

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DAĞINIK PARAMETRELİ HAT MODELİNİN DURUM-UZAYI
MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

İlker ARI

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ

HAZİRAN 2025

**T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DAĞINIK PARAMETRELİ HAT MODELİNİN DURUM-UZAYI
MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

**İlker ARI
(36183615054)**

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ

HAZİRAN 2025

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ'e, Tez ve TİK süreçlerim boyunca desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV ve Sayın Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ'a teşekkür ederim.

Doktora ve tez sürecinde desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Fevzi HANSU'ya ve Doç. Dr. Mehmet Recep MİNAZ'a, dostlarım Arş. Gör. Ramazan MENAK'a, Dr. Öğretim Üyesi Rıdvan ÇETİN'e teşekkür ederim.

Bugünlere gelmeme vesile olan, en büyük destekçilerim kıymetli anneme ve babama, tez süreci boyunca büyük bir sabır ve fedakârlık gösteren sevgili eşim Meryem ARI'ya, biricik oğlum Mikdat Ömür ARI'ya ve canım kızım Doğa ARI'ya teşekkür ederim.



ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduđum “Dađınık Parametrelı Hat Modelının Durum-Uzayı Modellenmesi ve Analizi” bařlıklı bu çalıřmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı dűřecek bir yardıma bařvurmaksızın tarafımdan yazıldıđına ve yararlandıđım bűtűn kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yűntemine uygun biçimde gűsterilenlerden oluřtuđunu belirtir, bunu onurumla dođrularım.

İlker ARI



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	ix
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ENERJİ İLETİM HATLARI VE YILDIRIM DARBELERİ	16
2.1 Enerji İletim Hattı Parametreleri	16
2.2 Toplu Parametrelili İletim Hatları.....	19
2.3 Dağınık Parametrelili İletim Hatları	20
2.4 İletim Hatlarının İki Kapılı Devre Modeli	20
2.5 Kısa İletim Hatları	21
2.6 Orta Uzunluktaki İletim Hatları.....	22
2.6.1 Orta uzunluktaki iletim hattının nominal Π -devre modeli	22
2.6.2 Orta uzunluktaki iletim hattının nominal T-devre modeli.....	23
2.7 Uzun İletim Hatları	25
2.8 Enerji İletim Hatlarında Yürüyen Dalgalar	29
2.8.1 Kayıpsız iletim hattı modeli.....	30
2.9 Yürüyen Dalgalarda Yansıma ve Kırılma	32
2.10 Enerji İletim Hatlarındaki Kayıplar	34
2.11 Ferranti Etkisi	37
2.12 İletim Hatlarında Transpozisyon (Çaprazlama).....	39
2.13 Yıldırım Darbeleri	40
2.13.1 IEEE (çift üstel fonksiyon) modeli	43
2.13.2 Heidler modeli	44
3. TRANSFORMATÖRLER	46
3.1 Gerçek Transformatör Eşdeğer Modeli	47
3.2 Transformatör Sargı Tipleri	48
3.3 Güç Transformatörünün Yüksek Frekans Modeli	48
3.3.1 Sargının seri direncinin hesaplanması	51
3.3.2 Sargının öz ve karşılıklı (ortak) endüktansının hesaplanması	51
3.3.3 Sargının seri kapasitansının hesaplanması	53
3.4 Penetrasyon Derinliği ve Ferromanyetik Etkiler	55
3.5 Transformatör Parametrelerinde Frekans Etkisi	56
4. DURUM-UZAYI YÖNTEMİ.....	58
4.1 Graf Teorisi ve Durum Denklemleri.....	60
4.2 Sayısal (Nümerik) Analiz Yöntemleri	66
4.2.1 Yamuk (Trapezoidal) Kuralı.....	67
5. DAĞINIK PARAMETRELİ İLETİM HATTI UYGULAMARI VE BULGULAR	70
5.1 İletim Hattı-Transformatör Anahtarlama Uygulaması ve Analizi.....	70
5.2 Yıldırım Darbe Uygulaması ve Analizi	79
5.3 İletim Hattı-Transformatör Yıldırım Darbe Uygulaması ve Analizi	85
5.4 İletim Hattı-Transformatör Bağlantı Noktası Arıza Uygulaması ve Analizi.....	93
5.5 İletim Hattı-Transformatör Yıldırım Darbe Arıza Uygulaması ve Analizi	100
5.6 Trapezoidal Yönteminde Adım Aralığı Etkisi.....	108

5.7 RC Yüklü İletim Hattı Anahtarlama Uygulaması ve Analizi.....	116
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	120
KAYNAKLAR.....	125
ÖZGEÇMİŞ.....	132



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1: İzolatörlerdeki yetersiz izolasyonundan kaynaklanan kayıplar.	37
Çizelge 5.1: İletim hattı parametreleri.	75
Çizelge 5.2: Güç transformatörünün parametreleri.....	75
Çizelge 5.3: Heidler yıldırım darbesi ve yük parametreleri.....	81
Çizelge 5.4: Hat ve yük parametreleri.....	117



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Toplu parametrelili modeller (a) T-devre (b) Π -devre (c) T -devre (d) Γ -devre. ..	19
Şekil 2.2: Π -devre kullanılarak elde edilen toplu parametrelili iletim hattı modeli.....	20
Şekil 2.3: Dağınlık parametrelili iletim hattı modeli.....	20
Şekil 2.4: İki kapılı devre modeli.....	21
Şekil 2.5: Kısa iletim hattı modeli.....	22
Şekil 2.6: Orta uzunluktaki iletim hattının nominal Π -devre modeli.....	23
Şekil 2.7: Orta uzunluktaki iletim hattının nominal T-devre modeli.....	24
Şekil 2.8: Uzun iletim hattının Δx uzunluğundaki bölüm modeli.	25
Şekil 2.9: Uzun iletim hattının nominal Π -eşdeğer devresi.	28
Şekil 2.10: Dağınlık parametrelili iletim hattı eşdeğer devresi.	30
Şekil 2.11: İletim hatlarında transpozisyon.....	40
Şekil 2.12: Faz iletkenine yıldırım düşmesi.....	41
Şekil 2.13: Çift üstel fonksiyonlu yıldırım dalga formu.	44
Şekil 2.14: Yıldırım yolu empedansı ile Heidler yıldırım darbe modeli.....	45
Şekil 3.1: Güç sisteminde transformatör kullanımı.	46
Şekil 3.2: Transformatör eşdeğer devresi.....	47
Şekil 3.3: Transformatörün sekonder tarafının primer tarafa aktarıldığı eşdeğer T-devre.	47
Şekil 3.4: Güç transformatörü sargısının çift merdivenli ağının eşdeğer devresi.	50
Şekil 3.5: Sargı disklerinin boyutları	52
Şekil 3.6: Tek fazlı disk tipi sargının yapısı.....	53
Şekil 3.7: Transformatör sargı kapasitansının eşdeğer devresi.	54
Şekil 4.1: Topojik elaman.	60
Şekil 4.2: Topolojik graf.	60
Şekil 4.3: Alt graf.....	61
Şekil 4.4: Graf yolları.....	61
Şekil 4.5: Birleşik graf.	61
Şekil 4.6: Ayrı graf.....	62
Şekil 4.7: Çevre.....	62
Şekil 4.8: Ağaç.	62
Şekil 4.9: Dallar.	63
Şekil 4.10: Kirişler.....	63
Şekil 4.11: Temel çevreler.	63
Şekil 4.12: Kesitleme.	64
Şekil 4.13: İkiye bölünmüş graf.....	64
Şekil 4.14: Temel kesitlemeler.....	65
Şekil 4.15: $f(x)$ grafiği ve yamuk alanı.	67
Şekil 4.16: Alanın daha küçük alt aralıklara bölünmesi.	68
Şekil 5.1: İletim hattı-transformatör anahtarlama eşdeğer devresi.	70
Şekil 5.2: Durum-uzayı yöntemi akış şeması.....	73
Şekil 5.3: İletim hattı-transformatör anahtarlama ATP-EMTP modeli.	74
Şekil 5.4: Durum-uzayı yöntemi kullanılarak iletim hattının gönderici ucu ve alıcı ucu gerilim dalga şekilleri.....	76
Şekil 5.5: ATP-EMTP kullanılarak iletim hattının gönderici ucu ve alıcı ucu gerilim dalga şekilleri.	76
Şekil 5.6: Durum-uzayı yöntemi kullanılarak iletim hattının gönderici ucu ve alıcı ucu akım dalga şekilleri.	77
Şekil 5.7: ATP-EMTP kullanılarak iletim hattının gönderici ucu ve alıcı ucu akım dalga şekilleri.	77

Şekil 5.8: Durum-uzayı yöntemi kullanılarak modellenen transformatörün disk sargıları boyunca gerilim dağılımı.	78
Şekil 5.9: ATP-EMTP kullanılarak modellenen transformatörün disk sargıları boyunca gerilim dağılımı.	78
Şekil 5.10: Transformatörün disk sargıları boyunca kalıcı rejimdeki gerilim dağılımı.	79
Şekil 5.11: Yıldırım darbesine maruz kalan iletim hattının eşdeğer devresi.	80
Şekil 5.12: Yıldırım darbesine maruz kalan iletim hattının ATP-EMTP modeli.	80
Şekil 5.13: Kodlanarak elde edilen Heidler yıldırım darbesi grafiği.	82
Şekil 5.14: ATP-EMTP kullanılarak elde edilen Heidler yıldırım darbesi grafiği.	82
Şekil 5.15: Durum-uzayı yöntemi kullanılarak elde edilen yıldırım darbeleri iletim hattının gönderici ve alıcı ucu gerilim dalga şekilleri.	83
Şekil 5.16: ATP-EMTP kullanılarak elde edilen yıldırım darbeleri iletim hattının gönderici ve alıcı ucu gerilim dalga şekilleri.	83
Şekil 5.17: Durum-uzayı kullanılarak elde edilen yıldırım darbeleri iletim hattının gönderici ve alıcı ucu akım dalga şekilleri.	84
Şekil 5.18: ATP-EMTP kullanılarak elde edilen yıldırım darbeleri iletim hattının gönderici ve alıcı ucu akım dalga şekilleri.	84
Şekil 5.19: İletim hattı-transformatör yıldırım darbesi eşdeğer devresi.	85
Şekil 5.20: İletim hattı-transformatör yıldırım darbesi ATP-EMTP modeli.	87
Şekil 5.21: Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen iletim hattının gönderici ucu ve alıcı ucu gerilim profili.	88
Şekil 5.22: ATP-EMTP yöntemiyle elde edilen iletim hattının gönderici ucu ve alıcı ucu gerilim profili.	88
Şekil 5.23: Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen iletim hattının gönderici ucu ve alıcı ucu akım profili.	89
Şekil 5.24: ATP-EMTP yöntemiyle elde edilen iletim hattının gönderici ucu ve alıcı ucu akım profili.	90
Şekil 5.25: $R_g = 1 \Omega$ için V_1 ve V_{10} gerilim dalga şekilleri (a) Durum-uzayı yöntemi, (b) ATP-EMTP simülasyonları.	90
Şekil 5.26: $R_g = 20 \Omega$ için V_1 ve V_{10} gerilim dalga şekilleri (a) Durum-uzayı yöntemi, (b) ATP-EMTP simülasyonları.	91
Şekil 5.27: Durum-uzayı yöntemi kullanılarak elde edilen transformatör disk sargıları üzerindeki gerilim dağılımı.	92
Şekil 5.28: ATP-EMTP yöntemi kullanılarak elde edilen transformatör disk sargıları üzerindeki gerilim dağılımı.	92
Şekil 5.29: Disk sargılarının tepe gerilim değerleri (a) $R_g = 1 \Omega$, (b) $R_g = 20 \Omega$	93
Şekil 5.30: Enerjilendirme ve arızaya ait eşdeğer devre.	93
Şekil 5.31: Enerjilendirme ve arızaya ait ATP-EMTP modeli.	95
Şekil 5.32: Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen arıza durumu gerilim dalga formları.	95
Şekil 5.33: ATP-EMTP kullanılarak elde edilen arıza durumu gerilim dalga formları.	96
Şekil 5.34: Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen arıza durumu akım dalga formları.	96
Şekil 5.35: ATP-EMTP kullanılarak elde edilen arıza durumu akım dalga formları.	97
Şekil 5.36: Farklı arıza direnç değerleri için Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen gönderici uç gerilim dalga formları.	98
Şekil 5.37: Farklı arıza direnç değerleri için Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen alıcı uç gerilim dalga formları.	98
Şekil 5.38: Farklı arıza direnç değerleri için Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen gönderici uç akım dalga formları.	99
Şekil 5.39: Farklı arıza direnç değerleri için Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen alıcı uç akım dalga formları.	100

Şekil 5.40: Heidler yıldırım darbesi ve arızaya ait eşdeğer devre.....	100
Şekil 5.41: Heidler yıldırım darbesi ve arızaya ait ATP-EMTP modeli.....	102
Şekil 5.42: Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen yıldırım darbeleri arıza durumu gerilim dalga formları.....	102
Şekil 5.43: ATP-EMTP kullanılarak elde edilen yıldırım darbeleri arıza durumu gerilim dalga formları.....	103
Şekil 5.44: Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen yıldırım darbeleri arıza durumu akım dalga formları.....	104
Şekil 5.45: ATP-EMTP kullanılarak elde edilen yıldırım darbeleri arıza durumu akım dalga formları.....	105
Şekil 5.46: Farklı arıza direnç değerleri için Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen yıldırım noktası gerilim dalga formları.....	106
Şekil 5.47: Farklı arıza direnç değerleri için Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen transformatör primer terminali gerilim dalga formları.....	106
Şekil 5.48: Farklı arıza direnç değerleri için Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen yıldırım noktası akım dalga formları.....	107
Şekil 5.49: Farklı arıza direnç değerleri için Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen hat sonu akım dalga formları.....	108
Şekil 5.50: ATP-EMTP dalga formları (a) $\Delta t=5 \times 10^{-8}$ s, (b) $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s, (c) $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s.	109
Şekil 5.51: Durum-uzayı dalga formları (a) $\Delta t=5 \times 10^{-8}$ s, (b) $\Delta t=5 \times 10^{-7}$ s.....	110
Şekil 5.52: Durum-uzayı dalga formları (a) $\Delta t=5 \times 10^{-6}$ s, (b) $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s, (c) $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s.	111
Şekil 5.53: Yıldırımın düştüğü noktadaki akım dalga formları kıyaslaması $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s.	112
Şekil 5.54: Transformator primer terminali akım dalga formları kıyaslaması $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s.	112
Şekil 5.55: Yıldırımın düştüğü noktadaki gerilim dalga formları kıyaslaması $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s.	113
Şekil 5.56: Transformator primer terminali gerilim dalga formları kıyaslaması $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s.	113
Şekil 5.57: Yıldırımın düştüğü noktadaki akım dalga formları kıyaslaması $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s.	114
Şekil 5.58: Transformator primer terminali akım dalga formları kıyaslaması $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s.	114
Şekil 5.59: Yıldırımın düştüğü noktadaki gerilim dalga formları kıyaslaması $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s.	115
Şekil 5.60: Transformator primer terminali gerilim dalga formları kıyaslaması $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s.	115
Şekil 5.61: RC yüklü iletim hattı anahtarlama eşdeğer devresi.....	116
Şekil 5.62: RC yüklü iletim hattı anahtarlama ATP-EMTP modeli.....	117
Şekil 5.63: RC yüklü iletim hattı anahtarlama MATLAB/Simulink modeli.....	117
Şekil 5.64: Durum-uzayı yöntemi ve ATP-EMTP modelinden elde edilen I_r dalga formları.....	118
Şekil 5.65: Durum-uzayı yöntemi ve MATLAB/Simulink modelinden elde edilen I_r dalga formları.....	118

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

LU	: Lower–Upper
EMTP	: Electromagnetic Transients Program
NLT	: Numerical Laplace Transform
2DNLT	: Two-Dimensional Numerical Laplace Transform
FFT	: Fast Fourier Transform
EDG	: Emergency Diesel Generatör
MNA	: Modified Nodal Analysis
VFTO	: Very Fast Transient Overvoltages
MTLM	: Multiple Transmission Line Model
STLM	: Single Transmission Line Model
NR	: Newton–Raphson
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineer
t	: Zaman
ATP-EMTP	: Alternative Transients Program-Electromagnetic Transients Program
ω	: Açısal hız
MATLAB	: Matrix Laboratory
DSE	: Descriptor State-space Equations
CC	: Companion Circuit
EMT	: Electromagnetic Transients
FILT	: Fast Inverse Laplace Transformation
ULM	: Universal Line Model
ATP	: Alternative Transients Program
PSCAD	: Power Systems Computer Aided Design
RTDS	: Real Time Digital Simulator
PSS®E	: Power System Simulator for Engineering
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
R_{AC}	: Etkin direnç değeri
$P_{kayıp}$	: Aktif güç kaybı
I	: Akım
V	: Gerilim
R_{DC}	: Doğru akım direnci
r	: Birim uzunluk başına direnç
l	: Birim uzunluk başına indüktans
c	: Birim uzunluk başına kapasitans

g	: Birim uzunluk başına kondüktans
ρ	: Özdirenç
d	: Uzunluk
A	: Yüzey alanı
D	: İletkenler arası uzaklık
D_s	: Etkin yarıçap
GMD	: Geometrical Mean Distance
GMR	: Geometrical Mean Radius
R	: Toplam direnç
L	: Toplam indüktans
C	: Toplam kapasitans
G	: Toplam kondüktans
N	: Transformatördeki disk sayısı (Bölüm sayısı)
V_S	: Gönderici uç gerilimi
V_R	: Alıcı uç gerilimi
I_S	: Gönderici uç akımı
I_R	: Alıcı uç akımı
KG	: Kirchhoff Gerilim Yasası
KAY	: Kirchhoff Akım Yasası
Z	: Empedans
Y	: Admitans
Δx	: Uzunluk
γ	: Yayılma sabiti
Z_C	: Karakteristik empedans
τ	: Dalga seyahat süresi
v	: Dalga yayılım hızı
a	: Zayıflama sabiti
β	: Faz sabiti
Γ	: Yansıma katsayısı
T	: İletim katsayısı
u	: Gerilim dalgası
i	: Akım dalgası
P_K	: Korona kaybı
R_K	: Korona direnci
f	: Frekans

P_{iso}	: İzolatör kaybı
S	: Görünür güç
Q	: Reaktif güç
X	: Reaktans
η	: Yıldırım tepe değeri düzeltme faktörü
Φ	: Manyetik akı
B_m	: Sargı süseptansı
FRA	: Frequency Response Analysis
MTL	: Multiple Transmission Lines
CMTL	: Circular Multiple Transmission Lines
MIMO	: Multiple Input Multiple Output
FEM	: Finite Element Method
μ_0	: Ortamın manyetik geçirgenliği
δ	: Penetrasyon derinliği
$u(t)$	: Giriş vektörü
$x(t)$	: Durum vektörü
$y(t)$	: Çıkış vektörü
Z_H	: Yıldırım yolu empedansı
F	: Katsayı Matrisi
ms	: Mili saniye
kA	: Kilo amper
kV	: Kilo volt
MV	: Mega volt
R_g	: Topraklama direnci
mt	: Disk başına sarım sayısı
R_f	: Arıza direnci

ÖZET

Doktora Tezi

DAĞINIK PARAMETRELİ HAT MODELİNİN DURUM-UZAYI MODELLENMESİ VE ANALİZİ

İLKER ARI

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

132+XIII sayfa

2025

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Salih MAMIŞ

Güç sistemlerinin güvenilirliği, sürekliliği ve kararlılığı açısından geçici rejim olaylarının doğru bir şekilde analiz edilmesi büyük önem arz etmektedir. Özellikle atmosferik kökenli darbeler, ani yük değişimleri, kısa devreler ve anahtarlama işlemleri gibi zamana bağlı hızlı değişen olaylar, sistem elemanlarında yüksek gerilim ve akım oluşturarak hem izolasyon sistemini zorlamakta hem de güç kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu tez çalışmasında, tek fazlı bir iletim hattının çeşitli geçici rejim analizleri yapılmıştır. İletim hattına güç transformatörü bağlıyken hatta anahtarlama durumu, yüklü iletim hattının yıldırım darbesine maruz kalması, hat sonuna güç transformatörü bağlıyken iletim hattının yıldırım darbesine maruz kalması, iletim hattındaki anahtarlama sonrası arıza oluşması ve yıldırım darbesinden sonra arıza oluşması gibi durumlar ele alınmıştır. Geçici rejim çalışmalarında, dağınık parametrelili iletim hattı, Heidler yıldırım modeli ve disk tipi sargı yapısına sahip güç transformatörü kullanılmıştır. Tüm modellerin geçici rejim analizi durum-uzay yöntemiyle yapılmıştır. İndüktör akımları ve kapasitör gerilimleri durum değişkeni olarak seçilmiş ve durum denklemlerinin çözümü için trapezoidal entegrasyon yöntemi kullanılmıştır. Durum-uzay yönteminde kullanılan eşdeğer devre ATP-EMTP’de çizilmiş ve simülasyonları yapılmıştır. Her iki yöntemin sonuçları karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların birbirini destekler nitelikte olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, arıza direnci, topraklama direnci ve adım aralığının değerleri değiştirilerek gerilim dağılımı, dalga formları ve maksimum gerilim seviyeleri üzerindeki etkileri detaylı şekilde analiz edilmiştir. Önerilen yöntem, geçici rejim esnasında iletim hattının ve transformatör sargılarının gerilim-akım karakteristiklerini etkili bir biçimde modellemektedir. Durum-uzay yaklaşımının, güç sistemlerinde geçici rejim analizine yönelik uygulanabilir bir seçenek olduğu ve koruma cihazları ile sargı izolasyonu tasarımına katkı sağlayabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İletim hattı, Durum-uzay yöntemi, Geçici rejimler, Transformatör, Yıldırım darbe analizi, Arıza

ABSTRACT

Phd. Thesis

STATE-SPACE MODELING AND ANALYSIS OF DISTRIBUTED PARAMETER LINE MODEL

İlker ARI

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

132+XIII pages

2025

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ

Accurate analysis of transients is of paramount importance for the reliability, continuity and stability of power systems. Especially time-dependent fast-changing events such as atmospheric pulses, sudden load changes, short circuits and switching operations create high voltages and currents in the system elements, both straining the insulation system and adversely affecting the power quality. In this thesis, various transient analyses of a single-phase transmission line have been performed. Conditions such as line switching with a power transformer connected to the transmission line, lightning strikes on the loaded transmission line, lightning strikes on the transmission line with a power transformer connected to the end of the line, fault occurrence after switching on the transmission line and fault occurrence after lightning strikes are discussed. In transient studies, transmission line with distributed parameters, Heidler lightning model and power transformer with disk type winding structure are used. The transient analysis of all models is performed by the state-space method. Inductor currents and capacitor voltages are selected as state variables and trapezoidal integration method is used to solve the equations of state. The equivalent circuit used in the state-space method is drawn and simulated in ATP-EMTP. The results of both methods were compared and it was found that the results obtained supported each other. In the study, the effects of varying the values of fault resistance, grounding resistance and step interval on voltage distribution, waveforms and maximum voltage levels were analyzed in detail. The proposed method effectively models the voltage-current characteristics of the transmission line and transformer windings during transients. It is concluded that the state-space approach is a viable option for transient analysis in power systems and can contribute to the design of protection devices and winding insulation.

Keywords: Transmission line, State-space method, Transients, Transformer, Lightning surge analysis, Fault

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi, sürdürülebilir gelişim ve endüstriyel faaliyetlerin kesintisiz devamı için vazgeçilmez bir kaynaktır. Sanayi, ulaşım, haberleşme ve konut gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılan elektrik enerjisinin, güvenilir, verimli ve sürekli bir şekilde sağlanması büyük önem arz etmektedir. Günümüz enerji sistemleri, karmaşık ve geniş ölçekli yapılarıyla çok sayıda teknik ve işletme parametresini içermektedir. Bu sistemlerin güvenli ve verimli bir şekilde işletilmesi, üretim, iletim ve dağıtım süreçlerinin bütüncül bir yaklaşımla ele alınmasını gerektirmektedir. Elektrik enerjisinin üretimi, genellikle fosil yakıtlar (kömür, doğal gaz ve petrol), hidroelektrik, nükleer ve yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgâr, jeotermal vb.) kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Enerji üretim santralleri, genellikle tüketim merkezlerinden uzak noktalarda konumlandığından, üretilen enerjinin tüketiciye ulaştırılması için iletim ve dağıtım altyapılarının etkin bir şekilde çalışması gerekmektedir. Elektrik enerjisi doğrudan düşük gerilim seviyelerinde iletildiğinde, hat boyunca önemli miktarda kayıp oluşmakta ve iletim verimliliği azalmaktadır. Bu nedenle, iletim hatlarında yüksek gerilim seviyeleri tercih edilerek hat kayıpları minimize edilmekte ve uzun mesafelerde enerji taşınması mümkün hale getirilmektedir.

Elektrik iletim hatları, yüksek gerilim seviyelerinde enerjiyi uzak mesafelere taşıyan kritik altyapı elemanlarıdır. İletim hatlarının tasarımı ve işletmesi, güç iletimi açısından çeşitli mühendislik parametrelerine bağlıdır. Güç iletiminde, gerilim seviyesi, hat uzunluğu, iletken özellikleri, reaktif güç kompanzasyonu ve sistemin kararlılığı gibi faktörler dikkate alınarak optimal çalışma koşulları sağlanmalıdır. Kalıcı rejim analizleri, sistemin normal işletme koşullarında kararlı bir şekilde çalışmasını değerlendirmek için kullanılan temel yöntemlerden biridir. Bu analizlerde, gerilim profili, güç akışı, gerilim düşümleri ve güç kayıpları gibi parametreler belirlenerek sistem performansı incelenmektedir. Ancak, elektrik iletim sistemleri yalnızca kalıcı rejim koşullarında değil, aynı zamanda çeşitli dış etkenler nedeniyle oluşan geçici rejim koşullarında da değerlendirilmelidir.

İletim hatlarında geçici rejim olayları, sistemde meydana gelen ani değişimlerin bir sonucu olarak ortaya çıkan dinamik süreçlerdir. Bu olaylar genellikle yıldırım düşmesi, ani

yük değişimleri, kısa devreler, hat açma-kapama işlemleri ve izolatör delinmeleri gibi faktörlerle tetiklenmektedir. Geçici rejim analizleri, bu olayların sistem üzerindeki etkilerini anlamak, uygun koruma stratejileri geliştirmek ve sistem güvenilirliğini artırmak için büyük önem taşımaktadır. Bu analizler, iletim hatlarında meydana gelen aşırı gerilimlerin ve akımların belirlenmesine olanak tanıyarak, sistem bileşenlerinin güvenli sınırlar içinde çalışmasını sağlamaya yönelik çözümler sunmaktadır. Geçici rejim analizlerinde, iletim hatlarının modellenmesi kritik bir adımdır. İletim hatlarının doğru bir şekilde temsil edilmesi için kullanılan modeller, odaklandıkları frekans aralıklarına ve analiz doğruluğuna göre farklılık göstermektedir. Geleneksel eşdeğer devre modelleri düşük frekanslı analizler için yeterli olsa da yüksek frekans bileşenlerini de içeren geçici rejim analizleri için dağınık parametre modelleri daha doğru sonuçlar sağlamaktadır. Dağınık parametrelili iletim hattı modelleri, hattın empedans ve iletkenlik dağılımını sürekli olarak ele alarak elektromanyetik dalga yayılımını daha gerçekçi bir şekilde temsil etmektedir.

Geçici rejimlerin sistem güvenliği açısından önemi göz önünde bulundurulduğunda, koruma sistemlerinin doğru bir şekilde tasarlanması ve uygulanması gerekmektedir. Elektrik iletim hatlarında koruma, sistemin güvenli ve kararlı bir şekilde çalışmasını sağlamak ve arızalara karşı önleyici tedbirler almak amacıyla kritik bir bileşen olarak değerlendirilir. Koruma sistemleri, röleler, kesiciler, sigortalar ve aşırı gerilim sınırlayıcılar gibi çeşitli elemanlardan oluşmaktadır. Bu elemanlar, sistemde meydana gelebilecek anormal durumları algılayarak, gerekli önlemleri otomatik olarak devreye sokmakta ve arızalı bileşenlerin izole edilmesini sağlamaktadır. Özellikle yıldırım kaynaklı aşırı gerilimlerin etkisini azaltmak amacıyla kullanılan parafudrlar ve topraklama sistemleri, geçici rejimlerin olumsuz etkilerini minimize etmek için önemli bir rol oynamaktadır.

İletim hatlarında meydana gelen geçici rejimlerin analizi, sistemin dinamik tepkilerini doğru bir şekilde ortaya koyabilmek adına hem zaman hem de frekans alanlarında gerçekleştirilmektedir. Zaman alanı analizleri, geçici olayların doğrudan zamana bağlı etkilerini gözlemlemeye imkân tanırken, frekans alanı yaklaşımları sistemin frekans bileşenlerine karşı verdiği yanıtları incelemek açısından önemlidir. Özellikle frekans bağımlı parametrelerin belirlenmesinde frekans alanı yöntemleri etkin şekilde kullanılmakta ve bu alanda gerçekleştirilen hesaplamalar, çoğunlukla ters Fourier veya ters Laplace dönüşümleri aracılığıyla zaman alanına geri dönüştürülmektedir. Böylelikle iletim hattının ani gerilim değişimleri, yansıma ve kırılma olayları gibi zamana duyarlı etkileri, frekans temelli modelleme sayesinde yüksek doğrulukla analiz edilebilmektedir. Bu iki alanın birbirini

tamamlayıcı biçimde kullanılması, geçici rejimlerin hem fiziksel hem de matematiksel olarak daha sağlıklı yorumlanmasını mümkün kılmaktadır. İletim hatlarının zaman alanındaki geçici rejim çalışmaları aşağıda verilmiştir.

Mamiş vd. tarafından yapılan çalışmada, durum değişkeni yaklaşımı, hareket eden dalgalar kavramına dayalı olarak dağınık parametrelili iletim hatlarındaki geçici akımları hesaplamak için kullanılmıştır [1]. Kayıpsız hat için karakteristikler yöntemi kullanılmış ve sistem için durum denklemleri türetilmiştir. Çalışmada, indüktör akımları ve kapasitör gerilimleri durum değişkeni olarak seçilmiştir. Denklemler trapezoidal entegrasyon kuralı kullanılarak bir dizi fark denklemine dönüştürülmüş ve zaman alanında çözülmüştür. Durum değişkenleri yöntemiyle elde edilen sonuçlar ile EMTP ve frekans alanına dayalı geleneksel yöntemlerle elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve yöntemin doğruluğu teyit edilmiştir.

Colqui vd. tarafından yapılan çalışmada, zaman alanında tek fazlı bir iletim hattının geçici rejim simülasyonları için özyinelemeli konvolüsyon ve vektör uydurma tekniği kullanan bir metodoloji kullanılmıştır [2]. Farklı gerilim kaynakları kullanarak ve hattın alıcı ucundaki koşullar değiştirilerek 150 km uzunluğundaki tek fazlı bir iletim hattında önerilen metodolojinin performansı analiz edilmiştir. Sonuçlar, frekans alanında geliştirilen ve zaman alanı yanıtlarını elde etmek için sayısal ters Laplace dönüşümü kullanan evrensel hat modeli ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntemin kolay uygulanmasının yanı sıra doğru olduğunu ve geçici rejim analizlerinde kullanılabileceğini göstermiştir.

Kurokawa vd. tarafından yapılan çalışmada, iletim hatlarının frekans bağımlılığını dikkate alan bir toplu parametrelili hat modeli geliştirilmiştir [3]. Çalışmada, dağıtılmış hat doğasını temsil etmek için π devrelerinin kaskad bağlantısı kullanılmış ve frekans etkisi, rasyonel bir fonksiyonla yaklaştırılarak eşdeğer bir devre ile modellenmiştir. Bu eşdeğer devre, her π devresine entegre edilmiş ve hat boyunca akım-gerilim ilişkileri durum uzayı formülasyonu ile ifade edilmiştir. Yöntemin avantajları arasında, zaman alanında doğrudan simülasyon yapabilme yeteneği ve frekans bağımlı parametrelerin doğru bir şekilde modellenmesi sayesinde geçici rejim analizlerinde yüksek doğruluk sağlaması yer almaktadır. Ayrıca, durum matrislerinin seyrek yapısı, hesaplama verimliliğini artırmıştır. Tek fazlı ve üç fazlı hatlar üzerinde yapılan testlerde, önerilen modelin sonuçları EMTP ile uyumlu bulunmuştur.

Bir başka çalışmada, durum matrislerinde frekans etkilerini içeren ve sonuçları dağınık parametrelili bir iletim hattı modelinden ve bir simülasyon programı olan

MICROTRAN'dan elde edilenlerle karşılaştırılarak doğrulanan toplu parametrelili bir hat modeli sunulmuştur [4]. Önerilen yöntem, iletim hattını modellemek ve simüle etmek için modal dönüşüm ve durum-uzaylı tekniklerinin bir kombinasyonunu kullanmıştır. Modal dönüşüm Clarke matrisi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve durum-uzaylı denklemleri sayısal ve analitik yöntemler kullanılarak çözülmüştür. Çalışmada, önerilen toplu parametrelili modelin, ters dönüşüm ve konvolüsyon teknikleri gibi karmaşık prosedürler olmaksızın, doğrudan zaman alanında düşük ve orta frekanslardan oluşan elektromanyetik geçişlerin iyi bir yaklaşımını temsil ettiği sonucuna varılmıştır.

Navarro-Adlemo yaptığı çalışmada, bir polinom yaklaşım modeli kullanarak iletim hatlarını zaman alanında modellemek için yeni bir yaklaşım sunmuştur. Model, uzaya bağı ve zamana bağı katsayıları olan ortogonal polinomların en küçük kareler uydurmasına dayanmaktadır [5]. Kullanılan yöntem, hat gerilimleri ve akımlarının uzay koordinatında polinomlarla yaklaştırılmasına dayanır ve zamanla değışen katsayılar sistem durum değışkenleriyle yakından ilişkilendirilmiştir. Model basit bir matematiksel prosedür kullanılarak formüle edilmiş ve terminal devreleri doğrusal, sonlu boyutlu dinamik sistemlerle tanımlanmıştır. Sonuçlar, modelin iletim hatlarındaki geçici olayları araştırmak için yararlı olduğunu ve yaklaşıklık derecesinin istenen ayrıntı düzeyine bağı olarak seçilebileceğini göstermiştir. Ayrıca önerilen model sayesinde, enterpolasyona ihtiyaç duymadan hat boyunca herhangi bir noktadaki gerilimler ve akımlar elde edilebilmektedir.

Mamiş tarafından yapılan çalışmada, durum-uzaylı tekniğı kullanılarak koronalı bir iletim hattının aşırı gerilim tepkisi korona kaybı ve korona parametrelerinin dinamik değışimleri baz alınarak hesaplanmıştır [6]. İletim hattı modeli olarak toplu parametrelili L-kesitli hat modeli kullanılmıştır. Korona etkisi, her bir kesitte gerilime bağı kapasitör-iletkenlik dalıyla temsil edilmiştir. Trapezoidal kural kullanılarak durum denklemleri çözülmüştür. Çalışmada Gary ve Skilling-Umoto korona modelleri kullanılmıştır. Çalışma neticesinde, deneysel sonuçların yeniden üretilmesinde Skilling ve Umoto tarafından önerilen modelin, Gary'nin modelinden iyi sonuçlar verdiğı tespit edilmiştir.

Chaban vd. tarafından yapılan çalışmada, 476 km uzunluğunda 750 kV ultra yüksek gerilimli (UHV) enerji iletim hattında elektromanyetik geçici rejim analizi yapılmış ve özellikle koruma iletkenlerinin etkileri araştırılmıştır [7]. Çalışmada, koruma iletkenleri dağıtılmış parametrelili bir sistemin parçası olarak içeren matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bu model, ikinci mertebeden kısmi diferansiyel denklemlerle tanımlanmış ve koruma iletkenleri ile faz iletkenleri arasındaki etkileşimleri dikkate almak amacıyla

Neumann ve Poincaré sınır koşulları kullanılmıştır. Simülasyonlarda hat açma-kapama işlemleri ve tek fazlı arıza gibi senaryolar analiz edilmiş, MATLAB/Simulink ve EMTD ortamlarında sayısal yöntemler uygulanmıştır. Açma-kapama anında A fazında 720 kV'a ulaşan aşırı gerilimler oluşmuştur. Arıza durumunda A fazı gerilimi, arıza noktasına yakın bölgede 26 kV'a düşmüştür. Koruma iletkenlerinde durağan halde akım değeri sıfır olarak gözlemlenmiş, ancak geçici rejimlerde anlık 400 A değerlerine sıçramalar olmuştur. Önerilen yöntemden elde edilen sonuçların teorik beklentileri doğruladığı tespit edilmiştir.

Mamiş tarafından geçici rejim analizi için yapılan bir diğer çalışmada, dağıtık parametrelili bir iletim hattının ayrık zamanlı durum alanı gösterimi için bir yeni bir yöntem önerilmiştir [8]. Karakteristikler yöntemi kullanılmış ve kayıpsız bir hattın eşdeğer devresinden durum denklemleri elde edilmiştir. Kapasitör gerilimleri ve indüktör akımları durum değişkeni olarak seçilmiştir. Bu denklemlerin fark denklemine dönüştürülmesi için trapezoidal entegrasyon kuralı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar hızlı ters Laplace dönüşümüne (FILT) dayalı yöntemle kıyaslanmıştır. Sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca hat kayıplarının toplu parametre gösteriminin etkisinin pratik uygulamalar için önemli olmadığı tespit edilmiştir.

Mamiş ve Nacaroglu tarafından yapılan çalışmada, çeşitli geçici rejimler için iletim hattının durum-uzayı gösterimi sunulmuştur [9]. Sistemin tepkisi, iletim hattının toplu parametre modelinden formüle edilen durum-uzayı denklemlerinin kapalı formülü bir çözümü kullanılarak elde edilmiştir. Toplu parametre gösteriminde hem indüktör akımları ve kapasitör gerilimleri aynı anda elde edilmiştir. Kısa ve açık devre arızaları ve çeşitli sonlandırma tipleri için iletim hatlarının durum-uzayı gösterimleri verilmiştir. Geliştirilen LINEX bilgisayar programı kullanılarak, çeşitli geçici rejimler için herhangi bir zamanda bir iletim hattındaki uzaysal gerilim veya akım dağılımları elde edilebileceği belirtilmiştir. Önerilen yöntemle elde edilen sonuçlar ile frekans alanında elde edilen çözümlerle karşılaştırılmış ve sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Da Costa vd. tarafında yapılan çalışmada, simetrik veya asimetrik konfigürasyonlarda geçici rejimlerin simülasyonu için toplu parametrelili bir iletim hattı modellenmiştir [10]. Önerilen model, zaman alanında doğrudan simülasyon yapılmasına olanak tanır ve ters dönüşümlerin kullanımını gerektirmemiştir. İletim hattı, her biri direnç, endüktans ve kapasitans ile modellenen çok sayıda π -kesite ayrılmış ve bu kesit dinamikleri durum-uzay denklemleriyle ifade edilmiştir. Üç fazlı sistemlerde, fazların birbirinden ayrıştırılması için modal dönüşüm teknikleri kullanılmıştır. Özellikle simetri düzlemi

olmayan veya transpozisyon yapılmamış hatlarda, Clarke matrisinin gerçek ve sabit bir dönüşüm matrisi olarak kullanılmasıyla ortaya çıkan kısıtlamalar, bir düzeltme prosedürü ile giderilmiştir. Bu sayede model, her türlü hat konfigürasyonuna uyarlanabilir hale gelmiştir. Hat parametrelerinin frekans bağımlılığı, vektör uydurma yöntemiyle durum matrislerine entegre edilmiştir. Kullanılan modelden elde edilen veriler ile ATP-EMTP'den ve evrensel hat modelinden elde edilen veriler kıyaslanmış ve sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Önerilen model, simetrik veya asimetrik hatlarda, temel sinyallerle birlikte ani ve salınımlı geçici olayların kolay bir şekilde modellenebilmesine imkân sağlamıştır.

Ghiasi vd. tarafından yapılan çalışmada, zaman alanında dağınık parametrelili bir iletim hattının anahtarlama ve kısa devre koşulları altında geçici rejim analizi için Bergeron modeline dayanan yeni yaklaşım sunulmuştur [11]. Önerilen yöntemde, iletim hattı küçük kesitlere ayrılmış her bir bölümdeki gerilim ve akım ilişkisi matematiksel olarak ifade edilmiştir. Bu sayede, hattın bir ucundan alınan ölçümlerle diğer noktadaki değerler hesaplanabilmiştir. Önerilen yöntemde iletim hattının sadece bir ucundaki büyüklükler kullanılarak hesaplama süresi, daha az veri girişi, daha az bellek kullanılması, simetrik veya asimetrik hatlarda, tek fazlı veya çok fazlı hatlara uygulanabilme gibi avantajlarının olduğu bulunmuştur. Önerilen yöntemin sonuçları EMTP ile kıyaslanmış ve yöntem doğrulanmıştır.

Colqui vd. tarafından yapılan çalışmada, π -devre kaskadı kullanan toplu parametrelili iletim hatlarının geçici rejimlerinde hatalı tepe noktalarına sebep olan salınımları azaltmak için bir metodoloji önerilmiştir [12]. Şönt kapasitöre seri bir direnç bağlama suretiyle yeni bir π -devre üzerinde yöntem uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan metodolojiden elde edilen sonuçlar ters sayısal Laplace dönüşümü yanıtları ve geçici rejim yanıtlarındaki sayısal salınımların zayıfladığını gösteren toplu parametrelili modeli ile kıyaslanmıştır. Çalışma neticesinde kullanılan yöntemin iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Carvalho vd. tarafından yapılan çalışmada, çok iletkenli enerji iletim hatlarının modellenmesine yönelik hat parametrelerinin frekans bağımlılığını dikkate alan iki aşamalı bir modal ayrıştırma yöntemi sunulmuştur [13]. Önerilen yöntemde, ilk olarak sabit ve gerçek terimlerden oluşan Clarke matrisi kullanılarak hat fazları arasında temel bir ayrıştırma gerçekleştirilmiş; ardından, tam ayrışmanın sağlanması amacıyla yalnızca yarı modlar (quasi-modes) üzerinde frekansa bağlı küçültülmüş boyutta ikinci bir dönüşüm matrisi uygulanmıştır. Böylece klasik yöntemlerde kullanılan üç-boyutlu frekans bağımlı dönüşüm matrisinin getirdiği hesap yükü ve karmaşıklık azaltılmıştır. Yöntem hem frekans hem zaman alanında doğruluk açısından, tam modal dönüşüm matrisine dayalı referans

modellerle karşılaştırılmış ve %40'a varan daha hızlı simülasyon süresiyle benzer doğrulukta sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Bu yaklaşım, elektromanyetik geçici rejimlerin etkin biçimde simüle edilmesine olanak tanırken, iletim hatlarının iki uçlu devre modeli üzerinden sade bir yapıda temsil edilmesine imkân sağlamaktadır. Önerilen model, özellikle yüksek frekanslı darbelerin (örneğin yıldırım etkileri) analizinde hem fiziksel doğruluk hem de sayısal verimlilik açısından dikkate değer bir alternatif sunmaktadır.

Sinkar vd. tarafından yapılan çalışmada, devrenin dinamik denklemlerini temsil etmek için Tanımlayıcı Durum-Uzayı Denklemlerini (DSE) kullanan güç şebekelerinin EMT (Elektromanyetik Transient) simülasyonu için alternatif bir yöntem araştırılmıştır [14]. DSE'leri doğrudan devrenin net listesinden formüle etmek için otomatik bir prosedür sunulmuştur. DSE'ler formüle edildikten sonra trapezoidal entegrasyon yöntemi kullanılarak ayrıştırılmış ve daha sonra EMT simülasyonları için kullanılmıştır. Bu yaklaşım, yaygın olarak kullanılan Companion Circuit (CC) yaklaşımıyla karşılaştırılmıştır. CC tabanlı bir EMT simülasyonunda, her bir dal indüktörü ve kondansatör, trapezoidal entegrasyon yöntemi kullanılarak ayrı zaman alanında karşılık gelen yardımcı devrelere dönüştürülmüştür. Devrenin fark denklemleri Modifiye Nodal Analiz (MNA) kullanılarak doğrudan formüle edilmiş ve her zaman adımında çözülmüştür. İki yöntem arasındaki fark ise trapezoidal kuralın uygunlandığı yerdir. DSE tabanlı yaklaşım, CC tabanlı yaklaşımla karşılaştırılmıştır. DSE tabanlı formülasyon kullanımı, ağı özdeğerlerini doğrudan analitik olarak hesaplamaya olanak sağlarken, EMT simülasyonu için CC tabanlı yaklaşımdan daha yüksek bir çalışma süresine sahip olma dezavantajına sahiptir.

İletim hatlarının geçici rejim analizinde kullanılan diğer alan frekans alanıdır. Güç sistemlerinde yaşanan geçici rejimler yüksek frekanslı bileşenlerdir oluşmaktadır. Frekans alanı analizi, bu sinyalleri Fourier veya Laplace dönüşümleri kullanarak frekans bileşenlerine ayırır ve hat davranışını çözmeyi kolaylaştırır. Frekans alanında yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Bilal vd. tarafından yapılan çalışmada, güç dağıtım şebekelerinde geçici rejim analizi için frekans alanında bir yöntem önerilmiştir [15]. Çalışma metodolojisi, elektrik bileşenlerinin frekans alanında modellenmesine ve bunlara karşılık gelen admitansın sistem matrisine eklenmesine dayanmaktadır. Sistem matrisinin boyutuna bağlı olarak, simülasyonlar birkaç saat sürebileceğinden, ağ indirgeme teknikleri uygulanmıştır. Bu sayede sistemde daha basitleştirilmiş ve simülasyon sürelerinde hızlanmıştır. Admitans matrisinin indirgenmesi için Kron indirgeme yöntemi kullanılmıştır. Matris indirgeme

işleminin ardından sistemin zaman alanındaki tepkisi elde etmek için sayısal ters Laplace dönüşümü uygulanmıştır. Önerilen yöntemin sonuçları ile ATP-EMTP'den elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Mamiş ve Köksal tarafından yapılan çalışmada, frekans alanında iletim hattının toplu parametrelili ve dağılık parametrelili modelleri kullanılmış ve geçici rejim analizi yapılmıştır [16]. İletim hattının dağılık parametrelili modeli için sayısal ters Laplace dönüşümü kullanılırken, toplu parametrelili iletim hattı için durum-uzay yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada iletim hattının toplu parametrelili olarak modellenmesindeki teorik hata ve kesit sayısının etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda yüzde hata değişiminin toplu parametrelili iletim hattındaki kesit sayısı ile ters orantılı olduğu ve kesit sayısının artmasıyla toplu parametrelili iletim hattının analiz sonuçlarının dağılık parametrelili iletim hattının sonuçlarına daha çok benzediği tespit edilmiştir.

Mamiş ve Köksal tarafından yapılan bir başka çalışmada, durum denklemleri kullanılarak frekans alanında toplu parametrelili bir iletim hattına ait geçici rejim analizleri yapılmıştır [17]. Çalışmada kullanılan yöntemden yola çıkarak LPTLAP adlı bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Hattın enerjilendirilmesi, enerjinin kesilmesi, kısa devre ve açık devre gibi çeşitli durumlar için geçici rejim analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan katsayı matrisinin seyrekliği ve özel özdeğer hesaplama yöntemlerinin kullanılması durumunda durum-uzay yönteminin diğer sayısal veya FILT gibi dönüşüm yöntemlerine göre daha üstün olduğu grafiklerle gösterilmiştir.

Araújo vd. tek fazlı toplu parametrelili ve dağılık parametrelili iletim hattı modellerinin olduğu bir çalışma yapmıştır [18]. Dağılık parametrelili iletim hattı frekans alanında modellenirken, toplu parametrelili iletim hattı ise zaman alanında modellenmiştir. Dağılık parametrelili iletim hattının zaman alanındaki çözümü için ters Laplace dönüşümü uygulanmış ve toplu parametrelili iletim hattı için durum-uzay denklemleri kullanılmıştır. Sonuçlar, çeşitli enerjilendirme işlemlerine tabi tutulan toplu modelin performansının iletim hattında kullanılan kesit sayısına, uzunluğuna ve simülasyonda kullanılan sinyalin frekans bandına bağlı olduğunu göstermiştir. Toplu parametrelili hat modeli kullanımının dağılık parametrelili hat modelinde bulunmayan yüksek frekanslarda salınımlara (sahte salınımlar) neden olduğu gözlemlenmiştir. İletim hattının uzunluğuna ve bağlanan pi-devre sayısına bağlı olarak, yüksek frekans bandına sahip sinyallerin, toplu parametre modeli kullanılarak yapılan benzetimlerde yeterli düzeyde temsil edilemediği sonucuna varılmıştır.

Souza vd. tarafından yapılan çalışmada, frekans alanında geliştirilmiş dağınk parametrelili tek fazlı bir iletim hattı modeli gösterilmiştir [19]. Hattın hem gönderici hem de alıcı uçlarındaki faz gerilimleri ve akımları ilişkilendirmek için ABCD matrisi kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca doğrudan faz alanında geliştirilen çok fazlı hat modeli ve modal alandaki çok fazlı hat modellerine yer verilmiştir. Çalışmada önerilen modelin doğrulanması için açık devre ve kısa devre testleri yapılmıştır. Çalışma neticesinde, akımların ve gerilimlerin ilk olarak modal alanda hesaplandığı klasik modal gösterimin, faz-faz ve faz-toprak arızaları sırasında çok fazlı bir hattı yeterli bir şekilde temsil etmediği, önerilen modelin ise gönderici ve alıcı hat uçlarının herhangi bir durumunu hesaba katan çok fazlı bir hattın temsil ettiği tespit edilmiştir.

Noda yaptığı çalışmada, güç sistemlerinin elektromanyetik geçici rejim simülasyonları için frekansa bağlı iletim hatlarının modellenmesinde simülasyon zaman adımına eşit yürüyen dalga süresine sahip Bergeron eşdeğer devresini kullanmıştır [20]. Modelde kullanılan simülasyon zaman adımına göre iletim hattı Bergeron hücresi olarak adlandırılan Bergeron eşdeğerlerine bölünmüştür. Böylece hattın yürüyen dalga doğası kademeli Bergeron hücreleri ile temsil edilmiştir. Hattın frekans bağımlı kayıp doğası Bergeron hücrelerinin her bir bağlantı noktasına Norton eşdeğeri biçiminde eklenmiştir. Önerilen model elektromanyetik geçici rejimlerin simülasyonu aşamalarında ve model tanımlamada modal ayrıştırmayı önlemiştir. Çalışmada kullanılan modelden elde edilen simülasyon sonuçları hem Laplace hem de saha testi sonuçlarıyla uyumluluk göstermiş ve doğrulanmıştır.

Nuricumbo-Guillén vd. yaptıkları çalışmada, q-s (uzamsal frekans-zamansal frekans) alanında bir iletim hattı modeli tanımlamışlardır [21]. İletim sistemine ait geçici gerilim ve akım analizi için iki boyutlu Laplace dönüşümü (2DNLT) ile süperpozisyon ilkesini kullanmışlardır. Geliştirilen yöntem, geleneksel EMTP tabanlı programların aksine, hat boyunca istenilen herhangi bir noktadaki gerilim ve akım bilgilerini doğrudan elde etmeyi mümkün kılmakta, ayrıca hat parametrelerinin frekansa bağılılıkları da frekans bölgesinde daha hassas şekilde temsil edilebilmektedir. Hibrit örnekleme tekniği sayesinde zaman ekseninde tekil noktaların etkisi azaltılmış ve daha yüksek doğrulukla sonuçlara ulaşılmıştır. Yöntemin en önemli avantajlarından biri, modelleme sürecinde hat alt bölümlere ayrılmaksızın yüksek çözünürlüklü profil elde edilmesine olanak tanımasıdır. Önerilen yöntemin sonuçları ATP-EMTP ile karşılaştırılmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Semlyen vd. tarafında yapılan çalışmada, iletim hatlarındaki anahtarlama işlemlerinden kaynaklanan geçici rejimleri doğrudan frekans alanında doğrudan hesaplanmasına yönelik yeni bir yöntem önerilmiştir [22]. Geleneksel zaman alanı yöntemlerinin aksine, bu çalışmada anahtarlama işlemleri, frekans alanında bir anahtarlama matrisi kullanılarak modellenmiş ve sayısal Laplace dönüşümü (NLT) ile kararlı sonuçlar elde edilmiştir. Anahtarlama işlemleri, FFT tabanlı bir anahtarlama matrisi ile frekans alanında temsil edilmiştir. Geleneksel Fourier dönüşümünden kaynaklanan Gibbs ve sızıntı (aliasing) hataları, NLT kullanılarak önlenmiştir. Anahtarlama işlemlerinin etkileri, frekans alanı admitans matrisi ile frekans alanında doğrudan hesaplanmıştır. Üç fazlı bir iletim hattının enerjilenmesi örneği üzerinde yapılan simülasyonlar, PSCAD sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve yüksek uyum gözlemlenmiştir. Önerilen yöntem, çoklu anahtarlama işlemlerini tek bir adımda çözebilme avantajı sunar. Yöntemin dezavantajı ise, lineer sistemler için optimize edilmiş olmasıdır. Nonlineer yükler için ek yaklaşımlar gerektirmektedir.

Bu tezde dağınık parametrelili iletim hattına yıldırım düşmüş ve bu yıldırım darbesinin hem iletim hattına hem de hat sonuna bağlı olan transformatöre olan etkileri de ayrıca incelenmiştir. Güç transformatörleri, enerji iletim ve dağıtım sistemlerinin en kritik bileşenlerinden biri olup, geçici rejim olayları sırasında hem işlevsel hem de yapısal olarak ciddi risklerle karşı karşıya kalmaktadır. Anahtarlama işlemleri, yıldırım darbeleri, arıza durumları ve yeniden enerji verme gibi hızlı değişim gösteren olaylar, transformatörler üzerinde ani gerilim ve akım zorlanmalarına neden olarak izolasyon sisteminin zorlanmasına, sargı deformasyonlarına ya da ciddi arızalara yol açabilmektedir. Bu tür geçici olayların doğru şekilde modellenmesi, yalnızca sistem güvenliği açısından değil, aynı zamanda ekipman ömrünün uzatılması ve izolasyon koordinasyonunun optimize edilmesi açısından da büyük önem taşımaktadır. Güç transformatörlerinin geçici rejim analizi için yapılan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Gupta ve Singh tarafından yapılan çalışmada, yıldırım darbesine maruz kalan çok sargılı bir büyük güç transformatörünün sargılarındaki gerilim dağılımının hesaplanması için bir yöntem sunulmuştur [23]. Önerilen yöntemde, transformatör sargıları sonlu sayıda segmente ayrılmış, öz ve karşılıklı indüktansları, seri toprak ve sargılar arası kapasitansları içeren bir elektrik devresi oluşturulmuştur. Bu devreyi temsil eden matematiksel bir model özdeğerlerin ve özvektörlerin hesaplanması için analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda elde

edilen veriler ile ölçüm veriler kıyaslanmış ve sonuçların iyi bir uyum sağladığı tespit edilmiştir.

Hassan vd. tarafından yapılan çalışmada, farklı koşullarda enerjilendirilmiş ve transformatörün ani akımları Elektromanyetik Geçici Akımlar Programı (EMTP) kullanılarak analiz edilmiştir [24]. İlk olarak transformatör 345 kV şebekeden enerjilendirilmiştir. Daha sonra transformatör, hafif ve tam yüklü EDG (Acil durum jeneratörü) tarafından enerjilendirilmiştir. 345 kV şebekeden enerjilendirmede, anma akımının 3,58 katı tepe inrush akımı gözlemlenmiş ve düşük dirençli sistem nedeniyle yavaş bir sönüm görülmüştür. EDG tarafından enerjilendirmede, inrush akımı 2,86 kat (transformatör anma akımına göre) veya 3,96 kat (jeneratör anma akımına göre) olarak ölçülmüştür. Yük etkisi incelendiğinde, pasif yükler, inrush akımının şiddetini etkilemezken, endüksiyon motorlu yükler daha düşük gerilim düşüşüne yol açmıştır.

Kezunovic ve Guo yaptıkları çalışmada, bir güç transformatörü arızalarını modellemiş ve bunların koruma rölelerinin performansı üzerindeki etkisini incelemiştir [25]. Çalışmada, EMTP/ATP kullanılarak yeni bir transformatör modeli öneriliyor ve bu modelin doğruluğu laboratuvar testleriyle karşılaştırılarak doğrulanıyor. Ayrıca, dijital bir transformatör koruma rölesi MATLAB'ta modellenmiş ve performansı değerlendirilmiştir. Transformatör sargı-toprak ve sargı-sargı arızaları, kuplajlı RL devreleri kullanılarak modellenmiştir. Parametreler, en küçük hata kareler yöntemiyle tahmin edilmiş ve önerilen modelin sonuçları deneysel verilerle tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Önerilen model, fiziksel testlerle elde edilmesi zor olan senaryoların simüle edilmesine olanak tanıyor.

Popov vd. transformatör sargılarındaki çok hızlı geçici aşırı gerilimlerin (VFTO) hesaplanması için çok iletkenli iletim hattı modeli (MTLM) ve tekli iletim hattı modelinin (STLM) kombinasyonunda oluşan bir hibrit bir algoritma geliştirmişlerdir [26]. Tek iletkenli iletim hattı modeli kullanılarak her bir sargının başındaki ve sonundaki gerilimleri hesaplanmıştır. Çok iletkenli iletim hattı modeli ise bu gerilimleri kullanarak sargılar boyunca dağılımı belirlemiş ve böylece hesaplanması gereken lineer denklem sayısı azaltılmıştır. Transformatör parametrelerinin frekansa bağlı değişimi nedeniyle problem frekans alanında çözülmüş ve modifiye edilmiş Fourier dönüşümü kullanılarak zaman alanında kararlı ve doğru sonuçlar elde edilmiştir. Önerilen yöntemden elde edilen sonuçlar ile literatürdeki ölçüm sonuçları kıyaslanmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Ruan vd. tarafından yapılan çalışmada, transformatör sargılarındaki gerilim dağılımının incelenmesi için çok iletkenli iletim hattı modeli kullanılmıştır [27]. Kapasitans, indüktans ve direnç parametrelerine göre, iletim hattı denklemi giriş terminali empedansı yöntemi ile çözülmüş ve transformatör sargısındaki gerilim dağılımı çok iletkenli iletim hattı denkleminin çözülmesiyle elde edilmiştir. Gerilim genliğinin, sargının başlangıcından sonuna doğru monotonik olarak azaldığı tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan yöntemden elde edilen sonuçlar ile hesaplanan gerilim dağılımı deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve uygulanan yöntemin doğruluğu teyit edilmiştir. Önerilen model sayesinde, sargıların karmaşık yapısını basitleştirilmiş ve hesaplama karmaşıklığını azaltılmıştır.

Smajic vd. transformatör sargıları üzerindeki yıldırım-darbe gerilim dağılımlarının simülasyonu ve ölçümü ile ilgili çalışmasında, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak elde ettikleri indüktans, kapasitans ve direnç matrisleri ile durum değişkenleri tekniğini kullanan bir yöntem önermişlerdir [28]. Çalışmada kuru tip bir transformatör kullanılmış olup, sargı modeli için transformatör yüksek frekans modeli kullanılmıştır. Çalışma neticesinde, gerilim dağılımının, yıldırım darbesi süresince neredeyse lineer kaldığı tespit edilmiştir. Bu durum sargı yalıtımının dengeli bir şekilde zorlandığını göstermiştir. Önerilen modelin simülasyon verileri ile ölçüm verileri kıyaslanmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Theocharis vd. tarafından yapılan çalışmada, gerilim dağıtım faktörü matrisleri kullanılarak transformatör sargılarındaki iç sargı noktalarındaki gerilim dağılımının hesaplanması için yeni bir yöntem önerilmiştir [29]. Yöntem, gerilim dağıtım faktörü matrisi olarak adlandırılan ve frekansa bağlı elemanlardan oluşan bir dönüşüm matrisi aracılığıyla çalışmakta olup, bu matris sargı yapısına ait empedans matrisinden türetilmiştir. Giriş verisi olarak ölçülen terminal gerilimleri kullanılmış, bu veriler önce Fourier dönüşümü ile frekans bölgesine aktarılmış, ardından ilgili matris yardımıyla her bir sargı segmentinde oluşacak gerilim değerleri frekans düzleminde hesaplanmıştır. Daha sonra iç gerilim profilleri ters Fourier dönüşümü ile zaman alanına dönüştürülmektedir. Önerilen yöntemin avantajı, yoğun hesaplama gerektiren toplu parametrelili model çözümüne ihtiyaç duymadan, iç gerilim davranışlarının hızlı ve güvenilir şekilde analiz edilebilmesidir. Hesaplanan dalga verileri ile ölçülen dalga verileri karşılaştırılmış ve önerilen yöntemi geçerliliği doğrulanmıştır.

Župan vd. yaptıkları çalışmada, transformatör sargılarının RLC parametrelerini hesaplanmış ve yıldırım darbe gerilimi dağılım simülasyonu yapmışlardır [30].

Transformatör sargılarının direnç, indüktans ve kapasitans matrislerini hesaplamak için sayısal bir yöntem önerilmiştir. Çalışmadaki tüm parametreler kendi geliştirdikleri çözücüler tarafından hesaplanmıştır. Bu parametreler yıldırım darbe testinde sargılar üzerindeki gerilim dağılımlarını belirlemek için kullanılmıştır. Çalışmada, yıldırım darbe testi simülasyonları frekans alanında gerçekleştirilmiş ve sonrasında Frekans alanı sonuçları ters Fourier dönüşümü ile zaman alanına aktarılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler ile ölçüm verilerinin uyumlu olduğu tespit edilmiş ve önerilen modelin transformatör sargılarının yüksek frekanslı modellenmesine katkı sağladığı tespit edilmiştir.

Ma vd. tarafından yapılan çalışmada, yıldırım darbesine maruz kalan 245 kV gerilim transformatörü sargılarındaki gerilim dağılımlarının analizi için bir devre modeli kullanılmıştır [31]. Modele ait parametreler sonlu elemanlar yöntemi ve analitik formüller kullanılarak elde edilmiştir. Transformatör, 14 diske bölünmüş ve her disk için eşdeğer devre modeli oluşturulmuştur. Çalışmada, 2.5/50 μ s yıldırım darbesi kullanılmıştır. Gerilim dağılımı zaman alanında analiz edilmiştir. Çalışmada neticesinde ilk diskten son diske doğru tepe gerilim değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Önerilen model ile deneysel çalışmalar kıyaslanmış ve yöntem doğrulanmıştır.

Jurišić vd. yaptıkları çalışmada, güç transformatörlerinin geçici durum analizi için analitik ve sonlu elemanlar yönteminde oluşan bir hibrit yaklaşım sunmuşlardır [32]. Transformatör sargısının yüksek frekans modellenmesi için toplu RLC parametreleri kullanılmış ve model Dommel yöntemi kullanılarak zaman alanında çözülmüştür. Kapasitanslar, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemine dayanan analitik modeller kullanılarak hesaplanırken indüktanslar ve dirençler, analitik modeller kullanılarak hesaplanmıştır. Önerilen yöntemin, binlerce sarımlı karmaşık transformatör sargı geometrilerinde bile hızlı hesaplamalar yapılmasına imkân sağladığı belirtilmiştir. Analitik hesaplamalara düzeltme faktörü de dahil edilmiş ve önerilen yöntemin disk sargıları sonuçları ölçümlerle desteklenmiş ve doğrulanmıştır.

Ghorbal vd. tarafından yapılan çalışmada, zaman alanında bir durum-uzay yöntemi kullanarak yıldırım darbe test devresini simüle etmek için bir yöntem sunulmuştur [33]. Çalışmada hem tam dalga hem de kırılmış dalga darbeleri zaman alanında simüle edilmiştir. Frekans cevabı analizi ve vektör uydurma teknikleri kullanılarak frekanstan bağımsız elemanlar içeren transformatör modeli elde edildikten sonra durum-uzay sistemindeki eşdeğer devrenin denklemleri çözülmüştür. Zaman alanındaki diferansiyel denklemlerin

çözümü için MATLAB kullanılmıştır. Ölçülen yıldırım darbesi sinyalleri ile simüle edilen sinyaller kıyaslanmış ve önerilen yöntemin doğruluğu kanıtlanmıştır.

Adamczyk vd. yaptıkları çalışmada, disk ve katman yapılı tasarımları karşılaştırarak güç transformatörleri sargılarındaki başlangıç gerilim dağılımlarının analizini sunmuşlardır [34]. Analizde kaynak olarak $50 \text{ V } 1.2/50 \text{ }\mu\text{s}$ bir yıldırım darbesi kullanılmış ve gerçek ölçekli sargı modeli kullanılmıştır. Çalışmada nitel ve nicel analizler kullanılarak her iki sargı tipindeki başlangıç gerilim dağılımları deneysel olarak incelenmiş ve aralarındaki farklar tespit edilmiştir. Çalışma neticesinde, sargı tiplerindeki başlangıç gerilim dağılımlarının, sargıların toplu kapasitans ağlarındaki farklılıklardan dolayı farklı olduğunu tespit edilmiştir.

İletim hatlarında ve hat sonuna bağlı transformatörlerde geçici durum analizi son yıllarda araştırma konusu olmuştur. Günümüzde bu amaçla ATP-EMTP, PSCAD, MATLAB/Simulink, RTDS ve PSS®E gibi çeşitli simülasyon programları mevcuttur. Zaman alanında geçici durum analizi için kullanılan yöntemlerden biri de dinamik sistemlerin zamana bağlı davranışlarının modellenmesine imkân tanıyan durum-uzayı modelidir.

Literatür taraması incelendiğinde, çeşitli yöntemler kullanılarak enerji iletim hatlarının geçici rejim analizi ile ilgili çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Bazı çalışmalarda sadece iletim hattına ait geçici rejim analizi, bazı çalışmalarda ise yıldırım darbesinin sadece güç transformatörüne olan etkisi incelenmiştir. Çoğunlukla toplu parametrelili iletim hatlarına değinilmiştir. Bu tezde diğer çalışmalardan farklı olarak durum-uzayı yöntemi kullanılarak zaman alanında farklı koşullar altında çeşitli geçici rejim analizleri yapılmıştır. İlk uygulamada, tek fazlı dağıtık parametrelili bir iletim hattının sonuna disk yapılı bir güç transformatörü bağlanmış ve anahtarlama koşulu altında iletim hattının ve transformatörün primer tarafındaki disklerin geçici rejim analizi yapılmıştır. İkinci uygulamada, yüklü bir iletim hattının faz iletkenine yıldırım darbesi düşmüş ve hat başı ile hat sonu gerilim-akım analiz edilmiştir. Üçüncü uygulamada, hat sonuna transformatör bağlı iletim hattına yıldırım düşmüş ve bunun neticesinde disk yapılı bir güç transformatörünün primer tarafındaki disklerin gerilim dağılımları incelemiştir. Dördüncü uygulamada, hat sonu transformatörlü bir iletim hattı enerjilendikten 20 ms sonra meydana gelen arıza ile ilgili geçici rejim analizi yapılmıştır. Beşinci uygulamada, hat sonuna transformatör bağlı olan bir iletim hattına yıldırım düştükten 1.06 ms sonra yaşanan arızanın geçici rejim analizi yapılmıştır. Çalışmada, arıza direnç değerlerinin ve nötr direncinin geçici rejimlere olan etkisi de

araştırılmıştır. Beşinci uygulamada, adım aralığının etkisinin gösterilmesi adına farklı Δt değerleri için simülasyonlar yapılmıştır. Son uygulamada ise RC yüklü bir iletim hattına ait anahtarlama durumu üç farklı ortamda modellenmiş ve geçici rejim analizi yapılmıştır. Durum-uzayı yöntemiyle yapılan tüm uygulamalarda, kapasitör gerilimleri ve indüktör akımları kullanılarak birinci dereceden diferansiyel denklemler türetilmiş ve bunlar daha sonra durum-uzayı formuna dönüştürülmüştür. Durum-uzayı formundaki denklemler trapezoidal entegrasyon kuralı kullanılarak çözülmüş ve gerilim-akım profilleri elde edilmiştir. Bu tezi diğer çalışmalardan ayıran temel nokta dağınk parametrelili iletim hattının disk yapılı bir güç transformatörüyle birlikte kullanılarak durum-uzayı yöntemiyle çeşitli koşullarda analiz edilmesi ve adım aralığı, arıza direnci, nötr direnci gibi kavramların geçici rejimlere olan etkisinin analiz edilmesidir. Önerilen modelin doğruluğu için tüm uygulamalar ATP-EMPT'de modellenmiş, simülasyonları yapılmış ve durum-uzayı yöntemiyle karşılaştırılmıştır.

2. ENERJİ İLETİM HATLARI VE YILDIRIM DARBELERİ

Elektrik enerjisinin son kullanıcıya ulaşması üç temel aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılmasıdır. Enerji iletim hatları bu noktada üretim ve dağıtım aşamaları arasında köprü görevi görmektedir. Dolayısıyla üretilen enerjinin dağıtım noktalarına ulaştırılması enerji iletim hatları diğer bir adıyla enerji nakil hatları vasıtasıyla olur. Gerek fosil gerekse yenilebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin dağıtım tesislerine kesintisiz ve minimum kayıpla iletimi önem arz etmektedir. İletim hatlarında yaşanabilecek kısa devre arızaları, açık devre arızaları, aşırı gerilim arızaları veya yalıtım problemleri enerji sisteminin sürekliliğini olumsuz etkileyen hususlardır. Enerji sistemi bir bütün olarak ele alındığında iletim hattında yaşanan bu problemler sistemin verimi düşürdüğü gibi ekonomik kayıplara da sebep olmaktadır. Bu bağlamda iletim hatları tasarlanırken olumlu olumsuz tüm koşulların dahil edilmesi gereklidir. Tasarım sürecinde iletim sisteminin kalıcı hal ve geçici rejim kavramlarının birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

İletim hatları gerilim seviyeleri ülkelere göre farklılık göstermektedir. Türkiye’de 400 kV, 220 kV, 154 kV ve 66 kV’luk iletim hattı gerilim seviyeleri bulunmaktadır. Türkiye’nin iletim hattı uzunluğuna bakıldığında, TEİAŞ’ın 2023 yılı faaliyet raporuna göre iletim hattı uzunlukları şöyledir; toplam havai hatları 73.801,27 km, yeraltı kara kablosu 615,51 km, denizaltı kablosu 24,78 km’dir. Yeraltı kablo uzunluğundaki en fazla pay 154 kV’luk sisteme aitken, 400 kV’luk sistem en düşük paya sahiptir. Havai iletim hatları uzunluğundaki en fazla pay 400 kV’luk iletim hatlarına aitken az pay 66 kV’luk iletim hatlarına aittir. Nisan 2025 itibarıyla toplam iletim hattı uzunluğu 75.658 km’dir. Türkiye enterkonnekte bir şebeke yapısına sahiptir. Bulgaristan, Yunanistan, Suriye, Irak, Gürcistan gibi ülkelerle enterkonneksiyon bağlantıları mevcuttur [35].

2.1 Enerji İletim Hattı Parametreleri

Enerji iletim hatlarını oluşturan iletkenler, birim uzunluk başına belirli bir direnç (r), endüktans (l), kapasitans (c) ve kondüktans (g) değerine sahiptir. Bu hat parametreleri belirli noktalarda yoğunlaşmış olmayıp, iletim hattı boyunca sürekli ve eşit şekilde dağılmıştır. Parametrelere göre iletim hattı modeli daha detaylı olarak iki farklı başlık altında

incelenecektir. Bu başlıklar toplu parametrelili iletim hattı modeli ve dağıtık parametrelili iletim hattı modelidir. İletim hattı parametrelerinden olan direncin formülleri aşağıda verilmiştir.

$$R_{AC} = \frac{P_{kayıp}}{I^2} \Omega \quad (2.1)$$

Etkin direnç değeri iletkendeki güç kaybının akımının karesine bölünmesiyle elde edilir.

İletkenin doğru akıma karşı gösterdiği direnç değeri denklem (2.2)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$R_{DC} = \rho \frac{d}{A} \Omega \quad (2.2)$$

Yukarıdaki denklemde A iletkinin kesit alanını, d iletkinin uzunluğunu ρ ise iletkenin öz direncini temsil etmektedir.

Bir iletim hattının endüktansı, kullanılan malzemenin türüne, iletkenlerin örgü yapısına ve faz iletkenlerinin birbirlerine göre konumlarına bağlıdır. İletim hattının bir fazının endüktansı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$l = 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{D}{r'} \right) [H / m] \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)'te verilen D ve r' sırasıyla iletkenler arası uzaklığı ve iletkenin etkin yarıçapını temsil etmektedir. Eğer bir direkte üç faz iletkenleri eşkenar üçgen formunda yerleştirilmişse, transpozisyona gerek kalmaz ve Geometrik Ortalama Uzaklık (GMD), fazlar arasındaki mesafeye eşit olur. Ancak, faz iletkenlerinin konumu eşkenar üçgen şeklinde değilse, 50 km'den uzun hatlarda çaprazlama uygulanır. Denklem (2.4) yardımıyla GMD hesaplandıktan sonra denklem (2.5) kullanılarak demet iletkenli hattın her bir fazının endüktansı hesaplanır [36]. Aşağıdaki denklemlerde GMR iletkenlerin geometrik ortalama yarıçapını temsil etmektedir.

$$GMD = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ac}} \quad (2.4)$$

$$l = 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{GMD}{GMR} \right) [H / m] \quad (2.5)$$

Çaprazlanmış demet iletkenli üç fazlı hatlarda faz başına birim kapasite aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$c = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{GMR}} [F / m] \quad (2.6)$$

Her iletim hattı belirli bir kaçak iletkenliğe sahiptir. Bu kaçak iletkenlik; iletkenler arası ve iletken ile toprak arasındaki güç kaybını temsil eder. İzolatörlerdeki sızıntı akımı ve korona bu güç kayıplarının bazı sebeplerindendir. Kaçak iletkenliğin değeri, kullanılan yalıtkan malzeme, frekans ve atmosferik koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterir. Düşük frekanslarda, bu değer ihmal edilebilecek kadar küçük olabilir. İyi yalıtılmış kabloların kaçak iletkenliği, hava koşullarından etkilenmez. Ancak, kablolarda kullanılan kağıt ve polietilen gibi yalıtkan malzemelerin dielektik kayıpları, frekans arttıkça önemli ölçüde yükselmektedir [36].

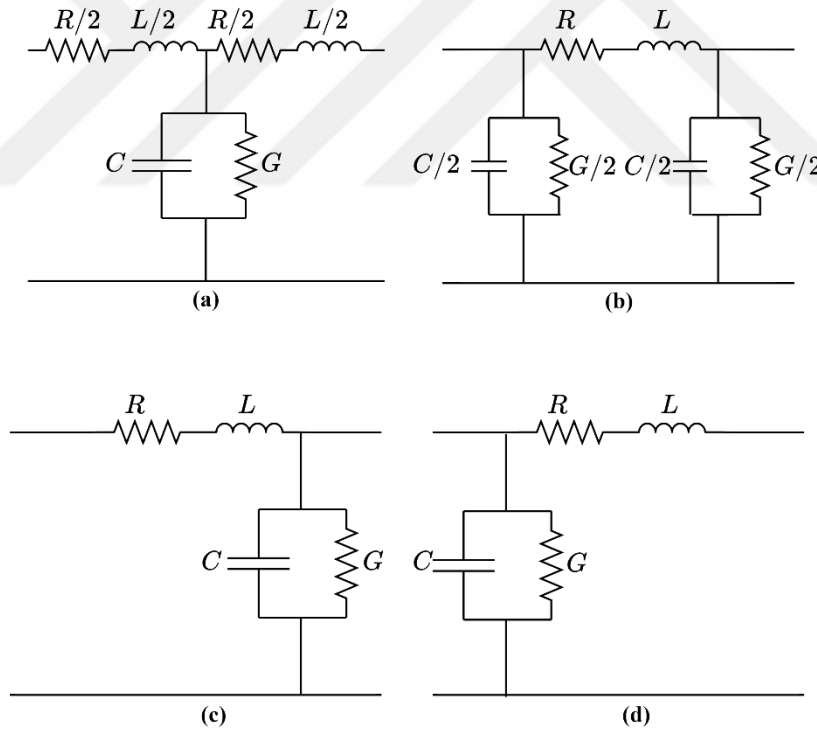
Güç sistemlerinde, hatların davranışını doğru biçimde modellemek, özellikle geçici rejim analizlerinde büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda, iletim hatlarının elektriksel özellikleri belirli varsayımlar altında matematiksel modellere dönüştürülmekte ve analizler bu modeller vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Hatların modellenmesinde kullanılan yöntemler, hattın fiziksel uzunluğu, çalışma frekansı ve analiz türüne bağlı olarak farklılık göstermektedir. İletim hatlarının modelleme çalışmalarında, dağınık parametrelili iletim hatları ve toplu parametrelili iletim hatları olmak üzere iki farklı model kullanılmaktadır. Özellikle kısa mesafeli hatlarda ya da düşük frekanslı işlemlerde hat parametrelerinin tümü bir noktada toplandığı varsayılarak toplu parametrelili modelleme tercih edilmektedir. Ancak, hat uzunluğu arttıkça ve analiz edilecek olayın dalga boyu hattın boyutlarına yaklaştıkça, iletim hattı boyunca gerilim ve akım değişimleri göz ardı edilemez hâle gelir. Bu durumda, hat boyunca parametrelerin belirli aralıklarla dağıtıldığı varsayımıyla oluşturulan dağınık parametrelili modelleme yöntemi daha gerçekçi ve doğru sonuçlar sunmaktadır. Her iki modelleme yaklaşımı da belirli kabuller çerçevesinde geçerli olup, kullanım alanları analiz hedeflerine göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle, iletim hatlarının geçici rejimlerdeki davranışını anlamak ve doğru analizler yapabilmek adına, her iki modelleme yaklaşımının temel prensiplerinin detaylı olarak ele alınması gerekmektedir.

2.2 Toplu Parametrelİ İletim Hatları

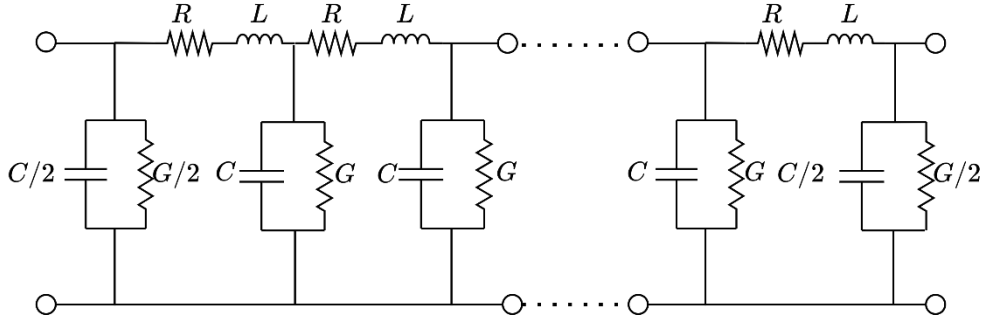
Toplu parametrelİ iletim hatları modellenirken iletim hattı çok sayıda bölümlere ayrılır. Her bir bölüm sırasıyla kendisine ait toplam seri direnç, seri indüktans, şönt kapasitans ve şönt iletkenlik gibi R , L , C ve G parametrelerinden oluşmaktadır. Bölümler özdeş olup kaskad bağılı olarak modellenir. Bu tipteki iletim hatları Şekil 2.1’de gösterildiğı gibi T , Π , Γ ve Γ olarak dört farklı şekilde modellenebilir [37,38].

Toplu parametrelİ bir iletim hattının N sayıda bölümden oluştuğı ve her bir bölümün Π -tipi bir devreden oluştuğunu varsayalım. Bu durumda elde edilecek olan devre modeli Şekil 2.2’de verilmiştir.

Toplu parametrelİ iletim hatları modellenirken her bir bölüme ait R , L , C ve G değerleri; hattın toplam direnç, indüktans, kapasitans ve iletkenlik değerinin bölüm sayısına bölünmesiyle bir diğ er ifadeyle N sayısına bölünmesiyle elde edilir. Dolayısıyla N sayısındaki değ işime bağılı olarak her bir bölümdeki hat parametre değ eri de değ işecektir.



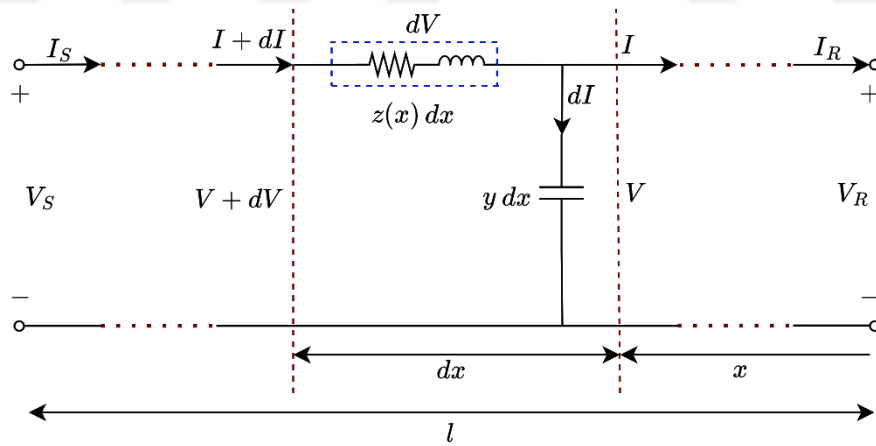
Şekil 2.1: Toplu parametrelİ modeller (a) T-devre (b) Π -devre (c) Γ -devre (d) Γ -devre.



Şekil 2.2: II-devre kullanılarak elde edilen toplu parametrelili iletim hattı modeli.

2.3 Dağılık Parametrelili İletim Hatları

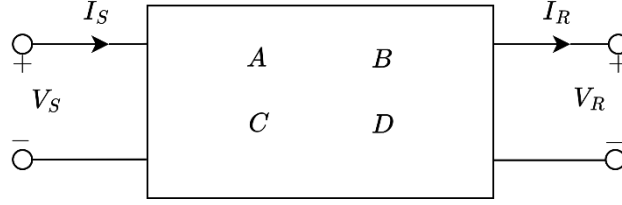
Dağılık parametrelili iletim hatları r , l , c ve g parametrelerinden oluşmaktadır. Bu parametreler bir iletim hattın boyunca düzgün bir şekilde dağılmıştır. İletim hattının herhangi bir noktasında diferansiyel uzunluktaki bir segment seçilerek gerekli hesaplamalar yapılabilir. İletim hattında diferansiyel uzunluktaki bir kesite ait devre Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Bu hat modelini toplu parametrelili hat modelinden ayıran temel noktalardan biri; parametrelerin iletim hattının birim uzunluğuna göre türetilmesidir. Dağılık parametrelili hatlar uzun mesafeli enerji iletimi, haberleşme hatlarının yüksek frekanslı iletimi ve geçici rejimden kaynaklı yürüyen dalgaların analiz edilmesinde kullanılır.



Şekil 2.3: Dağılık parametrelili iletim hattı modeli.

2.4 İletim Hatlarının İki Kapılı Devre Modeli

Enerji iletim hatlarıyla ilgili yapılan çalışmalarda hesaplama kolaylığı açısından genellikle iki kapılı devre modeli kullanılır. Bu sayede iletim hattının gerek gönderici gerekse alıcı ucuna ait gerilim-akım profilleri elde edilir. Enerji iletim hatlarının iki kapılı devre modeli Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4: İki kapılı devre modeli.

Burada V_S , I_S , V_R ve I_R sırasıyla gönderici uç gerilimi, gönderici uç akımı, alıcı uç gerilimi ve alıcı uç akımıdır. Hattın gönderici ucu ile alıcı ucu arasındaki ilişki aşağıdaki denklemlerle belirtilmiştir.

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.7)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (2.8)$$

Denklem (2.7) ve denklem (2.8) matris formuna çevrildiğinde denklem (2.9) elde edilir.

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

A, B, C ve D parametreleri iletim hattının R , L , C ve G parametrelerine bağlı olmakla birlikte hattın gönderici ve alıcı uçlarına bağlı formülleri aşağıda verilmiştir.

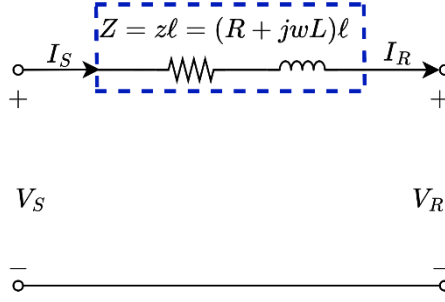
$$\begin{aligned} A &= V_S / V_R \\ B &= V_S / I_R \\ C &= I_S / V_R \\ D &= I_S / I_R \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$AD - BC = 1 \quad (2.11)$$

Enerji iletim hatları uzunluklarına göre dağınk veya toplu parametrelili olarak modellenmektedir. İletim hatları uzunluklarına göre ise kısa, orta ve uzun iletim hatları olmak üzere üç kategoriye ayrılırlar.

2.5 Kısa İletim Hatları

Hat uzunluğu 0-80 km arasında olan enerji iletim hatları kısa iletim hattı olarak adlandırılır. Bu tipteki kısa iletim hatları modellenirken şönt kapasitans ihmal edilirken, hat sadece direnç ve indüktanstan oluşan seri empedans değeriyle olarak modellenir. Bu model genellikle elektrik dağıtım şebekelerinin temsili için kullanılır. Kısa bir iletim hattına ait model Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Kısa iletim hattı modeli.

İletim hattı modelindeki R ve ωL sırasıyla birim uzunluk başına direnci ve reaktansı temsil etmektedir. Kısa iletim hattının eşdeğer devresine Kirchhoff'un gerilim yasası (KGY) uygulandığında aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$V_S = V_R + ZI_R \quad (2.12)$$

$$I_S = I_R \quad (2.13)$$

Denklem (2.12) ve denklem (2.13)'ün matris formu denklem (2.14)'te verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Kısa bir iletim hattının ABCD parametreleri ise şöyledir;

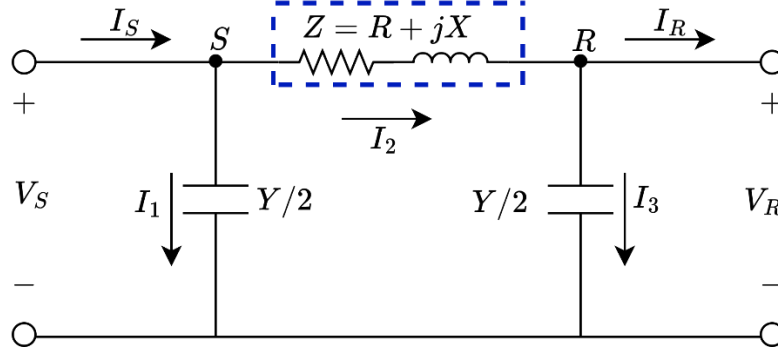
$$\begin{aligned} A &= D = 1 \\ B &= Z \\ C &= 0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

2.6 Orta Uzunluktaki İletim Hatları

Hat uzunluğu 80 km'nin üzerinde ve 250 km'nin altında olan hatlara orta uzunluktaki iletim hatları denir. İletim hattının uzunluğu arttıkça, hat şarj akımı önemli hale gelir ve şönt kapasitansı dikkate alınır. Dolayısıyla, orta uzunlukta bir iletim hattı, devreye seri olarak toplu şönt admittansı ve toplu empedans kullanılarak modellenir. Orta uzunluktaki toplu parametrelili iletim hatları; Nominal II-devre ve Nominal T-devre modelleri olmak üzere iki şekilde modellenir.

2.6.1 Orta uzunluktaki iletim hattının nominal II-devre modeli

Nominal II-devre gösteriminde, toplu seri empedans hattın ortasına yerleştirilirken, şönt admittansı iki eşit parçaya bölünerek hattın iki ucuna yerleştirilir.



Şekil 2.6: Orta uzunluktaki iletim hattının nominal Π -devre modeli.

Şekil 2.6’da verilen hat modelinin orta ağ gözüne KGY ve R düğümüne Kirchhoff’un akım yasası (KAY) uygulandığında aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$V_S = ZI_2 + V_R = Z \left(V_R \frac{Y}{2} + I_R \right) + V_R = \left(\frac{YZ}{2} + 1 \right) V_R + ZI_R \quad (2.16)$$

S ve R düğüm noktalarına KAY uygulanarak denklem (2.17) elde edilir.

$$I_S = I_1 + I_2 = I_1 + I_3 + I_R = \frac{Y}{2} V_S + \frac{Y}{2} V_R + I_R \quad (2.17)$$

Denklem (2.16)’nın denklem (2.17)’de yerine konulmasıyla, denklem (2.17) yeniden düzenlenerek denklem (2.18)’deki gibi olur.

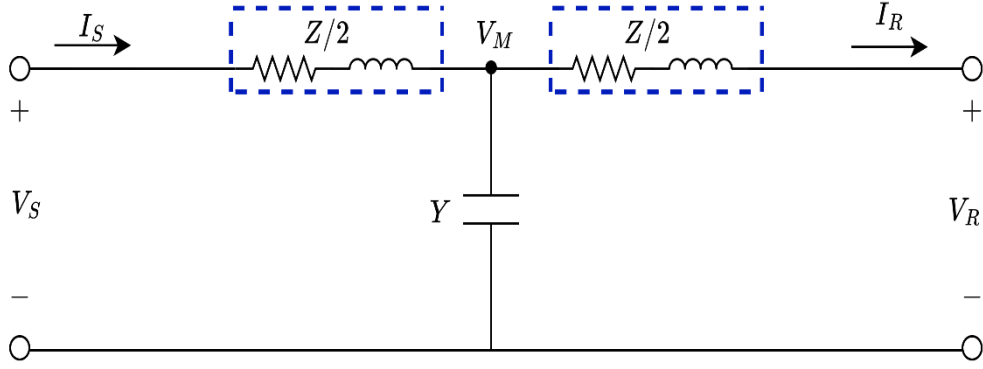
$$I_S = \frac{Y}{2} \left[\left(\frac{YZ}{2} + 1 \right) V_R + ZI_R \right] + \frac{Y}{2} V_R + I_R = Y \left(\frac{YZ}{4} + 1 \right) V_R + \left(\frac{YZ}{2} + 1 \right) I_R \quad (2.18)$$

Denklem (2.16) ve denklem (2.18)’den nominal Π -devresinin ABCD parametreleri aşağıda verildiği gibi yazılır.

$$\begin{aligned} A &= D = \left(\frac{YZ}{2} + 1 \right) \\ B &= Z \\ C &= \left(\frac{YZ}{4} + 1 \right) \end{aligned} \quad (2.19)$$

2.6.2 Orta uzunluktaki iletim hattının nominal T-devre modeli

Orta uzunluktaki bir iletim hattının Nominal T-devre modelinde şönt admitans ortaya yerleştirilir. Seri empedans ise iki eşit parçaya bölünerek şönt admittansının her iki tarafına yerleştirilir. İletim hattının T-devre modeli Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7: Orta uzunluktaki iletim hattının nominal T-devre modeli.

Yukarıda verilen modelde orta noktaya KAY uygulanır ve aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\frac{V_S - V_M}{Z/2} = YV_M + \frac{V_M - V_R}{Z/2} \quad (2.20)$$

Denklem (2.20) yeniden düzenlenir ve denklem (2.21) şeklinde yeniden yazılır.

$$V_M = \frac{2}{YZ + 4}(V_S + V_R) \quad (2.21)$$

İletim hattının alıcı ucuna ait akım I_R formülü ise denklem (2.22)'de verilmiştir.

$$I_R = \frac{V_M - V_R}{Z/2} \quad (2.22)$$

Denklem (2.21)'deki V_M değerinin, denklem (2.22)'de yerine konulmasıyla denklem (2.23) türetilir.

$$V_S = \left(\frac{YZ}{2} + 1 \right) V_R + Z \left(\frac{YZ}{4} + 1 \right) I_R \quad (2.23)$$

İletim hattının gönderici ucuna ait akım I_S formülü denklem (2.24)'te verilmiştir.

$$I_S = YV_M + I_R \quad (2.24)$$

V_M değerini denklem (2.21)'den denklem (2.24)'e yerine koyarak denklem (2.25) türetilir.

$$I_S = YV_R + \left(\frac{YZ}{2} + 1 \right) I_R \quad (2.25)$$

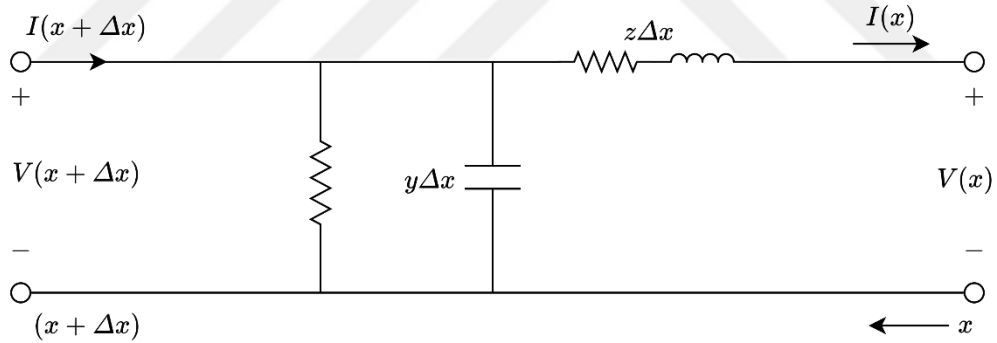
Denklem (2.23) ve denklem (2.25)'ten, nominal T-devre modelinin ABCD parametreleri aşağıdaki gibi yazılır;

$$\begin{aligned}
A &= D = \left(\frac{YZ}{2} + 1 \right) \\
B &= Z \left(\frac{YZ}{4} + 1 \right) \\
C &= Y
\end{aligned} \tag{2.26}$$

Güç sistemlerinin analizinde, güç akışı ve kısa devre hesaplamalarında nominal Π modeli nominal T modeli yerine daha çok tercih edilir. Bunun sebebi nominal T modelinin şebekeye ilave bir düğüm eklemesi ve bara matrislerinin boyutlarını arttırmasıdır.

2.7 Uzun İletim Hatları

Uzunluğu 250 km ve daha uzun olan enerji iletim hatlarına uzun iletim hatları denir. İletim hatlarının geçici rejim analizi ve doğru hesaplamaları için uzun iletim hatlarının parametreleri dağınık parametrelili olarak modellenir. Uzun iletim hatlarının dağınık parametrelili modelinde, hat üzerindeki gerilim-akım değerleri hattın diferansiyel denklemlerinin çözülmesiyle hesaplanır. Dağınık parametrelili uzun bir iletim hattının Δx uzunluğundaki bölümünü temsil eden eşdeğer devre aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.8: Uzun iletim hattının Δx uzunluğundaki bölüm modeli.

Yukarıdaki eşdeğer modelde; $V(x)$ ve $I(x)$, hattın sağından veya alıcı ucundan metre cinsinden ölçülen x konumundaki gerilimi ve akımı ifade ederken, $V(x + \Delta x)$ ve $I(x + \Delta x)$, $(x + \Delta x)$ konumundaki gerilim ve akımı temsil eder. Seri empedans (z) ve şönt admitans (y) gibi devre sabitleri ise şöyledir.

$$\begin{aligned}
z &= R + j\omega L \\
y &= G + j\omega C
\end{aligned} \tag{2.27}$$

Şekil 2.9'daki devreye KGY uygulanır ve aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$V = (z + \Delta x) = V(x) + (z\Delta x)I(x) \tag{2.28}$$

Denklem (2.28) yeniden düzenlenerek aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{V(x + \Delta x) - V(x)}{\Delta x} = zI(x) \quad (2.29)$$

Δx sifira yaklaşırken denklem (2.29)'un limiti alınır ve devreye KAY uygulanır.

$$\frac{dV(x)}{dx} = zI(x) \quad (2.30)$$

$$I(x + \Delta x) = I(x) + (y\Delta x)V(x + \Delta x) \quad (2.31)$$

Denklem (2.31) yeniden düzenlenir;

$$\frac{I(x + \Delta x) - I(x)}{\Delta x} = yV(x) \quad (2.32)$$

Δx sifira yaklaşırken denklem (2.32)'nin limiti alınır.

$$\frac{dI(x)}{dx} = yV(x) \quad (2.33)$$

Denklem (2.30) ve denklem (2.33) kullanılarak aşağıdaki denklem bulunur.

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} - zyV(x) = 0 \quad (2.34)$$

Denklem (2.34)'ün çözümü aşağıdaki gibidir;

$$V(x) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \quad (2.35)$$

Burada A_1 ve A_2 entegrasyon sabitlerini temsil ederken, γ yayılma sabitini temsil eder ve formülü şöyledir;

$$\gamma = \sqrt{zy} \quad (2.36)$$

Denklem (2.36) ve denklem (2.32) kullanılarak;

$$\frac{dV(x)}{dx} = \gamma A_1 e^{\gamma x} - \gamma A_2 e^{-\gamma x} = zI(x) \quad (2.37)$$

$I(x)$ için denklem (2.37) çözölür;

$$I(x) = \frac{A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}}{Z_c} \quad (2.38)$$

Burada Z_c karakteristik empedansı temsil eder ve formülü şöyledir;

$$Z_C = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (2.39)$$

A_1 ve A_2 entegrasyon sabitleri sınır koşullarından değerlendirilir. İletim hattın alıcı ucu olan $x=0$ 'da alıcı uç gerilimi ve akımı aşağıdaki gibidir;

$$\begin{aligned} V_R &= V(0) \\ I_R &= I(0) \end{aligned} \quad (2.40)$$

Denklem (2.35) ve denklem (2.38) aşağıdaki gibi olur.

$$V_R = A_1 + A_2 \quad (2.41)$$

$$I_R = \frac{A_1 - A_2}{Z_C} \quad (2.42)$$

A_1 ve A_2 için denklem (2.41) ve denklem (2.42) çözülerek aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$A_1 = \frac{V_R + Z_C I_R}{2} \quad (2.43)$$

$$A_2 = \frac{V_R - Z_C I_R}{2} \quad (2.44)$$

A_1 ve A_2 denklem (2.35) ve denklem (2.38)'de yerine koyulup ve bu eşitlikler yeniden düzenlendiğinde; denklem (2.45) ve denklem (2.46) elde edilir.

$$V(x) = \left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right) V_R + Z_C \left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right) I_R \quad (2.45)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_C} \left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right) V_R + \left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right) I_R \quad (2.46)$$

Hiperbolik fonksiyonlar olan $\cosh$ ve $\sinh$ 'i kullanılarak aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$V(x) = \cosh(\gamma x) V_R + \sinh(\gamma x) I_R \quad (2.47)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_C} \sinh(\gamma x) V_R + \cosh(\gamma x) I_R \quad (2.48)$$

Denklem (2.47) ve denklem (2.48) kullanılarak, hat üzerindeki herhangi bir x noktası için uzun iletim hattının ABCD parametreleri aşağıda verilmiştir;

$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(x) & B(x) \\ C(x) & D(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

burada;

$$\begin{aligned} A(x) &= D(x) = \cosh(\gamma x) \\ B(x) &= Z_c \sinh(\gamma x) \\ C(x) &= \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) \end{aligned} \quad (2.50)$$

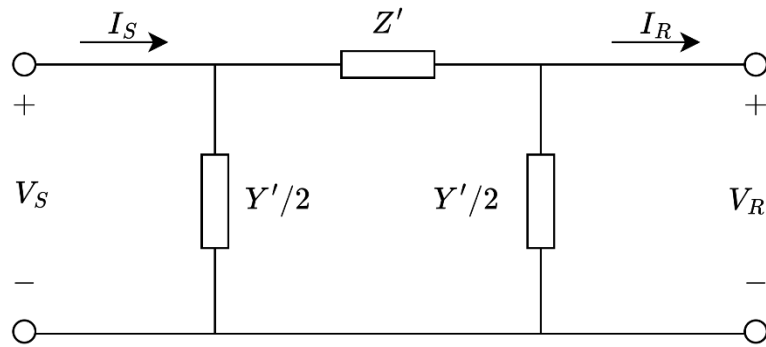
İletim hattının gönderici ucunda $x = d$, $V(d) = V_s$ ve $I(d) = I_s$ olduğu yerde ABCD parametreleri denklem şöyledir.

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

A, B, C ve D bağıntıları aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} A &= D = \cosh(\gamma d) \\ B &= Z_c \sinh(\gamma d) \\ C &= \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma d) \end{aligned} \quad (2.52)$$

Uzun enerji iletim hatları, Π eşdeğer devreler kullanılarak da modellenebilir. Uzun iletim hat modelinin eşdeğer Π -devresi için nominal Π -devre gösteriminde Z ve Y yerine Z' ve Y' kullanılır. Bu modele ait görsel Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9: Uzun iletim hattının nominal Π -eşdeğer devresi.

Uzun iletim hattının Π -devre modeline ait ABCD parametreleri ise şöyledir;

$$\begin{aligned}
A = D &= 1 + \frac{Y'Z'}{2} \\
B &= Z' \\
C &= Y' \left(1 + \frac{Y'Z'}{4} \right)
\end{aligned} \tag{2.53}$$

burada;

$$Z' = Z_c \sinh(\gamma d) = Z \frac{\sinh(\gamma d)}{\gamma d} \tag{2.54}$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \tanh(\gamma d / 2) = \frac{Y}{2} \frac{\tanh(\gamma d / 2)}{(\gamma d / 2)} \tag{2.55}$$

Yukarıda verilen denklemlerde verilen z ve y birim uzunluk parametreleri iken $Z = zd$ ve $Y = yd$ 'dir.

2.8 Enerji İletim Hatlarında Yürüyen Dalgalar

Enerji iletim hatları, elektrik enerjisinin üretildiği noktalardan tüketim merkezlerine iletilmesini sağlayan kritik altyapı bileşenleridir. Bu hatlar üzerinde meydana gelen gerilim ve akım dalgalanmaları, bazen hat boyunca yürüyen dalgalar şeklinde yayılabilir. Yürüyen dalgalar, genellikle ani anahtarlama olayları, arızalar ve dış etkenler (yıldırım düşmesi gibi) nedeniyle oluşur. Bu dalgaların analizi, iletim hatlarının tasarımı ve korunması açısından hayati önem taşımaktadır. Elektrik enerji sistemlerinde, iletim hatlarının uzunluğuna ve frekansa bağlı olarak, bu hatlar klasik devre teorisiyle doğrudan analiz edilemez hale gelir. Hat boyunca parametrelerin dağınık olması, hattın bir iletim hattı modeli ile ele alınmasını gerektirir. Bu noktada yürüyen dalgalar kavramı, elektrik enerji sistemlerinde kritik bir bileşen olarak ortaya çıkar.

Yürüyen dalgalar, bir iletim hattı boyunca gerilim ve akım dalgalarının zamana bağlı olarak ilerlemesiyle karakterize edilir. Bu dalgalar, dalga denklemleriyle tanımlanabilir ve belirli sınır koşullarına göre şekillenir. Genel olarak bir iletim hattında gerilim $V(x,t)$ ve akım $I(x,t)$ aşağıda verilen Telegrapher denklemleri ile ifade edilir.

$$-\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = ri + l \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} \tag{2.56}$$

$$-\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = gv + c \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} \tag{2.57}$$

2.8.1 Kayıpsız iletim hattı modeli

Kayıpsız hatlar için ($r=0$, $g=0$), Bergeron yaklaşımı kullanılarak, denklem (2.56) ve denklem (2.57) aşağıdaki gibi ileri ve geri giden dalgaları üretir [39–41];

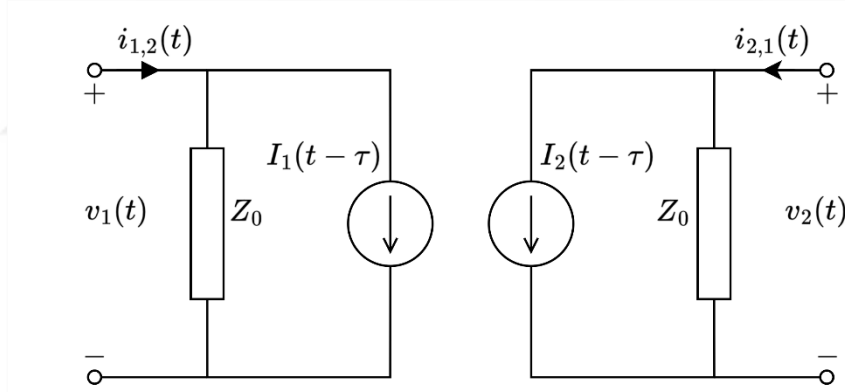
$$v(x,t) + Z_0 i(x,t) = 2Z_0 f_1(x-vt) \quad (2.58)$$

$$v(x,t) - Z_0 i(x,t) = -2Z_0 f_2(x+vt) \quad (2.59)$$

Bu yaklaşım karakteristikler yöntemine dayanmaktadır. Bu formülasyon, hattın gönderici ve alıcı uçları arasında bir eşdeğer devre oluşturulmasına izin verir. 1 ve 2 numaralı düğümlerden oluşan bir iletim hattı düşünüldüğünde, bu hat üzerindeki dalga seyahat süresi τ ve hat uzunluğu d 'dir.

$$\tau = d / v = d \sqrt{lc} \quad (2.60)$$

Kayıpsız bir iletim hattını modellemek için akım kaynakları ve empedans elemanlarından oluşan bir eşdeğer devre çizilebilir [41]. Bu kayıpsız hattın eşdeğer devresi iki kapılı bir eşdeğer devredir ve aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.10: Dağınık parametrelili iletim hattı eşdeğer devresi.

Eşdeğer devredeki I_1 ve I_2 akım kaynaklarının t zamanındaki değeri, geçmişteki $(t-\tau)$ akımlarından elde edilir.

$$I_1(t-\tau) = -(1/Z_0)v_2(t-\tau) - i_{2,1}(t-\tau) \quad (2.61)$$

$$I_2(t-\tau) = -(1/Z_0)v_1(t-\tau) - i_{1,2}(t-\tau) \quad (2.62)$$

Karakteristikler yöntemi, kayıpsız veya kayıplı bir hattı simüle etmek için kullanılabilir. Kayıplı bir iletim hattının toplam etkin direncinin $R' = rd$ olduğu varsayılırsa, kayıplı iletim hattı, iletim hattının başına ve sonuna $R'/2$ eklenerek veya terminallere $R'/4$

ve hattın ortasına $R'/2$ eklenerek temsil edilebilir. Bu durumda Şekil 2.10'deki Z_0 yerine $Z = Z_0 + R'/4$ bağıntısı kullanılır ve geçmiş akımlar aşağıdaki gibi belirlenir [42,43];

$$I_1(t-\tau) = \left(\frac{1+h}{2}\right) \left[(-1/Z)v_2(t-\tau) - hi_{2,1}(t-\tau)\right] + \left(\frac{1-h}{2}\right) \left[(-1/Z)v_1(t-\tau) - hi_{1,2}(t-\tau)\right] \quad (2.63)$$

$$I_2(t-\tau) = \left(\frac{1+h}{2}\right) \left[(-1/Z)v_1(t-\tau) - hi_{1,2}(t-\tau)\right] + \left(\frac{1-h}{2}\right) \left[(-1/Z)v_2(t-\tau) - hi_{2,1}(t-\tau)\right] \quad (2.64)$$

Yukarıdaki denklemlerde, $h = \left(Z_0 - \frac{rd}{4}\right) / \left(Z_0 + \frac{rd}{4}\right)$, tür

r : Hattın birim uzunluk başına direnç değeri (Ω/m),

l : Hattın birim uzunluk başına endüktansı (H/m),

c : Hattın birim uzunluk başına kapasitesi (F/m),

g : Hattın birim uzunluk başına iletkenlik değeridir (S/m).

Yukarıda verilen diferansiyel denklemler, yürüyen dalgaların karakteristiğini belirleyen temel bağıntılardır.

Bir iletim hattı üzerinden elektriksel sinyal biçiminde aktarılan veri, belirli bir zaman dilimi içinde hattın son noktasına ulaşacaktır. Standart bir koaksiyel kabloda, elektriksel sinyalin iletim hızı genellikle 2×10^8 m/s ile 3×10^8 m/s arasında değişmektedir. Bu doğrultuda, bilginin hattın sonuna varma süresi, her metre için yaklaşık 5 ns ile 3.33 ns arasında bir değere sahip olacaktır. Enerji iletim hattında yürüyen dalganın yayılım hızına (v) ait bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$v = \frac{1}{\sqrt{lc}} \quad (2.65)$$

Sonsuz uzunlukta olduğu varsayılan bir hattın giriş noktasından bakıldığında görülen empedansa karakteristik empedans adı verilir. Karakteristik empedans, hattın fiziksel yapısına bağlı olup, bu fiziksel özellikler elektriksel büyüklükler cinsinden ifade edilebilir. Hat parametreleri dikkate alınarak karakteristik empedansın hesaplanması mümkündür. Kayıpsız bir iletim hattının karakteristik empedansına (Z_c) ait formül aşağıda verilmiştir.

$$Z_c = \sqrt{\frac{l}{c}} \quad (2.66)$$

Yukarıda verilen ifadeler, dalganın hat boyunca ne kadar hızlı ilerlediğini ve iletim hattının dalgaların yayılımına olan etkisini belirlemede kullanılır.

İletim hatlarında yürüyen dalgalar için önemli olan bir diğer olgu ise dalga zayıflamasıdır. Yürüyen dalganın zayıflaması genliğinin düşmesi olarak da tanımlanabilir. Enerji iletim hatlarında dalganın zayıflaması *Neper* birimi olarak hesaplanır. Dalga giriş ve çıkış gerilim değerleri oranı iki farklı birim cinsinden (*Neper* ve *Desibel*) aşağıda verilmiştir.

$$a = \ln \left(\frac{V_i}{V_o} \right) np \quad (2.67)$$

$$a = 20 \log_{10} \left(\frac{V_i}{V_o} \right) dB \quad (2.68)$$

Dalga propagasyon (yayılım) sabiti bağıntısı aşağıdaki gibidir;

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (2.69)$$

Yukarıda verilen bağıntılarda;

α : Zayıflama sabiti (*Neper/m*) veya (*dB/m*)

β : Faz sabiti (*Radyan/m*)

ω : Açısal hız ($2\pi f$) (*Radyan/s*)

V_i : Giriş gerilimi (*V*)

V_o : Çıkış gerilimi (*V*)'dir.

Fiziksel bir enerji iletim hattında zayıflama, hattı oluşturan seri direnç ve paralel iletkenlik nedeniyle ortaya çıkar. Seri direnç ve paralel iletkenliği büyük olan iletim hatları, daha fazla zayıflamaya uğrar ve bu tür hatlar yüksek kayıplı iletim hatları olarak tanımlanır. Öte yandan, iletim hattında bulunan seri direnç ve paralel iletkenlik düşük seviyedeysse, bu tür hatlara düşük kayıplı iletim hattı denir [44].

2.9 Yürüyen Dalgalarda Yansıma ve Kırılma

Bir enerji iletim hattında, yürüyen dalgalar belirli bir noktada empedans uyumsuzluğu ile karşılaştığında bir kısmı yansırken bir kısmı iletmeye devam eder. Dalganın bir kısmı orijinal ortamında kalırken, diğer kısmı yeni ortamda ilerler. Dalganın kırılması, hattın bir ortamdan başka bir ortama geçişi sırasında farklı malzeme

özelliklerinden kaynaklanır. Eğer hat boyunca farklı empedans bölgeleri mevcutsa, dalga bu bölgelerde yön değiştirebilir ve farklı genliklere sahip olabilir. Yansıma ve kırılma olaylarına ait bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C} \quad (2.70)$$

$$T = \frac{2Z_L}{Z_L + Z_C} \quad (2.71)$$

Burada;

Γ : Yansıma katsayısı

T : İletim katsayısı

Z_L : İletim hattının sonundaki yük empedansı

Yukarıdaki denklemlere göre $Z_L = Z_C$ olursa, dalganın tamamı iletilir ve yansıma gerçekleşmez. Ancak $Z_L \neq Z_C$ durumunda bir yansıma meydana gelir ve dalganın bir kısmı geri döner. Eğer bir iletim hattı sonunda açık devre veya kısa devre bulunuyorsa, tam yansıma gerçekleşir. Açık devre durumunda ($Z_L \rightarrow \infty$), yansıyan gerilim dalgası pozitif işaretli olur ($\Gamma = 1$), kısa devre durumunda ($Z_L = 0$) ise yansıyan gerilim dalgası negatif işaretli olur ($\Gamma = -1$). Yansıma ve kırılma olaylarını analiz edebilmek için zaman domen ve frekans domeninde farklı yöntemler kullanılabilir. Zaman domeninde incelendiğinde, anlık gerilim ve akım dalgalarının nasıl değiştiği gözlemlenebilir. Frekans domeninde ise Fourier dönüşümü kullanılarak dalganın farklı frekans bileşenlerine nasıl ayrıldığı incelenebilir. Özellikle yüksek frekanslı sinyallerde, empedans süreksizlikleri önemli kayıplara ve parazit etkilerine neden olabilir.

Dalga yayılımı ve yansımaları grafiksel olarak da incelenebilir. Bewley Kafes Diyagramı yöntemiyle zaman ve konum eksenleri kullanılarak, dalga paketlerinin belirli noktalardaki davranışı izlenebilir. Bu diyagramda, dalga hareketi yatay ekseninde konum (x), dikey ekseninde ise zaman (t) ile gösterilir. Dalga ilerlemesi, karakteristik hat boyunca diyagonal çizgilerle gösterilir. Dalga bir düğüm noktasına ulaştığında yansıma katsayısına bağlı olarak geri yansır veya kısmen iletilir. Bewley Kafes Diyagramı, iletim hatlarındaki transient olayları analiz etmek için güçlü bir yöntemdir. Dalga yayılımını zaman ekseninde görselleştirmek, sistem tasarımında ve arıza analizlerinde büyük kolaylık sağlar. Ayrıca, farklı yük koşullarında dalga davranışlarını anlamak için kullanılabilir.

2.10 Enerji İletim Hatlarındaki Kayıplar

Elektrik enerjisinin üretim merkezlerinden tüketim noktalarına iletilmesi sürecinde, çeşitli kayıplar meydana gelmektedir. Bu kayıplar, iletim hatlarının fiziksel özelliklerinden ve işletme koşullarından kaynaklanmaktadır. Genel olarak, iletim hatlarındaki güç kayıpları joule kayıpları (I^2R kayıpları), korona kayıpları ve sızıntı (kaçak) kayıpları olarak sınıflandırılabilir.

Joule kayıpları, elektrik akımının iletkenlerin direncinden ötürü ısıya dönüşmesiyle meydana gelir. Bir iletim hattında iletilen güç aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$P = VI \cos \theta \quad (2.72)$$

Burada P iletim hattında iletilen gücü, I hat akımı, V hat gerilimini ve $\cos \theta$ güç faktörünü temsil etmektedir. Joule güç kayıpları, iletkenin omik direnci ile doğru orantılıdır ve şu şekilde hesaplanır:

$$P_{kayıp} = I^2 R \quad (2.73)$$

Burada R iletkenin omik direncidir. Denklem (2.73)'te görüldüğü üzere; iletim hatlarında taşınan akım miktarı ve iletkenin direnç değeri arttıkça kayıplar da artmaktadır. Bu nedenle, yüksek gerilim seviyelerinde güç iletimi tercih edilerek akım seviyesi düşürülmekte ve dolayısıyla joule kayıpları minimize edilmektedir. Enerji iletimi için daha düşük gerilim seviyesi kullanılırsa hattan akacak olan akım miktarını arttıracaktır. Aynı güç ve şartlara sahip 154 kV ile 380 kV'luk iletim hatları kıyaslandığında, $P=VI$ formülüne göre sabit bir güç için 154 kV'luk sistemdeki iletim hattından daha fazla akım akacaktır. Bu durum hat kayıplarını arttıracak gibi daha yüksek kesitli iletken kullanımına sebep olacaktır. Bu da güç sistemin ekonomik açıdan daha fazla maliyetli olması anlamına gelir. Bu yüzden ki üretim santrallerinde üretilen enerjini yükseltici transformatörler vasıtasıyla gerilim seviyeleri yükseltilir ve iletim hattında yüksek gerilim olarak taşınır. Joule kaybı formülüne göre kayıp miktarını arttıran diğer bir parametre ise iletkenin omik direncidir. Formülden de anlaşıldığı üzere omik direncin artması iletim hattındaki kayıpların artmasına sebep olacaktır. Dolayısıyla enerji iletim hattı tasarımında düşük omik değerlere sahip iletkenleri tercih edilmesi gerekmektedir.

Enerji iletim hatlarında yaşanan kayıplarından biri de elektriksel bir boşalma olan korona kayıplarıdır. Bu kayıpları, yüksek gerilimli iletim hatlarında hava iyonizasyonu nedeniyle meydana gelir. Havanın iyonize olması sonucu elektriksel boşalmalar meydana

gelir ve bu durum enerji kaybına yol açar. Korona kayıplarını etkileyen çok sayıda parametre vardır. Bunlar; hava koşulları, iletken yarıçapı, iletken yüksekliği, iletkenler arasındaki uzaklık, iletkenlerin pürüzlülük durumlarıdır [45]. Enerji iletim hatlarında, atmosferik nemin korona boşalmalarının tutuşma ve sönümlenme sınır gerilimlerinde ciddi bir etkisi vardır. Nem miktarının artması, boşalmanın tutuşma gerilimi değerlerine karşılık gelen akım değerlerinin artması anlamına gelmektedir [46]. Korona kayıplarını etkileyen bir diğer faktör ise besleme gerilimin frekans değeridir. Besleme gerilimi frekansının artması, korona kayıplarının artmasına sebep olmaktadır [47]. Çünkü frekansın artması, korona boşalmasına ait tutuşma gerilimi sınır değerini azalmasına sebep olur. Bu durumda tutuşma daha düşük bir gerilim seviyesinde olacağı için korona boşalması daha çabuk gerçekleşecektir. Bu da hattaki kaybın daha hızlı yaşanmasına sebep olmaktadır. Tutuşma sınır geriliminin yüksek olması hatta yaşanabilecek kayıpların daha az olmasına sebep olur. Korona kayıplarındaki bir diğer önemli faktör eğrilik yarıçapıdır. Eğrilik yarıçapının artması korona boşalmasının tutuşmasında zorlaştırıcı bir etkiye sahiptir.

Korona kayıplarına ilişkin bazı temel bağıntılar aşağıda verilmiştir. Peek'e göre tek fazlı bir iletim hattındaki korona kaybı aşağıda verilen denklemdeki gibi elde edilir.

$$P_{JK} = \frac{(U_f - U_{f0})^2}{R_K} \quad (2.74)$$

Üç fazlı bir iletim hattı için toplam korona kaybı;

$$P_K = 3P_{JK} = 3 \frac{(U_f - U_{f0})^2}{R_K} \quad (2.75)$$

bağıntılarıyla bulunur.

$$R_K = \frac{\delta}{241} \frac{1}{f + 25} \sqrt{\frac{a}{r}} 10^5 \quad (k\Omega / km - faz) \quad (2.76)$$

Üç fazlı iletim hatları için R_K 'nın açık ifadesinin hesaba katılması ile korona kaybı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_K = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{a}} (U - U_0)^2 10^{-5} \quad (kW / km) \quad (2.77)$$

İletim hattının tamamında meydana gelen korona kaybını hesaplamak için hat uzunluğunun P_K ile çarpılmasıyla elde edilir.

$$P_T = P_K l \quad (kW) \quad (2.78)$$

Yukarıda verilen bağıntılarda; U_f faz-nötr gerilimini (kV), U_{f0} çarpma ile iyonlaşmanın başladığı faz-nötr gerilimi (kV), U fazlar arası gerilim (kV), P_{fK} bir faza ait korona kaybı, P_K üç faza ait korona kaybı (kW/km-faz), f frekansı (Hz), R_K tekil hat için korona radyasyon direnci, δ bağıl hava yoğunluğu, a hatlar arası açıklık ve r ise hatların yarıçapıdır.

Peterson'ın amprik formülü baz alınarak korona kaybı hesaplanırken F katsayısı ve iletken yüzey sıcaklığı (T) hesaplamaya dahil edilir. F katsayısı U/U_0 bağılı olarak değişir.

Bu durumda Peterson formülüne göre bir iletim hattında km başına korona kaybı aşağıda verilen bağıntıyla hesaplanır.

$$P_K = F \frac{2.1 \times 10^{-5} f U^2}{\left(\log \frac{a}{r} \right)^2} \quad (kW / km) \quad (2.79)$$

İletim hattı boyunca meydana gelen korona kaybı toplam hat uzunluğu ile km başına hat korona kaybının çarpımıyla elde edilir.

Enerji iletim hatlarında yalıtımdan kaynaklı kayıplar da mevcuttur. İletim hatlarında kullanılan izolatörlerde meydana gelen kayıplar, kuru hava koşullarında ve özellikle yeni inşa edilmiş hatlarda genellikle ihmal edilebilecek düzeydedir. Ancak, eski hatlarda veya iletim hattı güzergâhında hava kirliliğinin yoğun olduğu bölgelerde, yalıtımın zamanla bozulması ve çevresel etkilere karşı daha hassas hale gelmesi nedeniyle özel önlemler alınması gerekmektedir. Bu tür durumlarda, toplam kayıpların doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için yalıtım zincirlerinde oluşabilecek kayıp miktarlarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. İzolatör kayıplarına ait bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$P_{iso} = \left(\frac{U}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{n_p}{R_{iso}} \quad (W / km) \quad (2.80)$$

Burada U hat gerilimini, n_p kilometre başına direk sayısını ve R_{iso} ise iyi havada bir izolatör zinciri için izolasyon direncini temsil eder. Yukarıdaki bağıntıya göre hat gerilim seviyesindeki artış veya kilometre başına düşen direk sayısındaki artış, izolatörlerdeki kayıp miktarında artışa sebep olmaktadır. Ancak diğer sabit şartlar altında izolasyon direncinde artış olması durumunda izolatör kayıpları azalacaktır. Dolayısıyla izolatör kaybı hat gerilimi ve direk sayısı ile doğru orantılıyken izolasyon direnci ile ters orantılıdır [48]. Yoğun yağışlı zamanlarda izolatör seviyelerinde oluşan aktif enerji kayıpları, kuru havalara göre daha

fazladır. Çizelge 2.1’de yetersiz izolasyondan kaynaklı izolatördeki kayıplar gösterilmiştir. Çizelgeye göre en az kayıp hafif sisli şartlarda olurken en fazla kayıp ise yağmurla karışık yoğun kar yağışının olduğu atmosferik şartlarda meydana gelmiştir. Hava koşullarının ağırlaşmasıyla izolatördeki kayıp miktarı artmıştır.

Çizelge 2.1: İzolatörlerdeki yetersiz izolasyonundan kaynaklanan kayıplar [48].

Atmosferin durumu	Bir izolatör için kayıplar (W)
Hafif Sis	0,15
Kar yağışı, 0 °C'nin altında	0,25
Şiddetli Yağmur	1
Uzun ve sürekli yağmur	1,10
Yağmur fırtınası	1,50
Yağmurla karışık yoğun kar yağışı	2,20

2.11 Ferranti Etkisi

Enerji iletim hatlarının alıcı uçlarındaki gerilim seviyelerinin değişimine sebep olan Ferranti etkisi, özellikle uzun mesafeli ve yüksek gerilimli enerji iletim hatlarında ortaya çıkan bir olgudur. Bu etki, iletim hattının alıcı ucundaki gerilimin, gönderici ucundaki gerilimden daha yüksek olması şeklinde gözlemlenir. Normal şartlarda, iletim hatlarında belirli miktarda gerilim düşümü beklenirken, özellikle düşük veya sıfır yük durumlarında, kapasitif etkiler nedeniyle gerilimde bir artış meydana gelir. Bu durum, enerji sistemlerinde istenmeyen sonuçlara yol açabilir ve gerilim regülasyonu açısından dikkatle ele alınması gereken bir konudur. Ferranti etkisi, temel olarak iletim hatlarının kapasite bileşenlerinden kaynaklanır. Uzun mesafeli hatlarda iletkenler arasında ve iletkenler ile toprak arasında bir kapasite oluşur. Bu kapasite, hat boyunca belirli bir yük akımsa bile reaktif güç üretir. Eğer hattın iki ucu arasındaki yük akımı çok düşükse veya hiç yoksa, üretilen kapasitif reaktif güç, hat empedansının indüktif bileşeni ile etkileşime girerek alıcı ucundaki gerilimin yükselmesine neden olur. Bu etki özellikle 100 km’den daha uzun olan yüksek gerilimli iletim hatlarında belirgindir. Hat ne kadar uzun olursa, kapasite etkisi de o kadar büyük olur. Benzer şekilde, hat üzerindeki yük miktarı azaldıkça, Ferranti etkisi daha belirgin hale gelir. Ferranti etkisinin oluşumunu tetikleyen bazı faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Hattın Uzunluğu: Uzun iletim hatlarında hat kapasitansı artar ve bu da Ferranti etkisinin daha belirgin olmasına sebep olur.
- Hattın Gerilim Seviyesi: Yüksek gerilim seviyelerindeki iletim hatlarında kapasitif reaktif güç diğer gerilim seviyelerine göre daha fazladır.
- Hat sonu Yük Durumu: Hat üzerindeki yükün düşük veya hattın yüksüz olması, kapasitif reaktif gücün hat üzerindeki etkisini arttırır.
- Hattın Fiziksel Yapısı: Hatların iletken tipi, direkler arası mesafe ve topraklama durumu kapasiteyi etkileyen faktörlerdendir.

Ferranti etkisi, enerji iletim hatlarında olumsuz sonuçlara yol açabilir. Bu olumsuzluklardan bazıları şöyledir:

- Gerilim Regülasyonu Problemleri: Ferranti etkisi, hattın alıcı uçtaki gerilim seviyesinin nominal değerden daha yüksek olmasına neden olduğundan, dağıtım sistemlerinde gerilim regülasyonu açısından sorun yaratabilir.
- Ekipman Hasarı: Fazla gerilim, transformatörler, iletim hatları ve diğer elektrik ekipmanlarının izolasyon seviyelerinin bozulmalarına neden olabilir. Dolayısıyla ekipmanların zarar görmesine veya ömrünün kısılmasına yol açabilir.
- Güç Sistemi Koruma Sistemlerinin Yanlış Çalışması: İletim hattındaki gerilim seviyesindeki artış, koruma rölelerinin yanlış tetiklenmesine neden olabilir ve enerji kesintilerine yol açabilir.
- Enerji Kalitesi Problemleri: Ferranti etkisi, gerilim dalgalanmalarına ve harmonik bozulmalara neden olarak sistemin enerji kalitesini düşürebilir.

Yukarıda verilen sebeplerden dolayı, Ferranti etkisinin sistem üzerindeki olumsuz etkilerini minimum hale getirmek için çeşitli önlemler alınabilir. Bunlardan bazıları:

- Yük Miktarının Optimizasyonu: Hat üzerindeki yük seviyesini artırmak, kapasitif reaktif gücün hat üzerindeki etkisini azaltabilir. Bunun için iletim hatlarının daha dengeli çalışmasını sağlamak gerekir.
- Reaktif Güç Kompanzasyonu: İletim hattı boyunca stratejik noktalara yerleştirilen indüktif yük gibi şönt reaktörler, hat kapasitesinin ürettiği fazla reaktif gücü dengeleyerek hat sonundaki gerilim seviyesini azaltabilir.

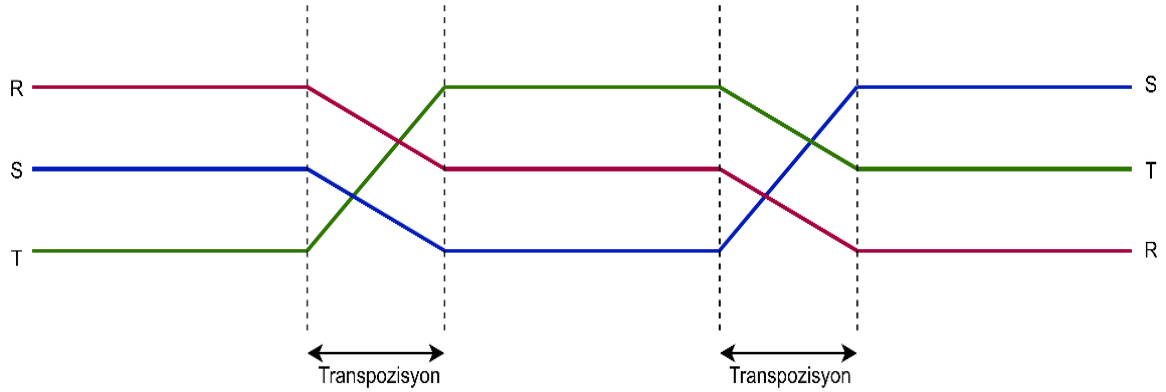
- Hat Uzunluğunun Optimizasyonu: Çok uzun hatlar yerine daha kısa mesafelerde transformatör merkezleri kurarak hatların uzunlukları optimize edilir ve Ferranti etkisini minimize edilebilir.
- Gelişmiş Koruma ve Kontrol Sistemleri: İleri seviye izleme ve kontrol sistemleri kullanılarak, Ferranti etkisi anlık olarak izlenebilir ve gerektiğinde anlık müdahale edilebilir.
- Kademeli Gerilim Regülasyonu: İletim hatlarında kullanılan gerilim regülatörleri ve otomatik kademe değiştiricili transformatörler, gerilim seviyesini belirli sınırlar içinde tutarak Ferranti etkisinin kontrol altına alır.

Yukarıda verilen yöntemlerin uygulanması, enerji iletim hatlarında gerilim seviyelerinin daha stabil hale getirilmesine ve sistemin güvenilirliğinin artırılmasına katkı sağlayacaktır.

2.12 İletim Hatlarında Transpozisyon (Çaprazlama)

Enerji iletim hatlarındaki verimliliği arttırmak ve hattın daha güvenilir olması adına çeşitli işlemler yapılmaktadır. Bu işlemlerden biri transpozisyon, diğer bir ifadeyle çaprazlamadır. Enerji iletim hatlarında transpozisyon, fazlar arasındaki empedans dengesizliğini azaltmak ve sistem performansını iyileştirmek amacıyla uygulanan bir tekniktir. Üç fazlı iletim hatlarında, faz iletkenleri tipik olarak yatay, dikey veya üçgen biçiminde yerleştirilir. Ancak, iletkenlerin konumları nedeniyle her fazın diğer iki faza ve toprağa olan mesafesi farklılık gösterir. Bu durum, fazlar arasında endüktans ve kapasitans açısından bir dengesizliğe yol açar. Fazlar arasındaki endüktans ve kapasitans dengesizliği, sistemde gerilim düşümlerinin eşit olmamasına ve akım dağılımında farklılıklar oluşmasına neden olabilir. Özellikle uzun mesafeli iletim hatlarında, bu dengesizlikler sistemin kararlılığını olumsuz etkileyebilir ve koruma sistemlerinin doğru çalışmasını zorlaştırabilir. Ayrıca, bu durum telafi edilmediğinde güç iletimi sırasında fazlar arasında reaktif güç akışları meydana gelebilir ve enerji kayıpları artabilir. Transpozisyon işlemi, iletim hattının belirli noktalarında faz iletkenlerinin yer değiştirilerek her fazın iletim hattı boyunca eşit mesafelerde farklı konumlara gelmesini sağlar. Böylece her faz, hat boyunca ortalama olarak aynı empedans ve kapasitansa sahip olur. Bu dengeleme sayesinde gerilim ve akım simetrisi sağlanır, nötr hattında istenmeyen akımların oluşması önlenir ve elektromanyetik girişim azaltılmış olur. Özellikle yüksek gerilimli uzun iletim hatlarında transpozisyonun etkisi daha belirgindir. Simetrik empedans yapısının sağlanması, sistemin harmonik davranışını iyileştirirken, haberleşme hatlarıyla olan elektromanyetik etkileşimi de minimize eder.

Böylece hem güç kalitesi hem de sistem güvenilirliği artırılmış olur. Transpozisyon yöntemine ait görsel Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11: İletim hatlarında transpozisyon.

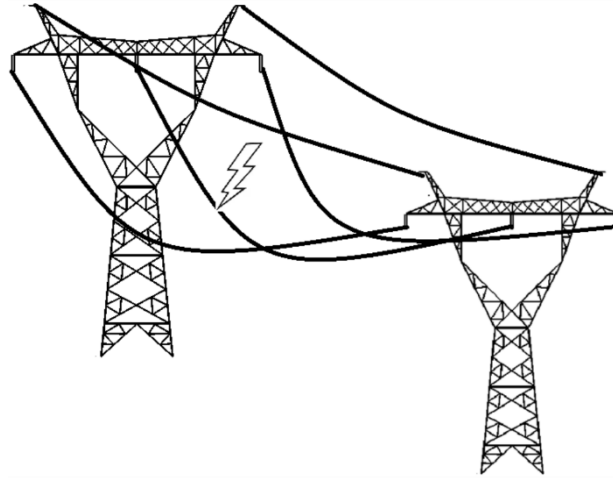
2.13 Yıldırım Darbeleri

Enerji iletim hatları dış etkenlere açık olan bu yapılar olduğundan doğal olaylardan özellikle de yıldırım darbelerinden ciddi ölçüde etkilenmektedir. Yıldırım, atmosferde meydana gelen elektriksel deşarj olaylarından biri olup, büyük miktarda enerji açığa çıkaran ve önemli zararlar verebilen bir doğa olgusudur. Yıldırımın oluşumu, atmosferdeki elektrik alan dağılımı, iyonizasyon mekanizmaları ve bulut-içi veya bulut-toprak arası gerilim farklarına bağlı olarak gerçekleşir. Bu elektriksel deşarj, iletim hatlarına doğrudan ya da dolaylı olarak etki ederek, ciddi seviyelerde aşırı gerilim oluşturabilir. Bunun sonucunda, enerji sistemlerinde güvenilir bir iletim sağlanabilmesi için yıldırım darbelerinin etkileri detaylı olarak incelenmelidir. Yıldırımın oluşumu, atmosferdeki karmaşık elektriklenme süreçleri ile yakından ilişkilidir. Atmosferde meydana gelen bu doğal olay, çeşitli fiziksel ve kimyasal etkileşimlerin bir sonucudur. Bulutlar arasında veya bulut ile yeryüzü arasında meydana gelen elektriksel potansiyel farkı, yıldırımın temel oluşum sebebidir. Atmosferde özellikle kümülonimbus tipi fırtına bulutları, güçlü dikey hava hareketleri ile yük ayrışmasına neden olur. Bu yük ayrışması sonucunda bulutun alt kısmı negatif, üst kısmı pozitif yüklenir. Bu elektrik alan çok büyük değerlere ulaştığında, havanın yıldırım iletkenliği artar ve iyonizasyon süreci başlar. Bunun sonucunda, iletim hatlarına doğru bir elektrik deşarjı gerçekleşir. Bazı yıldırım çeşitleri aşağıda verilmiştir.

- **Bulut içi yıldırım:** Aynı bulut içerisinde meydana gelen deşarj olaylarıdır.
- **Buluttan buluta yıldırım:** Farklı bulutlar arasındaki elektriksel deşarjları ifade eder.

- **Buluttan yere yıldırım:** Yeryüzü ile bulut arasındaki potansiyel fark nedeniyle oluşan yıldırım türüdür ve enerji iletim hatları için en tehlikelisidir.

Yıldırım darbeleri, enerji iletim hatlarına doğrudan veya dolaylı olarak etki edebilir. Bu etkiler, aşırı gerilimlerin oluşmasına, elektromanyetik girişimlere, izolator arızalarına ve hatta sistem genelinde ciddi güvenlik problemlerine yol açabilir. Yıldırım darbeleri, iletim hatlarında geçici aşırı gerilimlere neden olur. Bu aşırı gerilimler, izolatorların delinmesine ve elektrik arklarının oluşmasına yol açabilir. İzolator delinmeleri, hatların kesintiye uğramasına ve ciddi sistem arızalarına sebep olabilir. Yıldırımın oluşturduğu ani akım değişimleri, iletim hatları boyunca güçlü elektromanyetik alanlar oluşturur. Bu elektromanyetik girişimler, haberleşme sistemlerinde parazitlenmelere ve sinyal bozulmalarına neden olabilir. Ayrıca, güç sistemlerinde koruma ve kontrol cihazlarının hatalı çalışmasına yol açabilir. Yıldırımın neden olduğu yüksek akımlar, topraklama sistemlerinde ani potansiyel yükselmelerine neden olabilir. Bu durum, ekipman hasarlarına ve insan güvenliği açısından tehlikelere yol açabilir. Özellikle santraller ve transformatör merkezleri gibi kritik noktaların topraklama sistemleri, yıldırım etkilerine karşı özel olarak tasarlanmalıdır. Yıldırım darbeleri, enerji iletim hatlarında gerilim dalgalanmalarına ve harmonik bozulmalara sebep olabilir. Bu tür bozulmalar, özellikle hassas elektronik cihazların zarar görmesine neden olabilir. Aşağıda bir enerji iletim hattının faz iletkenine düşen yıldırım gösterilmiştir.



Şekil 2.12: Faz iletkenine yıldırım düşmesi.

Yıldırımın güç sistemlerine ve enerji iletim hatlarına olan etkileri, sistem güvenliği ve sürekliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, yıldırım darbelerine karşı koruma önlemlerinin alınması, analiz edilmesi, hat tasarımında bu gibi parametrelerin göz

önünde bulundurulması oldukça önemlidir. Bir enerji iletim hattına yıldırım düşmesi durumunda, çok kısa süreli ve yüksek frekanslı bir geçici (transient) gerilim dalgası oluşur. Yıldırım darbesinin iletim hattındaki yayılımı, hattın yapısal parametrelerine ve hattın bulunduğu çevresel koşullara bağlı olarak farklılık gösterebilir. Yıldırım darbesi, iletim hattındaki iletim parametrelerine (dağınık kapasitans, indüktans ve direnç gibi) bağlı olarak belirli bir hızla ilerler. Yıldırımın yüksek gerilimli doğası, hattın fiziksel boyutları ve topolojisiyle etkileşerek enerji, hat boyunca ilerlerken çeşitli yansımalara, dalgalanmalara ve rezonanslara yol açabilir. Ayrıca, hattın uzunluğu arttıkça, yıldırımın etkisi zamanla daha da karmaşıklaşır ve bu, özellikle çok uzun mesafelerde geçici gerilim dalgalarının kesişmeleri ve yansıması gibi etkilere neden olabilir. İletim hattına düşen yıldırım hem iletim hattının başladığı noktaya hem de hattın son noktasına doğru iki yönde yayılmaya başlar. Yıldırımın yarattığı transient dalga ilerledikçe, hattın uzunluğuna ve yapılandırmasına bağlı olarak, bu dalga genellikle yansımalara, tepe gerilimlerinin farklı noktalarda oluşmasına ve hatta zamanla dağılmasına neden olabilir.

Yıldırım darbelerinin modellenmesi, enerji sistemlerinde aşırı gerilim analizleri ve koruma sistemlerinin tasarımı açısından kritik bir rol oynar. Literatürde birçok farklı yıldırım darbe modeli geliştirilmiş olup, bu modeller yıldırım akımının zaman içindeki değişimini belirlemeye yönelik matematiksel ifadeler içerir. Aşağıda bazı yıldırım modelleri verilmiştir [49].

- IEEE modeli (Çift üstel fonksiyon)
- Heidler modeli
- CIGRE modeli
- Bruce-Golde modeli
- Diendorf-Uman modeli
- Rusck modeli
- Agrawal kuplaj modeli
- Rachidi modeli
- Chowdhuri-Gross modeli
- Pierce ve Cianos Modeli

Yıldırım darbesinin modellenmesi için yukarıda da verildiği üzere çok sayıda model mevcuttur. Geçici rejim analizleri için çift üstel fonksiyonlu model, CIGRE modeli ve Heidler modeli daha sık kullanılan modellerdir.

2.13.1 IEEE (çift üstel fonksiyon) modeli

Yıldırım deşarjlarının zamana bağlı akım ve gerilim karakteristikleri, ani yükselip daha yavaş bir şekilde sönümlenen asimetrik bir dalga formu gösterir. Bu özgün yapı, matematiksel olarak tek bir üstel fonksiyon ile yeterli doğrulukta temsil edilemez. Bu nedenle, literatürde sıklıkla kullanılan ve uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen bir yaklaşım, iki farklı zaman sabitine sahip üstel fonksiyonların farkı ile elde edilen çift üstel modeldir. Bu modelde, akım dalgası iki ayrı zaman sabitine sahip üstel fonksiyonların farkı şeklinde ifade edilir:

$$I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2.81)$$

Burada α ve β zaman sabitlerini, I_0 ise tepe akımını temsil etmektedir. α ve β değerleri yıldırım dalgasının şekline yön veren parametrelerdir. β Değeri ne kadar büyük olursa darbenin yükselişi o kadar hızlı olur. α Değeri ne kadar küçükse darbenin sönümlenmesi o kadar uzun sürer. Çift üstel modelin en önemli parametrelerinden biri, darbenin maksimum noktasına ulaştığı zamanı, yani tepe zamanını belirlemektir. Tepe zamanını hesaplamak için denklem (2.81)'in türevi alınır [50].

$$\frac{di(t)}{dt} = I_0(-\alpha e^{-\alpha t} + \beta e^{-\beta t}) = 0 \quad (2.82)$$

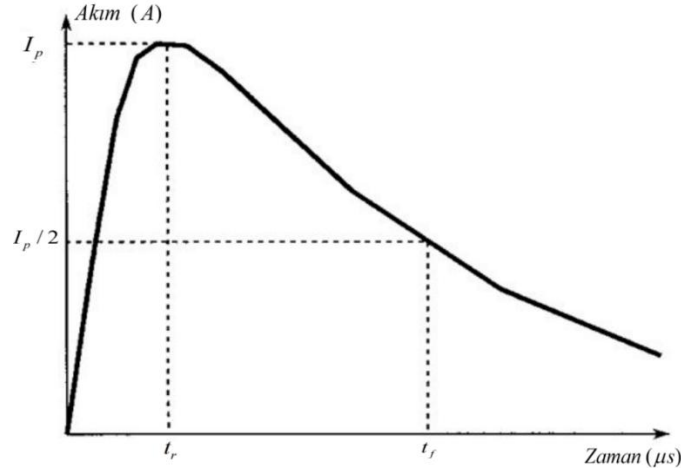
Tepe değeri, denklem (2.82)'de aşağıdaki koşulu sağlamalıdır.

$$\frac{di(t_p)}{dt} = I_0(-\alpha e^{-\alpha t_p} + \beta e^{-\beta t_p}) = 0 \quad (2.83)$$

Yukarıdaki formüllerde t_p , akım darbesinin başlangıcından tepe değerine kadar geçen süredir. Sonuç olarak t_p aşağıda verilen formülle ifade edilir.

$$t_p = \frac{\ln(\beta) - \ln(\alpha)}{(\beta - \alpha)} = \frac{\ln(\beta / \alpha)}{(\beta - \alpha)} \quad (2.84)$$

Çift üstel fonksiyonlu yıldırım modeline ait dalga formu Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13: Çift üstel fonksiyonlu yıldırım dalga formu.

Yıldırım dalga formu incelendiğinde, kısa sürede birkaç μs 'de tepe değerine ulaşmaktadır. Devamında ise sönümleme süreci başlar ve bu süre tepe değeri süresinden daha uzundur. Bu modelin denklem yapısı basit olduğundan hem analitik hem de sayısal çözümlerde doğrudan uygulanabilme kolaylığı sağlamaktadır. EMTP/ATP gibi elektromanyetik geçici rejim programlarında düşük hesaplama maliyeti ile kullanılabilir. Ancak gerçek ölçümlerde gözlenen bazı düzensizlikleri veya çok tepe değerli akım profillerini temsil etme kapasitesi diğer modellere göre daha düşüktür.

2.13.2 Heidler modeli

Heidler modeli, yıldırım akımının zamana bağlı değişimini simüle etmek için geliştirilmiş bir modeldir. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC 62305-1) gibi standart kuruluşlar tarafından referans model olarak onaylanması ve geniş uygulama alanı yelpazesi nedeniyle yıldırımın neden olduğu geçici aşırı gerilimleri doğru bir şekilde analiz etmek için en sık kullanılan modeller arasındadır. Bu modelde yer alan hesaplamalar diğer modellere göre daha karmaşıktır ve daha fazla hesaplama gerektirmektedir, bu karmaşıklık bir dezavantaj olarak görülebilir. Ancak, sonuçta daha basit modellere kıyasla daha gerçekçi sonuçlar verir. Akım dalga formunu daha iyi temsil etmek için kullanılan Heidler modelini aşağıda verilen fonksiyon ile ifade edilir [51,52].

$$I(t) = \frac{I_{\max}}{\eta} x(t)y(t) = \frac{I_{\max}}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (2.85)$$

Burada;

I_{max} : Yıldırım akımının en tepe değeri,

η : Tepe değerinin düzeltme faktörü,

t : Zaman,

τ_1 : Akımın yükselme süresine bağlı zaman sabiti,

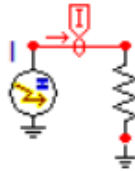
τ_2 : Akımın düşme (azalma) süresine bağlı zaman sabiti,

n : Akım diklik faktörüdür.

n değeri, akımın nasıl yükseleceğini etkileyen bir parametredir. Daha yüksek bir n değeri daha hızlı bir yükselme sağlar. $x(t)$ ifadesi akım yükselişinin fazını kontrol eder. Bu ekspresyon ile akım tepe değerine hızlı bir şekilde ulaşabilir. $y(t)$ ifadesi akım düşüşünün fazını kontrol eder. Bu ifade, akımın tepe değerine ulaştıktan sonra nasıl azaldığını belirler. Denklem (2.86)'daki düzeltme faktörünün matematiksel ifadesi, denklem (2.85)'in türevinin alınması, sıfıra eşitlenmesi ve çeşitli hesaplamaların yapılmasıyla elde edilir [53].

$$\eta = e^{-\frac{\tau_1}{\tau_2} \sqrt{\frac{n\tau_2}{\tau_1}}} \quad (2.86)$$

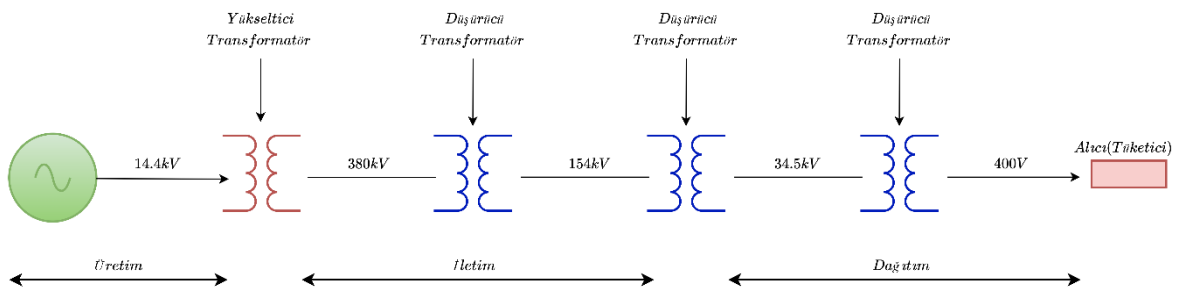
Heidler yıldırım dalgalanması modellenirken, Şekil 2.13'te gösterildiği gibi bir akım kaynağı yıldırım yolu empedansı olarak bilinen bir dirence paralel olarak bağlanır. Yıldırım yolu empedansının değeri, yıldırım kanalının uzunluğu, atmosferik koşullar ve yıldırımın fiziksel özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde bu empedans değerinin 250 Ω ile 2500 Ω arasında bir değer aralığında olduğu tespit edilmiştir [54,55]. Bu tez çalışmasında yıldırım yolu empedansı 400 Ω olarak alınmıştır.



Şekil 2.14: Yıldırım yolu empedansı ile Heidler yıldırım darbe modeli.

3. TRANSFORMATÖRLER

Transformatörler, elektrik enerjisinin gerilim seviyesini belirli bir oranda artırmak veya azaltmak için kullanılan statik elektromanyetik cihazlardır. Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımı süreçlerinde önemli bir role sahip olan transformatörler, gerilim seviyesini regüle etmek ve sistem güvenliğini artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Temel çalışma prensibi, manyetik endüksiyon ilkesine dayanmakta olup, alternatif akım sistemlerinde verimli bir şekilde gerilim seviyesinde dönüşüm sağlamaktadır. Transformatörler güç sistemlerinde istenen gerilim seviyesini elde etmeye yarayan makinalardır. Örneğin elektrik enerjisi üretim santrallerinde gerilim seviyesi düşüktür. Bu gerilim değerinde enerjinin iletim hattında taşınması akımın yükselmesine, hat kayıplarının artmasına, daha fazla gerilim düşümüne, güç kaybına, kablo kesitlerinin artmasına sebep olacaktır. Burada belirtilen bu hususlar sürdürülebilir ve güvenilir bir güç sistemi için istenmeyen durumlardır. Güç sisteminin optimum verimle kullanılması adına, enerji üretim santrallerinden üretilen düşük gerilim seviyesi bir yükseltici transformatör vasıtasıyla yüksek gerilime dönüştürülür. Ardından güç iletimi yüksek gerilimli olarak hatlarda yapılmaktadır. Enerjinin üretiminden son kullanıcıya kadar olan süreç şeması Şekil 3.1’de verilmiştir [56].



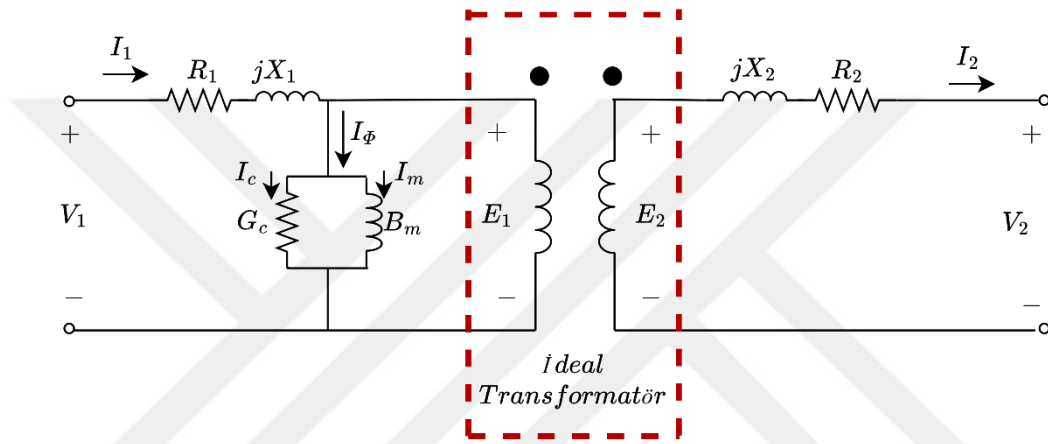
Şekil 3.1: Güç sisteminde transformatör kullanımı.

Transformatör yardımıyla yüksek gerilimin kullanılmasının nedenleri; daha az hat kaybı, daha fazla güç iletimi, daha az gerilim düşümü gibi sistem kalitesini arttırmaya yönelik durumlar olarak sıralanabilir. Enerji iletim aşamasından sonra dağıtım aşaması gelmektedir. Enerji dağıtımında ise düşük gerilim seviyeleri olmalıdır. Dolayısıyla iletim hatlarından sonra bir düşürücü transformatör vasıtasıyla gerilim seviyesi düşük bir seviyeye

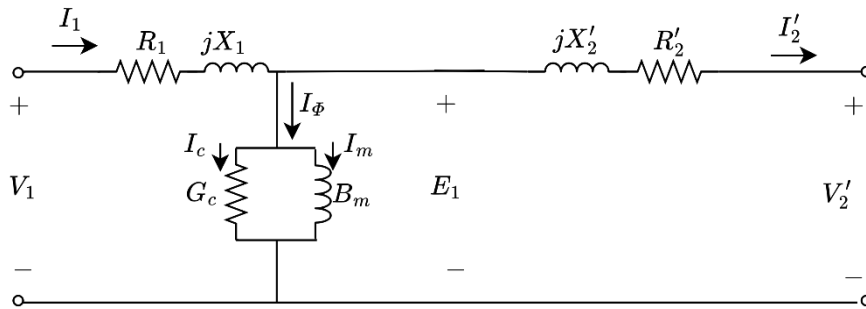
dönüştürülür. Tüm bu bilgiler doğrultusunda enerjinin tüm aşamalarında transformatörün kullanılması güç sistemlerinde kilit bir rol aldığının göstergesidir.

3.1 Gerçek Transformatör Eşdeğer Modeli

İdeal transformatörler bazı parametrelili ihmal edilmesinden dolayı basit bir yapıdadır. Ancak gerçek transformatör modelinde ihmal edilen parametreler de eşdeğer devre dahil edilir. Şekil 3.2’de gerçek bir transformatörün bir fazına ait eşdeğer devresi ve Şekil 3.3’te eşdeğer devrenin sekonder tarafının primer tarafına aktarıldığı eşdeğer devreler yer almaktadır.



Şekil 3.2: Transformatör eşdeğer devresi.



Şekil 3.3: Transformatörün sekonder tarafının primer tarafa aktarıldığı eşdeğer T-devre.

Aktarılmış eşdeğer T-devreye ait formüller ise aşağıdaki gibidir.

$$V_2' = \frac{N_1}{N_2} V_2 \quad (3.1)$$

$$I_2' = \frac{N_2}{N_1} I_2 \quad (3.2)$$

$$R_2' = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2 \quad (3.3)$$

$$X_2' = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 X_2 \quad (3.4)$$

Yukarıdaki denklemlerde; R_1 primer sargının direnci, R_2 sekonder sargının direnci, X_1 primer sargının kaçak reaktansı, X_2 sekonder sargının kaçak reaktansı, I_1 primer sargı akımı, I_2 sekonder sargı akımı, I_c nüve akımı, I_m mıknatıslanma akımı, V_1 primer sargı gerilimi, V_2 sekonder sargı gerilimi, I_ϕ Uyartım akımı, V_1 prime sargı gerilimi, V_2 sekonder sargı gerilimi, G_c nüve kondüktansı, B_m sargı süseptansını temsil etmektedir.

3.2 Transformatör Sargı Tipleri

Nüve yapılı transformatörlerde çeşitli sargı sarım çeşitleri vardır. Transformatörlerde sargı tasarımı, sistemin ihtiyaçlarına göre belirlenir ve bu seçimde çalışma gerilimi, akım seviyesi, soğutma gereksinimi, mekanik dayanım ve üretim maliyeti gibi birçok teknik faktör dikkate alınır. Uygun sargı tipinin belirlenmesi, transformatörün verimli, güvenilir ve uzun ömürlü çalışmasını sağlamak açısından kritik bir rol oynar. Bu sargılardan bazıları [57];

- Konsantrik dairesel sargılar,
- Konsantrik dikdörtgen sargılar,
- Tabakalı sargılar,
- Sipiral (helisel) sargılar,
- Disk tipi sargılardır.

Bu tez çalışmasında geçici rejim analizi için dağıtık parametrelili iletim hattının sonuna bağlanan güç transformatörü disk tipi sargılıdır.

3.3 Güç Transformatörünün Yüksek Frekans Modeli

Güç transformatörleri, enerji iletim ve dağıtım sistemlerinin temel bileşenlerinden biri olup, doğrusal ve doğrusal olmayan çeşitli gerilim ve frekans seviyelerinde çalışabilirler. Geleneksel olarak düşük frekanslardaki (50/60 Hz) davranışları iyi anlaşılacakla birlikte, transformatörlerin yüksek frekanstaki (kHz ve MHz düzeyinde) karakteristikleri özellikle geçici rejim analizlerinde büyük önem taşımaktadır. Yüksek frekans aralığında

transformatörlerin modellenmesi, geçici olaylara duyarlılığını belirlemek, elektromanyetik enterferansı anlamak ve yıldırım darbeleri ile anahtarlama olayları gibi etkileri öngörmek açısından kritik bir rol oynar. Güç transformatörlerinin yüksek frekans modellemesi, çeşitli uygulama alanlarında kritik öneme sahiptir.

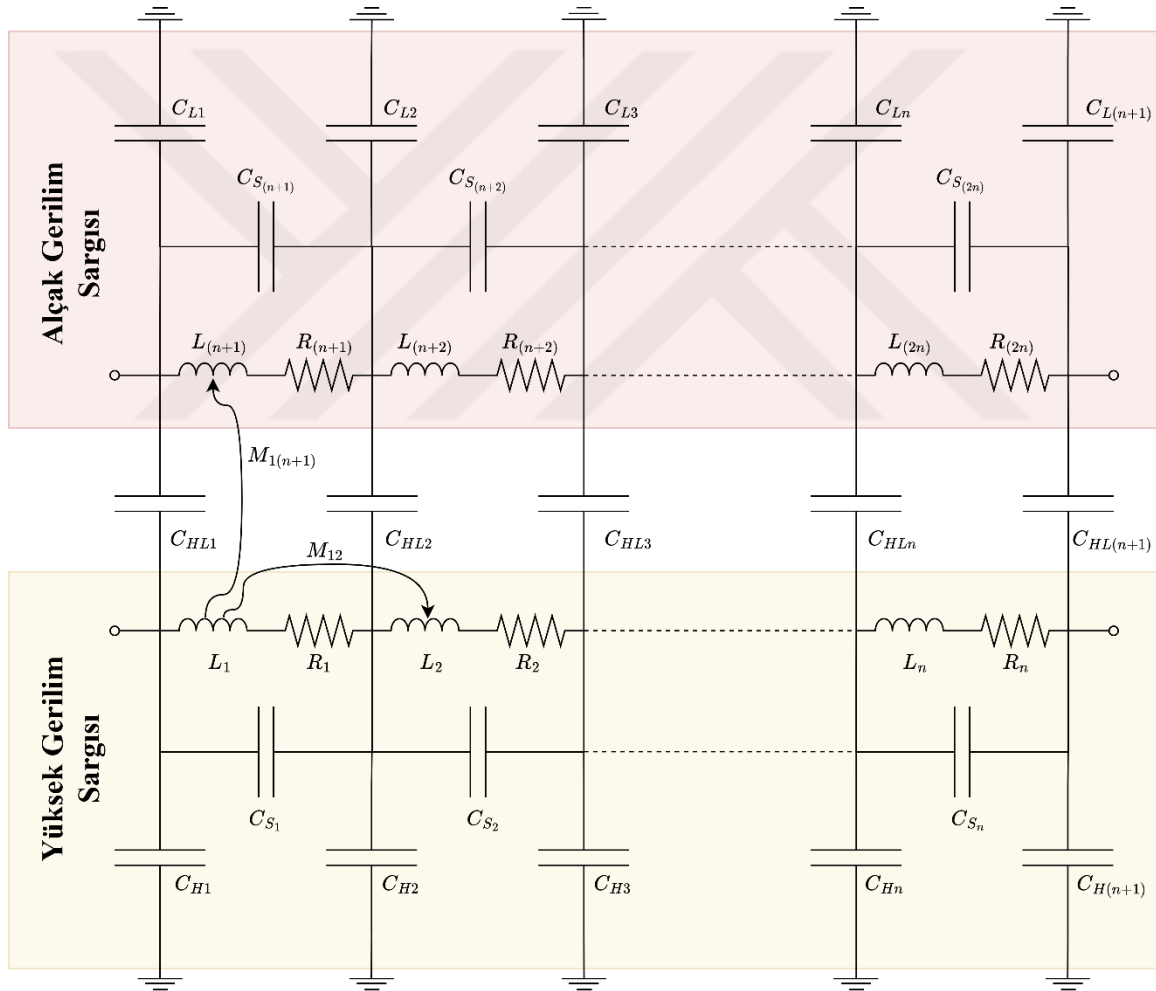
- **Yıldırım ve Anahtarlama Darbeleri:** Geçici rejimlerde meydana gelen önemli gerilim ve akım artışlarının transformatör üzerindeki etkisini anlamak için kullanılır.
- **Harmonik ve Rezonans Analizleri:** Günümüzde güç sistemlerinde yaygın olarak bulunan yüksek frekans bileşenlerinin transformatörle etkileşimini belirlemek için gereklidir.
- **Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) ve Gürültü Analizi:** Transformatörlerin yüksek frekansta yayılan elektromanyetik alanlar nedeniyle diğer sistemlerle olan etkileşimlerini öngörmek amacıyla kullanılır.

Güç transformatörlerinin yüksek frekans modeli Frekans Tepki Analizi (FRA) işlemlerinde de kullanılan bir modeldir. Frekans Tepki Analizi, güç transformatörlerinin mekanik bütünlüğünü değerlendirmek için kullanılan güçlü bir tanı yöntemidir. Bu analiz yöntemi, transformatör sargılarında ve çekirdeğinde meydana gelebilecek yapısal değişiklikleri tespit etmek amacıyla geniş bir frekans aralığında empedans veya transfer fonksiyonunun ölçülmesine dayanır. FRA testinde, transformatörün yüksek frekanstaki davranışı kritik bir rol oynadığından, analiz sonuçlarının doğru yorumlanabilmesi için uygun bir yüksek frekans modeline ihtiyaç duyulur. FRA analizinde, transformatörün iç yapısında meydana gelen değişiklikler, frekans tepkisinde rezonans noktalarının kaymasına veya genlik değişimlerine neden olur. Bu değişimleri doğru bir şekilde tespit edebilmek için yüksek frekans modeli kullanılmaktadır. FRA sonuçları, geniş bir frekans bandında farklı rejimlerde analiz edilir:

- **Düşük Frekans Bölgesi (10 Hz- 10 kHz):** Çekirdek doygunluğu ve manyetik devrenin etkileri belirgindir.
- **Orta Frekans Bölgesi (10 kHz- 1 MHz):** Sargılar arasındaki indüktif ve kapasitif etkileşimler baskın hale gelir.
- **Yüksek Frekans Bölgesi (1 MHz- 10 MHz):** Parazit kapasitanslar belirleyici olur ve transformatör yapısının iç rezonansları ortaya çıkar.

Güç transformatörlerinin yüksek frekanstaki davranışlarını modellemek için farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. En yaygın modelleme teknikleri arasında devre tabanlı

modeller, alan tabanlı modeller ve karışık (hibrid) modeller yer almaktadır. Çok İletkenli İletim Hatları (MTL'ler), Dairesel Çok İletkenli İletim Hatları (CMTL'ler), merdiven ağları ve hibrit modeller (MTL-merdiven ağları) literatürde kullanılan bazı sargı modelleridir [58]. MTL'ler ve CMTL'ler sarım tabanlı modellerdir, bu çalışmada ise disk tabanlı merdiven ağı modeli kullanılmıştır. Şekil 3.4'te hem primer (yüksek gerilim tarafı) hem de sekonder (düşük gerilim tarafı) sargıları içeren çift merdivenli ağ modelini gösterilmiştir. Buna karşılık, tek merdivenli ağ modeli transformatörün yalnızca yüksek gerilim veya alçak gerilim sargılarını temsil eder. Bu çalışma için tek merdivenli ağ modeli kullanılmıştır. Merdiven ağı, transformatörlerin frekans tepki analizi çalışmalarında yaygın olarak kullanılır ve yüksek frekanslı güç transformatörü modeli olarak da adlandırılır.



Şekil 3.4: Güç transformatörü sargısının çift merdivenli ağının eşdeğer devresi.

Bir güç transformatörünün merdiven ağı modeli, R , L ve C parametrelerine sahip çok sayıda bölümün ardışık bağlantısından oluşur. Toplu parametrelerden oluşan her bölüm, eşdeğer devrede bir diski temsil eder. Sonuç olarak, transformatör sargılarındaki disk sayısı modelde kullanılacak bölüm sayısını belirler. R_s , L_s , C_s , C_g ve C_{HL} bölümlerindeki toplu parametreler

sırasıyla seri direnci, öz endüktansı, seri kapasitansı, şönt (toprak) kapasitansı ve transformatörün yüksek gerilim ve düşük gerilim sargıları arasındaki kapasitansı temsil eder. Güç transformatörünün geometrisi ve fiziksel özellikleri gibi sargı tasarım detayları veya önceden ölçülmüş veriler kullanılarak transformatör merdiven ağı modelinin parametreleri tahmin edilebilir veya hesaplanabilir. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), analitik yaklaşım ve terminal bazlı ölçüm, model parametrelerini hesaplamak için kullanılan yöntemlerden bazılarıdır [59].

Transformatör parametreleri iletim hatları gibi dağıtılmıştır. Bununla birlikte, [60–62]’da transformatör modellemesi için toplu parametrelerden oluşan merdiven devreleri önerilmiştir. Transformatör sargılarının durum-uzayı analizine uygun dağıtılmış bir modeli mevcut olmadığından, merdiven devrelerinden oluşan toplu parametre modeli hem durum-uzayı gösterimi hem de transformatör sargısının ATP-EMTP simülasyonları için kullanılır.

3.3.1 Sargının seri direncinin hesaplanması

Disk tipi sargının seri direnç değerini (R_s) hesaplamak için aşağıda verilen bağıntılar kullanılır.

$$R_s = R_{s1} \zeta_r \quad (3.5)$$

Burada, C_{ir} iletkenin direncinin çevresini temsil eder ve $\zeta_r = 2\pi r$ ’dir.

$$R_{s1} = \frac{1}{2(h+w)} \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}} \quad (\Omega / m) \quad (3.6)$$

Verilen denklemde, h , w , μ , σ ve f sırasıyla, sarımların yüksekliğini, sarımların genişliğini, geçirgenliği, iletkenliği ve iletkenin sinyal frekansını temsil eder. İletkenlik matrisi G ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$G = 2\pi f C_s \tan \delta \quad (3.7)$$

Burada C_s seri kapasitansı temsil ederken, $\tan \delta$ yalıtım dağılım faktörünü temsil eder [63].

3.3.2 Sargının öz ve karşılıklı (ortak) endüktansının hesaplanması

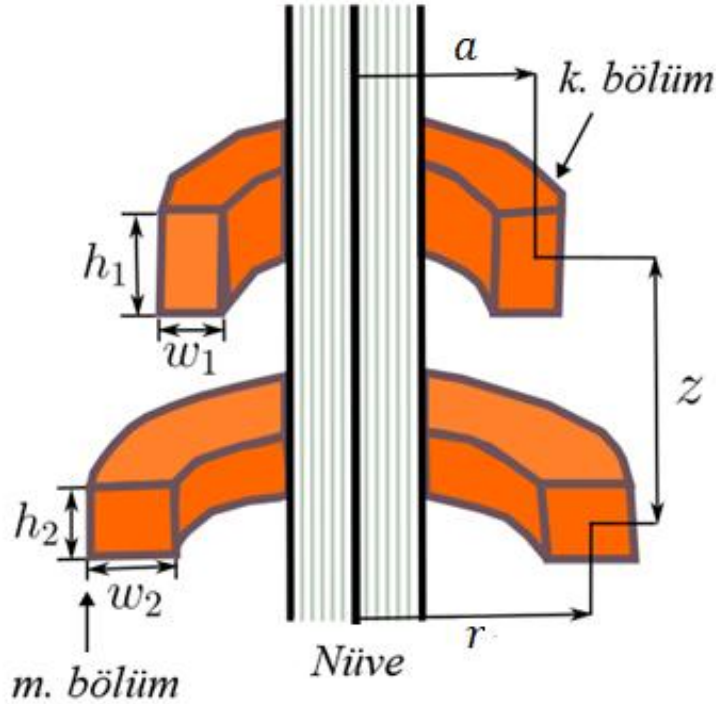
Disk tipi sargıda sarımlar arası öz ve karşılıklı endüktansını hesaplanması için aşağıda verilen bağıntılar kullanılır [64].

$$L_{km} = \mu_0 N_k N_m \sqrt{d_1 d_2} \frac{2}{k} \left[\left(1 - \frac{k^2}{2} \right) M(k) - E(k) \right] \quad (3.8)$$

Yukarıdaki denklemde verilen M ;

$$M = \sqrt{\frac{4d_1 d_2}{d_3^2 + (d_1 + d_2)^2}} \quad (3.9)$$

Bağıntısıyla ifade edilir. Burada L_{km} , k ve m diskleri arasındaki karşılıklı endüktans değeridir. μ_0 Ortamın manyetik geçirgenlik değeridir ve $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$. N_k ve N_m ifadeleri k . ve m . kesitlerin sayısını temsil ederken; d_1 ve d_2 disklerin ortalama yarıçapını ve d_3 diskler arasındaki eksenel mesafeyi temsil etmektedir. Öz endüktans için $k=m$ olduğunda, $d_3=0.02235(h+w)$ olarak hesaplanır. Şekil 4.6'da h_1 ve w_1 , h_2 ve w_2 'ye benzerdir. M ve E ise birinci ve ikinci türden eliptik integralleri temsil etmektedir. L_{km} matrisi için diyagonal elemanlar öz endüktansı temsil ederken, diyagonal olmayan elemanlar diskler arasındaki karşılıklı endüktansı temsil eder. Kesitlerin ortalama yarıçapı aynı olduğundan, bu hesaplamada d_1 ve d_2 değerleri eşittir [65].



Şekil 3.5: Sargı disklerinin boyutları [64].

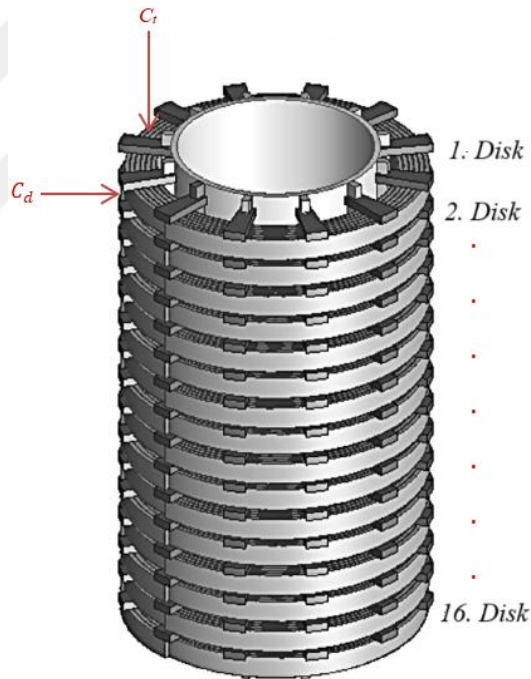
3.3.3 Sargının seri kapasitansının hesaplanması

Transformatör sargı yapısına göre seri kapasitans değerini hesaplamak için aynı diskteki iletkenler arasındaki kapasitans değeri (C_t) ve diskler arası kapasitans (C_d) olarak da bilinen komşu diskteki iletkenler arasındaki kapasitans hesaplanır. Şekil 3.6’da tek fazlı disk tipi sargının yapısı gösterilmiştir.

Aynı diskteki iletkenler arasındaki (iki sarım arasındaki) kapasitans değeri aşağıdaki gibi hesaplanır [63,66].

$$C_t = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0 d_w}{\ln \frac{b_1}{b_2}} \quad (3.10)$$

Burada b_1 dış iletkenin iç yarıçapını, b_2 iç iletkenin dış yarıçapını ve d_w iletkenin uzunluğunu temsil eder. ϵ_0 Serbest uzayın geçirgenliği ve ϵ_r iç ve dış iletkenler arasındaki yalıtım kağıdının bağıl geçirgenliğidir; burada $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ ve $\epsilon_r = 3.85$ ’tir.



Şekil 3.6: Tek fazlı disk tipi sargının yapısı [67].

Aşağıda verilen denklemler herhangi iki disk arasındaki kapasitans (C_d) değerini hesaplamak için kullanılır [65].

$$C_d = \epsilon \frac{S}{d} \quad (3.11)$$

$$S = \pi \left(\left(\frac{d_o}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_i}{2} \right)^2 \right) \quad (3.12)$$

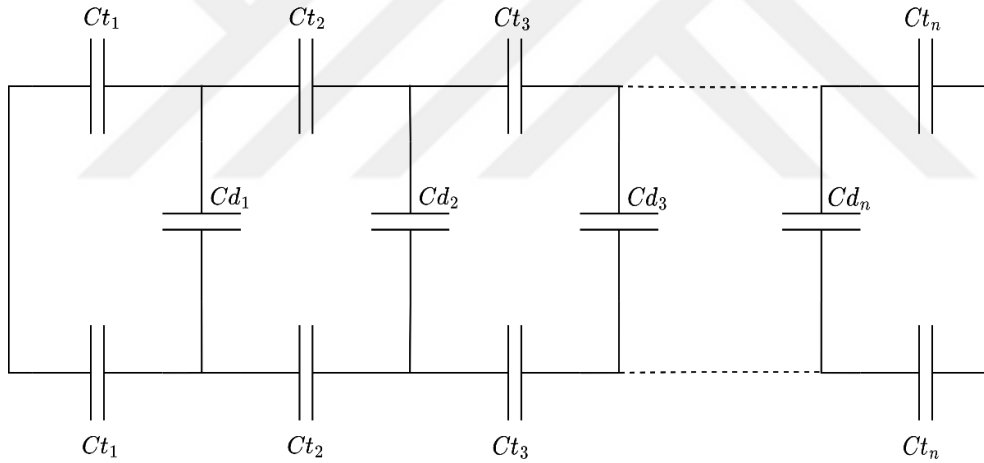
$$S = \pi \left(\frac{d_o^2}{4} - \frac{d_i^2}{4} \right) \quad (3.13)$$

Burada $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ 'dır.

$$C_d = \varepsilon_r \varepsilon_0 \pi \frac{d_o'^2 - d_i'^2}{4d} \quad (3.14)$$

Yukarıda verilen denklemlerde $d_i' = d_i - d$ ve $d_o' = d_o + d$ 'dir. Denklemlerdeki d , d_o ve d_i sırasıyla sarımlar arasındaki mesafeyi, sarımın dış çapını ve sarımın iç çapını temsil etmektedir. S diskin yüzey alanıdır.

Şekil 3.7'deki transformatör kapasitansının eşdeğer devresine göre, toplam C_t değerini ve toplam C_d değerini hesaplamak için aşağıdaki denklemler kullanılır.



Şekil 3.7: Transformatör sargı kapasitansının eşdeğer devresi.

$$C_{t \text{ total}} = \frac{1}{\frac{1}{C_{t1}} + \frac{1}{C_{t2}} + \frac{1}{C_{t3}} + \frac{1}{C_{tn}}} \quad (3.15)$$

$$C_{d \text{ total}} = C_{d1} + C_{d2} + C_{d3} + C_{dn} \quad (3.16)$$

Şekil 3.7 ile denklem (3.15) ve denklem (3.16) kullanılarak, bir disk için transformatör sargısının kapasitans değeri $C_d + C_t$ olarak hesaplanabilir. Ancak, sargının toplam seri kapasitans değerini hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılır.

$$C_s = \frac{1}{N_d} \left(\frac{C_t}{mt} + 4C_{dt} \right) \quad (3.17)$$

$$C_{dt} = \frac{(mt-1)(2mt-1)}{6mt} C_d \quad (3.18)$$

Burada, mt disk başına sarım sayısını temsil eder.

Burada C_{dt} , diskler arasındaki kapasitansın sonucu olarak hesaplanır. C_t ve C_d dışında transformatör sargısının disk modelinde C_g olarak adlandırılan toprağa karşı bir kapasitans da bulunmaktadır. C_g 'nin bu kapasitans değeri aşağıda verilen formül ile hesaplanır [65].

$$C_g = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0 d_w}{\ln\left(\frac{d_i}{d_o}\right)} \quad (3.19)$$

Gerilim dağılım faktörü (α), transformatör sargılarındaki gerilim dağılımlarını analiz ederken önemli bir faktördür. Gerilim dağılım faktörü formülü aşağıdaki gibidir [68].

$$\alpha = \sqrt{C_g / C_s} \quad (3.20)$$

Formülde verilen α değerinin küçük olması istenir. Aksi takdirde transformatör yalıtımı risk altında olabilir. Bu nedenle, bu faktör transformatör tasarımında sargı yalıtımı için faydalı olabilir.

3.4 Penetrasyon Derinliği ve Ferromanyetik Etkiler

Demir gibi ferromanyetik malzemeler yüksek manyetik geçirgenlik gösterir ve bu da çok küçük bir nüfuz derinliğine neden olur. Sonuç olarak, manyetik alanlar demir çekirdeğin yalnızca yüzey bölgesine nüfuz eder ve daha derin katmanlarına ulaşmaz. Bu olgu deri etkisi olarak bilinir. Çok yüksek frekanslarda, nüfuz derinliği demir çekirdeğin fiziksel boyutlarından önemli ölçüde daha küçük hale gelir. Bu koşullar altında, manyetik akı yüzeyin yakınında yoğunlaşır ve çekirdeğin iç bölgelerini etkisiz hale getirir ve manyetik akıya katkıda bulunmaz. Bu nedenle, demir çekirdeğin iç kısmındaki mıknatıslanma yüksek frekanslarda ihmal edilebilir. Penetrasyon (nüfuz) ve demir çekirdek arasındaki ilişki, elektromanyetik dalgaların veya manyetik alanların demir gibi ferromanyetik malzemeler içinde nasıl yayıldığını belirler. Bu ilişki, transformatör tasarımı ve yüksek frekanslı uygulamalarda çekirdek kayıplarının etkilerini anlamak için çok önemlidir. Nüfuz derinliği şu şekilde ifade edilir [69,70].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (3.21)$$

Bu çalışmada, yıldırım kaynağı frekans alanında *MHz* seviyelerine karşılık gelen μs aralığındadır. Bu nedenle, önerilen yöntemde ve ATP-EMTP simülasyonunda nüfuz derinliğinin düşük olduğu ve manyetizasyon etkisinin ihmal edilebileceği düşünülmektedir. Bunun temel nedeni, yukarıda açıklandığı gibi yüksek frekanslarda güç transformatörlerinin manyetik nüfuz derinliğinin çok düşük olmasıdır [71]. Akı penetrasyonları 20 Hz, 500 kHz ve 1 MHz gibi farklı frekans değerlerinde farklılık gösterir. 500 kHz ve 1 MHz'de akı penetrasyonu önemli ölçüde azalır. Frekans arttıkça manyetik alan şiddeti azalır ve iletkende (nüve ve sargı) girdap akımları indüklenir [72]. Transformatör modelleme çalışmalarında, özellikle 10 kHz'in üzerindeki frekanslarda nüve etkisinin ihmal edilebileceği varsayımları yapılmıştır [73].

3.5 Transformatör Parametrelerinde Frekans Etkisi

Transformatörlerin karakteristik parametreleri, işletme frekansına bağlı olarak değişim gösterebilmekte olup özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda bu bağımlılık daha belirgin hale gelmektedir. Genellikle güç sistemlerinde 50 Hz ya da 60 Hz gibi sabit frekanslarda çalışacak şekilde tasarlanan transformatörler, harmonik bileşenler, darbe gerilimleri veya geçici olaylar esnasında daha geniş bir frekans spektrumuna maruz kalmaktadır. Bu durum, transformatörlerin çeşitli parametrelerinin frekansla birlikte değişmesine yol açmakta ve klasik sabit parametrelili modellerin yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Transformatörlerin elektriksel eşdeğer devre parametreleri temel olarak direnç (R), sargı reaktansı (L), manyetik çekirdek özellikleri, sargılar arası ve sargı-nüve arasındaki dağıtılmış kapasitanslar (C) ile nüve kayıplarını temsil eden unsurlardan oluşmaktadır. Bu parametrelerden bazıları frekansla doğrudan ilişkilidir.

Transformatör sargılarında iletken olarak genellikle bakır ya da alüminyum tercih edilmektedir. Doğru akım altında sabit bir direnç değeri gösteren bu iletkenler, alternatif akım altında frekans arttıkça deri etkisi (skin effect) nedeniyle akımın iletkenin yüzeyine yönelmesine yol açar. Bu durum, etkin iletken kesit alanının azalmasına ve dolayısıyla direnç değerinin artmasına neden olur [74]. Ayrıca yüksek frekanslarda sargılar arasında oluşan girdap akımları da direnç üzerinde etkili olur.

İndüktans değeri, sargının fiziksel yapısı ve nüvenin manyetik geçirgenliği ile ilişkilidir. Ancak frekans arttıkça nüvenin geçirgenliği değişkenlik gösterebilir. Özellikle yüksek

frekanslarda nüve malzemesinde meydana gelen ferromanyetik rezonans ve manyetik dispersiyon etkileri indüktansın efektif değerinin düşmesine neden olur. Ayrıca kaçak endüktans değerleri de frekansa duyarlıdır. Çünkü bu parametre, iletkenlerin düzeni, ara mesafeleri ve sargı geometrisine bağlı olarak değişkenlik gösteren bir manyetik akı dağılımına bağlıdır. Frekansın artmasıyla kaçak endüktans değeri azalır [75].

Frekansın yükselmesiyle birlikte yukarıda belirtilen parametrelerdeki değişim, transformatörlerin hem elektromanyetik hem de termal performanslarını doğrudan etkiler. Örneğin, deri etkisi nedeniyle artan direnç, sargılarda daha fazla ısınmaya yol açarken, kaçak endüktansların artması yüksek frekanslı gerilim bileşenlerinin bastırılmasına neden olabilir. Sonuç olarak, transformatörlerin frekans bağımlı davranışlarının doğru şekilde modellenmesi, özellikle geçici rejim, darbeli gerilim, harmonik analiz ve elektromanyetik girişim gibi konuların daha sağlıklı bir biçimde analiz edilmesini sağlayacaktır. Bu tür çalışmalar, enerji iletim sistemlerinin güvenliği, kararlılığı ve elektromanyetik uyumluluğu açısından kritik öneme sahiptir.

4. DURUM-UZAYI YÖNTEMİ

Durum-uzayı yöntemi, doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerin matematiksel modellenmesi, analizi ve kontrolü için yaygın olarak kullanılan güçlü bir yaklaşımdır. Geleneksel diferansiyel denklem tabanlı yöntemlere kıyasla, durum-uzayı formülasyonu sistemin dinamik davranışını vektör ve matris gösterimleriyle ele alarak daha bütüncül bir analiz imkânı sunar. Özellikle çok girişli ve çok çıkışlı (MIMO) sistemler için uygun olması nedeniyle, mühendislik disiplinlerinde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Bu yöntemin temel prensibi, sistemleri birinci mertebeden diferansiyel denklem takımları şeklinde ifade etmek ve böylece sistemin herhangi bir anındaki durumunu belirleyen bir durum vektörü oluşturmaktır. Durum vektörü, sistemin geçmişini tam olarak yansıttığı için, sistemin dinamik davranışı yalnızca bu vektörün zaman içindeki evriminden takip edilebilir.

Dinamik sistemlerin modellenmesinde, durum-uzayı tekniği üç temel bileşenden yararlanır: giriş, çıkış ve durum değişkenleri. Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan sistemler, bu üç unsurun yardımıyla matematiksel olarak durum-uzayı denklemleri kısaca durum denklemleri biçiminde ifade edilir. Durum-uzayı kavramına dayalı sistem tasarımı, kontrol sistemlerinin belirlenen performans kriterlerine uygun şekilde yapılandırılmasını mümkün kılar. Bunun yanı sıra, durum-uzayında gerçekleştirilen tasarım, yalnızca adım, impuls ve sinüzoidal fonksiyonlar gibi standart sinyallerle sınırlı kalmayıp, kullanıcı tarafından tanımlanan farklı giriş sinyalleriyle de test edilebilir. Ek olarak, bu yaklaşım başlangıç koşullarının da modele entegre edilmesine olanak tanıyarak, oldukça işlevsel ve faydalı bir özellik sunar.

İletim hatlarının analizinde genel olarak iki ana yöntem tercih edilmektedir: zaman domen ve frekans domen analizleri. Zaman alanı yöntemlerinde, frekansa bağlı parametrelerin modele dahil edilmesi zorluk yaratabilmektedir. Öte yandan, frekans domen uygulamalarında doğrusal olmayan elemanların ve durumların modele entegrasyonu, zaman alanındaki kadar pratik olmamaktadır. Zaman domeninde yapılan analizlerde, durum-uzayı tekniği geleneksel yöntemlere kıyasla daha basit ve kullanışlı bir yapı sergiler. Örnek olarak, Laplace dönüşümü aracılığıyla t alanından s alanına geçiş sağlanarak devrenin transfer fonksiyonu rahatlıkla elde edilebilir. Ancak, elde edilen s domen çözümünü tekrar t

domenine taşımak için ters Laplace dönüşümüne ihtiyaç duyulması, özellikle yüksek mertebeden diferansiyel denklemlerde karmaşıklığı artırdığı için tercih edilmemektedir. Ayrıca, doğrusal olmayan sistemler için transfer fonksiyonunun elde edilememesi, Laplace dönüşümlerinin uygulanmasını engellerken; durum-uzay yöntemleri, doğrusal olmayan sistemlerin analizinde de etkin bir şekilde kullanılabilir [44].

Durum-uzay modeli, sistemin durum değişkenleri, girişleri ve çıkışları arasındaki ilişkileri belirleyen iki temel denklem ile ifade edilir; durum denklemi ve çıkış denklemi. Bu denklemler aşağıda verilmiştir.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4.1)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (4.2)$$

Burada;

$x(t)$: Durum vektörüdür ve sistemin mevcut durumunu temsil eder.

$u(t)$: Giriş vektörüdür.

$y(t)$: Çıkış vektörüdür.

A : Sistem matrisidir ve sistemin içsel dinamiklerini belirler.

B : Giriş matrisidir ve girişlerin sistem üzerindeki etkisini açıklar.

C : Çıkış matrisidir ve durum değişkenlerinin çıkışa etkisini belirler.

D : Doğrudan iletim matrisidir ve girişlerin doğrudan çıkış üzerindeki etkisini temsil eder.

Yukarıda verilen A, B, C ve D matrisleri en genelinde katsayı matrisleri olarak ifade edilir. Durum denkleminin ait bir diğer gösterim ise denklem (4.3)'te verilmiştir. Bu denklem n. mertebeden bir devrenin durum denklemlerini temsil etmektedir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & \cdots & A_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & \cdots & B_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{m1} & \cdots & B_{mn} \end{bmatrix} u(t) \quad (4.3)$$

Bu denklemler sayesinde sistemin tüm dinamik davranışı doğrusal cebir teknikleri kullanılarak analiz edilebilir. Sistemin kararlılığı, kontrol edilebilirliği ve gözlemlenebilirliği, durum-uzayındaki bu matrisler yardımıyla belirlenebilir. Bu yöntem, enerji sistemleri, sinyal işleme, otomatik kontrol sistemleri ve elektromanyetik alan

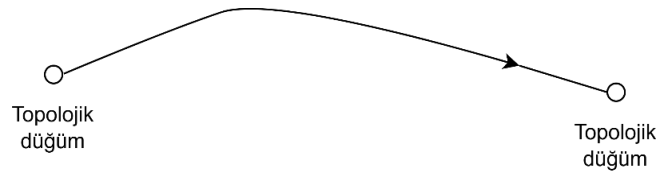
modellemeleri gibi birçok alanda önemli bir analiz ve tasarım aracı olarak kullanılmaktadır. Özellikle, elektrik güç sistemlerinde geçici rejimlerin incelenmesi ve yüksek frekanslı durumların modellenmesi için tercih edilmektedir.

Dağınık parametrelili bir iletim hattının eşdeğer devresi akım kaynakları ve direnç, indüktans ve kapasitans gibi empedans elemanlarından oluşmaktadır. Yüksek frekanslı güç transformatörünün eşdeğer devresinin de belirtilen empedans elemanlarından oluştuğu düşünüldüğünde hem iletim hattı hem de transformatör durum-uzayı modeline uyarlanabilir. Eşdeğer devrelerin modele uyarlanmasından sonra, kapasitör gerilimleri ve indüktör akımları durum değişkenleri olarak seçilir.

4.1 Graf Teorisi ve Durum Denklemleri

Graf teorisi, elektrik devrelerinin matematiksel olarak modellenmesi, analiz edilmesi ve optimizasyonunda güçlü bir yöntem sunmaktadır. Bu teori, elektrik devrelerinin düğüm (node) ve dal (branch) yapılarıyla temsil edilmesini sağlar ve devre elemanları arasındaki ilişkileri sistematik bir şekilde incelemeye olanak tanır. Özellikle büyük ölçekli devrelerin analizi, devre simülasyonları ve devre sentezi gibi alanlarda graf teorisi etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Graf teorisindeki kavramlar aşağıda verilmiştir.

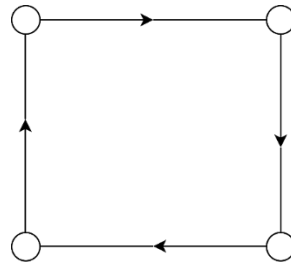
Topolojik Eleman: İki farklı uca sahip, yönlü çizgi parçasıdır. Şekil 4.1’de topolojik eleman gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Topojik elaman.

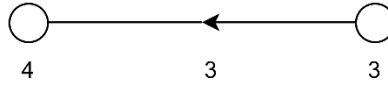
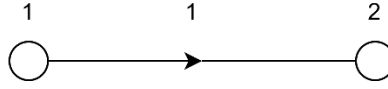
Topolojik Düğüm: Topolojik elemanın uç noktalarıdır.

Topolojik Graf: Topolojik eleman ve düğümlerden oluşan kümeye denir.



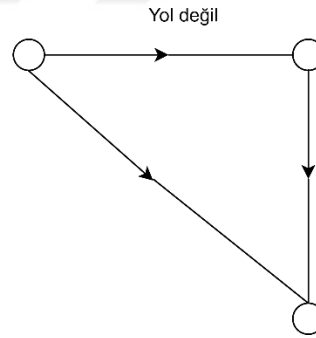
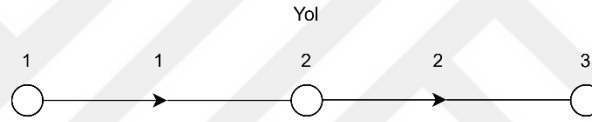
Şekil 4.2: Topolojik graf.

Alt Graf: Bazı eleman ve düğümlerden oluşan kümeye denir.



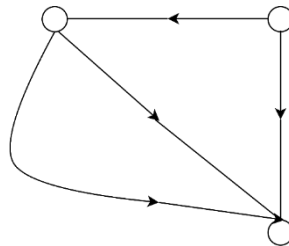
Şekil 4.3: Alt graf.

Yol: n adet elemandan oluşan bir alt grafta, birinci düğüm ve son düğüme birer tane, diğer düğümlere ikişer tane eleman bağlıysa bu alt graf bir yolu temsil eder.



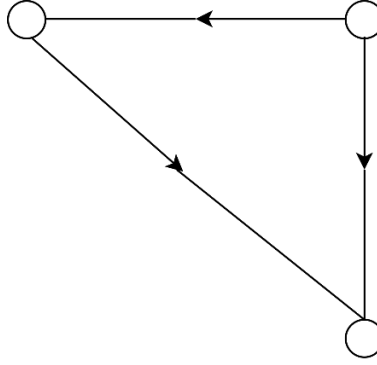
Şekil 4.4: Graf yolları.

Birleşik Graf: Bir grafın herhangi iki düğümü arasında en az bir yol varsa birleşik graf oluşur.



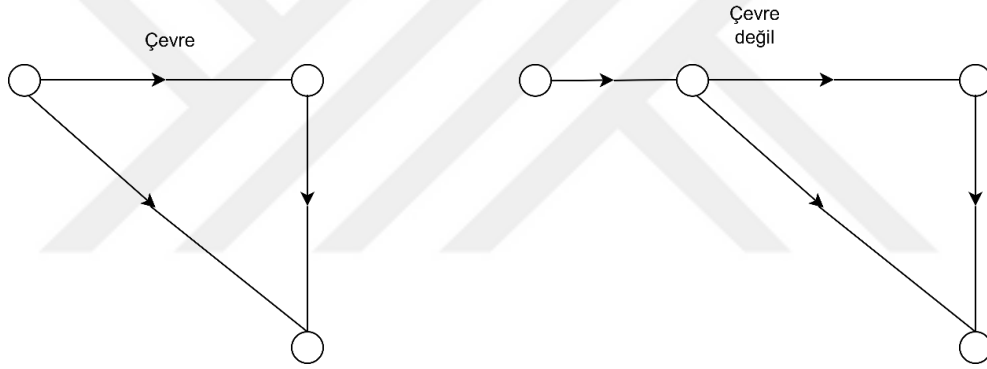
Şekil 4.5: Birleşik graf.

Ayrı Graf: Birleşik olmayan graftır.



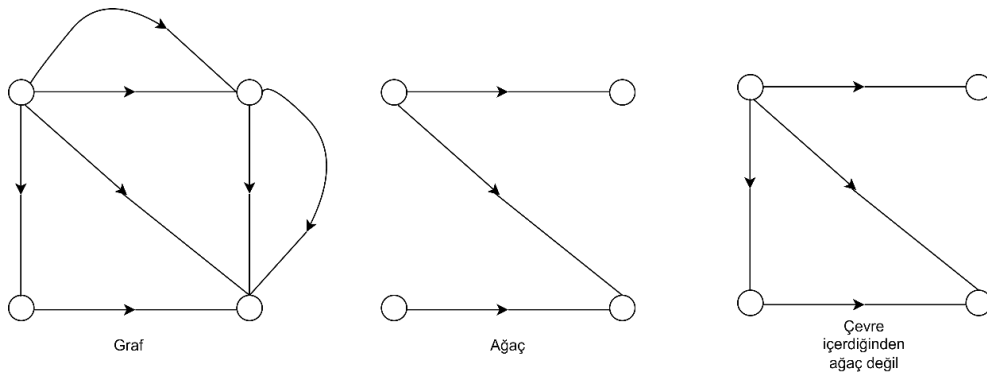
Şekil 4.6: Ayrı graf.

Çevre: Bir alt grafin belirli koşulları sağlaması durumunda oluşur. Bu koşullar; alt grafin birleşik graf olması ve alt grafin her düğümüne sadece iki elemanın bağlı olmasıdır.



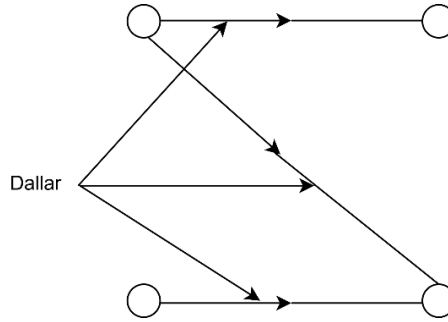
Şekil 4.7: Çevre.

Ağaç: Bir G grafinin, G_a alt grafi belirli bazı şartları sağlaması durumunda ağaç olarak adlandırılır. G_a alt grafi, G grafinin tüm düğümlerini içeriyorsa, birleşik bir alt grafsa ve çevre içermiyorsa buna ağaç denir [76].



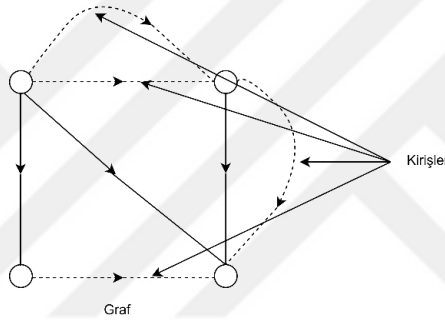
Şekil 4.8: Ağaç.

Dal: Ağacı oluşturan elemanlara denir. Bir diğer ifadeyle ağaç içi elemanlardır. Dal sayısı düğüm sayısının bir eksigidir (n_d-1). Burada n_d düğüm sayısını temsil eder.



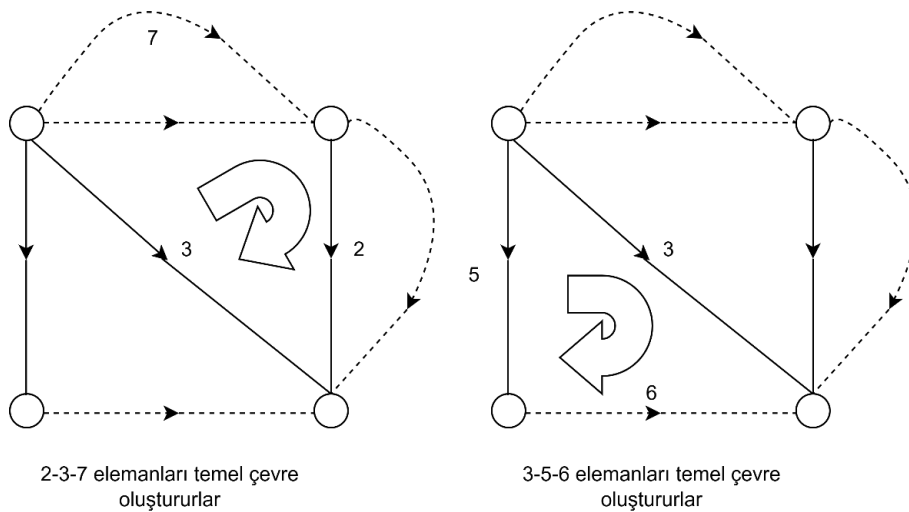
Şekil 4.9: Dallar.

Kiriş Sayısı: Ağaç dışında kalan eleman sayısıdır. Kiriş sayısı, eleman sayısından dal sayısının çıkarılmasıyla hesaplanır ($n_e-(n_d-1)$). Burada n_e eleman sayısını temsil eder.



Şekil 4.10: Kirişler.

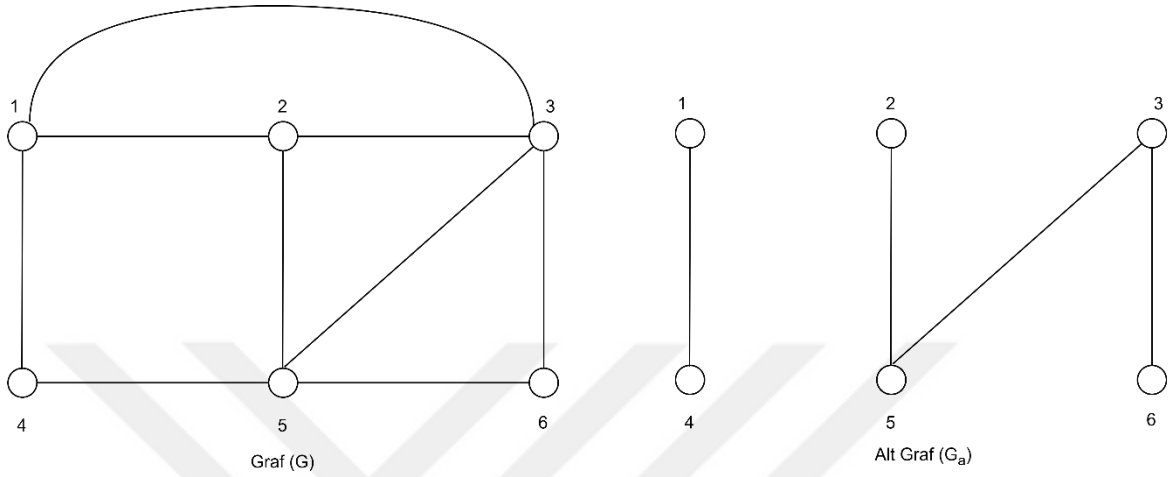
Temel Çevre: Bir tane kiriş ve dal elemanlarından oluşan çevrelere denir. Temel çevre sayısı, kiriş elemanı sayısına eşit olmakla birlikte bağımsız göz sayısına eşittir. Temel çevrenin yönü, temel çevredeki kiriş elemanının yönüyle aynıdır.



Şekil 4.11: Temel çevreler.

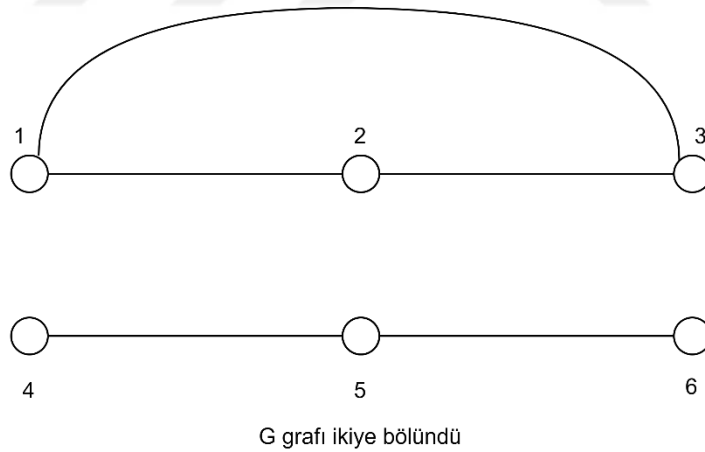
Kesitleme: Alt graftır ve bazı özellikleri sağlar. Bu özellikler;

- G_a alt grafindaki elemanlar G tarafından kaldırıldığında graftan ya bir düğüm kalkar ya da G grafi iki ayrı parçaya bölünür.
- G_a alt grafindaki herhangi bir eleman geri dönüldüğünde, birleşik grafa geri gelinir.



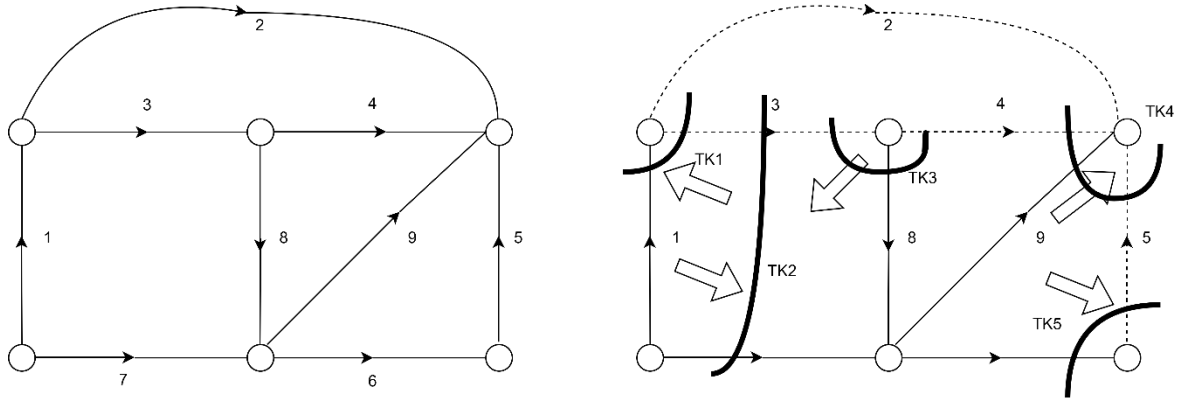
Şekil 4.12: Kesitleme.

Şekil 4.12’de verilen G_a alt grafi G grafindan söküldüğünde, Şekil 4.13’teki ikiye bölünmüş alt graf elde edilir. Dolayısıyla G_a alt grafi bir kesitleme olur.



Şekil 4.13: İkiye bölünmüş graf.

Temel Kesitleme: Bir kiriş ve bir dal elemanından oluşur. Yönü, temel kesitleme içerisine giren dal elemanlarının yönüyle aynıdır. Bir graftaki toplam kesitleme sayısı dal sayısına eşittir (n_d-1).



Şekil 4.14: Temel kesitlemeler [76].

Graf teorisinin elektrik devrelerindeki kullanımı, devreyi bir yönlendirilmiş veya yönlendirilmemiş graf olarak temsil etmeye dayanır. Düğümler, devrenin bağlantı noktalarını temsil ederken, dallar ise direnç, endüktans, kapasitans veya gerilim kaynağı gibi devre elemanlarını ifade eder. Böylece, karmaşık elektrik devreleri matematiksel olarak soyutlanarak analiz edilebilir ve devre çözümleri daha sistematik hale getirilebilir. Dolayısıyla Graf teorisi ile bir devrenin durum denklemlerini kolaylıkla elde edilmesine imkân sağlar. Gerilim denklemlerinin elde edilmesi için temel çevreler, akım denklemlerinin elde edilmesi için temel kesitlemeler kullanılır.

Durum değişkenlerinin elde edilmesi sürecinde, öncelikle devre için belirli prensiplere uygun olarak bir denklem ağacı seçilmelidir. Denklem oluşturma ağacı şu kurallar dikkate alınarak belirlenir [44]:

- Akım kaynakları kirişte olmalı.
- Gerilim kaynaklarının mutlaka ağacın bir parçası olması gerekmektedir.
- Mümkün olan en fazla kapasite elemanı ağaca dâhil edilmelidir.
- Endüktans elemanlarının mümkün olduğunca ağacın dallarında değil, dışarıda tutulmasına özen gösterilmelidir.
- Endüktanslar, birbirleriyle ya da akım kaynaklarıyla kesitleme oluşturmamalıdır. Eğer bu tür bir bağlantı kaçınılmazsa, endüktanslar ağacın içerisine alınmalıdır. Tüm bu adımların ardından, eğer denklem ağacı hala tamamlanmamışsa, ağacı tamamlamak amacıyla direnç elemanları dahil edilmelidir.

- Kapasitelerin kendi aralarında veya gerilim kaynakları ile çevre oluşturmamaları sağlanmalıdır. Eğer böyle bir durum ortaya çıkarsa, ilgili kapasiteler ağacın dışında bırakılmalıdır.

Bu kurallar doğrultusunda oluşturulan denklem kurma ağacı, uygun bir yapı olarak kabul edilir ve KGY ve KAY kullanılarak durum denklemleri türetilir.

4.2 Sayısal (Nümerik) Analiz Yöntemleri

Nümerik analiz, matematiksel problemlerin yaklaşık çözümlerini elde etmek amacıyla geliştirilen yöntemler bütünüdür. Özellikle karmaşık ve analitik olarak çözülemeyen problemlerin sayısal yaklaşımlarla çözümünü mümkün kılar. Diferansiyel denklemler, integral hesaplamaları, kök bulma problemleri ve doğrusal cebir sistemleri gibi birçok alanda nümerik analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Günümüzde mühendislik, fizik, ekonomi ve bilgisayar bilimleri gibi disiplinlerde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Nümerik analizde temel amaç, hataları minimize ederek güvenilir ve stabil çözümler elde etmektir. Sayısal yöntemlerin doğruluğu ve etkinliği, hata analizi ve yakınsama kriterleri dikkate alınarak değerlendirilir. Hata analizinde yuvarlama ve kesme hataları önemli faktörlerdir. Yuvarlama hataları, bilgisayarların sonlu basamak hassasiyeti nedeniyle ortaya çıkarken, kesme hataları ise seriler veya iteratif işlemler sonucunda ortaya çıkar.

Nümerik analiz kapsamında birçok farklı yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler, çözülecek probleme bağlı olarak seçilir. Başlıca nümerik analiz teknikleri şunlardır [77]:

- **Kök Bulma Yöntemleri:** Bir fonksiyonun köklerini bulmak için kullanılan yöntemlerdir. Örnek olarak Bisection (İkiye Bölme), basit iterasyon yöntemi, Regula- Falsi yöntemi, Newton-Raphson ve Secant yöntemleri verilebilir.
- **Doğrusal Denklem Sistemlerinin Çözümü:** Matris cebiri kullanılarak doğrusal denklemler çözülebilir. Gauss Eliminasyon, LU Ayrıştırma ve Jacobi-Gauss-Seidel yöntemleri bu gruba girer.
- **Enterpolasyon ve Yaklaşım Yöntemleri:** Verilen bir veri setine uygun bir fonksiyon belirlemek için kullanılır. Lagrange enterpolasyonu, Newton enterpolasyonu ve en küçük kareler yöntemi yaygın tekniklerdendir.
- **Sayısal Türev ve İntegrasyon:** Diferansiyel ve integral hesaplamalarını sayısal olarak gerçekleştirmek için kullanılan yöntemlerdir. Finite Difference yöntemleri

türev hesaplamalarında, Trapezoidal ve Simpson kuralları integral hesaplamalarında kullanılır.

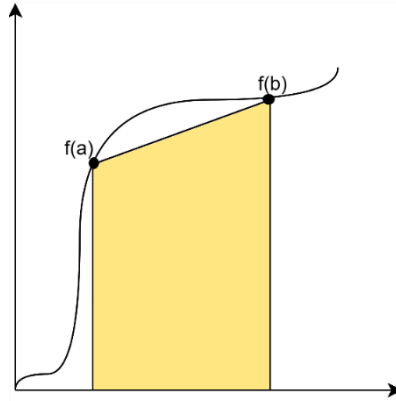
- **Diferansiyel Denklemlerin Sayısal Çözümü:** Euler yöntemi, Runge-Kutta yöntemi ve Adams-Bashforth yöntemi diferansiyel denklemlerin nümerik çözümü için yaygın olarak tercih edilir.

4.2.1 Yamuk (Trapezoidal) Kuralı

Trapezoidal kuralı, belirli integrallerin sayısal olarak hesaplanmasını sağlayan temel yöntemlerden biridir. Özellikle analitik olarak çözilemeyen veya karmaşık fonksiyonların integral değerlerini yaklaşık olarak elde etmek için kullanılır. Bu yöntemin temel mantığı, integral alınacak fonksiyonun, belirlenen aralıkta doğrusal parçalarla (trapezler) temsil edilmesine dayanır. Başka bir ifadeyle, fonksiyon belirlenen noktalar arasında doğrusal interpolasyon ile yaklaştırılır ve bu interpolasyon sonucunda trapezlerin alanları toplanarak integral değeri yaklaşık olarak hesaplanır.

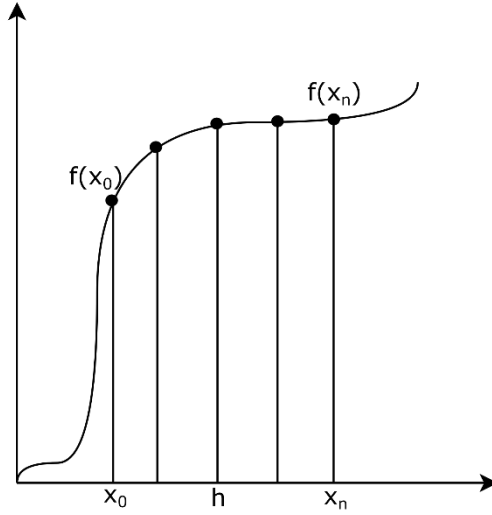
Bir $f(x)$ fonksiyonunun a ile b arasındaki belirli integralini hesaplama için Trapezoidal kuralı şu şekilde ifade edilir:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{2} [f(a) + f(b)] \quad (4.4)$$



Şekil 4.15: $f(x)$ grafiği ve yamuk alanı.

Bu formül, fonksiyonun sadece uç noktalarındaki değerlerini kullanarak integralin yaklaşık değerini belirler. Ancak daha yüksek doğruluk elde etmek için, aralığı daha küçük alt aralıklara bölmek gerekir. Bunu sağlamak amacıyla Trapezoidal kuralı, eşit bölünmüş n adet alt aralık için genişletilebilir [77]:



Şekil 4.16: Alanın daha küçük alt aralıklara bölünmesi.

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{2} \left[f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n) \right] \quad (4.5)$$

Burada;

$h = \frac{b-a}{n}$ olup, her alt aralığın genişliğini ifade eder.

$x_i = a + ih$ şeklinde ara noktalar belirlenir.

Fonksiyon değerleri belirlenen noktalarda hesaplanarak integral değeri tahmin edilir. Trapezoidal kuralın bazı avantajlar vardır. Hesaplama açısından oldukça basittir ve kolay uygulanabilir. Kesikli veri noktaları ile integral hesaplamalarına uygundur. Belirli bir doğruluk seviyesine ulaşmak için alt aralıkların sayısı artırılarak hata azaltılabilir.

İletim hatlarının durum denklemlerinde geçmiş akımlar bulunmaktadır. Bu akımların çözüm aşamasının her zaman adımında güncellenmesi gerekir. Bunu yapmak için, durum denklemlerinin ayrıklaştırılması gerekir, bu da durum denklemlerinin sayısal olarak entegre edilmesiyle yapılabilir. Bu çalışmada trapezoidal kural kullanılmıştır. x_k 'nin $t_k = k\Delta t$ anındaki değerini bildiğimizi varsayalım. Bu durumda, denklem (4.1) trapezoidal integral kuralı uygulanarak bir dizi fark denklemine dönüştürülebilir. $t(k+1) = (k+1)\Delta t$ anındaki sistem tepkisi denklem (4.6)'dan elde edilir.

$$\left(I - \frac{\Delta t}{2} A \right) (x_{k+1}) = \left(I + \frac{\Delta t}{2} A \right) x_k + \frac{\Delta t}{2} B (u_k + u_{k+1}) \quad (4.6)$$

Burada $k, k+1$ sırasıyla t_k ve t_{k+1} zamanlarındaki durum vektörü x ve girdi vektörü u 'nun alt simgeleridir. Δt adım uzunluğunu temsil eder. t zamanındaki geçmiş akımlar, $t-\tau$

zamanındaki geçmiş akım değerleri kullanılarak hesaplanabilir. Sistemin zaman alanındaki tepkisini belirlemek için, durum vektörü $k=0$ 'da bilinen bir durumdan başlayarak ayırık zaman noktalarında tekrar tekrar hesaplanır. Bu durum denklem (4.6)'nın eşzamanlı çözümünü gerektirir. Denklemlerin daha basit formu denklem (4.7)'de verilmiştir.

$$\bar{A}x_{k+1} = b_k \quad (4.7)$$

$$\bar{A} = \left(I - \frac{\Delta t}{2} A \right) \quad (4.8)$$

$$b_k = \left(I + \frac{\Delta t}{2} A \right) x_k + \frac{\Delta t}{2} [B(u_k + u_{k+1})] \quad (4.9)$$

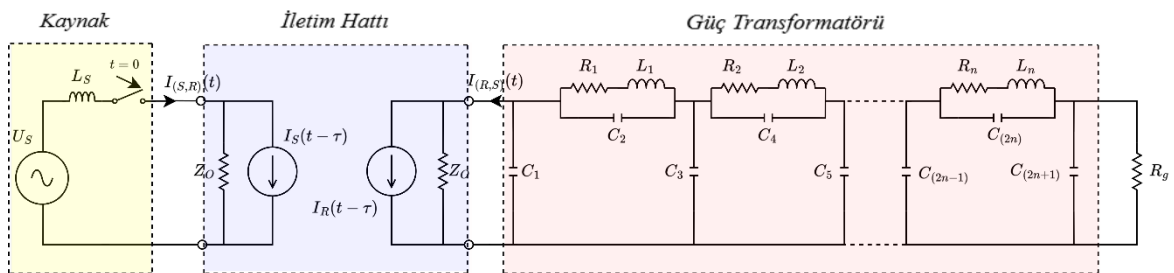
Sistemin yanıtını elde etmek için, x_{k+1} vektörü $k=0$ 'dan başlayarak denklem (4.7) kullanılarak iteratif olarak hesaplanmalıdır. $\bar{A}$ matrisi sabitken, b_k vektörünün hattın kayıpsız veya kayıplı olmasına bağlı olarak sırasıyla denklem (2.61), denklem (2.62) veya denklem (2.63), denklem (2.64) kullanılarak her zaman adımında güncellenmesi gerekir [43].

5. DAĞINIK PARAMETRELİ İLETİM HATTI UYGULAMARI VE BULGULAR

Bu tez çalışmasında dağınık parametrelî iletim hattı kullanılarak çeşitli koşullarda geçici rejim uygulamaları yapılmış ve analizi yapılmıştır. Sırasıyla; iletim hattı-transformatör anahtarlama uygulaması ve analizi, yıldırım darbe uygulaması ve analizi, iletim hattı-transformatör yıldırım darbesi uygulaması ve analizi, iletim hattı-transformatör bağlantı noktası arıza uygulaması ve analizi, iletim hattı-transformatör yıldırım arıza uygulaması ve analizi, trapezoidal yönteminde adım aralığı etkisi ve farklı yöntemler kullanılarak RC yüklü iletim hattında anahtarlama çalışmaları yapılmıştır.

5.1 İletim Hattı-Transformatör Anahtarlama Uygulaması ve Analizi

Bu uygulamada, dağınık parametrelî bir iletim hattının sonuna disk tipi sargıdan oluşan bir güç transformatörünün yüksek gerilim tarafı bağlanmıştır. İletim hattı tek fazlı olup, transformatörün bir fazı uygulamaya dahil edilmiştir. Uygulamaya ait eşdeğer devre Şekil 5.1’de verilmiştir. Eşdeğer devre; bir sinüzoidal gerilim kaynağı, akım kaynakları ve karakteristik empedanstan oluşan dağınık parametrelî iletim hattı modeli, N tane diskten oluşan disk tipi sargılı bir güç transformatörü modelinin kombinasyonundan oluşmaktadır. Durum-uzayı yöntemiyle bu anahtarlama duruma ait geçici rejim analizi yapılırken Şekil 5.1’de verilen eşdeğer devre baz alınmıştır.



Şekil 5.1: İletim hattı-transformatör anahtarlama eşdeğer devresi.

Eşdeğer devre incelendiğinde modelin kaynak, iletim hattı ve güç transformatörü gibi üç temel kısımdan oluştuğu görülmektedir. Çizilen eşdeğer devreden yola çıkılarak graf teorisi kullanılarak indüktör akımlarının ve kapasitör gerilimlerinin denklemleri elde edilmiştir.

Ancak bu bağıntıların denklem (4.1) formuna uymadığı ve denklem (5.1) formunda olduğu görülmüştür. Bu uyumsuzluğu gidermek için denklem (5.2)'de verilen birim matris özellikleri kullanılarak denklem eşitliğinin her iki tarafı soldan F^{-1} ile çarpılmış ve denklem (5.4) elde edilmiştir.

$$F\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (5.1)$$

$$F^{-1}F = I \text{ ve } F\dot{x}(t) = \dot{x}(t) \quad (5.2)$$

Burada I birim matrisi temsil etmektedir.

$$F^{-1}F\dot{x}(t) = F^{-1}(Ax(t) + Bu(t)) \quad (5.3)$$

$$\dot{x}(t) = F^{-1}Ax(t) + F^{-1}Bu(t) \quad (5.4)$$

ya da;

$$\dot{x}(t) = A'x(t) + B'u(t) \quad (5.5)$$

burada $A' = F^{-1}A$ ve $B' = F^{-1}B$ 'dir.

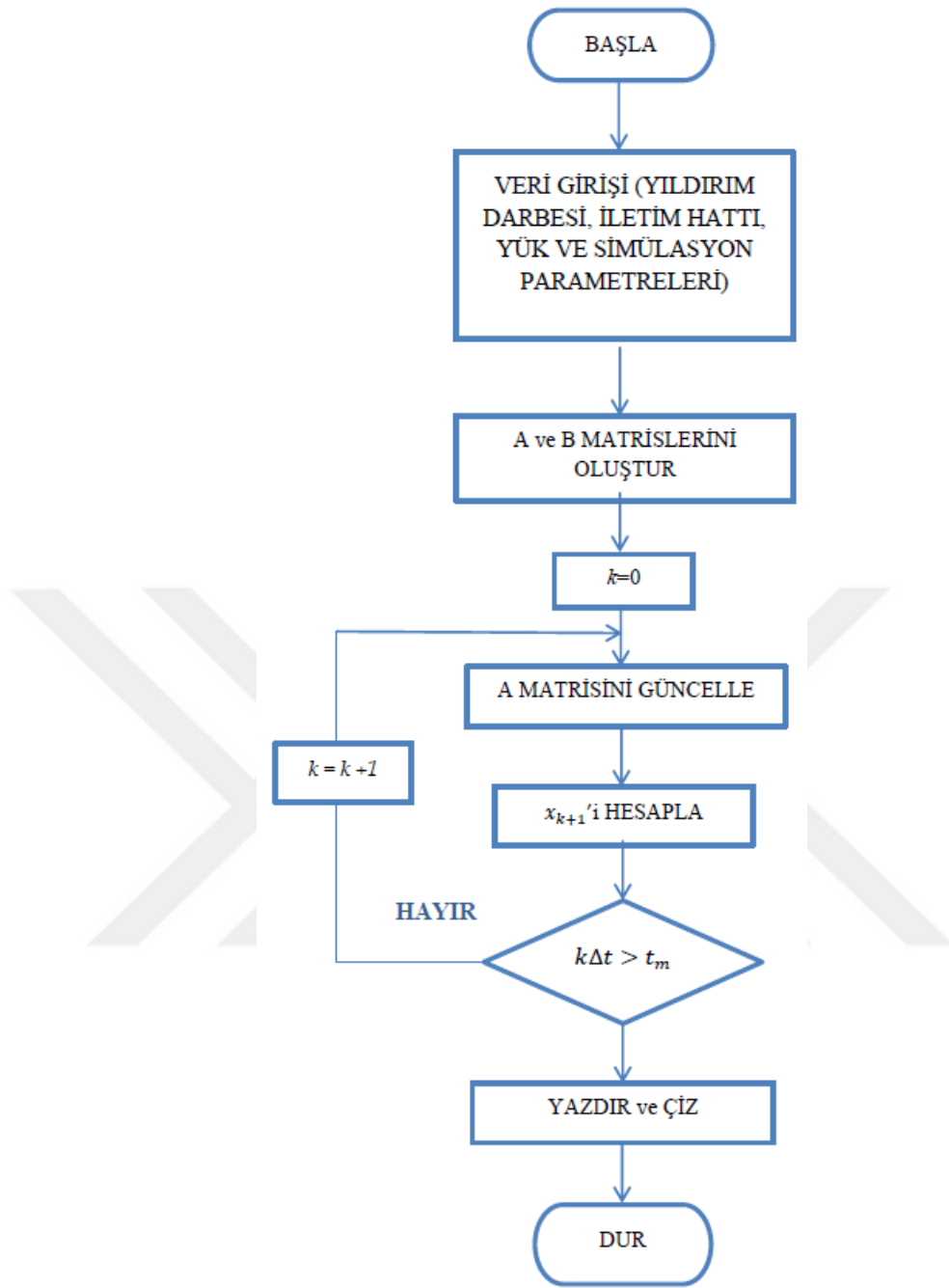
Durum denklemleri elde edildikten sonra besleme kaynağı, iletim hattı ve transformatöre ait devre elemanlarının değerleri dahil edilerek A, B ve F matrisleri oluşturulmuştur. Daha sonra denklem (4.6)'daki trapezoidal integrasyon kuralı ile her seferinde A' güncellenerek x_{k+1} için değerler hesaplanmıştır. Kayıplı iletim hattının akım ve gerilim değerleri denklem (2.63) ve denklem (2.64) kullanılarak hesaplanmıştır. Transformatör sargılarındaki akım ve gerilim değerleri, kapasitör gerilimleri ve indüktör akımları kullanılarak hesaplanır. $N=1$, $N=2$ ve $N=3$ için devrelerden elde edilen durum-uzayı denklemleri aşağıda verilmiştir. Burada N değeri transformatördeki disk (bölüm) sayısını temsil etmektedir.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (c_1 + c_2) & -c_2 \\ 0 & 0 & c_1 & c_3 \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Ls}(t) \\ i_{Ll}(t) \\ v_{C1}(t) \\ v_{C3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{Z_0}{L_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_1}{L_1} & \frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & -1 & -\frac{1}{Z_0} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{Z_0} & -\frac{1}{R_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ls}(t) \\ i_{Ll}(t) \\ v_{C1}(t) \\ v_{C3}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{Z_0}{L_s} & 0 & \frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s(t-\tau) \\ I_R(t-\tau) \\ U_s(t) \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (c_1 + c_2) & -c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_1 & (c_3 + c_4) & -c_4 \\ 0 & 0 & 0 & c_1 & c_3 & c_5 \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Ls}(t) \\ i_{L1}(t) \\ i_{L2}(t) \\ v_{C1}(t) \\ v_{C3}(t) \\ v_{C5}(t) \end{bmatrix} =
\begin{bmatrix} -\frac{Z_0}{L_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 & \frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_2}{L_2} & 0 & \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} \\ 0 & -1 & 0 & -\frac{1}{Z_0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -\frac{1}{Z_0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{Z_0} & 0 & -\frac{1}{R_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ls}(t) \\ i_{L1}(t) \\ i_{L2}(t) \\ v_{C1}(t) \\ v_{C3}(t) \\ v_{C5}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{Z_0}{L_s} & 0 & \frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s(t-\tau) \\ I_R(t-\tau) \\ U_s(t) \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (c_1 + c_2) & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_1 & (c_3 + c_4) & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_1 & c_3 & (c_5 + c_6) & -c_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_1 & c_3 & c_5 & c_7 \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Ls}(t) \\ i_{L1}(t) \\ i_{L2}(t) \\ i_{L3}(t) \\ v_{C1}(t) \\ v_{C3}(t) \\ v_{C5}(t) \\ v_{C7}(t) \end{bmatrix} =
\begin{bmatrix} -\frac{Z_0}{L_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 & 0 & \frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_2}{L_2} & 0 & 0 & \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{R_3}{L_3} & 0 & 0 & \frac{1}{L_3} & -\frac{1}{L_3} \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -\frac{1}{Z_0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -\frac{1}{Z_0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -\frac{1}{Z_0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{Z_0} & 0 & 0 & -\frac{1}{R_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ls}(t) \\ i_{L1}(t) \\ i_{L2}(t) \\ i_{L3}(t) \\ v_{C1}(t) \\ v_{C3}(t) \\ v_{C5}(t) \\ v_{C7}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{Z_0}{L_s} & 0 & \frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s(t-\tau) \\ I_R(t-\tau) \\ U_s(t) \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

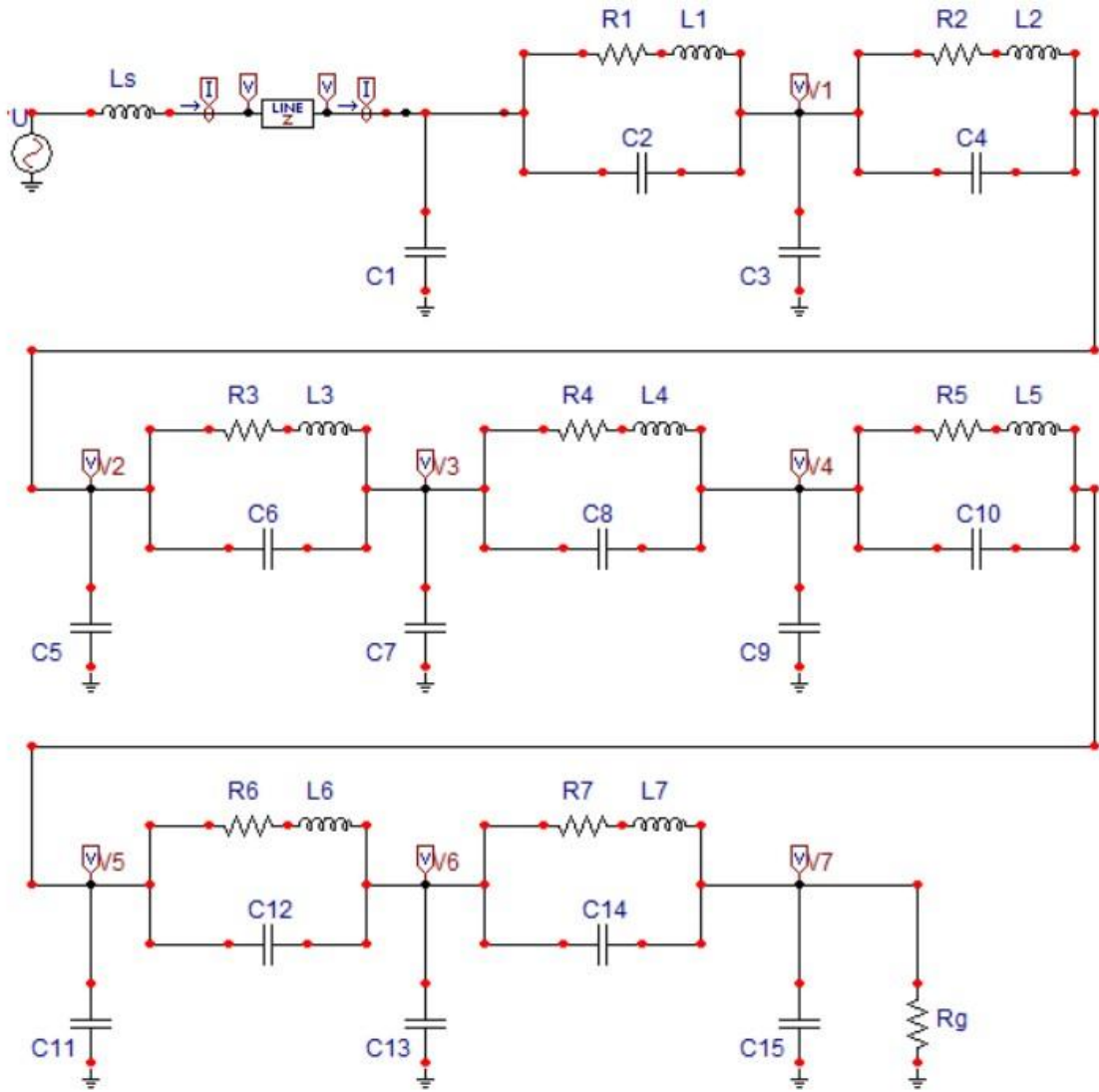
Durum-uzayı yöntemi kullanılarak yapılan çalışmanın akış diyagramı Şekil 5.2'de verilmiştir. Bu akış diyagramı tezdeki tüm uygulamalarda kullanılan algoritmayı temsil etmektedir.



Şekil 5.2: Durum-uzayı yöntemi akış şeması.

A, B ve F matrislerini oluştururken, transformatörün disk yapılı sargısında kullanılan disk sayısını (N) dikkate almak önemlidir. Denklem (5.6), denklem (5.7) ve denklem (5.8) 'den de görüleceği üzere disk sayısı arttıkça elde edilen durum denklemlerinin boyutu da artmaktadır. Çok sayıda disk olması durumunda bu denklemlerin elde edilmesi hem zaman alacak hem de denklemlerin oluşturulmasında hatalara neden olabilecektir. Bu denklemler incelendiğinde matris elemanları ve boyutları belirli bir örüntü kuralına göre değişmektedir. Bu çalışmada simülasyon için kodlar örüntü kuralı da dahil edilerek yazılmıştır. Hazırlanan

algoritma ile herhangi bir N değeri için ihtiyaç duyulan matrisler otomatik olarak elde edilmektedir. Devrede N sayıda diskten oluşan bir güç transformatörü kullanılması durumunda F ve A matrisleri $(2N+2) \times (2N+2)$, B matrisi ise $(2N+2) \times 3$ boyutlarında üretilmektedir. Buna göre, bu çalışmada kullanılan modelde disk sayısı $N=7$ olduğu için üretilen F ve A matrisleri (16×16) boyutlu, B matrisi ise (16×3) boyutludur. Örüntü kuralının yazılan kodlara entegre edilmesi işlem kolaylığı sağlamaktadır. Denklemlerdeki C_{2N-1} , C_{N+1} , R_N , L_N , L_s , Z_h ve Z_0 sırasıyla C_g , C_{tr} , R_{tr} , L_{tr} , seri endüktans, yıldırım yolu empedansı ve hattın karakteristik empedansını temsil etmektedir. $i_L(t)$ ve $V_c(t)$ sırasıyla indüktör akımları ve kapasitör gerilimleridir. Bu uygulamaya ait ATP-EMTP modeli Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3: İletim hattı-transformatör anahtarlama ATP-EMTP modeli.

Dağılık parametrelili iletim hattına ait parametreler Çizelge 5.1’de verilmiştir. İletim hattının parametre değerleri [43]’dan alınmıştır. Besleme kaynağı olarak tek fazlı $U_s(t)=220$ kV’luk bir kaynak kullanılmış ve kaynak frekansı $f=50$ Hz’dir.

Çizelge 5.1: İletim hattı parametreleri.

d	300 km
r	0.02 Ω /km
l	1.14 mH/km
c	9.8 nF/km
L_s	50 mH

Burada d iletim hattının uzunluğunu, r hattın seri direncini, l hattın indüktansını, c hattın kapasitansını ve L kaynağın indüktansını temsil etmektedir. Disk tipi sargılı güç transformatörünün yüksek frekans modelinin parametreleri Çizelge 5.2’de verilmiştir. Transformatöre ait parametreler [78]’den temin edilmiştir. Bu modelde kullanılan disk tipi sargılı güç transformatörü yedi adet diskten oluşmaktadır.

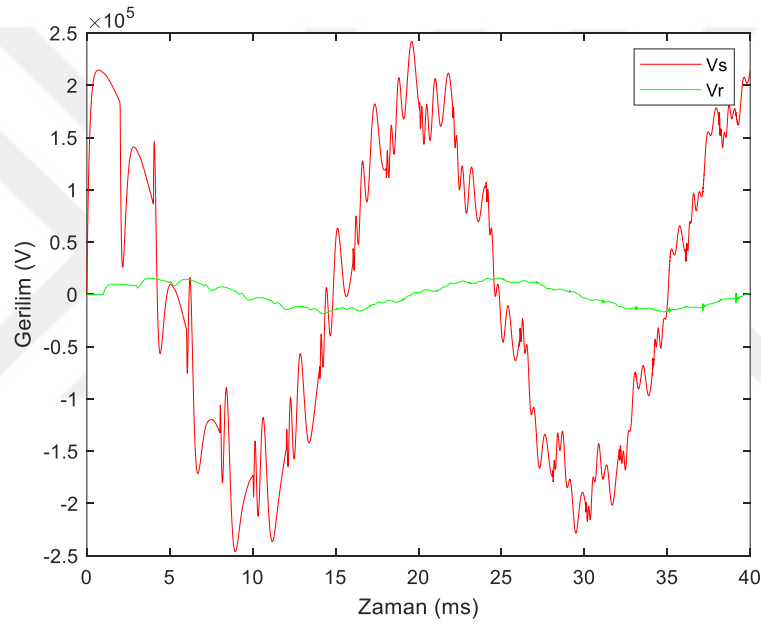
Çizelge 5.2: Güç transformatörünün parametreleri.

	Yüksek Gerilim Tarafı (Primer)	Alçak Gerilim Tarafı (Sekonder)
C_g	61.19 pF	115. 53 pF
C_{tr}	393.4 pF	127.67 pF
L_{tr}	10 μ H	10.5 μ H
R_{tr}	1 Ω	0.25 Ω
R_g	1 Ω	1 Ω
C_{HL}	89.283 pF	
N	7	

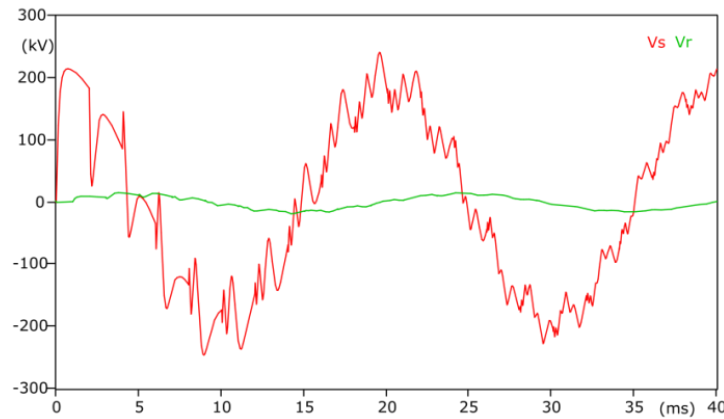
Yukarıda verilen çizelgede, yüksek gerilim sargısı ile topraklanmış tank arasındaki kapasitans C_g , diskler arasındaki kapasitans C_{tr} , her bir seri disk için endüktans L_{tr} , seri direnç R_{tr} ve sargının ucuna bağlı topraklama direnci R_g olarak gösterilir. Yüksek gerilim ve alçak

gerilim sargıları arasındaki kapasitans C_{HL} ve transformatörün yüksek gerilim tarafı sargısındaki disk sayısı ise N 'dir. Modelde güç transformatörünün her bir disk ardışık bağlı çizilmiştir.

Bu uygulamaya ait geçim rejim çalışmaları için Şekil 5.1 ve Şekil 5.3 baz alınarak yapılmıştır. Burada iletim hattına enerji verme anı baz alınıp, iletim hattının ve güç transformatörünün primer tarafındaki disk tipi sargılarının geçici rejimdeki tepkileri analiz edilmiştir. İletim hattının gönderici ve alıcı uçlarında durum-uzay yöntemiyle elde edilen gerilim-zaman grafiği Şekil 5.4'de, ATP-EMTP modelinden elde edilen gerilim-zaman grafiği Şekil 5.5'te verilmiştir. Grafiklerde verilen V_s ve V_r sırasıyla, hattın gönderici ucu ve alıcı ucundaki gerilimlerdir.

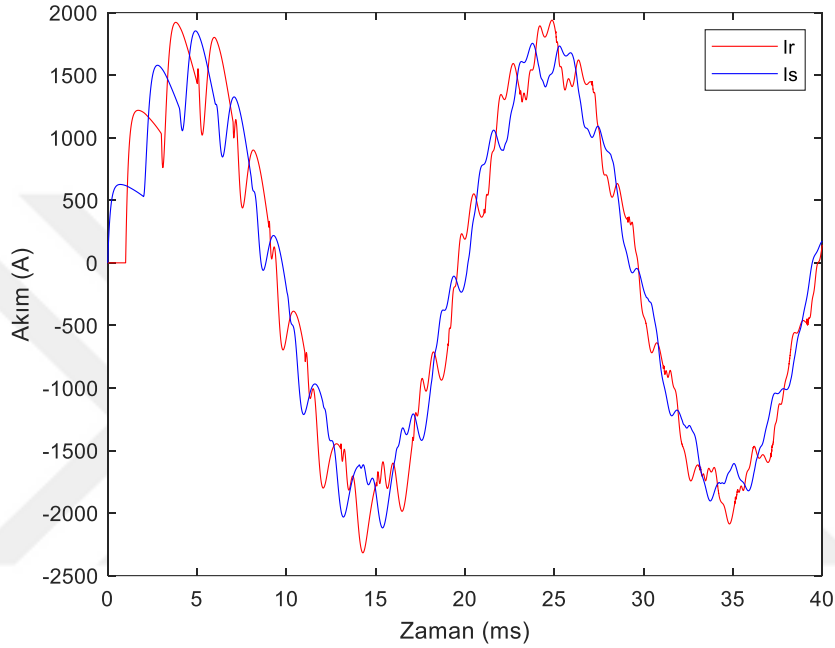


Şekil 5.4: Durum-uzay yöntemi kullanılarak iletim hattının gönderici ucu ve alıcı ucu gerilim dalga şekilleri.

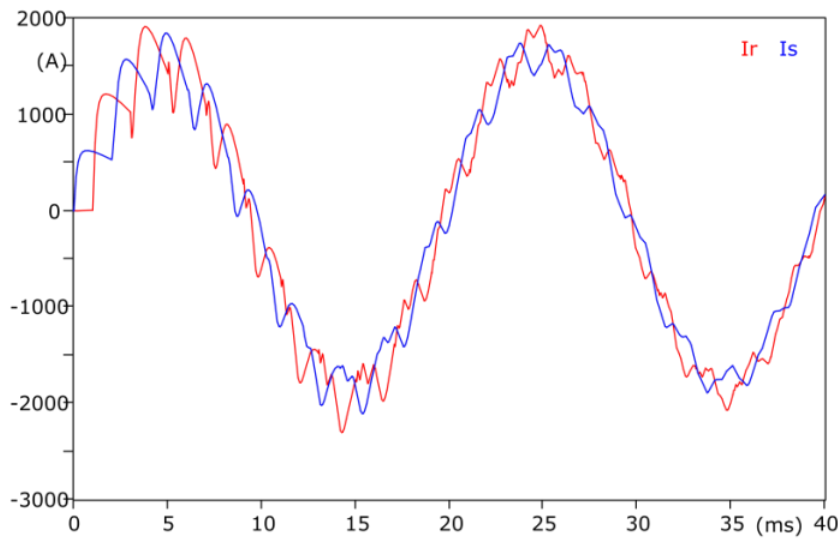


Şekil 5.5: ATP-EMTP kullanılarak iletim hattının gönderici ucu ve alıcı ucu gerilim dalga şekilleri.

Yukarıdaki şekillerde dalganın iletim hattının alıcı ucuna ulaşması $\tau = 1$ ms'lik bir gecikmeden sonra gerçekleşir. Alıcı uçtan yansıyan dalganın gönderici uca geri dönmesi için 2 ms gerekir. Gecikme ($\tau = d\sqrt{l/c}$) formülü kullanılarak hesaplanır. Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te gösterilen dalga şekilleri ve gerilim seviyeleri, durum-uzayı ve ATP-EMTP yöntemleri arasında güçlü bir uyum olduğunu göstermektedir. İletim hattının gönderici ve alıcı uçlarında durum-uzayı yöntemiyle ve ATP-EMTP yöntemiyle elde edilen akım-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

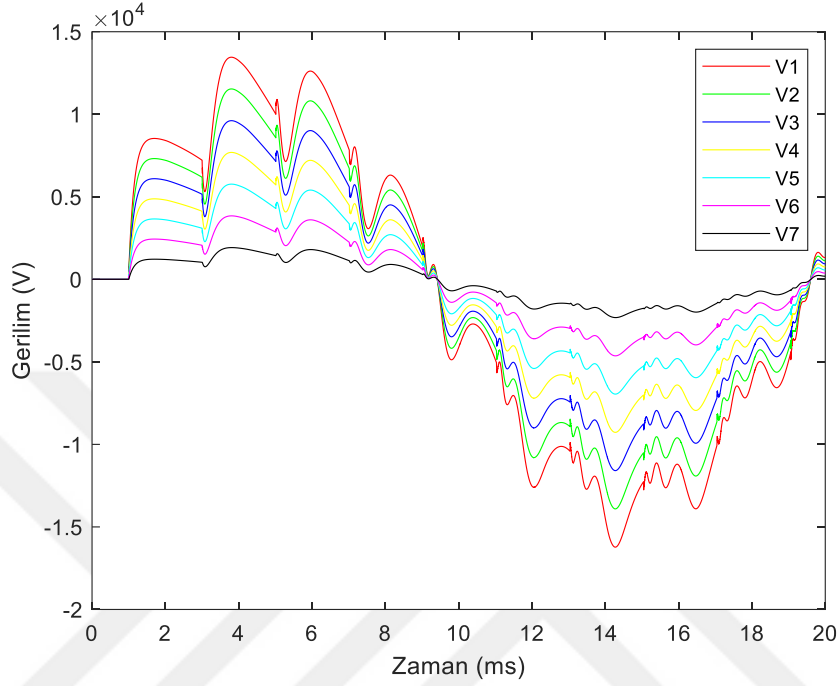


Şekil 5.6: Durum-uzayı yöntemi kullanılarak iletim hattının gönderici ucu ve alıcı ucu akım dalga şekilleri.



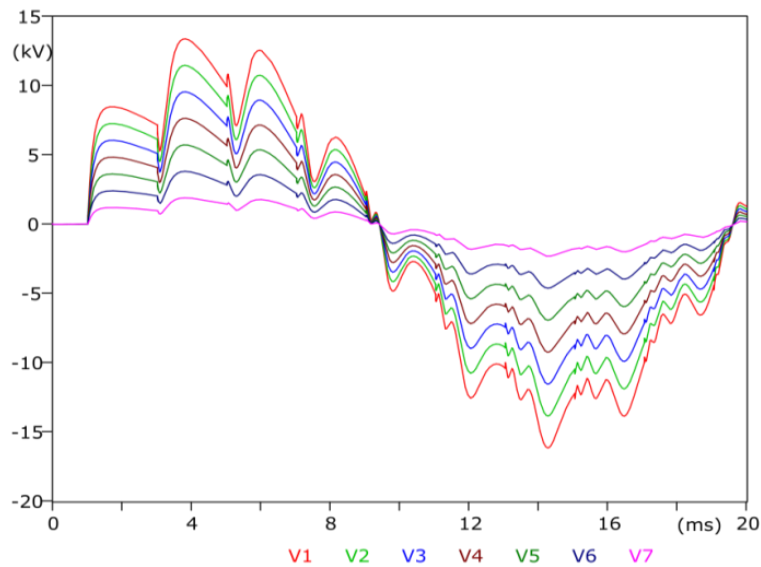
Şekil 5.7: ATP-EMTP kullanılarak iletim hattının gönderici ucu ve alıcı ucu akım dalga şekilleri.

Yukarıdaki şekillerde verilen akım dalga formlarında I_s ve I_r sırasıyla, iletim hattının gönderici ucu ve alıcı ucuna ait akımları temsil etmektedir. İletim hattının enerjilendirilmesi anında disk tipi sargılı güç transformatöründeki disklerin gerilim dalga formları aşağıda verilmiştir.



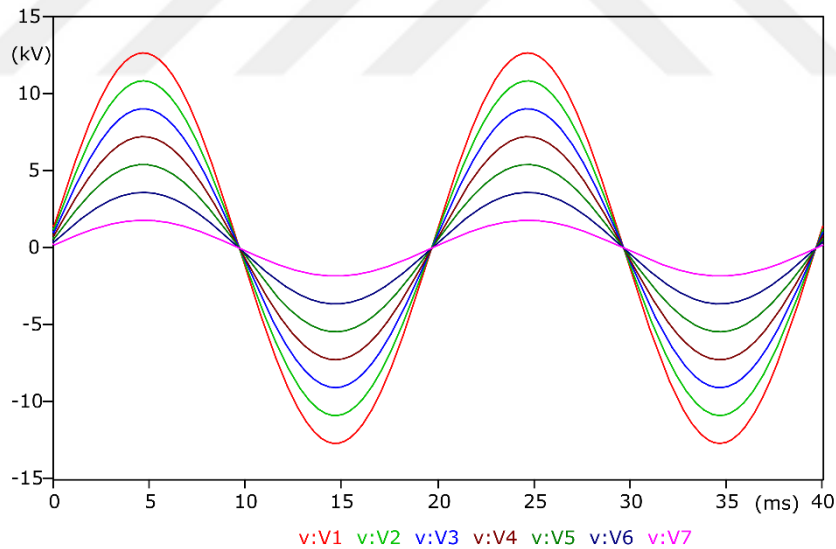
Şekil 5.8: Durum-uzayı yöntemi kullanılarak modellenen transformatörün disk sargıları boyunca gerilim dağılımı.

Şekillerde verilen V_1 birinci diskin gerilim dalga formunu temsil ederken, V_7 yedinci diskin dalga formunu temsil etmektedir.



Şekil 5.9: ATP-EMTP kullanılarak modellenen transformatörün disk sargıları boyunca gerilim dağılımı.

Yukarıda verilen şekiller incelendiğinde durum-uzayı metodu ile elde edilen gerilim-akım dalga formları ile ATP-EMTP modellerinden elde edilen dalga formları birbiriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Tüm grafiklerde hattın alıcı ucuna dalganın yaklaşık 1 ms sonra vardığı tespit edilmiştir. İletim hattının gönderici ucu ile alıcı ucu arasındaki ciddi gerilim farkının temel sebebi; güç transformatörünün yüksek gerilim tarafının nötrünün topraklama direnci ile alakalı olmasıdır. Bu modelde seçilen direnç değeri düşük olduğu için iki terminal arasında büyük bir gerilim farkı oluşmuştur. Dolayısıyla disklerin maruz kaldığı gerilim seviyelerinin de düşük olmasının nedeni yine topraklama direnç değeridir. Akım dalga formlarının grafiği incelendiğinde akım değerlerinin yüksek olması yine nötr topraklama direnci ile ilgili olduğu tespit edilmiştir. Grafiklere bakıldığında 2000 A seviyelerine kadar akım değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Daha yüksek bir direnç değeri seçilmesi durumunda gönderici ve alıcı uçlardaki akım değerleri daha düşük olacaktır. Hem akım hem gerilim dalga formlarına bakıldığında kaynağın saf sinüs dalga formundan farklı olarak bozulmalar olduğu görülmektedir. Bu durum hattın geçici rejim analizinde karşılaşılan bir durumdur. Kalıcı rejimde ise durum daha farklıdır ve dalga formları daha stabil ve sinüsoidal forma daha yakındır. Bu duruma ait görsel Şekil 5.10’da verilmiştir.

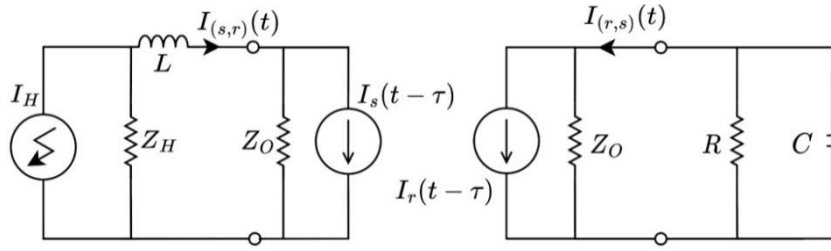


Şekil 5.10: Transformatörün disk sargıları boyunca kalıcı rejimdeki gerilim dağılımı.

5.2 Yıldırım Darbe Uygulaması ve Analizi

Bu uygulamada, dağıtık parametrelili bir iletim hattının sonuna RC yükü bağlanmıştır. RC yüklü iletim hattının bir faz iletkenine yıldırım düşmesi durumu modellenmiştir. Uygulamaya ait eşdeğer devre Şekil 5.11’de verilmiştir. Burada ilk uygulamadan farklı

olarak hat sonuna bir yük bağlanmış ve kaynak olarak Heidler yıldırım darbesi modeli kullanılmıştır.



Şekil 5.11: Yıldırım darbesine maruz kalan iletim hattının eşdeğer devresi.

Yukarıda verilen eşdeğer devreden yola çıkılarak graf teorisi kullanılarak indüktör akımlarının ve kapasitör gerilimlerinin denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemler aşağıda verilmiştir.

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{Z_H}{L} I_H + \frac{Z_0}{L} I_s(t-\tau) - \left(\frac{Z_0}{L} + \frac{Z_H}{L} \right) i_L(t) \quad (5.9)$$

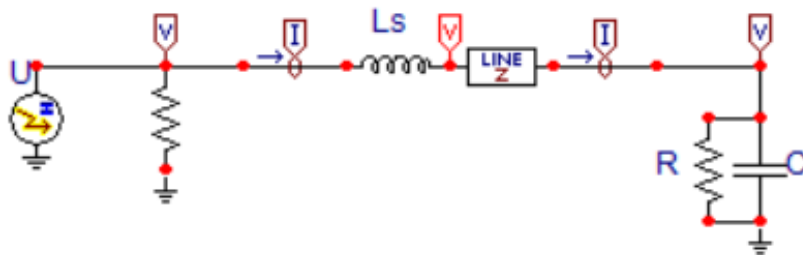
$$\frac{dv_C(t)}{dt} = -\frac{I_r(t-\tau)}{C} - \frac{v_C(t)}{C} \left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{R} \right) \quad (5.10)$$

Bu denklemler kapasitör gerilimleri ve indüktör akımları durum değişkeni olarak seçilir ve durum-uzay formuna dönüştürülür.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{Z_0 + Z_H}{L} \right) & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{R} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{Z_H}{L} & \frac{Z_0}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_H \\ I_s(t-\tau) \\ I_r(t-\tau) \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Denklem (5.11)'de verilen durum-uzay denklemleri her zaman adımında x_{k+1} için trapezoidal kural uygulanarak iteratif olarak çözülmüştür.

Şekil 5.11'de verilen eşdeğer devrenin ATP-EMTP modeli Şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.12: Yıldırım darbesine maruz kalan iletim hattının ATP-EMTP modeli.

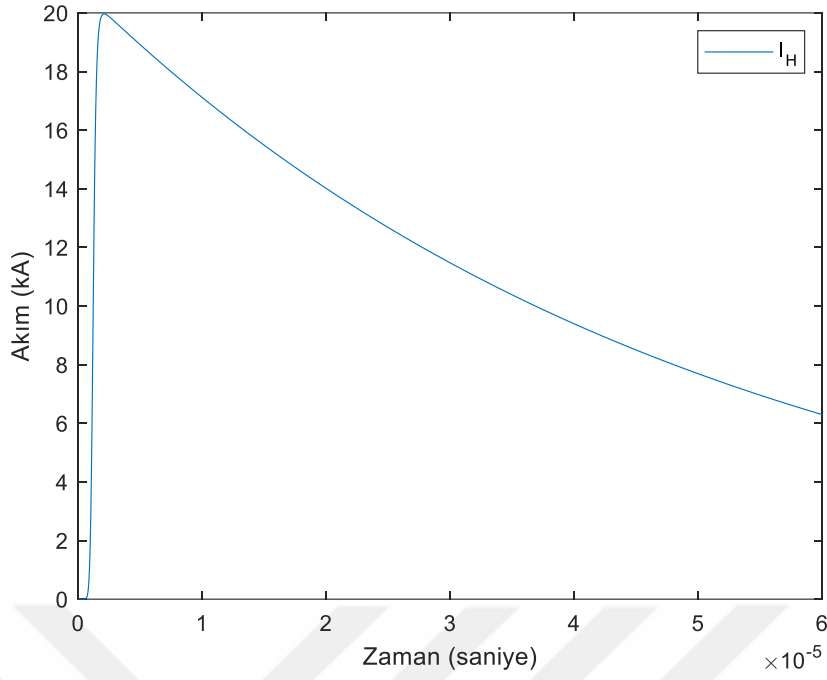
Yukarıda verilen eşdeğer devre ve ATP-EMTP modelinde kullanılan Heidler yıldırım darbesi ve yük parametreleri Çizelge 5.3'te verilmiştir. Yukarıda verilen devrelere, geçici rejim simülasyonlarının doğru sonuç verebilmesi adına yıldırım yolu empedansı olarak adlandırılan Z_H empedansı dahil edilmiştir.

Çizelge 5.3: Heidler yıldırım darbesi ve yük parametreleri.

$I_{\max}$	20 kA
τ_1	1.2 μs
τ_2	50 μs
n	10
Z_H	400 Ω
R	1 k Ω
C	0.1 μF

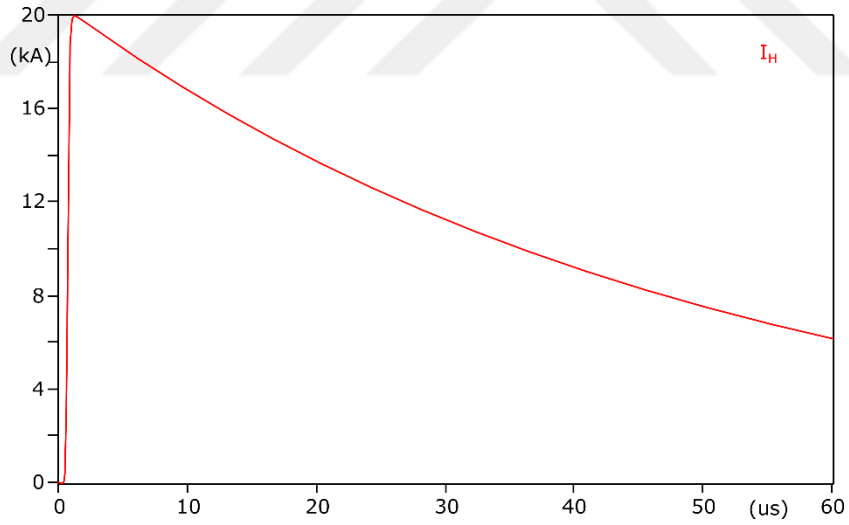
Yukarıda verilen çizelge R ve C hat sonundaki rezistif ve kapasitif yükleri temsil ederken diğer parametreler Heidler yıldırım darbesini temsil etmektedir. Bu uygulamada kullanılan iletim hattı parametreleri ise Çizelge 5.1'deki parametrelerle aynı olduğundan bu bölümde hat parametreleri yeni bir çizelge olarak eklenmemiştir.

Durum-uzayı yöntemi kullanılarak elde edilecek olan akım-gerilim profillerinin doğru olabilmesi için öncelikle Heidler yıldırım darbesinin MATLAB'ta doğru kodlanması gerekmektedir. Heidller modeline ait denklemler ile Çizelge 5.3'teki parametreler kullanılarak elde edilen Heidler yıldırım darbesi akım-zaman grafiği Şekil 5.13'te verilmiştir.



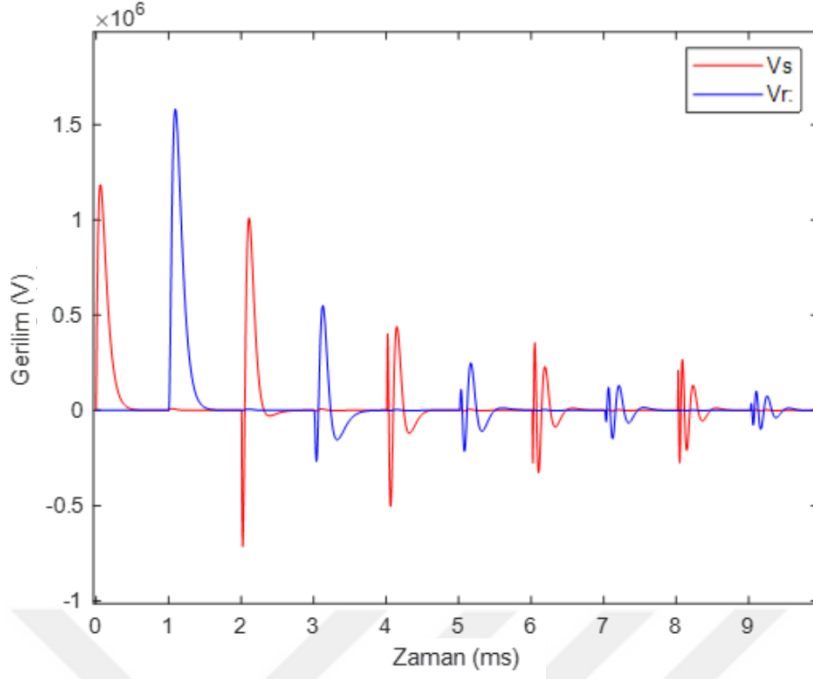
Şekil 5.13: Kodlanarak elde edilen Heidler yıldırım darbesi grafiği.

ATP-EMTP’de çizilen Heidler yıldırım darbesinin sadece yıldırım yolu empedansından oluşması durumunda elde edilen grafik aşağıda verilmiştir.

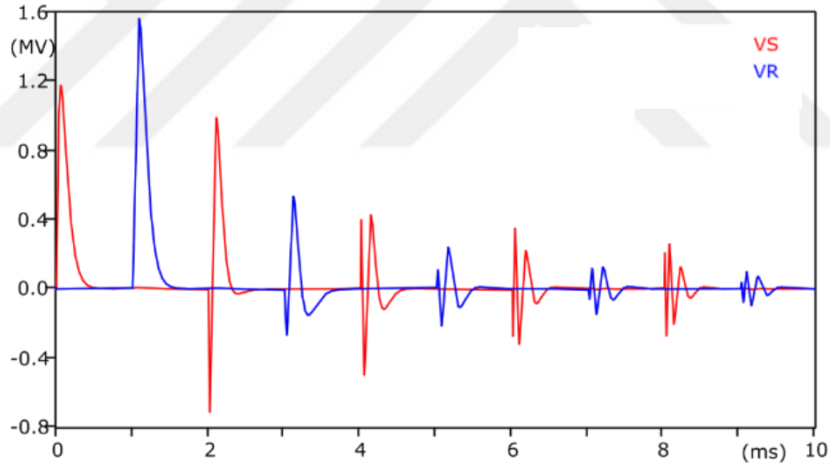


Şekil 5.14: ATP-EMTP kullanılarak elde edilen Heidler yıldırım darbesi grafiği.

Durum-uzay yöntemi ve ATP-EMTP simülasyonundan elde edilen gerilim-zaman grafikleri Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da verilmiştir. Grafiklerde yıldırım düştüğü noktanın (gönderici uç) gerilimi V_s , hat sonundaki gerilim (alıcı uç) ise V_r ile temsil edilmiştir.

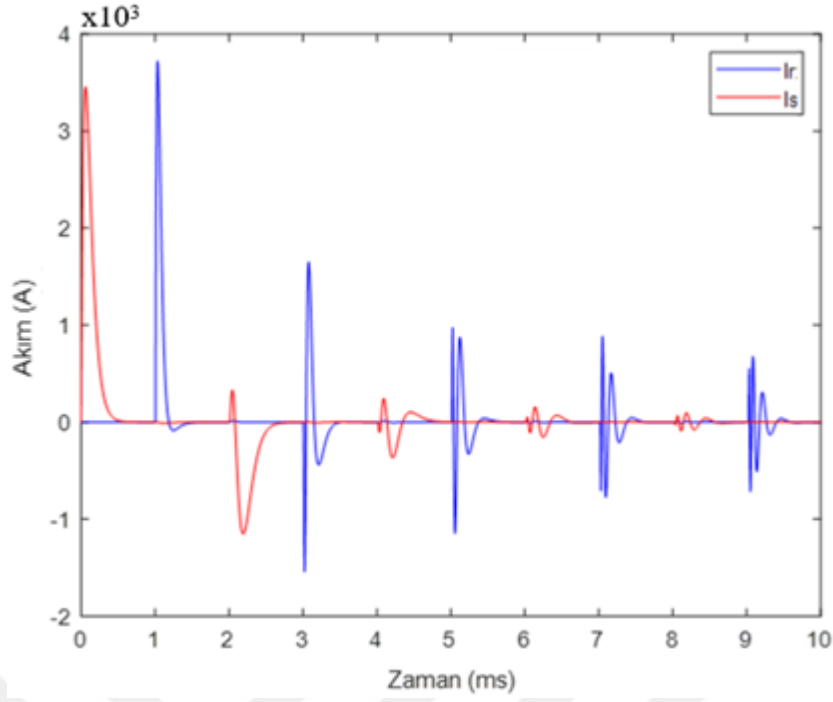


Şekil 5.15: Durum-uzayı yöntemi kullanılarak elde edilen yıldırım darbeli iletim hattının gönderici ve alıcı ucu gerilim dalga şekilleri.

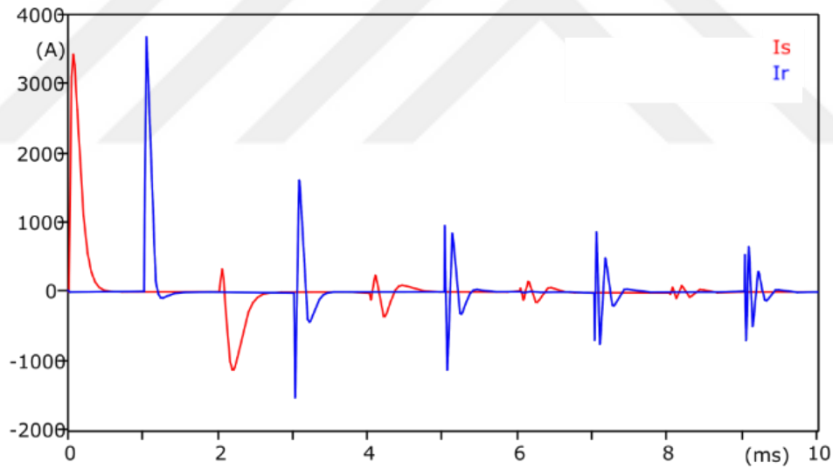


Şekil 5.16: ATP-EMTP kullanılarak elde edilen yıldırım darbeli iletim hattının gönderici ve alıcı ucu gerilim dalga şekilleri.

Aşağıdaki şekillerde durum-uzayı yöntemi ve ATP-EMTP programından elde edilen akım-zaman grafikleri verilmiştir. Yıldırımın düştüğü noktadaki (gönderici uç) akım I_s , hat sonundaki (alıcı uç) akım I_r ile temsil edilmiştir.



Şekil 5.17: Durum-uzayı kullanılarak elde edilen yıldırım darbeli iletim hattının gönderici ve alıcı ucu akım dalga şekilleri.

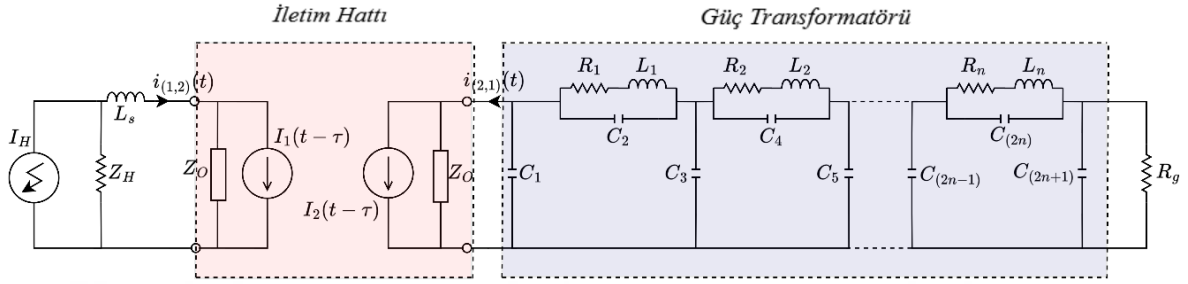


Şekil 5.18: ATP-EMTP kullanılarak elde edilen yıldırım darbeli iletim hattının gönderici ve alıcı ucu akım dalga şekilleri.

Yıldırım darbesine maruz kalmış RC yüklü tek fazlı bir iletim hattına ait akım-gerilim dalga formları incelendiğinde her iki yöntemin sonuçlarının birbirini uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Yıldırım darbesinden sonra oluşan geçici rejimlerde, iletim hattının hem gönderici hem de alıcı ucunda MV seviyelerinde aşırı gerilim yükselmeleri ve kA seviyelerinde aşırı akım yükselmeleri olmuştur. Bu durum iletim hattı ve diğer güç sistemi koruma elemanları için istenmeyen bir durumdur. Koruma elemanlarının devreye girmemesi durumunda güç sistemi ciddi hasara uğrayabilir ve bu da çeşitli arızalara sebep olarak enerji kesintisine yol açabilir.

5.3 İletim Hattı-Transformatör Yıldırım Darbe Uygulaması ve Analizi

Bu uygulamada, dağıtık parametrelili tek fazlı iletim hattının sonuna disk tipi sargıdan oluşan bir güç transformatörünün yüksek gerilim sargısının bir fazı bağlanmış ve iletim hattının bir faz iletkenine yıldırım düşmüştür. Uygulamaya ait eşdeğer devre Şekil 5.19'da verilmiştir.



Şekil 5.19: İletim hattı-transformatör yıldırım darbesi eşdeğer devresi.

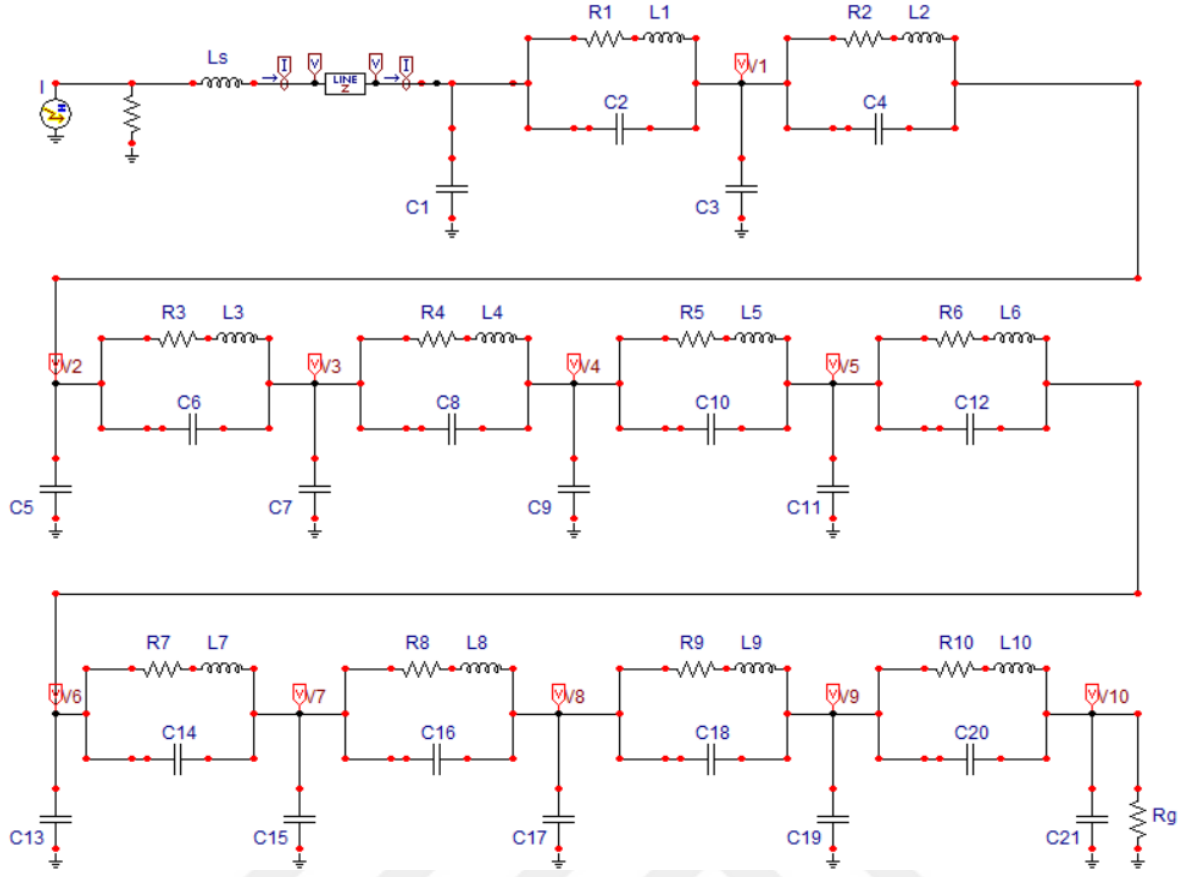
Uygulamada kullanılan transformatör $N=10$ adet diskten oluştuğu için F ve A matrisleri $(22) \times (22)$ boyutlarında, B matrisi ise $(22) \times (3)$ boyutlarında üretilir. Bu tipteki büyük boyutlu matrislerin hesaplanması oldukça zaman alıcıdır. Modele ait durum denklemlerine bakıldığında yine belli bir örüntüye göre denklemlerin oluştuğu tespit edilmiştir. Bu modelin $N=1$, $N=2$ ve $N=3$ sayıda diskten oluşması durumunda elde edilen formüller sırasıyla denklem (5.12)'de, denklem (5.13)'te ve denklem (5.14)'te verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (c_1 + c_2) & -c_2 \\ 0 & 0 & c_2 & (-c_2 - c_3) \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{L_s}(t) \\ i_{L_1}(t) \\ v_{C_1}(t) \\ v_{C_3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{Z_0 + Z_H}{L_s}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_1}{L_1} & \frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} \\ 0 & -1 & -\frac{1}{Z_0} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{Z_0} & -\frac{1}{R_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L_s}(t) \\ i_{L_1}(t) \\ v_{C_1}(t) \\ v_{C_3}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{Z_0}{L_s} & 0 & \frac{Z_H}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(t-\tau) \\ I_2(t-\tau) \\ I_H(t) \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (c_1+c_2) & -c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_1 & (c_3+c_4) & -c_4 \\ 0 & 0 & 0 & c_1 & c_3 & c_5 \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Ls}(t) \\ i_{L1}(t) \\ i_{L2}(t) \\ v_{C1}(t) \\ v_{C3}(t) \\ v_{C5}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{Z_0+Z_H}{L_s}\right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 & \frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_2}{L_2} & 0 & \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} \\ 0 & -1 & 0 & -\frac{1}{Z_0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -\frac{1}{Z_0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{Z_0} & 0 & -\frac{1}{R_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ls}(t) \\ i_{L1}(t) \\ i_{L2}(t) \\ v_{C1}(t) \\ v_{C3}(t) \\ v_{C5}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{Z_0}{L_s} & 0 & \frac{Z_H}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(t-\tau) \\ I_2(t-\tau) \\ I_H(t) \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (c_1+c_2) & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_1 & (c_3+c_4) & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_1 & c_3 & (c_4+c_5) & -c_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_1 & c_3 & c_5 & c_7 \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Ls}(t) \\ i_{L1}(t) \\ i_{L2}(t) \\ i_{L3}(t) \\ v_{C1}(t) \\ v_{C3}(t) \\ v_{C5}(t) \\ v_{C7}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{Z_0+Z_H}{L_s}\right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 & 0 & \frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_2}{L_2} & 0 & 0 & \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{R_3}{L_3} & 0 & 0 & \frac{1}{L_3} & -\frac{1}{L_3} \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -\frac{1}{Z_0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -\frac{1}{Z_0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -\frac{1}{Z_0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{Z_0} & 0 & 0 & -\frac{1}{R_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ls}(t) \\ i_{L1}(t) \\ i_{L2}(t) \\ i_{L3}(t) \\ v_{C1}(t) \\ v_{C3}(t) \\ v_{C5}(t) \\ v_{C7}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{Z_0}{L_s} & 0 & \frac{Z_H}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(t-\tau) \\ I_2(t-\tau) \\ I_H(t) \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

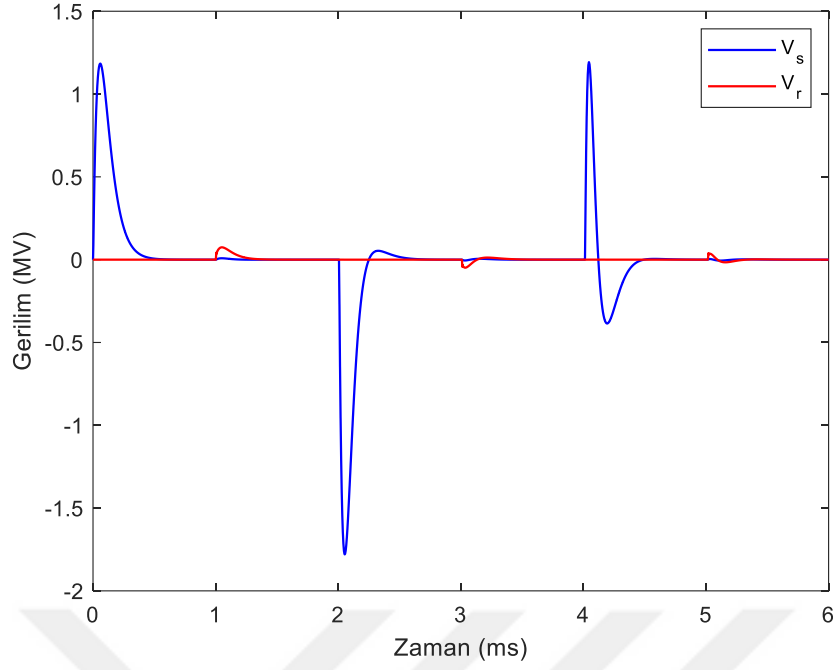
Bu uygulamaya ait eşdeğer devrenin ATP-EMTP’de çizilen modeli Şekil 5.20’de verilmiştir.



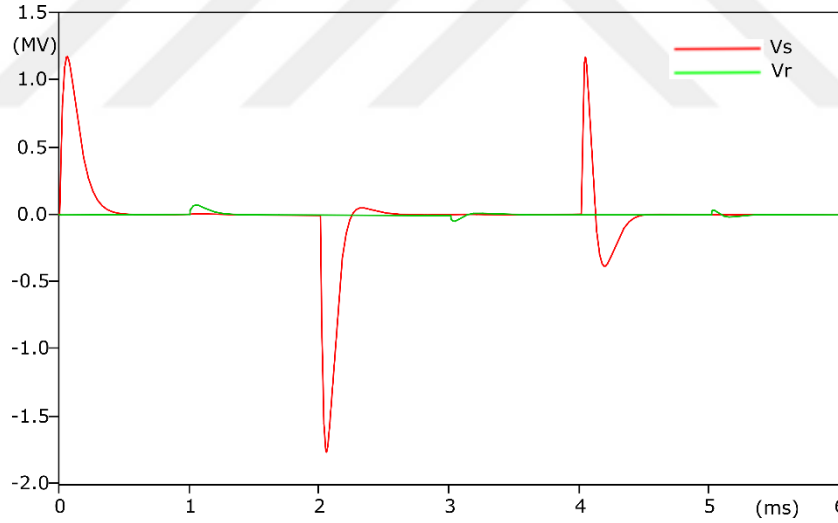
Şekil 5.20: İletim hattı-transformatör yıldırım darbesi ATP-EMTP modeli.

Yukarıda verilen eşdeğer devrede ve ATP-EMTP modelinde kullanılan Heidler yıldırım darbesi modeli, dağıtık parametrelili iletim hattı modeli ve disk tipi sargıdan oluşan güç transformatörünün yüksek frekans modeli parametreleri için Çizelge 5.1, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te verilen değerler kullanılmıştır. Bu uygulamada kullanılan transformatörün primer tarafındaki disk tipi sargısı Şekil 5.20'de verilen ATP-EMTP modelinden de anlaşılacağı üzere diğer modelden farklı olarak 10 adet diskten oluşmaktadır.

Uygulamaya ait geçim rejim analizleri için Şekil 5.19 ve Şekil 5.20 baz alınarak yapılmıştır. Durum-uzayı yöntemi ve ATP-EMTP simülasyonundan elde edilen gerilim profilleri aşağıda sırasıyla verilmiştir.



Şekil 5.21: Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen iletim hattının gönderici ucu ve alıcı ucu gerilim profili.

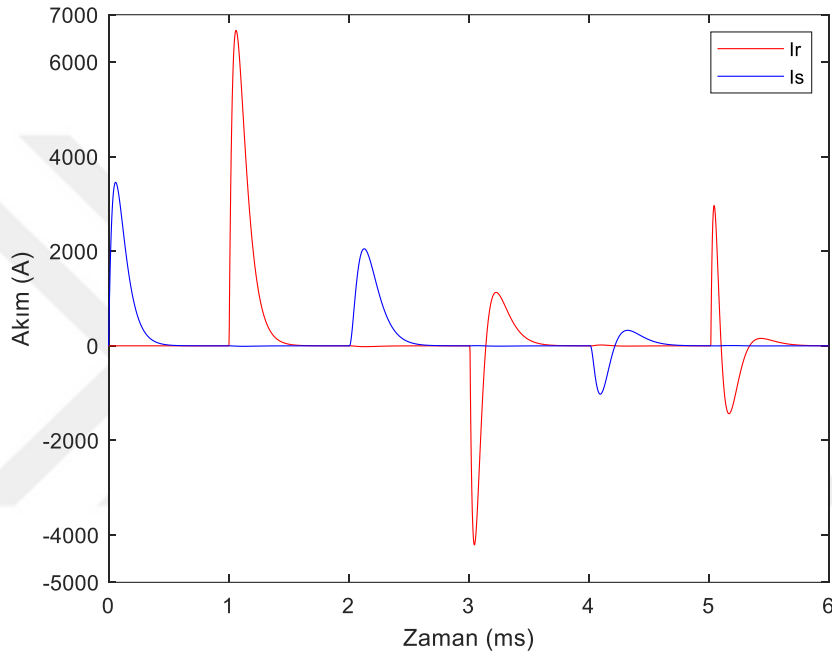


Şekil 5.22: ATP-EMTP yöntemiyle elde edilen iletim hattının gönderici ucu ve alıcı ucu gerilim profili.

$t=0$ ms'de, yıldırım darbesinin iletim hattının gönderici ucunda yaklaşık 1,2 MV'a ulaşan keskin bir gerilim tepe noktası oluşturur ve bunu dalga yansımaları nedeniyle $t=2$ ms'de önemli bir negatif tepe noktası (-1,8 MV) izler. V_s ve V_r arasındaki gecikme, hat boyunca dalga yayılma süresini ortaya koyar ve V_r , zayıflama ve enerji dağılımı nedeniyle daha düşük genlikli tepkiler sergiler. Yıldırım dalgası iletim hattının alıcı ucuna yaklaşık olarak $\tau=1$ ms'lik bir gecikmeyle ulaşır. Hattaki bu gecikme, hattın uzunluğunun karakteristik

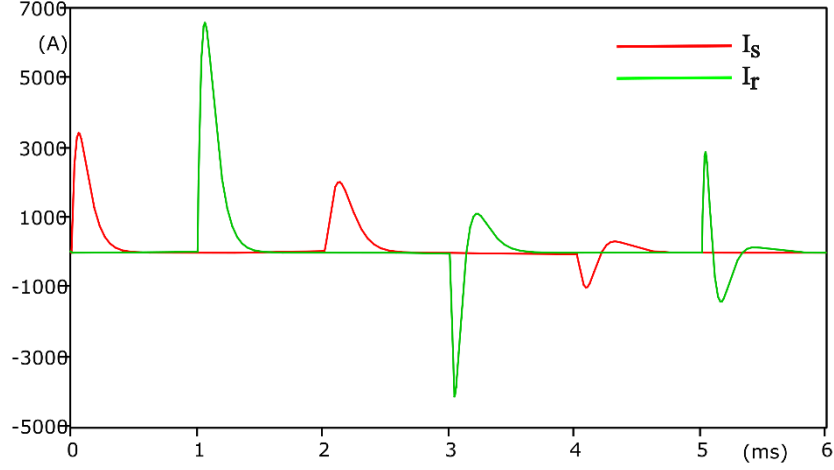
empedansa bölünmesiyle hesaplanır. Alıcı uç gerilimi, gönderici uç gerilimine kıyasla önemli bir zayıflama göstererek iletim hattının kayıplı yapısını ve dağıtılmış parametrelerini vurgular. V_s 'de $t=4$ ms'de ikincil bir yüksek genlikli geçici durum, sistemdeki potansiyel rezonans veya çoklu yansıma etkilerini gösterir. Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'de verilen dalga şekilleri ve gerilim değerlerinin birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen iletim hattı gönderici ucu (I_s) ve alıcı ucu (I_r) akım-zaman grafikleri Şekil 5.23'te, ATP-EMTP modelinin akım-zaman grafiği Şekil 5.24'te verilmiştir.



Şekil 5.23: Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen iletim hattının gönderici ucu ve alıcı ucu akım profili.

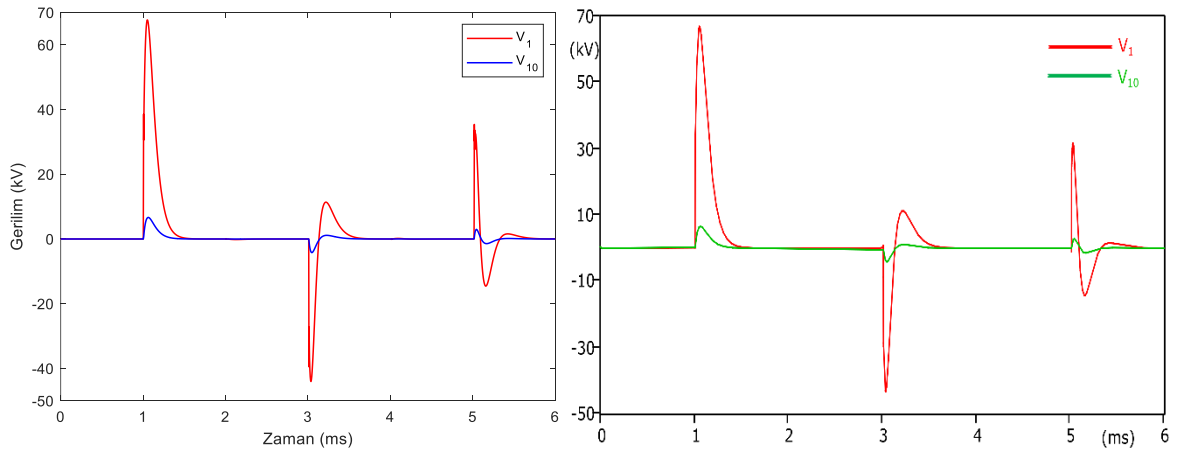
İletim hattının gönderici ucuna bir yıldırım darbesinin düşmesi I_s 'de ani bir yükselmeye neden olur. Gönderici uçtaki akım, yıldırım çarpmasının ardından keskin bir şekilde artarak yaklaşık 3,5 kA'lık bir başlangıç tepe noktasına ulaşır. Buna karşılık, alıcı uçtaki akım önemli ölçüde daha yüksek genlikler gösterir ve ilk tepe noktası yaklaşık 6,6 kA'e ulaşır. Bu fark, yıldırım darbesinin getirdiği yüksek frekanslı enerjinin neden olduğu geçici etkileri temsil eder. İlk tepe noktası, darbenin hızlı yükselme süresini ve sistemin bu yüksek enerjili bozulmaya verdiği tepkiyi yansıtır. Hem I_s hem de I_r 'de iletim hattı boyunca yansıma ve sönümlenme etkilerinin varlığına işaret eden çoklu tepe ve çukurlar gözlemlenir. İletim hattı ve transformatör arasındaki empedans farkı bazı dalgaların geri yansımalarına neden olarak her iki uçta da gözlemlenen geçici salınımlara yol açmaktadır. İlk birkaç milisaniye boyunca yüksek frekanslı geçici salınımlar hakimdir.



Şekil 5.24: ATP-EMTP yöntemiyle elde edilen iletim hattının gönderici ucu ve alıcı ucu akım profili.

Zamanla bu geçici akımların genlikleri azalır ve sistem daha kararlı bir duruma yaklaşarak hattın sönümleme mekanizmalarının etkinliğini gösterir. Yıldırım darbeleri tipik olarak geniş bir frekans spektrumuna sahiptir ve grafikte gözlemlenen keskin yükselişler ve sönümlenmiş salınımlar, transmisyonu yansıtır.

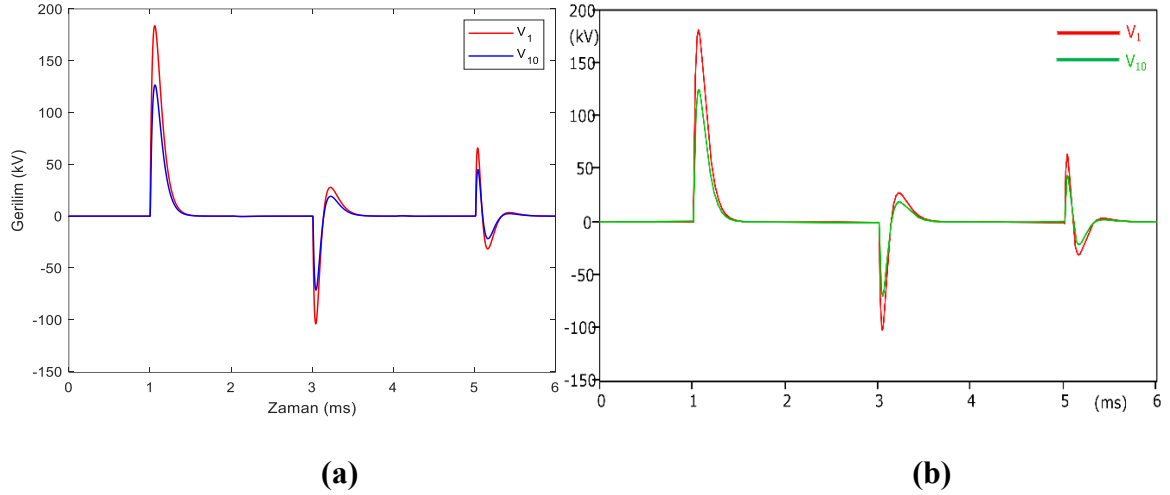
Gerilim-akım profilleri elde edilirken güç transformatorünün yüksek gerilim tarafının nötr topraklama direnci $R_g=1 \Omega$ olarak seçilmiştir. Bu direnç değerinin artması durumunda disklerin maruz kaldığı gerilim seviyesi değişir. Farklı topraklama dirençleri (R_g) için V_1 ve V_{10} gerilim dalga formları Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da verilmiştir.



(a)

(b)

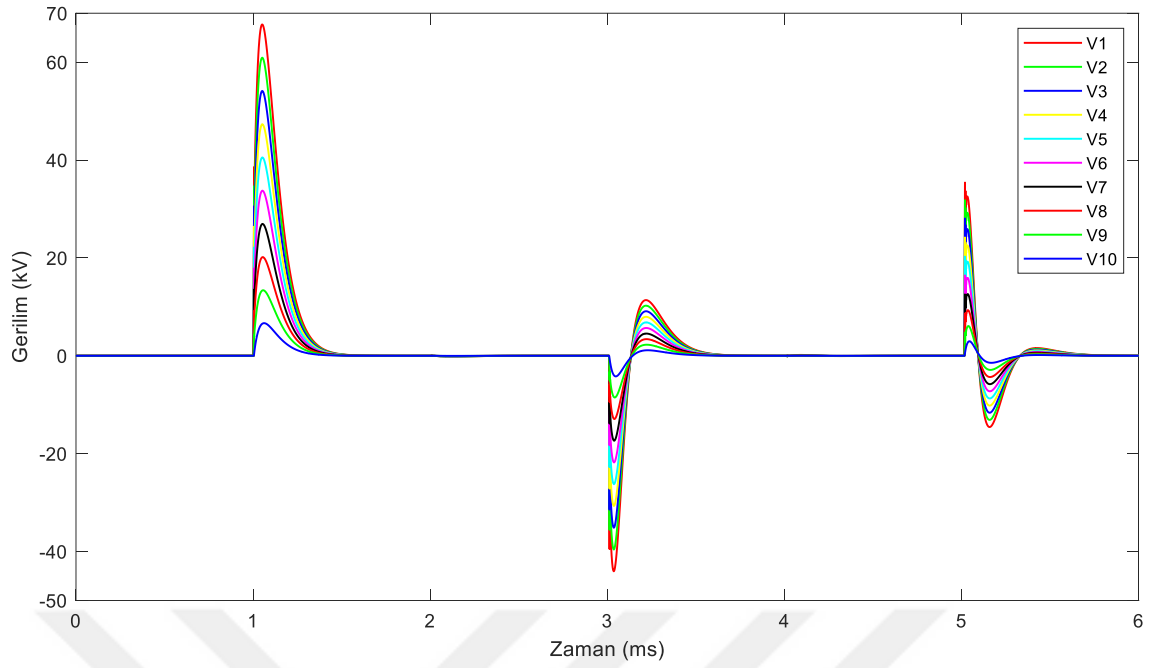
Şekil 5.25: $R_g=1 \Omega$ için V_1 ve V_{10} gerilim dalga şekilleri (a) Durum-uzayı yöntemi, (b) ATP-EMTP simülasyonları.



Şekil 5.26: $R_g = 20 \, \Omega$ için V_1 ve V_{10} gerilim dalga şekilleri (a) Durum-uzayı yöntemi, (b) ATP-EMTP simülasyonları.

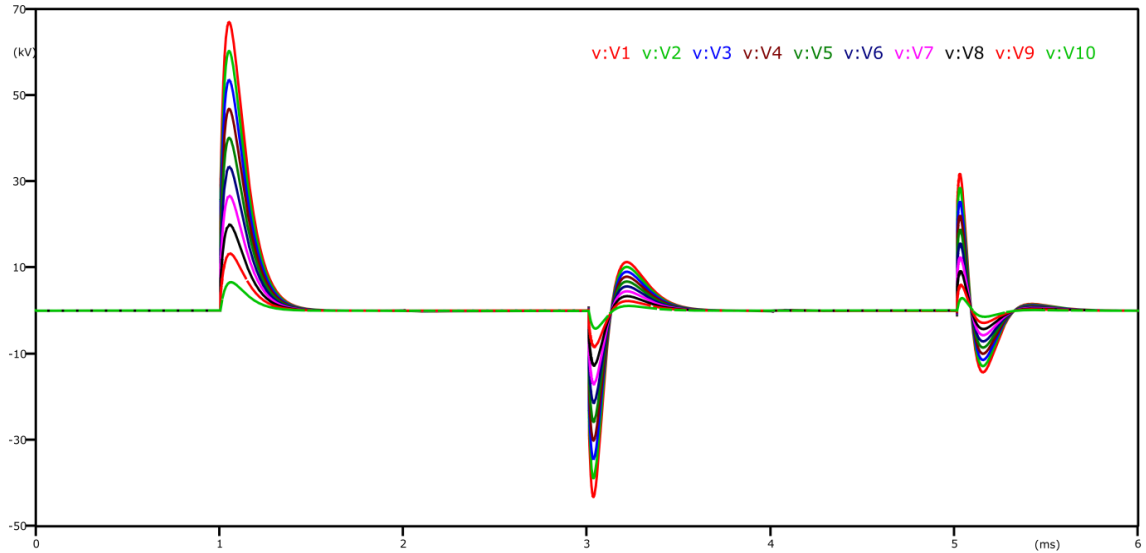
V_1 gerilimi 1. disk üzerindeki sargı gerilimini temsil ederken, V_{10} gerilimi 10. disk üzerindeki sargı gerilimini temsil eder. Grafikler incelendiğinde transformatörün nötr topraklı yüksek gerilim tarafının V_1 ve V_{10} arasındaki gerilim farkı açıkça görülmektedir. Transformatör nötr topraklama direnç değeri arttığında V_1 ve V_{10} gerilim değerleri de artmaktadır. Topraklama direncindeki değişim ilk disk ve son diskin tepe gerilim değerinde yaklaşık 118 kV'luk bir artışa neden olmuştur.

Disk sargı tipine sahip güç transformatörünün her bir diski için gerilim-zaman grafikleri Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'de sunulmuştur. Durum-uzayı yöntemi için simülasyon süresi 6 ms olarak belirlenmiştir. Grafiklere bakıldığında disklerin farklı gerilim değerlerine maruz kaldığı görülmektedir. İlk 1 ms içinde gerilimde hızlı bir artış, yıldırım darbesinin transformatöre ulaştığında üretilen yüksek frekanslı bileşenlerin varlığını gösterir. Bu yıldırım darbesi, iletim hattı boyunca kısa yükselme süresi ve dalga yayılımına bağlı olarak, başlangıç periyodunda (0-1 ms) transformatör sargılarında aşırı yüksek gerilimlere neden olur. 3 ms civarında, muhtemelen iletim hattı ile transformatör arasındaki yansıma etkilerinden kaynaklanan ve yansıyan dalgaların yaklaşık 2 ms'lik bir periyotta hareket ettiği ikinci bir önemli gerilim artışı gözlemlenir. En yüksek tepe gerilimi (67 kV) ilk diskte gözlenir, bu da yıldırım enerjisinin çoğunun bu disk tarafından emildiğini gösterir. Sonraki disklerde (örneğin V_2 , V_3 , V_4 , vb.) gerilimler kademeli olarak azalır.



Şekil 5.27: Durum-uzayı yöntemi kullanılarak elde edilen transformatör disk sargıları üzerindeki gerilim dağılımı.

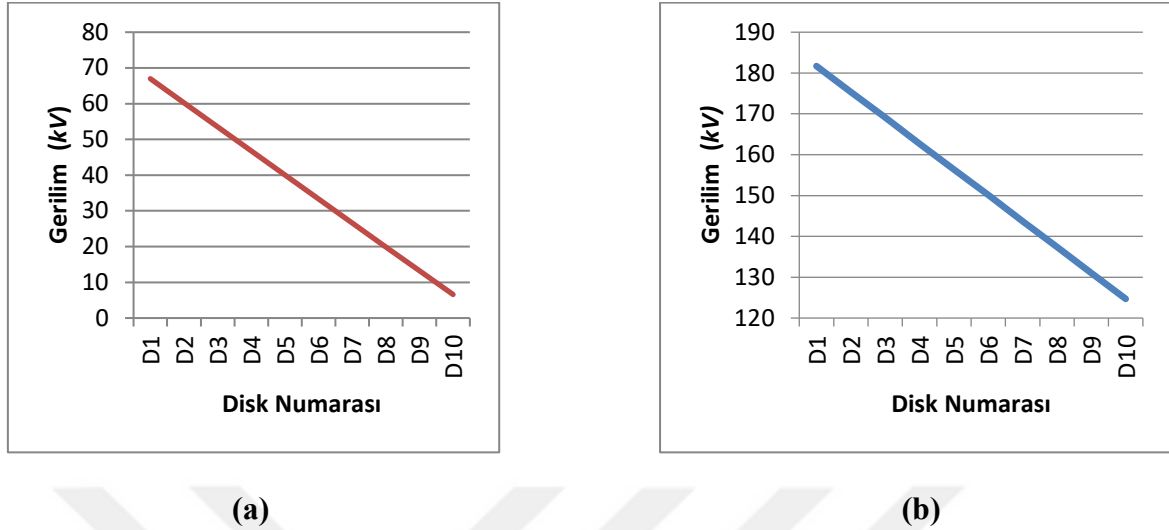
Grafikte gözlenen yüksek frekanslı salınımlar, özellikle de ilk 1 ms boyunca, manyetik çekirdeğin etkisinin ihmal edilmesini haklı çıkarmaktadır. Bu tür yüksek frekanslarda, sargıların indüktansı ve kapasitansı sistemin davranışına hâkim olurken, çekirdeğin manyetik özellikleri daha az önemli hale gelir.



Şekil 5.28: ATP-EMTP yöntemi kullanılarak elde edilen transformatör disk sargıları üzerindeki gerilim dağılımı.

Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'deki disk sargılarının gerilim dalga formları incelendiğinde her iki yöntemin sonuçlarının birbirini destekler nitelikte olduğu tespit edilmiştir.

Güç transformatörünün nötr topraklı yüksek gerilim tarafının diskleri üzerindeki tepe gerilim değerlerini gösteren grafikler farklı R_g değerleri için Şekil 5.29'da gösterilmiştir.

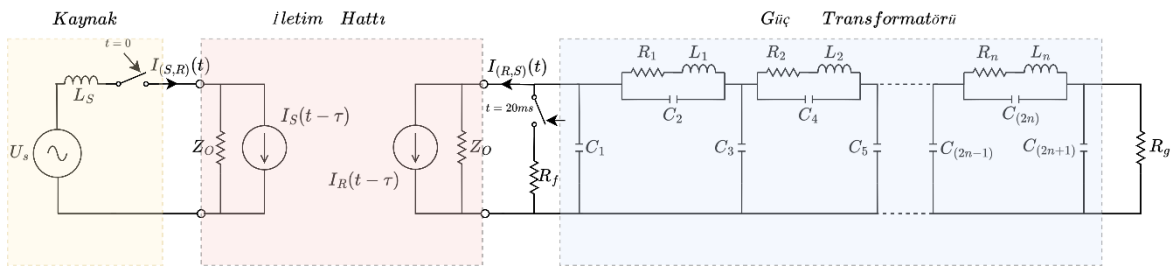


Şekil 5.29: Disk sargılarının tepe gerilim değerleri (a) $R_g = 1 \Omega$, (b) $R_g = 20 \Omega$.

Bu grafiklere göre, disk sargılarındaki tepe gerilim değerleri ilk diskten son diske doğru lineer olarak azalmaktadır. Sonuç olarak, ilk diskteki sargılar en yüksek gerilime maruz kalırken, son disktekiler en düşük gerilime maruz kalmaktadır.

5.4 İletim Hattı-Transformatör Bağlantı Noktası Arıza Uygulaması ve Analizi

Bu uygulamada, dağıtık parametrelili bir iletim hattının sonuna disk tipi sargıdan oluşan bir güç transformatörü bağlanmış ve enerjilendirme işlemi yapılmıştır. İletim hattının $t=0 \text{ ms}$ 'de enerjilendirilmesinden 20 ms sonra transformatörün primer terminalinde yaşanan arızaya ait eşdeğer devre Şekil 5.30'da verilmiştir.



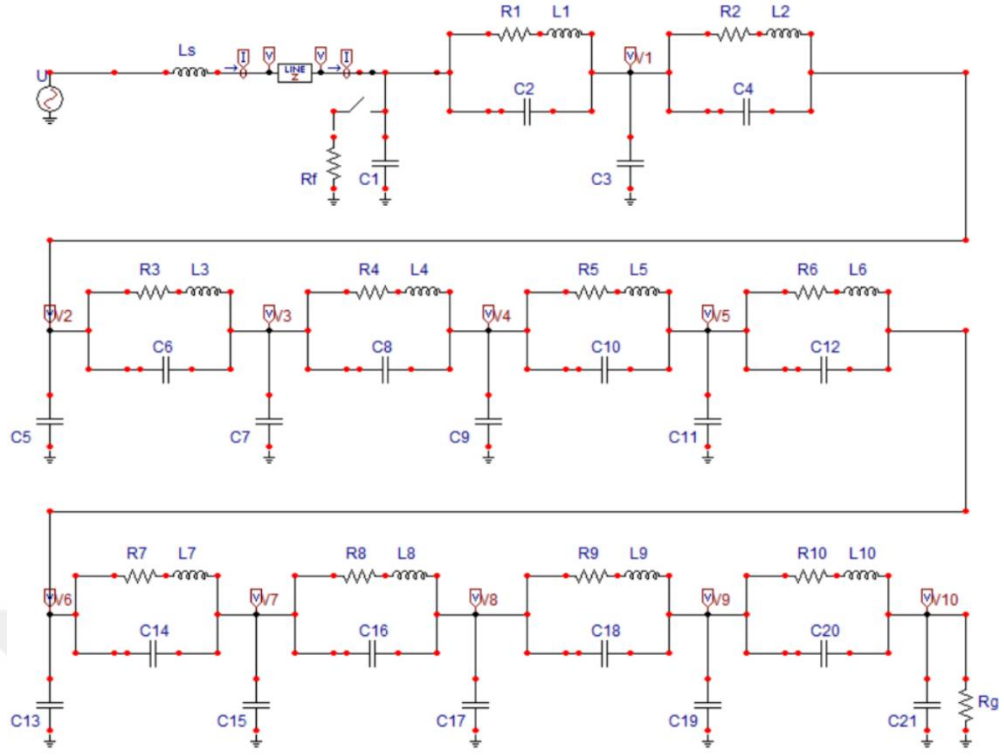
Şekil 5.30: Enerjilendirme ve arızaya ait eşdeğer devre.

Yukarıdaki eşdeğer devre incelendiğinde, diğer uygulamalardan farklı olarak hattın enerjilendirilmesinden 20 ms sonra R_f direncinin devreye girdiği görülmektedir. Bu durum arıza öncesi ve arıza sonrası durumları temsil etmek adına iki farklı A matrisi kullanılmasını gerektirmiştir. F ve B matrislerinde herhangi bir değişiklik yaşanmamıştır. Bu uygulamadaki

transformatörün disk sayısı $N=10$ 'dur. Arıza öncesi disk sayısı $N=3$ için elde edilen durum denklemleri denklem (5.8) ile aynıdır. Ancak arıza sonrası $N=3$ için elde edilen durum denklemleri farklıdır. Disk sayısı $N=10$ için denklemlerin matris boyutları büyük olduğundan çok yer kaplamaktadır. Dolayısıyla durum denklemlerinin temsili için disk sayısı $N=3$ için denklemlerin gösterimine yer verilmiştir. $N=3$ için elde edilen denklemler aşağıda verilmiştir.

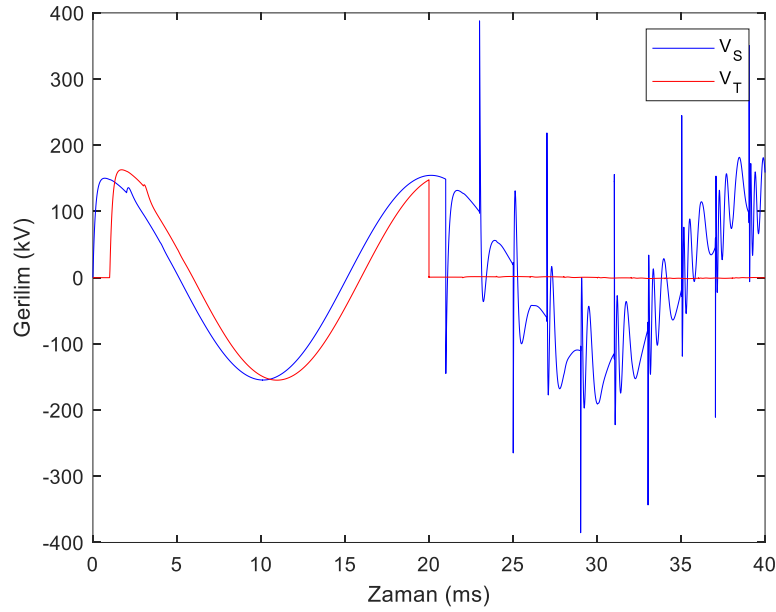
$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (c_1 + c_2) & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_1 & (c_3 + c_4) & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_1 & c_3 & (c_5 + c_6) & -c_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_1 & c_3 & c_5 & c_7 \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Ls}(t) \\ i_{L1}(t) \\ i_{L2}(t) \\ i_{L3}(t) \\ v_{C1}(t) \\ v_{C3}(t) \\ v_{C5}(t) \\ v_{C7}(t) \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} -\frac{Z_0}{L_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 & 0 & \frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_2}{L_2} & 0 & 0 & \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{R_3}{L_3} & 0 & 0 & \frac{1}{L_3} & -\frac{1}{L_3} \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -\left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{R_f}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -\left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{R_f}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -\left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{R_f}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{R_f}\right) & 0 & 0 & -\frac{1}{R_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ls}(t) \\ i_{L1}(t) \\ i_{L2}(t) \\ i_{L3}(t) \\ v_{C1}(t) \\ v_{C3}(t) \\ v_{C5}(t) \\ v_{C7}(t) \end{bmatrix} + \\
 & \begin{bmatrix} -\frac{Z_0}{L_s} & 0 & \frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s(t - \tau) \\ I_R(t - \tau) \\ U_s(t) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.15}$$

Transformatörün primer terminalinde yaşanan arızanın ATP-EMTP modeli ise Şekil 5.31'de verilmiştir. Durum-uzayı yöntemi kullanılarak elde edilen hattın gönderici ucuna (V_S) ve transformatörün primer terminaline (V_T) ait gerilim-zaman grafikleri Şekil 5.32'de verilmiştir. ATP-EMTP yönteminden elde edilen grafikler ise Şekil 5.33'te verilmiştir

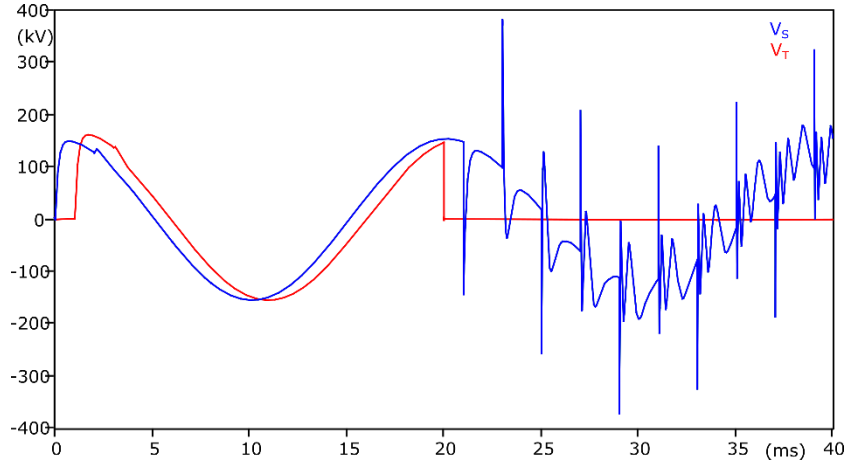


Şekil 5.31: Enerjilendirme ve arızaya ait ATP-EMTP modeli.

Şekil 5.30’da verilen eşdeğer devre ve Şekil 5.31’de verilen ATP-EMTP modelinde kullanılan parametreler, R_g direnç değeri hariç Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’de verilen parametrelerle aynıdır. Burada $R_g=400 \, \Omega$ ve $R_f=1 \, \Omega$ ’dur. Her iki modele de 20 ms sonrasındaki arıza anının modellenmesi için anahtarlama elemanı eklenmiştir.

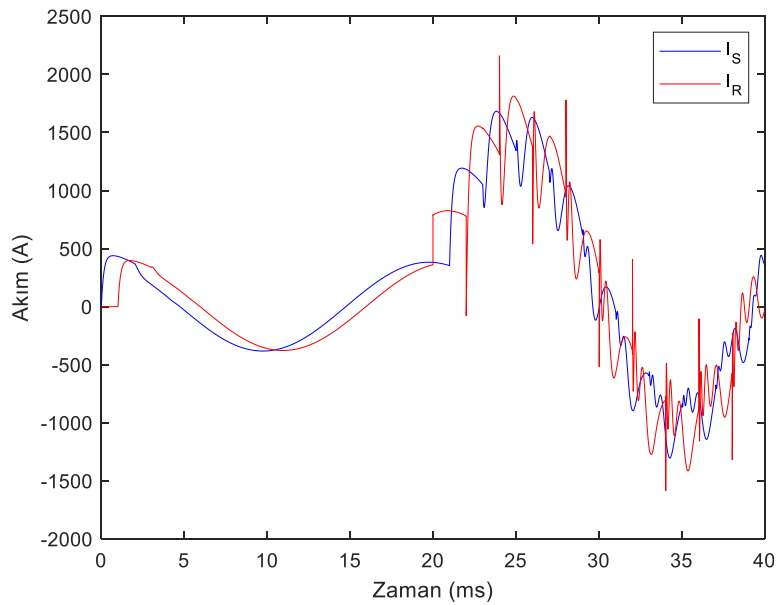


Şekil 5.32: Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen arıza durumu gerilim dalga formları.



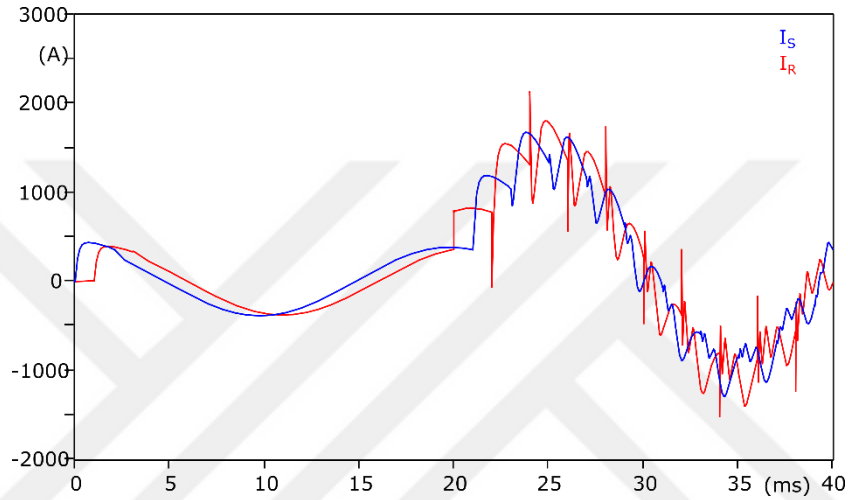
Şekil 5.33: ATP-EMTP kullanılarak elde edilen arıza durumu gerilim dalga formları.

Yukarıdaki şekiller incelendiğinde, $t=0$ anında enerjilendirilen iletim hattının gönderici uç gerilim dalgasının ilk 21 ms'lik zaman diliminde kararlı hale geldiği ve 21 ms'den sonra ise transformatörün primer terminalinde yaşanan arızadan dolayı ani ve gerilim yükselmeleri ve kararsız duruma geçtiği görülmektedir. Transformatörün primer terminalindeki gerilim profiline bakıldığında, yaklaşık 1 ms'lik bir gecikmeyle gerilim dalgasının başlangıç noktasından ilerlediği ve ilk 20 ms'lik zaman diliminde kararlı hale geldiği ve 20 ms'den sonra ise arızadan dolayı ani ve keskin bir şekilde yaklaşık olarak 0 V'a düştüğü görülmektedir. Burada transformatörün primer terminalindeki gerilim hattın alıcı ucuna ait gerilime (V_S) eşittir. Arıza öncesi ve sonrası durumuna ait farklı yöntemlerle elde edilen akım profilleri ise aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Durum-uzayı yöntemine ait dalga formları Şekil 5.34'te verilmiştir.



Şekil 5.34: Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen arıza durumu akım dalga formları.

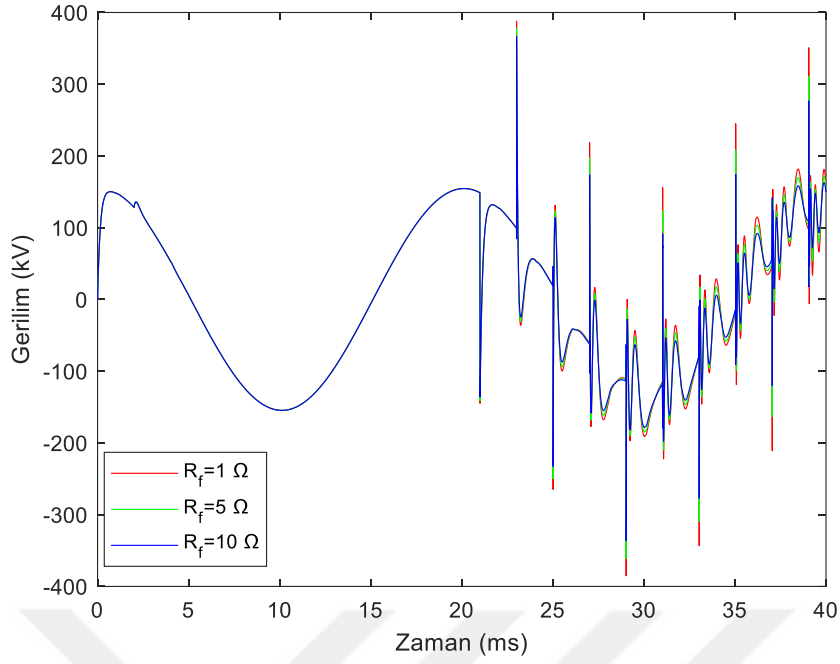
Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen akım dalga formları incelendiğinde, hattın gönderici ucuna ait akım dalgasının gerilim dalga formlarında olduğu gibi ilk 21 ms boyunca kararlı hale geldiğini arıza anından itibaren ise kararsız hale geldiği görülmektedir. Hattın alıcı ucundaki akım dalga formuna bakıldığında, arızanın akım dalgasının hat sonuna yaklaşık 1 ms'lik bir gecikmeyle vardığı ve arıza anına kadar karar hal yapısını korumaya çalıştığı görülmektedir. Ancak arıza yaşandığı andan itibaren akım dalgasına ait kararlı yapı bozulup kararsız hale gelmiş ve azalan tepe değerleri oluşmuştur. Yine bu eşdeğer devrenin ATP-EMTP modelinden elde edilen akım dalga formları Şekil 5.35'te verilmiştir.



Şekil 5.35: ATP-EMTP kullanılarak elde edilen arıza durumu akım dalga formları.

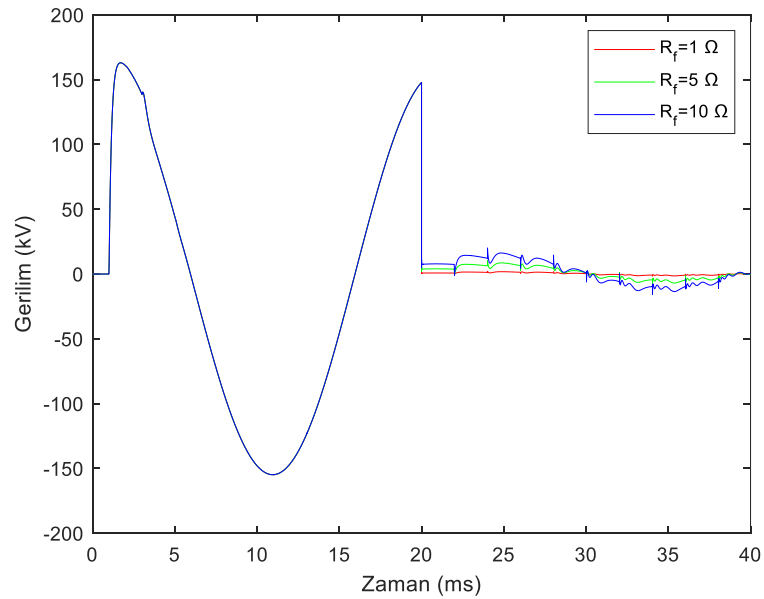
Şekil 5.34 ve Şekil 5.35 incelendiğinde grafiklerin neredeyse birebir aynı olduğu ve akım profillerinin birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Her iki şekilde de alıcı uca ait akım değerinin 380 A'den 2100 A değerlerine kadar çıktığı tespit edilmiştir.

Anahtarlama durumunda yaşanan arıza durumuna ek olarak arıza direncinin etkisi de araştırılmak üzere farklı arıza direnç değerleri için akım-gerilim profilleri elde edilmiştir. Aşağıda artan arıza dirençleri için ($R_f=1 \Omega$, $R_f=5 \Omega$ ve $R_f=10 \Omega$) hattın gönderici ucuna ait gerilim dalga formları verilmiştir.



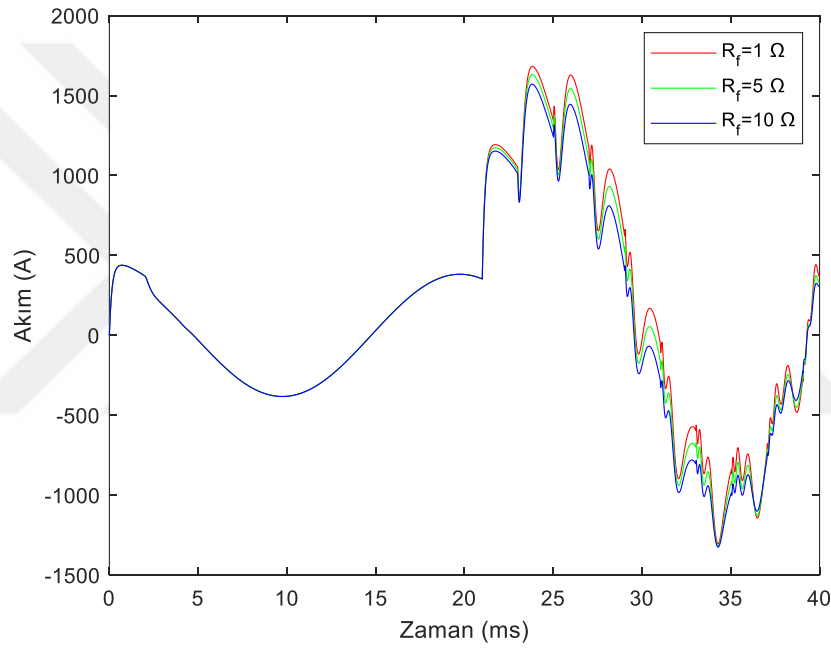
Şekil 5.36: Farklı arıza direnç değerleri için Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen gönderici uç gerilim dalga formları.

Şekil 5.36’da verilen farklı R_f değerlerindeki gerilim dalga formları incelendiğinde, arıza direnç değeri arttıkça hattın gönderici ucuna ait gerilim dalgalarının tepe gerilim seviyelerinde azalma olduğu görülmektedir. Bu da daha düşük arıza direncinin daha yüksek tepe gerilimlerinin oluşmasına sebebiyet verdiği anlamına gelmektedir. Hattın alıcı ucuna veya transformatör primer terminallerindeki gerilim dalga formu ise Şekil 5.37’de verilmiştir.



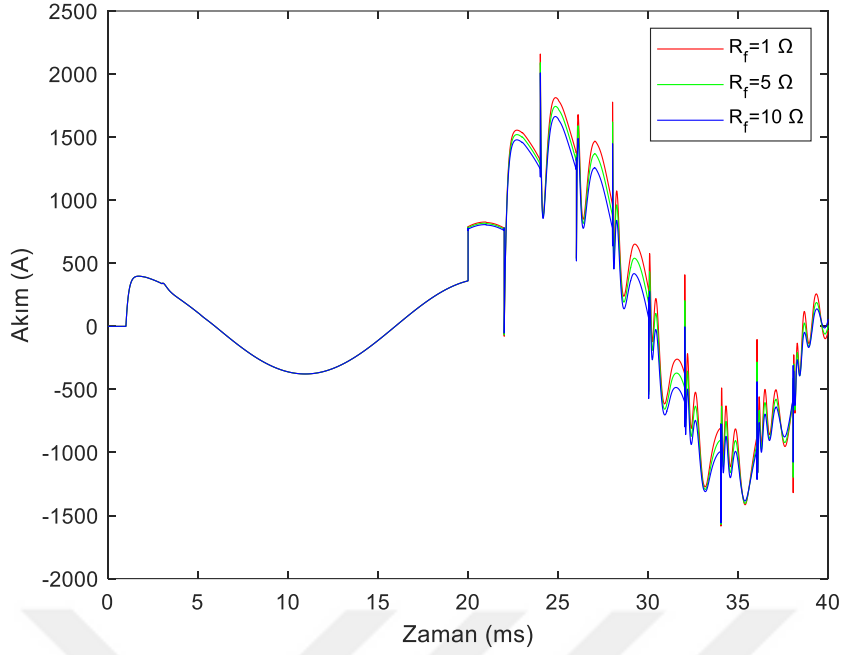
Şekil 5.37: Farklı arıza direnç değerleri için Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen alıcı uç gerilim dalga formları.

Şekil 5.37'deki hattın alıcı ucuna ait gerilim dalgaları incelendiğinde farklı arıza direnç değerleri için farklı gerilim seviyelerinin elde edildiği görülmektedir. Arıza direnç değeri arttıkça hattın alıcı ucundaki gerilime eşit olan transformatörün primer terminalindeki gerilim değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir. Bir başka deyişle arıza direnç değerinin azalması transformatörün primer terminalindeki gerilim seviyesinin de azalmasına sebep olmaktadır. Burada transformatörün nötr topraklama direnci yani $R_g=400 \Omega$ 'dır. Arıza direnci ile topraklama direnci birbirine yakın değerler olması durumunda gerilim dalga formlarında ciddi değişiklikler olması bir başka ifadeyle gerilim dalga formunun kararlı hale gelmesi beklenen bir durumdur. Bu modele ait durum-uzayı yöntemiyle elde edilen gönderici uç akım dalga formları Şekil 5.38'da verilmiştir.



Şekil 5.38: Farklı arıza direnç değerleri için Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen gönderici uç akım dalga formları.

Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen alıcı uç akım dalga formları Şekil 5.39'da verilmiştir.

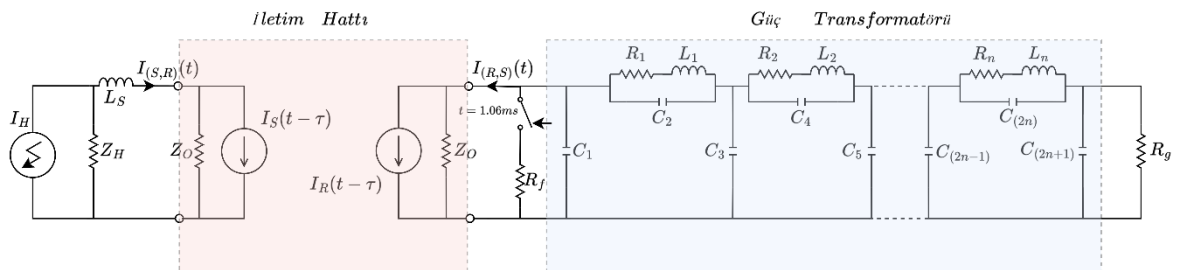


Şekil 5.39: Farklı arıza direnç değerleri için Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen alıcı uç akım dalga formları.

Durum-uzayı yöntemi kullanılarak elde edilen Şekil 5.38 ve Şekil 5.39'a göre, R_f değerleri arttıkça hem gönderici hem de alıcı uçtaki akım tepe değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Bu da daha düşük arıza direnç değerinin iletim hattında daha yüksek akımlara sebep olduğu anlamına gelmektedir.

5.5 İletim Hattı-Transformatör Yıldırım Darbe Arıza Uygulaması ve Analizi

Bu uygulamada, dağıtık parametrelili iletim hattının sonuna disk tipi sargıdan oluşan bir güç transformatörünün yüksek gerilim sargısının bir fazı bağlanmış ve iletim hattının faz iletkenine Heidler yıldırım darbesi düştükten 1.06 ms sonra transformatörün primer terminalinde arıza yaşanmıştır. Bu uygulamaya ait eşdeğer devre Şekil 5.40'ta verilmiştir.



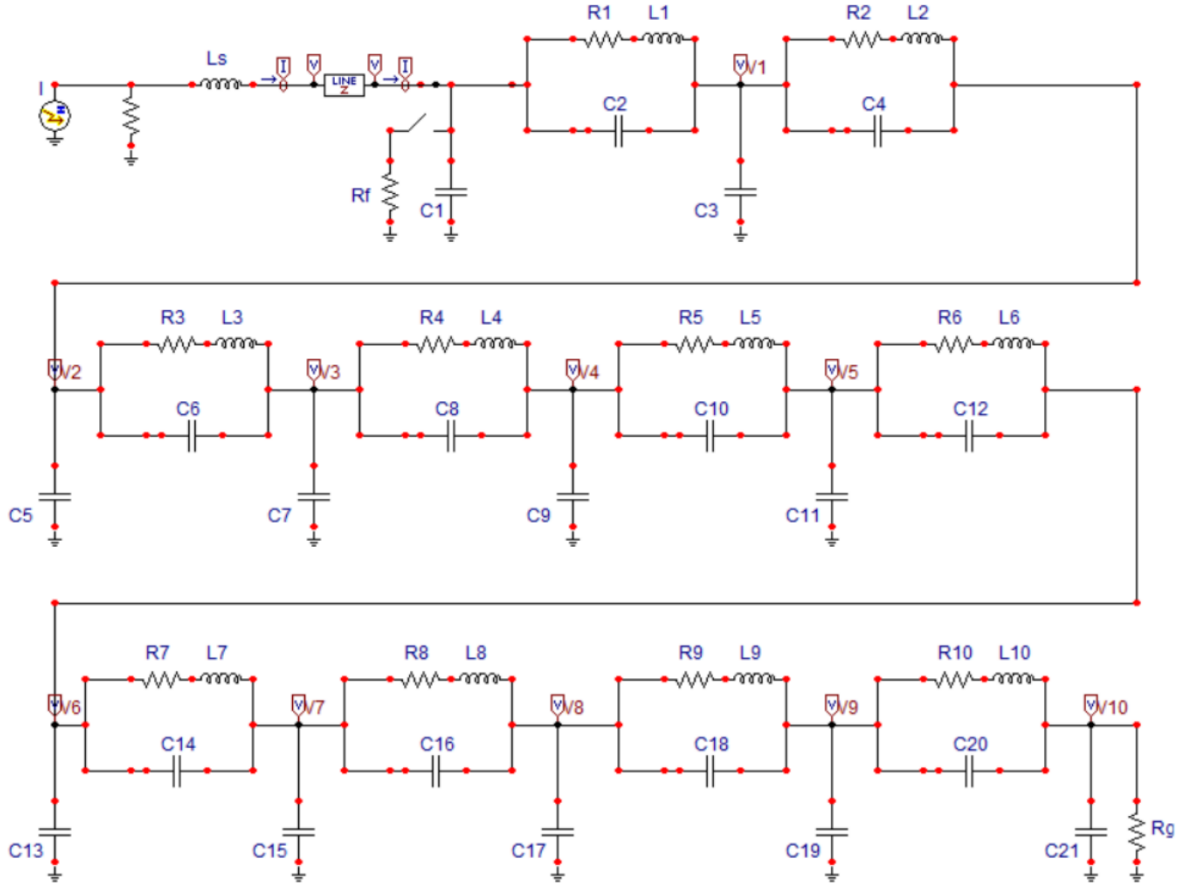
Şekil 5.40: Heidler yıldırım darbesi ve arızaya ait eşdeğer devre.

Durum denklemlerinin elde edilmesi için diğer uygulamalarda olduğu gibi indüktör akımları ve kapasitör gerilimleri durum değişkeni olarak seçilmiştir. Bu uygulamada arıza öncesi ve

arıza sonrası olmak üzere iki farklı matris kullanılmıştır. Arızayı temsil etmek adına eklenen R_f direncinden dolayı durum-uzayı formatındaki A matrisi değişmiş ancak F ve B matrisleri sabit kalmıştır. Buradaki F ve B matrisleri denklem (5.14)'te verilen matrislerle aynıdır ($N=3$). Uygulamada kullanılan transformatörün disk sayısı $N=10$ olduğundan çok büyük boyutlu matrisler eklenmemiş, $N=3$ durumu için arıza sonrası yeni aşağıda denklemler gösterilmiştir.

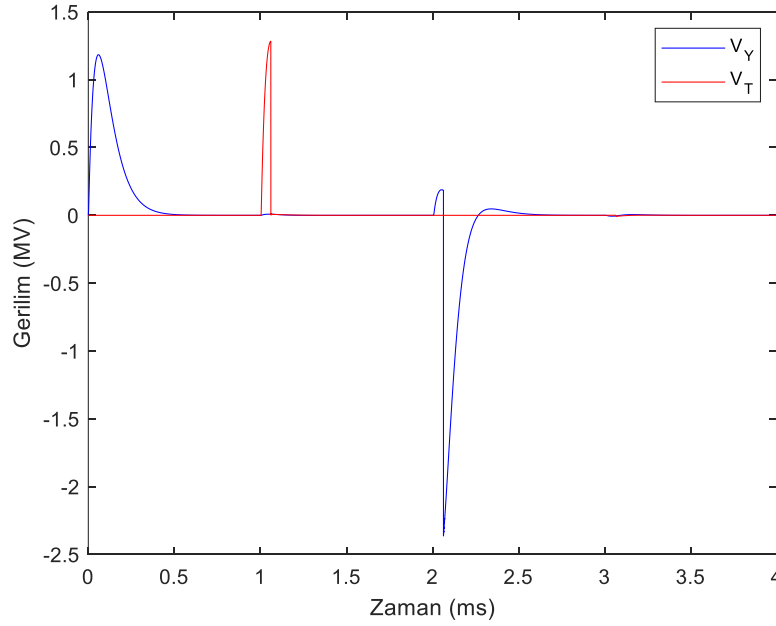
$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (c_1 + c_2) & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_1 & (c_3 + c_4) & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_1 & c_3 & (c_4 + c_5) & -c_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_1 & c_3 & c_5 & c_7 \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Ls}(t) \\ i_{L1}(t) \\ i_{L2}(t) \\ i_{L3}(t) \\ v_{C1}(t) \\ v_{C3}(t) \\ v_{C5}(t) \\ v_{C7}(t) \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} -\frac{Z_0}{L_s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_1}{L_1} & 0 & 0 & \frac{1}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_2}{L_2} & 0 & 0 & \frac{1}{L_2} & -\frac{1}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{R_3}{L_3} & 0 & 0 & \frac{1}{L_3} & -\frac{1}{L_3} \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -\left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{R_f}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -\left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{R_f}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -\left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{R_f}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{R_f}\right) & 0 & 0 & -\frac{1}{R_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ls}(t) \\ i_{L1}(t) \\ i_{L2}(t) \\ i_{L3}(t) \\ v_{C1}(t) \\ v_{C3}(t) \\ v_{C5}(t) \\ v_{C7}(t) \end{bmatrix} + \\
 & \begin{bmatrix} -\frac{Z_0}{L_s} & 0 & \frac{Z_H}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(t-\tau) \\ I_2(t-\tau) \\ I_H(t) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.16}$$

Uygulamaya ait eşdeğer devrenin ATP-EMTP modeli ise Şekil 5.41'de verilmiştir.



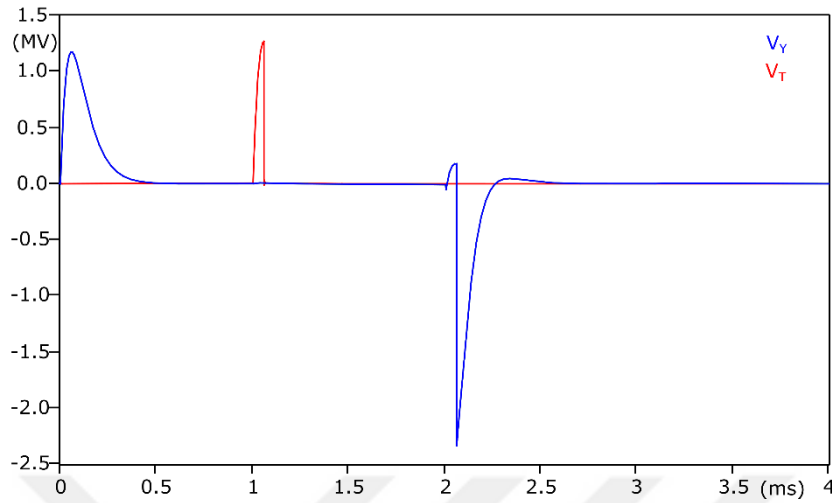
Şekil 5.41: Heidler yıldırım darbesi ve arızaya ait ATP-EMTP modeli.

Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen yıldırım darbesinin düştüğü noktanın ve transformatörün primer terminaline ait gerilim grafikleri Şekil 5.42’de verilmiştir.



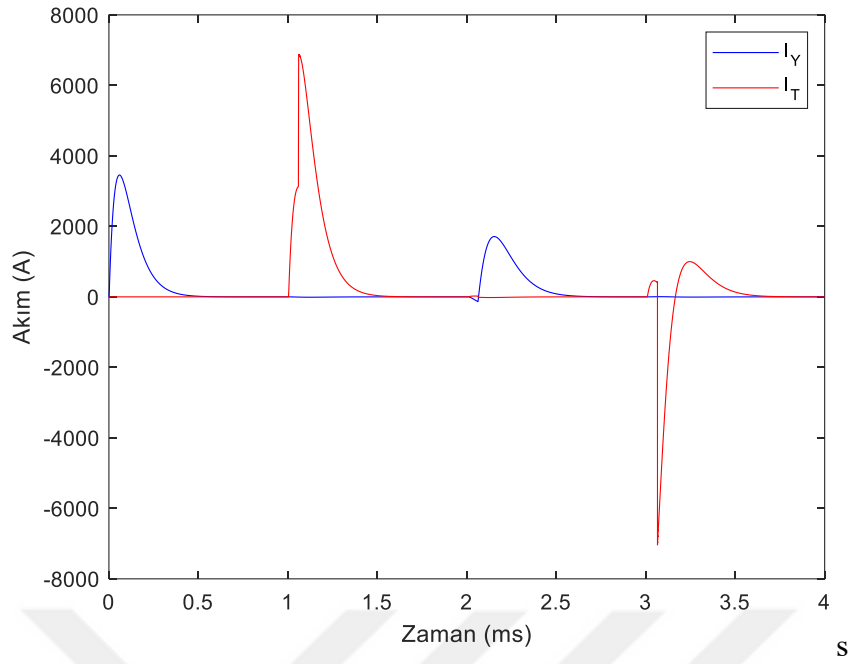
Şekil 5.42: Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen yıldırım darbeleri arıza durumu gerilim dalga formları.

ATP-EMTP modelinden elde edilen gerilim-zaman dalga profilleri Şekil 5.43'te verilmiştir.



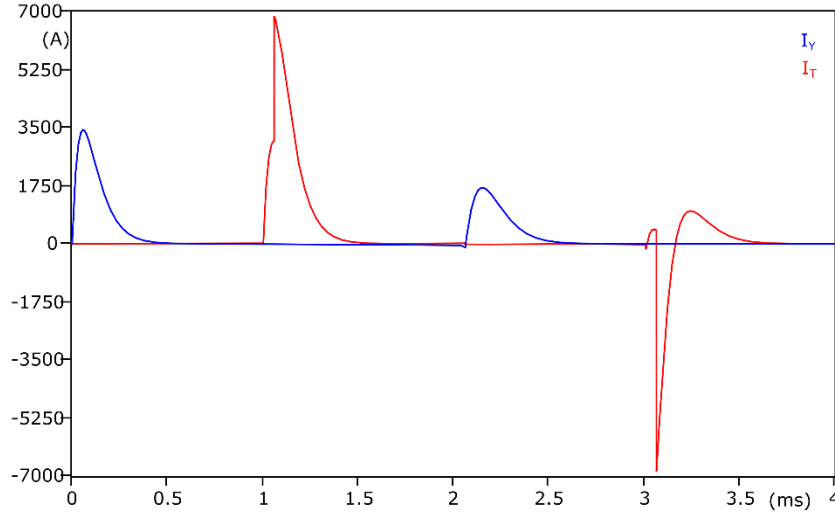
Şekil 5.43: ATP-EMTP kullanılarak elde edilen yıldırım darbeleri arıza durumu gerilim dalga formları.

Yukarıda verilen şekiller incelendiğinde, yıldırım darbesinin düştüğü noktanın gerilim seviyesinin arıza direncinden dolayı 2 ms'den sonra 2.4 MV'a varan ani bir yükseliş yaşadığı görülmektedir. Arıza olmaması durumunda belirtilen zaman aralığındaki gerilim seviyesi yaklaşık 200 kV dolaylarındadır. Transformatör primer terminal geriliminin ise 1.06 ms'den sonra ani ve keskin bir düşüş yaşadığı ve 0 V'a daha çabuk yaklaştığı görülmektedir. Ancak arıza olmaması durumunda buradaki gerilim dalga formu 1 ms ile 1.5 ms arasında 0 V'a daha geç yaklaşmış olacaktır. Devam eden zaman aralığına bakıldığında ise arıza 3. ms'de yıldırım darbesinin transformatör primer terminalinde neredeyse tamamına yakınının sönümlendiği tespit edilmiştir. Arıza olmaması durumunda belirtilen nokta ve zaman için elde edilecek gerilim seviyesi yaklaşık 100 kV olacaktır. Yıldırım darbesinin düştüğü yer (I_Y) ve transformatörün bağlı olduğu iletim hattının sonundaki (I_T) akım dalga formları durum-uzay yöntemi kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 5.44'te gösterilmiştir.



Şekil 5.44: Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen yıldırım darbeli arıza durumu akım dalga formları.

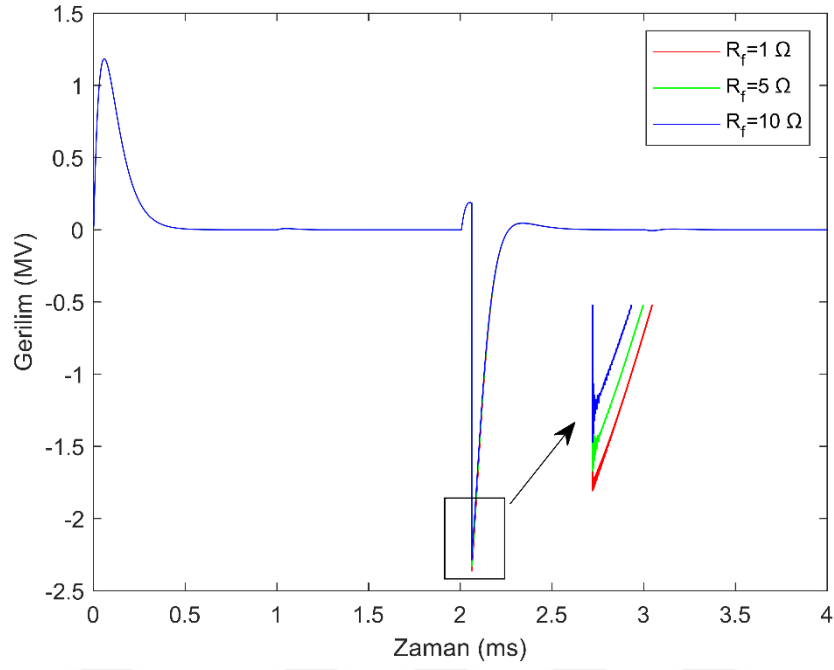
Şekil 5.44'te verilen akım profilleri incelendiğinde, akım dalgasının transformatörün bağlı olduğu uca varması yaklaşık 1 ms sürdüğü ve başlangıçtan 1.06 ms sonra ise arızadan kaynaklı keskin ve ani bir şekilde 6900 A gibi bir tepe değerine ulaştığı görülmektedir. Grafik incelendiğinde 1 ms ile 1.06 ms arasındaki akım yükselişinin, 1.06 ms'den sonraki akım yükselişinden daha yavaş olduğu görülmektedir. Bunun temel sebebi 1.06 ms'den sonra devrede arıza yaşanmış olmasıdır. Arıza yaşanmaması durumunda belirtilen noktadaki akım değeri 3000 A dolaylarında olacaktır. Hat sonundaki akım değeri 3. ms'den sonra yine bir tepe değeri yaşamıştır. Bunun da temel nedeni yaşanan arızadır. Arıza olmaması durumunda bu zaman diliminde yaşanacak tepe akım değeri ise yaklaşık 200 A olacaktır. Bu modelin ATP-EMTP sonuçları ise Şekil 5.45'te verilmiştir.



Şekil 5.45: ATP-EMTP kullanılarak elde edilen yıldırım darbeli arıza durumu akım dalga formları.

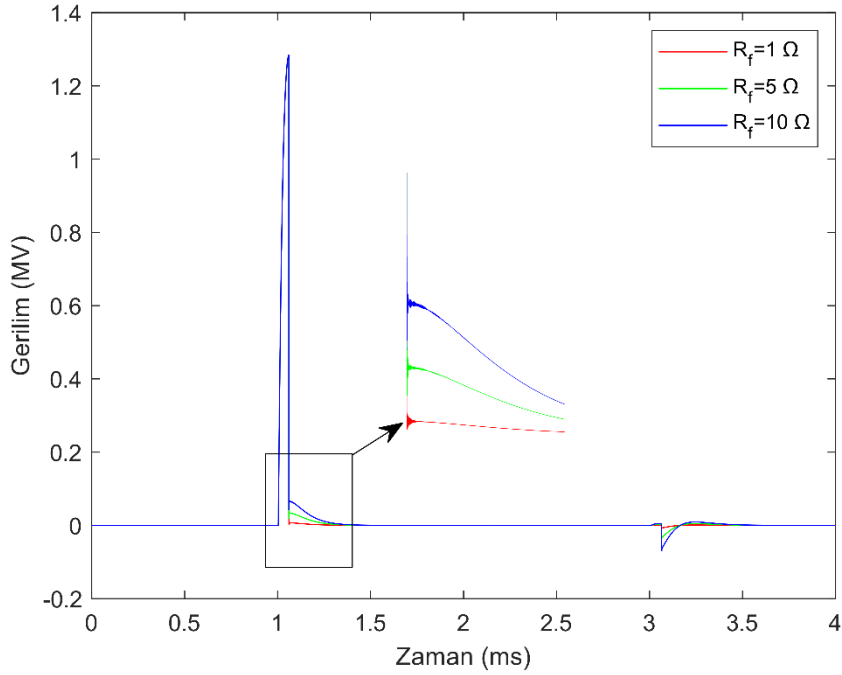
Yıldırımın düştüğü noktadaki akım değerinin yaklaşık 3500 A olduğu grafikten anlaşılmaktadır. Bu akım dalgasının 2 ms sonrasında genlik değerinde bir yarılanma olduğu görülmektedir. Arıza olmaması durumunda 2 ms sonra görülebilecek genlik değeri yaklaşık olarak 200 A olacaktır. Dolayısıyla oluşan arızanın yıldırımın düştüğü noktadaki akıma olan etkisi de bu grafikten anlaşılmaktadır. Şekil 5.44 ve Şekil 5.45 karşılaştırıldığında, hem durum-uzay yönteminde hem de ATP-EMTP programından elde edilen geçici rejim grafiklerinin birbiriyle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

Hat sonu transformatörlü ve yıldırım darbesi düşmüş iletim hattının arıza analizinde bazı ek geçici rejim çalışmaları yapılmıştır. Bu ek çalışmalar, farklı arıza direnç değerlerinin yıldırımın düştüğü noktadaki ve hat sonundaki akım-gerilim dalga formlarına olan etkilerini araştırmak adına yapılmıştır. Daha önceki bölümlerde transformatörün nötr topraklama direnci etkisi gerilim ve akım değerlerine olan etkisi incelenmiş ve sonuçları belirtilmişti. Durum-uzay yöntemi kullanılarak, arıza direnci $R_f=1 \Omega$, $R_f=5 \Omega$ ve $R_f=10 \Omega$ için elde edilen yıldırım darbesinin düştüğü yerin gerilim-zaman grafiği Şekil 5.46'da verilmiştir. Yıldırım darbesi düştükten 1.06 ms sonra arıza yaşanması durumunda farklı direnç değerleri için grafikler elde edilmiştir.



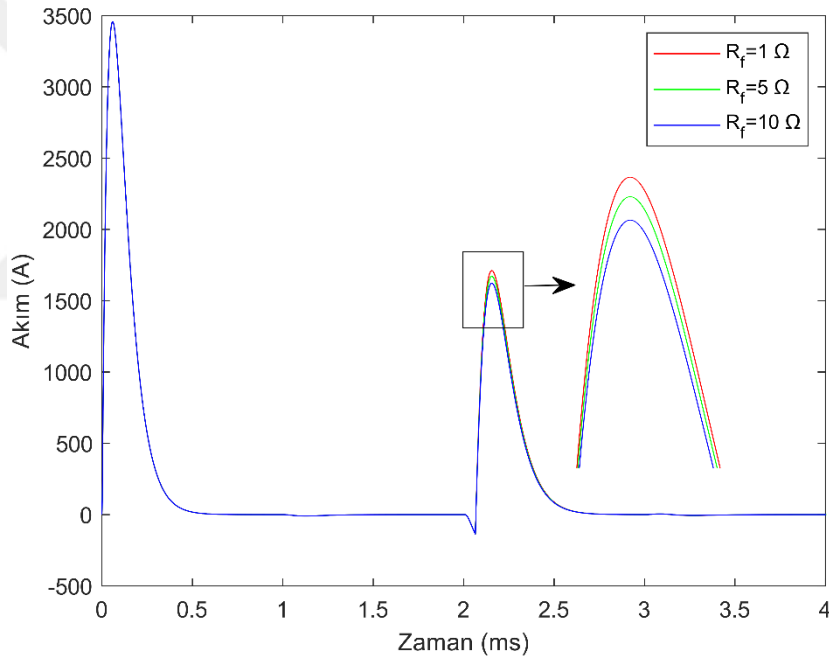
Şekil 5.46: Farklı arıza direnç değerleri için Durum-uzay yöntemiyle elde edilen yıldırım noktası gerilim dalga formları.

Şekil 5.46’te verilen farklı arıza direnç değerlerine göre 2. ms’den sonra yıldırım darbesinin düştüğü noktada farklı gerilim değerleri elde edilmiştir. Grafiğe göre arıza direnç değeri arttıkça bu noktadaki tepe gerilim değeri azalmaktadır. Şekil 5.47’de farklı arıza direnç değerleri için transformatör primer terminaline ait gerilim dalga formları verilmiştir.



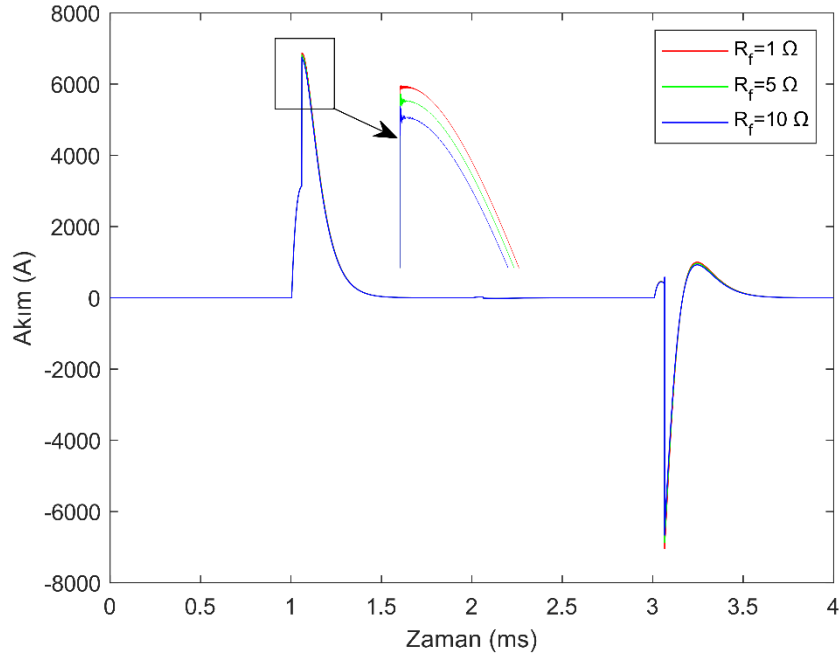
Şekil 5.47: Farklı arıza direnç değerleri için Durum-uzay yöntemiyle elde edilen transformastör primer terminali gerilim dalga formları.

Durum uzayı-yöntemiyle elde edilen Şekil 5.46'daki grafiğe göre arıza direnç değeri ile arıza sonrasındaki tepe gerilim değerleri arasında ters bir orantı olduğu söylenebilir. Aynı yöntemle elde edilen Şekil 5.47 incelendiğinde, arıza anından hemen sonra tepe gerilim değerlerinde keskin bir gerilim düşüşü yaşanmıştır. Değişen arıza dirençlerine göre değerlendirme yapıldığında; arıza direncinin artmasıyla tepe gerilimlerinin 0 V'a düşme zamanı arasında ters bir orantı olduğu söylenebilir. Daha düşük arıza direnci gerilimin daha kısa zamanda sıfıra yaklaşmasına sebep olmaktadır. Yine 3. ms'den sonra ki gerilim dalga formlarına bakıldığında arıza direncinin artmasıyla bu zaman dilimindeki gerilim tepe noktaları da artmıştır. Dolayısıyla burada arıza direnci ile transformatör primer terminali arasındaki gerilim arasında doğru bir orantı olduğu tespit edilmiştir. Farklı arıza direnç değerlerinin yıldırımın darbesinin düştüğü noktadaki akım profillerine olan etkisi Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.48: Farklı arıza direnç değerleri için Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen yıldırım noktası akım dalga formları.

Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen Şekil 5.48'deki akım dalga formlarına incelendiğinde, arıza direnç değerinin artmasıyla tepe akım değerlerinin de azaldığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla daha küçük arıza direnci daha büyük tepe akım değerine sebep olmaktadır. Arıza direnci ile yıldırım darbesinin düştüğü noktadaki tepe akım değerleri arasında ters bir orantı olduğu söylenebilir. Durum-uzayı yöntemi kullanılarak, farklı arıza direnç değerleri için hat sonuna akım dalga formlarını gösteren grafik Şekil 5.49'da verilmiştir.

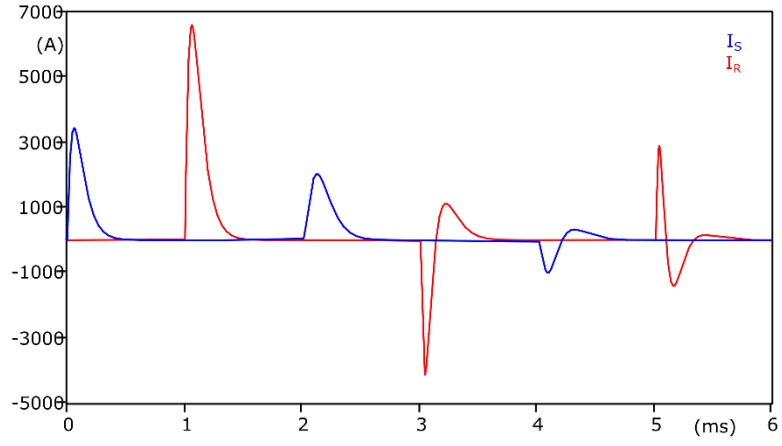


Şekil 5.49: Farklı arıza direnç değerleri için Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen hat sonu akım dalga formları.

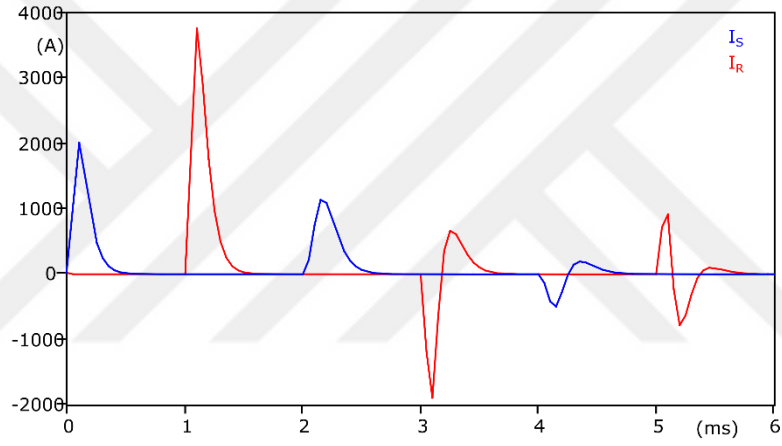
Şekil 5.49’da verilen akım dalga formlarına göre, arıza direnç değerinin artmasıyla hat sonundaki akım tepe değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Daha düşük arıza direnci daha büyük tepe akım değerlerine sebep olmaktadır. Bu durum arıza direnç değeri ile hat sonu yıldırım darbe akımı arasında ters bir orantı olduğunu göstermektedir. Akım değerlerinin kA seviyelerinde olduğu göz önünde bulundurulduğunda, arıza direnç değerinin hat akımlarına ve hat sonuna bağlı şebeke elemanlarına olan etkisi göz ardı edilemeyecek kadar önemlidir.

5.6 Trapezoidal Yönteminde Adım Aralığı Etkisi

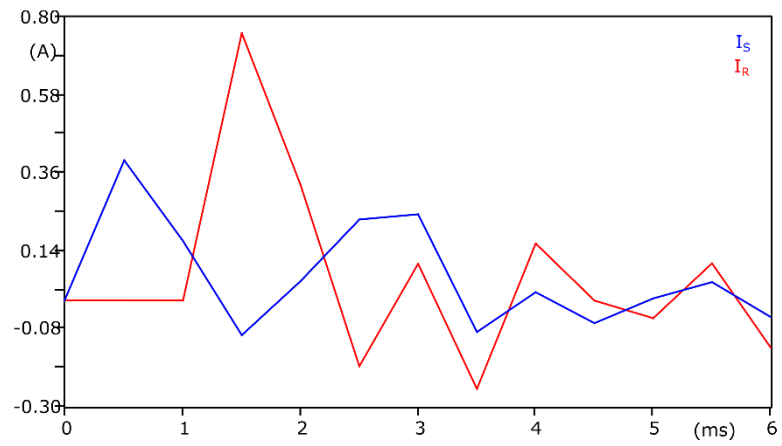
Güç sistemlerinin geçici rejim analizlerindeki önemli parametrelerden biri de adım aralığı (uzunluğu) olarak adlandırılan Δt ’dir. Geçici rejim çalışmalarında sayısal entegrasyon kullanıldığından, adım aralığı parametresi kritik bir role sahiptir. Çünkü bu değer, elde edilen sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini ciddi anlamda etkilemektedir. Tezin bu noktasına kadar yapılan bütün çalışmalarda adım aralığı $\Delta t=5 \times 10^{-8}$ s olarak seçilmiştir. Aşağıda farklı Δt değerleri için ATP-EMTP simülasyon sonuçları gösterilmiştir.



(a)



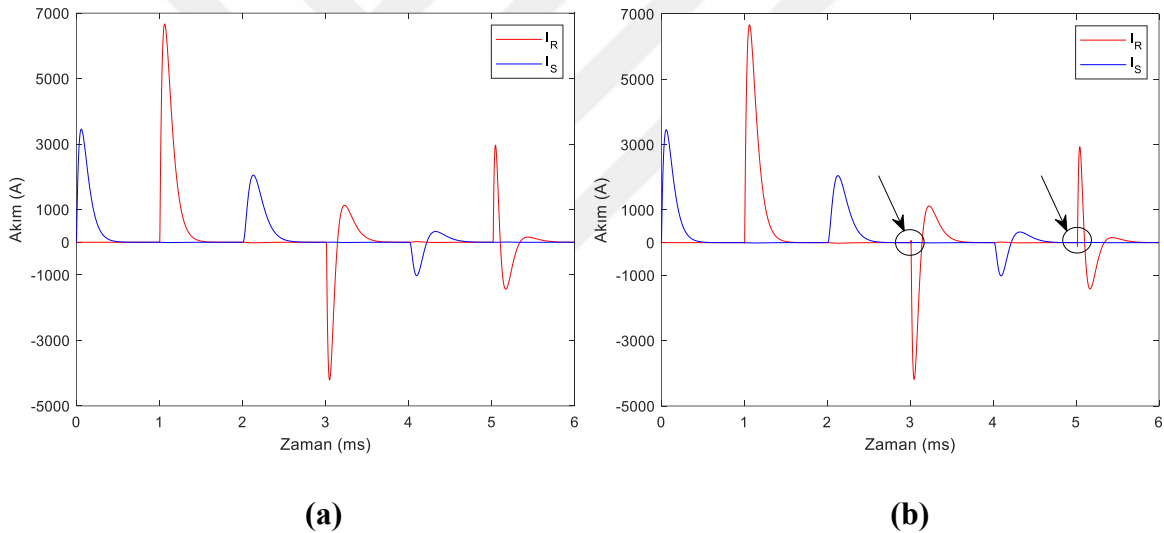
(b)



(c)

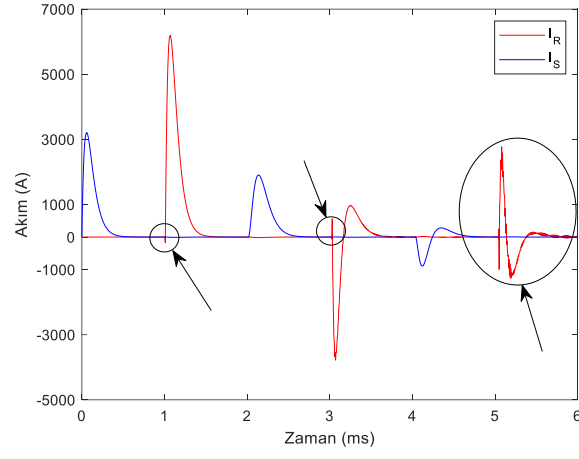
Şekil 5.50: ATP-EMTP dalga formları (a) $\Delta t=5 \times 10^{-8}$ s, (b) $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s, (c) $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s.

Şekil 5.50’de verilen akım dalga formları, hat sonu transformatörlü dağıtık parametrelili iletim hattının yıldırım darbesine maruz kalması durumunda elde edilen dalga formlarıdır. Şekildeki grafikler incelendiğinde, adım aralığı büyüdükçe akım dalga formlarında bozulma meydana geldiği görülmektedir. Adım aralığı $\Delta t=5 \times 10^{-8}$ s olması durumunda yıldırımın düştüğü noktadaki tepe akım 6600 A, transformatörün bağlı olduğu uçtaki tepe akım 3500 A değerlerine ulaşırken, $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s olması durumunda bu akım değerleri sırasıyla 3800 A ve 2000 A olmaktadır. Adım aralığının $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s durumunda ise bu değerlerin 1 A’in altına düştüğü görülmektedir. ATP-EMTP’de yapılan diğer simülasyon çalışmalarında $\Delta t=5 \times 10^{-7}$ s ve $\Delta t=5 \times 10^{-6}$ s adım aralığı değerleri için bir bozulma olmadığı ve $\Delta t=5 \times 10^{-8}$ s için grafikteki dalga formlarının aynı olduğu tespit edilmiştir. Bu model için ATP-EMTP simülasyonlarındaki ilk bozulma $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s değeri için başlamıştır. Aşağıdaki şekillerde ise farklı adım aralıkları için durum-uzayı metodundan elde edilen akım dalga formları verilmiştir.

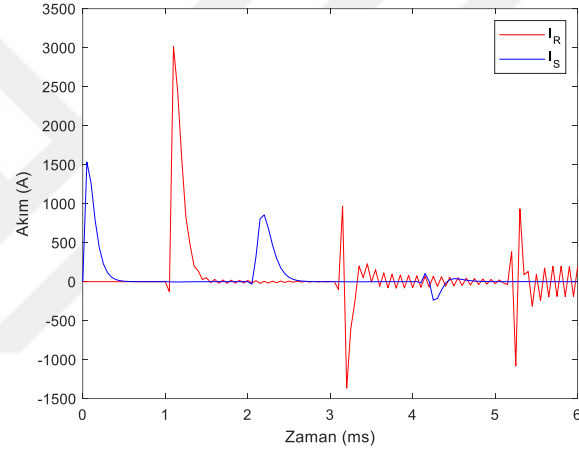


Şekil 5.51: Durum-uzayı dalga formları (a) $\Delta t=5 \times 10^{-8}$ s, (b) $\Delta t=5 \times 10^{-7}$ s.

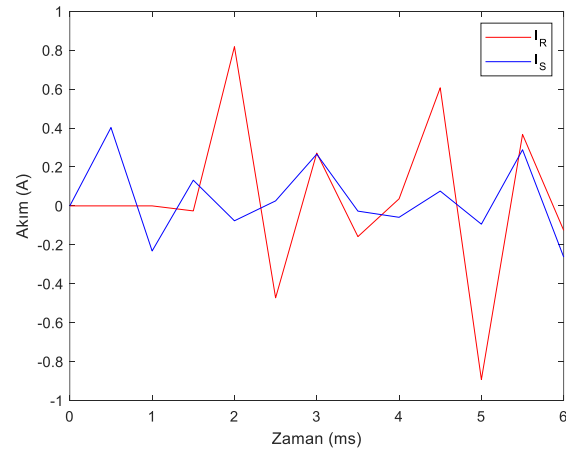
Şekil 5.51’de durum-uzayı metoduyla farklı adım aralıkları için elde grafikler incelendiğinde, 3. ms ve 5. ms’deki akım dalga formunda küçük farklılıklar olduğu görülmektedir. ATP-EMTP’de bu adım uzunluğundaki değerler için yapılan simülasyonda herhangi bir farklılık tespit edilmemesine rağmen durum-uzayı metodunda dalga formunda bir değişiklik yaşanmıştır. Ancak adım uzunluğu daha da artınca buradaki küçük farklılıklar yerini daha büyük bozulmalara bırakacaktır. Aşağıdaki şekilde durum-uzayı metodu kullanılarak daha büyük adım aralığı için akım dalga formları elde edilmiştir.



(a)



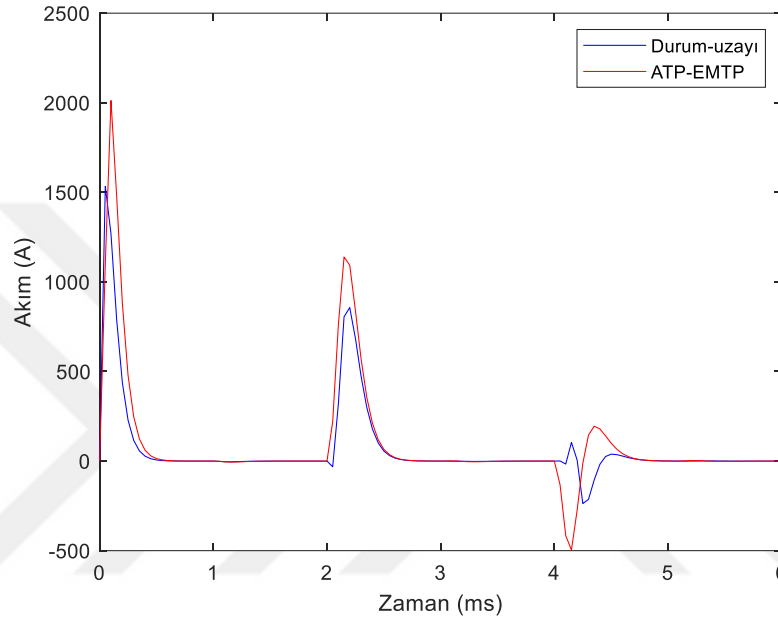
(b)



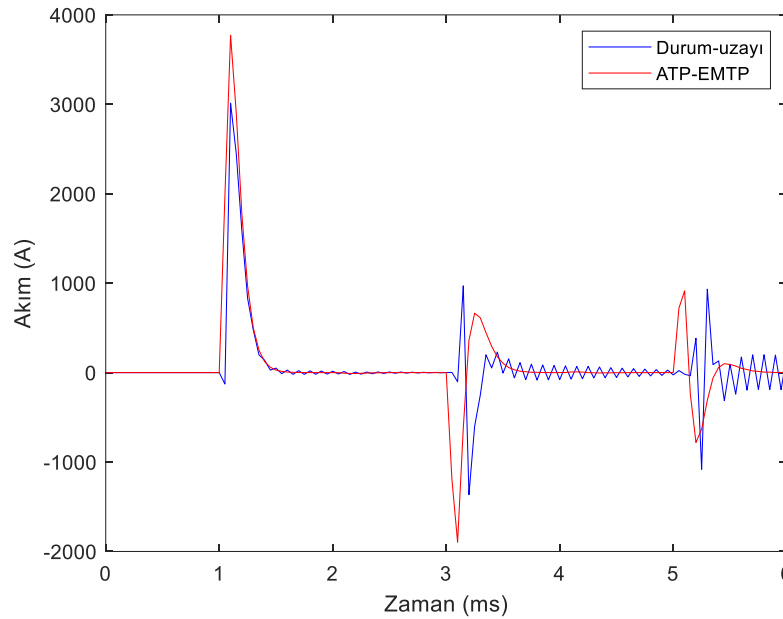
(c)

Şekil 5.52: Durum-uzay dalgaları (a) $\Delta t=5 \times 10^{-6} \text{ s}$, (b) $\Delta t=5 \times 10^{-5} \text{ s}$, (c) $\Delta t=5 \times 10^{-4} \text{ s}$.

Şekil 5.52 incelendiğinde ATP-EMTP simülasyonlarında da olduğu gibi, adım aralığı arttıkça akım profillerinin bozulduğu görülmektedir. Adım aralığı arttıkça akım tepe değerlerinde de büyük değişimler yaşandığı tespit edilmiştir. $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s değeri için akım tepe değerlerinin 1 A gibi gerçek dışı değerlerin altına düştüğü görülmektedir. Akım değerlerinin kA seviyelerinden A seviyelerine düşmesinin temel nedeni sayısal entegrasyon için önemli olan adım aralığının hatalı seçimidir. Aşağıda aynı adım aralığına sahip farklı yöntemlerden elde edilen grafikler verilmiştir.

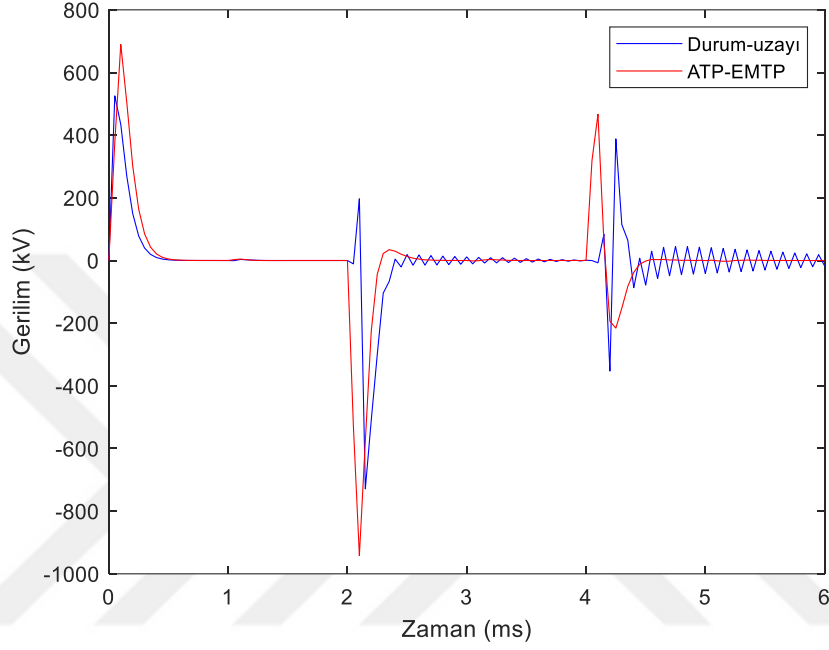


Şekil 5.53: Yıldırımın düştüğü noktadaki akım dalga formları kıyaslaması $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s.

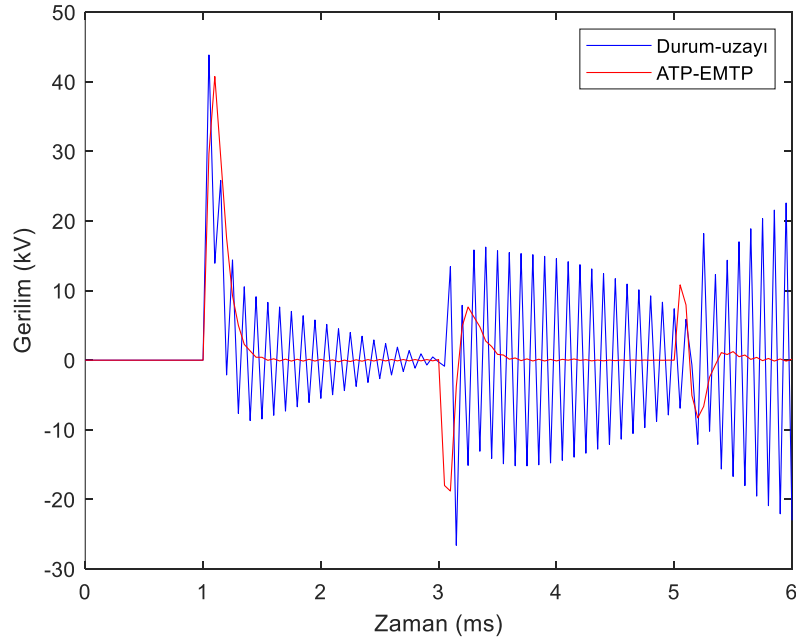


Şekil 5.54: Transformatör primer terminali akım dalga formları kıyaslaması $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s.

Yukarıda verilen grafikler incelendiğinde, adım aralığı $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s olması durumunda durum-uzay yönteminde elde edilen tepe noktaları ve değerleri ile ATP-EMTP'den elde edilen verilerin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Özellikle Şekil 5.54'te durum-uzay yöntemiyle elde edilen akım dalgasının 3. ms'den sonra osilasyona girdiği ancak ATP-EMTP dalgasının girmediği tespit edilmiştir. Aynı adım aralığında farklı yöntemlerle elde edilen gerilim dalga formları aşağıda verilmiştir.

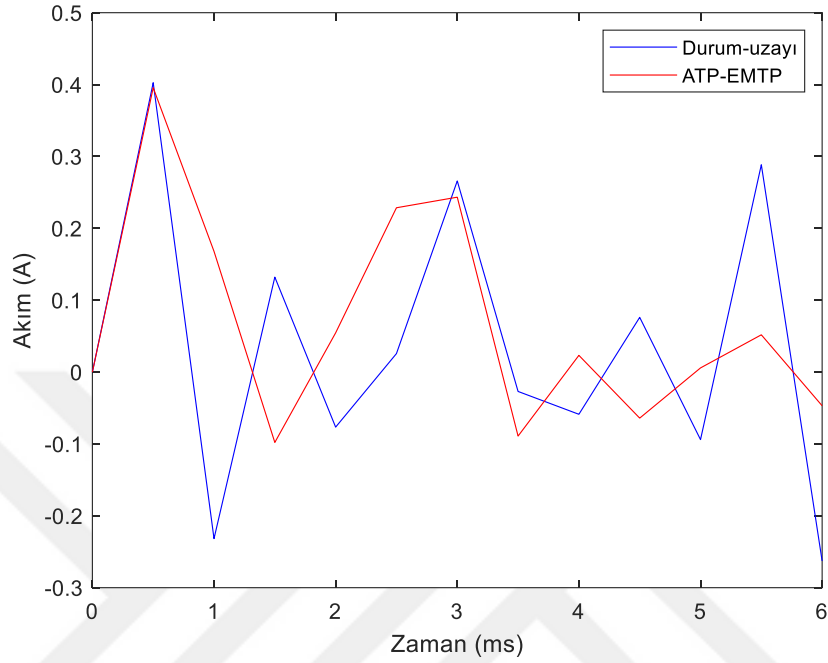


Şekil 5.55: Yıldırımın düştüğü noktadaki gerilim dalga formları kıyaslaması $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s.

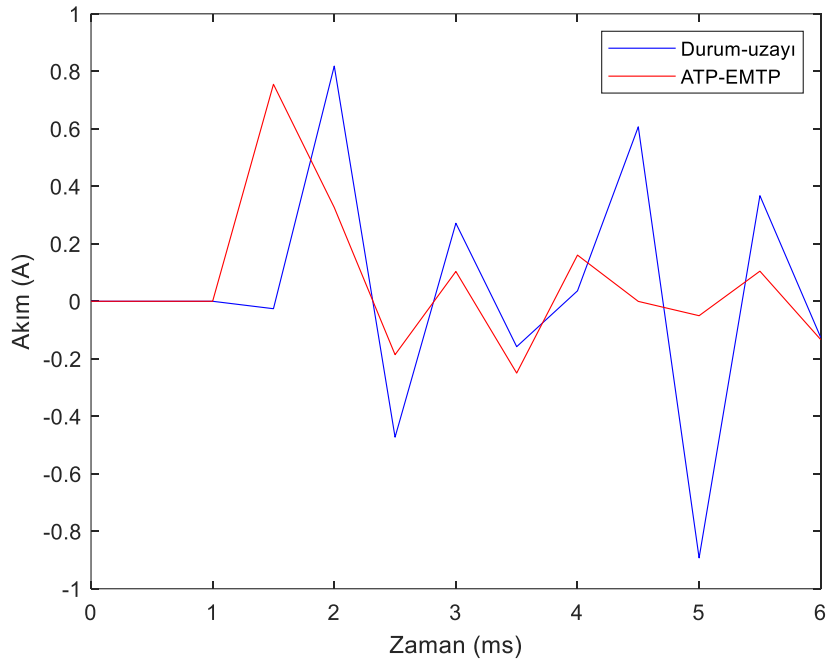


Şekil 5.56: Transformör primer terminali gerilim dalga formları kıyaslaması $\Delta t=5 \times 10^{-5}$ s.

Yukarıda verilen gerilim grafikleri incelendiğinde, durum-uzayı yöntemiyle elde edilen dalga formunun osilasyona girdiği görülmektedir. Her iki yöntemin sonuçlarının farklı olduğu tespit edilmiştir. Adım aralığı değerinin farklı yöntemlerdeki etkisinin gösterilmesi amacıyla aşağıda $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s için akım dalga formları gösterilmiştir.

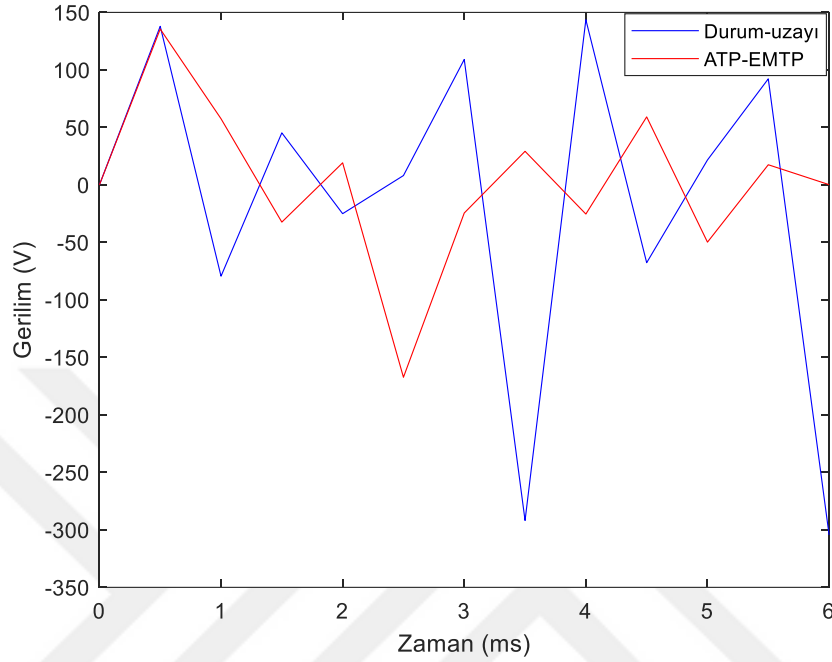


Şekil 5.57: Yıldırımın düştüğü noktadaki akım dalga formları kıyaslaması $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s.

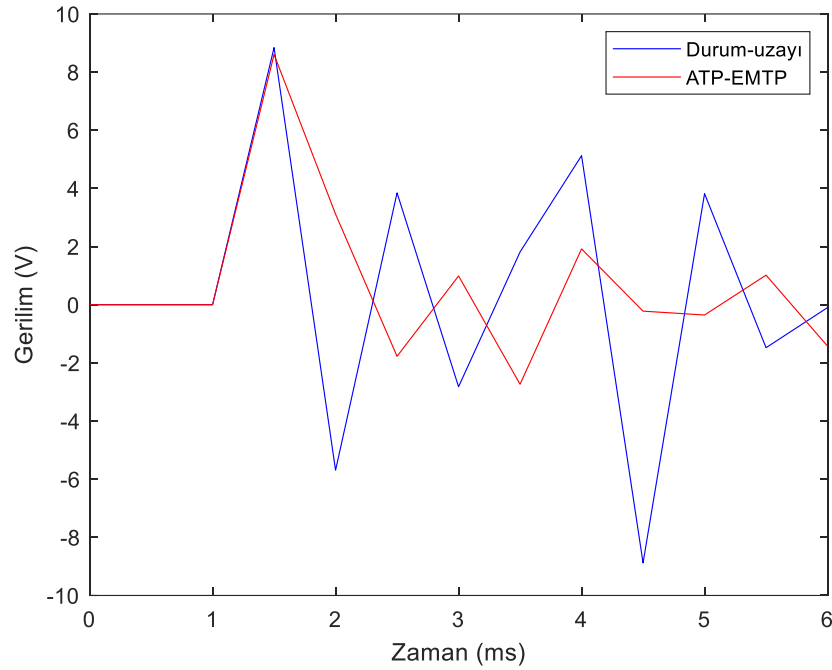


Şekil 5.58: Transformatör primer terminali akım dalga formları kıyaslaması $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s.

Yukarıda verilen akım grafikleri incelendiğinde, her iki yöntemden elde edilen dalga formlarının birbirinden tamamen farklı olduğu ve gerçek verilerden oldukça uzak sonuçlar verdiği görülmektedir. Aynı adım aralığı için her iki yöntemden elde edilen gerilim grafikleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.59: Yıldırımın düştüğü noktadaki gerilim dalga formları kıyaslaması $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s.

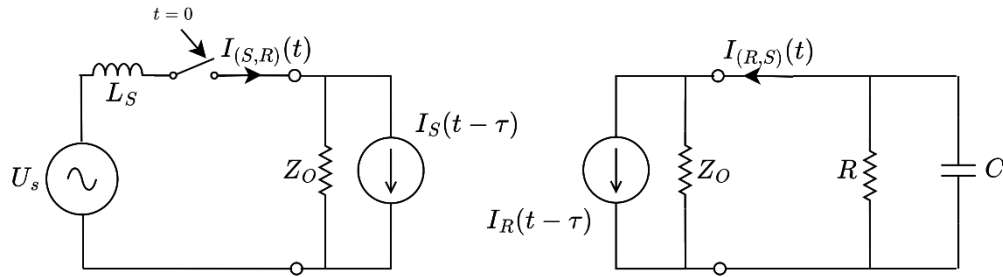


Şekil 5.60: Transformör primer terminali gerilim dalga formları kıyaslaması $\Delta t=5 \times 10^{-4}$ s.

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde, adım aralığı arttıkça, gerçek dalga formlarından uzaklaşıldığı görülmektedir. Özellikle çok büyük adım aralığında gerçek dışı akım-gerilim verileri elde edilmiştir. Bu durum sayısal kararsızlığa, hassasiyet kaybına ve fiziksel anlamsızlığa sebebiyet vermektedir. ATP-EMTP programı, kapasitans ve endüktansların diferansiyel denklemlerini akım kaynakları ve karakteristik empedans olarak modellemekte ve bunun için trapezoidal kuralı kullanmaktadır. Ancak, bu tezde parametreler analitik olarak modellenirken, durum denklemlerinin çözümünde sayısal entegrasyon için trapezoidal kural kullanılmıştır. Geçici rejim analizlerinde daha düşük adım aralığı kullanmak, daha doğru, daha gerçekçi ve daha hassas sonuçlar vereceği anlamına gelmektedir. Adım aralığının daha küçük seçilmesinin simülasyon zamanını arttırması gibi bir dezavantajı vardır. Ancak bir güç sisteminin davranışının doğru modellenmesi ve sistemin doğru tasarlanması adına bu dezavantaj göz ardı edilebilecek bir durumdur.

5.7 RC Yüklü İletim Hattı Anahtarlama Uygulaması ve Analizi

Bu uygulamada, RC yüklü kayıpsız bir iletim hattında anahtarlama durumu modellenmiştir. Uygulamaya ait eşdeğer devre Şekil 5.61’de verilmiştir.

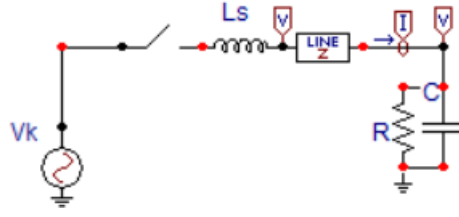


Şekil 5.61: RC yüklü iletim hattı anahtarlama eşdeğer devresi.

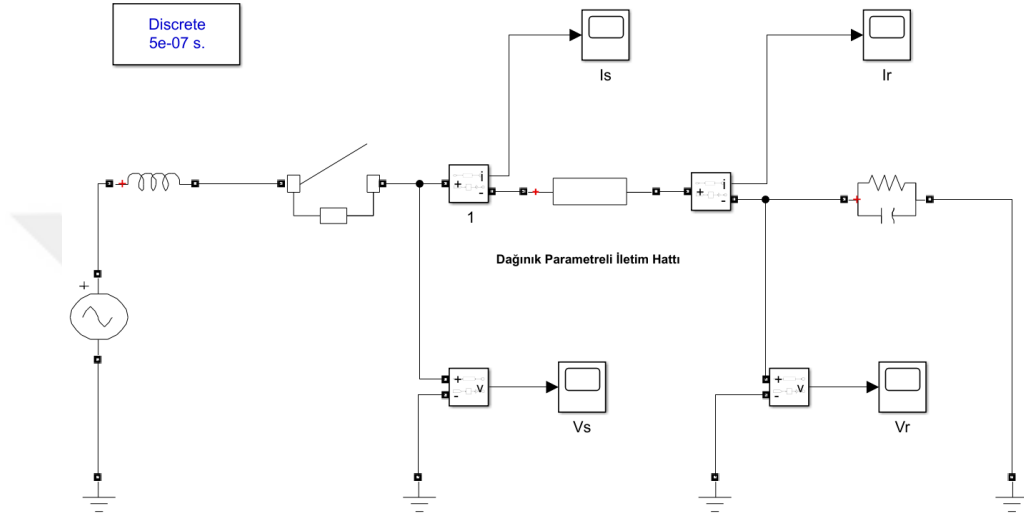
Eşdeğer devreye ait durum denklemleri indüktör akımları ve kapasitör gerilimleri seçilerek denklem (5.17)’deki gibi elde edilir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{Z_0}{L}\right) & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{R} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & \frac{Z_0}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_s(t) \\ I_s(t-\tau) \\ I_r(t-\tau) \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Bu uygulamaya ait ATP-EMTP modeli Şekil 5.62’de, MATLAB/Simulink eşdeğer devresi Şekil 5.63’te verilmiştir.



Şekil 5.62: RC yüklü iletim hattı anahtarlama ATP-EMTP modeli.



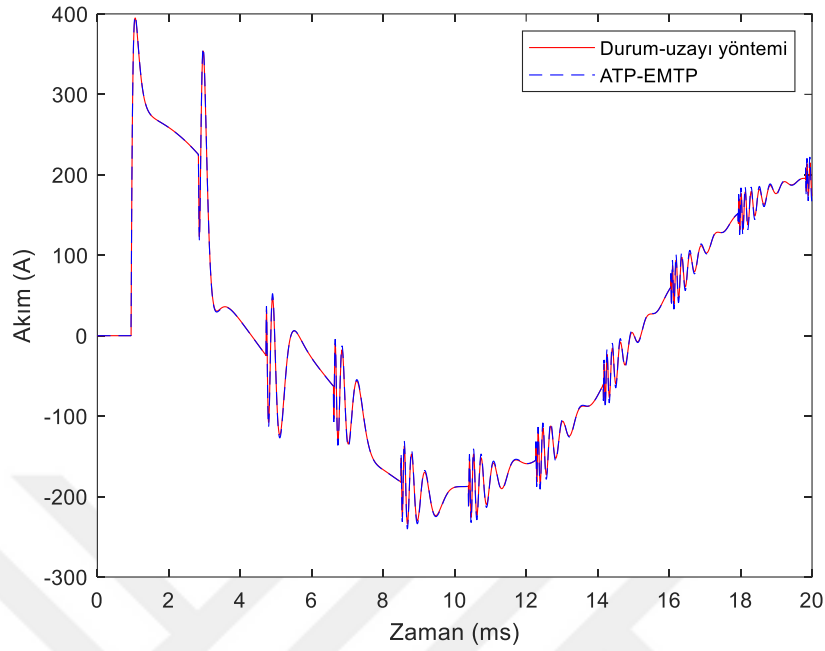
Şekil 5.63: RC yüklü iletim hattı anahtarlama MATLAB/Simulink modeli.

Anahtarlama uygulaması için kullanılan parametreler Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4: Hat ve yük parametreleri.

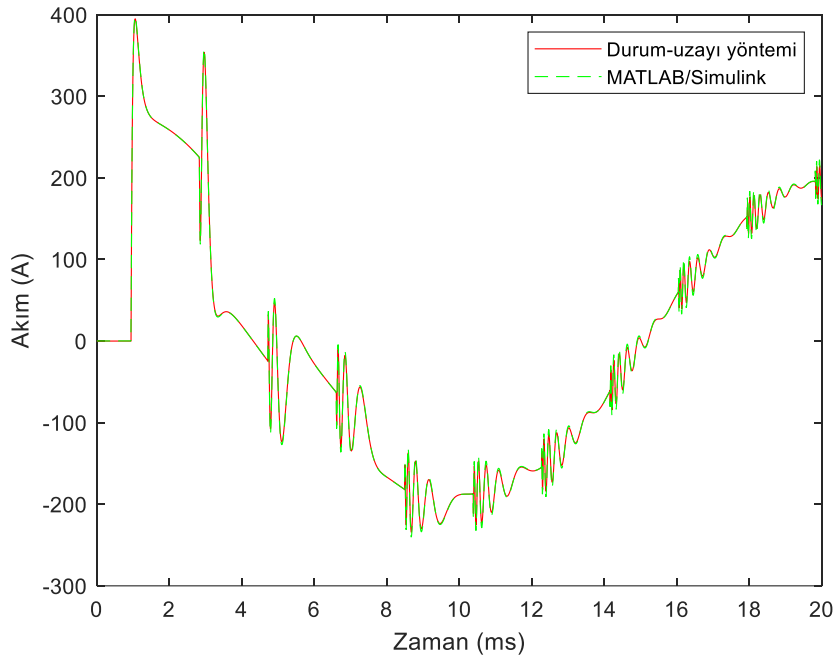
d	250 km
l	1.5 mH/km
c	9.5 nF/km
L_s	40 mH
R	1200 Ω
C	0.2 μF
$U_s(t)$	220 kV
Δt	5×10^{-7} s
$t_{\max}$	20 ms

Yukarıda verilen parametreler kullanılarak, durum-uzay yöntemi ve ATP-EMTP simülasyonundan elde edilen hattın alıcı uç (I_r) akım grafiği Şekil 5.64'te verilmiştir.



Şekil 5.64: Durum-uzay yöntemi ve ATP-EMTP modelinden elde edilen I_r dalga formları.

MATLAB/Simulink ve durum-uzay yöntemiyle elde edilen akım dalga formları Şekil 5.65'te verilmiştir.



Şekil 5.65: Durum-uzay yöntemi ve MATLAB/Simulink modelinden elde edilen I_r dalga formları.

Yukarıda verilen alıcı uç akım grafikleri incelendiğinde, anahtarlama dolayısı ile ani ve yüksek bir tepe akımı oluştuğu, akım dalgasının osilasyona uğradığı, hat sonuna belirli bir gecikme ile ulaştığı tespit edilmiştir. Zaman ilerledikçe dalganın genliğinin azaldığı ve dalganın daha stabil bir dalga formuna yaklaştığı dolayısıyla kararlı hale benzemeye yaklaştığı görülmektedir. Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen akım profilinin hem MATLAB/Simulink hem de ATP-EMP modeliyle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Güç sistemlerinde geçici rejim (transient state) ve kalıcı rejim (steady-state) olmak üzere iki farklı rejim vardır. Kalıcı rejim, sistemin zamanla değişen geçici rejim davranışlarını tamamlayarak, sabit bir denge durumuna ulaştığı durumu ifade eder. Geçici rejim, bir güç sisteminde herhangi bir dış uyarı ya da ani değişim sonucunda, sistem parametrelerinin (gerilim, akım, güç vb.) yeni bir dengeye ulaşmadan önce geçirdiği kararsız ve zamana bağlı değişim dönemini ifade eder. Geçici rejim, sistemin kalıcı rejime ulaşması öncesinde meydana gelen dinamik davranışları kapsar. Geçici rejimler, enerji depolayan bileşenler içeren bir sistemde meydana gelen ani durum değişimlerinden kaynaklanır. Bu tür ani değişimler sırasında, enerji depolayan elemanlar anında tepki veremez. Depolanan enerjinin sistemde dengeli bir şekilde dağılımı belirli bir süre alır. Elektrik devrelerinde enerji depolayan elemanlar arasında indüktörler ve kapasitörler önemli bir yer tutar. Dolayısıyla, anahtarlama işlemleri veya sistemde meydana gelen bir arıza gibi bu elemanların durumlarını etkileyen olaylar, geçici durumların oluşmasına neden olur. Başka bir ifadeyle, indüktör üzerinden geçen akım ya da bir kapasitör üzerindeki gerilim aniden değişmez. Bu değişimin gerçekleşmesi için belirli bir zaman dilimi gerekir ve bu süre zarfında akım ve gerilim değerleri sistemde oldukça yüksek seviyelere ulaşarak salınımlı bir şekilde sönümlenir. Enerji iletim hatları eşdeğer devrelerinin indüktör ve kapasitörden oluştuğu göz önünde bulundurulduğunda, bu hatlarda geçici rejimlerin yaşanması olağan bir durum olarak karşılanabilir. Ancak güç sistemlerinde yaşanan bu geçici rejimlerin detaylı bir şekilde analizi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında geçici rejimlerin öneminden hareketle, tek fazlı dağıtık parametrelili bir enerji iletim hattının durum-uzay modellemesi ve analizi yapılmıştır. İndüktör akımları ve kapasitör gerilimleri durum değişkenleri olarak seçilmiştir. Nümerik entegrasyon için trapezoidal (yamuk) kuralı kullanılmıştır. Durum-uzay yönteminin uygulanabilirliğini ve kabiliyetini göstermek çeşitli geçici rejim analizleri yapılmıştır.

İletim hattı-transformatör anahtarlama uygulamasında, dağıtık parametrelili iletim hattının sonuna disk yapılı sargıdan oluşan bir güç transformatorü bağlanmış ve hattın enerjilendirilmesi durumunda hem iletim hattı hem de transformatordeki geçici rejimler

incelenmiştir. Kaynaktan çıkan gerilim dalgası hat sonuna belirli bir gecikme ile varmıştır. Transformatör disklerindeki gerilim seviyelerinin ve hattın akan akım seviyesinin nötr topraklama direncine bağlı oldu tespit edilmiştir. İlk diskten son diske doğru ilerledikçe disklerin maruz kaldığı gerilim seviyesi azalmıştır. Enerjilendirme anındaki gerilim dalga formları düzensizken kararlı hale gelindiğinde bu dalga formlarının sinüsoidal forma daha çok benzediği belirlenmiştir. Bu model için hem durum-uzayı metodu hem de ATP-EMTP simülasyon programından elde edilen veriler kıyaslanmıştır. Grafiklerdeki dalga formları ve akım-gerilim değerlerinin birbiriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Yıldırım darbe uygulamasında, RC yüklü dağıtık parametrelili iletim hattının başına yıldırım darbesi düşmüş ve yıldırımın hat üzerindeki etkileri durum-uzayı yöntemiyle analiz edilmiştir. Bu uygulamada, durum-uzayı denklemlerinin üretilmesi için kapasitör gerilimleri ve indüktör akımları durum değişkeni olarak seçilmiştir. Yıldırım düşmesi neticesinde yıldırımın düştüğü noktada ve iletim hattının alıcı uçlarında oldukça yüksek akım ve gerilim seviyelerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Aşırı yüksek seviyede gerilim ve akım değerler güç sistemine, koruma elemanlarına zarar verme potansiyeline sahip olmakla birlikte yalıtım problemlerinin oluşmasına sebebiyet verebilir. Yıldırım gerilim ve akım dalgalarının ilk darbe anında çok yüksek seviyelerde olduğu ancak hat sonunda çarpıp geri döndüğünde zayıflama eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum dalgaların bir ortamdan farklı bir ortama geçmesinde dalga yansıma katsayısı ve dalga yansıma özelliği ile ilgilidir. Bu modelin geçici rejim analizi için hem durum-uzayı modeli hem de ATP-EMTP simülasyonu kullanılmıştır. Her iki yöntemden alınan sonuçlar karşılaştırılmış ve sonuçların birbirini desteklediği tespit edilmiştir.

İletim hattı-transformatör yıldırım darbe uygulamasında, iletim hattının sonuna bağlanmış disk yapılı bir transformatörün nötr topraklı primer tarafındaki disklerin sargılarındaki gerilim dağılımları ve iletim hattına yıldırım düşmesi sonucu iletim hattında oluşan gerilim-akım dalga şekilleri durum-uzayı yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Hattın gönderici ucunda, yıldırım darbesi nedeniyle MV seviyelerinde ani bir gerilim yükselmesi meydana gelmiştir. Yıldırımın dalgasının transformatör sargılarına varış süresi hattın karakteristik empedansına bağlıdır ve akım-gerilim dalgalarının trafo sargılarına yaklaşık 1 ms gecikmeyle ulaşmasına neden olur. Dolayısıyla bu çalışma, iletim hattının yıldırım düşmesi nedeniyle sargılardaki gerilim dağılımları üzerindeki etkisini de içermektedir. Transformatör disklerindeki tepe gerilim değerleri ve iletim hattının gönderici ve alıcı uçlarındaki akım-gerilim değerleri kaydedilmiştir. Birbirine ardışık bağlı diskler arasındaki

gerilim farkı yaklaşık 6,5 kV iken, ilk ve son diskler arasındaki gerilim farkı 60,5 kV'tur. Topraklama direnci değeri arttıkça diskler üzerindeki tepe gerilim değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Tepe gerilim değerleri artmasına rağmen, diskler arasındaki gerilim farkı yaklaşık 6,5 kV'ta sabit kalırken, gerilim dağılımı ilk diskten son diske doğru lineer olarak azalmıştır. Bu, ilk disklerdeki yalıtımın son disklerle göre daha kritik olduğunu gösterir. Tepe gerilim seviyesi her diskte farklılık gösterdiğinden, disklerdeki sargı yalıtımı da farklılık gösterebilir. Sargılar aşırı gerilimlere dayanacak şekilde tasarlanmalıdır.

İletim hattı-transformatör bağlantı noktası arıza uygulamasında, iletim hattının sonuna bir güç transformatörü bağlanmış ve enerjilendirme işlemi yapılmıştır. İletim hattının enerjilendirilmesinden 20 ms sonra transformatör primer terminalinde yaşanan arıza neticesinde hattın gönderici ucu ve alıcı ucuna (transformatör primer terminali) ait akım-gerilim dalga profilleri durum-uzayı yöntemi ve ATP-EMTP kullanılarak elde edilmiştir. Arıza neticesinde transformatör primer terminalindeki gerilim değerinin arıza anından itibaren ani bir düşüşle sıfıra yaklaştığı, hattın gönderici ucunun ise çok yüksek tepe gerilim seviyelerine vararak kararlı halden kararsız hale geçiş yaptığı tespit edilmiştir. Ayrıca hat başı ve hat sonu akım dalgalarının da kararlı halden kararsız hale geçerek çok yüksek akım tepe değerlerine ulaştığı sonucuna varılmıştır. Yaşanan arızadan dolayı gerek iletim hattında gerekse transformatörde ciddi bir oranda akım-gerilim seviyelerinde değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Buradaki değişimler disklerin maruz kaldığı gerilim seviyelerine de etki etmiştir. Durum-uzayı yöntemi ve ATP-EMTP programından elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bu modelde yaşanan arızada, arıza direnç değerinin etkisinin gösterilmesi adına farklı arıza dirençleri kullanılarak durum-uzayı yöntemiyle geçici rejim çalışmaları da yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde artan arıza direnci hattın gönderici ucuna ait tepe gerilim seviyelerinde azalmaya sebep olmuştur. Yine arıza direncinin artmasıyla transformatör primer terminalindeki gerilim seviyelerinin artmasına ve kararlı hale benzemeye çalışmasına katkıda bulunmuştur. Arıza direnç değerinin artmasıyla gerek hat başı gerekse hat sonundaki akım tepe değerleri azalma meydana gelmiş ve arıza direnç değeri ile hat akımları arasında ters bir orantı olduğu sonucuna varılmıştır.

İletim hattı-transformatör yıldırım darbe arıza uygulamasında, iletim hattının bir faz iletkenine yıldırım düştükten 1.06 ms sonra transformatörün primer terminalinde arıza yaşanmış ve bu arıza neticesinde durum-uzayı yöntemi ve ATP-EMTP kullanılarak iletim hattı ve transformatöre ait bazı geçici rejim analizleri yapılmıştır. Yıldırım darbesinden 1.06

ms sonra yaşanan arıza neticesinde, arıza yaşanmayan duruma kıyasla gerek yıldırımın düştüğü noktada gerekse transformatörün primer terminalinde yüksek gerilim tepe noktalarına varıldığı ve arıza anında transformatör primer terminal gerilimin ani ve keskin bir düşüşle 0 V'a daha kısa bir sürede yaklaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca ilerleyen periyotlarda transformatör primer terminali geriliminin neredeyse tamamen sönümlendiği görülmüştür. Akım dalga profillerinde ise transformatörün bağlı olduğu uç olan hat sonunda arıza anında ani ve keskin bir yükseliş meydana gelmiştir. Yıldırımın darbesinin düştüğü noktada ise arıza yaşanmaması durumuna kıyasla yine daha yüksek akım tepe değerlerine ulaşılmıştır. Sonuç olarak iletim hattına düşen yıldırım kaynaklı arızadan dolayı yüksek seviyelerde akım-gerilim değerleri oluşmuştur. Durum-uzayı yöntemi ve ATP-EMTP kullanılarak elde edilen geçici rejim sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçların birbirini destekler nitelikte olduğu tespit edilmiştir. Bu arıza uygulamasında, arıza direnç değerinin etkisini göstermek adına arıza direnç değerleri değiştirilmiş ve durum-uzayı yöntemiyle geçici rejim çalışmaları yapılmıştır. Arıza direnç değerinin artması, yıldırım darbesinin düştüğü noktadaki tepe gerilim değerinin azalmasına, transformatörün primer terminalindeki gerilimin daha kısa sürede düşmesine sebep olmuştur. Arıza direnci arttıkça yıldırımın düştüğü noktadaki akım dalgasının tepe değeri ve hat sonundaki akım tepe değeri azalmıştır. Arıza direncinin gerek iletim hattında gerekse transformatör disklerindeki gerilim seviyelerinde önemli ölçüde etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışmada, adım aralığının geçici rejimlerin analizindeki etkisini göstermek adına farklı adım aralıkları için hem ATP-EMTP hem de durum-uzayı yöntemiyle geçici rejim simülasyonları yapılmıştır. Bu simülasyonlar sonucunda, her iki yöntemde de adım uzunluğunun arttırılması sonuçları olumsuz bir şekilde etkilediği gözlemlenmiştir. Gerek dalga formları gerekse dalga tepe değerlerinde ciddi değişimler meydana gelmiştir. Daha büyük adım aralığı daha kötü sonuçlar vermiştir. Adım aralığı küçüldükçe gerçeğe daha yakın akım-gerilim profillerinin elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Her iki yöntemde büyük değerlerdeki eşit adım aralığında farklı sonuçların elde edilmesinin sebebi, sayısal entegrasyonun yapıldığı yer olduğu düşünülmektedir. ATP-EMTP kapasite ve endüktansları akım kaynağı ve direnç olarak modellemekte ve bu parametrelerin dönüşümü için trapezoidal kuralı kullanmaktadır. Ancak tez çalışmasında, parametreler analitik olarak modellenirken, denklemlerin çözümünde sayısal entegrasyon için trapezoidal kural kullanılmıştır.

RC yüklü iletim hattının anahtarlama uygulamasında, durum-uzayı yönteminin geçerliliği göstermek adına ATP-EMTP modeline ek olarak MATLAB/Simulink ortamında da simülasyonlar yapılmıştır. Durum-uzayı yöntemiyle elde edilen sonuçların ATP-EMTP ve MATLAB/Simulink'ten elde edilen sonuçlarla neredeyse birebir aynı olduğu tespit edilmiş ve önerilen yöntemi doğruluğu teyit edilmiştir.

Transformatör sargıları aşırı gerilim koşullarına maruz kaldığında, yalıtım bozulması, termal stres, dielektrik arızası, mekanik stresler ve kıvılcım veya ark oluşumu dahil olmak üzere çeşitli kritik sorunlar ortaya çıkabilir. Bu yöntem sayesinde, sargılarda oluşabilecek herhangi bir deformasyon veya çalışma gerilimi altında diskler arasında, sargılar arasında veya disk ile transformatör tankı arasında oluşabilecek herhangi bir kısa devre arızası ileride yapılacak çalışmalarla analiz edilebilir. Transformatör parametrelerinin frekans bağımlı karakteristiklerinin daha iyi anlaşılabilmesi ve geçici rejim analizlerin daha sağlıklı yapılabilmesi adına durum-uzayı yöntemi kullanılarak gelecekte farklı modellemeler yapılabilir. Ayrıca, bir faza düşen yıldırımın diğer fazlar üzerindeki etkisi de bu yaklaşımla incelenebilir. Bu konular, iletim hatlarının ve transformatörlerin güvenilirliğini ve uzun ömürlülüğünü sağlamak için sağlam aşırı gerilim koruma sistemlerine duyulan kritik ihtiyacın altını çizmektedir. Durum-uzayı yöntemi, frekans tepkisi analizinde kullanılan transformatör modelinin geçici durum analizi için alternatif bir yaklaşım olarak kullanılabilir. Özellikle disk sayısının yüksek olduğu transformatörlerin geçici rejim analizinde durum-uzayı yönteminin avantajı oldukça fazladır. Çünkü yazılan kodlar sayesinde sadece disk sayısının sisteme girilmesi yeterli olacaktır. Ve bu duruma ait matrisler yine MATLAB'ta yazılan kodlar yardımıyla otomatik olarak oluşturulacaktır. Durum-uzayı yönteminin bir diğer üstünlüğü ise adım uzunluğu sınırlaması olmamasıdır. Adım uzunluğu istenilen küçüklükte seçilebilir ve bu sayede elde edilen sonuçların daha hassas ve daha doğru olması sağlanır. Önerilen yöntem, iletim hatlarının ve transformatör koruma ekipmanlarının tasarımını kolaylaştırmakla birlikte transformatör üreticilerinin yıldırım darbe testlerinde de katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Mamiş, M. S., Kaygusuz, A., & Köksal, M.** (2010). State variable distributed-parameter representation of transmission line for transient simulations, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 18(1), 31–42. <https://doi.org/10.3906/elk-0905-2>
- [2] **Jaimis Colqui, S. L., Anderson De Araujo, R. J., & Kurokawa, S.** (2018). A new methodology for calculating electromagnetic transients in transmission lines. In *INDUSCON 2018- Proceedings. 13th IEEE International Conference on Industry Applications*, (pp. 949–954). Sao Paulo, Brazil, November 12-14. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON.2018.8627286>
- [3] **Kurokawa, S., Yamanaka, F. N. R., Prado, A. J., & Pissolato, J.** (2009). Inclusion of the frequency effect in the lumped parameters transmission line model: State space formulation. *Electric Power Systems Research*, 79(7), 1155–1163. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2009.02.007>
- [4] **Kurokawa, S., Costa, E. C. M., Pissolato, J., Prado, A. J., & Bovolato, L. F.** (2010). Proposal of a transmission line model based on lumped elements: An analytic solution. *Electric Power Components and Systems*, 38(14), 1577–1594. <https://doi.org/10.1080/15325008.2010.492450>
- [5] **Navarro-Adlemo, R.** (1994). A state-space model for multiphase transmission lines. *Control Engineering Practice*, 2(2), 255–262. [https://doi.org/10.1016/0967-0661\(94\)90205-4](https://doi.org/10.1016/0967-0661(94)90205-4)
- [6] **Mamis, M. S.** (2003). State-Space Transient Analysis of Single-Phase Transmission Lines with Corona. In *Proceedings of the International Conference on Power Systems Transients 2003*, New Orleans, Louisiana, USA, September 28 – October 2.
- [7] **Chaban, A., Popenda, A., & Szafraniec, A.** (2023). Including shield wires in the analysis of transient processes. *Energies*, 16, 1–20. <https://doi.org/10.3390/en16237870>
- [8] **Mamis, M. S.** (2007). Discrete-time state-space modeling of distributed parameter transmission line. In *EUROCON 2007- The International Conference on Computer as a Tool*, (pp. 2078–2081). Warsaw, Poland, September 9-12. <https://doi.org/10.1109/EURCON.2007.4400383>
- [9] **Mamiş, M. S., & Nacaroğlu, A.** (2002). Transient voltage and current distributions on transmission lines. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 149(6), 705–712. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20020625>
- [10] **Da Costa, E. C. M., Kurokawa, S., Do Prado, A. J., & Pissolato, J.** (2011). Proposal of an alternative transmission line model for symmetrical and asymmetrical configurations. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 33(8), 1375–1383. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.06.015>
- [11] **Ghiyasi, S. M. S., Abedi, M., & Hosseinian, S. H.** (2022). A New Approach for the Estimation of Transient Voltage Profile Along Transmission Line. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 40(4), 295–302. <https://doi.org/10.1109/cjece.2017.2763988>
- [12] **Colqui, J. S. L., De Araújo, A. R. J., & Kurokawa, S.** (2019). Improving the

performance of a lumped transmission line model used in electromagnetic transient analysis. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 13(21), 4942–4951. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6301>

- [13] **De Carvalho, C. G., Costa, E. C. M., Kurokawa, S., & Pissolato, J.** (2016). Alternative Phase-domain Model for Multi-conductor Transmission Lines Using Two Modal Transformation Matrices. *Electric Power Components and Systems*, 44(3), 291–301. <https://doi.org/10.1080/15325008.2015.1110733>
- [14] **Sinkar, A., Zhao, H., Qu, B., & Gole, A. M.** (2021). A Comparative Study of Electromagnetic Transient Simulations using Companion Circuits, and Descriptor State-space Equations. *Electric Power Systems Research*, 198(April), 107360. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107360>
- [15] **Bilal, G., Gomez, P., Salcedo, R., & Villanueva-Ramirez, J. M.** (2019). Electromagnetic transient studies of large distribution systems using frequency domain modeling methods and network reduction techniques. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 110(January), 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.02.043>
- [16] **Mamiş, M. S., & Köksal, M.** (2000). Remark on the lumped parameter modeling of transmission lines. *Electric Machines and Power Systems*, 28(6), 565–575. <https://doi.org/10.1080/073135600268180>
- [17] **Mamiş, M., & Köksal, M.** (1996). Some Renovations in Transient Analysis of Transmission Lines by State-Space Techniques. *Mathematical and Computational Applications*, 1(1), 181–190. <https://doi.org/10.3390/mca1010181>
- [18] **Araújo, A. R. J., Silva, R. C., & Kurokawa, S.** (2014). Comparing Lumped and Distributed Parameters Models in. *2014 Ieee Pes T&d Conference And Exposition*, (pp 1–5). Chicago, Illinois, USA, April 14-17.
- [19] **Souza, N. V., Carvalho, C. G., Kurokawa, S., & Pissolato, J.** (2013). A distributed-parameters transmission line model developed directly in the phase domain. *Electric Power Components and Systems*, 41(11), 1100–1113. <https://doi.org/10.1080/15325008.2013.809823>
- [20] **Noda, T.** (2017). Frequency-dependent modeling of transmission lines using bergeron cells. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 12(S2), S23–S30. <https://doi.org/10.1002/tee.22564>
- [21] **Nuricumbo-Guillén, R., Espino Cortés, F. P., Gómez, P., & Martínez, C. T.** (2019). Computation of transient profiles along nonuniform transmission lines including time-varying and nonlinear elements using the numerical Laplace transform †. *Energies*, 12(17), 3227. <https://doi.org/10.3390/en12173227>
- [22] **Semlyen, A., & Ramirez, A.** (2008). Direct Frequency Domain Computation of Transmission Line Transients Due to Switching Operations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(4), 2255–2261. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.2002651>
- [23] **Gupta, S. C., & Singh, B. P.** (1992). Determination of the impulse voltage distribution in windings of large power transformers. *Electric Power Systems Research*, 25(3), 183–189. [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(92\)90017-U](https://doi.org/10.1016/0378-7796(92)90017-U)
- [24] **Hassan, I., Nguyen, H. V., & Jamison, R.** (2000). Analysis of energizing a large

- transformer from a limited capacity engine generator. In *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077)* (pp. 446–451). Singapore, January 23–27. <https://doi.org/10.1109/PESW.2000.850005>
- [25] **Kezunovic, M., & Guo, Y.** (2000). Modeling and simulation of the power transformer faults and related protective relay behavior. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(1), 44–50. <https://doi.org/10.1109/61.847227>
- [26] **Popov, M., Van Der Sluis, L., Paap, G. C., & De Herdt, H.** (2003). Computation of very fast transient overvoltages in transformer windings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(4), 1268–1274. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.817738>
- [27] **Ruan, L., Zhao, C., Du, Z., Ruan, J., Deng, W., & Shen, Y.** (2008). Solution for voltage distribution in transformer winding based on the model of multi-conductor transmission line. In *Proceedings of the 2008 International Conference on Computer and Electrical Engineering, ICCEE 2008*, (pp. 87–91). Phuket, Thailand, December 20–22. <https://doi.org/10.1109/ICCEE.2008.104>
- [28] **Smajic, J., Steinmetz, T., Ruegg, M., Tanasic, Z., Obrist, R., Tepper, J., Weber, B., & Carlen, M.** (2014). Simulation and Measurement of Lightning-Impulse Voltage Distributions Over Transformer Windings. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(2), 553–556. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2283061>
- [29] **Theocharis, A., Popov, M., & Terzija, V.** (2016). Computation of internal voltage distribution in transformer windings by utilizing a voltage distribution factor. *Electric Power Systems Research*, 138(3), 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.01.001>
- [30] **Zupan, T., Trkulja, B., Obrist, R., Franz, T., Cranganu-Cretu, B., & Smajic, J.** (2016). Transformer Windings' RLC Parameters Calculation and Lightning Impulse Voltage Distribution Simulation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(3), 2–5. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2481004>
- [31] **Ma, X., Zhang, N., Zhou, X., He, Z., Wang, Y., & Wang, S.** (2024). Calculation of Lightning Impulse Voltage Distribution of Voltage Transformer. In *Proceedings of 2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference, CIEEC 2024*, (pp. 1256–1261). Harbin, China, May 10–12. <https://doi.org/10.1109/CIEEC60922.2024.10583604>
- [32] **Jurišić, B., Jurković, Z., Župan, T., & Marković, M.** (2024). Hybrid Analytical-FEM Approach for Power Transformer Transient Analysis. *Journal of Energy - Energija*, 73(1), 8–13. <https://doi.org/10.37798/2024731512>
- [33] **Ghorbal, M. B., Mirzaei, H. R., & Rahimpour, E.** (2024). Precise Modeling of Chopped Lightning Impulse Test of Power Transformers. *Electric Power Systems Research*, 230(November 2023), 110207. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110207>
- [34] **Adamczyk, B., Pajak, P., & Florkowski, M.** (2024). Comparison of initial voltage distributions in layer and disc type power transformer windings. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 32(1), 73–82. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2024.3473893>

- [35] **Url-1** <<https://www.teias.gov.tr/faaliyet-raporlari>>, date retrived 07.03.2025.
- [36] **Akmaz, D.** (2017). İletim Hatlarında Arıza Yeri ve Türünün Geçici Rejim Sinyalleri ve Makine Öğrenme Algoritmaları ile Belirlenmesi (Doktora tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [37] **Mamiş, M. S.** (1992). Steady-State and Transient Analysis of Transmission Lines by Using State-Space Techniques (Yüksek lisans tezi). Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- [38] **Koksal, M., & Mamis, M. S.** (2000). Remark on the Lumped Parameter Modeling of Transmission Lines. *Electric Machines & Power Systems*, 28(6), 565–575. <https://doi.org/10.1080/073135600268180>
- [39] **Bergeron, L.** (1961). *Water Hammer in Hydraulics and Wave Surges in Electricity*.
- [40] **Branin, F. H.** (1967). Transient Analysis of Lossless Transmission Lines. In *Proceedings of the IEEE*, 55(11), (pp. 2012–2013). <https://doi.org/10.1109/PROC.1967.6033>
- [41] **Dommel, H.** (1969). Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single-and Multiphase Networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-88(4), 388–399. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1969.292459>
- [42] **Dommel, H.** (1992). *EMTP Theory Book, Microtran Power System Analysis Corporation* (2nd ed). Vancouver, BC, Canada.
- [43] **Mamiş, M. S., Kaygusuz, A., & Köksal, M.** (2010). State variable distributed-parameter representation of transmission line for transient simulations. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 18(1), 31–42. <https://doi.org/10.3906/elk-0905-2>
- [44] **Akkılınç, R.** (2011). Güç Sistemlerinin Durum Uzay Teknikleri ile Analizi (Yüksek lisans tezi). İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [45] **Arı, İ.** (2018). Korona Boşalmalarının Tutuşmasında ve Sönümlemesinde Yüksek Frekans Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi (Yüksek lisans tezi). Siirt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Siirt.
- [46] **Çetin, R.** (2018). Atmosferik Nemin Yüksek Gerilim Hava Hatlarında Gerçekleşen Korona Kayıpları Üzerindeki Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi (Yüksek lisans tezi). Siirt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Siirt.
- [47] **Arı, İ., & Hansu, F.** (2024). Experimental Investigation of High-Frequency Effect on Ignition and Damping of Corona Discharges. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 1, 15–22. <https://doi.org/10.24012/dumf.1351383>
- [48] **Omboua, A., & Labane, H. A.** (2017). High voltage lines: energy losses in insulators. *The International Journal of Engineering and Science*, 6(10), 58–62. <https://doi.org/10.9790/1813-0610025862>
- [49] **Cvetić, J., Heidler, F., & Schwab, A.** (1999). Light intensity emitted from the lightning channel: comparison of different return stroke models. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32(3), 273–282. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/32/3/015>
- [50] **Jia, W., & Xiaoqing, Z.** (2006). Double-Exponential expression of lightning current waveforms. In *The 2006 4th Asia-Pacific Conference on Environmental*

Electromagnetics, (pp. 320–323). Dalian, China, August 01-04.
<https://doi.org/10.1109/CEEM.2006.257962>

- [51] **Heidler, F., Cvetić, J. M., & Stanić, B. V.** (1999). Calculation of lightning current parameters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(2), 399–404.
<https://doi.org/10.1109/61.754080>
- [52] **Heidler, F., & Cvetić, J.** (2002). A class of analytical functions to study the lightning effects associated with the current front. *European Transactions on Electrical Power*, 12(2), 141–150. <https://doi.org/10.1002/etep.4450120209>
- [53] **Şeker, M.** (2022). Parameter estimation of positive lightning impulse using curve fitting-based optimization techniques and least squares algorithm. *Electric Power Systems Research*, 205(June 2021), 107733.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107733>
- [54] **Bewley, L. V.** (1931). Traveling waves on transmission systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 50(2), 532–550
- [55] **Mamis, M. S., & Keleş, C.** (2024). ATP-EMTP simulation of lightning protection system for multi-storey building. *UNEC Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(1), 43–54. <https://doi.org/10.61640/ujeas.2024.0504>
- [56] **Bal, G.** (2016). *Elektrik Makinaları-I* (5. Baskı), Ankara.
- [57] **İlkkahraman, M.** (2008). Güç Transformator Arızalarının İncelenmesi (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [58] **Samal, M., & Mondal, M.** (2023). Power Transformer FRA Studies Using Ladder, Multi-Conductor Transmission Lines (MTL), Circular MTL, and Hybrid Winding Models. In *2023 IEEE 8th International Conference for Convergence in Technology, I2CT 2023*, (pp. 1–6). Lonavla, India, April 7-9. <https://doi.org/10.1109/I2CT57861.2023.10126461>
- [59] **Samal, M., & Mondal, M.** (2022). Estimation of a Disk Transformer Winding's Ladder Network Parameters Using Analytical, FEM, and Terminal Measurements. In *2022 IEEE North Karnataka Subsection Flagship International Conference, NKCon 2022*, (pp. 1–6). Vijayapura, India, November 20-21. <https://doi.org/10.1109/NKCon56289.2022.10126684>
- [60] **Amara, A., Gacemi, A., Houassine, H., & Chaouche, M. S.** (2021). A novel methodology for high-frequency lumped equivalent circuit of an isolated transformer winding construction based on frequency response analysis signal morphology interpretation. *IET Electric Power Applications*, 15(2), 171–185. <https://doi.org/10.1049/elp2.12013>
- [61] **Zhang, Z.** (2024). Derivation of transformer winding equivalent circuit by employing the transfer function obtained from frequency response analysis data. *IET Electric Power Applications*, 18(7), 826–840.
<https://doi.org/10.1049/elp2.12436>
- [62] **Ragavan, K., & Satish, L.** (2007). Localization of changes in a model winding based on terminal measurements: Experimental study. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(3), 1557–1565. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.886789>
- [63] **Popov, M., Gustavsen, B., & Martinez-Velasco, J. a.** (2012). *Electromagnetic Transients in Transformer and Rotating Machine Windings* (1st Ed.). Pennsylvania, USA.

- [64] **Wilcox, D. J., Hurley, W. G., & Conlon, M.** (1989). Calculation of self and mutual impedances between sections of transformer windings. *IEEE Proceedings C: Generation Transmission and Distribution*, 136(5), (pp. 308–314). <https://doi.org/10.1049/ip-c.1989.0041>
- [65] **Al-Ameri, S. M. A. N., Kamarudin, M. S., Yousof, M. F. M., Salem, A. A., Banakhr, F. A., Mosaad, M. I., & Abu-Siada, A.** (2021). Understanding the Influence of Power Transformer Faults on the Frequency Response Signature Using Simulation Analysis and Statistical Indicators. *IEEE Access*, 9, 70935–70947. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3076984>
- [66] **Kulkarni, S. V.; Khaparde, S. A.** (2004). *Transformer Engineering: Design and Practice* (1st ed.). New York, USA.
- [67] **Jaarsveld, B. J. Van.** (2013). *Wide band modelling of an air-core power transformer winding* (Master's thesis). Retrieved from <https://scholar.sun.ac.za/items/5a96304a-26f7-4052-8898-d29338327623>
- [68] **Samal, M., Lakshmi Prasanna, K., Mishra, P., & Mondal, M.** (2024). Accurate Estimation of Transformer Winding Capacitances and Voltage Distribution Factor Using Driving Point Impedance Measurements. *IEEE Access*, 12(September), 133670–133684. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3460968>
- [69] **Olivares, J. C., Cañedo, J., Moreno, P., Driesen, J., Escarela, R., & Palanivasagam, S.** (2002). Experimental study to reduce the distribution-transformers stray losses using electromagnetic shields. *Electric Power Systems Research*, 63(1), 1–7. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(02)00096-2)
- [70] **Penabad-Durana, P., Lopez-Fernandez, X. M., & Turowski, J.** (2015). 3D non-linear magneto-thermal behavior on transformer covers. *Electric Power Systems Research*, 121, 333–340. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.11.010>
- [71] **Rahimpour, E., Christian, J., Feser, K., & Mohseni, H.** (2003). Transfer function method to diagnose axial displacement and radial deformation of transformer windings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(2), 493–505. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.809692>
- [72] **Tahir, M., & Tenbohlen, S.** (2019). A comprehensive analysis of windings electrical and mechanical faults using a high-frequency model. *Energies*, 13(1), 105. <https://doi.org/10.3390/en13010105>
- [73] **Abeywickrama, N., Serdyuk, Y. V., & Gubanski, S. M.** (2008). High-frequency modeling of power transformers for use in frequency response analysis (FRA). *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(4), 2042–2049. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.917896>
- [74] **Yiwei, F., Chenguo, Y., Jiangnan, L., Shoulong, D., Yu, L., Huangtong, L., & Lisheng, Z.** (2025). Equivalent Circuit Model and Experimental Validation of Transformer Windings Considering Long-Distance Conductor Effects and Frequency-Dependent Parameters. *IET Electric Power Applications*, 19(1). <https://doi.org/10.1049/elp2.70009>
- [75] **Thein, M. M., Toda, H., Hikita, M., Ikeda, H., Haginomori, E., & Koshiduka, T.** (2011). Investigation of Transformer Model for TRV Calculation by Using Frequency Dependent Inductance Model. *Journal of International Council on*

- [76] **Arifoğlu, U.** (2013). *Elektrik-Elektronik Devrelerinin Analizi* (1. Basım), İstanbul.
- [77] **Gültekin, S.** (2012). *MATLAB ile Nümerik Analiz* (1. Basım), İstanbul.
- [78] **Abu-Siada, A., Mosaad, M. I., Kim, D., & El-Naggar, M. F.** (2020). Estimating Power Transformer High Frequency Model Parameters Using Frequency Response Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35(3), 1267–1277. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2938020>



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : İlker ARI

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği (İngilizce)
- **Yüksek Lisans:** 2018, Siirt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2014-2016, Siirt DEDAŞ İl Müdürlüğü, Müşteri Teknik Hizmetleri Mühendisi
- 2016-2020, Siirt DEDAŞ İl Müdürlüğü, Müşteri Teknik Hizmetleri Yöneticisi
- 2020- Siirt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Öğretim Görevlisi

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

- **Ari, İ., & Mamiş, M. S. (2025).** Voltage distribution on transformer windings subjected to lightning strike using state-space method. Applied Sciences, 15(3), 1569.
- **Ari, İ., & Mamiş, M. S. (2025).** Determination of voltage distribution on transformer windings under switching conditions using state-space. In 2025 9th International Conference On Global Practice Of Multidisciplinary Scientific Studies (pp. 839-850)
- **Ari, İ., & Mamiş, M. S. (2025).** Transient analysis of lightning strike on distributed parameter transmission line using the state-space method. In 2025 9th International Conference On Global Practice Of Multidisciplinary Scientific Studies (pp. 851-859)