

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNİN ÇEVRESEL
FAKTÖRLERE BAĞLI OLARAK TOPRAK YOLU
ANALİZİ VE SİMÜLASYONU**

Elektrik Yük. Müh. Ercan İZGİ

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 02/01/2006
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Selim AY (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR (YTÜ)
: Prof. Dr. Celal KOCATEPE (YTÜ)
: Prof. Dr. İrfan GÜNEY (MÜ)
: Prof.Dr. Fahrettin ARSLAN (İÜ)

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ.....	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİ ELEMANLARININ GENEL TANITIMI.....	8
2.1. İletken Malzemeler.....	8
2.1.1. Çelik Özlü Alüminyum İletkenler.....	9
2.1.2. Demet İletkenler:.....	12
2.2. Enerji İletim Hatlarının Ülkemizdeki Uygulamaları.....	12
2.2.1. İletim hatlarında çaprazlaştırma.....	14
2.3. Koruma Telleri.....	15
2.4. İzolatörler.....	16
2.4.1. Zincir İzolatör.....	18
2.4.1.1. U Zincir İzolatörler (K Zincir İzolatörler).....	18
2.4.2. İzolatörlerde Yüzey Kirlenmeleri.....	20
2.4.2.1. İzolatörlere İlişkin Yapılan Kirlilik Testleri.....	22
2.4.2.1.1. İzolatörlerin Kirlenmesini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi.....	24
2.4.2.1.2. Kirli İzolatörlerin Bakımı.....	31
2.5. Direkler.....	32
2.5.1.1. Cıvatalı Demir Direklerin Yapılışı.....	33
2.6. 154 kV'luk Cıvatalı Demir Direkler.....	35
3. ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNİN İŞLETME ÖZELLİKLERİ.....	36
3.1. Giriş.....	36
3.2. Dengeli – Sinüsoidal Yüklenme.....	37
3.3. Dengeli – Sinüsoidal Olmayan Yüklenme.....	37
3.3.1. Harmonik Kaynakları.....	38
3.3.2. Harmonik Büyüklüklere Ait Temel Kavramlar.....	39
3.4. Dengesiz – Sinüsoidal Yüklenme.....	42
3.4.1. Dengesiz Yükler ve Türleri.....	42
3.4.1.1. Geçici Dengesizlik.....	43
3.4.1.2.1. Bir Fazlı Yük.....	43
3.4.1.2.2. İki fazlı Yük.....	44
3.4.1.2.3. Disimetrik Yük.....	44
3.4.1.2.4. Hattın Yapısından Doğan Dengesizlikler.....	45
3.5. Dengesiz – Sinüsoidal Olmayan Yüklenme.....	45

3.6.	Enerji İletim Sistemleri Faz-Toprak Kısa Devre Arızaları.....	46
3.6.1.	Giriş	46
3.6.2.	Tek Faz-Toprak Arızaları	46
3.6.2.1.	Simetrik Bileşenler	47
3.6.2.2.	Asimetrik Fazörlerin Simetrik Bileşenler Cinsinden Analizi.....	47
4.	ENERJİ İLETİM HATLARI TOPRAK YOLU MODELLEMESİ	49
4.1.	Giriş	49
4.2.	Enerji İletim Sistemlerinde Topraklama Sistemleri.....	50
4.2.1.	Topraklama ve Topraklama Sistemleri.....	50
4.2.2.	Topraklama Sisteminin Direnci	50
4.2.2.1.	Toprağın Direnç Üzerindeki Etkileri	51
4.2.2.2.	Topraktaki Nemin Direnç Üzerindeki Etkileri	51
4.2.2.3.	Sıcaklığın Direnç Üzerindeki Etkileri.....	52
4.2.2.4.	Derinliğin Direnç Üzerindeki Etkileri	52
4.2.2.5.	Elektrot Çapının Direnç Üzerindeki Etkileri	53
4.2.2.6.	Elektrot Uzunluğunun Direnç Üzerindeki Etkileri	53
4.3.	Yüksek Öz dirençli Zeminlerin Düşük Öz dirençli Olması için Yapılan Çalışmalar	54
4.3.1.	Düşük Öz dirençli Malzeme (LRM, “Low-Resistivity Materials”) Kullanmak.....	54
4.3.2.	Kimyasal Madde Katkılı Topraklama Çubukları Kullanmak.....	55
4.3.3.	Topraklama Yeri Toprağın Değiştirilmesi.....	56
4.4.	Enerji İletim Hatlarının Topraklanması	58
4.4.1.	Direklerin Topraklanması	58
4.4.1.1.	Koruma Telleri.....	60
4.4.1.2.	Çubuk Topraklayıcı	60
4.5.	Enerji Sistemlerinde Oluşan Tehlikeli Gerilimler	61
4.5.1.	Dokunma ve Adım Gerilimleri	62
4.5.1.2.	Dokunma Gerilimi	62
4.5.1.2.	Adım Gerilimi	63
4.6.	Enerji İletim Hatları Toprak Yolu Modeli	64
5.	SAYISAL UYGULAMA	82
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	122
	KAYNAKLAR.....	133
	EKLER.....	139
Ek 1	Dengeli ve Dengesiz İletim Sistemlerinin Toprak Yolu Matlab/M-file Programı.....	140
Ek 2	Dengeli ve Dengesiz Harmonikli İletim Sistemlerinin Toprak Yolu Matlab/M-file Programı.....	149
Ek 3	Faz-Toprak Kısa Devre Matlab/M-file Programı.....	158

Ek 4	Dengeli ve Dengesiz Sistemlerde Magnetik Alan Matlab/M-file Programı.....	163
Ek 5	Dengeli ve Dengesiz Harmonikli Sistemlerde Magnetik Alan Matlab/M-file Programı.....	168
ÖZGEÇMİŞ.....		175

SİMGE LİSTESİ

a, b, c	Faz sırası
D	Koruma telleri arası mesafe
De	Toprak dönüş mesafesi
F	Elektrodinamik kuvvet
GMR	Geometric mean radius (Geometrik ortalama yarıçapı)
G_o	Doyma iletkenliği
h	Harmonik
H	Magnetik alan
I	Fazörel akım
I_{ef}	Efektif akım
k	Öz iletkenlik katsayısı
L	Hattın öz endüktansı
N	Zincir empedans modelinde direk sayısı
q	İletken kesiti
R	Direnç
R^2	Coefficient of determination (Regresyon katsayısı)
R_a	Ağ direnci
R_d	Direk direnci
S	Kompleks güç
THD	Toplam harmonik distorsiyon
U_x	X yönünde birim vektör
U_y	Y yönünde birim vektör
V	Gerilim
V_{ef}	Efektif gerilim
V_g	Dayanma gerilimi
Z	Empedans
Z_g	Koruma teli empedansı
Z_0	Sıfır sequence empedansı
Z_1	Pozitif sequence empedansı
Z_2	Negatif sequence empedansı
Z_∞	Zincir empedans
$Z_{\infty, m}$	Kuplaj faktörü varken zincir empedans
α	Akım faz açısı
β	Gerilim faz açısı
μ	Kuplaj faktörü
σ_s	Yüzeysel iletkenlik
Φ	Faz açısı
$0, 1, 2$	Pozitif, negatif, sıfır sequence sırası

KISALTMA LİSTESİ

AA	Alternatif Akım
ACSR	Aluminium-Conductor Steel Reinforced
ASA	American Standards Association
AWG	American Wire Gauge
CM	Circular Mils
EHV	Extra High Voltage
EKATY	Enerji Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
ESDD	Equivalent Salt Density Deposit
HVDC	High Voltage Direct Current
IEC	International Electrotechnic Commission
LRM	Low Resistivity Materials
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TS	Türk Standartları

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Çelik –Alüminyum iletkenin kesiti	10
Şekil 2.2	İletim hatlarında çaprazlaştırma	15
Şekil 2.3	Normal koşullarda kullanılan izolatör profili	18
Şekil 2.4	Sisli koşullarda kullanılan izolatör profili	19
Şekil 2.5	Sodyum klorür kir unsuruna karşılık gelen direnç değerleri	28
Şekil 2.6	Bakır sülfat kir unsuruna karşılık gelen direnç değerleri	28
Şekil 2.7	Rüzgar hızına karşılık gelen ESDD değerleri	30
Şekil 2.8	Kir kaynağı mesafesine karşılık ESDD değerleri	31
Şekil 2.9	Enerji iletim hattı taşıyıcı direği (Saner, 2004)	36
Şekil 3.1	Sinüsoidal şebekeye bağlı lineer olmayan yük	38
Şekil 3.2	Nonsinüsoidal dalga ve bileşenleri	41
Şekil 3.3	Dengesiz akımların fazörel gösterimi	42
Şekil 3.4	Geçici dengesizlik oluşturan olası durumlar	43
Şekil 3.5	Dengesizliğe neden olan bir fazlı yük gösterimi ve fazör diyagramı	43
Şekil 3.6	Dengesizliğe neden olan iki fazlı yük gösterimi	44
Şekil 3.7	Disimetrik yük gösterimi	44
Şekil 3.8	Elektrostatik dengesizlik oluşumu	45
Şekil 3.9	Faz-toprak kısa devre arızası	47
Şekil 3.10	Dengesiz üç gerilim fazörlerinin simetrik bileşen olarak gösterilmesi	48
Şekil 3.11	Pozitif (1), negatif (2) ve sıfır(0) sequence eşdeğer devreleri	48
Şekil 3.12	Tek faz-toprak kısa devre arızası sequence bağlantı devresi	48
Şekil 4.1	Toprağın içindeki tuz oranı ile öz direnç arasındaki ilişki	51
Şekil 4.2	Nem oranı ile öz direnç ilişkisi	52
Şekil 4.3	Sıcaklık ile öz direnç ilişkisi	52
Şekil 4.4	Elektrot uzunluğu ile elektrot direnç ilişkisi	54
Şekil 4.5	LRM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen topraklama sistemi	55
Şekil 4.6	Kimyasal madde içerikli topraklama çubuğu	56
Şekil 4.7	Güneş motivasyonu nemlendirici düzenek	56
Şekil 4.8	Silindirik hacim içinde kimyasal işleme ile ortamın topraklamaya uygun hale getirilmesi	57
Şekil 4.9	İşlenmiş ve işlenmemiş toprağın elektrot direnç dağılımı	57
Şekil 4.10	Direk topraklaması	58
Şekil 4.11	Kayalık zeminde direk topraklaması	59
Şekil 4.12	Optik koruma teli (OPGW)	60
Şekil 4.13	Çubuk topraklayıcıları	61
Şekil 4.14	Bir kısa devre anında direk çevresinde toprağın potansiyel eğrisi ve temas gerilimi	63
Şekil 4.15	Bir kısa devre anında direk çevresinde toprağın potansiyel eğrisi ve adım gerilimi	63
Şekil 4.16	Enerji iletim hattı şematik gösterimi	65
Şekil 4.17	Enerji iletim hattı toprak yolu modeli	65
Şekil 4.18	Fazların koruma telleri üzerindeki kuplajı	66
Şekil 4.19	İletim hattı direğinde bulunan fazların ve koruma tellerinin mesafeleri	67
Şekil 4.20	Faz akımlarının koruma telleri üzerindeki gerilim indüklemesi	69
Şekil 4.21	Faz akımlarının indüklediği gerilimlerin tek kaynak haline indirgenmesi	69
Şekil 4.22	İki direk arası akım kaynaklı toprak yolu modeli	69
Şekil 4.23	İki direk arası gerilim kaynaklı toprak yolu modeli	70
Şekil 4.24	Fazların koruma teli üzerinde endüklediği gerilimler	70
Şekil 4.25	Bir iletim hattı j. direğinde kirli izolatörlerden akan kaçak akımlar	73

Şekil 4.26 j. ve (j+1). direklerde akım ve gerilimler	75
Şekil 4.27 Matlab/Simulink'te oluşturulan toprak yolu modelinin iki direk arası gösterimi ...	76
Şekil 4.28 Dengesiz akımların toprak yolunda modellenmesi	77
Şekil 4.29 Faz akımlarının koruma telleri üzerindeki harmonikli gerilim modellemesi	77
Şekil 4.30 Faz akımlarının indüklediği harmonikli gerilimlerin tek kaynak haline indirgenmesi	77
Şekil 4.31 Faz- toprak kısa devre durumunda toprak yolu modeli.....	81
Şekil 5.1 Dengeli yüklenme durumunda iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri (temiz).....	83
Şekil 5.2 Dengeli yüklenme durumunda iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri (hafif kir)	84
Şekil 5.3 Dengeli yüklenme durumunda iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri (orta kir).....	84
Şekil 5.4 Dengeli yüklenme durumunda iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri (yoğun kir).....	85
Şekil 5.5 Dengesiz yüklenme durumunda iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri (temiz).....	86
Şekil 5.6 Dengesiz yüklenme durumunda iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri (hafif kir)	86
Şekil 5.7 Dengesiz yüklenme durumunda iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri (orta kir).....	87
Şekil 5.8 Dengesiz yüklenme durumunda iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri (yoğun kir).....	87
Şekil 5.9 Dengeli sinüsoidal olmayan yüklenme durumunda direk topraklama gerilimleri (temiz).....	88
Şekil 5.10 Dengeli sinüsoidal olmayan yüklenme durumunda direk topraklama gerilimleri (hafif kir)	89
Şekil 5.11 Dengeli sinüsoidal olmayan yüklenme durumunda direk topraklama gerilimleri (orta kir).....	89
Şekil 5.12 Dengeli sinüsoidal olmayan yüklenme durumunda direk topraklama gerilimleri (yoğun kir).....	90
Şekil 5.13 Dengesiz sinüsoidal olmayan yüklenme durumunda direk topraklama gerilimleri (temiz).....	91
Şekil 5.14 Dengesiz sinüsoidal olmayan yüklenme durumunda direk topraklama gerilimleri (hafif kir)	91
Şekil 5.15 Dengesiz sinüsoidal olmayan yüklenme durumunda direk topraklama gerilimleri (orta kir).....	92
Şekil 5.16 Dengesiz sinüsoidal olmayan yüklenme durumunda direk topraklama gerilimleri (yoğun kir).....	92
Şekil 5.17 Dengeli sinüsoidal çalışmada farklı mesafelere ilişkin direk topraklama gerilimleri	93
Şekil 5.18 Dengeli sinüsoidal çalışmada topraklama çubuk sayısına ilişkin direk topraklama gerilimleri	93
Şekil 5.19 Dengesiz sinüsoidal çalışmada topraklama çubuk sayısına ilişkin direk topraklama gerilimleri	94
Şekil 5.20 Hat başında faz-toprak kısa devresi olması durumunda direk topraklama gerilimleri	95
Şekil 5.21 Hat ortasında faz-toprak kısa devresi olması halinde direk topraklama gerilimleri	95
Şekil 5.22 Hat sonunda faz-toprak kısa devresi olması halinde direk topraklama gerilimleri	96
Şekil 5.23 Faz toprak kısa devre analizinde farklı direk açıklıklarında direk gerilim değerleri	96

Şekil 5.24 Faz toprak kısa devre analizinde topraklama çubuk sayısına ilişkin direk gerilim değerleri.....	97
Şekil 5.25 Dengeli sistemde koruma tellerindeki güç kayıpları (50 Ω m)	102
Şekil 5.26 Dengeli sistemde koruma tellerindeki güç kayıpları (1000 Ω m)	103
Şekil 5.27 Dengesiz sistemde koruma tellerindeki güç kayıpları (50 Ω m)	103
Şekil 5.28 Dengesiz sistemde koruma tellerindeki güç kayıpları (1000 Ω m)	104
Şekil 5.29 Dengeli non-sinüsoidal sistemde koruma tellerindeki güç kayıpları (50 Ω m).....	104
Şekil 5.30 Dengeli non-sinüsoidal sistemde koruma tellerindeki güç kayıpları (1000 Ω m) ..	105
Şekil 5.31 Dengesiz non-sinüsoidal sistemde koruma tellerindeki güç kayıpları (50 Ω m) ...	105
Şekil 5.32 Dengesiz non-sinüsoidal sistemde koruma tellerindeki güç kayıpları (1000 Ω m)	106
Şekil 5.33 Dengeli sistemde koruma tellerinin asimetri oranları (50 Ω m).....	107
Şekil 5.34 Dengeli sistemde koruma tellerinin asimetri oranları (1000 Ω m).....	107
Şekil 5.35 Dengesiz sistemde koruma tellerinin asimetri oranları (50 Ω m)	108
Şekil 5.36 Dengesiz sistemde koruma tellerinin asimetri oranları (1000 Ω m)	108
Şekil 5.37 Dengeli non-sinüsoidal sistemde koruma tellerinin asimetri oranları (50 Ω m)	109
Şekil 5.38 Dengeli non-sinüsoidal sistemde koruma tellerinin asimetri oranları (1000 Ω m)	109
Şekil 5.39 Dengesiz non-sinüsoidal sistemde koruma tellerinin asimetri oranları (50 Ω m) ..	110
Şekil 5.40 Dengesiz non-sinüsoidal sistemde koruma tellerinin asimetri oranları (1000 Ω m)	110
.....	110
Şekil 5.41 Dengeli sistemde koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler (50 Ω m) ..	111
Şekil 5.42 Dengeli sistemde koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler (1000 Ω m)	111
.....	111
Şekil 5.43 Dengesiz sistemde koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler (50 Ω m)	112
Şekil 5.44 Dengesiz sistemde koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler (1000 Ω m)	112
.....	112
Şekil 5.45 Dengeli non-sinüsoidal sistemde koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler (50 Ω m)	113
Şekil 5.46 Dengeli non-sinüsoidal sistemde koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler (1000 Ω m)	113
Şekil 5.47 Dengesiz non-sinüsoidal sistemde koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler (50 Ω m)	114
Şekil 5.48 Dengesiz non-sinüsoidal sistemde koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler (1000 Ω m)	114
Şekil 5.49 Faz-toprak kısa devre durumunda hat başında (1), hat ortasında (2) ve hat sonunda (3) koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler	115
Şekil 5.50 Dengeli sistemde iletim hattı boyunca direk adım gerilimleri	115
Şekil 5.51 Dengesiz sistemde iletim hattı boyunca direk adım gerilimleri	116
Şekil 5.52 Dengeli non-sinüsoidal sistemde iletim hattı boyunca direk adım gerilimleri.....	116
Şekil 5.53 Dengesiz non-sinüsoidal sistemde iletim hattı boyunca direk adım gerilimleri ...	117
Şekil 5.54 Toprak yolu zincir empedans modeli	117
Şekil 5.55 Faz-toprak kısa devresinde öz direnç-kuplaj katsayısı değişimi	121

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1	Çelik-alüminyum (ACSR) iletkenlerin özellikleri. TS 490.....	11
Çizelge 2.2	154 kV İletim hatlarında kullanılan iletken tipleri ve kapasiteleri.....	13
Çizelge 2.3	380 kV İletim hatlarında kullanılan iletken tipleri ve kapasiteleri.....	14
Çizelge 2.4	İletim hatlarında kullanılan normal izolatör tipleri ve özellikleri	19
Çizelge 2.5	İletim hatlarında kullanılan sis tipi izolatörlerin özellikleri	19
Çizelge 2.6	TS-IEC 815'e göre yüzey kirlenme sınıfları ve ortamların tanımı	21
Çizelge 2.7	Yapay kirlenme seviyelerine göre minimum anma özgül yüzeysel kaçak yolu uzunlukları (TS IEC 815, 1995)	22
Çizelge 2.8	Kizelgur Karışımı: İzolatördeki Referans Kirlilik Derecesi ile 20°C Sıcaklıktaki Süspansiyonun Hacimsel İletkenliği Arasındaki Yaklaşık İlişki (TS EN 60507, 1999).....	24
Çizelge 2.9	Sodyum klorür ile yüzeyi kirlenen izolatörün ölçülen kaçak akım ve dirençleri.....	27
Çizelge 2.10	Bakır sülfat ile yüzeyi kirlenen izolatörün ölçülen kaçak akım ve dirençleri.....	27
Çizelge 2.11	Rüzgâr hızına karşılık gelen ESDD değerleri	29
Çizelge 2.12	154 kV'luk direklerin ağırlıkları (kg).....	35
Çizelge 3.1	154 kV gerilim seviyeleri için gerilim harmonik değerleri (EPDK, 2003).....	41
Çizelge 3.2	Kabul edilebilir akım harmonik değerleri (EPDK, 2003).....	41
Çizelge 4.1	Bazı zeminlere (toprak cinslerine) ilişkin öz direnç değerleri	51
Çizelge 4.2	Çaprazlaştırma sonucu kısımlara ilişkin faz ile koruma teli arası mesafeler	68
Çizelge 4.3	Farklı kir seviyelerine ilişkin izolatör iletkenlik değerleri (TS EN 60507, 1999).....	74
Çizelge 5.1	Faz akımlarının değerleri	83
Çizelge 5.2	Harmonik akımların değerleri	88
Çizelge 5.3	Faz toprak kısa devre analizinde direk topraklama gerilimleri	94
Çizelge 5.4	Faz toprak kısa devre analizinde farklı direk açıklıklarında arıza noktasındaki direk gerilim değerleri	97
Çizelge 5.5	Faz toprak kısa devre analizinde farklı çubuk sayılarının direk gerilim değerleri	97
Çizelge 5.6	Farklı işletmelere ilişkin magnetik alan değerleri (-5°C buzsuz).....	99
Çizelge 5.7	Farklı işletmelere ilişkin magnetik alan değerleri (-5 °C, %100 buzlu).....	99
Çizelge 5.8	Farklı işletmelere ilişkin magnetik alan değerleri (-5 °C, %50 buzlu).....	100
Çizelge 5.9	Farklı işletmelere ilişkin magnetik alan değerleri (+5 °C, rüzgarsız)	100
Çizelge 5.10	Farklı işletmelere ilişkin magnetik alan değerleri (+5 °C, % 100 rüzgarlı)	101
Çizelge 5.11	Farklı işletmelere ilişkin magnetik alan değerleri (+5 °C, % 70, rüzgarlı)	101
Çizelge 5.12	Farklı işletmelere ilişkin magnetik alan değerleri (+15 °C).....	102
Çizelge 5.13	Zincir empedansa ilişkin elde edilen analitik ve simülasyon sonuçları	119
Çizelge 5.14	Zincir empedansa ilişkin elde edilen analitik ve simülasyon sonuçları	119
Çizelge 5.15	Zincir empedansa ilişkin elde edilen analitik ve simülasyon sonuçları	120
Çizelge 5.16	Zincir empedansa ilişkin elde edilen analitik ve simülasyon sonuçları	120

ÖZET

Elektrik enerjisi, üretim, iletim ve dağıtım olarak üç bölümde ele alınmaktadır. Enerjinin iletimi aşamasında gerilim seviyesinin yüksek olması (154 kV, 380 kV, ...) gerekmektedir. Enerji iletim sistemlerinde, çelik galvanizli direkler kullanılmaktadır. İletim hattının devre sayısına bağlı olarak direk modelleri farklı olmaktadır. Enerji iletim hatlarını atmosferik olaylardan korumak için koruma telleri kullanılmaktadır. İletim hatlarında olabilecek yıldırım düşmesi veya kısa devre durumlarında oluşan aşırı akımların koruma telleri vasıtasıyla toprağa akıtılabilmesi için iletim hattının tüm direklerinin topraklanması gerekir.

Bu tez çalışmasında 100 MVA, 154 kV'luk tek devre / çift koruma telli, 50 km'lik (163 adet direk) bir enerji iletim hattının toprak yolu analizi ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Enerji iletim hatlarında fazları direğe (toprağa) karşı yalıtımla zincir izolatörler kullanılmaktadır. Bu izolatörlerin yüzeyleri çevre koşulları sebebiyle kirlenerek iletken hale gelmektedir. Bunun sonucu olarak izolatör yüzeyinden direğe doğru kaçak akımlar akmaktadır. Bunun yanı sıra faz iletkenleri ile koruma telleri arasında karşılıklı kuplaj sebebiyle, koruma telleri üzerinde gerilimler (akımlar) endüklenmektedir.

Bu çalışmada, enerji iletim hatları sürekli işletmenin tüm durumları (dengeli-sinüsoidal, dengeli-non sinüsoidal, dengesiz-non sinüsoidal) için farklı zemin yapıları kullanılarak toprak yolu analizi ve simülasyonları yapılmıştır. İletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri elde edilmiştir.

Ayrıca iletim hattında sık meydana gelen arızalardan faz-toprak kısa devre arızası farklı zemin yapıları ve farklı arıza noktaları (hat başı, hat ortası ve hat sonu) için direk topraklama gerilimleri elde edilmiştir.

Bu çalışmalarda farklı direk açıklıklarının (300 m, 400 m) olması ve farklı sayıda topraklama çubuğu kullanılması durumlarında direk topraklama gerilimlerinin nasıl değiştiği incelenmiştir. Bunun yanında, koruma tellerinden geçen akımlar için, farklı iklim koşullarına bağlı olarak oluşan magnetik alanlar, elektrodinamik kuvvetler, asimetri oranları, güç kayıpları ile direklerden akan akımların oluşturduğu adım gerilimleri incelenmiştir. Ayrıca, literatürde toprak yolu için oluşturulan modeller ile Matlab/Simulink'te oluşturulan modelin karşılaştırılmasına yönelik inceleme yapılmıştır. Elde edilen sonuçların her iki durumla örtüştüğü ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler: Toprak yolu, izolatör, enerji iletim hattı, toprak özgül direnci, Matlab/Simulink, direk topraklama gerilimi, faz-toprak kısa devresi, çevre koşulları.

ABSTRACT

Electric energy is considered in three sections as generation, transmission and distribution. High voltage such as 154 kV and 380 kV is required to transmit the electrical power. For the power transmission systems, steel galvanized towers are used. Based on the number of circuits of the transmission line, tower models differ. To prevent the transmission lines from the atmospheric discharge, ground wires are used. The towers must be grounded against possible high current flows caused from a lightning stroke or short-circuits.

In this study, the analysis and simulation of a 100 MVA / 154 kV ground path of a 50 km single-circuit transmission line having 163 towers with double ground wire are carried out. String isolators are used to insulate phase conductors against the tower / ground in the power transmission lines. Because of the ambient conditions, isolators are contaminated and become conductive. Thus, leakage currents flow from the surface of isolators to the tower. On the other hand, because of the mutual coupling between phase conductors and ground wires, the voltage / current is induced on the ground wires.

In this study, the analysis and simulations of the ground path for different soil structures and for all conditions of steady-state operation of power transmission lines have been performed. Tower footing voltages are obtained along the transmission line. In addition, tower footing voltages in case of single line to ground fault, which frequently occurs in power system are analyzed for different soil structures and fault points, namely at sending-end, mid-point and receiving-end of the transmission line.

The change of tower footing voltages for different spans (300 m, 400 m) and for different value of electrode has been studied. On the other hand, magnetic fields for different weather conditions, electrodynamic forces, asymmetry ratio, power losses and step voltages because of current flowing through the towers have been studied.

In addition to these, the comparison between the ground path models in the literature and the proposed Matlab/Simulink model has been evaluated. It is shown that both numerical results match each other.

Keywords: Ground path, string insulator, power transmission line, soil resistivity, Matlab/Simulink, tower footing voltage, phase-ground fault, environmental conditions.

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi üretim, iletim ve dağıtım olmak üzere üç bölümde incelenir. Enerjinin iletim aşamasında hava hatlarında gerilim düşümleri ve güç kayıpları olduğundan dolayı, gerilim seviyesi yüksek (154 kV, 380 kV,...) olmaktadır. Bu çalışmada 154 kV'luk bir iletim hattının (50 km) toprak yolu analizi ve simülasyonu yapılmıştır.

Enerji iletim hatlarında atmosferik koşullar sebebiyle kullanılan koruma telleri, yıldırım darbelerini ve meydana gelen arıza akımlarını tüm hat boyunca toprağa aktarması bakımından büyük önem taşımaktadır. Koruma telleri, direk tiplerine göre tek veya çift olarak kullanılabilir. Son zamanlarda haberleşme ve veri alış verişini sağlamak amacıyla optik koruma telleri (OPGW) kullanılmaktadır. Koruma tellerinin sözü edilen büyük yararları yanında, faz iletkenlerinin bu teller üzerinde kuplaj etkisi sonucu endüklediği gerilimlerin dengeli yüklenme durumunda bile, direklerde topraklama gerilimlerinin oluşmasına neden olabilmektedir. Tez çalışmada, fazların koruma teli üzerindeki etkileri dikkate alınarak analiz ve simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Enerji iletim hava hatlarında faz iletkenlerini direğe (toprağa) karşı yalıtmak amacıyla zincir izolatörler kullanılmaktadır. Bu izolatörlerin yüzeyleri zaman içerisinde çevresel ve mevsimsel sebeplerle kirle kaplanmaktadır. İzolatör yüzeyinde oluşan bu kir, nem veya hafif yağış olması durumunda iletken hale gelerek yalıtkanlık özelliğini zayıflatmaktadır. Bunun sonucunda faz iletkenlerinden direğe (toprağa) doğru akan kaçak akımlar, direklerde topraklama gerilimlerinin oluşmasına yol açabilmektedir. Kir unsurunun çok yoğun olduğu yerlerden geçen iletim hattının izolatörleri yüksek seviyede kirlenebilmektedir. Toprak yolu analizi için izolatörlerin farklı opsiyonları (temiz veya hafif kirli, orta kirli ve yoğun kirli) dikkate alınarak oluşturulan modelde analizler yapılmıştır.

İletim hava hatlarında kullanılan galvanizli çelik kafesli direklerin her biri topraklanmaktadır ve bu topraklamaların uygun özellikte yapılması gerekmektedir. Fakat güzergah boyunca bunun sağlanabilmesi çok zordur. Bir yerde yumuşak karakterli zeminle karşılaşılırken diğer yandan çok sert (kayalık) zeminlerle de karşılaşmaktadır. Bu nedenle çalışmamızda, hem yumuşak hem de sert zeminlere yönelik analizler yapılarak farklı zeminlerin iletim hattı toprak yolunda etkileri ortaya konulmuştur.

İletim hatları kapsamında yukarıda verilen hususlar sebebiyle, sürekli işletme durumlarının (dengeli/dengesiz sinüsoidal, dengeli/dengesiz sinüsoidal olmayan işletme) tümüne ait analiz ve simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Matlab/Simulink ortamında oluşturulan toprak yolu modelinde, iletim hattının transpoze edildiği (çaprazlaştırıldığı) ve tam kompanzasyonun sağlandığı öngörülerek, 100 MVA'lık güç ve 154 kV'lık gerilim değerine sahip tek devre, çift koruma telli (163 direkli) bir iletim hattı kullanılmıştır. Ayrıca, enerji iletim hatlarında değişik nedenlerle geçici rejim (arıza) durumları oluşabilmektedir. Bu çalışmamızda, en çok karşılaşılan arızalardan faz-toprak kısa devre analizi yapılmıştır. Bunun için hattın farklı noktalarında (hat başı, hat ortası ve hat sonu) arıza analizleri gerçekleştirilmiştir. Sürekli işletme durumları için yapılan çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak, faz iletkenlerinin koruma telleri üzerinde endüklediği gerilimlerden dolayı oluşan akımların belli bir "P" noktasındaki magnetik alan değerleri meteorolojik parametrelere göre ortaya konulmuştur. Ayrıca koruma tellerindeki akımların iletim hattı direk açıklığı boyunca oluşturacağı güç kayıpları da elde edilmiştir. Koruma tellerinden geçen akımlar, farklı faz açıları ve faz ile koruma teli arasındaki mesafelerin farklı olması nedeniyle aynı olmamaktadır. Bunun için "asimetri oranı" tanımlanarak iletim hattı boyunca sürekli işletmenin dört opsiyonu için değişimler elde edilmiştir. Söz konusu bu akımların kendi aralarında oluşturduğu elektrodinamik kuvvetler hesaplanıp, dört opsiyon ve faz-toprak kısa devresi için ortaya konulmuştur. Ayrıca toprak yolundaki akım dağılımı sonucunda direktan akan akımların oluşturduğu adım gerilimleri de dört opsiyon için elde edilmiştir. Tezde yapılan literatür çalışmaları aşağıda verilmiştir:

Enerji iletim hatlarında faz iletkenlerini direğe (toprağa) karşı yalıtmaq için zincir izolatörler kullanılır. Bu izolatörler açık havada çevre koşulları sebebiyle kirlenerek yalıtkanlık özelliği gösterememektedirler. Bu nedenle izolatör yüzeyi iletken hale gelmekte, buna bağılı olarak kaçak akımların seviyeleri kir miktarına ve özelliğine bağılı olarak değişmektedir. İzolatör yüzeyinde oluşan (biriken) kir miktarı da çevre koşullarına (sahile yakınlık, rüzgar hızı ve yönü, yağmur, nem, sıcaklık, vb..) göre farklı olmaktadır. Örneğin; sahile yakın iletim hattı izolatörü üzerinde deniz tuzunun rüzgar ile birlikte oluşturduğu kir tabakası, rüzgarın az olduğu yerde daha fazla olmaktadır. Bu ve buna benzer parametreler kir tabakasının karakterini ve iletkenlik seviyesini belirlemede önemli olmaktadır. Literatürde izolatörler, yukarıda verilen durumları sebebiyle genişçe inceleme alanı bulmuştur. Kirli izolatörlerin yüzeylerinde oluşan kaçak akımlar sadece kirlilik seviyesine bağılı değildir; aynı zamanda izolatör şekli, izolatör zincir uzunluğu, çalışma gerilimi gibi özelliklere de bağılıdır (Zhicheng and Guoshon, 1994). İzolatör kir seviyesi literatürde kısa adı ESDD (Equivalent Salt Deposit

Density) olan eşdeğer tuz birikim yoğunluğu ile ifade edilmektedir. Buna yönelik yapılan çalışma konularından biri rüzgar hızı ile ESDD arasındaki ilişkidir (Abdus Salam vd., 2000). Bu konudaki çalışmada rüzgar hızının çok ciddi etkisi olduğu ortaya konulmuştur. Örneğin 4,5 m/s 'de 0,01544 mg/cm² olan ESDD değeri 6,0 m/s'de 0,09002 mg/cm² olmaktadır. Görüldüğü üzere rüzgar hızındaki %33'lük artış için ESDD değerinde %500 civarında bir artış gözlenmektedir. ESDD ile izolator direnci arasındaki ilişki için yapılan çalışmada kir unsurları farklı olduğunda farklı sonuçlar elde edilmiştir (Abdus Salam vd., 2003). Sodyum klorür (NaCl) ve Bakır sülfat (CuSO₄) için yapılan deneylerde; 1 gr/100 ml konsantrasyonlu NaCl çözeltisi verilen izolatorün direnci 35,29 MΩ ve kaçak akımı 3,4 µA elde edilirken, aynı konsantrasyona sahip CuSO₄ çözeltisi için izolatorün direnci 4,77 MΩ ve kaçak akımı 25,13 µA olmaktadır. Bu da kir unsurlarının (kaynaklarının) etkilerinin farklı olduğunu göstermektedir. Kir kaynağının izolatöre uzaklığı ile ESDD arasındaki bağıntı için yapılan çalışmada, uzaklık arttıkça ESDD'nin azaldığı ortaya konulmuştur (Abdus Salam vd., 2000). Kir kaynağının izolatöre 1 km'lik mesafede olduğu durumda ESDD değeri 0,1 mg/cm² olurken 2 km'lik mesafe için ESDD değeri 0,06 mg/cm² olmaktadır. İzolatorlerin yoğun kirlenmesi sebebiyle meydana gelen arızalar sonucu enerji kesintileri oluşabilmektedir. Bunun için yapılan çalışmalarda özellikle gece saatlerinde ve sabah erken saatlerde bu kesintilerin olduğu ortaya çıkarılmıştır (Macey ve Vosloo, 1994). Bu saatler izolator yüzeyinin nemlenmesinin en yoğun olduğu saatlerdir.

İzolatorlerin kirlenmesi sebebiyle kaçak yolu uzunluğunun önemi büyüktür. Onun için izolatorlerin alt kısmı kıvrımlı olarak imal edilmektedir. Sis tipi izolatorlerde ise bu kıvrımların (toplam) uzunluğu normal tipli izolatorlere göre daha fazla olmaktadır. İzolatorlerin form faktörü olarak isimlendirilen bu özelliğine yönelik yapılan çalışmalarda kıvrımların her birine yönelik parça parça kir deneyleri yapılarak bölgesel kirlenmenin izolator üzerindeki kaçak akımı nasıl etkilediği ortaya konulmuştur (Garcia vd., 1991). İzolator kirlenmesine neden olan bu parametrelere yönelik yapılan çalışmalar daha da genişletilerek birden çok parametre için (yağmur miktarı, rüzgar hızı, basınç, nem, sıcaklık), ESDD değerleri elde edilmiştir. Elde edilen ESDD değerleri, ölçülen ve tahmin edilen değerler olarak verilerek %MAE (Mean Absolute Error) sonuçları ortaya konulmuştur (Ahmad vd., 2000; Ahmad vd., 2002a; Ahmad vd., 2002b). Benzer şekilde çevresel veriler (nem, yağış miktarı, rüzgar hızı, sıcaklık,...) kullanılıp lineer ve non-lineer regresyon yapılmış, R² (Coefficient of Determination) katsayıları elde edilerek karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda non-lineer regresyon sonucunun lineer regresyon sonucuna göre daha doğru sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur (Vosloo ve Holtzhausen, 2002). Enerji iletim

hatlarında kullanılan izolatörlerin kirlenmesi sonucu oluşan kaçak akım ve atlamaları önlemek için yapılacak çalışmalarda bunlara yönelik bölgesel ve mevsimsel (meteorolojik) verilere ihtiyaç vardır. Bunun için kaçak akım görüntüleme (monitoring) sistemleri geliştirilmiştir. İzolatöre elektronik devreler kullanılarak monte edilen bu sistemler, kaçak akımları ve çevresel koşulları kaydetmektedir. Buna yönelik literatürde geniş çalışmalar yer almaktadır (Khalifa vd.,1988; Sugawara ve Hkari, 1994; Kanashiro ve Burani, 1996; Mahmoud ve Azzam, 1997; Fierro-Chavez, 1998; Ramirez-Vazquez ve Fierro-Chavez, 1999; Cebeci ve Şenpınar, 2003). Bunun yanında laboratuvar şartlarında suni kir oluşturulup izolatörlere püskürtülmekte ve ESDD'ye karşılık kaçak akım değerleri tespit edilebilmektedir (Devendranath ve Rajkumar, 2002). Yapılan yaygın testlerden biri “Kizelgur Testi”dir (TS EN 60507, 1999). Bu test sonucunda hafif, orta ve yoğun kirlenmelere ilişkin izolatör iletkenlikleri (μS) tespit edilmektedir.

Enerji iletim hatlarının toprak yolu elemanları, koruma telleri ve topraklama çubuklarıdır. Koruma telleri çoğunlukla çelik malzemeden yapılmaktadır. Atmosferik koşullar ve kısa devre arızaları sebebiyle koruma teli kullanmak işletme ve canlılar açısından büyük önem taşımaktadır. Son zamanlarda koruma telleri, sözü edilen amaçlarının yanı sıra OPGW (Optical Ground Wire) şeklinde haberleşme amacına yönelik olarak da kullanılmaktadır. Çelik telin ortasına optik lifler yerleştirilerek üretilen OPGW telleri, sıcaklık ve mekanik zorlanmalardan etkilendiğinden dolayı izin verilen değerlerin dışına çıkılmaması gerekir. Bu tellerin ulaşabileceği en yüksek sıcaklık anı kısa devre durumundadır. Tasarım aşamasında, doğru ve güvenilir bilgi sağlanması açısından kısa devre anında olabilecek sonuçlar dikkate alınmalıdır (Saotome vd., 1988). OPGW'ler aynı zamanda kısa devre arızası durumunda arıza yerinin tespitinde de kullanılabilmektedirler (Urasawa vd., 1989).

Toprak yolu elemanlarından diğeri ise topraklama çubuğudur. Bakır silindir biçiminde olan bu çubuklar, her bir direğin topraklanmasında kullanılırlar. Sert zeminlerde 2 veya 3 adet topraklama çubuğu kullanılarak istenen topraklama direnç değeri elde edilmektedir. 2 ve daha fazla topraklama çubuğunun olması durumunda çubuklar arasındaki ekranlama faktörü sebebiyle paralel dirençler gibi işlem olmamaktadır. IEEE Std-142 (1991)'e göre çubuk sayısı (n)'na bağlı ekranlama faktörü bulunarak işlem yapılmaktadır. Çok özel durumlarda (özdirencin yüksek çıktığı yerlerde) LRM (Low Resistivity Material) olarak isimlendirilen düşük özdirence sahip malzemeler kullanılarak topraklama yapılacak yerin zemin karakteri değiştirilebilmektedir. Ayrıca kimyasal içerikli (Chem-rod) çubuklar kullanılarak suni nem ortamı oluşturulmakta ve özdirenç düşürülebilmektedir (Carpenter ve Lanzoni, 1997). Enerji

iletim hatlarında faz iletkenlerinden geçen akımların koruma telleri üzerinde karşılıklı kuplaj etkisi yaratması sebebiyle koruma tellerinde gerilimler endüklenmektedir. Carson denklemlerinde, faz ile koruma teli arasındaki empedans ile koruma teli empedansı için verilen denklemlerde öz direnç (ρ) parametresi yer almakta ve toprak yolu akım dağılımında zemin yapısının ne kadar önemli olduğu gösterilmektedir (Anderson, 1973).

Faz iletkenleri ile koruma telleri arasındaki kuplaj etkisi, toprak yolu modelinde koruma telleri üzerinde akım kaynağı (Norton Modeli) veya gerilim kaynağı (Thevenin Modeli) ile modellenmektedir (Chan, 1993; Popovic, 1996; Fehr, 2002; Dlala, 2004). Gerilim kaynağı olarak oluşturulan modelde endüklenen gerilim değeri, endüksiyona neden olan akım (faz akımı) ile koruma teli arasındaki karşılıklı empedansın çarpımıdır.

Enerji iletim hatlarında sürekli işletme durumu (arızasız durum) dışında farklı nedenlerle (fırtına, ağaç dalları, vinç, uçurtmalar, kuşlar, uçak düşmesi vb.) kısa devreler (arızalar) meydana gelmektedir (Çakır, 1986; Sluis, 2001). Kısa devre arızaları, simetrik (3 faz) ve asimetrik (tek faz-toprak, faz-faz, iki faz-toprak) olmak üzere iki kısımda ele alınırlar. Bu arızalardan en yaygın olanı faz-toprak arızasıdır (El-Hawary, 1995; El-Hawary, 2000; Gonos, 2002). Bu arızaların azaltılması için ağaçların dallarının budanması, havai veya yer altı kablo kullanılması gibi önlemler alınabilir (Short, 2004). Faz-toprak kısa devre analizlerine yönelik yapılan çalışmalarda iletim hattı toprak yolu elemanlarının oluşturduğu zincir empedans ve buna bağlı olarak geliştirilen analitik çözümler, faz-toprak kısa devre analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Popovic, 1996; Nahman, 1998; Seedher vd., 1999; Popovic, 2000; Popovic, 2001). Aynı zamanda ortaya konulan analitik çözümler ölçme sonuçları ile beraber verilerek analitik çözümlerin yaklaşımı (doğruluğu) ortaya konulmaktadır.

Enerji iletim hatlarında transpozisyon (çaprazlaştırma) yapılmayan uzun iletim hatları, karşılıklı kuplajlı hatlar ve ark fırınları sebebiyle dengesiz yüklemeler meydana gelmektedir (Verde ve Menniti, 1996; Shan ve Abur, 2002).

Son yıllarda elektrik enerjisi kullanımının artışı ve bununla beraber teknolojinin gelişmesiyle harmonik üreten cihazların yaygınlaşması sebebiyle enerji iletim sistemlerinde temel bileşen (50 Hz) dışında bunun katları olan (100 Hz, 150 Hz, ...) harmonik frekansları enerji kalitesini büyük oranda etkilemektedir. Özellikle 3 ve 3'ün katı olan harmonik bileşenlerinin bozucu etkileri daha fazla olmaktadır. Bu konudaki literatür çalışmaları çok geniş bir yelpazede harmonik analizleri ve bunlara yönelik çözümler içermektedir (Cividino, 1992; Ellis, 1996; İnan, 1999; Yumurtacı, 2000; El Mofty ve Youssef, 2001; Kocatepe vd., 2003). Harmoniklerin belirlenmesi için harmoniklere yönelik ölçümler yapılması gerekir. Bunun için

harmonik analizörleri kullanılmaktadır. Burada var olan tüm harmonik bileşenler ortaya çıkmaktadır ve bunlara yönelik filtreleme tasarımları geliştirilmektedir (Sutherland, 1995). Enerji iletim hatlarına yönelik kalite çalışmalarında, 154 ve 380 kV'luk hatlar için akım ve gerilim harmonik sınırları belirlenmiştir (Mendis ve Gonzales, 1990; McGranaghan, 1998; EPDK, 2004).

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde enerji iletim hatlarını oluşturan sistem elemanlarının tanıtımı yapılarak toprak yolu modelinin oluşmasında etkili olan faktörler anlatılmıştır. Üçüncü bölümde tezin temelini oluşturan işletme özellikleri genişçe anlatılarak bunlara yönelik programların oluşturulmasında yer alan bilgiler verilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde enerji iletim hatları topraklama sistemleri ile toprak yolu modelinin tüm ayrıntıları verilerek bunlara yönelik denklemler genişçe ve detaylı bir şekilde verilmiştir.

Tezin beşinci bölümünde enerji iletim hatlarında Matlab/Simulink ortamında oluşturulan toprak-yol modeli için yapılan tüm çalışmalara ilişkin elde edilen sonuçlar şekil ve çizelgelerle verilmiştir.

Tezin altıncı bölümünde ise toprak-yol modeli için 5. bölümde verilen sayısal uygulamada yer alan tüm şekil ve çizelgelere ilişkin sonuçlar verilerek, yapılan çalışmanın getirdiği yenilikler anlatılmıştır. Son kısımda ise sonuçlara yönelik öneriler maddeler halinde verilerek, işletme ile insan ve diğer canlıların güvenliği açısından yapılması gerekenler örneklerle anlatılmıştır.

Tez çalışmasında, enerji iletim hatlarında kullanılan izolatörlere yönelik yapılan kirlilik testleri sonuçları 50 km'lik (163 adet direk) iletim hattına uygulanmıştır. Literatürde yer alan kirlenme seviyeleri (hafif, orta, yoğun) için verilen iletkenlik değerleri kullanılarak fazlardan koruma tellerine akacak olan kaçak akımlar ile fazların koruma telleri üzerinde endüklediği gerilimlerden dolayı akan akımın dağılımı sonucu direk topraklamalarında meydana gelen gerilimler dört opsiyon için incelenmiştir. Bu aşamada elde edilen koruma tellerinden geçen akımların oluşturduğu magnetik alanlar, direk adım gerilimleri, güç kayıpları, koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler ile koruma telleri üzerinde akan akımların farklı olması sebebiyle oluşan asimetrisinin belirlenmesi çalışmaları yapılmıştır.

Yapılan tüm çalışmaların Matlab/M-file ortamında programları yazılmış ve Simulink'te de 163 direkli toprak yolu oluşturulmuştur. M-file kısmında yazılan programlar sayesinde farklı sorgulamalar (giriş bilgileri, "p", izolatör kir seviyesi, işletme özelliği, ...) yapılarak aynı anda Simulink'te oluşturulan iletim hattı toprak yolu modelinde yer alan tüm parametreler

(Z_g , V_m , R_d , I_k , ...) değiştirilerek direk topraklama gerilimleri elde edilmektedir. Bunun yanında, magnetik alan hesaplamalarının, meteorolojik koşullar da dikkate alınarak programları oluşturulmuştur. Ayrıca güç kayıpları, asimetri oranları, elektrodinamik kuvvetler ile direk adım gerilimleri için de ayrı programlar oluşturularak sonuçlar elde edilmiştir. Tüm sonuçlarda farklı zemin yapılarına (50 Ω m, 100 Ω m , 500 Ω m ve 1000 Ω m) ve dört opsiyona bağlı olarak verilen zemin yapısının ve işletme özelliğinin etkileri ortaya konulmuştur.

Faz-toprak kısa devre analizi için yapılan çalışmada, farklı zemin yapıları (50 Ω m, 100 Ω m, 500 Ω m) ve farklı noktalarda (hat başı “1.direk”, hat ortası “81.direk” ve hat sonu “163.direk”) analiz ve simülasyon yapılarak öz direncin ve arıza yerinin etkileri açık bir şekilde verilmiştir. Bu çalışmalara bağlı olarak dengeli çalışmada farklı direk açıklıkları (300m - 400m) için analizler yapılarak direk açıklıklarının değişmesiyle sonuçların hemen hemen değişmediği ortaya konulmuştur. Buna benzer olarak dengeli, dengesiz ve faz-toprak arızası durumları için birden çok (iki ve üç) topraklama çubuğunun olması halinde direk topraklama gerilimlerinin nasıl değiştiğinin verileri elde edilmiştir.

Yapılan çalışmalara yönelik literatürde yer alan modeller ve analitik yaklaşımlar Matlab/Simulink ortamında da uygulanarak elde edilen sonuçlar ile literatürde verilen sonuçlar karşılaştırmalı biçimde verilmiş ve her iki sonucun (Literatür ile Matlab/Simulink) örtüştüğü sayısal uygulama üzerinde gösterilmiştir.

2. ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİ ELEMANLARININ GENEL TANITIMI

Enerji iletim sistemleri hava hattı elemanları genel olarak faz iletkenleri, koruma telleri, izolatörler ve direklerden oluşmaktadır. 154 kV'luk enerji iletim hatlarında örgülü çelik özlü alüminyum iletkenler ve çelik koruma telleri kullanılmaktadır. Gerilim seviyesi ile çevre ve atmosferik koşullara göre normal veya sisli olarak iki türlü izolatör kullanılır. Direkler ise, gerilim seviyesi, devre sayısı ve arazi yapısına göre seçilmektedir.

2.1. İletken Malzemeler

Enerji iletim hatlarında kullanılan iletkenlerin hem enerji iletimi hem de mekanik bakımdan uygun olarak seçilmesi gerekir. İletkenler, gerekli esnekliği sağlamak, askı noktalarında oluşan titreşimler nedeniyle zedelenmeleri, ayrıca iletken yorulmalarını ve kopmalarını önlemek amacıyla damarlı ve spiral sarılmış örgülü şekilde yapılırlar. Spiral şeklinde örgülü yapılmış iletkenlerde her bir damarın yüzeyinde meydana gelen kir ve oksit tabakası nedeniyle akım, damardan damara değil, spiral olarak sarılmış örgünün içinde akar. Bu bakımdan örgülü iletkenlerin elektriksel hat sabitlerinden direnç ve endüktansları, dolayısıyla endüktif reaktansları aynı kesit ve cinsteki iletkenlere nazaran daha büyüktür. Endüktans artışını azaltmak için damarlar birbirini izleyen katlarda ters yönde sarılmıştır. Örgülü iletkenlerde genel olarak ortada bir damar bulunur ve bu damarın etrafına diğer damarlar oluşturulur.

Hava hattı iletkenlerinde aranan başlıca özellik, iletkenliğin iyi ve çekme dayanımının büyük olmasıdır. Bu özelliklere en uygun malzeme, çekme dayanımı soğuk çekilerek artırılmış olan yarı sert bakırdır. Soğuk çekme işlemi sırasında bakır iletkenin çekme dayanımının önemli ölçüde artmasına karşılık iletkenliğinde çok az azalma olur. Bakır pahalı ve ağır bir malzeme olduğundan, günümüzde hava hatlarında daha ucuz ve hafif bir malzeme olan alüminyum kullanılmaktadır.

Çelik-alüminyum iletkenlerde çekme dayanımını artırmak için, ortasında galvanizli örgülü çelik tel veya tellerden öz bulunur. Böylece, çelik-alüminyum iletkenlerin çekme dayanımı %55 - %60 artmış olunur. Çelik-alüminyum iletkenlerde özü oluşturan çelik teller çinko ile kaplanır. Bu işleme sıcak galvanizleme adı verilir. Son yıllarda, öz olarak alüminyum kaplı çelik teller de kullanılmaktadır. Böylece çok iyi korozyon dayanımı sağlamakla birlikte iletkenlik de artırılmış olunur.

Alüminyum iletkenlerin üzerinde oluşan oksit katmanı yalıtkan olduğu için eklerde sorun oluştursa da bu oksit katmanı korozyon (aşınma) dayanımı sağladığından (örneğin tuzlu deniz havasında) alüminyum iletkenlerin de bakır kadar dayanıklı olduğu görülür.

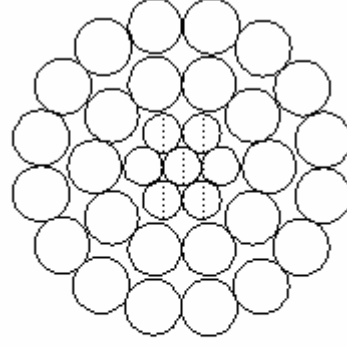
Büyük açıklıklı YG hava hatlarında, ülkemizde ACSR çelik-alüminyum iletkenler (Aluminum Conductor Steel-Reinforced) kullanılmaktadır.

2.1.1. Çelik Özlü Alüminyum İletkenler

Çelik özlü alüminyum iletkenlerin (St-Al iletken) yapısı, ortasında galvanizli çelik damarlardan yapılmış bir göbek ve etrafı alüminyum damarlardan oluşmuş, bir ya da daha fazla tabakadan meydana gelen damarlar şeklindedir. St-Al iletkende ortadaki çelik göbek iletkenin mukavemetini attırdığından kopma mukavemeti alüminyum iletkene nazaran daha büyüktür. St-Al iletkenlerin kopma gerilmesi 30 kg/mm² mertebesinde, sadece alüminyumdan yapılmış iletkenlerin kopma gerilmesi ise 18kg/mm² mertebesinde olduğundan, St-Al iletken alüminyum iletkene nazaran 30/18=1,66 kat daha dayanıklıdır. Bu nedenle daha yüksek gergi ile direkler arasına gerilebilme imkanına sahip olunması, bakıra nazaran yaklaşık olarak (2,5-2,6) defa daha hafif olması, alüminyum iletkene nazaran ise ağırlığında fazla bir artış olmayışı ve fiyatının da bakır ve alüminyum iletkenlerinin fiyatlarından daha düşük olması gibi nedenlerle St-Al iletkenler enerji iletim hatlarında çok büyük kullanım alanı bulmuştur.

Alüminyum ve çelik-alüminyum iletkenlerin birimleri, bakır iletkenlerde olduğu gibi (mm²) normunda olmayıp CM (Circular Mil) olarak belirtilmiştir. Bir CM, çapı 0,001 inç olan daire yüzeyine eşittir. Circular mil'in mm² olarak değeri,

$$1 \text{ CM} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi}{4} (0,001 \text{ inç})^2 = \frac{\pi}{4} (0,001.25,4)^2 = 5067.10^{-7} \text{ mm}^2 \text{ dir.}$$



26 Al / 7 St



Alüminyum Teller



Çelik Teller

Şekil 2.1 Çelik –Alüminyum iletkenin kesiti

Örgülü iletkenlerde, çapları eşit olan ortada bir tel ve bu telin çevresindeki katmanlarda, her bir katmanda bir önceki katmandakinden 6 fazla veya n katman sayısı olmak üzere $3.n^2+3.n+1$ bağıntısının verdiği sayıda tel bulunur. Şekil 2.1’de Çelik-Alüminyum iletken kesiti verilmiştir.

Çelik alüminyum iletkenlerde direnç hesaplanırken çelik özün kesiti dikkate alınmaz ve yalnız alüminyum kesiti göz önüne alınır.

Örgülü iletkenlerde katmanların birbirine zıt yönde sarılmış olmaları, burulma nedeniyle tellerin açılmasını önlediği gibi, zıt yönde sarılmış olan katmanlarda doğan manyetik akılar birbirini hemen hemen yok edeceğinden, çelik-alüminyum iletkenlerde çelik özde oluşacak kayıplar azalır ve iletkenin AA direnci küçülür. Kayıplar iletkenin sarım adımına da bağlıdır. Sarım adımı küçüldükçe kayıplar büyür. Sarım adımı örgünün sıkı veya gevşek olduğunu gösterir.

YG hava hatlarında bükülgenliği artırmak, rüzgarın gergi noktalarında oluşturduğu titreşimler nedeniyle yorulmaları ve kopmaları önlemek için; EKATY’ nin 43.a/v. maddesine göre, yalnız örgülü iletkenler kullanılır.

EKATY’ nin 43.a/vii. maddesine göre hava hatlarında kullanılan örgülü iletkenlerin kesitleri, çelik-alüminyum iletkenler için $21/4 \text{ mm}^2$ ’den küçük olamaz.

Ülkemizde, 154 kV iletim hatlarında 477 MCM (Hawk) ve 795 (Drake); 380 kV iletim hatlarında 954 MCM (Cardinal) ve 1272 MCM (Pheasant) iletkenleri kullanılmaktadır.

Enerji iletim hatlarında kullanılan çelik özlü alüminyum iletkenlerin özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Çelik-alüminyum (ACSR) iletkenlerin özellikleri. TS 490

Anma adı	AWG ve MCM	Anma kesiti Al/St [mm ²]	Gerçek kesiti			Ağırlık			Yüklenme akımı [A]
			Al [mm ²]	St [mm ²]	Toplam [mm ²]	Al [kg/km]	St [kg/km]	Toplam [kg/km]	
Swan	4	21/4	21,18	3,53	24,71	58,51	27,5	85,6	105 ^(**)
Swallow	3	27/4	26,69	4,45	31,14	73,2	34,6	107,8	120 ^(**)
Sparrow	2	34/6	33,59	5,60	39,19	92,1	43,6	135,7	140 ^(**)
Robin	1	42/7	42,41	7,07	49,48	116,4	55,0	171,4	165 ^(**)
Raven	1/0	54/9	53,52	8,92	62,44	146,8	69,4	216,2	195 ^(**)
Pigeon	3/0	85/14	85,12	14,18	99,30	233,5	110,4	343,9	275 ^(**)
Partridge	266,8	135/22	134,87	21,99	156,86	372,2	171,6	543,8	345 ^(**)
Ostrich	300	152/25	152,19	24,71	176,90	420,0	192,9	612,9	410 ^(**)
Hawk	477	242/39	241,65	39,19	280,84	666,8	306,0	972,8	540 ^(**)
Drake	795	403/65	402,56	65,44	468,00	1110,9	511,0	1621,9	683 ^(***)
Cardinal	954	485/63	484,53	62,81	547,34	1339,6	490,2	1829,8	764 ^(***)
Pheasant	1272	645/82	645,08	81,71	726,79	1783,8	639,7	2423,5	920 ^(***)

(**) Ortam sıcaklığı 40 °C ve ortam üstü sıcaklığı 40 °C (iletkenin sıcaklığı 80 °C), rüzgar hızı=0, güneş etkisi yok, frekans 50 Hz.

(***)Ortam sıcaklığı 40 °C ve ortam üstü sıcaklığı 40 °C (iletkenin sıcaklığı 80 °C), rüzgar hızı=0,25 m/s, güneş etkisi yok, frekans 50 Hz. Yüklenme akımları TS 490’da verilmiştir.

2.1.2. Demet İletkenler:

Hava hatlarında gerilim yavaş yavaş yükseltirse, gerilimin belirli bir değerine çıktığında, iletken yüzeyinde havanın iyonize olduğu bir noktaya gelinir. Bu durumda çarpma suretiyle iyonizasyon başlar. Gerilimin yükseltilmesine devam edilirse, iletkenin etrafında mor renkte bir ışık hüzmesi görülür. İletkenlerin etrafındaki mor renkli ışıklı silindirler birbirine dokunacak kadar arttığında delinme olur. Aralarında 15 iletken yarıçapından az uzaklık bulunan iletkenlerde, görünür koronadan önce, delinme olur.

Çarpma suretiyle iyonizasyonun başladığı andaki iletkenler arasındaki gerilime, kritik korona gerilimi; deşarjın, hattın etrafında baştanbaşa ince mor ışıklı bir gaz oluşturduğu, diğer bir deyişle, deşarjın kesikli olmayıp devamlı olarak kendi kendini beslediği andaki gerilime de görünür korona gerilimi denir.

Korona gerilimine etki eden birçok faktör vardır. Hatlarda kullanılan iletkenlerin yarıçapı, iletkenler arası geometrik ortalama uzaklık, havanın sıcaklık, nem, basınç, sis, yağmur ve kar gibi değişik iklim şartları korona olayını etkiler.

Hava hatlarında gerilim büyüdükçe ve iletken çapı küçüldükçe elektrik alan şiddeti büyüyeceğinden, korona olayı yaşanır. 220 kV 'un üzerindeki gerilimlerde korona olayı önem kazandığından, önceleri iletken çapını büyütme amacıyla içi boş iletkenler kullanılmıştır. Daha sonra her faz için bir yerine birden çok demet iletken kullanılarak iletken çapının büyütülmesi yoluna gidilmiştir. 380 kV üzerindeki gerilimlerde demet iletkenler kullanılmadan büyük güçleri iletme olanağı yoktur. Ülkemizde 380 kV'luk gerilim için ikili, üçlü ve dördü demet iletkenler kullanılmaktadır (Dengiz, 1991; Saner, 2004).

2.2. Enerji İletim Hatlarının Ülkemizdeki Uygulamaları

154 kV'luk iletim hatları, standart 281 mm² 477 MCM Hawk, 468 mm² 795 MCM Drake, 546 mm² 954 MCM Cardinal ve 726 mm² 1272 MCM Pheasant olan çelik takviyeli alüminyum iletken (ACSR) ve tek veya çift devre direkleri kullanılarak tesis edilir. 154 kV'luk hatlarda genellikle her fazda bir iletken bulunur. Çok yüksek talep bölgelerinde iletim hatlarının kapasitesini arttırmak için 154 kV'luk ikili demet cardinal iletkenli, çift devre stratejik kısa hatlar tesis edilir. Havai hatların güzergâhının temin edilemediği yoğun yerleşim bölgelerinde standart olarak 154 kV, 630 mm² veya 1000 mm² kesitli XLPE bakır iletkenli

yeraltı kabloları tesis edilir. 154 kV'luk iletim sisteminde enerji akışlarının planlanmasında kullanılan iletkenlerin termik kapasiteleri ve sınırları Çizelge 2.2'de verilmiştir (EPDK, 2004).

Çizelge 2.2 154 kV İletim hatlarında kullanılan iletken tipleri ve kapasiteleri

TİP	Toplam İletken Alanı (mm ²)	MCM	Akım Taşıma Kapasitesi (A)***	Yazlık Kapasite (MVA)*	Bahar/Sonbahar Kapasite(MVA)**	Termik Kapasite (MVA)***
Hawk	281	477	496	110	180	132
Drake	468,4	795	683	153	250	182
Cardinal	547	954	765	171	280	204
2B Cardinal	2x547	2x954	2x765	342	560	408
Pheasant	726	1272	925	206	336	247

* : İletken Sıcaklığı: 80 °C, Hava Sıcaklığı: 40 °C, Rüzgar Hızı: 0,1 m/s

** : İletken Sıcaklığı: 80 °C, Hava Sıcaklığı: 40 °C, Rüzgar Hızı: 0,5 m/s

*** : İletken Sıcaklığı: 80 °C, Hava Sıcaklığı: 40 °C, Rüzgar Hızı: 0,25 m/s

2B ikili iletken demetini temsil eder.

380 kV'luk iletim hatları, standart 954 MCM Cardinal (546 mm²) ve 1272 MCM Pheasant (726 mm²) kesitli, her bir fazda iki veya üçlü demet halinde çelik takviyeli (ACSR) alüminyum iletkenler ve tek devreli direkler kullanılarak tesis edilir. Uygun iklim ve hat profili/mekanik yüklenme şartlarına göre tasarlanan standart tek devre direkleri üzerinde, iletken karakteristikleri ikili demet 954 MCM Cardinal, üçlü demet 954 MCM Cardinal ve üçlü demet 1272 MCM Pheasant olan 380 kV'luk hatlar kullanılır. İstisnai durumlarda tek bir direk üzerinde birden fazla devre kullanılır.

İstisnai veya aşırı buz yükünün olabileceği 1600 m yüksekliğin üzerindeki güzergahlar gibi ilave emniyet gerektiren durumlarda, 1–20 km arasındaki kısıtlı mesafeler için özel tasarlanmış direkler üzerine, her demetteki üç iletken yerine, bunlara elektriksel olarak eşdeğer özelliklere sahip 2027 mm² kesitli tek iletken tesis edilir.

380 kV'luk iletim sisteminde enerji akışlarının planlanmasında kullanılan iletken termik kapasiteleri ve sınırları Çizelge 2.3'te verilmiştir (EPDK,2004).

Çizelge 2.3 380 kV İletim hatlarında kullanılan iletken tipleri ve kapasiteleri

TİP	Toplam İletken Alanı (mm ²)	MCM	Akım Taşıma Kapasitesi (A)***	Yazlık Kapasite (MVA)*	Bahar/ Sonbahar Kapasite (MVA)**	Termik Kapasite (MVA)***
2B, Rail	2x517	2x954	2x755	832	1360	995
2B, Cardinal	2x547	2x954	2x765	845	1360	1005
3B, Cardinal	3x547	3x954	3x765	1268	2070	1510
3B, Pheasant	3x726	3x1272	3x925	1524	2480	1825

* : İletken Sıcaklığı: 80 °C, Hava Sıcaklığı: 40 °C, Rüzgar Hızı: 0,1 m/s

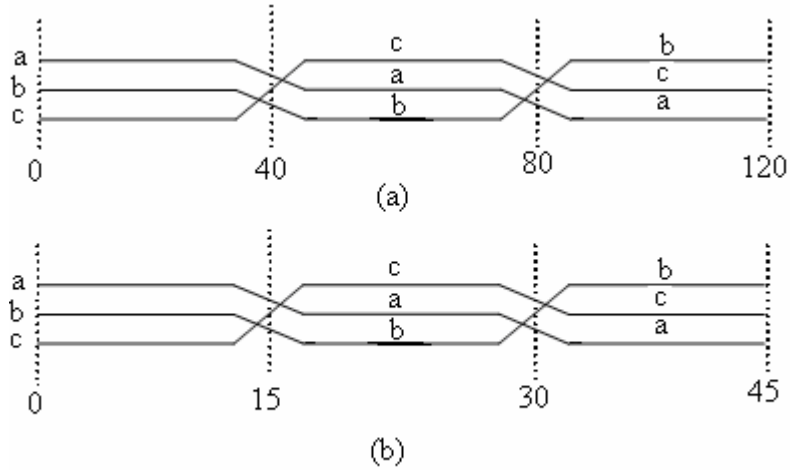
** : İletken Sıcaklığı: 80 °C, Hava Sıcaklığı: 25 °C, Rüzgar Hızı: 0,5 m/s

*** : İletken Sıcaklığı: 80 °C, Hava Sıcaklığı: 40 °C, Rüzgar Hızı: 0,25 m/s

2B ve 3B sırasıyla ikili ve üçlü iletken demetlerini temsil eder.

2.2.1. İletim hatlarında çaprazlaştırma

Enerji iletim hattı direklerinin travers modellerine göre, çoğu kez faz iletkenlerinin aralarındaki açıklıklar birbirine eşit değildir. Bunun sonucu olarak, her fazın diğer fazlara göre açıklığı aynı olmayacak ve her fazın karşılıklı endüktans (reaktans) bileşeni de birbirinden farklı değer alacaktır. Hattın faz endüktanslarının (reaktanslarının) simetrik olmaması halinde hat boyunca gerilim düşümleri eşit olmayacak ve hat sonunda gerilim dengesizliği (asimetrisi) ortaya çıkacaktır. Bu sakıncayı gidermek için uzunluğu 120 km'nin üzerindeki 380 kV'luk hatlar için, hattın uzunluğu boyunca bir tam üç faz çaprazlama yapılır. 45 km'nin üzerindeki 154 kV'luk hatlar için de, hattın uzunluğu boyunca bir tam üç faz çaprazlama yapılır. Şekil 2.2'de 154 kV'luk ve 380 kV'luk iletim hatları için çaprazlaştırma işlemi gösterilmiştir (EPDK, 2004).



Şekil 2.2 İletim hatlarında çaprazlaştırma

a) 380 kV'luk iletim hattının çaprazlaştırılması

b) 154 kV'luk iletim hattının çaprazlaştırılması

2.3. Koruma Telleri

Hava hatlarında kullanılan direklerin topraklanmasında zeminin yüksek özgül direncinden dolayı tehlikeli gerilimlerin oluşmasına engel olmak için kısa devre arızasının olduğu direğin civarında meydana gelen akımların, koruma teli vasıtasıyla arıza noktasından uzakta bulunan topraklanmış direklerden toprağa geçmesinin sağlanması gerekir.

Bu bakımdan arızalı direktteki toprak akımının diğer direkler vasıtası ile toprağa geçmesini sağlamak için koruma teli kullanılır. Koruma hattı belli bir dirence sahip olduğundan kısa devre arızasının olduğu yerden uzakta olan direklerden yakında olanlar kadar bir akım akmaz. En büyük akım arızanın olduğu direktten akar (Dengiz, 1991).

Koruma tellerinin yıldırım akımlarını da toprağa akıtma fonksiyonu bulunmaktadır. İletim hattını yıldırımdan korumak için direklerin tepe noktalarına 3 faz iletkenine ilave olarak galvanizli çelik toprak teli tesis edilir. Genel olarak, 380 kV'luk standart direklerde hatları korumak için iki adet toprak teli kullanılır. 154 kV'luk hatlar, direk tasarımına bağlı olarak bir veya iki toprak teli ile korunur. Standart olarak, 154 kV'luk ve 380 kV'luk hatlarda sırasıyla 70 mm^2 ve 96 mm^2 'lik koruma iletkenleri kullanılır.

Yeni tesis edilen iletim hatlarında standart çelik toprak tellerinden biri yerine, 380 kV'luk hatlarda 15.2 mm ve direk tasarımına bağlı olarak 154 kV'luk hatlarda 13,5 mm çaplı fiber

optik toprak teli kullanılır. Bu toprak telinin içinden geçen fiber optik, iletim sisteminin gereksinimlerine göre otomasyon, haberleşme ve koruma amaçlı olarak kullanılır.

İşletmede olan iletim hatlarındaki koruma iletkenleri ihtiyaç duyulduğunda fiber optikli koruma iletkeni ile değiştirilir.

2.4. İzolatörler

İletim hatlarının faz iletkenleri için uygun izolasyon seviyelerini sağlamak amacıyla zincir tipi porselen, cam veya fiber izolatörler kullanılır (EPDK, 2004). Hava hatlarında işletme güvenliği ve sürekliliği büyük ölçüde hattın yalıtımına bağlıdır. İzolatörler iletkenleri taşımak, iletkenleri birbirlerine bağlamak ve metal kısımlara karşı yalıtım sağlamak amacıyla kullanıldıklarından, elektriksel ve mekanik olarak zorlanırlar. Bu nedenle, izolatörlerde elektriksel atlama ve delinme olmamalı, mekanik zorlamalara dayanmalıdır.

İzolatör malzemesi sırlı porselen veya sertleştirilmiş camdır. Ülkemizde porselen izolatörler yapılmakta ve kullanılmaktadır. Porselen izolatörlerin dış yüzeyi kahverengi renkte sırlanmıştır. Sır, izolatörlere cam gibi parlak koruyucu bir yüzey sağlayarak izolatörün nem emmesini ve izolatörde kir birikmesini, dolayısıyla kaçak akımların oluşmasını önler. Sır ani ısı değişimlerinden etkilenmemeli ve normal atmosfer değişimlerinde karşılaşılabilecek ozon, asit ve alkali tozların etkisine karşı dayanıklı olmalıdır. Sırın çatlaması ile izolatör elektriksel özelliklerini büyük ölçüde yitireceğinden, sır özenle korunmalıdır.

YG izolatörlerinde aranan, özellikle kıvılcım, ark veya delinme olmaması, izolatörün mekanik ve elektromekanik kırılma yüküne dayanmasıdır. Elektriğin, izolatörün yüzeyinden ani ve kesintili olarak atlaması veya sıçraması kıvılcım şeklinde olur. Elektrik akışı sürekli olursa, ark baş gösterir. İzolatörün yalıtkanlığı yetersiz ise, izolatörün içinden boşalma olur ve bu boşalma izolatörün delinmesine yol açar. İzolatörün yüzey kaçak yolu uzun yapılarak toprağa kaçak akımların oluşması önlenir.

Yüksek gerilim güç sistemlerinde kullanılan açık hava izolatörleri, şebeke frekansında normal işletme gerilimi ile sistemde meydana gelen iç aşırı gerilimlere dayanabilmelidir. Ayrıca izolatörlerin, atlama sayısını azaltmak için daha yüksek değerlerde dirence sahip olması istenmesine rağmen, hiç olmazsa sistemin temel darbe izolasyon seviyesi gerilimine dayanması gerekir.

İzolatörler, elektriki özellikleri yanında büyük mekanik yüklere de dayanmalıdır. Cam izolatörler enerji iletim sisteminde zincir izolatörü olarak büyük bir uygulama sahası bulmuştur.

İzolatörlerin yüzeyleri aşınma ve karbonlaşma ile çabuk bozulmaya meyillidir. Son zamanlarda karbonlaşmayan böylece açık havada kullanılabilen cycloaliphatic epoxy resin gibi maddeler geliştirilmiştir. Bu maddenin yüksek mekanik mukavemeti, cam elyafı ile takviye edildiğinde aynı mekanik yük için izolatör ağırlığında %30'a kadar bir azalma olmaktadır. Ayrıca bu maddeye porselenden daha kolay bir şekilde istenilen profil verilebilmektedir.

İzolatörlerde aranılan diğer özellik de korona sebebi ile fazla miktarda yüksek frekanslı parazitlerin oluşmamasıdır. Bu parazitler radyo ve televizyon alıcılarında respesiyona etki ederler. Bunun için izolatörler, nominal gerilimin %20 üstündeki gerilim altında gözle deşarj muayenesine tabi tutulurlar. Bu gerilim altında izolatörün deşarj oluşturup oluşturmadığı incelenir. Hava hatlarında kullanılan izolatörler pin tipi ve zincir tipi olmak üzere iki kısımda incelenir. Zincir tipi izolatörler direklerdeki bağlantı durumuna göre askı tipi ve gergi tipi olarak iki kısma ayrılırlar.

Yüksek gerilim hatlarında kullanılan izolatörler, hatların endüstri bölgelerinden geçmeleri, kuru kir ve kimyasal dumanlarla, sahil bölgelerinde deniz tuzuna maruz kalmaları gibi önemli nedenlerle kirlenirler. İzolatör kuru iken hemen hemen tamamı kapasitif olan küçük bir kaçak akım mevcuttur. Elektriki alan dağılımı elektrostatik alan dağılımı şeklindedir. Halbuki izolatör yüzeyi yağmur, sis veya çığ dolayısıyla nemlenirse, kir tabakası içindeki iyonize olan tuzlardan dolayı iletken hale gelir ve tatbik edilen gerilimle aynı fazda ve izolatör yüzeyi boyunca omik bir kaçak akım akar. Bu kaçak akım, kuru haldeki kaçak akımdan daha büyük olduğu için izolatör yüzeyindeki alan dağılımını bozar.

İzolatör yüzeyinde oluşan kir tabakası kül, çimento, yağ, is gibi maddelerden oluşur. Kirin iki ayrı özelliği olduğu kabul edilir:

1. Yapışkan ve su emici özelliğe sahip olan kirler
2. Suda çözünerek iyonlara ayrılan ve elektrikselsel iletkenliği sağlayan kirler

Kirin izolatörlerin yüzeyinde toplanmasına genel olarak; yer çekimi, rüzgâr kuvveti, elektriki kuvvetler ile homojen olmayan alanlar sebep olur. İzolatörlerde kirlenme halinde atlama, ark uçlarının ıslak yüzey üzerinde iki elektrot arasında bir ark meydana gelinceye kadar büyümesiyle meydana gelir.

2.4.1. Zincir İzolatör

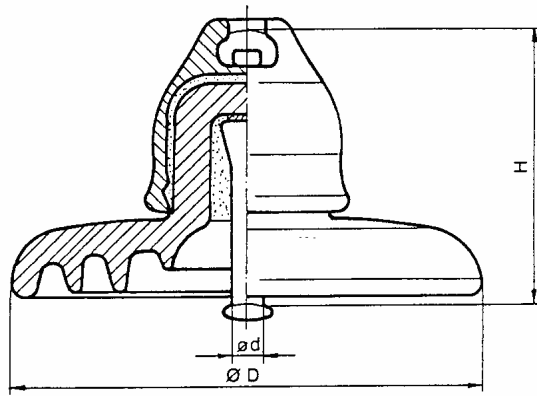
YG mesnet izolatörlerinin gerilim büyüdükçe irileşmesi ve ağırlaşması, pin izolatör demirinin eğilme momentinin aşırı değerler alması nedeniyle bu izolatörler 60 kV'a kadar yapılmaktadır.

2.4.1.1. U Zincir İzolatörler (K Zincir İzolatörler)

U zincir izolatörlerde porselen veya cam eteğin üzerine dökme demir kap geçirilmiş, göbeğine ise alttan başlı demir yerleştirilmiştir. Zincir izolatör zincir baklalarının üst üste geçirilmesiyle oluşturulur. Üstteki baklanın başı alttaki baklanın kepindeki yuvaya yandan geçirilir ve baş, yukarı çekilerek altına güvence pimi sokulur. Pimin pim deliğinden geçen uçlarının açılarak geri çıkması önlenmelidir. Yoksa baş yuvadan kurtulursa zincirin çözülmesine ve alt kısmında kalan baklaların iletkenle birlikte yere düşmesine neden olur.

U zincir izolatörler, simgenin yanına kN cinsinden elektromekanik kırılma yükü yazılarak belirtilir. Porselen çekiye kıyasla basıya karşı daha fazla dayanıklı olduğundan, zincir izolatörlerde keple başlı demir arasındaki porselen basıya çalışır. Böylece, büyük kopma yüklerine erişilebildiğinden, izolatöre etkiyen germe kuvvetine karşı mesnet izolatörlerin yetersiz kaldığı durumlarda zincir izolatörler mekanik zorlamalarda güvenli olarak kullanılır.

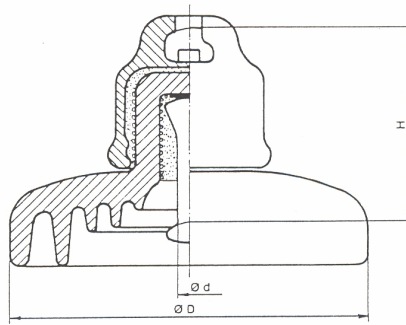
Enerji iletim hatlarında kullanılan normal ve sis tipi izolatörler Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 2.3 Normal koşullarda kullanılan izolatör profili

Çizelge 2.4 İletim hatlarında kullanılan normal izolatör tipleri ve özellikleri

Type	Manufacture number	Dimensions			Creepage distance (min.)	Electromechanical failing load	Maximum working load	Puncture voltage	Flashover voltage min.				withstand voltage			Average weight of each pieces	Contents of each package	Packed weight	
									Power frequency		50 %Impulse		One-minute power frequency		Impulse				
		D	H	d					Dry	Wet	Poz.	Neg.	Dry	Wet					Impulse
		mm	mm	mm					mm	mm	mm	mm	mm	mm					
U40 BL (Z40U)	560/1	175	110	11	190	4000	1600	80	55	30	75	80	50	25	70	3.5	6	25	
U50 BL (Z60U)	561	255	146	16	280	6000	2400	110	78	45	120	125	70	40	110	6.2	6	41	
U80 BL (Z 80 U)	613	255	146	16	280	8000	3200	110	78	45	120	125	70	40	110	6.6	6	45	
U100 BL (Z100U)	590/2	255	146	16	280	10000	4000	130	78	45	120	125	70	40	110	7.2	6	48	
U160 BS (Z160 U)	593/1	280	146	20	305	16000	6400	130	80	47	125	130	75	45	115	8.9	6	60	
Tip	İmalât numarası	Ölçüler			Kaçak mesafesi (min.)	Elektro mekanik kırılma yükü	Maximum çalışma yükü	Yağda delinme gerilimi	Kuru	Yaş	Poz.	Neg.	Kuru	Yaş	Darbe	Ortalama eleman ağırlığı	Sandıktaki adet	Sandıktaki ağırlık	
									Güç frekansında		% 50 Darbe		Güç frekansında 1 dakika						Dayanma gerilimi
									Atlama gerilimi (min.)				Dayanma gerilimi						



Şekil 2.4 Sisli koşullarda kullanılan izolatör profili

Çizelge 2.5 İletim hatlarında kullanılan sis tipi izolatörlerin özellikleri

Type	Manufacture number	Dimensions			Creepage distance	Electromechanical failing load	Maximum working load	Puncture Voltage	Flashover voltage min.				Withstand voltage			Average Weight of each pieces	Contents of each package	Packed weight
		D	H	D					power frequency		50 % Impluse		1 minute Power Frequency		Impluse			
									Dry	Wet	Poz.	Neg.	Dry	Wet				
UF60BL	561 /2	300	155	16	432	6000	2400	110	95	55	135	145	85	50	110	8.5	6	57
UF80BL	614	300	146	16	432	9000	3600	110	95	55	135	145	85	50	110	9.3	6	60
UF100BL	612/1	300	146	16	432	10000	4000	130	95	55	135	145	85	50	110	10	6	65
UF160BS	615 /1	300	146	20	460	16000	6400	130	95	55	135	145	85	50	110	10.7	6	69
Tip	İmalat numarası	Ölçüler			Kaçak mesafesi	Elektromekanik kırılma yükü	Maksimum çalışma yükü	Yağda delinme gerilimi	Kuru	Yaş	Poz	Neg	Kuru	Yaş	Darbe	Ortalama Eleman ağırlığı	Sandıktaki adet	Sandıklı ağırlık
									Güç frekansında		50% darbe		Güç frekan- sında 1 dakika					
									Atlama gerilimi min.				Dayanma Gerilimi					

2.4.2. İzolatörlerde Yüzey Kirlenmeleri

İzolatörler, hatların sanayi bölgelerinden ve konut alanlarından geçmesi, kirlетici durumların, iletken tozların ve birikintilerin etkisinde olması, deniz suyuyla temasta bulunması ve yoğun kum ve tuz taşıyan rüzgârlara açık durmaları nedeniyle kirlenirler. İzolatörlerde oluşan kirlenme yüzeysel atlamalara neden olur.

Nem yüzey kirlenmesi ve izolatörün yalıtkanlık yeteneğini etkiler. Deniz kıyılarında tuzlu su, sanayi alanlarında çeşitli tuzlar, haddehanelerin bulunduğu yerlerde demir tozları, kum ocaklarında kum taneleri ve tarım alanlarında havada uçuşan gübre tozları nemli ortamda izolatör yüzeyine yapışarak iletkenliğe neden olabilir.

Yüzey katmanının ve bunun sonucu olarak ark atlamasının oluşması birçok etkene bağlıdır. Kimi etkenler:

- Havada katı, sıvı ve gaz olarak bulunan yabancı parçacıkların niceliğı ve niteliğı,
- İzolatörün şekli ve izolatörün yüzeyine yapışmış olan yabancı madde veya parçacıkların yağmur ve rüzgârla temizlenme olanakları gibi yüzey koşulları,
- Havada az miktarda bulunan yoğunlaşmış su veya çığ yüzünden, izolatörün yüzeyinde oluşuşan yabancı katmanın nemlenmesidir.

Yüzey katmanı kuru veya pratik olarak geçirgen olmadığı sürece, izolatörün yüzey kirlenmesinin zararlı etkileri görülmez.

Çizelge 2.6 TS-IEC 815'e göre yüzey kirlenme sınıfları ve ortamların tanımı

Yüzey Kirlenme Düzeyi	Ortamin Tanımı
I. Hafif Kirlenme	• Sanayi tesisi bulunmayan, ısıtma tesisleri ile donatılmış ve konut yoğunluğunun az olduğu alanlar. • Sanayi tesisleri ve konut yoğunluğu az olan, ancak çok rüzgâr ve/veya yağmur alan alanlar. • Tarım alanları. • Dağlık alanlar Tüm bu alanlar denizde en az 10 ile 20 km uzaklıkta bulunmalı ve denizden esen rüzgârlara açık olmamalıdır.
II. Orta Kirlenme	• Önemli ölçüde kirletici duman çıkartmayan sanayi tesisleri ve/veya ısıtma tesisleri ile donatılmış ve konut yoğunluğu ortalama değerde olan alanlar. • Sanayi tesisleri ve konut yoğunluğu yüksek olan, ancak sık rüzgâr ve/veya yağmur alan alanlar. • Denize çok yakın olmayan (En az birkaç km uzaklıkta) ancak denizden esen rüzgârlara açık olan alanlar.
III. Ağır Kirlenme	• Sanayi tesislerinin çok yoğun olduğu, kirlenmeye yol açan ısıtma tesislerinin çok yoğun bulunduğu büyük şehirlere yakın alanlar. • Denize yakın veya denizden her zaman esen oldukça kuvvetli rüzgârlara açık olan alanlar.
IV. Çok Ağır Kirlenme	• İletken tozların ve özellikle iletken birikintiler oluşturan sanayi dumanının etkisinde bulunan sınırlı alanlar. • Denize çok yakın veya deniz suyuyla temasta bulunan, çok kuvvetli ve kirletici deniz rüzgârlarına açık olan sınırlı alanlar. • Yoğun kum ve tuz taşıyan kuvvetli rüzgârlara açık olan, düzenli yağışmanın etkisinde bulunan ve uzun süre yağmur almayan çöl alanlar.

Deneyler, dayanma gerilimi ve yüzeysel kaçak yolu uzunluğu arasındaki kirlenme durumundaki doğrusallığı gerektiren ve mevcut sistemler üzerinde kullanılan çoğu izolatlara uygulanan minimum özgül yüzeysel kaçak yolu uzunluğunun kriterini göstermiştir.

Kirlenmenin belirli çeşitleri için özel olarak şekillendirilmiş bazı izolatorler, işletmede istenilen yeterlikte performans göstermelerine rağmen, bu şartları sağlamayabilirler.

Çizelge 2.7 Yapay kirlenme seviyelerine göre minimum anma özgül yüzeysel kaçak yolu uzunlukları (TS IEC 815, 1995)

Kirlenme Seviyesi	Minimum Anma Özgül Yüzeysel Kaçak Uzunluğu(mm/kV)
I- Hafif	16
II- Orta	20
III- Ağır	25
IV- Çok Ağır	31
1) Gerçek yüzeysel kaçak yolu uzunluğu için belirtilen imalat toleransları uygulanabilir (IEC 273, IEC 433, IEC 720, IEC 305). 2) Faz ve toprak arasında ölçülen kaçak uzaklığının cihaz için en yüksek etken fazlar arası gerilim değerine oranıdır (IEC 71-1).	

2.4.2.1 İzolatörlere İlişkin Yapılan Kirlilik Testleri

Kirlenme atlamalarının ciddi bir işletme problemi olarak belirmesi nedeniyle araştırmacılar çeşitli ve daha uygun test yöntemlerinin gerçekleştirilmesine çalışmışlardır. Bu maksatla kurulan test merkezlerinde yapılan araştırmalar sonucu yeni birçok yöntem ortaya çıkmıştır. Bunlar arasında en çok ilgi toplayan, Almanya’da gerçekleştirilen “Kizelgur” yöntemidir. Bu yöntemin özelliği izolatörün suni kirle homojen olarak kaplanmasıdır. “Kizelgur Deneyi” diye bilinen bu testin gayesi, endüstriyel türde kir altında çalışan hat ve cihaz izolatörlerinin davranışlarını tespit etmektir. Kizelgur deneyinin iki çeşidi Almanya’daki Studiengesellschaft für Höchstspanungsanlagen (SFH) ve Siemens Schuckert Werke (SSW) tarafından geliştirilmiştir. Kizelgur testi 1963’den beri Almanya’da standart test olarak kabul edilmiş ve Almanya normlarına (BDE 0448 / 1-63) alınmıştır.

Kullanılan suni kir 10 birim damıtık su, 1 birim kizelgur ve 0,1 birim dekstrin karışımıdır. Dekstrin çözeltiye yapışkanlık özelliği verir. Arzulanan spesifik iletkenlik, karışıma yeterli miktarda sofr tuzu katılarak sağlanır. 1000 gram damıtık su başına 1-35 gram tuz katılması halinde elde edilecek spesifik iletkenlikler yaklaşık olarak 1900-40000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olur. İzolatör önce gres cinsinden yapışkan kirleri giderici bir çözücü ile iyice temizlendikten sonra düşük spesifik iletkenliği olan (500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ den az) su ile iyice çalkalanır. Temizlenmiş izolatör önce

60-80°C'ye kadar ısıtılır. Yukarıda belirtildiği tarzda hazırlanmış suni kir gayet ince (atomize) hale getirici olarak püskürtücülerle ısıtılmış izolatör yüzeyine homogen olarak püskürtülür. Yüzey sıcak olduğundan püskürtülen suni kir kısa zamanda kuruyarak izolatör yüzeyi kuru bir tabaka halinde kaplanmış olur. Kir tabakasının kalınlığı kolayca ayarlanabilir. Homojen bir kir kaplama tekniği için izolatörün simetri eksenini boyunca döndürülmesi tavsiye edilir.

Test gerilim kaynağının kısa devre akımının değeri önemli olup standartla belirtilen değerden (genellikle 10-20 A) az olmamalıdır. Deney boyunca test gerilimi ve akım, kaydedicilerle (osiloskop) kaydedilmelidir. Bu tarzda, verilen bir doyma iletkenliği için dayanım gerilimi (atlama yapmayan maksimum gerilim) tespit edilir. Hazırlanmış bir izolatör üzerindeki kir tabakası yenilenmeden, ıslatma yenilenerek deney en fazla 4 defa tekrarlanabilir. Dört defada da atlama olmazsa izolatör temizlenir ve yeniden kir tabakası ile kaplanır. Deney, farklı doyma iletkenlikleri için yeniden tekrarlanır. Deney sonuçları dayanım gerilimi (V_g , kV-efektif), yüzeysel iletkenlik (σ_s , μS) eğrisi şeklinde gösterilir.

Yüzeysel iletkenlik σ_s , doyma iletkenliği G_0 ve izolatörün form faktörü F yardımı ile hesaplanır.

$$\sigma_s = G_0 F \quad (2.1)$$

Form faktörü F , izolatör boyutlarına bağlıdır ve aşağıdaki formül yardımıyla grafik veya sayısal yöntemler ile bulunur.

$$F = \int_0^L \frac{dL}{\pi D} \quad (2.2)$$

Bu bağıntıda L ; toplam kaçak uzunluğunu, dL ; kaçak yüzeyi boyunca uzunluk elemanını, D ise dL 'ye tekabül eden izolatör çapını gösterir. $V_s(\sigma_s)$ eğrisi verilen bir kirlenme derecesi için izolatörde atlama yapan ve yapmayan gerilim sınırını gösterir (Alış, 1997).

Çizelge 2.8 Kizelgur Karışımı: İzolatördeki Referans Kirlilik Derecesi ile 20°C Sıcaklıktaki Süspansiyonun Hacimsel İletkenliği Arasındaki Yaklaşık İlişki (TS EN 60507, 1999)

Kizelgur karışımı için referans kirlilik derecesi		Süspansiyonun hacimsel iletkenliği σ_{20} S/cm
Tuz birikim yoğunluğu SDD mg/cm ²	Tabaka iletkenliği K20 μ S	
0,0176	7	0,21
0,025	10	0,30
0,0353	14	0,42
0,005	20	0,60
0,0705	28	0,85
0,1	40	1,20
0,141	56	1,69
0,20	80	2,40

2.4.2.1.1. İzolatörlerin Kirlenmesini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi

Güç sistem güvenilirliği, kirli izolatörün gerilim atlamasına sebep olan çevresel ve atmosferik (iklim) koşullarına bağlıdır. Gerilim atlamaları enerji kesintilerine yol açar (Ahmad vd., 2002)

Yüksek gerilim izolatör yüzeylerinde bulunan kirlenme miktarı, hava hattı izolasyon seviyesinin belirlenmesinde ve izolatör tipinin seçiminde önemli faktördür. Nemli ve ıslak tuzlar izolatör yüzeylerinde iletken tabaka şeklini alırlar. Bu tabaka, izolatörlerin yüksek gerilim tarafından toprağa doğru akacak olan kaçak akım için ideal bir yol olur. Söz konusu kaçak akım belli kritik değeri aşarsa, gerilim atlaması meydana gelir. Meteorolojik parametrelerin (ortam sıcaklığı, basınç, bağıl nem, yağış miktarı, rüzgar hızı ve yönü gibi.), izolatör üzerinde kirlerin oluşmasında büyük etkileri vardır (Ahmad vd., 2000).

Enerji iletim hatlarının geçtiği güzergahlar, izolatör kirliliği açısından önem taşımaktadır. Kir unsurları, güzergah boyunca değişiklik göstererek izolatörlerin farklı yoğunlukta kire maruz kalmalarına sebep olabilmektedir. Kirlenmenin tam olarak tüm izolatörler için belirlenebilmesi pratik değildir. Bunun için iletim hattı izolatörlerine monitörler ve kayıt cihazları konularak, farklı iklim koşullarına göre enerji altında kaçak akımlar ölçülebilmektedir (Zhao vd., Klahifa vd., 1989; Cebeci ve Şenpınar, 2003).

Kirli izolatörden akan kaçak akım, sadece kirlilik seviyesine bağlı değil, aynı zamanda izolatör şekli, tipi, zincir uzunluğu, çalışma gerilimi gibi faktörlere de bağlıdır. Kirli izolatörden dolayı meydana gelen gerilim atlamaları, enerji sistemlerinde arızalara ve enerji kesintilerine sebep olur. Sistemin güvenli çalışması için izolatörün kirlenme seviyesinin sürekli (belli periyotlarda) ölçülerek buna yönelik bakımın yapılması önemli bir faktördür (Zhicken ve Goushon, 1994).

İzolatör üzerinde oluşan kir tabakasının kaçak akım oluşturmaları, yüzeyin hava koşullarına bağlı olarak nemlenmesi ve ıslanması ile ilişkilidir. Havanın sisli ve nemli olduğu durumlarda kir izolatör yüzeyine daha rahat yapışır. Günün belli saatlerinde, özellikle gece ve sabaha karşı ilkbahar ve sonbahar aylarında çığ düşmesinden ötürü izolatör yüzeyi nemlenir ve nemlenen izolatörün üzerindeki kir aktif (iletken) kaçak akımlara yol açar. Özellikle denize yakın ve rüzgarın sert olduğu yerlerde deniz tuzundan kaynaklanan kirlenme sebebiyle oluşan kaçak akımlar daha yüksek değerlere ulaşmaktadır (Macey ve Voslo, 1994)

İzolatördeki kirlilik seviyesi, genellikle ESDD (Equivalent Salt Deposit Density-Eşdeğer Tuz Birikim Yoğunluğu), yüzey iletkenliği ve kaçak akım ile belirtilir. Kirlilik seviyesinin belirlenmesinde kaçak akım monitörü kullanılır (Zhicken ve Goushon, 1994).

- Kaçak akım-nem oranı arasındaki ilişki

İzolatörden akan kaçak akım, hem kirlilik seviyesi hem de kirli tabakanın nemli olmasıyla ilişkilidir. İzolatör yüzeyi kuru durumda iken kaçak akım olmaz, ama havanın nemli, yağışlı olması durumunda kir tabakası iletken hale gelerek kaçak akımlara yol açar. Nem oranı arttıkça kaçak akım da artmaktadır. Nem oranı doyma sınırına geldiğinde izolatörden maksimum kaçak akım akar.

- Kaçak akım-kirlilik seviyesi arasındaki ilişki

İzolatör için yapılan yapay kirlilik testlerinde kullanılan kizelgur ve tuz kirlilik kaynakları izolatöre, farklı miktarlarda (mg/cm^2 olarak) verilerek kaçak akımlar kaydedilmektedir. Kir kaynaklarının seviyeleri arttırıldıkça kaçak akımın da arttığı gözlenmiştir.

- Kaçak akım-işletme gerilimi arasındaki ilişki

Ohm kanununa göre kaçak akım işletme gerilimiyle doğru orantılıdır. Bu sebeple farklı gerilim seviyelerinde teste tabi tutulan izolatörlerde, gerilim seviyesi arttıkça kaçak akımın da o hızda arttığı görülmüştür.

- Kaçak akım-elektrik alanı arasındaki ilişki

İzolatör yüzeyinde oluşan kir tabakası yüzeyin iletken hale gelmesine sebep olur. Bu da direncin azalmasına ve kaçak akımın artmasına sebep olur. Kirlenme öncesi izolatör yüzeyinde oluşan elektrik alanı, kirlenme sonrası azalmaktadır (Macey ve Voslo, 1994).

İletim hattının optimum dizayn edilmesi, hatta meydana gelebilecek arıza ve diğer olumsuz durumların azalmasında önemli bir unsurdur. Atmosferin kirli olması (tuzlar, kimyasal içerikli maddeler gibi.) zincir izolatörün izolasyon dayanımının değerlendirilmesinde ana faktörlerden birisidir. İzolatör yüzeyinin kirini oluşturan karışımın yaklaşık %70-75' i tuz (NaCl) ve %25-30' u (CaSO_4) ve Tonoko' dur. Bunlar özellikle nemin yüksek olması da tehlikeli kir seviyelerine yol açabilmektedir. Zaman zaman ESDD miktarının yüksek seviyelere çıkarak izolatörün dayanma sınırını aşabilmesine yönelik olarak mevcut izolatörün kaçak mesafesi yeterli gelmeyebilir. Bunun için izolatör seçiminde bunların dikkate alınması ve yüksek performanslı izolatörün (kaçak mesafesi daha uzun) tercih edilmesi gerekir. Genellikle yağışların yoğun olduğu denize yakın yerlerin iletim hattı izolatörleri için ideal olduğuna inanılır. Aksine, izolasyon problemlerine bakılacak olursa, sahil alanlarında bunun daha çok yaşandığı görülecektir.

Sahile yakın yerlerde hava hattı izolatörleri, performansı olumsuz etkileyen tuzlarla kirlenirler. Denizden karaya doğru gelen rüzgarla taşınan tuz parçacıkları izolatör yüzeyinde bir tabaka oluşturur; sis ve nem sebebiyle ıslanarak etki altında kalan izolatörlerin izolasyon dayanma seviyesi azalmaktadır. Bu şekilde oluşan iletken tabaka çok tehlikeli olur ve gerilim atlamalarına yol açabilir. İzolatör kirliliği bakımından enerji iletim hatlarının izolasyon seviyesi, işletme deneyimi, kirlilik unsurları, kirlilik seviyesi ve hava şartlarına bağlıdır (Ahmad vd., 2002).

Enerji iletim hatları, bazı durumlarda deniz kenarından ve sanayi bölgelerinden geçebilmektedir. Dolayısıyla dış çevrede yer alan her türlü olumsuzluklarla karşı karşıya kalır.

Laboratuvar şartlarında yapılan izolator kirlilik testleri için değişik kir unsurları uygulanmaktadır. Yapılan testlerde NaCl (sodyum klorür) ve CuSO₄(bakır sülfat) uygulanarak ikisi arasında izolatörden alınan değerler karşılaştırılmıştır. Çizelge 2.9’da sodyum klorür, Çizelge 2.10’da ise bakır sülfata ilişkin yapılan deney sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, bakır-sülfat içerikli kir unsuru, sodyum klorür içerikli kir unsuruna göre daha etkili bulunmuştur (Abdus Salam vd., 2003).

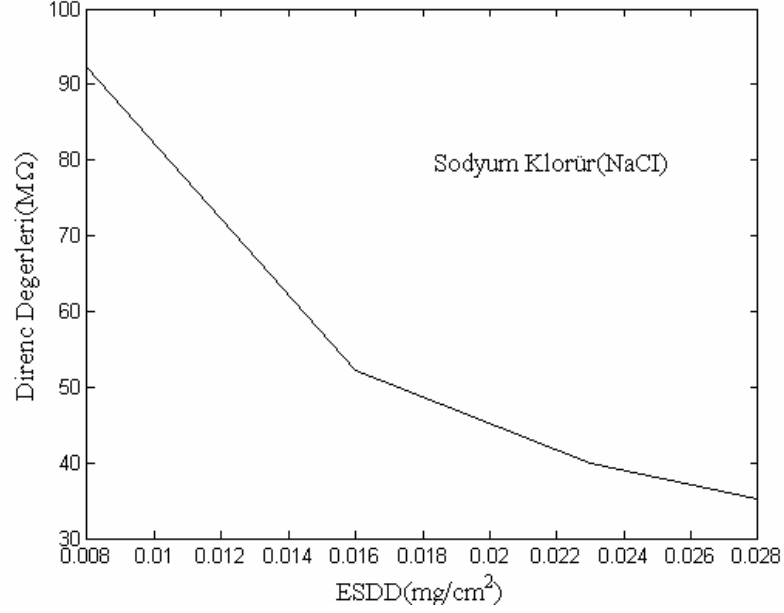
Çizelge 2.9 Sodyum klorür ile yüzeyi kirletilen izolatorün ölçülen kaçak akım ve dirençleri

NaCl (Sodyum klorür) konsantrasyonu(<i>gm / 100ml</i>)	Kaçak Akım(μ A)	İzolator Direnci($M\Omega$)
0,2	1,3	92,31
0,4	2,3	52,17
0,6	2,4	50
0,8	3,3	40
1	3,4	35,29

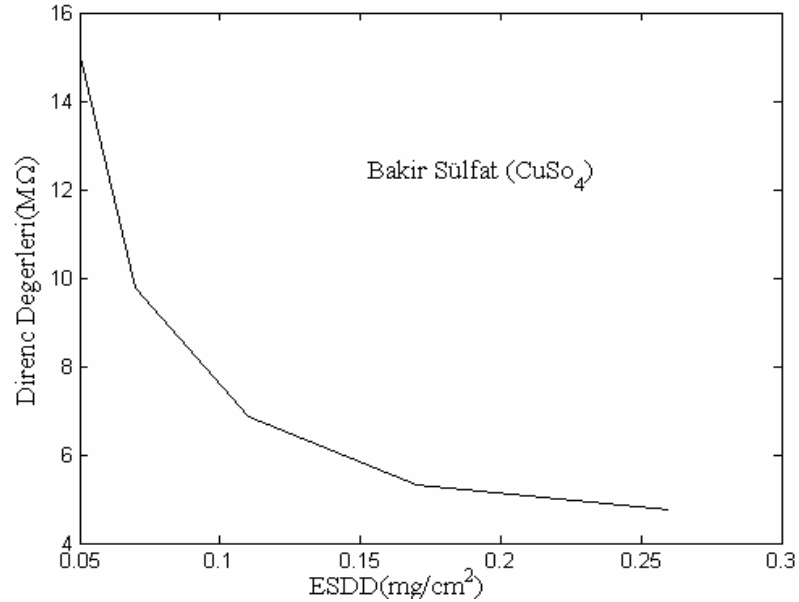
Çizelge 2.10 Bakır sülfat ile yüzeyi kirletilen izolatorün ölçülen kaçak akım ve dirençleri

CuSO ₄ (Bakır sülfat) konsantrasyonu(<i>gm / 100ml</i>)	Kaçak akım(μ A)	İzolator Direnci($M\Omega$)
0,2	8	15
0,4	12,3	9,76
0,6	17,5	6,86
0,8	22,6	5,31
1	25,13	4,77

Laboratuar koşullarında yapılan deneylerde başlık ve pim tipi porselen izolatörler kullanılarak sodyum klorür için Şekil 2.5 ve bakır sülfat için Şekil 2.6'deki eğriler elde edilmiştir. Şekillerden de görüldüğü üzere ESDD değeri arttıkça izolatör direnci düşmekte, dolayısıyla iletkenlik artmaktadır.



Şekil 2.5 Sodyum klorür kir unsuruna karşılık gelen direnç değerleri



Şekil 2.6 Bakır sülfat kir unsuruna karşılık gelen direnç değerleri

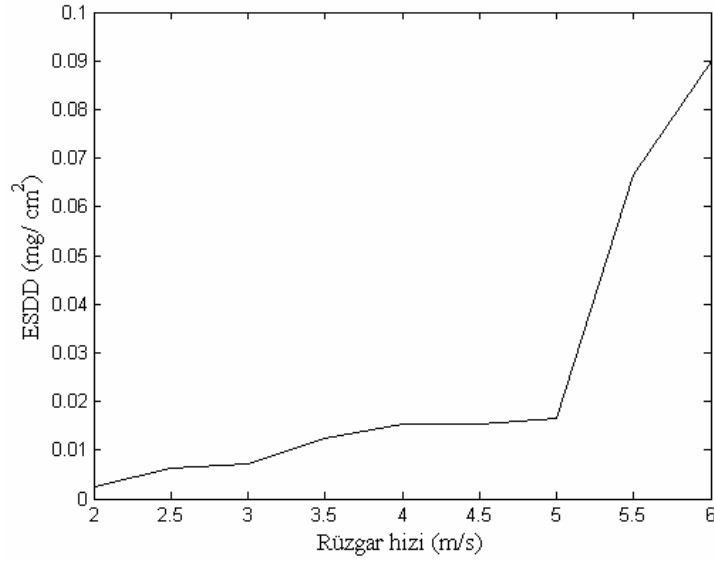
İzolatör yüzeyinde kirliliğe neden olan unsurların taşınarak izolatöre gelmesi ve izolatörde tabaka oluşturmada rüzgârın ve elektrostatik alanların büyük rolleri vardır. Deniz suyunun

küçük damlaları, rüzgâr sebebiyle oluşan yüksek dalgalarla meydana gelir. Bu su damlacıkları rüzgârla taşınır ve izolator üzerinde birikirler. İzolator üzerinde biriken kir tabakası, kuru durumdadır. Hafif bir yağmur veya çığ olması durumunda izolator yüzeyi nemlenerek iletken bir yol oluşur. Çizelge 2.11’de rüzgar hızına karşılık gelen ESDD değerleri yer almaktadır.

Çizelge 2.11 Rüzgâr hızına karşılık gelen ESDD değerleri

Rüzgar Hızı (m / s)	ESDD (mg / cm ²)
2,0	0,00258
2,5	0,00627
3,0	0,00709
3,5	0,01244
4,0	0,01530
4,5	0,01544
5,0	0,01655
5,5	0,06638
6,0	0,09002

Çizelge 2.11’e ilişkin Şekil 2.7’de verilen eğriden anlaşılacağı üzere rüzgar hızı arttıkça ESDD değeri de artarak izolator üzerinde rüzgar hızının ne kadar etkili bir faktör olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2.7 Rüzgar hızına karşılık gelen ESDD değerleri

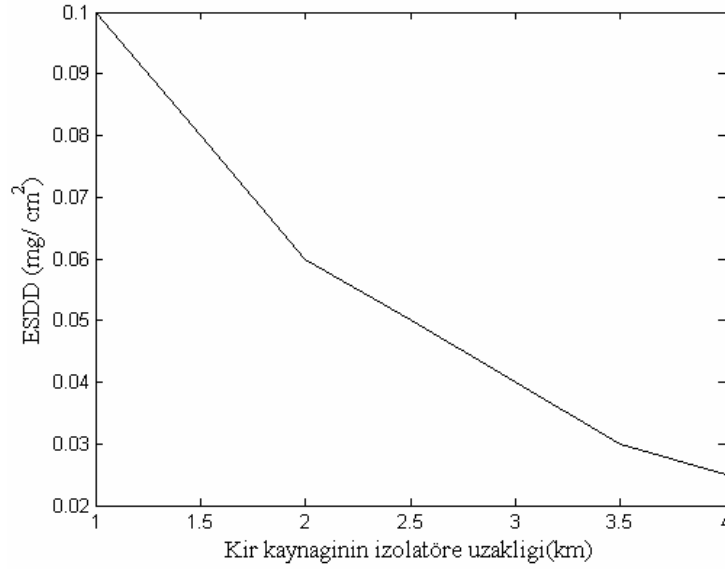
Şekil 2.7’de rüzgar hızı 5 m/s den sonra ESDD değerleri aşırı derecede yükselerek tehlikeli boyutlara ulaşabilmektedir.

Enerji iletim hatlarının güvenli çalışmasında, izolatör üzerinde oluşan ESDD seviyesi denize yakın yerlerde büyük problem oluşturmaktadır. Bu sorun, izolatör seçiminde çevresel faktörler dikkate alınarak ekonomik olarak çözülebilir (Abdus Salam vd., 2000).

Enerji iletim hattı gerilim seviyesinin yükselmesiyle birlikte, izolatör üzerindeki kirlenmeye yönelik çalışmalar önem kazanmaktadır. Kir ortamında bulunan izolatörün performansı, enerji iletim ve dağıtım şebekelerindeki izolasyon çalışmalarında öncü rehber olacaktır.

İzolatör üzerindeki kir unsurları iki tipte sınıflandırılabilir; biri, çözülebilen iletken bileşenler, diğeri ise çözilemeyen iletken olmayan bileşenlerdir. En yaygın iletken bileşenler, iyonik tuzlar olan sodyum klorür, sodyum sülfat ve magnezyum klorür gibi içeriklerden oluşur. Deniz tarafında, sodyum klorür izolatör kirliliğinin ana bileşenidir. İzolatör üzerinde biriken kirler, hafif bir yağış veya çığ sebebiyle nemlenerek izolatörün izolasyon direncini düşürürler.

ESDD değeri, izolatörün kir kaynağına olan uzaklığıyla değişir. Normalde, izolatörleri etkileyen kirin ana kaynakları, endüstriyel alanlar, sahil bölgeleri ve çöllerdir. ESDD değerleri, denizden uzaklaştıkça azalmaya başlar. Şekil 2.8’ de kir kaynağının izolatöre olan mesafesine karşılık ESDD değerleri verilmiştir. Kir kaynağının izolatöre olan mesafesi arttıkça ESDD değeri azalarak, etkisini hemen hemen kaybetmektedir (Salam vd., 2000).



Şekil 2.8 Kir kaynağı mesafesine karşılık ESDD değerleri

2.4.2.1.2. Kirli İzolatörlerin Bakımı

İstisnai durumlarda, kirlenme problemleri, iyi bir izolatör seçimi ile ekonomik olarak çözülemez. Örnek olarak çok şiddetli kirlenme olan veya yıllık olarak düşük yağışlı alanlarda, izolatör bakımı gerekebilir.

Bütün mevcut bina merkezinin çevresinde yeni kirletici endüstrilerden dolayı merkez (veya hat) değişimleri de olabilir. Bakım, normal olarak, aşağıdaki şekillerden bir veya bir kaç kullanılarak yapılabilir:

- Enerjilenmemiş tesisat üzerinde, periyodik olarak elle ovularak yapılan temizleme ve enerjilenmiş olarak veya olmayarak yapılan kuru temizleme
- Yağlı (gres) bileşiklerine yapılan periyodik kaplama
- Periyodik olarak enerjilenmiş veya enerjilenmemiş durumda yapılan yıkama.

a) Yağlama

İzolatörleri kaplamak için kullanılan yağ bileşikleri, esas olarak, silikon ürünleri veya hidrokarbonlardır. Gres yağının kalınlığı, gresin tipine veya kirlenmenin derecesine bağlıdır. Genellikle, silikon esaslı bileşikler için yaklaşık 1 mm ve hidrokarbon esaslı bileşikler için birkaç milimetreye erişebilir.

Uygulamanın bu tipi, yağı temizlemek ve yeniden kaplamak için düzenli olarak bakım gerektirir ve pahalıdır. Yağmurda veya rüzgarda yağlı izolatörlerin kendi kendine temizleyici özelliklerinin çoğunu kaybettiği ve belirli şiddetli kirlenme şartlarında; yağın seramiğe veya cama hasar verebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Temizleme ve tekrar yağlama sıklığı, pislik derecesine ve hava koşullarına bağlı olarak birkaç aydan birkaç yıla kadar değişir. Bu işlemlerin en aza indirilmesi; yağ içindeki kirlilik içeriğinin birikme oranı ve yağla kendi yaşı göz önüne alınarak yağın şartlarının da kontrolünün yapılması ile elde edilmelidir.

b) Yıkama

Kirin giderilmesi için, izolatörlerin yıkanmasında iki ana metot vardır.

- Sabit spreyleyler ile
- Taşınabilir ve elle kontrollü bir püskürtme cihazının kullanılması ile.

Yıkama sıklığı, kirin önemli miktarda birikmesini önleyecek şekilde olmalıdır. Burada amaç, izolatörleri olabildiğince temiz bir durumda tutmaktır.

Özellikle, birikinti oranının yüksek olduğu durumlarda, sabit otomatik spreyle izolatörlerin yıkanması, kirlilikle mücadelede etkin ve güvenilir bir yoldur. Bu teknik, yüksek yatırım ancak düşük işletme maliyetlidir.

Taşınabilir bir püskürtme cihazı, uygun şekilde eğitilmiş personelin doğrudan denetimi altında çalışır ve bir yerden daha fazla yerde kullanılabilir. Bu düşük yatırım maliyetini gerektirir, ancak yüksek işletme maliyetlidir. Bazı güvenlik önlemleri de gerekir. Her iki sistemde;

- a) Yeterli kapasitede ve uygun düşük öz iletkenli bir depolanmış su kaynağı gerekir. Şehir şebeke suyu, bazı durumlarda yıkama için uygun olabilir.
- b) Yıkama suyunun damlacıklar haline dönüşmesini sağlamak için özel hortum başlıklar gerekir.
- c) Yıkanmamış izolatörlerin üzerine kuvvetli rüzgâr vasıtasıyla suyun püskürtülmesi riskini azaltacak önlemler gerekir.

Kirlilik birikintisi oranının yüksek olduğu durumlarda, sabit yıkamayı başlatmak veya elle yıkamayı devreye sokmak için bir kirlilik detektörüne gerek duyulabilir. Yıkamanın etkinliği, izolatörlerin tasarımına ve özellikle etek adımlarına ve şekline bağlıdır. Özellikle etek adımları profili iyi aerodinamik niteliklere sahip ve kirlenmeye karşı performansı iyi olan izolatörler iyi yıkanır.

2.5. Direkler

Direkler gerilim altındaki iletkenleri izolatör üzerinde yerden ve birbirlerinden belirli uzaklıkta havada tutmak için kullanılırlar.

2.5.1.1. Cıvatalı Demir Direklerin Yapılışı

Gerilim ve iletken kesiti büyüdükçe direğin boyu ve ağırlığı arttığından, taşıma ve dikme kolaylığı için kaynaklı demir direklerin yerine cıvatalı demir direkler kullanılır.

Cıvatalı demir direklerin yapım resimlerinde belirtilen ölçülerde kesilmiş, delinmiş ve bükülmüş olan profil ve NPU demirleri, levhaları, 12 mm çapındaki tırmanma engelleri, izolatör zincirlerinin direğe saptanması için gerekli şakıl pabuçları, taşıyıcı direklerde konsol uçlarına konulacak kuşkonmazlar, topraklama kazıkları, topraklama iletkenleri ve pabuçları, galvanizli tırmanma cıvataları, civata, somun ve rondelalar, dolgu malzemeleri, 20x40 cm² boyutunda kancalı tipte ölüm tehlike levhaları, 11x11 cm² boyutunda direk numara levhaları, toprak iletkeni klemensine ait 14 mm çapında bağlantı pimleri, hepsi birlikte paket olarak gösterilir.

Cıvatalı demir direklerde her tip direk için bir travers bulunur. Direk sipariş edilirken, ayrıca travers sipariş etmek gerekmez, direk ve traversi birlikte verilir. Direk ağırlığına travers ağırlığı da dâhildir.

Cıvatalı demir direklerde, taşıyıcı traversler askı ve durdurucu traversler gergi zincir izolatörlüdür.

Direk elemanları direğin tipini, eleman numarasını ve yapım partisinin sıra numarasını gösteren simge ile markalanır. Örneğin, A2-25-1 markasında A2 direğin tipini, 25 eleman numarasını ve 1 yapımının parti numarasını gösterir.

Cıvatalı demir direkler sıcak daldırma yöntemiyle galvanizlenir. Dikmelerin temel betonuna girdiği yerin 30 cm altında ve beton içinde kalan kısımları galvanizlenmez. Sıcak daldırma galvaniz 25 ile 30 yıl ömürlüdür.

İstif ve montaj sırasında, galvanizli demir direk parçaları yerde sürüklenmemelidir. Galvanizi bozulmuş veya hasara uğramış malzeme temiz paçavraya emdirilmiş madeni xylene ispiertosu ile silinerek temizlenir ve Subox Inc. firmasının üretimi olan galvanox boya veya benzer boya ile boyanır (Saner, 2004).

Temel betonu 477 MCM ve 795 MCM iletkenli bir ve iki devre direklerde BS 14, 1272 MCM iletkenli bir ve iki devre direklerde BS 16 kalitesinde ve 300 dozdur. B 16 kaliteli beton betoniye içinde karıştırılır. BS 14 kalitesi için betoniye kullanma zorunluluğu yoktur. Üst betonun toprak altında kalan 30 cm' lik kısmı ile toprak üstündeki kısmı 500 doz olmalıdır.

Direk temel kazıları projede gösterilen ölçülerden daha küçük yapılamaz. Kazı daha büyük ölçüde yapılırsa, zeminin yan taban gerilmeleri ile devrilme bakımından ayağın güvenliği hesaplarla doğrulanmalıdır.

Direk temelleri oynatılmamış zemine oturtulur ve temeller gereğinden fazla kazılamaz. Direk çukurları yağmur ve benzer nedenlerle çamur ve balçık haline gelmişse, bu malzeme temizlenir; ayrıca temel gereğinden fazla kazılmış olursa, taban iri kum ve çakılla doldurulur ve tokmakla iyice sıkıştırılır. Sıkıştırılmış olan zemine en az 6 cm kalınlığında grobeton (Tesviye betonu) dökülerek zemin yatay düzleme paralel duruma getirilir.

Direk alt montajına başlamadan önce, 300 doz betonla 30x30x10cm boyutunda hazırlanmış olan ayar taşı tesviye betonunun üzerine konur ve direk ayak dikmeleri ayar taşının üzerine oturtularak alt montaja başlanır.

Direklerin yatağı değiştirilen akarsuların içine veya temelin üstündeki toprağın sürüklediği sel yataklarına dikilmeleri durumunda, direğin dört ayağı birden betonarme rayda üzerine oturtulur. Betonarme rayda, suyun akış durumuna ve zeminin cinsine göre 12 ile 20 m derinliğe çakılan fore kazıklarla tutturulur.

Cıvatalı demir direklerin alt bölümünde montajı (Alt montaj) yapıldıktan sonra üst bölümdeki parçaları birbirlerine cıvatarla bağlandığından (Üst montaj) dikilmeleri kolaydır. Bu yüzden, cıvatalı demir direkli iletim hatları en zor ve dik arazi koşullarında da kurulabilmektedir.

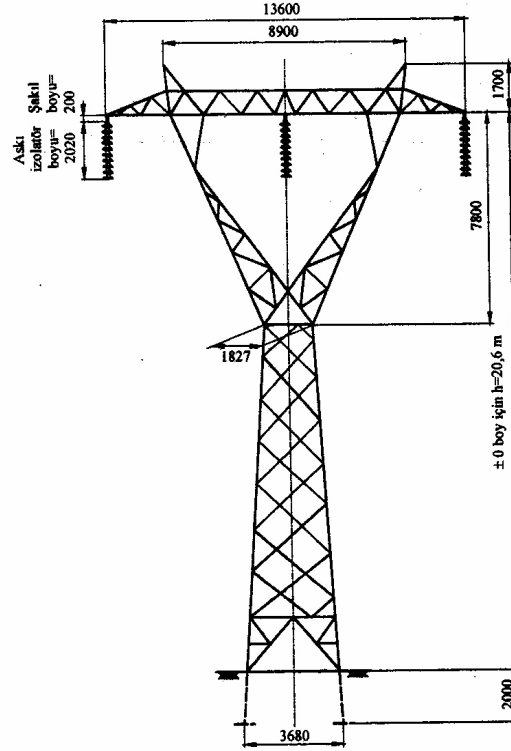
Cıvatalı demir direkler, işlevi ve yapısını belirten simgesinin yanına direğin en alt traversinin altına yerden h yüksekliği yazılarak belirtilir. h yüksekliği, direğin + 0 (Sıfır) olarak tanımlanan boyu için verilir. Bu boyun üstündeki ve altındaki boylar 2'şer m (1,5 ve 3'er m de olabilir) ara ile artar (+) veya azalır (-). Örneğin, direğin tipi L ve h = 17 m ise, L +2 tipi direğin boyu $17+2=19$ m, L -4 direğin boyu $17-4=13$ m'dir.

2.6. 154 kV'luk Cıvatalı Demir Direkler

Taşıyıcı direk olarak A2 tipi (Şekil 2.9), ağır taşıyıcı direk olarak B2 tipi, durdurucu direk olarak C2 tipi ve son direk olarak D2 tipi olmak üzere dört tip direk vardır. Sıfır boylar A2 tipi direkte 20,6 m, B2 tipi direkte 19,6 m, C2 tipi direkte 16,75 m ve D2 tipi direkte 17,15 m'dir. 154 kV, 477 MCM, tek devre cıvatalı demir direk ağırlıkları (kg) :

Çizelge 2.12 154 kV'luk direklerin ağırlıkları (kg)

İşlev	Direk Tipi	Boy					
		-6	-3	+0	+3	+6	+9
Taşıyıcı	A2	2300	2600	2850	3210	3550	-
Ağır taşıyıcı	B2	2700	3050	3460	3930	4470	5000
Durdurucu	C2	3810	4420	5110	5600	6420	-
Son	D2	5850	6710	7600	8450	9600	



Şekil 2.9 Enerji iletim hattı taşıyıcı direği (Saner, 2004)

3. ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNİN İŞLETME ÖZELLİKLERİ

3.1. Giriş

Bir elektrik güç sistemi, üretim, iletim ve dağıtım tesislerinden meydana gelir. Ayrıca sistemde tüketicilere ait tesisler ve yükler bulunmaktadır. Güç sistemine ve tüketicilere ait tesisler elektrik enerjisinin akım ve gerilim değerlerini, gerektiğinde dalga şekillerini ve frekanslarını değiştirerek sistemdeki yüklerin çalışma koşullarına uygun hale getirilirler. Generatör, transformatör, iletim hattı, HVDC sistemi, kondansatör, doğrultucu, evirici, statik VAR sistemi, ark fırını gibi aygıt ve tesisler güç sisteminde ve tüketicilerde belirli bir işlevi gerçekleştirmek üzere yer almaktadır. Bu elemanlardan bir kısmının akım-gerilim karakteristiği doğrusal değildir. Nonlineer elemanlar, şebekenin akım ve gerilim dalga şeklinin sinüs formunu bozarak, akım ve gerilimin harmonik bileşenlerinin meydana gelmesine neden olurlar.

Yarı iletken teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak sistemdeki geleneksel elemanların yerini gün geçtikçe güç elektroniği düzenleri almakta, sistemdeki nonlineer eleman sayısı artmaktadır. Güç sistemindeki nonlineer karakteristikli elemanlar iletim ve dağıtım sistemlerinde ciddi bir harmonik kirliliğine neden olmakta, tüketiciye verilen enerjinin kalitesini azaltmaktadır (Martinon vd., 1996).

Enerji iletim sistemleri işletme özellikleri bakımından genel olarak dört farklı şekilde incelenir:

- a) Dengeli -sinüsoidal yüklenme
- b) Dengeli – sinüsoidal olmayan yüklenme
- c) Dengesiz -sinüsoidal yüklenme
- d) Dengesiz – sinüsoidal olmayan yüklenme

3.2. Dengeli – Sinüsoidal Yüklenme

Enerji sistemleri dengeli-sinüsoidal üç fazlı yük durumunda, yüklerden geçen akımlar birbirine eşit, birbirinden 120° faz farklı ve her üç akımın geometrik (fazörel) toplamı sıfıra eşittir; buna simetrik yük adı da verilir.

Dengeli üç fazlı güç sistemlerinde sistemin tek hat diyagramlarında aşağıdaki varsayımlar öngörülür.

- Yük güçleri dengelidir. ($S_a = S_b = S_c$)
- Sistemin besleme ve uç gerilimleri dengelidir.
- Akımlar ve gerilimler sinüsoidaldir.
- Fazların empedansları ($Z_a = Z_b = Z_c$) ve admitansları ($Y_a = Y_b = Y_c$) eşdeğerdir.
- Uzun iletim hatlarında kaçak kapasitelerin belirli noktalarda toplandığı kabul edilir; kısa ve orta iletim hatlarında ihmal edilebilir.

3.3. Dengeli – Sinüsoidal Olmayan Yüklenme

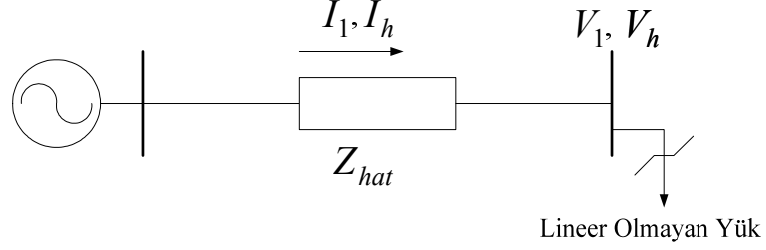
Akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan elemanların (güç elektroniği elemanları, ark fırınları vb.) kullanımına duyulan ihtiyaç nedeniyle, enerji sistemlerinde harmonikler oluşmaktadır. Şekil 3.1’de harmonik bileşenlerin bulunduğu bir enerji sistemi verilmiştir. Kaynağın sinüsoidal yani gerilimin sadece temel bileşeninin bulunmasına karşılık sisteme bağlı lineer olmayan yük nedeniyle harmonik akım bileşenleri meydana gelecek ve bu akımların sonucunda harmonik gerilim bileşenleri sistemde görülecektir. Harmonik içerikli devreler analiz edilirken süperpozisyon teoremi uygulanarak temel bileşen ve sistemde yer alan diğer harmonik bileşenlerin etkileri incelenebilir.

Harmonikli bir sistemin efektif akım (I_{ef}) ve gerilim (V_{ef}) ifadeleri aşağıdaki gibidir:

$$I_{ef} = \left[\sum_{n=1}^N I_{ef_n}^2 \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

$$V_{ef} = \left[\sum_{n=1}^N V_{ef_n}^2 \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

Burada n, harmonik mertebesini göstermektedir.



Şekil 3.1 Sinüsoidal şebekeye bağlı lineer olmayan yük.

3.3.1. Harmonik Kaynakları

Elektrik güç sistemlerinde gerilim ve akımın dalga şeklinin sinüs biçiminden sapmasına neden olan harmonik bileşenleri, harmonik kaynağı olarak nitelendirilen ve akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan elemanlar tarafından üretilmektedir. Harmonikleri meydana getiren elemanlar genel olarak şu şekilde verilebilir:

- Konverterler,
- Yarı iletken elemanların kullanıldığı cihazlar,
- Generatörler,
- Motorlar,
- Senkron makinelerin uyarılması için kullanılan diyot ve tristörlü dönüştürücüler,
- Transformatörler,
- Gaz deşarj prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları,
- Fotovoltaik sistemler,
- Bilgisayarlar,
- Elektronik balastlar,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Anahtarlama güç kaynakları,

- Kaynak makinaları,
- Kontrol devreleri,
- Frekans dönüştürücüleri,
- Statik Var kompanzatörler,
- Ark fırınları,
- Yüksek gerilim ile enerji iletimi (HVDC) sistemleri,
- Elektrikli ulaşım sistemleri.

Enerji sistemlerinde harmoniklerin etkinliğinin belirlenmesi ve olumsuzlukların giderilmesi bakımından tüm harmonik üreten elemanların harmonik kaynağı olarak ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir.

3.3.2. Harmonik Büyüklüklere Ait Temel Kavramlar

Elektrik enerji sistemlerinde harmoniklerin her geçen gün artması nedeniyle bu etkilerin ifade edilmesi, yok edilmesi veya sınırlandırılmasında baz alınan bazı büyüklükler tanımlanmıştır. (Shuter vd., 1989; Emanuel, 1990; Heydt vd., 1991; Yumurtacı, 2000). En yaygın olarak kullanılan hem gerilim hem de akım için verilen “Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)” kavramıdır. Bu konudaki standartlar da sınırlamalarını yüzde THD olarak vermektedir. Maksimum harmonik derecesi K olan,

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^K I_n \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (3.3)$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^K V_n \sin(n\omega t + \beta_n) \quad (3.4)$$

akım ve gerilim dalga şekilleri göz önüne alınsın. Akım için sırasıyla efektif akım (I_{ef}), toplam harmonik distorsiyonu (THD_i) ve distorsiyon faktörü (DF_i),

$$I = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt \right)} = \left(I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots \right)^{1/2} \quad (3.5)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.6)$$

$$DF_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.7)$$

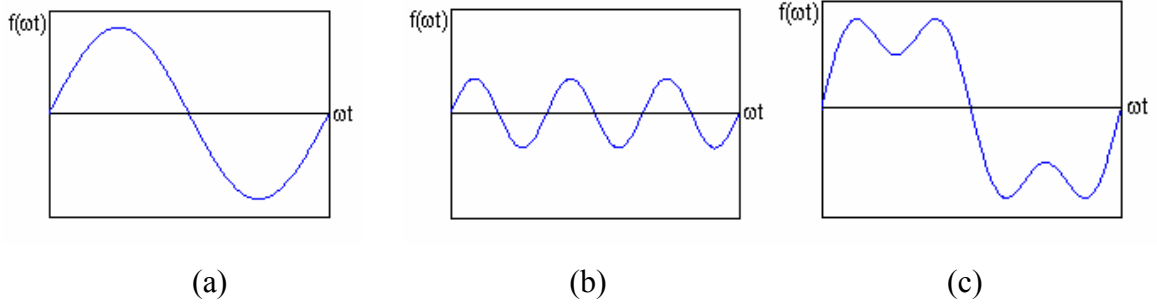
Gerilim için sırasıyla efektif gerilim (V), toplam harmonik distorsiyonu (THD_v) ve distorsiyon faktörü (DF_v),

$$V_{ef} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt \right)} = (V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots)^{1/2} \quad (3.8)$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (3.9)$$

$$DF_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (3.10)$$

şeklinde yazılabilir. Yukarıdaki ifadelerde “1” indisi temel bileşen değerini, “2,...,K” indisleri ise harmonik bileşenleri gösterir. K değeri, pratikte 25 ile 50 arasında değer almaktadır. Non-sinüsoidal bir dalga şeklinin temel bileşen ve 3. bileşenine ait şekiller aşağıda verilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Nonsinüsoidal dalga ve bileşenleri

- a. Temel bileşen
- b. 3.harmonik bileşen
- c. Toplam (nonsinüsoidal) dalga
($v = V_1 \cdot \sin \omega t + V_3 \cdot \sin 3\omega t$)

Çizelge 3.1 154 kV gerilim seviyeleri için gerilim harmonik değerleri (EPDK, 2003)

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No. "h"	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No. "h"	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No. "h"	Harmonik Gerilim (%)
5	1.5	3	1.5	2	1.0
7	1.5	9	0.75	4	0.8
11	1.0	15	0.3	6	0.5
13	1.0	21	0.2	8	0.4
17	0.75	>21	0.2	10	0.4
19	0.75			12	0.2
23	0.5			>12	0.2
25	0.5				
>25	0.2+0.3 (25/h)				
Toplam harmonik bozulma seviyesi % 3					

Çizelge 3.2 Kabul edilebilir akım harmonik değerleri (EPDK, 2004)

Harmonik Sırası		YG 34.5<Un<154					ÇYG Un>154				
Grup	No	Ik/II					Ik/II				
		<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000
Tek Harmonik	3	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	5	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8

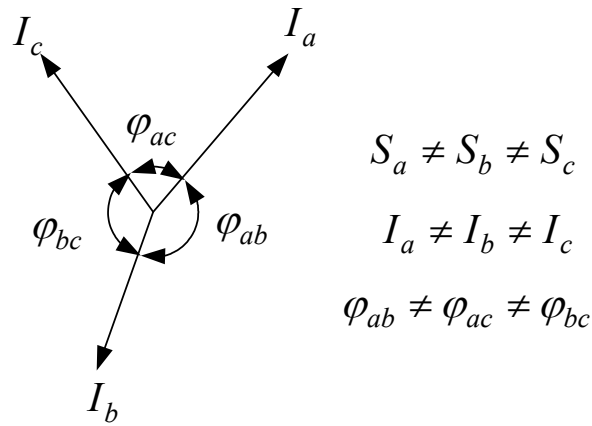
3.4. Dengesiz – Sinüsoidal Yüklenme

İletim sistemlerinde çok yüksek gerilimli (EHV) transpoze edilmemiş hatların kullanımının artması, yüklerin bir fazlı hava hattı üzerinden beslendiği elektrikli demiryolu ulaşımının yaygınlaşması ve şebekeden dengesiz akım çeken büyük güçlü ark fırınlarının sayısının gittikçe artması gibi nedenlerle şebekenin simetrik yapısı bozulmuş, şebeke asimetrik ve dengesiz yüklü hale gelmiştir (Zhang ve Chen, 1994; Garcia ve Zago, 1996).

3.4.1. Dengesiz Yükler ve Türleri

Üç fazlı olarak gerçekleştirilen elektrik enerjinin üretimi, iletimi ve dağıtımı sırasında faz gerilimi ve akımlarının olabildiğince dengeli tutulmasına çalışılır. Generatörler yapıları gereği dengeli gerilim üretirler. Ancak bazı tür tüketiciler karakteristikleri nedeniyle fazlardan dengesiz akımlar çekebilir. Demiryolu tesisleri, ark fırınları, haddehaneler, alçak gerilim enerji dağıtım şebekelerindeki bu tür yüklere birer örnektir. Bu durumda her fazın akımının genliği birbirinden farklı ve akım fazörleri arasındaki açı da 120° 'den farklı olabilir.

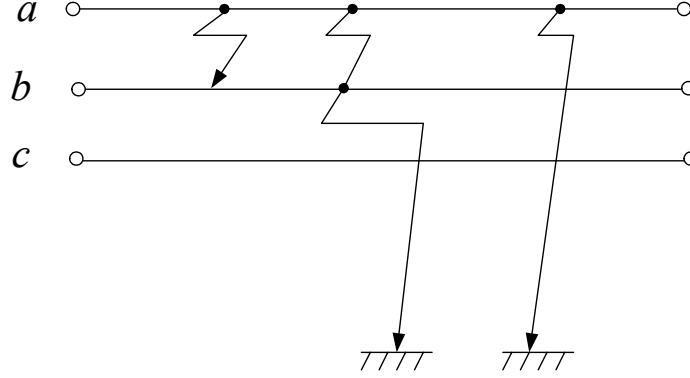
Eğer bir şebekenin ya da indirici trafonun sargıları dengeli olarak yüklenmiyor ise bu durumda sistem yükü dengesizdir. Dengesiz yükte faza bağlı yük empedansları hem genlik hem de faz açısı olarak birbirinden farklıdır. Bu nedenle de faz akımları, genlik ve faz açısı bakımından dengesizdir. Şekil-3.3'de dengesiz yüklenmiş bir sistemdeki akımlar fazörel olarak gösterilmiştir. Dengesiz yük kavramını iki açıdan irdelemek mümkündür:



Şekil 3.3 Dengesiz akımların fazörel gösterimi

3.4.1.1. Geçici Dengesizlik

Geçici dengesizlik oluşturan durumlara, tek faz-toprak, iki faz, iki faz-toprak asimetrik kısa devre arızaları örnek verilebilir. Bu durumlar, Şekil-3.4’de gösterilmiştir.



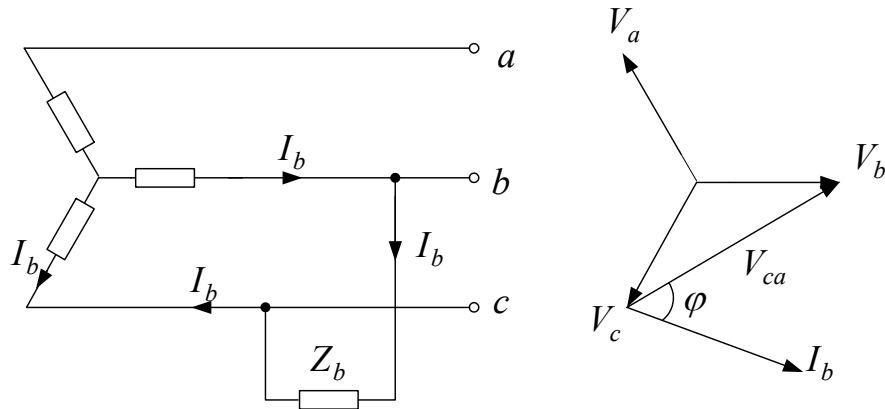
Şekil 3.4 Geçici dengesizlik oluşturan olası durumlar

3.4.1.2. Sürekli Dengesizlik

Sürekli dengesizlikler, genelde yüklerin fazlar arasında dengeli dağılmamasından kaynaklanmaktadır. Aşağıda sürekli dengesizlik oluşturan yüklerin çeşitleri ve bunlara ilişkin temel açıklamalar verilmiştir.

3.4.1.2.1. Bir Fazlı Yük

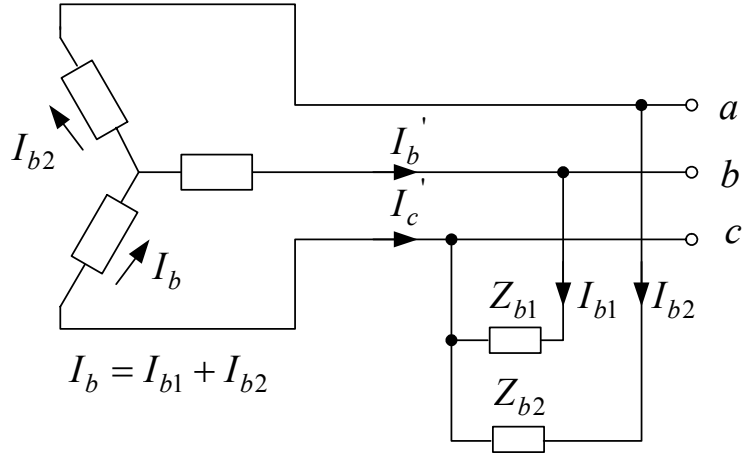
Bir fazlı yükler, nötr hattı olmayan trafolarla yalnız iki faz arasına, nötr hattı olan sistemlerde ise hem iki faz arasına hem de faz ile nötr arasına bağlanabilir. Şekil 3.5’de dengeli sistemlerde dengesizlik oluşturan bir fazlı yükün iki faz arasına bağlantısı ve fazör diyagramı görülmektedir.



Şekil 3.5 Dengesizliğe neden olan bir fazlı yük gösterimi ve fazör diyagramı

3.4.1.2.2. İki fazlı Yük

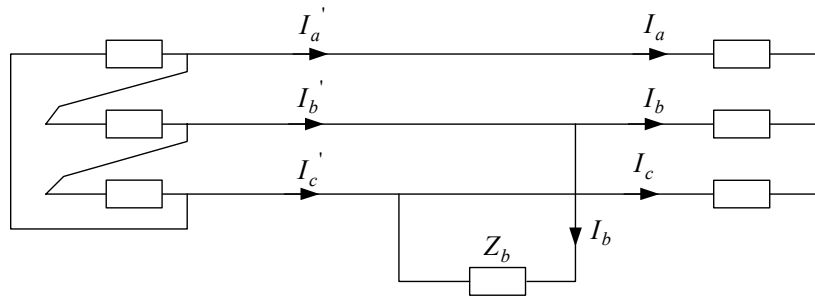
İki fazlı yük, nötr hattı olmayan sistemlerde iki tane bir fazlı yük empedansının iki ayrı faz hattı arasına veya nötr hattı olan sistemlerde iki ayrı faz ile nötr hattı arasına bağlanması durumudur. Bu durum, sistemin dengesiz yüklenmesine neden olur. Şekil 3.6'da nötr hattı olmayan üç fazlı bir sistemde dengesizliğe neden olan iki fazlı yük bağlantısı görülmektedir.



Şekil 3.6 Dengesizliğe neden olan iki fazlı yük gösterimi

3.4.1.2.3. Disimetrik Yük

Disimetrik yük, nötr hattı olmayan üç fazlı ve üç iletkenli alçak ya da yüksek gerilim şebekelerinde söz konusudur. Besleme trafosunun sekonder tarafı Δ , Λ veya zigzag bağlı olup Λ noktası dışarıya çıkarılmamış yani yalıtılmıştır. Nötr hattı olmayan dengeli yüklenmiş bir sistemde, herhangi iki faz arasında bağlanan yüke disimetrik yük adı verilir. Şekil-3.7'de I_a , I_b , I_c dengeli yük akımları ve I_a' , I_b' , I_c' disimetrik yük akımları olmak üzere disimetrik yük gösterimi görülmektedir.

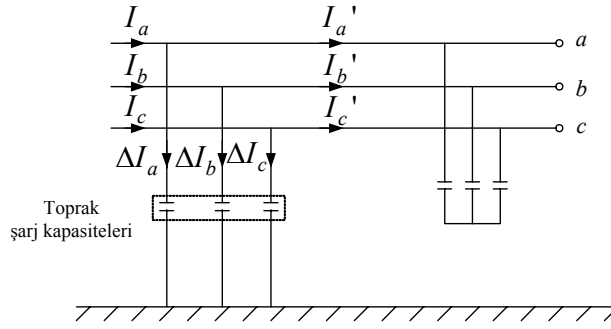


Şekil 3.7 Disimetrik yük gösterimi

Disimetrik yüklenmede trafonun manyetik devresi bozulmaz ancak disimetrik akımlar, primer tarafından geçecekleri için sistemi besleyen generatör ve buna bağlı hatları da disimetrik olarak yükler.

3.4.1.2.4. Hattın Yapısından Doğan Dengesizlikler

Bu tür dengesizlikler toprak şarj kapasitelerinden kaynaklanan elektrostatik dengesizliklerdir (Şekil-3.8). Bu tür dengesizliklerin etkileri çok küçük olduğundan genelde ihmal edilebilir.



Şekil 3.8 Elektrostatik dengesizlik oluşumu

3.5. Dengesiz – Sinüsoidal Olmayan Yüklenme

Güç sistemlerinde dengesiz yüklenme durumlarında lineer olmayan yüklerin de olması her zaman mümkündür. Bölüm 3.4.1’de anlatıldığı üzere hemen hemen her noktada lineer olmayan yük durumları karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanında dengesiz yüklenme de olması durumunda ortaya çıkan sonuçlar önem kazanmaktadır.

Bu aşamada dengesiz akımlardan dolayı faz akımları farklı değerler alacak ve lineer olmamasından da temel bileşene ek olarak akımın diğer harmonik bileşenleri etkili olacaktır.

3.6. Enerji İletim Sistemleri Faz-Toprak Kısa Devre Arızaları

3.6.1. Giriş

Enerji sistemlerinde akım ve gerilimler, sürekli çalışma durumunda (arızasız) dengeli olduğu kabul edilmektedir. Ancak, iletim hattı faz iletkenlerinin kendi aralarında (iki faz, üç faz) veya toprakla (faz-toprak, iki faz-toprak, üç faz-toprak) oluşturduğu kısa devreler sonucunda bu denge bozulur ve geçici yüksek akımların oluşmasına sebep olurlar.

Enerji iletim hatlarında meydana gelen kısa devrelerin sebepleri şu şekilde verilebilir:

- Sert esen rüzgâr (fırtına)
- Ağaç dalları
- Yüksek iş makineleri (vinç)
- Uçurtmalar
- Geniş kanatlı kuşlar
- Kar ve buz yükü

Üç-fazlı sistemlerde kısa devre arızaları aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

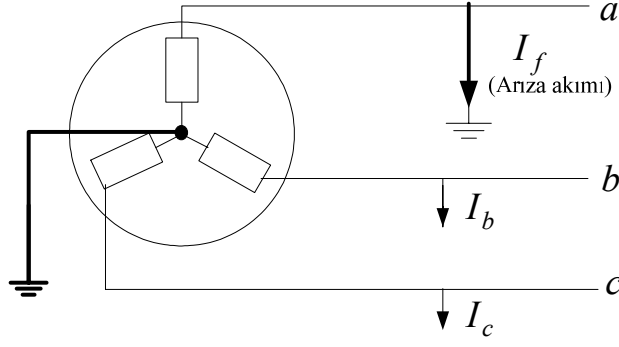
- Dengeli ve simetrik üç-fazlı arızalar
- Tek-faz toprak arızaları
- Faz-faz arızaları
- İki-faz toprak arızaları

Bu arızalardan en yaygın olanı tek faz-toprak kısa devre arızasıdır. Güç sistemlerinin tasarımında yukarıda bazı sebepleri sayılan kısa devrelerin oluşturduğu akımların sistem elemanları üzerindeki dağılımının hesaplanması önemlidir. Bu akımların büyüklüğü (genliği) devre kesicilerin ayarlarının yapılması için sistem kullanıcılarına (mühendislere) bilgi sağlamaktadır (Mohamed, 2000; Weedy, 1998).

3.6.2. Tek Faz-Toprak Arızaları

Üç fazlı sistemlerde bir faz iletkeninin toprağa değmesi sonucu oluşan arızalardır. Bu tip arızalar, fırtına, kar yükü, ağaç dalları gibi sebeplerle meydana gelir. İletim hatlarında meydana gelen arızalardan en büyük orana sahip (% 75) faz-toprak (Şekil 3.9) arızalarıdır (Çakır, 1986 ;Popovic, 1996; Sabrol vd., 1993).

Güç sistemlerinde en yaygın arızalar simetrik olmayan (faz-toprak, iki faz-toprak) arızalardır. Bu tip arızalarda dengesiz akımlar olduğundan, arızaların analiz edilmesinde en iyi metot simetrik bileşenlerdir (Sluis, 2001).



Şekil 3.9 Faz-toprak kısa devre arızası

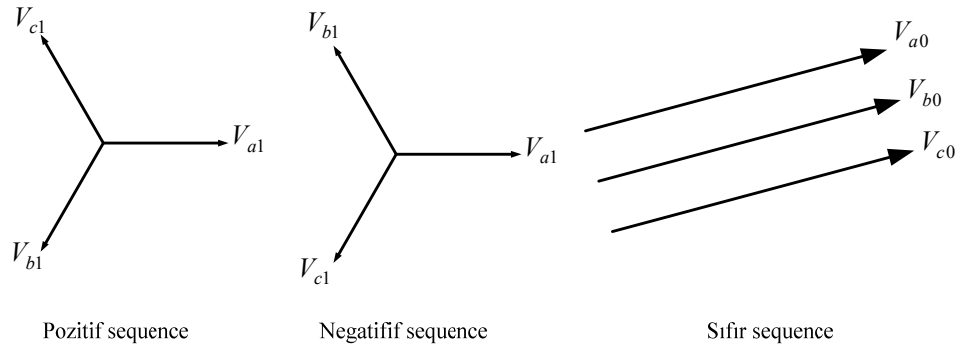
3.6.2.1. Simetrlili Bileşenler

Simetrlili bileşenler teorisi 1918’ de C. L. Fortescue tarafından Amerikan Elektrik Mühendisleri toplantısında ortaya atılmıştır. Daha sonra metot geliştirilerek bir çok makalede ana konu olarak araştırılmıştır. Kısaca bu metot asimetrik bir elektrik şebekesinin kolayca etüt edilmesine imkan vermektedir.

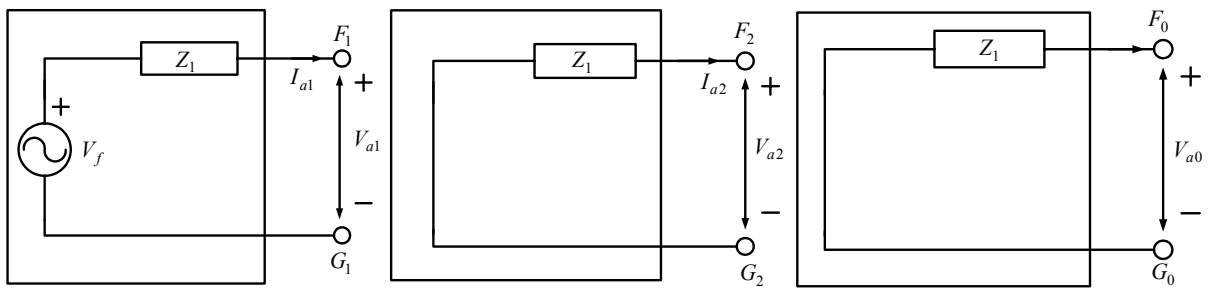
3.6.2.2. Asimetrik Fazörlerin Simetrlili Bileşenler Cinsinden Analizi

Fortescue’nin çalışmaları ispat etmiştir ki, n adet fazörden oluşan dengesiz bir sistem dengeli fazörlerden meydana gelen n sistem içinde yeniden çözülebilir. Bunlar orijinal fazörlerin simetrlili bileşenleri olarak adlandırılır. Simetrlili bileşenler metodu herhangi bir devrede çok fazlı sistemlere uygulanabilirse de biz üç fazlı sistemler açısından inceleyeceğiz. Fortescue teoremine göre 3 fazlı sistemin 3 dengesiz fazörü 3 dengeli sistem fazörleri cinsinden çözülebilir. Bileşenlerin Dengeli Grupları:

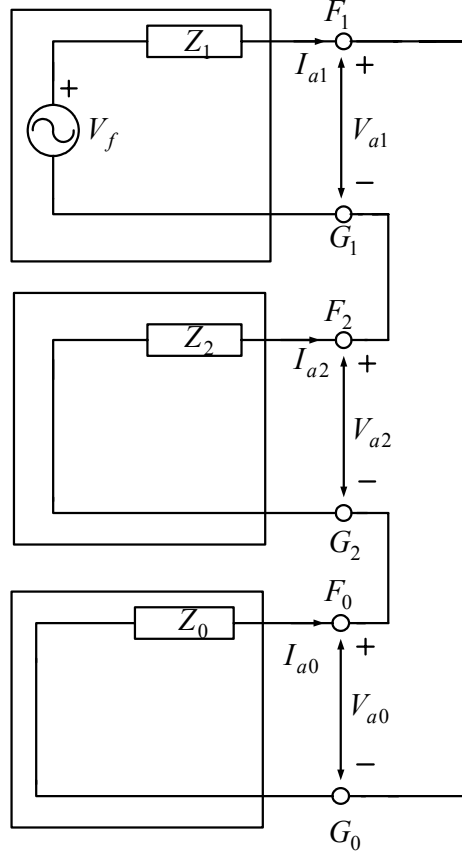
1. Pozitif-sequence bileşenleri: Üç eşit büyüklükteki fazörden meydana gelir. Bu fazörler arasındaki faz farkı 120° dir ve fazörler orijinal fazörlerin faz sırasındadır.
2. Negatif-sequence bileşenleri: Üç eşit büyüklükteki fazörden meydana gelir. Bu fazörler arasındaki faz farkı 120° dir ve fazörler orijinal fazörlerin tam ters faz sırasındadır.
3. Sıfır-sequence bileşenleri: Üç eşit büyüklükteki fazörden meydana gelir. Bu fazörler arasındaki faz farkı 0° dir.



Şekil 3.10 Dengesiz üç gerilim fazörlerinin simetrik bileşen olarak gösterilmesi



Şekil 3.11 Pozitif (1), negatif (2) ve sıfır(0) sequence eşdeğer devreleri



Şekil 3.12 Tek faz-toprak kısa devre arızası sequence bağlantı devresi

Tek faz-toprak arıza akımı yüksek değerli olduğu için güç sistem elemanları açısından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır.

Buna göre, üç fazlı sistemlerde tek faz-toprak kısa devre akımı şu şekildedir:

$$I_f = \frac{3.V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad (3.11)$$

I_f : Faz-toprak kısa devre arıza akımı

V_f : Faz-toprak kısa devre arıza gerilimi

Z_0 : Arızalı fazın sıfır sequence empedans değeri

Z_1 : Arızalı fazın pozitif sequence empedans değeri

Z_2 : Arızalı fazın negatif sequence empedans değeri

4. ENERJİ İLETİM HATLARI TOPRAK YOLU MODELLEMESİ

4.1. Giriş

Elektrik enerjisi genel olarak üretim, iletim ve dağıtım olarak üç aşamada incelenir. Elektrik enerjisinin söz konusu her aşamasında gerilim ve akım değerleri farklıdır. Örnek olarak, 13,8 kV'luk gerilimli üretim merkezinden çıkan elektrik enerjisi, belli mesafelere iletilmek üzere iletim hattına aktarılarak yüklerin (kullanıcıların) bulunduğu yerlere ulaştırılmaktadır. İletim hatlarının uygulamada farklı seviyelerde (154 kV, 380 kV, 765 kV, vb.) gerilim değerleri vardır. Ülkemizde şu anda 154 kV ve 380 kV'luk enerji iletim hatları kullanılmaktadır.

Enerji sistemlerinin sahip olduğu yüksek değerli güçlerin kullanıcılara güvenli bir şekilde iletilmesi ve dağıtılması çok önemlidir. Güç sistemlerinde kullanılan donanımın (izolatör, kesici, ayırıcı, vb.) ve özellikle enerji ortamında çalışan-bulunan kişilerin güvenliği büyük önem taşımaktadır.

Elektrik enerjisinin hem donanım hem de insan ve diğer canlılar açısından güvenli olabilmesi için topraklama sisteminin oluşturulması gerekir. Topraklama, arıza ve sızıntı (kaçak) akımların çok kısa süre içerisinde ne tesise ne de insan ve hayvanlara zarar vermeden toprağa aktarılmasıdır.

Enerji iletim hatlarının taşınmasında çelik konstrüksiyonlu direkler kullanılmaktadır. Bu direkler tek devre ve çift devre sistemine göre farklı şekillerde yapılırlar. Enerji iletim hattı direkleri bir koruma telli ve iki koruma telli olarak tasarlanmaktadır. Bu çalışmamızda 154 kV'luk tek devre/çift koruma telli iletim hattı incelenmiştir.

Enerji iletim hatlarında muhtemel kısa devre arızaları ve izolatör kaçak akımı ile faz-koruma teli karşılıklı kuplaj etkilerinden dolayı oluşan akımların oluşturacağı temas gerilimleri yüksek değerlere çıkabilmektedir. Bunun için akım dağılımının iletim hattının tüm direklerinde sağlanabilmesi amacıyla direklerin her birinin uygun koşullarda topraklanması gerekir.

Bu çalışmada yukarıda önemli sebepleri verilen kaçak akımların izlediği toprak yolunun farklı işletme ve çevresel koşullar için iletim hattı boyunca direk topraklama (temas) gerilimleri incelenmiştir.

4.2. Enerji İletim Sistemlerinde Topraklama Sistemleri

4.2.1. Topraklama ve Topraklama Sistemleri

Elektrik enerjisi büyük faydaları yanında, insan ve hayvanlar için tehlikeli elektriksel şokları beraberinde getirmektedir. Bundan dolayı elektrik sistemlerinin uygun noktalarından topraklanması gerekmektedir. Böylece arıza durumlarında, kaçak akımlar sisteme zarar vermeden hızlı bir şekilde toprağa akacaktır. Bunun için düşük öz dirence sahip ortamlar doğal olarak ideal topraklama alanlarıdır.

Topraklama, aşırı gerilimden sistemi korumak ve sistem güvenilirliğini artırmak için büyük öneme sahiptir.

4.2.2. Topraklama Sisteminin Direnci

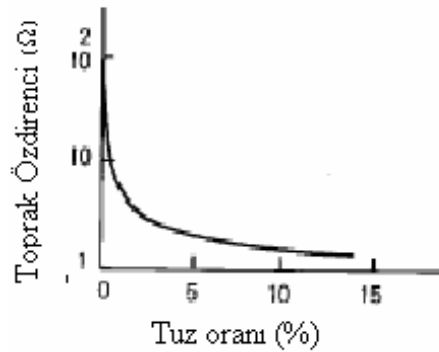
Topraklama sisteminde direnç hesabında en önemli belirleyici faktör toprağın özgül direncidir. Toprağın özgül direnci zemin cinsine göre değişmektedir. Çizelge 4.1'de bazı zeminlere (toprak cinslerine) ilişkin öz direnç değerleri verilmiştir:

Çizelge 4.1 Bazı zeminlere (toprak cinslerine) ilişkin öz direnç değerleri

Toprağın Cinsi	Öz direnç (Ωm)
Bataklık, tarla toprağı	5-50
Kil	8-50
Kum ve çakıl	60-100
Kum-taş	100-500
Kaya	200-10.000

Çizelge 4.1’de verilen öz direnç değerleri arasında büyük aralıkların olmasında bağıl nem (%), sıcaklık, basınç ve çözülmemiş tuzların öz direnç üzerinde büyük etkiye sahip olduklarını göstermektedir (Şekil 4.1).

Toprağın genel yapısına bakıldığında, birçok katmandan oluşmaktadır. Dolayısıyla homojen olmayan zemin yapıları için eşdeğer öz direnç tanımlanmıştır (Sverak vd., 1982; Nahman ve Salamon, 1984; Komaragiri ve Mukhedkar., 1981; Sunde., 1968)



Şekil 4.1 Toprağın içindeki tuz oranı ile öz direnç arasındaki ilişki

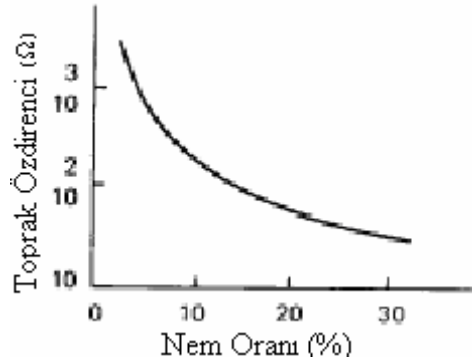
4.2.2.1. Toprağın Direnç Üzerindeki Etkileri

Topraktaki kimyasal maddeler ve nem toprağın (elektriksel) iletkenliğini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle Amerikan Standartlar Bürosu (ASA) tarafından yapılan bir seri toprak direnci ölçmelerinde 2 Ω ’dan 3000 Ω ’a kadar değişik direnç değerleri elde edilmiştir.

4.2.2.2. Topraktaki Nemin Direnç Üzerindeki Etkileri

Topraktaki nemin çok büyük önemi vardır. %20’nin altında, nemin %1-2 değerinde değişmesi topraklama dirençlerinde büyük farklar oluşturur (Şekil 4.2). % 20 içeren toprağın öz direnci, %20 nemli toprağın öz direncinden 30 kat daha büyük olduğu görülmüştür. %20’ den daha fazla nem öz direnç üzerinde fazla etkili değildir. Fakat %20’ nin altında toprağın içerdiği

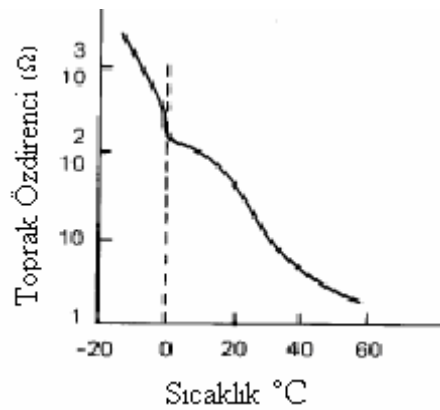
nemin azalması ile hızla yükselir. Normal nem, mevsimlere göre değişiklik gösterir. Nem toprakta kuru mevsimlerde %10, yağışlı mevsimlerde %35 ve ortalama yaklaşık olarak % 16-18 kadardır (Dengiz, 1991).



Şekil 4.2 Nem oranı ile öz direnç ilişkisi

4.2.2.3. Sıcaklığın Direnç Üzerindeki Etkileri

Şekil.4.3’de, % 18,6 nem içeren kırmızı balçık toprağın sıcaklıkla öz direnç değişimlerini göstermektedir. 0 °C ’deki toprak içindeki su donar ve topraktaki öz direnç ısı katsayısı artar. Bu katsayı negatiftir. Bu sebeple ısı düştüğünde öz direnç yükselir ve topraklama direnci artar. Sonuç olarak, topraklamalar bütün sene fonksiyonlarını yapabilmeleri için dondan her zaman korunabilecek derinlikte olmalıdırlar (Dengiz, 1991).



Şekil 4.3 Sıcaklık ile öz direnç ilişkisi

4.2.2.4. Derinliğin Direnç Üzerindeki Etkileri

Toprak bağlantılarında topraklama elektrodunun derinliği önemli bir faktördür. Çakılmış elektrotlar toprağın sabit nem seviyesine erişebilecek kadar uzun olmalıdırlar. Yeterli nem

seviyesine ulaşamama durumunda yalnız yüksek dirence değil aynı zamanda mevsim değişimlerinde büyük direnç değişikliklerine sebep olunur.

Farklı derinliklerde toprak nadiren üniform özdirence sahiptir. Genellikle toprak yüzeyine ilk birkaç m mesafede direnç yüksek ve yağışla kuru ve nem durumlarına göre değişkendir. Toprak derinleştikçe direnç daha stabildir. Yani direncin azalıp çoğalması daha azdır.

Direnç üzerine en büyük etki ilk 1,83 m derinlikte elde edilir. Her ne kadar direnç, 2,44 m' lik elektrot için hala azalırsa da azalma 1,83 m' likteki kadar değildir.

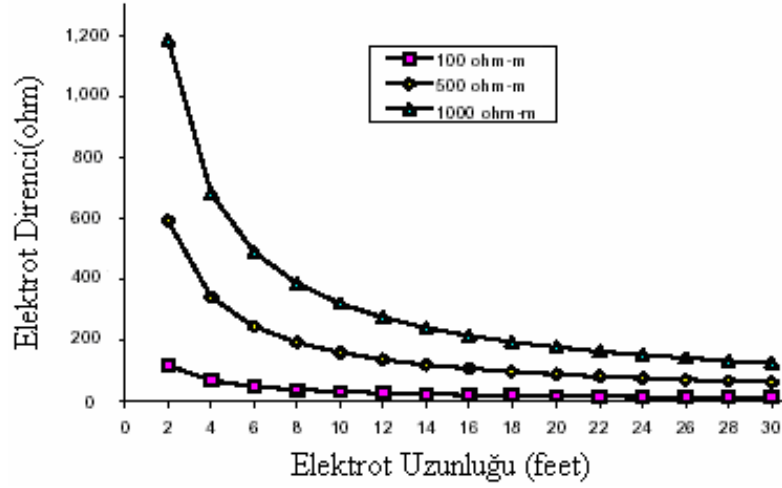
Toprakta daha derine inmekle daha yüksek nem elde edilir ve derinliğin avantajı daha da artar. Uygulamada en çok kullanılan elektrot uzunluğu 2,44 m'dir. Birçok topraklamalarda 2,44 m uzunluk sabit neme erişmek için yeterlidir (Dengiz, 1991).

4.2.2.5. Elektrot Çapının Direnç Üzerindeki Etkileri

Elektrotların çapını büyütmekle dirençte ancak çok küçük değişimler elde edilir. Esasen çap dirence etki etmez. Yapılan testler sonucunda görülmüştür ki, piyasada kullanılan elektrotlar arasında direnç farkı o kadar küçüktür ki, çap pratik olarak ihmal edilebilir bir faktör olarak düşünülebilir. Temel olarak, elektrodun, toprağa çakılırken bükülmeyecek ve hasara uğramayacak kadar kalınlıkta olması yeterlidir (Dengiz,1991).

4.2.2.6. Elektrot Uzunluğunun Direnç Üzerindeki Etkileri

Şekil 4.4'te elektrot uzunluğunun farklı toprak özdirenç değerlerine bağlı olarak elektrot direnç eğrileri verilmiştir (Carpenter ve Lanzoni, 1997). Elektrot direnç değerleri belli elektrot uzunluğuna kadar hızlı değişim göstermektedir. Yaklaşık olarak 4 m'lik elektrot uzunluğundan sonra doyuma ulaşıldığından dolayı fazla değişim olmamaktadır. Fakat toprak özdirenç değerlerine bakıldığında, özdirenç değeri yükseldikçe elektrot direncinde yüksek değerlerde artış olmaktadır. Bu da toprak özdirencinin topraklama sisteminde en önemli faktör olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.4 Elektrot uzunluğu ile elektrot direnç ilişkisi

4.3. Yüksek Öz dirençli Zeminlerin Düşük Öz dirençli Olması için Yapılan Çalışmalar

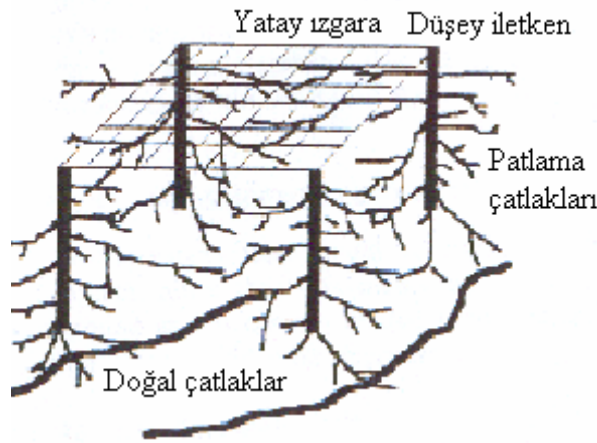
Yüksek öz dirençli topraklama sisteminde topraklama direncini düşürmek zor bir iştir. Toprak direncini düşürmek için aşağıdaki üç yöntem uygulanabilir (El-Morshedy vd., 2000):

4.3.1. Düşük Öz dirençli Malzeme (LRM, “Low-Resistivity Materials”) Kullanmak

- Toprakta derin çukurlar açılır.
- Çukurlarda dinamit yardımıyla topraktaki sert kayalar parçalanır.
- Yüksek basınç altında düşük öz direnç içeren malzemeler bu çukurlara doldurulur.

Böylece, yüksek öz dirençli zeminlerde düşük öz direnç ortamı oluşturulabilir (Meng vd., 1999).

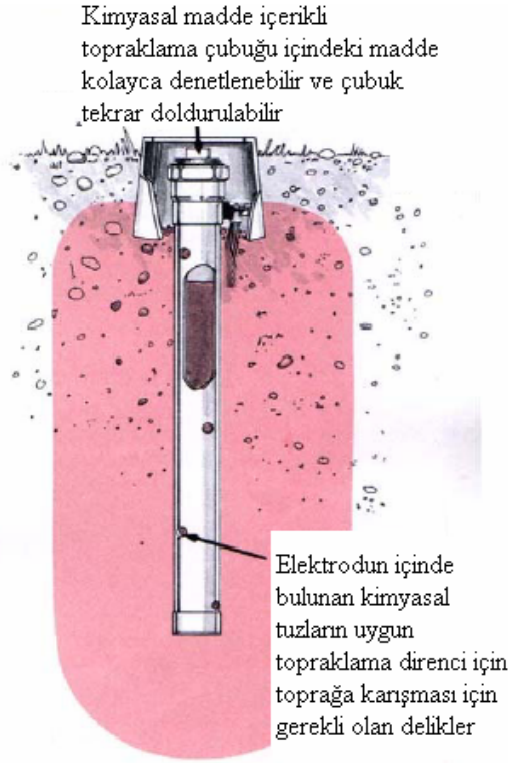
Dikey olarak gömülen elektrotların etrafındaki alan LRM ile doldurulur. Şekil 4.5’ te bir elektrik tesisinde LRM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen topraklama sistemi verilmiştir. Görüldüğü üzere ağaç dallarına benzer çatlaklıklar oluşmuştur.



Şekil 4.5 LRM yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen topraklama sistemi

4.3.2. Kimyasal Madde Katkılı Topraklama Çubukları Kullanmak

Kimyasal madde içerikli topraklama çubukları, mineral tuzlarla doldurulan, uzunlukları boyunca delikli elektrotlardır. Özel olarak formüle edilen mineral tuzlar düzgün bir şekilde topraklama elektrotunun bütün uzunluğu boyunca dağıtılmıştır. Buna yönelik bilgiler Şekil 4.6’ da verilmiştir. Bu topraklama elektrotları hem havadan hem de topraktan nemi çeker. Konvansiyonel (geleneksel) elektrot sisteminden daha etkili olan kimyasal içerikli elektrotlar, büyük ortamların sürekli olarak topraklama açısından uygun olmasını sağlamaktadır. Kimyasal madde içerikli elektrotları içindeki iletken tuzlar azaldığında, bu elektrotlar özel teçhizatla tekrar doldurulabilir. Bu elektrotlar hem yatay hem de düşey konfigürasyonlarda kullanılabilmektedir. Ayrıca, kayalık zeminlerde, don olan bölgelerde, kuru çöllerde veya tropikal yerlerde kullanılabilir ve uzun yıllar kararlı koruma sağlayabilmektedir (Meng vd., 1999).

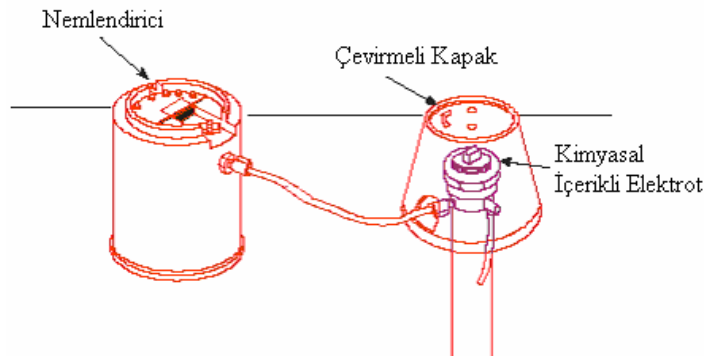


Şekil 4.6 Kimyasal madde içerikli topraklama çubuğu

4.3.3. Topraklama Yeri Toprağın Değiştirilmesi

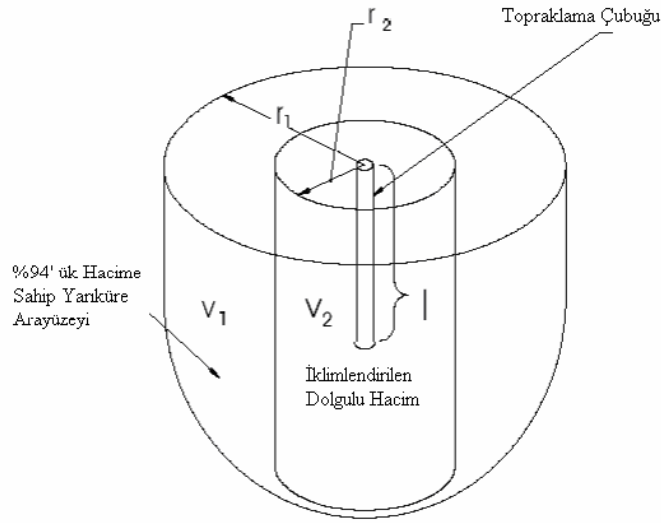
Topraklama elektrodunun direncinin %95 'i zemin karakteri ile belirlenir. Dolayısıyla, toprağın bir kısmını veya hepsini daha yüksek iletkenliğe sahip dolgu malzemesiyle değiştirerek, düşük dirençli topraklama sistemi sağlanmış olur. Ne kadar toprak değiştirilirse, o kadar daha düşük topraklama direnci elde edilir (Meng vd., 1999).

Ayrıca, topraklamaya uygun suni ortamlar da oluşturulabilir (Carpenter ve Lanzoni, 1997). Bunlardan biri Şekil 4.7'de verilen güneş motivasyonlu nemlendirici ortam oluşturan düzeneklerdir. Nem sensörleri ile uygun ortam sağlanmaktadır.

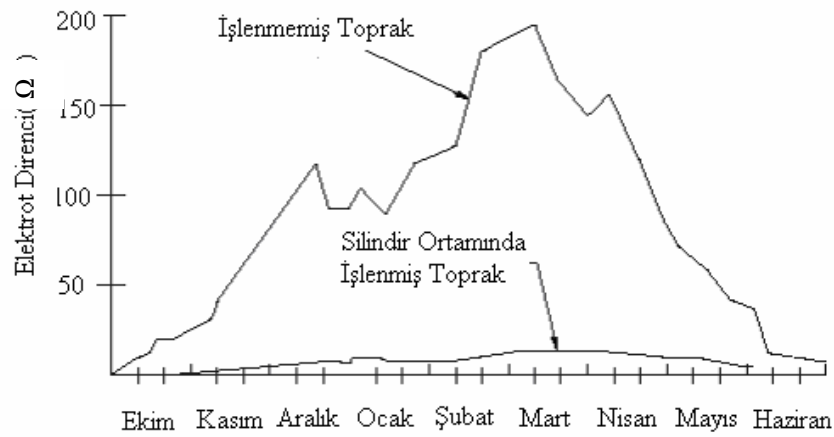


Şekil 4.7 Güneş motivasyonu nemlendirici düzenek

Diğer yöntem Şekil 4.8’de verilmiştir. Burada yarımkürel bir hacmin içine silindirik bir hacim oluşturularak yapılan çalışma gösterilmektedir. Silindirik hacmin içinde yer alan topraklama elektrodunun ortamı kimyasal tuzlarla işlenerek topraklamaya uygun hale getirilmektedir. Şekil 4.9’da mevsimlere bağlı olarak işlenmiş ve işlenmemiş topraklama ortamlarına ilişkin elektrot direnç değerleri verilmiştir. Sonuçta, topraklamaya uygun olmayan ortamlar uygun hale getirilerek düşük değerde öz direnç ve buna bağlı olarak topraklama direnci sağlanmaktadır.



Şekil 4.8 Silindirik hacim içinde kimyasal işleme ile ortamın topraklamaya uygun hale getirilmesi



Şekil 4.9 İşlenmiş ve işlenmemiş toprağın elektrot direnç dağılımı

4.4. Enerji İletim Hatlarının Topraklanması

Enerji iletim hatlarının güvenli olarak işletilebilmesi ve oluşacak arıza akımlarından insan ve hayvanları koruyabilmek için iletim hattının tüm direklerinin topraklanması gerekir.

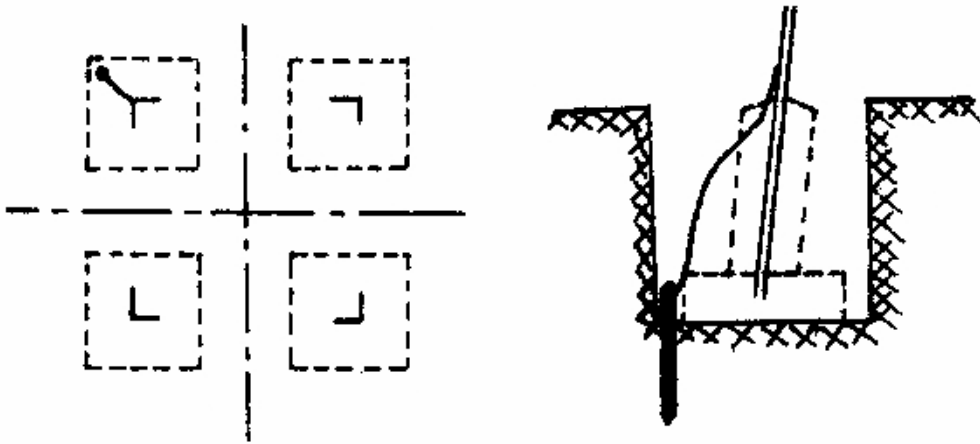
İletim hatlarında kullanılan direklerin topraklanmasında zeminin yüksek özgül direncinden dolayı tehlikeli adım ve temas gerilimlerin oluşmasına engel olmak için topraklama arızasının olduğu direğin civarında meydana gelen akımların, diğer direklere de geçebilmesi ve akım dağılımının yapılabilmesi için koruma telleri kullanılır. Koruma hattının empedansı belli bir değerde olduğundan, topraklama arızasının olduğu yerden uzakta bulunan direklerden yakında olanlar kadar akım akmaz. En büyük akım, arızanın olduğu direkten akar (Dengiz, 1991; El-Morshedy vd., 2000).

4.4.1. Direklerin Topraklanması

Enerji iletim hatlarında kullanılan direklerin toprak direnci 20Ω 'un altında olmalıdır. Bunun için direkler, aşağıda belirtildiği gibi iki yöntem kullanılarak topraklanır (Dengiz, 1991).

Birinci Yöntem:

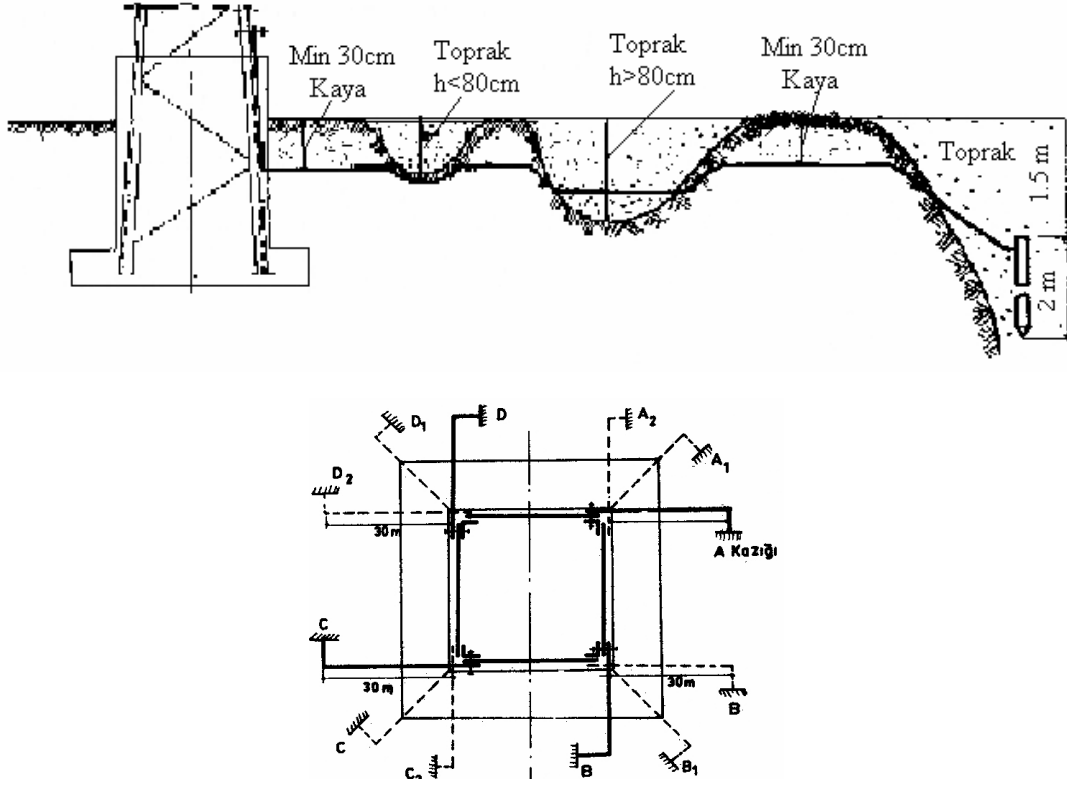
Topraklama elektrodu topraklama direnci 20Ω 'un altına düşmek şartı ile temel çukurlarından kotu en düşük ve zemini en uygun ayakların temel tabanına çakılır (Şekil 4.10). Bu şekilde yapılan topraklamada, topraklama direncinin 20Ω 'un altına düşmeyeceği başlangıçta arazinin yapısına göre tahmin edilirse ya da bu şekilde topraklama yapıldığı halde topraklama direnci 20Ω 'un altına düşürülemediyse bu durumda aşağıda belirtilen ikinci yöntemdeki gibi topraklama yapılmalıdır:



Şekil 4.10 Direk topraklaması

İkinci yöntem:

Topraklama, direk ayaklarından herhangi biri merkez olmak üzere 30 m yarıçaplı bir alan içinde 20 Ω 'u sağlayacak en uygun bir yer ve istikamette, en az 1.5 m derinlikteki düşey düzlemde dikine yerleştirilmiş en az 2 m boyunda ve en az 5 cm çapında galvanizli boru ile yapılmalı ve topraklama elektrodu direk gövdesine en az 70 mm² 'lik galvanizli çelik telle bağlanmalıdır (Şekil 4.11).



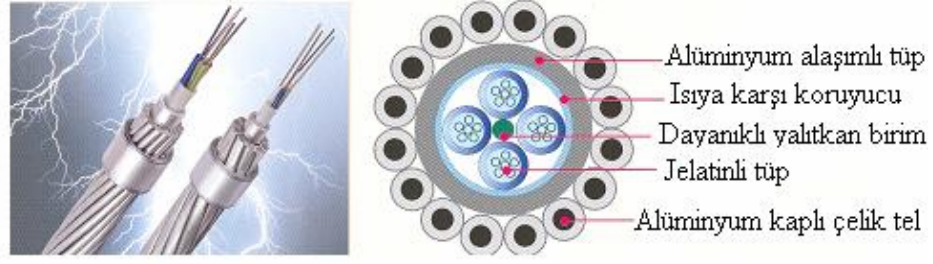
Şekil 4.11 Kayalık zeminde direk topraklaması

Kayalık zeminde topraklamada yapılması gereken işlemler aşağıda verilmiştir:

- Toprak elektrotları A,B,C,D zeminin en müsait yeri olmak üzere A1, B1, C1, D1 veya A2, B2, C2, D2 noktalarına gömülmelidir.
- Direnci düşürmek için klorürler veya iletkenliği artırıcı tuzlar kullanılmalıdır.
- Topraklama direnci ölçme raporlarında direncin değeri, ölçme tarihi, sıcaklık derecesi ve zeminin sahip olduğu durumlar (yaş, normal, kuru veya çok kuru) olarak belirtilmelidir.
- Topraklama bağlantı teli kayalık zeminde en az 30 cm derinliğe gömülmeli ve üzerine beton dökülerek kayalık zemine sabitlenmelidir.

4.4.1.1. Koruma Telleri

Enerji iletim hatlarında yıldırım akımı ile kısa devre akımlarının oluşturacağı adım ve temas gerilimlerine karşı koruma telleri kullanılır. Koruma telleri tek olabildiği gibi, çift olarak ta kullanılır. Genellikle malzemesi çelik olan bu teller yerine son zamanlarda hem koruma hem de haberleşme amaçlı üzere optik koruma telleri (OPGW) kullanılmaktadır. Bu tellerin yapısı Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Optik kısım OPGW’nin ortasında dış etkenlerden korunacak şekilde tasarlanmıştır. Yurt dışında ve ülkemizde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.12 Optik koruma teli (OPGW)

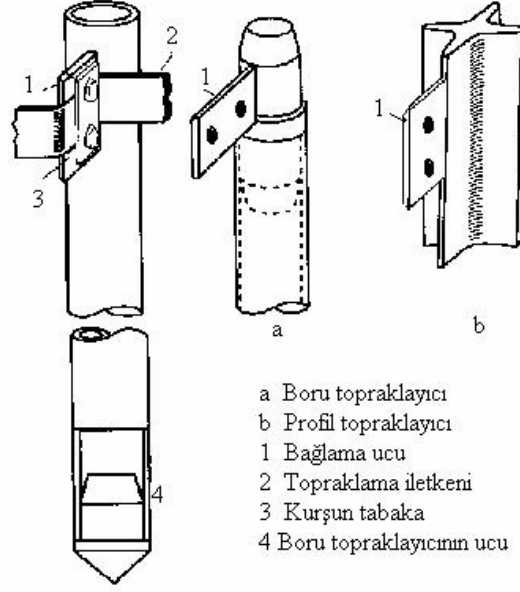
4.4.1.2. Çubuk Topraklayıcı

Çubuk topraklayıcı en basit ve en ekonomik elektrotlardan biridir. Bunlar çoğunlukla 1 inç çapında çelik borudan veya buna eşdeğer profil çelikten yapılırlar ve zemine dik olarak çakılırlar. Çubuk topraklayıcının uzunluğu 3-5 m kadardır ve üst ucu 50 cm kadar toprakta kalır. Çubuk topraklayıcılar oldukça derine indiklerinden, yazın zemin kurusa bile topraklayıcı daima rutubetli zeminde bulunur ve çok iyi bir topraklama imkanı sağlar. Onun için buna derin topraklayıcı denir.

Şekil 4.13’te çubuk topraklayıcı gösterilmiştir. Bu topraklayıcının çapı, yayılma direnci üzerine çok az etki eder; onun için boru çapı veya profil kesiti mekanik dayanıma ve korozyon olaylarına göre tayin edilir. Yayılma direnci daha çok çubuk uzunluğuna bağlıdır. Çubuğun zemine kolay çakılabilmesi için ucunun sivri olması gerekir. Eğer zeminin daha rutubetli ve yayılma direnci bakımından daha avantajlı olacağı görülürse, çubuğun yere dik değil, eğimli olarak da çakılmasına müsaade edilir.

Çubuk topraklayıcılarla istenen yayılma direncinin sağlanamadığı kurak zeminlerde özel bir çubuk topraklayıcı kullanılır ki buna emdirmeli topraklayıcı denir. Bu da üzerinde delikler bulunan bir çeşit çubuk topraklayıcıdır. Zaman zaman borunun içine iletken bir sıvı dökülür. Bu sıvı, topraklayıcı borunun deliklerinden çıkarak etrafa yayılır. Böylece toprağın özgül direnci, topraklayıcı etrafında çok düşürülmüş olur. Bu gibi topraklayıcılar her iki ayda bir

defa emdirilir. Bu amaçla soda çözeltisi kullanılır, bunun korozyon etkisi çok düşüktür (Bayram, 2004).



Şekil 4.13 Çubuk topraklayıcıları

4.5. Enerji Sistemlerinde Oluşan Tehlikeli Gerilimler

Enerji sistemlerinin hem işletme hem de insan ve diğer canlılar açısından güvenliğinin sağlanması için, sistemin uygun bir şekilde topraklanması gerekir. Bunun için topraklama direnç ölçümlerinin yapılarak standartlarda uygun görülen değerlerin sağlanması gerekmektedir.

Elektrik sistemlerinde büyük önem taşıyan toprak öz direnci ölçümlerinin sebepleri aşağıda verilmiştir (ANSI/IEEE, 1983).

- Yapılacak olan trafo merkezi veya iletim hattı direklerinin toprak direncinin tespiti
- Adım ve dokunma gerilimlerinin bulunması
- Birbirine yakın güç sistemleri ve haberleşme devreleri arasındaki endüktif kuplajın hesap edilmesi
- Katodik koruma sistemlerinin tasarlanması
- Jeolojik çalışmalar

Topraklama direnci ölçümleri ise aşağıda sıralanan gereksinimlerden dolayı yapılmaktadır (ANSI/IEEE, 1983).

- Yeni topraklama sisteminin uygunluğunun belirlenmesi
- Mevcut topraklama sistemindeki değişikliğin kontrol edilmesi

- Tehlikeli adım ve dokunma gerilimlerinin belirlenmesi

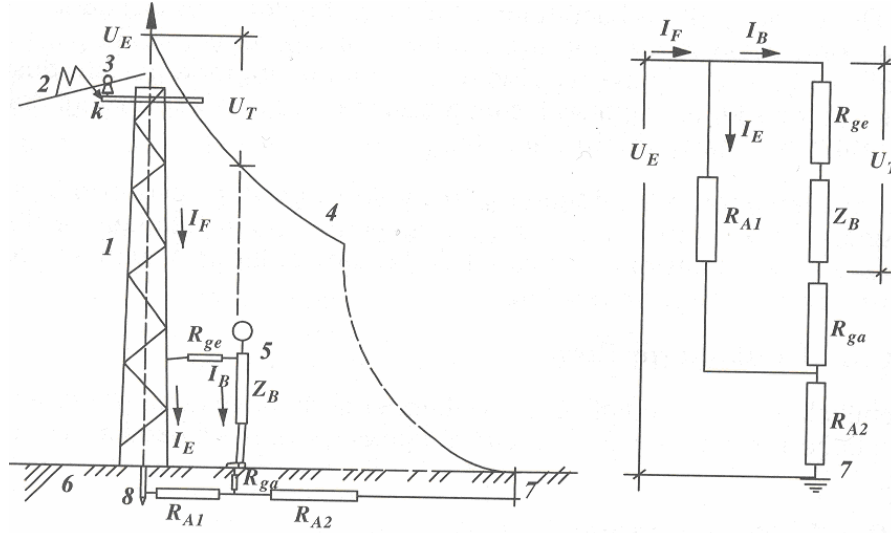
4.5.1. Dokunma ve Adım Gerilimleri

Enerji iletim hattı boyunca mevcut direklerin topraklanmasında dikkate alınan tehlikeli gerilimler dokunma ve adım gerilimleridir (Bayram, 2004).

4.5.1.2. Dokunma Gerilimi

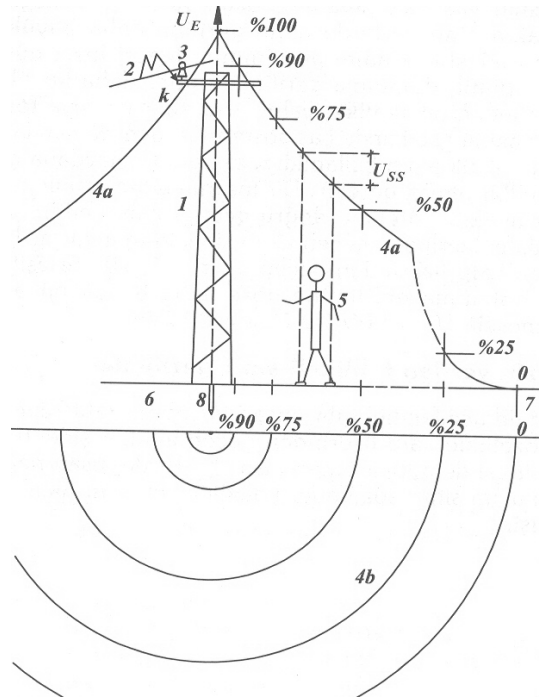
Alçak gerilim tesislerinde olduğu gibi, yüksek gerilim tesislerinde koruma topraklamasının dokunma gerilimine karşı koyucu etkisi, Şekil 4.14'te verilen bir örnek üzerinde gösterilmiştir. Burada bir yüksek gerilim hava hattına ait bir direk üzerindeki bir izolatörün harap olması sonucunda bir faz hattının direğin topraklanmış olan metal gövdesine dokunduğu ve hata yerinden I_F gibi bir hata akımının geçtiği kabul edilmiştir. Buradan da açıkça görüldüğü gibi, dokunma geriliminin bir kısmını teşkil eder. Hatalı tesis kısmı etrafındaki potansiyel dağılımı da Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Buna göre toprak üzerinde duran ve hatalı tesis kısmına dokunan bir insan üzerinden toprağa elden ayağa doğru I_B gibi bir akım geçer.

Burada insanın direk topraklayıcısından yaklaşık olarak $s = 1\text{m}$ yatay uzaklıkta bulunduğu kabul edilir. Dokunma geriliminin, yukarıda kabul edildiği gibi, yalnız el ile ayak arasında olması şart değildir; biri hata gerilimi ile ve diğeri toprak ile temas eden vücudun her hangi iki noktası, örneğin iki el arasında da bir akım yolu meydana gelebilir. Birinci durumda akım yolu ile ayak arasında ve ikincisinde ise iki el arasındadır. Çoğu zaman insanın durduğu yer, potansiyel değişimin en büyük olduğu yere isabet ettiğinden dokunma gerilimi topraklayıcı geriliminin büyük bir kısmını teşkil eder. İnsan vücudunun direnci ile el ve ayaktaki geçiş dirençleri göz önüne alındığında meydana gelen dokunma gerilimi, topraklayıcı ile insanın durduğu yerdeki potansiyel farkından daha küçük olur. Bu bakımdan iki cins dokunma gerilimi ayırt etmek mümkündür: Birincisi insan vücudunun temas etmesinden önce ölçülebilen dokunma gerilimi U_{T1} ve ikincisi insan tarafından dokunma esnasında meydana gelen dokunma gerilimi U_{T2} dir. Dokunma esnasında meydana gelen dokunma gerilimi ise el ve ayaktaki geçiş dirençleri ile insan vücudunun direncine isabet eden toplam gerilim düşümüdür ve genellikle $U_{T1} > U_{T2}$ dir.



Şekil 4.14 Bir kısa devre anında direk çevresinde toprağın potansiyel eğrisi ve temas gerilimi

4.5.1.2. Adım Gerilimi



Şekil 4.15 Bir kısa devre anında direk çevresinde toprağın potansiyel eğrisi ve adım gerilimi

Adım gerilimi alçak gerilim tesislerinde önemli olmadığı halde yüksek gerilim tesislerinde insan ve hayvan hayatı bakımından önemli bir tehlike kaynağı olabilir. Şekil 4.15'te açıklandığı gibi, bir açık hava tesisinde bir yalıtım hatası yüzünden toprağa bir hata akımı geçerse ve topraklayıcı ile referans toprağı alanına yüksek gerilim direğine dik yönde yürüyen bir insan (veya hayvan) girerse bir adım gerilimine maruz kalır ve insan vücudundan bir akım

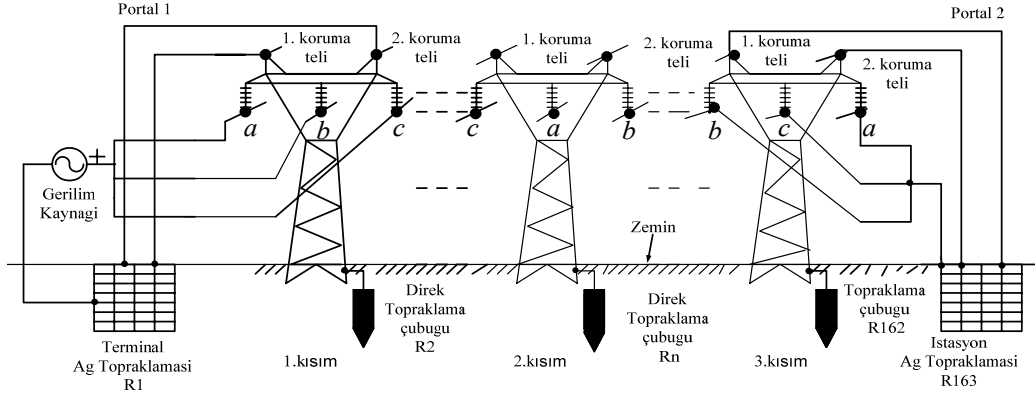
geçer. Şekil 4.15'te bir toprak kısa devresi halinde meydana gelen potansiyel dağılımı ve toprak üzerinde buna denk düşen eş potansiyel çizgileri ile bu alan içinde bulunan bir insanın maruz kaldığı adım gerilimi gösterilmiştir. Şu halde adım gerilimi, üzerinden akım geçen topraklayıcıya ait potansiyel alanı içinde her bir ayağa tekabül eden potansiyellerin farkına eşittir. İnsanın veya hayvanın eş potansiyel çizgilere dik olarak yürümesi halinde iki ayağı arasındaki potansiyel farkı yani adım gerilimi maksimumdur; eş potansiyel çizgilere paralel olarak hareket eden insanın ayakları arasındaki adım gerilimi sıfırdır. Başka yönlerdeki adım gerilimleri maksimum değer ile sıfır arasındadır. Ayrıca adım geriliminin değeri, adım uzunluğuna bağlıdır. Ön ve arka ayaklar arasındaki adım uzunlukları daha büyük olan büyük baş hayvanların etkisi altında kaldıkları adım gerilimleri daha büyük olduğundan ve bunların gövdelerinden geçen akım yolu mutlaka kalp üzerinden gittiğinden, büyük baş hayvanlar insanlara göre daha büyük bir tehlike ile karşı karşıya kalırlar; iki ayaklarını birleştirerek sıçramak suretiyle adım geriliminin etkisinden kurtulabilirler.

Topraklayıcının yakınında potansiyel değişimi en büyük değeri aldığından, topraklayıcıya yakın olan yerlerde adım gerilimi daha büyük değer alır ve topraklayıcıdan uzaklaştıkça adım geriliminin değeri hızla düşer. Onun için genellikle adım gerilimi, dokunma gerilimine göre daha küçük değerler alır. Adım gerilimi yüzünden bir tehlike, yalnız topraklayıcı veya topraklama tesisi üzerinden bir hata akımı geçtiğinde baş göstermez, aynı zamanda topraklayıcının direnci ölçülürken büyük akım kullanıldığı zaman da meydana gelir. Onun için bu gibi hallerde tedbir almak gerekir. Bir insanın adım uzunluğu $a=1$ m olduğu ve akımın da bir ayaktan ötekine doğru geçtiği kabul edilir. Ayaktan ayağa akım geçtiğinde kalp üzerinden geçen akım şiddetinin aynı şartlar altında elden ele akım geçerken kalp üzerinden geçen akımın $1/10$ 'una eşittir. Bu sebeple müsaade edilen dokunma gerilimine göre daha büyük bir adım gerilimine müsaade edilir; örneğin $U_L=50V$ ise $U_{SS}=80V$ 'dur.

4.6. Enerji İletim Hatları Toprak Yolu Modeli

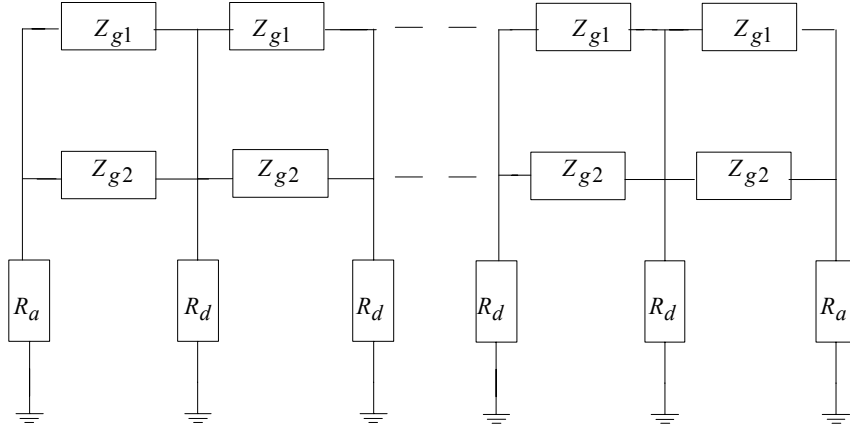
Enerji iletim hatlarında oluşturulan toprak yolu, yıldırım akım darbesi, kısa devre arızası ve kaçak akımların iletim sistemlerini ve bu akımların oluşturacağı temas ve adım gerilimlerinin çevredeki insan ve hayvanlara karşı oluşturacağı tehlikelerden korumak amacıyla büyük önem taşımaktadır. Özellikle adım ve temas gerilimlerinin; iletim hattında meydana gelecek arızanın yeri belli olmadığı için, tüm direklerde olma ihtimali vardır. Bunun için her bir direğin topraklamasının uygun topraklama şartları sağlanarak yapılması gerekmektedir.

Enerji iletim hatları toprak yolu modellemesi için Şekil 4.16'da verilen tek devre/çift koruma telli bir iletim hattı kullanılmıştır.



Şekil 4.16 Enerji iletim hattı şematik gösterimi

Enerji iletim hatları sürekli işletmede toprak yolu elemanlarından (koruma telleri, direk topraklama çubuğu) oluşan toprak yolu modeli Şekil 4.17'deki gibidir.



Şekil 4.17 Enerji iletim hattı toprak yolu modeli

Enerji iletim hatları için en genel halde verilen modelde toprak yolu elemanları olarak, Z_{g1} ve Z_{g2} , koruma tellerinin empedanslarını; R_a (R_1, R_{163}), ağ topraklama direncini; R_d ($R_2 \dots R_{162}$) ise, direk topraklama direncini göstermektedir. Enerji iletim hatlarında kullanılan çift koruma telleri (4.1) deki eşitliğine göre, zincir empedans değerini düşürerek, tehlikeli gerilim seviyelerini düşürmektedir. Koruma telleri empedansları eşit olduğundan dolayı, paralel eşdeğer sonucu olarak empedans yarıya düşmektedir.

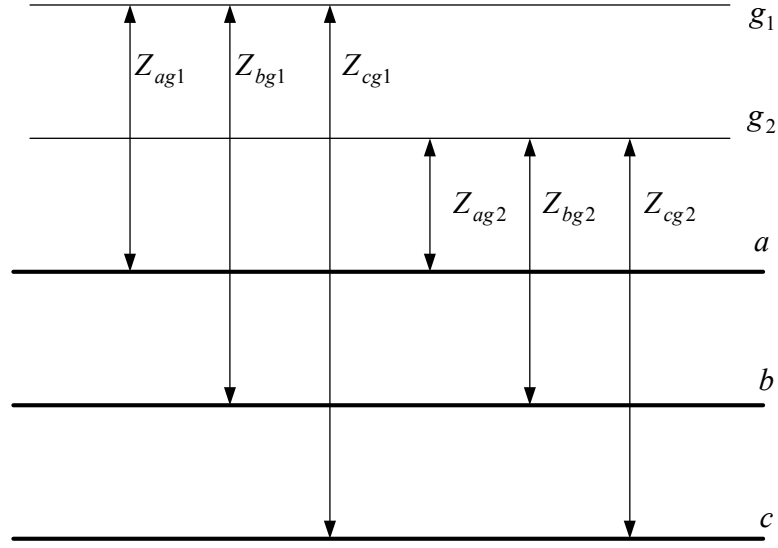
Çift koruma telli iletim hattında koruma teli empedansı aşağıda verilmiştir:

$$Z_g = \frac{Z_{g1} \cdot Z_{g2}}{Z_{g1} + Z_{g2}} = \frac{Z_{g1}}{2} \quad (4.1)$$

Enerji iletim hattının direk sayısı yirmi ve yirminin üzerinde ise, toprak yolu için zincir empedans formülü tanımlanabilir:

$$Z_{\infty} = \frac{Z_g}{2} + \sqrt{Z_g \cdot R_d} \quad (4.2)$$

Enerji iletim hatlarında fazlar hem kendi aralarında hem de koruma telleri üzerinde kuplaj etkisi yapmaktadır. Faz iletkenleri arasındaki kuplaj etkisi, iletim hattının transpoze edilmesiyle yok edilebilmektedir. Faz akımlarının koruma telleri üzerinde yaptığı kuplaj etkisi Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18 Fazların koruma telleri üzerindeki kuplajı

Burada,

Z_{ag1} , Z_{bg1} , ve Z_{cg1} empedansları, a , b ve c faz akımları ile 1. koruma teli($g1$) arasındaki karşılıklı empedanslardır. Z_{ag2} , Z_{bg2} , ve Z_{cg2} empedansları da, a , b ve c faz akımları ile 2. koruma teli($g2$) arasındaki karşılıklı empedanslardır. Bu empedanslar Carson denklemlerinde şu şekilde verilmektedir (Anderson, 1973):

$$Z_{ig} = 9,87 \cdot 10^{-4} \cdot f + j \cdot 0,0029 \cdot f \cdot \log_{10}(D_e / D_{ig}) \quad (4.3)$$

$$D_e = 658,9 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (4.4)$$

Bu denklemde

i : a,b,c fazlarını,

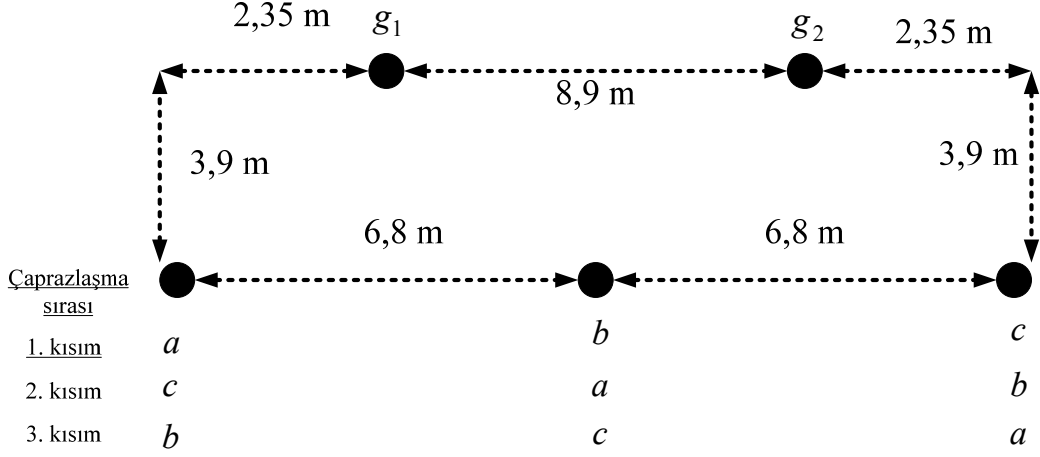
g : koruma telini,

f : şebeke frekansını,

D_{ig} : i fazı ile g koruma teli arasındaki mesafeyi,

D_e : Toprak dönüş mesafesini,
göstermektedir.

Modellemede kullanılan iletim hattı direğinde yer alan fazların ve koruma tellerinin mesafe bilgileri Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.19 İletim hattı direğinde bulunan fazların ve koruma tellerinin mesafeleri

Buna göre;

1. kısım için işlem yapılırsa,

$$D_{ag1} = \sqrt{2,35^2 + 3,9^2} = 4,55 \text{ m}$$

$$D_{bg1} = \sqrt{4,45^2 + 3,9^2} = 5,92 \text{ m}$$

$$D_{cg1} = \sqrt{11,25^2 + 3,9^2} = 11,91 \text{ m}$$

Simetri özelliğinden dolayı,

$$D_{ag2} = D_{cg1} = 11,91 \text{ m}$$

$$D_{bg2} = D_{bg1} = 5,92 \text{ m}$$

$$D_{cg2} = D_{ag1} = 4,55 \text{ m} \text{ olmaktadır.}$$

Çaprazlaşmadaki sonucunda tüm kısımlara ilişkin faz-koruma teli mesafeleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Çaprazlaştırma sonucu kısımlara ilişkin faz ile koruma teli arası mesafeler

Faz-koruma teli arası mesafeler,	Faz iletkenlerinin çaprazlaştırılması		
	1. Kısım (metre)	2. Kısım(metre)	3. Kısım(metre)
D_{ag1}	4,55	5,92	11,91
D_{bg1}	5,92	11,91	4,55
D_{cg1}	11,91	4,55	5,92
D_{ag2}	11,91	4,55	5,92
D_{bg2}	5,92	11,91	4,55
D_{cg2}	4,55	5,92	11,91

Şekil 4.19’da verilen mesafe bilgileri ışığında faz ile koruma teli arasındaki karşılıklı empedanslar, her durum için şu şekilde yazılabilir:

$$Z_{ag1} = 9,87.10^{-4}.f + j.0,0029.f.\log_{10}(D_e / D_{ag1}) \quad (4.5)$$

$$Z_{bg1} = 9,87.10^{-4}.f + j.0,0029.f.\log_{10}(D_e / D_{bg1}) \quad (4.6)$$

$$Z_{cg1} = 9,87.10^{-4}.f + j.0,0029.f.\log_{10}(D_e / D_{cg1}) \quad (4.7)$$

$$Z_{ag2} = 9,87.10^{-4}.f + j.0,0029.f.\log_{10}(D_e / D_{ag2}) \quad (4.8)$$

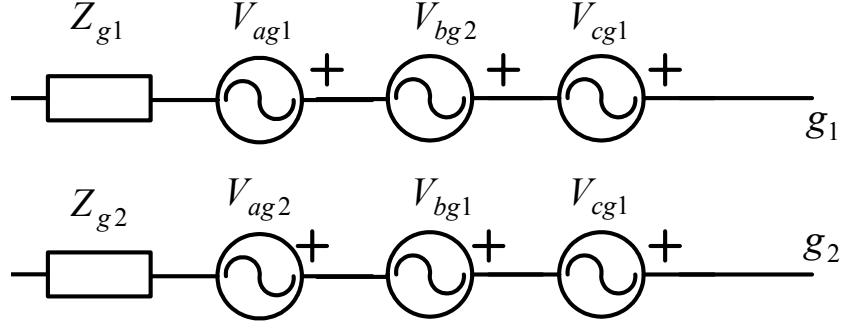
$$Z_{bg2} = 9,87.10^{-4}.f + j.0,0029.f.\log_{10}(D_e / D_{bg2}) \quad (4.9)$$

$$Z_{cg2} = 9,87.10^{-4}.f + j.0,0029.f.\log_{10}(D_e / D_{cg2}) \quad (4.10)$$

Enerji iletim hatları toprak yolu analizi yapılan sürekli çalışma durumları şu şekilde sıralanabilir:

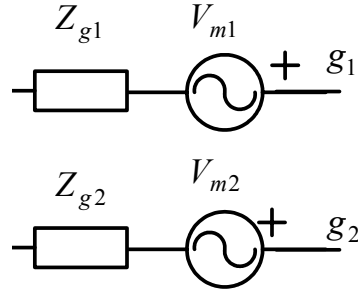
- Dengeli yüklenme,
- Dengesiz yüklenme,
- Dengeli harmonikli yüklenme,
- Dengesiz harmonikli yüklenme

Dengeli yüklenme durumunda faz akımlarının koruma telleri üzerinde indüklemiş olduğu gerilimler Şekil 4.20'deki gibi modellenenebilir (Fehr, 2002).



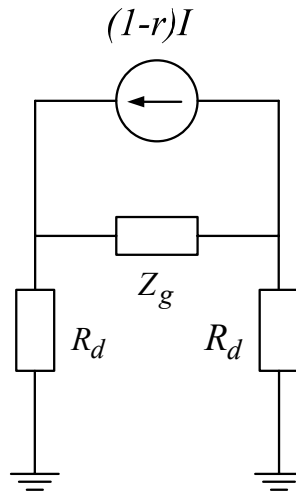
Şekil 4.20 Faz akımlarının koruma telleri üzerindeki gerilim indüklemesi modellemesi

Şekil 4.20'de verilen modelde koruma telleri üzerinde modellenen gerilim kaynakları, fazörel olarak toplanıp Şekil 4.21'deki gibi tek bir kaynak ile gösterilebilir.



Şekil 4.21 Faz akımlarının indüklediği gerilimlerin tek kaynak haline indirgenmesi

Bu model, bazı çalışmalarda akım kaynakları kullanılarak da yapılabilir. Kullandığımız model Thevenin eşdeğerini gösterirken, söz konusu akım kaynağı kullanılarak Norton eşdeğer devresi de oluşturulabilir (Popovic, 2001).



Şekil 4.22 İki direk arası akım kaynaklı toprak yolu modeli

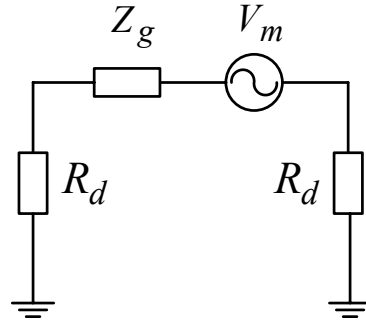
Toprak yolu analizi için oluşturulan modellerde faz akımlarının koruma telleri üzerinde endüklediği gerilimlerin (akımların) modelde gösterim biçimi farklı olmakla beraber aynı özelliği taşımaktadır. Akım kaynağı kullanılarak oluşturulan modelde akım kaynağına ilişkin verilen parametrelerde r (azaltma faktörü) bulunmaktadır. Burada r , karşılıklı kuplajda kullanılan Z_m (faz ile koruma teli arasındaki empedans) empedansının Z_g (koruma teli empedansı) empedansına oranının 1'den çıkarılmasıyla elde edilmektedir (Nahman, 2001)

$$r = 1 - \frac{Z_m}{Z_g} \quad (4.11)$$

Akım kaynağına ilişkin verilen ifadeyi I_m olarak verirsek şu sonuçları elde edebiliriz:

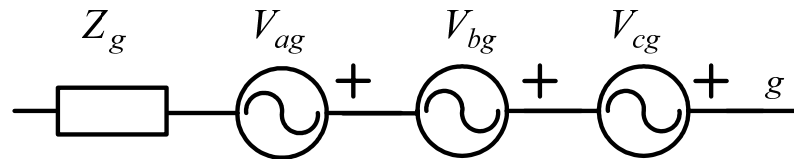
$$I_m = (1 - r)I = \left(1 - \left(1 - \frac{Z_m}{Z_g}\right)\right)I = \frac{Z_m \cdot I}{Z_g} = \frac{V_m}{Z_g} \quad (4.12)$$

Denklem (4.12)' te elde edilen sonuç, Norton teoremi (akım kaynağına paralel empedans modeli) kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 4.22). Toprak yolu modelimizde ise (Şekil 4.23) Thevenin teoremi (gerilim kaynağına seri empedans modeli) kullanılarak analizler yapılmıştır. Modelimizi Norton teoremine göre oluşturacak olursak, oluşacak olan akım kaynağı, (4.12)' te verilen denklemle aynı olacaktır.



Şekil 4.23 İki direk arası gerilim kaynaklı toprak yolu modeli

Faz akımlarının kuplaj etkisi gerilim kaynağı (gerilim düşümü) olarak aşağıdaki gibi modellenmiştir (Fehr, 2002):



Şekil 4.24 Fazların koruma teli üzerinde endüklediği gerilimler

Burada, a , b , c faz akımlarının kuplaj etkisi gerilim düşümü şeklinde gösterilmiştir.

Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de verilen empedans ve kaynak modellemeleri fazörel olarak aşağıda tanımlanmıştır:

Z_{g1} : 1. koruma teli empedansı,

Z_{g2} : 2. koruma teli empedansı,

V_{ag1} : a fazının 1. koruma teli üzerinde indüklediği gerilim,

V_{bg1} : b fazının 1. koruma teli üzerinde indüklediği gerilim,

V_{cg1} : c fazının 1. koruma teli üzerinde indüklediği gerilim,

V_{ag2} : a fazının 2. koruma teli üzerinde indüklediği gerilim,

V_{bg2} : b fazının 2. koruma teli üzerinde indüklediği gerilim,

V_{cg2} : c fazının 2. koruma teli üzerinde indüklediği gerilim,

V_{m1} : a, b ve c fazlarının 1. koruma teli üzerinde indüklediği gerilimlerin toplamı,

V_{m2} : a, b ve c fazlarının 2. koruma teli üzerinde indüklediği gerilimlerin toplamı,

Modelde yer alan empedans ve gerilim denklemleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

Direk açıklıkları eşit olduğu için Z_{g1} ve Z_{g2} koruma teli empedansları eşit olup aşağıdaki bağıntıya göre hesaplanmaktadır (Anderson, 1973).

$$Z_g = \left(\frac{l}{k \cdot q} \right) + 9,87 \cdot 10^{-4} \cdot f + j \cdot 0,0029 \cdot f \cdot \log_{10} (D_e / GMR) \quad (4.13)$$

Burada,

l : Koruma telinin uzunluğu,

k : Koruma telinin öz iletkenlik katsayısı,

q : Koruma telinin kesiti,

ρ : Toprağın özgül direnci,

GMR : Koruma telinin geometrik ortalama yarıçapı,

dır.

Enerji iletim hattımız, transpoze edildiğinden (çaprazlaştırıldığından) dolayı hattın her 1/3

uzunluğu için farklı denklemler oluşturulmuştur. Çaprazlaştırma sırası Şekil 4.18’de verildiği

gibi şu şekildedir:

1 indisi 1. kısım; 2 indisi 2. kısım ve 3 indisi 3. kısım anlamındadır.

1. Kısım için elde edilen denklemler:

$$\left. \begin{aligned} V_{ag1} &= Z_{ag1} \cdot I_a \\ V_{bg1} &= Z_{bg1} \cdot I_b \\ V_{cg1} &= Z_{cg1} \cdot I_c \\ V_{ag2} &= Z_{ag2} \cdot I_a \\ V_{bg2} &= Z_{bg2} \cdot I_b \\ V_{cg2} &= Z_{cg2} \cdot I_c \end{aligned} \right\}_1 \quad (4.14)$$

2. Kısım için elde edilen denklemler:

$$\left. \begin{aligned} V_{ag1} &= Z_{ag1} \cdot I_a \\ V_{bg1} &= Z_{bg1} \cdot I_b \\ V_{cg1} &= Z_{cg1} \cdot I_c \\ V_{ag2} &= Z_{ag2} \cdot I_a \\ V_{bg2} &= Z_{bg2} \cdot I_b \\ V_{cg2} &= Z_{cg2} \cdot I_c \end{aligned} \right\}_2 \quad (4.15)$$

3. Kısım için elde edilen denklemler:

$$\left. \begin{aligned} V_{ag1} &= Z_{ag1} \cdot I_a \\ V_{bg1} &= Z_{bg1} \cdot I_b \\ V_{cg1} &= Z_{cg1} \cdot I_c \\ V_{ag2} &= Z_{ag2} \cdot I_a \\ V_{bg2} &= Z_{bg2} \cdot I_b \\ V_{cg2} &= Z_{cg2} \cdot I_c \end{aligned} \right\}_3 \quad (4.16)$$

şeklinde olacaktır.

1, 2 ve 3. kısımda verilen denklemlerden yararlanarak, Şekil 4.21’de genel olarak modellenen V_{m1} ve V_{m2} gerilimlerini aşağıdaki gibi yazabiliriz:

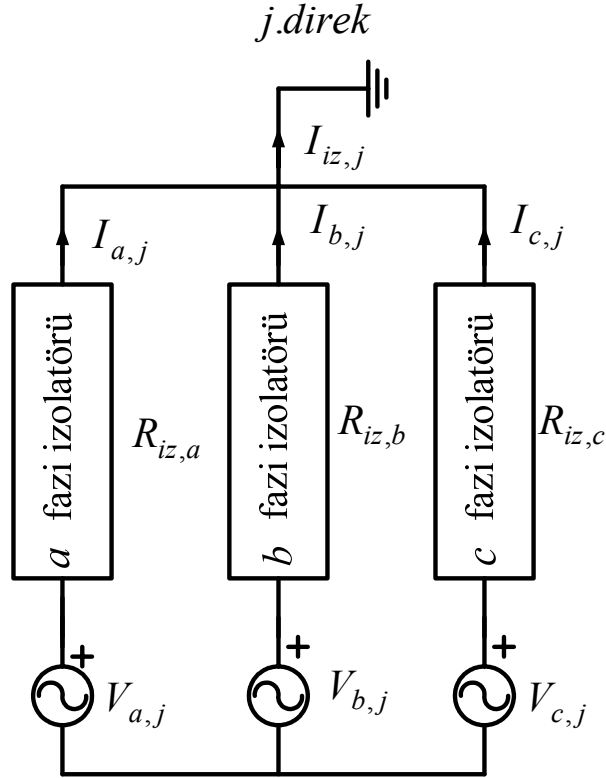
$$V_{m1} = V_{ag1} + V_{bg1} + V_{cg1} \quad (4.17)$$

$$V_{m2} = V_{ag2} + V_{bg2} + V_{cg2} \quad (4.18)$$

Çaprazlaştırma sonucu elde edilen denklemler matrisel olarak şu şekildedir:

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \end{bmatrix}_1 &= \begin{bmatrix} Z_{ag1} & Z_{bg1} & Z_{cg1} \\ Z_{ag2} & Z_{bg2} & Z_{cg2} \end{bmatrix}_1 \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_1 \\ \begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \end{bmatrix}_2 &= \begin{bmatrix} Z_{ag1} & Z_{bg1} & Z_{cg1} \\ Z_{ag2} & Z_{bg2} & Z_{cg2} \end{bmatrix}_2 \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_2 \\ \begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \end{bmatrix}_3 &= \begin{bmatrix} Z_{ag1} & Z_{bg1} & Z_{cg1} \\ Z_{ag2} & Z_{bg2} & Z_{cg2} \end{bmatrix}_3 \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_3 \end{aligned} \right\} \quad (4.19)$$

matrisel denklemler elde edilmiştir. Enerji iletim hatlarında fazları toprağa karşı yalıtmak amacıyla kullanılan izolatörler Çizelge 2.6, Çizelge 2.7 ve Çizelge 2.8’de verilen kirlilik seviyeleri ve yapılan kirlilik testlerine ilişkin farklı kirlenme seviyelerinde izolatörlerde izlenen iletkenlik (μS) verilmiştir. Herhangi bir j.direkte izolatörlerden akacak olan kaçak akımlara ilişkin bilgiler Şekil 4.25’te verilmiştir.



Şekil 4.25 Bir iletim hattı j. direğinde kirli izolatörlerden akan kaçak akımlar

Burada,

$V_{a,j}$: j. direğin a faz gerilimi,

$V_{b,j}$: j. direğin b faz gerilimi,

$V_{c,j}$: j. direğin c faz gerilimi,

$I_{a,j}$: j. direğin a fazı izolatöründen akan kaçak akım,

$I_{b,j}$: j. direğin b fazı izolatöründen akan kaçak akım,

$I_{c,j}$: j. direğin c fazı izolatöründen akan kaçak akım,

$I_{iz,j}$: j. direk izolatörlerinden akan kaçak akımların fazörel toplamı,

$R_{iz,a}$: a fazındaki izolatörün kir direnci,

$R_{iz,b}$: b fazındaki izolatörün kir direnci,

$R_{iz,c}$: c fazındaki izolatörün kir direnci,

Kirli izolatörlere ilişkin yapılan yapay kirlilik testlerinde farklı kir seviyeleri (hafif-orta-yoğun) için elde edilen izolatör kir iletkenlik değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 Farklı kir seviyelerine ilişkin izolatör iletkenlik değerleri (TS EN 60507, 1999)

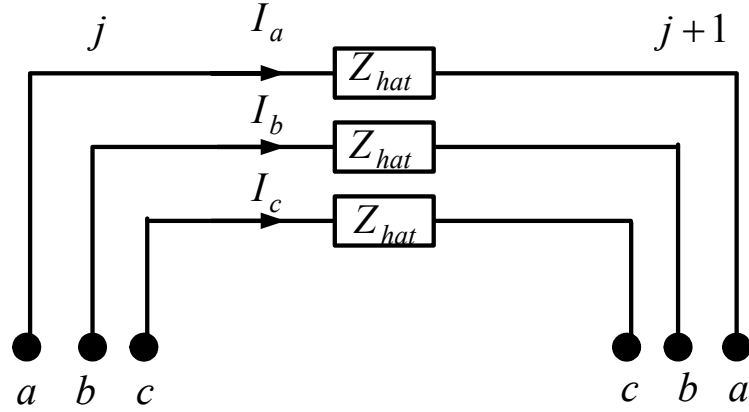
İzolatör iletkenliği (μS)	1.Kısım			2.Kısım			3.Kısım		
	Kirlenme seviyeleri			Kirlenme seviyeleri			Kirlenme seviyeleri		
	Hafif	Orta	Yoğun	Hafif	Orta	Yoğun	Hafif	Orta	Yoğun
$\frac{1}{R_{iz,a}}$	7	14	28	8	16	32	7,5	15	30
$\frac{1}{R_{iz,b}}$	7,5	15	30	7	14	28	8	16	32
$\frac{1}{R_{iz,c}}$	8	16	32	7,5	15	30	7	14	28

Şekil 4.25'deki kirli izolatöre ilişkin elektriksel eşdeğer devresinde kısımlara göre herhangi bir direğe ilişkin kaçak akım hesabı şu şekilde yazılabilir:

Çaprazlaşma sırasına göre yazacak olursak,

$$\left. \begin{aligned} [I_{iz,j}]_1 &= \left[\frac{V_{a,j}}{R_{iz,a}} + \frac{V_{b,j}}{R_{iz,b}} + \frac{V_{c,j}}{R_{iz,c}} \right]_1 \\ [I_{iz,k}]_2 &= \left[\frac{V_{a,k}}{R_{iz,a}} + \frac{V_{b,k}}{R_{iz,b}} + \frac{V_{c,k}}{R_{iz,c}} \right]_2 \\ [I_{iz,n}]_3 &= \left[\frac{V_{a,n}}{R_{iz,a}} + \frac{V_{b,n}}{R_{iz,b}} + \frac{V_{c,n}}{R_{iz,c}} \right]_3 \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

Enerji iletim hattında gerilim düşümleri sebebiyle direklerin a, b ve c faz gerilimleri farklı olacaktır. Herhangi bir direkte izolator kaçak akımı hesaplanabilmesi için, ilgili direğin fazlarının gerilim değerlerinin bilinmesi gerekir. Bunun için Şekil 4.26'da verilen iki direğin akım ve gerilim bilgilerini kullanarak, j . direkte gerilimler biliniyorsa $(j+1)$. direğine ilişkin direk gerilimlerini bulabiliriz.



Şekil 4.26 j . ve $(j+1)$. direklerde akım ve gerilimler

Buna göre,

$$V_{a,j+1} = V_{a,j} - Z_{hat} \cdot I_a$$

$$V_{b,j+1} = V_{b,j} - Z_{hat} \cdot I_b$$

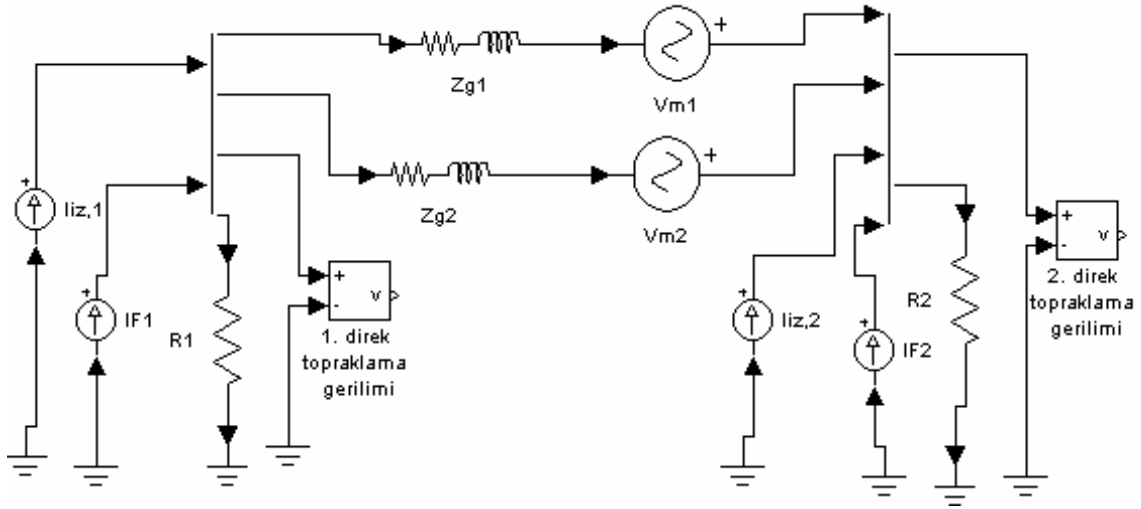
$$V_{c,j+1} = V_{c,j} - Z_{hat} \cdot I_c$$

Bu denklemler matrisel formda yazılırsa,

$$\begin{bmatrix} V_{a,j+1} \\ V_{b,j+1} \\ V_{c,j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a,j} \\ V_{b,j} \\ V_{c,j} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{hat} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{hat} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{hat} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

elde edilir. Z_{hat} , j ve $j+1$ noktaları arasında kalan hat parçasının empedansdır.

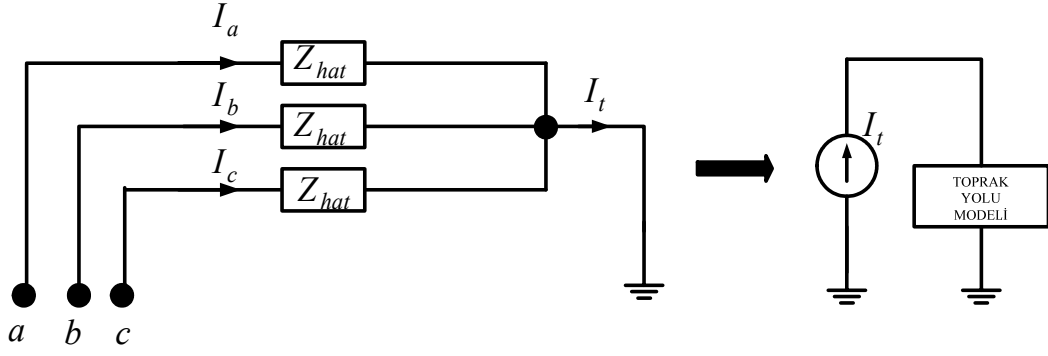
Şekil 4.16'daki enerji iletim hattı için Şekil 4.17'de verilen toprak yolu modelinin, Şekil 4.25'te ve Şekil 4.26'da yer alan modellerin Matlab/Simulink yazılımında tam olarak oluşturulmaları Şekil 4.27'de verilmiştir.



Şekil 4.27 Matlab/Simulink'te oluşturulan toprak yolu modelinin iki direk arası gösterimi

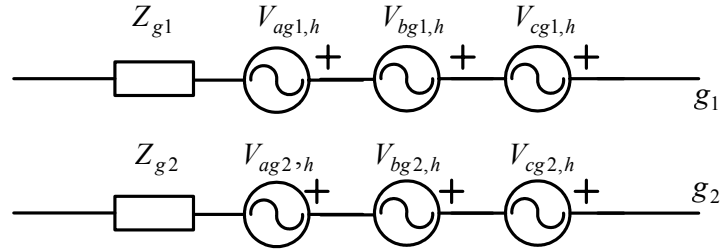
Şekil 4.27'de verilen toprak yolu modelinde yer alan parametrelerden, I_{F1} ve I_{F2} akım kaynakları, 1 ve 2. direkte muhtemel kısa devre akımı için toprak yolu modelinde kullanılan kaynaklardır. Modelimizin tüm direklerinde kısa devre akımları yer almaktadır. Dengeli veya dengesiz sürekli çalışma durumunda tüm kısa devre akımları Matlab programında sıfırlanmaktadır. Faz-toprak kısa devre programında, arıza noktası sorgulamasında arızanın meydana geldiği direkte yer alan kısa devre akım kaynağına hesaplanan akım değeri Simulink'te oluşturulan toprak yolu modeli bölümüne aktarılarak (arızanın meydana gelmediği direkler sıfırlanır) toprak yolunda akım dağılımı yapılır ve direk topraklama gerilimleri elde edilir.

Dengesiz yüklenme durumunda toprak yolu modelinde verilen tüm denklemler aynen geçerlidir. Sadece Şekil 4.27'de verilen modelin en son direğinde a , b ve c faz akımlarının dengesizliğinden dolayı üç akımın fazörel toplamı (I_t) akım kaynağı olarak Şekil 4.28'de modellenmiştir.



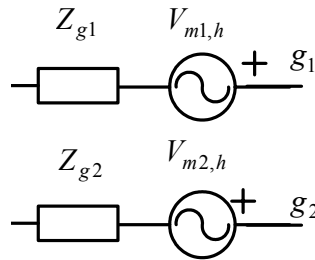
Şekil 4.28 Dengesiz akımların toprak yolunda modellenmesi

Dengeli harmonikli yüklenme durumunda, dengeli durum için verilen tüm denklemler, hem temel bileşen hem de harmonik derecesi durumuna göre gerilim ve akım harmonikleri de süperpozisyon (toplamsallık) teoremi kullanılarak elde edilecektir. Bu çalışmamızda en etkili harmonik bileşeni 3 olduğundan, temel bileşen ve 3. harmonik bileşeni kullanılarak denklemler oluşturulacaktır. Buna göre, Şekil 4.20’de verilen modelde yer alan gerilimlerin 3. harmonik bileşeni katılarak harmonikli durumda Şekil 4.29 ve eşdeğer olarak Şekil 4.30’da verilmiştir.



Şekil 4.29 Faz akımlarının koruma telleri üzerindeki harmonikli gerilim modellemesi

Şekil 4.29’da verilen modelde koruma telleri üzerinde modellenen harmonikli gerilim kaynakları, fazörel olarak toplanıp tek bir kaynak Şekil 4.21’deki gibi gösterilebilir.



Şekil 4.30 Faz akımlarının indüklediği harmonikli gerilimlerin tek kaynak haline indirgenmesi

Şekil 4.30’da verilen harmonikli gerilim kaynakları modellerinin matematiksel ifadeleri, dengeli durumda verilen denklemlere 3. harmonik bileşeni kullanılarak aşağıda verilmiştir. Çaprazlaştırma sonucu elde edilen harmonikli yüklenmede indüklenen gerilimlere ilişkin denklemler matrisel formda şu şekildedir:

1 alt indisi çaprazlaşmada 1. kısım; 2 alt indisi 2. kısım ve 3 alt indisi 3. kısım anlamındadır. (1) ve (3) üst indisleri, sırasıyla temel bileşen (50 Hz) ve 3. harmonik bileşeni (150 Hz) göstermektedir.

$$\left. \begin{aligned}
 \begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \end{bmatrix}_{(1)}^{(1)} &= \begin{bmatrix} Z_{ag1} & Z_{bg1} & Z_{cg1} \\ Z_{ag2} & Z_{bg2} & Z_{cg2} \end{bmatrix}_1 \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_{(1)}^{(1)} \\
 \begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \end{bmatrix}_{(1)}^{(3)} &= \begin{bmatrix} Z_{ag1} & Z_{bg1} & Z_{cg1} \\ Z_{ag2} & Z_{bg2} & Z_{cg2} \end{bmatrix}_1 \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_{(1)}^{(3)} \\
 \begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \end{bmatrix}_{(2)}^{(1)} &= \begin{bmatrix} Z_{ag1} & Z_{bg1} & Z_{cg1} \\ Z_{ag2} & Z_{bg2} & Z_{cg2} \end{bmatrix}_2 \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_{(2)}^{(1)} \\
 \begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \end{bmatrix}_{(2)}^{(3)} &= \begin{bmatrix} Z_{ag1} & Z_{bg1} & Z_{cg1} \\ Z_{ag2} & Z_{bg2} & Z_{cg2} \end{bmatrix}_{(2)} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_{(2)}^{(3)} \\
 \begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \end{bmatrix}_{(3)}^{(1)} &= \begin{bmatrix} Z_{ag1} & Z_{bg1} & Z_{cg1} \\ Z_{ag2} & Z_{bg2} & Z_{cg2} \end{bmatrix}_3 \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_{(3)}^{(1)} \\
 \begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \end{bmatrix}_{(3)}^{(3)} &= \begin{bmatrix} Z_{ag1} & Z_{bg1} & Z_{cg1} \\ Z_{ag2} & Z_{bg2} & Z_{cg2} \end{bmatrix}_3 \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_{(3)}^{(3)}
 \end{aligned} \right\} \quad (4.22)$$

matrisel denklemler elde edilmiştir. Fazörel olarak (4.22)’ de verilen denklemlerden yararlanarak lineer olmayan yüklenme durumu için koruma telleri üzerinde endüklenen gerilimlerin efektif değerleri için aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$\left. \begin{aligned} (V_{m11}^{(1,3)})_{ef} &= \sqrt{(V_{m11}^1)_{ef}^2 + (V_{m11}^3)_{ef}^2} \\ (V_{m21}^{(1,3)})_{ef} &= \sqrt{(V_{m21}^1)_{ef}^2 + (V_{m21}^3)_{ef}^2} \\ (V_{m12}^{(1,3)})_{ef} &= \sqrt{(V_{m12}^1)_{ef}^2 + (V_{m12}^3)_{ef}^2} \\ (V_{m22}^{(1,3)})_{ef} &= \sqrt{(V_{m22}^1)_{ef}^2 + (V_{m22}^3)_{ef}^2} \\ (V_{m13}^{(1,3)})_{ef} &= \sqrt{(V_{m13}^1)_{ef}^2 + (V_{m13}^3)_{ef}^2} \\ (V_{m23}^{(1,3)})_{ef} &= \sqrt{(V_{m23}^1)_{ef}^2 + (V_{m23}^3)_{ef}^2} \end{aligned} \right\} \quad (4.23)$$

Direk geometrisi gereği 1 ve 2 no.lu koruma telleri ile faz iletkenleri arasında simetrik mesafeler olduğundan, her iki koruma teli üzerinde endüklenecek gerilimlerin efektif değerleri birbirine eşit olacaktır.

İzolator kaçak akımına ilişkin denklemler, harmonikli yüklenme durumunda şu şekilde olacaktır:

$$\left. \begin{aligned} [I_{iz,j}]_{(1)}^{(1)} &= \left[\frac{V_{a,j}}{R_{iz,a}} + \frac{V_{b,j}}{R_{iz,b}} + \frac{V_{c,j}}{R_{iz,c}} \right]_{(1)}^{(1)} \\ [I_{iz,j}]_{(1)}^{(3)} &= \left[\frac{V_{a,j}}{R_{iz,a}} + \frac{V_{b,j}}{R_{iz,b}} + \frac{V_{c,j}}{R_{iz,c}} \right]_{(1)}^{(3)} \\ [I_{iz,k}]_{(2)}^{(1)} &= \left[\frac{V_{a,k}}{R_{iz,a}} + \frac{V_{b,k}}{R_{iz,b}} + \frac{V_{c,k}}{R_{iz,c}} \right]_{(2)}^{(1)} \\ [I_{iz,k}]_{(2)}^{(3)} &= \left[\frac{V_{a,k}}{R_{iz,a}} + \frac{V_{b,k}}{R_{iz,b}} + \frac{V_{c,k}}{R_{iz,c}} \right]_{(2)}^{(3)} \\ [I_{iz,n}]_{(3)}^{(1)} &= \left[\frac{V_{a,n}}{R_{iz,a}} + \frac{V_{b,n}}{R_{iz,b}} + \frac{V_{c,n}}{R_{iz,c}} \right]_{(3)}^{(1)} \\ [I_{iz,n}]_{(3)}^{(3)} &= \left[\frac{V_{a,n}}{R_{iz,a}} + \frac{V_{b,n}}{R_{iz,b}} + \frac{V_{c,n}}{R_{iz,c}} \right]_{(3)}^{(3)} \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

Direk numaraları hat başından itibaren verilmektedir. Bu yüzden formüller; 1. çaprazlaştırma aralığında j. direk, 2. çaprazlaştırma aralığında k. direk ve 3. çaprazlaştırma aralığında n. direk için yazılmıştır.

Fazörel olarak (4.24)' te verilen denklemlerden yararlanarak lineer olmayan yüklenme durumu için izolatörlerden akan kaçak akımların efektif değerleri için aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$\left. \begin{aligned} \left(I_{iz,j1}^{(1,3)}\right)_{ef} &= \sqrt{\left(I_{iz,j1}^1\right)_{ef}^2 + \left(I_{iz,j1}^3\right)_{ef}^2} \\ \left(I_{iz,k2}^{(1,3)}\right)_{ef} &= \sqrt{\left(I_{iz,k2}^1\right)_{ef}^2 + \left(I_{iz,k2}^3\right)_{ef}^2} \\ \left(I_{iz,n3}^{(1,3)}\right)_{ef} &= \sqrt{\left(I_{iz,n3}^1\right)_{ef}^2 + \left(I_{iz,n3}^3\right)_{ef}^2} \end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

(4.25)'teki parametrelere ilişkin tanımlamalar şu şekildedir:

$[I_{iz,j}]_1^h$: j direkte bulunan kirli izolatörlerden akan temel ve 3. bileşen akım içerikli matris,

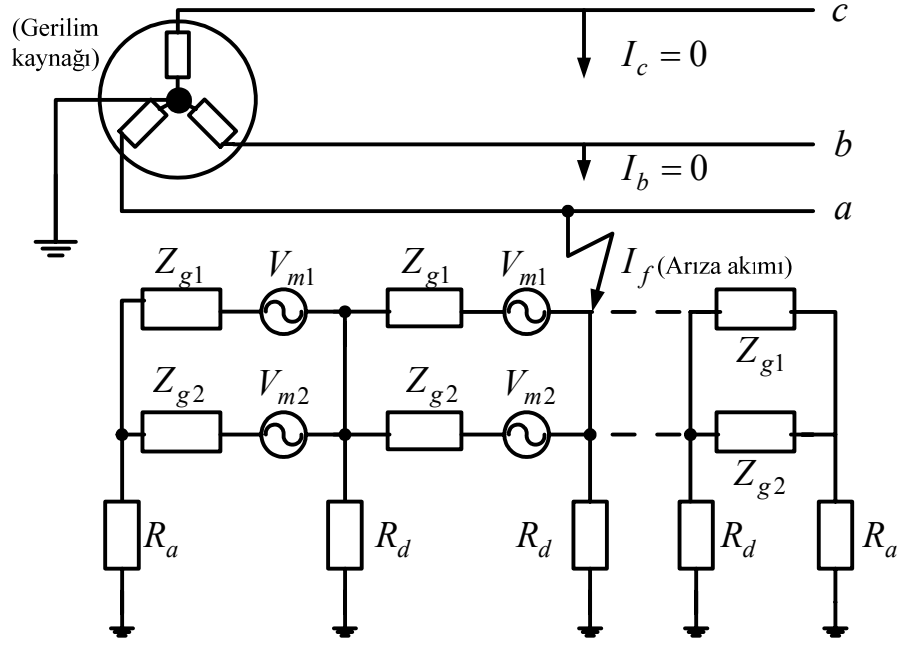
$V_{a,j}^h$: j. direkte a fazının 3. harmonik gerilimidir. Diğer parametreler benzer şekilde tanımlanabilir.

Matlab/Simulink toprak yolu modelinde 3. harmonik akımlarının genlik ve faz açıları aynı olduğundan dolayı, a, b ve c harmonik akımları fazörel toplanarak, hat sonunda Şekil 4.28'deki gibi modellenir.

Dengesiz harmonikli yüklenmede ise, (4.22), (4.23), (4.24) ve (4.25)'te verilen dengeli harmonikli yüklenmeye ilişkin denklemler burada aynen geçerlidir. Simulink modelinde ise, hem temel bileşendeki dengesizlik akımı, hem de 3. harmonik bileşenindeki dengesizlik akımı hat sonunda Şekil 4.28'deki gibi modellenir.

Toprak yolu analizinde sürekli çalışma durumu dışında, geçici rejim (arıza) durumlarından en yaygın olarak, faz-toprak kısa devre analizi yapılmıştır.

Faz-toprak kısa devre analizi için kullanılan toprak yolu modeli, Şekil 4.27'de verilen modelden biraz farklıdır. Şekil 4.27'de verilen modelde tüm koruma tellerinde yer alan indüklenmiş gerilimler, kısa devre modelinde arızanın olduğu noktaya kadardır. Çünkü, arıza noktasında akan kısa devre akımı hattın devamında etkisiz hale geldiğinden, hat başından arıza noktasına kadar kuplaj etkisi olmaktadır. Arıza noktasına kadar modellenen kuplaj gerilimleri, Şekil 4.27'den farklı olarak, sadece arızalı fazın akımı ile işlem yapılmasıdır. Diğer fazların akımları, faz-toprak kısa devre analizinde sıfır olarak kabul edilmektedir (Şekil 4.31).



Şekil 4.31 Faz- toprak kısa devre durumunda toprak yolu modeli

5. SAYISAL UYGULAMA

Bu tez çalışmasında enerji iletim sistemleri toprak yolu analizi ve simülasyonu yapılmıştır. Oluşturulan toprak yolu modeli kullanılarak, enerji iletim hatlarında sürekli işletmede fazların koruma telleri üzerindeki kuplaj etkileri, farklı kir seviyelerinde izolatör kaçak akımları ve değişik zemin yapılarının iletim hattı direk topraklama gerilimleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca geçici rejim durumlarında (faz-toprak kısa devresi), kısa devre akımlarının iletim hattının farklı arıza noktaları ve farklı zemin yapılarında toprak yolu direk topraklama gerilimleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Tez çalışmasında, 154 kV'luk tek noktadan beslemeli 100 MVA'lık güce sahip tek devre çift koruma telli bir enerji iletim hattı kullanılmıştır (Şekil 4. 6). İletim hattı uzunluğu 50 km olup 163 adet direk içermektedir. Portal (ilk ve son) direklerin direk açıklığı 120 'şer metre, diğer taşıyıcı direklerin direk açıklığı ise 311'er metredir. Kullanılan direk modeli Şekil 2.9'da verilen direklerdir. Modelde kullanılan hat başı trafosunun sekonderi ile hat sonundaki trafonun primeri yıldız topraklıdır. Enerji iletim sisteminin transpoze edildiği ve tam kompanzasyonun sağlandığı öngörülmüştür.

Enerji iletim hattının toprak yolu analizi ve simülasyonu Matlab/Simulink (6,5) yazılımı kullanılarak yapılmıştır (Uzunoğlu vd.,2003; İnan, 2004). Bu yazılımın Matlab M-file kısmında iletim hattının farklı işletmelere ilişkin programları yazılmıştır (Ek-1, Ek-2, Ek-3, Ek-4, Ek-5). Simulink kısmında da bu programlar doğrultusunda iletim hattının toprak yolunda yer alan tüm parametreler (50 km'lik iletim hattı için) modellenmiştir (Şekil 4.6).

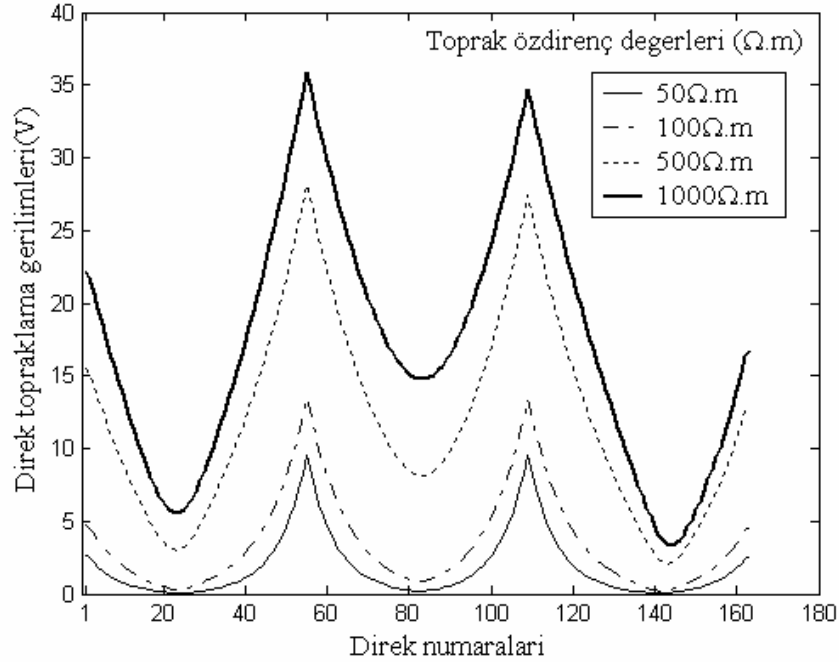
Sayısal uygulamada, enerji iletim hattı toprak yolu modeli için yapılan analiz ve simülasyonlar sırasıyla aşağıda verilmiştir:

- Dengeli sinüsoidal yüklenme durumunda temiz ve farklı seviyelerde (hafif-orta-yoğun) kirlenen izolatörlerden akan kaçak akımların ve fazların koruma telleri üzerinde endüklediği gerilimlerin farklı toprak öz direnç (50 Ω m, 100 Ω m, 500 Ω m, 1000 Ω m) değerlerinde iletim hattı boyunca (50 km-163 direk) Bölüm 5'te verilen toprak yolu modellemesi çerçevesinde direk topraklama gerilimlerinin analizi ve simülasyonu yapılmıştır.

Dengeli sinüsoidal yüklenmede, faz akımları Çizelge 5.1'de verilmiştir. Bu çalışmada, izolatörlerin temiz olması durumunda, izolatörlerden dolayı kaçak akımların oluşmadığı; sadece fazların koruma telleri üzerinde endüklediği gerilimlerin etkili olduğuna ilişkin iletim hattı boyunca direk topraklama gerilim değerleri Şekil 5.1' de verilmiştir.

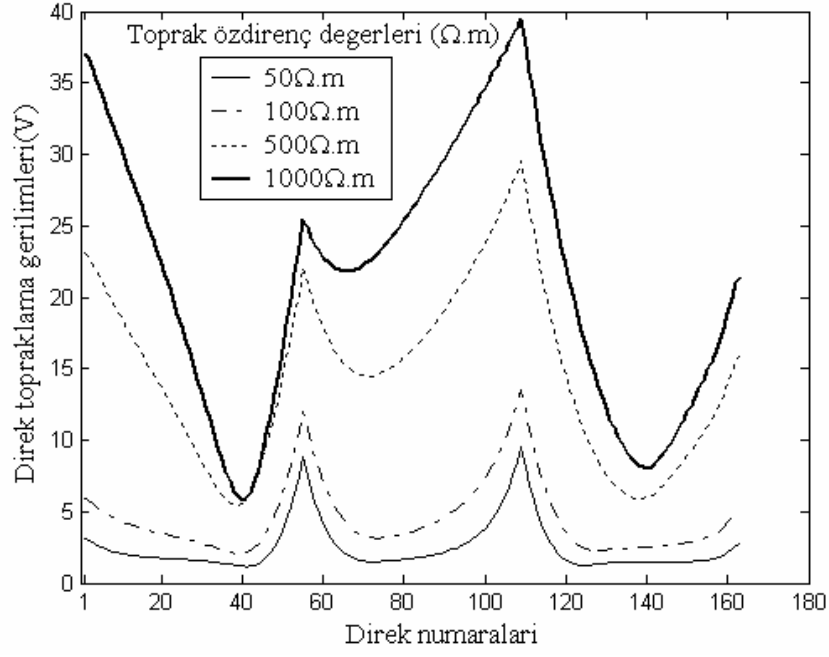
Çizelge 5.1 Faz akımlarının değerleri

Faz akımları (A)	I_a	I_b	I_c
Dengeli	$375\angle 0^\circ$	$375\angle -120^\circ$	$375\angle 120^\circ$
Dengesiz	$350\angle 0^\circ$	$375\angle -110^\circ$	$400\angle 110^\circ$

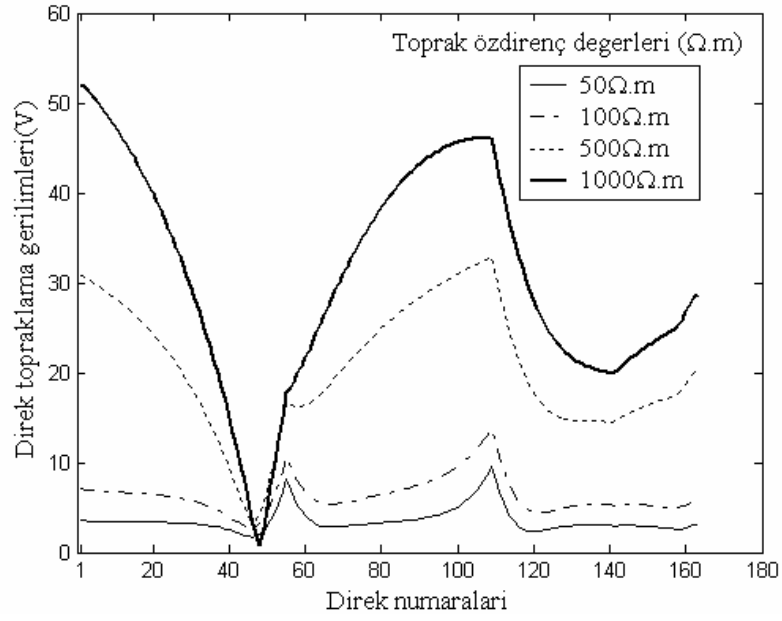


Şekil 5.1 Dengeli yüklenme durumunda iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri (temiz)

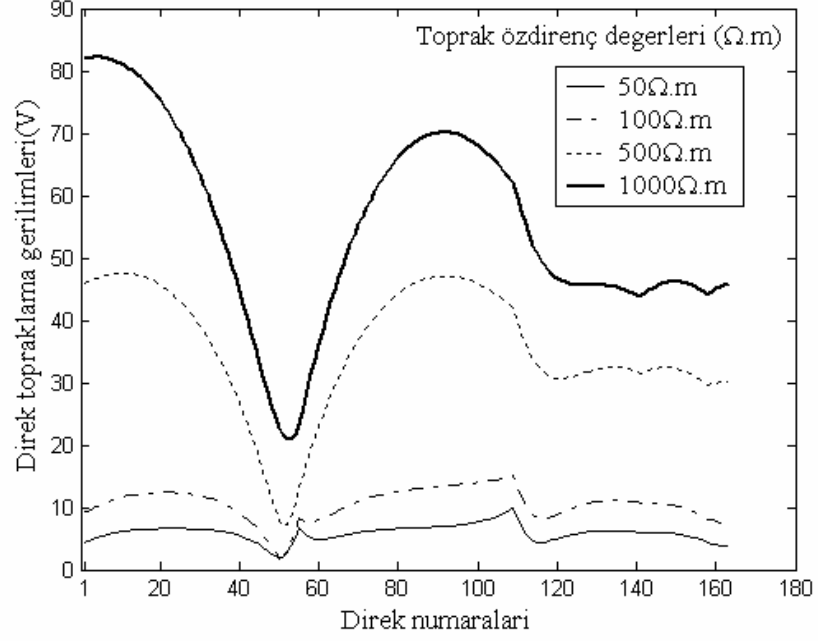
- Dengeli yüklenmede izolatörlerin kirli olması durumunda Çizelge 4.3'te verilen farklı kirlenmelere ilişkin değerler kullanılmıştır. Hafif kirlenmede Şekil 5.2, orta kirlenmede Şekil 5.3 ve yoğun kirlenme durumunda da Şekil 5. 4'te iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri verilmiştir. Hafif, orta ve yoğun kirlenme değerleri Çizelge 4.2'deki gibidir.



Şekil 5.2 Dengeli yüklenme durumunda iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri (hafif kir)



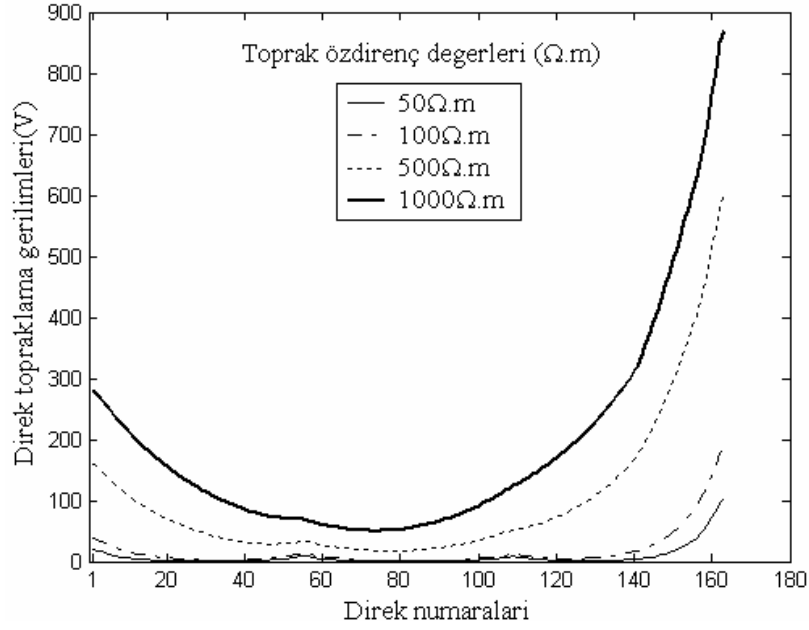
Şekil 5.3 Dengeli yüklenme durumunda iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri (orta kir)



Şekil 5.4 Dengeli yüklenme durumunda iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri (yoğun kir)

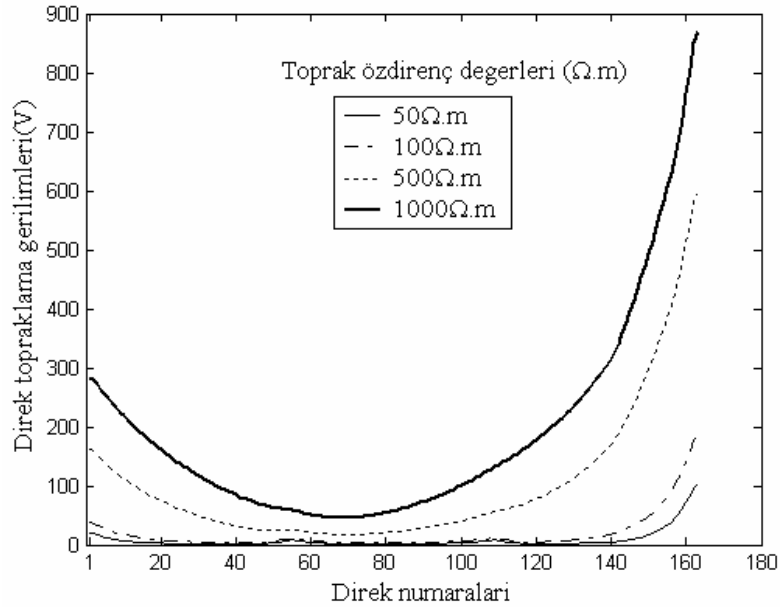
- Dengesiz sinüsoidal yüklenmede de, temiz ve farklı seviyelerde (hafif-orta-yoğun) kirlenen izolatörlerden akan kaçak akımların ve fazların koruma telleri üzerinde endüklediği gerilimler ile faz akımlarının dengesiz olmasından dolayı oluşan artık akımın hat sonunda toprak yolu modelinde akım kaynağı olarak modellenmesi durumunda farklı toprak öz direnç (50 Ω m, 100 Ω m, 500 Ω m, 1000 Ω m) değerlerinde iletim hattı boyunca (50 km-163 direk) Bölüm 5'te verilen toprak yolu modellemesi çerçevesinde direk topraklama gerilimlerinin analizi ve simülasyonu yapılmıştır.

Dengesiz sinüsoidal yüklenmede, faz akımları Çizelge 5.1'de verilmiştir. Bu çalışmada, izolatörlerin temiz olması durumunda, izolatörlerden kaçak akımların oluşmadığı, ancak dengesiz yüklenmeden dolayı hat sonunda akım kaynağı olarak modellenen artık akımın ve fazların koruma telleri üzerinde endüklediği gerilimlerin etkili olduğuna ilişkin iletim hattı boyunca direk topraklama gerilim değerleri Şekil 5.5' te verilmiştir.

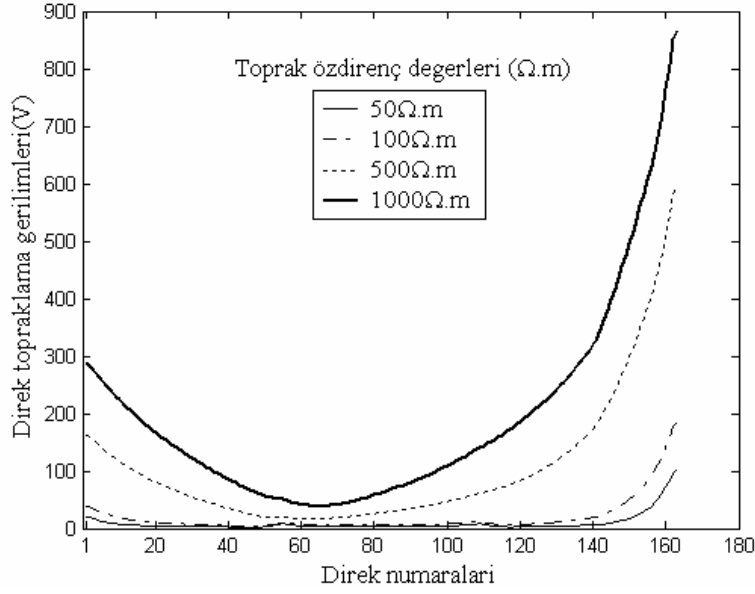


Şekil 5.5 Dengesiz yüklenme durumunda iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri (temiz)

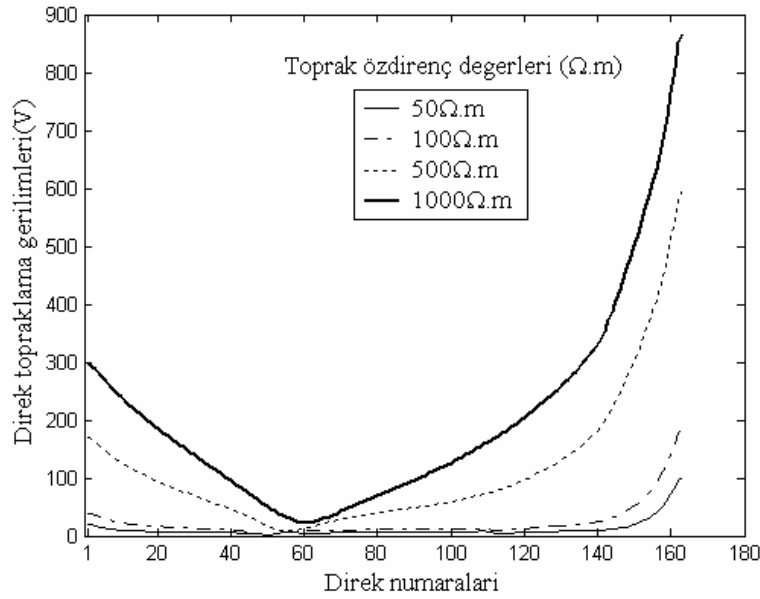
- Dengesiz yüklenmede izolatörlerin kirli olması durumunda Çizelge 4.3'te verilen farklı kirlenmelere ilişkin değerler kullanılmıştır. Hafif kirlenmede Şekil 5.6, orta kirlenmede Şekil 5.7 ve yoğun kirlenme durumunda da Şekil 5.8'te iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri verilmiştir.



Şekil 5.6 Dengesiz yüklenme durumunda iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri (hafif kir)



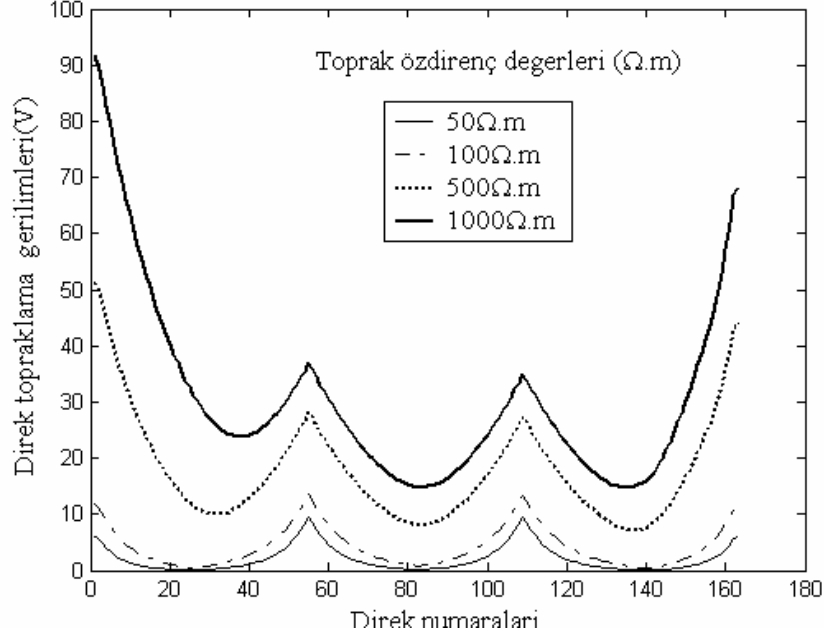
Şekil 5.7 Dengesiz yüklenme durumunda iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri (orta kir)



Şekil 5.8 Dengesiz yüklenme durumunda iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri (yoğun kir)

- Dengeli sinüsoidal olmayan (harmonikli) yüklenme durumunda temiz ve farklı seviyelerde (hafif-orta-yoğun) kirlenen izolatörlerden akan kaçak akımların ve fazların koruma telleri üzerinde endüklediği gerilimlerin, hem temel bileşen (50 Hz), hem de 3. harmonik bileşen (150 Hz) olması durumunda farklı toprak öz direnç (50 $\Omega.m$, 100 $\Omega.m$, 500 $\Omega.m$, 1000 $\Omega.m$) değerlerinde iletim hattı boyunca (50 km–163 direk) Bölüm 5'te verilen toprak yolu modellemesi çerçevesinde direk topraklama gerilimlerinin analizi ve simülasyonu yapılmıştır.

Dengeli sinüsoidal olmayan yüklenmede, temel bileşen akımları Çizelge 5.1’de ve 3. bileşen akımları da Çizelge 5.2’de verilmiştir. Bu çalışmada, izolatörlerin temiz olması durumunda, izolatörlerden kaçak akımların oluşmadığı; ancak, 3. bileşen akımların hat sonunda toplanarak dengesiz akımların oluşturduğu artık akım ile akım kaynağı gibi modellenmesi sonucu fazların koruma telleri üzerinde endüklediği gerilimlerin toprak yolundaki etkilerine ilişkin iletim hattı boyunca direk topraklama gerilim değerleri Şekil 5.9’ de verilmiştir.

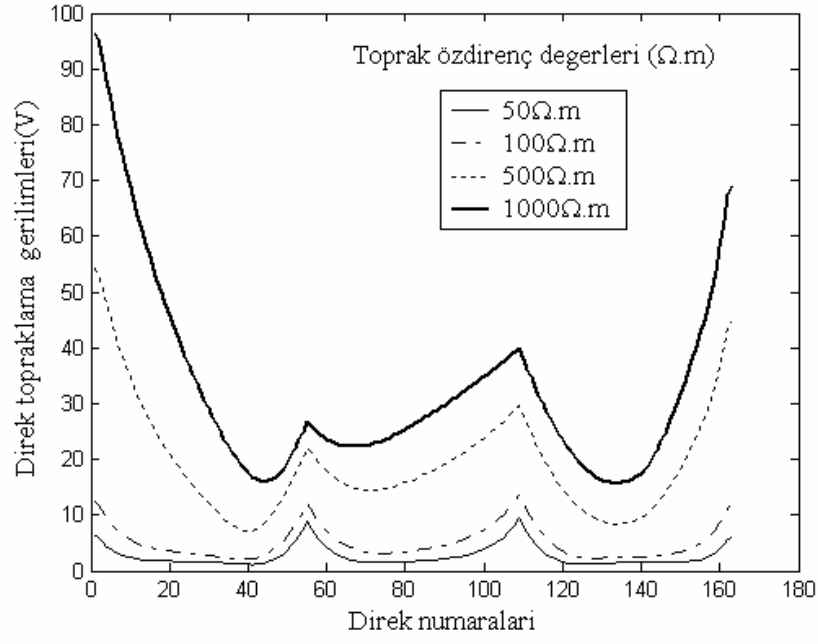


Şekil 5.9 Dengeli sinüsoidal olmayan yüklenme durumunda direk topraklama gerilimleri (temiz)

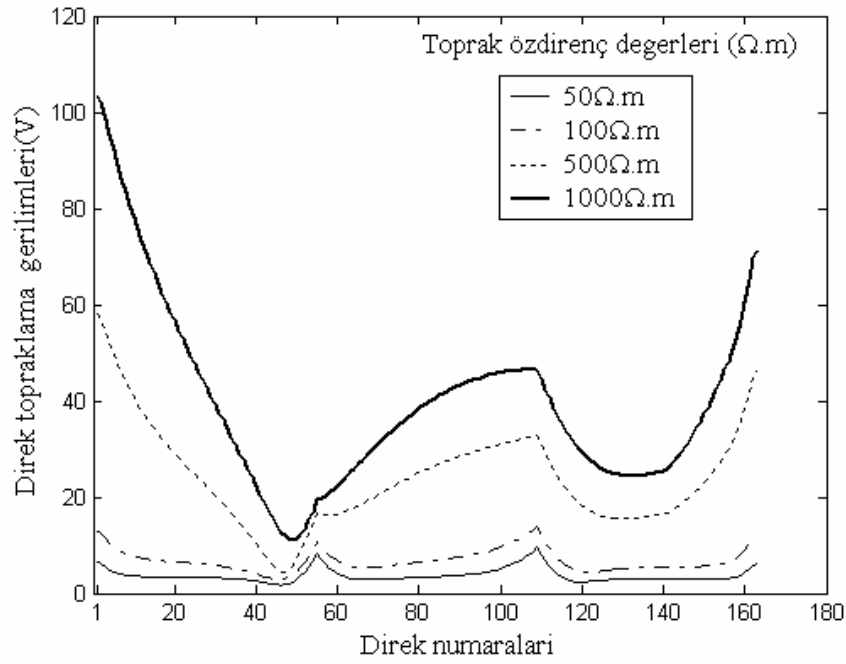
Çizelge 5.2 Harmonik akımların değerleri

Harmonik akımları (A)	$I_a^{(3)}$	$I_b^{(3)}$	$I_c^{(3)}$
Dengeli 3.harmonik bileşeni	$10\angle -40^\circ$	$10\angle -40^\circ$	$10\angle -40^\circ$
Dengesiz 3.harmonik bileşeni	$8\angle -40^\circ$	$10\angle -45^\circ$	$12\angle -60^\circ$

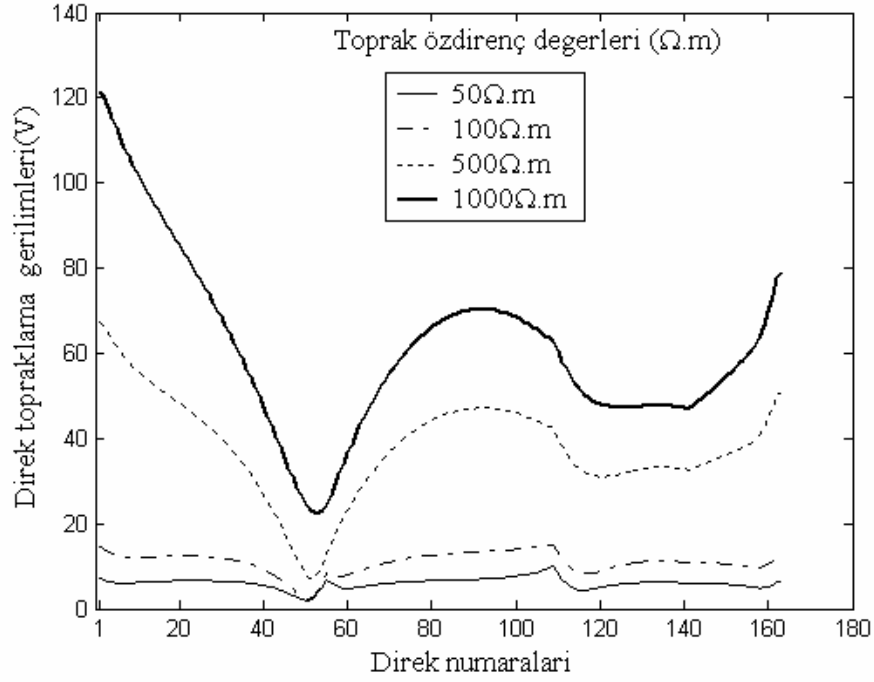
- Dengeli sinüsoidal olmayan yüklenmede izolatörlerin kirli olması durumunda Çizelge 4.3’te verilen farklı kirlenmelere ilişkin değerler kullanılmıştır. Hafif kirlenmede Şekil 5.10, orta kirlenmede Şekil 5.11 ve yoğun kirlenme durumunda da Şekil 5.12’te iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri verilmiştir.



Şekil 5.10 Dengeli sinüsoidal olmayan yüklenme durumunda direk topraklama gerilimleri (hafif kir)



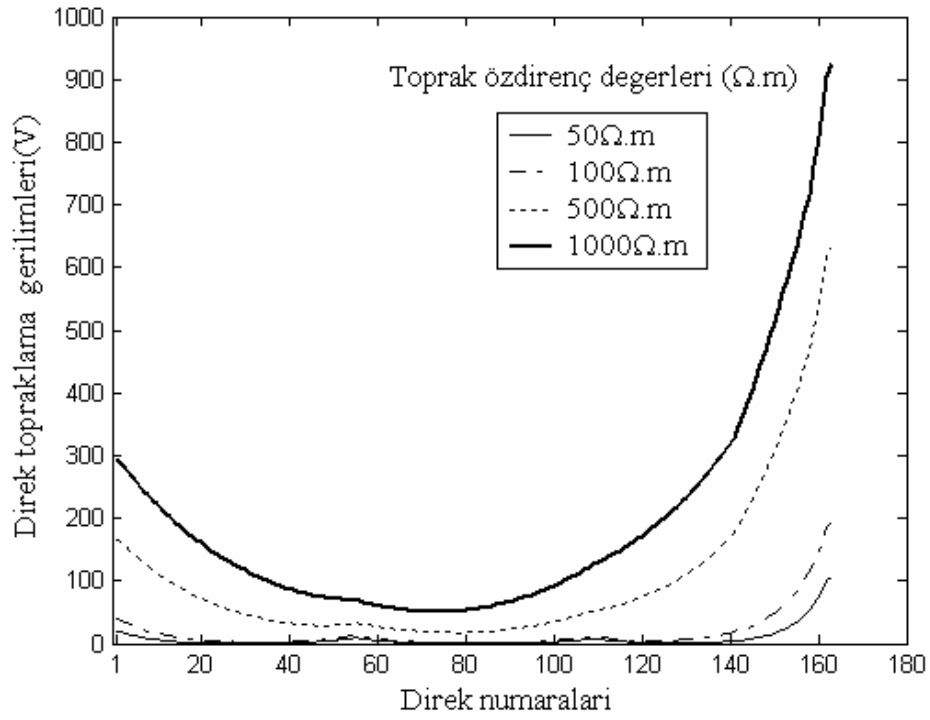
Şekil 5.11 Dengeli sinüsoidal olmayan yüklenme durumunda direk topraklama gerilimleri (orta kir)



Şekil 5.12 Dengeli sinüsoidal olmayan yüklenme durumunda direk topraklama gerilimleri (yoğun kir)

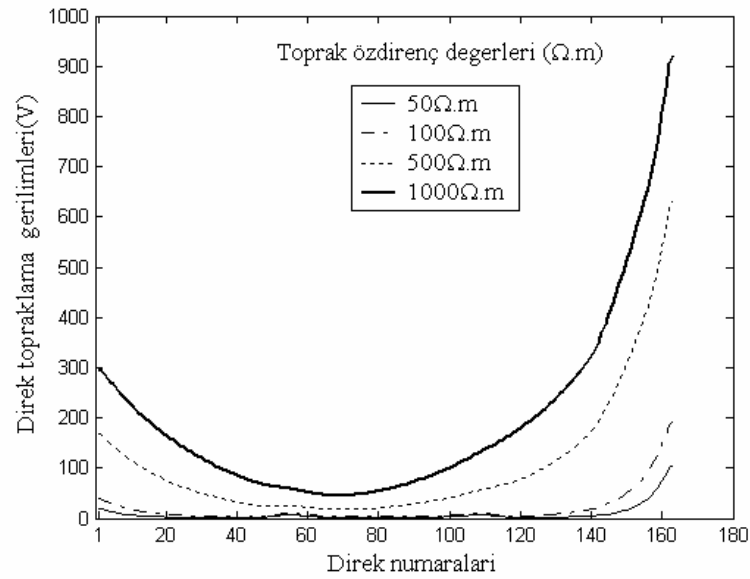
- Dengesiz sinüsoidal olmayan (harmonikli) yüklenme durumunda temiz ve farklı seviyelerde (hafif-orta-yoğun) kirlenen izolatörlerden akan kaçak akımların ve fazların koruma telleri üzerinde endüklediği gerilimlerin, hem temel bileşen (50 Hz), hem de 3. harmonik bileşen (150 Hz) olması durumunda farklı toprak öz direnç (50 $\Omega.m$, 100 $\Omega.m$, 500 $\Omega.m$, 1000 $\Omega.m$) değerlerinde iletim hattı boyunca (50 km–163 direk) Bölüm 5'te verilen toprak yolu modellemesi çerçevesinde direk topraklama gerilimlerinin analizi ve simülasyonu yapılmıştır.

Dengesiz sinüsoidal olmayan yüklenmede, temel bileşen akımları Çizelge 5.1'de ve 3. bileşen akımları da Çizelge 5.2'de verilmiştir. Bu çalışmada, izolatörlerin temiz olması durumunda, izolatörlerden kaçak akımların oluşmadığı; ancak, hem temel bileşen, hem de 3. bileşen akımların hat sonunda toplanarak oluşturdukları artık akımın akım kaynağı ile modellenmesi sonucu fazların koruma telleri üzerinde endüklediği gerilimlerin toprak yolundaki etkilerine ilişkin iletim hattı boyunca direk topraklama gerilim değerleri Şekil 5.13'te verilmiştir.

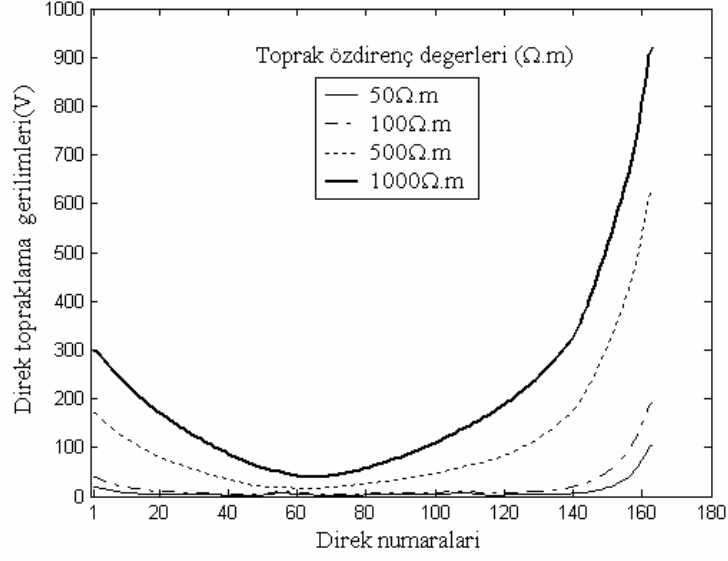


Şekil 5.13 Dengesiz sinüsoidal olmayan yüklenme durumunda direk topraklama gerilimleri (temiz)

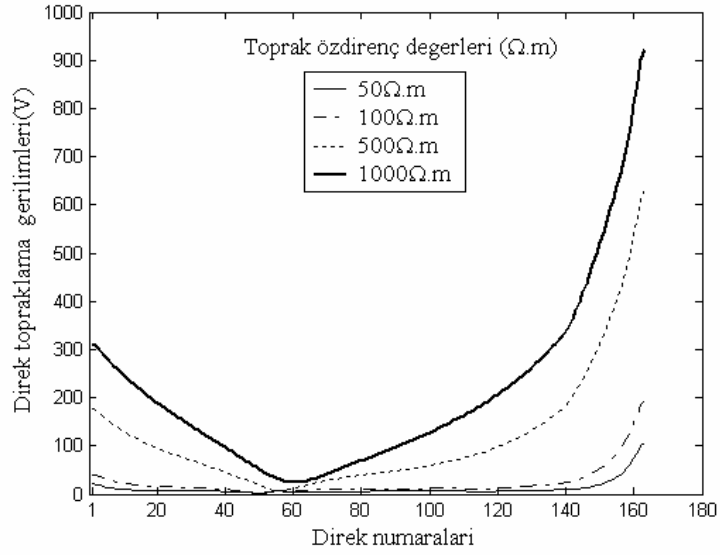
- Dengesiz sinüsoidal olmayan yüklenmede izolatörlerin kirli olması durumunda Çizelge 4.3'te verilen farklı kirlenmelere ilişkin değerler kullanılmıştır. Hafif kirlenmede Şekil 5.14, orta kirlenmede Şekil 5.15 ve yoğun kirlenme durumunda da Şekil 5.16'da iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri verilmiştir.



Şekil 5.14 Dengesiz sinüsoidal olmayan yüklenme durumunda direk topraklama gerilimleri (hafif kir)



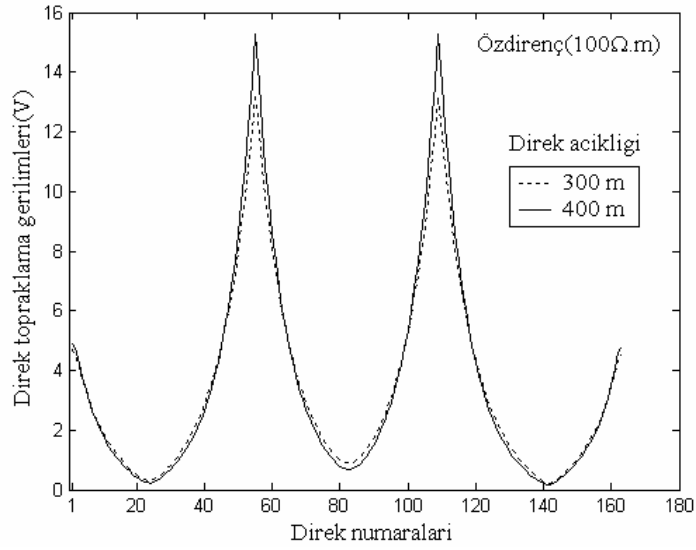
Şekil 5.15 Dengesiz sinüsoidal olmayan yüklenme durumunda direk topraklama gerilimleri (orta kir)



Şekil 5.16 Dengesiz sinüsoidal olmayan yüklenme durumunda direk topraklama gerilimleri (yoğun kir)

Dengeli ve dengesiz yüklenme durumları için yukarıda verilen tüm opsiyonlara ek olarak, dengeli ve dengesiz sinüsoidal çalışmada izolatörlerin temiz olduğu varsayılarak, direk açıklığı ve direk topraklama çubuk sayılarının iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimlerini nasıl etkilediği aşağıda sırasıyla verilmiştir.

- Dengeli sinüsoidal yüklenme durumunda 50 Ω.m'lik toprak öz dirence ilişkin direk açıklıklarına bağlı olarak direk topraklama gerilimleri Şekil 5.17'de verilmiştir.



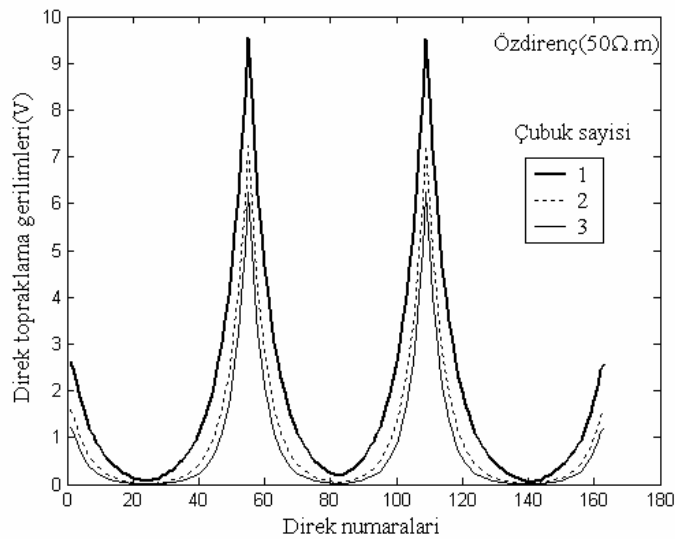
Şekil 5.17 Dengeli sinüsoidal çalışmada farklı mesafelere ilişkin direk topraklama gerilimleri

- Dengeli ve dengesiz sinüsoidal yüklenme durumlarında, $50 \Omega.m$ 'lik toprak özdişence ilişkin topraklama çubuk sayılarına bağılı olarak direk topraklama gerilimleri Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da sırasıyla verilmiştir. Bir direkte birden fazla sayıda (n tane) topraklama çubuğı konulduğunda eşdeğer topraklama direnci;

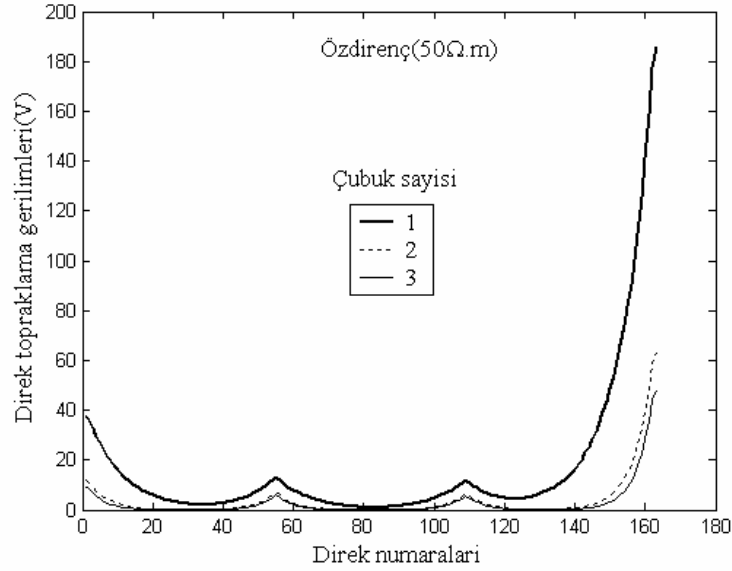
$$R_{es} = (R) \cdot \frac{\text{Ekranlama Faktörü}}{n}$$

ile bulunmaktadır. *Ekranlama Faktörü* IEEE Std 142-1991'de tanımlandığı gibidir.

Buna göre *Ekranlama Faktörü*; $n = 2$ için 1,19 ve $n = 3$ için 1,29 değerlerini almaktadır.



Şekil 5.18 Dengeli sinüsoidal çalışmada topraklama çubuk sayısına ilişkin direk topraklama gerilimleri

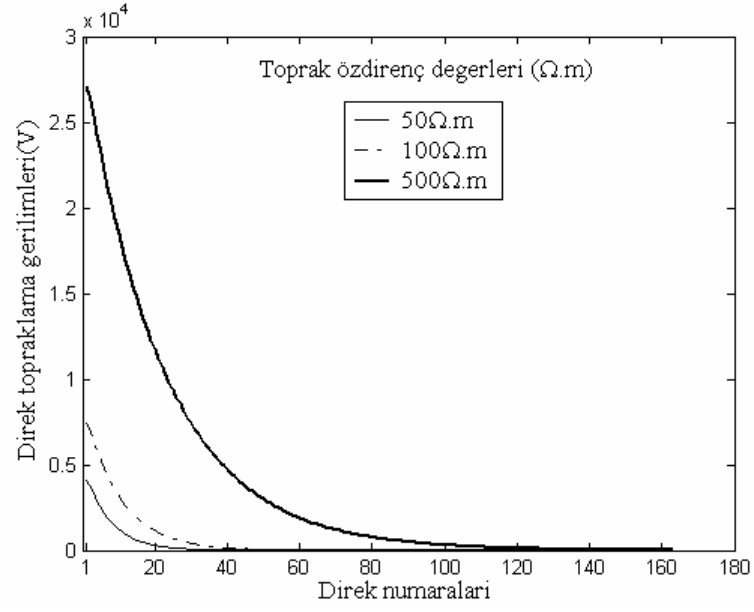


Şekil 5.19 Dengesiz sinüsoidal çalışmada topraklama çubuk sayısına ilişkin direk topraklama gerilimleri

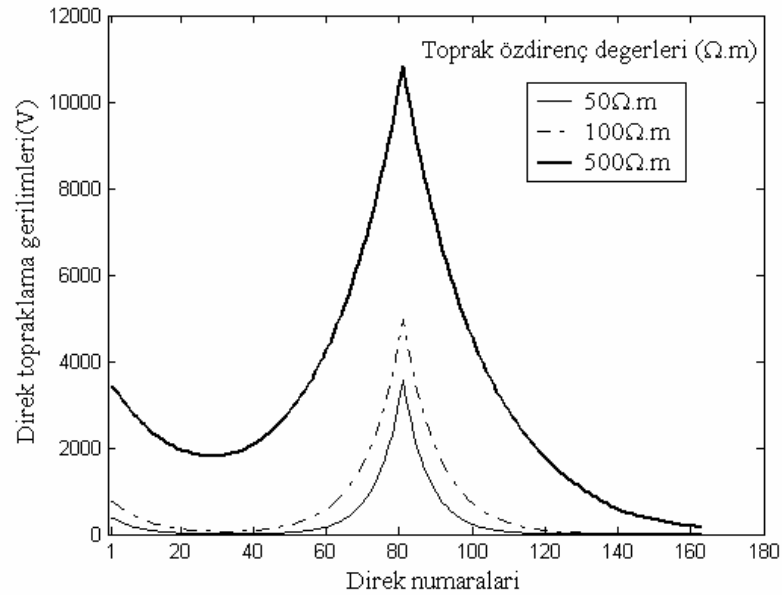
- Enerji iletim hatlarında sürekli işletme durumları dışında, Bölüm 3.6’da anlatıldığı üzere, bir faz iletkeninin değişik nedenlerle direğe, toprağa temas ederek faz toprak kısa devresi oluşturması durumunda iletim hattında kısa süreli geçici rejim olayları meydana gelmektedir. Bu çalışmada, faz-toprak kısa devre analizinde, iletim hattının farklı noktalarında (hat başı, hat ortası ve hat sonu), farklı zemin yapılarına bağlı olarak iletim hattı boyunca arıza akımının toprak yolunda oluşturduğu direk topraklama gerilimleri incelenmiştir.
- Faz-toprak kısa devre analizinde hat başı, hat ortası ve hat sonuna ilişkin direk topraklama gerilimleri Şekil 5.20, Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de sırasıyla verilmiştir. Bunlara ilişkin, arıza noktalarında oluşan kısa devre akım değerleri de Çizelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.3 Faz toprak kısa devre analizinde direk topraklama gerilimleri

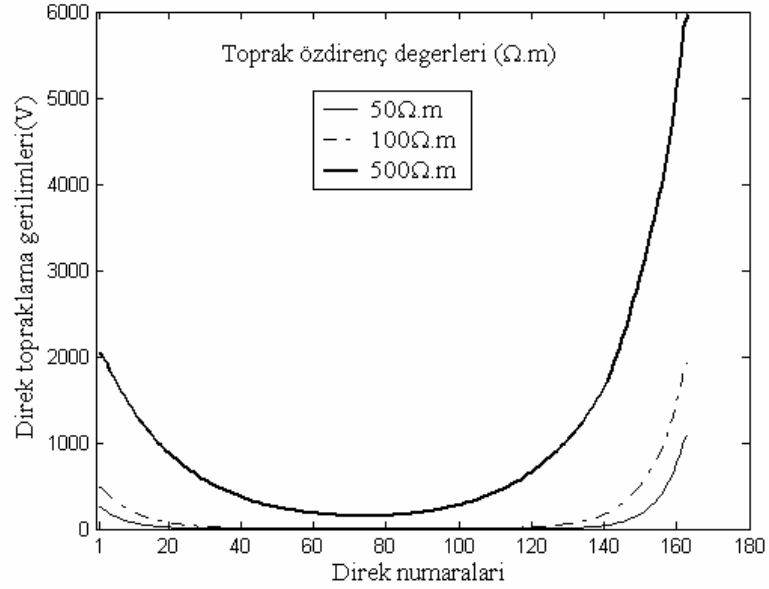
Toprak Öz direnci ($\Omega.m$)	Farklı Arıza Noktalarında Direk Topraklama Gerilimleri (V)		
	Hat başı (5354 A)	Hat ortası (2606 A)	Hat sonu (1698 A)
50	4078	3554	1095
100	7433	4972	1939
500	27060	10840	5971



Şekil 5.20 Hat başında faz-toprak kısa devresi olması durumunda direk topraklama gerilimleri

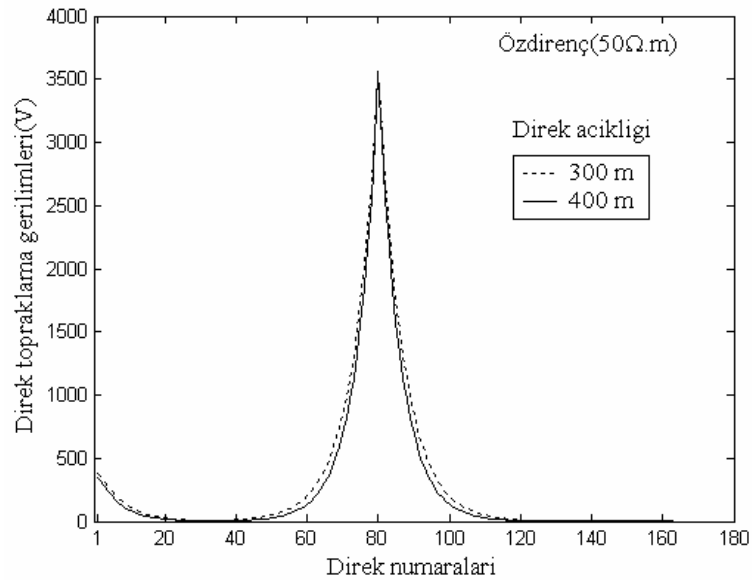


Şekil 5.21 Hat ortasında faz-toprak kısa devresi olması halinde direk topraklama gerilimleri



Şekil 5.22 Hat sonunda faz-toprak kısa devresi olması halinde direk topraklama gerilimleri

- Ayrıca, faz-toprak kısa devre analizi için farklı direk açıklıkları ve direk topraklama çubuk sayılarına ilişkin sadece hat ortası için iletim hattı boyunca direk topraklama gerilimleri elde edilmiştir. Farklı direk açıklığı ve topraklama çubuk sayıları için elde edilen simülasyon eğrileri Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'te sırasıyla verilmiştir. Bu opsiyonlara ilişkin arıza noktalarında oluşan direk topraklama gerilimleri Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'te verilmiştir.



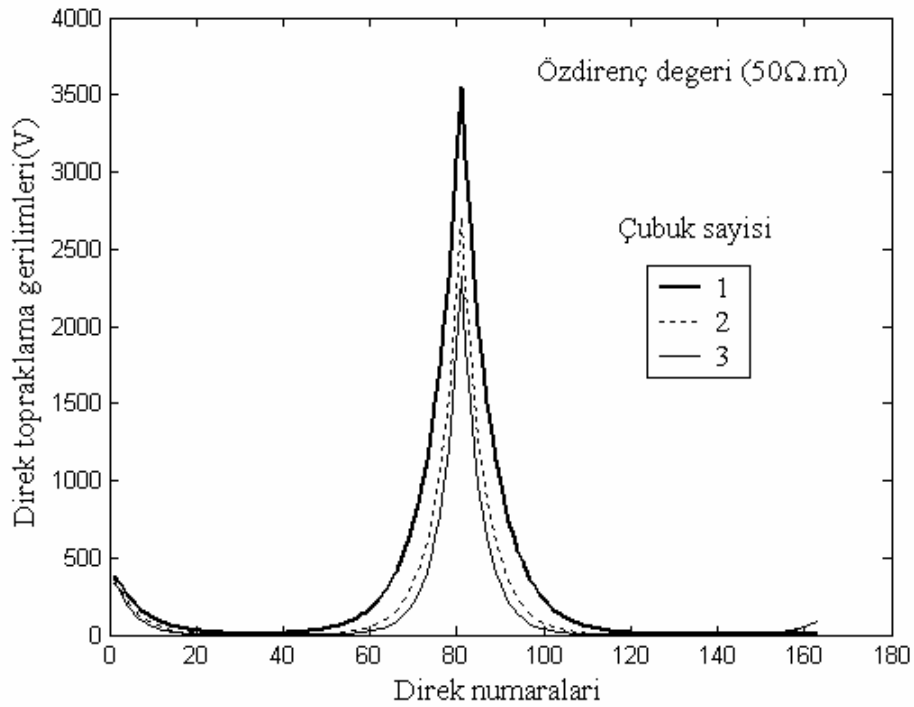
Şekil 5.23 Faz toprak kısa devre analizinde farklı direk açıklıklarında direk gerilim değerleri

Çizelge 5.4 Faz toprak kısa devre analizinde farklı direk açıklıklarında arıza noktasındaki
direk gerilim değerleri

Direk Açıklığı (metre)	Direk Topraklama Gerilimi (Volt)
300	3577
400	3544

Çizelge 5.5 Faz toprak kısa devre analizinde farklı çubuk sayılarının direk gerilim
değerleri

Topraklama Çubuk Sayısı	Direk Topraklama Gerilimi (Volt)
1	3554
2	2523
3	2055



Şekil 5.24 Faz toprak kısa devre analizinde topraklama çubuk sayısına ilişkin direk gerilim değerleri

- Enerji iletim hatları toprak yolu modeli için yapılan analiz ve simülasyonlardan elde edilen veriler kullanılarak yapılan çalışmalar aşağıda sıralanmıştır:
 1. Faz iletkenleri, koruma telleri ve bunların bileşkesi olarak iletim hattının magnetik alan değerlerinin elde edilmesi,

2. Koruma tellerinden geçen akımların iletim hattı boyunca (direk açıklıklarına göre) oluşturduğu güç kayıpları,
3. Koruma tellerinden geçen akımların iletim hattı boyunca (direk açıklıklarına göre) asimetri oranları (1.00 per unit),
4. Koruma tellerinden geçen akımların iletim hattı boyunca (direk açıklıklarına göre) oluşturduğu elektrodinamik kuvvetler,
5. Toprak yolunda akım dağılımlarının iletim hattı boyunca oluşturduğu adım gerilimleri elde edilmiştir.

Yukarıda anlatılan çalışmalara yönelik elde edilen sonuçlar, aşağıda sırasıyla verilmiştir:

1. Magnetik alan (A/m) için yapılan çalışmalar, kritik durumlar (-5 °C (buzsuz, %100 buzlu, %50 buzlu), +5°C (rüzgârsız, %100 rüzgârlı, %70 rüzgârlı), ve +15°C) göz önüne alınmıştır. Bunların dışında kalan sıcaklıklarda önemli değişikliklere rastlanmamıştır. Bu çalışmalar, sürekli çalışmanın tüm opsiyonları için gerçekleştirilmiş olup, bunlara yönelik kullanılan bilgiler şu şekilde verilebilir (Umurkan, 1995):

$$H = \frac{I_i}{2\pi r_{ij}} \cdot \phi_{ij} \quad (5.1)$$

$$\phi_{ij} = \frac{-y_i - y_{ij}}{r_{ij}} \cdot u_x + \frac{x_i - x_{ij}}{r_{ij}} \cdot u_y \quad (5.2)$$

(5.1) ve (5.2)'de verilen denklemlerde, $H, I_i, r_{ij}, \phi_{ij}, u_x$ ve u_y parametreleri vektörel olup aşağıda tanımlanmıştır:

H : Magnetik alan (A/m),

I_i : i fazının akım değeri (A)

r_{ij} : i fazı ile j ölçüm noktası arasındaki uzaklık (m)

ϕ_{ij} : Magnetik alan ölçümünde koordinatların belirleyici vektörü

u_x, u_y : x ve y yönünde birim vektörlerdir.

Bileşke alan hesaplamalarında (5.1) ve (5.2)'de verilen denklemlerde verilen vektörel büyüklüklerin reel ve imajiner kısımları esas alınmıştır. Koordinatların belirlenmesinde Şekil 2.9'da verilen Teiaş direği esas alınmıştır. Faz iletkenin ve koruma telinin meteorolojik parametrelere bağlı olarak sehimleri değişeceğinden, referans alınan koordinatlar da

değişecektir. Koruma telinin ağırlığı 0,58 kg/m, faz iletken (HAWK) 0,973 kg/m'dir. Alan hesabı, direk açıklığının tam ortasında, yerden 1 metre yükseklikte bir "P" noktası için gerçekleştirilmiştir. Her meteorolojik koşulda, bu nokta ile iletkenler arasındaki mesafelerin (koordinatların) değerleri Ek-4'deki programdan görülebilir. Buna yönelik çalışmalar aşağıda sırasıyla verilmiştir:

Çizelge 5.6 Farklı işletmelere ilişkin magnetik alan değerleri (-5°C buzsuz)

İşletme Özellikleri	Magnetik Alan Değerleri (A/m) , $\rho = 100 \Omega.m$, -5 °C (buzsuz)						
	Magnetik Alan Kaynağı						
	Faz iletkenleri	Koruma telleri			Bileşke		
	Hat başı/Hat ortası/Hat sonu	Hat başı	Hat ortası	Hat sonu	Hat başı	Hat ortası	Hat sonu
Dengeli sinüsoidal	5.0060	0.0430	0.0480	0.0424	5.0275	5.0347	4.9158
Dengesiz sinüsoidal	5.2791	0.1993	0.2375	0.3032	5.3087	5.2146	3.7569
Dengeli non-sinüsoidal	4.6399	0.0610	0.0726	0.0620	4.6648	4.6714	4.6645
Dengesiz non-sinüsoidal	5.2827	0.2051	0.2446	0.3068	5.3142	5.2207	4.9831

Çizelge 5.7 Farklı işletmelere ilişkin magnetik alan değerleri (-5 °C, %100 buzlu)

İşletme Özellikleri	Magnetik Alan Değerleri (A/m) , $\rho = 100 \Omega.m$, -5 °C (%100 buzlu)						
	Magnetik Alan Kaynağı						
	Faz iletkenleri	Koruma telleri			Bileşke		
	Hat başı/Hat ortası/Hat sonu	Hat başı	Hat ortası	Hat sonu	Hat başı	Hat ortası	Hat sonu
Dengeli sinüsoidal	4.9165	0.03399	0.0437	0.0395	4.9349	4.9409	4.8771
Dengesiz sinüsoidal	5.0275	0.1622	0.1386	0.2309	5.0556	5.0878	5.0375
Dengeli non-sinüsoidal	4.5945	0.0517	0.0622	0.0524	4.6154	4.6204	4.6151
Dengesiz non-sinüsoidal	5.0297	0.1666	0.1892	0.2338	5.0590	5.0915	4.8021

Çizelge 5.8 Farklı işletmelere ilişkin magnetik alan değerleri (-5 °C, %50 buzlu)

İşletme Özellikleri	Magnetik Alan Değerleri (A/m) , $\rho = 100 \Omega.m$, -5 °C (% 50 buzlu)						
	Magnetik Alan Kaynağı						
	Faz iletkenleri	Koruma telleri			Bileşke		
	Hat başı/Hat ortası/Hat sonu	Hat başı	Hat ortası	Hat sonu	Hat başı	Hat ortası	Hat sonu
Dengeli sinüsoidal	5.0274	0.0410	0.0451	0.0405	5.0456	5.0520	4.9447
Dengesiz sinüsoidal	5.3368	0.1751	0.2023	0.2560	5.3611	5.2021	3.7176
Dengeli non-sinüsoidal	4.6516	0.0549	0.0644	0.0556	4.6729	4.6785	4.6726
Dengesiz non-sinüsoidal	5.3407	0.1800	0.2084	0.2591	5.3667	5.2083	5.0873

Çizelge 5.9 Farklı işletmelere ilişkin magnetik alan değerleri (+5 °C, rüzgarsız)

İşletme Özellikleri	Magnetik Alan Değerleri (A/m) , $\rho = 100 \Omega.m$, +5 °C (rüzgârsız)						
	Magnetik Alan Kaynağı						
	Faz iletkenleri	Koruma telleri			Bileşke		
	Hat başı/Hat ortası/Hat sonu	Hat başı	Hat ortası	Hat sonu	Hat başı	Hat ortası	Hat sonu
Dengeli sinüsoidal	4.9836	0.0429	0.0478	0.0423	5.0054	5.0125	4.8945
Dengesiz sinüsoidal	5.2179	0.1980	0.2356	0.3007	5.2487	5.1917	3.7907
Dengeli non-sinüsoidal	4.6280	0.0607	0.0722	0.0616	4.6530	4.6595	4.6526
Dengesiz non-sinüsoidal	5.2212	0.2038	0.2426	0.3042	5.2537	5.1974	4.9243

Çizelge 5.10 Farklı işletmelere ilişkin magnetik alan değerleri (+5 °C, % 100 rüzgarlı)

İşletme Özellikleri	Magnetik Alan Değerleri (A/m) , $\rho = 100 \text{ } \Omega.m$, +5 °C (%100 rüzgarlı)						
	Magnetik Alan Kaynağı						
	Faz iletkenleri	Koruma telleri			Bileşke		
	Hat başı/Hat ortası/Hat sonu	Hat başı	Hat ortası	Hat sonu	Hat başı	Hat ortası	Hat sonu
Dengeli sinüsoidal	4.7557	0.0386	0.0418	0.0382	4.7749	4.7803	4.6907
Dengesiz sinüsoidal	4.5167	0.1441	0.1574	0.1956	4.5516	4.9999	4.1898
Dengeli non-sinüsoidal	4.5333	0.0475	0.0544	0.0480	4.5541	4.5636	4.5538
Dengesiz non-sinüsoidal	4.5171	0.1478	0.1623	0.1981	4.5525	5.0102	4.3268

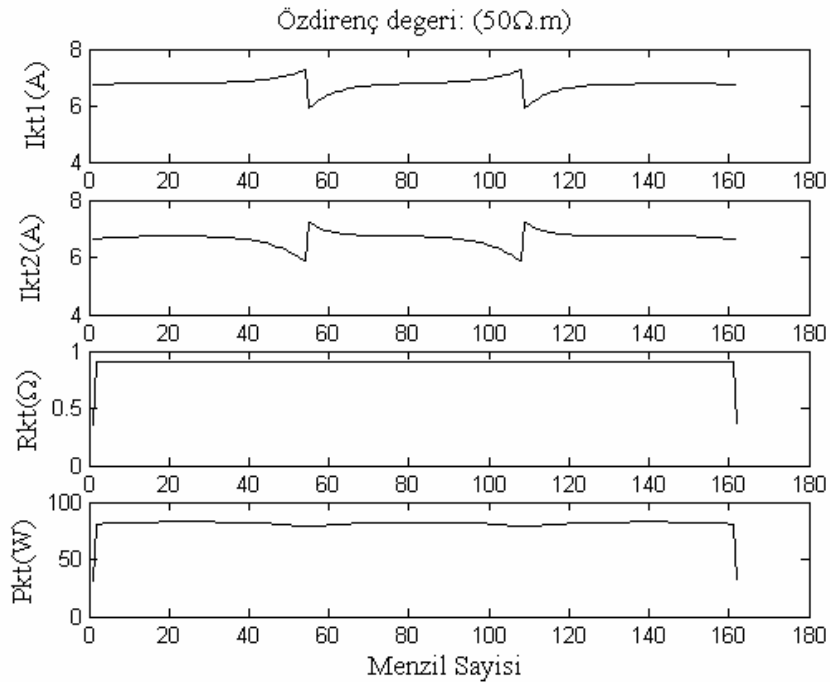
Çizelge 5.11 Farklı işletmelere ilişkin magnetik alan değerleri (+5 °C, % 70, rüzgarlı)

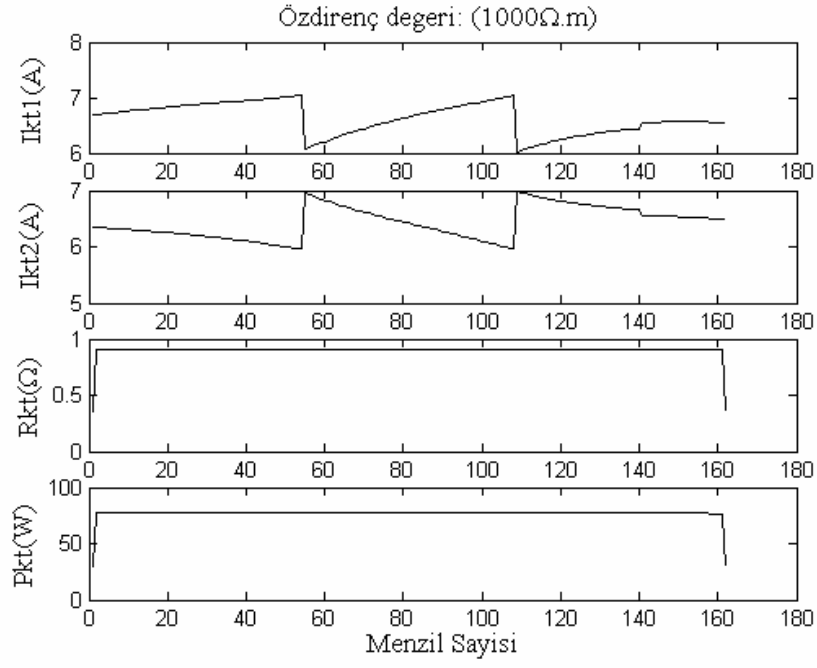
İşletme Özellikleri	Magnetik Alan Değerleri (A/m) , $\rho = 100 \text{ } \Omega.m$, +5 °C (%70 rüzgârlı)						
	Magnetik Alan Kaynağı						
	Faz iletkenleri	Koruma telleri			Bileşke		
	Hat başı/Hat ortası/Hat sonu	Hat başı	Hat ortası	Hat sonu	Hat başı	Hat ortası	Hat sonu
Dengeli sinüsoidal	4.7716	0.0391	0.0425	0.0387	4.7916	4.7973	4.7044
Dengesiz sinüsoidal	4.5730	0.1509	0.1672	0.2088	4.6084	5.0091	4.1564
Dengeli non-sinüsoidal	4.5379	0.0490	0.0566	0.0496	4.5593	4.5513	4.5589
Dengesiz non-sinüsoidal	4.5735	0.1548	0.1724	0.2114	4.6095	4.5596	4.3701

Çizelge 5.12 Farklı işletmelere ilişkin magnetik alan değerleri (+15 °C)

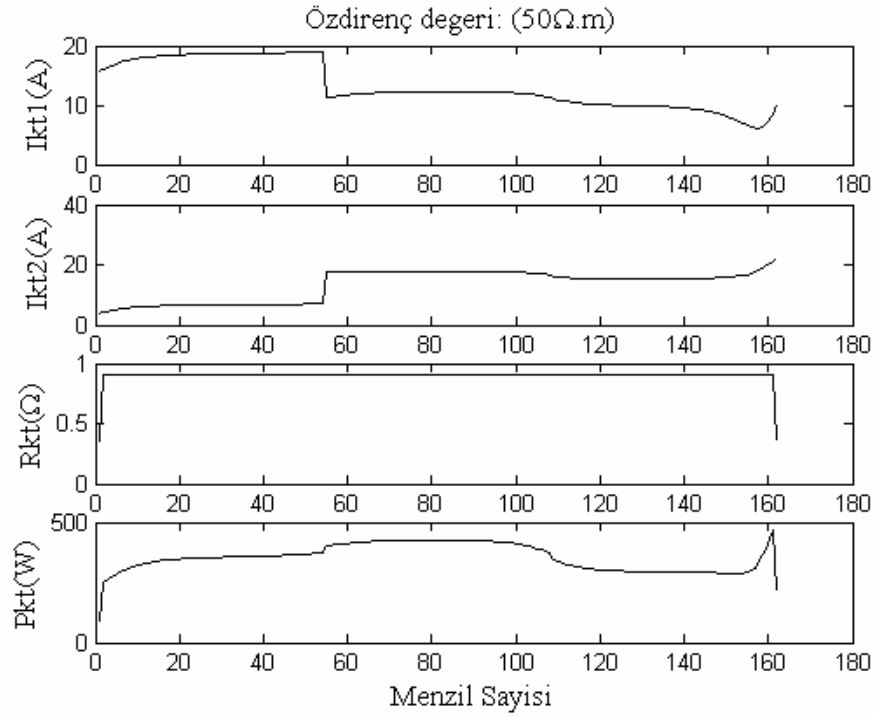
İşletme Özellikleri	Magnetik Alan Değerleri (A/m) , $\rho = 100 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, +15 °C						
	Magnetik Alan Kaynağı						
	Faz iletkenleri	Koruma telleri			Bileşke		
	Hat başı/Hat ortası/Hat sonu	Hat başı	Hat ortası	Hat sonu	Hat başı	Hat ortası	Hat sonu
Dengeli sinüsoidal	5.0293	0.0431	0.0481	0.0425	5.0506	4.9914	4.8744
Dengesiz sinüsoidal	5.1589	0.1967	0.2337	0.2981	5.1907	5.1710	3.8235
Dengeli non-sinüsoidal	4.6171	0.0603	0.0717	0.0613	4.6421	4.6485	4.6417
Dengesiz non-sinüsoidal	5.1618	0.2024	0.2406	0.3016	5.1954	5.1761	4.8677

2. Faz iletkenlerinin koruma telleri üzerinde endüklediği gerilimlerinden kaynaklanan akımların oluşturduğu güç kayıpları aşağıda sırasıyla verilmiştir:

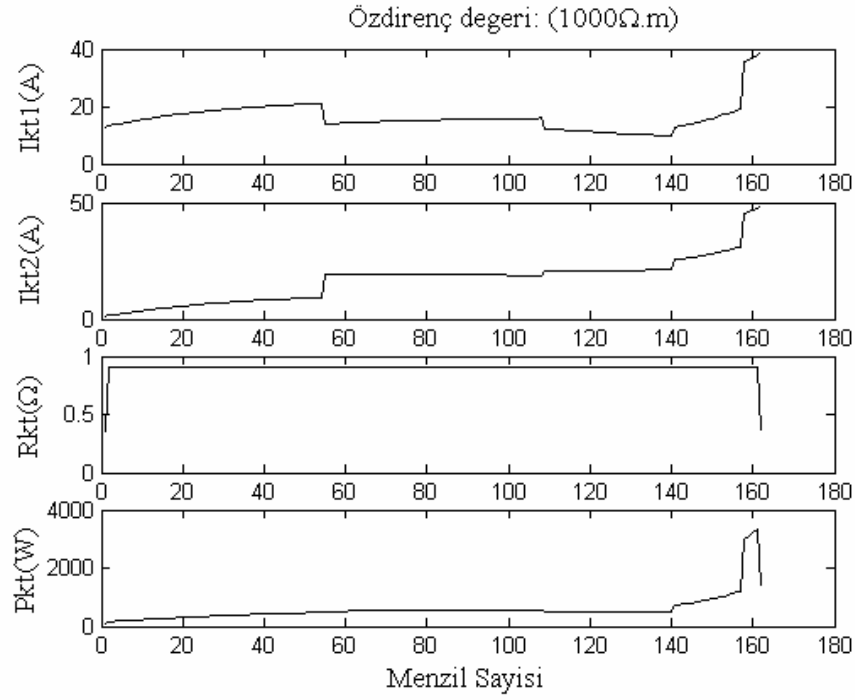
Şekil 5.25 Dengeli sistemde koruma tellerindeki güç kayıpları (50 $\Omega \cdot \text{m}$)



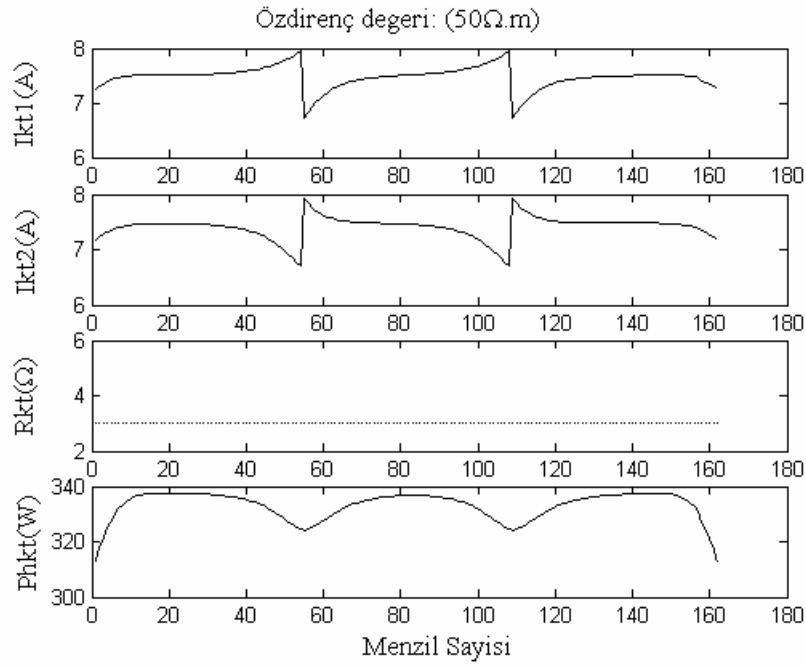
Şekil 5.26 Dengeli sistemde koruma tellerindeki güç kayıpları (1000 Ω m)



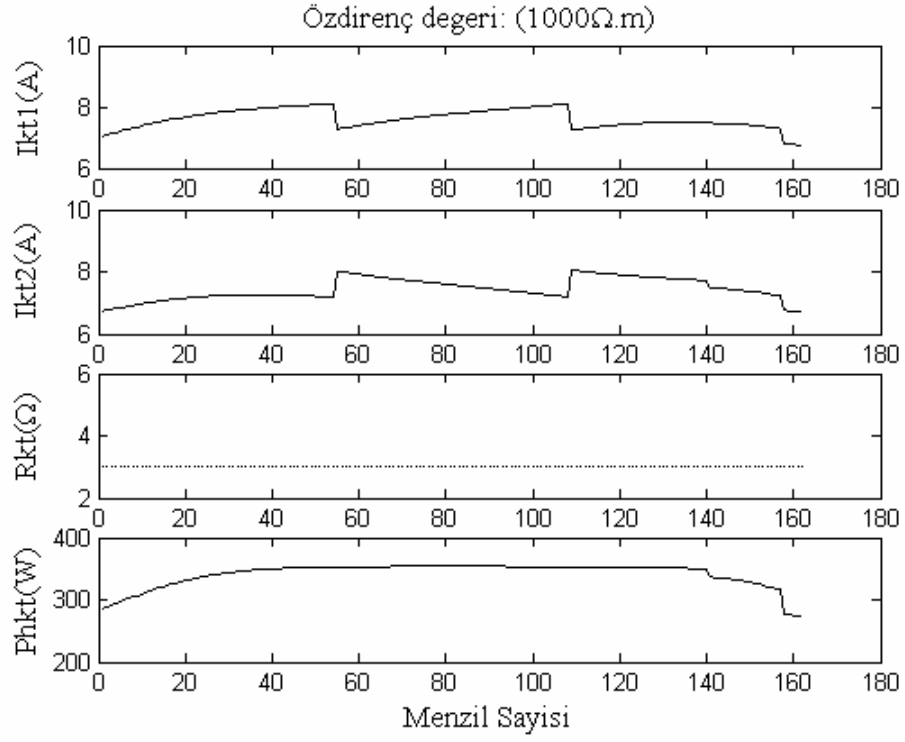
Şekil 5.27 Dengesiz sistemde koruma tellerindeki güç kayıpları (50 Ω m)



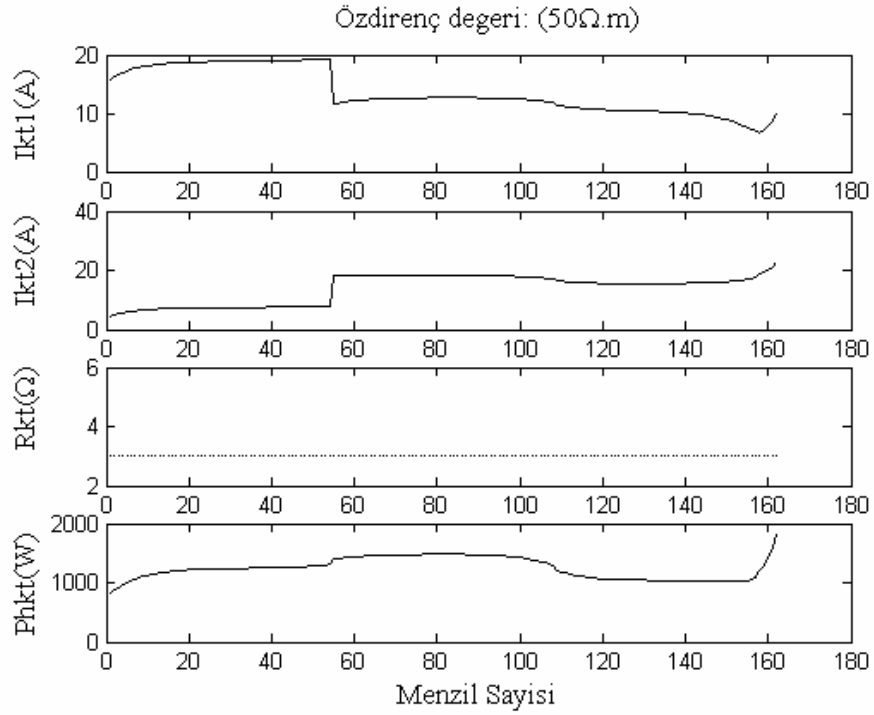
Şekil 5.28 Dengesiz sistemde koruma tellerindeki güç kayıpları (1000 Ω m)



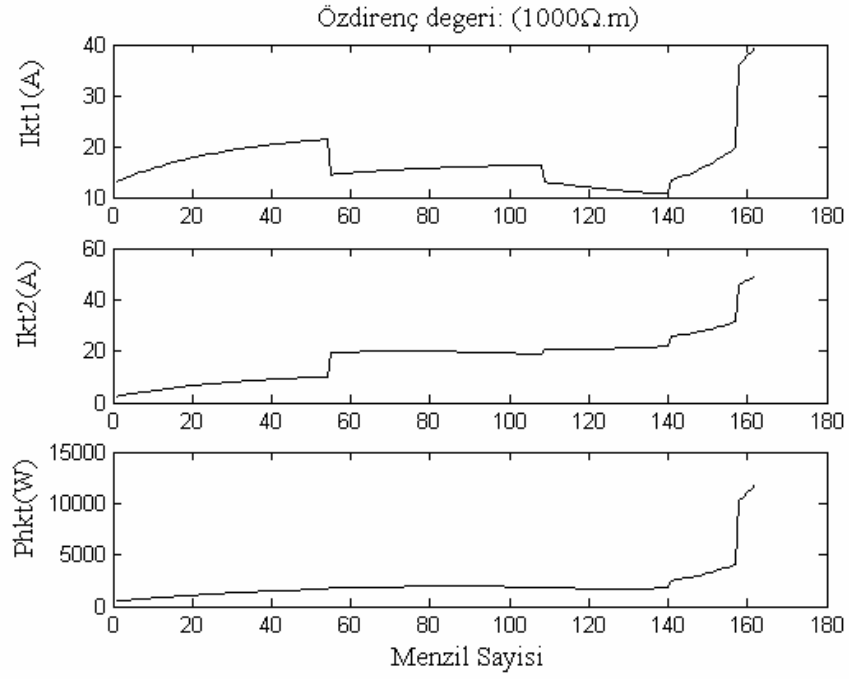
Şekil 5.29 Dengeli non-sinüsoidal sistemde koruma tellerindeki güç kayıpları (50 Ω m)



Şekil 5.30 Dengeli non-sinüsoidal sistemde koruma tellerindeki güç kayıpları (1000 Ω m)



Şekil 5.31 Dengesiz non-sinüsoidal sistemde koruma tellerindeki güç kayıpları (50 Ω m)

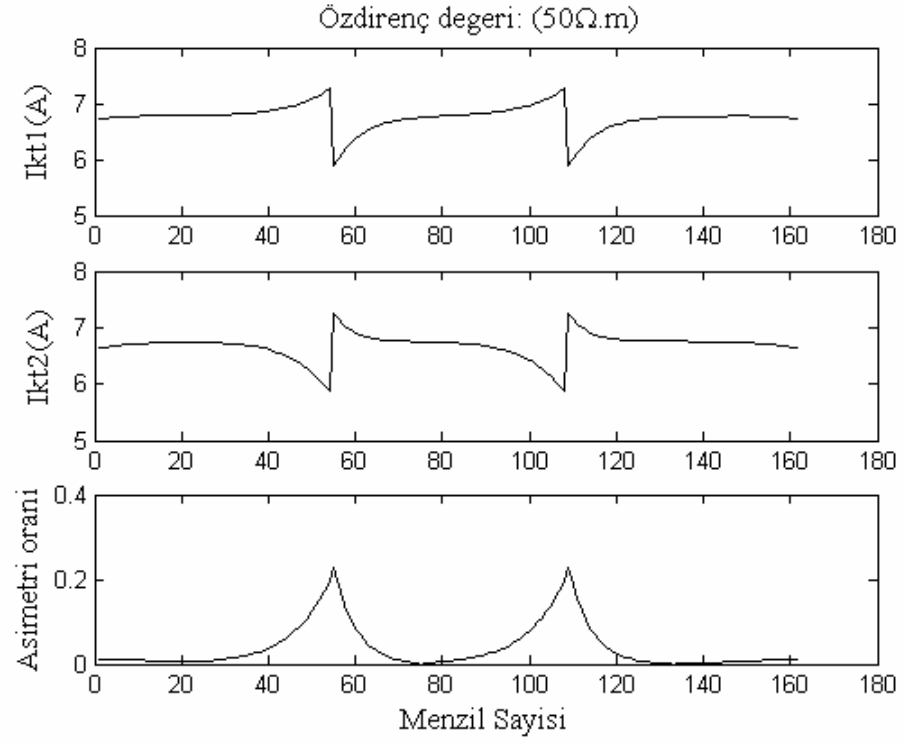


Şekil 5.32 Dengesiz non-sinüsoidal sistemde koruma tellerindeki güç kayıpları (1000 Ωm)

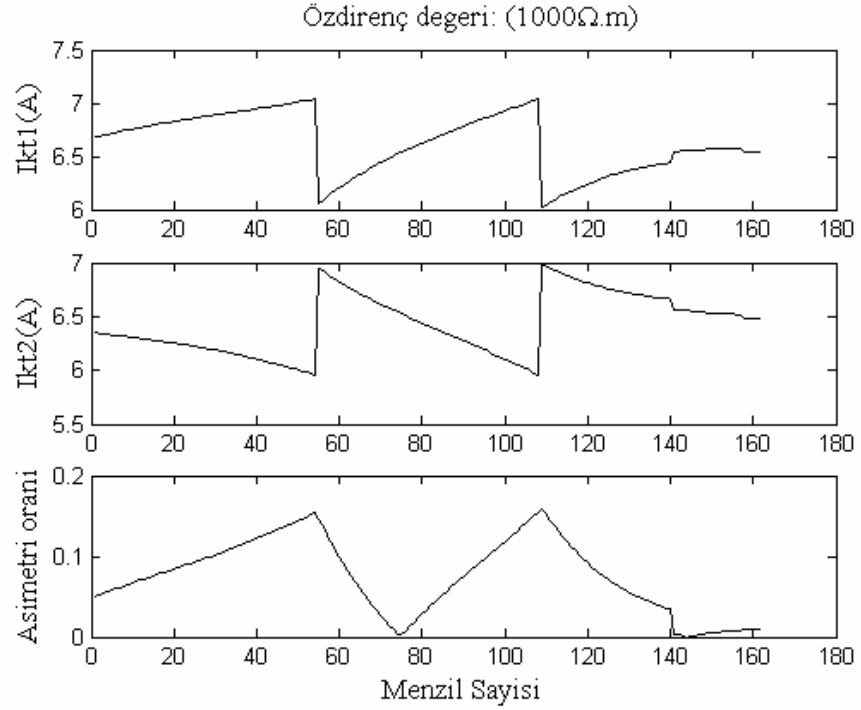
3. Herhangi bir direk açıklığında, 1 ve 2 no.lu koruma telinden geçen akımlar I_1 ve I_2 ise, “asimetri oranı” şöyle tanımlanabilir:

$$\text{Asimetri Oranı} = \left| \frac{I_{1_{ef}} - I_{2_{ef}}}{I_{1_{ef}}} \right| \quad (5.3)$$

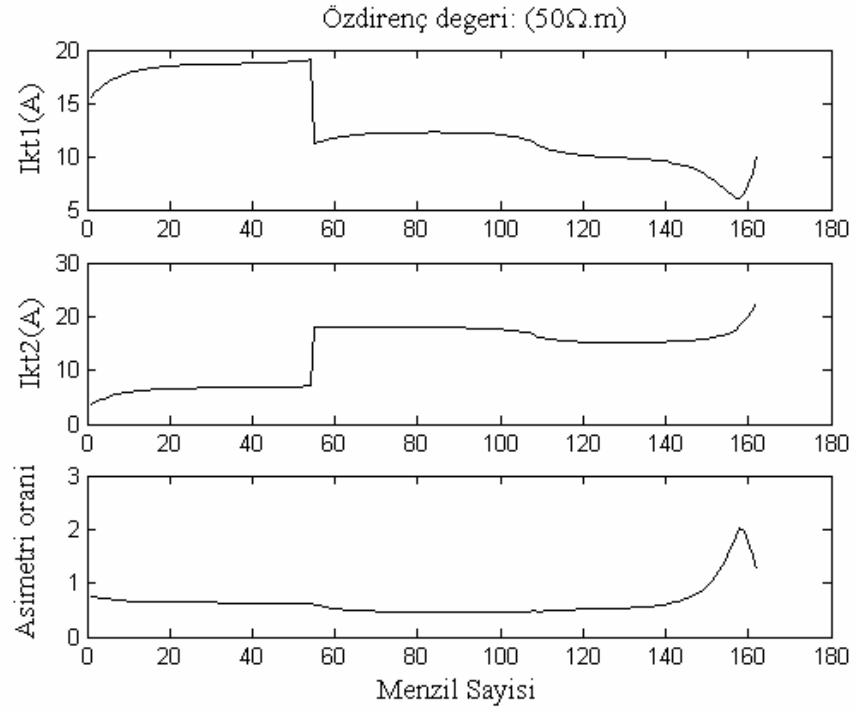
Koruma tellerinden geçen akımların aynı olmaması sebebiyle oluşan dengesizliğin belirleyicisi olarak tanımlanan asimetri oranları (1.00 per unit olarak) aşağıda sırasıyla verilmiştir:



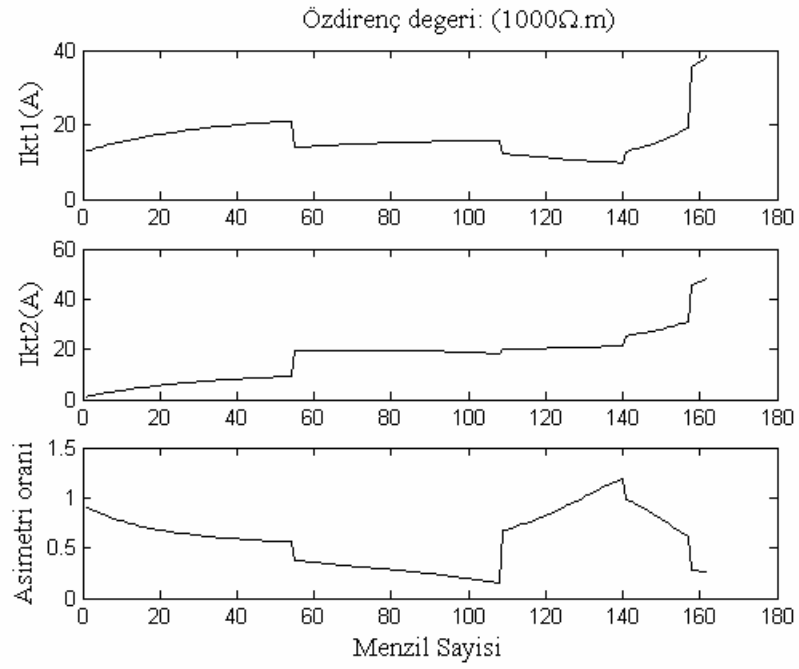
Şekil 5.33 Dengeli sistemde koruma tellerinin asimetri oranları (50 Ωm)



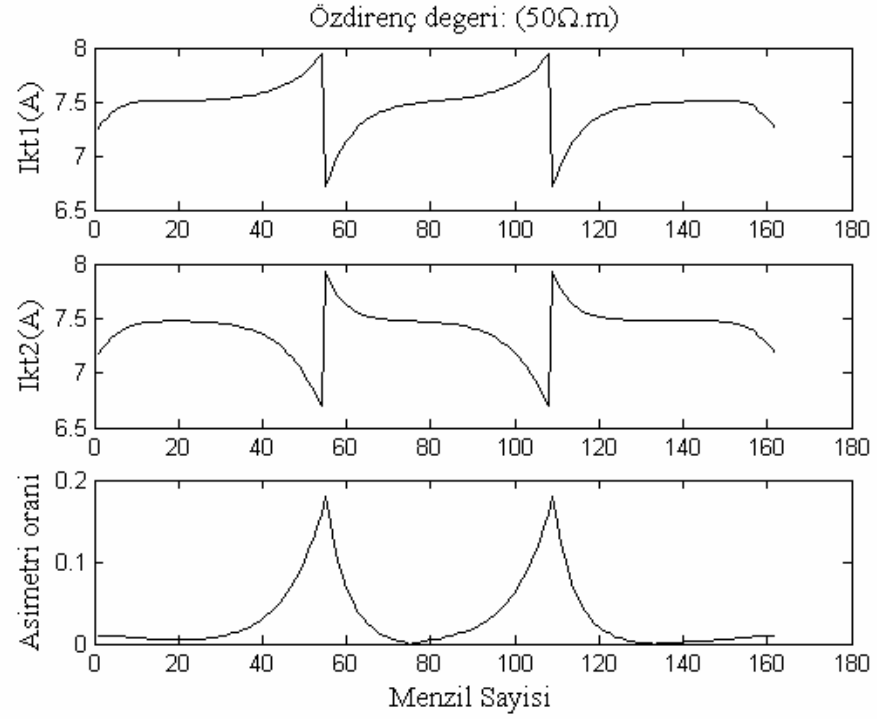
Şekil 5.34 Dengeli sistemde koruma tellerinin asimetri oranları (1000 Ωm)



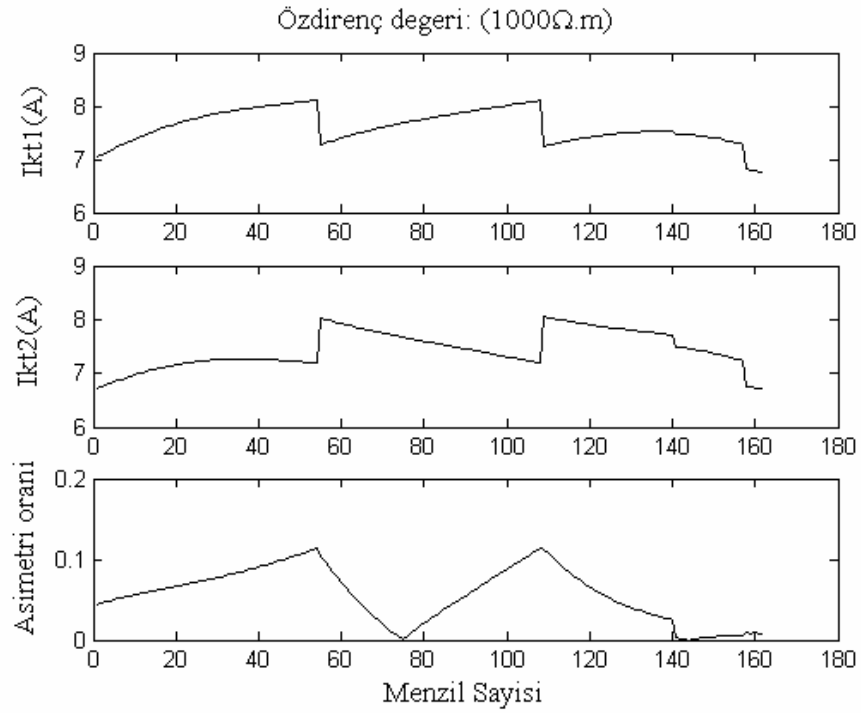
Şekil 5.35 Dengesiz sistemde koruma tellerinin asimetri oranları ($50\Omega.m$)



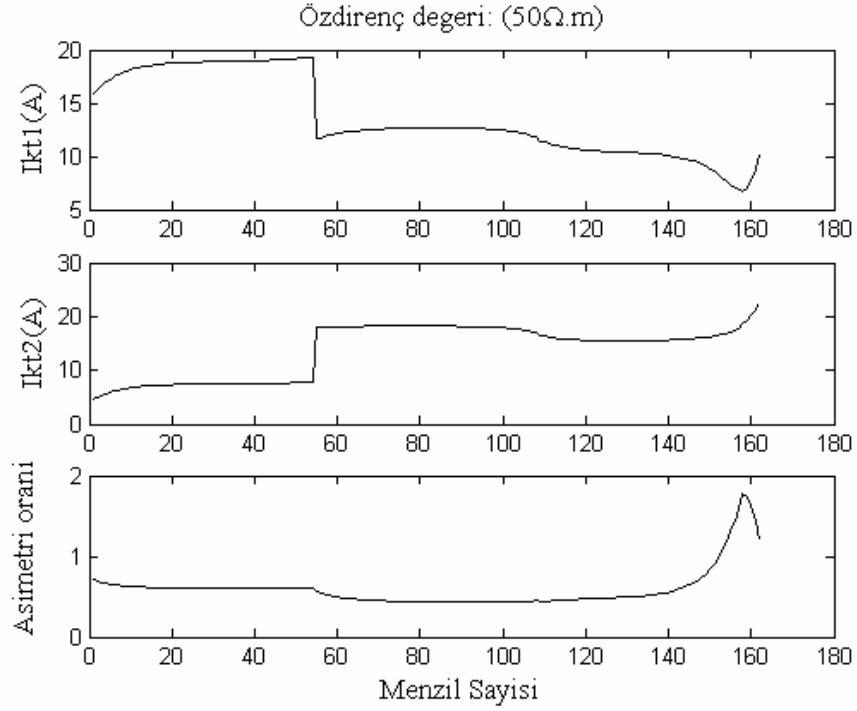
Şekil 5.36 Dengesiz sistemde koruma tellerinin asimetri oranları ($1000\Omega.m$)



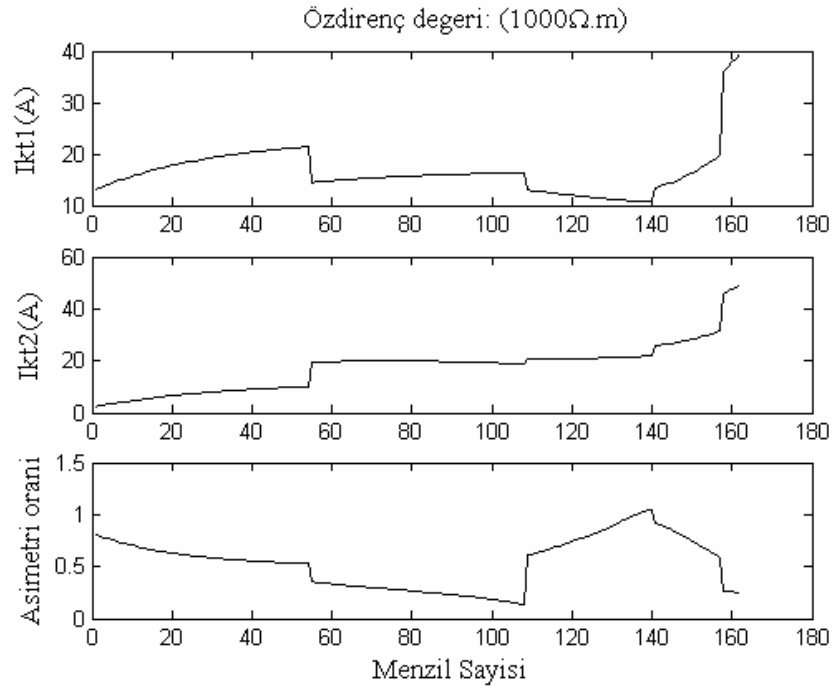
Şekil 5.37 Dengeli non-sinüsoidal sistemde koruma tellerinin asimetri oranları ($50\Omega.m$)



Şekil 5.38 Dengeli non-sinüsoidal sistemde koruma tellerinin asimetri oranları ($1000\Omega.m$)



Şekil 5.39 Dengesiz non-sinüsoidal sistemde koruma tellerinin asimetri oranları (50 Ωm)



Şekil 5.40 Dengesiz non-sinüsoidal sistemde koruma tellerinin asimetri oranları (1000 Ωm)

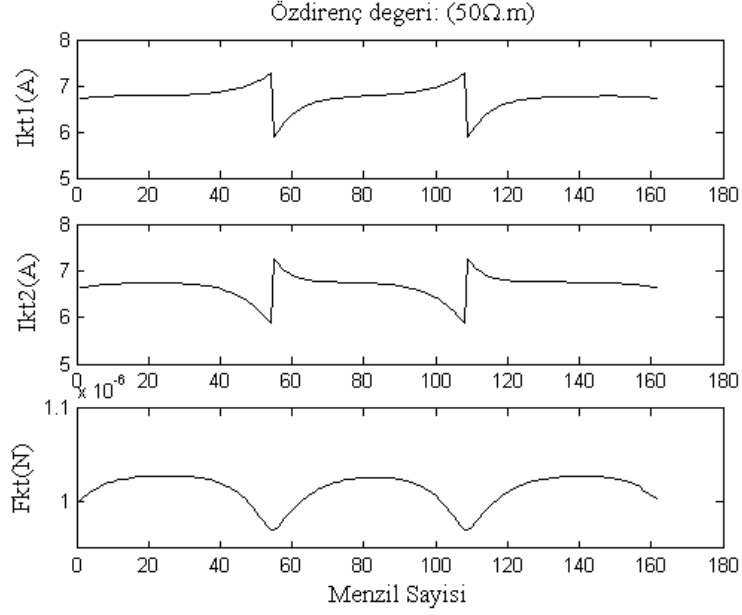
4. Herhangi bir direk açıklığında, 1 ve 2 no.lu koruma telinden geçen akımlar I_1 ve I_2 ise, tellerde oluşacak elektrodinamik kuvvet;

$$F = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot I_{ef}^2}{2 \cdot \pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot I_{ef}^2}{D} \quad (5.4)$$

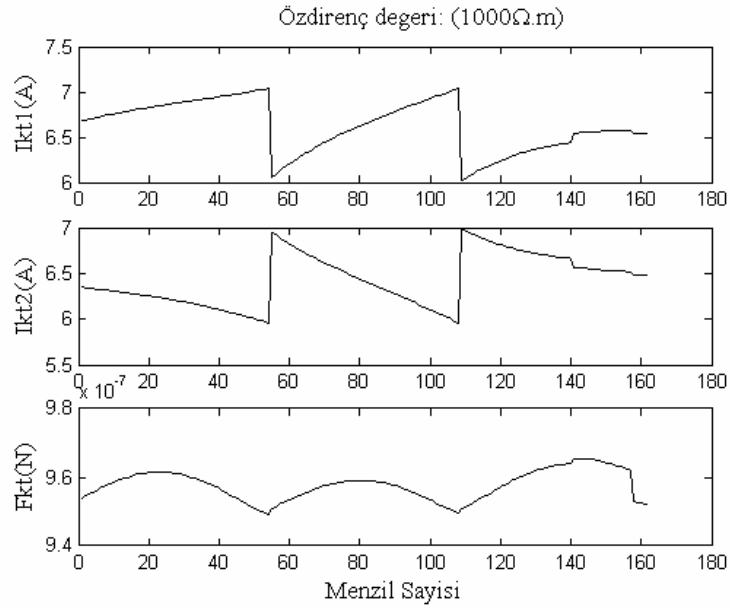
bağıntısıyla hesaplanmaktadır. D koruma telleri arasındaki mesafedir. Koruma tellerinin akımları birbirinden farklı olduğundan;

$$I_{ef} \triangleq \frac{I_{1_{ef}} + I_{2_{ef}}}{2} \quad (5.5)$$

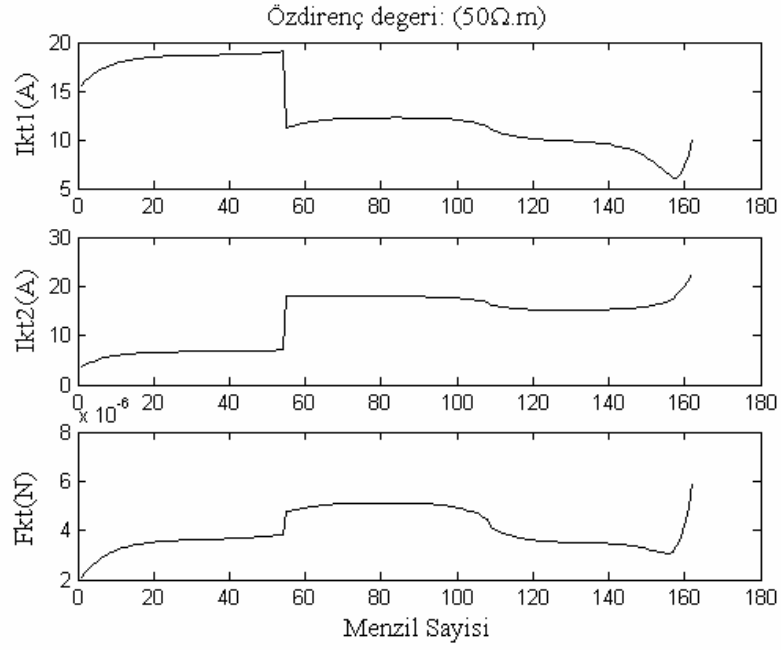
alınmıştır. Koruma tellerinden geçen akımların kendi aralarında oluşturduğu elektrodinamik kuvvetlere ilişkin sonuçlar aşağıda sırasıyla verilmiştir:



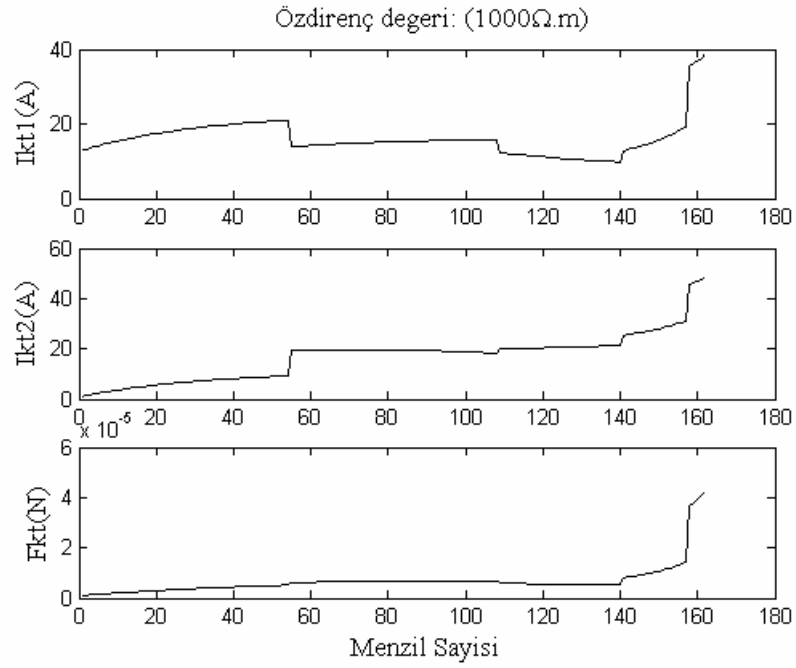
Şekil 5.41 Dengeli sistemde koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler (50 Ωm)



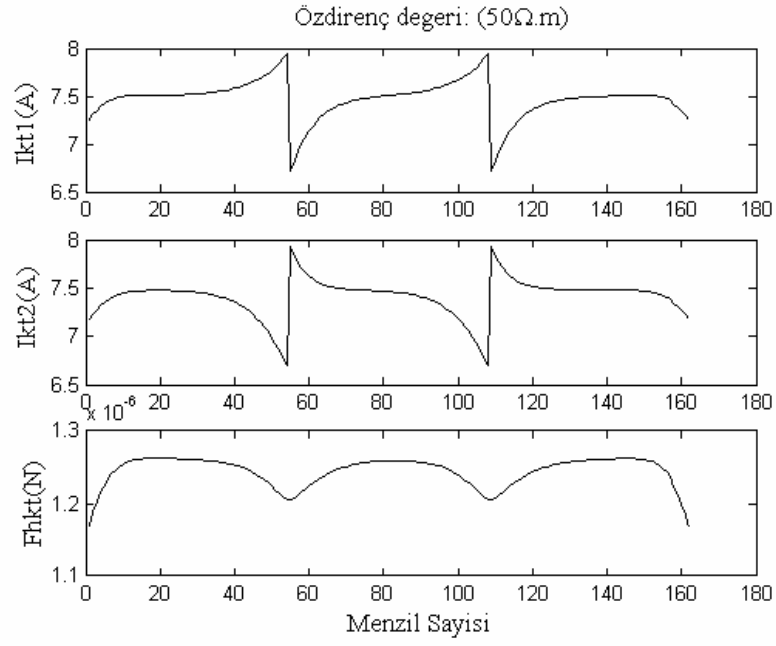
Şekil 5.42 Dengeli sistemde koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler (1000 Ωm)



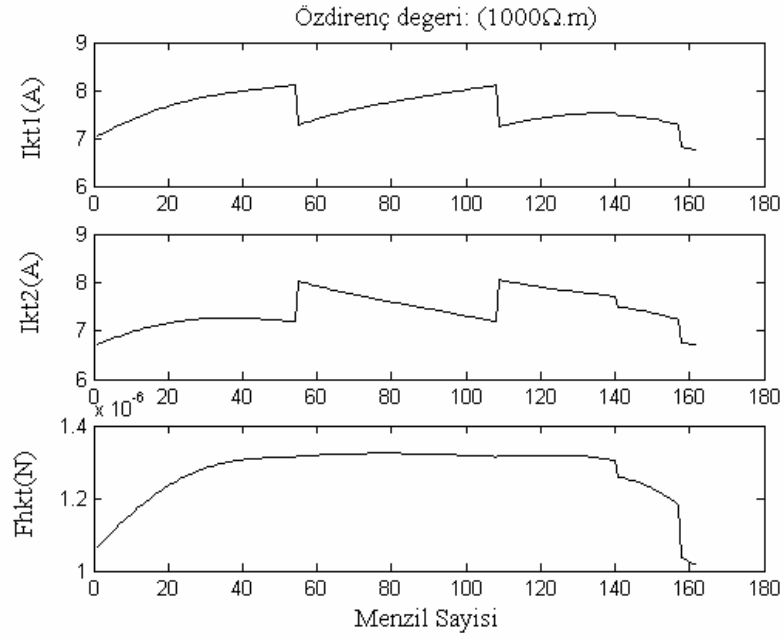
Şekil 5.43 Dengesiz sistemde koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler ($50\Omega.m$)



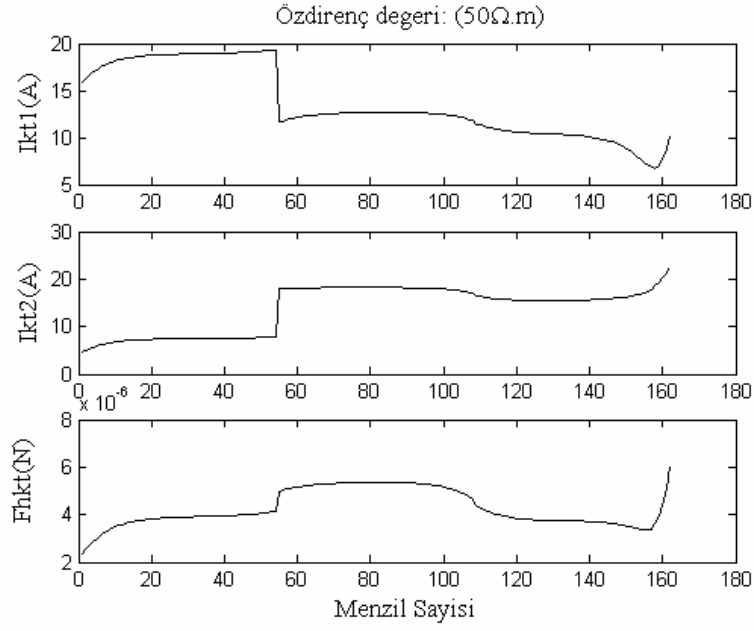
Şekil 5.44 Dengesiz sistemde koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler ($1000\Omega.m$)



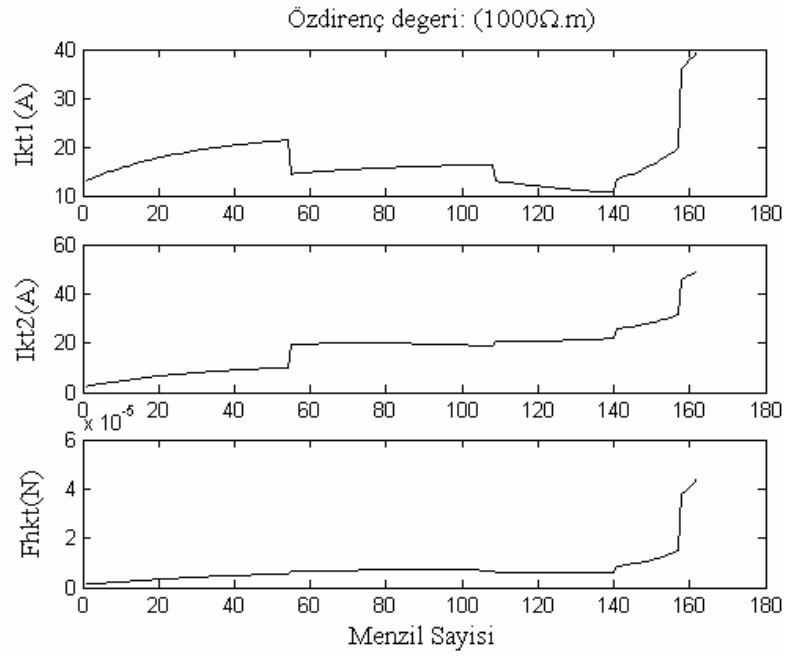
Şekil 5.45 Dengeli non-sinüsoidal sistemde koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler ($50\Omega.m$)



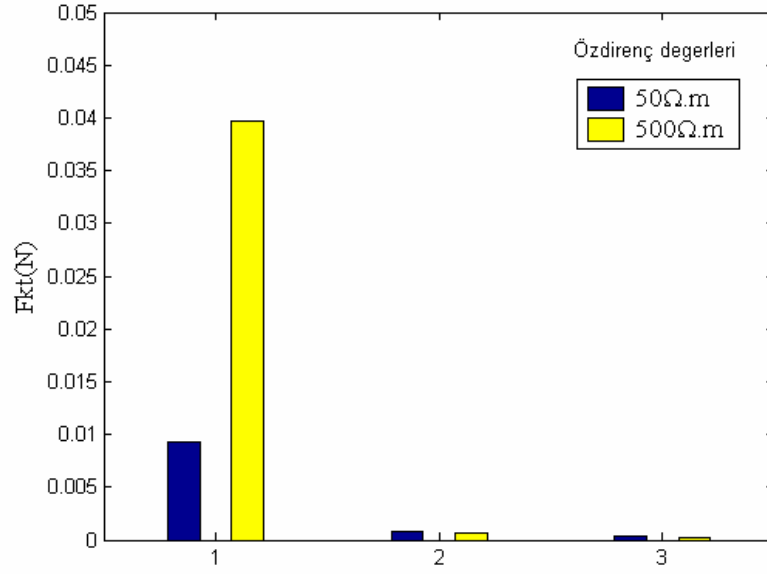
Şekil 5.46 Dengeli non-sinüsoidal sistemde koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler ($1000\Omega.m$)



Şekil 5.47 Dengesiz non-sinüsoidal sistemde koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler (50 Ω m)

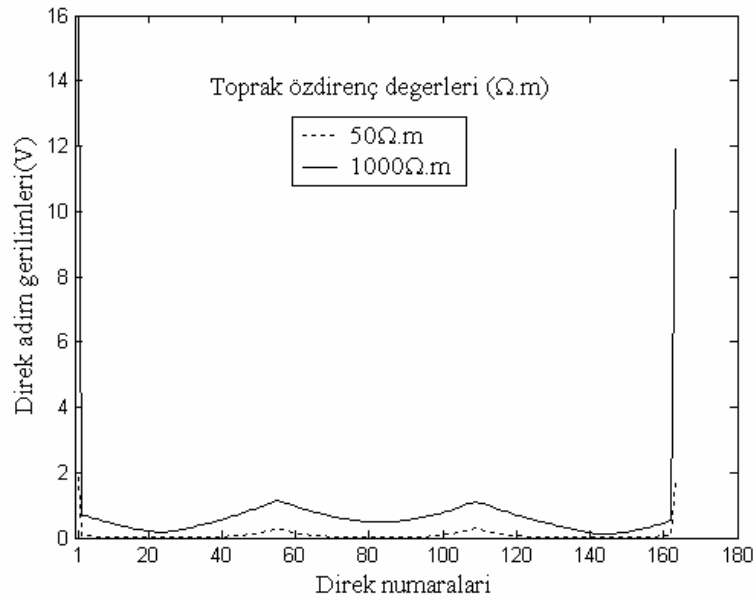


Şekil 5.48 Dengesiz non-sinüsoidal sistemde koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler (1000 Ω m)

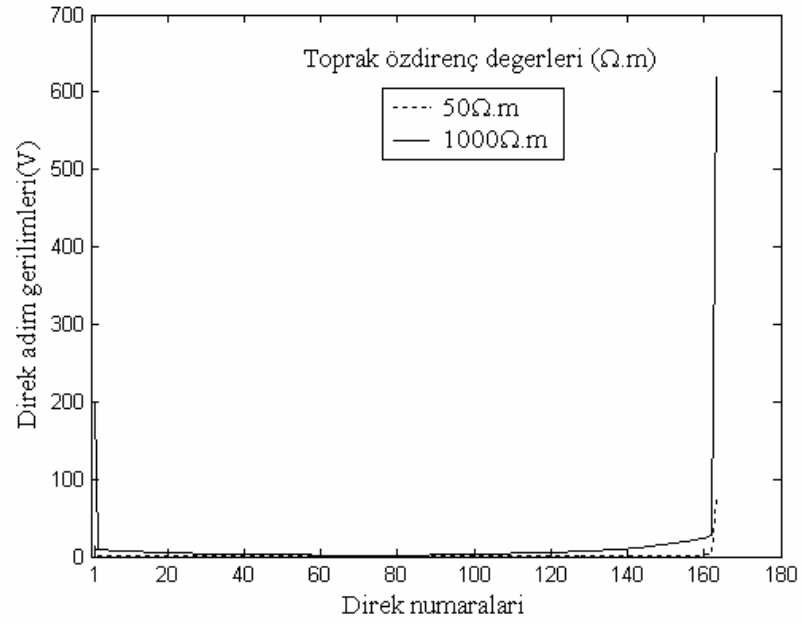


Şekil 5.49 Faz-toprak kısa devre durumunda hat başında (1), hat ortasında (2) ve hat sonunda (3) koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvetler

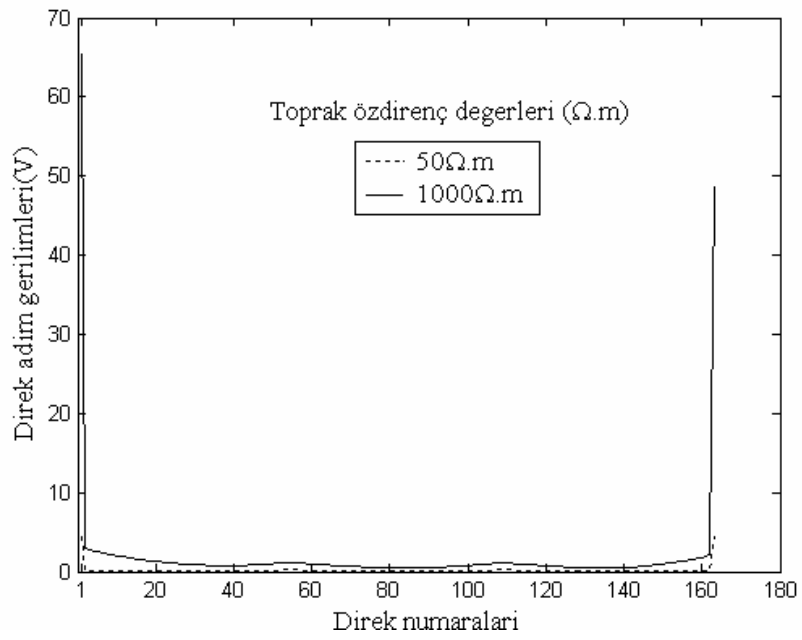
5. İletim hattı direk topraklamalarından akan akımların oluşturduğu adım gerilimlerine ilişkin sonuçlar aşağıda sırasıyla verilmiştir. Bu çalışma için direklerden 10 m uzaklık ve 1 m adım açıklığı öngörülmüştür. Ayrıca, izolatörlerin temiz olduğu varsayılmıştır.



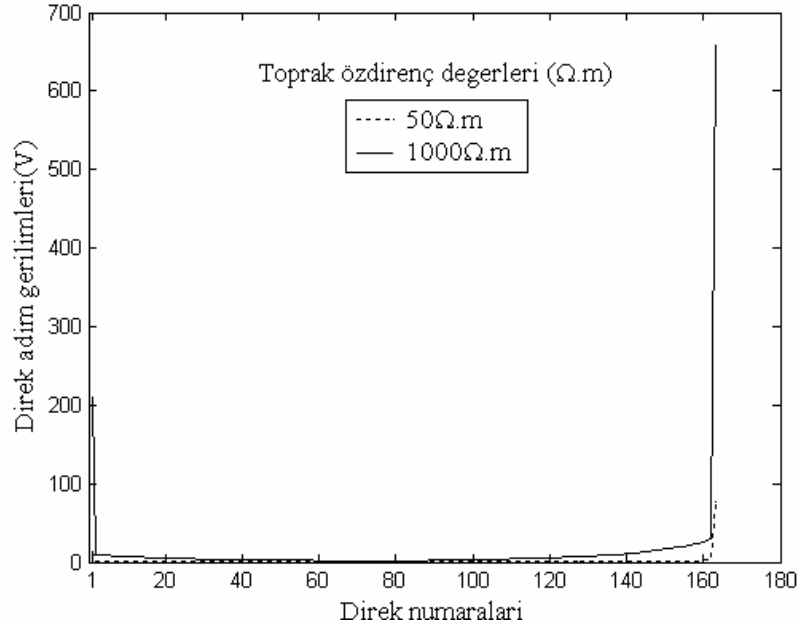
Şekil 5.50 Dengeli sistemde iletim hattı boyunca direk adım gerilimleri



Şekil 5.51 Dengesiz sistemde iletim hattı boyunca direk adım gerilimleri



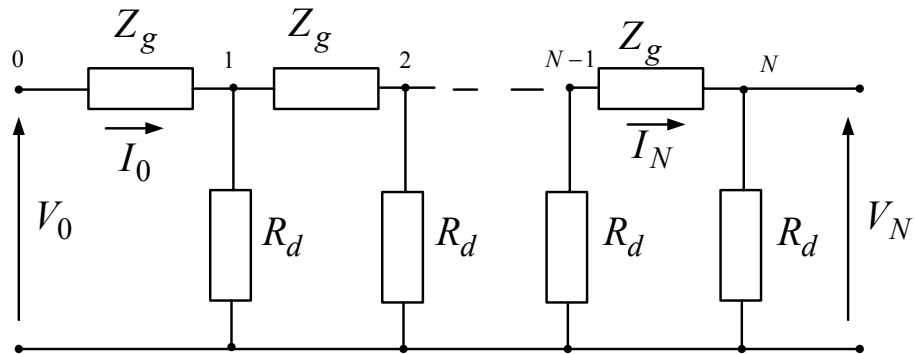
Şekil 5.52 Dengeli non-sinüsoidal sistemde iletim hattı boyunca direk adım gerilimleri



Şekil 5.53 Dengesiz non-sinüsoidal sistemde iletim hattı boyunca direk adım gerilimleri

- Bu çalışmalara ek olarak, sayısal uygulamada yapılan önemli çalışmalardan biri de toprak yolu modelleri için literatürde yer alan çalışmalar ile Modelimizde kullandığımız Matlab/Simulink yazılımını kullanarak yaptığımız çalışmalar şu şekilde verilebilir:

1. Enerji iletim sistemleri için toprak yolu modeli zincir empedans olarak verilmektedir. Zincir empedansa ilişkin elde edilen analitik ifadeler sonsuz sayıda (N) empedans içeren sistemler için verilmektedir. Yapılan çalışmalarda zincir empedansa ilişkin denklemlerin kullanılabilmesi için en az 20 adet (N) direk açıklığına ulaşılması gerekmektedir. Zincir empedans modeli Şekil 5.54’te verilmiştir (Popovic, 1996).



Şekil 5.54 Toprak yolu zincir empedans modeli

Bu modelde hat başı ile hat sonu akım ve gerilimleri arasındaki bağıntılar aşağıdaki gibidir:

$$V_0 = \frac{k^{2N} + k}{k^N + k^{N+1}} V_N + \frac{(k^{2N} - 1) \cdot Z_\infty}{k^N + k^{N+1}} I_N \quad (5.6)$$

$$I_0 = \frac{k^{2N} - k}{(k^N + k^{N+1}) \cdot Z_\infty} V_N + \frac{k^{2N} + 1}{k^N + k^{N+1}} I_N \quad (5.7)$$

$$k = 1 + \frac{Z_\infty}{R} \quad (5.8)$$

$$Z_\infty = \frac{Z_g}{2} + \sqrt{Z_g \cdot R + \frac{Z_g^2}{4}} \quad (5.9)$$

Burada,

V_0 : Hat başı gerilimini,

I_0 :Hat başı akımını,

V_N :Hat sonu gerilimini

I_N :Hat sonu akımını,

Z_g :Koruma teli empedansını,

R :Direk topraklama direncini

Z_∞ :Zincir empedansı

göstermektedir.

Bu modele ilişkin Matlab/ Simulink programı kullanılarak yapılan analizler aşağıda Çizelge 5.13'te verilmiştir. Modelde kullanılan elemanlara ilişkin giriş bilgileri şu şekildedir:

$$Z_g = 0.875 + 0.305i \quad \Omega \quad (24 \text{ elemanlı için})$$

$$Z_g = 0.5 + 0.873i \quad \Omega \quad (44 \text{ elemanlı için})$$

$$R = 20 \quad \Omega$$

$$V_0 = 1000 \text{ V}$$

Çizelge 5.13 Zincir empedansa ilişkin elde edilen analitik ve simülasyon sonuçları

Direk sayısı	Simülasyon sonuçları	Analitik sonuçlar	Bağıl hata(%)
24	$V_0=1000$ V	$V_0=1000$ V	-
	$I_0=208,9$ A		
	$V_N=11,2$ V	$I_0=202,3$ A	3.159
	$I_N=0,56$ A		
44	$V_0=1000$ V	$V_0=1002,3$ V	0.23
	$I_0=202,3$ A		
	$V_N=0,3564$ V	$I_0=202,6$ A	0.148
	$I_N=0,01782$ A		

Zincir empedans modeline yönelik yapılan çalışmalar ile aynı çalışmaların (verilerin) kullanılarak Matlab/Simulink'te uygulamasına ait sonuçlar Çizelge 5.14'de verilmiştir.

Modelde kullanılan giriş verileri şu şekildedir:

$$Z_g = 0.1 + 0.1i \, \Omega \quad (24 \text{ elemanlı için})$$

$$R = 10 + 10i \, \Omega \quad (\text{empedans olarak verilmiştir})$$

$$V_0 = 1000 \text{ V}$$

Çizelge 5.14 Zincir empedansa ilişkin elde edilen analitik ve simülasyon sonuçları

Direk sayısı	Simülasyon sonuçları (Matlab/Simulink)	Analitik sonuçlar (Matlab)	Analitik sonuçlar (Popovic,1996)	Simülasyon sonuçları (Popovic,1996)
24	$V_0=1000$ V	$V_0=999,93$ V	$V_0=1000$ V	$V_N=131,48$ V
	$I_0=672,5$ A			
	$V_N=131,7$ V	$I_0=672,894$ A	$I_0=672,6$ A	$I_N=93,16$ A
	$I_N=93,15$ A			

2. Ayrıca, herhangi bir noktada (örneğin 20. direkte) meydana gelen bir arıza durumunda o noktaya ilişkin empedans değeri arızanın (akımın) olduğu noktadaki direncin (empedansın) geriliminin bu akıma oranıdır. Matlab /Simulink'te uygulanan modele ilişkin sonuçlar Çizelge 5.15'te verilmiştir.

$$Z_g = 0.875 + 0.305i \, \Omega \quad (30 \text{ direk için}) \text{ olup, } 1 \text{ A'lik akım uygulanmıştır.}$$

Çizelge 5.15 Zincir empedansa ilişkin elde edilen analitik ve simülasyon sonuçları

Direnç (Ω), R	Gerilim değerleri (V)	Empedans ölçümü (Ω), 20.direkte Matlab/Simulink	Empedans ölçümü(Ω), 20.direkte Popovic(2001)
10	1,504	1,5036	1,5036
20	2,097	2,0969	2,0969
40	2,868	2,8677	2,8677
80	3,732	3,7322	3,7322

3. Faz-toprak kısa devrelerinde gerilim kaynağı ile arıza noktasına kadar olan iletim hattında arızalı fazın koruma telleri üzerinde endüklediği gerilimlerden dolayı sistemin zincir empedans değeri değişmektedir. Buna ilişkin yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir (Çizelge 5.16).

Kuplaj etkisinin dikkate alındığı zincir empedans ifadesi şu şekilde verilebilir:

$$Z_{\infty, m} = Z_{\infty} \cdot (1 - \mu) \quad (5.10)$$

Çizelge 5.16 Zincir empedansa ilişkin elde edilen analitik ve simülasyon sonuçları

ρ ($\Omega.m$)	$Z_{\infty, m}$ (Ω)	Z_{∞} (Ω)	μ
50	2,4665	3,462	0,2876
100	3,358	4,8	0,301
150	4,0326	5,8275	0,3081
200	4,5957	6,6939	0,3135
250	5,089	7,4581	0,3177
300	5,61786	8,27745	0,32131
350	5,9416	8,7818	0,3234
400	6,32325	9,35167	0,32384
450	6,5098	9,6674	0,32663
500	7,025	10,447	0,33

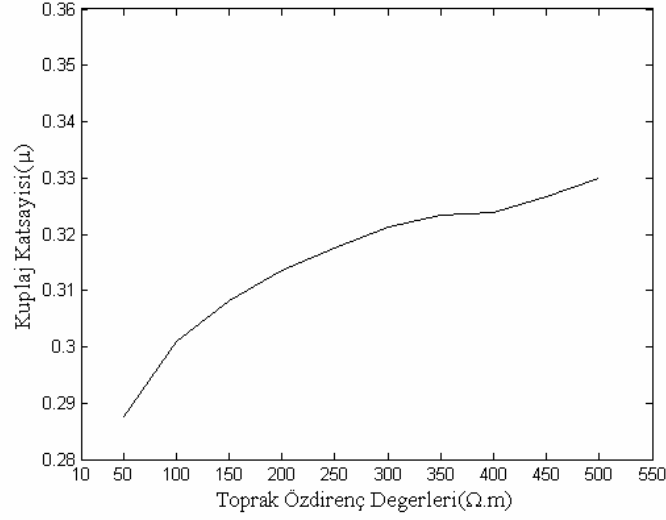
Burada,

$Z_{\infty, m}$: Hat başı ile arıza noktası arasındaki toprak yolunun empedansı (Ω),

Z_{∞} : Arıza noktası ile hat sonu arasındaki toprak yolunun empedansı (Ω),

m ise, kuplaj etkisinin dikkate alındığı empedans anlamını taşımaktadır. Çünkü, hat başı ile arıza noktası arasındaki bölümde, faz ile koruma teli arasında karşılıklı kuplaj bulunmaktadır; arıza noktası ile hat sonu arasında ise, iletim sistemi tek taraflı beslendiğinden, karşılıklı kuplaj söz konusu değildir.

$Z_{\infty,m}$, arıza noktasındaki direk topraklama geriliminin, arıza yerinin hemen solundaki koruma tellerinden akan akımların fazörel toplamına bölümünden elde edilmiştir. Z_{∞} ise, arıza noktasının hemen sağında yer alan koruma tellerinden akan akımların fazörel toplamından elde edilmiştir.



Şekil 5.55 Faz-toprak kısa devresinde özdirenç-kuplaj katsayısı değişimi

Şekil 5.55’te verilen eğriye ilişkin yapılan curve fitting (eğri uydurma) sonucunda elde edilen bağıntı (5.11) aşağıda verilmiştir (Hyams, 1997):

$$\mu = \frac{1}{(85,4758 - 81,3 \cdot \rho^{0,00221})} \quad (5.11)$$

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Enerji iletim sistemlerinin sürekli ve geçici (arızalı) işletme durumlarında toprak yolu analizinin yapılarak iletim hattın direklerinin topraklama gerilimlerinin incelenmesi, hem iletim sistemi hem de insan ve diğer canlıların güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Enerji iletim hattının geçtiği güzergâhlar, her zaman arzu edilen zemin yapılarına sahip olamamaktadır. Güzergâh boyunca yumuşak, sert ve kayalık gibi farklı zemin özelliklerinden dolayı direk topraklama sistemleri yapılırken zorluklarla karşılaşmaktadır. Sert ve kayalık zeminlerde toprağın özgül direnci $1000 \Omega.m$ ve üstüne çıkarak, dengeli yüklenme durumunda bile, direk topraklama gerilimlerinin artmasına yol açabilmekte ve çevredeki insan ve diğer canlıların güvenliğini etkilemektedir.

İletim hatlarında faz iletkenlerinden geçen akımlar sebebiyle koruma telleri üzerinde kuplaj sonucu gerilimler endüklenmekte ve bu gerilimler toprak yolunda akım dağılımı sonucunda direk topraklama gerilimlerini oluşturmaktadırlar. Faz ile koruma teli arasındaki karşılıklı empedans denkleminde zemin yapısı (ρ) da yer almakta ve bunun toprak yolu analizinde ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Toprak yolu analizinde önemli bir parametre olan izolatörlerin çevresel ve atmosferik koşullar sebebiyle kirlenmesi sebebiyle, faz iletkenlerinden direğe (toprağa) kaçak akımlar akmaktadır. Bu akımların seviyeleri düşük olmakla birlikte, çok yoğun kir kaynakların olduğu yerlerde kaçak akımların yanısıra gerilim atlamalarına sebep olabilmektedirler. Bunun için izolatörlerin yoğun kire maruz kaldığı ortamlarda, belli periyotlarla temizlenerek bakıma alınması sistemin ve canlıların güvenliği açısından önemlidir.

Elektrik enerjisi ihtiyacının giderek artması ve tüketicilere yönelik enerji planlaması tam olarak uygulanamaması sebebiyle hatlarda dengesiz yüklenme durumları oluşabilmektedir. Dengesiz akımların oluşturduğu “artık akımlar” da toprak yolu modelinde yer aldığından, özellikle hat sonları ve hat başlarında etkili direk topraklama gerilimlerine neden olabilmektedir. Bunun yanısıra, teknolojiye paralel olarak, üretim ve tüketim yerlerinde kullanılan cihazların lineer karakterli olmaması sebebiyle temel bileşenin yanında harmonik bileşenler de akım ve gerilim hesaplamalarında önemli etkilere sahip olmaktadır. En etkili harmonik bileşenlerden biri olan 3. harmonikte, akım ve gerilimlerin genlik ve faz açıları eşit olduğundan cebirsel olarak toplanmakta ve temel bileşenin toprak yolunda yaptığı etkiden daha fazla etki yapabilmektedir.

Toprak yolu analizinin en önemli kısmı kısa devre analizidir. Yapılan çalışmalarda en yaygın arızaların faz-toprak kısa devre arızaları olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada da faz-toprak

kısa devre analizinde arızanın hat başı, hat ortası ve hat sonunda olma varsayımlarına (opsiyonlarına) ilişkin sonuçlar elde edilmiştir.

Toprak yolu analizinde, tanıtım ve literatür çalışmalarına yönelik giriş bölümü dışında, şu bölüm ve içerikler yer almaktadır:

Tez çalışmasının ikinci bölümünde, enerji iletim sistemlerinin genel tanıtımı çerçevesinde, iletim hatlarında kullanılan faz iletkenleri, koruma telleri, izolatörler ve direklerle ilişkin toprak yolu modeli açısından genel bilgiler verilmiştir. Özellikle modelde incelenen izolatör kaçak akımlarından dolayı, izolatörlere geniş yer verilmiştir. İzolatör kirliliğini etkileyen faktörler, literatür çalışmalarıyla detaylı olarak anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, enerji iletim sistemlerinde sürekli yüklenme durumları olan; dengeli ve dengesiz sinüsoidal ile sinüsoidal olmayan yüklenme durumları anlatılmıştır. Özellikle toprak yolunda etkili olan yük dengesizliği çeşitleri ve harmoniklere yönelik bilgiler genişçe verilmiştir. Ayrıca, geçici rejim durumlarından faz-toprak kısa devre olaylarının oluşumu ve alınabilecek önlemler anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, enerji sistemlerinde topraklama sistemleri genişçe anlatılmıştır. Uygun topraklamanın yapılabilmesi için farklı yöntemler anlatılarak, dokunma ve adım gerilimleri incelenmiştir. Ayrıca, toprak yolu analizi için oluşturulan modellemeye yönelik denklemler ve sayısal bilgiler verilmiştir. Toprak yolu modelinin her işletme durumu için ilgili işletmeye yönelik denklemleri ve modellemeleri açıkça verilmiştir.

Sayısal uygulamanın yer aldığı beşinci bölümde ise, enerji iletim hatları için Matlab/Simulink ortamında oluşturulan toprak yolu modelinin tüm işletme opsiyonlarından elde edilen sonuçlar, şekil ve çizelgelerle verilmiştir.

Enerji iletim sistemleri toprak yolu modeli için yapılan tüm analiz ve simülasyonlara yönelik sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Şekil 5.1’de temiz izolatör için verilen dengeli sisteme ait iletim hattı boyunca direk topraklama gerilim eğrileri, sadece fazların koruma teli üzerindeki kuplaj etkisini göstermektedir. Hattın transpoze edildiği noktalarda (54 ve 108.direkler) direk topraklama gerilimleri en yüksek değerlere çıkmaktadır. Bunun sebebi, transpoze noktalarının sağ ve sol direklerde bulunan kuplaj gerilimlerinden dolayı kapalı gözlerde akan akımların ters işaretli olması ve akım yönlerinin de ters olması sebebiyle iki akımın pozitif olarak toplanması sonucu yüksek akımlar oluşmaktadır. Kuplaj gerilimleri dışında herhangi bir etki olmadığından dolayı, şekiller simetrik özellik taşımaktadır. Ayrıca 50 Ω m’lik öz dirence sahip eğrinin

gerilim değerleri ile 1000 Ω m'lik özdirence sahip eğrinin gerilim değerleri karşılaştırıldığında, 1000 Ω m'lik zeminlerde gerilim değerleri tehlikeli boyutlara ulaşabilmektedir.

2. Şekil 5.2'de hafif kirli izolatör için verilen dengeli sisteme ait eğrilerde, hem kuplaj etkisi, hem de fazlardan direğe(toprağa) doğru akan izolatör kaçak akımların etkiler yer almaktadır. Şekil 5.1'de verilen eğrilere kıyas edildiğinde, simetrisinin biraz bozulduğu ve eğrilerin gerilim değerlerinin biraz daha yükseldiği görülmektedir. Bu da kaçak akımların yavaş yavaş ne derece etkili olduğunu göstermektedir. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te sırasıyla orta ve yoğun kirlenmeye ilişkin verilen eğrilerde ise kuplaj etkisinin kaçak akım etkisine oranla azaldığını ve direk topraklama gerilimlerinin belli noktalarda (hat başı, transpoze noktaları ve hat sonu) yüksek değerlere ulaştığını göstermektedir. Genel görünüme bakıldığında ise, şekillerde hat başından itibaren hat sonuna doğru bir azalma görülmektedir. Bu da hat başında (tek beslemeli iletim hattı) gerilim seviyesinin hat sonuna doğru gerilim düşümlerinden dolayı azalmasına bağlı olarak; izolatörlerden akacak kaçak akımın da azalmasıyla, eğride hat başından hat sonuna doğru düşüş olmaktadır.
3. Şekil 5.5'te temiz izolatör için verilen dengesiz yüklenme durumuna ait eğride, hem kuplaj etkisi, hem de fazların dengesiz akımlarından ortaya çıkan artık akımın hat sonunda akım kaynağı olarak modellenmesinden ötürü, hat sonunda toprak özdirencine bağlı olarak gerilim değerleri yüksek elde edilmiştir. Dengesiz akımların; kuplaj ve transpoze daha etkili olmasından dolayı, 1. ve 2. sonuçlara ilişkin şekillerde gözlenen ani düşüş ve yükseliş burada hissedilemeyecek kadar azdır.
4. Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de farklı kirlenmelere ilişkin verilen eğrilerde; dengesiz akımlardan oluşan artık akımın toprak yolundaki dağılımı yanında kaçak akımların ciddi bir etkisi olmadığı görülmektedir. Dengesiz yüklenmede özdirencin yüksek olduğu eğrilerde ciddi gerilim değerleri oluşmaktadır. Bu da direk topraklama gerilimlerinde zemin karakterinin ne denli önemli olduğunu göstermektedir. Dikkat edilirse, hat başları ve hat sonlarında yüksek değerler oluşmaktadır. Bu da hat başı ve hat sonunda; üretim ve dağıtımın olduğu merkezlerde topraklama sisteminin çok önemli olduğunu göstermektedir.
5. Şekil 5.9'da temiz izolatör için verilen dengeli sinüsoidal olmayan yüklenme durumuna ait eğriler, dengeli sinüsoidal yüklenmeye ilişkin eğrilere benzemektedir. Burada, temel bileşene ek olarak gelen 3. harmonik bileşenin de

etkisiyle gerilim değerleri yüksek elde edilmiştir. Hat sonunda 3. harmonikten dolayı artık akım meydana geldiğinden, hat başı ve hat sonunda direk topraklama gerilim değerleri yüksek olmaktadır. Ayrıca, iletim hattının transpoze edilmesi ve transpozede kuplaj etkisinin etkin olması sebebiyle transpoze edilen yerlerde gerilim değerleri yüksek elde edilmiştir.

6. Şekil 5.10, Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de dengeli sinüsoidal olmayan yüklenme durumuna ait eğriler, farklı kirlenme seviyelerine göre elde edilmişlerdir. Kirlenme seviyesi arttıkça, direk topraklama gerilimleri de artmaktadır. Burada kirlenme faktörünün dengeli sinüsoidal duruma göre daha etkili olması, izolatörlerden akan kaçak akımların hem temel bileşen hem de daha etkin olarak 3. harmonik bileşenlerden oluşmasından kaynaklanmaktadır.
7. Şekil 5.13’ te temiz izolatör ile Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da farklı kirlenme seviyeleri için dengesiz sinüsoidal olmayan yüklenme durumuna ilişkin verilen eğrilerde kirlenmeden dolayı oluşan kaçak akımların, dengesiz akımlardan kaynaklanan kaçak akıma oranla etkisiz olduğu gözlenmektedir. Aynı zamanda, Transpoze ve kuplaj etkileri, dengesiz akımlara oranla daha az olmaktadır. Bundan dolayı, transpoze noktalarında ani yükselmelere rastlanmamıştır.
Toprak öz direnci arttıkça dengesiz akımların yüksek değerlere ulaşabileceği görülmektedir. Dolayısıyla, özellikle hat başı ve hat sonlarında iyi topraklamanın yapılarak güvenliğin sağlanması büyük önem taşımaktadır.
8. Şekil 5.17’de dengeli sinüsoidal için farklı direk mesafelerinde direk topraklama gerilimleri elde edilmiştir. 300 ve 400 m için yapılan çalışmada farklı mesafelerin direk gerilimleri açısından önemli bir etkisi olmamaktadır.
9. Şekil 5.18’da dengeli sinüsoidal ve Şekil 5.19’de dengesiz sinüsoidal için farklı topraklama çubuk sayılarına ilişkin elde edilen eğrilerde, topraklama çubuğunun sayısının artmasıyla direk topraklama gerilimleri önemli oranda düşmektedir. Özellikle dengesiz yüklenme için verilen eğrilerde, dengesizlikten kaynaklanan yüksek gerilim değerlerinin düşürülmesi için önemli bir yol olabileceği açıkça görülmektedir.
10. Toprak yolu için yapılan önemli analizlerden biri de faz-toprak kısa devre analizidir. Burada hattın farklı noktalarında (hat başı, hat ortası ve hat sonu) kısa devre akımının toprak yolunda dağılımı sonucu iletim hattı direklerinde oluşan ani topraklama gerilimleri elde edilmiştir (Şekil 5.20, Şekil 5.21 ve Şekil 5.22). Kısa devre anında fazların koruma telleri üzerindeki kuplaj etkileri, sürekli işletmeye

göre çok yüksek olmaktadır. Modelde kullanılan iletim hattının tek noktadan beslenmesi sebebiyle, arızanın olduğu yerden sonraki kısım akım içermemekte ve kuplaj etkisi olmamaktadır. Hat başından arıza noktasına kadar kuplaj etkisi görülmektedir. Çizelge 5.3'te arıza noktalarına ilişkin direk topraklama gerilimleri verilmiştir. Hat başı için elde edilen eğrilerde arıza noktasında yüksek gerilimler elde edilmiştir. Hat ortasında ve hat sonunda oluşturulan kısa devrelerde bu gerilimler azalmaktadır. Bu da hat başından hat sonuna doğru hattın uzunluğuna bağlı olarak empedans değeri arttığından kısa devre akımlarını azaltıcı yönde etki etmektedir. Özellikle öz direncin yüksek olduğu eğrilerde bu gerilimler daha yüksek çıkmaktadır. Arıza akımının en yüksek çıktığı hat başında terminalin çok iyi topraklamaya sahip olması büyük önem taşımaktadır.

11. Farklı direk mesafelerinin yer aldığı eğrilerde (Şekil 5.23) direkler arası mesafenin önemli bir etkisi olmamaktadır. Fakat, farklı topraklama çubuk sayılarının olduğu eğrilerde ise (Şekil 5.24) önemli sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara ilişkin gerilim değerleri Çizelge 5.4 ve 5.5'te verilmiştir.
12. Yapılan analiz ve simülasyonlarda elde edilen veriler kullanılarak, iletim hatlarının faz iletkenleri ile koruma tellerinden geçen akımların oluşturdukları magnetik alanlar Çizelge 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 ve 5.12'de ayrı ayrı verilmiştir. Bu çizelgelerde sürekli işletme durumları dikkate alınarak ve hattın farklı noktalarındaki magnetik alanlar faz iletkenleri, koruma telli ve bileşke şeklinde verilmiştir. Bu sonuçlara göre, faz iletkenleri yanında koruma tellerinin oluşturduğu magnetik alan değerleri düşük çıkmaktadır. Koruma tellerinde magnetik alanın en yüksek çıktığı yerler dengesizliğin olduğu durumlardır. Bu da hat sonunda oluşmaktadır. Faz iletkenleri ise hat boyunca akımlar değişmediğinden dolayı magnetik alan değeri değişmemektedir. Sehimin en düşük rüzgârlı durumlarda magnetik alan değerleri düşük elde edilmiştir. Bu da magnetik alanda farklı mesafelerin etkilerini göstermektedir.
13. Faz iletkenlerinin, geçen akımların koruma telleri üzerindeki endüklediği gerilimlerden kaynaklanan akımlar, koruma tellerinde güç kayıpları oluşturmaktadır. Şekil 5.25, 5.26, 5.27, 5.28, 5.29, 5.30, 5.31 ve 5.32'de farklı işletme durumları için en düşük (50Ω) ve en yüksek (1000Ω) öz direnç değeri kullanılarak menzil sayısına bağlı olarak kayıpları verilmiştir. Bu şekillerdeki güç kayıplarını oluşturan akımlar da aynı şekil üzerinde verilerek daha açıklayıcı olması hedeflenmiştir. Şekillere dikkat edildiğinde dengeli işletmede öz direnç

değeri düşüken daha fazla güç kaybı oluşmaktadır. Bu da yüksek öz direnç durumunda koruma tellerinin empedansının artmasıyla akım azalmakta ve buna bağlı olarak güç kayıpları da azalmaktadır. Dengesiz işletme durumunda ise tam tersi olmaktadır. Yüksek öz direnç durumunda daha fazla güç kayıpları oluşmaktadır. Bu da dengesiz faz akımlarının koruma telleri üzerinde oluşturduğu kuplaj etkisinin dengeli duruma göre daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle sinüsoidal olmayan durumlarda daha yüksek değerler çıkmaktadır.

14. Koruma tellerinden geçen akımlar, faz iletkenleriyle koruma telleri arasındaki mesafelerin farklı olması sebebiyle aynı değerde olmamaktadır. Bunun sonucu olarak koruma tellerinde farklı akımlar akarak asimetriğe neden olmaktadır. Bunlara yönelik yapılan çalışmalar, Şekil 5.33, 5.34, 5.35, 5.36, 5.37, 5.38, 5.39 ve 5.40'ta verilmiştir. Asimetri oranları 1.00 per unit cinsinden verilmiştir. Asimetriğin en çok olduğu yerler dengesiz işletme durumlarıdır.
15. Birbirine yakın iki noktadan geçen akımlar arasında, aralarındaki mesafeye bağlı olarak elektrodinamik kuvvet meydana gelmektedir. Koruma tellerinden geçen akımların oluşturduğu elektrodinamik kuvvetler Şekil 5.41, 5.42, 5.43, 5.44, 5.45, 5.46, 5.47 ve 5.48'de verilmiştir. Dengeli durumda öz direnç düşük iken yüksek değerler çıkarken, dengesiz durumda bunun tersi olmaktadır. Faz toprak kısa devresi için Şekil 5.49'da verilen çubuklu elektrodinamik kuvvet değerleri sürekli işletmeye oranla çok yüksek çıkmaktadır. Özellikle hat başında ve yüksek öz dirençli durumda en yüksek değerlere ulaşılmaktadır.
16. Toprak yolu analizinde yapılan çalışmalardan biri de, adım gerilimleridir. Özellikle insan ve diğer canlıların güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Sürekli işletmenin tüm opsiyonları için adım gerilimleri elde edilerek, Şekil 5.50, 5.51, 5.52 ve 5.53'de verilmiştir. Bu şekillerde belirgin olarak hat başları ve hat sonlarında yüksek değerler elde edilmiştir. Özellikle dengesiz sinüsoidal çalışmada en yüksek akım değerleri oluşmaktadır.
17. Bunlara ek olarak, sayısal uygulamada yapılan analizlerden biri de, Matlab/Simulink programı ile toprak yoluna ilişkin literatürde güncelliğini koruyan analitik çözümler karşılaştırılmıştır. Bunun sonucu olarak, tez çalışmasında yapılan çalışmaların orijinalliği ve bilimselliği ortaya konulmuştur. Buna ilişkin yapılan çalışmalar Şekil 5.54'te verilen zincir empedans modelinin sonuçları Çizelge 5.13 ve 5.14'te verilmiştir. Ayrıca, modele ilişkin yapılan başka bir analiz de, bir noktaya akım uygulanarak o noktadan ölçülen empedans değeri ile analitik

olarak bulunan empedans değeriyle karşılaştırılmasıdır (Çizelge 5.15). Bu çalışmada bulunan sonuçlar, literatür çalışmaları ile benzer (aynı) olduğu görülmektedir .

18. Faz toprak kısa devre arızası durumunda faz iletkenlerinin koruma telleri üzerinde endüklediği gerilimlerden dolayı, zincir empedans değeri de değişmektedir. Buna yönelik yapılan analiz ve simülasyonlar Çizelge 5.16’de verilmiştir. Bu çizelgede yer alan değerler kullanılarak, kuplaj katsayısı (η) eğrisi elde edilmiştir (Şekil 5.55). Bu eğriye ilişkin $\eta = f(\rho)$ denklemi elde edilerek, farklı ρ durumunda kuplaj katsayısı bulunabilir ve buna bağlı olarak kuplaj etkisinin olduğu durumlarda zincir empedans hesaplanabilir.

Bu tezde yapılan çalışmalar ve ortaya konulan sonuçlar ışığında getirilen yenilikler aşağıda özetlenmiştir:

1. Enerji iletim hatlarında kullanılan zincir izolatörlerin kirlenme analizleri literatürde tek elemana veya zincire yönelik olarak yapılmasına karşılık, bu çalışmada bir enerji iletim hattı boyunca (163 adet direkte) izolatör kirliliği analiz edilmiştir. TS EN 60507 standardında (1999) verilen kirlenme dereceleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir.
2. Matlab/ Simulink programı genellikle küçük ölçekli (az sayıda düğüm ve çevre içeren) elektrik devreleri için kullanılmasına karşılık, bu çalışmada 163 adet gözden oluşan ve magnetik kuplajlar içeren büyük ölçekli bir elektrik devresi olarak modellenen enerji iletim hattına uygulanmıştır.
3. Enerji iletim hatlarının sürekli işletme analizlerini genellikle güç akışları oluşturmaktadır. Literatürde dengeli işletmede, koruma telleri ile direk topraklama dirençlerinden oluşan ve kısaca “ toprak yolu” adı verilen devre üzerindeki akım dağılımı üzerinde durulmamaktadır. Bu çalışmada ise, dengeli işletme için de olsa toprak yolunun parametrik (ρ ’ya bağlı) simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu çerçevede;
 - Direkt topraklama gerilimleri,
 - Toprak yolundaki akım dağılımı,
 - Toprak yolundaki güç kayıpları ($I^2 R$),
 ortaya konulmuştur.
4. Dengeli yüklenme ve üniform kirlilik için her üç fazın zincir izolatör kaçak akımlarının fazör toplamının sıfır olacağı açıktır. Bu çalışmada, faz iletkenlerinin

üniform olmayan kirlenme varsayımı altında toprak yolu bulgularının nasıl değiştiği gösterilmiştir.

5. Enerji iletim hatlarının geleneksel işletme analizleri “dengeli sinüsoidal yüklenme” için yapılmasına karşılık, bu çalışmada toprak yolu analizi için;

- Dengeli sinüsoidal yüklenme
- Dengesiz sinüsoidal yüklenme
- Dengeli sinüsoidal olmayan yüklenme
- Dengesiz sinüsoidal olmayan yüklenme

olmak üzere, “dört işletme varsayımı” göz önüne alınmıştır. (Bu varsayımlar, “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği” uyarınca analize dâhil edilmiştir.)

6. Enerji iletim hatlarının oluşturduğu magnetik alan hesabı, literatürde yalnızca faz iletkenleri içerikli verilmektedir. Bu çalışmada ise, koruma tellerindeki akım dağılımı elde edildiğinden, belirli bir noktada hem faz iletkenlerinden hem de koruma tellerinden kaynaklanan magnetik alan büyüklükleri hesaplanmıştır.

7. Hem faz hem de koruma tellerinden kaynaklanan magnetik alan değerleri (H ; A/m) ;

- Dengeli sinüsoidal yüklenme,
- Dengesiz sinüsoidal yüklenme,
- Dengeli sinüsoidal olmayan yüklenme,
- Dengesiz sinüsoidal olmayan yüklenme,

için olmak üzere ayrı ayrı hesaplanmıştır.

8. Hem faz hem de koruma tellerinden kaynaklanan magnetik alan değerleri;

- Ortam sıcaklık dereceleri,
- Ortamın buzlanma özelliği,
- Ortamın rüzgar potansiyeli,

gibi meteorolojik parametrelere bağlı olarak da ortaya konulmuştur.

9. Direk topolojisindeki simetri nedeniyle her iki koruma telinin aynı elektriksel büyüklüklere sahip olmadığı; faz akımlarının faz açılarındaki 120’şer derecelik öteleme nedeniyle, koruma tellerinden farklı akımların geçtiği gösterilmiş ve “asimetri oranı” tanımlanmıştır.

10. Literatürdeki geleneksel analizlerde, faz toprak kısa devresi durumunda demeti oluşturan iletkenler arasındaki elektrodinamik kuvvet hesabı yapılmaktadır. Bu çalışmada ise koruma telleri arasındaki elektrodinamik kuvvet ortaya konulmuştur.

Koruma telleri arasındaki kuvvet (F);

- Dört işletme varsayımı,
- Faz-toprak kısa devresi durumu,
- Toprak özgül direnci,

bağlamında ayrı ayrı hesaplanmış, faz-toprak kısa devre arızasının yerine bağlı olarak en büyük elektrodinamik kuvvetin değeri elde edilmiştir.

11. Literatürdeki geleneksel analizlerde gerek dokunma gerilimi gerekse adım gerilimi, genellikle faz-toprak kısa devresi durumunda seçilen j. direk için ayrı olarak incelenmektedir. Bu çalışmada ise, dört işletme varsayımı için enerji iletim hattının tamamını kapsayacak şekilde adım gerilimlerinin hesabına yer verilmiştir.
12. Literatürde toprak yolu zincir empedans (Z_{∞}) bağıntısı, koruma teli ile faz iletkeni arasındaki karşılıklı kuplaj etkisini içermemekte, yalnızca iki direk arasındaki koruma telinin empedansını (Z_g) ve direklerin topraklama dirençlerini (R_d) içermektedir. Bu çalışmada ise, faz-toprak kısa devresi halinde, simülasyon yardımıyla “kuplaj etkisi” ortaya konulmuş ve ardından kuplajın toprak özgül direnci ile değişimine yönelik ampirik bir bağıntı elde edilmiştir (Denklem 5.11).
13. Bu çalışmada ortaya konulan tüm simülasyonlar, gerçekleştirilen MATLAB M-File yazılımı ile SIMULINK devresinin birlikte çalıştırılması sonucu elde edilmiş bulunmaktadır. Simülasyonların doğruluğunu göstermek üzere;
 - Analitik formülasyondan (denklem (5.6), ve (5.7))
 - IEEE Makale sonuçlarından (Popovic, 1996; ve Popovic, 2001) yararlanılmıştır. Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’den görüleceği üzere, çalışmadaki simülasyon sonuçları ile,
 - Popovic, 1996
 - Popovic, 2001

bulgularının birbiriyle örtüştüğü gözlenmektedir.

Sayısal uygulamaya yönelik elde edilen sonuçlardan, iletim hatları için bugün ve geleceğe yönelik aşağıdaki önerilerden söz edilebilir:

- Enerji iletim sistemleri dengeli sinüsoidal yüklenmede, toprak yolu analizinde hat başı, hat sonu ve transpoze yapılan noktalarda (direklerde) direk topraklama gerilimleri yüksek değerlere çıkmaktadır. Özellikle toprak öz direncinin yüksek ve izolator kirliliğinin yoğun olduğu yerlerde tehlikeli gerilim değerlerine ulaşılmaktadır. İletim hattının bu noktalarında yapılan/yapılacak topraklamalarda zemin yapısının iyi

incelenerek düşük öz direnç ortamının sağlanması ve mevsimsel farklılıklardan dolayı belli periyotlarla bu topraklamaların ölçülerek bakımlarının yapılması önem taşımaktadır.

- Dengesiz yüklenme durumunda elde edilen eğrilerde, hat başları ve hat sonlarında topraklama gerilim değerleri ciddi boyutlara ulaşmaktadır. Enerji iletim hatlarında temas gerilimi maksimum 75 Volt olabilmektedir (Bayram, 2004). Topraklama gerilimleri, yüksek öz dirence ($1000 \Omega m$) sahip zeminlerde 800 Volt değerlerine çıkabilmekte ve ne derece tehlikeli gerilimler olduğu görülmektedir. Düşük öz dirence ($50 \Omega m$) sahip zeminlerde ise, bu değer hat sonu için yaklaşık 100 Volt'tur. Burada (hat sonunda) topraklama ağ direnci ($0,02 \rho$) olarak verildiğinden; bu direnç 1Ω değerinde olacaktır. Bu direncin $0,5 \Omega$ olması için toprak öz direncin $25 \Omega m$ olması gerekmektedir. Bu takdirde, maksimum gerilime nazaran daha düşük (50 Volt) gerilim değeri oluştuğundan daha uygun olacaktır. Diğer taraftan, dengesiz akımların oluşturduğu artık akımın toprak yolunda dağılıma başladığı yerden (ağ topraklamasından) zincir empedans özelliği taşıyan toprak yoluna bakıldığında, ağ topraklaması ne kadar iyi yapılırsa, toprak yolunda bulunan diğer direklerde de daha düşük akım ve gerilimler oluşacaktır.
- Dengeli ve dengesiz-sinüoidal olmayan yüklenme durumlarında elde edilen eğrilerde hat başı, hat sonu ve transpoze edilen yerlerde, sinüoidal yüklenme durumuna göre daha yüksek topraklama gerilimleri elde edilmiştir. Burada, harmonik bileşenin, etkili olduğunu göstermektedir. İletim hatlarında harmonik analizi yapılarak, harmoniklerin filtrelenerek etkilerinin azaltılması, toprak yolunda oluşan gerilimlerin azalmasını sağlayacaktır.
- Geçici rejim (faz-toprak kısa devresi) için yapılan çalışmalarda, elde edilen direk topraklama gerilimlerinin azaltılabilmesi için, iletim hattının tüm direklerinin çok iyi topraklanması gerekmektedir. Çünkü, arızanın nerede olacağı belli olamamaktadır. Özellikle, hat empedansının en düşük olduğu hat başında arıza olması durumunda çok yüksek akım ve gerilimler oluşmaktadır. Bu da hem sistemde donanım ve izolasyon problemlerine hem de çevredeki insan ve diğer canlıların ölümlerine sebep olabilmektedir. Bunun için hat başında yapılacak topraklamanın çok büyük önem taşıdığı görülmektedir.
- Sürekli işletme ve arıza durumları için verilen önerilere ek olarak; direk topraklamalarında öngörülen topraklama direnci ($<20 \Omega$)'nin mümkün olduğunca daha düşük değerlere çekilmesi (ek çubukların konulması, düşük öz dirençli

malzemenin kullanılması gibi) her durum için daha güvenli toprak yolu oluşturacaktır.

KAYNAKLAR

Abdel-Salam, M., Anis, H., El-Morshedy, A. ve Radwon, R., (2000) “High-Voltage Engineering Theory and Practice”, Marcel Dekker.

Abdus Salam, Md., Aamer, K., Hamdan, A. ve Hamdan, N., (2003) “Study the Relationship between the Resistance and ESDD of a Contaminated Insulator-A Laboratory Approach”, Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 3:1032-1034

Abdus Salam, M., Ahmad, H., Fuad, S.A., Ahmad, A.S., Tamsir, T., Piah, M.A.M., Buntat, Z., Saadom, Z. ve Budin, R., (2000) “Development of Mathematical Relation between ESDD and Wind Velocity for a Contaminated Insulator in Malaysia”, Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 1:379-382

Ahmad, A.S., Ghosh, P.S., Aljunid, S.A. ve Ahmad, H., (2002) “Estimation of Salt Contamination Level on the High Voltage Insulators Surfaces During Rainy Season Using Artificial Neural Network”, IEE, Fifth International Conference on Power System Management and Control, 488:303-308.

Ahmad, A.S., Ahmad, H., Salam, M.A., Tamsir, T., Buntat, Z., Mustafa, M.W., (2000), “Prediction of Salt Contamination on High Voltage Insulators in Rainy Season Using Regression Technique”, 3:184-189

Ahmad, A.S., Ghosh, P.S., Aljunid, S.A. ve Ahmad, H., (2002) “Modeling of Various Meteorological Effects on Contamination Level for Suspension Type of High Voltage Insulators Using ANN”, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference, 2:1030-1035

Alış, H., (1997), “İzolatör Kaçak Akımlarının ve Yüzeysel Atlama Gerilimlerinin Ortam Faktörlerine Bağımlılığı”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.

Anderson, P.M., (1973), “Analysis of Faulted Power Systems”, The Iowa State University Press, USA.

ANSI/IEEE, “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System”, Std 81-1983.

ANSI/IEEE, “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”, Std 80-1986.

Arrillage, J., Smith, B.C., Watson, N.R. ve Wood, A.R., (1997), “Power System Harmonic Analysis”, John Wiley&Sons.

Awad, H., Svensson, J. ve Bollen, M., (2004) “Mitigation of Unbalanced Voltage Dips Using Static Series Compensator”, IEEE Trans. on Power Electronics, 19(3):837 – 846

Bayram, M., ve İlisu, İ., (2004), “Elektrik Tesislerinde Güvenlik ve Topraklama”, TMMOB EMO

Bayraş, B., (1993), “Enerji Sistemlerinde Toprak Yolundaki Akım Dağılımı ve Optimal Topraklama Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, İstanbul.

Caramia, P., Verde, P. ve Menniti, D., (1996), "Evaluation of the Losses in Unbalanced Three-Phase Power Systems", Electrotechnical Conference MELECON '96., 8th Mediterranean, 2:715 – 720.

Carpenter, R.B. ve Lanzoni J.A., (1997), "Designing for a Low Resistance Earth Interface (Grounding)", LEC

Carpinelli, G., Proto, D., Di Perna, C., Varilone, P. ve Verde, P., (2004), "Probabilistic Short-Circuit Analysis in Unbalanced Three-Phase Power Systems" , International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 807 – 812.

Carpinelli, G., Varilone, P., Di Vito, V. ve Abur, A., (2005), "Capacitor Placement in Three-Phase Distribution Systems with Nonlinear and Unbalanced Loads" IEE Proc. on Generation, Transmission and Distribution, 152(1):47 – 52.

Cebeci, M. ve Şenpınar, A.,(2003), "Yüksek Gerilim İzolatörlerinde Sızıntı Akımlarına Dayalı Bir Görüntü ve Uyarı Cihazının Tasarımı", F.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15(2): 183-191.

Chan, S.M., (1993) "Computing Overhead Line Parameters", IEEE, Computer App. in Power, 6(1):43-45

Cividino, L., (1992), "Power Factor, Harmonic Distortion, Causes, Effects and Considerations", Telecommunications Energy Conference, INTELEC '92., 14th International : 506 – 513.

Çakır, H., (1986), "Elektrik Güç Sistemleri Analizi", Nesil Matbaacılık Yayıncılık.

Çakır, H., (1989), "Enerji İletimi", Yıldız Üniversitesi, İstanbul.

Dengiz, H.H., (1991) , "Enerji Hatları Mühendisliği", Kardeş Kitabevi.

Devendranath, D., Channakeshava, ve Rajkumar, A.D.,(2002), "Leakage Current and Charge in RTV Coated Insulators under Pollution Conditions", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 9(2): 294 – 299.

Dlala, E.A., (2004), "Power System Harmonics", (by Arrilage and Watson).

Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S. Ve Beaty, H.W., (2002) "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill

El Mofty, A.ve Youssef, K., (2001) "Industrial Power Quality Problems" , 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution Part 1 (IEEE Conf. Publ No. 482), 2:5

El-Hawary, M., (1995) "Electrical Power Systems", IEEE Press

El-Hawary, M.E., (2000) "Electrical Energy Systems", CRC Press

Ellis, R.G., (1996) "Harmonic Analysis of Industrial Power Systems" , IEEE Trans. on Industry Applications, 32(2):417 – 421

Emanuel, A.E. ve Czarnecki, L.S., (1990), "Power Components in a System with Sinusoidal and Nonsinusoidal Voltage and/or Currents", IEE Proc. 137(3): 194-196

"Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği", Sayı:24500

EPDK, (2003) "Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği"

EPDK, (2004) "Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenirliliği ve Kalitesi Yönetmeliği", Sayı:25639

Fehr III, R., (2002) "Industrial Power Distribution", Prentice Hall

Fierro-Chavez, J.L.,(1998) "Online Leakage Current Monitoring of 400 kV Insulator Strings in Polluted Areas [reply]" IEE Proc.on Generation, Transmission and Distribution, 145(4):480

Garcia, R.W.S., Bosignoli, R., Gomes, E. ve Jr., (1991) "Influence of the Non-Uniformity of Pollution Distribution on the Electrical Behavior of Insulators", Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, (1):342-345

Gonos, I.F., Topalis, F.V. ve Stathopolos, I.A.,(2002) "Genetic Algorithm Approach to the Modelling of Polluted Insulators" IEEE Proc. on Generation, Transmission and Distribution, 149(3): 373 - 376

Grigsby, L.L., (2001) "Electric Power Engineering Handbook", CRC Press

Heydt, G.T., Kish, D.J., Holcomb, F. ve Hill, Y., (1991), "A Methodology for Assesment of Harmonic Impact and Compliance with Standards for Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, 6(4): 1748-1754

Hyams, D., (1997) "CurveExpert Version 1.34", Microsoft Corporation

IEEE, "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems", Std 142-1991

İnan, A., (1999) "Lineer Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Kayıpların Yapay Sinir Ağları ile Analizi ve Filtre Maliyetlerinin Kestirimi", Doktora Tezi, (1999), Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

İnan, A., (2004) "Matlab ve Programlama", Papatya Yayıncılık

Kanashiro, A.G. ve Burani, G.F., (1996) "Leakage Current Monitoring of Insulators Exposed to Marine and Industrial Pollution", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1:271-274

Khalifa, M., El-Morshedy, A.,Gouda, O.E. ve Habib, S.E.-D.,(1988) "A New Monitor for Pollution on Power Line Insulators. II. Simulated Field Tests", IEEE Proc.on Generation, Transmission and Distribution, 135(19):24-30.

Kocatepe, C., Yumurtacı, R., Uzunoğlu, M., Karakaş, A. ve Arıkan, O., (2003) "Elektrik Tesislerinde Harmonikler", Birsen Yayınevi

Ledwich, G. and George, T.A., (1994) "Using Phasors to Analyze Power System Negative Phase Sequence Voltages Caused by Unbalanced Loads", IEEE Trans. on Power Systems, 9(3):1226 – 1232

Macey, R.E ve Vosloo, W.L., (1994) "Outages of the Brand-Se-Baai 132 kV Feeder-The Insulator problem Wasn't", Mace Electrical Technologies, Eskom Enterprises, TSI, SAHVEC.

Mahmoud, F. ve Azzam, R.M.A., (1997) "Optical Monitor for Contamination on HV Insulator Surfaces", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 4(1): 33-38

Martinon, J., Fauquembergue, P., Lachaume, J. ve Meunier, M., (1996), "A New Statistical Approach of Harmonic Propagation in Transmission Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, 11 (2): 1032-1038

McGranaghan, M., (1998) "Overview of the Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems-IEEE P519A", Proc. on 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 1: 462 - 469

Mendis, S.R.ve Gonzales, D.A., (1990) "Harmonic and Transient Overvoltage Analyses in Arc Furnace Power Systems", Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, Conference Record. Papers Presented at the 1990 Annual Meeting:42 – 50

Meng, Q., He, J., Dawalibi, F.P. ve Ma, J., (1999) "A New Method to Decrease Ground Resistances of Substation Grounding Systems in High Resistivity Regions", IEEE Trans on Power Delivery, 14(3):911-916

Moshref, A. ve Khan, S., (1992) "Harmonic Analysis for Industrial Power Systems Computation Techniques and Filtering", Pulp and Paper Industry Technical Conference, Conference Record of 1992 Annual:115 – 121

Nahman, J., (1998) "Zero Sequence Currents and Potentials During Line Tower Earth Faults in the Vicinity of Power Stations", Electric Power System Research, 44:183-188

Nahman, J., (2001) "Compact Models of Nonuniform Lines for Earthing-System Analysis", IEE Proc on Generation, Transmission and Distribution, 148(6):579-582

Olejniczak, K.J. and Heydt, G.T., (1989) "Basic Mechanisms of Generation and Flow of Harmonic Signals in Balanced and Unbalanced Three-Phase Power Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, 4(4):2162 – 2170

Popovic, L.M., (1996) "Practical Method for Evaluating Ground Fault Current Distribution in Station Supplied by an Unhomogeneous Line", IEEE Proc Transmission and Distribution Conference, 314-319

Popovic, L.M., (2000) "Efficient Reduction of Fault Current Through the Grounding Grid of Substation Supplied by Cable Line", IEEE Trans on Power Delivery, 15(2):556-561

Popovic, L.M., (2001) "Analytical Expression for Voltage Drops on Return Paths of Ground-Fault Current when Faults Occur in Transmission Line", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, (3):1319 - 1323

Ramirez-Vazquez, I. ve Fierro-Chavez, J.L., (1999) "Criteria for the Diagnostic of Polluted Ceramic Insulators based on the Leakage Current Monitoring Technique", Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report Conference 2: 715 - 718

Reichelt, D., Ecknauer, E. ve Glavitsch, H., (1996) "Estimation of Steady-State Unbalanced System Conditions Combining Conventional Power Flow and Fault Analysis Software" , IEEE Trans. on Power Systems, 11(1):422 – 427

Salam, M.A., Ahmad, H., Tamsir, T., Ahmad, A.S., Fuad, S.A., Buntat, Z. ve Piah, M.A.M.,(2000) "Development of the Relationship between ESDD and the Distance from the Source of Contaminants for the Insulator", 3:190-192

Saner, Y., (2004) "Güç İletimi (Enerji Taşınması)", Birsen Yayıncılık

Saotome, H. , Yoshioka, M., Okada, K. ve Urasawa, K., (1988) "Technology for Replacing Existing Ground Wires with Multi-Core OPGW", Int.Conf. on Overhead line Design and Construction, 161-165

Seedher, H.R., Arora, J.K. ve Soni, S.K., (1999) "A Practical Approach for Computation of Grid Current", IEEE Trans on Power Delivery, 14(3):897-902

Shan Z.ve Abur, A., (2002) "Effects of Nontransposed Lines and Unbalanced Loads on State Estimation" , IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2:975 - 979

Short, T., (2004) "Electric Power Distribution Handbook", CRC Press

Shuter, T.C., Vollkommer, H.T. ve Kirkpatrick, T.L., (1989), "Survey of Harmonic Levels on the American Electric Power Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, 4(4): 2204-2213

Siluis, L., (2001) "Transients in Power Systems", John Wiley&Sons LTD

Sonkaran, C., (2001) "Power Quality", CRC Press

Sugawara, N.ve Hkari, K.,(1994) "Leakage Resistance Data Acquisition System for Porcelain Insulators along the Coast",IEEE Proc. 2:503-506.

Sutherland, P.E., (1995) "Harmonic Measurements in Industrial Power Systems", IEEE Trans. on Industry Applications, 31(1):175 – 183

TEİAŞ, "Türkiye Ulusal Elektrik Ağındaki Havai Hatların, Trafoların ve Generatörlerin Elektriki Karakteristikleri", SA-2004/1

TS EN 60507, (1999) "AA Sistemlerinde Kullanılan Yüksek Gerilim İzolatörlerine Uygulanan Yapay Kirlilik Deneyleri"

TS-IEC 815, (1995) "Kirlenme Şartlarına Göre İzolatörlerin Seçilme Kuralları Kılavuzu"

- Ulusoy, H., (1993) “Yüksek Gerilim Elektrik Malzemeleri ve Testleri”, Akay Ofset Matbaacılık
- Urasawa, K., Kanemaru, K., Toyota, S. ve Sugiyama, K., (1989) “New Fault Location System for Power Transmission Lines Using Composite Fiber-Optic Overhead Ground Wire (OPGW)”, IEEE Trans on Power Delivery, 4(4):2005-2011
- Uzunoğlu, M., Kızıl, A. ve Onar, Ö.Ç., (2003) “Her Yönü ile Matlab”, Türkmen Kitabevi
- Valcarel, M.ve Mayordomo, J.G., (1993) “Harmonic Power Flow for Unbalanced Systems”, IEEE Trans. on Power Delivery, 8(4):2052 – 2059
- Vosloo, W.L. ve Holtzhausen, J.P., (2002) “The Prediction of Insulator Leakage Currents from Environmental Data” IEEE AFRICON. 6th Africon Conference in Africa, 2:603 - 608
- Wakileh, G.J., (2001) “Power Systems Harmonics”, Springer
- Weedy, B.M. ve Cory, B.J., (1998) “Electric Power Systems”
- Yumurtacı, R., (2000) “Lineer Olmayan Dengesiz Yükler İçeren Enerji Sistemlerinde Üç Fazlı Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- Zhicken, G. ve Guoshun, C., (1994) “A Study on the Leakage Current Along the Surface of Polluted Insulator”, Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials”, 2:495-498

EKLER

EK – 1

**DENGELİ VE DENGESİZ İLETİM SİSTEMLERİNİN TOPRAK YOLU
MATLAB/M-FILE PROGRAMI**

% DENGELİ ÇALIŞMA--DENGESİZ ÇALIŞMA

%(163 adet direk- eşit mesafe-temiz-orta-hafif-yogun izolatör kirlenme seçenekleri ve farklı
% zemin seçenekleri için yaklaşık 50 km lik iletim hattı toprak yolu
% analizi
%

%GENEL BİLGİLER

```
k=163;          %Direk sayısı
Va(1)=88912;          % a fazı gerilimi(volt)
Vb(1)=88912*(cos(-2*pi/3)+i*sin(-2*pi/3));  % b fazı gerilimi(volt)
Vc(1)=88912*(cos(2*pi/3)+i*sin(2*pi/3));    % c fazı gerilimi(volt)
%
Zhat= 0.134+i*0.43; %(ohm/km hattın empedansı),teiaş kitabı'ndan
dd=input('dengeli sistem için 1, dengesiz sistem için 2 yazınız: ');
ro=input('zeminin özdirenç değerini giriniz : ');
kirlilik=input('izolatörler için kirlilik seviyesini giriniz (temiz=0; hafif=1; orta=2; yoğun=3):
');
cubukcap=0.03; % metre
cubukuz=2; % metre
%
f=50; % şebeke frekansı
Dag1=4.55; % a fazının 1. koruma teline olan mesafesi (metre)
Dbg1=5.92; %b fazı...
Dcg1=11.91; %c fazı...
Dag2=11.91; % a fazının 2. koruma teline olan mesafesi (metre)
Dbg2=5.92; % b fazı...
Dcg2=4.55; % c fazı...
%
d=sqrt(280/pi)*10^(-3);% koruma telinin çapı(m)
GMR=0.77*d/2;% koruma telinin geometrik ortalama yarıçapı(m)
%
L=ones(1,162);
L=L*0.311; %direk açıklıkları (eşit olup, 311'er metredir); portal direklerde yaklaşık 120'şer metredir
L(1,1)=0.12;
L(1,162)=0.12;
G0=zeros(163,3); % temiz izolatör iletkenliği sıfırdır.
for j=1:54 % hafif kirlenme
G1(j,1)=7*10^(-6);
G1(j,2)=7.5*10^(-6);
G1(j,3)=8*10^(-6);
end
for j=55:108
G1(j,1)=8*10^(-6);
G1(j,2)=7*10^(-6);
G1(j,3)=7.5*10^(-6);
end
for j=109:163
G1(j,1)=7.5*10^(-6);
G1(j,2)=8*10^(-6);
G1(j,3)=7*10^(-6);
end
```

```

Guz=length(G1);
G2=2*G1;           % (orta kirlenme)
G3=4*G1;           % (yoğun kirlenme)
%
zag_1=9.87*10^(-4)*f+i*0.0029*f*log10(658.9*sqrt(ro/f)/Dag1); % a fazı ile 1. koruma
teli arası kuplaj empedansı
zbg_1=9.87*10^(-4)*f+i*0.0029*f*log10(658.9*sqrt(ro/f)/Dbg1); % b fazı.....
zcg_1=9.87*10^(-4)*f+i*0.0029*f*log10(658.9*sqrt(ro/f)/Dcg1); % c fazı...
zag_2=9.87*10^(-4)*f+i*0.0029*f*log10(658.9*sqrt(ro/f)/Dag2); % a fazı ile 2. koruma
teli arası kuplaj empedansı
zbg_2=9.87*10^(-4)*f+i*0.0029*f*log10(658.9*sqrt(ro/f)/Dbg2); % b fazı...
zcg_2=9.87*10^(-4)*f+i*0.0029*f*log10(658.9*sqrt(ro/f)/Dcg2); % c fazı...
%
say=ones(1,k);
%
for n=1:k
R(1,n)=(ro/(2*pi*cubukuz)*log(4*cubukuz/cubukcap))*say(n); % Direk topraklama çubuk
direnci(ohm)
end
R=R.';
R(1,1)=0.02*ro; % 1. terminal ağ direnci (1. direk); RAĞ=0.02*RO
R(163,1)=0.02*ro; % 2. terminal ağ direnci (163. direk)
for jj=1:k
    r=sprintf(['dm/R%s'],num2str(jj));
    set_param(r,'a',num2str(R(jj,1)));
end
for n=1:length(L)
Zg(1,n)=(1000/(5*70)+9.87*10^(-4)*f+i*0.0029*f*log10(658.9*sqrt(ro/f)/GMR))*L(n); %
koruma teli empedansı(0hm/km)
end
Zgg=Zg.';
for n=1:k-1
    Zggg(2*n-1,1)=Zgg(n,1);
    Zggg(2*n,1) =Zgg(n,1);
end
Zggg;
a1=real(Zggg);
b1=imag(Zggg)/314;
Zg=[a1 b1];%koruma telinin R ve L değerleri için matris
Z=Zg;
%
for jj=1:(2*(k-1))
    r=sprintf(['dm/Z%s'],num2str(jj));
    set_param(r,'a',num2str(Z(jj,1)));
    set_param(r,'b',num2str(Z(jj,2)));
end

if dd==1          %%%DENGELİ SİSTEM
Ia=375;           % a fazı akımı(A)
Ib=375*(cos(-2*pi/3)+i*sin(-2*pi/3)); % b fazı akımı

```

```

Ic=375*(cos(2*pi/3)+i*sin(2*pi/3));    % c fazı akımı
%
AA=zeros(k,3); % artık akım(dengeli sistemde sıfırdır)
for jj=k
    r=sprintf(['dm/AA%s'],num2str(jj));
    set_param(r,'A',num2str(AA(jj,1)));
    set_param(r,'P',num2str(AA(jj,2)));
    set_param(r,'F',num2str(AA(jj,3)));
end
%
    % çaprazlama 1. kısmı
for n=1:54
    Vag_1(1,n)=zag_1*Ia*L(n);% 1.koruma teli üzerinde %a fazının endüklediği gerilim
    Vbg_1(1,n)=zbg_1*Ib*L(n);    % b.....
    Vcg_1(1,n)=zcg_1*Ic*L(n);    % c.....
    Vag_2(1,n)=zag_2*Ia*L(n);% 2.koruma teli üzerinde a fazının endüklediği gerilim
    Vbg_2(1,n)=zbg_2*Ib*L(n);    % b...
    Vcg_2(1,n)=zcg_2*Ic*L(n);    % c...
end
    % çaprazlama 2. kısmı
for n=55:108
    Vag_1(1,n)=zag_1*Ic*L(n);% 1.koruma teli üzerinde %a fazının endüklediği gerilim
    Vbg_1(1,n)=zbg_1*Ia*L(n);    % b.....
    Vcg_1(1,n)=zcg_1*Ib*L(n);    % c.....
    Vag_2(1,n)=zag_2*Ic*L(n);% 2.koruma teli üzerinde a fazının endüklediği gerilim
    Vbg_2(1,n)=zbg_2*Ia*L(n);    % b...
    Vcg_2(1,n)=zcg_2*Ib*L(n);    % c...
end
    % çaprazlama 3. kısmı
for n= 109:162

    Vag_1(1,n)=zag_1*Ib*L(n);% 1.koruma teli üzerinde %a fazının endüklediği gerilim
    Vbg_1(1,n)=zbg_1*Ic*L(n);    % b.....
    Vcg_1(1,n)=zcg_1*Ia*L(n);    % c.....
    Vag_2(1,n)=zag_2*Ib*L(n);% 2.koruma teli üzerinde a fazının endüklediği gerilim
    Vbg_2(1,n)=zbg_2*Ic*L(n);    % b...
    Vcg_2(1,n)=zcg_2*Ia*L(n);    % c...
end

VM_1=Vag_1+Vbg_1+Vcg_1; % 1. koruma teli üzerinde a,b,c fazlarının endüklediği gerilimler
VM_2=Vag_2+Vbg_2+Vcg_2; % 2. koruma teli üzerinde a,b,c fazlarının endüklediği gerilimler

for n=1:162

    VMA(1,2*n-1)=VM_1(1,n);
    VMA(1,2*n) =VM_2(1,n);
end
VM1=VMA.';
VM1l=abs(VM1);

```

```

VM22=angle(VM1)*180/pi;
VM=[VM11 VM22];
VM(:,3)=50;
V=VM;
%
for jj=1:(2*(k-1))
    r=sprintf(['dm/V%s'],num2str(jj));
    set_param(r,'A',num2str(V(jj,1)));
    set_param(r,'P',num2str(V(jj,2)));
    set_param(r,'F',num2str(V(jj,3)));
end
%
for n=1:length(L)
    Va(n+1)=Va(n)-Zhat*L(n)*Ia;
    Vb(n+1)=Vb(n)-Zhat*L(n)*Ib;
    Vc(n+1)=Vc(n)-Zhat*L(n)*Ic;
end
%
Vfaz=[Va.' Vb.' Vc.']; % tüm direklerin(163) a,b,c fazlarının gerilimleri)
%
if kirlilik==0
    for n=1:k
        I(n,:)=Vfaz(n,:).* G0(n,:);
        Ikacak(n,:)=sum(I(n,:));
        m=abs(Ikacak);
        h=angle(Ikacak)*180/pi;
        I=[m h];
        I(:,3)=50;
    end
    %
elseif kirlilik==1
    for n=1:k
        I(n,:)=Vfaz(n,:).* G1(n,:);
        Ikacak(n,:)=sum(I(n,:));
        m=abs(Ikacak);
        h=angle(Ikacak)*180/pi;
        I=[m h];
        I(:,3)=50;
    end
    %
elseif kirlilik==2
    for n=1:k
        I(n,:)=Vfaz(n,:).* G2(n,:);
        Ikacak(n,:)=sum(I(n,:));
        m=abs(Ikacak);
        h=angle(Ikacak)*180/pi;
        I=[m h];
        I(:,3)=50;
    end
    %
else

```

```

for n=1:k
I(n,:)=Vfaz(n,:).* G3(n,:);
Ikacak(n,:)=sum(I(n,:));
m=abs(Ikacak);
h=angle(Ikacak)*180/pi;
I=[m h];
I(:,3)=50;
end
%
end
%I
for jj=1:k
h=sprintf(['dm/I%s'],num2str(jj));
set_param(h,'A',num2str(I(jj,1)));
set_param(h,'P',num2str(I(jj,2)));
set_param(h,'F',num2str(I(jj,3)));
end
IF=zeros(k,3); % faz-toprak arıza akımları sürekli çalışmada sıfırdır.
for jj=1:k

r=sprintf(['dm/IF%s'],num2str(jj));
set_param(r,'A',num2str(IF(jj,1)));
set_param(r,'P',num2str(IF(jj,2)));
set_param(r,'F',num2str(IF(jj,3)));
end
%
else %%% DENGESİZ ÇALIŞMA

Ia=375; % a fazı akımı (A)
Ib=400*(cos(-11*pi/18)+i*sin(-11*pi/18)); %-110 DERECE % b...
Ic=350*(cos(11*pi/18)+i*sin(11*pi/18)); % 110 DERECE % c...
artik_akim=Ia+Ib+Ic; % dengesiz a,b,c akımlarının fazörel toplamı
aa1=abs(artik_akim);
aa2=angle(artik_akim)*180/pi;
hava=zeros(k-1,3);
AA=(hava);%artık akım
AA(k,1)=aa1;
AA(k,2)=aa2;
AA(k,3)=50;
for jj=k
r=sprintf(['dm/AA%s'],num2str(jj));
set_param(r,'A',num2str(AA(jj,1)));
set_param(r,'P',num2str(AA(jj,2)));
set_param(r,'F',num2str(AA(jj,3)));
end
%
% çaprazlama 1. kısmı
for n=1:54
Vag_1(1,n)=zag_1*Ia*L(n);% 1.koruma teli üzerinde %a fazının endüklediği gerilim
Vbg_1(1,n)=zbg_1*Ib*L(n); % b.....
Vcg_1(1,n)=zcg_1*Ic*L(n); % c.....

```

```

Vag_2(1,n)=zag_2*Ia*L(n);% 2.koruma teli  üzerinde a fazının endüklediği gerilim
Vbg_2(1,n)=zbg_2*Ib*L(n);                % b...
Vcg_2(1,n)=zcg_2*Ic*L(n);                % c...
end
    % çaprazlama 2. kısmı
for n=55:108
Vag_1(1,n)=zag_1*Ic*L(n);% 1.koruma teli  üzerinde  %a fazının endüklediği gerilim
Vbg_1(1,n)=zbg_1*Ia*L(n);                % b.....
Vcg_1(1,n)=zcg_1*Ib*L(n);                % c.....
Vag_2(1,n)=zag_2*Ic*L(n);% 2.koruma teli  üzerinde a fazının endüklediği gerilim
Vbg_2(1,n)=zbg_2*Ia*L(n);                % b...
Vcg_2(1,n)=zcg_2*Ib*L(n);                % c...
end
    % çaprazlama 3. kısmı
for n= 109:162

Vag_1(1,n)=zag_1*Ib*L(n);% 1.koruma teli  üzerinde  %a fazının endüklediği gerilim
Vbg_1(1,n)=zbg_1*Ic*L(n);                % b.....
Vcg_1(1,n)=zcg_1*Ia*L(n);                % c.....
Vag_2(1,n)=zag_2*Ib*L(n);% 2.koruma teli  üzerinde a fazının endüklediği gerilim
Vbg_2(1,n)=zbg_2*Ic*L(n);                % b...
Vcg_2(1,n)=zcg_2*Ia*L(n);                % c...
end

VM_1=Vag_1+Vbg_1+Vcg_1;  % 1. koruma teli  üzerinde a,b,c fazlarının endüklediği
gerilimler
VM_2=Vag_2+Vbg_2+Vcg_2;  % 2. koruma teli  üzerinde a,b,c fazlarının endüklediği
gerilimler

for n=1:k-1

    VMA(1,2*n-1)=VM_1(1,n);
    VMA(1,2*n) =VM_2(1,n);

end
VM1=VMA.';
VM11=abs(VM1);
VM22=angle(VM1)*180/pi;
VM=[VM11 VM22];
VM(:,3)=50;
V=VM;

for jj=1:(2*(k-1))

r=sprintf(['dm/V%s'],num2str(jj));
set_param(r,'A',num2str(V(jj,1)));
set_param(r,'P',num2str(V(jj,2)));
set_param(r,'F',num2str(V(jj,3)));
end

for n=1:length(L)

```

```

Va(n+1)=Va(n)-Zhat*L(n)*Ia;
Vb(n+1)=Vb(n)-Zhat*L(n)*Ib;
Vc(n+1)=Vc(n)-Zhat*L(n)*Ic;
end

```

```

Vfaz=[Va.' Vb.' Vc.']; % tüm direklerin(163) a,b,c fazlarının gerilimleri)

```

```

if kirlilik==0
for n=1:k
I(n,:)=Vfaz(n,:).* G0(n,:);
Ikacak(n,:)=sum(I(n,:));
m=abs(Ikacak);
h=angle(Ikacak)*180/pi;
I=[m h];
I(:,3)=50;

```

```

end
%
elseif kirlilik==1
for n=1:k
I(n,:)=Vfaz(n,:).* G1(n,:);
Ikacak(n,:)=sum(I(n,:));
m=abs(Ikacak);
h=angle(Ikacak)*180/pi;
I=[m h];
I(:,3)=50;

```

```

end
elseif kirlilik==2
for n=1:k
I(n,:)=Vfaz(n,:).* G2(n,:);
Ikacak(n,:)=sum(I(n,:));
m=abs(Ikacak);
h=angle(Ikacak)*180/pi;
I=[m h];
I(:,3)=50;
end

```

```

else
for n=1:k
I(n,:)=Vfaz(n,:).* G3(n,:);
Ikacak(n,:)=sum(I(n,:));
m=abs(Ikacak);
h=angle(Ikacak)*180/pi;
I=[m h];
I(:,3)=50;

```

```

end
end
%I
for jj=1:k

```

```

    h=sprintf(['dm/I%s'],num2str(jj));
    set_param(h,'A',num2str(I(jj,1)));
    set_param(h,'P',num2str(I(jj,2)));
    set_param(h,'F',num2str(I(jj,3)));
end
IF=zeros(k,3);
for jj=1:k

    r=sprintf(['dm/IF%s'],num2str(jj));
    set_param(r,'A',num2str(IF(jj,1)));
    set_param(r,'P',num2str(IF(jj,2)));
    set_param(r,'F',num2str(IF(jj,3)));
end
end

```

EK – 2
DENGELİ VE DENGESİZ HARMONİKLİ SİSTEMLERİN MATLAB/M-FILE
PROGRAMI

```

% DENGELİ ÇALIŞMA (3. harmonikli)--DENGESİZ ÇALIŞMA(3. harmonikli)
%(163 adet direk- eşit mesafe-temiz-orta-hafif-yogun izolatör kirlenme seçenekleri ve farklı
% zemin seçenekleri için yaklaşık 50 km lik iletim hattı toprak yolu analizi
%
%GENEL
k=163; %Direk sayısı
Va(1)=0; % a fazı gerilimi(volt)
Vb(1)=0; % b fazı gerilimi(volt)
Vc(1)=0; % c fazı gerilimi(volt)
%
Zhat= 0.134+i*0.43; %(ohm/km hattın empedansı),teiaş kitabı'ndan
dd=input('dengeli sistem için 1, dengesiz sistem için 2 yazınız: ');
ro=input('zeminin öz direnç değerini giriniz : ');
kirlilik=input('izolatörler için kirlilik seviyesini giriniz (temiz=0; hafif=1; orta=2; yoğun=3):
');
cubukcap=0.03; % metre
cubukuz=2; % metre
%
f=150; % 3. HARMONİK frekansı
Dag1=4.55; % a fazının 1. koruma teline olan mesafesi (metre)
Dbg1=5.92; %b fazı...
Dcg1=11.91; %c fazı...
Dag2=11.91; % a fazının 2. koruma teline olan mesafesi (metre)
Dbg2=5.92; % b fazı...
Dcg2=4.55; % c fazı...
%
d=sqrt(280/pi)*10^(-3);% koruma telinin çapı(m)
GMR=0.77*d/2;% koruma telinin geometrik ortalama yarıçapı(m)
%
L=ones(1,162);
L=L*0.311; %direk açıklıkları (eşit olup, 311'er metredir); portal direklerde 120 'şer metredir
L(1,1)=0.12;
L(1,162)=0.12;
G0=zeros(163,3); % temiz izolatör iletkenliği sıfırdır.
for j=1:54 % hafif kirlenme
G1(j,1)=7*10^(-6);
G1(j,2)=7.5*10^(-6);
G1(j,3)=8*10^(-6);
end
for j=55:108
G1(j,1)=8*10^(-6);
G1(j,2)=7*10^(-6);
G1(j,3)=7.5*10^(-6);
end
for j=109:163
G1(j,1)=7.5*10^(-6);
G1(j,2)=8*10^(-6);
G1(j,3)=7*10^(-6);

```

```

end
uz=length(G1);
G2=2*G1;          % (orta kirlenme)
G3=4*G1;          % (yoğun kirlenme)
%
zag_1=9.87*10^(-4)*f+i*0.0029*f*log10(658.9*sqrt(ro/f)/Dag1); % a fazı ile 1. koruma
teli arası kuplaj empedansı
zbg_1=9.87*10^(-4)*f+i*0.0029*f*log10(658.9*sqrt(ro/f)/Dbg1); % b fazı.....
zcg_1=9.87*10^(-4)*f+i*0.0029*f*log10(658.9*sqrt(ro/f)/Dcg1); % c fazı...
zag_2=9.87*10^(-4)*f+i*0.0029*f*log10(658.9*sqrt(ro/f)/Dag2); % a fazı ile 2. koruma
teli arası kuplaj empedansı
zbg_2=9.87*10^(-4)*f+i*0.0029*f*log10(658.9*sqrt(ro/f)/Dbg2); % b fazı...
zcg_2=9.87*10^(-4)*f+i*0.0029*f*log10(658.9*sqrt(ro/f)/Dcg2); % c fazı...
%
say=ones(1,k);
%
for n=1:k
R(1,n)=(ro/(2*pi*cubukuz)*log(4*cubukuz/cubukcap))*say(n); % Direk topraklama çubuk
direnci(ohm)
end
R=R.';
R(1,1)=0.02*ro; % 1. terminal ağ direnci (1. direk); RAĞ=0.02*RO
R(163,1)=0.02*ro; % 2. terminal ağ direnci (163. direk)
for jj=1:k
    r=sprintf(['dm/R%s'],num2str(jj));
    set_param(r,'a',num2str(R(jj,1)));

end
for n=1:length(L)
%
Zg(1,n)=(1000/(5*70)+9.87*10^(-4)*f+i*0.0029*f*log10(658.9*sqrt(ro/f)/GMR))*L(n); %
koruma teli empedansı(0hm/km)
end
Zgg=Zg.';
for n=1:k-1

    Zggg(2*n-1,1)=Zgg(n,1);
    Zggg(2*n,1) =Zgg(n,1);
end
Zggg;

a1=real(Zggg);
b1=imag(Zggg)/314;
Zg=[a1 b1];%koruma telinin R ve L değerleri için matris
Z=Zg;

for jj=1:(2*(k-1))

    r=sprintf(['dm/Z%s'],num2str(jj));
    set_param(r,'a',num2str(Z(jj,1)));
    set_param(r,'b',num2str(Z(jj,2)));

```

```

end

%
if dd==1          %%%%DENGELİ SİSTEM (sadece 3. harmonik analizi)
Ia=10*(cos(-2*pi/9)+i*sin(-2*pi/9)); % a fazı akımı(A)
Ib=10*(cos(-2*pi/9)+i*sin(-2*pi/9)); % b fazı akımı
Ic=10*(cos(-2*pi/9)+i*sin(-2*pi/9)); % c fazı akımı

AA=zeros(k,3); % artık akım(dengeli sistemde sıfırdır)
for jj=k
    r=sprintf(['dm/AA%s'],num2str(jj));
    set_param(r,'A',num2str(AA(jj,1)));
    set_param(r,'P',num2str(AA(jj,2)));
    set_param(r,'F',num2str(AA(jj,3)));
end
%
% çaprazlama 1. kısmı
for n=1:54
Vag_1(1,n)=zag_1*Ia*L(n);% 1.koruma teli üzerinde %a fazının endüklediği gerilim
Vbg_1(1,n)=zbg_1*Ib*L(n); % b.....
Vcg_1(1,n)=zcg_1*Ic*L(n); % c.....
Vag_2(1,n)=zag_2*Ia*L(n);% 2.koruma teli üzerinde a fazının endüklediği gerilim
Vbg_2(1,n)=zbg_2*Ib*L(n); % b...
Vcg_2(1,n)=zcg_2*Ic*L(n); % c...
end
% çaprazlama 2. kısmı
for n=55:108
Vag_1(1,n)=zag_1*Ic*L(n);% 1.koruma teli üzerinde %a fazının endüklediği gerilim
Vbg_1(1,n)=zbg_1*Ia*L(n); % b.....
Vcg_1(1,n)=zcg_1*Ib*L(n); % c.....
Vag_2(1,n)=zag_2*Ic*L(n);% 2.koruma teli üzerinde a fazının endüklediği gerilim
Vbg_2(1,n)=zbg_2*Ia*L(n); % b...
Vcg_2(1,n)=zcg_2*Ib*L(n); % c...
end
% çaprazlama 3. kısmı
for n= 109:162

Vag_1(1,n)=zag_1*Ib*L(n);% 1.koruma teli üzerinde %a fazının endüklediği gerilim
Vbg_1(1,n)=zbg_1*Ic*L(n); % b.....
Vcg_1(1,n)=zcg_1*Ia*L(n); % c.....
Vag_2(1,n)=zag_2*Ib*L(n);% 2.koruma teli üzerinde a fazının endüklediği gerilim
Vbg_2(1,n)=zbg_2*Ic*L(n); % b...
Vcg_2(1,n)=zcg_2*Ia*L(n); % c...
end

VM_1=Vag_1+Vbg_1+Vcg_1; % 1. koruma teli üzerinde a,b,c fazlarının endüklediği gerilimler
VM_2=Vag_2+Vbg_2+Vcg_2; % 2. koruma teli üzerinde a,b,c fazlarının endüklediği gerilimler

for n=1:162

```

```

    VMA(1,2*n-1)=VM_1(1,n);
    VMA(1,2*n) =VM_2(1,n);
end
VM1=VMA.';
VM11=abs(VM1);
VM22=angle(VM1)*180/pi;
VM=[VM11 VM22];
VM(:,3)=150;
V=VM;

for jj=1:(2*(k-1))
    r=sprintf(['dm/V%s'],num2str(jj));
    set_param(r,'A',num2str(V(jj,1)));
    set_param(r,'P',num2str(V(jj,2)));
    set_param(r,'F',num2str(V(jj,3)));
end

for n=1:length(L)

Va(n+1)=Va(n)-Zhat*L(n)*Ia;
Vb(n+1)=Vb(n)-Zhat*L(n)*Ib;
Vc(n+1)=Vc(n)-Zhat*L(n)*Ic;
end
%
Vfaz=[Va.' Vb.' Vc.']; % tüm direklerin(163) a,b,c fazlarının gerilimleri)
%
if kirlilik==0
for n=1:k
I(n,:)=Vfaz(n,:).* G0(n,:);
Ikacak(n,:)=sum(I(n,:));
m=abs(Ikacak);
h=angle(Ikacak)*180/pi;
I=[m h];
I(:,3)=150;
end
%
elseif kirlilik==1
for n=1:k
I(n,:)=Vfaz(n,:).* G1(n,:);
Ikacak(n,:)=sum(I(n,:));
m=abs(Ikacak);
h=angle(Ikacak)*180/pi;
I=[m h];
I(:,3)=150;
end
%
elseif kirlilik==2
for n=1:k
I(n,:)=Vfaz(n,:).* G2(n,:);
Ikacak(n,:)=sum(I(n,:));

```

```

m=abs(Ikacak);
h=angle(Ikacak)*180/pi;
I=[m h];
I(:,3)=150;
end
%
else
for n=1:k
I(n,:)=Vfaz(n,:).* G3(n,:);
Ikacak(n,:)=sum(I(n,:));
m=abs(Ikacak);
h=angle(Ikacak)*180/pi;
I=[m h];
I(:,3)=150;

end
end
%I
for jj=1:k
h=sprintf(['dm/I%s'],num2str(jj));
set_param(h,'A',num2str(I(jj,1)));
set_param(h,'P',num2str(I(jj,2)));
set_param(h,'F',num2str(I(jj,3)));
end
IF=zeros(k,3); % faz-toprak arıza akımları sürekli çalışmada sıfırdır.
for jj=1:k

r=sprintf(['dm/IF%s'],num2str(jj));
set_param(r,'A',num2str(IF(jj,1)));
set_param(r,'P',num2str(IF(jj,2)));
set_param(r,'F',num2str(IF(jj,3)));
end

else
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% DENGESİZ ÇALIŞMA ( Sadece 3. harmonik analizi)

Ia=8*(cos(-2*pi/9)+i*sin(-2*pi/9)); % a fazı akımı (A)
Ib=10*(cos(-1*pi/4)+i*sin(-1*pi/4)); % b ...
Ic=12*(cos(-1*pi/3)+i*sin(-1*pi/3)); % c...
%
%
artik_akim=Ia+Ib+Ic; % dengesiz a,b,c harmonik akımlarının fazörel toplamı
aa1=abs(artik_akim);
aa2=angle(artik_akim)*180/pi;
hava=zeros(k-1,3);
AA=(hava);%artık akım
AA(k,1)=aa1;
AA(k,2)=aa2;
AA(k,3)=150;
for jj=k

r=sprintf(['dm/AA%s'],num2str(jj));

```

```

set_param(r,'A',num2str(AA(jj,1)));
set_param(r,'P',num2str(AA(jj,2)));
set_param(r,'F',num2str(AA(jj,3)));
end

```

% çaprazlama 1. kısmı

```

for n=1:54
Vag_1(1,n)=zag_1*Ia*L(n);% 1.koruma teli üzerinde %a fazının endüklediği gerilim
Vbg_1(1,n)=zbg_1*Ib*L(n); % b.....
Vcg_1(1,n)=zcg_1*Ic*L(n); % c.....
Vag_2(1,n)=zag_2*Ia*L(n);% 2.koruma teli üzerinde a fazının endüklediği gerilim
Vbg_2(1,n)=zbg_2*Ib*L(n); % b...
Vcg_2(1,n)=zcg_2*Ic*L(n); % c...
end

```

% çaprazlama 2. kısmı

```

for n=55:108
Vag_1(1,n)=zag_1*Ic*L(n);% 1.koruma teli üzerinde %a fazının endüklediği gerilim
Vbg_1(1,n)=zbg_1*Ia*L(n); % b.....
Vcg_1(1,n)=zcg_1*Ib*L(n); % c.....
Vag_2(1,n)=zag_2*Ic*L(n);% 2.koruma teli üzerinde a fazının endüklediği gerilim
Vbg_2(1,n)=zbg_2*Ia*L(n); % b...
Vcg_2(1,n)=zcg_2*Ib*L(n); % c...
end

```

% çaprazlama 3. kısmı

```

for n= 109:162

Vag_1(1,n)=zag_1*Ib*L(n);% 1.koruma teli üzerinde %a fazının endüklediği gerilim
Vbg_1(1,n)=zbg_1*Ic*L(n); % b.....
Vcg_1(1,n)=zcg_1*Ia*L(n); % c.....
Vag_2(1,n)=zag_2*Ib*L(n);% 2.koruma teli üzerinde a fazının endüklediği gerilim
Vbg_2(1,n)=zbg_2*Ic*L(n); % b...
Vcg_2(1,n)=zcg_2*Ia*L(n); % c...
end

```

VM_1=Vag_1+Vbg_1+Vcg_1; % 1. koruma teli üzerinde a,b,c fazlarının endüklediği gerilimler

VM_2=Vag_2+Vbg_2+Vcg_2; % 2. koruma teli üzerinde a,b,c fazlarının endüklediği gerilimler

```

for n=1:k-1

```

VMA(1,2*n-1)=VM_1(1,n);

VMA(1,2*n) =VM_2(1,n);

```

end

```

VM1=VMA.;

VM11=abs(VM1);

VM22=angle(VM1)*180/pi;

VM=[VM11 VM22];

VM(:,3)=150;

V=VM;

```

for jj=1:(2*(k-1))

r=sprintf(['dm/V%s'],num2str(jj));
set_param(r,'A',num2str(V(jj,1)));
set_param(r,'P',num2str(V(jj,2)));
set_param(r,'F',num2str(V(jj,3)));
end
5
for n=1:length(L)

    Va(n+1)=Va(n)-Zhat*L(n)*Ia;
    Vb(n+1)=Vb(n)-Zhat*L(n)*Ib;
    Vc(n+1)=Vc(n)-Zhat*L(n)*Ic;
end

Vfaz=[Va.' Vb.' Vc.']; % tüm direklerin(163) a,b,c fazlarının gerilimleri)
%
if kirlilik==0
for n=1:k
I(n,:)=Vfaz(n,:).* G0(n,:);
Ikacak(n,:)=sum(I(n,:));
m=abs(Ikacak);
h=angle(Ikacak)*180/pi;
I=[m h];
I(:,3)=150;

end
elseif kirlilik==1
for n=1:k
I(n,:)=Vfaz(n,:).* G1(n,:);
Ikacak(n,:)=sum(I(n,:));
m=abs(Ikacak);
h=angle(Ikacak)*180/pi;
I=[m h];
I(:,3)=150;

end
elseif kirlilik==2
for n=1:k
I(n,:)=Vfaz(n,:).* G2(n,:);
Ikacak(n,:)=sum(I(n,:));
m=abs(Ikacak);
h=angle(Ikacak)*180/pi;
I=[m h];
I(:,3)=150;

end
else
for n=1:k
I(n,:)=Vfaz(n,:).* G3(n,:);
Ikacak(n,:)=sum(I(n,:));

```

```

m=abs(Ikacak);
h=angle(Ikacak)*180/pi;
I=[m h];
I(:,3)=150;

end
end
%I
for jj=1:k
    h=sprintf(['dm/I%s'],num2str(jj));
    set_param(h,'A',num2str(I(jj,1)));
    set_param(h,'P',num2str(I(jj,2)));
    set_param(h,'F',num2str(I(jj,3)));
end
IF=zeros(k,3);
for jj=1:k

    r=sprintf(['dm/IF%s'],num2str(jj));
    set_param(r,'A',num2str(IF(jj,1)));
    set_param(r,'P',num2str(IF(jj,2)));
    set_param(r,'F',num2str(IF(jj,3)));
end
end

```

EK – 3

FAZ-TOPRAK KISA DEVRE MATLAB/M-FILE PROGRAMI

```

%FAZ-TOPRAK KISA DEVRE PROGRAMI
%(163 adet direk- eşit mesafe-temiz izolatör farklı
% zemin seçenekleri için yaklaşık 50 km lik iletim hattı toprak yolu
% analizi
%
%GENEL
k=163; %Direk sayısı
Va(1)=88912; % a fazı gerilimi(volt)
Vb(1)=88912*(cos(-2*pi/3)+i*sin(-2*pi/3)); % b fazı gerilimi(volt)
Vc(1)=88912*(cos(2*pi/3)+i*sin(2*pi/3)); % c fazı gerilimi(volt)
%
Ia=375; % a fazı akımı(A)
Ib=375*(cos(-2*pi/3)+i*sin(-2*pi/3)); % b fazı akımı
Ic=375*(cos(2*pi/3)+i*sin(2*pi/3)); % c fazı akımı
%
Zhat= 0.134+i*0.43; %(ohm/km hattın empedansı),teiaş kitabı'ndan
Z0=0.418+i*1.21;%(ohm/km hattın empedansı),teiaş kitabı'ndan
Xt=i*3*0.07*154^2/100
ro=input('zeminin öz direnç değerini giriniz : ');
%
cubukcap=0.03; % metre
cubukuz=2; % metre
%
f=50; % şebeke frekansı
Dag1=4.55; % a fazının 1. koruma teline olan mesafesi (metre)
Dbg1=5.92; % b fazı...
Dcg1=11.91; % c fazı...
Dag2=11.91; % a fazının 2. koruma teline olan mesafesi (metre)
Dbg2=5.92; % b fazı...
Dcg2=4.55; % c fazı...
%
d=sqrt(280/pi)*10^(-3);% koruma telinin çapı(m)
GMR=0.77*d/2;% koruma telinin geometrik ortalama yarıçapı(m)
5
L=ones(1,162);
L=L*0.311; %direk açıklıkları (eşit olup, 311'er metredir); portal direklerde yaklaşık 104'er metredir
L(1,1)=0.12;
L(1,162)=0.12;
G0=zeros(163,3); % temiz izolatör iletkenliği sıfırdır.
%
zag_1=9.87*10^(-4)*f+i*0.0029*f*log10(658.9*sqrt(ro/f)/Dag1); % a fazı ile 1. koruma teli arası kuplaj empedansı
zag_2=9.87*10^(-4)*f+i*0.0029*f*log10(658.9*sqrt(ro/f)/Dag2); % a fazı ile 2. koruma teli arası kuplaj empedansı
5
say=ones(1,k);
%
for n=1:k

```

```

R(1,n)=(ro/(2*pi*cubukuz)*log(4*cubukuz/cubukcap))*say(n); % Direk topraklama çubuk
direnci(ohm)
end
R=R.';
R(1,1)=0.02*ro; % 1. terminal ağ direnci (1. direk); RAĞ=0.02*RO
R(163,1)=0.02*ro; % 2. terminal ağ direnci (163. direk)
for jj=1:k
    r=sprintf(['dm/R%s'],num2str(jj));
    set_param(r,'a',num2str(R(jj,1)));
end
for n=1:length(L)
    Zg(1,n)=(1000/(5*70)+9.87*10^(-4)*f+i*0.0029*f*log10(658.9*sqrt(ro/f)/GMR))*L(n); %
    koruma teli empedansı(0hm/km)
end
Zgg=Zg.';
for n=1:k-1
    Zggg(2*n-1,1)=Zgg(n,1);
    Zggg(2*n,1) =Zgg(n,1);
end
Zggg;

a1=real(Zggg);
b1=imag(Zggg)/314;
Zg=[a1 b1];%koruma telinin R ve L değerleri için matris
Z=Zg;
%
for jj=1:(2*(k-1))

    r=sprintf(['dm/Z%s'],num2str(jj));
    set_param(r,'a',num2str(Z(jj,1)));
    set_param(r,'b',num2str(Z(jj,2)));

end
% IF
%
for n=1:k-1
    L_1(1)=0.01;
    L_1(n+1)=L_1(n)+L(n);
end

k1=input('arızalı direk numarasını giriniz: ');
IFFF=zeros(k,3);

IFT=3*Va(1)/((Z0+2*Zhat)*L_1(k1)+Xt);%faz-toprak kısa devre arıza akım değerleri
IF1=IFT.';
Ikd1=abs(IF1);
Ikd2=angle(IF1)*180/pi;
IS=[Ikd1 Ikd2];
IS(:,3)=50;

IFFF(k1,:)=IS;

```

```

IF=IFFF
for jj=1:k

    r=sprintf(['dm/IF%s'],num2str(jj));
    set_param(r,'A',num2str(IF(jj,1)));
    set_param(r,'P',num2str(IF(jj,2)));
    set_param(r,'F',num2str(IF(jj,3)));
end

% çaprazlama 1. kısmı
for n=1:54
    Vag_1(1,n)=zag_1*IF(k1)*L(n);% 1.koruma teli üzerinde %a fazının endklediği gerilim
    Vag_2(1,n)=zag_2*IF(k1)*L(n);% 2.koruma teli üzerinde a fazının endklediği gerilim

end

% çaprazlama 2. kısmı
for n=55:108
    Vag_1(1,n)=zag_1*IF(k1)*L(n);% 1.koruma teli üzerinde %a fazının endklediği gerilim
    Vag_2(1,n)=zag_2*IF(k1)*L(n);% 2.koruma teli üzerinde a fazının endüklediği gerilim

end

% çaprazlama 3. kısmı
for n= 109:162
    Vag_1(1,n)=zag_1*IF(k1)*L(n);% 1.koruma teli üzerinde %a fazının endüklediği gerilim
    Vag_2(1,n)=zag_2*IF(k1)*L(n);% 2.koruma teli üzerinde a fazının endüklediği gerilim

end
VM_1=Vag_1; % 1. koruma teli üzerinde a fazının endüklediği gerilimler
VM_2=Vag_2; % 2. koruma teli üzerinde a fazının endklediği gerilimler
%
for n=1:k-1

    VMA(1,2*n-1)=VM_1(1,n);
    VMA(1,2*n) =VM_2(1,n);
end
VM1=VMA.';
VM11=abs(VM1);
VM22=angle(VM1)*180/pi;
VM=[VM11 VM22];
VM(:,3)=50;
V=VM;
for n=2*(k1-1)+1:324
    V(n,:)=0;
end

for jj=1:(2*(k-1))

    r=sprintf(['dm/V%s'],num2str(jj));
    set_param(r,'A',num2str(V(jj,1)));
    set_param(r,'P',num2str(V(jj,2)));
    set_param(r,'F',num2str(V(jj,3)));

```

end

for n=1:length(L)

$V_a(n+1) = V_a(n) - Z_{hat} * L(n) * I_a$;

$V_b(n+1) = V_b(n) - Z_{hat} * L(n) * I_b$;

$V_c(n+1) = V_c(n) - Z_{hat} * L(n) * I_c$;

end

%

Vfaz=[Va.' Vb.' Vc.']; % tüm direklerin(163) a,b,c fazlarının gerilimleri)

for n=1:k

$I(n,:) = Vfaz(n,:) * G0(n,:)$;

$I_{kacak}(n,:) = \text{sum}(I(n,:))$;

$m = \text{abs}(I_{kacak})$;

$h = \text{angle}(I_{kacak}) * 180 / \pi$;

$I = [m \ h]$;

$I(:,3) = 50$;

end

%I

for jj=1:k

$h = \text{sprintf}(['dm/I\%s'], \text{num2str}(jj))$;

$\text{set_param}(h, 'A', \text{num2str}(I(jj,1)))$;

$\text{set_param}(h, 'P', \text{num2str}(I(jj,2)))$;

$\text{set_param}(h, 'F', \text{num2str}(I(jj,3)))$;

end

EK – 4

**DENGELİ VE DENGESİZ SİSTEMLERDE MAGNETİK ALAN
MATLAB/M-FILE PROGRAMI**

```

clear all
clc
% Akım Kaynaklarının(iletkenlerin) Bir Noktadaki Manyetik Alan Hesabı
% DENGELİ/DENGESİZ
%
feksi15=[5.77,5.77,5.77,2.395,2.395,2.395,2.395,2.395,2.395,];% eksi 15 derecede sehim
değerleri
feksi5=[6.1,6.1,6.1,2.513,2.513,2.513,2.513,2.513,2.513];
farti5=[6.423,6.423,6.423,2.635,2.635,2.635,2.635,2.635,2.635];
farti15=[6.736,6.736,6.736,2.759,2.759,2.759,2.759,2.759,2.759];
farti25=[7.087,7.087,7.087,2.917,2.917,2.917,2.917,2.917,2.917];
farti35=[7.4,7.4,7.4,3.08,3.08,3.08,3.08,3.08,3.08];
farti45=[7.646,7.646,7.646,3.13,3.13,3.13,3.13,3.13,3.13];
feksi5tambuzlu=[7.437,7.437,7.437,6.6,6.6,6.6,6.6];
feksi5yarimbuzlu=[5.797,5.797,5.797,4.79,4.79,4.79,4.79,4.79,4.79];
farti5tamruzgarli=[4.671,4.671,4.671,3.853,3.853,3.853,3.853,3.853,3.853];
farti5yarimruzgarli=[5.436,5.436,5.436,4.157,4.157,4.157,4.157,4.157,4.157];
xarti5tamruzgarli=[5.567,5.567,5.567,3.853,3.853,3.853,3.853,3.853,3.853];
xarti5yarimruzgarli=[4.486,4.486,4.486,2.91,2.91,2.91,2.91,2.91,2.91];
%
isletme=input('isletme gir(dengeli 1 dengesiz 2 :')
if isletme==1
    li=[375, -187.5-i*324.76,-187.5+i*324.76, 5.54+i*3.78,-3.719-i*5.446,-5.957+i*3.22,6.66-
    i*0.188,0.537-i*6.675,-2.822+i*5.958];
    yi=[18.38,18.38,18.38,22.3,22.3,22.3,22.3,22.3,22.3];
    yi=yi- farti5tamruzgarli
    xi=[-6.8, 0, 6.8, -4.45, 4.45,-4.45, 4.45,-4.45, 4.45];
    xi=xi+ xarti5tamruzgarli
    xj=0;
    yj=1;
    ri=[12.473, 10.456, 12.473, 17.14, 17.14,17.14, 17.14,17.14, 17.14];
    for n=1:3
        fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
        fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
        Hi1(n)=li(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
        Hi2(n)=li(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
        Hix1(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
        Hiy1(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

    end
    for n=4:5
        fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
        fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
        Hi1(n)=li(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
        Hi2(n)=li(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
        Hix2(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
        Hiy2(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

    end

    for n=6:7

```

```

fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
Hix3(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
Hiy3(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

end
for n=8:9
fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
Hix4(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
Hiy4(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

end
%
else isletme==2
    Ii=[375, -136.8-375.88i, -119.7+328.9i,
12.145+i*10.09,3.155+i*2.2,2.96+i*12.63,16.56+i*8.6,-9.26+i*9.3,-13.87+i*21.225];
    yi=[11.456,11.456,11.456,17.55, 17.55,17.55, 17.55,17.55, 17.55];
    yi=yi- farti5yarimruzgarli
    %
    xi=[-6.8, 0, 6.8, -4.45, 4.45,-4.45, 4.45,-4.45, 4.45];
    xi=xi+ xarti5yarimruzgarli
    %
    xj=0;
    yj=1;
    ri=[12.473, 10.456, 12.473, 17.14, 17.14,17.14, 17.14,17.14, 17.14];
    for n=1:3
        fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
        fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
        Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
        Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
        Hix1(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
        Hiy1(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

    end
    for n=4:5
        fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
        fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
        Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
        Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
        Hix2(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
        Hiy2(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));
    end
    %
    for n=6:7
        fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
        fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);

```

```

Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
Hix3(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
Hiy3(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

end
for n=8:9
fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
Hix4(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
Hiy4(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

end
%
end
Hix1=sum(Hix1)
Hiy1=sum(Hiy1)
Hix2=sum(Hix2)
Hiy2=sum(Hiy2)
Hix3=sum(Hix3)
Hiy3=sum(Hiy3)
Hix4=sum(Hix4)
Hiy4=sum(Hiy4)
%
Hihb1=sqrt(Hix1^2+Hiy1^2)% A/m
Hihb2=sqrt(Hix2^2+Hiy2^2)% A/m
Hihb12=sqrt((Hix1+Hix2)^2+(Hiy1+Hiy2)^2)
%
Hiho1=sqrt(Hix1^2+Hiy1^2)% A/m
Hiho2=sqrt(Hix3^2+Hiy3^2)% A/m
Hiho12=sqrt((Hix1+Hix3)^2+(Hiy1+Hiy3)^2)
%
Hihs1=sqrt(Hix1^2+Hiy1^2)% A/m
Hihs2=sqrt(Hix4^2+Hiy4^2)% A/m
Hihs12=sqrt((Hix1+Hix4)^2+(Hiy1+Hiy4)^2)
%
mu=4*pi*10^(-7);
B=mu*Hi1; % Tesla
magnetikalan=[Hihb1, Hihb2, Hihb12;Hiho1, Hiho2, Hiho12;Hihs1, Hihs2, Hihs12];

% % magnetikalan=[Hihb1, Hihb2, Hihb12;Hiho1, Hiho2, Hiho12;Hihs1, Hihs2, Hihs12];
% bar(magnetikalan,0.8)
% ylabel('\fontname{times}\fontsize{12} {Magnetik Alan(A/m)}');
% legend('\fontname{times}\fontsize{12} {Faz iletkenleri etkisi','Koruma telleri etkisi','Faz ve
koruma telleri etkisi}');
% gtext('\fontname{times}\fontsize{12} {Özdirenç degeri: (100\Omega.m)}')
% k=findobj(gcf,'Tag','zemin');
% set(k,'Color','white')
%
```

%BAZI FORMÜLLER.....

%Bir iletkenin bir noktaya alan manyetik alan formülü:

% $H_i = I_i \cdot f_{ij} / r_{ij}$;

% $f_{ij} = (-y_i/y_j) / r_{ij} \cdot U_x + (x_i-x_j) / r_i \cdot U_y$; programda fi olarak verilmiştir.

% U_x ve U_y x ve y birim vektörleridir.

%sehim hesabı

% faz iletkeni için; $g_i = 0.973 \text{ kg/m}$ $T = 1699 \text{ kg}$.

% koruma teli için ; $g_i = 0.58 \text{ kg/m}$ $T = 1474 \text{ kg}$

% $f = g_i \cdot a^2 / (8 \cdot T)$;

EK – 5

**DENGELİ VE DENGESİZ HARMONİKLİ SİSTEMLERDE MAGNETİK ALAN
MATLAB/M-FILE PROGRAMI**

% Akım Kaynaklarının(iletkenlerin) Bir Noktadaki Manyetik Alan Hesabı

% DENGELİ-DENGESİZ HARMONİK Lİ

feksi15=[5.77,5.77,5.77,2.395,2.395,2.395,2.395,2.395,2.395,5.77,5.77,5.77,2.395,2.395,2.395,2.395,2.395,2.395];

feksi5=[6.1,6.1,6.1,2.513,2.513,2.513,2.513,2.513,2.513,6.1,6.1,6.1,2.513,2.513,2.513,2.513,2.513,2.513];

farti5=[6.423,6.423,6.423,2.635,2.635,2.635,2.635,2.635,2.635,6.423,6.423,6.423,2.635,2.635,2.635,2.635,2.635];

farti15=[6.736,6.736,6.736,2.759,2.759,2.759,2.759,2.759,2.759,6.736,6.736,6.736,2.759,2.759,2.759,2.759,2.759];

farti25=[7.087,7.087,7.087,2.917,2.917,2.917,2.917,2.917,2.917,7.087,7.087,7.087,2.917,2.917,2.917,2.917,2.917];

farti35=[7.4,7.4,7.4,3.08,3.08,3.08,3.08,3.08,3.08,7.4,7.4,7.4,3.08,3.08,3.08,3.08,3.08];

farti45=[7.646,7.646,7.646,3.13,3.13,3.13,3.13,3.13,3.13,7.646,7.646,7.646,3.13,3.13,3.13,3.13,3.13];

feksi5tambuzlu=[7.437,7.437,7.437,6.6,6.6,6.6,7.437,7.437,7.437,6.6,6.6,6.6];

feksi5yarimbuzlu=[5.797,5.797,5.797,4.79,4.79,4.79,4.79,4.79,4.79,5.797,5.797,5.797,4.79,4.79,4.79,4.79,4.79];

farti5tamruzgarli=[4.671,4.671,4.671,3.853,3.853,3.853,3.853,3.853,3.853,4.671,4.671,4.671,3.853,3.853,3.853,3.853,3.853];

farti5yarimruzgarli=[5.436,5.436,5.436,4.157,4.157,4.157,4.157,4.157,4.157,5.436,5.436,5.436,4.157,4.157,4.157,4.157,4.157];

xarti5tamruzgarli=[5.567,5.567,5.567,3.853,3.853,3.853,3.853,3.853,3.853,5.567,5.567,5.567,3.853,3.853,3.853,3.853,3.853];

xarti5yarimruzgarli=[4.486,4.486,4.486,2.91,2.91,2.91,2.91,2.91,2.91,4.486,4.486,4.486,2.91,2.91,2.91,2.91,2.91];

%

isletme=input('isletme gir dengeli harmonikli 1 dengersiz harmonikli 2 :')

if isletme==1

Ii=[375, -187.5-i*324.76,-187.5+i*324.76, 5.54+i*3.78,-3.719-i*5.446,-5.957+i*3.22,6.66-i*0.188,0.537-i*6.675,-2.822+i*5.958,7.66-i*6.427,7.66-i*6.427,7.66-i*6.427,2.68-i*0.35,2.68-i*0.35,3.05-i*1.5,3.05-i*1.5,2.65-i*0.88,2.65-i*0.88];

akim=length(Ii)

yi=[11.456,11.456,11.456,17.55, 17.55,17.55, 17.55,17.55,17.55,11.456,11.456,11.456,17.55, 17.55,17.55, 17.55,17.55, 17.55];

yi=yi-farti5yarimruzgarli

xi=[-6.8, 0, 6.8, -4.45, 4.45,-4.45, 4.45,-4.45, 4.45,-6.8, 0, 6.8, -4.45, 4.45,-4.45, 4.45,-4.45, 4.45];

xi=xi+xarti5yarimruzgarli

xj=0;

yj=1;

ri=[12.473, 10.456, 12.473, 17.14, 17.14,17.14, 17.14,17.14, 17.14,12.473, 10.456, 12.473, 17.14, 17.14,17.14, 17.14,17.14, 17.14];

for n=1:3

fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);

fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);

Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));

Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));

Hix1(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));

Hiy1(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

```

end
for n=4:5
fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
Hix2(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
Hiy2(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

end
%
for n=6:7
fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
Hix3(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
Hiy3(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

end
for n=8:9
fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
Hix4(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
Hiy4(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

end
%
for n=10:12
fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
Hix1h(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
Hiy1h(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

end
for n=13:14
fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
Hix2h(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
Hiy2h(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

end
%
for n=15:16
fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);

```

```

fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
Hix3h(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
Hiy3h(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

end
for n=17:18
fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
Hix4h(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
Hiy4h(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

end
%
else
Ii=[375, -136.8-375.88i, -119.7+328.9i,
12.145+i*10.09,3.155+i*2.2,2.96+i*12.63,16.56+i*8.6,-9.26+i*9.3,-13.87+i*21.225,6.128-
i*5.142,7.07-i*7.07,6-i*10.39, 2.434-i*1.29,2.484-i*1.41,2.72-i*2,2.71-
i*1.91,1.935+i*1.844,1.894+i*1.877];
yi=[11.456,11.456,11.456,17.55, 17.55,17.55, 17.55,17.55,
17.55,11.456,11.456,11.456,17.55, 17.55,17.55, 17.55,17.55, 17.55];
yi=yi-farti5yarimruzgarli
xi=[-6.8, 0, 6.8, -4.45, 4.45,-4.45, 4.45,-4.45, 4.45,-6.8, 0, 6.8, -4.45, 4.45,-4.45, 4.45,-4.45,
4.45];
xi=xi+xarti5yarimruzgarli
xj=0;
yj=1;
ri=[12.473, 10.456, 12.473, 17.14, 17.14,17.14, 17.14,17.14, 17.14,12.473, 10.456, 12.473,
17.14, 17.14,17.14, 17.14,17.14, 17.14];
for n=1:3
fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
Hix1(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
Hiy1(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

end
for n=4:5
fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
Hix2(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
Hiy2(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

end

```

```

for n=6:7
    fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
    fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
    Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
    Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
    Hix3(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
    Hiy3(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

end
    for n=8:9
        fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
        fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
        Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
        Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
        Hix4(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
        Hiy4(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

    end
    %
    for n=10:12
        fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
        fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
        Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
        Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
        Hix1h(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
        Hiy1h(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

    end
    for n=13:14
        fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
        fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
        Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
        Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
        Hix2h(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
        Hiy2h(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

    end
    for n=15:16
        fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
        fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
        Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));
        Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
        Hix3h(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
        Hiy3h(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

    end
    for n=17:18
        fi1(n)=(-yi(n)-yj)/ri(n);
        fi2(n)=(xi(n)-xj)/ri(n);
        Hi1(n)=Ii(n)*fi1(n)/(2*pi*ri(n));

```

```

Hi2(n)=Ii(n)*fi2(n)/(2*pi*ri(n));
Hix4h(n)=real(Hi1(n))+real(Hi2(n));
Hiy4h(n)=imag(Hi1(n))+imag(Hi2(n));

end

end
Hix1=sum(Hix1)
Hiy1=sum(Hiy1)
Hix2=sum(Hix2)
Hiy2=sum(Hiy2)
Hix3=sum(Hix3)
Hiy3=sum(Hiy3)
Hix4=sum(Hix4)
Hiy4=sum(Hiy4)
Hix1h=sum(Hix1h)
Hiy1h=sum(Hiy1h)
Hix2h=sum(Hix2h)
Hiy2h=sum(Hiy2h)
Hix3h=sum(Hix3h)
Hiy3h=sum(Hiy3h)
Hix4h=sum(Hix4h)
Hiy4h=sum(Hiy4h)

Hihb1=sqrt(Hix1^2+Hiy1^2)% A/m
Hihb2=sqrt(Hix2^2+Hiy2^2)% A/m
Hihb12=sqrt((Hix1+Hix2)^2+(Hiy1+Hiy2)^2)

Hiho1=sqrt(Hix1^2+Hiy1^2)% A/m
Hiho2=sqrt(Hix3^2+Hiy3^2)% A/m
Hiho12=sqrt((Hix1+Hix3)^2+(Hiy1+Hiy3)^2)

Hihs1=sqrt(Hix1^2+Hiy1^2)% A/m
Hihs2=sqrt(Hix4^2+Hiy4^2)% A/m
Hihs12=sqrt((Hix1+Hix4)^2+(Hiy1+Hiy4)^2)

Hihb1h=sqrt(Hix1h^2+Hiy1h^2)% A/m
Hihb2h=sqrt(Hix2h^2+Hiy2h^2)% A/m
Hihb12h=sqrt((Hix1h+Hix2h)^2+(Hiy1h+Hiy2h)^2)

Hiho1h=sqrt(Hix1h^2+Hiy1h^2)% A/m
Hiho2h=sqrt(Hix3h^2+Hiy3h^2)% A/m
Hiho12h=sqrt((Hix1h+Hix3h)^2+(Hiy1h+Hiy3h)^2)

Hihs1h=sqrt(Hix1h^2+Hiy1h^2)% A/m
Hihs2h=sqrt(Hix4h^2+Hiy4h^2)% A/m
Hihs12h=sqrt((Hix1h+Hix4h)^2+(Hiy1h+Hiy4h)^2)

%sonuc
Hihb1harm=sqrt(Hihb1^2+Hihb1h^2)% A/m
Hihb2harm=sqrt(Hihb2^2+Hihb2h^2)% A/m

```

```
Hihb12harm=sqrt((Hix1+Hix2)^2+(Hiy1+Hiy2)^2+(Hix1h+Hix2h)^2+(Hiy1h+Hiy2h)^2)
```

```
Hiho1harm=sqrt(Hiho1^2+Hiho1h^2)% A/m
```

```
Hiho2harm=sqrt(Hiho2^2+Hiho2h^2)% A/m
```

```
Hiho12harm=sqrt((Hix1+Hix3)^2+(Hiy1+Hiy3)^2+(Hix1h+Hix3h)^2+(Hiy1h+Hiy3h)^2)
```

```
Hihs1harm=sqrt(Hihs1^2+Hihs1h^2)% A/m
```

```
Hihs2harm=sqrt(Hihs2^2+Hihs2h^2)% A/m
```

```
Hihs12harm=sqrt((Hix1+Hix4)^2+(Hiy1+Hiy4)^2+(Hix1h+Hix4h)^2+(Hiy1h+Hiy4h)^2)  
%
```

```
% mu=4*pi*10^(-7);
```

```
% B=mu*Hi1; % Tesla
```

```
% magnetikalan=[Hihb1harm, Hihb2harm, Hihb12harm;Hiho1harm, Hiho2harm,  
Hiho12harm;Hihs1harm, Hihs2harm, Hihs12harm];
```

```
% bar(magnetikalan,0.8)
```

```
% ylabel('\fontname{times}\fontsize{12} {Magnetik Alan(A/m)}');
```

```
% legend('\fontname{times}\fontsize{12} {Faz iletkenleri etkisi','Koruma telleri etkisi','Faz ve  
koruma telleri etkisi}');
```

```
% gtext('\fontname{times}\fontsize{12} {Özdirenç degeri: (100\Omega.m)}')
```

```
% k=findobj(gcf,'Tag','zemin');
```

```
% set(k,'Color','white')
```

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 14.09.1974

Doğum yeri Mardin

Lise 1988-1991 Midyat Lisesi

Lisans 1992-1996 Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fak.
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1996-1999 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Müh. Anabilim Dalı, Elektrik Tes. Programı

Doktora 1999-2005 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Müh. Anabilim Dalı Programı

Çalıştığı kurum(lar)

1997-Devam ediyor YTÜ Elektrik Müh. Bölümü Araştırma Görevlisi