerji besleme sürekliliği için, iletim hattının arıza tespiti ve arıza yeri analizinin önemi artmaktadır. Enerji iletim hattında arıza meydana gelmesi, üretim merkezleri ile tüketim noktaları arasında bağlantının kopmasına ve büyük kayıpların oluşmasına neden olabilmektedir.

Elektrik enerjisinin iletimini sağlamak amacıyla tasarlanan sistemlerde özellikle sayısal koruma aygıtlarının yeterli koruma görevini yerine getirebilmesi için, iletim hattı elektriksel parametrelerinin iyi bir tahminle bilinmesi gereklidir. İletim hattı parametrelerindeki hatanın azaltılması, sistemde arıza olması halinde elde edilen verilerle en doğru ve en kısa sürede gerekli müdahale yapılabilmesini sağlayacaktır.

Enerji iletim hat parametrelerinin kestirimi konulu bu tez çalışması, üç ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm, iletim hattı parametrelerinin ve özelliklerinin açıklanması, parametreleri etkileyen faktörlerin incelenmesi, iletim hatlarının modellenme şekilleri, iletim sisteminde meydana gelebilecek simetrisizlikler ve dönüşüm yöntemlerini içermektedir. Enerji iletim hattı parametrelerinin analitik olarak hesaplanması ve göz önüne alınan çeşitli parametre kestirim yöntemlerine ait teorik bilgiler ikinci bölümü oluşturmaktadır. Üçüncü ana bölümde ise analitik yolla parametreleri hesaplanarak oluşturulmuş örnek sistem üzerinde, iletim hattı parametre kestirimi için biri zaman domeninde, diğeri fazör domenindeki verileri kullanan göz önüne alınan iki yöntemin çeşitli çalışma koşullarını içeren uygulamalarına yer verilerek sonuçlar irdelenmiştir.

İncelemelerde zaman domeni verilerini kullanan adaptif parametre kestirim yöntemi ile hem arızasız durumda ve hem de çeşitli senaryolarla oluşturulan dengesiz durumlarda kısa bir iletim hattının parametreleri büyük bir doğrulukla kestirilmiştir. Akım ve gerilim verilerinin toplanması açısından örnekleme frekansının benzetime olan etkisinin çok fazla olmadığı, hatanın ve çözümün oturma süresinin biraz azaldığı gözlenmiştir.

Ayrıca oluşturulan çeşitli senaryolar ile yönteme ilişkin aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Arıza direncinin hem 0.001Ω olan küçük bir değer için hem de 50Ω gibi büyük bir değer olarak alınmasıyla arıza direncinin etkisi araştırılmıştır. Her iki arıza direnci durumunda da kestirilen parametreler arasında görülen farkın küçük olması ile arıza direncinin değişiminin uygulanan yönteme etkisinin küçük olduğu ve bu etkinin doğrusal olmadığı görülmüştür. Her iki arıza direnci (0.001Ω ve 50Ω) ile yapılan benzetimlerde en büyük parametre kestirim hatası $\%0.0286$ ' dir.
- Uygulanan farklı tipte arızalar ile arıza tipi ile parametre kestirim hataları arasında doğrudan bir ilişki olmadığı gözlenmiştir. En büyük kestirim hatası $\%1.4235$ ile A faz-toprak arızası durumundadır.
- Dengesiz çalışma olarak simetrik olmayan hat açmalarının etkisi, parametreleri kestirilen hat üzerinde yapılabilen açmalarla incelenmiştir. Kestirim hatalarının çok büyük bir değerde olmaması nedeniyle kestirilen parametrelerin doğruluğuna güvenilebilmektedir. (En büyük kestirim hatası $\%4.3011$ ' dir.)

Adaptif parametre kestirimine dayalı yöntemin çözüm süresinin uzun olması, geniş veri penceresine gereksinim duyması ve kısa iletim hattına uygulanabilirliği önemli dezavantajlarıdır.

İncelemelerde ikinci yöntem olarak fazör domendeki akım ve gerilim verilerini kullanan algoritma göz önüne alınmıştır. Oluşturulan örnek sistem üzerinde bu algoritma kullanılarak gerçekleştirilen çeşitli senaryolar ile yönteme ilişkin aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Arızasız durumda veriler ile çok küçük hata ile kestirim başarılmıştır. En büyük kestirim hatası $\%0.1871$ ' dir.
- Göz önüne alınan hat dışındaki farklı arıza noktalarında uygulanan çeşitli arıza tipleri için elde edilen sonuçlardan, arıza yeri ve tipinin parametre kestirim hatası üzerinde doğrusal ve birebir bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir. En büyük kestirim hatası $\%6.6374$ ' dür.

- Elde edilen sonuçlara göre arıza direncinin değışiminin parametre kestirimi üzerinde etkisinin küçük olduğu ve arıza direncinin değeri ile parametre kestirim hatası arasında doğrusal bir bağıntının bulunmadığı gözlenmiştir. 0.001Ω arıza direnci için yapılan benzetimlerde en büyük kestirim hatası %1.28889 ve 50Ω arıza direnci için yapılan benzetimlerde en büyük kestirim hatası %1.4777' dir.
- Hattın iki ucundan elde edilen akım ve gerilim örneklerinin eşzamanlı olmadığı durumda parametre kestiriminin incelenmesi için, hatbaşı ve hatsonu verileri arasında yarım periyotluk bir zaman farkı yaratılmıştır. Eşzamanlı olmayan durum için öne sürülen kestirim algoritması uygulanarak, kestirilen parametrelerin eşzamanlı çalışma ile elde edilen analitik değerler ile karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuçlar, kestirim hatalarının küçük değerler olması nedeniyle yöntemin eşzamanlı olmayan durumlarda da kullanılabilirliğini göstermektedir. En büyük kestirim hatası %3.3179' dur.

Fazör domendeki parametre kestirim algoritması hem kısa ve orta uzunlukta iletim hatlarına uygulanabilirliği hem de benzetim süresinin zaman domenini adaptif parametre kestirimine göre kısa olması nedeniyle daha avantajlıdır. Ancak bu yöntem için de çaprazlanmamış iletim hatlarının ele alınmaması çalışmanın eksikliğidir. Ayrıca ölçülen verilerin uygun filtrelerin kullanımıyla fazör domen için giriş verilerini oluşturması ile doğruluk payı daha da büyük, kestirim hata değerleri daha da küçük sonuçlar elde edilebilir.

Teknolojilerdeki gelişmeler doğrultusunda, zaman domeninde uzun hatlara ilişkin parametrelerin kestiriminin gerçekleştirilebileceği yöntemlerin araştırılması ileri çalışmaların konusu olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Dilli B.**, Ocak 2001. Türkiye Elektrik Üretim ve İletiminde Yeniden Yapılanma, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı 142.
- [2] **Gönen T.**, 1988. Electric Power Transmission System Engineering, Analysis and Design, J. Wiley, New York, USA.
- [3] **Atalay H.**, 1977. Transmisyon Tekniği, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Makina-Elektrik Fakültesi Yayınları, No:5.
- [4] **Chen Y., Hu Z., Zhang C.**, 2000. A Study of Parameters Live Measurement of Transmission Lines with Mutual-inductance Based on GPS, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, **Vol. 4**, pp. 2658-2663.
- [5] **Philippot L., Maun J-C.**, November 1995. An Application of Synchronous Phasor Measurement to the Estimation of the Parameters of an Overhead Transmission Line, *Proceedings of the Fault and Disturbance Analysis and Precise Measurement Conference*, Arlington, Virginia, USA.
- [6] **Koglin H. J., Schmidt M.**, August 1996. Estimation of Transmission Line Parameters by Evaluating Fault Data Records, *Proceedings of the 12th Power Systems Computation Conference Dresden*, Germany.
- [7] **Jiang J. A., Yang J. Z., Lin Y. H., Liu C. W., Ma J.C.**, April 2000. An Adaptive PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines, Part I: Theory and Algorithms, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **Vol. 15, No. 2**, pp. 486-493.
- [8] **Waikar D. L., Chin S. M. P.**, September 1997. Fast and Accurate Parameter Estimation Algorithm for Digital Distance Relaying, *Elsevier Electric Power Systems Research* 44(1998), pp. 53-60.
- [9] **Rodriguez G., Aromataris L., Donolo M., Hernandez J., Moitre D.**, July 2001. Software for Calculation of Electric Power Systems Parameters, *Pergamon Computers and Electric Engineering* 29(2003), pp. 643-651.
- [10] **Gopalakrishnan A.**, 2000. Fault Location and Parameter Estimation on Overhead Transmission Lines Using Synchronized Sampling, PhD. Dissertation, Texas A&M University, USA.
- [11] **Saadat H.**, 1999. Power System Analysis, McGraw Hill, Singapore.
- [12] **HP Inc.**, 1997. Traveling Wave Fault Location in Power Transmission System, Application Note 1285, Japan.

- [13] **Çaylı T.**, Eylül 2002. Elektrik Dağıtım Tesislerinin Projelendirilmesi Semineri, Elektrik Tesisat Mühendisleri Derneği, İstanbul.
- [14] **Sohtaoğlu N. H.**, 1994. Elektrik Enerji İletim Şebekelerinin Optimal Genişletmeye Planlaması, *Doktora Tezi*, İTÜ.
- [15] **Watson N., Arillaga J.**, 2003. Power Systems Electromagnetic Transients Simulation, the Institution of Electrical Engineers, London, UK.
- [16] **Dengiz H.**, 1991. Enerji Hatları Mühendisliği, Kardeş Kitabevi, Ankara.
- [17] **Stevenson W. D.**, 1982. Elements of Power System Analysis 4th Edition, McGraw Hill, USA.
- [18] **Anderson P. M.**, 1973. Analysis of Faulted Power Systems, the Iowa State University Press, Iowa, USA.
- [19] **Çakır H.**, 1989. Enerji İletimi, Elektrik Hesapları, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [20] **Ciric R. M., Ochoa L. F., Padilha A.**, 2004. Power Flow in Distribution Networks with Earth Return, *Elsevier Simulation Practice and Theory* 6, pp. 323-336.
- [21] **Dommel H. W.**, July 1994. EMTP Rule Book (Theory Book in WP 5.1), BPA, Portland, USA.
- [22] **Tavares M. C., Pissolato J., Portela C. M.**, April 1999. New Multiphase Mode Domain Transmission Line Model, *Elsevier Electrical Power and Energy Systems*, pp. 373-380.
- [23] **Giovanni M.**, 2001. Transmission Lines and Lumped Circuits, Academic Press, San Diego, USA.
- [24] **Glover J. D., Sarma M.**, 1987. Power System Analysis and Design, PWS Publishers, Boston, USA.
- [25] **Güzelkokar S.**, 1982. Parametreleri Frekansa Bağlı Düzgün Yüksek Gerilim Hatlarında Oluşan Aşırı Gerilimlerin Yeni Bir Yaklaşımla İncelenmesi, *Doktora Tezi*, İTÜ Müh.-Mim. Fakültesi Matbaası.
- [26] **Karaer E., Bağrıyanık F. G., Bağrıyanık M.**, Aralık 2004. Enerji İletim Sistemlerinde Hat Parametrelerinin Kestirimi, *Eleco 2004, Ulusal Konferans*, A2-26.
- [27] **Hsu J. C., Meyer A. U.**, 1968. Modern Control Principles and Applications, McGraw Hill, USA.
- [28] **Sarioğlu, K.**, 1988. Otomatik Kontrol II, 3. Baskı, İTÜ, İstanbul.
- [29] **Clayton P. R.**, 1994. Analysis of Multiconductor Transmission Lines, J. Wiley, New York, USA.

- [30] **Fette M., Voss J., Oprea L., Velicescu C.**, May 1998. Modelling and Simulation of High-voltage Transmission Lines with Frequency Dependent Parameters, *Elsevier Simulation Practice and Theory* 6, pp. 323-336.
- [31] **Abur A., Exposito A. G.**, 2004. Power System State Estimation Theory and Implementation, M. Dekker, New York, USA.
- [32] **Hes Kablo AŞ**, 2004, ACSR Tipi İletken Veriler, www.hes.com.tr
- [33] **The Aluminum Association Incorporated**, 1982, Aluminum Electrical Conductor Handbook, Second Edition, Washington DC, USA.
- [34] **TEİAŞ**, 2004. Türkiye Ulusal Elektrik Ağındaki Havai Hatların, Trafoların ve Generatörlerin Elektrik Karakteristikleri SA-2004/1, Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı, Etüd ve Raporlama Müdürlüğü, Ankara.
- [35] **Chen Z., Maun J-C.**, May 1997. Artificial Neural Network Approach to Single Ended Fault Locator for Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Systems*, **Vol. 15, No. 1**, pp. 370-375.
- [36] **MATLAB**, 2002. Release 13, www.mathworks.com, The MathWorks Inc., Natick MA, USA.

EK-A: LYAPUNOV TEORİSİ

A.1 GİRİŞ

Rus matematikçisi Lyapunov, diferansiyel denklemlerin çözümünün kararlılığı üzerine iki önemli yöntem açıklamıştır. 1892 yılında açıklanan bu iki yöntem, uygulamada kullanma açısından şu biçimde açıklanabilir: Birinci yöntem, diferansiyel denklemin çözümünü kullanır ve dinamik sistemin kararlı olup olmadığını saptamaya yararmaktadır. İkinci yöntem ise dinamik sisteme ilişkin diferansiyel denklemin çözümünü bulmadan sistemin kararlılığını inceleme olanağını vermektedir. Doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin analitik çözümleri elde edilemediğinden böyle sistemlerin kararlılığı, Lyapunov'un ikinci yöntemi ile incelenebilmektedir. Böylece, Lyapunov'un ikinci yöntemi daha önemlidir [27,28].

A.2 KARARLILIK KAVRAMI

Tanım 1: Sıfır girişli ve herhangi ilk koşullu bir sistemde, durum uzayında sistem yörüngesi orijine gidiyorsa sistem kararlı, sonsuza gidiyorsa kararsızdır.

Tanım 2: Bir sistemin girişine uygulanan bütün sınırlı giriş işaretleri için çıkışı da sınırlı kalıyorsa sistemin kararlı, çıkışı sınırsız oluyorsa kararsızdır.

Bu tanımların birincisi serbest sistemin 'geçici davranışı' ile, ikincisi ise giriş etkisindeki bir sistemle ilgilidir [27,28]. Doğrusal olmayan sistemlerde geçici davranış, sürekli halden oldukça farklı olduğundan bu iki tanım arasında bir uygunluk yoktur.

A.2.1 Lyapunov Kararlılığı

Tanım 1: x , $n \times 1$ durum vektörü ise $\|x\|$, x durum vektörünün normu denir [28].

$$\|x\| = \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} = (x^T x)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.1})$$

olarak ifade edilir.

Tanım 2: $\dot{x} = f(x, u, t)$ sisteminde, her t için

$$f(x_e, 0, t) = 0 \quad (\text{A.2})$$

ise x_e ' ler bu serbest dinamik sistemin denge durumlarıdır [28].

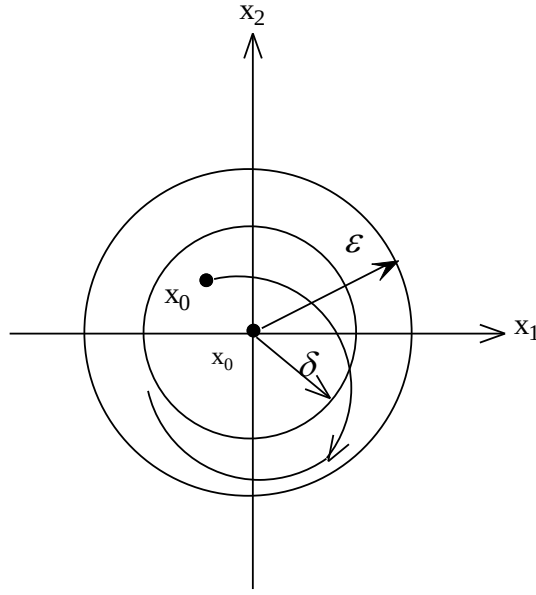
Tanım 3: Bir R bölgesinde her $\varepsilon > 0$ için, yalnızca bir ε ' a bağlı bir $\delta > 0$ varsa, öyle ki (x_0, t_0) başlangıç noktası olmak üzere bütün $t > t_0$ ' lar için

$$\|x_0 - x_e\| < \delta \quad (\text{A.3})$$

denklemini ve

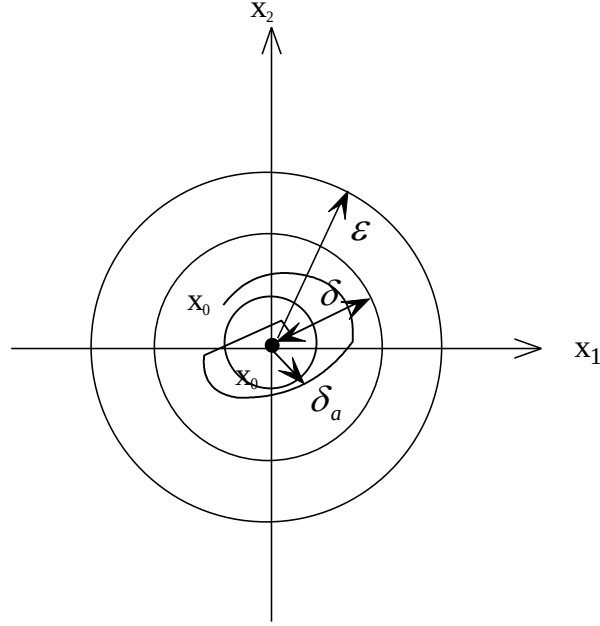
$$\|x(t, x_0) - x_e\| < \varepsilon \quad (\text{A.4})$$

denklemini gerçekleniyorsa dinamik sistemin x_e denge noktaları kararlıdır [28].



Şekil A.1 : Kararlılık [27]

Tanım 4: Tanım 3' teki özelliklerle birlikte bir δ_a bulunabiliyorsa, öyle ki x_e ' nin δ_a civarından başlayan her hareketi $t \rightarrow \infty$ iken x_e ' e yakınsıyorsa, dinamik sistemin x_e denge noktaları asimptotik olarak kararlıdır [28].



Şekil A.2 : Asimptot Kararlılık [27]

A.2.1.1 Lyapunov' un birinci yöntemi

Teorem: $\dot{x} = f(x)$ sistemi için, sistemin x_e denge durumundan sapma denklemi

$$\Delta \dot{x} = \frac{\partial f(x_e)}{\partial x} \Delta x + h(x_e, \Delta x) \quad (\text{A.5})$$

olmak üzere

$$\lim_{\|\Delta x\| \rightarrow 0} \frac{h(x_e, \Delta x)}{\|\Delta x\|} = 0 \quad (\text{A.6})$$

oluyorsa, doğrusallaştırılmış

$$\Delta \dot{x} = \frac{\partial f(x_e)}{\partial x} \Delta x \quad (\text{A.7})$$

sistemin [27]

- i) sadece negatif gerçel kısmı çözümleri varsa x_e denge noktaları asimptotik kararlı,
- ii) pozitif gerçel kısmı bir veya daha fazla çözümü varsa kararsız,
- iii) bir veya daha fazla sıfır gerçel çözümlü kısmı varsa ve diğer çözümler de negatif gerçel kısmı kalıyorsa x_e denge noktalarının kararlılığı doğrusallaştırılmış sistemden belirlenemez.

A.2.1.2 Lyapunov' un ikinci yöntemi

Lyapunov' un ikinci yöntemi, dinamik bir sisteme ilişkin diferansiyel denklemin çözümünü elde etmeksizin, denklemin biçiminden dinamik sistemin kararlı olup olmadığının belirlenmesini sağlamaktadır. Rus matematikçisi Lyapunov sistemin içinde biriktirilen enerji ile sistemin dinamiği arasında bağıntı kuracak bir fonksiyonu, enerji kavramını göz önüne alarak vermiştir [27]. Genel bir açıklama için ikinci dereceden bir sistem ele alınmaktadır:

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2), \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) \quad (\text{A.8})$$

ve

$$f_1(0,0) = f_2(0,0) = 0 \quad (\text{A.9})$$

olsun. Buna göre orijin, kararlılığın gerçekleştiği denge durumudur. Sistemle ilgili bir $V(x_1, x_2)$ fonksiyonunun bulunduğu ve bu fonksiyonun orijinde '0', bunun dışında her zaman pozitif değerler aldığı kabul edilmektedir.

Sistemin durumları, $V(x_{10}, x_{20})$ ilk koşullarından V' i azaltacak yönde hareket ettirilirse, orijin dışında sistem durumlarının gidecek başka yeri olmadığı görülmektedir. Öyleyse sistem asimptotik olarak kararlıdır.

Fiziksel sistemler için yazılan enerji fonksiyonları kesin pozitif olduklarından Lyapunov fonksiyonu olarak alınabilmektedirler. Toplam enerjisi sürekli olarak azalan bir sistemde ise enerji fonksiyonunun zamana göre türevi negatif olmaktadır. Lyapunov' un ikinci yöntemi bu özelliklere dayanmaktadır [28].

Genel olarak n . dereceden bir sistem için skaler $V(x)$ Lyapunov fonksiyonu şu koşulları sağlamaktadır [28].

- i) $V(x)$, orijin çevresindeki bir R bölgesinde süreklidir ve sürekli birinci kısmi türeve sahiptir.
- ii) R bölgesinde $V(x)$ kesin pozitifdir, $V(0) = 0$ ve $V(x) > 0$.
- iii) R bölgesinde $V(x)'$ in sistem yörüngesi boyunca zamana göre türevi yarı kesin negatiftir $V(x)' \leq 0$.

$$V(x)' = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial t} = (\text{grad } V)^T \dot{x} = (\nabla V)^T f(x) \quad (\text{A.10})$$

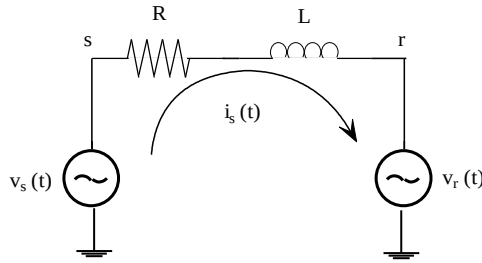
Denklem sonuçları aşağıdaki ifadelerle özetlenmektedir [27,28]:

1. Kararlılık Teoremi: $\dot{x} = f(x)$, $f(0) = 0$ sistemi için orijin civarındaki bir R bölgesinde bir Lyapunov fonksiyonu bulunabilirse sistem orijinde kararlıdır.
2. Kararlılık Teoremi: $V(x)' \leq 0$ (kesin negatif) ise sistem orijinde asimptotik kararlıdır.

EK-B: ADAPTİF PARAMETRE KESTİRİMİ

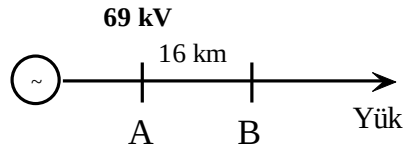
B.1 KISA HAT UYGULAMASI

İletim hattının parametre kestirimi için yöntem uygulandığında ilk adım 3 fazlı ortak kuplajlı devrelerin 3 tek fazlı kuplajsız devrelere modal dönüşüm ile dönüştürülmesidir.



Şekil B.1 : R ve L Elemanlarından Oluşan Kısa İletim Hattı

Bu çalışmada adaptif parametre kestirimi yönteminin uygulaması amacıyla 69 kV' luk 3 fazlı 16 km uzunluğunda bir kısa iletim hattı göz önüne alınmıştır. Şekil B.2' de gösterilen örnek iletim hattının faz başına seri empedansı $0.125 + j0.4375 [\Omega / km]$ ' dir. İncelemelerde ele alınan yöntemin hattın yük durumuna bağlı olarak etkileneceğini görmek amacıyla, hattın alıcı ucunda 120 MW' lık (ağır yük) ve 4.5 MW' lık (hafif yük) yüklenme durumları göz önüne alınmıştır. Güç faktörünün 1.0 olduğu varsayılmıştır. Örnek sistem üzerindeki incelemeler MATLAB-Simulink programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [7].



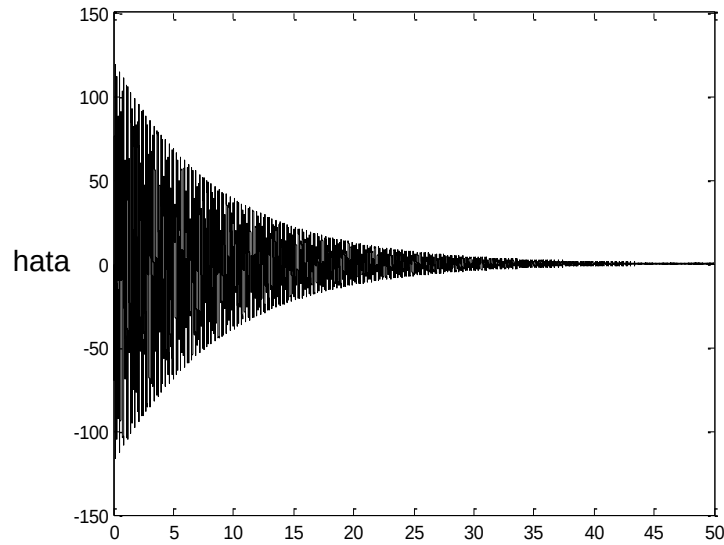
Şekil B.2 : Örnek İletim Hattı

B.2 UYGULAMA SONUÇLARI

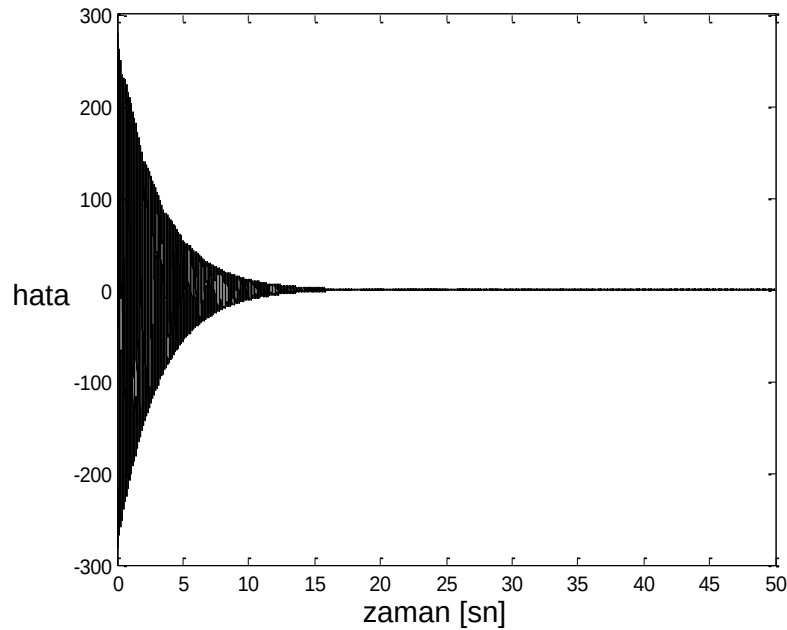
Göz önüne alınan 16 km uzunluğundaki iletim hattının seri direnci $R = 2 [\Omega]$ ve reaktansı $X_L = 7 [\Omega]$ ' dur. $f = 50 Hz$ için toplam hat endüktansı $L = 0.02228 [H]$ olarak bulunmaktadır.

$$L = 16 \times \frac{0.4375}{2 \times \pi \times 50} = 0.02228 [H] \quad (B.1)$$

İncelemelerde 50 sn' lik bir zaman süresi için elde edilen, hat uçlarındaki veriler kullanılmıştır. Örnekleme frekansı olarak 20kHz alınmıştır. Her iki yük durumu için elde edilen sonuçlara ait hata değişimleri Şekil B.3 ve Şekil B.4' de verilmiştir. Bu şekillerden görüleceği üzere parametre kestirimi için 15-35 sn' lik veriye gereksinim duyulabilmektedir. Yöntemin sınırlaması olarak, parametre kestirimi için gereken zamanın uzun olduğu söylenebilmektedir. Bu nedenle parametre kestirimlerinin yakınsaması için veri penceresi genişletilmelidir.



Şekil B.3 : 4.5 MW' lık Yük için Çıkışta Elde Edilen Sistem Hatası
zaman [sn]



Şekil B.4 : 120 MW' lık Yük için Çıkışta Elde Edilen Sistem Hatası

İletim hattı parametreleri R ve L' nin kestirilen değerlerini içeren sonuçlar ele alınarak (1.1.12) denklemi ile kestirim değerleri hatası hesaplanmaktadır. Direnç R için her iki yük durumunda da '0' olarak bulunmuştur.

$$hata_L = \frac{|L_{analitik} - L_{simulasyon}|}{L_{analitik}} \quad (B.2)$$

Endüktans için gözlemlenen hata ise 4.5 MW' lık yük durumunda hata

$$hata_L = \frac{|0.02228 - 0.02229|}{0.02228} \times 100 = 0.045 \quad (B.3)$$

olarak sıfıra yakın değerdedir. 120 MW' lık yük durumundaki hata ise

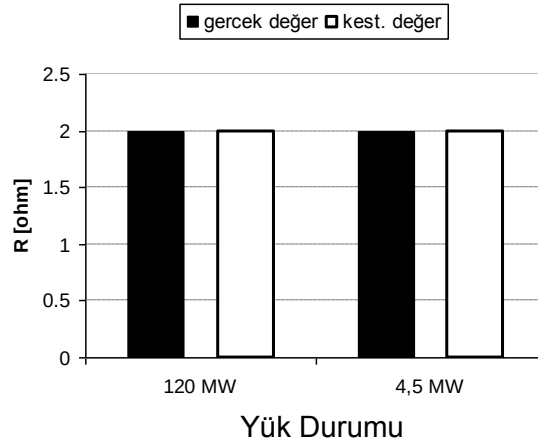
$$hata_L = \frac{|0.02228 - 0.02232|}{0.02228} \times 100 = 0.179 \quad (B.4)$$

yine oldukça küçük değerdedir.

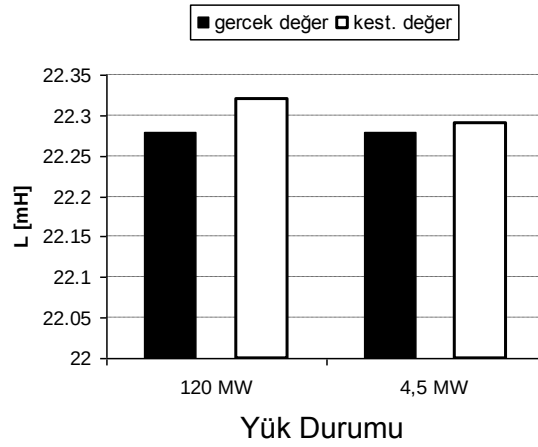
İletim hattı parametreleri R ve L' nin gerçek ve kestirilen değerleri ise Tablo B.1' de verilmektedir. Yöntemle elde edilen parametre değerleri ile gerçek değerler arasındaki karşılaştırma seri direnç R için Şekil B.5' de grafik olarak verilmektedir. Hattın seri endüktansı L için elde edilen sonuçlar ise grafiksel olarak Şekil B.6' da görülebilmektedir.

Tablo B.1: R ve L Değerleri

	Yük					
	4.5 MW			120 MW		
	gerçek değer	kestirilen değer	hata oranı (%)	gerçek değer	kestirilen değer	hata oranı (%)
R [Ω]	2	2	0	2	2	0
L [H]	0.02228	0.02229	0.045	0.02228	0.02232	0.179



Şekil B.5 : Direnç Değerlerinin Karşılaştırılması



Şekil B.6 : Endüktans Değerlerinin Karşılaştırılması

EK-C: K MATRİSİNİN ELEMANLARININ BULUNMASI

C.1 EŞZAMANLI ÖRNEKLEME İLE PARAMETRE KESTİRİMİ

$$\begin{bmatrix} V_A \\ I_A \end{bmatrix} = K \times \begin{bmatrix} V_B \\ I_B \end{bmatrix} \quad (\text{C.1})$$

$$K = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \quad (\text{C.2})$$

$$\begin{bmatrix} V_B \\ I_B \end{bmatrix} = K^{-1} \times \begin{bmatrix} V_A \\ I_A \end{bmatrix} \quad (\text{C.3})$$

$$K^{-1} = \begin{bmatrix} A & -B \\ -C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & -Z_c \sinh(\gamma l) \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \quad (\text{C.4})$$

$$\det(K) = 1 \quad (\text{C.5})$$

$$A = D$$

(C.1) matrisi kullanılarak (C.6) denklemi elde edilmektedir,

$$B = \frac{V_A - AV_B}{I_B} \quad (\text{C.6})$$

$$V_B = AV_A - \left(\frac{V_A - AV_B}{I_B} \right) I_A$$
$$V_B = AV_A - \frac{V_A I_A}{I_B} + \frac{AV_B I_A}{I_B} \quad (\text{C.7})$$

$$V_B = A \left(V_A + \frac{V_B I_A}{I_B} \right) - \frac{V_A I_A}{I_B}$$

A elemanının bulunması;

$$A = \frac{V_B + \frac{V_A I_A}{I_B}}{V_A + \frac{V_B I_A}{I_B}} = \left(\frac{V_B I_B + V_A I_A}{I_B} \right) \left(\frac{I_B}{V_A I_B + V_B I_A} \right) \quad (\text{C.8})$$

$$A = \frac{V_B I_B + V_A I_A}{V_A I_B + V_B I_A}$$

B elemanının bulunması;

$$B = \frac{V_A - AV_B}{I_B} = \frac{V_A - \left(\frac{V_B I_B + V_A I_A}{V_A I_B + V_B I_A} \right) V_B}{I_B}$$

$$B = \frac{V_A (V_A I_B + V_B I_A) - V_B (V_B I_B + V_A I_A)}{(V_A I_B + V_B I_A)} \frac{1}{I_B} \quad (\text{C.9})$$

$$B = \frac{V_A^2 I_B + V_A V_B I_A - V_A I_A V_B - V_B^2 I_B}{V_A I_B + V_B I_A} \frac{1}{I_B} = \frac{I_B (V_A^2 - V_B^2)}{(V_A I_B + V_B I_A) I_B}$$

$$B = \frac{V_A^2 - V_B^2}{V_A I_B + V_B I_A}$$

(C.1) matrisi kullanılarak (C.10) denklemi elde edilmektedir,

$$I_A = CV_B - DI_B = CV_B + \left(\frac{V_B I_B + V_A I_A}{V_A I_B + V_B I_A} \right) I_B \quad (\text{C.10})$$

$$I_A = CV_B + \frac{V_B I_B^2 + V_A I_A I_B}{V_A I_B + V_B I_A}$$

$$CV_B = I_A - \frac{V_B I_B^2 + V_A I_A I_B}{V_A I_B + V_B I_A} = \frac{I_A (V_A I_B + V_B I_A) - (V_A I_A I_B + V_B I_B^2)}{V_A I_B + V_B I_A}$$

$$CV_B = \frac{I_A V_A I_B + V_B I_A^2 - V_A I_A I_B - V_B I_B^2}{V_A I_B + V_B I_A} \quad (\text{C.11})$$

$$C = \frac{V_B I_A^2 - V_B I_B^2}{(V_A I_B + V_B I_A) V_B} = \frac{I_A^2 - I_B^2}{V_A I_B + V_B I_A}$$

Kısa devre giriş empedansı;

$$Z_K = \frac{B}{A} = \frac{\frac{V_A^2 - V_B^2}{V_A I_B + V_B I_A}}{\frac{V_B I_B + V_A I_A}{V_A I_B + V_B I_A}} = \frac{V_A^2 - V_B^2}{V_A I_A + V_B I_B} \quad (\text{C.12})$$

olmaktadır. Açık devre giriş admitansı

$$Y_L = \frac{C}{A} = \frac{\frac{I_A^2 - I_B^2}{V_A I_B + V_B I_A}}{\frac{V_B I_B + V_A I_A}{V_A I_B + V_B I_A}} = \frac{I_A^2 - I_B^2}{V_A I_A + V_B I_B} \quad (\text{C.13})$$

olmaktadır.

C.2 EŞZAMANLI OLMAYAN ÖRNEKLEMELERLE PARAMETRE KESTİRİMİ

C.2.1 Doğrusal Kestirimci

Giriş büyüklükleri her bir ölçüm noktasındaki lokal empedanslardır.

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} \quad (\text{C.14})$$

$$Z_B = \frac{V_B}{I_B}$$

K matrisi kullanılırsa

$$Z_A = \frac{\cosh(\gamma l) V_B + Z_c \sinh(\gamma l) I_B}{\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) V_B + \cosh(\gamma l) I_B} = \frac{\cosh(\gamma l) Z_B I_B + Z_c \sinh(\gamma l) I_B}{\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) Z_B I_B + \cosh(\gamma l) I_B}$$

$$Z_A = \frac{I_B (\cosh(\gamma l) Z_B + Z_c \sinh(\gamma l))}{I_B \left(\frac{Z_B}{Z_c} \sinh(\gamma l) + \cosh(\gamma l) \right)} \quad (\text{C.15})$$

$$Z_A = \frac{\cosh(\gamma l) Z_B + Z_c \sinh(\gamma l)}{\frac{Z_B}{Z_c} \sinh(\gamma l) + \cosh(\gamma l)}$$

denklemleri oluşmaktadır. Eğer iletim hattı parametreleri kısa devre giriş empedansı ve açık devre giriş admitansı kullanılırsa, bu eşitlik doğrusal bir eşitlik olmaktadır.

$$Z_A = \frac{\cosh(\gamma l) Z_B + Z_c \sinh(\gamma l)}{\frac{Z_B}{Z_c} \sinh(\gamma l) + \cosh(\gamma l)} = \frac{Z_B A + B}{Z_B C + A} \quad (\text{C.16})$$

denklemdir.

$$\begin{aligned} Z_K &= \frac{B}{A} \\ Y_L &= \frac{C}{A} \end{aligned} \quad (\text{C.17})$$

yerine konursa

$$\begin{aligned} Z_A &= \frac{Z_B + \frac{B}{A}}{Z_B \frac{C}{A} + 1} = \frac{Z_B + Z_K}{Z_B Y_L + 1} \\ Z_A Z_B Y_L + Z_A &= Z_B + Z_K \\ Z_K &= Z_A - Z_B + Z_A Z_B Y_L \end{aligned} \quad (\text{C.18})$$

denklemleri oluşmaktadır.

Y_L ve Z_K ifadelerinin kestirimi arasında gerçek değerine en yakın olanı aşağıdaki denklemlerle bulunabilmektedir:

$$\hat{Y} = X\hat{\theta} + \varepsilon \quad (\text{C.19})$$

ile ifade edilebilmektedir. Burada en doğru kestirim elde edilmek istendiği için kestirim hatasını gösteren terim olan ε göz ardı edilmektedir. Alt indis M , göz önüne alınan durum sayısıdır. Bu denklem içinde yer alan X, Y, θ değişkenleri

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -Z_{A1}Z_{B1} \\ 1 & -Z_{A2}Z_{B2} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -Z_{AM}Z_{BM} \end{bmatrix} \quad (\text{C.20})$$

$$\hat{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_K \\ Y_L \end{bmatrix} \quad (\text{C.21})$$

$$\hat{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{A1} - Z_{B1} \\ Z_{A2} - Z_{B2} \\ \vdots \\ Z_{AM} - Z_{BM} \end{bmatrix} \quad (\text{C.22})$$

olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda kestirilen ifadeleri gösteren $\hat{\theta}^w$

$$\hat{\theta} = (X^T X)^{-1} X^T \hat{Y} \quad (\text{C.23})$$

denklemleri ile matrisel olarak ifade edilmektedir. Bu ifadede yer alan matrisler elemanları cinsinden yazılırsa;

$$X^T X = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdot & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdot & x_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \cdot & \cdot \\ 1 & x_M \end{bmatrix} \quad (\text{C.24})$$

$$X^T X = \begin{bmatrix} M & \sum_{i=1}^m x_i \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 \end{bmatrix}$$

denklemleri oluşturmaktadır. (C.22)' de yer alan matrisin tersi alındığında

$$(X^T X)^{-1} = \frac{1}{M \sum_{i=1}^M x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^M x_i \right)^2} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^M x_i^2 & - \sum_{i=1}^M x_i \\ - \sum_{i=1}^M x_i & M \end{bmatrix} \quad (\text{C.25})$$

denklemini oluşturmaktadır.

$$X^T \overset{\rho}{Y} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdot & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdot & x_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ y_M \end{bmatrix} \quad (\text{C.26})$$

$$X^T \overset{\rho}{Y} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^M y_i \\ \sum_{i=1}^M x_i y_i \end{bmatrix}$$

(C.25) denklemi ile (C.26) denklemleri çarpılarak $\overset{\omega}{\theta}$ matrisi elde edilmektedir.

$$\overset{\omega}{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_k \\ \underline{Y}_l \end{bmatrix} \quad (\text{C.27})$$

$$\begin{bmatrix} \underline{Z}_k \\ \underline{Y}_l \end{bmatrix} = (X^T X)^{-1} X^T \overset{\rho}{Y}$$

Bu matris

$$\begin{bmatrix} Z_K \\ Y_L \end{bmatrix} = \frac{1}{M \sum_{i=1}^M x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^M x_i \right)^2} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^M x_i^2 & - \sum_{i=1}^M x_i \\ - \sum_{i=1}^M x_i & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^M y_i \\ \sum_{i=1}^M x_i y_i \end{bmatrix} \quad (\text{C.28})$$

$$\begin{bmatrix} Z_K \\ Y_L \end{bmatrix} = \frac{1}{M \sum_{i=1}^M x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^M x_i \right)^2} \begin{bmatrix} \left(\sum_{i=1}^M y_i \right) \left(\sum_{i=1}^M x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^M x_i \right) \left(\sum_{i=1}^M x_i y_i \right) \\ M \left(\sum_{i=1}^M x_i y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^M x_i \right) \left(\sum_{i=1}^M y_i \right) \end{bmatrix} \quad (\text{C.29})$$

olarak ifade edilmektedir.

C.2.2 Doğrusal Olmayan Kestirimci

Admitans parametreleri ile iletim hattı tanımlandığında

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} \\ -Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \end{bmatrix} \quad (\text{C.30})$$

matrisi oluşmaktadır. (C.1) denkleminde

$$\begin{aligned} I_A &= CV_B + DI_B \\ V_A &= AV_B - BI_B \end{aligned} \quad (\text{C.31})$$

oluşmuştur. İki denklem kullanılarak

$$\begin{aligned} I_A &= CV_B + D \frac{V_A - AV_B}{B} = CV_B + \frac{V_A D}{B} - \frac{AV_B}{B} \\ I_A &= \frac{V_A D}{\underbrace{B}_{Y_{11}}} + V_B \left(\underbrace{C}_{Y_{12}} - \frac{AD}{\underbrace{B}_{-Y_{12}}} \right) \end{aligned} \quad (\text{C.32})$$

elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} -Y_{12} &= C - \frac{AD}{B} \\ Y_{12} &= \frac{AD}{B} - C = \frac{AD - BC}{B} \end{aligned} \quad (\text{C.33})$$

oluşmaktadır. (C.5) denklemini göz önüne alınırsa

$$Y_{12} = \frac{AD - BC}{B} = \frac{1}{B} \quad (\text{C.34})$$

olmaktadır. Y_{11} ve Y_{12} elemanları

$$Y_{11} = \frac{A}{B}$$

(C.35)

$$Y_{12} = \frac{1}{B}$$

olarak tanımlanırlar.

EK-D: EŞZAMANLI OLMAYAN ÖRNEKLEME İÇİN HAZIRLANAN MATLAB DOSYASI

% eszamanli olmayan ornekleme icin yarim periyotluk orneklemede kayma yaratilmistir.

j=0;

for i= 1 : 9000

if tout(i)<=0.08

j=j+1;

time(j,1)=tout(i);

VsA_fazor_son1(j,1)=VsA_fazor_son(i);

IsA_fazor_son1(j,1)=IsA_fazor_son(i);

end

end

k=0;

for i= 1001 : 10000

if tout(i)<=0.1

k=k+1;

time2(k)=tout(i);

VrA_fazor_son1(k,1)=VrA_fazor_son(k);

IrA_fazor_son1(k,1)=IsA_fazor_son(k);

end

end

```

time2_yeni=time2';
P=length(time);
R=length(time2_yeni);

% X matrisi tanımlanmaktadır.
X_A=ones(P,2);

% X matrisinin elemanları oluşturulmaktadır.
for j=1:P;
    zA_A(j,1)=VsA_fazor_son1(j)./IsA_fazor_son1(j);
    for k=1:R;
        zB_A(k,1)=VrA_fazor_son1(k)./IrA_fazor_son1(k);
    end
end

for j=1:P;
    if k==j;
        X_A(j,2)=(-1)*zA_A(j,1).*zB_A(k,1);
        Y_A(j,1)=zA_A(j,1)-zB_A(k,1);
    end
end

% (C.26) denklemindeki elemanların hesaplanması,
for j=1:P;
    toplam_X_A=sum(X_A(j,2));
    X_A_kare(j,1)=X_A(j,2).*X_A(j,2);
    toplam_kare_X_A=sum(X_A_kare);
    toplam_Y_A=sum(Y_A(j,1));

```

```

XY_A(j,1)=Y_A(j,1).*X_A(j,2);

toplaml_XY_A=sum(XY_A(j,1));

end

```

% (C.28) denklemindeki elemanların yerine konarak ZK ve YL elemanlarından oluşan teta_A1 matrisinin elde edilmesi,

```

m=P;

T_A(1,1)=toplaml_kare_X_A;

T_A(1,2)=-toplaml_X_A;

T_A(2,1)=T_A(1,2);

T_A(2,2)=m;

U_A(1,1)=toplaml_Y_A;

U_A(2,1)=toplaml_XY_A;

skaler_A=(1/((m*toplaml_kare_X_A)-((toplaml_X_A)*(toplaml_X_A))));

teta_A1=skaler_A*(T_A*U_A)

```

% (C.2.16) matrisindeki elemanların yerine konarak ZK ve YL' den oluşan teta_A2 matrisinin elde edilmesi ile teta_A1 matrisinin teyidi ,

```

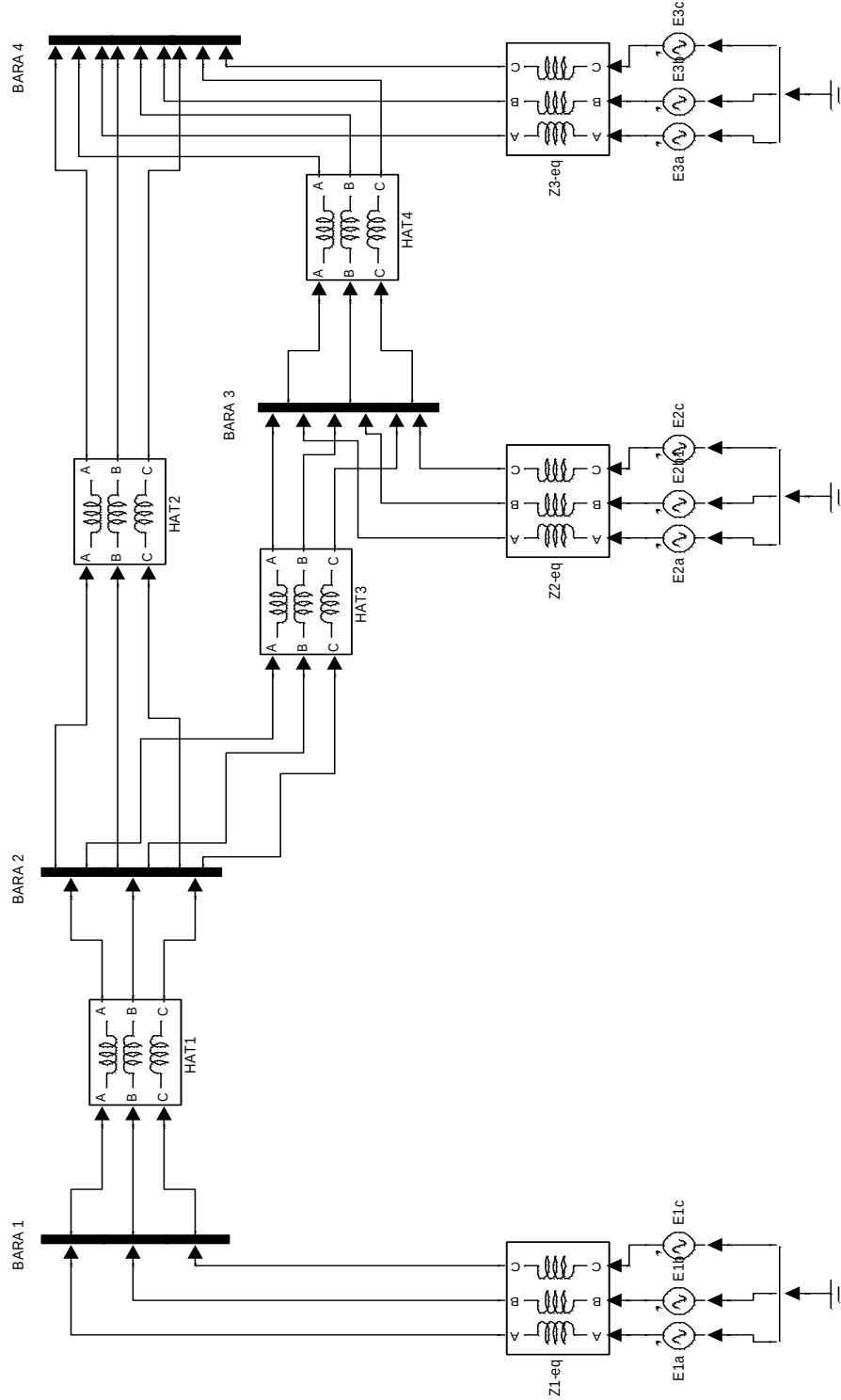
K_A(1,1)=(toplaml_Y_A*toplaml_kare_X_A)-(toplaml_X_A*toplaml_XY_A);

K_A(2,1)=(m*toplaml_XY_A)-(toplaml_X_A*toplaml_Y_A);

teta_A2=skaler_A*K_A

```

EK-E: MATLAB-SİMULİNK' TE OLUŞTURULAN ÖRNEK SİSTEM MODELİ



Şekil E.1 Örnek Sistem Modeli

ÖZGEÇMİŞ

Esra Karaer, 1979 yılında İstanbul’ da doğdu. İlk ve orta eğitimini sırasıyla Lütfi Banat İlkokulu ve Cağaloğlu Anadolu Lisesi’ nde aldı. Lisans eğitimini 1997-2002 yılları arasında bir yıl hazırlık sınıfı dahil Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü’ nde tamamlayarak Elektrik Mühendisi ünvanını aldı. 2002 yılında başlamış olduğu İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı’ nda yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır.

