

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORTA GERİLİM ŞEBEKELERİNDE
KISA SÜRELİ GERİLİM DEĞİŞİMLERİNİN
TOPRAKLAMA METODLARINA BAĞLI
İNCELENMESİ

Özgür KARACASU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ
ANA BİLİM DALI

GEBZE
2002

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORTA GERİLİM ŞEBEKELERİNDE
KISA SÜRELİ GERİLİM DEĞİŞİMLERİNİN
TOPRAKLAMA METODLARINA BAĞLI
İNCELENMESİ

Özgür KARACASU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ
ANA BİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
YRD. DOÇ. DR. M. HAKAN HOCAOĞLU

GEBZE

ÖZET

Bir elektrik şebekesinin durumunu belirleyen en önemli güç kalitesi unsurlarından biri de Kısa Süreli Gerilim Değişimleri (KSGD)'nin genliği ve süresidir. KSGD yarım periyot ile bir dakika arasında gerilim değişimi olarak tanımlanmaktadır. KSGD sürelerine ve genliklerine göre gerilim çökmesi, gerilim şişmesi, kısa kesilme ve salınımlı geçicilikler olarak sınıflandırılmaktadır. KSGD'nin temel nedeni kısa devreler ve büyük yüklerin anahtarlanması olarak kabul edilmektedir. KSGD'nin nicel bir analizinin standart geliştiriciler, güç sistemi operatörleri ve üreticiler için yararlı bilgiler sağlaması beklenmelidir.

Bu tez orta gerilim şebekesi nötr topraklama metodlarının, 11 kV radyal şebekede simüle edilen tek faz toprak kısa devresi sonucunda meydana gelen, kısa süreli gerilim değişimleri üzerindeki etkisini incelemektedir. Topraklama metodları ile birlikte hat uzunluğu, kısa devre yeri ve kısa devre gücünün de etkisi incelenmiştir. Simülasyonlar EMTP'nin (ElectroMagnetic Transient Program) ATP (Alternative Transient Program) versiyonu ile yapılmış ve simetrik bileşenler teorisine dayanan analitik çözümler ile kıyaslanmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki kısa süreli gerilim değişimleri nötr topraklama metodları ve yukarıda adı geçen diğer parametrelerin etkisi altındadır.

SUMMARY

One of the most important power quality factors which determine the state of an electric network is magnitude and time scale of the Short Duration Voltage Variations (SDVVs). SDVVs. are regarded as having a voltage change with a time scale of half a cycle to a minute. In addition, they are categorized according to their duration and magnitude as; voltage sag, voltage swell, brief interruption and transients. It has been accepted that, faults or switching on/off large loads are the main cause of the SDVVs. Therefore quantitative analysis of the SDVVs is expected to provide valuable information for standard developers, power system operators and manufacturers.

The study presented here is about the effects of neutral grounding methods of medium voltage networks on SDVVs which are simulated by creating single line to ground faults in a 11 kV radial network. The effect of length of the line, fault location and source impedance are investigated in conjunction with neutral grounding methods. The simulations are carried out using ATP (Alternative Transient Program) version of EMTP (Electro Magnetic Transient Program) and results are compared with the analytical solutions which are based on symmetrical components theory. The results demonstrate that SDVVs are heavily under influence of neutral grounding methods and above mentioned parameters.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince yardımını ve hoşgörüsünü esirgemeyen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU'na

Ve her zaman maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin amacı	1
1.2. Tezin sınırları	1
1.3. Tezin yapısı	2
2. GÜÇ KALİTESİ VE KISA SÜRELİ GERİLİM DEĞİŞİMLERİ	4
2.1. Güç Kalitesi	4
2.1.1. Bozulmalar	5
2.1.2. Gerilim Dalgalanmaları	5
2.1.3. Kırpışmalar	6
2.1.4. Rahatsızlıklar	6
2.1.5. Dengesizlikler	7
2.2. Güç Kalitesi Standartları	8
2.2.1. IEC 61000-2-5:1995	8
2.2.2. IEEE 1159:1995	10
2.2.3. EN 50160:2000	13
2.2.4. Bilgi Teknolojileri Endüstrisi Konseyi Eğrisi	13
2.3. Kısa Süreli Gerilim Değişimleri	15
3. KISA SÜRELİ GERİLİM DEĞİŞİMLERİ - NİTEL BİR İNCELEME	18
3.1. Giriş	18
3.2. Gerilim çökmesi ile ilgili analizler	19
3.3. Sonuç	27
4. GÜÇ SİSTEMLERİNDE TOPRAKLAMA	28
4.1. Giriş	28
4.2. Yıldız noktası yalıtılmış şebekeler	29
4.3. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekeler	32
4.4. Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebekeler	34
4.5. Toprak teması kompanze edilmiş şebekeler	35
4.6. Etkin topraklanmış şebekeler	37
4.7. Sonuç	38
5. NÖTR BAĞLANTI ŞEKLİNE GÖRE AŞIRI GERİLİMLERİN ANALİZİ	40
5.1. Giriş	40
5.2. Yıldız noktası yalıtılmış şebeke	41
5.3. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekeler	44
5.4. Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebekeler	45

5.5. Toprak teması kompanze edilmiş şebekeler	58
5.6. Sonuç	60
6. HAT UZUNLUĞU VE NÖTR BAĞLANTI ŞEKLİNE GÖRE AŞIRI GERİLİMLERİN ANALİZİ	62
6.1. Giriş	62
6.2. Yıldız noktası yalıtılmış şebeke	62
6.3. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebeke	65
6.4. Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebeke	67
6.5. Toprak teması kompanze edilmiş şebeke	75
6.6. Sonuç	77
7. KISA DEVRE YERİNİN DEĞİŞİMİ VE NÖTR BAĞLANTI ŞEKLİNE GÖRE AŞIRI GERİLİMLERİN ANALİZİ	79
7.1. Giriş	79
7.2. Test şebekesi	79
7.3. Yıldız noktası yalıtılmış şebeke	80
7.4. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebeke	82
7.5. Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebeke	84
7.6. Toprak teması kompanze edilmiş şebeke	91
7.7. Sonuç	93
8. KISA DEVRE GÜCÜ VE NÖTR BAĞLANTI ŞEKLİNE GÖRE AŞIRI GERİLİMLERİN ANALİZİ	94
8.1. Giriş	94
8.2. Test şebekesi	94
8.3. Yıldız noktası yalıtılmış şebeke	96
8.4. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebeke	97
8.5. Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebeke	99
8.6. Toprak teması kompanze edilmiş şebeke	105
8.7. Sonuç	106
9. SONUÇ	108
KAYNAKLAR	111
ÖZGEÇMİŞ	114
EK-A. TEST ŞEBEKESİ PARAMETRELERİNİN HESABI	115
A.1. Giriş	115
A.2. Test şebeksi	115
A.3. Eşdeğer devre parametrelerinin hesabı	116
A.3.1. Gerilim kaynağı parametreleri	116
A.3.2. İletim hattı parametreleri	116
A.3.3. Hat empedansı hesabı	117
A.3.4. Hat kapasitansı hesabı	119
A.3.5. ATP-EMTP hat parametreleri rutini	119
A.3.6. Simetrik bileşenler	120

KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltma	Açıklaması
KSGD	Kısa Süreli Gerilim Değişimleri
TFTKD	Tek Faz Toprak Kısa Devresi
ATP	Alternative Transient Program
EMTP	ElectroMagnetic Transient Program
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
EN	Europäische Norm (European Standard)
ITIC	Information Technology Industry Council
CBEMA	Computer and Business Equipment Manufacturers Association

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
2.1. IEEE 1159:1995' göre kısa süreli değişimler.	12
2.2. Teknoloji Endüstrisi Konseyi Eğrisi [15].	14
2.3. Tek faz toprak kısa devre sonrası faz nötr gerilimleri.	16
3.1. Gerilim çökmesi devre modeli.	19
3.2. Gerilim çökmesi genliğinin mesafe ile değişimi.	20
3.3. Gerilim çökmesi genliğinin mesafe ve kısa devre gücü ile değişimi.	21
3.4. Gerilim çökmesinin kesit ve mesafeye göre değişimi, (a) havai hat, (b) yer altı kablosu.	22
3.5. İki farklı gerilim seviyesine sahip devre modeli.	23
3.6. Gerilim çökmesi genliğinin transformatör empedansı ile değişimi.	24
3.7. Güç sisteminde kısa devre yeri ve yük pozisyonları.	25
4.1. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede tek faz toprak kısa devresi öncesi; (a) şarj akımları; (b) fazör diyagramı.	30
4.2. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede faz ve nötr gerilimleri; (a) tek faz toprak kısa devre öncesi; (b) tek faz toprak kısa devre sonrası.	30
4.3. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede tek faz toprak kısa devresi sırasında; (a) şarj akımları; (b) fazör diyagramı.	31
4.4. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede tek faz toprak kısa devresi sonrasında; (a) şarj akımlarının dağılımı; (b) akım ve gerilim fazör diyagramı.	33
4.5. Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebekede tek faz toprak kısa devresi sonrasında şarj akımlarının dağılımı.	34
4.6. Toprak teması kompanze edilmiş şebekede tek faz toprak kısa devresi sonrasında şarj akımlarının dağılımı.	36
5.1. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede TFTKD akımı.	41
5.2. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede TFTKD sırasında faz nötr gerilimleri.	42
5.3. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede TFTKD sırasında nötr toprak gerilimi.	42
5.4. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede TFTKD sırasında faz faz gerilimleri.	43
5.5. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede TFTKD sırasında faz nötr gerilimleri.	44
5.6. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede TFTKD sırasında faz faz gerilimleri.	45
5.7. TFTKD sırasında B, C fazları ve nötr toprak geriliminin topraklama direnci (R) ile değişimi.	46
5.8. TFTKD sırasında B, C fazları ve nötr toprak geriliminin topraklama reaktansı (XL) ile değişimi.	47
5.9. TFTKD akımının topraklama direnci (R) ve reaktansına (XL) göre değişimi.	47
5.10. TFTKD sırasında B, C fazları ve nötr toprak geriliminin topraklama direnci (R) ve reaktansına (XL) göre değişimi.	48
5.11. TFTKD sırasında B, C fazları ve nötr toprak geriliminin acı ve genliklerinin topraklama direnci (R) ve reaktansına (XL) göre değişimi.	49

5.12.	10 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede tek faz toprak kısa devresi sırasında faz nötr gerilimleri.	50
5.13.	10 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede tek faz toprak kısa devresi sırasında faz faz gerilimleri.	51
5.14.	200 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede tek faz toprak kısa devresi sırasında faz nötr gerilimleri.	52
5.15.	200 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede tek faz toprak kısa devresi sırasında faz faz gerilimleri.	52
5.16.	10 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı sistemde tek faz toprak kısa devresi sırasında faz nötr gerilimleri.	53
5.17.	10 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı sistemde tek faz toprak kısa devresi sırasında faz faz gerilimleri.	54
5.18.	200 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı sistemde tek faz toprak kısa devresi sırasında faz nötr gerilimleri.	55
5.19.	200 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı sistemde tek faz toprak kısa devresi sırasında faz faz gerilimleri.	55
5.20.	TFTKD sırasında B, C fazları ve nötr toprak geriliminin maksimum değerlerinin topraklama direnci (R) ve reaktansı (XL) ile değişimi.	57
5.21.	Rezonans topraklı sistemde tek faz toprak kısa devre akımı.	58
5.22.	Rezonans topraklı sistemde tek faz toprak kısa devresi sırasında faz nötr gerilimi.	59
5.23.	Rezonans topraklı sistemde tek faz toprak kısa devresi sırasında nötr toprak gerilimi.	59
5.24.	Rezonans topraklı sistemde tek faz toprak kısa devresi sırasında faz faz gerilimleri.	60
6.1.	Yıldız noktası yalıtılmış şebekede kısa devre akımının hat uzunluğuna bağlı değişimi.	63
6.2.	Yıldız noktası yalıtılmış şebekede faz ve nötr gerilimlerinin hat uzunluğuna bağlı değişimi.	64
6.3.	Yıldız noktası yalıtılmış şebekede faz ve nötr gerilimlerinin maksimum değerlerinin hat uzunluğuna bağlı değişimi.	64
6.4.	Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede kısa devre akımının hat uzunluğuna bağlı değişimi.	65
6.5.	Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede faz ve nötr gerilimlerinin hat uzunluğuna bağlı değişimi.	66
6.6.	Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede faz gerilimlerinin maksimum değerlerinin hat uzunluğuna bağlı değişimi.	67
6.7.	Yıldız noktası direnç üzerinden topraklanmış şebekede (a) B fazı gerilimi; (b) C fazı gerilimi; (c) nötr toprak gerilimi; (d) kısa devre akımının topraklama direnci ve hat uzunluğuna bağlı değişimi.	68
6.8.	Yıldız noktası direnç üzerinden topraklanmış şebekede (a) B fazı gerilimi; (b) C fazı gerilimi; (c) nötr toprak gerilimi; (d) kısa devre akımı maksimum değerinin topraklama direnci ve hat uzunluğuna bağlı değişimi.	70
6.9.	Yıldız noktası reaktans üzerinden topraklanmış şebekede (a) B fazı gerilimi; (b) C fazı gerilimi; (c) nötr toprak gerilimi; (d) kısa devre akımının topraklama reaktansı ve hat uzunluğuna bağlı değişimi.	72
6.10	Yıldız noktası reaktans üzerinden topraklanmış şebekede (a) B fazı gerilimi; (b) C fazı gerilimi; (c) nötr toprak gerilimi; (d) kısa devre akımı	

maksimum değerinin topraklama reaktansı ve hat uzunluğuna bağlı değişimi.	74
6.11. Toprak teması kompanze edilmiş şebekede kısa devre akımının hat uzunluğuna bağlı değişimi	76
7.1. Test şebekesi tek hat diyagramı.	79
7.2. Test şebekesi simetrik bileşenler eşdeğer devresi.	80
7.3. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede kısa devre akımının hat uzunluğuna bağlı değişimi.	81
7.4. Kısa devre mahalli ve hat sonu gerilimlerinin kısa devre yerine bağlı değişimi.	82
7.5. Yıldız noktası direnç üzerinden topraklanmış şebekede (a) B fazı gerilimi; (b) C fazı gerilimi; (c) nötr toprak gerilimi; (d) kısa devre akımının topraklama direnci ve kısa devrenin kaynaktan olan uzaklığına bağlı değişimi.	84
7.6. Yıldız noktası direnç üzerinden topraklanmış şebekede (a) B fazı gerilimi; (b) C fazı gerilimi; (c) nötr toprak gerilimi; (d) kısa devre akımı maksimum değerinin topraklama direnci ve kısa devrenin kaynaktan olan uzaklığına bağlı değişimi.	86
7.7. Yıldız noktası reaktans üzerinden topraklanmış şebekede (a) B fazı gerilimi; (b) C fazı gerilimi; (c) nötr toprak gerilimi; (d) kısa devre akımının topraklama reaktansı ve kısa devrenin kaynaktan olan uzaklığına bağlı değişimi.	88
7.8. Yıldız noktası reaktans üzerinden topraklanmış şebekede (a) B fazı gerilimi; (b) C fazı gerilimi; (c) nötr toprak gerilimi; (d) kısa devre akımı maksimum değerinin reaktans değeri ve kısa devrenin kaynaktan olan uzaklığına bağlı değişimi.	90
7.9. Toprak teması kompanze edilmiş şebekede kısa devre akımının hat uzunluğuna bağlı değişimi.	92
8.1. Test şebekesi tek hat diyagramı.	94
8.2. 34.5 kV'luk iletim hattı iletken konfigürasyonu.	95
8.3. Test şebekesi simetrik bileşenler eşdeğer devresi.	95
8.4. Transformator primerindeki gerilimlerin hat uzunluğuna bağlı değişimi.	96
8.5. Transformator primerinde ve kısa devre mahallindeki gerilimlerin hat uzunluğuna bağlı değişimi	98
8.6. Transformator primerindeki gerilimlerin hat uzunluğuna bağlı değişimi	98
8.7. Yıldız noktası direnç üzerinden topraklanmış şebekede (a) kısa devre mahalli gerilimleri; (b) transformator sekonder gerilimleri; (c) transformator primer gerilimleri; (d) kısa devre akımının topraklama direnci ve primer hat uzunluğuna bağlı değişimi.	100
8.8. Yıldız noktası reaktans üzerinden topraklanmış şebekede (a) kısa devre mahalli gerilimleri; (b) transformator sekonderi gerilimleri; (c) transformator primer gerilimleri; (d) kısa devre akımının topraklama reaktansı ve primer hat uzunluğuna bağlı değişimi.	103
8.9. Toprak teması kompanze edilmiş şebekede kısa devre akımının hat uzunluğuna bağlı değişimi.	106
A.1. Modellenen şebekenin eşdeğer devresi	115
A.2. Test şebekesi simetrik bileşenler eşdeğer devresi	116
A.3. 11kV havai hat iletken konfigürasyonu	117

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
2.1. IEC 61000'e göre Güç Sistemi Elektromanyetik Olayları [1, 3].	9
2.2. IEEE 1159:1995 'e göre Güç Sistemi Elektromanyetik Olayları [1, 3].	11
5.1. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede tek faz toprak kısa devresi sırasında faz akımları ve gerilimleri.	43
5.2. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede tek faz toprak kısa devresi sırasında kısa devre akım ve sağlıklı faz gerilimler.	45
5.3. TFTKD sırasında B, C, nötr toprak gerilimleri ve kısa devre akımının 10Ω ve 200Ω 'luk topraklama empedansı ile değişimi.	56
6.1. Mesafeye bağlı Peterson Bobini değerleri	76
A.1. Poppy tipi iletken bilgisi	117
A.2. Hat parametrelerinin simetrik bileşen eşdeğerleri	121

1. GİRİŞ

Enerji piyasasının özelleştirilmesi ve satılacak enerjinin standartlarının ortaya konulması ile birlikte son kullanıcılar kendilerine ne kadar kaliteli enerji satıldığını sorgular hale gelmiştir. Kaliteli enerji son kullanıcıya iletilen gerilim, akım ve frekansın deklare edilen sınırlar içinde kalması şeklinde tanımlanabilir. Bu sınırların dışına çıkılması durumu güç kalitesi problemlerini ortaya çıkartmaktadır.

Teknolojideki gelişmeler sonucunda kullanılmaya başlanan birçok hassas ekipmanın güç sisteminden iletilen bozulmaları tolere edememesi ile paralel olarak son yıllarda güç kalitesi kavramının önem kazandığı görülmektedir. Bu bozulmalardan biri de kısa süreli gerilim değişimleridir.

Yıldırım, kısa devre, büyük güçlü transformatörlerin devreye alınması ve çıkartılması gibi durumlarda kendini gösteren kısa süreli gerilim değişimlerinin temel kaynağı şebekedir [1, 2, 3, 4]. Kısa süreli gerilim değişimleri ile ilgili olarak literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde şebeke kısa devre gücü [4], iletim hattı mesafesi [5] gibi konuların incelendiği, arıza çeşitlerine göre muhtemel kısa süreli gerilim değişimlerinin sınıflandığı [6] görülmüştür. Ancak şebeke arızalarının çok önemli bir kısmını oluşturan tek faz toprak kısa devresi sonucunda oluşan kısa süreli gerilim değişimlerinin topraklama metodlarına bağlı olarak yeterince incelenmediği görülmüştür. Bu eksiklik tezin temel motivasyonunu oluşturmaktadır.

1.1. Tezin amacı

Bu çalışmanın ana amacı güç sistemleri topraklama metodlarının kısa süreli gerilim değişimleri üzerindeki etkisini incelemektir. Bu çalışmanın neticesinde elde edilecek verilerin şebeke planlayıcıları ve işletmeciler için güç kalitesi ile ilgili standartlara uyum sağlamada faydalı olması beklenmektedir.

1.2. Tezin sınırları

Kısa süreli gerilim değişimleri zaman ve genlik bakımından çok geniş bir aralığı kapsamaktadır. 0.2ms-1dakika arasında gözlenen gerilim çökmesi, gerilim

şışmesi, kısa kesilme ve salınımlı geçicilikleri bünyesinde barındırmaktadır [7]. Bu olayların topraklama metotlarından ne ölçüde etkilendiği nitel olarak analiz edilmiştir.

Çalışmalar orta gerilim seviyesinde ve radial şebeke ile sınırlı tutulmuştur. Kısa devre akımının yük akımından bağımsız olarak incelenebilmesi ve kısa devre akımından kaynaklanan gerilim düşümlerinin görülebilmesi için şebeke yüksüz olarak kullanılmıştır. 11 kV'luk havai hatta, meydana gelme oranı en yüksek kısa devre türü olan, tek faz toprak kısa devresi modellenmiştir.

Topraklama metodlarının dolayısıyla topraklama empedansının etkisi incelendiği için kısa devre direnci ve toprak direnci hesaba katılmıştır. Ark oluşması durumu topraklama metodu ve kısa devre akımının değeri gibi özel koşullara bağlı olduğu için analizlerde ark hesaba katılmamıştır. Tek faz toprak kısa devresi sürekli. Tek faz veya üç faz açma ve geri kapama yapılmamıştır.

1.3. Tezin yapısı

Tez dokuz bölümden oluşmuştur. Tezin ikinci bölümünde güç kalitesinden bahsedilmiştir. Şebekede gözlenen güç kalitesi olayları hakkında bilgi verildikten sonra mevcut güç kalitesi standartları tanıtılmıştır. Standartlar arasındaki farklar gösterilmiş ve bu çalışmanın konusunu oluşturan *kısa süreli gerilim değişimleri* terimi tanımlanmıştır.

Tezin üçüncü kısmında kısa süreli gerilim değişimleri ile ilgili olarak literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Gerilim çökmesi üzerinde yoğunlaşan çalışmaların önemli görülenleri bu bölümde tekrar gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki çalışmaların ışığında gerilim çökmesi ve şebeke topraklama tipi ile ilgili olarak eksik görülen kısımlar belirlenmiştir.

Tezin dördüncü kısmında güç sistemlerinde kullanılan topraklama metodlarının geçmişten günümüze doğru gelişimi mevcut standartlar ışığında ele alınmıştır. Metodlar arasındaki farklar belirtilmiş ve şebekede meydana gelen kısa devreler sonrasında sağlıklı fazların gerilimlerinin değişimi vurgulanmıştır.

Tezin beşinci kısmında topraklama metodlarının tek faz toprak kısa devresindeki performansı test şebekesi üzerinde incelenmiştir. Sağlıklı fazlardaki gerilim değişimlerinin incelendiği bu bölümde nümerik analiz programlarından faydalanılmış ve analizler analitik metodlar ile doğrulanmıştır.

Tezin altıncı kısmında topraklama metodlarının tek faz toprak kısa devresindeki performansının şebeke yapısından nasıl etkilendiğinin belirlenebilmesi için hat uzunluğu değişken test şebekesi üzerinde parametrik analizler yapılmıştır. İletim hattı uzunluğunun sağlıklı fazlara olan etkisi incelenmiştir. Analizler analitik metodlar ile doğrulanmıştır.

Tezin yedinci kısmında topraklama metodlarının tek faz toprak kısa devresindeki performansının kısa devre yerinden nasıl etkilendiğinin belirlenebilmesi için hat uzunluğu sabit test şebekesi üzerinde kısa devre yeri değiştirilerek parametrik analizler yapılmıştır. Kısa devre yeri değişikliğinin sağlıklı fazlara olan etkisi incelenmiştir. Analizler analitik metodlar ile doğrulanmıştır.

Tezin sekizinci kısmında kısa devrenin neden olduğu gerilim değişimlerinin Üçgen yıldız transformatör üzerinden bir üst gerilimi seviyesine geçişi incelenmiştir. Bu geçiş sırasında transformatörün alçak gerilim tarafındaki topraklama metodu değişkendir. Yüksek gerilim tarafında hat uzunluğu değişken tutularak kısa devre gücünün etkisine de bakılmıştır. Analizler analitik metodlar ile doğrulanmıştır.

2. GÜÇ KALİTESİ VE KISA SÜRELİ GERİLİM DEĞİŞİMLERİ

Bu bölümde güç kalitesi kavramından kısaca bahsedilecektir. Güç kalitesine etki eden unsurlar hakkında kısa bilgiler verildikten sonra güç kalitesi ile ilgili standartlar [7, 8, 9] tanıtılacak ve bu standartların genlik ve zaman açısından farklılıkları belirtilecektir.

Standartlar arasındaki farklar ışığında bu çalışmanın konusunu teşkil eden *kısa süreli gerilim değişimleri* terimi ile verilen gerilim çökmesi, gerilim şişmesi, kısa kesilme ve salınımlı geçicilikler tanımlanacak ve bu olaylar detaylı olarak ele alınacaktır.

2.1. Güç Kalitesi

Güç sistemlerinde ‘Kalite’ kelimesi uzun yıllar boyunca kaynak (güç sistemi) yeterliliği ve güvenilirliğini ifade etmek için kullanılmaktaydı. İlerleyen yıllarda gerilimin kalitesi ‘Güç Kalitesi’ ile birlikte anılmaya başlandı. Güç elektroniği ekipmanlarının kullanımının artması ile birlikte sürekli duyulan bir kelime haline geldi [1, 2].

Günümüzde ‘Güç kalitesi’ terimi bozulmuş sinüzoidal gerilim ve akım veya tasarlandığı sınırlar dışındaki gerilim, akım ve frekans olarak tanımlanabilir [3, 4].

1980’lere kadar güç kalitesi dağıtım ve iletim seviyesinde ele alınıyordu ve son kullanıcı tarafından kullanılan ekipmanların büyük bir kısmı bu bozulmaları tolere edebilmekteydi. Ancak 1980’lerden sonra kullanılan bilgisayarlar, bilgisayar kontrollü ekipmanlar ve hassas cihazların yüksek kalitede ve güvenilirlikte enerjiye ihtiyaç duymaları güç kalitesi probleminin son kullanıcı seviyesinde ele alınmasına neden oldu.

Son dönemde çeşitli ulusal ve uluslararası kuruluşlarca yapılan standardizasyon çalışmaları ile güç kalitesi veya gerilimdeki ve akımdaki bozulmalar tanımlanmıştır. Bu tanımları beş ana grupta inceleyebiliriz [3]. Bunlar;

- Bozulmalar (Distortion)
- Gerilim dalgalanmaları (Voltage fluctuations)
- Kırpışmalar (Flicker)
- Rahatsızlıklar (Disturbances)
- Dengesizlikler (Unbalance)

2.1.1. Bozulmalar

Çalışma frekansının katlarındaki sinüzoidal akım ve gerilim dalgalarının neden olduğu bozulmalar genel olarak harmonikler olarak bilinmektedir. Çalışma frekansının tam katlarında olmayan sinüzoidal akım ve gerilim dalgaları ise ara harmoniklere olarak tanımlanmaktadır.

Harmoniklerin ana nedeni lineer olmayan gerilim ve akım karakteristiğine sahip devre elemanlarıdır.

Transformatörlerde, kapasitörlerde ve döner makinalarda fazladan kayıplara ve gürültüye, sistemde seri veya paralel rezonans sonucu tahribatlara, telefon hatları ile girişime neden olmaktadır [3].

2.1.2. Gerilim Dalgalanmaları

Gerilim dalgalanmaları iki grupta incelenebilir. Birinci grupta gerilim, düzenli veya düzensiz zaman aralıklarında, farklı bir değere çıkmaktadır. Bunun nedeni kaynak makinesi, kompresör, değirmen vb. güçlü makinaların kullanılmasıdır.

İkinci grupta ise gerilim, periyodik veya rasgele değişmektedir. Bunun nedeni ark fırınları gibi yüklerde empedansın ani olarak değişmesidir.

Gerilim dalgalanmaları genel olarak kapasitör kullanılan ekipmanlarda performans kayıplarına, kontrol sistemlerinin stabiliteden ayrılmasına neden olmaktadır. Genel olarak bir çok ekipman gerilimdeki $\pm\%10$ bandında oluşan dalgalanmasından etkilenmemektedir [1].

2.1.3. Kırpışmalar

Kırpışma kelimesi; günlük hayatta kullanılan aydınlatma ekipmanlarda meydana gelen ve gözle algılanabilir her türlü ışık şiddeti salınımının genel adıdır. Genlik modülasyonu, anahtarlamalar, ara harmonikler gibi gerilimin genliği ve frekansında aynı anda meydana gelen değişimlerdir. Ark fırınları, sürücü devreleri ile sabit bir momente veya devire ayarlanmış motorlar kırpışma nedenidir. 50 Hz 220 V'luk sinyal üzerinde 7 Hz 20 V'luk bir sinyalin binmesi 7 Hz'lik bir kırpışma veya 90 Hz'lik bir ara harmonik 10 Hz'lik bir kırpışma olarak tanımlanabilir.

Balastlar, deşarj lambaları vb. aydınlatma ekipmanları ve hassas elektronik cihazları etkilemektedir. Aydınlatma ekipmanlarında görülen problemler direk olarak insanları etkilemekte, baş ağrısı ve göz yorgunluğuna neden olmaktadır. Hassas cihazları ve aydınlatma ekipmanlarını kırpışmalardan kolaylıkla korunabilmektedir. Ancak aydınlatma ekipmanlarının sayısının fazlalığı ve ucuzluğu korunmaları yönünde büyük bir engeldir [3].

2.1.4. Rahatsızlıklar

Güç sistemindeki ani değişiklikler veya kısa süreli arızalar sonucunda sürekli hal dalga şeklinde oluşan geçici değişikliklerdir. Bu değişiklikler beş başlıkta ele alınabilir.

- Gerilim azalması (voltage sag-dip, undervoltage)
- Kesilmeler (brief interruptions, interruptions)
- Gerilim yükselmesi (voltage swell, overvoltage)
- Geçicilikler (transients)
- Gerilim çentikleri (voltage notches)

Gerilim azalması; gerilim çökmesi ve alçak gerilim olmak üzere iki grupta ele alınabilir. Gerilim çökmesi, gerilimin genliğinin yarım periyot ile bir dakika arasında 0.1-0.9 pu aralığına düşmesidir. Alçak gerilim ise gerilimin genliğinin bir dakikadan uzun süre için 0.8-0.9 pu aralığına düşmesidir.

Kesilmeler; kısa süreli kesilmeler ve kesilmeler olmak üzere iki grupta ele alınabilir. Kısa süreli kesilmeler, gerilimin genliğinin yarım periyot ile bir dakika arasında 0.1 pu'nun altına inmesidir. Kesicilerin açması ve tekrar geri kapaması sırasında görülür. Kesilmeler ise gerilimin genliğinin bir dakikadan uzun süre için 0 pu değerini almasıdır.

Gerilim yükselmesi; gerilim şişmesi ve yüksek gerilim olmak üzere iki grupta ele alınabilir. Gerilim şişmesi, gerilimin genliğinin yarım periyot ile bir dakika arasında nominal değerinin 1.1-1.8 pu aralığına yükselmesidir. Yüksek gerilim ise gerilimin genliğinin bir dakikadan uzun süre için 1.1-1.2 pu aralığına yükselmesidir.

Geçicilikler; gerilim çökmesi ve şişmesinden daha kısa süreli (azami yarım period) gerilim değişimleri olarak tanımlanmaktadır. Güç sistemindeki ani değişiklikler neden olarak gösterilebilir. Sürelerine göre iki ayrı grupta incelenebilirler. Bunlar kapasitör bankları gibi rezonansa neden olabilecek yüklerin anahtarlama (Switching surge) veya kısa devreler sonucunda meydana gelen milisaniyeler mertebesindeki salınımlı geçicilikler ve ark veya izolasyon bozulmaları gibi mikro saniyelik darbelerdir (Impulse spike).

Gerilim çentikleri; AC – DC konverterlerde komutasyon sırasında faz faz kısa devresinin neden olduğu periyodik geçiciliklerdir. Çok ani gerilim yükselmesi ve ana dalgada meydana gelen sıfır geçişlerden dolayı elektronik ekipmanlar zarar görmektedir. Bu problemler son kullanıcı tarafında trafoda filtrelendiği için yüksek gerilim tarafında ilerlemesi mümkün değildir. Ancak bu problem aynı trafo merkezinden beslenen son kullanıcılar için ciddi bir problemdir.

2.1.5. Dengesizlikler

Üç faz geriliminin tanımlanan değerde olmaması, faz açılarının 120° den farklı bir değerde olması veya her ikisinin aynı anda görülmesi durumudur. Genel olarak çaprazlanmamış hatlardan ve tek fazdan beslenen büyük yüklerin dengeli olarak dağıtılamamasından kaynaklanmaktadır. Nötr noktasının kaymasına, ölçümlerde hataya, üç fazlı cihazlarda ısınmaya neden olmaktadır [3].

2.2. Güç Kalitesi Standartları

Güç kalitesi ile standartlar iki grupta ele alınabilir. Birinci gruptaki standartlara IEC 61000-2-5:1995 [8] ve EN 50160:2000 [9] standartları örnek verilebilir. Bu standartlar cihaz veya ürün temelli standartlardır. Bir cihaz ve ürünün sahip olması gereken uyumluluk sınırlarını verir. Uyumluluk sınırları iki unsurdan oluşur. Birincisi cihazın sebep olacağı olaylar, ikincisi ise cihazı etkileyecek dış kaynaklı olaylardır. İkinci gruptaki standartlara ise IEEE 1159:1995 [7] standardı örnek verilebilir. Bu standartta ortak etkileşim noktası olarak tanımlanan bir noktada oluşabilecek bozulmalara sınırlanmaktadır. Bu çalışmada sadece kısa süreli gerilim değişimleri ile ilgili standartla üzerinde durulmuştur.

Bu standartlar dışında, özel grupların ve kuruluşların yayınladığı cihazlara özel sınırların verildiği çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalara örnek olarak ITIC (Information Technology Industry Council) tarafından yayınlanan ve bilgi teknolojileri konusunda çalışan cihazların maruz kalabilecekleri bozulmaların belirlendiği ITIC eğrisi verilebilir [10].

2.2.1. IEC 61000-2-5:1995

Tüm elektrikli cihazların çevrelerindeki diğer cihazlar ile hiçbir elektromanyetik etkileşim içinde olmadan çalışmasını beklemek doğru bir yaklaşım değildir. Ancak bu etki belirli toleranslar dahilinde olmalıdır. Cihazların hangi elektromanyetik olaylara ne boyutta neden olacağı ve hangi boyuttaki elektromanyetik olaylardan ne nispette etkileneceği ve neye neden olacağı belirlenmelidir. Bu mantıktan yola çıkılarak hazırlanılan IEC standartlarına göre tüm bozulmalar üç ana başlık altında incelenebilir. Bunlar;

- Düşük frekans olayları (<9 kHz),
- Yüksek frekans olayları (>9 kHz),
- Elektrostatik deşarj olaylarıdır.

Her bir olay kendi içinde ışıma (radyasyon) ve iletim olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Işıma bozulmaları ekipmanların çevresinde görülen elektrik ve manyetik alan ile meydana gelen bozulmaları, iletim bozulmaları ise metalik yolla

iletilen bozulmaları ele almaktadır. IEC 61000-2-5:1995'e göre güç sistemi elektromanyetik olayları Tablo 2.1'de verilmiştir [1, 3].

Tablo 2.1. IEC 61000'e göre Güç Sistemi Elektromanyetik Olayları [1, 3].

Düşük frekans olayları (<9kHz)	
- İletim bozulmaları	- Harmonik ve ara harmonikler - Haberleşme gerilimleri - Gerilim dalgalanmaları - Gerilim inmesi (dip) ve kesilmeler - Gerilim dengesizlikleri - Güç frekansı değişimleri - İndüklenen alçak frekanslı gerilimler - A.C. şebekelerde D.C. kullanımı
- Işıma bozulmaları	- Manyetik alan - Elektrik alan
Yüksek frekans olayları (>9kHz)	
- İletim bozulmaları	- İndüklenen sürekli formda akım ve gerilim - Tek yönlü geçicilikler - Salınımlı geçicilikler
- Işıma bozulmaları	- Manyetik alan - Elektrik alan - Elektromanyetik alan ▪ Sürekli ▪ geçici
Elektrostatik deşarj olayları	
Nükleer elektromanyetik darbe	

Tablo 2.1'de görülen, 9 kHz'den düşük frekanslı iletim bozulmaları, IEC 61000-2-1:1990 [11]'da detaylı olarak ele alınmıştır. IEC 61000-2-1:1990'e göre gerilim inmesi (Voltage dip), gerilimin ani olarak azalması ve yarım periyot ile birkaç dakikalık süre sonunda tekrar nominal değerine oturmasıdır. Kesilme ise bir dakikadan uzun olmamak şartıyla gerilim kaynağının kaybedilmesidir. Gerilim inmesinde gerilim, nominal değerinin %10 ile %99 arasında azalabilir. %100'lük bir azalma kesilme olarak tanımlanmaktadır [3].

Tablo 2.1 incelendiğinde düşük frekanslı iletim bozulmaları grubu içinde gerilimin nominal sınırların üzerine çıkması durumunun tanımlanmadığı görülebilir. Gerilimin nominal sınırlarının üzerine çıkması hali yüksek frekanslı iletim bozulmaları grubu içinde salınımlı geçicilikler ve tek yönlü geçicilikler ile tanımlanmıştır. 9 kHz altındaki düşük frekanslı geçicilikler yüksek frekanslı olaylar sınıfında incelense de güç frekansında görülen kısa süreli gerilim yükselmeleri bu grupta da incelenmemektedir.

2.2.2. IEEE 1159:1995

Bu Standartta güç kalitesi olayları sürelerine ve genliklerine göre tanımlanmaktadır. IEEE 1159:1995'e göre güç kalitesi olaylarını süre ve genliklerine göre değişimi Tablo 2.2 verilmiştir [1, 3].

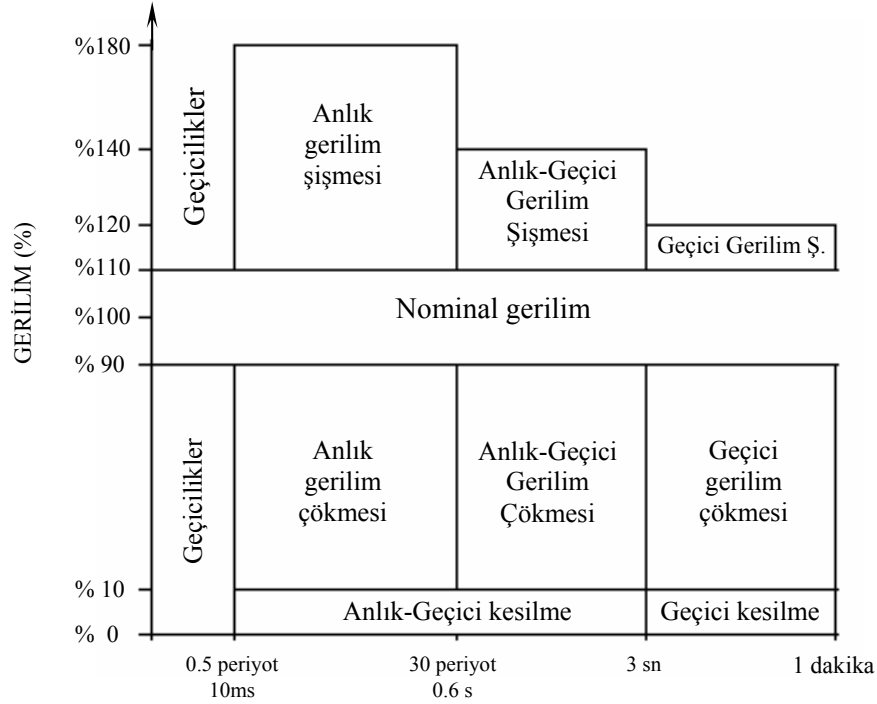
Yarım periyottan daha kısa sürede gerçekleşen olaylar geçicilikler, yarım periyottan bir dakikaya kadar olan olaylar kısa süreli değişimler ve bir dakikadan uzun süren olaylar uzun süreli değişimler olarak tanımlanmaktadır. Dengesizlikler, bozulmalar, dalgalanmalar ve güç frekansındaki değişimler ayrıca tanımlanmıştır.

IEC 61000'de tanımlanmayan düşük frekansta nominal gerilimin üzerine çıkılması durumu gerilim şişmesi adıyla tanımlanmıştır. Tablo 2.2'den görüldüğü gibi gerilim çökmesi ve şişmesi kısa süreli değişimler sınıfına girmektedir [3]. Kısa süreli değişimler, koruma cihazlarının tipik çalışma sürelerine bağlı olarak anlık, anlık-geçici ve geçici olmak üzere üç kısma ayrılır. Geçiciliklere bakıldığında darbelerin zamana göre, salınımlı geçiciliklerin ise frekansa göre sınıflandırıldığı dikkati çekecektir.

Tablo 2.2. IEEE 1159:1995 'e göre Güç Sistemi Elektromanyetik Olayları [1, 3].

Sınıf	Frekans aralığı	Zaman aralığı	Gerilim
1. Geçicilikler			
1.1. Darbe			
1.1.1. Nanosaniyelik	5 ns'lik artış	< 50 ns	
1.1.2. Microsaniyelik	1 µs'lik artış	50 ns – 1 ms	
1.1.3. Milisaniyelik	0.1 ms'lik artış	> 1 ms	
1.2. Salınımlar			
1.2.1. Düşük frekans	< 5 kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 p.u.
1.2.2. Orta frekans	5 – 500 kHz	20 µs	0 – 8 p.u.
1.2.3. Yüksek frekans	0.5 – 5 MHz		0 – 4 p.u.
2. Kısa süreli değişimler			
2.1. Anlık (Instantaneous)			
2.1.1. Gerilim çökmesi		0.5-30 period	0.1 – 0.9 p.u.
2.1.2. Gerilim şişmesi		0.5-30 period	1.1 – 1.8 p.u.
2.2. Anlık-Geçici (Momentary)			
2.2.1. Kesilme		0.5-30 period – 3 s	< 0.1 p.u.
2.2.2. Gerilim çökmesi		30 period – 3 s	0.1 – 0.9 p.u.
2.2.3. Gerilim şişmesi		30 period – 3 s	1.1 – 1.4 p.u.
2.3. Geçici (Temporary)			
2.3.1. kesilme		3 s – 1 dakika	< 0.1 p.u.
2.3.2. Gerilim çökmesi		3 s – 1 dakika	0.1 – 0.9 p.u.
2.3.3. Gerilim şişmesi		3 s – 1 dakika	1.1 – 1.2 p.u.
3. Uzun süreli değişimler			
3.1. Kesilme		> 1 dakika	0.0 p.u.
3.2. Alçak gerilim		> 1 dakika	0.8 – 0.9 p.u.
3.3. Yüksek gerilim		> 1 dakika	1.1 – 1.2 p.u.
4. Gerilim dengesizliği		Sürekli hal	0.5% - 02%
5. Dalga şeklindeki bozulmalar			
5.1. D.C. öteleme		Sürekli hal	0% - 0.1%
5.2. Harmonikler	0 – 100. H.	Sürekli hal	0% - 20%
5.3. Ara harmonikler	0 – 6 kHz	Sürekli hal	0% - 2%
5.4. Çentikler		Sürekli hal	
5.5. Gürültü	Broad band	Sürekli hal	0% - 1%
6. Gerilim kıpraşmaları	< 25 Hz	Süreksiz	0.1% - 7%
7. Güç frekansı değişim		< 10 s	

Anlık değişimler gerilim çökmesi ve şişmesi olmak üzere iki kısma ayrılır. Anlık-geçici ve geçici değişmeler ise kesilme, gerilim çökmesi ve şişmesi olmak üzere üç kısma ayrılır. Kısa ve uzun süreli değişimlerin gerilim azalma ve artma limitleri, sistemin gerilim değişim limiti olan $\pm\%10$ 'dan daha fazladır. IEEE 1159:1995'e göre kısa süreli değişimler Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. IEEE 1159:1995' göre kısa süreli değişimler.

IEEE 1159'da kullanılan terimler IEC standartlarında kullanılan terimlere benzemekle birlikte farklılıklar da arz etmektedir. IEEE'de kullanılan gerilim çökmesi tabiri ile IEC'de kullanılan gerilim inmesi tabiri eş anlamlıdır. Gerilim inmesi tabiri referans olarak nominal gerilimi ele almakta ve buna göre kıyas yapmaktadır. %100 gerilim inmesi, kesilme anlamına gelmektedir. Gerilim çökmesi tabiri ise referans olarak sıfırı almaktadır. %100 gerilim çökmesi, gerilimin nominal değerde olduğunu ifade etmektedir.

IEC'de frekansa bağlı olarak tek grupta ele alınan *gerilim inmesi ve kesilmeler* IEEE'de süre ve genlik açısından kısa süreli değişimler altında üç farklı grupta ele alınmıştır. IEC'de ele alınmayan, gerilimin nominal değerlerin üzerine çıkması durumu IEEE'de gerilim şişmesi adı altında kısa süreli değişimleri grubuna dahil edilmiştir.

2.2.3. EN 50160:2000

Alçak ve orta gerilim dağıtım şebekesinin sahip olması gereken vasıfların sıralandığı bu standartta gerilim, frekans, genlik, anlık değişim, gerilim çökmesi, kısa ve uzun süreli kesilme, dengesizlik ve harmonik gibi kavramların sınırları belirtilmiştir.

Gerilim yükselmesi iki ayrı terimle tanımlanmaktadır. *Gerilim çökmesi*, kaynak geriliminin 10ms ile bir dakika arasında kabul edilen değerinin %90'ı ile %1'i arasında yeni bir değer almasıdır. *Güç frekansında geçici yüksek gerilim* ise kısa devreler veya anahtarlamalara sonrasında olay mahallinde meydana gelen gerilim yükselmeleridir. Gerilim çökmesine oranla uzun süreli bir olaydır. Geçicilikler ise birkaç milisaniyeden daha kısa süreli olan, salınımlı veya salınımsız, kendi kendine azalan gerilim yükselmeleridir [9].

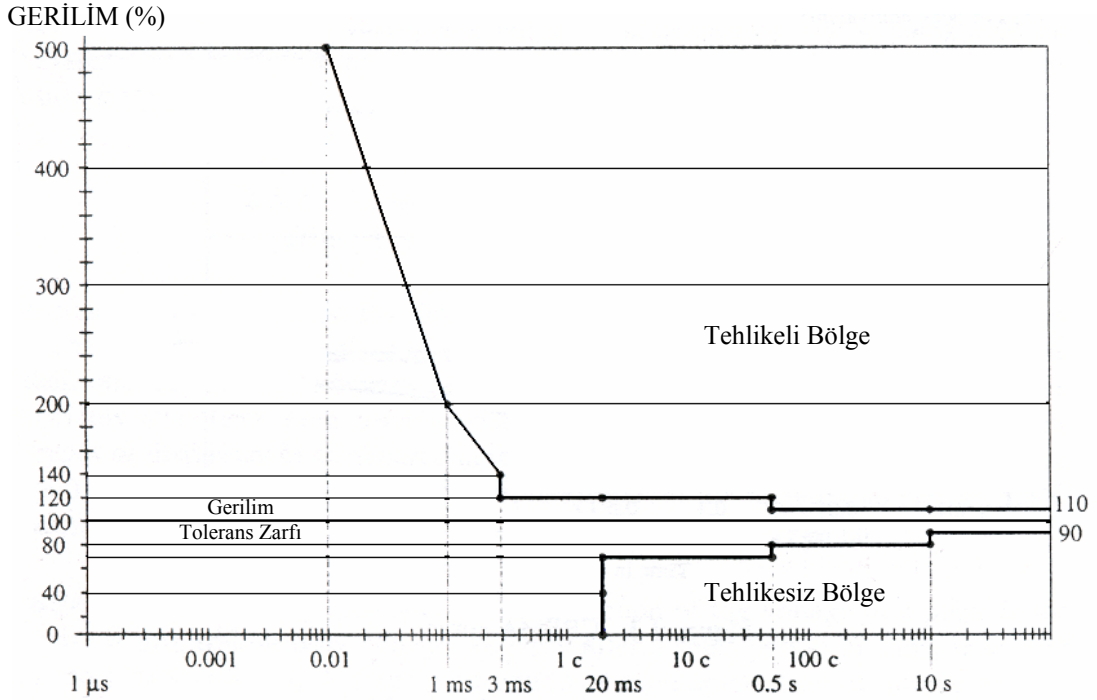
Standart incelendiğinde genel olarak olayların tanımlandığı, nedenlerinin gösterildiği ancak IEEE'de veya IEC'de olduğu gibi kesin sınırlar çizilmediği görülmektedir.

2.2.4. Bilgi Teknolojileri Endüstrisi Konseyi Eğrisi

Gerilim kalitesi ile ilgili ilk çalışmalardan biri olarak tanımlanmaktadır. İlk adı CBEMA (Bilgisayar Ekipmanları Üreticileri Birliği) olan kurum tarafından yapılan çalışmanın amacı, bilgisayar güç kaynağı üreticilerinin karşılaştıkları ve şebekeden kaynaklanan dizayn problemlerinin çözülmesiydi.

Adını ITIC (Bilgi Teknolojileri Endüstrisi Konseyi) olarak değiştiren birlik, çalışmanın kapsamını genişletmiş ve bilgi teknolojileri konusunda çalışan cihazların maruz kalabilecekleri bozulmaların belirlendiği ITIC eğrisini yayınlamıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen eğri Şekil 2.2'de verilmiştir [10].

Bu eğri ile geçicilikler, gerilim kesilmesi, gerilim çökmesi veya alçak gerilim ve gerilim şişmesi veya aşırı gerilim olaylarının genlik ve zamana bağlı olarak cihazlara olan etkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Teknoloji Endüstrisi Konseyi Eğrisi [10].

Eğri genlik ve süre bakımından yedi farklı olay ile ilgili sınırları içermektedir. Bunlar;

- **Sürekli hal toleransı :** Bu zarf gerilimin nominal efektif değerindeki $\pm\%10$ 'luk değişime karşılık gelmektedir.
- **Gerilim şişmesi :** Bu zarf, gerilimin 0.5 s'ye kadar $\%120$ 'ye çıkmasına karşılık gelmektedir. Bu zarftaki değişikliklere örnek olarak büyük güçteki yüklerin devre dışı bırakılması verilebilir.
- **Nominal ile $\%80$ arasındaki gerilim çökmesi :** Neden olarak sistemde meydana gelen kısa devreler ve büyük güçlü yüklerin anahtarlanması gösterilebilir. Bu olaylar 10 s'ye kadar sürebilir.
- **Nominal ile $\%70$ arasındaki gerilim çökmesi :** Neden olarak sistemde meydana gelen kısa devreler ve büyük güçlü yüklerin anahtarlanması gösterilebilir. Bu olaylar 0.5 s'ye kadar sürebilir.
- **Nominal ile $\%0$ arasındaki gerilim çökmesi veya kesilmesi :** Kısa devrenin meydana gelmesi ve temizlenmesi sırasında görülen gerilim çökmesi ve kesilmelerdir. Sistem tekrar nominal çalışma koşullarına geri döner. Bu olaylar 20 ms'ye kadar sürebilir.

- **Alçak frekanslı salınımlar :** Kapasitör banklarının devreye girmesi sırasında gözlenen salınımlardır. Genliği 200 Hz’de %140’ dan 5 kHz’de %200’a kadar frekansa bağlı olarak lineer olarak artmaktadır.
- **Yüksek frekanslı salınım ve darbeler :** Bu zarf, yıldırım düşmesi sonrasında gözlenen geçiciliklerdir. Efektif genlikleri yerine hem genlikleri hem de frekansları ile tanımlanırlar.

Bu sınırlar dışında kalan iki bölge vardır. Bunlar tehlikeli ve tehlikesiz bölgedir. Tehlikesiz bölgede cihazlar gerilim çökmesi ve kesilmelere maruz kalmaktadır. Cihazların doğru olarak çalışması beklenmemektedir. Ancak cihazlarda kalıcı bir arızada oluşmamaktadır. Tehlikeli bölgede cihazlar aşırı gerilime maruz kalmaktadır. Bu da cihazların arızalanmasına sebep olmaktadır [3, 10].

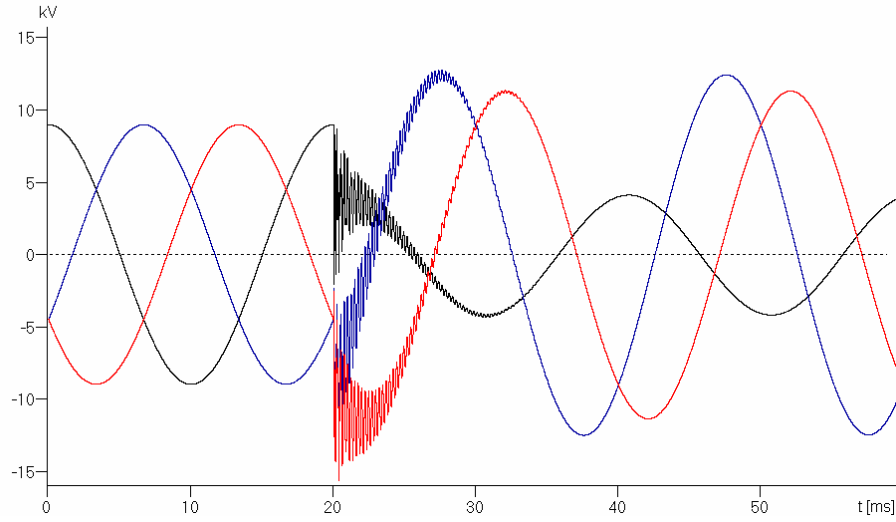
Bu çalışma 60 Hz 120 V dağıtım şebekesi için yapılmıştır. 50 Hz 240 V dağıtım şebekesi ile ilgili olarak literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

2.3. Kısa Süreli Gerilim Değişimleri

Güç kalitesi ile ilgili standartlar incelendiğinde bir çok güç kalitesi olayının genlik ve frekans bakımından farklı değerlendirildiği, bir standartta ele alınan bozulmanın diğer bir standartta ele alınmadığı görülmektedir. Kısaca standartlar arasında koordinasyon eksikliği olduğu görülmektedir. Bunun nedeni güç kalitesi standartlarının yeni ortaya konulması ve düzenlemelerinin hala devam etmesidir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde IEEE tarafından kısa süreli değişimler olarak tanımlanan gerilim çökmesi ve gerilim şişmesi olaylarından gerilim çökmesinin incelenmeye devam edildiği [12], gerilim şişmesi konusunda ise yeterli çalışma yapılmadığı görülmüştür. Üç fazlı kısa devreler ve üç fazlı yüklerin anahtarlanması dışında, gerilim çökmesi ve şişmesi olaylarının eş zamanlı olduğu görülmektedir. Meydana gelen tek faz toprak kısa devresinde, şebekenin topraklama tipine bağlı olarak farklı genlikte, kısa devre olan fazda gerilim çökmesi gözlenirken sağlıklı fazlarda gerilim şişmesi gözlenmektedir. Şekil 2.3’de 11 kV’luk şebekede meydana gelen tek faz toprak kısa devresi sonrasında faz nötr gerilimlerinin değişimi verilmiştir. Sağlıklı fazların gerilimlerinde gerilim şişmesi görülürken kısa devre

olan fazda gerilim çökmesi görülmektedir. Bununla birlikte her üç fazında gerilimlerinde salımlı geçicilikler görülmektedir.



Şekil 2.3. Tek faz toprak kısa devre sonrası faz nötr gerilimleri.

Şekil 2.3'den de görülmektedir ki gerilim çökmesi, gerilim şişmesi ve salınımlar birbirinden ayrı incelenmesi durumu söz konusu değildir. Bu çalışmanın da başlığını oluşturan *Kısa Süreli Gerilim Değişimleri*, *gerilim çökmesi*, *gerilim şişmesi*, *kısa kesilmeler* ve *salımlı geçicilikleri* kapsamaktadır.

Gerilim çökmesi; nominal şebekenin gerilimin etkin değerinin yarım periyot ile bir dakika arasında 0.1-0.9 pu aralığına düşmesidir. Bu azalmanın nedenleri; sisteme yıldırım düşmesi, kaynağın geçici olarak sistemden ayrılıp geri bağlanması (anahtarlanması), büyük güçlü motor ve transformatörlerin devreye alınması ve kısa devreler olarak gösterilebilir. Gerilim çökmeleri, deşarj lambalarının sönmeye, kontrol cihazlarının hatalı çalışmasına, motorlarda devir kaybına veya durmaya, bilgisayar ve haberleşme cihazlarında hatalara neden olur.

Gerilim şişmesi ise nominal şebeke geriliminin etkin değerinin yarım periyot ile bir dakika arasında 1.1 pu üzerine çıkmasıdır. Bu artmanın nedenleri; büyük güçlü motor ve transformatörlerin devreden çıkartılması ve dengesiz kısa devreler olarak gösterilebilir. Gerilim şişmeleri; kontrolörlerin ve motor sürücülerinin koruma devrelerinin bozulmasına neden olur. Maruz kalan tüm cihazlar için, gerilim çökmesinin aksine, yalıtım problemleri, ömür azalması ve tahribat gibi sonuçlar doğurur.

Kısa kesilmeler, gerilimin genliğinin yarım periyot ile bir dakika arasında 0.1 pu'nın altına inmesidir. Salınımlı geçicilikler ise 50-5 kHz frekans aralığında gerilim genliğinin 0-4 pu arasında değişmesidir.

Gerilim çökmesi ve şişmesinin etkisi hem genliğe hem de süreye bağlıdır. %40'lık bir azalma bir periyot süreyle meydana geldiğinde bir çok cihazın bu çökmeden etkilenmediği görülür. Ancak %40'lık bir azalma 10 periyot süreyle meydana gelirse bu çökme bilgisayar sistemlerinde hatalı çalışmaya neden olacaktır. Gerilim şişmelerinin gerilim çökmelerine göre en büyük dezavantajı cihazlarda tahribata veya izolasyon problemlerine neden olmasıdır [1].

Gerilim şişmeleri, çökmelere göre daha az görülmektedir. Büyük güçlü motor ve transformatörlerin devreye alınması ve devreden çıkartılması işlemleri sırasında gerilim çökmesi ve şişmesi gözlenmektedir. Bu olaylar üç fazlı dengeli olaylardır ve kontrol altında yapılmaktadır. Ancak dengesiz kısa devreler ve hatta yıldırım düşmesi gibi olaylar kontrolsüz ve plansız olaylardır. Kısa devre, gerçekleştiği fazlarda gerilim çökmesine yol açarken sağlıklı fazlarda gerilim şişmesine neden olmaktadır.

Salınımlı geçicilikler, gerilim çökmesi ve şişmesinden daha kısa süreli (yarım period) gerilim değişimleri olarak tanımlanmaktadır. Kapasitör bankları gibi rezonansa neden olabilecek yüklerin anahtarlama veya kısa devreler gibi güç sistemindeki ani değişiklikler neden olarak gösterilebilir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde gerilim çökmelerinin farklı bir gerilim seviyesine transferinin [13, 14, 15] incelendiği ancak bu transfer sırasında şebeke topraklama tipinin gerilim çökmesi ve gerilim şişmesi üzerindeki etkilerinin incelenmediği görülmüştür. Bölüm 3'te literatürde bulunan çalışmaların bir kısmı detaylı olarak tekrar incelenecektir.

3. KISA SÜRELİ GERİLİM DEĞİŞİMLERİ - NİTEL BİR İNCELEME

3.1. Giriş

Kısa süreli gerilim değişimleri ile ilgili literatürdeki çalışmalar incelendiğinde gerilim çökmesinin, meydana gelme sayısının fazlalığı ile orantılı olarak, gerilim şişmesine oranla daha detaylı incelendiği görülmektedir.

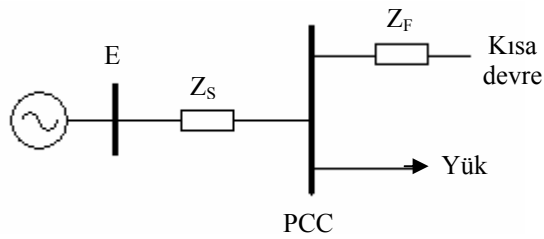
Gerilim çökmesi ile ilgili literatürdeki çalışmalar genel olarak iki grupta ele alınabilir. İlk grupta cihazların gerilim çökmeleri esnasındaki davranışları [14] ve nasıl korunabilecekleri ele alınmıştır. Bu amaçla şebeke modelleri üzerinde analizler yapılmış, güç sisteminin gerilim çökmesi karakteristikleri çıkartılmaya çalışılmıştır [16]. Bu karakteristiklerin bilinmesi şebekeden beslenecek olan hassas cihazların çalışma aralıklarını belirlenmesinde önem kazanmaktadır.

İkinci grupta ise gerilim çökmesi mekanizmalarının belirlenmesi ile ilgilenilmektedir. Gerilim çökmelerinin nedenlerinin sınıflandırılması [17], radyal olmayan şebekelerdeki davranışı [15], farklı kısa devre durumlarında gerilim çökmesinin nasıl değiştiği [6, 18, 19], transformatörlerden farklı bir gerilim seviyesine nasıl intikal ettiği [13], faz açısının nasıl değiştiği [15], gibi konularda çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sırasında güç sisteminin yıldız noktasının doğrudan doğruya veya küçük değerli direnç üzerinden topraklı olduğu koşullar incelenmiştir [4]. Yıldız noktası yalıtılmış veya toprak teması kompanze edilmiş şebekelerdeki durum incelenmemiştir.

Bu bölümde verilen analizler ikinci grupta ele alınan çalışmalara girmektedir. Üç fazlı kısa devreye maruz kalan radyal şebeke modelinde yapılan analizleri kapsamaktadır. Gerilim çökmeleri ile ilgili literatürde bulunan, kısa devre gücü, kısa devre mahalline olan uzaklık, iletim hattı yapısı ve farklı gerilim seviyesine intikal gibi konularda yapılan çalışmalar tekrar gerçekleştirilmiştir.

3.2. Gerilim çökmesi ile ilgili analizler

Gerilim çökmesinin detaylı olarak incelenmesi için gerilim bölme esasına dayanan basit bir devre modeli kullanılmaktadır [4, 15, 18]. Şekil 3.1’de verilen devre modelinde Z_S kaynak empedansını, Z_F ise kısa devre ile PCC arasındaki empedansı ifade etmektedir. Kısa devre direnci ve toprak direnci Z_F ’e eklenebilir. PCC (Point of Common Coupling) ortak etkileşim noktası anlamına gelmektedir. PCC, herhangi bir arıza durumu söz konusu olmadığında gerilimin nominal değerinde olmasını beklediğimiz baradır.



Şekil 3.1. Gerilim çökmesi devre modeli.

Şekil 3.1’deki devre incelendiğinde meydana gelen üç fazlı kısa devre sonunda PCC’deki gerilimin gerilim bölme kuralına uygun olarak Denklem 3.1 ile hesaplanabileceği görülür.

$$V_{PCC} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} \cdot E \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de E ’nin değerinin 1 p.u. kabul edilmesi durumunda Denklem 3.2 elde edilir.

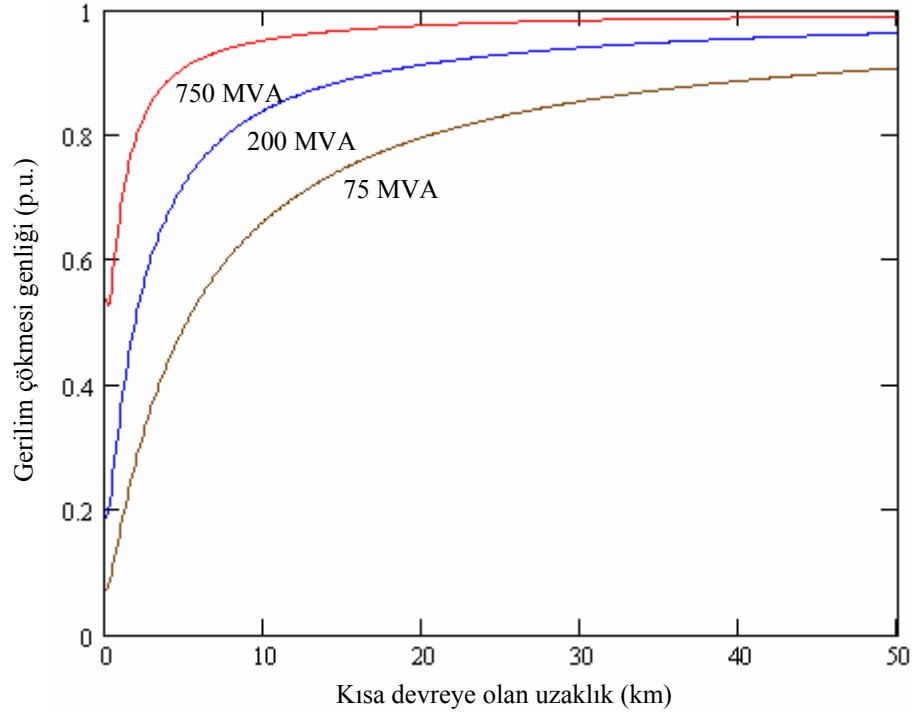
$$V_{PCC} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} \quad (3.2)$$

Kısa devre öncesindeki akım kısa devre akımı yanında ihmal edilebilir. Bu kabul sayesinde yük ile PCC noktası arasındaki gerilim düşümü ihmal edilmiş olur.

PCC noktasındaki gerilim çökmesinin mesafe ile olan ilişkisini gösterebilmek için Denklem 3.2’deki Z_F değişkeni iletim hattının km başına empedansı ve km cinsinden mesafe ile değiştirilirse Denklem 3.3 elde edilir [4, 15].

$$V_{PCC} = \frac{z \cdot L}{Z_S + z \cdot L} \quad (3.2)$$

11 kV'luk hatta meydana gelecek bir kısa devre sonrasında PCC noktasındaki gerilim çökmesinin mesafeye bağlı değişimi Şekil 3.2'de verilmiştir. 150 mm² kesitli havai hattın empedansı $0.117+j0.315 \Omega/\text{km}$ olarak verilmiştir. Şebekenin kısa devre gücünün gerilim çökmesi üzerindeki etkisinin gösterilebilmesi için 750 MVA, 200 MVA ve 75 MVA'lık üç ayrı kısa devre gücü kullanılmıştır.

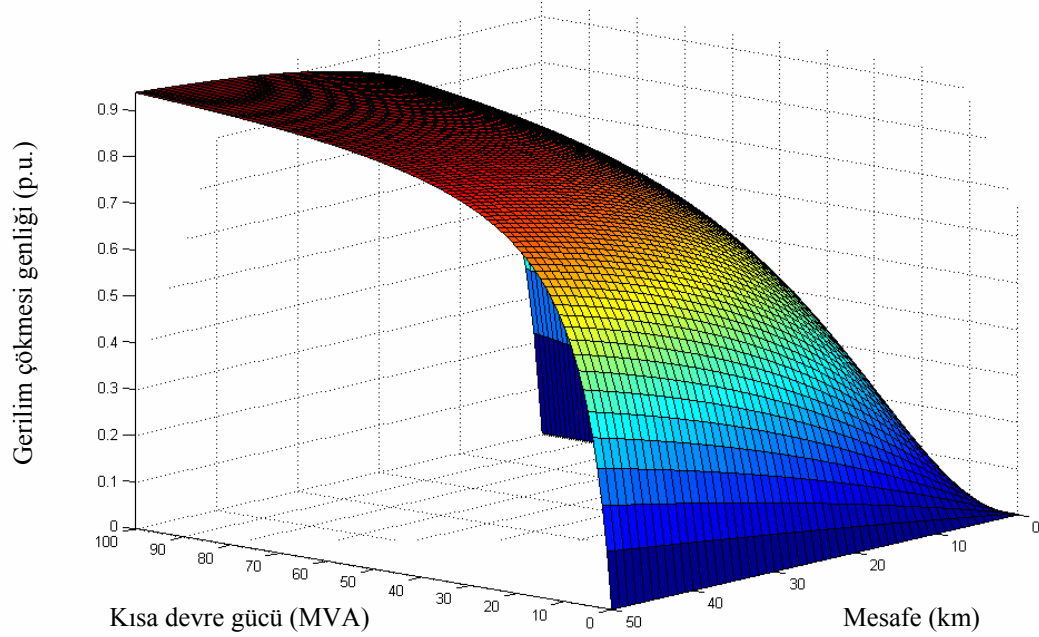


Şekil 3.2. Gerilim çökmesi genliğinin mesafe ile değişimi.

Gerilim çökmesi genliğinin mesafe ile arttığı Şekil 3.2'den görülmektedir. Kısa devre gücü 75 MVA iken kısa devre mahallinden 10 km uzakta görülen gerilim çökmesi %80, 20 km uzakta görülen gerilim çökmesi %67'dir. Kısa devre gücü 200 MVA'ya çıkartıldığında kısa devre mahallinden 10 km uzakta görülen gerilim çökmesi %91, 20 km uzakta görülen gerilim çökmesi %84'e yükselmiştir. Kısa devre gücü 750 MVA iken kısa devre mahallinden 10 km uzakta görülen gerilim çökmesi %97, 20 km uzakta görülen gerilim çökmesi %95'tir.

Kısa devre gücü arttıkça yani kaynak empedansı azaldıkça gerilim çökmesinin etkisi arttırdığı görülmektedir. 750 MVA'lık şebekede gerilim çökmesi şebekenin $\pm\%10$ 'luk tolerans sınırı içinde kalmıştır. 75 MVA'lık şebekede ise 10 km uzakta yaşanan bir kısa devrede dahi %80'lik gerilim çökmesi gözlenmiştir. Şebekenin güçlü olmasının gerilim çökmelerinin etkilerini azalttığı Şekil 3.2'den görülmektedir.

11 kV'luk şebekede kısa devre gücü ve mesafenin gerilim çökmesi üzerindeki etkisi Şekil 3.3'den görülmektedir. İletim hattı, 150 mm² kesite sahip, empedansı $0.117+j0.315 \Omega/\text{km}$ olan havai hattır. Kısa devre gücü 0-100 MVA, kısa devre mahalline olan uzaklık ise 0-50 km arasında değişkendir.



Şekil 3.3. Gerilim çökmesi genliğinin mesafe ve kısa devre gücü ile değişimi.

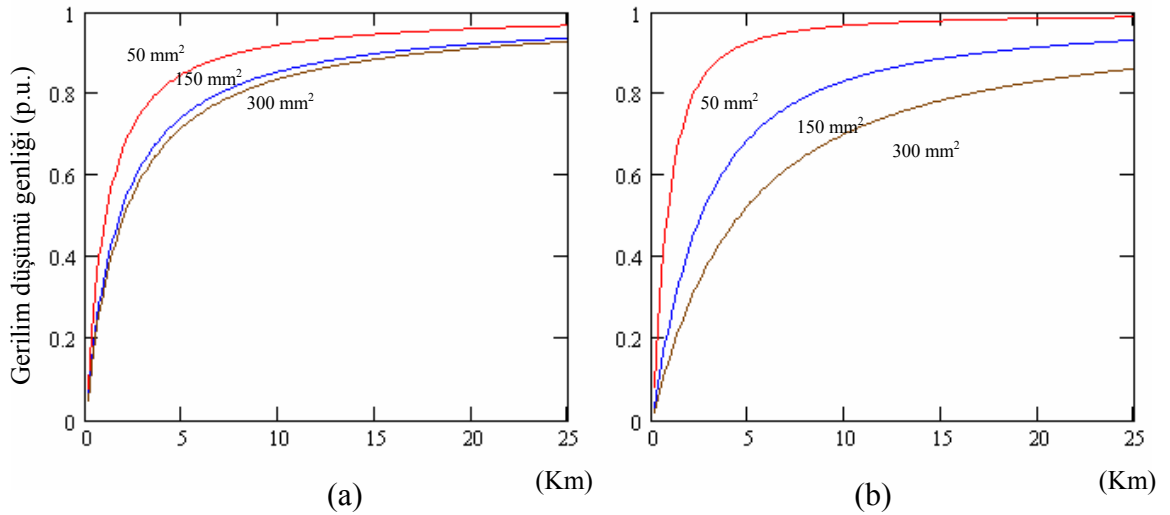
Kısa devre gücü arttıkça kaynak empedansı Z_S küçülmektedir. Z_S 'in küçülmesi gerilim çökmesi genliğinin artmasını sağlamaktadır. PCC noktası ile kısa devre mahalli arasındaki mesafenin artması, Z_F 'in artmasına neden olmaktadır. Z_F 'in artması gerilim düşmesi genliğinin artmasını sağlamaktadır. Küçük güçlü şebekelerde PCC noktasında meydana gelen bir kısa devrede gerilim çökmesi genliğinin sıfıra yakın olduğu yani gerilimin sıfıra yakın olduğu Şekil 3.3'den görülebilmektedir. Bununla birlikte 100 MVA gücündeki şebekede kısa devre mahalline olan uzaklık arttıkça PCC noktasının daha az etkilendiği görülmektedir. 100 MVA gücündeki şebekede 50 km uzakta meydana gelen kısa devrede PCC noktasındaki gerilim düşümü genliği 0.936 p.u.'dır. Bu değer şebekenin $\pm\%10$ 'luk tolerans sınırı içinde kalmaktadır.

Denklem 3.3 incelendiğinde Z_F 'in sadece mesafeden değil iletim hattı empedansından da etkilendiği görülmektedir. Tablo 3.1'de farklı kesitlerde havai hat ve yeraltı kablolarının empedansları verilmiştir.

Tablo 3.1. İletken ve kablo empedansları.

Kesit	Havai hat empedansı	Yer altı kablosu empedansı
50 mm ²	0.363 + j0.351 Ω/km	0.492 + j0.116 Ω/km
150 mm ²	0.117 + j0.315 Ω/km	0.159 + j0.097 Ω/km
300 mm ²	0.061 + j0.298 Ω/km	0.079 + j0.087 Ω/km

Tablo 3.1’de verilen empedans değerleri kullanılarak, 200 MVA kısa devre gücüne sahip şebekede, mesafe değişimine bağlı, kısa devreler yapılmıştır. PCC’den görülen, kesit ve mesafeye bağlı, gerilim çökmesi genliğinin değişimi Şekil 3.4’de verilmiştir.



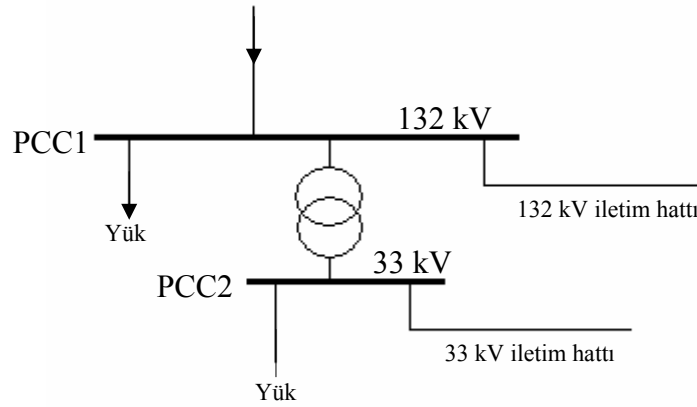
Şekil 3.4. Gerilim çökmesinin kesit ve mesafeye göre değişimi, (a) havai hat, (b) yer altı kablosu.

Tablo 3.1 incelendiğinde aynı kesit için yer altı kablosu ve havai hat iletkenin dirençlerinin yakın olduğu bununla birlikte yer altı kablolarının reaktanslarını aynı kesitteki havai hat iletkenine oranla daha düşük olduğu görülmektedir. Aynı kesitteki yer altı kablusunun empedansı havai hat iletkeninin empedansından daha büyük olacaktır. Şekil 3.4’ten de görülmektedir ki aynı kesitteki yer altı kablосundan beslenen yük havai hattı beslenen aynı güçteki yüke oranla gerilim çökmesinden daha çok etkilenecektir.

PCC ile kısa devre mahalli arası empedans (Z_F) sadece iletken empedanslarından oluşmamaktadır. Transformatör empedansları da Z_F ’e eklenebilir.

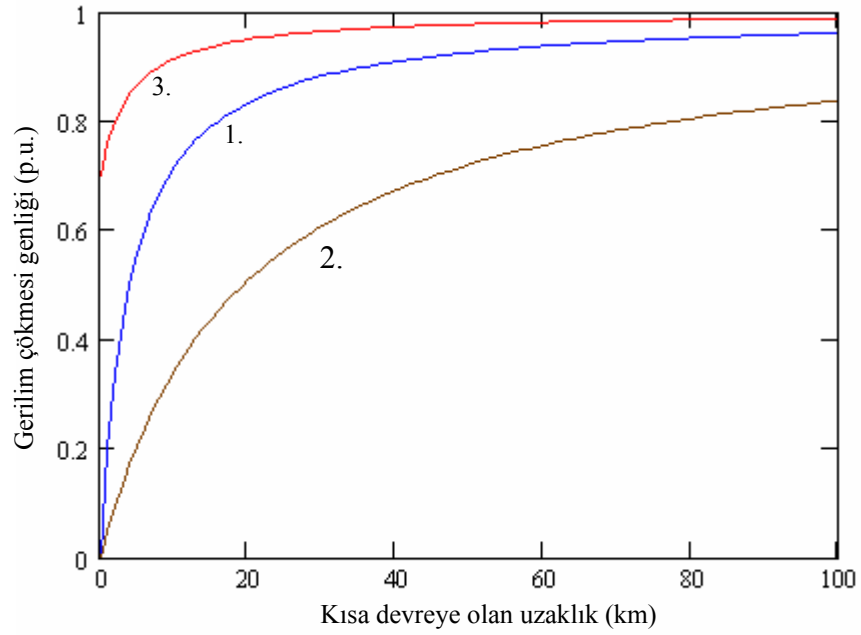
Transformatör empedansları kaynak ile PCC arasındaki empedansa (Z_S) da eklenebilir. Kısacası PCC olarak seçilen noktaya göre şebekenin Z_F ve Z_S 'i ayarlanabilir.

Transformatör empedansının gerilim çökmesi üzerindeki etkisini belirleyebilmek için Şekil 3.5'da verilen devre modeli hazırlanmıştır. Bu modelde empedansı 13.55Ω olan 132 kV/33 kV'luk bir transformatör kullanılmıştır. 132 kV gerilim seviyesinin kısa devre gücü 3000 MVA, 33 kV gerilim seviyesinin kısa devre gücü 900 MVA'dır. 132 kV ve 33 kV taraflarında bulunan iletim hatlarının empedansı $0.3 \Omega/\text{km}$ 'dir.



Şekil 3.5. İki farklı gerilim seviyesine sahip devre modeli.

Şekil 3.5'te verilen devre modelinde üç farklı durum incelenmiştir. Bunlar; 33kV'luk iletim hattında meydana gelen kısa devrenin PCC 2'de hissedilmesi (1), 132kV'luk iletim hattında meydana gelen kısa devrenin PCC 1'de hissedilmesi (2), 33kV'luk iletim hattında meydana gelen kısa devrenin PCC 1'de hissedilmesidir (3). Bu üç koşulun kısa devreye olan uzaklığa bağlı değişimi Şekil 3.6'da verilmiştir.

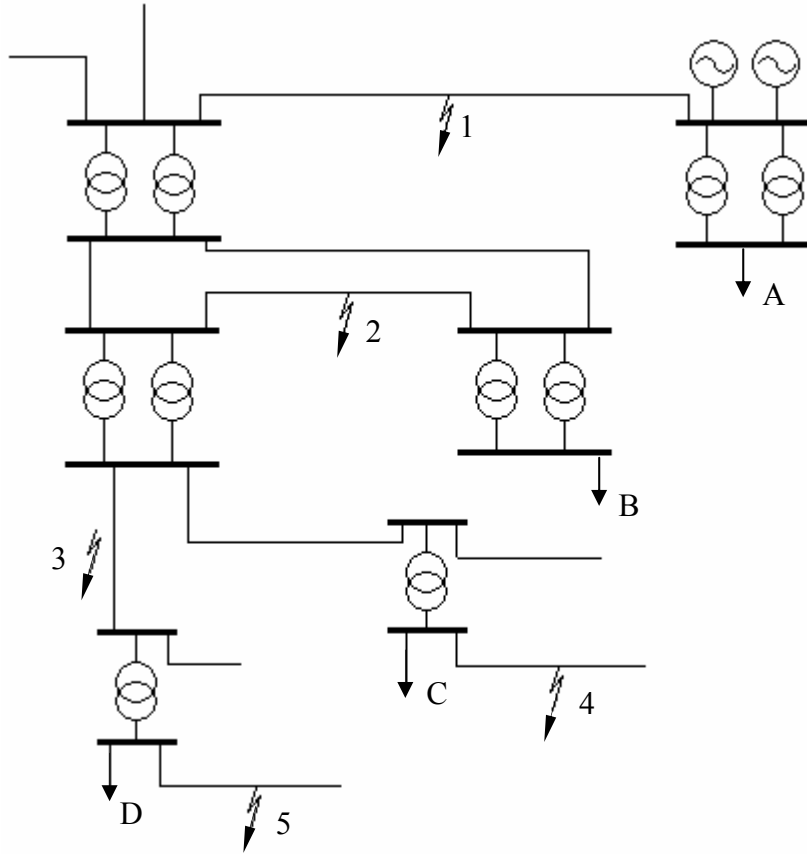


Şekil 3.6. Gerilim çökmesi genliğinin transformatör empedansı ile değişimi.

Şekil 3.6'den görüldüğü gibi 33 kV'da meydana gelen kısa devrenin PCC 2'den görünüşü ile 132 kV'da meydana gelen kısa devrenin PCC 1'den görünüşü mesafeye bağlı olarak benzer bir değişim göstermektedir. Bunun nedeni gerilim çökmelerinin kısa devreleri ile aynı gerilim seviyelerindeki PCC'ler den bakılmasıdır. Eğriler arasındaki fark gerilim seviyelerinin farklı kısa devre gücüne sahip olmasındandır. İki gerilim seviyesinde de kullanılan iletkenin empedansları eşit olsa da PCC 1'in kısa devre gücünün PCC 2'den yüksek olması kısa devre sonrasında oluşan gerilim çökmesinden PCC 2'ye oranla daha az etkilenmesine neden olmaktadır.

Bununla birlikte 33 kV'da meydana gelen kısa devrenin PCC 1'den görünüşü farklılık arz etmektedir. Gerilim sıfır değerine hiç düşmemektedir. Transformatör empedansından dolayı belli bir değerin üzerinden başlamaktadır. Ayrıca eğrinin eğimi de değerlerinden farklıdır. Bunun nedeni 33 kV tarafındaki hat empedansının transformatör dönüştürme oranına bağlı olarak daha büyük görülmesidir. Buradan transformatör üzerinden farklı bir gerilim seviyesine geçen gerilim çökmesinin etkisinin azaldığı söylenebilir. Mesafe arttıkça bu etki daha da azalacaktır.

Gerilim çökmelerinin güç sistemindeki etkilerini incelemek için Şekil 3.7'de verilen şebeke üzerinde beş farklı kısa devre noktası (1..5) ve dört farklı yük (A..D) belirlenmiştir [4].



Şekil 3.7. Güç sisteminde kısa devre yeri ve yük pozisyonları.

1 numaralı noktada meydana gelecek kısa devre transformatörler tarafından tüm güç sistemine iletilecektir. Hiçbir yükün kendine özel üretim birimleri olmadığı için bu kısa devre dolayısıyla oluşan gerilim çökmesinden etkileneceklerdir. İletim sistemi farklı noktalardan beslendiği için A, B, C ve D’de yükleri, düşük genlikli gerilim çökmesi yani *derin çökmeye* maruz kalacaktır. A yükü diğer yüklere oranla daha az etkilenecektir. Bunu nedeni transformatörden önce bağlı olan üretim birimlerinin derin çökmenin etkisini azaltmasıdır.

2 numaralı noktada meydana gelecek kısa devre B, C ve D yüklerinde derin çökme olarak hissedilecektir. A yükü bu kısa devreden hiç etkilenmeyecektir. İletim sistemin de transformatör empedansları gerilim çökmesini yüksek gerilim tarafına iletimini sınırlandıracaktır. A yükünün bağlı olduğu üretim birimleri de gerilim çökmesinin etkisini daha da azaltacaktır.

3 numaralı noktada meydana gelecek kısa devrede D yükünde çok derin çökme gözlenecektir. Koruma cihazlarının hata temizleme süresine ve sayılarına bağlı olarak kesilmelerde görülecektir. C yükü de bu kısa devreden etkilenecek ve sadece

derin çökme gözlenecektir, herhangi bir kesilme görülmecektir. Ancak hızlı geri kapama özelliğine sahip koruma cihazları kullanıldı ise C yükünde tekrar kapamalara bağlı olarak yeni çökmeler görülebilir. B yükünde transformatör empedanslarının derin çökmeleri sınırlamasından dolayı yüksek genlikli gerilim çökmesi yani *sığ çökme* gözlenecektir. A yükü ise bu kısa devreden hiç etkilenmeyecektir.

4 numaralı noktada meydana gelecek kısa devrede C yükünde derin çökme gözlenecektir. Bunun nedeni C yükü ile kısa devre olan hattın aynı baraya bağlı olmasına rağmen bu baranın transformatör üzerinden beslenmesidir. Kısa devre her ne kadar gerilim çökmesine neden olsa da transformatörden baraya enjekte edilen gerilim C yükünde, 3 numaralı kısa devrenin D yükü üzerindeki etkisi ile kıyaslandığında, sadece derin çökme görülmesine neden olacaktır. 3 numaralı kısa devrenin D yükü üzerinde çok derin çökmeye neden olmasının sebebi D yükünü başka bir noktadan beslenmemesidir.

5 numaralı noktada meydana gelecek kısa devrede D yükünde derin çökme, C yükünde ise *sığ çökme* gözlenecektir. A ve B yükleri bu kısa devreden etkilenmeyecektir.

Güç sisteminde farklı noktalarda meydana gelen kısa devrelerin farklı gerilim seviyelerinde bulunan yüklere etkileri Tablo 3.2’de toplu olarak gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Güç sisteminde kısa devre ve yük pozisyonu.

Kısa devre noktası	Derin çökme	Sığ çökme	Dalgalanma ihtimali
1	A-B-C-D	-----	-----
2	B-C-D	-----	A
3	C-D	B	A
4	C	D	A-B
5	D	C	A-B

İngiltere, Manchester’da 11 kV’luk gerçek şebeke değerleri kullanılarak benzer bir çalışma yapılmıştır [13]. Yapılan çalışmada 11 kV’luk şebeke 400 kV, 132 kV, 33 kV, 11 kV ve 400 V kademelerinde modellenmiştir. Yapılan kısa devre simülasyonlarında, 11 kV ve 33 kV seviyelerindeki gerilim çökmeleri *sığ çökmeler* olduğu ancak 400 V seviyesindeki gerilim çökmelerinin derin çökme olduğu belirlenmiştir.

3.3. Sonuç

Analizler sonucunda şebeke kısa devre gücü ile gerilim çökmesi etkisinin ters orantılı olduğu görülmüştür. Şebeke kısa devre gücünün yüksek olması gerilim çökmelerinin etkisinin daha az hissedilmesini sağlamaktadır. Kısa devre mahalline olan uzaklığın artması da gerilim çökmesinin etkisini azalmaktadır. Yapılan analizlerde en etkili gerilim çökmesi olayları kısa devre gücü düşük bir şebekede kısa devreye yakın noktalarda yaşanmaktadır.

Kısa devre mahalline olan uzaklık iletim hattının yapısından bağımsız olarak düşünülmemelidir. Sabit uzaklıkta meydana gelen kısa devre için yapılan analizlerde aynı kesitteki yer altı kablосundan beslenen şebekenin havai hattan beslenen şebekeye oranla gerilim çökmesinden daha fazla etkilendiği görülmüştür.

Farklı gerilim seviyelerinin kullanıldığı analizler sonucunda gerilim çökmelerinin transformatör üzerinden bir üst gerilim şebekesine iletilmesi sırasında etkisinin azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni transformatör eşdeğer empedansının devredeki diğer eşdeğerlerden büyük olmasıdır.

Literatürdeki çalışmalar sırasında güç sisteminin yıldız noktasının doğrudan doğruya veya küçük değerli direnç üzerinden topraklı olduğu koşullar incelenmiştir [4]. Yıldız noktası yalıtılmış veya toprak teması kompanze edilmiş şebekelerdeki durum incelenmemiştir. Bölüm 3'te güç sistemlerinde topraklama metodları verilecek ve bölüm 4'te farklı topraklama metodlarına sahip şebeke modelleri üzerinde gerilim çökmesi, gerilim şişmesi ve salınımlı geçicilikler ile ilgili olarak analizler yapılacaktır.

4. GÜÇ SİSTEMLERİNDE TOPRAKLAMA

4.1. Giriş

Üç fazlı güç sistemlerinin kullanılmaya başlandığı ilk günlerde transformatör nötr noktası topraktan izole idi. Ancak şebeke, iletim hattının toprakla olan kapasitesi üzerinden tabii olarak topraklıydı. İngiltere’de 1912’ye kadar yüksek gerilim sisteminin büyük bir kısmı izole olarak işletildi. Almanya’da ise bu durum 1917’ye kadar devam etti [20].

Bununla birlikte elektrik enerjisine olan talebin artması ve buna bağlı olarak dağıtım şebekelerinin boyutlarının büyümesi, izole şebekeden kaynaklanan problemlerin ortaya çıkmasına yol açtı. En çok karşılaşılan sorun, toprak kısa devrelerinde meydana gelen arklardı. Bunun sonucu olarak kısa devre olayının meydana geldiği çevredeki ekipmanlar artan zarar görmekte ve dağıtım şebekesinin geri kalan kısmı ise ark nedeni ile oluşan yüksek genlikli geçicilikten etkilenmekteydi. Bu problemler nötr noktasının topraklanması yönündeki çalışmaların başlamasına neden oldu.

Topraklı şebekeler şebekenin en az bir noktasının toprağa bağlanmış olduğu şebekelerdir. IEEE std 142 [21]’ye göre topraklı sistem, “*En az bir iletkeni veya bir noktasının (Orta iletken veya transformatör veya jeneratörün nötr noktası) bilerek ve isteyerek, ister direk ister bir empedans üzerinden toprağa bağlandığı sistem*”dir. BS 5311:1996 [22]’e göre topraklı sistem “*Direk veya salınımlı geçicilikleri ölçülebilir düzeyde sınırlayan ve seçici korumaya uygun düşük değerli direnç veya reaktans üzerinden topraklanan sistemdir*” şeklinde tanımlanmıştır. Kendi içinde, yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekeler, yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebekeler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Güç sistemlerinde kullanılan bir diğer topraklama şeklide toprak temasının kompanze edilmesidir. Toprak teması kompanze edilmiş şebekelerde nötr ile toprak arasına, değeri izole sistemde meydana gelen tek faz toprak arızasında akan kapasitif kısa devre akımını kompanze edecek kadar olan, bir reaktör konulan şebekelerdir. Toprak teması kompanze edilmiş şebeke, 1916’da Almanya’da tanıtıldıktan sonra

dünyanın bir çok yerinde kullanılmaya başlanmıştır. İlk olarak 1921 yılında A.B.D. Alabama’da 44 kV’luk topraksız çalışan sisteme monte edilmiştir. 1938’e kadar 33 kV ile 230 kV arasındaki 17 sisteme monte edilmiştir. 1950’ye kadar 50’den fazla montaj yapıldığı bilinmektedir. Şu anki durum, sistemlerin özelleştirilmesine bağlı olarak firmalar tarafından açıklanmadığı için bilinmemektedir [20].

İngiltere’de güç sisteminin topraksız olmasına izin verilmemektedir [23]. Bu ülkede 66 kV ve üzeri sistemlerde yıldız noktasında doğrudan doğruya topraklama, 33 kV ve altındaki dağıtım şebekesinde ise genellikle yıldız noktasının empedans üzerinden topraklanması istenmektedir.

Türkiye’de yüksek gerilim şebekesi yıldız noktası doğrudan doğruya topraklı olarak işletilmektedir. Orta gerilim şebekesi ise yıldız noktası doğrudan doğruya topraklı veya direnç üzerinden topraklı olarak işletilmektedir. Bununla birlikte yerinde yapılan inceleme sonrasında İstanbul Hadımköy’de yıldız noktası yalıtılmış olarak işletilmekte olan 15 kV’luk bir şebeke olduğu görülmüştür.

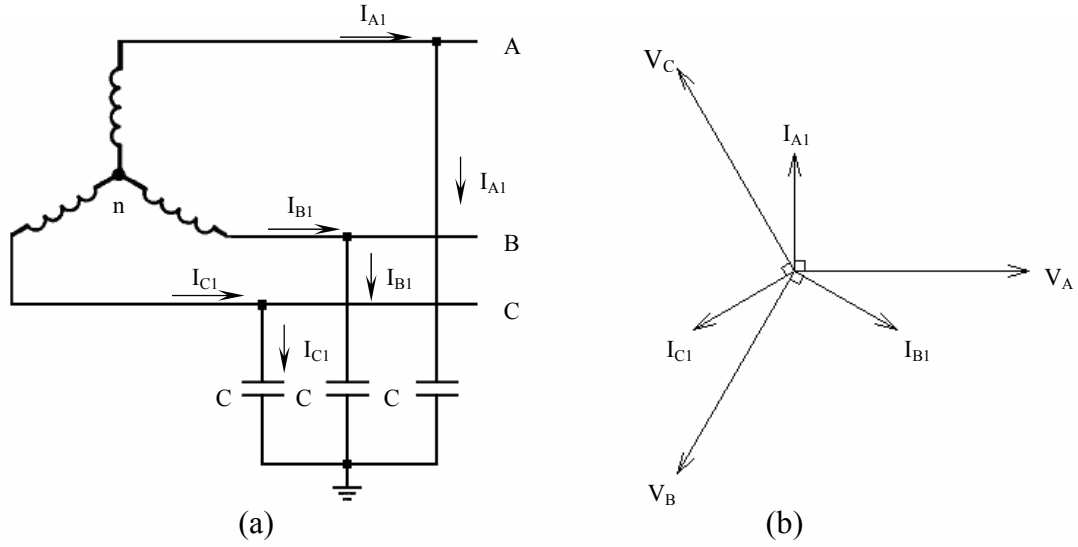
Bu bölümde tüm topraklama metodları detaylı olarak incelenecek ve yapısal özellikleri verilecektir.

4.2. Yıldız noktası yalıtılmış şebekeler

Transformatörlerin ve generatörlerin yıldız noktaları ile yıldız noktası oluşturan öteki tesis bölümleri, işletmenin topraklama tesisine bağlanmamış olan şebekelerdir [24]. Ancak sistem, iletim hattının toprakla olan kapasitesi üzerinden tabii olarak topraklanmıştır. Şekil 4.1 (a)’de yıldız noktası yalıtılmış bir şebekede hattın toprakla olan kapasiteleri gösterilmiş, karşılıklı kapasiteleri resimlerde karışıklığa yol açmamak için verilmemiştir.

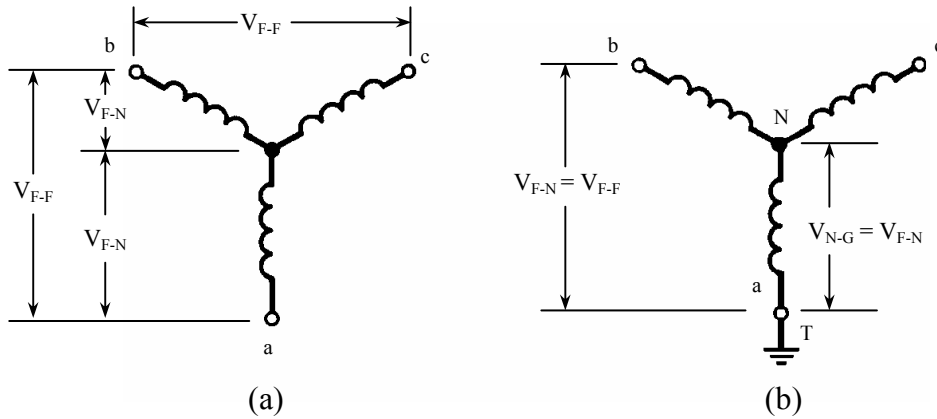
Yıldız noktası yalıtılmış şebekelerde herhangi bir yük bulunmaması durumunda dahi sistemden bir akım çekilmektedir. Hat kapasitesi üzerinden akan bu akım şarj akımı olarak isimlendirilmektedir. Hattın mükemmel olarak çaprazlandığı kabul edilirse dengeli durumda, iletim hattının toprakla olan kapasitesi her faz için aynıdır. Bu durumda kapasiteler üzerinden akacak olan şarj akımları da birbirine eşittir (Şekil 4.1 (b)). Dengeli durumda nötr potansiyeli toprak potansiyelindedir

(Şekil 4.2 (a)). Her fazın gerilimleri ve şarj akımları arasında hattın kapasitesine bağlı olarak 90° 'lik faz farkı bulunmaktadır.

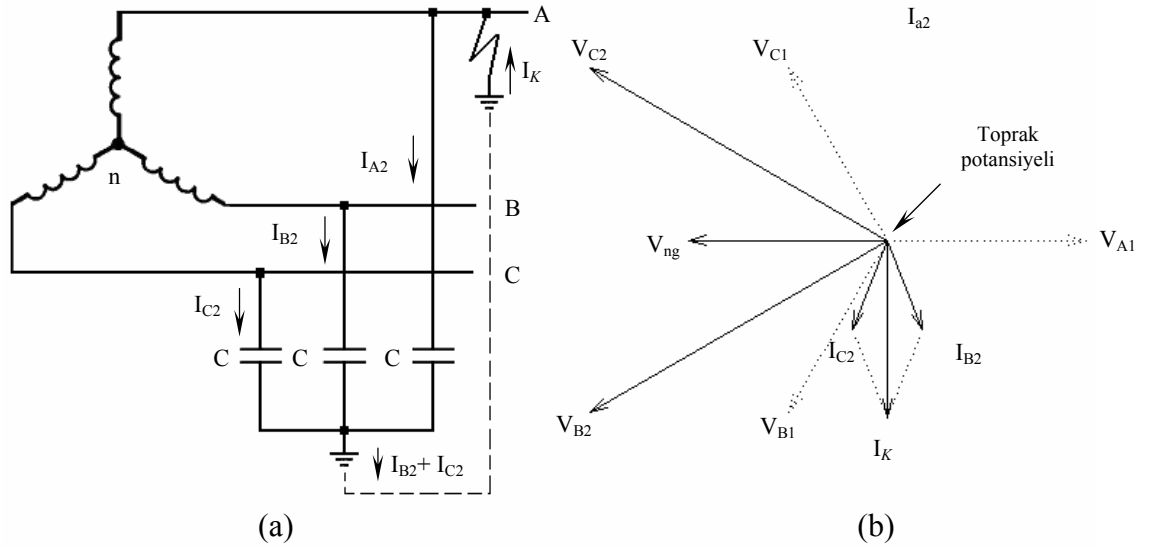


Şekil 4.1. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede tek faz toprak kısa devresi öncesi; (a) şarj akımları; (b) fazör diyagramı.

Meydana gelebilecek bir toprak arızası sırasında kısa devre akımı devresini hat kapasiteleri üzerinden tamamlayacaktır (Şekil 4.3 (a)). Tek faz toprak kısa devresi sonucunda kısa devre olan fazın potansiyeli, Şekil 4.2 (b)'den görüldüğü gibi, toprak potansiyeline eşit olur. Toprak arızaları nötr kaymasına ve aşırı gerilimlere sebep olmaktadır. (Şekil 4.3 (b)).



Şekil 4.2. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede faz ve nötr gerilimleri; (a) tek faz toprak kısa devre öncesi; (b) tek faz toprak kısa devre sonrası.



Şekil 4.3. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede tek faz toprak kısa devresi sırasında; (a) şarj akımları; (b) fazör diyagramı.

İlk bakışta üç fazlı yıldız noktası yalıtılmış bir şebekede faz-toprak arası gerilim, anma geriliminin 1.73 katından fazla olmayacağı ve elektrikli cihazların izolasyon seviyesinin bu gerilime rahatlıkla dayanabileceği düşünülebilir. Ancak yıldız noktası yalıtılmış şebekede faz toprak arasındaki kapasite önem kazanmaktadır. Kısa devre sonrasında sistem kapasitesi yüksek frekansta şarj-deşarj olmaya başlar. Bu yüksek frekanslı salınım, normal gerilimin yükselmesine neden olur. Bu geçici arıza sebebiyle faz-toprak arasındaki gerilim anma gerilimin bir kaç katına kadar çıkabilmektedir.

Yıldız noktası yalıtılmış şebekede toprak kısa devresi akımının genliği sistemin faz toprak kapasitesi ile orantılıdır. Hat uzunluğunun artması ve/veya yer altı kablosu kullanılması toprak kısa devresi akımının artmasına neden olacaktır. Toprak kısa devre akımının artması ve kısa devrenin süresiz olması koşulunda süresiz ark hatası meydana gelmektedir. Toprak arızası arkın periyodik olarak tutuşması ve sönmesi şeklinde kendini göstermektedir. Kısa devre akımının boyutu süresiz arkın tekrarlanma sayısının arttırmaktadır. 5 A'lık toprak kısa devresi akımı, süresiz arkın tutuşması için gerekli eşik geriliminin aşılması için yeterlidir [20, 25]. Süresiz ark istenmeyen bir durumdur. Ekipmanların zarar görmesine ve kısa devre mahallinde yangına neden olur. Sağlıklı fazlarda oluşan aşırı gerilimler sebebiyle izolasyon hataları meydana gelir ki bu da yeni kısa devrelere neden olur. Sistemde oluşan bu tarz sürekli tek faz toprak kısa devrelerin tekrarlanması kabul edilemez. Dolayısıyla

hata yerinin hızlı bir şekilde bulunması ve bu kısmın sistemden ayrılması gerekir. Ancak yıldız noktası yalıtılmış şebekede tek faz toprak kısa devresi sonucunda ortaya çıkan kapasitif akım, koruma cihazlarını devreye sokmaya yeterli değildir.

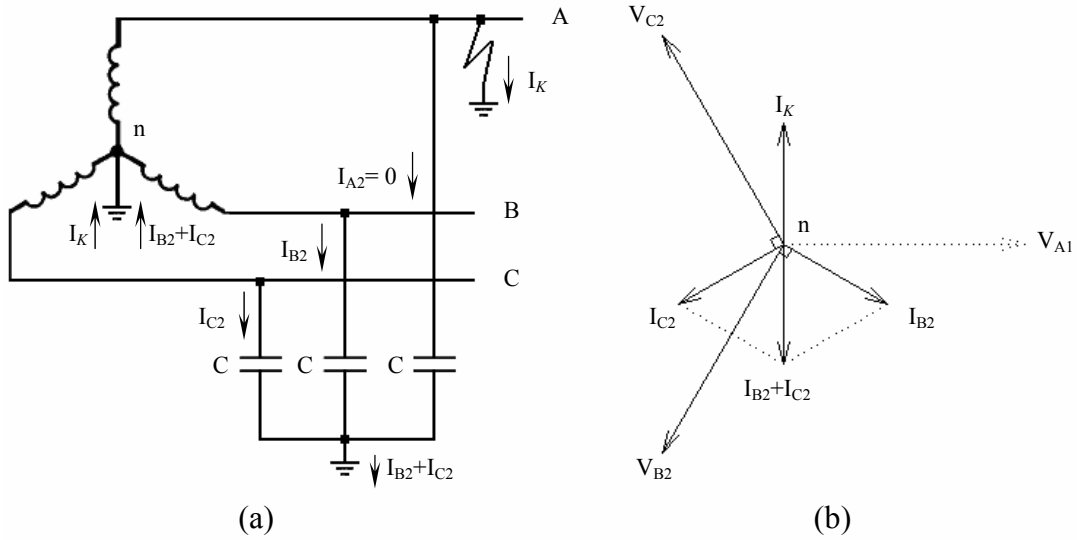
Bu problemlere rağmen şebekenin ufak olması ve oluşacak toprak kısa devresi akımının süresiz arkın tutuşmasına yetmeyecek kadar az olması nedeniyle günümüzde bazı orta gerilim şebekelerinde hala kullanılmaktadır. Almanya'nın 10 kV şebekesinin %23'ü, Polonya'nın 15 kV ve 20 kV şebekelerinin %7'si, Japonya'nın 6.6 kV şebekesinin bir kısmı yıldız noktası yalıtılmış olarak çalışmaktadır [26]. Uygun koşulların sağlanması ile sistemin topraklanması için gerekli olan maliyette ortadan kalkmaktadır.

4.3. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekeler

Bir yada birden fazla transformatörün veya yıldız noktasını oluşturan öteki tesis bölümlerinin yada generatörlerin yıldız noktası, doğrudan doğruya topraklanmış olan ve şebekedeki koruma düzeni, herhangi bir noktadaki toprak hatasında otomatik açmayı sağlayacak biçimde yapılmış olan şebekelerdir [24]. Günümüzde hemen hemen orta gerilim şebekeleri dışında tüm alçak ve yüksek gerilim tesisleri yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış olarak çalışmaktadır.

Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekelerde toprak kısa devresi oluştuğunda hata akımının dönüş yolundaki empedans değerinin az olmasına bağlı olarak kısa devre akımının genliği çok büyük olmaktadır. Bu şebekelerde arıza akımı çok yüksek değerlere ulaştığı için toprakla olan kapasitesi ve şarj akımları ihmal edilebilecek seviyededir. Yüksek genlikli kısa devre akımı hata mahallinde yangına veya erimeye neden olabilir. Bu nedenle hatanın hızlı bir şekilde duyulması ve izole edilmesi gerekmektedir. Büyük genlikli toprak kısa devre akımı, aşırı akım ve/veya toprak kısa devresi röleleri tarafından algılanır ve hatalı fazın veya hattın tümünün sistemden ayrılması sağlanır. Yıldız noktası yalıtılmış şebekeye oranla arızanın duyulması ve sistemden izole edilmesi kolaydır. Ayrıca yıldız noktası yalıtılmış şebekenin en önemli iki sakıncası olan ark ve aşırı gerilimlerin önüne büyük oranda geçilmiş olunur.

Tek faz toprak kısa devresi sonrasında şarj akımları ve gerilimlere ait fazör diyagramı Şekil 4.4’da verilmiştir.



Şekil 4.4. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede tek faz toprak kısa devresi sonrasında; (a) şarj akımlarının dağılımı; (b) akım ve gerilim fazör diyagramı.

Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklı şebekede meydana gelene tek faz toprak kısa devresi akımının genliği, şebekenin yapısına bağlı olarak, üç faz kısa devre akımının %125’i kadar olabilmektedir [25]. Bu hatanın hızla temizlenmesi gerekmektedir. Bununla birlikte hızlı hata temizleme ihtiyacı, geçici toprak arızalarından sonra hattın enerjisiz kalmasına neden olmaktadır. Mesele kuvvetli esen rüzgarla hatta temas eden ağaç, tek faz toprak kısa devresi olarak algılanacak ve toprak kısa devresi röleleri hattın açılmasını sağlayacaktır. Ağaç temasının ortadan kalkması durumunda dahi hat enerjisiz kalacaktır. Bu nedenle otomatik tek faz geri kapama röleleri kullanılmaktadır.

Tabiidir ki bu işleme tarzı da kendine has sorunları bünyesinde barındırmaktadır. Bunların en önemlisi topraklama sistemlerinin bu çok yüksek olan arıza akımını toprağa dağıtmakta yeterli olması yani düşük bir topraklama sistemi direncine sahip olmasıdır. Hata akımı, topraklama direncinin değişimine bağlı olarak kısa devre çevresinde potansiyel fark oluşmasına neden olacaktır. Bu alanda yürüyen insan veya çiftlik hayvanlarının her ayağının farklı bir potansiyelde olması sonucunda vücutlarından adım gerilimine bağlı olarak tehlikeli seviyede ‘adım’ ve ‘dokunma’ gerilimlerine maruz kalmalarına neden olacaktır.

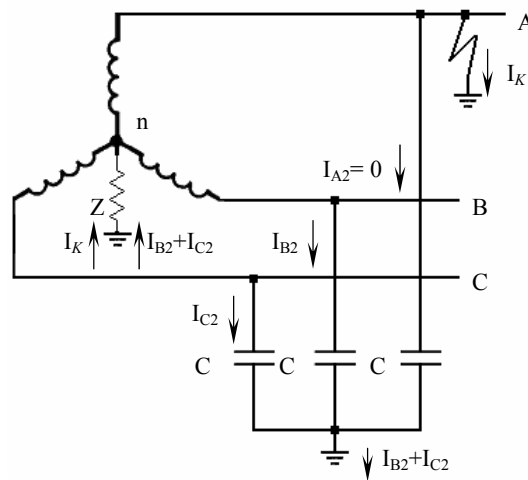
İletim şebekelerinde birden fazla noktadan topraklama (Multiple Earthing) yapılmaktadır. Bunun nedeni şebekenin enterkonnekte şebeke olmasıdır. Herhangi bir nedenle şebekeden ayrılan bir bölge topraklama yapılan bölge olabilir. Bu da şebekenin geri kalanının belli bir süre yıldız noktası yalıtılmış şebeke olarak çalıştırılması anlamına gelmektedir.

Yeraltı kablolarında toprak kısa devresinin çok sık yaşanması, yüksek genlikli kısa devre akımının neden olduğu ısınmaya bağlı olarak kablo izolasyonunun zayıflamasına ve yeni toprak kısa devrelerinin oluşmasına zemin hazırlamaktadır.

4.4. Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebekeler

Bir yada birden fazla transformatörün veya yıldız noktasını oluşturan öteki tesis bölümlerinin yada generatörlerin yıldız noktası, akım sınırlayan direnç yada reaktans bobini üzerinden topraklanmış olan ve şebekedeki koruma düzeni, herhangi bir noktadaki toprak hatasında otomatik açmayı sağlayacak biçimde yapılmış olan şebekelerdir [24].

Yıldız noktası empedans üzerinden topraklı şebekede tek faz toprak kısa devresi sonrasında şarj akımlarının dağılımı Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebekede tek faz toprak kısa devresi sonrasında şarj akımlarının dağılımı.

İki grupta ele alınabilir. Bunlar;

- Direnç üzerinden topraklanmış şebekeler
- Reaktans üzerinden topraklanmış şebekeler

Direnç üzerinden topraklanmış şebekelerde nötr noktası ile toprak arasına direnç yerleştirilir. Bu direncin amacı yıldız noktası doğrudan doğruya topraklı şebekede karşılaşılan, yüksek genlikli arıza akımını sınırlamaktır. Bu sayede

- Hata mahallinde yangın ve erime riski azalmıştır,
- Devre ve hata akımı taşıyan cihazlardaki mekanik zorlanma azalmıştır,
- İnsan ve çiftlik hayvanlarında adım geriliminin aşılması sonucu görülen elektrik şoku tehlikesi azalmıştır.

Kullanılan topraklama direnci metalik veya sıvı olabilirler. Krom-çelik alaşımlı olan metalik dirençler 36 kV ve daha düşük gerilim seviyelerinde kullanılırlar [27]. 36 kV üzerinde sıvı dirençler kullanılır.

Topraklama direnci, nötr toprak arasına direk yerleştirilebileceği gibi, primeri nötr toprak arasına yerleştirilmiş transformatörün sekonderine veya yıldız üçgen topraklama transformatörünün üçgen sargıları arasına yerleştirilmek suretiyle endirek olarak bağlanabilir [28, 29].

Reaktans üzerinden topraklanmış şebekelerde nötr noktası ile toprak arasına reaktör yerleştirilir. Bu reaktörün amacı, direnç üzerinden topraklı şebekede olduğu gibi, toprak kısa devresi sırasında oluşacak olan hata akımını sınırlamaktır. Direnç üzerinden topraklama ile aynı avantajlara sahiptir.

4.5. Toprak teması kompanze edilmiş şebekeler

Reaktans üzerinden yapılan topraklamada reaktans değeri sistemin toprakla olan kapasitesine eşit olursa tek faz toprak kısa devresi için sıfır sıra devresi rezonansa girer ve sıfır sıra empedansı çok yükselir. Özel değerdeki bu reaktör Peterson bobini olarak anılmaktadır [25, 30]. Bu metod “Peterson Bobini Üzerinden Topraklama” olarak bilinmektedir. Rezonans Topraklama, Ark Söndürücü Bobin

Topraklaması (Arc suppression coil earthing-U.K.), Toprak Kısa Devresi Yatıştırıcısı (Ground Fault Neutraliser-U.S.A.) olarak da anılır.

Kısa devre sırasında hat kapasitesi ile rezonansa girmesi istenilen Peterson bobinin, rezonans koşulu kullanılarak hesaplanabilir.

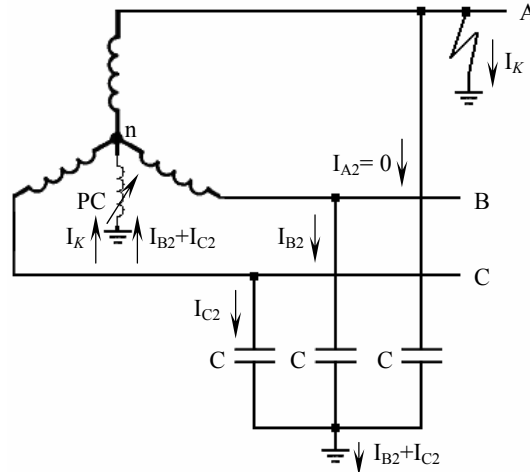
$$X_L = X_C \quad (4.1)$$

$$wL_{PC} = \frac{1}{w \cdot \sum C_{HAT}} \quad (4.2)$$

$$L_{PC} = \frac{1}{(2\pi f)^2 \cdot \sum C_{HAT}} \quad (4.3)$$

ile hesaplanabilir. Denklem 4.3’de verilen f , kısa devrenin güç frekansında olması sebebiyle, 50 Hz alınmaktadır [30].

Toprak teması kompanze edilmiş şebekede tek faz toprak kısa devresi sonrasında şarj akımlarının dağılımı Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. Toprak teması kompanze edilmiş şebekede tek faz toprak kısa devresi sonrasında şarj akımlarının dağılımı.

Peterson bobini basit demir nüveli, ayar kademeli bir reaktördür. Rezonans topraklama, yıldırım, hayvan veya ağaçtan kaynaklanan geçici kısa devrelerin etkisini elimine eder ve sistemin tek faz toprak kısa devresine karşı olan

mukavemetini arttırır. Tek faz toprak kısa devresinin neden olduğu gerilim düşmelerini azaltması ve oluşabilecek arkları engellemesi diğer avantajlarıdır.

Toprak temasını kompanze etmenin iki ana avantajı vardır. Birincisi tek faz toprak arızası sırasında oluşan akımı başka hiç bir akım kesiciye ihtiyaç duymadan söndürmesi, ikincisi ise, tek faz toprak arızası sırasında akan kapasitif kısa devre akımını tamamen kompanze etmesidir. Bu sayede şebeke kısa devre altında da işlemeye devam edebilmektedir.

Peterson bobininin bir dezavantajı hat kapasitesinin her fazda eşit olabilmesi için hatların çaprazlanması gerekliliğidir. Peterson bobininin en önemli dezavantajı ise şebekede yapılan her değişiklikten sonra, örneğin hat devreye alınması ve devreden çıkartılması gibi, bobin değerinin tekrar ayarlanmasıdır. Yarı iletken teknolojisindeki son gelişmelerin ışığında kendi reaktans değerini yaptığı ölçümler ile ayarlayabilen bobinler geliştirilmiştir. Bu da toprak teması kompanze edilmiş şebekeleri tekrar gündeme getirmektedir [31].

4.6. Etkin topraklanmış şebekeler

Bu kısma kadar anlatılan topraklama metodları şebeke ile toprak arasındaki topraklama elemanlarına bağlı olarak tanımlandı. Topraklama yapılabilecek tek bir nötr noktası bulunan basit bir şebekede şebekenin hangi topraklama metodu ile topraklandığını söylemek kolaydır. Örneğin tek transformatörle beslenen bir sistemde nötr noktası ile toprak arasına bağlanan dirence ve değerine bakarak sistemin “yıldız noktası küçük değerli empedans üzerinden topraklanmış sistem” olduğu söylenebilir. Ancak sistem daha karmaşık hale geldikçe yani farklı gerilim seviyelerinin devreye girdiği, birden fazla nötr noktası olan (transformatör, generetör, kapasitör bankları, reaktörler vb.) ve nötr noktaları farklı metodlar ile topraklanmış sistemlerde sistemin topraklama tipine karar vermek için sistemin simetrik bileşenler eşdeğerlerinden yararlanılır. Bu nedenle topraklama metodları tanımlanırken sistemin simetrik bileşen eşdeğerlerinin oranlarından faydalanılmaktadır.

Topraklama metodlarının tanımlanmasında kullanılan bir diğer metod ise şebekenin etkin olarak topraklanıp topraklanmadığıdır. Bir şebekenin etkin

topraklanmış şebeke olarak tanımlanabilmesi için, seçilen bir nokta için faz toprak kısa devresi sırasında faz nötr geriliminin en yüksek etkin değerinin kısa devre sonrasındaki faz faz gerilimine oranı olan topraklama katsayısının 0.8'den fazla olmaması gerekir [28].

Bir şebekenin topraklama katsayısının 0.8'den fazla olmaması şartının simetrik bileşenler açısından eşdeğerinin sağlanması iki koşula bağlıdır. Bunlar;

- Sıfır sıra rezistansının pozitif sıra reaktansından küçük olması,

$$R_0 \leq X_1 \quad (4.4)$$

- Sıfır sıra reaktansının pozitif sıra reaktansından üç kat küçük olmasıdır.

$$X_0 \leq 3X_1 \quad (4.5)$$

Eğer şebeke denklem 4.4 ve 4.5'de belirtilen özellikleri sahipse *etkin topraklanmış şebeke* olarak tanımlanır. Bunun dışındaki koşullar etkin topraklanmamış şebeke olarak tanımlanmaktadır. Etkin topraklanmamış şebekeler simetrik bileşen oranlarına göre farklı topraklama metodları ile topraklanmış gibi davranmaktadır. Etkin topraklanmamış bir şebeke yıldız noktası düşük değerli empedans üzerinde topraklanmış şebeke veya toprak teması kompanze edilmiş şebeke gibi çalışabilmektedir.

4.7. Sonuç

Topraklamanın ana amacının kısa devre esnasında değerleri değişen kısa devre akımının ve gerilimlerin sınırlanması olduğu görülmektedir. Yıldız noktası yalıtılmış veya doğrudan doğruya topraklanmış şebekeler özel durumlardır. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekelerde kısa devre akımı çok yüksek değerlere ulaşırken faz gerilimleri aynı kalmaktadır. Yıldız noktası yalıtılmış şebekelerde ise kısa devre akımı koruma cihazlarının algılayamayacağı kadar küçük olmakla birlikte faz gerilimleri şebeke faz faz gerilimine kadar yükselmektedir.

Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebekelerde kullanılacak empedans değerine göre kısa devre akımı ve gerilimler istenilen sınırlar içinde tutulabilmektedir.

Toprak teması kompanze edilmiş şebekeler diğer sistemlerin bir arada yapamadığı sıfıra yakın kısa devre akımı ve 1.2 pu altına düşürülebilen faz gerilimleri ile geleneksel topraklama metodları için yeniden ciddi bir alternatif olmaktadır. Yarı iletkenlerdeki gelişmeler sonucunda eskiye oranla çok daha kullanışlı bir hale gelmektedir.

5. NÖTR BAĞLANTI ŞEKLİNE GÖRE AŞIRI GERİLİMLERİN ANALİZİ

5.1. Giriş

Bu bölümde, Ek A'da detayları verilmiş olan 11kV'luk test şebekesi üzerinde nümerik olarak inceleme yapılmıştır. Topraklama metodlarının, tek faz toprak kısa devresi (TFTKD) sırasında, sağlıklı faz gerilimlerine olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca nötr toprak gerilimi ve kısa devre akımının değişimi de sunulmuştur.

Topraklama metodlarının modellenmesinde empedans modelinden yararlanılmıştır. Yıldız noktası empedans üzerinden topraklı şebeke 0-1000 Ω değerleri arasında değişken empedans olarak modellenmiştir.

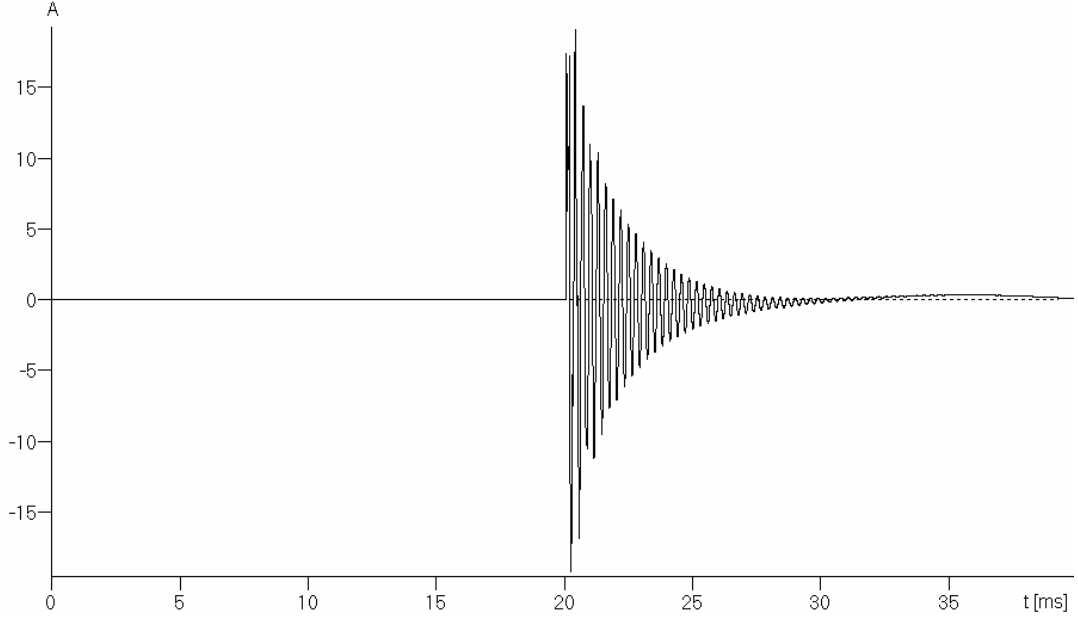
Simetrik bileşenler kullanılarak yapılan hesaplarda sürekli hal sonuçlarına ulaşılmaktadır. Ancak geçicilik sürecinde gerilim ve akımların nasıl değiştiği, tepe değerlerinin ne olduğu belirlenememektedir. Bu nedenle nümerik metodlar ile çalışan analiz programlarından biri olan ATP (Alternative Transient Program) [32]'den faydalanılmıştır. ATP ile yapılan analizler sonucunda normal işletme koşullarında şarj akımlarının her faz için aynı genlikte ve değerinin 0.192 A olduğu görülmüştür. Her fazın gerilimleri ve şarj akımları arasında hattın kapasitesine bağlı olarak 63°'lik faz farkı bulunmaktadır.

Analizler sırasında kısa devre direnci, toprak direnci ve ark hesaba katılmamıştır. Tüm simülasyonlar $t=0$ ms'de başlatılmış ve $t=80$ ms'de bitirilmiştir. Kısa devre senaryosu, hat sonunda A fazının maksimum geçişinde ($t=20$ ms) meydana gelecek sürekli tek faz toprak kısa devresi şeklindedir.

Tüm analiz sonuçlarında şebekeye kısa devre olan noktadan bakılmaktadır. Sürekli hal analizlerinin sonuçları per unit cinsinden, geçici hal analizlerinin sonuçları ise per unit'in tepe değeri (*Per-Unit of the Peak*) cinsinden sunulmaktadır.

5.2. Yıldız noktası yalıtılmış şebeke

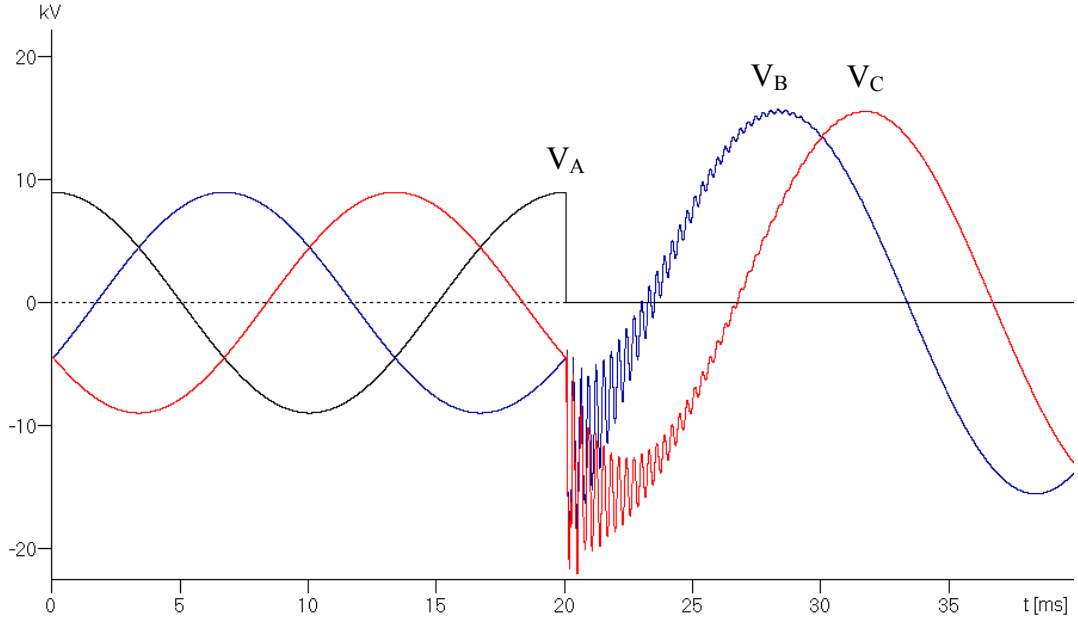
Yıldız noktası yalıtılmış şebekede TFTKD esnasında akmakta olan kısa devre akımı Şekil 5.1 görülmektedir.



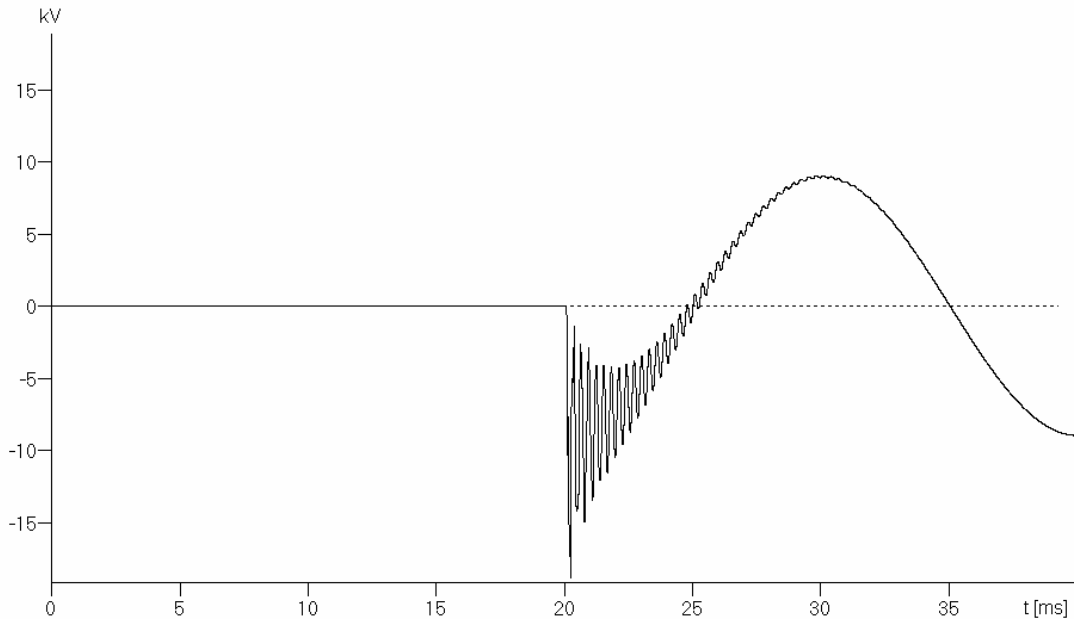
Şekil 5.1. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede TFTKD akımı.

Akımın tepe değeri 19.2 A değerine ulaşmakta ve literatürde belirtildiği gibi 3 kHz civarında bir salınım ile hızla azalmaktadır. 10 ms'de 0.236 A seviyesine inen akım bu andan itibaren 50 Hz'lik güç frekansında salınmaya devam etmektedir [20, 30]. Akımda görülen bu ani ve hızlı değişim sağlıklı fazlarda ve nötr-toprak arasında istenmedik geçici gerilim yükselmelerine sebep olmaktadır.

TFTKD sırasında faz nötr gerilimlerinin değişimlerin Şekil 5.2'de, nötr-toprak gerilimlerinin değişimi Şekil 5.3'te ve faz faz gerilimlerinin değişimi ise Şekil 5.4'te verilmiştir.

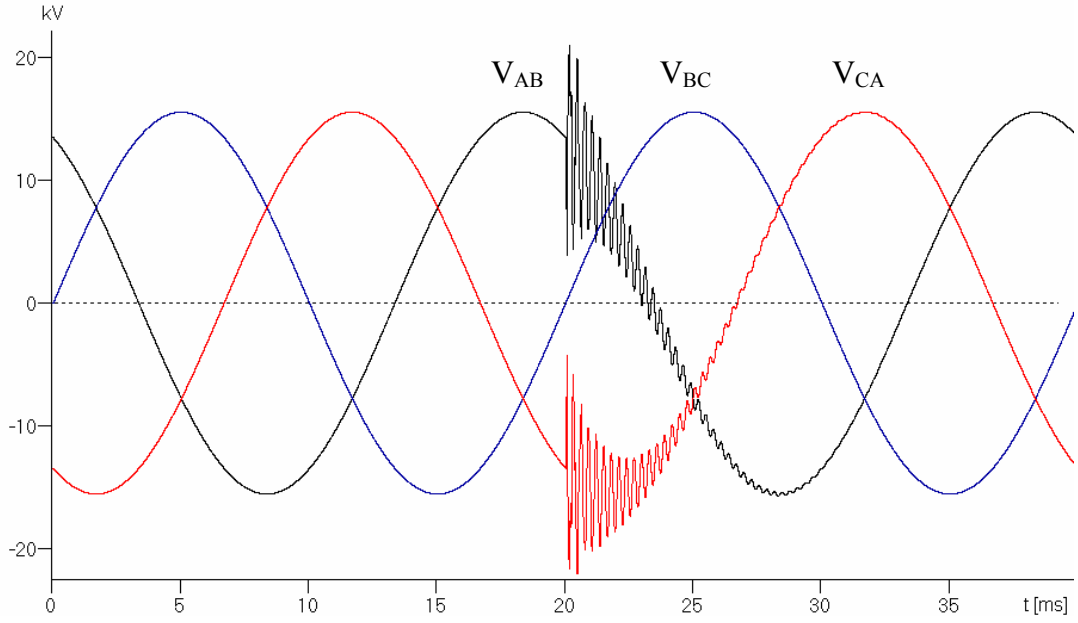


Şekil 5.2. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede TFTKD sırasında faz nötr gerilimleri.



Şekil 5.3. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede TFTKD sırasında nötr toprak gerilimi.

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 incelendiğinde faz ve nötr gerilimleri 10ms sonunda geçici halden sürekli hale geçmektedir. Sürekli halde faz nötr gerilimlerinin şebeke faz faz gerilimi olan 11 kV (1.73 pu)'a, nötr toprak geriliminin ise şebeke faz nötr gerilimi olan 6.35 kV (1 pu)'a oturduğu ölçülmektedir. Ancak geçici hal sırasında B fazı gerilimi 20.96 kV (2.33 pu), C fazı gerilimi 22.08 kV (2.45 pu) ve nötr toprak gerilimi ise 18.80 kV (2.09 pu) tepe değerine ulaşmaktadır.



Şekil 5.4. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede TFTKD sırasında faz faz gerilimleri.

Şekil 5.4 incelendiğinde yıldız noktası yalıtılmış şebekede meydana gelen tek faz kısa devresi esnasında oluşan faz faz gerilim çökmelerinin sistemden beslenen cihazları etkilemediği ve şebekenin sürekli kısa devre altında dahi çalışabildiği görülmektedir. Faz faz arasında gerilim çökmesi görülmemekle birlikte yüksek genlikli geçicilikler görülmektedir.

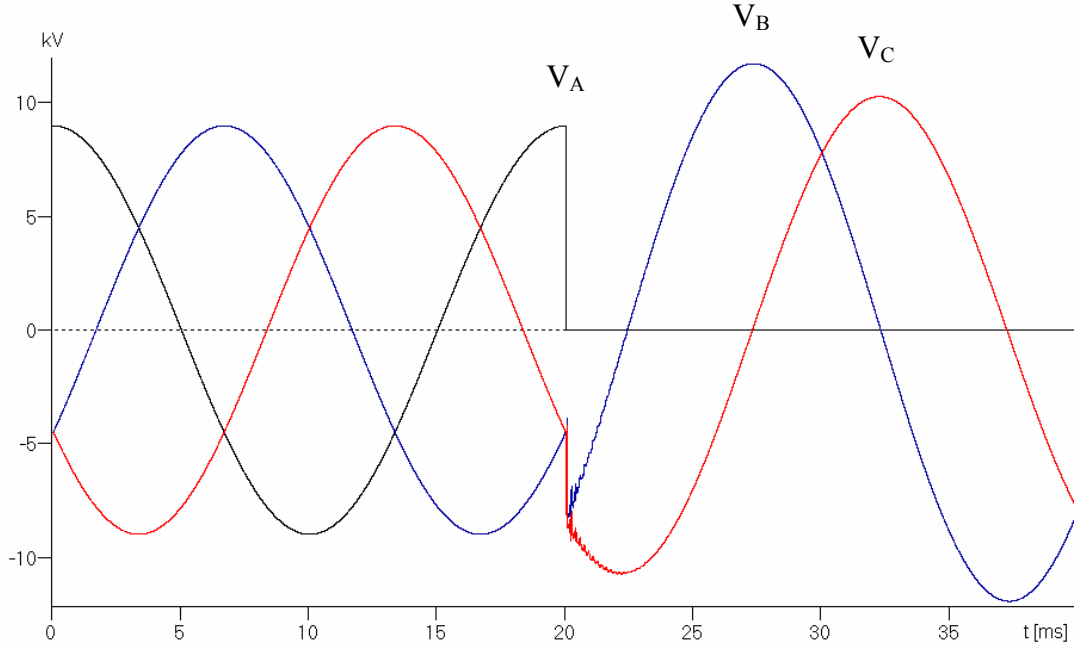
Sürekli hal analizleri sonucunda elde edilen gerilim ve akım değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Akım değerleri incelendiğinde faz akımlarının kısa devre sırasında arttığı bununla birlikte kısa devre akımının a fazı akımından daha düşük olduğu görülmektedir. Analitik metod sonuçları ATP sonuçlarının doğrular niteliktedir.

Tablo 5.1. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede tek faz toprak kısa devresi sırasında faz akımları ve gerilimleri.

A fazı akımı (I_A)	0.347A
B fazı akımı (I_B)	0.253A
C fazı akımı (I_C)	0.226A
Kısa devre akımı	0.239A
Nötr toprak gerilimi (V_{NE})	6.35kV
Faz B toprak gerilimi (V_{BE})	11kV
Faz C toprak gerilimi (V_{CE})	11kV

5.3. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekeler

TFTKD'ne maruz kalan yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede faz nötr ve faz faz gerilimlerinin değişimi Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da görülmektedir.



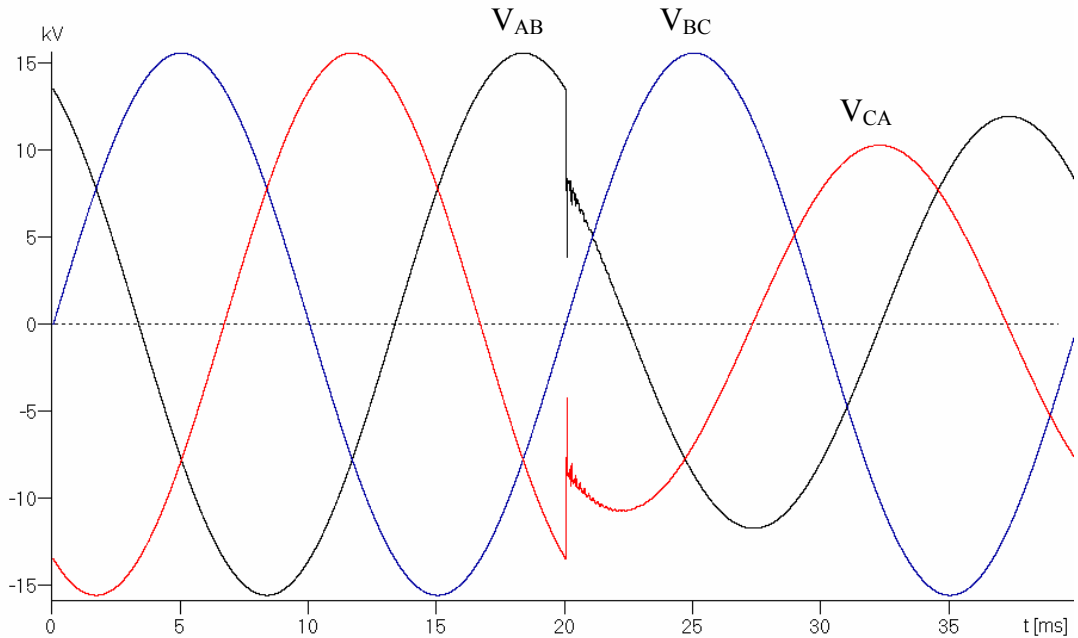
Şekil 5.5. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede TFTKD sırasında faz nötr gerilimleri.

Sürekli halde B fazı gerilimi 8.55 kV (1.34 pu), C fazı gerilimi ise 6.94 kV (1.09 pu) hesaplanmıştır. Test şebekesinin boyutunun küçük olması sonucunda şebekenin etkin topraklanmadığı sağlıklı fazların gerilimlerinden görülmektedir. Test şebekesi $X_0 \leq 3X_1$ koşulunu sağlasa da $R_0 \leq X_1$ koşulunun sağlamamaktadır. Bu nedenle şebeke yıldız noktası direk topraklandığı halde etkin topraklanamamıştır. Şebeke yıldız noktası düşük değerli reaktans üzerinden topraklanmış şebeke gibi davranmaktadır [28]. Geçici hal sırasında B fazı gerilimi 11.86 kV (1.32 pu) ve C fazı gerilimi ise 10.35 kV (1.15 pu) tepe değerlerine çıkmaktadır. Sürekli hal analizi sonuçları Tablo 5.2'da verilmiştir. Kısa devre akımının genliğinin yıldız noktası yalıtılmış şebekeye oranla çok yüksek olduğu bununla birlikte sağlıklı fazların gerilimlerinin yıldız noktası yalıtılmış şebekeye oranla düşük seviyelerde olduğu görülmektedir.

Tablo 5.2. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede tek faz toprak kısa devresi sırasında kısa devre akım ve sağlıklı faz gerilimleri.

Kısa devre akımı	596.57 A
Nötr toprak gerilimi (V_{NE})	0
Faz B toprak gerilimi (V_{BE})	8.55 kV
Faz C toprak gerilimi (V_{CE})	6.94 kV

Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede meydana gelen tek faz kısa devresi esnasında oluşan faz faz gerilim çökmelerinin sistemden beslenen cihazları etkileyecek büyüklükte olduğu Şekil 5.6'dan görülmektedir.



Şekil 5.6. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede TFTKD sırasında faz faz gerilimleri.

Şekil 5.6 incelendiğinde faz faz arasındaki gerilim çökmelerinin yüksek genlikli olduğu bununla birlikte salınımların yüksek genlikli olmadığı görülmektedir.

5.4. Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebekeler

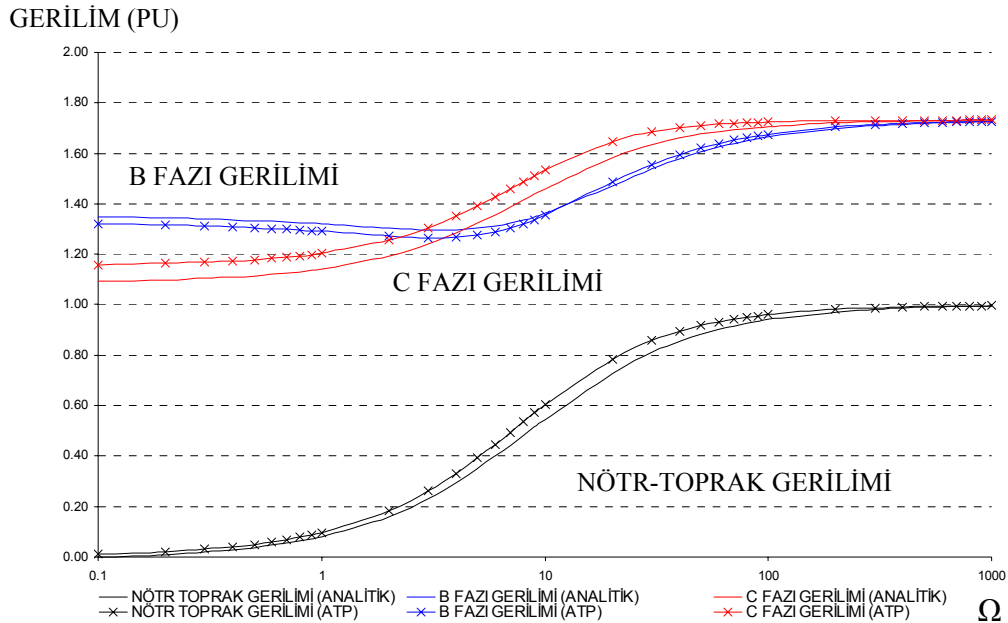
Bu kısımda TFTKD altında nötr toprak arasına yerleştirilen empedansın değişiminin bağlı olarak sağlıklı fazların, nötr toprak gerilimin ve kısa devre akımını

değişimi incelenmiştir. Empedans modeli olarak 0-1000 Ω aralığında saf direnç ve saf reaktans kullanılmıştır.

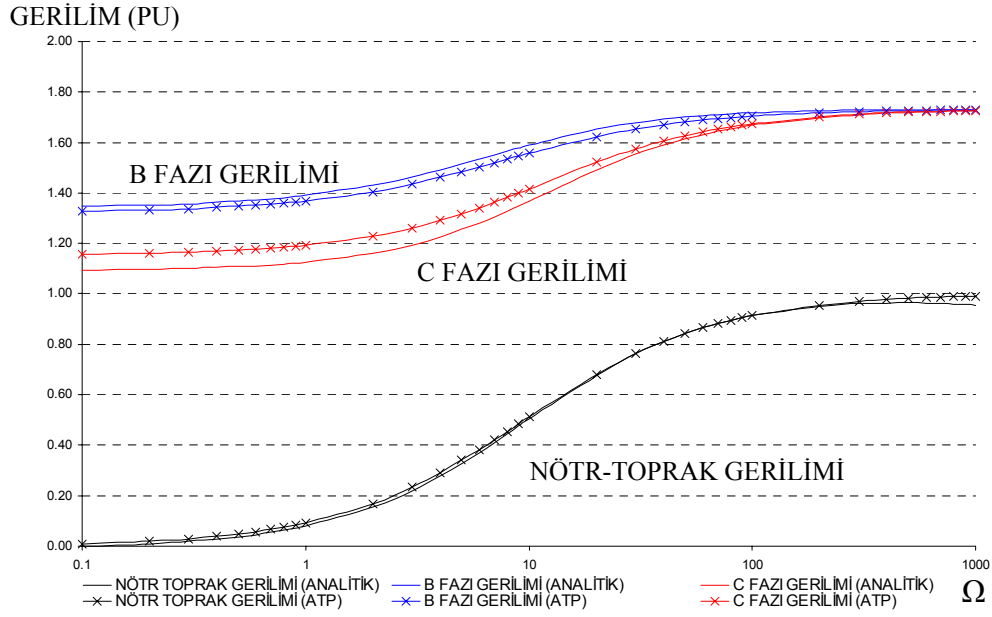
Analitik metodlar ve ATP ile yapılan analizler sonucunda, yıldız noktası empdans üzerinden topraklanmış şebekede kısa devre akımı, nötr toprak gerilimi ve sağlıklı fazların gerilimlerinin topraklama empedansının değerine bağlı olarak değiştiği Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'dan görülmektedir.

Topraklama empedansının değeri 1000 Ω 'a yaklaştıkça şebeke yıldız noktası yalıtılmış şebeke gibi davranmaktadır. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 incelendiğinde, sürekli halde, sağlıklı faz gerilimlerinin 1000 Ω empedans değerine doğru şebeke faz faz gerilimi olan 11 kV (1.73 pu)'a, nötr toprak gerilimi ise şebeke faz nötr gerilimi olan 6.35 kV (1 pu)'a oturduğu ölçülmektedir. Aynı empedans değeri için kısa devre akımı 10 A'in altına inmektedir (Şekil 5.9).

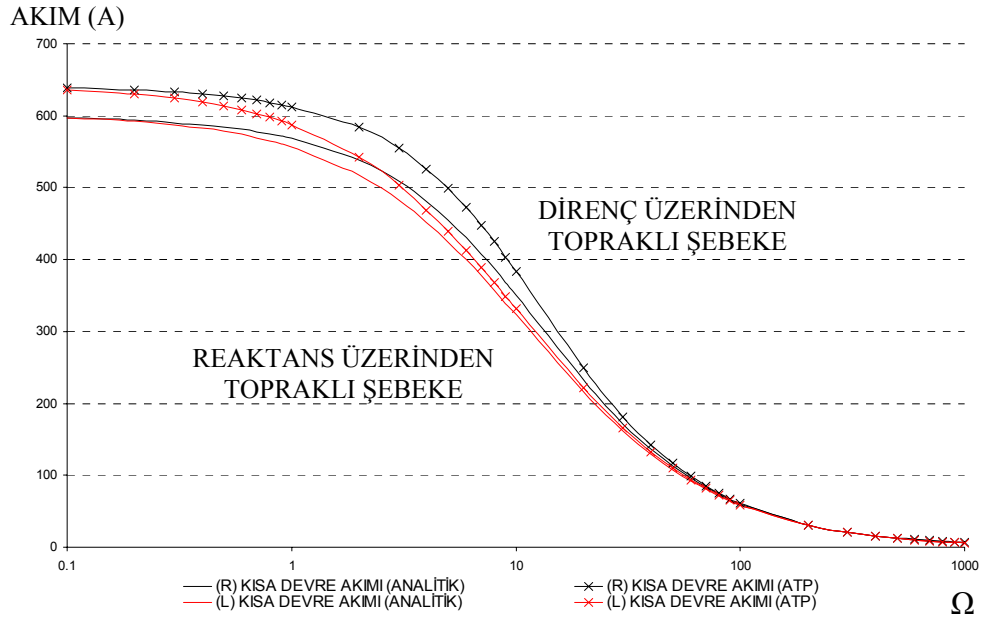
Topraklama empedansının değeri 0.1 Ω 'a yaklaştıkça şebeke, yıldız noktası doğrudan doğruya topraklı şebeke gibi davranmaktadır. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 incelendiğinde, sürekli halde analitik olarak, B fazı gerilimini 8.55 kV (1.34 pu), C fazı gerilimi ise 6.94 kV (1.09 pu) ölçülmüştür. Aynı empedans değeri için kısa devre akımı 600 A civarlarındadır (Şekil 5.9).



Şekil 5.7. TFTKD sırasında B, C fazları ve nötr toprak geriliminin topraklama direnci (R) ile değişimi.



Şekil 5.8. TFTKD sırasında B, C fazları ve nötr toprak geriliminin topraklama reaktansı (X_L) ile değişimi.

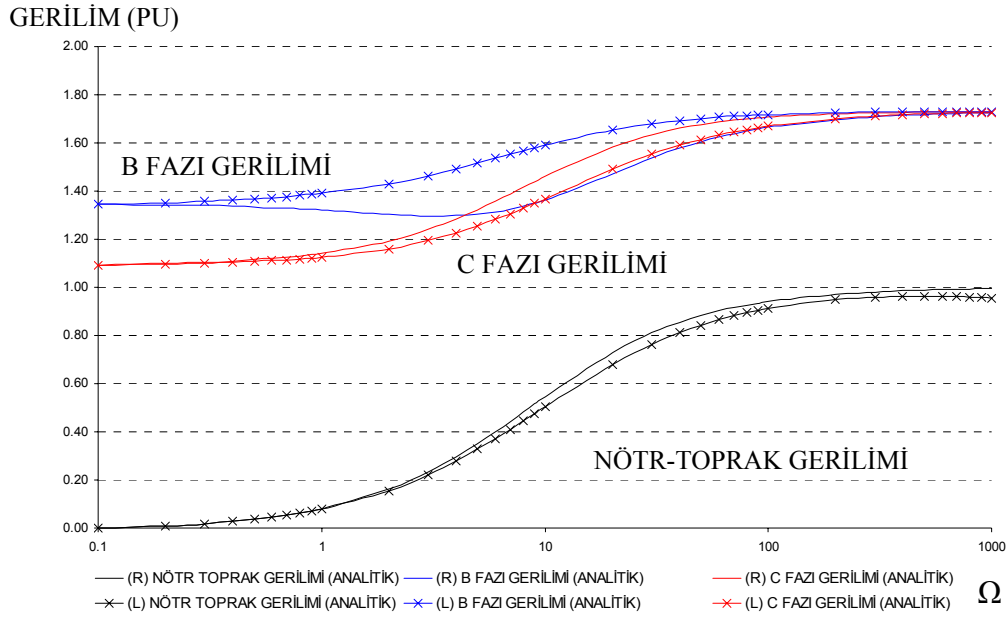


Şekil 5.9 TFTKD akımının topraklama direnci (R) ve reaktansına (X_L) göre değişimi.

Yapılan analizler sonucunda analitik metodlar ile ATP sonuçlarının birbirine yakın olduğu söylenebilir. Analitik yöntemle ATP sonuçları arasındaki fark kullanılan hat modellerindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır. ATP programında yüksek frekanslı değişikliklerin detaylı olarak incelenebilmesi için frekansa bağlı hat modeli kullanılmıştır. Kullanılan modelde, hattın şönt kondüktansında hesaba

katılmaktadır. Ancak analitik metod ile yapılan çözümde nominal π eşdeğer devre modeli kullanılmıştır.

Analitik olarak hesaplanan, TFTKD sırasında B, C fazları ve nötr toprak geriliminin topraklama direnci (R) ve reaktansı (XL) değerine göre değişimi Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de verilmiştir.



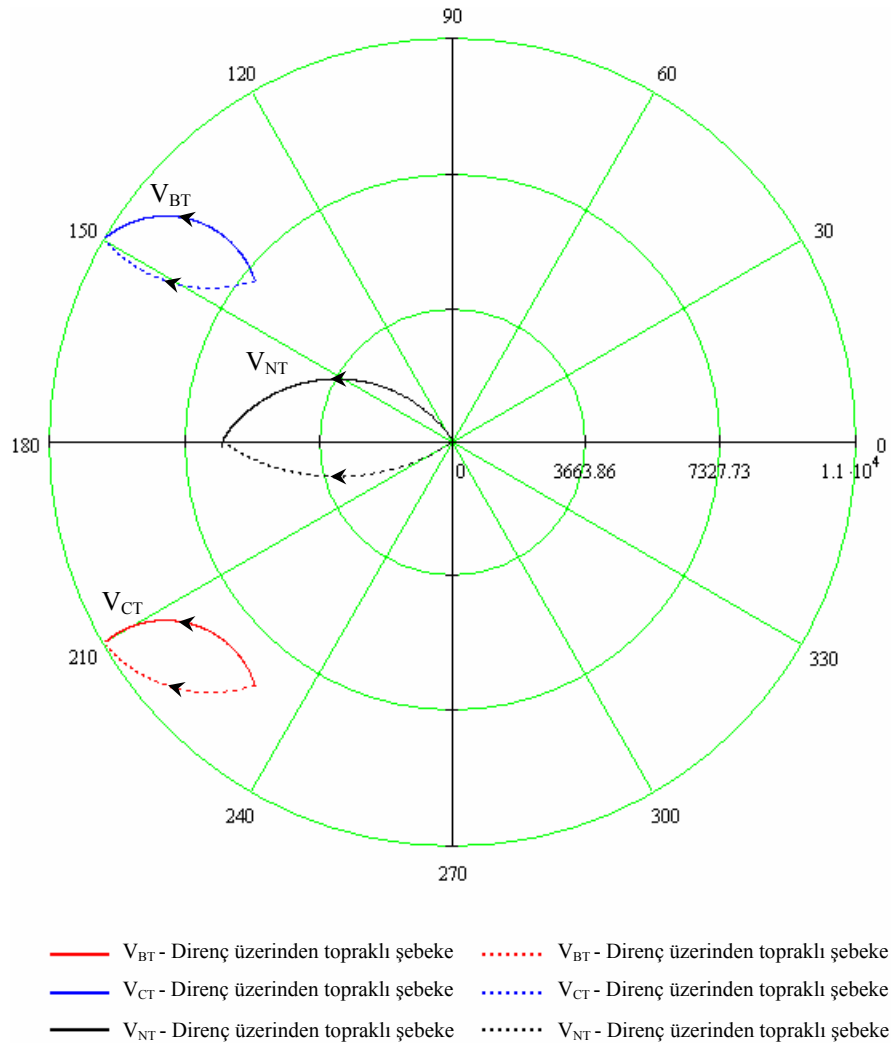
Şekil 5.10. TFTKD sırasında B, C fazları ve nötr toprak geriliminin topraklama direnci (R) ve reaktansına (XL) göre değişimi.

Direnç üzerinden topraklı şebekede nötr toprak gerilimi, V_{NT} , $R=1 \Omega$ 'da 511 V(0.08 pu) iken $R=10 \Omega$ 'da 3.46 kV (0.54 pu)'a, $R=100 \Omega$ 'da 5.97 kV (0.94 pu)'a yükselmiştir. B fazı faz toprak gerilimi, V_{BT} , $R=1 \Omega$ 'da 8.39 kV (1.32 pu) iken $R=10 \Omega$ 'da 8.64 kV (1.36 pu)'a, $R=100 \Omega$ 'da 10.53 kV (1.65 pu)'a yükselmiştir. C fazı faz toprak gerilimi, V_{CT} , $R=1 \Omega$ 'da 7.24 kV (1.14 pu) iken $R=10 \Omega$ 'da 9.27 kV (1.45 pu)'a, $R=100 \Omega$ 'da 10.83 kV (1.73 pu)'a yükselmiştir. 1000 Ω direnç değerinde nötr toprak gerilimi şebeke faz nötr gerilimi olan 6.35 kV (1 pu)'a, B ve C fazı gerilimleri ise şebeke faz faz gerilimi olan 11 kV (1.73 pu)'a yükselmiştir.

Reaktans üzerinden topraklı şebekede ise nötr toprak gerilimi, V_{NT} , $R=1 \Omega$ 'da 501 V(0.08 pu) iken $R=10 \Omega$ 'da 3.19 kV (0.50 pu)'a, $R=100 \Omega$ 'da 5.80 kV (0.91 pu)'a yükselmiştir. B fazı faz toprak gerilimi, V_{BT} , $R=1 \Omega$ 'da 8.82 kV (1.38 pu) iken $R=10 \Omega$ 'da 10.10 kV (1.59 pu)'a, $R=100 \Omega$ 'da 10.90 kV (1.71 pu)'a yükselmiştir. C fazı faz toprak gerilimi, V_{CT} , $R=1 \Omega$ 'da 7.14 kV (1.12 pu) iken

$R=10 \Omega$ 'da 8.68 kV (1.36 pu)'a, $R=100 \Omega$ 'da 10.59 kV (1.66 pu)'a yükselmiştir. 1000Ω reaktans değerinde nötr toprak gerilimi şebeke faz nötr gerilimi olan 6.35 kV (1 pu)'a, B ve C fazı gerilimleri ise şebeke faz faz gerilimi olan 11 kV (1.73 pu)'a yükselmiştir.

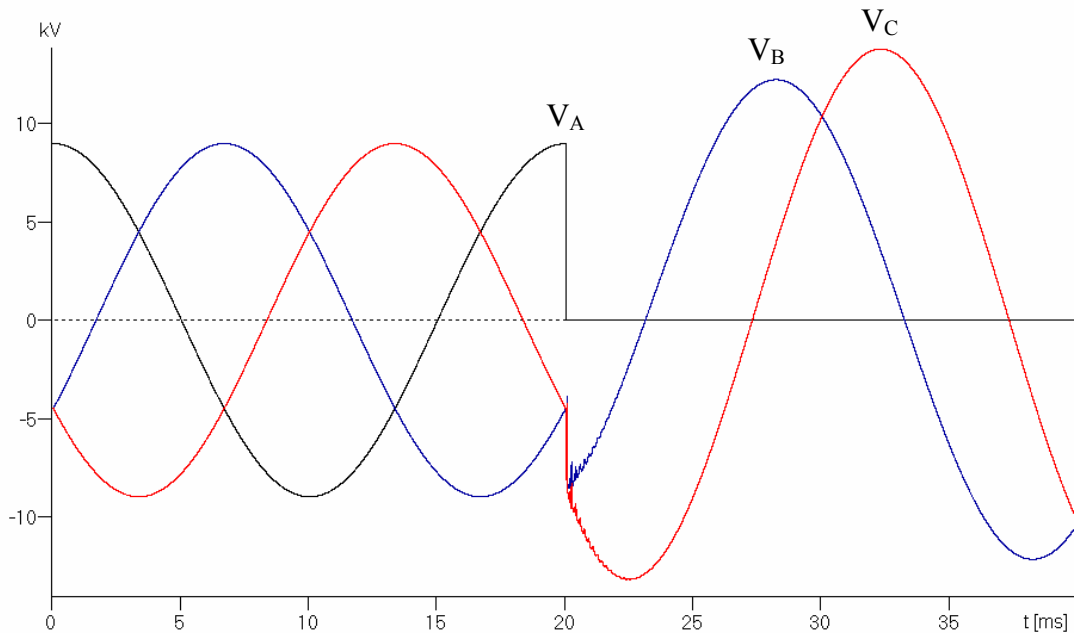
Şekil 5.11'de okların yönü empedans değerinin artışı ifade etmektedir. Direnç üzerinden topraklı şebeke eğrileri ile reaktans üzerinden topraklı şebeke eğrileri kıyaslandığında reaktans üzerinden topraklı şebeke eğrilerinin eğiminin daha düşük olduğu görülmektedir. Eğimin nedeni sıfır sıra devresindeki dirençtir. Eğer bu direnç ihmal edilirse sağlıklı fazların ve nötr toprak geriliminin topraklama empedansına bağlı değişimi düz çizgi şeklini alır.



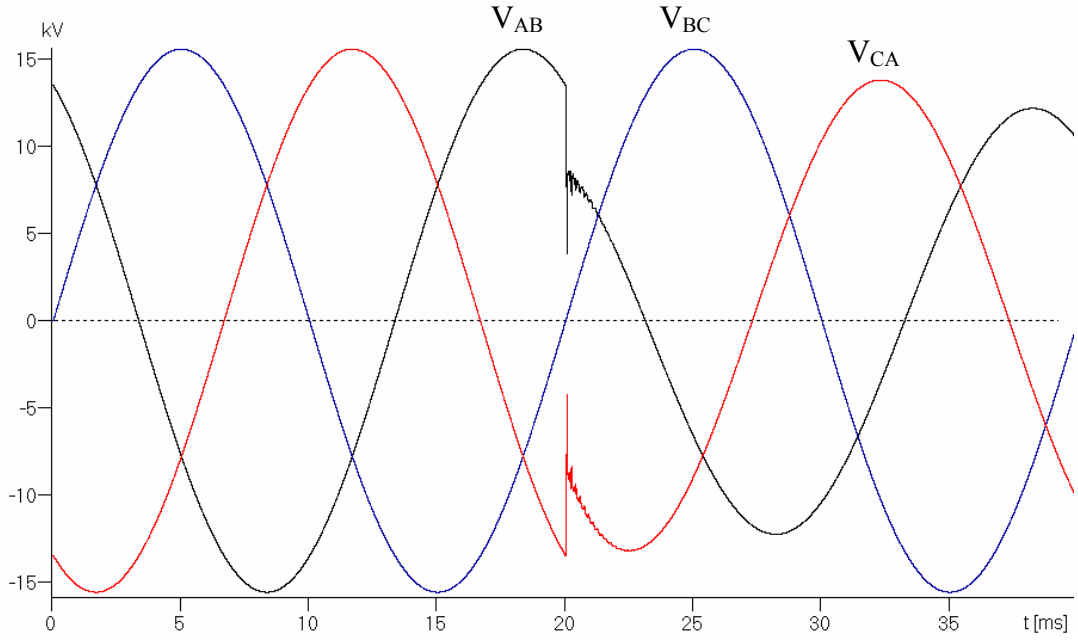
Şekil 5.11. TFTKD sırasında B, C fazları ve nötr toprak geriliminin acı ve genliklerinin topraklama direnci (R) ve reaktansına (XL) göre değişimi.

Geçici hal analizleri 10Ω ve 200Ω empedans değerlerinde yapılmıştır. Sürekli hal analizleri incelendiğinde 10Ω ve 200Ω değerlerinin kırılma noktaları olduğu görülebilir. Şebeke 10Ω 'dan küçük empedans değerlerinde yıldız noktası doğrudan doğruya topraklı şebeke gibi davranmaktadır. Şebeke 200Ω 'dan büyük empedans değerlerinde ise yıldız noktası yalıtılmış şebeke gibi davranmaya başlamaktadır.

Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de 10Ω 'luk direnç üzerinden topraklanmış şebekenin faz nötr ve faz faz gerilimlerinin değişimi verilmiştir.



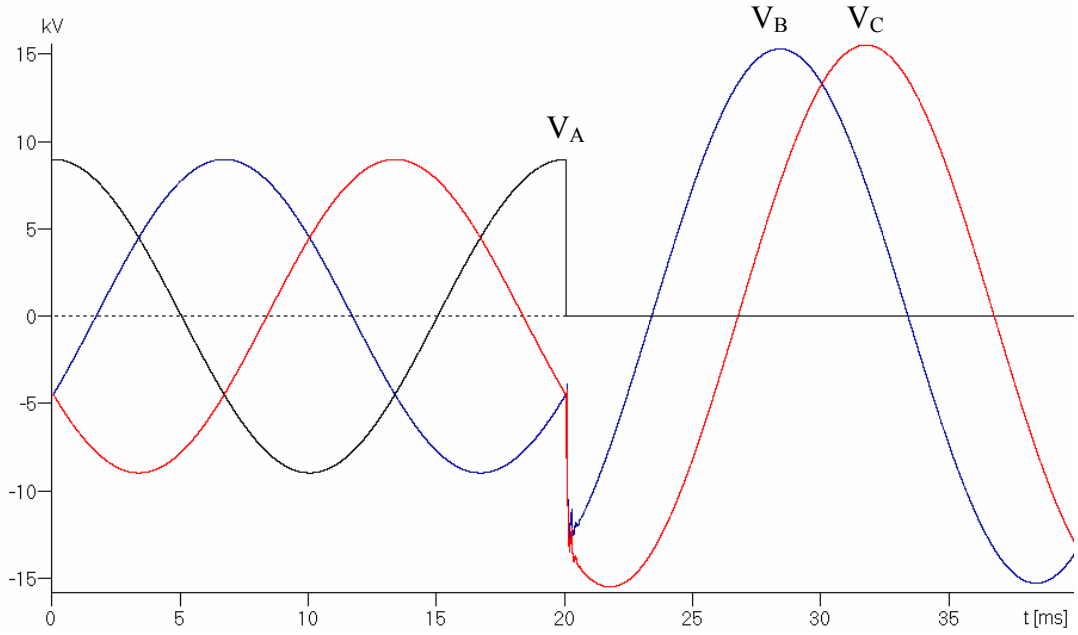
Şekil 5.12. 10Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede tek faz toprak kısa devresi sırasında faz nötr gerilimleri.



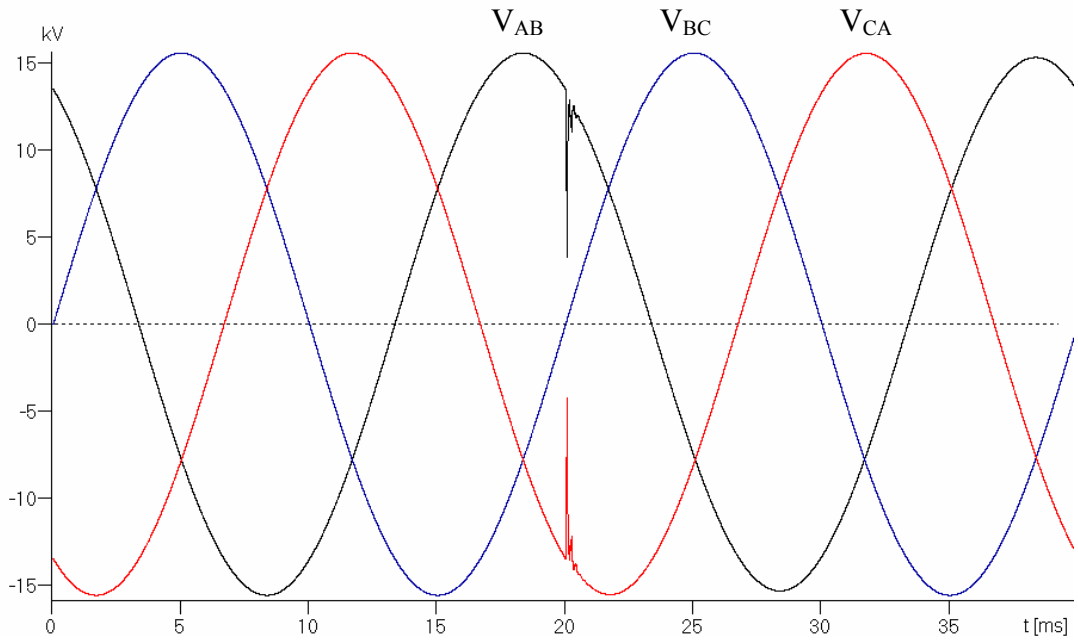
Şekil 5.13. 10 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede tek faz toprak kısa devresi sırasında faz faz gerilimleri.

Şekil 5.12 incelendiğinde faz nötr gerilimlerinin B fazı için 12.16 kV (1.35 pu) ve C fazı için 13.77 kV (1.53 pu) tepe değerlerine ulaştığı görülmektedir. Kısa devre akımı 383 A ve nötr toprak gerilimi ise 3.83 kV'tur. 10 Ω 'luk direnç üzerinden topraklanmış şebekede faz faz gerilimlerinin dengesiz olduğu Şekil 5.13'den görülebilmektedir. Farklı bir ifade ile sürekli kısa devre altında oluşan faz faz gerilim çökmeleri çalışmakta olan cihazları etkileyecek düzeydedir. Değerler incelendiğinde yıldız noktası doğrudan doğruya topraklı şebeke gibi davrandığı görülmektedir.

Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'de ise 200 Ω 'luk direnç üzerinden topraklanmış şebekenin faz nötr ve faz faz gerilimlerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 5.14. 200 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede tek faz toprak kısa devresi sırasında faz nötr gerilimleri.

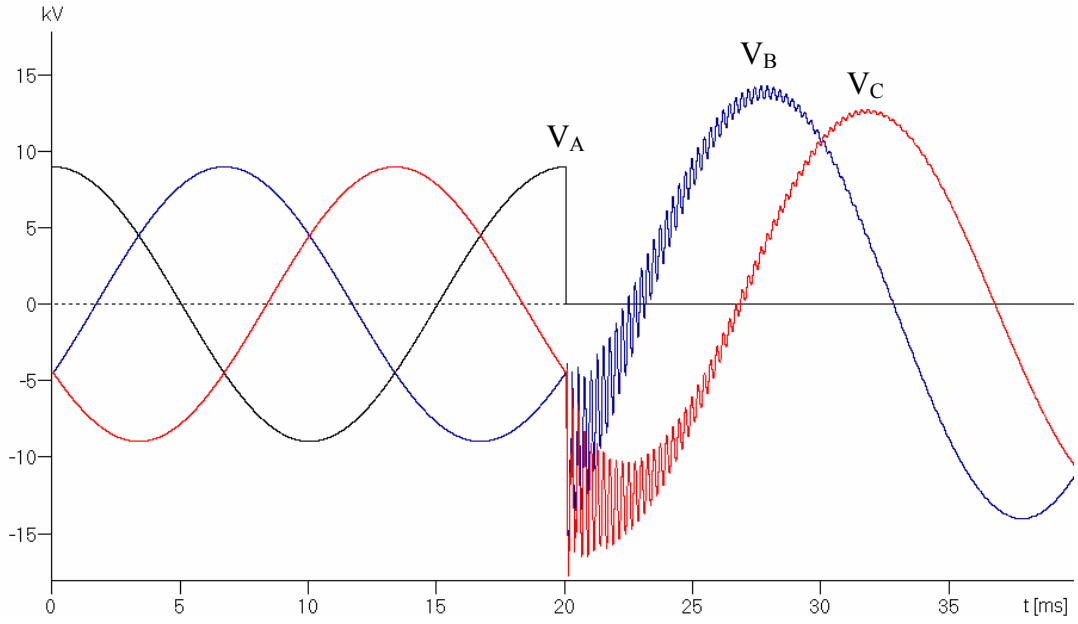


Şekil 5.15. 200 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede tek faz toprak kısa devresi sırasında faz faz gerilimleri.

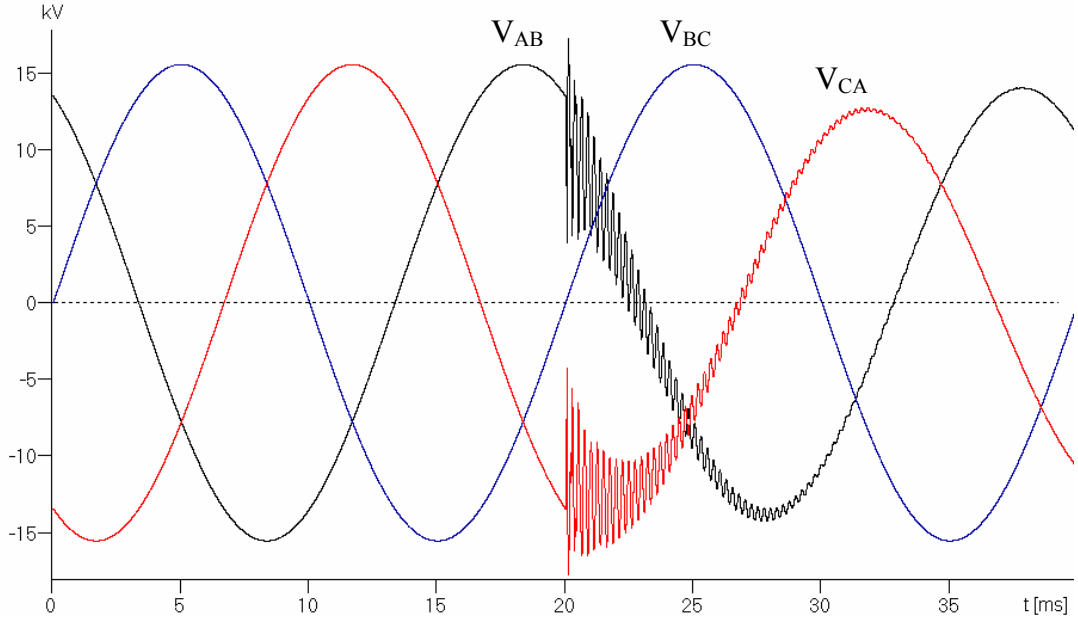
Şekil 5.14 incelendiğinde faz nötr gerilimlerinin şebeke faz faz gerilimi olan 11 kV'a ulaştığı görülmektedir. Beklendiği gibi kısa devre akımı 31.1 A'a düşmüş ve nötr toprak gerilimi ise şebeke faz nötr gerilimi olan 6.22 kV'a çıkmıştır. 200 Ω 'luk direnç üzerinden topraklanmış şebekede faz faz gerilimlerinin dengeli olduğu Şekil

5.15’den görülmektedir. Farklı bir ifade ile sürekli kısa devre altında oluşan faz faz gerilim çökmelerin çalışmakta olan cihazları etkilemeyecek düzeydedir. Değerler incelendiğinde yıldız noktası yalıtılmış şebeke gibi davrandığı görülmektedir.

Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de $10\ \Omega$ ’luk reaktans üzerinden topraklanmış sistemin faz nötr ve faz faz gerilimlerinin değişimi verilmiştir.



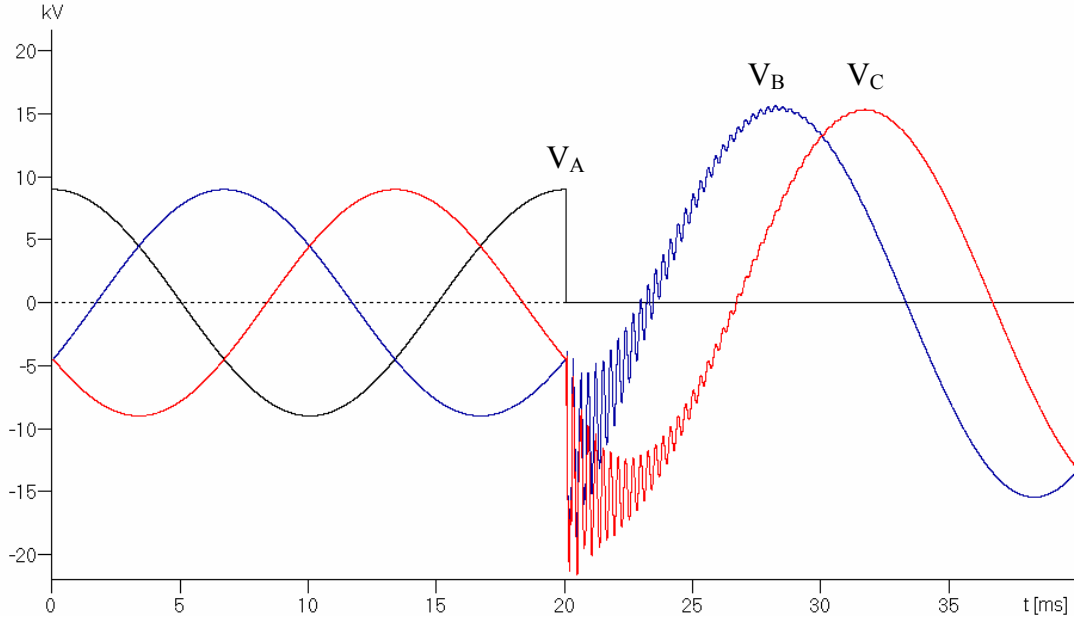
Şekil 5.16. $10\ \Omega$ ’luk reaktans üzerinden topraklı sistemde tek faz toprak kısa devresi sırasında faz nötr gerilimleri.



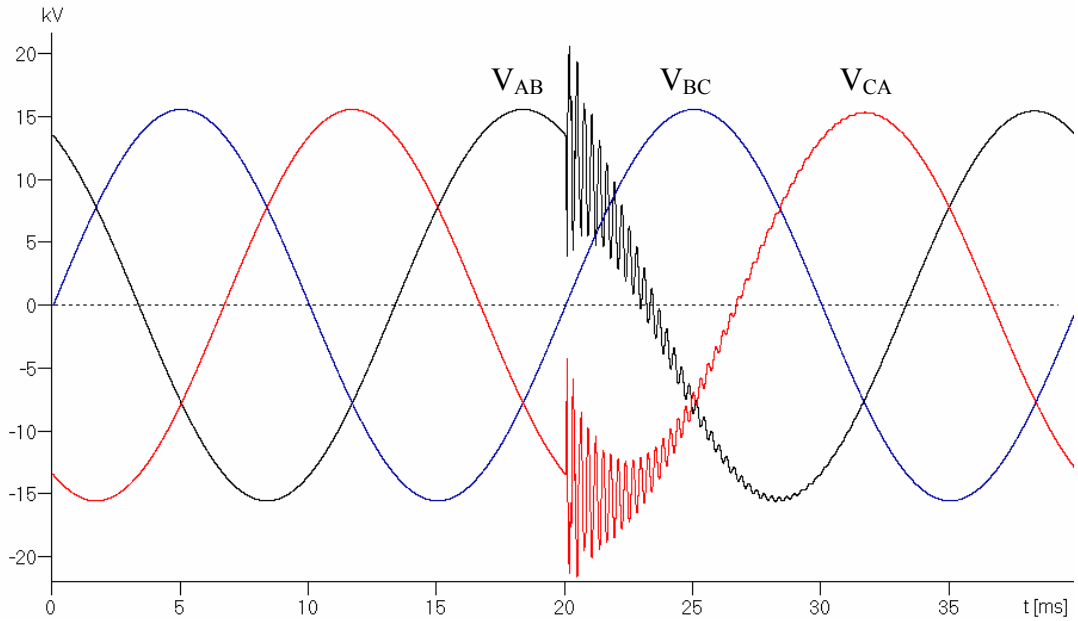
Şekil 5.17. 10 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı sistemde tek faz toprak kısa devresi sırasında faz faz gerilimleri.

Şekil 5.16 incelendiğinde faz nötr gerilimlerinin B fazı için 17.25 kV (1.92 pu) ve C fazı için 17.72 kV (1.97 pu) tepe değerlerine ulaştığı görülmektedir. Kısa devre akımı 326 A ve nötr toprak gerilimi ise 3.22 kV'tur. 10 Ω 'luk direnç üzerinden topraklanmış şebekede faz faz gerilimlerinin dengesiz olduğu Şekil 5.17'den görülebilmektedir. Farklı bir ifade ile sürekli kısa devre altında oluşan faz faz gerilim çökmeleri çalışmakta olan cihazları etkileyecek düzeydedir. Değerler incelendiğinde yıldız noktası doğrudan doğruya topraklı şebeke gibi davrandığı görülmektedir.

Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da ise 200 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklanmış sistemin faz nötr ve faz faz gerilimlerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 5.18. 200 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı sistemde tek faz toprak kısa devresi sırasında faz nötr gerilimleri.



Şekil 5.19. 200 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı sistemde tek faz toprak kısa devresi sırasında faz faz gerilimleri.

Şekil 5.18 incelendiğinde faz nötr gerilimlerinin, sürekli halde, şebeke faz faz gerilimi olan 11 kV'a ulaştığı görülmektedir. Ancak geçici halde B fazı 20.55 kV (2.28 pu) ve C fazı 21.54 kV (2.39 pu) tepe değerlerine ulaşmaktadır. Beklendiği gibi kısa devre akımı 29.7 A'a düşmüş ve nötr toprak gerilimi ise şebeke faz nötr gerilimi olan 6.22 kV'a çıkmıştır. 200 Ω 'luk direnç üzerinden topraklanmış şebekede faz faz

gerilimlerinin dengeli olduğu Şekil 5.19 ve Şekil 5.15’den görülmektedir. Farklı bir ifade ile sürekli kısa devre altında oluşan faz faz gerilim çökmelerin çalışmakta olan cihazları etkilemeyecek düzeydedir.

10 Ω ve 200 Ω empedans değerleri ile yapılan geçici hal ve sürekli hal analizlerinin sonuçları Tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.3. TFTKD sırasında B, C, nötr toprak gerilimleri ve kısa devre akımının 10 Ω ve 200 Ω ’luk topraklama empedansı ile değişimi.

	R=10 Ω		XL=10 Ω		R=200 Ω		XL=200 Ω	
	Sürekli Hal (rms) (PU)	Geçici Hal (max) (PU)	Sürekli Hal (rms) (PU)	Geçici Hal (max) (PU)	Sürekli Hal (rms) (PU)	Geçici Hal (max) (PU)	Sürekli Hal (rms) (PU)	Geçici Hal (max) (PU)
B fazı gerilimi	1.36	1.36	1.59	1.92	1.70	1.70	1.73	2.29
C fazı gerilimi	1.46	1.54	1.37	1.97	1.72	1.73	1.70	2.40
Nötr toprak gerilimi	0.55	0.61	0.50	1.11	0.97	0.98	0.95	2.00
Kısa devre akımı	350	545	322	492	30	44	30	43

Aynı empedans değeri için reaktans üzerinden topraklı şebekedeki nötr toprak ve C fazı gerilimi ile kısa devre akımı, direnç üzerinden topraklı şebekeye oranla daha düşüktür. Bununla birlikte reaktans üzerinden topraklı şebekede ki B fazı gerilimi direnç üzerinden topraklı şebekeye oranla daha büyüktür. Bu fark Şekil 5.10’dan görülebilmektedir. Şekil 5.11 tüm empedans değişimi için incelendiğinde topraklama direnci değişiminin nötr toprak gerilimi ve C fazı geriliminin genliği ve açısı üzerindeki etkisinin topraklama reaktansı değişimine oranla daha fazla olduğu görülmektedir. Bununla birlikte B fazı geriliminin genliği ve açısının topraklama reaktansı değişiminden topraklama direnci değişimine oranla daha fazla etkilenmektedir.

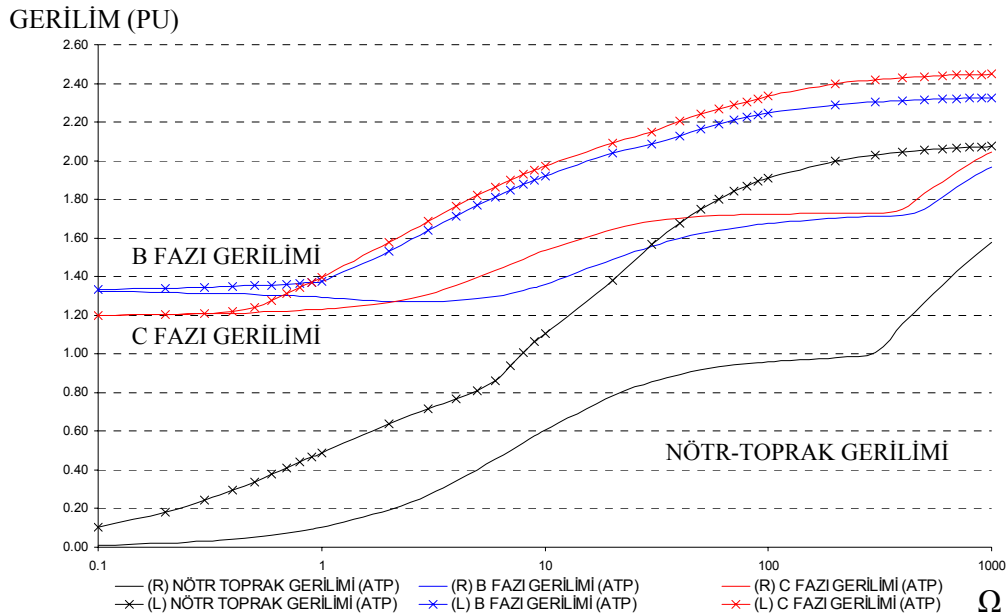
Literatürde belirtildiği gibi sürekli hal sonuçlarına aynı empedans değeri için bakıldığında reaktans üzerinden topraklı şebekenin kısa devre akımını dolayısıyla gerilimleri direnç üzerinden topraklı şebekeye oranla daha iyi sınırladığı Tablo 5.3’den görülmektedir. Bununla birlikte geçici hal sonuçlarına bakıldığında reaktans üzerinden topraklı şebekede ortaya çıkan salınımların direnç üzerinden topraklı şebekeye oranla, zaman sabitindeki değişime bağlı olarak, daha yüksek

genlikli olduğu ve daha uzun sürede yatıştığı görülmektedir. Salınım genlikleri yüksek empedans değerlerinde daha da artmaktadır [20, 30].

10 Ω empedans üzerinden topraklı şebeke için en yüksek sürekli hal gerilimi 1.59 pu ile reaktans üzerinden topraklı şebekede B fazında gözlenmiştir. Aynı empedans değeri için en yüksek geçici hal gerilimi ise 1.97 pu ile reaktans üzerinden topraklı şebekede C fazında gözlenmiştir.

200 Ω empedans üzerinden topraklı şebeke için en yüksek sürekli hal gerilimi 1.73 pu ile reaktans üzerinden topraklı şebekede B fazında gözlenmiştir. Aynı empedans değeri için en yüksek geçici hal gerilimi ise 2.40 pu ile reaktans üzerinden topraklı şebekede C fazında gözlenmiştir.

ATP ile yapılan geçici hal analizleri sonucunda elde edilen maksimum değerlerin topraklama empedansına bağlı değişimi Şekil 5.20 verilmiştir.



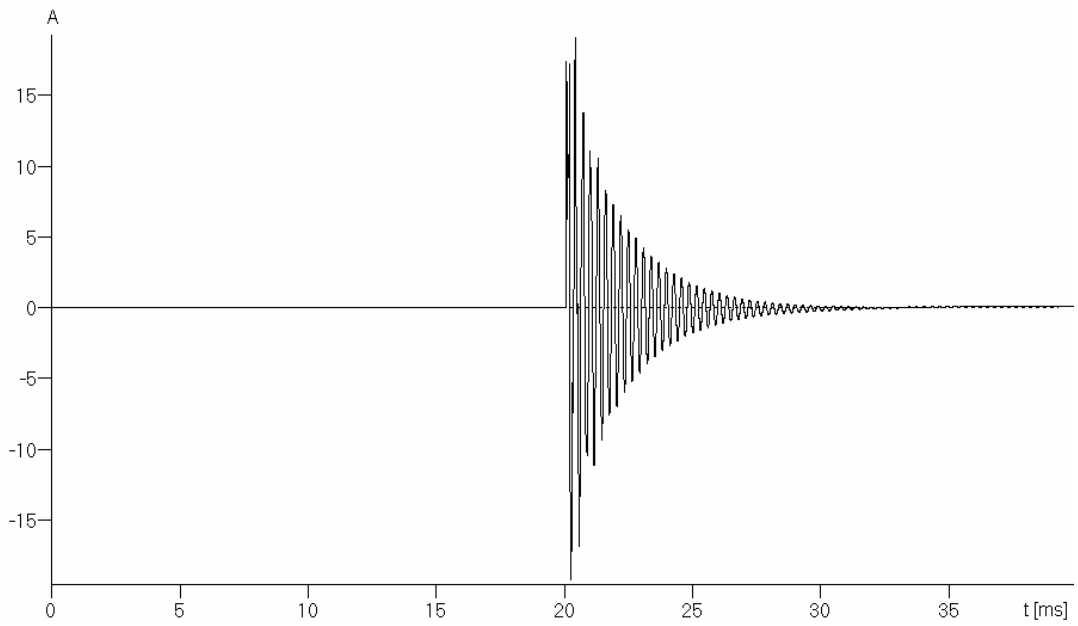
Şekil 5.20. TFTKD sırasında B, C fazları ve nötr toprak geriliminin maksimum değerlerinin topraklama direnci (R) ve reaktansı (XL) ile değişimi.

Bu kısımdaki analizlerde teorik hesaplama yapıldığı ve empedans etkisi incelendiği için saf direnç veya saf reaktans kullanılmıştır. Ancak gerçek hayatta bunu bulmak imkansızdır. Topraklama direncinin önemli bir kısmı reaktanstır. Dökme demir direncin güç faktörü 0.98'den daha azdır. Buda %20'sinin reaktans olduğu anlamına gelmektedir [28].

5.5. Toprak teması kompanze edilmiş şebekeler

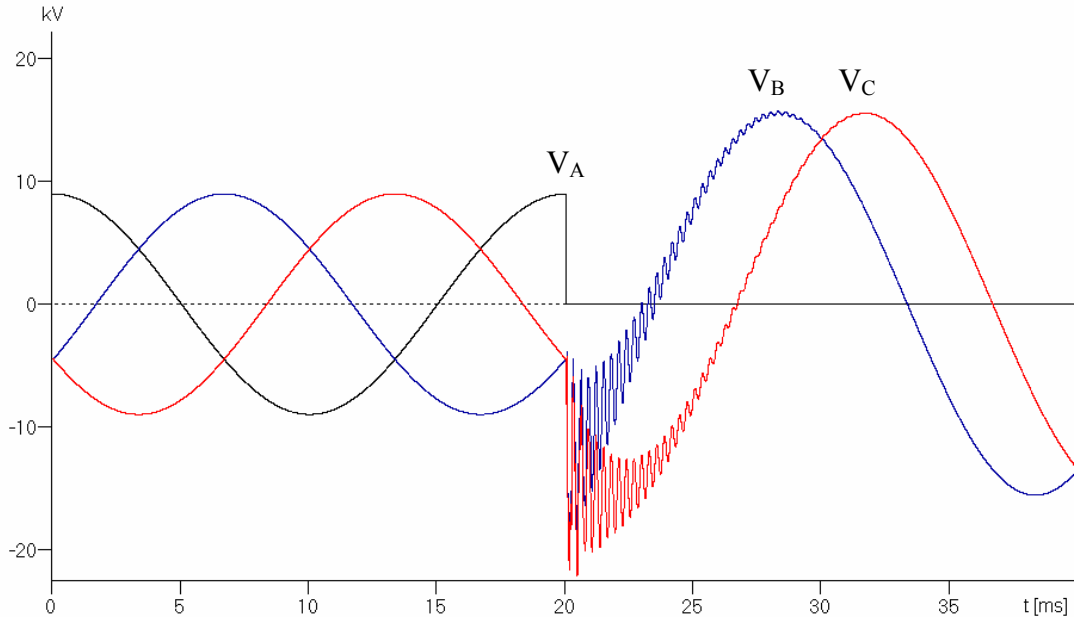
Yapılan sürekli hal analizlerinden Peterson Bobini değeri 26485 Ω olduğu bulunmuştur.

Toprak teması kompanze edilmiş şebekede meydana gelen tek faz toprak kısa devresine sonucunda görülen kısa devre akımının değişimi Şekil 5.21’de, faz nötr gerilim değişimi Şekil 5.22’de, nötr toprak geriliminin değişimi Şekil 5.23’de ve faz faz gerilimlerinin değişimi ise Şekil 5.24’de verilmiştir.

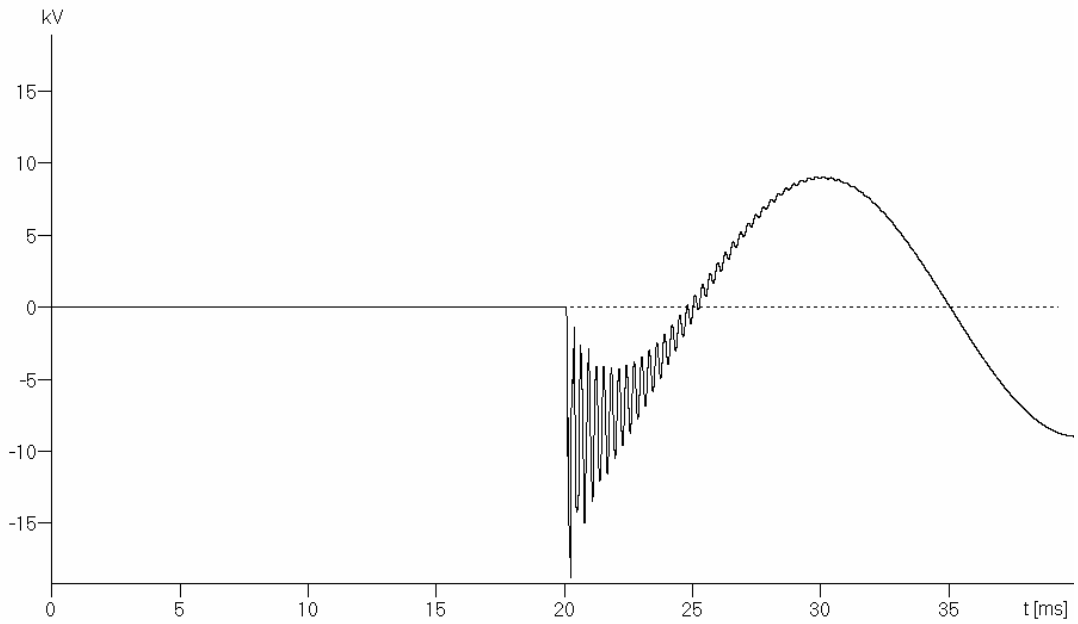


Şekil 5.21. Rezonans topraklı sistemde tek faz toprak kısa devre akımı.

26485 Ω reaktans değeri kullanılarak yapılan analizler sonucunda elde edilen kısa devre akımının geçici hal sırasında 19.12 A tepe değerine çıkmakta, sürekli halde ise 0.083 A değerine düşmektedir. Analitik metodlar ile yapılan sürekli hal çözümünde kısa devre akımı sıfır civarındadır.



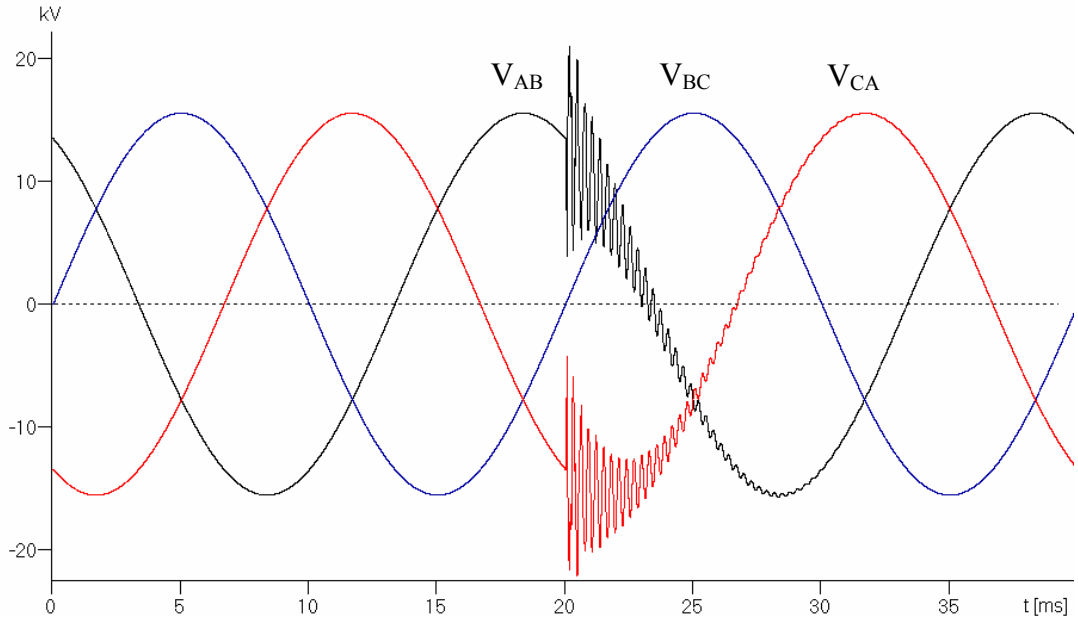
Şekil 5.22. Rezonans topraklı sistemde tek faz toprak kısa devresi sırasında faz nötr gerilimi.



Şekil 5.23. Rezonans topraklı sistemde tek faz toprak kısa devresi sırasında nötr toprak gerilimi.

Sürekli halde faz nötr gerilimlerinin faz faz gerilimi olan 11 kV'a, nötr toprak geriliminin ise faz nötr gerilimi olan 6.35 kV'a çıkmaktadır. Ancak geçici hal sırasında B fazı gerilimi 21.69 kV (2.41 pu)'a, C fazı gerilimi 22.08 kV (2.45 pu)'a ve nötr toprak gerilimi 19.12 kV (2.12 pu)'a tepe değerine çıkmaktadır. Faz ve nötr

gerilimleri 10 ms sonunda geçici halden sürekli hale geçmektedir. (Şekil 5.22, Şekil 5.23)



Şekil 5.24. Rezonans topraklı sistemde tek faz toprak kısa devresi sırasında faz faz gerilimleri.

Şekil 5.24 incelendiğinde yıldız noktası yalıtılmış şebekede meydana gelen tek faz kısa devresi esnasında oluşan faz faz gerilim çökmelerinin sistemden beslenen cihazları etkilemediği ve şebekenin sürekli kısa devre altında dahi çalışabildiği görülmektedir.

5.6. Sonuç

Yıldız noktası yalıtılmış veya doğrudan doğruya topraklanmış şebekeler özel durumlardır. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekelerde kısa devre akımı çok yüksek değerlere ulaşırken faz gerilimleri kısa süreli salınımlar ile 1.35 pu'nin üzerine çıkmamaktadır. Yıldız noktası yalıtılmış şebekelerde ise kısa devre akımı koruma cihazlarının algılayamayacağı kadar küçük olmakla birlikte faz gerilimleri uzun süreli ve yüksek genlikli salınımlar ile 1.73 pu sürekli hal ve 2.40 pu geçici hal değerlerine ulaşmaktadır. Test sistemi simetrik bileşen devre parametrelerine göre (EK-A) incelendiğinde yıldız noktası doğrudan doğruya topraklı şebeke modelinin planlandığı gibi çalışmadığı, şebekenin yıldız noktası

düşük değerli reaktans üzerinden topraklı şebeke gibi davrandığı görülmüştür. Analiz sonuçları bu bulguları desteklemektedir.

Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebekelerde kullanılabilecek empedans değerine göre kısa devre akımı ve gerilimler istenilen sınırlar içinde tutulabilmektedir. Ancak bu yönteminde maliyet ve yüksek genlikli salınımlar gibi problemleri vardır.

Toprak teması kompanze edilmiş şebekeler diğer sistemlerin bir arada yapamadığı sifıra yakın kısa devre akımı ve 1.2 pu altına düşürülebilen faz gerilimleri ile geleneksel topraklama metodları için yeniden ciddi bir alternatif olmaktadır. Kısa devre altında çalışabilmesi de artı bir avantajdır. Yarı iletkenlerdeki gelişmeler sonucunda eskiye oranla çok daha kullanışlı bir hale gelmektedir.

Bir şebekenin etkin topraklanıp topraklanmadığı sadece nötr bağlantı şekline bağlı değildir. Simetrik bileşenler eşdeğer devre parametreleri önem kazanmaktadır. Bu nedenle şebeke parametrelerinin analizi önem taşımaktadır. Topraklama yapılmadan önce şebekenin analiz edilmesi ve koruma ekipmanlarının çalışma aralıklarının analiz sonuçlarına göre belirlenmesi gerektiği görülmüştür.

6. bölümde hat uzunluğunun, dolayısıyla hat parametrelerinin, topraklama metodları ile birlikte kısa süreli gerilim değişimleri üzerindeki etkileri incelenecektir.

6. HAT UZUNLUĞU VE NÖTR BAĞLANTI ŞEKLİNE GÖRE AŞIRI GERİLİMLERİN ANALİZİ

6.1. Giriş

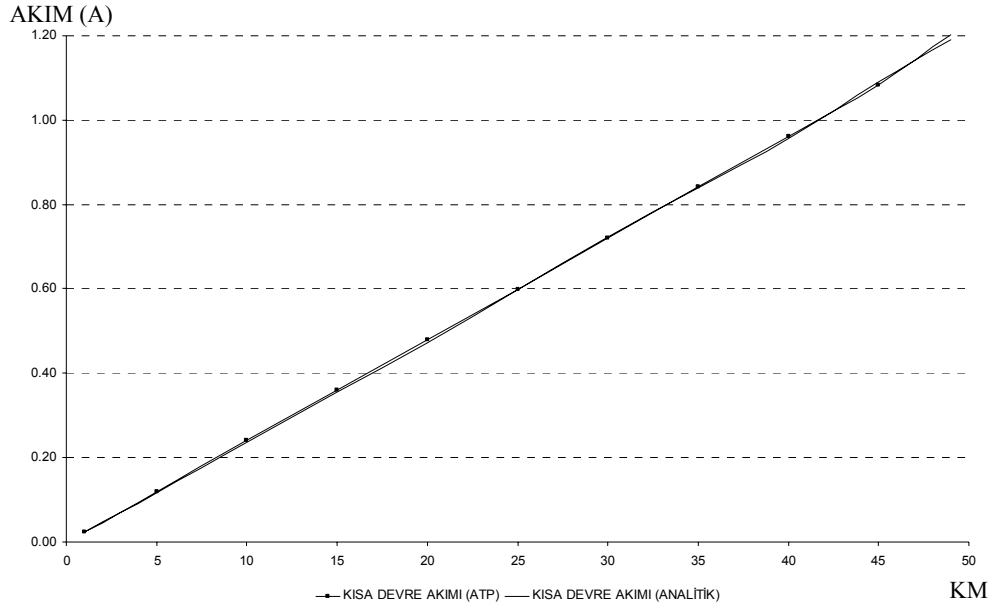
Topraklama metodları ve bu metodların kullanıldığı şebekelerin tek faz toprak kısa devresi altındaki davranışları 11 kV'luk test sistemi ile test edilmiş ve sonuçları bölüm 5'te sunulmuştur. Sonuçlar göstermiştir ki topraklama metodlarının dolayısıyla topraklama empedansının değişimi aşırı gerilimlerin genliklerinin değişmesine neden olmaktadır.

Bu bölümde hat uzunluğunun değişiminin kısa devre büyüklükleri üzerindeki etkisi incelenecektir. Hat uzunluğu, iletim hattının empedansı ve kapasitansı ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Hat empedansındaki ve kapasitansındaki değişim kısa devre akımını ve gerilimleri etkilemektedir. Bu nedenle 11 kV'luk test şebekesinin hat uzunluğu 1-50 km arasında değişken hale getirilmiştir. Topraklama empedansı ve hat uzunluğu parametrelerinin değişime bağlı olarak tek faz toprak kısa devresi altındaki şebekede sağlıklı fazların gerilimler incelenmiştir.

Yeni test şebekesinin devre eşdeğeri EK-A Şekil A-1'de, simetrik bileşenler eşdeğer devresi ise EK-A Şekil A-2'de verilen devre eşdeğerleri ile aynıdır.

6.2. Yıldız noktası yalıtılmış şebeke

Yıldız noktası yalıtılmış şebekede kısa devre akımının hat uzunluğu ile değişimi Şekil 6.1'de verilmiştir. Literatürde belirtildiği gibi kısa devre akımı, hat uzunluğu dolayısıyla hat kapasitesi ile artmaktadır [20]. 1 km uzunluğundaki hattın sonunda meydana gelen kısa devre sonucunda toprağa akan kısa devre akımı 0.02 A iken 50 km uzunluğundaki hattın sonunda meydana gelen kısa devre sonucunda toprağa akan kısa devre akımı 1.19 A'dır. ATP ve analitik çözüm sonuçları birbirini desteklemektedir.

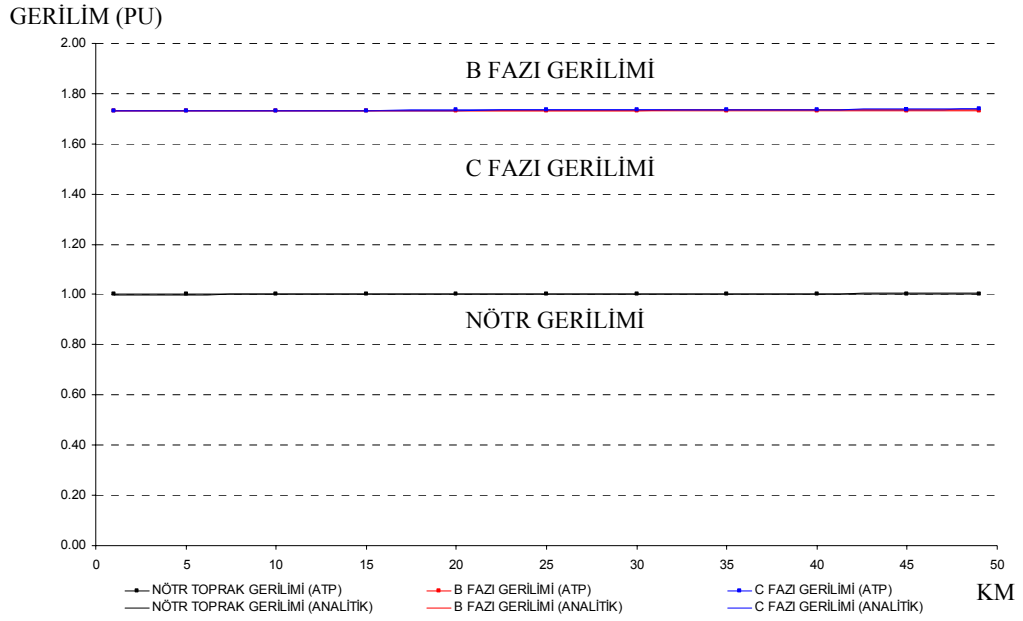


Şekil 6.1. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede kısa devre akımının hat uzunluğuna bağlı değişimi.

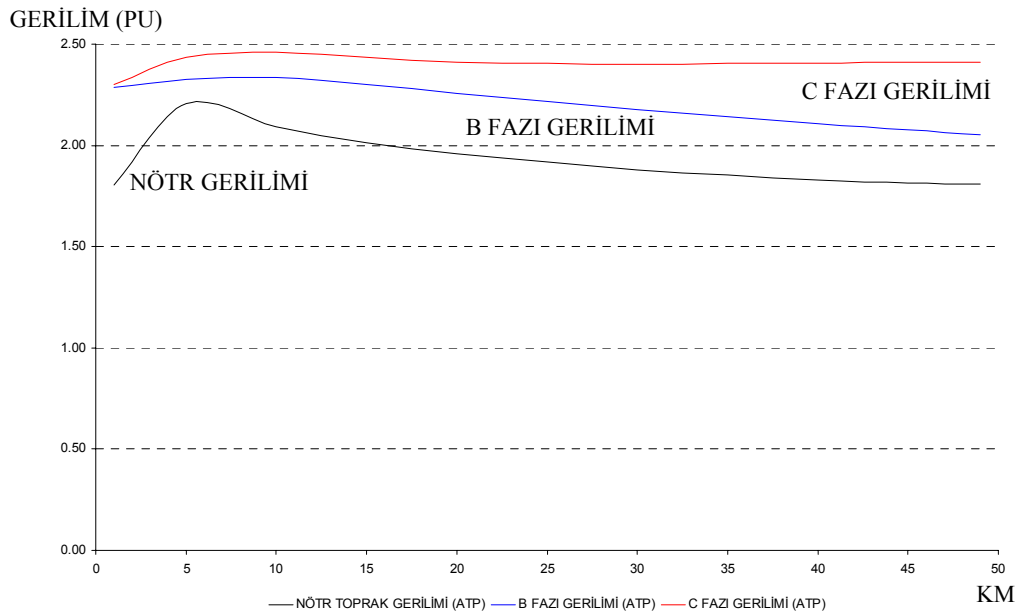
Yıldız noktası yalıtılmış şebekede kısa devre akımının maksimum değerleri de hat uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Kısa devre akımı oluşan geçicilikler sonucunda 1 km'lik hat sonunda 20 A, 50 km'lik hat sonunda 23 A tepe değerine ulaşmaktadır.

Sürekli tek faz toprak kısa devresi altında sağlıklı fazların faz nötr gerilimlerinin şebeke faz faz gerilimi olan 11 kV'a, nötr toprak geriliminin ise şebekenin faz nötr gerilimi olan 6.35 kV'a çıktığı Şekil 6.2'den görülmektedir.

1km uzunluğundaki hattın sonunda meydana gelen kısa devre sonucunda B fazı gerilimi 10.99 kV (1.73 pu) iken 50 km uzunluğundaki hattın sonunda meydana gelen kısa devre sonucunda 11.02 kV (1.73 pu)'a çıkmıştır. Aynı şekilde C fazı gerilimi 10.99 kV (1.73 pu)'dan 11.04 kV (1.73 pu)'a ve nötr toprak gerilimi 6.35 kV (1 pu)'dan 6.38 kV (1 pu)'a çıkmıştır. Dikkat edilirse artışların %0.5'den daha az olduğu görülmektedir. Bu artışa şebekenin yüksüz olması ve hat kapasitesindeki artış neden olmaktadır. ATP ve analitik çözüm sonuçları birbirini desteklemektedir.



Şekil 6.2. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede faz ve nötr gerilimlerinin hat uzunluğuna bağlı değişimi.

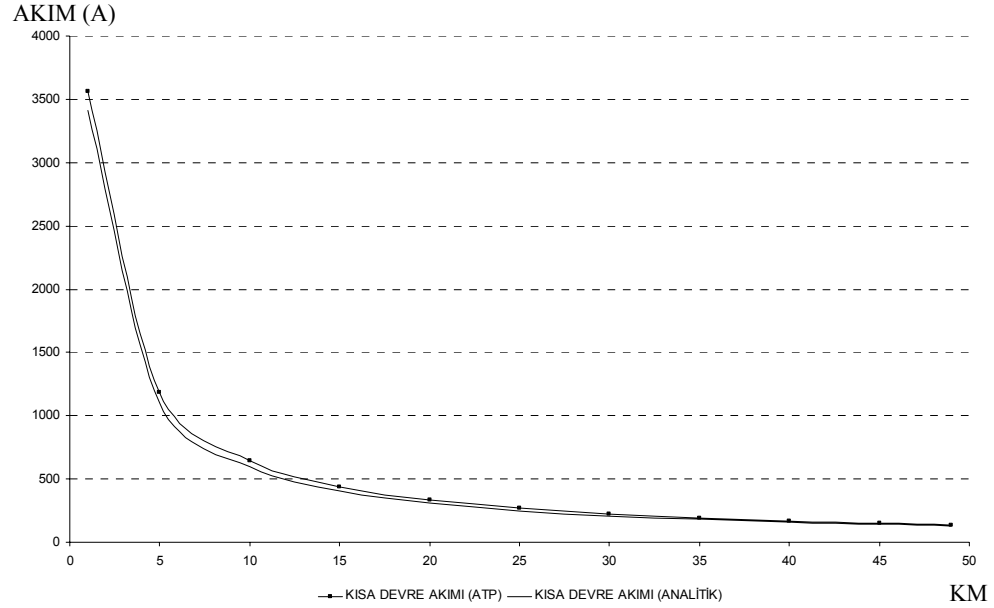


Şekil 6.3. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede faz ve nötr gerilimlerinin maksimum değerlerinin hat uzunluğuna bağlı değişimi.

Faz ve nötr gerilimlerinin maksimum değerleri Şekil 6.3’de verilmiştir. B ve C fazı 10 km’lik hat sonunda 20.96 kV (2.33 pu) ve 22.08 kV (2.46 pu) tepe değerlerini almıştır. Nötr toprak gerilimi ise 5 km’lik hat sonunda 19.79 kV (2.20 pu) tepe değerine çıkmaktadır. Hat uzunluğunun artması ve hat parametrelerinin değerlerinin büyümesi sonucunda kısa devre sonrasında oluşan geçiciliklerin genlikleri azalmaktadır.

6.3. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebeke

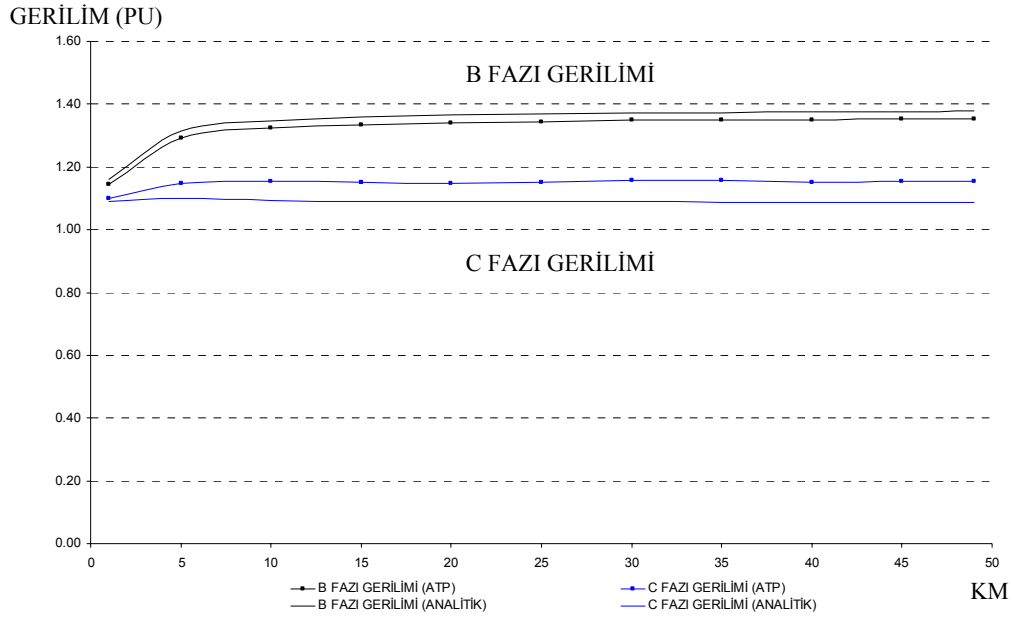
Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede sürekli tek faz toprak kısa devresi altında elde edilen kısa devre akımının hat uzunluğuna bağlı değişimi Şekil 6.4’de verilmiştir. Faz ve nötr gerilimlerinin hat uzunluğuna bağlı değişimi ise Şekil 6.5’de verilmiştir.



Şekil 6.4. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede kısa devre akımının hat uzunluğuna bağlı değişimi.

Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebeke, 1km’lik hat üzerinden kısa devre edildiğinde kaynak düşük bir empedans üzerinden kısa devre edilmiş gibi davranmakta ve yüksek genlikli kısa devre akımı şebekeden akmaktadır. 1 km uzunluğundaki hattın sonunda meydana gelen kısa devrede akan akımın ATP’de 3565 A, analitik metodlar ile 3408 A olduğu Şekil 6.4’den görülmektedir. Kısa devre akımının, hat uzunluğunun artışıyla empedans artışı ile birlikte azaldığı görülmektedir. 50 km sonunda meydana gelen kısa devrede akan akımın ATP’de 138 A, analitik metodlar ile 126 A olduğu Şekil 6.4’den görülmektedir.

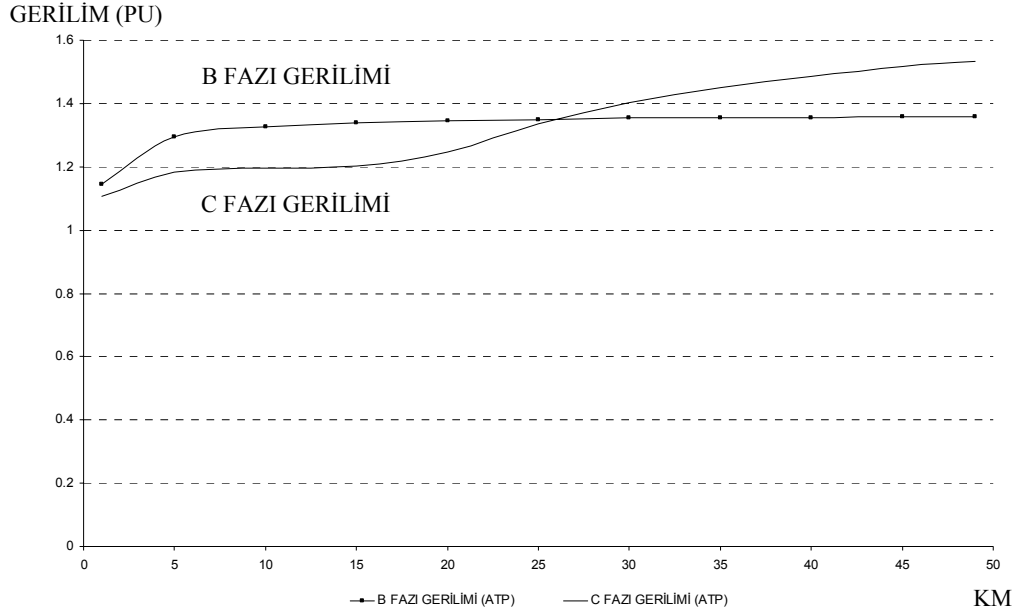
Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede kısa devre akımının maksimum değerleri sürekli hal değerlerinin 1.5 katı kadardır. Kısa devre akımı 1km’lik hat sonunda 5297 A, 50 km’lik hat sonunda ise 208 A olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.5. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede faz ve nötr gerilimlerinin hat uzunluğuna bağlı değişimi.

Tek faz toprak kısa devresine maruz kalan yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede sağlıklı faz gerilimlerinin hat uzunluğunun artışına bağlı olarak arttığı Şekil 6.5'den görülmektedir. Ancak bu değişim doğrusal değildir. İki kısımda incelenebilir. Hat uzunluğunun 4 km'nin altında olduğu değerlerde şebeke etkin topraklanmış şebeke olarak çalışmaktadır. Analitik olarak hat mesafesi 0'dan başlatıldığında gerilimlerin ilk değerleri 6.35 kV (1 pu) olmaktadır. Hat uzunluğu arttıkça şebeke yapısı değişmekte ve şebeke düşük değerli reaktans üzerinden topraklı şebeke gibi davranmaktadır.

Hat uzunluğu 5 km'nin üzerine çıktığında B ve C fazı gerilimlerinin değerleri artmaktadır. 5 km'lik hat sonunda meydana gelen kısa devre sonrasında B fazı gerilimi 8.20 kV (1.29 pu) ve C fazı gerilim 7.28 kV (1.14 pu), 50 km'lik hat sonunda meydana gelen kısa devre sonrasında ise B fazı gerilimi 8.59 kV (1.35 pu) ve C fazı gerilim 7.32 kV (1.15 pu) değerlerine ulaşmaktadır.



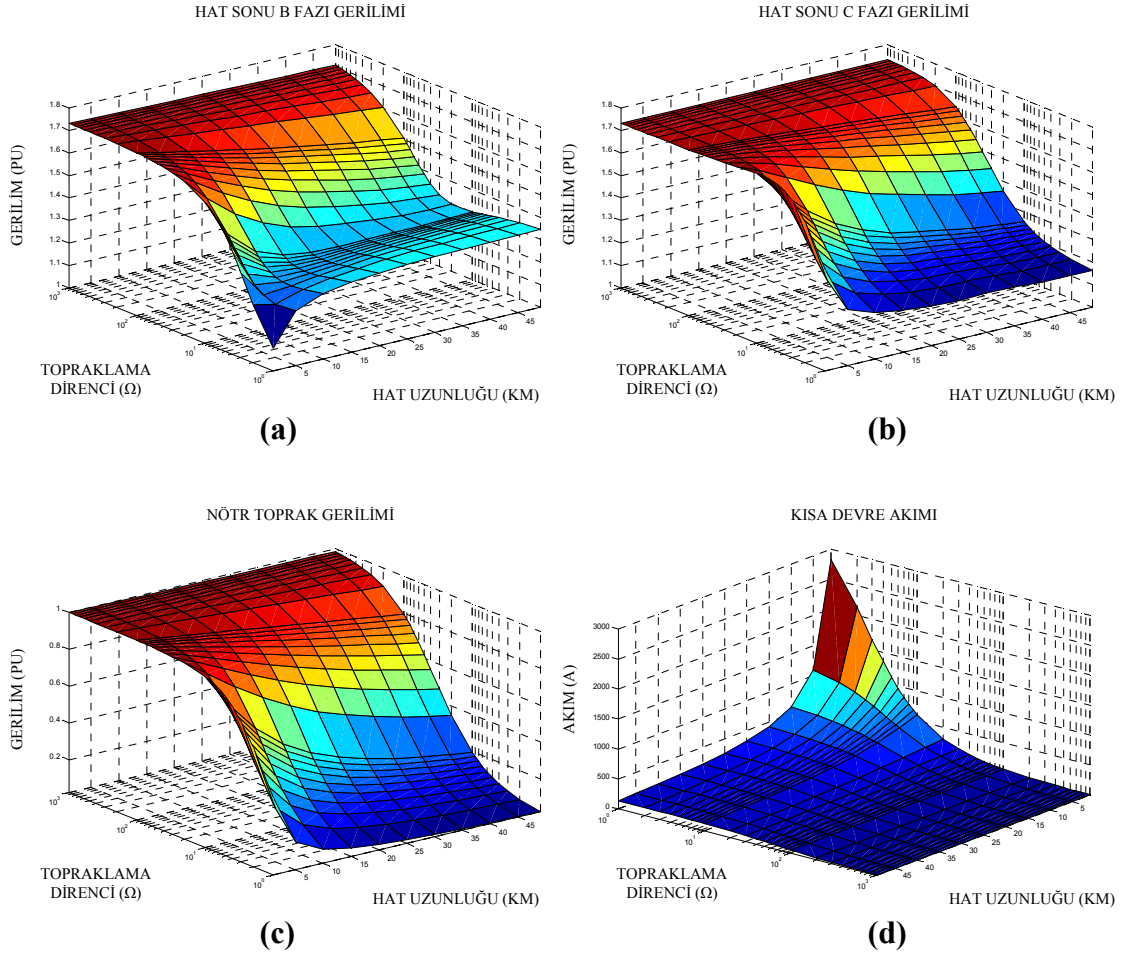
Şekil 6.6. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede faz gerilimlerinin maksimum değerlerinin hat uzunluğuna bağlı değişimi.

Faz ve nötr gerilimlerinin maksimum değerleri Şekil 6.6'de verilmiştir. 5 km'lik hat sonunda meydana gelen kısa devre sonrasında B fazı gerilimi maksimum değeri 11.60 kV (1.29 pu) ve C fazı gerilimi maksimum değeri 10.61 kV (1.18 pu) ölçülmüştür. 50 km'lik hat sonunda meydana gelen kısa devre sonrasında ise B fazı gerilimi maksimum değeri 12.20 kV (1.35 pu) ve C fazı gerilimi maksimum değeri 13.76 kV (1.52 pu) değerlerine yükselmektedir. C fazı gerilimi maksimum değerinin hat uzunluğunun 15 km'nin üzerine çıkması ile birlikte 1.18 pu'den 1.55 pu'e yükseldiği görülmektedir. Bunun nedeni ATP'de kullanılan hat modelinin rutininin mesafe artışı sırasında geçicilikte önemli bir parametre olan R/X 'in değişimine neden olmasıdır.

6.4. Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebeke

Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebekede, topraklama empedansının direnç ve reaktans olması durumu için ayrı ayrı analiz yapılmıştır. Direnç ve reaktans üzerinden topraklı şebekede toprak empedansının değerinin değişimi ile hat uzunluğunun değişimi aynı anda incelenmiştir.

Direnç üzerinden topraklı şebekede sürekli tek faz toprak kısa devresi altında elde edilen hat uzunluğuna ve topraklama direncine bağlı kısa devre akımı, nötr toprak ve sağlıklı fazların gerilimlerinin değişimi Şekil 6.7’de verilmiştir.



Şekil 6.7. Yıldız noktası direnç üzerinden topraklanmış şebekede (a) B fazı gerilimi; (b) C fazı gerilimi; (c) nötr toprak gerilimi; (d) kısa devre akımının topraklama direnci ve hat uzunluğuna bağlı değişimi.

Kısa devre akımının, hat uzunluğuna ve topraklama direncine bağlı değişimi Şekil 6.7 (d)’den incelendiğinde, en büyük değerin 2821 A ile 1 Ω’luk direnç üzerinden topraklı 1 km uzunluğundaki hatta olduğu görülmektedir. Aslında bu koşul yıldız noktası doğrudan doğruya topraklı şebekede kaynağın kısa devre edilmesi gibi düşünülebilir. Topraklama direnç 1 Ω iken hat uzunluğu 50 km’ye çıkartıldığında kısa devre akımı 137 A’e düşmektedir.

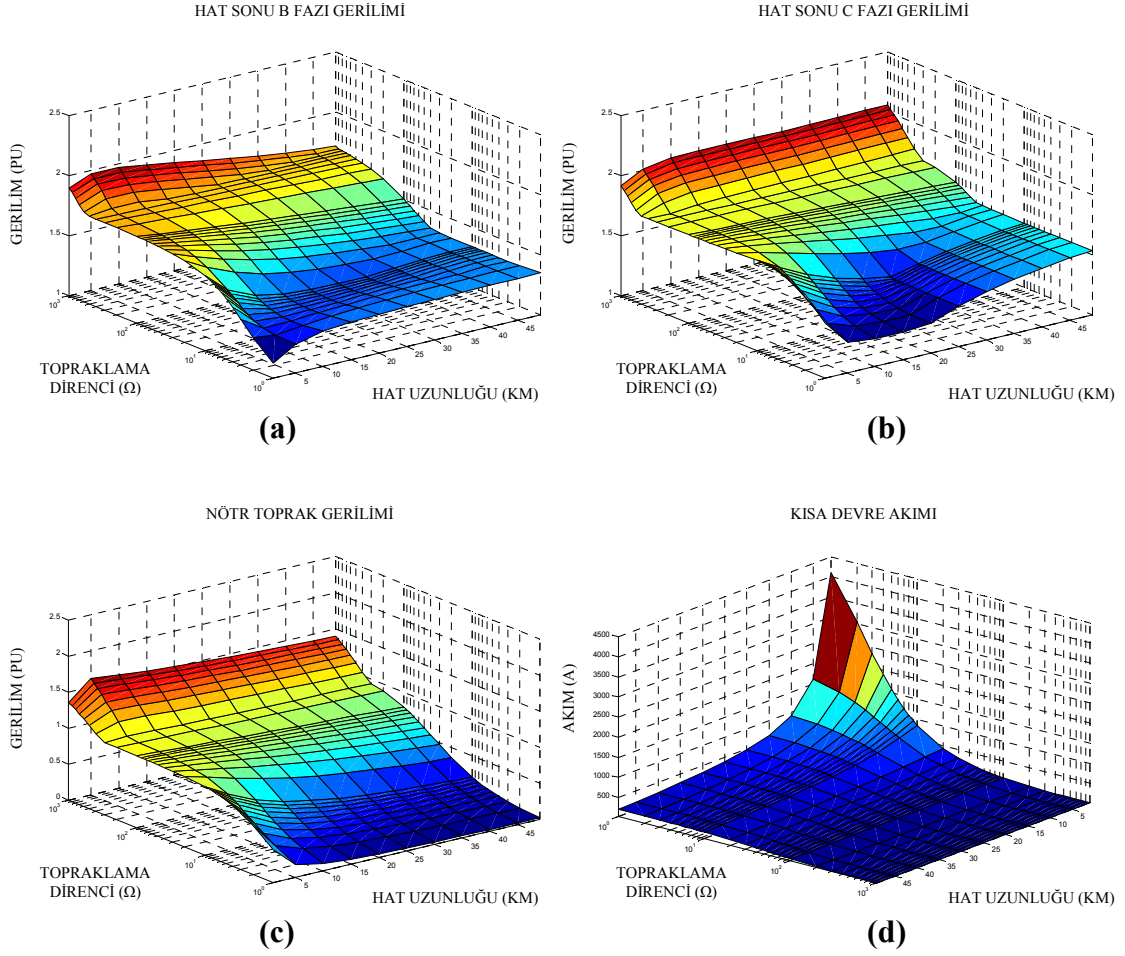
1000 Ω’luk direnç üzerinden topraklı 1 km uzunluğundaki hatta kısa devre akımı 6.35 A iken hat uzunluğu 50 km’ye çıkartıldığında kısa devre akımı 6.56 A’e yükselmektedir. Bunun nedeni hat uzunluğunun artması sonucu hat kapasitesinin

artmasıdır. Bununla birlikte topraklama direncinin 1000Ω olduğu koşulda 1 km'den 50 km'ye kadar her uzunluktaki iletim hattın için kısa devre akımı 7 A'in altına düşmektedir.

Şekil 6.7 (a)(b)(c) incelendiğinde, beklendiği gibi, direnç değeri 1000Ω 'a yaklaştıkça şebeke yıldız noktası yalıtılmış şebeke gibi davranmakta, direnç değeri 1Ω 'a yaklaştıkça şebeke yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebeke gibi davranmaktadır. Şekil 6.7 (a)(b)'ye dikkat edilirse 1Ω direnç değerinde B ve C fazlarının gerilimleri 1 pu'den farklıdır. Bunun nedeni modellenen şebekenin boyutlarından kaynaklanan etkin topraklanmama problemi. 1Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede 1km uzunluğundaki hattın sonunda meydana gelen kısa devrede B fazı gerilimi 6.98 kV (1.09 pu) ve C fazı gerilimi 9.19 kV (1.44 pu) değerleri almaktadır. 1Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede 50 km uzunluğundaki hattın sonunda B fazı gerilimi 8.54 kV (1.34 pu) ve C fazı gerilimi 7.38 kV (1.16 pu) değerleri almaktadır. Nötr toprak gerilimi ise 1 km hat için 2.82 kV (0.44 pu), 50 km hat için 137 V (0.02 pu) değerlerini almaktadır. 1Ω 'luk direnç değeri için B ve C fazı gerilimlerinin değişimleri Şekil 6.5 ile benzer yapıdadır.

1000Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede C fazı gerilimi hat uzunluğu ne olursa olsun 11 kV (1.73 pu)'a ulaşmaktadır. B fazı gerilimi ise 1 km'lik hat sonunda 10.99 kV (1.73 pu)'dan 50 km'lik hat sonunda 10.84 kV (1.70 pu) değerine düşmektedir. Benzer şekilde Nötr toprak gerilimi de 1 km'lik hat sonunda 6.35 kV (1 pu)'dan 50 km'lik hat sonunda 6.26 kV (0.98 pu) değerine düşmektedir. Bunun nedeni hat uzunluğu ile birlikte artan hat kapasitesinin neden olduğu kısa devre akımının artışı ve meydana getirdiği gerilim düşümüdür. 1000Ω 'luk direnç değeri için faz ve nötr gerilimlerinin değişimleri Şekil 6.2 ile benzer yapıdadır.

Direnç üzerinden topraklı şebekede sürekli tek faz toprak kısa devresi altında elde edilen hat uzunluğuna ve topraklama direncine bağlı kısa devre akımı, nötr toprak ve sağlıklı fazların gerilimlerinin maksimum değerlerinin değişimi Şekil 6.8'de verilmiştir.



Şekil 6.8. Yıldız noktası direnç üzerinden topraklanmış şebekede (a) B fazı gerilimi; (b) C fazı gerilimi; (c) nötr toprak gerilimi; (d) kısa devre akımı maksimum değerinin topraklama direnci ve hat uzunluğuna bağlı değişimi.

Şekil 6.8 (a)(b)(c) incelendiğinde 1 Ω'luk direnç üzerinden topraklı 1 km uzunluğundaki hattın sonunda meydana gelen tek faz toprak kısa devresi akımının maksimum değerinin 4112 A ($1.45 I_K$) olduğu görülmektedir. Hat uzunluğu 50 km'ye çıkartıldığında kısa devre akımının maksimum değeri 205 A ($1.49 I_K$) düşmektedir. Düşük değerli direnç üzerinde topraklanmış şebekelerde kısa devre akımının maksimum değerinin, efektif değerinin 1.41 katından fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni maksimum değerlerin kaydedilmesi sırasında sürekli hal değil geçici halin ele alınmasıdır. Bu nedenle salınımlar değerlerin yükselmesine neden olmaktadır. Salınımlar yüksek genlikli olmadığı için fark azdır.

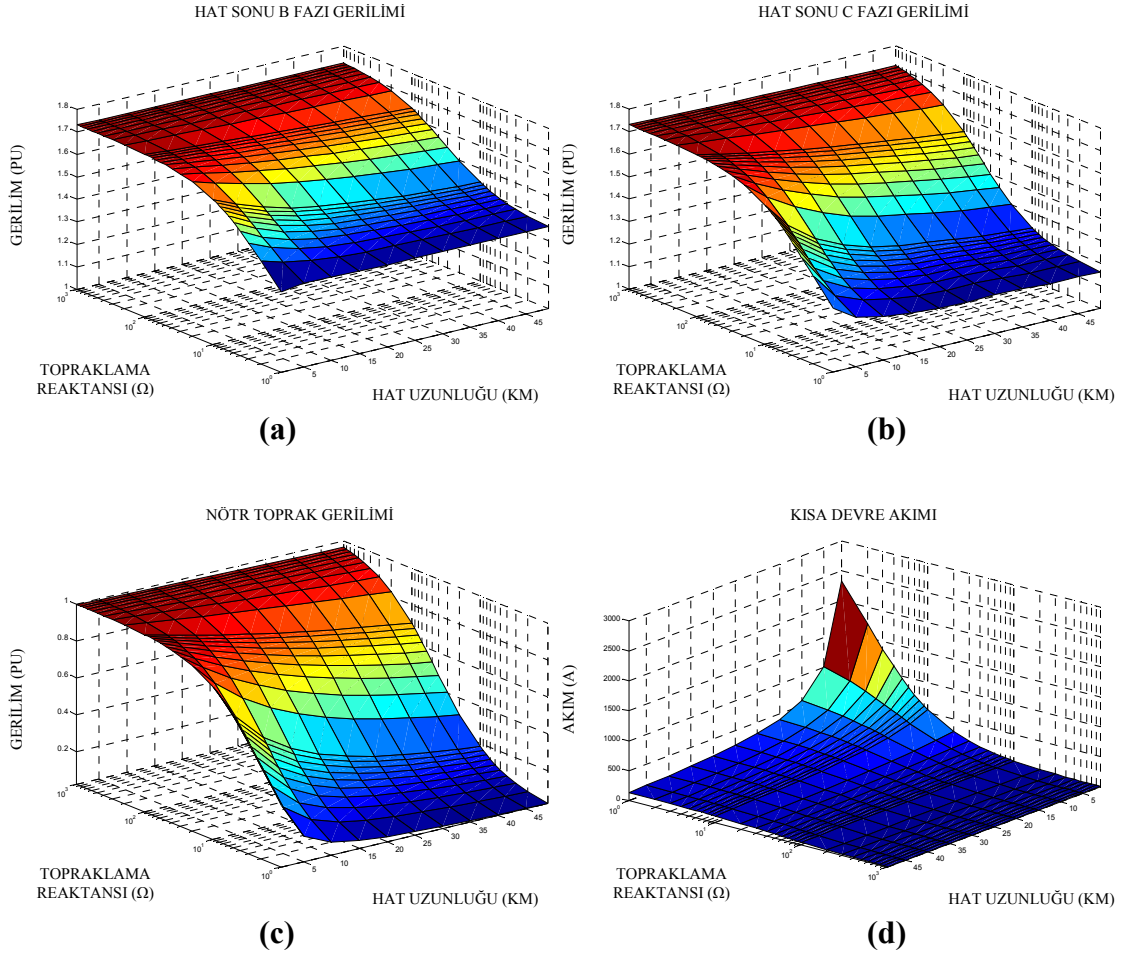
1000 Ω'luk direnç üzerinden topraklı 1km uzunluğundaki hatta kısa devre akımının maksimum değeri 20.45 A ($3.22 I_K$) iken hat uzunluğu 50 km'ye

çıkartıldığında kısa devre akımının maksimum değeri 24.10 A ($3.67 I_K$)'e çıkmaktadır. Yüksek değerli direnç üzerinden topraklanmış şebekelerde oluşan geçiciliklerin yüksek genlikli olması kısa devre akımının, efektif değerine oranla 1.41 katından fazla ölçülmesine neden olmaktadır.

1 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede 1km uzunluğundaki hattın sonunda B fazı geriliminin maksimum değerinin 10.13 kV (1.12 pu) ve C fazı geriliminin maksimum değerinin 13.09 kV (1.45 pu) olduğu Şekil 6.8 (a)(b)'den görülmektedir. 1 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede 50 km uzunluğundaki hattın sonunda B fazı geriliminin maksimum değeri 12.12 kV (1.34 pu) ve C fazı geriliminin maksimum değeri 13.76 kV (1.53 pu) ölçülmektedir. Nötr toprak gerilimi ise 1 km uzunluğundaki hat için 4.11 kV (0.45 pu), 50 km uzunluğundaki hat için 206 V (0.02 pu) değerlerini almaktadır. 1 Ω 'luk direnç değeri için B ve C fazı gerilimlerinin değişimleri Şekil 6.6 ile benzer yapıdadır.

1000 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede C fazı geriliminin maksimum değeri hat uzunluğu ne olursa olsun 18.40 kV (2.04 pu)'a ulaşmaktadır. B fazı geriliminin maksimum değeri ise 1 km'lık hat sonunda 17.04 kV (1.89 pu)'dan 50 km'lık hat sonunda 15.44 kV (1.71 pu) değerine düşmektedir. Benzer şekilde nötr toprak geriliminin maksimum değeri de 5 km'lık hat sonunda 14.50 kV (1.61 pu)'dan 50 km'lık hat sonunda 12.54 kV (1.39 pu) değerine düşmektedir. 1000 Ω 'luk direnç değeri için faz ve nötr gerilimlerinin değişimleri Şekil 6.3 ile benzer yapıdadır.

Reaktans üzerinden topraklı şebekede sürekli tek faz toprak kısa devresi altında elde edilen hat uzunluğuna ve topraklama reaktansına bağlı kısa devre akımı, nötr toprak ve sağlıklı fazların gerilimlerinin değişimi Şekil 6.9'de verilmiştir.



Şekil 6.9. Yıldız noktası reaktans üzerinden topraklanmış şebekede (a) B fazı gerilimi; (b) C fazı gerilimi; (c) nötr toprak gerilimi; (d) kısa devre akımının topraklama reaktansı ve hat uzunluğuna bağlı değişimi.

Kısa devre akımının, hat uzunluğuna ve topraklama reaktansına bağlı değişimi Şekil 6.9 (d)'den incelendiğinde, en büyük değeri 2330 A ile 1Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı 1 km uzunluğundaki hatta oluştuğu görülmektedir. Topraklama reaktansı 1Ω iken hat uzunluğu 50 km'ye çıkartıldığında kısa devre akımı 136 A'e düşmektedir.

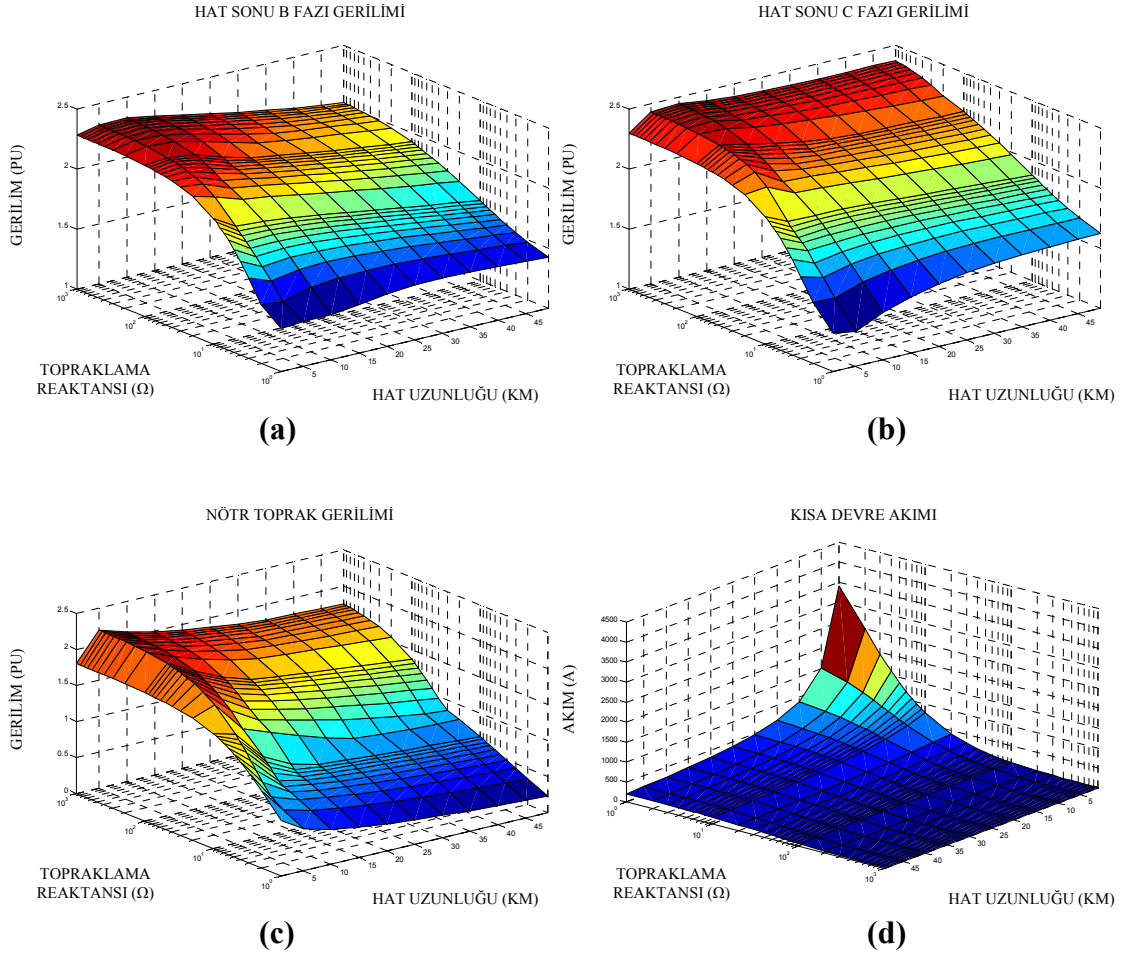
1000Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı 1 km uzunluğundaki hatta kısa devre akımı 6.32 A iken hat uzunluğu 50 km'ye çıkartıldığında kısa devre akımı 5.08 A'e düşmektedir. Topraklama reaktansının 1000Ω olduğu koşulda ise 1 km'den 50 km'ye kadar her uzunluktaki iletim hattın için kısa devre akımı 7 A'in altına düşmektedir.

Şekil 6.9 (a)(b)(c) incelendiğinde, 1Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede 1 km uzunluğundaki hattın sonunda B fazı geriliminin 8.60 kV (1.35 pu) ve

C fazı geriliminin 8.14 kV (1.28 pu) olduğu görülmektedir. 1 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede hat uzunluğu 50 km'ye çıkartıldığında B fazı gerilimi 8.66 kV (1.36 pu)'a çıkarken C fazı gerilimi 7.38 kV (1.16 pu)'a düşmektedir. Nötr toprak gerilimi ise 1 km hat için 2.26 kV (0.35 pu), 50 km hat için 135 V (0.02 pu) değerlerini almaktadır. 1 Ω 'luk reaktans değeri için B ve C fazı gerilimlerinin değişimleri Şekil 6.5 ile benzer yapıdadır.

1000 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede C fazı gerilimi 1 km'lik hat sonunda 10.98 kV (1.73 pu)'dan 50 km'lik hat sonunda 10.86 kV (1.71 pu) değerine düşmektedir. B fazı gerilimi ise 1 km'lik hat sonunda 10.99 kV (1.73 pu)'dan 50km'lik hat sonunda 10.94 kV (1.72 pu) değerine düşmektedir. Benzer şekilde nötr toprak gerilimi de 1 km'lik hat sonunda 6.34 kV (1 pu)'dan 50 km'lik hat sonunda 6.12 kV (0.96 pu) değerine düşmektedir. Bunun nedeni hat uzunluğu ile birlikte artan hat kapasitesinin neden olduğu kısa devre akımının artışı ve meydana getirdiği gerilim düşümüdür. 1000 Ω 'luk reaktans değeri için faz ve nötr gerilimlerinin değişimleri Şekil 6.2 ile benzer yapıdadır.

Reaktans üzerinden topraklı şebekede sürekli tek faz toprak kısa devresi altında elde edilen hat uzunluğuna ve topraklama reaktansına bağlı kısa devre akımı, nötr toprak ve sağlıklı fazların gerilimlerinin maksimum değerlerinin değişimi Şekil 6.10'de verilmiştir.



Şekil 6.10 Yıldız noktası reaktans üzerinden topraklanmış şebekede (a) B fazı gerilimi; (b) C fazı gerilimi; (c) nötr toprak gerilimi; (d) kısa devre akımı maksimum değerinin topraklama reaktansı ve hat uzunluğuna bağlı değişimi.

Şekil 6.10 (a)(b)(c) incelendiğinde 1 Ω'luk reaktans üzerinden topraklı 1 km uzunluğundaki hattın sonunda meydana gelen tek faz toprak kısa devresi akımının maksimum değerinin 3406 A ($1.46 I_K$) olduğu görülmektedir. Hat uzunluğu 50 km'ye çıkartıldığında kısa devre akımının maksimum değeri 204 A ($1.50 I_K$)'e düşmektedir. Düşük değerli reaktans üzerinde topraklanmış şebekelerde kısa devre akımının maksimum değerinin, efektif değerinin 1.41 katından fazla olduğu görülmektedir. Salınımlar yüksek genlikli olmadığı için fark azdır.

1000 Ω'luk reaktans üzerinden topraklı 1 km uzunluğundaki hatta kısa devre akımının maksimum değeri 20.06 A ($3.17 I_K$) iken hat uzunluğu 50 km'ye çıkartıldığında kısa devre akımının maksimum değeri 23.60 A ($4.64 I_K$)'e çıkmaktadır. Yüksek değerli reaktans üzerinden topraklanmış şebekelerde oluşan

geçiciliklerin yüksek genlikli olması kısa devre akımının, efektif değerine oranla 1.41 katından fazla ölçülmesine neden olmaktadır.

1 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede 1 km uzunluğundaki hattın sonunda B fazı geriliminin maksimum değerinin 12.18 kV (1.35 pu) ve C fazı geriliminin maksimum değerinin 11.85 kV (1.32 pu) olduğu Şekil 6.10 (a)(b)'den görülmektedir. 1 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede 50 km uzunluğundaki hattın sonunda B fazı geriliminin maksimum değeri 12.79 kV (1.42 pu) ve C fazı geriliminin maksimum değeri 14.58 kV (1.62 pu) ölçülmektedir. Nötr toprak gerilimi ise 1 km hat için 6.94 kV (0.77 pu), 50 km hat için 2.08 kV (0.23 pu) değerlerini almaktadır. 1 Ω 'luk reaktans değeri için B ve C fazı gerilimlerinin değişimleri Şekil 6.6 ile benzer yapıdadır.

1000 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede C fazı geriliminin maksimum değeri 1 km'lık hat sonunda 20.63 kV (2.29 pu)'dan 50 km'lık hat sonunda 21.32 kV (2.37 pu) değerine çıkmaktadır. B fazı geriliminin maksimum değeri ise 1 km'lık hat sonunda 20.49 kV (2.28 pu)'dan 50 km'lık hat sonunda 18.19 kV (2.02 pu) değerine düşmektedir. Benzer şekilde nötr toprak geriliminin maksimum değeri ise 5km'lık hat sonunda 19.70 kV (2.19 pu)'dan 50 km'lık hat sonunda 15.74 kV (1.75 pu) değerine düşmektedir. 1000 Ω 'luk reaktans değeri için faz ve nötr gerilimlerinin değişimleri Şekil 6.3 ile benzer yapıdadır.

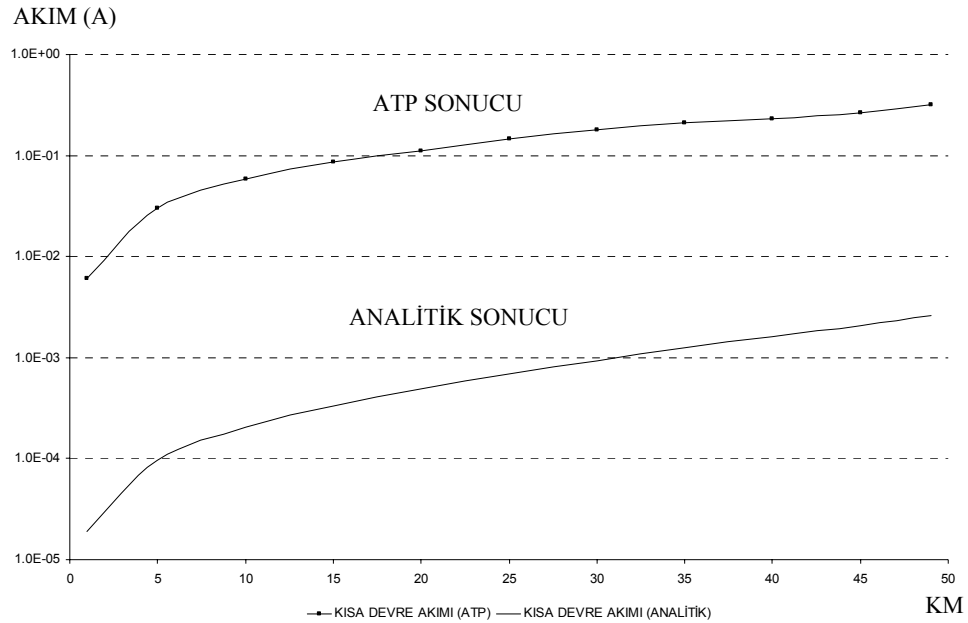
6.5. Toprak teması kompanze edilmiş şebeke

Toprak teması kompanze edilmiş şebekede, hat uzunluğunun artması sonucunda hat parametreleri mesafeye bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle her hat uzunluğu için yeni bir Peterson bobini değeri hesaplanmıştır. Analizlerde kullanılan mesafeye bağlı Peterson Bobini değerleri Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1. Mesafeye bağı Peterson Bobini değerleri

Mesafe (KM)	Peterson Bobini Analitik (Ω)	Peterson Bobini ATP (Ω)
1	265067	344864
5	53013	67117
10	26507	33018
15	17671	21677
20	13253	16102
25	10603	12865
30	8836	10845
35	7573	9246
40	6627	8035
45	5890	7133
49	5301	6866

Toprak teması kompanze edilmiş şebekede kısa devre akımını hat uzunluğuna bağı değişimi Şekil 6.11’de verilmiştir: ATP ile yapılan analizler sonucunda kısa devre akımı 1km’lik hat için 0.006 A, 50 km’lik hat için ise 0.319 A olarak ölçülmüştür. Analitik metodlar ile yapılan analizler sonucunda ise kısa devre akımı 1 km’lik hat için $1.89E-5$ A’e, 50 km’lik hat için ise $2.6E-3$ A’e kadar düşürülmüştür. Kısa devre akımının maksimum değeri oluşan salınımlı geçiciliklere bağı olarak 17-24 A aralığındadır.



Şekil 6.11. Toprak teması kompanze edilmiş şebekede kısa devre akımının hat uzunluğuna bağı değişimi

ATP ile yapılan analizlerde kısa devre akımı analitik çözüm sonuçlarına oranla çok büyüktür. Bunun nedeni ATP hat parametreleri rutininin, hattın şönt

kondüktansını da hesaba kattığı, farklı bir model kullanmasıdır. Peterson Bobini değerleri yıldız noktası yalıtılmış şebekede belirlenen kısa devre akımı değerlerinden yararlanılarak elde edilmiştir.

Faz ve nötr gerilimlerinin değişimi Şekil 6.2 ile benzer yapıdadır. Faz gerilimleri beklendiği gibi; şebeke faz faz gerilimi olan 11 kV'a ve nötr toprak gerilimi ise şebeke faz nötr gerilimi olan 6.35 kV'a çıktığı görülmüştür. ATP ile analitik çözüm sonuçları birbirini desteklemektedir.

6.6. Sonuç

Yıldız noktası yalıtılmış şebekede hat uzunluğunun artması kısa devre akımının artmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte kısa devre sonrasında şebeke faz faz gerilimi değerine ulaşan sağlıklı fazların ve şebeke faz nötr gerilimi değerine ulaşan nötr toprak geriliminin sürekli hal değerleri de artmaktadır. Ancak artış oranı 50km için %0.5'den daha azdır. Salınlı geçiciliklerin genliklerine bakıldığında hat uzunluğu arttıkça salınım genliklerinin azaldığı görülmüştür. Hat uzunluğunun artması sonucu kısa devre akımının artması yıldız noktası yalıtılmış şebekenin önemli sınırlayıcılarından biridir. Kısa devre akımının herhangi bir arki tutuşturmaya yetecek eşik değerine ulaşmasının engellenmesi için hat uzunluğunun fazla olmaması gerekmektedir.

Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklı şebekede hat uzunluğunun artması yüksek genlikli kısa devre akımının azalmasına neden olmaktadır. Sağlıklı fazların sürekli hal ve geçici hal gerilimlerinde de maksimum %30 olmak üzere artış gözlenmiştir.

Yıldız noktası empedans üzerinden topraklı şebekede mesafe artışı tüm gerilim ve akımlarda, topraklama empedansının değerine bağlı olarak, farklı oranlarda artışa neden olmuştur.

Toprak teması kompanze edilmiş şebeke özel bir durumdur. Kısa devre akımı mesafe ile artmaktadır. Nötr toprak ve sağlıklı fazlardaki gerilim değişimi ise yıldız noktası yalıtılmış şebekede olduğu gibidir.

Yapılan analizler sonucunda şebekede meydana gelecek kısa devre sonrasında görülecek geçici hal ve sürekli hal gerilimlerinin genliklerinin şebeke topraklama empedansı değerine ve hat uzunluğuna göre farklılık gösterdiği görülmüştür.

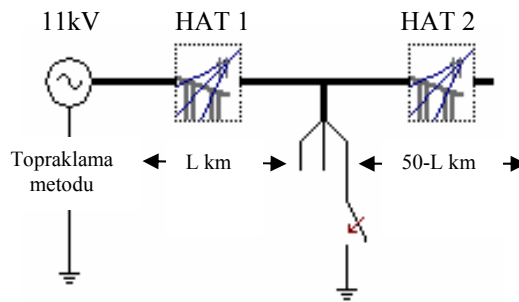
7. KISA DEVRE YERİNİN DEĞİŞİMİ VE NÖTR BAĞLANTI ŞEKLİNE GÖRE AŞIRI GERİLİMLERİN ANALİZİ

7.1. Giriş

Tek faz toprak kısa devresine maruz kalan şebekede görülen aşırı gerilimlerin, topraklama metodları ve hat uzunluğuna bağlı değişimi bölüm 5 ve 6’te sunulmuştur. Bu bölümde topraklama empedansı ve kısa devre olayının meydana geldiği yerin değişiminin kısa devre büyüklükleri üzerindeki etkisi incelenecektir. Sonuçların daha önceki çalışmalar ile kıyaslanabilmesi için hat uzunluğu 50 km seçilmiştir.

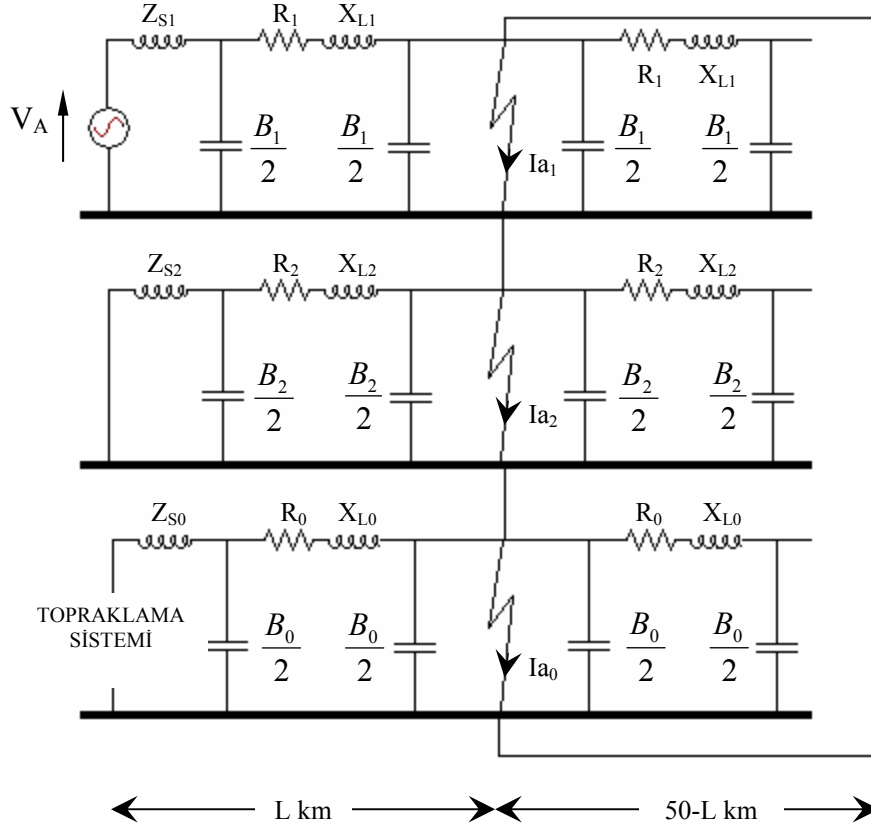
7.2. Test şebekesi

Yeni test şebekesinin yapısı genel olarak EK-A’da detayları verilen şebeke ile aynıdır. Fark hat uzunluğunun 50 km’ye çıkartılmış olmasıdır. Hat uzunluğu sabit olduğu için iletim hattının empedansı ve kapasitansı sabittir. Analiz yapılacak yeni test şebekesinin tek hat diyagramı Şekil 7.1’de ve simetrik bileşenler eşdeğer devresi ise Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.1. Test şebekesi tek hat diyagramı.

Tek hat diyagramı incelendiğinde 2 ayrı iletim hattı olduğu dikkati çekecektir. Sabit uzunluktaki hatta kısa devre yerinin hareket ettirilebilmesi için hat 2 parçaya bölünmüştür. Kısa devre yerinin her değişimde iki hattın toplamı 50 km olacak şekilde hat uzunluklarında gerekli ayarlama yapılmaktadır.

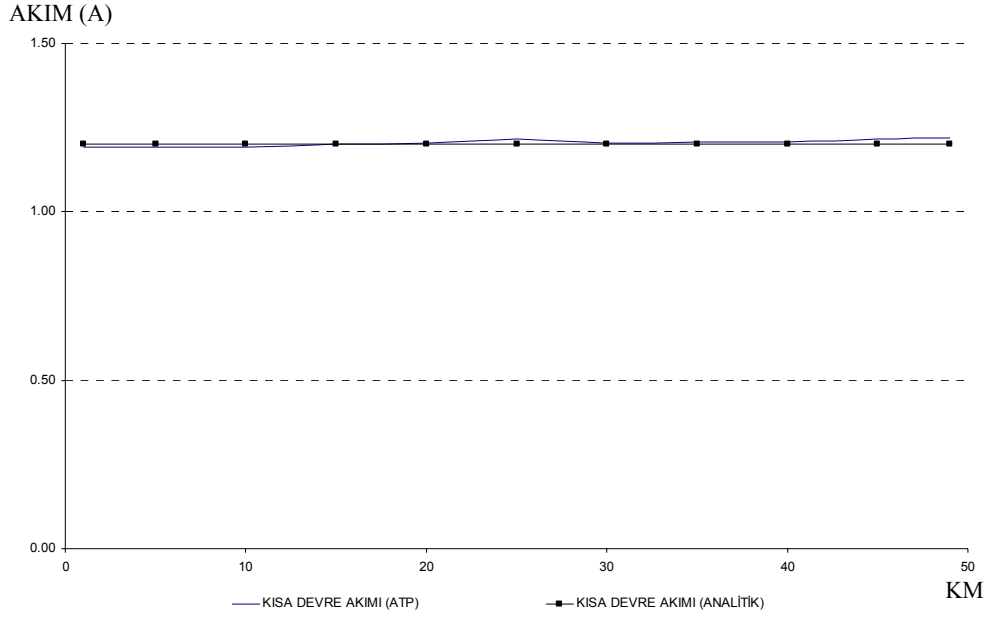


Şekil 7.2. Test şebekesi simetrik bileşenler eşdeğer devresi.

Aynı mantık Şekil 7.2’da verilen simetrik bileşenler eşdeğer devresinde de kendini göstermektedir. π eşdeğer devre parametreleri farklı uzunluklardaki iki hat için ayrı ayrı hesaplanmaktadır.

7.3. Yıldız noktası yalıtılmış şebeke

Yıldız noktası yalıtılmış şebekede kısa devre olayının meydana geldiği yerin değişiminin kısa devre akımına olan etkisi Şekil 7.3’de verilmiştir. ATP ile yapılan analizlerde 1. km’de meydana gelen kısa devre sonucunda toprağa akan kısa devre akımı 1.19 A iken 49. km’de meydana gelen kısa devre sonucunda toprağa akan kısa devre akımı 1.22 A olduğu görülmüştür. Analitik olarak yapılan analizlerin sonuçları ATP sonuçlarını doğrulamaktadır.



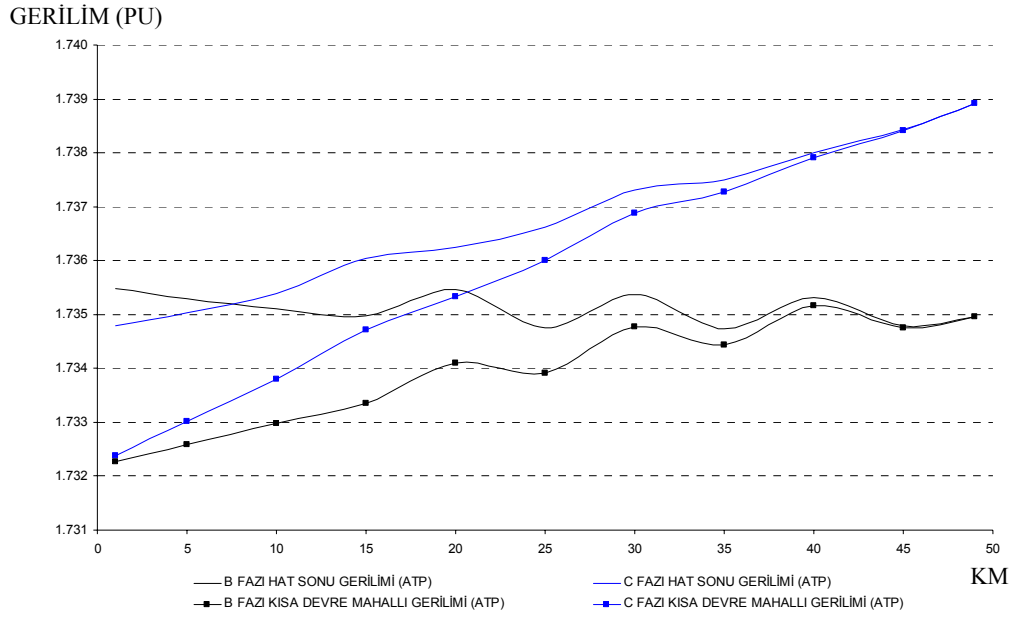
Şekil 7.3. Yıldız noktası yalıtılmış şebekede kısa devre akımının hat uzunluğuna bağlı değişimi.

Kısa devre akımının maksimum değerleri ise kısa devre olayının meydana geldiği yerin değişimine bağlı olarak 34.78 A - 34.81 A aralığında ölçülmüştür. Sürekli hal ve geçici hal sonuçlarındaki değişimin küçük olmasına dayanılarak yıldız noktası yalıtılmış şebekede kısa devre yerinin değişiminin kısa devre akımını etkilemediği söylenebilir.

Sürekli tek faz toprak kısa devresi altında sağlıklı fazların faz nötr gerilimleri şebeke faz faz gerilimi olan 11 kV'a, nötr toprak gerilimi ise şebeke faz nötr gerilimi olan 6.35 kV'a çıkmaktadır. Faz ve nötr gerilimlerinin değişimi Bölüm 6 Şekil 6.2 ile benzer yapıdadır. Nötr toprak gerilimi 1. km'de meydana gelen kısa devre sonucunda 6.351 kV (1 pu)'dan 49. km'de meydana gelen kısa devre sonucunda 6.389 kV (1 pu)'a çıkmıştır.

ATP ile yapılan analizler sonucunda 1. km'de meydana gelen kısa devrede olay mahallinde B fazı gerilimi 10.99 kV (1.73 pu), C fazı gerilimi 11.00 kV (1.73 pu) ve hat sonunda B fazı gerilimi 11.02 kV (1.73 pu), C fazı gerilimi 11.01 kV (1.73 pu) olarak ölçülmüştür. 49. km'de meydana gelen kısa devrede olay mahallinde B fazı gerilimi 11.01 kV (1.73 pu), C fazı gerilimi 11.04 kV (1.73 pu) ve hat sonunda B fazı gerilimi 11.01 kV (1.73 pu), C fazı gerilimi 11.04 kV (1.73 pu) olarak ölçülmüştür. Analitik olarak yapılan analizler ATP sonuçlarını doğrulamaktadır. Kısa devre

mahalli ve hat sonu gerilimlerinin kısa devre yerine bağlı değişimi Şekil 7.4’de verilmiştir.



Şekil 7.4. Kısır devre mahalli ve hat sonu gerilimlerinin kısır devre yerine bağılı değışimi.

Şekil 7.4 incelendiğinde kısır devre mahallindeki gerilimler ile hat sonu gerilimleri arasındaki farkın kısır devrenin hat sonuna kayması ile birlikte ortadan kaybolduğı görölmektedir. Bunun nedeni kısır devre mahalli ile hat sonu arasındaki iletim hattı üzerindeki gerilim düşümünün, hattın kısalmasına bağılı olarak azalmasıdır.

Gerilimlerdeki maksimum değerler incelendiğinde genliklerin hat sonu B fazı için 22.93 kV (2.53 pu)’a, hat sonu C fazı için 25.09 kV (2.79 pu)’a ve nötr toprak gerilimi için 17.89 kV (1.99 pu)’a çıktığı ölçölmüştür. Kısır devre mahalli gerilimlerinin genlikleri benzer değerlerdedir.

7.4. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebeke

Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede sürekli tek faz toprak kısır devresi altında elde edilen kısır devre akımının kısır devre yerine bağılı değışimi Bölüm 6 Şekil 6.4 ile benzer yapıdadır. Faz ve nötr gerilimlerinin kısır devre yerine bağılı değışimi Bölüm 6 Şekil 6.5 ile benzer yapıdadır.

Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebeke, 1. km’de kısa devre edildiğinde kaynak düşük bir empedans üzerinden kısa devre edilmiş gibi davranır ve yüksek genlikli kısa devre akımı şebekeden akar. 1. km’de meydana gelen kısa devrede akan akım ATP ile 3565 A, analitik metodlar ile 3410 A hesaplanmıştır. Kısa devre akımının genliği, kısa devre mahallinin kaynaktan uzaklaşması ile birlikte azalmaktadır. 49. km’de meydana gelen kısa devrede akan akım ATP ile 139 A, analitik metodlar ile 129 A hesaplanmıştır.

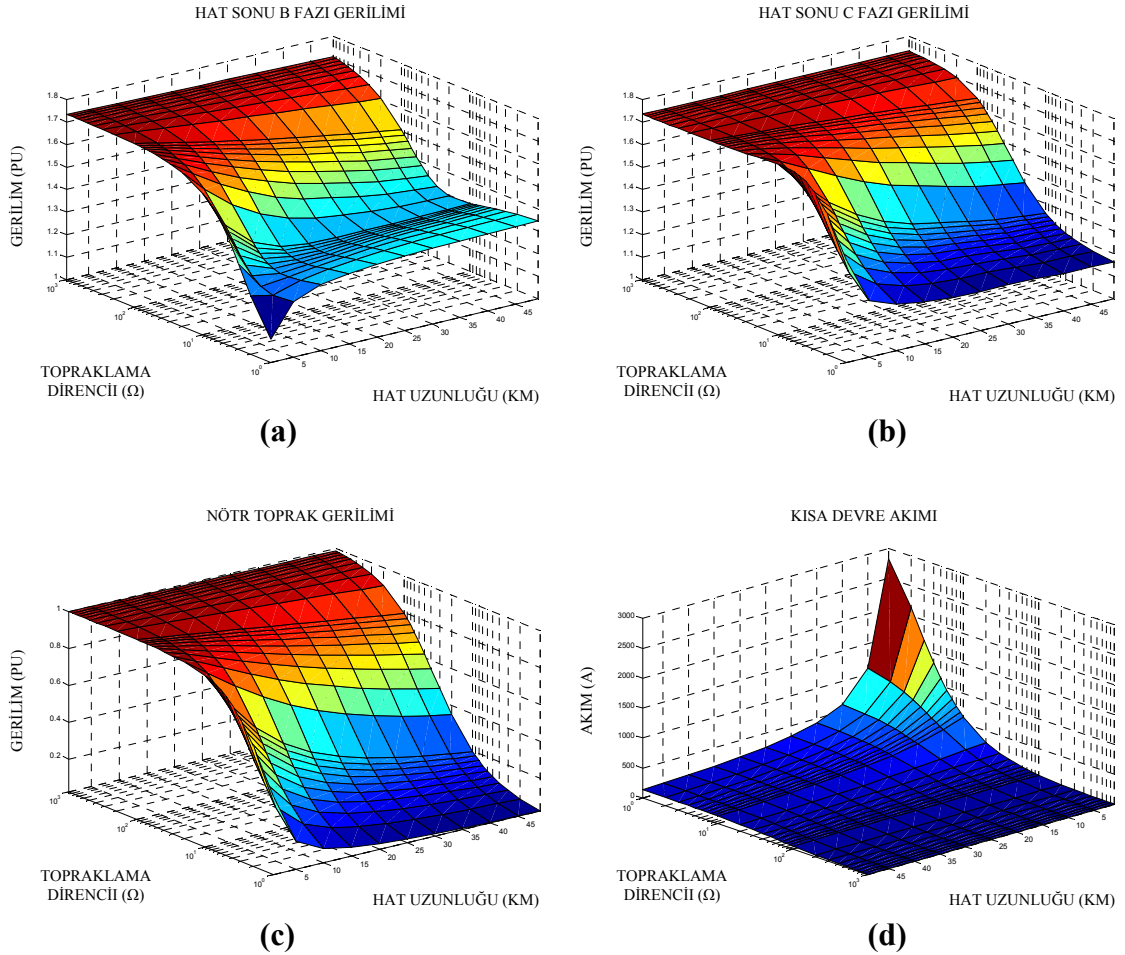
Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede kısa devre akımının maksimum değerleri sürekli hal değerlerinin 1.5 katı kadardır. Kısa devre akımı 1 km’lik hat sonunda 5297 A ($1.44 I_K$), 49 km’lik hat sonunda ise 208 A ($1.49 I_K$) olarak ölçülmüştür.

Tek faz toprak kısa devresine maruz kalan yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebekede faz gerilimlerinin kısa devre mahallinin kaynaktan uzaklaşmasına bağlı olarak arttığı Bölüm 6 Şekil 6.5’den görülmektedir. Ancak bu değişim doğrusal değildir. İki kısımda incelenebilir. Hat uzunluğunun 4 km’nin altında olduğu değerlerde şebeke etkin topraklanmış şebeke olarak çalışmaktadır. Analitik olarak hat mesafesi 0 km’den başlatıldığında gerilimlerin ilk değerleri 6.35 kV olmaktadır. Hat uzunluğu 5 km’nin üzerine çıktığında şebeke yapısı değişmekte ve şebeke düşük değerli reaktans üzerinden topraklı şebeke gibi davranmaktadır. 5. km’de meydana gelen kısa devre sonrasında kısa devre mahalli B fazı gerilimi 8.21 kV (1.29 pu) ve kısa devre mahalli C fazı gerilimi 7.30 kV (1.14 pu), 49. km’de meydana gelen kısa devre sonrasında ise kısa devre mahalli B fazı gerilimi 8.59 kV (1.35 pu) ve kısa devre mahalli C fazı gerilimi 7.32 kV (1.15 pu) değerlerine ulaşmaktadır. Hat sonu gerilimlerinin değişimi, kısa devre mahalli gerilimlerinin değişimi ile aynı yapıdadır. 5. km’de meydana gelen kısa devrede hat sonu gerilimleri ile kısa devre mahalli gerilimleri arasındaki fark 10 V civarındadır. Bu fark hat sonuna doğru azalmakta ve hat sonunda sıfır olmaktadır.

Gerilimlerdeki maksimum değerler incelendiğinde genliklerin hat sonu B fazı için 13.03 kV (1.45 pu)’a ve hat sonu C fazı için 14.56 kV (1.62 pu)’a çıktığı ölçülmüştür. Kısa devre mahalli gerilimlerinin genlikleri benzer değerlerdedir.

7.5. Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebeke

Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebekede, topraklama empedansının direnç ve reaktans olması durumu için ayrı ayrı analiz yapılmıştır. Direnç ve reaktans üzerinden topraklı şebekede toprak empedansının değerinin değişimi ile kısa devre mahallinin kaynağa olan uzaklığının değişimi aynı anda incelenmiştir. Direnç üzerinden topraklı şebekede sürekli tek faz toprak kısa devresi altında elde edilen, topraklama direnci ve kısa devrenin kaynaktan olan uzaklığına bağlı kısa devre akımı, nötr toprak ve sağlıklı fazların gerilimlerinin değişimi Şekil 7.5’de verilmiştir.



Şekil 7.5. Yıldız noktası direnç üzerinden topraklanmış şebekede (a) B fazı gerilimi; (b) C fazı gerilimi; (c) nötr toprak gerilimi; (d) kısa devre akımının topraklama direnci ve kısa devrenin kaynaktan olan uzaklığına bağlı değişimi.

Kısa devre akımının, topraklama direncine ve kısa devrenin kaynaktan olan uzaklığına bağlı değişimi Şekil 6.7 (d)'den incelendiğinde, en büyük değerin 2821 A ile $1\ \Omega$ 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede 1. km'de meydana gelen kısa devrede olduğu görülmektedir. Aslında bu koşul yıldız noktası doğrudan doğruya topraklı şebekede kaynağın kısa devre edilmesi gibi düşünülebilir. Topraklama direnç $1\ \Omega$ iken 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında görülen kısa devre akımı 137 A'e düşmektedir.

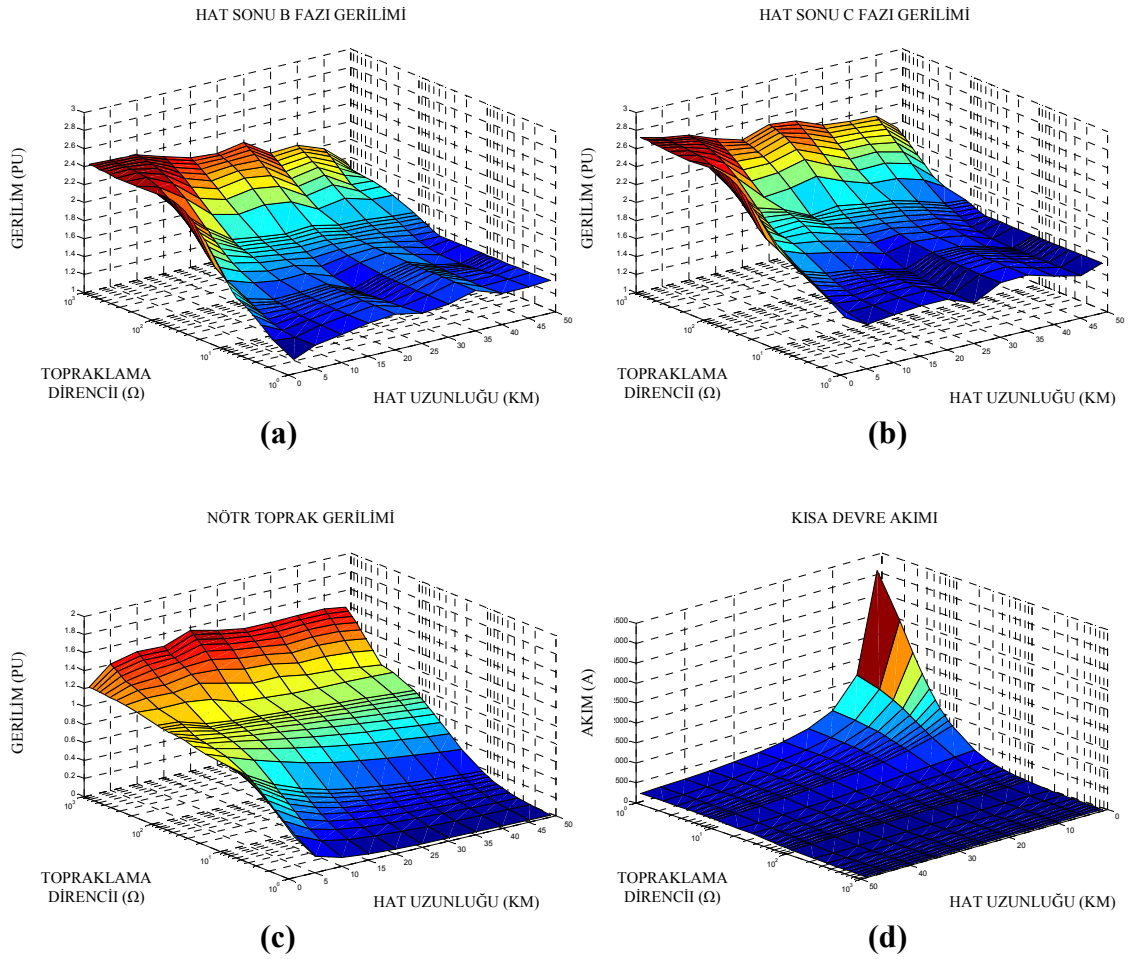
1000 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında görülen kısa devre akımı 6.67 A iken 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında görülen kısa devre akımı 6.57 A'e düşmektedir. Bununla birlikte topraklama direncinin 1000 Ω olduğu koşulda herhangi bir noktada meydana gelen kısa devre için kısa devre akımı 7 A'in altına düşmektedir.

Şekil 6.7 (a)(b)(c) incelendiğinde, beklendiği gibi, direnç değeri 1000 Ω 'a yaklaştıkça şebeke yıldız noktası yalıtılmış şebeke gibi davranmakta, direnç değeri $1\ \Omega$ 'a yaklaştıkça şebeke yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebeke gibi davranmaktadır. Şekil 6.7 (a)(b)'ye dikkat edilirse $1\ \Omega$ direnç değerinde B ve C fazlarının gerilimleri 1 pu'den farklıdır. Bunun nedeni modellenen şebekenin boyutlarından kaynaklanan etkin topraklanmama problemi. $1\ \Omega$ 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında B fazı gerilimi 6.99 kV (1.10 pu) ve C fazı gerilimi 9.21 kV (1.44 pu) değerleri almaktadır. $1\ \Omega$ 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında B fazı gerilimi 8.54 kV (1.34 pu) ve C fazı gerilimi 7.39 kV (1.16 pu) değerleri almaktadır. Nötr toprak gerilimi ise 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 2.82 kV (0.44 pu), 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 138 V (0.02 pu) değerlerini almaktadır. $1\ \Omega$ 'luk direnç değeri için B ve C fazı gerilimlerinin değişimleri Bölüm 6 Şekil 6.5 ile benzer yapıdadır.

1000 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede C fazı gerilimi kısa devre yerinden bağımsız olarak 11 kV (1.73 pu)'a ulaşmaktadır. B fazı gerilimi ise 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 11.01 kV (1.73 pu)'dan 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 10.84 kV (1.70 pu) değerine düşmektedir. Benzer şekilde nötr toprak gerilimi de 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 6.35 kV (1 pu)'dan 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 6.26 kV

(0.98 pu) değerine düşmektedir. 1000Ω 'luk direnç değeri için faz ve nötr gerilimlerinin değişimleri Bölüm 6 Şekil 6.2 ile benzer yapıdadır.

Direnç üzerinden topraklı şebekede sürekli tek faz toprak kısa devresi altında elde edilen, topraklama direnci ve kısa devrenin kaynaktan olan uzaklığına bağlı kısa devre akımı, nötr toprak ve sağlıklı fazların gerilimlerinin maksimum değerlerinin değişimi Şekil 7.6'de verilmiştir.



Şekil 7.6. Yıldız noktası direnç üzerinden topraklanmış şebekede (a) B fazı gerilimi; (b) C fazı gerilimi; (c) nötr toprak gerilimi; (d) kısa devre akımı maksimum değerinin topraklama direnci ve kısa devrenin kaynaktan olan uzaklığına bağlı değişimi.

Şekil 7.6 (d) incelendiğinde 1Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında kısa devre akımının maksimum değerinin 4112 A ($1.45 I_K$) olduğu görülmektedir. 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında kısa devre akımının maksimum değeri ise 205 A ($1.49 I_K$) düşmektedir. Düşük değerli direnç üzerinde topraklanmış şebekelerde kısa devre

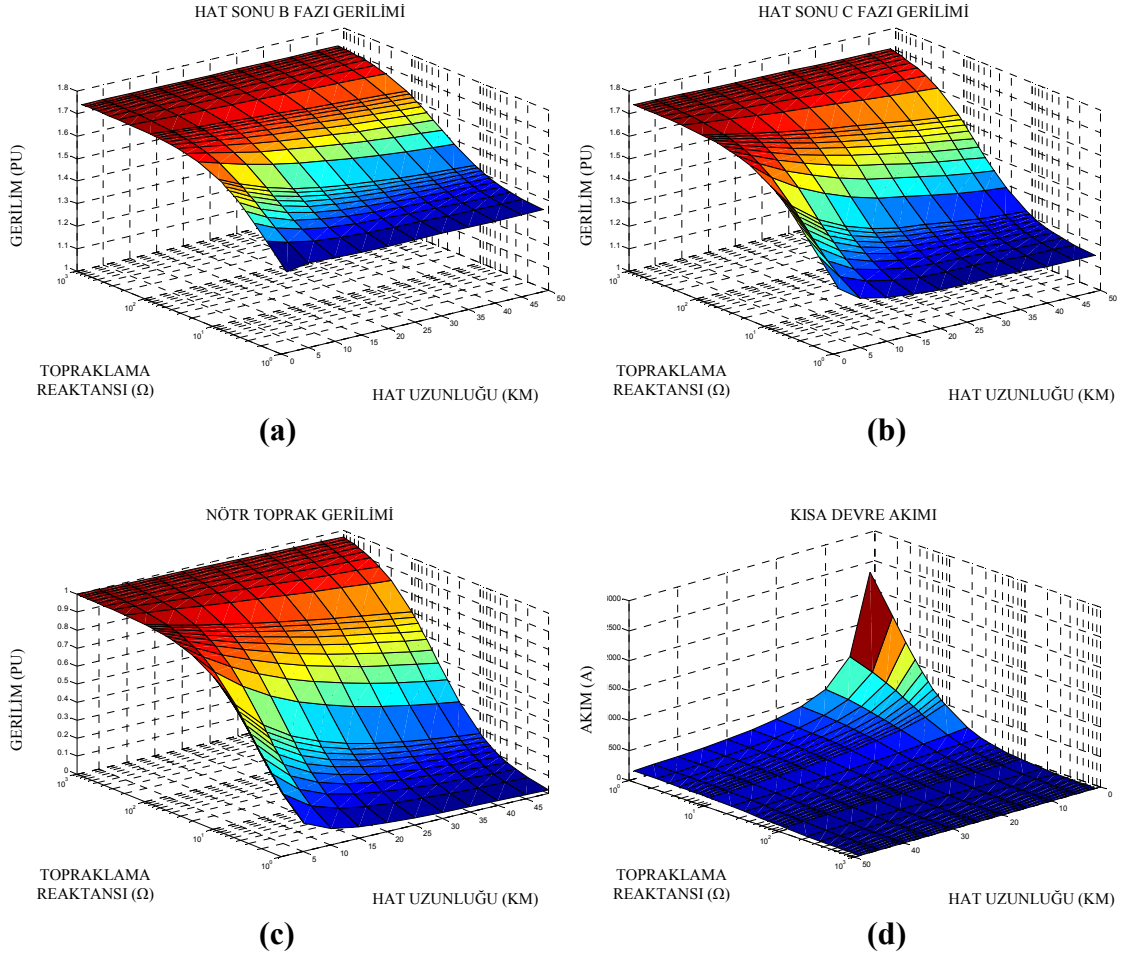
akımının maksimum değerinin, efektif değerinin 1.41 katından fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni maksimum değerlerin kaydedilmesi sırasında sürekli hal değil geçici halin ele alınmasıdır. Bu nedenle salınımlar değerlerin yükselmesine neden olmaktadır. Salınımlar yüksek genlikli olmadığı için fark azdır.

1000 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında kısa devre akımının maksimum değeri 30.30 A (5.44 I_K) iken 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında kısa devre akımının maksimum değeri 34.30 A (5.22 I_K)'e düşmektedir. Yüksek değerli direnç üzerinden topraklanmış şebekelerde oluşan geçiciliklerin yüksek genlikli olması kısa devre akımının, efektif değerine oranla 1.41 katından fazla ölçülmesine neden olmaktadır.

1 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında B fazı geriliminin maksimum değerinin 10.42 kV (1.16 pu) ve C fazı geriliminin maksimum değerinin 14.57 kV (1.62 pu) olduğu Şekil 7.6 (a)(b)'den görülmektedir. 1 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında B fazı geriliminin maksimum değeri 12.26 kV (1.36 pu) ve C fazı geriliminin maksimum değeri 13.97 kV (1.55 pu) ölçülmektedir. Nötr toprak gerilimi ise 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 4.11 kV (0.45 pu), 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 206 V (0.02 pu) değerlerini almaktadır.

1000 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede C fazı geriliminin maksimum değeri 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 24.32 kV (2.70 pu)'dan 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 19.18 kV (2.13 pu) değerine düşmektedir. B fazı geriliminin maksimum değeri ise 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 21.65 kV (2.41 pu)'dan 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 15.85 kV (1.76 pu) değerine düşmektedir. Benzer şekilde nötr toprak geriliminin maksimum değeri de 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 10.76 kV (1.19 pu)'dan 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 12.72 kV (1.41 pu) değerine düşmektedir.

Reaktans üzerinden topraklı şebekede sürekli tek faz toprak kısa devresi altında elde edilen, topraklama reaktansı ve kısa devrenin kaynaktan olan uzaklığına bağlı kısa devre akımı, nötr toprak ve sağlıklı fazların gerilimlerinin değişimi Şekil 7.7'de verilmiştir.



Şekil 7.7. Yıldız noktası reaktans üzerinden topraklanmış şebekede (a) B fazı gerilimi; (b) C fazı gerilimi; (c) nötr toprak gerilimi; (d) kısa devre akımının topraklama reaktansı ve kısa devrenin kaynaktan olan uzaklığına bağlı değişimi.

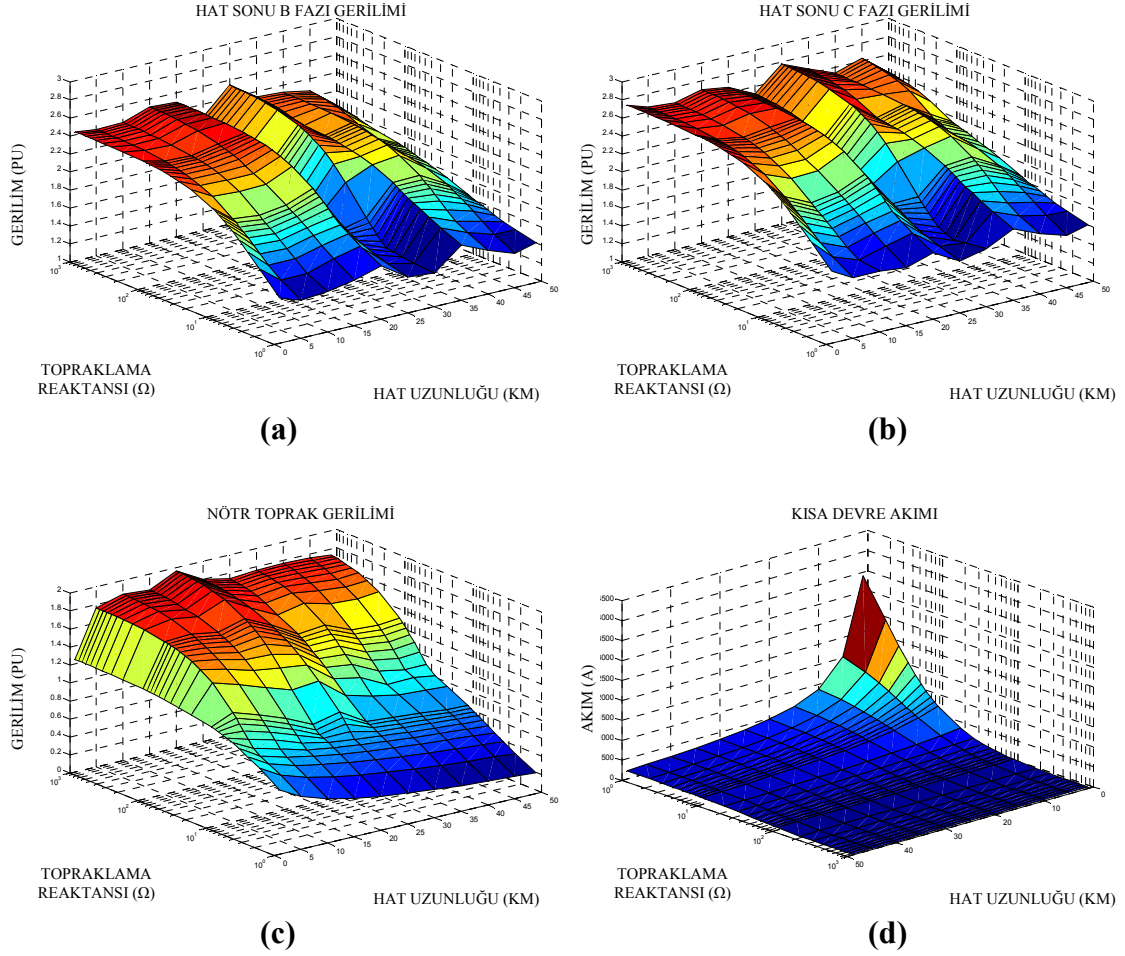
Kısa devre akımının, topraklama direncine ve kısa devrenin kaynaktan olan uzaklığına bağlı değişimi Şekil 7.7 (d)'den incelendiğinde, en büyük değeri 2330 A ile 1 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede 1. km'de meydana gelen kısa devrede olduğu görülmektedir.. Topraklama direnç 1 Ω iken 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında görülen kısa devre akımı 136 A'e düşmektedir.

1000 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında görülen kısa devre akımı 5.18 A iken 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında görülen kısa devre akımı 5.06 A'e düşmektedir. Bununla birlikte topraklama direncinin 1000 Ω olduğu koşulda herhangi bir noktada meydana gelen kısa devre için kısa devre akımı 6 A'in altına düşmektedir.

Şekil 7.7 (a)(b)(c) incelendiğinde, 1 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında B fazı geriliminin 8.62 kV (1.35 pu) ve C fazı geriliminin 8.15 kV (1.28 pu) olduğu görülmektedir. 1 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında B fazı gerilimi 8.66 kV (1.36 pu)'a çıkarken C fazı gerilimi 7.38 kV (1.16 pu)'a düşmektedir. Nötr toprak gerilimi ise 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 2.26 kV (0.35 pu), 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 135 V (0.02 pu) değerlerini almaktadır. 1 Ω 'luk reaktans değeri için B ve C fazı gerilimlerinin değişimleri Bölüm 6 Şekil 6.5 ile benzer yapıdadır.

1000 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede C fazı gerilimi 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 11.01 kV (1.73 pu)'dan 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 10.86 kV (1.71 pu) değerine düşmektedir. B fazı gerilimi ise 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 11.01 kV (1.73 pu)'dan 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 10.95 kV (1.72 pu) değerine düşmektedir. Benzer şekilde nötr toprak gerilimi de 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 6.34 kV (1 pu)'dan 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 6.12 kV (0.96 pu) değerine düşmektedir. 1000 Ω 'luk reaktans değeri için faz ve nötr gerilimlerinin değişimleri Bölüm 6 Şekil 6.2 ile benzer yapıdadır.

Reaktans üzerinden topraklı şebekede sürekli tek faz toprak kısa devresi altında elde edilen, topraklama reaktansı ve kısa devrenin kaynaktan olan uzaklığına bağlı kısa devre akımı, nötr toprak ve sağlıklı fazların gerilimlerinin maksimum değerlerinin değişimi Şekil 7.8'de verilmiştir.



Şekil 7.8. Yıldız noktası reaktans üzerinden topraklanmış şebekede (a) B fazı gerilimi; (b) C fazı gerilimi; (c) nötr toprak gerilimi; (d) kısa devre akımı maksimum değerinin reaktans değeri ve kısa devrenin kaynaktan olan uzaklığına bağlı değişimi.

Şekil 7.8 (d) incelendiğinde 1Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında kısa devre akımının maksimum değerinin 3405 A ($1.46 I_K$) olduğu görülmektedir. 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında kısa devre akımının maksimum değeri ise 204 A ($1.50 I_K$) düşmektedir. Düşük değerli reaktans üzerinde topraklanmış şebekelerde kısa devre akımının maksimum değerinin, efektif değerinin 1.41 katından fazla olduğu görülmektedir. Salınımlar yüksek genlikli olmadığı için fark azdır.

1000Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında kısa devre akımının maksimum değeri 35.62 A ($6.87 I_K$) iken 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında kısa devre akımının maksimum değeri 34.81 A ($6.87 I_K$)'e çıkmaktadır. Yüksek değerli reaktans üzerinden

topraklanmış şebekelerde oluşan geçiciliklerin yüksek genlikli olması kısa devre akımının, efektif değerine oranla 1.41 katından fazla ölçülmesine neden olmaktadır.

1 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında B fazı geriliminin maksimum değerinin 13.49 kV (1.50 pu) ve C fazı geriliminin maksimum değerinin 16.15 kV (1.79 pu) olduğu Şekil 7.8 (a)(b)'den görülmektedir. 1 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında B fazı geriliminin maksimum değeri 12.92 kV (1.44 pu) ve C fazı geriliminin maksimum değeri 14.76 kV (1.64 pu) ölçülmektedir. Nötr toprak gerilimi ise 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 6.42 kV (0.71 pu), 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 2.08 kV (0.23 pu) değerlerini almaktadır.

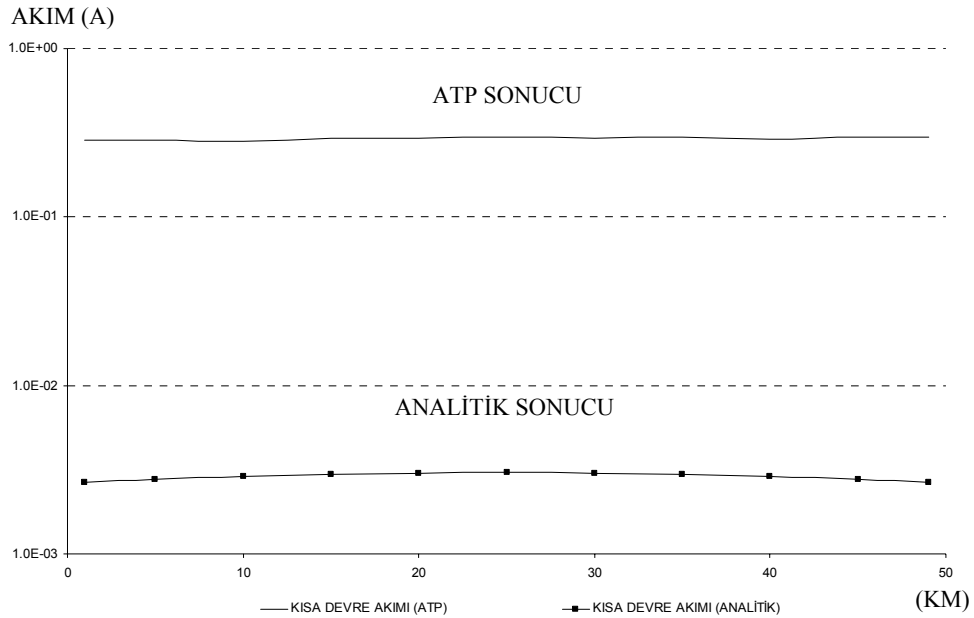
1000 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede C fazı geriliminin maksimum değeri 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 24.52 kV (2.73 pu)'dan 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 21.98 kV (2.44 pu) değerine düşmektedir. B fazı geriliminin maksimum değeri ise 1. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 21.85 kV (2.43 pu)'dan 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 18.69 kV (2.08 pu) değerine çıkmaktadır. Benzer şekilde nötr toprak geriliminin maksimum değeri ise 5. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 11.19 kV (1.24 pu)'dan 49. km'de meydana gelen kısa devre sonrasında 15.56 kV (1.73 pu) değerine çıkmaktadır.

7.6. Toprak teması kompanze edilmiş şebeke

Toprak teması kompanze edilmiş şebekede, hat uzunluğunu sabit olduğu için tek bir Peterson bobini değeri kullanılmaktadır. ATP'de kullanılan Peterson Bobini değeri 6417 Ω , analitik hesaplarda kullanılan Peterson bobini değeri ise 5301 Ω olarak hesaplanmıştır.

Yapılan analizler sonucunda toprak teması kompanze edilmiş şebekede kısa devre olayının meydana geldiği yerin değişiminin kısa devre akımına olan etkisi Şekil 7.9'da verilmiştir: ATP ile yapılan analizler sonucunda kısa devre akımı 1. km'de meydana gelen kısa devre için 0.29 A, 49. km'de meydana gelen kısa devre için ise 0.30 A olarak ölçülmüştür. Analitik metodlar ile yapılan analizler sonucunda

ise kısa devre akımı 1. km’de meydana gelen kısa devre için $2.66E-3$ A’e, 49. km’de meydana gelen kısa devre için ise $2.65E-3$ A’e kadar düşürülmüştür. Değişim her iki bobin değeri içinde doğrusal değildir. Kısa devrenin hattın ortasına yaklaşması ile birlikte kısa devre akımının değeri artmaktadır. En yüksek kısa devre akımı 25 km ile iletim hattının ortasında gözlenmektedir. Kısa devre akımı analitik olarak $3.03E-3$ A hesaplanmıştır. ATP sonucu da benzer yapıdadır. Kısa devre akımının maksimum değerleri ise kısa devre yerinin değişimine bağlı olarak 34.78 A-34.81 A aralığında ölçülmüştür. Sonuçlardaki değişimin küçük olmasına dayanılarak toprak teması kompanze edilmiş şebekede kısa devre yerinin değişiminin kısa devre akımını etkilemediği söylenebilir.



Şekil 7.9. Toprak teması kompanze edilmiş şebekede kısa devre akımının hat uzunluğuna bağlı değişimi.

ATP ile yapılan analizlerde kısa devre akımı analitik çözüm sonuçlarına oranla çok büyüktür. Bunun nedeni ATP hat parametreleri rutininin, hattın şönt kondüktansını da hesaba kattığı, farklı bir model kullanmasıdır. ATP’de kullanılan Peterson Bobini değeri yıldız noktası yalıtılmış şebekede belirlenen kısa devre akımı kullanılarak elde edilmiştir.

Faz ve nötr gerilimlerinin değişimi Bölüm 6 Şekil 6.2 ile benzer yapıdadır. Faz gerilimleri beklendiği gibi; şebeke faz faz gerilimi olan 11 kV’a ve nötr toprak geriliminin şebeke faz nötr gerilimi olan 6.35 kV’a çıktığı görülmüştür. ATP ile analitik çözüm sonuçları birbirini desteklemektedir.

7.7. Sonuç

Yıldız noktası yalıtılmış şebekede kısa devre akımı kısa devre yerinin değişiminden etkilenmemektedir. Nötr toprak ve sağlıklı fazların gerilimleri sürekli halde kısa devre yerinin değişiminden etkilenmemektedir. Ancak geçici haldeki değişim çok yüksektir.

Yıldız noktası direk topraklı şebekede kısa devre akımı kısa devre kaynaktan uzaklaştıkça azalmaktadır. Sağlıklı faz gerilimleri sürekli halde kısa devre yerinin değişiminden çok az etkilenmektedir.

Yıldız noktası empedans üzerinden topraklı şebekede kısa devre yerinin değişimi nötr ve sağlıklı fazların gerilimlerinin farklı oranlarda değişmesine neden olmaktadır.

Toprak teması kompanze edilmiş şebekede de kısa devre akımı yıldız noktası yalıtılmış şebekede olduğu gibi kısa devre yerinin değişiminden etkilenmemektedir. Sağlıklı fazların gerilimlerindeki değişim yok denecek kadar azdır.

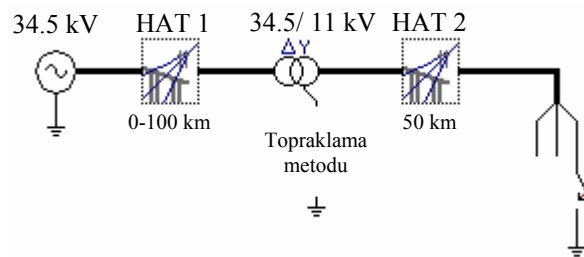
8. KISA DEVRE GÜCÜ VE NÖTR BAĞLANTI ŞEKLİNE GÖRE AŞIRI GERİLİMLERİN ANALİZİ

8.1. Giriş

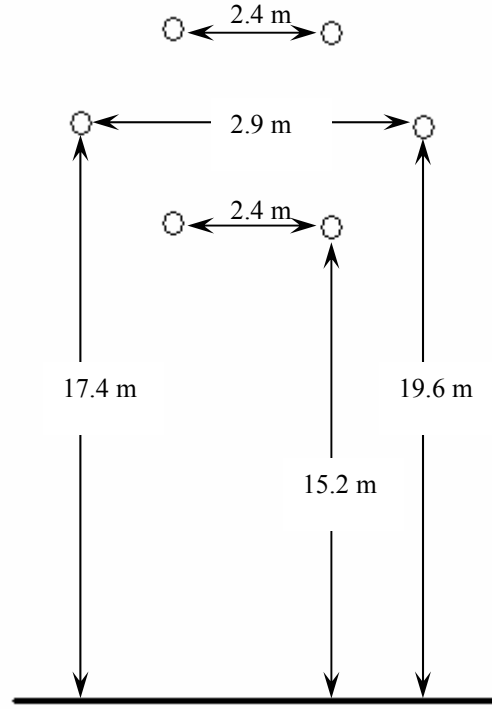
Tek faz toprak kısa devresine maruz kalan şebekede görülen aşırı gerilimlerin, topraklama metodları, hat uzunluğu ve kısa devrenin kaynaktan olan uzaklığına bağlı değişimi bölüm 5, 6 ve 7’de sunulmuştur. Bu bölümde kısa devre büyüklüklerinin topraklama metodu değişken transformatör üzerinden farklı gerilim seviyesine yayılması incelenecektir. Bu yayılma sırasında transformatörün primer tarafındaki kısa devre gücü değişkendir. Kısa devre gücünün değişken oluşu primer taraftaki hattın uzunluğunun değişimi ile sağlanmaktadır.

8.2. Test şebekesi

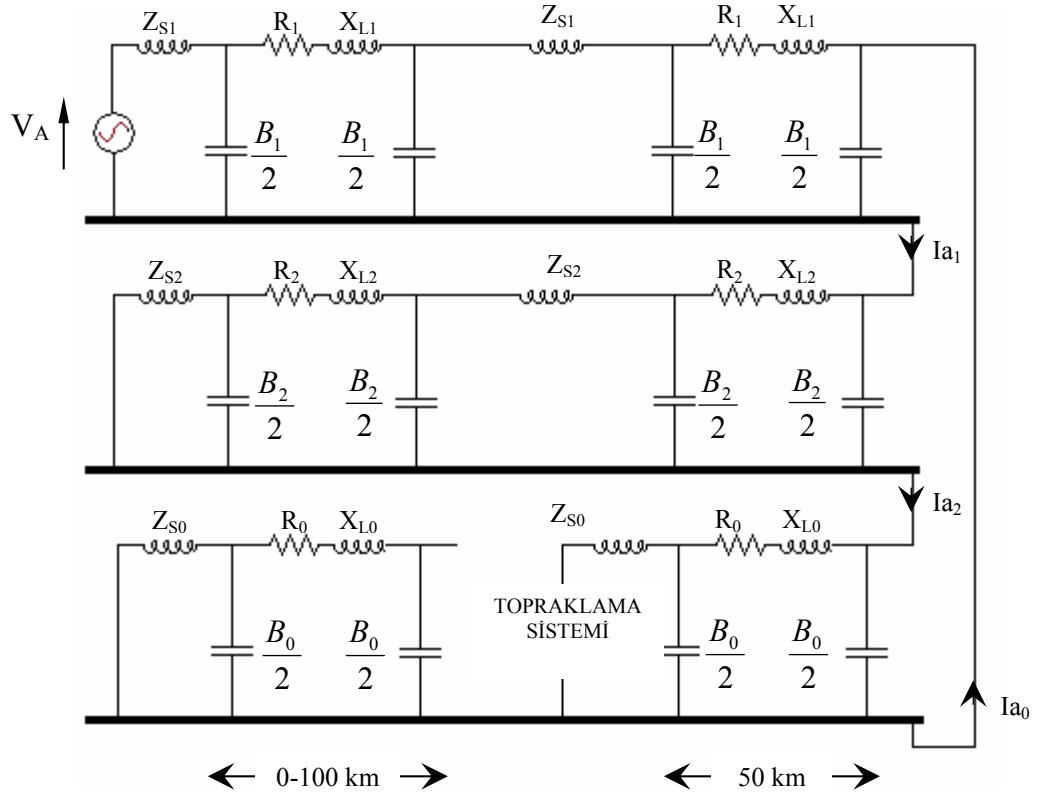
Yeni test şebekesinin tek hat diyagramı Şekil 7.1’de verilmiştir. 11 kV tarafındaki hat, direk yapısı EK-A Şekil A-1’de verilen, uzunluğu 50 km olan hattır. 34.5 kV tarafındaki hat, direk yapısı Şekil 8.2’de verilen, uzunluğu 1-100 km arasında değişken hattır. Kullanılan transformatör 14 MVA gücünde üçgen yıldız (DY₁₁) bağlı bir transformatördür. Analiz yapılacak test şebekesinin tek hat simetrik bileşenler eşdeğer devresi ise Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 8.1. Test şebekesi tek hat diyagramı.



Şekil 8.2. 34.5 kV'luk iletim hattı iletken konfigürasyonu.



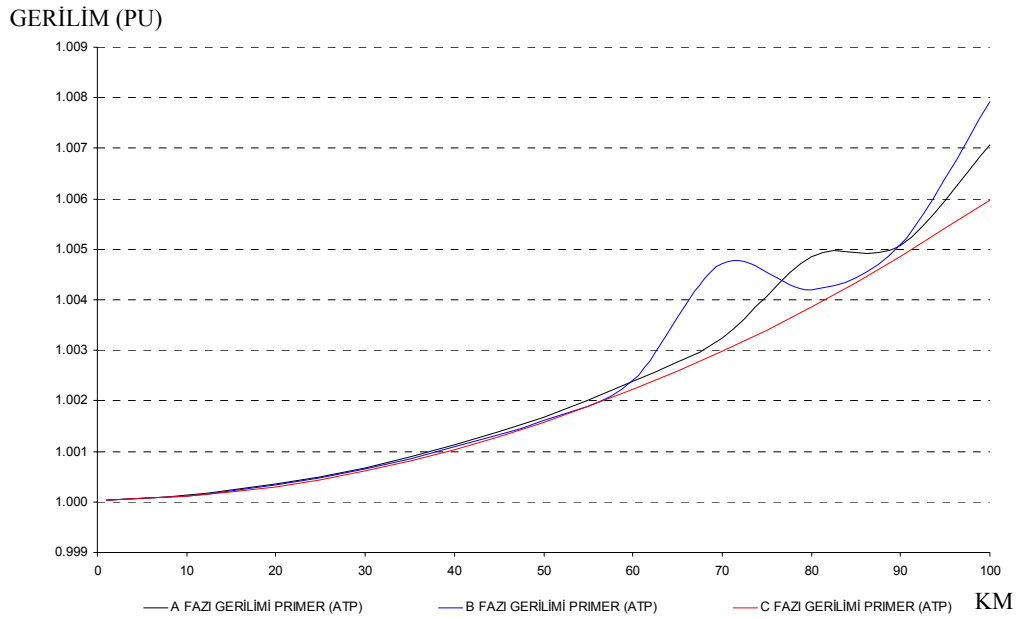
Şekil 8.3. Test şebekesi simetrik bileşenler eşdeğer devresi.

8.3. Yıldız noktası yalıtılmış şebeke

Yıldız noktası yalıtılmış transformatör üzerinden beslenen şebekede meydana gelen kısa devrede, transformatörün primerinde bulunan hattın boyunun uzaması ile birlikte hat kapasitesin artmasına bağlı olarak kısa devre akımı 1.22 A'den 1.43 A'e çıkmaktadır.

Alçak gerilim tarafında kısa devre olayının meydana geldiği A fazının hat sonu gerilimi kısa devreden dolayı 0 V'tur. A fazının transformatör sekonderindeki gerilimi, transformatörün primerinde bulunan kaynağın empedansının artmasına bağlı olarak, 53 V'dan 108 V'a çıkmaktadır. B fazı sekonder gerilimi hat sonunda ve transformatör sekonderinde 11.01 kV iken transformatörün primerinde bulunan kaynağın empedansının artmasına bağlı olarak, hat sonunda ve transformatör sekonderinde 11.12 kV'a yükselmiştir. Benzer şekilde C fazı sekonder gerilimi hat sonunda ve transformatör sekonderinde 11.05 kV iken transformatörün primerindeki hat boyunun artması dolayısıyla hat kapasitesinin artmasına bağlı olarak, hat sonunda ve transformatör sekonderinde 11.15 kV'a yükselmiştir.

Yüksek gerilim tarafında transformatör primerinde ölçülen faz gerilimlerinin kaynak empedansının artmasına bağlı olarak değişimi Şekil 8.4'de verilmiştir.



Şekil 8.4. Transformatör primerindeki gerilimlerin hat uzunluğuna bağlı değişimi.

Yüksek gerilim tarafında tüm fazların gerilimleri, kaynak empedansının en küçük değerine karşılık gelen 1 km'lik hat üzerinden beslenen şebekede, 19.91 kV'tur. Kaynak empedansının en yüksek değerine karşılık gelen 100 km'lik hat üzerinden beslen şebekede faz gerilimleri A, B ve C fazları için sırasıyla 20.05 kV, 20.07 kV ve 20.03 kV değerlerini almaktadır.

Sonuçlar göstermektedir ki transformatör sekonderinden kısa devre olan A fazında gerilim düşmesi gözlenirken (Nominal gerilimin %10'nunun altına düştüğü için kesilme olarak tanımlanabilir) B ve C fazlarında gerilim şişmesi gözlenmektedir. Bu olayların transformatör üzerinden bir üst gerilim seviyesine aktarılmasında, kaynak empedansının en küçük değerine karşılık gelen 1 km'lik hat üzerinden beslenen şebekede gerilimler 1 p.u.'tir. Yani bozulmalar hiç aktarılmamıştır. Kaynak empedansının en yüksek değerine karşılık gelen 100 km'lik hat üzerinden beslenen şebekede faz gerilimleri artmaktadır. Yani şebeke zayıfladıkça bir üst şebekede 3 fazlı gerilim şişmesi gözlenmektedir.

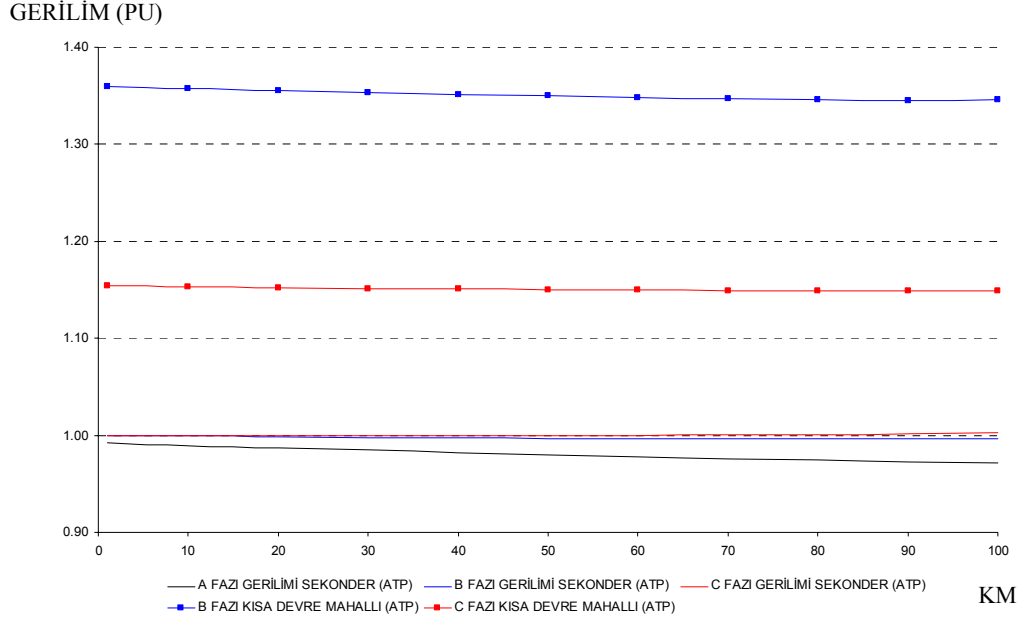
Maksimum değerlerin değişimi benzer yapıdadır. Analitik olarak yapılan analizlerin sonuçları ATP sonuçlarını doğrulamaktadır.

8.4. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış şebeke

Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanmış transformatör üzerinden beslenen şebekede meydana gelen kısa devrede, transformatörün primerinde bulunan kaynağın empedansının artmasına bağlı olarak kısa devre akımı 137 A'den 134 A'e düşmektedir.

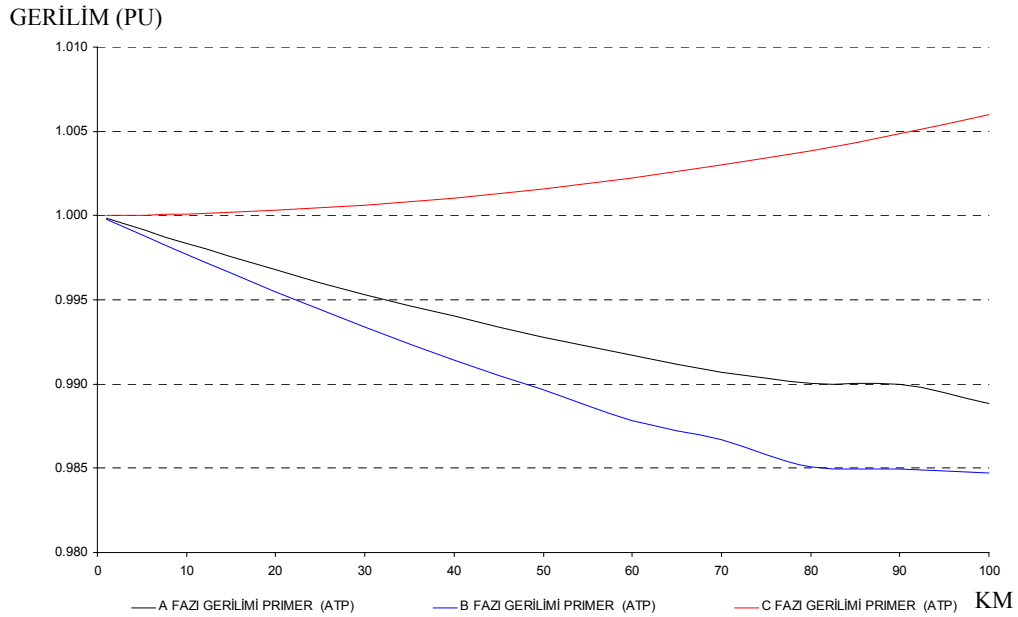
Alçak gerilim tarafında transformatör sekonderinde ve kısa devre mahallinde ölçülen faz gerilimlerinin kaynak empedansı artışına bağlı değişimi Şekil 8.5'te verilmiştir. Kısa devre olayının meydana geldiği A fazının hat sonu gerilimi kısa devreden dolayı 0 V'tur. A fazının transformatör sekonderindeki gerilimi, transformatörün primerinde bulunan kaynağın empedansının artmasına bağlı olarak, 6.30 kV'dan 6.17 kV'a düşmektedir. B fazı gerilimi, 1 km'lik hat üzerinden beslenen şebekede, kısa devre mahallinde 8.63 kV iken transformatör sekonderinde 6.35 kV'a düşmektedir. B fazı gerilimi, 100 km'lik hat üzerinden beslenen şebekede, kısa devre mahallinde 8.54 kV iken transformatör sekonderinde 6.33 kV'a düşmektedir. Benzer

şekilde C fazı gerilimi, 1 km'lik hat üzerinden beslenen şebekede, kısa devre mahallinde 7.33 kV iken transformatör sekonderinde 6.35 kV'a düşmektedir. C fazı gerilimi, 100 km'lik hat üzerinden beslenen şebekede, kısa devre mahallinde 7.29 kV iken transformatör sekonderinde 6.36 kV'a düşmektedir.



Şekil 8.5. Transformatör primerinde ve kısa devre mahallindeki gerilimlerin hat uzunluğuna bağlı değişimi

Yüksek gerilim tarafında transformatör primerinde ölçülen faz gerilimlerinin kaynak empedansının artmasına bağlı olarak değişimi Şekil 8.6'da verilmiştir.



Şekil 8.6. Transformatör primerindeki gerilimlerin hat uzunluğuna bağlı değişimi

Yüksek gerilim tarafında tüm fazların gerilimleri, kaynak empedansının en küçük değerine karşılık gelen 1 km'lik hat üzerinden beslenen şebekede, 19.91 kV'tur. Kaynak empedansının en yüksek değerine karşılık gelen 100 km'lik hat üzerinden beslen şebekede faz gerilimleri A, B ve C fazları için sırasıyla 19.69 kV, 19.61 kV ve 20.03 kV değerlerini almaktadır.

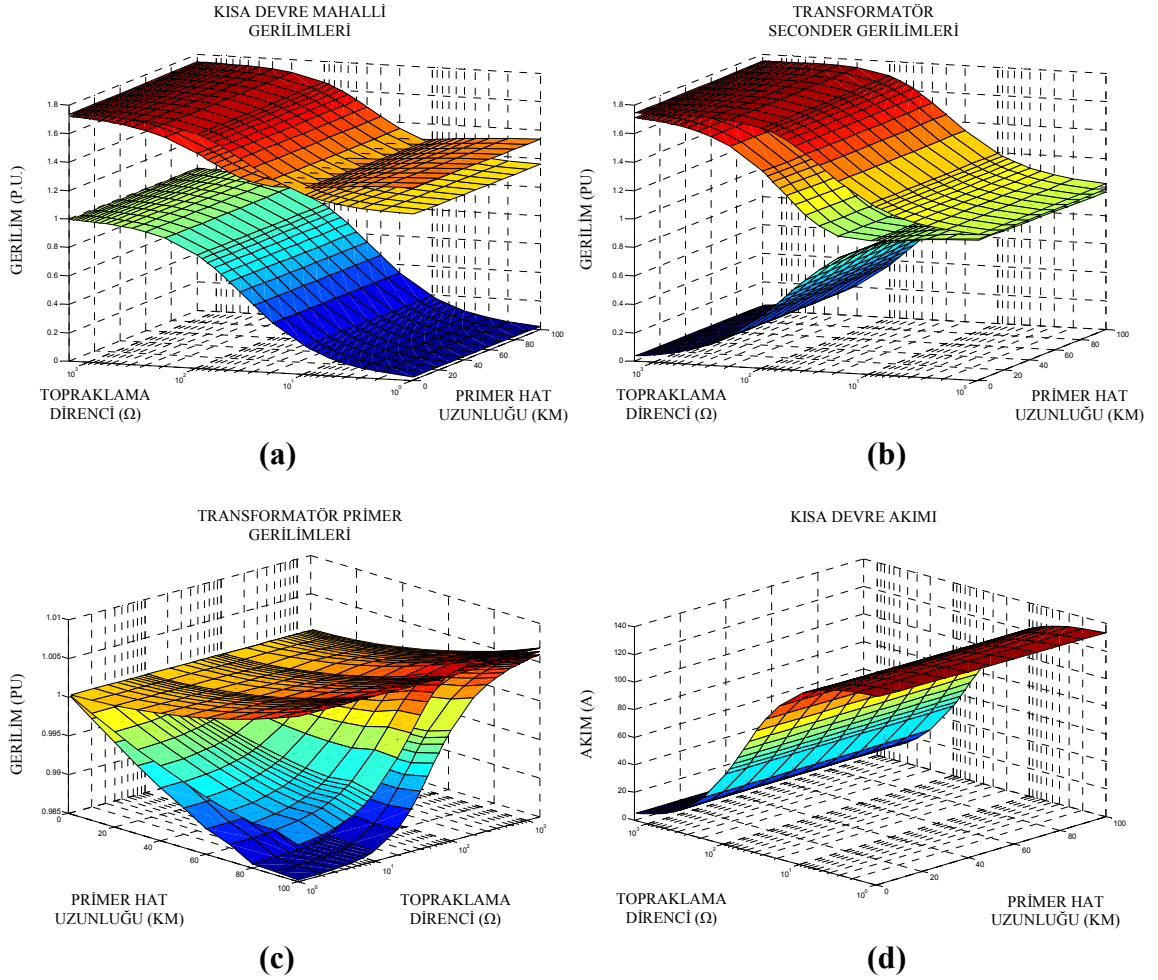
Sonuçlar göstermektedir ki transformatör alçak gerilim tarafında yaşanan kısa devrede alçak gerilim tarafındaki sağlıklı fazların gerilimleri kaynak empedansının büyümesine yani şebekenin zayıflamasına bağlı olarak azalmaktadır. Transformatör sekonderinde sadece A fazında %3'luk gerilim düşmesi gözlenmektedir ki bu değer şebekenin %10 salınım aralığındadır. Bu olayların transformatör üzerinden bir üst gerilim seviyesine aktarılmasında, kaynak empedansının en küçük değerine karşılık gelen 1 km'lik hat üzerinden beslenen şebekede gerilimler 1 pu'tir. Yani bozulmalar hiç aktarılmamıştır. Kaynak empedansının en yüksek değerine karşılık gelen 100 km'lik hat üzerinden beslenen şebekede C fazı artarken A ve B fazları azalmaktadır.

Maksimum değerlerin değişimi benzer yapıdadır. Analitik olarak yapılan analizlerin sonuçları ATP sonuçlarını doğrulamaktadır.

8.5. Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebeke

Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanmış şebekede, topraklama empedansının direnç ve reaktans olması durumu için ayrı ayrı analiz yapılmıştır. Direnç ve reaktans üzerinden topraklı şebekede toprak empedansının değerinin değişimi ile primer hat uzunluğunun değişimi aynı anda incelenmiştir.

Direnç üzerinden topraklı şebekede sürekli tek faz toprak kısa devresi altında elde edilen, topraklama direnci ve primer hat uzunluğuna bağlı kısa devre mahalli, transformatör sekonder ve primer gerilimleri ile kısa devre değişimi Şekil 8.7'de verilmiştir.



Şekil 8.7. Yıldız noktası direnç üzerinden topraklanmış şebekede (a) kısa devre mahalli gerilimleri; (b) transformatör sekonder gerilimleri; (c) transformatör primer gerilimleri; (d) kısa devre akımının topraklama direnci ve primer hat uzunluğuna bağlı değişimi.

Kısa devre akımının, topraklama direncine ve primer hat uzunluğuna bağlı değişimi Şekil 8.7 (d)'den incelendiğinde, 1Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede primer hat uzunluğu 1 km iken 135 A olduğu görülmektedir. Topraklama direnç 1Ω iken primer hat uzunluğu 100 km'ye çıkartıldığında kısa devre akımı 132 A'e düşmektedir. Topraklama direnç 1000Ω iken primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında kısa devre akımı 5.03 A'den 5.06 A'e yükselmektedir.

Şekil 8.7 (a) incelendiğinde, kısa devre mahalli B fazı geriliminin 1Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede primer hat uzunluğu 1 km iken 8.58 kV olduğu ölçülmüştür. Primer hat uzunluğu 100 km'ye çıkartıldığında B fazı gerilimi 8.49 kV'a düşmektedir. Bununla birlikte topraklama direncinin 1000Ω olduğu

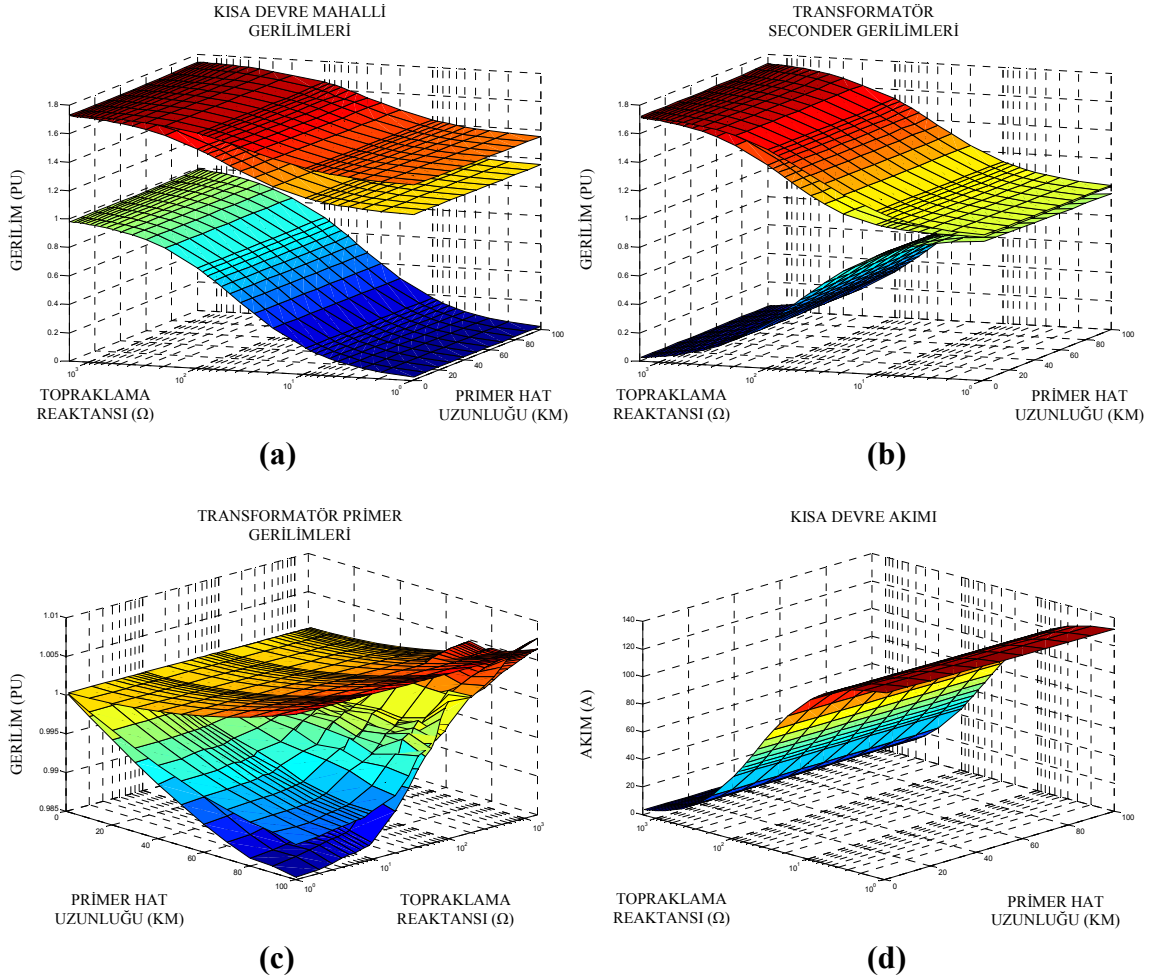
koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında B fazı gerilimi de 10.90 kV'dan 10.96 kV'a çıkmaktadır. Kısa devre mahalli C fazı geriliminin 1 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede primer hat uzunluğu 1 km iken 7.39 kV olduğu ölçülmüştür. Primer hat uzunluğu 100 km'ye çıkartıldığında C fazı gerilimi 7.36 kV'a düşmektedir. Bununla birlikte topraklama direncinin 1000 Ω olduğu koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında C fazı gerilimi de 11.02 kV'dan 11.09 kV'a çıkmaktadır. Kısa devre mahalli nötr toprak geriliminin 1 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede primer hat uzunluğu 1 km iken 136 V olduğu ölçülmüştür. Primer hat uzunluğu 100 km'ye çıkartıldığında nötr toprak geriliminin 100 V'a düştüğü görülmüştür. Bununla birlikte topraklama direncinin 1000 Ω olduğu koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında nötr toprak gerilimi de 6.30 kV'dan 6.34 kV'a çıkmaktadır.

Şekil 8.7 (b) incelendiğinde, transformatör sekonderinde B fazı geriliminin 1 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede primer hat uzunluğu 1 km iken 6.27 kV olduğu ölçülmüştür. Primer hat uzunluğu 100 km'ye çıkartıldığında B fazı gerilimi 6.25 kV'a düşmektedir. Bununla birlikte topraklama direncinin 1000 Ω olduğu koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında B fazı gerilimi de 10.84 kV'dan 10.90 kV'a çıkmaktadır. Transformatör sekonderinde C fazı geriliminin 1 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede primer hat uzunluğu 1 km iken 6.48 kV olduğu ölçülmüştür. Primer hat uzunluğu 100 km'ye çıkartıldığında C fazı gerilimi 6.45 kV'a düşmektedir. Bununla birlikte topraklama direncinin 1000 Ω olduğu koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında C fazı gerilimi de 11.06 kV'dan 11.13 kV'a çıkmaktadır. Transformatör sekonderinde A fazı geriliminin 1 Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede primer hat uzunluğu 1 km iken 6.24 kV olduğu ölçülmüştür. Primer hat uzunluğu 100 km'ye çıkartıldığında nötr toprak geriliminin 6.11 kV'a düştüğü görülmüştür. Bununla birlikte topraklama direncinin 1000 Ω olduğu koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında A fazı gerilimi de 217 V'dan 218 V'a çıkmaktadır.

Şekil 8.7 (c) incelendiğinde, primer hat uzunluğunun 1 km olduğu şebekede transformatör sekonderi topraklama direncinin ne olursa olsun (1-1000 Ω) her üç fazında gerilimi 19.91 kV'ta sabit kalmaktadır. Transformatör sekonderi topraklama direnci 1 Ω iken primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında A fazı gerilimi 19.70 kV'a düşmektedir. Bununla birlikte transformatör sekonderi

topraklama direncinin 1000Ω olduğu koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında A fazı gerilimi 19.70 kV'dan 20.04 kV'a çıkmaktadır. Benzer şekilde transformatör sekonderi topraklama direnci 1Ω iken primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında B fazı gerilimi 19.61 kV'a düşmektedir. Transformatör sekonderi topraklama direncinin 1000Ω olduğu koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında B fazı gerilimi 19.61 kV'dan 20.03 kV'a çıkmaktadır. C fazı geriliminin değişimi A ve B fazı değişimlerinden farklıdır. Transformatör sekonderi topraklama direnci 1Ω iken primer hat uzunluğunun artması ile birlikte A ve B fazlarının gerilimleri azalmaktadır. Topraklama direnci değeri 1000Ω iken primer hat uzunluğunun artması ile birlikte A ve B fazlarının gerilimleri artmaktadır. Farklı bir yaklaşımla primer hat uzunluğunun 100 km olduğu koşulda A ve B fazlarının gerilimleri topraklama direncinin artması ile birlikte artmaktadır. Transformatör sekonderi topraklama direncinin 1000Ω olduğu koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında C fazı gerilimi 20.03 kV'ta sabit kalmaktadır. Herhangi bir topraklama direnci değeri için primer hat uzunluğunun 1 km'den 100 km'ye çıkartılması C fazı geriliminin değerinin 19.91 kV'tan 20.03 kV'a yükseltmektedir.

Reaktans üzerinden topraklı şebekede sürekli tek faz toprak kısa devresi altında elde edilen, topraklama reaktansı ve primer hat uzunluğuna bağlı kısa devre mahalli, transformatör sekonder ve primer gerilimleri ile kısa devre değişimi Şekil 8.8'de verilmiştir.



Şekil 8.8. Yıldız noktası reaktans üzerinden topraklanmış şebekede (a) kısa devre mahalli gerilimleri; (b) transformatör sekonderi gerilimleri; (c) transformatör primer gerilimleri; (d) kısa devre akımının topraklama reaktansı ve primer hat uzunluğuna bağlı değişimi.

Kısa devre akımının, topraklama direncine ve primer hat uzunluğuna bağlı değişimi Şekil 8.8 (d)'den incelendiğinde, 1Ω 'luk direnç üzerinden topraklı şebekede primer hat uzunluğu 1 km iken 134 A olduğu görülmektedir. Topraklama direnç 1Ω iken primer hat uzunluğu 100 km'ye çıkartıldığında kısa devre akımı 131 A'e düşmektedir. Topraklama direnç 1000Ω iken primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında kısa devre akımı 2.58 A'den 2.64 A'e yükselmektedir.

Şekil 8.8 (a) incelendiğinde, kısa devre mahalli B fazı geriliminin 1Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede primer hat uzunluğu 1 km iken 8.69 kV olduğu ölçülmüştür. Primer hat uzunluğu 100 km'ye çıkartıldığında B fazı gerilimi 8.61 kV'a düşmektedir. Bununla birlikte topraklama reaktansının 1000Ω olduğu

koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında B fazı gerilimi de 10.97 kV'dan 11.08 kV'a çıkmaktadır. Kısa devre mahalli C fazı geriliminin 1 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede primer hat uzunluğu 1 km iken 7.38 kV olduğu ölçülmüştür. Primer hat uzunluğu 100 km'ye çıkartıldığında C fazı gerilimi 7.34 kV'a düşmektedir. Bununla birlikte topraklama reaktansının 1000 Ω olduğu koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında C fazı gerilimi de 10.92 kV'dan 11.07 kV'a çıkmaktadır. Kısa devre mahalli nötr toprak geriliminin 1 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede primer hat uzunluğu 1 km iken 134 V olduğu ölçülmüştür. Primer hat uzunluğu 100 km'ye çıkartıldığında nötr toprak geriliminin 100 V'a düştüğü görülmüştür. Bununla birlikte topraklama reaktansının 1000 Ω olduğu koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında nötr toprak gerilimi de 6.21 kV'dan 6.29 kV'a çıkmaktadır.

Şekil 8.8 (b) incelendiğinde, transformatör sekonderinde B fazı geriliminin 1 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede primer hat uzunluğu 1 km iken 6.46 kV olduğu ölçülmüştür. Primer hat uzunluğu 100 km'ye çıkartıldığında B fazı gerilimi 6.43 kV'a düşmektedir. Bununla birlikte topraklama reaktansının 1000 Ω olduğu koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında B fazı gerilimi de 10.90 kV'dan 11.01 kV'a çıkmaktadır. Transformatör sekonderinde C fazı geriliminin 1 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede primer hat uzunluğu 1 km iken 6.36 kV olduğu ölçülmüştür. Primer hat uzunluğu 100 km'ye çıkartıldığında C fazı gerilimi 6.38 kV'a çıkmaktadır. Bununla birlikte topraklama reaktansının 1000 Ω olduğu koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında C fazı gerilimi de 10.85 kV'dan 10.94 kV'a çıkmaktadır. Transformatör sekonderinde A fazı geriliminin 1 Ω 'luk reaktans üzerinden topraklı şebekede primer hat uzunluğu 1 km iken 6.18 kV olduğu ölçülmüştür. Primer hat uzunluğu 100 km'ye çıkartıldığında nötr toprak geriliminin 6.05 kV'a düştüğü görülmüştür. Bununla birlikte topraklama reaktansının 1000 Ω olduğu koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında A fazı gerilimi de 146 V'dan 190 V'a çıkmaktadır.

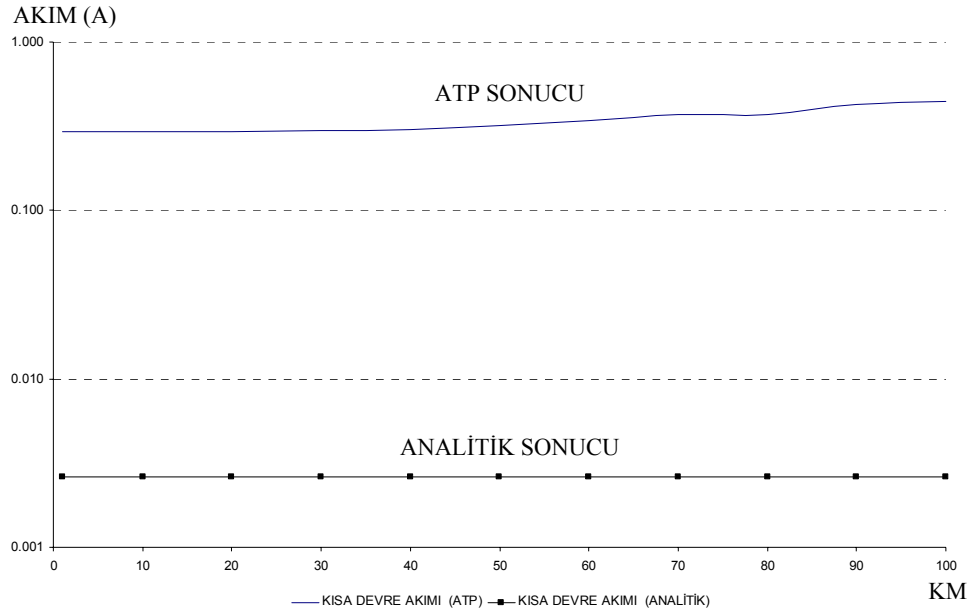
Şekil 8.8 (c) incelendiğinde, primer hat uzunluğunun 1 km olduğu şebekede transformatör sekonderi topraklama direncinin ne olursa olsun (1-1000 Ω) her üç fazında gerilimi 19.91 kV'ta sabit kalmaktadır. Transformatör sekonderi topraklama direnci 1 Ω iken primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında A fazı

gerilimi 19.70 kV'a düşmektedir. Bununla birlikte transformatör sekonderi topraklama direncinin 1000 Ω olduğu koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında A fazı gerilimi 19.70 kV'dan 20.04 kV'a çıkmaktadır. Benzer şekilde transformatör sekonderi topraklama direnci 1 Ω iken primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında B fazı gerilimi 19.61 kV'a düşmektedir. Transformatör sekonderi topraklama direncinin 1000 Ω olduğu koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında B fazı gerilimi 19.61 kV'dan 20.06 kV'a çıkmaktadır. C fazı geriliminin değişimi A ve B fazı değişimlerinden farklıdır. Transformatör sekonderi topraklama direnci 1 Ω iken primer hat uzunluğunun artması ile birlikte A ve B fazlarının gerilimleri azalmaktadır. Topraklama direnci değeri 1000 Ω iken primer hat uzunluğunun artması ile birlikte A ve B fazlarının gerilimleri artmaktadır. Farklı bir yaklaşımla primer hat uzunluğunun 100 km olduğu koşulda A ve B fazlarının gerilimleri topraklama direncinin artması ile birlikte artmaktadır. Transformatör sekonderi topraklama direncinin 1000 Ω olduğu koşulda primer hat uzunluğu 1 km'den 100 km'ye çıkartıldığında C fazı gerilimi 20.03 kV'ta sabit kalmaktadır. Herhangi bir topraklama direnci değeri için primer hat uzunluğunun 1 km'den 100 km'ye çıkartılması C fazı geriliminin değerinin 19.91 kV'tan 20.03 kV'a yükseltmektedir.

8.6. Toprak teması kompanze edilmiş şebeke

Toprak teması kompanze edilmiş şebekede, sekonder hat uzunluğu sabit olduğu için tek bir Peterson Bobini değeri kullanılmaktadır. ATP'de kullanılan Peterson Bobini değeri 6379 Ω , analitik hesaplarda kullanılan Peterson bobini değeri ise 5298 Ω olarak hesaplanmıştır.

Yapılan analizler sonucunda toprak teması kompanze edilmiş şebekede kısa devre olayının meydana geldiği yerin değişiminin kısa devre akımına olan etkisi Şekil 6.11'de verilmiştir. ATP ile yapılan analizler sonucunda kısa devre akımı 1 km'lik hat üzerinden beslenen şebekede 0.30 A iken, 100 km'lik hat üzerinden beslenen şebekede 0.44 A olarak ölçülmüştür. Analitik metodlar ile yapılan analizler sonucunda ise kısa devre akımı her koşulda 2.63E-3 A olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 8.9. Toprak teması kompanze edilmiş şebekede kısa devre akımının hat uzunluğuna bağlı değişimi.

ATP ile yapılan analizlerde kısa devre akımı analitik çözüm sonuçlarına oranla çok büyüktür. Bunun nedeni ATP hat parametreleri rutininin, hattın şönt kondüktansını da hesaba kattığı, farklı bir model kullanmasıdır. Peterson Bobini değerleri yıldız noktası yalıtılmış şebekede belirlenen kısa devre akımı değerlerinden yararlanılarak elde edilmiştir.

Gerilimlerin değişimi yıldız noktası yalıtılmış şebeke ile aynıdır. Alçak gerilim tarafında B ve C fazları kısa devre mahallinde ve transformatör sekonderinde 11 kV'tur. Kısa devre mahalli ile transformatör sekonderi sonuçları arasında 5 V'dan daha az fark vardır. Bu fark kısa devre akımından kaynaklanan gerilim düşümüdür. Yüksek gerilim tarafında da tüm gerilimler yıldız noktası yalıtılmış şebekede olduğu gibi yükselmektedir.

8.7. Sonuç

Analiz sonuçları incelendiğinde tüm topraklama tiplerinde transformatör üzerinden bir üst gerilim seviyesine iletilen bozulmaların, iletildikleri gerilim seviyesinin kısa devre gücünden etkilendikleri görülmüştür. İletim hattının kısa olması ile modellenen kısa devre gücünün yüksek olması durumunda herhangi bir bozulma bir üst gerilim seviyesine aktarılamamıştır. İletim hattının uzun olması ile modellenen kısa devre gücünün düşük olması durumunda alçak gerilim tarafında

görülen bozulmalar bir üst gerilim seviyesine aktarılmıştır. Ancak gerilimlerdeki bozulma şebekenin $\pm\%10$ 'luk tolerans sınırı içinde kalmaktadır.

Primer taraftaki kaynağın kısa devre gücünün değişimi sekonder taraftaki gerilimleri de etkilemektedir. Tüm topraklama tiplerinde kısa devre gücünün artması ile birlikte gerilimlerde çok düşük artışlar gözlenmiştir.

9. SONUÇ

Bu çalışmada güç sistemleri nötr topraklama metodlarının şebekede oluşabilecek kısa süreli gerilim değişimleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Test şebekesi üzerinde yapılan analizler neticesinde topraklama metodlarının kısa süreli gerilim değişimleri üzerinde önemli oranda etkili olduğu görülmüştür. Topraklama metodunun, dolayısıyla topraklama empedansının değişimi ile birlikte kısa devre sonrasında sağlıklı fazların gerilimleri sürekli halde 1-1.73 p.u. arasında sınırlandırılabilir. Sürekli halde topraklama reaktansı aynı değerdeki topraklama direncine göre kısa devre sonrası görülen aşırı gerilim ve akımları daha iyi sınırlamaktadır. Bununla birlikte görülen salınımlı geçiciliklerin genlikleri reaktans üzerinden topraklı şebekede, direnç üzerinden topraklı şebekeye oranla, zaman sabitindeki değişime bağlı olarak, yüksektir. Toprak teması kompanze edilmiş şebekeler reaktans üzerinden topraklı şebekenin özel bir durumudur ve bu tip sistemlerde kısa devre sonrası görülen akım yıldız noktası yalıtılmış şebekeden daha düşüktür.

Hat uzunluğunun artması yıldız noktası yalıtılmış şebekede kısa devre akımının artmasına neden olmaktadır. Hat uzunluğunun gerilimlerdeki değişime etkisi yok denecek kadar azdır. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklı şebekede kısa devre akımı hat uzunluğunun artması ile azalmaktadır. Sağlıklı faz gerilimleri sürekli halde hat uzunluğunun artmasından etkilenmemektedir. Ancak geçici hal gerilimleri hat uzunluğunun artışından etkilenmektedir. Yıldız noktası empedans üzerinden topraklı şebekelerde hat uzunluğunun artması sağlıklı fazların gerilimlerinin farklı oranlarda artmasına, kısa devre akımının ise azalmasına neden olmaktadır. Toprak teması kompanze edilmiş şebekede de kısa devre akımı yıldız noktası yalıtılmış şebekede olduğu gibi hat uzunluğu ile birlikte artmaktadır. Sağlıklı fazların gerilimlerindeki değişim yok denecek kadar azdır.

Yıldız noktası yalıtılmış şebekede kısa devre akımı, nötr toprak ve sağlıklı fazların gerilimleri sürekli halde kısa devre yerinin değişimden etkilenmemektedir. Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklı şebekede kısa devre akımı kısa devre kaynaktan uzaklaştıkça azalmaktadır. Sağlıklı faz gerilimleri sürekli halde kısa devre

yerinin değişiminden çok az etkilenmektedir. Yıldız noktası empedans üzerinden topraklı şebekelerde kısa devre yerinin değişimi sağlıklı fazların gerilimlerinin farklı oranlarda artmasına, kısa devre akımının ise azalmasına neden olmaktadır. Toprak teması kompanze edilmiş şebekede de kısa devre akımı yıldız noktası yalıtılmış şebekede olduğu gibi kısa devre yerinin değişiminden etkilenmemektedir. Sağlıklı fazların gerilimlerindeki değişim yok denecek kadar azdır.

Transformatör üzerinden bir üst gerilim seviyesine iletilen bozulmalar tüm topraklama tipleri için kısa devre gücünden etkilenmektedirler. Kısa devre gücünün yüksek olması durumunda herhangi bir bozulma bir üst gerilim seviyesine aktarılamamaktadır. Kısa devre gücünün düşük olması durumunda ise alçak gerilim tarafında görülen bozulmalar bir üst gerilim seviyesine aktarılmıştır. Ancak aktarılan bozulma şebekenin $\pm\%10$ 'luk tolerans sınırı içinde kalmaktadır. Kısa devre gücünün değişimi sekonder taraftaki gerilimleri de etkilemektedir. Tüm topraklama tiplerinde kısa devre gücünün artması ile birlikte gerilimlerde çok düşük artışlar gözlenmiştir.

Analizlerde tek faz toprak kısa devresi süreklidir. Bu nedenle kısa süreli gerilim değişimlerinin zamana bağlı değişimi incelenmemiş, sadece gerilimin genliğindeki değişim incelenmiştir. Devre kesicilerinin devreye girme süresi ve tekrar kapama yapması durumu, zamana bağlı değişimin incelenmesi konusunda dikkate alınması gereken bir noktadır.

Analizlerde ark modeli kullanılmamıştır. Standartlar, süreden bağımsız olarak, gerilim şişmesi genliği açısından incelendiğinde 1.8 pu'e kadar izin vermektedir. Yapılan çalışmalarda arkın etkisi dikkate alınmadığı için yıldız noktası yalıtılmış şebekenin güç kalitesi standartları bakımından kullanılabilir bir şebeke olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak şebekelerin büyümesi ile birlikte bu tip şebekelerde arıza akımı ark tutuşturacak değerlere ulaşabilmektedir. Oluşacak bir ark arızası ile yıldız noktası yalıtılmış şebekede tek faz toprak kısa devresi sonrasında sağlıklı fazlarda görülebilecek gerilim yükselmesinin genliğinin artması beklenmektedir.

Geleceğe dönük olarak analizlere ark modeli eklenecek ve arkın gerilim değişimlerine etkisi analiz edilecektir. Hat dengesizliği, şebeke üzerinde farklı noktalarda görülen farklı tip kısa devreler, şebekenin farklı noktalardan beslenmesi ve aktif yük modelleri de analizlere eklenecektir. Yapılan tüm çalışmalar gerçek

şebeke modeli üzerinde tekrarlanacak ve sonuçlar gerçek veriler ile karşılaştırılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **DUGAN, R.C., MCGRANAGHAN, M.F., BEATY, H.W.:** *‘Electrical Power Systems Quality’*, McGraw-Hill, 1996, New York, ISBN 1996, 0-07-018031-8
- [2] **KENNEDY, B.:** *‘Power Quality Primer’*, McGraw-Hill, New York, 2000, ISBN 0-07-134416-0
- [3] **ARRILLAGA, J., WATSON, N.R., CHEN, S.:** *‘Power Systems Quality Assessment’*, John Wiley & Sons Inc., New York, 2000, ISBN 0-471-98865-0
- [4] **BOLLEN, M.H.J.:** *‘Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions’*, IEEE Publication, New York, 2000, ISBN 0-7803-4713-7
- [5] **BOLLEN, M.H.J.:** “Method of Critical Distances for Stochastic Assessment of Voltage Sags”, IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol.145, No.1, January 1998, pp 70-76
- [6] **BOLLEN, M.H.J., ZHANG, L.:** ‘A Method for Characterization of Three-Phase Unbalanced Dips (Sags) from recorded voltage waveshapes’, Telecommunication Energy Conference, 1999, Page(s): 9 pp.
- [7] **IEEE std 1159:1995:** IEEE Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality, ISBN 1-55937-549-3
- [8] **IEC 61000-2-5:1995:** Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 2: Environment, section 5: Classifications of Electromagnetic Environments
- [9] **BS EN 50160:2000:** Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems, BRITISH STANDART INSTITUTION, 2000
- [10] **ITIC (Information Technology Industry Council):** ITIC Curve Application Note, http://www.itic.org/iss_pol/techdocs/curve.pdf
- [11] **IEC 61000-2-1:1990:** Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 2: Environment, section 1: Descriptions of the Environments – Electromagnetic Environment for Low-Frequency Conducted Disturbances and Signaling in Public Power Supply Systems.
- [12] **IEEE PES & IAS TASK FORCE P1564:** Voltage Sag Indices, Draft 2.0, 2000
- [13] **BOLLEN, M.H.J., TAYJASANAT T., YALÇINKAYA, G.:** ‘Assessment of The Number of Voltage Sags Experienced by a Large Industrial Customer’, IEEE

- Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 6, November/December 1997, pp. 1465-1471
- [14] **YALÇINKAYA, G., BOLLEN, M.H.J., CROSSLEY, P.A.:** ‘Characterization of Voltage Sag in Industrial Distribution Systems.’, IEEE Transactions on Industry Applications Vol 34, No. 4, July/August 1998, pp. 682-688
 - [15] **BOLLEN M.H.J.:** ‘Fast Assessment Methods for Voltage Sags in Distribution Systems’, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32 Issue: 6 , Nov.-Dec. 1996 Page(s): 1414 -1423
 - [16] **CONRAD, L.E., BOLLEN M.H.J.:** ‘Voltage Sag Coordination for Reliable Plant Operation’, IEEE Transactions on Industry Applications Vol 33, No. 6, November/December 1997, pp. 1459-1464
 - [17] **BOLLEN, M.H.J., STYVAKTAKIS, E., GU, Y.H.,** “Analysis of voltage dips for event identification”, IEE, Power Quality: Monitoring and Solutions Seminar, November 2000, pp 4.1-4.4
 - [18] **BOLLEN, M.H.J., ZHANG L.:** ‘Characteristic of Voltage Dips (Sags) in Power Systems’, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No.2, April 2000
 - [19] **BOLLEN Math H. J., STYVAKTAKIS E. :** ‘Characterization of Three-Phase Dips (As Easy As One-Two-Three) Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings., Volume: 1 ,Page(s): 81 -86 vol.1
 - [20] **MARICAN, A.M.A.:** ‘Modern Application of Resonant Earthing’, PhD. Thesis, Cardiff 2000
 - [21] **IEEE std 142-1991 :**IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems
 - [22] **BS 5311:1996 :** High-Voltage Alternating-Current Circuit-Breakers, BRITISH STANDARD INSTITUTION
 - [23] **THE ELECTRICITY SUPPLY REGULATIONS,** No. 1057: 1.October.1988
 - [24] **ENERJİ VE TABİİ KAYNAKLAR BAKANLIĞI:** ‘Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği’, AĞUSTOS 2001
 - [25] **GÖNEN T.:** ‘*Modern Power System Analysis*’, John Wiley & Sons Inc., New York, 1987)
 - [26] **LACROIX, B., CALVAS, R.:** ‘Earthing Systems Worldwide and Evolutions’, Merlin Gerin Technical Specification n° 173, September 1995
 - [27] **HİLKAR ELEKTROTEKNİK LTD.ŞTİ.:** Nötr Topraklama Direnci Kataloğu

- [28] **IEEE Std C62.92.1-2000:** Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems
- [29] **HEATHCOTE M.J. :** *'The J&P Transformer Book'*, Newnes, Oxford, Twelfth edition, 1998
- [30] **WILLHEIM, R., WATERS, M.:** *'Neutral Grounding in High-Voltage Transmission'* (Elsevier publishing company, London1956)
- [31] **YI, T.:** 'A Complete Set of Automatic Compensation Equipment of a Capacitive Charging Current in the Application of a Medium-Voltage Power System', *Eelectric Power System Research* Vol 41, 1997, pp. 35-41
- [32] **CAN/AM EMTP USER GROUP:** 'Alternative Transients Program (ATP) Rule Book', (Canadian/American EMTP User Group, 1992)
- [33] **HES HACILAR ELEKTRİK SAN. VE TİC. A.Ş.:** Ürün Katoloğu, 2002

Özgeçmiş

Özgür KARACASU, 1978 yılında İstanbul'da doğdu. İlk ve orta öğretimini 1983-1994 yılları arasında İstanbul'da tamamladı. 1994 yılında girmeye hak kazandığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 1998 yılında ikincilikle mezun oldu. 1999 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı. Halen Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü Devreler ve Sistemler Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

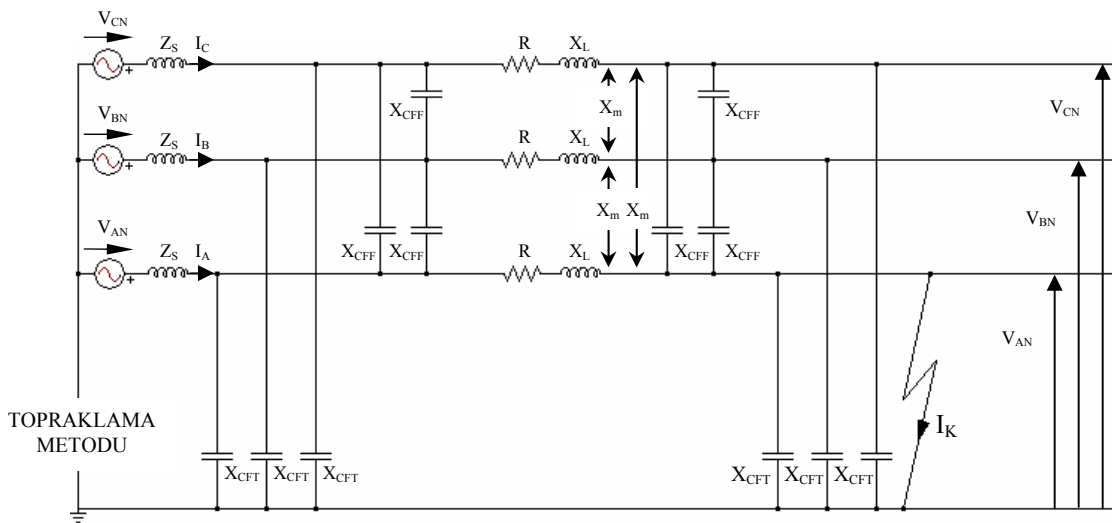
EK-A. TEST ŞEBEKESİ PARAMETRELERİNİN HESABI

A.1. Giriş

Bu bölümde geçici hal ve sürekli hal analizlerinde kullanılan üç fazlı 11 kV'luk test şebekesi parametrelerinin analitik hesabı üzerinde durulacaktır. Analitik olarak yapılan hesaplar geçici hal analizi için kullanılan ATP programı bünyesinde bulunan hat parametreleri hesabı rutini ile kıyaslanacaktır. Sürekli hal analizinde kullanılmak üzere simetrik bileşenler eşdeğerlerine dönüş yapılacaktır.

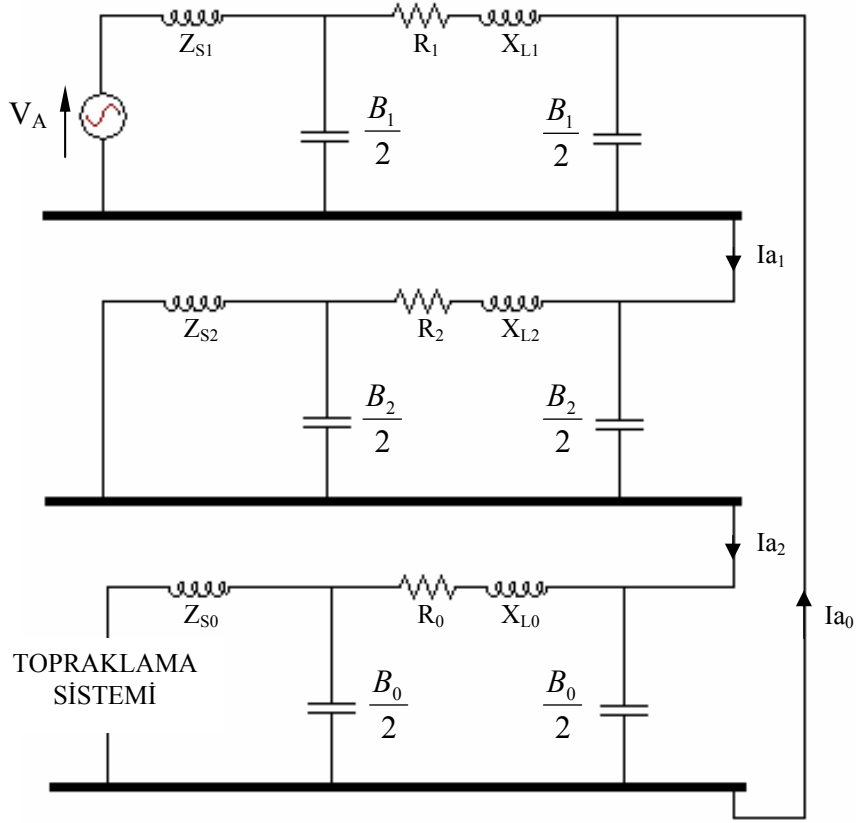
A.2. Test şebekesi

Test şebekesi, üç fazlı 11 kV'luk gerilim kaynağı ve buna bağlı 10 km'lik havai hattandır. Hat kapasitesinin etkisinin daha iyi görülmesi ve hata akımının yük akımından bağımsız olarak incelenebilmesi için hat yüksüz durumdadır. Tek faz toprak kısa devresi hat sonunda A fazında oluşmaktadır. Modellenen sistemin devre diyagramı Şekil A.1'de verilmiştir.



Şekil A.1. Modellenen şebekenin eşdeğer devresi

Şekil A.1’de verilen X_L ve X_m iletim hattının öz ve karşılıklı empedansını, X_{CFT} ve X_{CFF} ise iletim hattının toprakla ve kendi arasında olan kapasitelerini ifade etmektedir. Test şebekesinin sürekli hal analizinde kullanılan simetrik bileşenler eşdeğer devresi Şekil A.2’de verilmiştir.



Şekil A.2. Simetrik bileşenler eşdeğer devresi

A.3. Eşdeğer devre parametreleri hesabı

A.3.1. Gerilim kaynağı parametreleri

Test şebekesinde üç fazlı 11 kV’luk gerilim kaynağı kullanılmıştır. Kaynak empedansı, Z_s , $j0.98 \Omega$ ’dur. Simetrik bileşenler eşdeğeri devre parametreleri hesaplandığında $V_A = 6.35\text{kV}$ ve $Z_{S1} = Z_{S2} = Z_{S0} = j0.98 \Omega$ bulunur.

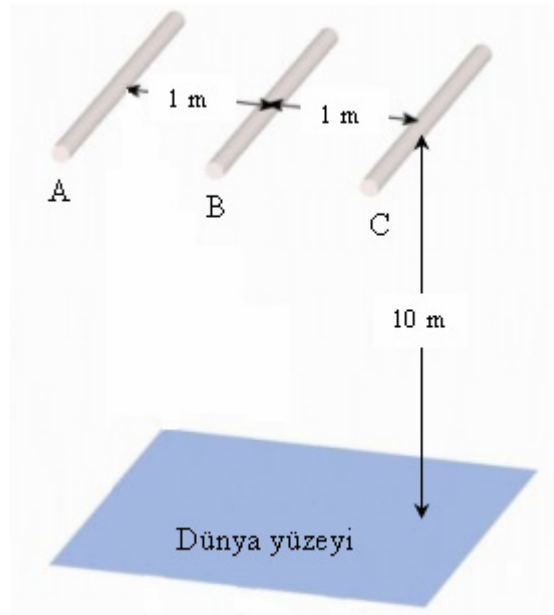
A.3.2. İletim hattı parametreleri

Test şebekesinde 11 kV’luk 10 km’lik havai hat kullanılmıştır. Hat çaprazlanmıştır. Kanada standardı POPPY sınıfı tam alüminyum iletken

kullanılmıştır. Bu iletkeni ait elektrik ve yapısal bilgiler Tablo A.1’de verilmiştir [33]. Koruma iletkeni bulunmayan yatay diziliimli hattın (Horizontal Unshielded) direk konfigürasyonu Şekil A.3’de verilmiştir.

Tablo A.1 : Poppy tipi iletken bilgisi [33]

Tel sayısı	7
Tel çapı	3.12 mm
Toplam kesit	53.49 mm ²
20 C°’de DC direnci	0.5351 Ω/km
İletken anma çapı	9.36 mm
GMR	0.3395 cm



Şekil A.3. 11kV havai hat iletken konfigürasyonu

A.3.3. Hat empedansı hesabı

Öz empedans;

$$Z_{i,i} = R + R' + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{D_{eq}}{d_s} \right]$$

(A.1)

karşılıklı empedans;

$$Z_{i,k} = R' + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{D_{eq}}{d_{ik}} \right]$$

(A.2)

Değişkenler;

Z_{ii} = İletken self empedansı (Ω/m)

Z_{ik} = İletken karşılıklı empedansı (Ω/m)

R = iletkenin boyuna direnci(Ω/km)

R' = Rezistans için Carson düzeltme faktörü

$$R = 9.869.10^{-7} \cdot f \text{ (}\Omega/\text{m)}$$

μ_0 = Boşluğun geçirgenliği

$$\mu_0 = 4\pi.10^{-7} \text{ (H/m)}$$

d_s = İletkenin ortalama yarıçapı (GMR)(m)

d_{ik} = İletkenler arası mesafe (m)

D_{eq} = Reaktans için Carson düzeltme faktörü

$$D_{eq} = 658.8 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ (mt)}$$

ρ = toprak öz direnci (Ωm)

f = sürekli hal frekans

Sürekli hal analizlerinde kullanılmak üzere Şekil A.3'de verilen iletken konfigürasyonu ve Tablo A.1'de verilen değerlere göre self ve karşılıklı empedansları hesaplırsak aşağıdaki empedans matrisine ulaşırız. Hesaplamalarda toprak öz direnci 100 Ωm alınmıştır.

$$Z_{abc} = \begin{pmatrix} 0.59124 + j0.78715 & 0.04934 + j0.42953 & 0.04934 + j0.38598 \\ 0.04934 + j0.42953 & 0.59124 + j0.78715 & 0.04934 + j0.42953 \\ 0.04934 + j0.38598 & 0.04934 + j0.42953 & 0.59124 + j0.78715 \end{pmatrix} \Omega/\text{km}$$

A.3.4. Hat kapasitansı hesabı

$$[V] = [P][Q] \quad (A.3)$$

$$p_{i,i} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r} \quad (A.4)$$

$$p_{i,k} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} \quad (A.5)$$

D_{ik} = i iletkeni ile k iletkeninin dünya yüzeyine göre görüntüsü arasındaki mesafe $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m

$$[Q] = [P]^{-1} [V] \quad (A.6)$$

$$[Q] = [C][V] \quad (A.7)$$

Yapılan hesaplama sonucunda Denklem A.8'deki C matrisi elde edilir.

$$C_{abc} = \begin{pmatrix} 7.84893 \times 10^{-9} & -2.33573 \times 10^{-9} & -1.32805 \times 10^{-9} \\ -2.33573 \times 10^{-9} & 8.3193 \times 10^{-9} & -2.33573 \times 10^{-9} \\ -1.32805 \times 10^{-9} & -2.33573 \times 10^{-9} & 7.84893 \times 10^{-9} \end{pmatrix} \text{ F/km} \quad (A.8)$$

A.3.5. ATP-EMTP hat parametreleri rutini

Hat parametreleri ATP-EMTP programının “Line Constant” dahili rutini ile hesaplanmıştır. Bu rutin dünya yüzeyini düz kabul etmekte ve toprak öz direncini hat boyunca homojen dağılımlı olarak kabul etmektedir.

Hesaplanan empedans matrisi Ω/km , kapasitans matrisi F/km olarak aşağıda verilmiştir.

$$Z_{abc} = \begin{pmatrix} 0.59027 + j0.78393 & 0.04822 + j0.43075 & 0.04822 + j0.38720 \\ 0.04822 + j0.43075 & 0.59027 + j0.78393 & 0.04822 + j0.43075 \\ 0.04822 + j0.38720 & 0.04822 + j0.43075 & 0.59027 + j0.78393 \end{pmatrix} \Omega/\text{km}$$

$$C_{abc} = \begin{pmatrix} 7.8527\text{E} - 9 & -2.33688\text{E} - 9 & -1.3287\text{E} - 9 \\ -2.3369\text{E} - 9 & 8.3079\text{E} - 9 & -2.3369\text{E} - 9 \\ -1.3287\text{E} - 9 & -2.33688\text{E} - 9 & 7.8527\text{E} - 9 \end{pmatrix} \text{F/km}$$

ATP-EMTP hat parametreleri rutini ile kıyaslandığında sonuçların birbirini doğruladığı görülür.

A.3.6. Simetrik bileşenler

Sürekli hal analizi için test sisteminin simetrik bileşenler eşdeğer devresine ihtiyaç vardır. Bu nedenle hesaplanan Z ve C matrislerinden simetrik bileşen eşdeğer devre elemanlara geçilmesi gerekir.

Devre self ve karşılıklı değerlerinin eşit olması durumunda (denklem (A.9) ve denklem (A.10)) devrenin simetrik bileşenler eşdeğeri denklem (A.11) ve denklem (A.12)'de verildiği gibi hesaplanabilir [25].

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_S & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_S & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_S \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

$$B_{abc} = \begin{bmatrix} B_S & B_M & B_M \\ B_M & B_S & B_M \\ B_M & B_M & B_S \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

$$Z_{012} = \begin{bmatrix} Z_S + 2Z_M & & \\ & Z_S - Z_M & \\ & & Z_S - Z_M \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

$$B_{012} = \begin{bmatrix} B_S + 2B_M & & \\ & B_S - B_M & \\ & & B_S - B_M \end{bmatrix} \quad (\text{A.12})$$

Ancak hesaplanan iletim hattı dengeli değildir. Bunu elde etmek için matrislerin köşegen ve köşegen olmayan elemanlarının ortalamasından yararlanılır. Matrislerin ortalamaları aşağıda verilmiştir.

$$Z_S = 0.5903 + j0.7839 \, \Omega/\text{km}$$

$$Z_M = 0.0482 + j0.4162 \, \Omega/\text{km}$$

$$B_S = 2.5163 \, \mu\text{mho}/\text{km}$$

$$B_M = -0.6285 \, \mu\text{mho}/\text{km}$$

$$C_S = 8.0096 \, \text{nF}/\text{km}$$

$$C_M = -2.0008 \, \text{nF}/\text{km}$$

Hesaplanan ortalamalar denklem (A.11) ve denklem (A.12)'de yerlerine konulduğunda Tablo A.2'deki sonuçlar elde edilir.

Tablo A.2. Hat parametreleri simetrik bileşen eşdeğer devre elemanları

Z_0	$0.68673 + j1.61642 \, \Omega/\text{km}$
Z_1	$0.54205 + j0.36770 \, \Omega/\text{km}$
Z_2	$0.54205 + j0.36770 \, \Omega/\text{km}$
B_0	$1.25751 \, \mu\text{mho}/\text{km}$
B_1	$3.14324 \, \mu\text{mho}/\text{km}$
B_2	$3.14324 \, \mu\text{mho}/\text{km}$
C_0	$2.00139 \, \text{nF}/\text{km}$
C_1	$5.00263 \, \text{nF}/\text{km}$
C_2	$5.00263 \, \text{nF}/\text{km}$