

**T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE
GERİLİM DEĞİŞİMLERİNİN İNCELENMESİ**

**Yiğit BORHAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE
2006**

**T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE
GERİLİM DEĞİŞİMLERİNİN İNCELENMESİ**

**Yiğit BORHAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ
ANABİLİM DALI**

**TEZ DANIŞMANI
Yrd. Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU**

GEBZE

2006

ÖZET

TEZ BAŞLIĞI: Elektrik Dağıtım Şebekelerinde Gerilim Değişimlerinin İncelenmesi

YAZAR ADI : Yiğit BORHAN

Modern yaşamımızda her an kullandığımız elektrik enerjisi; üretim noktalarından tüketim noktalarına elektrik dağıtım şebekeleri üzerinden taşınır ve tüketim noktasındaki gerilim değerinin müşteriye belirli limitler içerisinde sunulması amaçlanır. Ancak elektrik dağıtım şebekelerindeki çeşitli arızalar, büyük ölçekli yüklerin anahtarlanması veya küçük ölçekli non-lineer yüklerin kullanımlarının gün geçtikçe artması gibi sebepler, gerilim çökmeleri, gerilim şişmeleri ve kesilmeler gibi çeşitli güç kalitesi problemlerine neden olmaktadır. Güç kalitesi kavramı akım ve gerilimdeki bu değişimleri tanımlamak amacıyla kullanılmakta olup önemi her geçen gün daha da artmaktadır. Çalışma sonuçlarının elektrik enerjisi operatörlerine ve üreticilere yararlı bilgiler sağlaması beklenmektedir.

Bu tez gerçek bir gerilim şebekesinde meydana gelen üç faz ve bir faz kısa devrelerinin, kısa devre noktasının şebekeye mesafesine ve trafo topraklama empedansına bağlı olarak şebekedeki gerilim kademelerine etkisini incelemektedir. Şebekenin MATLAB programında oluşturulan matematiksel modeli ile yapılan hesaplamaların sonuçları, yine aynı şebeke için EMTP (Electro Magnetic Transient Program) programının ATP (Alternative Transient Program) versiyonu ile yapılan elektriksel modeli sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Her iki modelin de çok yaklaşık olarak birbirlerini doğruladığı sonuçlar göstermiştir ki üç faz ve bir faz kısa devreleri sonucunda, mesafe, topraklama empedansı ve transformatör bağlantı şekli parametrelerine bağlı olarak şebeke gerilim kademelerinde gerilim çökmesi ve gerilim şişmesi gözlemlenmektedir.

SUMMARY

TITLE OF THE THESIS: Investigations of Voltage Variations On Power Distribution Systems

AUTHOR : Yiğit BORHAN

The electrical energy that we use in our modern life is transported through electric power system from generator units to the terminals of electrical equipments and the voltage at the customer side aimed to be maintained within certain limits. However various kinds of faults in the system, the increase in the number of non-linear loads or switching operations of large loads causes different kinds of problems like distortions, sags, swells or interruptions on the pure sine wave form of the energy produced by generators. The power quality term is used for to determine these problems on the current and voltage quality which becomes a serious subject day by day. The results of this study is expected to provide valuable information for the power system operators and the manufacturers.

The study presented here concerns about the effects of three phase and single phase faults causing voltage sags on a real transmission network depending on the distance of the fault to the point of common coupling and magnitude of the grounding impedance. The calculations has been made on the analitical model of the system that has been compiled using MATLAB and compared with the results of the electrical model of the same system created on ATP (Alternative Transient Program) version of EMTP (Electromagnetic Transient Program). The confirmative results of two models shows that three phase and single phase faults causes power quality problems such as sags and swells related to the parameters of fault distance, earthing impedance and transformer connection types.

TEŞEKKÜR

Benim için oldukça uzun ve yorucu geçen bu tez çalışmam boyunca bilgisini ve yardımlarını eksik etmeyen tez danışmanım Yrd. Doç Dr. M. Hakan HOCAOĞLU' na;

Ardı arkası kesilmeyen sorularıma büyük sabırla göğüs gerip her türlü konuda yardımlarını eksik etmeyen Araş. Gör. Özgür KARACASU' ya;

Ve maddi manevi destekleriyle her zaman yanımda olan sevgili anneme, babama, ağabeyime ve Pınar HOŞGÖR' e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER - KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Tezin Yapısı	2
2. GÜÇ KALİTESİ	4
2.1. Giriş	4
2.2. Güç Kalitesi Problemi	4
2.2.1. Kesilmeler	5
2.2.2. Düşük Gerilimler	6
2.2.3. Gerilim Dalgalanmaları	6
2.2.4. Aşırı Gerilimler	6
2.2.5. Ani Gerilim Olayları	7
2.2.6. Açık Kaymaları ve Üç Faz Dengesizlikleri	7
2.2.7. Bozulmalar	7
2.3. Güç Kalitesi ile İlgili Standartlar	8
2.3.1. IEEE Std. 1159-1995	8
2.3.2. EN 50160:2000	10
2.3.3. IEC 61000	10
2.3.4. ITIC Eğrisi	11

2.4. Özet	12
3. GERİLİM ÇÖKMESİ	14
3.1. Giriş	14
3.2. Gerilim Çökmesi ile ilgili çalışmalar	15
3.2.1. Simetrik Kısa Devrelerde Gerilim Çökmesi Hesaplamaları	15
3.2.2. Simetrik Olmayan Kısa Devrelerdeki Hesaplamaları	20
3.2.3. Transformatör bağlantı şekilleri	24
3.2.4. Gerilim Çökmelerinin Transformatörler üzerinden Yayılımı	25
3.2.5. Temel gerilim çökmesi türleri	27
3.2.6. Gerçek Şebeke Üzerinde Yapılan Hesaplamalar	29
3.2.6.1. Üç Faz Kısa Devre Sonuçları	31
3.2.6.2. Bir Faz Kısa Devre Sonuçları	32
3.3. Sonuç	35
4. GÜÇ SİSTEMLERİNDE NÖTR TOPRAKLAMASI TÜRLERİ	37
4.1. Giriş	37
4.2. Nötr Noktası Yalıtılmış Şebekeler	37
4.3. Nötr Noktası Direkt Topraklanmış Şebekeler	40
4.4. Nötr Noktası Empedans Üzerinden Topraklanmış Şebekeler	41
4.5. Nötr Noktası Kompanze Edilmiş Şebekeler	42
4.6. Özet	43
5. GERÇEK BİR ŞEBEKEDEN GERİLİM ÇÖKMELERİNİN MESAFEYE BAĞLI DEĞİŞİMLERİNİN ANALİZİ	45
5.1. Giriş	45
5.2. Üç Faz Kısa Devresi MATLAB Modellemesi	45
5.3. Bir Faz Kısa Devresi MATLAB Modellemesi	48
5.4. ATP-EMTP & ATPDraw	51
5.5. Üç Faz Kısa Devresi ATP Modellemesi	52
5.6. Bir Faz Kısa Devresi ATP Modellemesi	53
5.7. Üç Faz ve Bir Faz Kısa Devresi Modelleri İle Elde Edilen Gerilim Çökmesi Değişimleri	54
5.8. Sonuç	67

6. NÖTR NOKTASI BAĞLANTI ŞEKLİNİN GERİLİM ÇÖKMESİNE ETKİLERİ	69
6.1. Giriş	69
6.2. Topraklamanın Gerçek Şebeke Üzerindeki Etkileri	69
6.2.1. STU-11 Barası	70
6.2.2. ROS-33 Barası	76
6.2.3. PAD-132 Barası	80
6.2.4. PEN-400 Barası	84
6.2.5. EGG-400 Barası	89
6.3. Sonuç	93
7. SONUÇ	96
KAYNAKLAR	98
EK.1. MATLAB MODELLERİ	101
EK.2. ATP MODELLERİ	102
EK.2.1. Giriş	102
EK.2.2. Üç Faz Kısa Devresinin Gerilim Çökmesine Etkileri ATP Model ve Kodları	102
EK.2.3. Bir Faz Kısa Devresinin Gerilim Çökmesine Etkileri ATP Model ve Kodları	102
EK.2.4. 33-11 kV Trafosu Topraklama Direncinin Mesafeye Bağlı Olarak Gerilim Seviyesine Etkileri ATP Model ve Kodları	103
EK.3. TRAFO KISA DEVRE TESTLERİ	105
EK.3.1. Giriş	105
EK.3.2. 400/132kV Trafosu	105
EK.3.3. 132/33kV Trafosu	107
EK.3.4. 33/11kV Trafosu	109
EK.3.5. 11/0.66kV Trafosu	110
EK.3.6. 11/0.42kV Trafosu	111
EK.4. MATHCAD MODELLERİ	113
ÖZGEÇMİŞ	114

SİMGELER - KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltma	Açıklaması
EMTP	Electromagnetic Transient Program
ATP	Alternative Transient Program
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
EN	European Norm
ITIC	Information Technology Industry Council
AC	Alternative Current
DC	Direct Current
PCC	Point of Common Coupling

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil		Sayfa
2.1.	IEEE 1159:1995’ de kullanılan gerilim büyüklüğü terimleri [21].	10
2.2.	ITIC Eğrisi (Teknoloji Endüstrisi Konseyi-2000) [24].	12
3.2.	Gerilim çökmesi rms değerinin karakteristiği	15
3.3.	Gerilim bölme metodu’ na göre gerilim çökmesi devre modeli [1].	16
3.4.	Farklı iki gerilim kademesinin bulunduğu güç şebekesi modeli [1].	17
3.5.	Gerilim çökmesinin’ nün trafo empedansına bağlı olarak yüksek ve alçak gerilim taraflarındaki değişimi.	18
3.6.	Örnek bir güç sisteminde kısa devre noktaları [1].	18
3.7.	Bir faz kısa devresi hesaplarında kullanılan simetrik bileşenler devre yapıları; -a- pozitif (i), negatif (ii) ve sıfır (iii) sıra devreleri; -b- bir faz kısa devresi için eşdeğer devre bağlantı şekli [2].	20
3.8.	Dört tür gerilim çökmesinin matematiksel ve fazör diyagramları ile gösterimleri [1].	28
3.9.	Kuzey İngiltere’ deki bir kağıt fabrikasına ait gerçek bir güç şebekesi [1, 17].	30
3.10.	Gerilim bölmesi metoduyla hesaplanan gerilim çökmesinin; (a) 11 kV barasındaki mesafeye bağlı değişimi; (b) 33 kV barasındaki mesafeye bağlı değişimi.	32
3.11.	Gerilim bölmesi metoduyla hesaplanan gerilim çökmesinin; (a) 132 kV barasındaki mesafeye bağlı değişimi; (b) EGG-400 ve PEN-400 baralarındaki mesafeye bağlı değişimi.	32
3.12.	Bir faz ve üç faz kısa devreleri sonucu 11 kV barasındaki gerilim değerinin mesafeyle değişimleri.	33
3.13.	Bir faz kısa devresi sonucu 11 kV barasındaki; (a) üç fazın gerilim büyüklüğünün mesafeyle değişimi; (b) üç fazın faz-açılarındaki kaymanın mesafeyle değişimi.	33
3.14.	Bir faz kısa devresi sonucu 11 kV barasındaki; (a) faz arası gerilimlerin mesafeyle değişimi; (b) faz-nötr ve faz-toprak gerilimlerinin mesafeyle değişimi.	34

3.15.	Bir faz ve üç faz kısa devreleri sonucu; (a) 33 kV barasındaki gerilim değerinin mesafeyle değişimi; (b) 132 kV barasındaki gerilim değerinin mesafeyle değişimi.	34
3.16.	Bir faz ve üç faz kısa devreleri sonucu; EGG400 kV ve PEN400 kV baralarındaki gerilim değerlerinin mesafeyle değişimleri.	35
4.1.	Nötr noktası yalıtılmış şebekelerde bağlantı şekli [28].	38
4.2.	Nötr noktası yalıtılmış şebekelerde bir faz kısa devresi öncesi (a) şarj akımları [27]; (b) gerilim ve akım fazör diyagramları [27].	38
4.3.	Nötr noktası yalıtılmış şebekelerde bir faz kısa devresi esnasında (a) şarj akımları [27]; (b) gerilim ve akım fazör diyagramları [27].	39
4.4.	Nötr noktası yalıtılmış şebekelerde; (a) bir faz kısa devresi öncesi faz ve nötr gerilimleri [27]; (b) bir faz kısa devresi esnasında faz ve nötr gerilimleri [27].	39
4.5.	Nötr noktası direkt topraklanmış şebekelerde bağlantı şekli [28].	40
4.6.	Nötr noktası direkt topraklanmış şebekelerde bir faz kısa devresi esnasında; (a) şarj akımları [27]; (b) gerilim ve akım fazör diyagramları [27].	41
4.7.	Nötr noktası empedans üzerinden topraklanmış şebekelerde (a) bağlantı şekli [28]; (b) bir faz kısa devresi esnasında akımlar [27].	42
4.8.	Nötr noktası kompanze edilerek topraklanmış şebekelerde; (a) bağlantı şekli [28]; (b) şarj akımları [27].	43
5.1.	Gerçek şebekenin analitik çözümünde MATLAB modelleri için kullanılan şebekenin bir faz çizimi.	46
5.2.	Üç faz kısa devresi analitik çözümü akış diyagramı.	47
5.3.	Gerçek şebekenin analitik çözümünde MATLAB modelleri için kullanılan şebekenin sıfır sıra devresi çizimi.	49
5.4.	Gerçek şebekenin analitik çözümünde kullanılan bir faz MATLAB modeli akış diyagramı.	50
5.5.	Gerçek şebekenin elektriksel analizi için kullanılan ATP programı STU11 barası üç faz kısa devresi modeli.	53
5.6.	Gerçek şebekenin elektriksel analizi için kullanılan ATP programı ROS33 barası Bir faz kısa devresi modeli.	54

- 5.7. a) 11 kV barası besleme hatlarında meydana gelen üç faz kısa devresinde gerilim seviyesinin mesafeyle değişimi. b) STU11 barası ATP 1 km gerilimleri, c) STU11 barası ATP 20 km gerilimleri. 55
- 5.8. 11 kV barası besleme hatlarında meydana gelen bir faz kısa devresinde her bir fazın gerilim seviyelerinin mesafeyle değişimi. b) STU11 barası ATP 1 km gerilimleri, c) STU11 barası ATP 20 km gerilimleri. 56
- 5.9. a) 33 kV barası besleme hatlarında meydana gelen üç faz kısa devresinde her bir fazın gerilim seviyelerinin mesafeyle değişimi. b) ROS33 barası ATP 1 km gerilimleri, c) ROS33 barası ATP 30 km gerilimleri. 58
- 5.10. 33 kV barası besleme hatlarında meydana gelen bir faz kısa devresinde her bir fazın gerilim seviyelerinin mesafeyle değişimi. b) ROS33 barası ATP 1 km gerilimleri, c) ROS33 barası ATP 30 km gerilimleri. 59
- 5.11. a) 132 kV barası besleme hatlarında meydana gelen üç faz kısa devresinde gerilim seviyesinin mesafeyle değişimi. b) PAD132 barası ATP 1 km gerilimleri, c) PAD132 barası ATP 50 km gerilimleri. 60
- 5.12. 132 kV barası besleme hatlarında meydana gelen bir faz kısa devresinde her bir fazın gerilim seviyelerinin mesafeyle değişimi. b) PAD132 barası ATP 1 km gerilimleri, c) PAD132 barası ATP 50 km gerilimleri. 62
- 5.13. a) PEN-400 barası besleme hatlarında meydana gelen üç faz kısa devresinin tüm baralardaki gerilim seviyelerine mesafeye bağlı etkisi. b) PEN400 barası ATP 1 km gerilimleri, c) PEN400 barası ATP 1000 km gerilimleri. 63
- 5.14. PEN-400 barası besleme hatlarında meydana gelen bir faz kısa devresinin tüm baralardaki gerilim seviyelerine mesafeye bağlı etkisi. b) PEN400 barası ATP 1 km gerilimleri, c) PEN400 barası ATP 1000 km gerilimleri. 64
- 5.15. a) EGG-400 barası besleme hatlarında meydana gelen üç faz kısa devresinde gerilim seviyesinin mesafeyle değişimi. b) EGG400 barası ATP 1 km gerilimleri, c) EGG400 barası ATP 1000 km gerilimleri. 65
- 5.16. EGG-400 barası besleme hatlarında meydana gelen bir faz kısa devresinde her bir fazın gerilim seviyelerinin mesafeyle değişimi. b)

	EGG400 barası ATP 1 km gerilimleri, c) EGG400 barası ATP 1000 km gerilimleri.	67
6.1.	STU11 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. (MATLAB modeli ile)	70
6.2.	a) STU11 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. (ATP modeli ile) b) 0.1 Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede gerilimler, c) 0.1 Ω topraklama direnci ve 20 km mesafede gerilimler, d) 1000 Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede gerilimler, e) 1000 Ω topraklama direnci ve 20 km mesafede gerilimler, f) 50 Ω topraklama direnci ve 10 km mesafede gerilimler.	72
6.3.	ROS33 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.	74
6.4.	PAD132 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.	75
6.5.	PAD400 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.	75
6.6.	ROS33 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. (MATLAB modeli ile)	76
6.7.	a) ROS33 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. (ATP modeli ile), b) 0.1 Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede gerilimler, c) 0.1 Ω topraklama direnci ve 30 km mesafede gerilimler	77
6.8.	STU11 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.	78
6.9.	PAD132 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.	79
6.10.	PAD400 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.	79
6.11.	PAD132 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. (MATLAB modeli ile)	80
6.12.	a) PAD132 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. (ATP modeli ile), b) 0.1 Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede gerilimler, c) 0.1 Ω topraklama direnci ve 50 km mesafede gerilimler, d) 0.1 Ω topraklama direnci ve 10 km mesafede gerilimler	81

- 6.13. STU11 barasında toprak direncinin mesafeye bağılı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile. 82
- 6.14. ROS33 barasında toprak direncinin mesafeye bağılı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile. 83
- 6.15. PAD400 barasında toprak direncinin mesafeye bağılı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile. 83
- 6.16. PEN400 barasında toprak direncinin mesafeye bağılı olarak gerilime etkisi. (MATLAB modeli ile) 84
- 6.17. a) PEN400 barasında toprak direncinin mesafeye bağılı olarak gerilime etkisi. (ATP modeli ile), b) 0.1Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede gerilimler, c) 0.1Ω topraklama direnci ve 1000 km mesafede gerilimler, d) 0.1Ω topraklama direnci ve 10 km mesafede gerilimler 85
- 6.18. STU11 barasında toprak direncinin mesafeye bağılı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile. 86
- 6.19. ROS33 barasında toprak direncinin mesafeye bağılı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile. 87
- 6.20. PAD132 barasında toprak direncinin mesafeye bağılı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile. 88
- 6.21. EGG400 barasında toprak direncinin mesafeye bağılı olarak gerilime etkisi. (MATLAB modeli ile) 89
- 6.22. a) EGG400 barasında toprak direncinin mesafeye bağılı olarak gerilime etkisi. (ATP modeli ile) , b) 0.1Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede gerilimler, c) 0.1Ω topraklama direnci ve 1000 km mesafede gerilimler, d) 0.1Ω topraklama direnci ve 10 km mesafede gerilimler 90
- 6.23. STU11 barasında toprak direncinin mesafeye bağılı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile. 91
- 6.24. ROS33 barasında toprak direncinin mesafeye bağılı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile. 92
- 6.25. PAD132 barasında toprak direncinin mesafeye bağılı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile. 93

Ek2.1.	ATP ile yapılan 33/11kV trafosu topraklama direncinin mesafe ile gerilim çökmesine etkisi analizinde kullanılan programların akış diyagramı.	104
Ek3.1.	400/132kV trafosu kısa devre testi şeması.	105
Ek3.2.	132/33kV trafosu kısa devre testi şeması.	107
Ek3.3.	33/11kV trafosu kısa devre testi şeması.	109
Ek3.4.	11/0.66kV trafosu kısa devre testi şeması.	110
Ek3.5.	11/0.42kV trafosu kısa devre testi şeması.	111

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo		Sayfa
2.1.	IEEE 1159:1995' e göre Güç Sistemi Elektromanyetik Olaylar [19].	9
3.1.	Örnek güç sisteminde, kısa devre noktasına bağlı olarak yüklerden hissedilen gerilim çökmeleri [1].	19
3.2.	Gerilim çökmelerinin transformatör tiplerine göre yayılımı [1].	26
3.3.	Arıza türüne ve yük bağlantı şekline göre gerilim çökmesi türleri [1].	28
3.4.	Gerilim çökmelerinin transformatör çeşitlerine göre düşük gerilim seviyelerine yayılımı [1].	29
3.5.	100 MVA baz değeri için hesaplanmış kaynak empedansı değerleri [1].	31
3.6.	Besleme hatları empedans değerleri [1].	31
3.7.	Transformatör bağlantı şekilleri ve nötr topraklamaları [1].	31

1. GİRİŞ

Elektrik şebekelerinin temel amacı uzun yıllar boyunca “elektrik enerjisinin üretim noktalarından tüketim noktalarına taşınması” ve bunu yaparken “enerjinin belirli limitler çerçevesinde tüketiciye sunulması” olarak kabul edilmiş, sunulan enerjinin kalitesi göz ardı edilmiştir. Ancak 1980’lerden sonra teknolojiye ilerlemelerle kullanılmaya başlanan hassas cihazların artmasıyla Güç Kalitesi Problemi yavaş yavaş belirginleşmeye ve önem kazanmaya başlamıştır [1]. Güç kalitesi günümüzde dahi sınırları net bir şekilde çizilmemiş, detaylı çalışmaların ve standartlaştırma çalışmalarının sürdüğü çok genel bir ifadedir [2].

Tez boyunca ilgileneceğimiz “Gerilim Çökmesi” bir Güç Kalitesi problemi olup literatüre bakıldığında meydana gelme sıklığı nedeniyle pek çok kez ele alındığı görülür. Gerilim çökmesi ile ilgili çalışmalar genellikle iki grupta ele alınmaktadır. Bunlardan ilki gerilim çökmesi esnasında cihazların davranışları ve nasıl korunabilecekleri ile ilgilidir. İkinci grup ise gerilim çökmesi mekanizmalarının belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalardır [5]. Bu amaçla şebeke modelleri üzerinde analizler yapılmış [6], [7] güç sisteminin gerilim çökmesi karakteristikleri çıkartılmaya çalışılmıştır [8]. Karakteristiklerin bilinmesi ile hassas cihazların çalışma aralıklarının belirlenmesi sağlanmaktadır.

Literatürde gerilim çökmesi ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde gerilim çökmelerinin nedenlerinin sınıflandırması [9], gerilim çökmelerinin farklı kısa devre türlerinde nasıl değiştikleri [1, 10, 11, 12, 13, 14, 15], radyal olmayan şebekelerdeki davranışları [16], trafolar üzerinden alt ve üst gerilim kademelerine ne şekilde geçtikleri [17], iletim hattı mesafesi ile ilişkileri [18], gerilim faz açılarının nasıl etkilendiği [15] gibi konuların araştırıldığı görülmektedir. Ancak şebeke içerisinde kullanılan transformatörlerin yıldız noktası topraklamasının gerilim kademelerinde ne gibi etki yaratacağı üzerinde durulmadığı görülmüştür. Bu sebeple tez içerisinde gerçek bir şebekede gerilim çökmesi ile ilgili diğer konulara ek olarak bu eksik cevap bulunmaya çalışılmaktadır.

1.1. Tezin Amacı

Tezin amacı elektrik şebekelerinde meydana gelen üç faz ve bir faz kısa devrelerinin oluşturduğu gerilim çökmelerinin kısa devre noktasının yeri ve transformatör nötr noktası topraklamasına bağlı olarak şebeke üzerindeki farklı gerilim kademelerindeki etkilerini incelemektir. Bu amaçla incelenen şebeke gerçek bir şebeke olup İngiltere'nin Manchester şehri kuzeyinde bulunan bir kağıt fabrikasına aittir [17]. Güç kalitesi terimi çok geniş bir anlam içerdiğinden ve tez boyunca geçiciliklerle ilgilenmediğimizden çalışma sınırları olarak 0.6ms-0.8ms arası olarak alınmıştır. İncelenen gerçek şebeke radial bir sistem olup çeşitli gerilim kademelerini içerisinde bulundurmaktadır. Modellerde uygulanan üç faz ve bir faz kısa devreler süreklidir, ark hesapları modellerde yer almamaktadır.

1.2. Tezin Yapısı

Yedi bölümden oluşmakta olan tezin ikinci bölümünde Güç kalitesi kavramından bahsedilmektedir. Güç kalitesinin incelendiği standartlar tanıtılarak bu standartlarda kullanılan terminolojiler gözden geçirilecektir.

Tezin üçüncü bölümünde, Gerilim Çökmesi (Voltage Sag) kavramı tanıtılacaktır. Gerilim çökmesi ile ilgili literatürdeki çalışmalara göz atılacak ve gerçek bir elektrik şebekesi üzerinde yapılan gerilim çökmesi çalışması yardımıyla üç faz ve bir faz kısa devrelerinin bu şebekede meydana getirdikleri gerilim çökmesi etkileri incelenecektir.

Tezin dördüncü bölümünde, güç sistemlerinde kullanılmakta olan nötr topraklama türlerinden bahsedilecek ve kısa devre sonucunda nasıl bir davranış sergiledikleri şarj akımları, gerilim ve akım fazör diyagramları yardımıyla incelenecektir.

Tezin beşinci bölümünde, üçüncü bölümde incelenen gerçek şebekenin matematiksel ve elektriksel modelleri üzerinde bir faz ve üç faz kısa devresi çalışmaları yapılmıştır. Her iki modelin sonuçları grafiksel olarak birbirleriyle karşılaştırılmış ve sonuçları tartışılmıştır.

Tezin altıncı bölümünde, gerçek şebekenin 33/11 kV trafolarının topraklama empedansı matematiksel ve elektriksel modellerde değişken olarak modellenmiştir. Buna göre değişken topraklama empedansının tüm gerilim kademelerindeki etkisi, herhangi bir gerilim seviyesinde değişken mesafede oluşacak bir faz kısa devresi durumunda incelenmiştir. Sonuçlar üç boyutlu grafikler olarak çıkarılmış ve yorumlanmıştır.

Son olarak tezin yedinci bölümü, gerçek şebeke üzerinde matematiksel ve elektriksel modeller vasıtasıyla yapılan tüm çalışma ve incelemeler neticesinde elde edilen sonuçların genel bir yorumunu içermektedir.

2. GÜÇ KALİTESİ

2.1. Giriş

Güncelliği her geçen gün daha da artan “Güç Kalitesi” terimi bir çok kaynak tarafından incelenmekte ve değişik standartlar ile açıklanmaktadır. Bu çeşitlilik kavram karmaşalarına neden olduğu gibi birbirinden ayrılması güç terimlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Her ne kadar “Güç” gibi fiziksel bir büyüklüğü ifade eden bir terimin kalitesinden söz etmek doğru olmasa da bugün Güç Kalitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) gibi pek çok yetkili kurum ve kişi tarafından sıklıkla kullanılmakta ve yavaş yavaş resmi bir yapı kazanmaktadır [1]. Buna karşın Elektrik Mühendisliği’nde uluslararası standart koyucu kimliğiyle Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) [19], yayımlarının hiç birinde Güç Kalitesi terimini kullanmamakta, bunun yerine aynı anlama gelmekte olan “Elektromagnetik Uyumluluk” terimini tercih etmektedir.

Bu bölümde, tez boyunca “Güç Kalitesi” adı altında incelenecek olan bu kavram ile ilgili standartlar tanıtılacak, terminolojilerindeki farklar belirtilecektir.

2.2. Güç Kalitesi Problemi

IEEE, IEC gibi kuruluşlarca yapılan standardizasyon çalışmalarında güç kalitesi problemi için çeşitli terimler kullanılmaktadır. Bu terimlerin aralarındaki ufak farklılıklar, terminolojide karışıklıklara yol açmaktadır. Güç kalitesi ile ilgili standartlar, ileriki bölümde incelenecek ve kullandıkları terminoloji tanıtılacaktır. Aşağıda kullanılan sınıflandırmalar, bu standartlara alternatif değildir, genel olarak güç kalitesi problemlerinin anlaşılmasında faydalı olabilecek bir sınıflandırmadır. Buna göre, güç kalitesi problemlerini yedi ana grup altında tanımlamak yanlış olmaz [1]. Bunlar;

- 1) Kesilmeler (Interruptions)
- 2) Düşük Gerilimler (Undervoltages)
- 3) Gerilim Dalgalanmaları (Voltage Fluctuations)

- 4) Aşırı Gerilimler (Overvoltages)
- 5) Ani Gerilim Olayları (Fast Voltage Events)
- 6) Açık Kaymaları ve Üç Faz Dengesizlikleri (Phase-Angle Jumps and 3-Phase Unbalance)
- 7) Bozulmalar (Distortions)

2.2.1. Kesilmeler

IEEE 1159 standardında “Gerilim Kesilmesi - Voltage Interruption”, EN 50160 standardında “Kaynak Kesilmesi – Supply Interruption”, IEEE Std.1250 [20]’ de ise sadece “Kesilme” olarak tanımlanan durum, kaynak geriliminin yaklaşık sıfır değerini almasını ifade eder. (Tipik olarak nominal gerilimin %1-10 aralığında olması). Sadece süre olmak üzere tek bir parametre ile karakterize edilirler. Kısa kesilmeler şebekenin işletme koşullarına bağlı olarak üç dakikaya kadar çıkabilse de genel olarak bir dakikadan daha az sürer ve çoğunlukla uzun süreli kesilmelerden kaçınmak amacıyla tasarlanmış bir devre kesicinin açılması veya otomatikman kapanmasıyla sonuçlanır. Kısa ve uzun süreli kesilmeler hem kaynaklarına göre hem de meydana gelmelerini önlemek veya azaltmak amacıyla getirilen çözümlere göre farklılık gösterirler.

Genellikle, (hızlı ve/veya yavaş) otomatik devre kesicisi gibi şebeke üzerinde bulunan otomatik sistemlerin çalıştırılması, trafo ile generatör arasındaki kilitleme düzeneğinin çalıştırılması veya hatların fazlarının tersine çevrilmesinin (enversör) bir sonucu olarak görülürler.

Kesilme türleri için değişik standartlarda değişik terminolojiler kullanılmaktadır. IEC, 3 dakikadan uzun süreli için “Uzun Süreli Kesilme – Long Interruption”, 3 dakikaya kadar olanlar içinse “Kısa Süreli Kesilme – Short Interruption” terimini kullanır. IEEE ise; “Anlık-Geçici Kesilme – Momentary Interruption”, “Anlık Kesilme – Sustained Interruption” veya “Geçici Kesilme – Temporary Interruption” terimlerini farklı dokümanlarda farklı süre değerleri için kullanmaktadır.

2.2.2. Düşük Gerilimler

Kısa süreli düşük gerilimler “Gerilim Çökmeleri - Voltage Sags / Dips” olarak adlandırılır. IEC genellikle “Voltage Dips”, IEEE ise “Voltage Sags” terimini kullanmaktadır.

Düşük Gerilimler; kaynak geriliminin birkaç periyot ile birkaç saniye gibi kısa bir süre aralığında gerilimin tekrar nominal değerine dönmesi ile sonuçlanan güç kalitesi problemidir. Buna, kaynak geriliminin sınırlı bir zaman içindeki düşüşü de denilebilir. Standartlarda, IEC’ye göre belirtilen kaynak geriliminin %90-%1 değerleri arasındaki ani düşüşü, IEEE’ye göre ise; nominal gerilimin %10-%90 değerleri arasındaki düşüşüdür. Gerilim azalmaları, genellikle sistemdeki kısa devre arızaları veya büyük güçlü motorların devreye girmesi esnasında görülür.

2.2.3. Gerilim Dalgalanmaları

Yüklerin devreye alınıp, çıkartılması; trafo değişiklikleri ve sistemdeki bir takım anahtarlama olayları, kaynak gerilimin ani değişimlerinde rol oynayabilir. Gerilim Dalgalanmaları, “Hızlı Gerilim Değişimi - Rapid Voltage Change” (EN 50160) yada “Gerilim Değişimi - Voltage Change” (IEEE Std. 1159) olarak adlandırılır. Dalgalanma genellikle önceki ve sonraki gerilim seviyesi nominal sınırları olan %90 - %110 aralığında olduğundan elektrikli ekipmanları etkilemez.

2.2.4. Aşırı Gerilimler

Çok kısa süreli ve yüksek değerli gerilim yükselmeleri “Gerilim Sıçramaları - Voltage Spikes”, “Ani Yüksek Gerilimler - Transient Over Voltages” yada bazen “Gerilim Darbeleri - Voltage Surges” olarak isimlendirilir. Gerilim Darbeleri terimi “Gerilim Şişmeleri – Voltage Swells” olarak da isimlendirilebilir.

Kısa ve uzun süreli gerilim yükselmeleri yıldırım düşmeleri, anahtarlama olayları, anlık yük değişimleri, basit faz kısa devreleri ve lineer olmayan olaylardan meydana gelebilir. Transformatörlerin lineer olmayan reaktansları ile kapasitansları arasındaki rezonans, uzun süreli gerilim yükselmelerine neden olabilir. Bu olay, “ferroresonance” olarak isimlendirilir ve güç sistemlerinde kullanılan cihazlarda birçok hasara neden olabilir.

2.2.5. Ani Gerilim Olayları

Kısa zamanlı gerilim olayları, genellikle bir periyottan kısa sürede meydana gelen çok kısa süreli olaylardır ve “Geçicilikler – Transients” olarak adlandırılır [1]. Genellikle “Geçici Aşırı Gerilimler - Transient (Over) Voltages”, “Gerilim Geçicilikleri - Voltage Transients” yada “Dalga Şekli Bozuklukları - Wave Shape Faults” olarak adlandırılırlar [1]. Normalde geçici teriminin kullanılması tam anlamıyla doğru değildir, geçicilik sadece iki sürekli olay arasındaki (steady state) geçişi ifade etmektedir. Bu tanım doğrultusunda anahtarlama faaliyetleri sonucundaki olaylara geçicilik denilebilir, yıldırım düşmesi sonucundaki olaylar ise geçici olarak adlandırılmazlar. Ancak zaman eksenindeki benzerlikler sonucu bunlara da “Gerilim Geçicilikleri - Voltage Transient” denilmektedir [1].

Ani gerilim olayları, genellikle yıldırımlar sonucu oluşan “Darbesel Geçicilikler – Impulsive Transients” ve genellikle anahtarlama olayları sonucu oluşan “Salınımsal Geçicilikler - Oscillatory Transients” olarak ikiye ayrılır [1].

2.2.6. Açık Kaymaları ve Üç Faz Dengesizlikleri

Gerilim Çökmeleri sık sık faz açısı atlamaları ve üç faz dengesizlikleri ile özleştirilir. Öyle ki gerilim değerinde bir düşüş yaşanmamasına rağmen faz açılarında meydana gelebilecek kaymalar dahi Gerilim Çökmesi olarak ifade edilebilmektedir. Faz gerilimlerinin rms değerleri veya ardışık fazlar arasındaki faz açılarının eşit olmaması durumunda üç fazlı bir sistem dengesiz demektir [1].

Dengesizlikler bir fazdan beslenen büyük yüklerin dengesiz dağıtılmasından veya işletmedeki fazlardan bir tanesinin devre dışı kalmasından meydana gelebilir. Bu durum nötr noktasının kaymasına ve üç fazlı cihazlarda aşırı ısınmalarla izolasyon problemlerine neden olur.

2.2.7. Bozulmalar

Akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte temel sinüsoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüsoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Sinüzoidal dalga yapısındaki bozulmalara neden olan dalgalara “Harmonik” adı verilir. Harmonikler genel olarak lineer olmayan elemanlar ile

sinüzoidal olmayan kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin birden sistemde bulunmasından meydana gelirler.

Bozulmalar, başka bir deyişle harmonikler güç sistemlerinde ek kayıplar, ek gerilim çökmeleri, rezonans olayları, güç faktörünün değişmesi v.b. gibi teknik ve ekonomik problemlere yol açar.

2.3. Güç Kalitesi ile İlgili Standartlar

Elektrik Güç kalitesi ile ilgili çeşitli kuruluşlara ait belli başlı standartlar aşağıda verilmiştir. Bu standartlardan ilk dördü üzerinde detaylı olarak durulacaktır.

- IEEE Std. 1159-1995: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü Standardı
- EN 50160:2000: Avrupa Standardı
- IEC 61000: Uluslararası Enerji Komisyonu Standardı
- ITIC (Bilgi Teknolojileri Endüstrisi Konseyi) Eğrisi
- IEC/EN/TS 61000-3-2: ‘Elektromanyetik Uyumluluk (EMU) - Bölüm 3-2: Sınır Değerler-Harmonik Akım Emisyonlar İçin Sınır Değerler (Faz Başına Donanımın Giriş Akımı 16 A).
- IEC/EN/TS 61000-3-3: ‘Elektromanyetik uyumluluk (EMU)-Bölüm 3-3: Sınır değerler-Beyan Akımı Faz Başına 16 A (Dahil) Olan ve şartlı bağlantıya tabi olmayan Cihazlar İçin Alçak Gerilim Besleme Sistemlerindeki Gerilim Değişiklikleri,Dalgalanmaları ve Kırpışma Sınırları.
- IEEE 519-1992: ‘Harmonik kontrolü ve Statik Güç Dönüştürücüler ile Reaktif Kompanzasyon, ANSI/IEEE Std.519’

2.3.1. IEEE Std. 1159-1995

Bu standart birçok kişi tarafından temel Güç Kalitesi terimlerinin ifade edildiği standart olarak kabul edilmektedir. Kısa süreli gerilim değişimleri arasındaki küçük farklılıklar süre ve genlik değişimlerine göre belirlenmiştir. Yarım periyot daha kısa süren olaylar geçicilikler, yarım çevrimden 1 dakikaya kadar olan olaylar kısa süreli değişimler, bir dakikadan uzun süreli olaylar ise uzun süreli değişimler olarak sınıflandırılmıştır [21].

Tablo 2-1’ de bu sınıflandırmaların kapsadığı güç kalitesi terimleri frekans ve/veya süre aralıkları kesin olarak çizilerek tanımlanmıştır.

Tablo 2.1.IEEE 1159:1995’ e göre Güç Sistemi Elektromanyetik Olaylar [21].

Kategorisi	Frekans	Süresi	Gerilim
1. Geçicilikler			
1.1 Darbeler			
1.1.1 Nanosaniyelik	5 ns’ lik artış	< 50 ns	
1.1.2 Mikrosaniyelik	1 µs’ lik artış	50 ns – 1 ms	
1.1.3 Milisaniyelik	0.1 ms’ lik	> 1 ms	
1.2 Salınımlar			
1.2.1 Düşük frekans	< 5 kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 pu
1.2.2 Orta frekans	5 – 500 kHz	20 µs	0 – 8 pu
1.2.3 Yüksek frekans	0.5 – 5 MHz	5 µs	0 – 4 pu
2. Kısa Süreli Değişimler			
2.1 Anlık (Instantaneous)			
2.1.1 Gerilim çökmeleri (Sag)		0.5 – 30 periyot	0.1 – 0.9 pu
2.1.2 Gerilim şişmeleri (Swell)		0.5 – 30 periyot	1.1 – 1.8 pu
2.2 Anlık-Geçici (Momentary)			
2.2.1 Kesilmeler (Interruption)		0.5 periyot – 3s	< 0.1 pu
2.2.2 Gerilim çökmeleri (Sag)		30 periyot – 3s	0.1 – 0.9 pu
2.2.3 Gerilim şişmeleri (Swell)		30 periyot – 3s	1.1 – 1.4 pu
2.3 Geçici (Temporary)			
2.3.1 Kesilmeler (Interruption)		3 s – 1 dakika	< 0.1 pu
2.3.2 Gerilim çökmeleri (Sag)		3 s – 1 dakika	0.1 – 0.9 pu
2.3.3 Gerilim şişmeleri (Swell)		3 s – 1 dakika	1.1 – 1.2 pu
3. Uzun Süreli Değişimler			
3.1 Kesilmeler (Interruption)		> 1 dakika	0.0 pu
3.2 Gerilim çökmeleri (Undervoltages)		> 1 dakika	0.8 – 0.9 pu
3.3 Gerilim yükselmeleri		> 1 dakika	1.1 – 1.2 pu
4. Gerilim Dengesizlikleri (Imbalance)			
		sürekli hal	0.5 – 2 %
5. Dalga Şekli Bozulmaları			
5.1 DC öteleme (DC offset)		sürekli hal	0 – 0.1%
5.2 Harmonikler	0 – 100. Har.	sürekli hal	0 – 20%
5.3 Ara Harmonikler (Interharmonics)	0 – 6 kHz	sürekli hal	0 – 2%
5.4 Çentikler (Notching)		sürekli hal	
5.5 Gürültü (Noise)	Broad-band	sürekli hal	0 – 1%
6. Gerilim Dalgalanmaları			
	< 25 Hz	sürekli hal	0.1 – 7%
7. Sistem Frekansı Değişimleri			
		< 10 s	

Şekil 2.1’ de IEEE 1159:1995’ de tanımlandığı şekilde kısa süreli değişimlerin limitleri görülmektedir.

Her bir olay ışıma (radiation) ve iletim (cunduction) olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Işıma ile elektrik ve magnetik alanların neden olduğu bozulmalar, iletim ile de iletken üzerinden iletilen bozulmalar kastedilmektedir.

2.3.4. ITIC Eğrisi

Deneyisel çalışmalar sonucunda elde edilen bu eğri, geçicilikler, kesilmeler, gerilim çökmeleri, aşırı gerilimler, gerilim şişmesi gibi güç kalitesi problemlerinin genlik ve zamana bağlı olarak cihazlara etkisini göstermektedir. Çalışma 60 Hz ve 120 V' luk dağıtım şebekesi için yapılmıştır. Diğer gerilim seviyeleri için ayrı bir çalışma bulunmamaktadır. Şekil 2.2' de görülen grafikte iki bölge tanımlanmıştır, tehlikeli bölge ve gerilim tolerans zarfı [24].

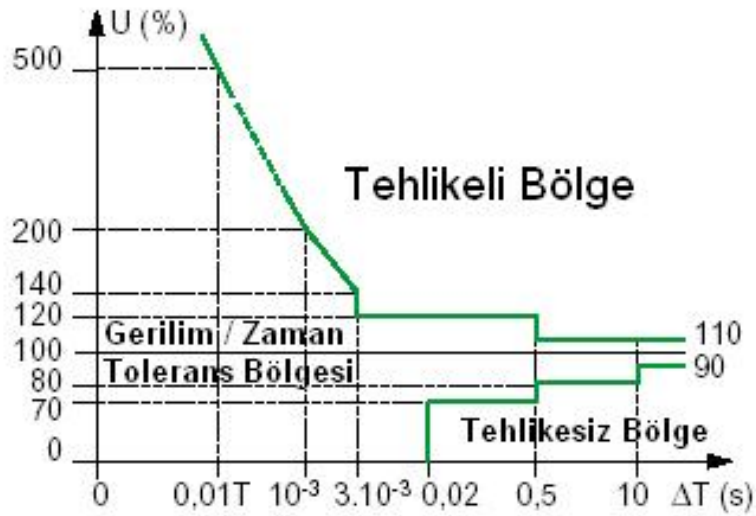
Tehlikeli bölge, cihazların aşırı gerilime maruz kaldıkları ve arıza olasılıklarının yüksek olduğu bölgedir.

Gerilim tolerans zarfı içerisinde kalan bölümler cihazların gerilim değişimlerine dayanabildikleri sınırları çizmektedir. Yedi farklı durum belirtilmiştir.

- 1) **Sürekli Hal toleransı (Steady-state tolerance):** Nominal şebeke gerilimi rms değerinin $\pm\%10$ ' luk sınırlar içerisinde kaldığı değişimlerdir. Bu değişimlerin içinde kalan gerilim değerleri bir zaman sınırlaması içinde bulunmazlar ve normal kabul edilirler.,
- 2) **Gerilim Şişmesi (Voltage swell):** Gerilimin rms değerinin 0.5 sn' ye kadar $\%120$ ' ye çıkması olarak tanımlanmaktadır. Büyük yüklerin sistemden çıkarılması gibi durumlarda meydana gelebilir.
- 3) **Düşük frekanslı salınımlar (Low-frequency decaying ringwave):** Genliği 200 Hz' den 5 kHz' e kadar değişen salınımlardır. Genellikle AC dağıtım sistemindeki kapasitör gruplarının devreye alınması sırasında meydana gelir.
- 4) **Yüksek frekanslı darbe ve salınımlar (High frequency impulse and ringwave):** Yıldırımların sonucunda oluşan geçiciliklerdir. Gerilimin rms değeri yerine frekans ve genlikleri ile tanımlanırlar.
- 5) **Gerilim çökmeleri (Voltage sags):** Şebekede büyük yüklerin devreye girmesi, çeşitli arızalar gibi nedenlerle meydana gelen geçiciliklerdir. İki farklı gerilim çökmesi tanımlanmıştır. Nominal gerilimin $\%80$ ' ine

kadar olan gerilim çökmeleri 10 sn' ye kadar, %70' e kadar olan gerilim çökmeleri de 0.5 sn' ye kadar kabul edilebilir sınırlardadır.

- 6) **Sönümler (Dropouts):** Nominal gerilimin tamamen kesilmesi veya derin gerilim çökmelerine maruz kalmasını takiben normal çalışma koşullarına geri dönmesi durumudur. 20 msn' ye kadar sürebilir.
- 7) **Tehlikesiz bölge (No damage region):** Sürekli hal toleransı limitleri altında bulunan düşük gerilim veya gerilim çökmelerine maruz kalmasına rağmen cihazlar için tehlike teşkil etmeyen bölgedir.



Şekil 2.2. ITIC Eğrisi (Teknoloji Endüstrisi Konseyi-2000) [24].

2.4. Özet

“Güç kalitesi” terimi bozulmuş sinüzoidal gerilim ve akım veya tasarlandığı sınırlar dışındaki gerilim, akım ve frekans olarak tanımlanabilir [10]. Buna göre, güç kalitesi problemlerini; kesilmeler, düşük gerilimler, gerilim dalgalanmaları, aşırı gerilimler, ani gerilim olayları, açık kaymaları ve üç faz dengesizlikler, bozulmalar olarak yedi ana grup altında tanımlamak yanlış olmaz [1].

Son dönemde çeşitli ulusal ve uluslararası kuruluşlarca yapılan standartlaştırma çalışmaları ile güç kalitesi veya gerilimdeki ve akımdaki bozulmalar tanımlanmıştır.

IEEE Std. 1159-1995, birçok kişi tarafından temel Güç Kalitesi terimlerinin ifade edildiği standart olarak kabul edilmektedir. Kısa süreli gerilim değişimleri arasındaki küçük farklılıklar süre ve genlik değişimlerine göre belirlenmiştir. Yarım

çevrimden daha kısa süren olaylar geçicilikler, yarım çevrimden 1 dakikaya kadar olan olaylar kısa süreli değişimler, bir dakikadan uzun süreli olaylar ise uzun süreli değişimler olarak sınıflandırılmıştır [21].

EN50160:2000, normal işletme şartları altında elektrik dağıtım şebekelerindeki düşük ve orta gerilim karakteristiklerinin belirlendiği bir standarttır ve son kullanıcının kabul edebileceği sınırlar ve değerler açıklanmaktadır. Kısa ve uzun süreli kesintilerin, gerilim dalgalanmaları ve kırpışmaların, geçici gerilim yükselmelerinin, dengesizliklerin ve harmoniklerin tanımları yapılmıştır [22].

IEC 61000, elektronik cihazların hangi elektromagnetik olaylara neden olacağını ve hangi elektromagnetik olaylardan ne şekilde etkileneceğini inceleyen bir standarttır. Düşük frekans, yüksek frekans ve elektrostatik deşarj olayları olmak üzere üç ana başlık altında ifade edilmiştir [23].

ITIC Eğrisi, 60 Hz ve 120 V' luk dağıtım şebekesi için deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen geçicilikler, kesilmeler, gerilim çökmeleri, aşırı gerilimler, gerilim şişmesi gibi güç kalitesi problemlerinin genlik ve zamana bağlı olarak cihazlara etkisini göstermektedir [24].

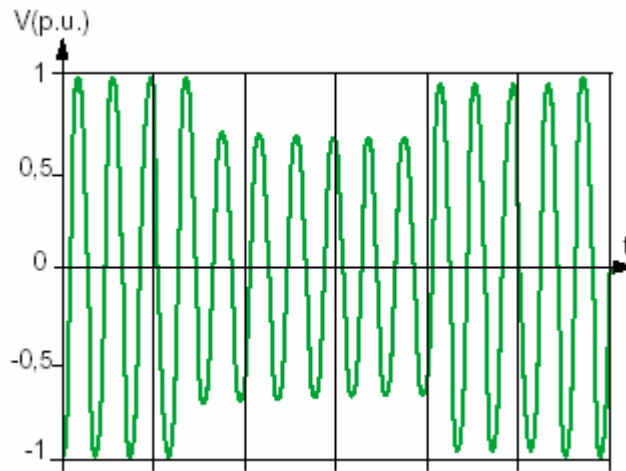
Tez çalışması boyunca ilgileneceğimiz güç kalitesi problemi, “Gerilim çökmesi” olarak ifade edilen ve nominal şebeke gerilimi etkin değerinin yarım periyot ile bir dakika zaman diliminde 0.1-0.9 pu seviyesi aralığında düşmesini ifade eden olaydır. Gerilim çökmesi ileriki bölümlerde detaylı biçimde ele alınacaktır.

3. GERİLİM ÇÖKMESİ

3.1. Giriş

Gerilim çökmeleri; kısa devreler, aşırı yükler veya büyük güçlü motor ve transformatörlerin devreye girmesi gibi nedenlerle oluşan, gerilimin RMS değerinde meydana gelen kısa süreli gerilim azalmalarıdır [1]. Gerilim çökmelerine olan ilginin temel sebebi, hız ayarlı sürücüler gibi hassas cihazlarda meydana getirdiği arızalardır. Bu tip cihazlar gerilimin rms değeri bir veya iki periyottan daha uzun bir süre boyunca %90' ın altına düşerse, zarar görebilir. Tabii ki gerilim çökmesinin endüstriye verdiği zarar, kesilmeler kadar değildir. Ancak, gerilim çökmelerinin sayısı kesilmelere göre daha çok olduğundan, toplam zararları daha fazladır [1]. Kısa kesilmeler ve uzun kesilmelerin birçoğu lokal dağıtım ağlarında oluşur. Ne var ki, gerilim çökmelerinin nedeni, yüzlerce kilometre ötedeki dağıtım şebekesinde meydana gelen bir kısa devreden kaynaklanabilir. Bu nedenle gerilim çökmesi, kesilmelere göre daha geniş çaplı bir problemdir. Kesilmelerin sayısı, besleme hattında yapılacak iyileştirmelerle azaltılırken, gerilim çökmelerinin sayısı, farklı besleme hatlarındaki ve hatta enerji iletim hatlarındaki iyileştirilmelerle düşürülebilir [1].

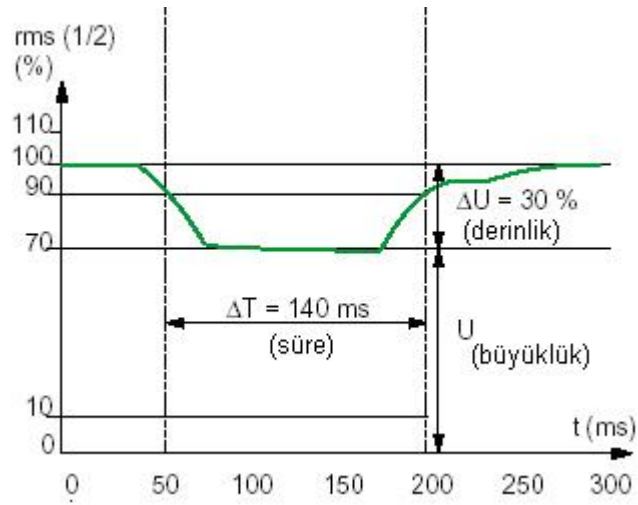
Kısa devre nedeniyle meydana gelen gerilim çökmesine örnek, Şekil 3.1' de verilmiştir. Yaklaşık iki periyot kadar süren bu örnekte gözükten büyüklük ve zaman değerleri, tipik bir gerilim çökmesinin temel özelliklerini göstermektedir.



Şekil 3.1. Gerilim çökmesi dalga formu.

3.2. Gerilim Çökmesi ile ilgili çalışmalar

Gerilim çökmeleri ile ilgili yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu, kısa devre arızaları ile ilgilenmektedir. Bunlar, ekipmanlara zarar veren gerilim çökmelerinin, büyük bölümünü oluşturur. Bunun dışında literatür incelendiğinde gerilim çökmesi ile ilgili çalışmaların, gerilim çökmelerinin nedenlerinin sınıflandırması, radyal olmayan şebekelerdeki davranışları [16], trafolar üzerinden alt ve üst gerilim kademelerine ne şekilde geçtikleri [17], iletim hattı mesafesi ile ilişkileri [18], gerilim faz açılarının nasıl etkilendiği [15] gibi konuların araştırıldığı görülmektedir.



Şekil 3.2. Gerilim çökmesi rms değerinin karakteristiği

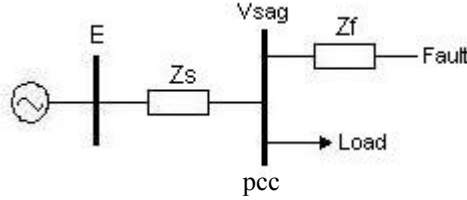
Şekil 3.2' de görülen grafik, elektrik dağıtım şebekesinin bir noktasında meydana gelen kısa devre esnasında gerilimin zamana bağlı olarak rms değerini vermektedir. 140 ms gibi kısa bir süre için gerilimin rms değeri % 30 oranında azalmakta yani gerilim çökmesine maruz kalmaktadır. Gerilimin rms değeri, sistem frekansının her bir veya yarım periyodu için hesaplanır.

Bölüm 3.2.1 ve 3.2.2' de Math H. J. Bollen' in gerilim çökmesi hesaplamaları incelenecektir. Bu kısım tez çalışmamın konusunu teşkil ettiğinden Math H.J. Bollen' in araştırmaları aynen alınmış ve yeniden üretilmiştir.

3.2.1. Simetrik Kısa Devrelerde Gerilim Çökmesi Hesaplamaları

Radyal sistemlerde gerilim çökmesi hesaplamaları için kullanılabilecek yöntemlerden biri basit bir metot olan, gerilim bölme metodudur. Şekil 3.3' deki

devre modelinde Z_S ve Z_F olarak iki empedans bulunmaktadır. Z_S , pcc (point of common coupling) noktasındaki kaynak empedansı; Z_F de pcc ile arıza noktası arasındaki empedans değeridir. Pcc, yükün ve arızanın ortak olarak beslendiği noktadır. Kısaca yük akımı ile arıza akımının ayrıldığı noktadır [1].



Şekil 3.3. Gerilim bölme metodu' na göre gerilim çökmesi devre modeli [1].

Gerilim bölme modelinde yük akımı, kısa devre akımı yanında çok küçük olduğundan ihmal edilir. Bu nedenle pcc ile yük arasında gerilim çökmesi olmadığı kabul edilir. Böylece pcc' deki gerilim, şu şekilde bulunabilir;

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

Kaynak gerilimi, tam olarak $E=1pu$ olarak kabul edilirse, bu gerilim çökmesi şu ifadeye dönüşür;

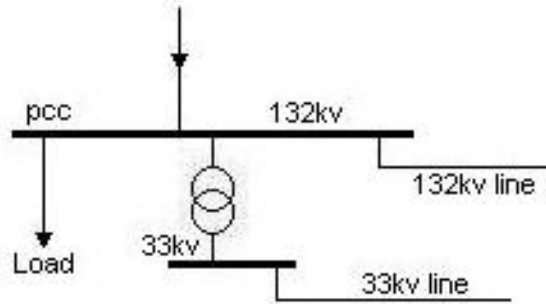
$$V_{sag} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} \quad (3.2)$$

Tüm arıza empedansı, Z_F empedansına eklendiği takdirde denklem 3.2' den anlaşılacağı gibi, arıza noktası müşteriye yaklaştıkça gerilim çökmesi daha derin olur. (Çünkü Z_F küçülmektedir) Aynı zamanda gerilim kademesi küçüldükçe Z_S büyüyeceğinden, gerilim çökmesi yine derin olur.

Denklem 3.2, gerilim çökmesi büyüklüğünün mesafe ile değişimi hesabında da kullanılabilir. Bu amaçla, $Z_F = z \cdot L$ olmak üzere gerilim çökmesi şu şekilde ifade edilir. (z :besleme hattı birim mesafe empedansı, L : kısa devre noktası ile pcc arasındaki mesafe)

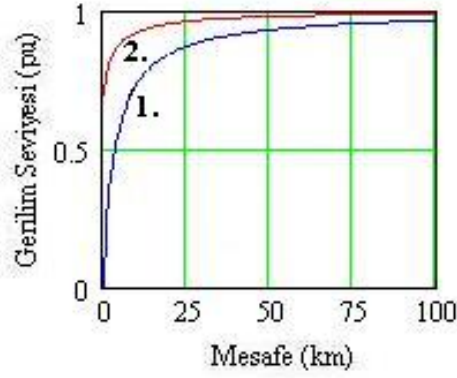
$$V_{sag} = \frac{z.L}{Z_S + z.L} \quad (3.3)$$

Şekil 3.4’ de arıza noktası ile pcc arasındaki empedans Şekil 3.3’ deki gibi sadece hatlardan veya kablolardan değil, aynı zamanda transformatör empedanslarından oluşmaktadır.

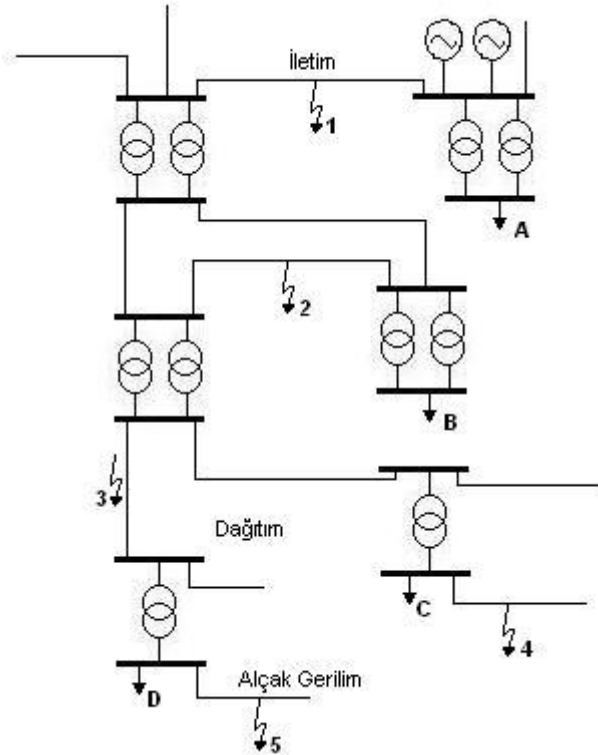


Şekil 3.4. Farklı iki gerilim kademesinin bulunduğu güç şebekesi modeli [1].

Transformatörler, kısa devre noktası ile pcc arasında olması halinde, büyük empedans değerleri ile düşük gerilim tarafındaki arızanın neden olduğu gerilim çökmesinin etkilerini azaltırlar. Transformatör empedansının gerilim çökmesi üzerindeki etkisini anlayabilmek için, Şekil 3.4’ ü göz önüne alalım. Empedansı 13.55Ω olan trafo’ nun düşük gerilim tarafı 33 kV, yüksek gerilim tarafı 132 kV’ tur. Yüksek gerilim tarafı kısa devre gücü 3000 MVA, düşük gerilim tarafında 900 MVA’ dır. Her iki pcc noktasına bağlı olan iletim hatlarının empedansı $0.3 \Omega/\text{km}$ ’ dir. Bu durumda, gerilim bölme metodu uygulandığında, 33 kV ve 132 kV baralarında meydana gelen gerilim çökmeleri, Şekil 3.5’ deki gibidir. 2 numara ile verilen eğri 33 kV’ luk iletim hattında meydana gelen kısa devrenin üst gerilim kademesindeki etkisini, 1 numara ile verilen eğri de 33 kV’ luk iletim hattında meydana gelen kısa devrenin aynı gerilim kademesindeki etkisini göstermektedir. Buna göre gerilim çökmesi, transformatörün hat empedanslarına oranla yüksek empedansı sebebiyle üst gerilim kademesinde çok zayıf olarak hissedilmektedir.



Şekil 3.5. Gerilim çökmesinin' nün trafo empedansına bağlı olarak yüksek ve alçak gerilim taraflarındaki değişimi.



Şekil 3.6. Örnek bir güç sisteminde kısa devre noktaları [1].

Şekil 3.6' da numaralı güç sisteminde 1' den 5' e kadar olan numaralar arıza oluşan noktaları, A' dan D' ye kadar olan isimlendirmelerde yükleri göstermektedir [1]. Şebeke üzerinde 1 numaralı noktada meydana gelecek kısa devre, transformatörler tarafından tüm şebekeye iletilecektir. Alt kademelerde kaynak bulunmadığından ciddi gerilim çökmeleri gözlemlenecektir. Buda A, B, C ve D müşterileri tarafından büyük gerilim çökmeleri olarak hissedilecektir. Ne var ki, A

tarafından hissedilen gerilim çökmesi derin olmasına rağmen, bağlı bulunan generatörler nedeni ile diğer müşterilerle aynı büyüklükte olmayacaktır.

2 numaralı noktada meydana gelecek bir kısa devre, A tarafından hissedilmeyecektir. Bunun nedeni gerilim kademeleri arasında bulunan transformatörlerin empedanslarının yüksek gerilim tarafına gerilim çökmesini büyük oranda geçirmemesidir. Aynı zamanda bağlı bulunan generatörlerde, gerilim çökmesi etkisini daha da azaltacaktır. Buna karşın alt kademelerde bulunan B, C, D müşterileri, gerilim çökmesini oldukça derin hissedecektir.

3 numaralı noktada, meydana gelecek kısa devre D müşterisinde çok büyük gerilim çökmesi olarak etkisini gösterecektir, aynı zamanda koruma sistemi devreye girene kadar kısa veya uzun süreli kesilmeler oluşacaktır. C müşterisinde, bir kesilme gözlemlenmemesine rağmen, derin gerilim çökmesi olacaktır. Eğer dağıtım sisteminde, hızlı geri kapamalı koruma sistemleri kullanıldıysa kalıcı bir arıza durumunda, C' de birbirini takip eden 2 veya daha çok sayıda gerilim çökmesi kısa aralıklarla görülür. B müşterisi, transformatör empedansları nedeni ile sığ bir gerilim çökmesi hissedecek, A müşterisi ise muhtemelen bu arızayı fark etmeyecektir.

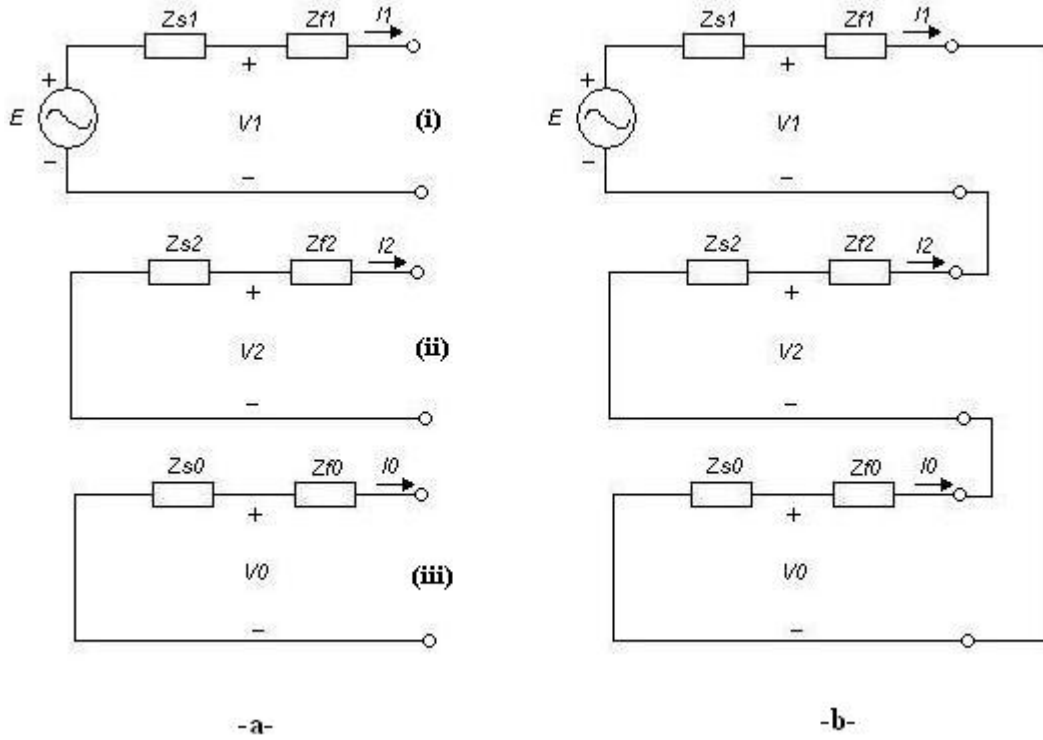
Son olarak, 4 numaralı noktada meydana gelecek kısa devre, C müşterisi için derin bir gerilim çökmesi, D müşterisi için ise sığ bir gerilim çökmesi olarak algılanacak A ve B hiçbir gerilim çökmesi hissetmeyecektir. 5 numaralı noktada oluşacak kısa devre bunun tersi olarak D' de derin, C' de sığ gerilim çökmesi olarak hissedilecektir.

Tablo 3.1. Örnek güç sisteminde, kısa devre noktasına bağlı olarak yüklerden hissedilen gerilim çökmeleri [1].

Kısa Devre Noktası	Derin Çökme	Sığ Çökme	Etkilenmeyen
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

3.2.2. Simetrik Olmayan Kısa Devrelerdeki Hesaplamaları

Şimdiye kadar anlatılan hesaplamalar, gerilim bölmesi ile yapılan metotla üç faz kısa devrelerini inceledi ve bu nedenle tüm hesaplamalarda pozitif sıra empedansı değerleri kullanıldı. Ancak, güç sistemlerinde meydana gelen kısa devrelerin çoğunluğu, bir faz kısa devrelerdir. Bu durumda, simetrik olmayan arızaların analizi için her üç fazın da simetrik bileşenler teoremine göre incelenmesi gerekir [1].



Şekil 3.7. Bir faz kısa devresi hesaplarında kullanılan simetrik bileşenler devre yapıları; -a- pozitif (i), negatif (ii) ve sıfır (iii) sıra devreleri; -b- bir faz kısa devresi için eşdeğer devre bağlantı şekli [2].

Burada, bir faz kısa devresi durumunda her üç fazın gerilim seviyelerinin hesaplanabilmesi için, simetrik bileşenler yöntemi' nin sonuçları kullanılacaktır.

Bir faz kısa devresi gibi simetrik olmayan arızalar için gerilim bölme metodu simetrik bileşenler metodu yardımıyla kullanılabilir. Buna göre Şekil 3.7: -a-'daki gibi pozitif, negatif ve sıfır sıra devrelerinden faydalanılır. V_1 , V_2 ve V_0 sırasıyla bu üç devredeki pcc'lerin gerilim seviyelerini; Z_{s1} , Z_{s2} ve Z_{s0} kaynak empedansı değerlerini ve son olarak da Z_{f1} , Z_{f2} ve Z_{f0} da besleme hattı empedans değerlerini sembolize etmektedir. Üç devreden geçen akımlar I_1 , I_2 , I_0 'dır. Pozitif devre

kaynak değeri E ile belirtilirken negatif ve sıfır sıra devrelerinde kaynak bulunmamaktadır.

Simetrik olmayan arıza'nın türüne göre bu üç devrenin bağlantı şekli değişecektir. Burada incelenen durum bir faz kısa devresi olduğundan kısa devre halinde meydana gelecek eşdeğer devre Şekil 3.7: -b-' deki gibi olacaktır.

Sistemin yüksüz olduğu varsayımına dayanarak pozitif sıra devresindeki kaynak değeri $E=1$ alınabilir. Bu durumda gerilim bölme metodu kullanılacak olursa V_1 , V_2 ve V_0 gerilimleri denklem 3.4' deki şekilde hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{Z_{F1} + Z_{S2} + Z_{F2} + Z_{S0} + Z_{F0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \\ V_2 &= \frac{Z_{S2}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \\ V_0 &= \frac{Z_{S0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \end{aligned} \quad (3.4)$$

PCC noktasındaki her bir fazın gerilim değeri simetrik bileşenler domeyninden faz domeyn' ine geçilerek bulunur. Bunun için denklem 3.5' deki dönüşüm kullanılır ($a = 1^{\angle 120^\circ}$).

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Buradan denklem 3.6' daki eşitlik elde edilir.

$$\begin{aligned} V_a &= V_1 + V_2 + V_0 \\ V_b &= a^2 V_1 + a V_2 + V_0 \\ V_c &= a V_1 + a^2 V_2 + V_0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

V_1 , V_2 ve V_0 değerleri yerlerine konulup gerekli sadeleştirmeler yapıldığında fazların değerleri denklem 3.7' de görüldüğü şekilde bulunacaktır.

$$\begin{aligned}
V_a &= 1 - \frac{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \\
V_b &= a^2 - \frac{a^2 Z_{S1} + a Z_{S2} + Z_{S0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \\
V_c &= a - \frac{a Z_{S1} + a^2 Z_{S2} + Z_{S0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})}
\end{aligned} \tag{3.7}$$

Arıza oluşmayan iki faz arasındaki gerilim değeri denklem 3.8’ de görüldüğü gibidir. Fark edileceği üzere gerilim değeri sadece pozitif ve negatif sıra devreleri empedanslarına bağlıdır. Bu değerler neredeyse birbirinin aynı olduğundan V_b - V_c değeri arıza ile değişmeyecektir.

$$V_b - V_c = a^2 - a \left[1 - \frac{Z_{S1} - Z_{S2}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \right] \tag{3.8}$$

Direkt topraklı sistemlerde faz gerilimleri Z_{S1} , Z_{S2} ve Z_{S0} birbirine neredeyse eşit olduklarından denklem 3.9’ daki değerleri alır.

$$\begin{aligned}
V_a &= - \frac{Z_{S1}}{\frac{1}{3}(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + Z_{S1}} \\
V_b &= a^2 \\
V_c &= a
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Empedans üzerinden topraklı sistemlerde faz gerilimleri Z_{S1} ve Z_{S2} birbirine neredeyse eşit olduğundan denklem 3.10’ daki değerleri alır.

$$\begin{aligned}
V_a &= 1 - \frac{Z_{S0} + 2Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})} \\
V_b &= a^2 - \frac{Z_{S0} + 2Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})} \\
V_c &= a - \frac{Z_{S0} + 2Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Bu noktada dikkat edilmesi gereken şudur; arıza oluşmayan hatlarda gerilim çökmesi sadece Z_{S0} ’ a bağlıdır. Gerilim çökmesi şebekede düşük gerilim seviyelerine doğru yol alırken transformatörlerin yüksek empedans değerleri sıfır sıra empedans’ larını engellediğinden arızasız fazlardaki gerilim çökmeleri azalır. Hatta aynı gerilim kademesinde meydana gelen bir kısa devrede transformatörler genelde

üçgen bağlandığından gerilimin sıfır sıra bileşenini hissetmeyecektir. Bu nedenlerden ötürü arızasız fazlardaki gerilim çökmesini yok edecek bir sıfır sıra gerilimi denklem 3.10' a eklenebilir. Bu durumda sonuç denklem 3.11' deki gibi olacaktır.

$$\begin{aligned} V'_a &= V_a - \frac{Z_{S0} - Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})} = 1 - \frac{3Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})} \\ V'_b &= V_b - \frac{Z_{S0} - Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})} = a^2 \\ V'_c &= V_c - \frac{Z_{S0} - Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})} = a \end{aligned} \quad (3.11)$$

Kısa devre oluşan A fazındaki gerilim değeri ise tekrar düzenlendiğinde denklem 3.12' deki gibi bulunur.

$$V'_a = 1 - \frac{Z_{S1}}{\frac{1}{3}(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + \frac{1}{3}(Z_{S0} - Z_{S1}) + Z_{S1}} \quad (3.12)$$

Paydada görülen $1/3(Z_{S0} - Z_{S1})$ denklem 3.9' daki paydada ek olarak gelmiştir. Bu değer pcc ile kısa devre noktası arasındaki ek empedans değerini göstermektedir. Bu empedasın' ın pozitif olması durumunda, $Z_{S0} > Z_{S1}$ olacaktır ve gerilim çökmesi daha sığ meydana gelecektir. Empedans üzerinden topraklı sistemlerde $Z_{S0} \gg Z_{S1}$ olduğundan tam pcc noktasındaki bir kısa devre dahi sığ bir gerilim çökmesine neden olur. Direkt topraklı sistemlerde $Z_{S0} < Z_{S1}$ olduğundan paydadaki ek empedans negatif olur.

$E=1$ kabul edildiğinde faz-nötr gerilimleri denklem 3.13' deki gibi bulunur.

$$\begin{aligned} V_{an} &= 1 - \frac{3Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})} \\ V_{bn} &= a^2 \\ V_{cn} &= a \end{aligned} \quad (3.13)$$

Buraya kadar yapılan hesaplamalar bölüm 3.2.6' daki gerçek bir şebeke üzerinde yapılan gerilim çökmesi analizlerinde kullanılacaktır.

3.2.3. Transformator bağlantı şekilleri

Transformator bağlantı şekilleri çok çeşitli olmasına karşın üç faz gerilim çökmelerinin bir gerilim seviyesinden diğerine geçişini açıklayabilmek için 3 temel tip altında sınıflandırma yapmak yeterli olur [1].

- **Tip-1:** Gerilim değerinde değişiklik meydana getirmeyen transformatörlerdir. Birim değer olarak sekonder tarafın gerilimi primer tarafın gerilimi ile aynıdır. Bu tipe tek örnek her iki tarafı da topraklı Y-Y transformatörler verilebilir.
- **Tip-2:** Sıfır sıra geriliminin etkisini öne çıkaran transformatörlerdir. Sekonder taraf gerilimleri primer taraftan sıfır sıra gerilim değeri kadar farklıdır. Bir veya her iki tarafıda topraklanmamış Y-Y trafolar, üçgen-üçgen trafolar ve üçgen-zigzag trafolar da bu tipe örnektir.
- **Tip-3:** Faz-toprak ve faz arası gerilimlerini değişen transformatörlerdir. Bu tipteki transformatörlerde iki primer taraf arasındaki gerilim farkı sekonder gerilimini verir. Üçgen-yıldız, yıldız-üçgen ve yıldız-zigzag trafolar örnek olarak verilebilir.

Bu kategoriler içerisinde primer ve sekonder taraflar arasındaki açı farkları birbirinden değişik olan çeşitli trafolar (Yd1, Yd11 gibi) bulunabilir. Cihazlar tarafından hissedilen gerilim çökmeleri açısından primer ve sekonder gerilim arasındaki bu açı farklılıklarının hiçbir önemi yoktur. Esas önemli olan nokta arıza öncesi ve sonrası gerilimler arasındaki genlik ve faz açısı farklılıklarıdır. Arıza öncesi ve arıza esnasındaki fazör diyagramları cihaza hiç etkimeksizin dönüştürülebilir. Bu dönüştürme zaman ekseninde sıfır noktasındaki bir kayma olarak görülür. Bu durum matematiksel olarak aşağıdaki dönüşüm matrisleri ile modellenebilir.

$$T_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

$$T_2 = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

$$T_3 = \frac{j}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Denklem 3.14' te T_1 olarak görülen matris bir birim matristir. Denklem 3.15' de görülen matris ise gerilimin sıfır sıra bileşenini çıkartır. T_2 matrisi aslında sıfır sıra geriliminin $\frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)$ olduğu anımsanırsa daha iyi anlaşılabilir. Denklem 3.16' da T_3 matrisi ile sağlanan dönüşüm için, $T_3^2 = T_2$ olduğundan denilebilir ki iki adet Dy transformatörün kaskat bağlanmasının gerilim çökmesi üzerindeki etkisi bir Dd transformatörünki ile aynı olacaktır.

3.2.4. Gerilim Çökmelerinin Transformatörler üzerinden Yayılımı

Bu üç tip transformatör bir faz ve faz arası kısa devrelerin neden olduğu gerilim çökmelerine de uyarlanabilir. Çalışma süresince üç faz ve bir faz kısa devreler ile ilgilendiğimiz için aşağıda yalnızca bu durumlar ile ilgili kombinasyonlara değinilmiştir [1];

- *Transformatörsüz ve yıldız bağlı yük' te bir faz kısa devresi:* X1 türü gerilim düşmesi olarak adlandırılacaktır. Tip1 transformatör aynı etkiyi göstermektedir.
- *Transformatörsüz ve üçgen bağlı yük' te bir faz kısa devresi:* X2 türü gerilim düşmesi olarak adlandırılacaktır.
- *Tip2 transformatör ve yıldız bağlı yük' te bir faz kısa devresi:* Tip2 transformatör gerilimin sıfır sıra bileşenini yok eder. Bir faz kısa devresi durumunda faz geriliminin sıfır sıra bileşeni $\frac{1}{3}(V-1)$ ' dir. Buna göre gerilimler için Denklem 3.17' deki değerler elde edilir;

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{1}{3} + \frac{2}{3}V \\ V_b &= -\frac{1}{6} - \frac{1}{3}V - \frac{1}{2}j\sqrt{3} \\ V_c &= -\frac{1}{6} - \frac{1}{3}V + \frac{1}{2}j\sqrt{3} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Bu değerler yeni bir tür gerilim düşmesi olarak görünse de üçgen bağlı yükteki faz arası kısa devresi esnasında oluşanla benzer özellikler göstermektedir. Şu an için X3 türü gerilim düşmesi olarak adlandırılacaktır.

- *Tip2 transformatör ve üçgen bağlı yük' te bir faz kısa devresi:* Üçgen bağlı bir yük tarafından hissedilecek olan faz arası gerilimlerde sıfır sıra bileşeni bulunmaz. Bu sebeple Tip2 transformatörün gerilim çökmesinin değerinde herhangi bir etkisi yoktur. Bu sebeple gerilim çökmesi halen X2 türü' ne girmektedir.
- *Tip3 transformatör ve yıldız bağlı yük' te bir faz kısa devresi:* Tip3 transformatör faz gerilimlerini hat gerilimlerine çevirir. Bu sebeple sekonder tarafta yıldız bağlı bulunan bir yük gerilim çökmesini primer tarafta üçgen bağlı bir yükün hissedeceği şekilde hisseder. Bu durumda X2 türü gerilim çökmesidir.
- *Tip3 transformatör ve üçgen bağlı yük' te bir faz kısa devresi:* Bu durumda primer tarafta yıldız bağlı yükten sekonder tarafta üçgen bağlı yüke olmak üzere iki farklı değişim söz konusudur. Bu geçişlerin her biri T_3 değişim matrisi ile ifade edilebilir. Peş peşe gelen bu iki değişim T_2 değişim matrisi' nin etkisini gösterecektir. Bu sebeple üçgen bağlı bu yük tarafından hissedilecek olan gerilim çökmesi Tip2 transformatör arkasında yıldız bağlı bir yükün hissedeceği gerilim çökmesi ile aynı olacaktır. Bu duruma X3 türü gerilim çökmesi denilebilir.

Aşağıda Tablo3.2' de, yukarıda bahsi geçen gerilim çökmesi türlerinin önceden karakteristikleri verilen üç tip transformatör üzerinden geçerken ne şekilde değişime uğrayacaklarını göstermektedir.

Tablo 3.2. Gerilim çökmelerinin transformatör tiplerine göre yayılımı [1].

Gerilim Çökmesi Türü	Transformatör Tipi		
	Tip1	Tip2	Tip3
X1	X1	X3	X2
X2	X2	X2	X3
X3	X3	X3	X2

3.2.5. Temel gerilim çökmesi türleri

Bir faz kısa devresi arızaları 3 türde gerilim çökmelerine neden olur. Buna göre;

X1 türü gerilim çökmesi durumunda;

$$\begin{aligned} V_a &= V \\ V_b &= -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3} \\ V_c &= -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3} \end{aligned} \quad (3.18)$$

X2 türü gerilim çökmesi durumunda;

$$\begin{aligned} V_a &= 1 \\ V_b &= -\frac{1}{2} - \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3}V\right)j\sqrt{3} \\ V_c &= -\frac{1}{2} + \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3}V\right)j\sqrt{3} \end{aligned} \quad (3.19)$$

X3 türü gerilim çökmesi durumunda;

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{1}{3} + \frac{2}{3}V \\ V_b &= -\frac{1}{6} - \frac{1}{3}V - \frac{1}{2}j\sqrt{3} \\ V_c &= -\frac{1}{6} - \frac{1}{3}V + \frac{1}{2}j\sqrt{3} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Gerilim değerleri elde edilir. Bu üç tür dışında tüm fazların aynı miktarda çökmeye maruz kaldığı üç faz kısa devresi sonucu oluşan gerilim çökmesi de vardır.

$$\begin{aligned} V_a &= V \\ V_b &= -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3} \\ V_c &= -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Üç faz ve bir faz kısa devreler için belirlenen bu 4 tür gerilim çökmesinin fazör diyagramları ile birlikte gösterimi Şekil 3.8' de verilmiştir. Tüm gerilim çökmeleri %50 genlikte olup denklemlerin neyi ifade ettiği açıkça görülebilmektedir.

$V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$	A Tipi
$V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$	B Tipi
$V_a = 1$ $V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$	C Tipi
$V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$	D Tipi

Şekil 3.8. Dört tür gerilim çökmesinin matematiksel ve fazör diyagramları ile gösterimleri [1].

Tablo 3.3. Arıza türüne ve yük bağlantı şekline göre gerilim çökmesi türleri [1].

Arıza Türü	Yıldız Bağlı Yük	Üçgen Bağlı Yük
Üç faz	A	A
Bir faz	B	C

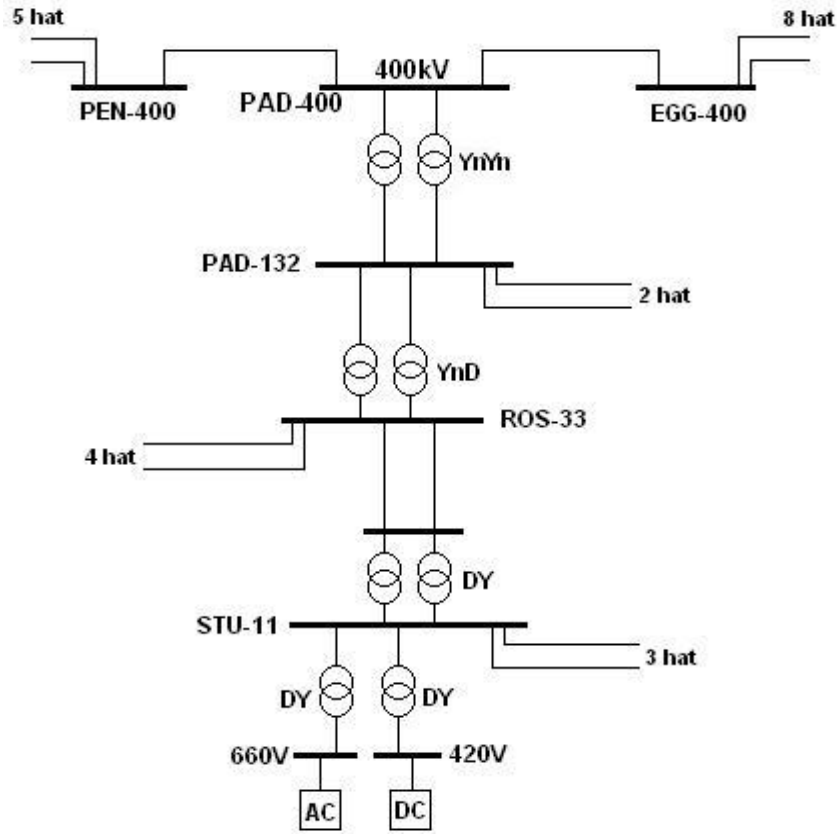
Tablo 3.4. Gerilim çökmelerinin transformatör çeşitlerine göre düşük gerilim seviyelerine yayılımı [1].

Transformatör Bağlantı Şekli	A Tipi Gerilim Çökmesi	B Tipi Gerilim Çökmesi	C Tipi Gerilim Çökmesi	D Tipi Gerilim Çökmesi
YN-yn	A	B	C	D
Yy, Dd, Dz	A	D	C	D
Yd, Dy, Yz	A	C	C	C

Tüm bu bilgilerin eşliğinde Şekil 3.9’da görülen gerçek şebeke üzerinde Bölüm 5 ve Bölüm 6’ da yapılan hesaplamalarda görülecektir ki, ROS33 barasında bulunan Yz (zigzag trafo üzerinden topraklı yıldız-üçgen trafo) trafo üzerinden alt kademeye yayılmakta olan B tipi gerilim çökmesi, alt kademeye C tipi çökme olarak geçmektedir. Yani trafo öncesinde bir fazda gerilim çökmesi yaşanırken, trafo sonrasında iki fazda gerilim çökmesi yaşanmaktadır. Bu durum hem MATLAB hem de ATP modellerinden elde edilen grafiklerde gösterilmiştir.

3.2.6. Gerçek Şebeke Üzerinde Yapılan Hesaplamalar

Aşağıda Şekil 3.8’deki şebeke Math H. J. Bollen’ in bir makalesinde [17] incelenmiş gerçek bir şebeke olup, Kuzey İngiltere’deki bir kağıt fabrikasına aittir. Fabrikada ikisi dc hız ayarlı sürücü (Adjustable Speed Drive), biride ac hız ayarlı sürücü ile çalıştırılan üç adet üretim hattı bulunmaktadır.



Şekil 3.9. Kuzey İngiltere’ deki bir kağıt fabrikasına ait gerçek bir güç şebekesi [1, 17].

Dağıtım şebekesi boyunca gerilim, ac sürücüler için 660 V, dc sürücüler için ise 420 V ye kadar indirilmektedir. Müşterinin sıkıntısı, kaynağın sağladığı güç kalitesindeki yetersizliktir. Sistemde meydana gelen arızalar sonucu oluşan gerilim çökmeleri, üretim kademesinde sorunlara neden olmaktadır. Ancak, arızanın kaynağı tam olarak bilinmemesine karşın, ilk şüphelenilen unsur, kullanılan hız ayarlı güç kaynaklarıdır [17].

Gerilim çökmesi analizinde yapılacak ilk adım, olası pcc’ leri belirlemektir. STU-11, ROS-33, PAD-132, PAD-400, PEN-400 ve EGG-400 baraları, güç sistemindeki pcc noktalarıdır. 100 MVA baz değerine göre belirlenen empedanslar ve transformatör bağlantı şekilleri ile topraklama empedansları aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 3.5. 100 MVA baz değeri için hesaplanmış kaynak empedansı değerleri [1].

	Sıfır Sıra Empedansı (pu)	Pozitif ve Negatif Sıra Empedansları (pu)
11 kV	7.87+j2.2	0.0494+j0.659
33 kV	2.51	0.0123+j0.183
132 kV	0.00047+j0.0275	0.0009+j0.0286
400 kV		
EGG' den bakış	0.00329+j0.02273	0.0084+j0.01061
PEN' den bakış	0.00653+j0.05124	0.00132+j0.0194

Tablo 3.6. Besleme hatları empedans değerleri [1].

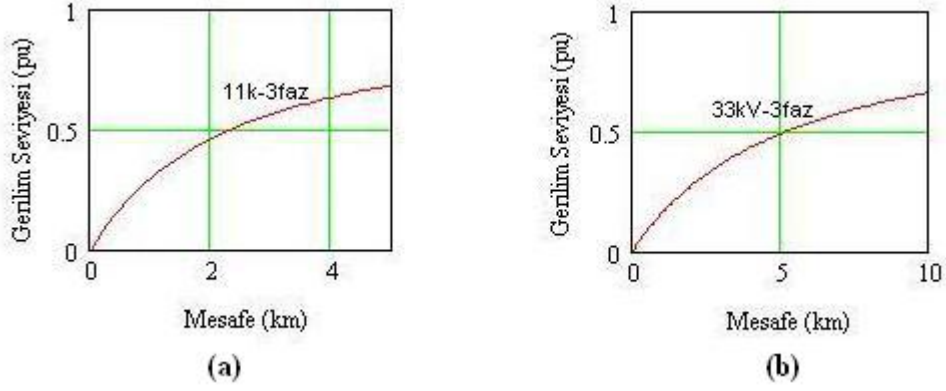
	Sıfır Sıra (pu)	Pozitif ve Negatif Sıra (pu)	Hat uzunluğu
11 Kv	0.184+j1.12	0.097+j0.26	5 km
33 kV	0.02795+j0.15256	0.01435+j0.03102	10 km
132 Kv	0.0023+j0.065	0.00101+j0.00257	2 km
400 Kv	0.00007+j0.0005	0.00001+j0.00018	>1000 km

Tablo 3.7. Transformatör bağlantı şekilleri ve nötr topraklamaları [1].

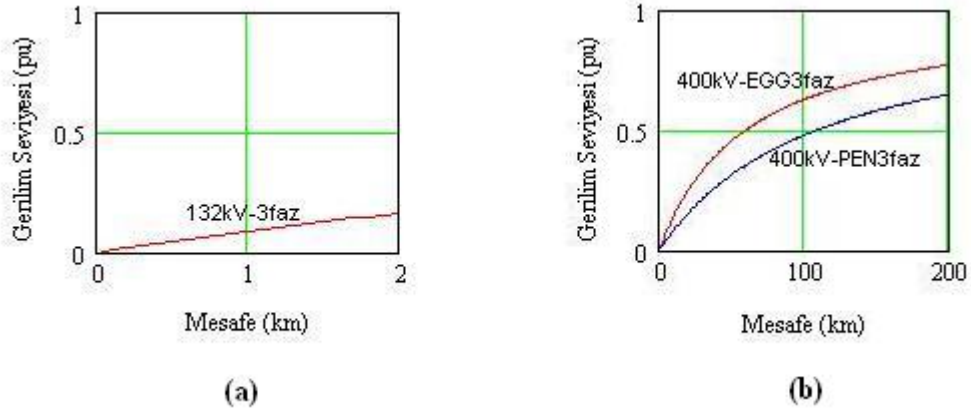
Gerilim Kademesi	Transformatör Bağlantı Şekilleri	Alçak Gerilim Tarafı Nötr Topraklaması
400 kV		Direkt topraklı
400/132 kV	YY oto transformatör	Direkt topraklı
132/33 kV	Yıldız-Üçgen	Zig-zag trafo üzerinden direnç topraklı
33/11 kV	Üçgen-Yıldız	Direnç topraklı
11/660 kV		
11/420 kV	Üçgen Yıldız	Direkt topraklı

3.2.6.1. Üç Faz Kısa Devre Sonuçları

Gerçek şebekenin tablolarındaki verileri kullanılarak bölüm 3.2.1' deki gerilim bölme metodu ile yapılan analizlerde Şekil 3.10-a ve 3.10-b' deki değişimler elde edilmiştir. üç faz kısa devresinin pcc noktasına uzaklığı arttıkça tüm baralarda gerilim çökmesinin azaldığı açıkça görülmektedir. Tüm gerilim kademeleri için gerilim bölme metodu ile yapılan hesaplamalar Ek.4' de verilmiştir.



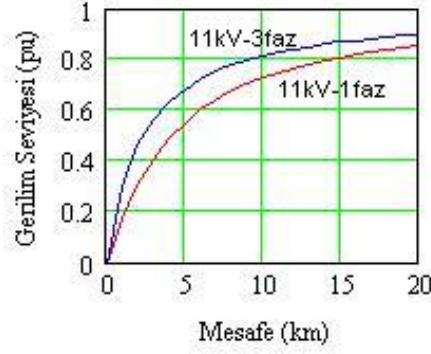
Şekil 3.10. Gerilim bölmesi metoduyla hesaplanan gerilim çökmesinin; (a) 11 kV barasındaki mesafeye bağlı değişimi; (b) 33 kV barasındaki mesafeye bağlı değişimi.



Şekil 3.11. Gerilim bölmesi metoduyla hesaplanan gerilim çökmesinin; (a) 132 kV barasındaki mesafeye bağlı değişimi; (b) EGG-400 ve PEN-400 baralarındaki mesafeye bağlı değişimi.

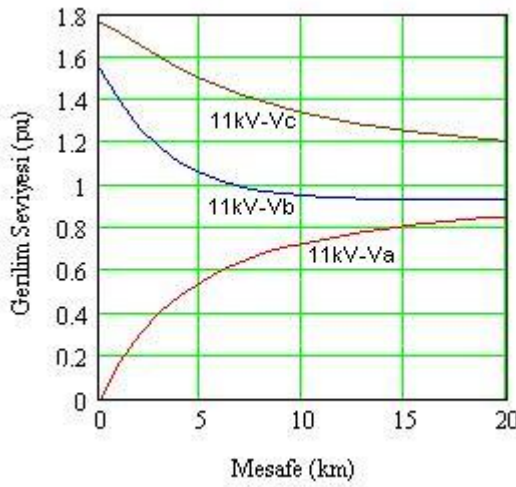
3.2.6.2. Bir Faz Kısa Devre Sonuçları

Gerçek şebekenin tablolarındaki verileri kullanılarak bölüm 3.2.2' de elde edilen denklemler ile yapılan analizlerde Şekil 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 ve 3.16' daki değişimler elde edilmiştir. Bir faz kısa devresinin pcc noktasına uzaklığı arttıkça tüm baralarda gerilim çökmesinin azaldığı görülmektedir. Ancak üç faz kısa devresi ile kıyaslandığında bir faz kısa devresi gerilim çökmesi daha derin olmaktadır. 11 kV kademesi için yapılan hesaplamalar Ek.4' de verilmiştir.

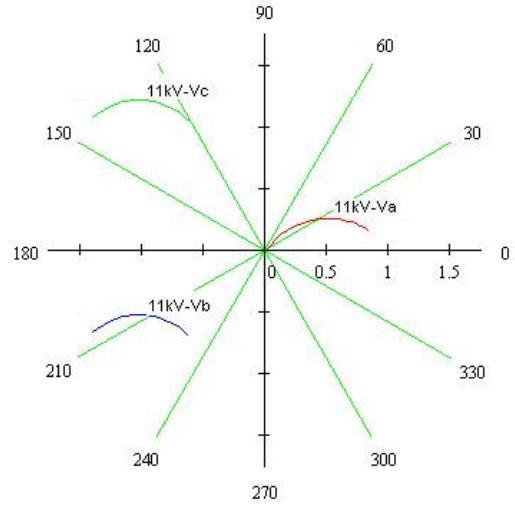


Şekil 3.12. Bir faz ve üç faz kısa devreleri sonucu 11 kV barasındaki gerilim değerinin mesafeyle değişimleri.

11 kV barasına bağlı besleme hatlarında meydana gelen bir faz kısa devresinin pcc noktasına mesafesi ile değişen faz gerilimleri ve faz açısı kaymaları Şekil 3.13’ de görülmektedir. Kısa devre olan hatta gerilim çökmesi yaşanırken sağlıklı iki hatta ise gerilim şişmesi olduğu görülmektedir. Aynı zamanda faz açıları da kaymalar meydana gelmektedir.



(a)

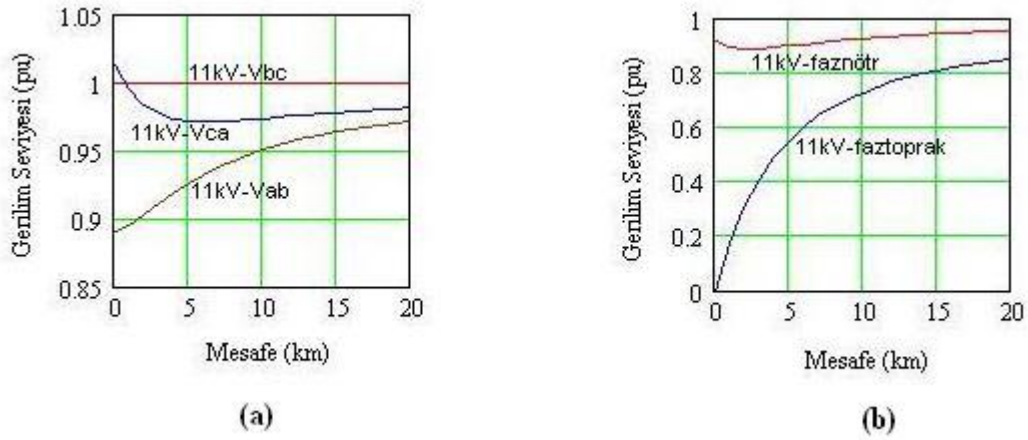


(b)

Şekil 3.13. Bir faz kısa devresi sonucu 11 kV barasındaki; (a) üç fazın gerilim büyüklüğünün mesafeyle değişimi; (b) üç fazın faz-açılarındaki kaymanın mesafeyle değişimi.

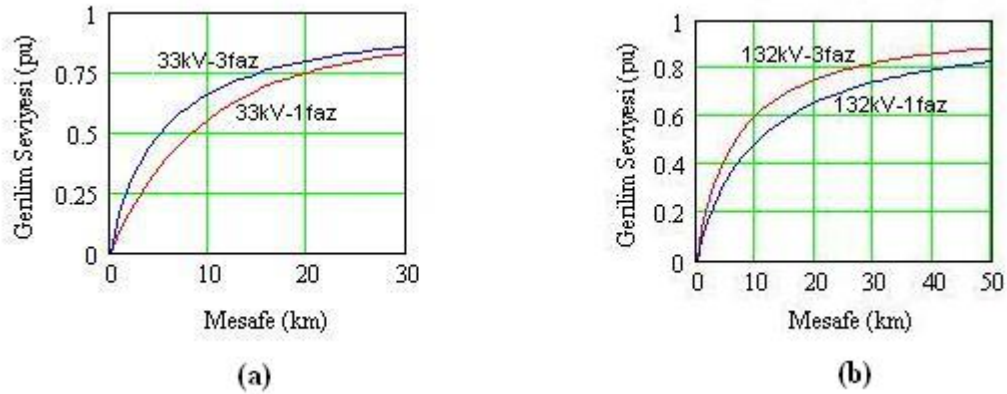
11kV barasına bağlı besleme hatlarında meydana gelen bir faz kısa devresinin pcc noktasına mesafesi ile değişen faz-arası ve faz-nötr ile faz-toprak gerilim

seviyeleri Şekil 3.14’ de görülmektedir. Bir faz kısa devresi sonucunda faz arası gerilimlerin ve faz-nötr geriliminin fazla etkilenmediği görülmektedir.



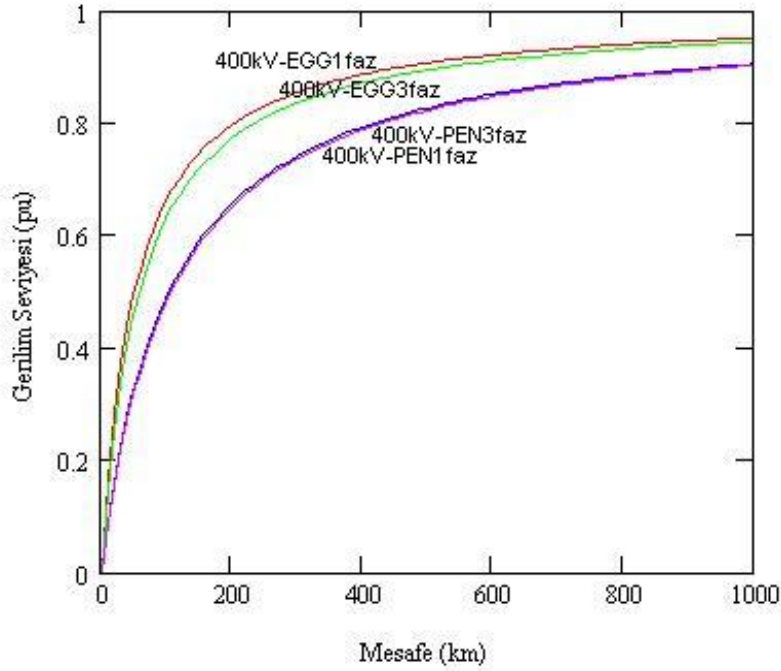
Şekil 3.14. Bir faz kısa devresi sonucu 11 kV barasındaki; (a) faz arası gerilimlerin mesafeyle değişimi; (b) faz-nötr ve faz-toprak gerilimlerinin mesafeyle değişimi.

33 kV ve 132 kVbarasına bağlı besleme hatlarında meydana gelen üç faz ve bir faz kısa devrelerinin pcc noktasına mesafesi ile değişen faz gerilimleri Şekil 3.15-a ve Şekil 3.15-b’ de görülmektedir. Bir faz kısa devresi sonucunda oluşan gerilim çökmesi her ikisinde de üç faz kısa devresi sonucunda oluşana göre daha derindir.



Şekil 3.15. Bir faz ve üç faz kısa devreleri sonucu; (a) 33 kV barasındaki gerilim değerinin mesafeyle değişimi; (b) 132 kV barasındaki gerilim değerinin mesafeyle değişimi.

PEN400 ve EGG400 barasına bağlı besleme hatlarında meydana gelen üç faz ve bir faz kısa devrelerinin pcc noktasına mesafesi ile değişen faz gerilimleri Şekil 3.16’ da görülmektedir. Bir faz kısa devresi sonucunda oluşan gerilim çökmesi her ikisinde de üç faz kısa devresi sonucunda oluşana göre daha derindir.



Şekil 3.16. Bir faz ve üç faz kısa devreleri sonucu; EGG400 kV ve PEN400 kV baralarındaki gerilim değerlerinin mesafeyle değişimleri.

3.3. Sonuç

Gerilim bölme metodu ile yapılan analizler sonucunda şebeke kısa devre gücü ile gerilim çökmesi etkisinin ters orantılı olduğu görülmektedir. Kısa devre gücü yüksek olan şebekelerde meydana gelen üç faz ve bir faz kısa devresi arızalarında gerilim çökmelerinin etkisi daha az hissedilmektedir. Kısa devre noktasının gerilim kademesine olan uzaklığının artması da hat empedansının artmasına bağlı olarak gerilim çökmesinin etkisini azaltmaktadır. Buna göre üç faz veya bir faz kısa devreleri için gerilim çökmesinin en etkin hissedileceği durum kısa devre gücü düşük bir şebekede kısa devre noktasının gerilim kademesine (pcc) yakın olması durumudur.

Farklı gerilim seviyelerinin olduğu şebekelerde, kullanılmakta olan transformatörler büyük empedans değerleri ile arıza sonrasında meydana gelecek gerilim çökmelerinin üst gerilim kademesine iletilmesini sınırlandırır. Bunun nedeni transformatör eşdeğer empedansının devredeki diğer empedanslardan büyük olmasıdır. Ancak oluşacak gerilim çökmeleri alt gerilim kademelerine şiddetli olarak hissedilecektir. Bunun dışında transformatör yıldız noktası topraklamaları da bir faz kısa devresi durumunda yaşanacak gerilim çökmeleri üzerinde etkilidir. Bununla

ilgili olarak nötr topraklama türleri Bölüm 4’ de incelenecek ve direnç üzerinden topraklı gerçek şebekede topraklama direncinin etkisi Bölüm 6’ da yapılan hesaplamalar üzerinden analiz edilecektir.

4. GÜÇ SİSTEMLERİNDE NÖTR TOPRAKLAMASI TÜRLERİ

4.1. Giriş

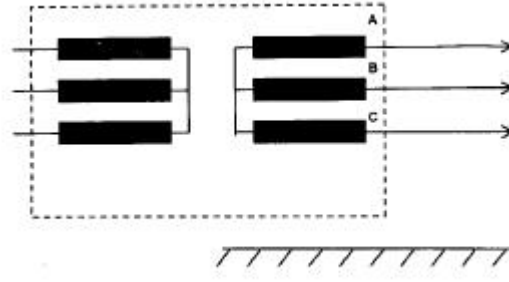
Topraklı şebekeler şebekenin en az bir noktasının toprağa bağlanmış olduğu şebekelerdir [5]. IEEE std 142-1991 [25]' ye göre topraklı sistem, “En az bir iletkeni veya bir noktasının (Orta iletken veya transformatör veya jeneratörün nötr noktası) bilerek ve isteyerek, ister direk ister bir empedans üzerinden toprağa bağlandığı sistem”dir.

Bir güç sisteminde nötr topraklaması dört farklı şekilde olabilir;

- Nötr noktası yalıtılmış şebekeler (topraklanmamış),
- Nötr noktası direkt topraklanmış şebekeler,
- Nötr noktası empedans üzerinden topraklanmış şebekeler,
- Nötr noktası kompanze edilerek topraklanmış şebekeler.

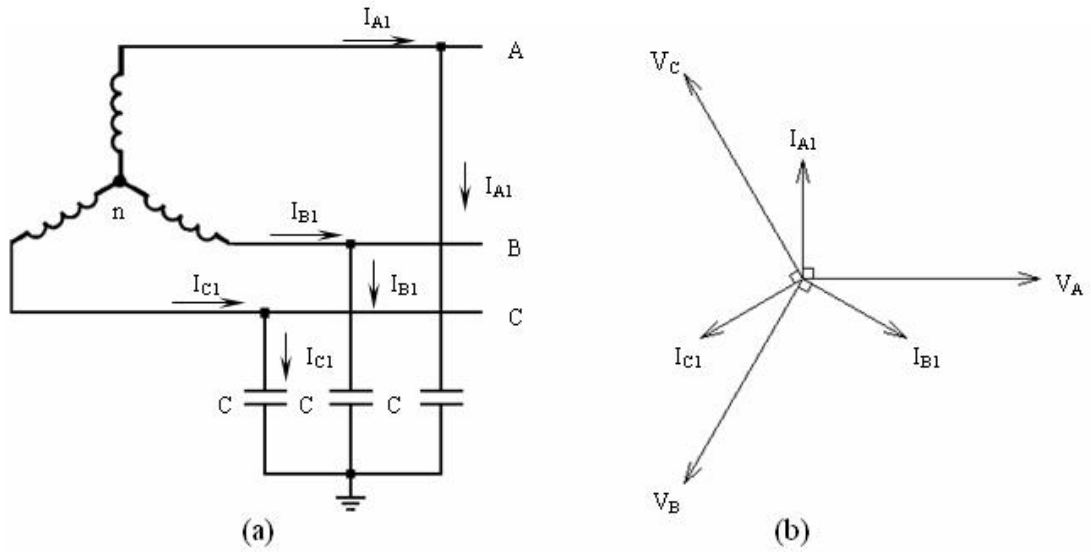
4.2. Nötr Noktası Yalıtılmış Şebekeler

Nötr Noktası yalıtılmış şebekeler, IEEE Std. C62.92.1 [26]' da “Gerilim ölçücü veya diğer çok yüksek empedanslı cihazlar haricinde bilerek veya isteyerek toprağa temas ettirilmeyen şebekelerdir” şeklinde açıklanmaktadır. Şekil 4.1' de görüldüğü üzere nötr noktası (veya noktaları) ve toprak arasında hiç bir maksatlı bağlantı bulunmaz [27]. Kısa devre esnasında oluşacak arıza akımı sadece faz iletkenleri ile toprak arasında oluşan hat kapasiteleri üzerinden akabilir, bu nedenle düşük genliklidir. Bir faz kısa devresi durumunda sağlıklı fazların gerilimi faz-arası gerilim değerine kadar yükselir. Şebekede kullanılacak izolasyon özellikleri buna göre belirlenmelidir [28].



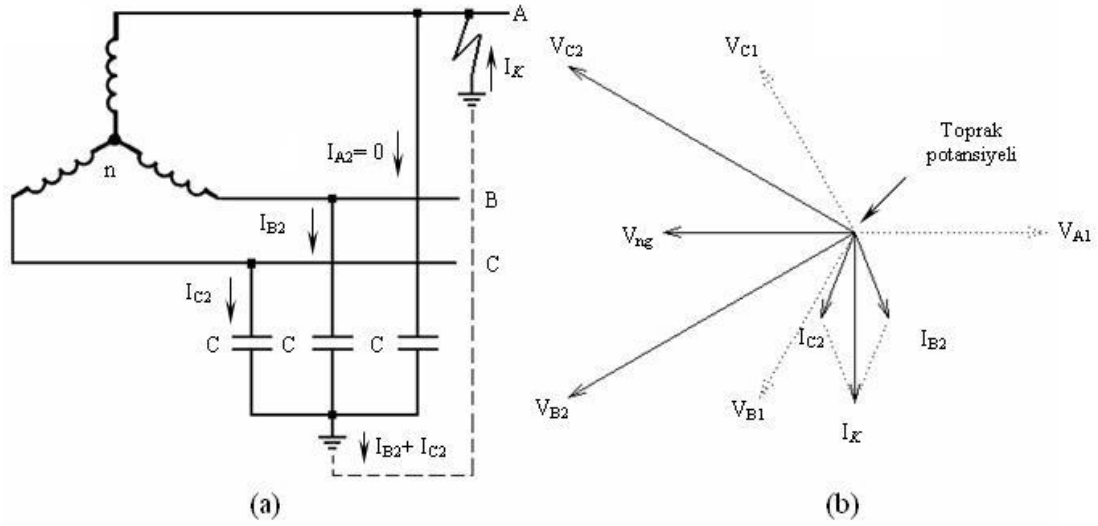
Şekil 4.1. Nötr noktası yalıtılmış şebekelerde bağlantı şekli [28].

İletim hattı ile toprak arasında oluşan hat kapasiteleri ile dolaylı olarak topraklanan şebekede hat kapasite değerleri dengeli ve mükemmel koşullar altında her hat için eşittir. Bu durumda kapasitelerden akacak şarj akımları da birbiriyle eşit olacağından nötr noktası potansiyeli toprak potansiyeli ile Şekil 4.2(a)'daki gibi aynı, faz akımları da Şekil 4.2(b)'deki gibi birbirleri ile 90° faz farkı ile dengede olacaklardır [27].

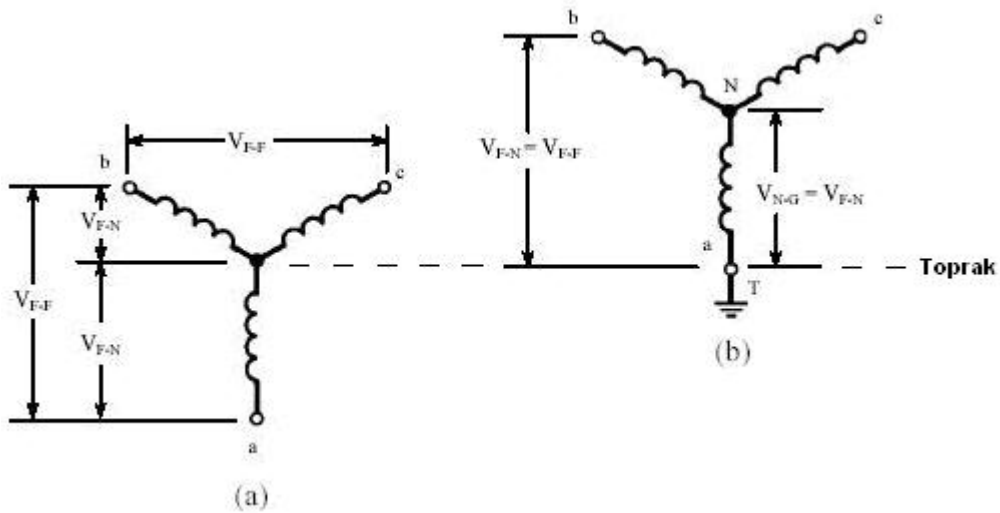


Şekil 4.2. Nötr noktası yalıtılmış şebekelerde bir faz kısa devresi öncesi (a) şarj akımları [27]; (b) gerilim ve akım fazör diyagramları [27].

Şekil 4.3 (a)'daki gibi bir faz kısa devresi olması durumunda kısa devre olan A fazının gerilimi toprak potansiyeline eşit olur ve herhangi bir şarj akımı akmaz. Bu sebeple nötr noktası toprak potansiyelinden Şekil 4.4(b)'deki noktaya kayar.



Şekil 4.3. Nötr noktası yalıtılmış şebekelerde bir faz kısa devresi esnasında (a) şarj akımları [27]; (b) gerilim ve akım fazör diyagramları [27].



Şekil 4.4. Nötr noktası yalıtılmış şebekelerde; (a) bir faz kısa devresi öncesi faz ve nötr gerilimleri [27]; (b) bir faz kısa devresi esnasında faz ve nötr gerilimleri [27].

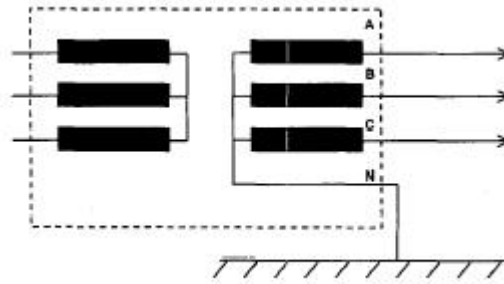
Sağlıklı fazların gerilimleri normal faz gerilimlerinin $\sqrt{3}$ misline kadar arttığından, kısa devre noktasından normal şartlarda bir fazdan akacak şarj akımının üç misli bir kısa devre akımı akar. Bu nedenle bu hatlara bağlı olan tüm elemanlar bu yüksek gerilim'e maruz kalırken arızanın uzaması durumunda yalıtımlarında sorun yaşanacaktır.

$$I_f = 3I_{b1} = 3I_{c1}$$

Sistem koruma elemanlarının çalışabilmesi için arıza akımının belirli seviyeleri geçmesi gerekir. Ancak nötr noktası yalıtılmış şebekelerde bir faz kısa devresi durumunda kısa devre akımı koruma elemanlarını çalıştıracak genlikte değildir. Dahası 4-5 A'lık bu kısa devre akımı iyonize olan noktalarda arklara neden olmak için yeterlidir. Yüksek frekanslı bu salınımlar nominal gerilim değerlerinin 6 misline kadar ani gerilim değerleri oluşturur ve izolasyonların zarar görmesine, yangınlara neden olabilir. Bu istenmeyen bir durumdur. Yüksek gerilim şebekelerinde nötr noktaları bu tür sorunlara karşın genellikle topraklanır.

4.3. Nötr Noktası Direkt Topraklanmış Şebekeler

Direkt topraklı şebekeler, IEEE Std. C62.92.1' de "Uygun bir noktasından herhangi bir empedans üzerinden olmaksızın bilerek ve isteyerek direkt olarak toprağa temas ettirilen şebekelerdir" şeklinde açıklanmaktadır [26]. Şekil 6.5' de direkt topraklı bir trafonun bağlantı şekli görülmektedir.

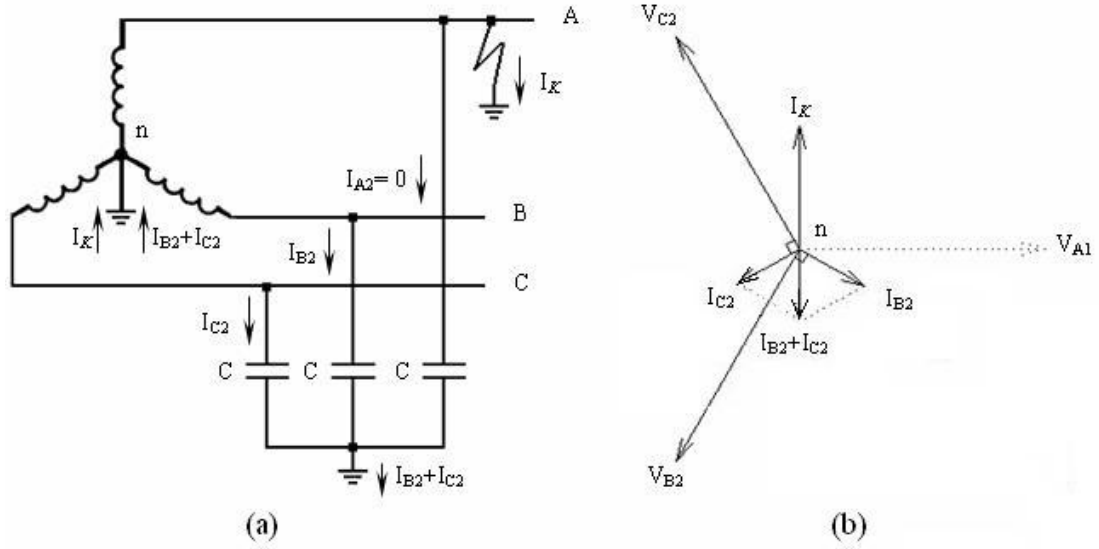


Şekil 4.5. Nötr noktası direkt topraklanmış şebekelerde bağlantı şekli [28].

Herhangi bir fazda bir faz kısa devresi olduğunda sağlıklı iki fazın gerilim değeri nötr noktası kaymadığı için aynı kalırken arızalı fazın faz-toprak gerilimi sıfır olur. Şekil 4.6 (a)' da görüldüğü gibi arıza akımı hat kapasitelerinden akan akımlar ile kısa devde olan faz' dan (veya fazlardan) akan akımların toplamına eşittir ve oldukça yüksek genliklidir. Bu nedenle sistemin kararlı kalabilmesi açısından sistem empedansı yüksek şebekelerde direkt topraklama kullanılmalıdır.

Bir faz ve üç faz kısa devresi akımları oranı sistemin ne ölçüde direkt topraklanacağını belirler. Üç faz kısa devresi akımı ne kadar yüksekse sistem o kadar küçük empedans üzerinden topraklanabilir. Yüksek gerilim seviyelerinde izolasyon

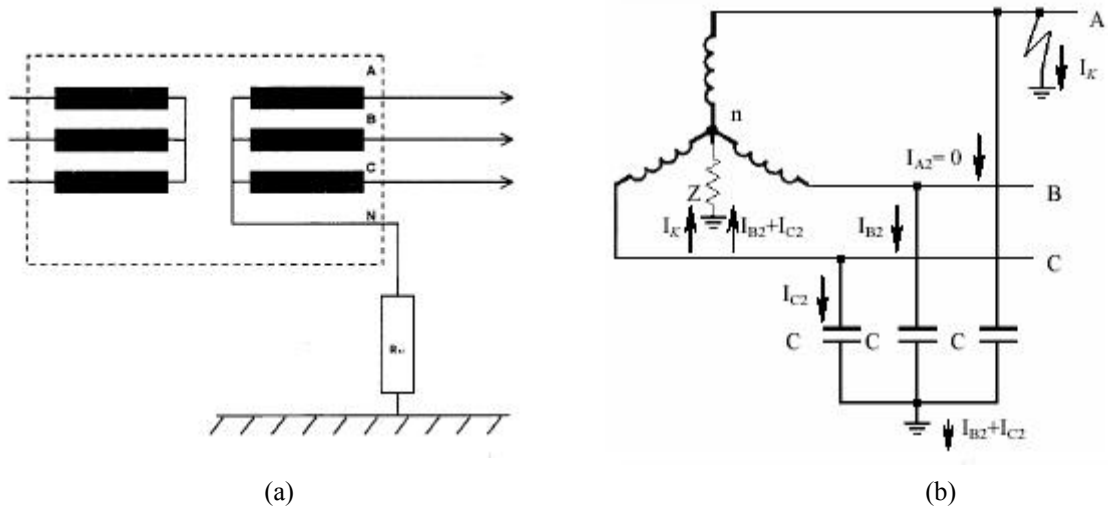
maliyeti yüksektir ve mümkünse düşük tutulmaya çalışılır. Direkt topraklama üzerinden akan akım azami üç faz kısa devresi akımından yüksek olacağından yalıtım veya sargılara zarar verebilir. Bu nedenle generatörler genellikle akım değerlerinin belirli sınırlar içerisinde tutulmasını sağlayan direnç, empedans veya Petersen bobini üzerinden topraklanırlar.



Şekil 4.6. Nötr noktası direkt topraklanmış şebekelerde bir faz kısa devresi esnasında; (a) şarj akımları [27]; (b) gerilim ve akım fazör diyagramları [27].

4.4. Nötr Noktası Empedans Üzerinden Topraklanmış Şebekeler

IEEE Std. C62.92.1’ de “Direnç, endüktans veya kapasitans özelliği gösteren bir eleman üzerinden toprağa temas ettirilen şebekelerdir” şeklinde açıklanan nötr noktası empedans üzerinden topraklı şebekelerde, nötr noktası ile toprak arasında bilerek ve isteyerek bir empedans elemanı yerleştirilir. Yüksek transientli arıza akımı bu empedans üzerinden akarken sınırlandırılır. Böylece tehlikeli arkaların oluşması önlenir. Burada dikkat edilecek nokta arıza akımının devre koruma elemanlarının kesin ve hızlı açma sağlamalarını sağlayacak kabul edilebilir limitler içinde bulunmasını sağlamaktır. Bir faz kısa devresi esnasında sağlıklı faz gerilimleri faz arası değere kadar yükselir, bu sebeple tespit edilmesi kolaydır [28].

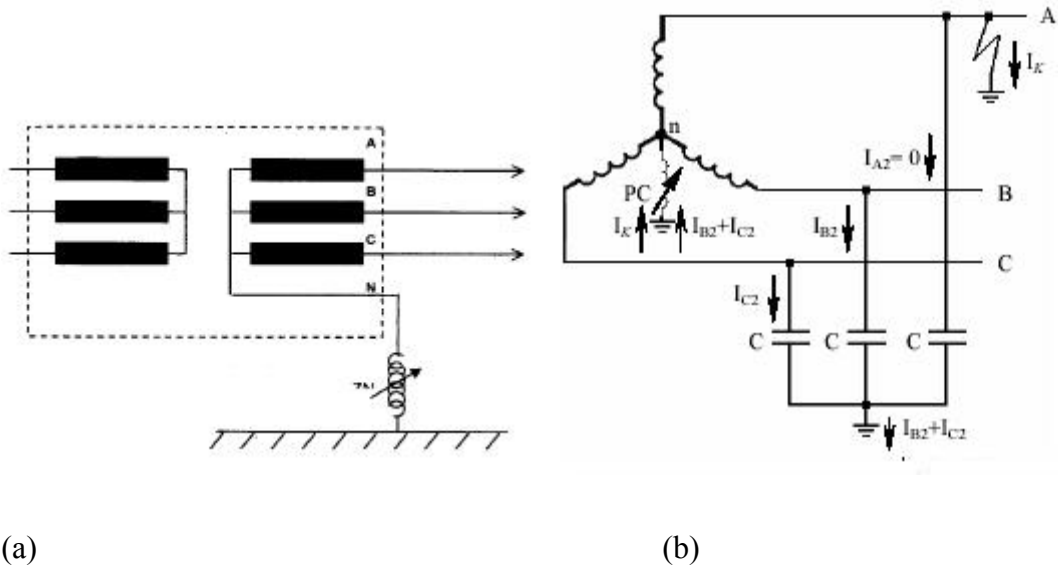


Şekil 4.7. Nötr noktası empedans üzerinden topraklanmış şebekelerde (a) bağlantı şekli [28]; (b) bir faz kısa devresi esnasında akımlar [27].

4.5. Nötr Noktası Kompanze Edilmiş Şebekeler

Sistemin toprak kapasitesinin, topraklama reaktansına eşit olması durumunda sistemin sıfır sıra devresi bir faz kısa devrelerinde rezonansa girer. Bunun sonucunda nötr reaktansından toprağa akan arıza akımı ile sistem kapasitesi üzerinden toprağa akan akımlar birbirlerini söndürecek şekilde ve topraklama olarak yalnızca küçük bir direnç elamanı kalacak şekilde akarlar. Bu özel durumu sağlayan reaktans' a Toprak Kısa devre Söndürücü, Ark Söndürücü Bobin veya Petersen Bobini denir. Petersen bobini ayarlanabilir sargılı basit bir demir nüveli bobinden oluşur [27].

Petersen bobini yıldırım, hayvan veya ağaçlardan kaynaklanan geçici kısa devrelerin etkilerinin azaltılmasında oldukça etkilidir. Ayrıca bir faz kısa devrelerinden kaynaklanan arkların söndürülmesinde ve gerilim düşmelerinin azaltılmasında faydalıdır. En büyük dezavantajları ise sistemdeki her değişiklikten sonra ayarlama gerektirmesi ve iletim hatlarının belli mesafelerde çaprazlanma yoluyla dengelenmesi gerekliliğidir [27].



Şekil 4.8. Nötr noktası kompanze edilerek topraklanmış şebekelerde; (a) bağlantı şekli [28]; (b) şarj akımları [27].

4.6. Özet

Topraklamanın ana amacı, kısa devre durumunda değeri değişen kısa devre akımının, dolayısıyla gerilimlerin sınırlandırılmasıdır [27].

Yıldız noktası yalıtılmış şebekelerde kısa devre akımı koruma elemanlarını çalıştıracak genlikte olmamasına karşın nominal gerilim değerinin altı misline kadar oluşan salınımlar ve arklar yalıtımların zarar görmesine ve yangın riskine neden olmaktadır. Bu nedenle alçak ve yüksek gerilim şebekelerinde pek kullanılmayan bir yöntemdir.

Yıldız noktası doğrudan doğruya topraklanan şebekelerde kısa devre akımı çok yüksek değerlere ulaşır. Bu durum yalıtım ve sargılara zarar verebileceğinden sık tercih edilen bir yöntem değildir.

Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanan şebekelerde akan akım empedans elemanı üzerinde sınırlandırılır, böylece tehlikeli arkların oluşması engellenir. Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken nokta arıza akımının koruma elemanlarının hızlı açma yapabileceği limitler içinde tutulması gerekliliğidir.

Yıldız noktası empedans üzerinden topraklanan şebekelerde sistemin toprak kapasitesinin, topraklama reaktansına eşit olması durumunda sistemin sıfır sıra

devresi bir faz kısa devrelerinde rezonansa girer. Bunun sonucunda nötr reaktansından toprağa akan arıza akımı ile sistem kapasitesi üzerinden toprağa akan akımlar birbirlerini söndürecek şekilde ve topraklama olarak yalnızca küçük bir direnç elamanı kalacak şekilde akarlar. Bu özel durumu sağlayan reaktans' a Toprak Kısa devre Söndürücü, Ark Söndürücü Bobin veya Petersen Bobini denir. Yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler sonucunda eskiye oranla çok daha kullanışlı bir hale gelmiş ve ciddi bir topraklama alternatifi olmuştur [27].

5. GERÇEK BİR ŞEBEKEDEN GERİLİM ÇÖKMELERİNİN MESAFEYE BAĞLI DEĞİŞİMLERİNİN ANALİZİ

5.1. Giriş

Bu bölümde, üçüncü kısımda incelediğimiz gerçek şebekede, farklı gerilim kademelerindeki besleme hatlarında meydana gelen kısa devrelerin, pcc'ye mesafesine bağlı olarak şebekedeki etkileri incelenecektir. Çalışma süresince üç faz ve bir faz kısa devre sonrasında oluşan geçiciliklerle ilgilenilmemektedir. Tüm motivasyon kısa devreden belirli bir süre sonunda ulaşılan sürekli hal analizleri üzerine yoğunlaşmaktadır.

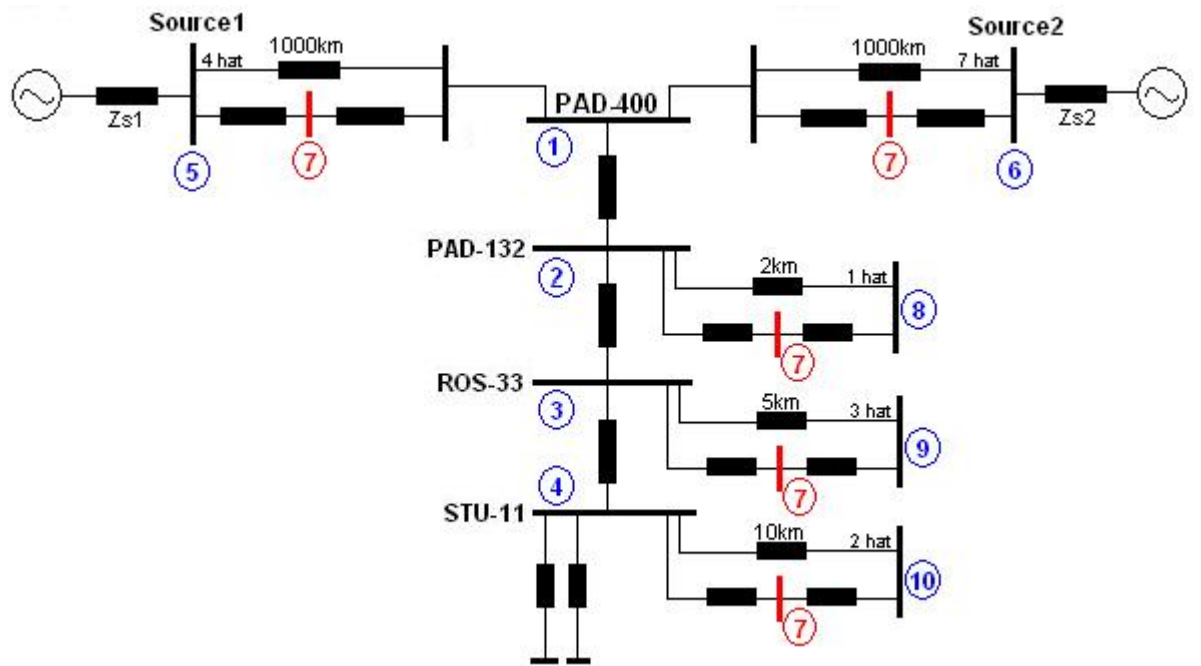
Şebekedeki her gerilim kademesinde MATLAB ve ATP programları kullanılarak analitik ve elektriksel modeller oluşturulmuştur. Bara admitans matrisi yöntemi kullanılarak yapılan analitik modellerin MATLAB kodlarına örnek olarak Ek.1'de STU-11 barası kodları, zaman domeyn'inde diferansiyel denklem çözümlerini kullanan elektriksel modellere örnek olarak da Ek.2'de yine STU-11 barası ATP kodları verilmiştir. STU-11 barası analizleri her iki kısa devre türü için de tipik olup diğer tüm bara analizleri için örnek teşkil etmektedir. Elde edilen sonuçlar 3. kısımda kullanılan gerilim bölme metodu sonuçları ile kıyaslanarak yorumlanacaktır.

5.2. Üç Faz Kısa Devresi MATLAB Modellemesi

Kısa devre analizlerinde en çok kullanılan yöntem bara admitans matrisi yöntemidir. Şebekedeki elemanların tümünün admitans değerleri belirli kurallar çerçevesinde matrise yazılır. Tüm elemanların admitans değerlerinin bilinmesi gerektiğinden, Şekil 3.8'deki gerçek şebeke için elimizde olmayan değerler, çeşitli kaynaklardan uygun veriler seçilerek tamamlanmıştır [29].

Şekil 5.1.'de gerçek şebekemizin MATLAB modeli için kullanılan şebeke modeli görülmektedir. Gerçek şebekede toplam 4 adet bara bulunmasına karşın, MATLAB modelinde kullandığımız şebekede bu 4 adet baraya ek olarak 6 bara daha

kullanılmıştır. Bunlardan 7 numaralı bara “dummy bara” olarak ifade edilen ve kısa devre noktasını taklit eden baradır. Bu baranın yeri kısa devre noktasının pcc noktasına olan uzaklığı değiştiğinden sabit değildir. 8, 9 ve 10 numaralı baralar besleme hatlarının sonlandığı farz edilen baralardır ve admitans matrisi hesaplarında besleme hattı admitans değerlerinin girilebilmesi için kullanılmıştır. 5 ve 6 numaralı baralar ise aslında gerçek şebekede bulunmayan, kaynakların kısa devre gücünden hesaplanan kaynak empedansları üzerinden devreye bağlandığı baralardır. Bu şekilde admitans matrisi elemanları eksiksiz tamamlanmıştır.



Şekil 5.1. Gerçek şebekenin analitik çözümünde MATLAB modelleri için kullanılan şebekenin bir faz çizimi.

Bara admitans matrisi oluşturulduktan sonra denklem 4.1’ deki gibi empedans matrisine geçilir.

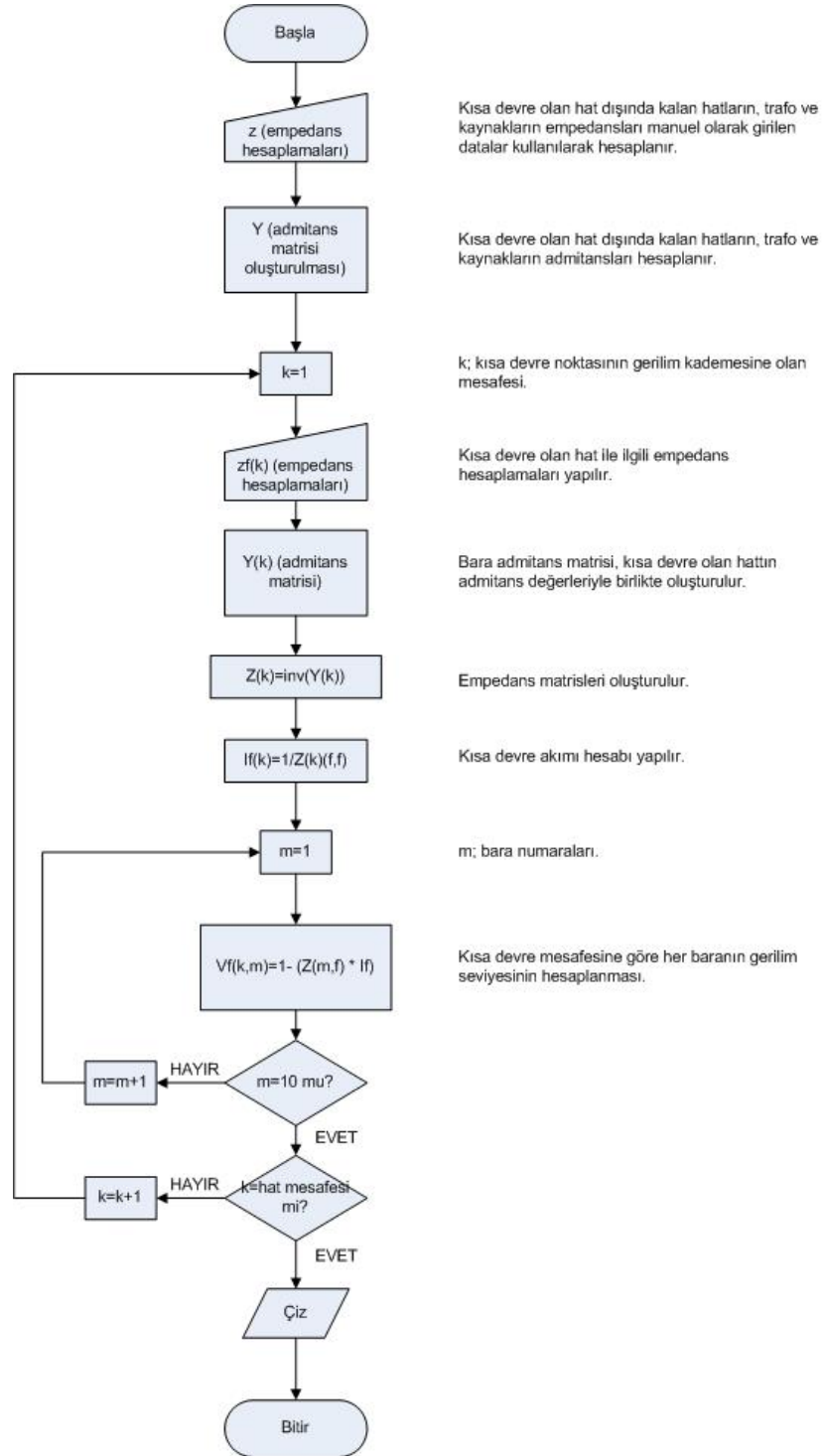
$$Z = Y^{-1} \quad (5.1)$$

Bir baradaki kısa devre akımı değeri o baranın geriliminin o noktadan görülen empedansa oranıdır. Yani denklem 4.2’ deki gibi ifade edilebilir;

$$I_{F_k} = \frac{V_k}{Z_{k,k}} \quad (5.2)$$

Sistemin dengeli olduğu kabul edilir ve yük akımı da ihmal edilirse $V=1pu$ kabul edilebileceğinden denklem şu şekli alır;

$$I_{F_k} = \frac{1}{Z_{k,k}} \quad (5.3)$$



Şekil 5.2. Üç faz kısa devresi analitik çözümü akış diyagramı.

Denklem 5.3 ile bulunan kısa devre akımları denklem 5.4' te yerine konularak sistemdeki diğer baraların gerilim değerlerinin kısa devreden nasıl etkilendiği bulunabilir.

$$V_{F_k} = 1 - (Z_{k,n} \cdot I_{F_k}) \quad (5.4)$$

Şekil 5.2.' de gerçek şebekemizin üç faz MATLAB modeli akış diyagramı görülmektedir. Tez' in son kısmında yer alan Ek.1.1' de akış diyagramına uygun MATLAB kodları verilmiştir.

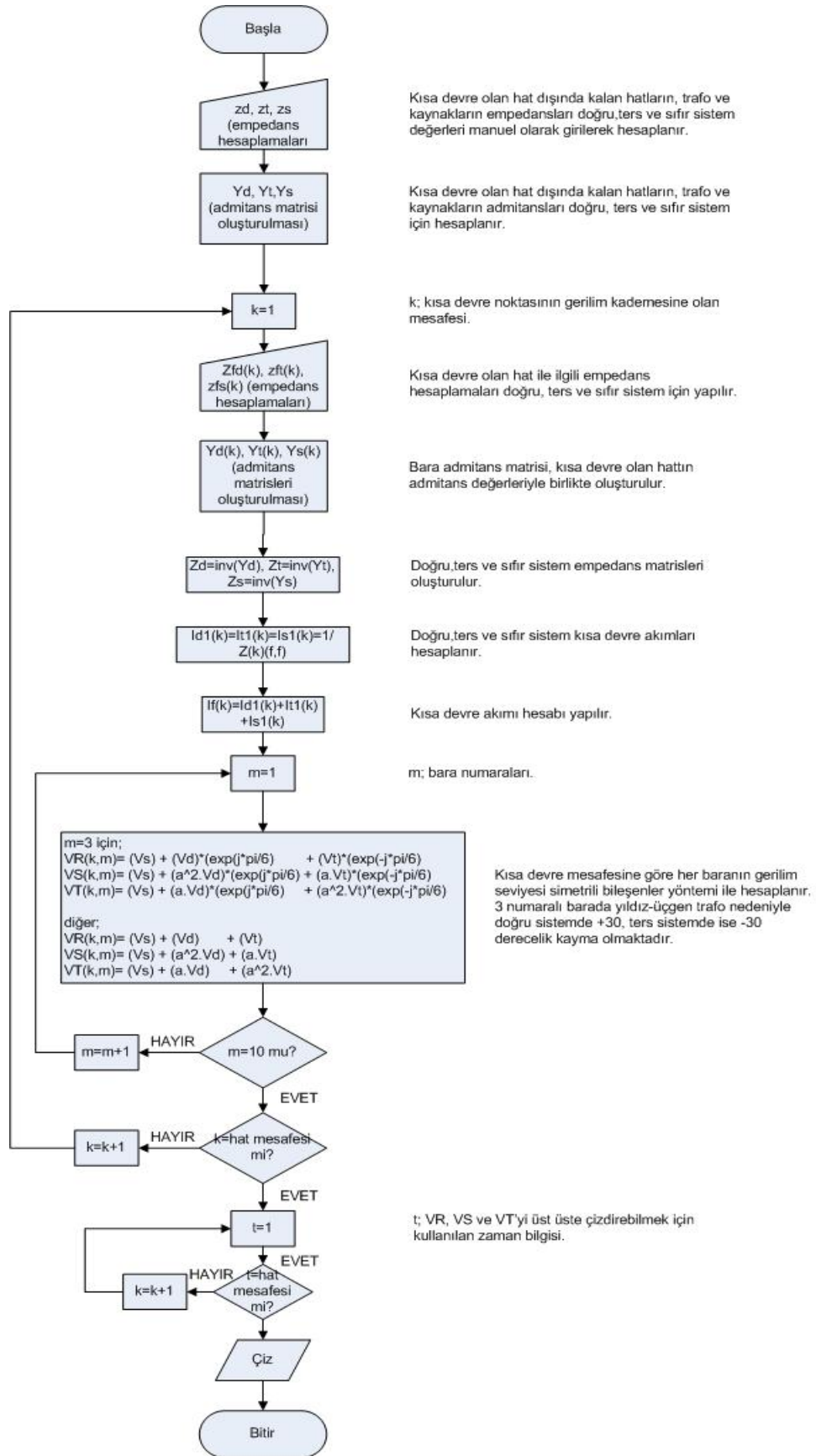
5.3. Bir Faz Kısa Devresi MATLAB Modellemesi

Üç faz kısa devresinin aksine bir faz kısa devresi simetrik olmayan bir kısa devredir. Bu nedenle yalnızca pozitif sıra devresi ile hesaplamalar yeterli değildir. Simetrik bileşenler yöntemi kullanılarak pozitif, negatif ve sıfır sıra devreleri kullanılmalı ve bu devreler bölüm 3.2.2' de anlatıldığı gibi bağlanarak eşdeğer devre oluşturulmalıdır [2].

Bunun için gerçek şebekemizin pozitif ve çok yaklaşık değerli negatif devrelerinin yanında birde sıfır sıra devresinin çizilmesi gerekmektedir. Şekil 5.3.' de gerçek şebekenin sıfır sıra devresinin transformatör bağlantı şekilleri göz önüne alınarak çizimi görülmektedir.

Üç faz kısa devresi modelinde olduğu şekilde admitans matrisi oluşturulur. Bir faz kısa devresinde eşdeğer devre her üç devrenin seri bağlantısı olduğundan pozitif, negatif ve sıfır sıra empedanslarının devreler göz önüne alınarak bunların toplamı bize eşdeğer devre empedanslarını dolayısıyla admitanslarını verecektir.

Bu noktada dikkat edilmesi gereken konu, MATLAB ile yapılan analizlerin bölüm 5.5 ve 5.6' da ATP ile yapılacak olan analizlerle kıyaslanacak olmasıdır. Bu sebeple bir faz kısa devresi için MATLAB' da yapılan simetrik bileşenler modellerinde normalde üç misline kadar çıkan sıfır sıra empedans değerleri pozitif sıra değerleri ile aynı alınmıştır. Bunun sebebi ATP modellerinde pozitif, negatif ve sıfır sıra değerlerinin ayrı ayrı girilemiyor olması ve tüm hesaplamaların pozitif sıra empedansları kullanılarak yapılıyor olmasıdır. İki modelin sonuçlarının kıyaslanabilmesi için bu şekilde bir kabul yapılması gerekmiştir.



Şekil 5.4. Gerçek şebekenin analitik çözümünde kullanılan bir faz MATLAB modeli akış diyagramı.

5.4. ATP-EMTP & ATPDraw

ATP, elektrik güç sistemlerinde elektromagnetik geçiciliklerin ve elektromekanik olayların dijital simulasyonunda kullanılan EMTP programının bugün en yaygın kullanılan versiyonudur. Bu kadar yaygın olarak kullanılıyor olmasının başlıca nedenlerinden biri yasal olarak dünya üzerinde neredeyse herkes için ücretsiz kullanılabilir olması ve en çok kullanılan bilgisayar sistemleriyle uyumlu olmasıdır [30].

Bu program sayesinde karmaşık şebekeler ve kontrol sistemleri simule edilebilir. Geçiciliklerin hesaplanabilmesi dışında çok çeşitli modelleme imkanlarına olanak sağlaması gibi önemli özelliklere de sahiptir.

EMTP ilk olarak 1984 senesinde Bonneville Elektrik İdaresi (BPA) dahilindeki EMTP Geliştirme Koordinasyon Grubu (DCG) ve Palo Alto Elektrik Enerjisi Araştırma Enstitüsü (EPRI) tarafından endüstriyel amaçlı kullanımı serbest bir program olarak geliştirilmiştir. ATP'nin doğuşu ise 1984'ün başlarında ticarileştirilmesi önerisini kabul etmeyen Dr. Meyer ve Dr. Liu'nun, yine BPA'nin EMTP programı kodlarını kullanarak yeni bir program yazmaya başlamasına dayanır. Bu tarihten itibaren ATP programı, Dr. W. Scott Meyer ve Dr. Tsu-huei Liu (Canada/Amerika EMTP Kullanıcıları Grubu eski başkanları) tarafından yayınlanan uluslararası makaleler vasıtasıyla sürekli olarak geliştirilmektedir. 1975'den başlayarak EMTP ve sonrasında ATP için çok sayıda uzman Portland/USA'deki programcılar ile işbirliği içinde çalışmaktadır.

EMTP Amerikan yasalarına göre kullanımı serbest bir program olarak kabul edilse de ATP'nin kullanımı serbest değildir, kullanımı için lisans gerektirmektedir. Bu lisans ticari olarak elektromagnetik geçicilik programları satışı ile ilgilenmekte olan kişiler dışında ücretsizdir.

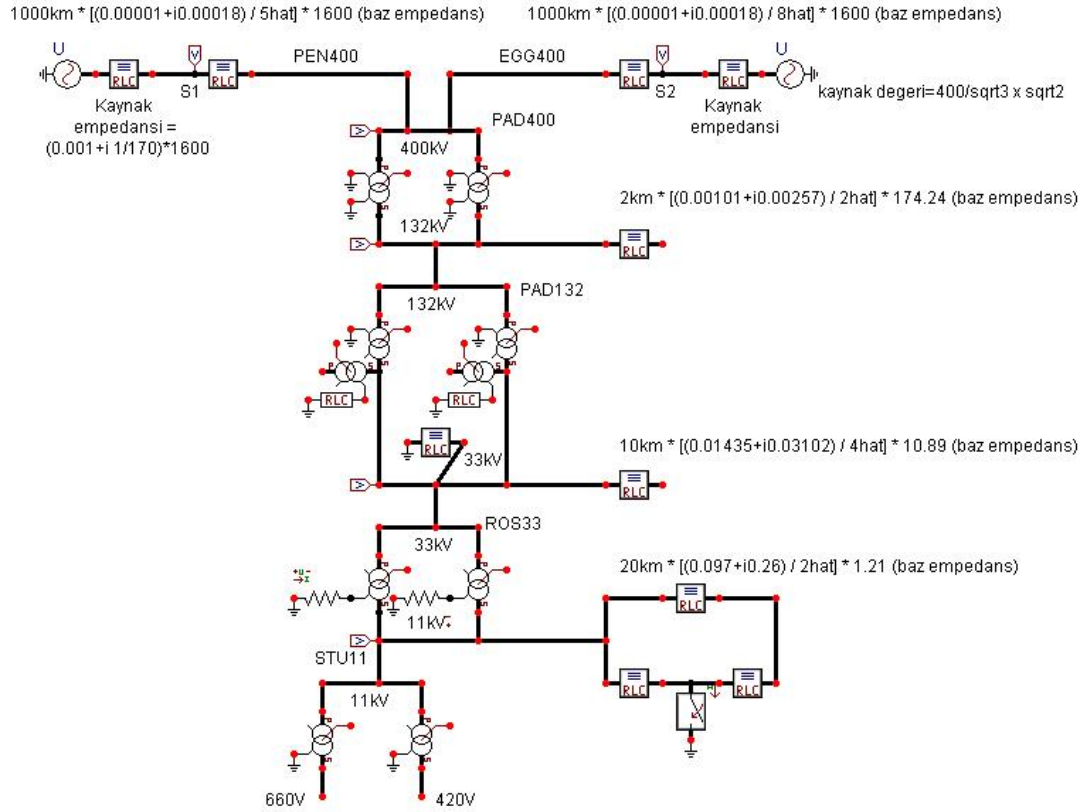
ATPDraw EMTP'nin ATP versiyonu için geliştirilmiş, Windows işletim sistemlerinde kullanılabilen bir grafik ara yüzüdür. Program, Borland Delphi programlama dili ile yazılmış olup Windows 9x/NT/2000/XP işletim sistemleriyle uyumlu olarak çalışabilmektedir. ATPDraw ile kullanıcı mouse yardımı ile önceden tanımlanmış bileşenleri kullanarak, simule edilecek devrenin dijital modelini oluşturabilir. Bundan sonra ATPDraw, "gördüğün, girdiğindir" mantığı çerçevesinde

ATP simülasyonu için gerekli formata uygun giriş dosyasını oluşturur. Böylece ATP simülasyon programı ile çizim programı ATPDraw ile birbirlerine entegre edilmiş olur.

ATPDraw aynı anda birden fazla devre modellemesine ve bunlar arasında bilgilerin kopyalanmasına olanak tanır. Standart düzenleme komutlarının (kopyala/yapıştır, grupta, çevir, vs.) hepsi kullanılabilir. Üç faz ve bir faz düğüm noktaları isimlendirmesi özel olarak kullanıcı tarafından isimlendirilecek düğümler dışında tamamen ATPDraw tarafından otomatik olarak gerçekleştirilir. Standart olarak bulunan bileşenler dışında (üç faz ve bir faz bileşenleri) kullanıcı kendi objelerini oluşturabilir. Makine ve transformatör modellemelerinde kullanılabilecek Üniversal Motor gibi özel objeler, iletim hatları, kablolar, döner makineler, transformatörler modelleri mevcuttur. TACS (Kontrol Sistemlerinin Geçicilik Analizi) ve MODELS (Bir çeşit simülasyon dili) kontrol sistemlerindeki ark ve korona gibi lineer olmayan davranışların modellenmesinde, harmonik analizlerinde simetrik ve asimetrik kısa devre analizlerinde kullanılabilmektedir [30].

5.5. Üç Faz Kısa Devresi ATP Modellemesi

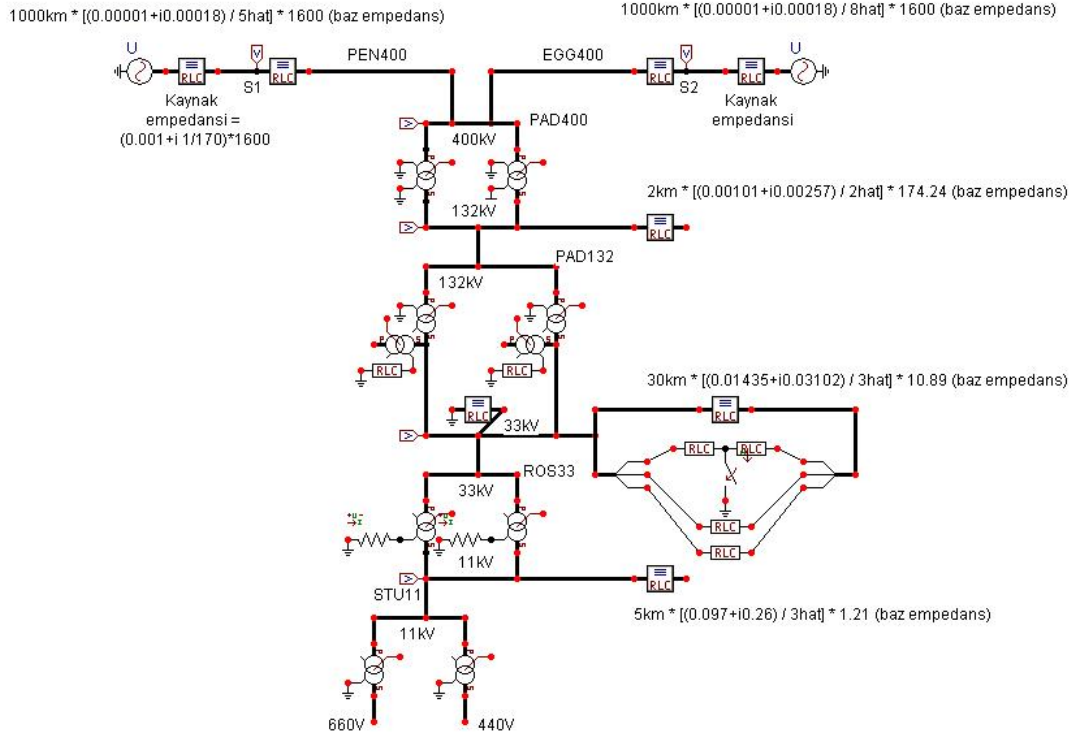
Şekil 5.5. ATPDraw programında çizilmiş olup, gerçek şebekemizin STU-11 gerilim kademesi besleme hatlarının birinde meydana gelen üç faz kısa devresinin ATP programı ile modellenmesini göstermektedir. Diğer tüm gerilim kademeleri için de benzer modellemeler yapılmıştır. Bölüm 5.7.'de verilen grafikler bu modellemelerin sonucunda ATP programı çıktılarından elde edilmiştir. Bu çıktıların bir bölümü Ek.2' de örnek olarak verilmiştir.



Şekil 5.5. Gerçek şebekenin elektriksel analizi için kullanılan ATP programı STU11 barası üç faz kısa devresi modeli.

5.6. Bir Faz Kısa Devresi ATP Modellemesi

Şekil 5.6. ATP Draw programında çizilmiş olup, gerçek şebekemizin ROS-33 gerilim kademesi besleme hatlarının birinde meydana gelen bir faz kısa devresinin ATP programı ile modellenmesini göstermektedir. Diğer tüm gerilim kademeleri için de benzer modellemeler yapılmıştır. Bölüm 5.7.'de verilen grafikler bu modellemelerin sonucunda ATP programı çıktılarından elde edilmiştir.

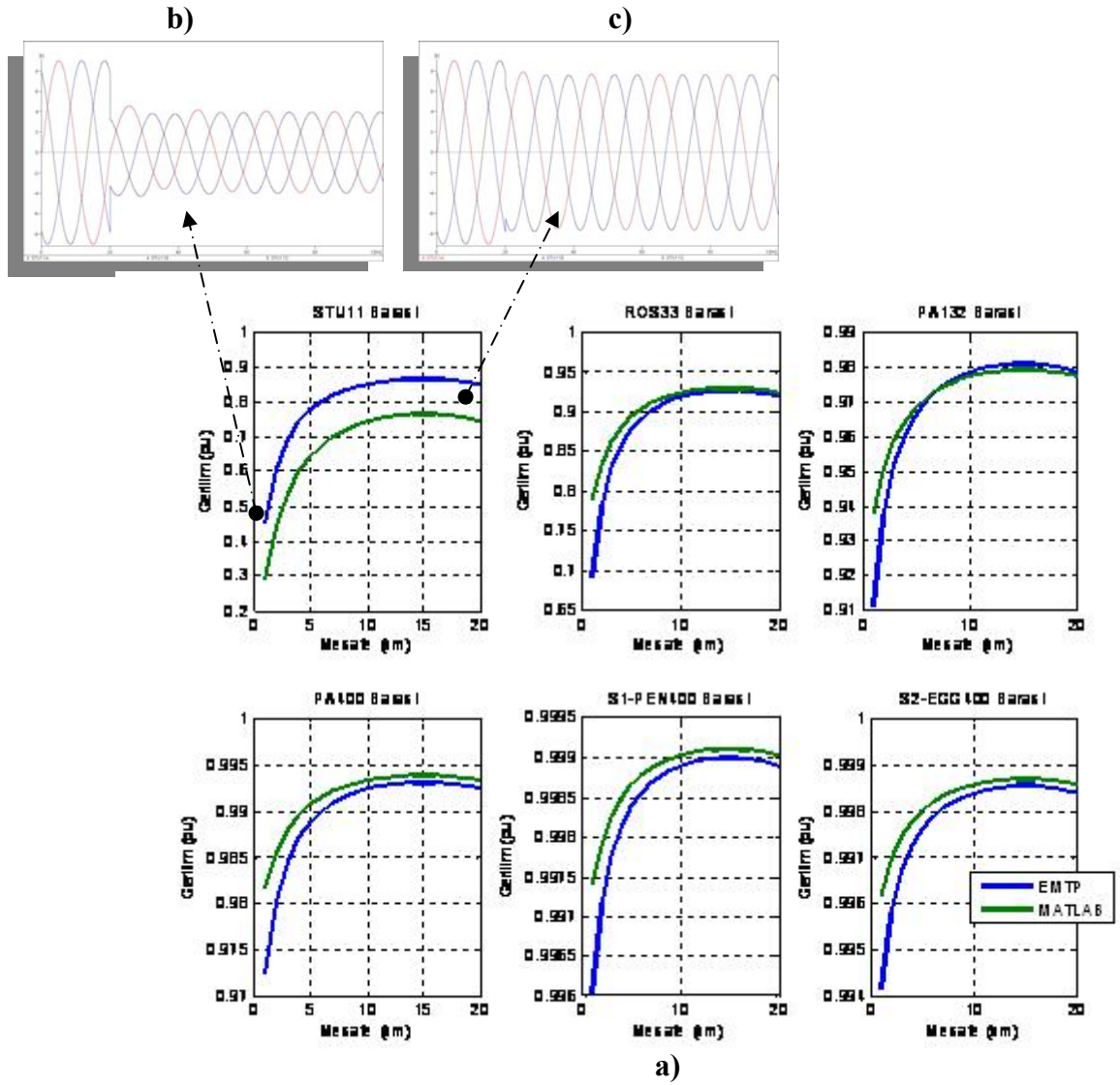


Şekil 5.6. Gerçek şebekenin elektriksel analizi için kullanılan ATP programı ROS33 barası Bir faz kısa devresi modeli.

5.7. Üç Faz ve Bir Faz Kısa Devresi Modelleri İle Elde Edilen Gerilim Çökmesi Değişimleri

Bölüm 5.1 ve 5.2’de anlatılanlar çerçevesinde MATLAB ve ATP programlarında 11 kV, 33 kV, 132 kV ve 400 kV gerilim seviyelerinde yapılan üç faz ve bir faz kısa devresi modellerinin analiz sonuçları Şekil 5.5’den Şekil 5.19’ a kadar verilmiştir. Şekillerin tümünde yatay eksen km cinsinden mesafeyi, dikey eksen ise birim değer (pu) cinsinden belirtilen baranın gerilim seviyesini göstermektedir. Yine tüm şekillerde üç faz ve bir faz kısa devreleri sonucunda besleme hattı mesafesi uzadıkça gerilim çökmesi etkisi azalmakta, bir noktadan sonra tekrar artış göstermektedir. Bunun sebebi kısa devre noktasından bakıldığında görülmekte olan eşdeğer devre empedansının besleme hattı ortasında maksimum değere ulaşması, hattın ortasından itibaren ise azalmaya başlamasıdır. Bu durum özellikle 1000 km’ye varan hat uzunluğu ile 400 kV gerilim kademesinde etkisini göstermektedir.

11 kV barası besleme hatlarında meydana gelen üç faz kısa devresinde gerilim seviyelerinin mesafeyle değişimi Şekil 5.7-a' da verilmiştir. 1 km uzunluğundaki besleme hattının sonunda üç faz kısa devresi olması durumunda MATLAB modeli ile yapılan analitik hesaplar STU-11 barasındaki gerilim değerinin 1 pu' dan 0.29 pu' ya, ATP modeli ile yapılan analizler ise aynı gerilimin 0.44 pu' ya kadar düştüğünü göstermektedir. Mesafe 20 km' ye çıktığında analitik hesaplar 0.74 pu ATP analizleri ise 0.85 pu gerilim seviyesine ulaşmaktadır.

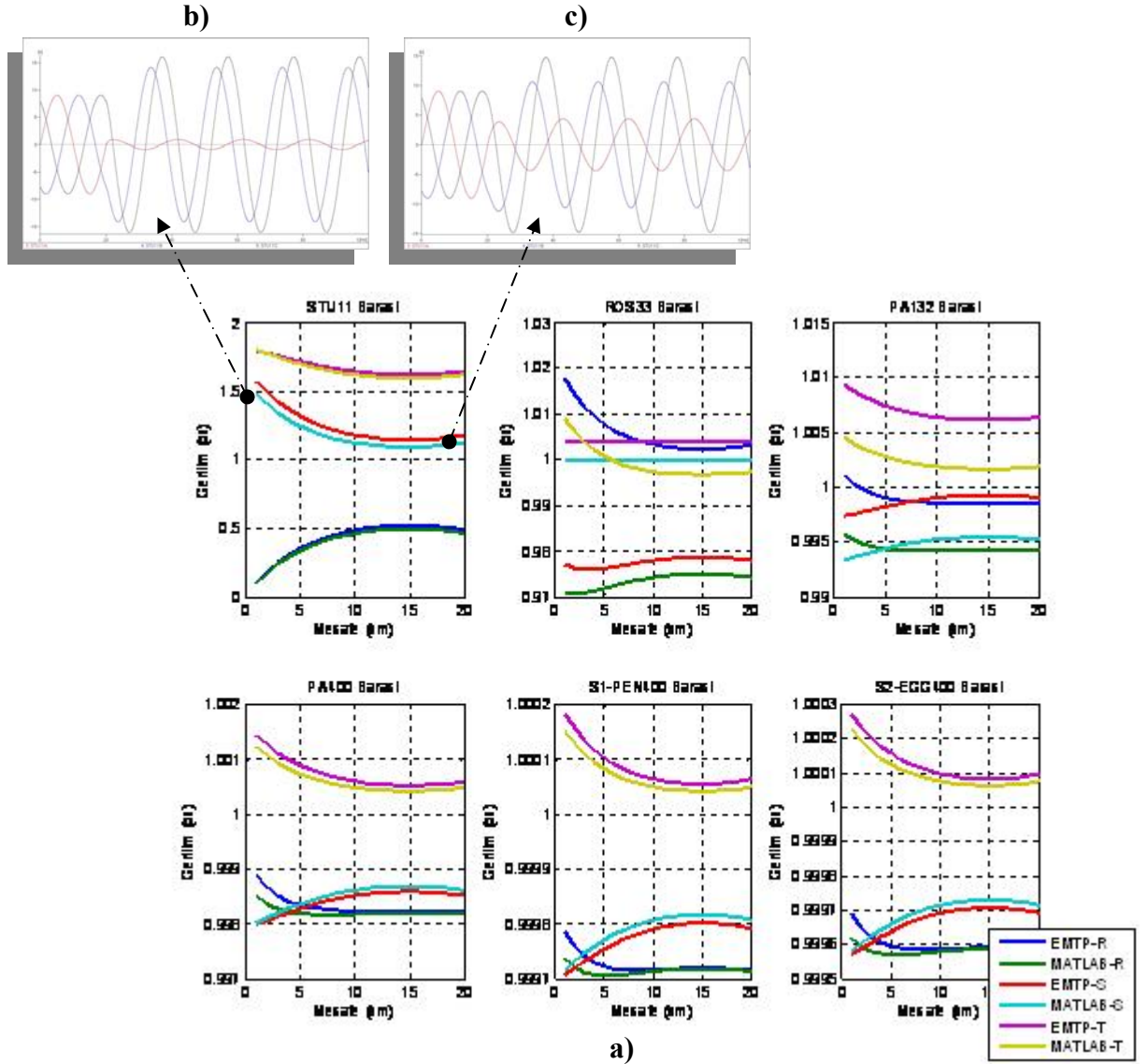


Şekil 5.7. a) 11 kV barası besleme hatlarında meydana gelen üç faz kısa devresinde gerilim seviyesinin mesafeyle değişimi. b) STU11 barası ATP 1 km gerilimleri, c) STU11 barası ATP 20 km gerilimleri.

STU11 barasında meydana gelen üç faz kısa devresi sonucunda oluşan gerilim çökmesinin üst kademelerde önemli etkiler yapmadığı açıktır. ROS33 barasında 1km' de hissedilen gerilim değeri MATLAB' da 0.78 pu, ATP' de 0.69 pu

mertebelerine düşerken çökmenin etkisi hafif olarak hissedilse de 20 km' de sırasıyla 0.92 pu ve 0.91 pu olmuştur. PAD132 barası ve yukarısında ise kısa devre neredeyse hiç hissedilmemektedir.

Şekil 5.7-b ve Şekil 5.7-c' de ATP ile yapılan analizler sonucunda STU11 barasındaki gerilim değerinin besleme hattı uzunluğunun artmasıyla nasıl değişim gösterdiği görülmektedir. Mesafenin artmasıyla artan hat empedansı değeri çökmenin etkisini düşürmektedir.



Şekil 5.8. 11 kV barası besleme hatlarında meydana gelen bir faz kısa devresinde her bir fazın gerilim seviyelerinin mesafeyle değişimi. b) STU11 barası ATP 1 km gerilimleri, c) STU11 barası ATP 20 km gerilimleri.

11 kV barası besleme hatlarında meydana gelen bir faz kısa devresinde gerilim seviyelerinin mesafeyle değişimi Şekil 5.8-a' da verilmiştir. 1 km uzunluğundaki

besleme hattının sonunda bir faz kısa devresi olması durumunda MATLAB modeli ile yapılan analitik hesaplar, STU-11 barasında arıza meydana gelen faz geriliminin 0.095 pu' ya kadar düştüğünü, bunun yanında sağlam iki fazın değerlerinin 1.48 ve 1.79 pu' ya çıktığını göstermektedir. Kısa devre noktasının mesafesi 20 km' ye geldiğinde arızalı faz gerilimi 0.46 pu' ya yükselmekte, sağlam iki faz ise sırasıyla 1.12 ve 1.61 pu' ya düşmektedir.

ATP modeli ile yapılan analizler 1 km sonunda meydana gelen bir faz kısa devresinin, arızalı faz gerilimini 0.097 pu' ya düşürdüğünü arızasız fazlarda sırasıyla 1.57 ve 1.79 pu gerilim değerleri görüldüğünü, 20 km sonunda ise gerilim değerlerinin sırasıyla 0.48, 1.18, 1.64 pu olduğu görülmektedir.

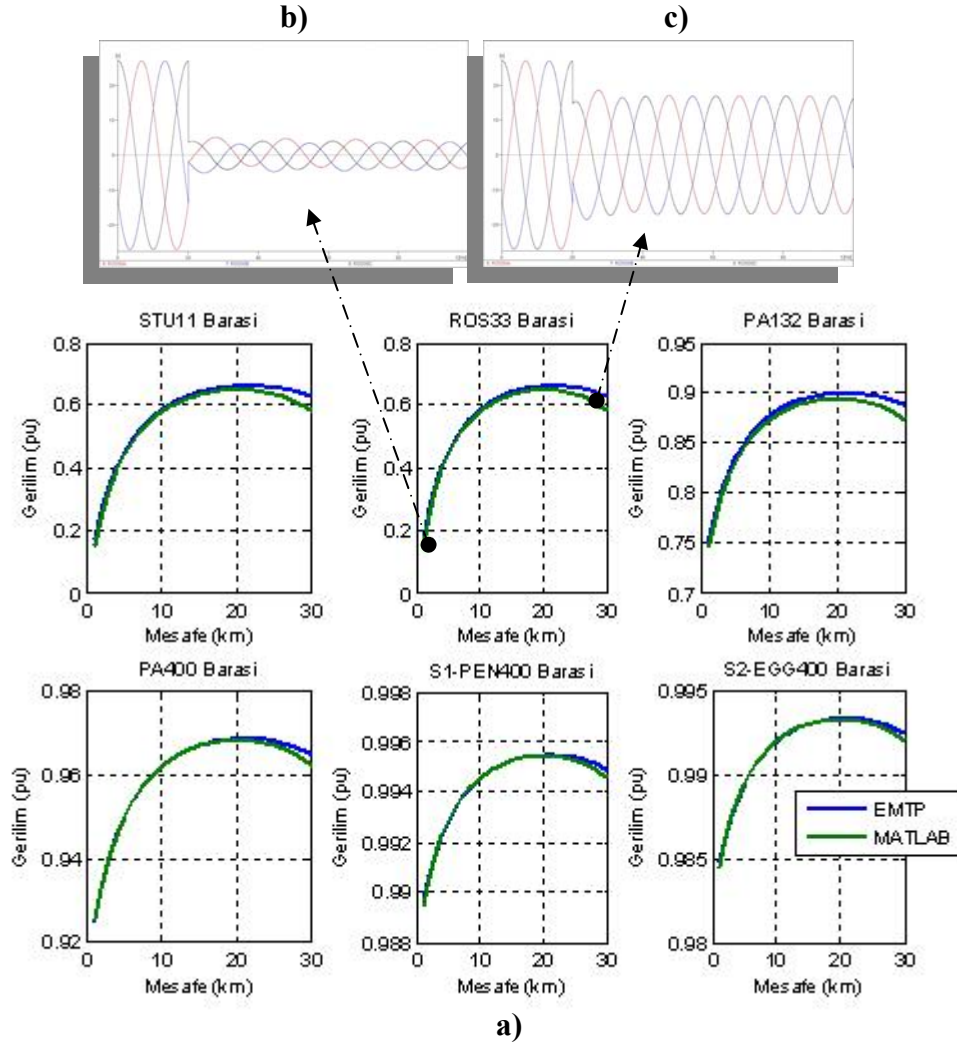
Şekil 5.8-b ve Şekil 5.8-c' de ATP ile yapılan analizler sonucunda STU11 barasındaki gerilim değerinin besleme hattı uzunluğunun artmasıyla nasıl değiştiği görülmektedir. Mesafenin artmasıyla artan hat empedans değeri çökmenin etkisini düşürmektedir.

MATLAB ve ATP sonuçlarının birbiriyle son derece iyi örtüştüğü yapılan iki farklı modelin ne kadar doğru olduğunun bir göstergesidir. Kısa devre sonucunda arıza olmayan fazlarda meydana gelen bu gerilim yükselmesi sistemin direnç topraklı olduğunu ifade etmektedir [1].

33 kV barası besleme hatlarında meydana gelen üç faz kısa devresinde gerilim seviyelerinin mesafeyle değişimi Şekil 5.9-a' da verilmiştir. 1 km uzunluğundaki besleme hattının sonunda üç faz kısa devresi olması durumunda MATLAB modeli ile yapılan analitik hesaplar ROS-33 barasındaki gerilim değerinin 1 pu' dan 0.14 pu' ya, ATP modeli ile yapılan analizler ise aynı gerilimin 0.16 pu' ya kadar düştüğünü göstermektedir. Mesafe 30 km' ye çıktığında analitik hesaplar 0.62 pu ATP analizleri ise 0.58 pu gerilim seviyesine ulaşmaktadır.

ROS33 barasında meydana gelen üç faz kısa devresi sonucunda oluşan gerilim çökmesi PAD132' de hafif bir şekilde hissedilse de üst kademelerde önemli bir etki yapmamaktadır. Ancak alt kademe olan STU11 barasında hissedilen gerilim çökmesi son derece şiddetlidir ve ROS33 ile aynı derinlikte hissedilmektedir. Şekil 5.9-b ve Şekil 5.9-c' de ATP ile yapılan analizler sonucunda ROS33 barasındaki gerilim değerinin besleme hattı uzunluğunun artmasıyla nasıl değişim gösterdiği

görülmektedir. Mesafenin artmasıyla artan hat empedans değeri çökmenin etkisini düşürmektedir.

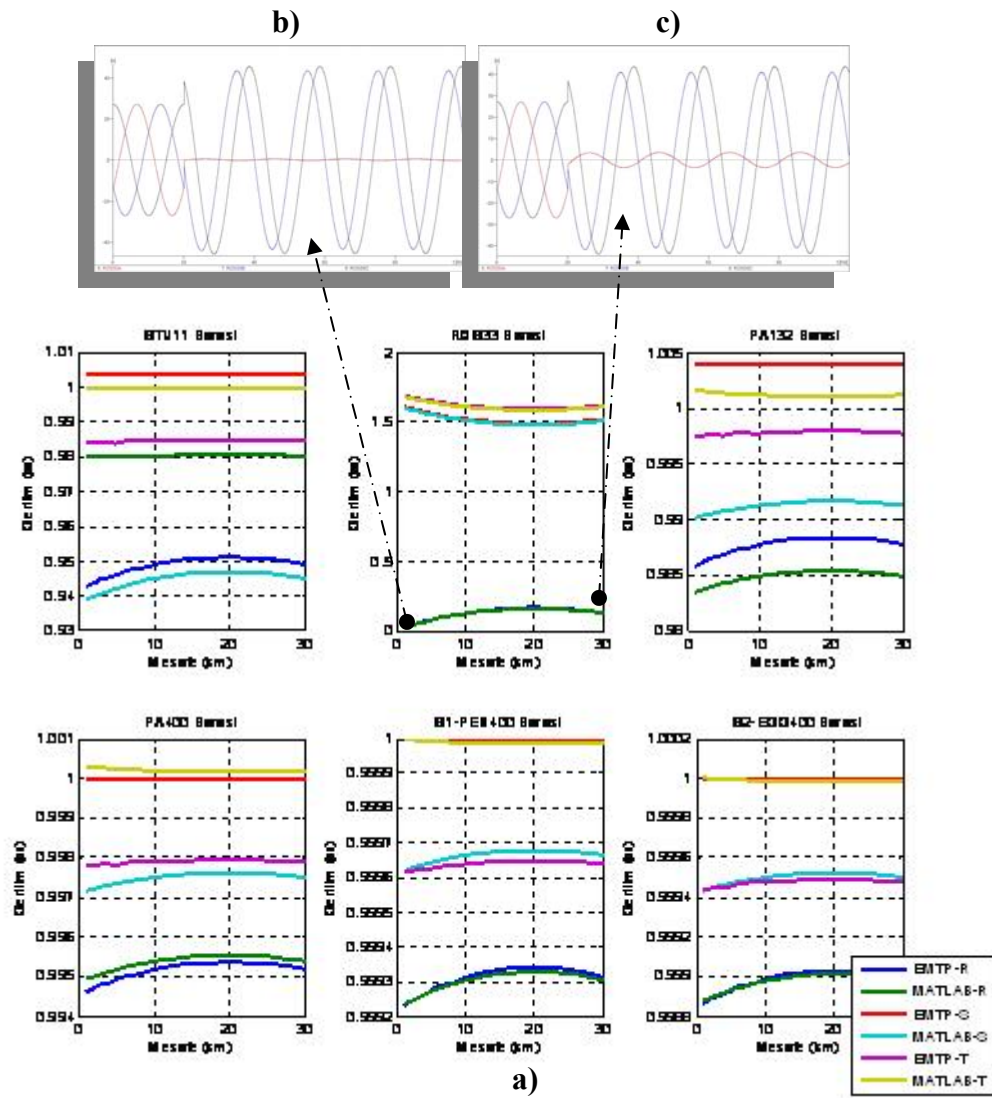


Şekil 5.9. a) 33 kV barası besleme hatlarında meydana gelen üç faz kısa devresinde her bir fazın gerilim seviyelerinin mesafeyle değişimi. b) ROS33 barası ATP 1 km gerilimleri, c) ROS33 barası ATP 30 km gerilimleri.

33 kV barası besleme hatlarında meydana gelen bir faz kısa devresinde gerilim seviyesinin mesafeyle değişimi Şekil 5.10-a' da verilmiştir. 1 km uzunluğundaki besleme hattının sonunda bir faz kısa devresi olması durumunda MATLAB modeli ile yapılan analitik hesaplar, ROS33 barasında arıza meydana gelen faz geriliminin 0.018 pu' ya kadar düştüğünü, bunun yanında sağlam iki fazın değerlerinin 1.60 ve 1.68 pu' ya çıktığını göstermektedir. Kısa devre noktasının mesafesi 30 km' ye geldiğinde arızalı faz gerilimi 0.12 pu' ya yükselmekte, sağlam iki faz ise sırasıyla 1.51 ve 1.61 pu' ya düşmektedir.

ATP modeli ile yapılan analizler 1 km sonunda meydana gelen bir faz kısa devresinin, arızalı faz gerilimini 0.018 pu' ya düşürdüğünü arızasız fazlarda sırasıyla 1.61 ve 1.69 pu gerilim değerleri görüldüğünü, 30 km sonunda ise gerilim değerlerinin sırasıyla 0.12, 1.52, 1.62 pu olduğu görülmektedir.

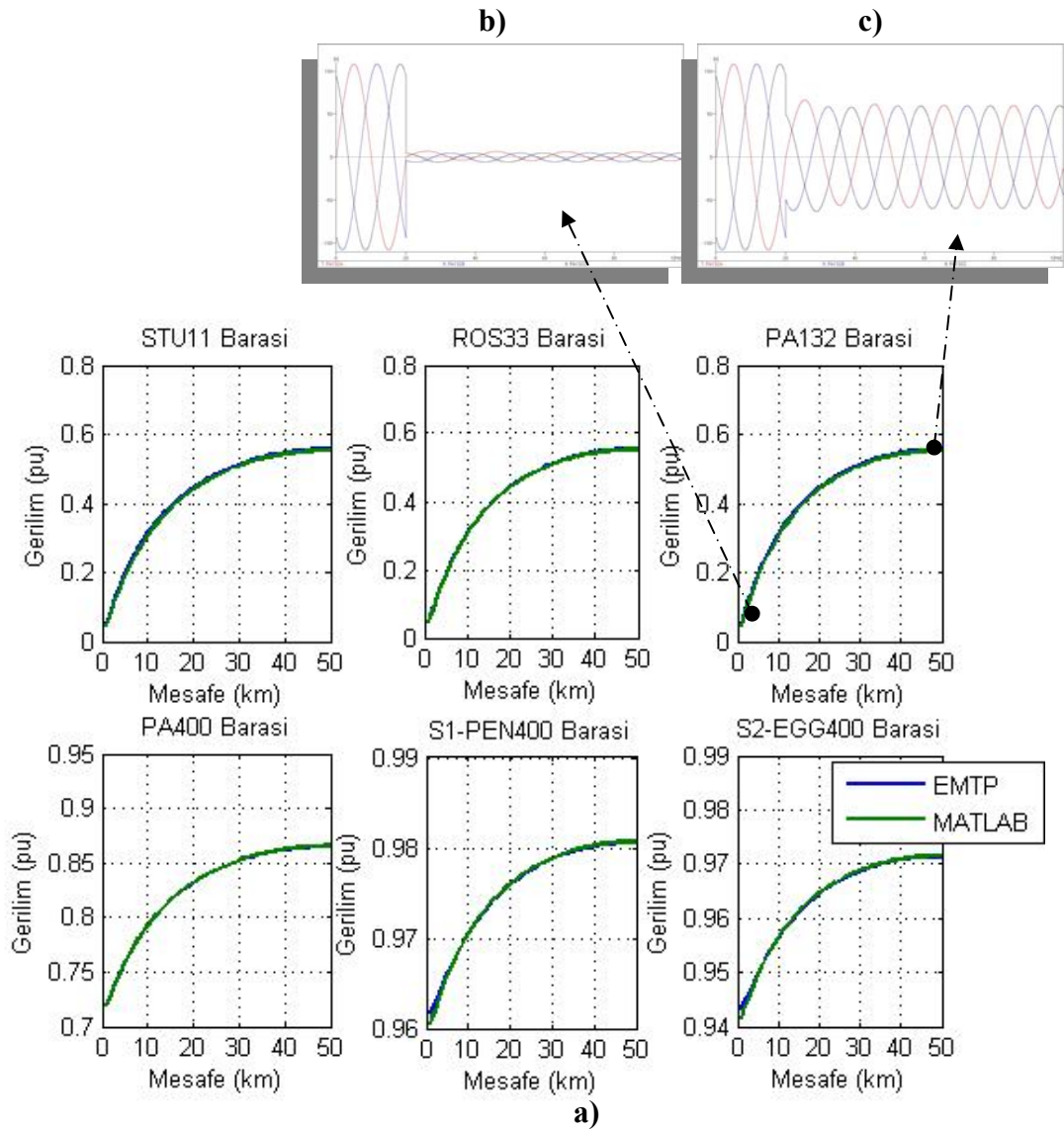
Şekil 5.10-b ve Şekil 5.10-c' de ATP ile yapılan analizler sonucunda ROS33 barasındaki gerilim değerinin besleme hattı uzunluğunun artmasıyla nasıl değişim gösterdiği görülmektedir. Kısa devre sonrası arızalı fazdaki çökme, arızasız iki fazdaki yükselme ve 30 km sonra bunlardaki değişimler sonuçları doğrulamaktadır. MATLAB ve ATP sonuçlarının neredeyse bire bir aynı olduğu söylenebilir.



Şekil 5.10. 33 kV barası besleme hatlarında meydana gelen bir faz kısa devresinde her bir fazın gerilim seviyelerinin mesafeyle değişimi. b) ROS33 barası ATP 1 km gerilimleri, c) ROS33 barası ATP 30 km gerilimleri.

132 kV barası besleme hatlarında meydana gelen üç faz kısa devresinde gerilim seviyelerinin mesafeyle değişimi Şekil 5.11-a’da verilmiştir. 1 km uzunluğundaki besleme hattının sonunda üç faz kısa devresi olması durumunda MATLAB modeli ile yapılan analitik hesaplar PAD132 barasındaki gerilim değerinin 1 pu’ dan 0.045 pu’ ya, ATP modeli ile yapılan analizler ise aynı gerilimin 0.049 pu’ ya kadar düştüğünü göstermektedir. Mesafe 50 km’ ye çıktığında her iki modelde de hesaplar 0.55 pu gerilim seviyesine ulaşmaktadır.

Şekil 5.11-b ve Şekil 5.11-c’ de ATP ile yapılan analizler sonucunda PAD132 barasındaki gerilim değerinin besleme hattı uzunluğunun artmasıyla nasıl değişim gösterdiği görülmektedir.

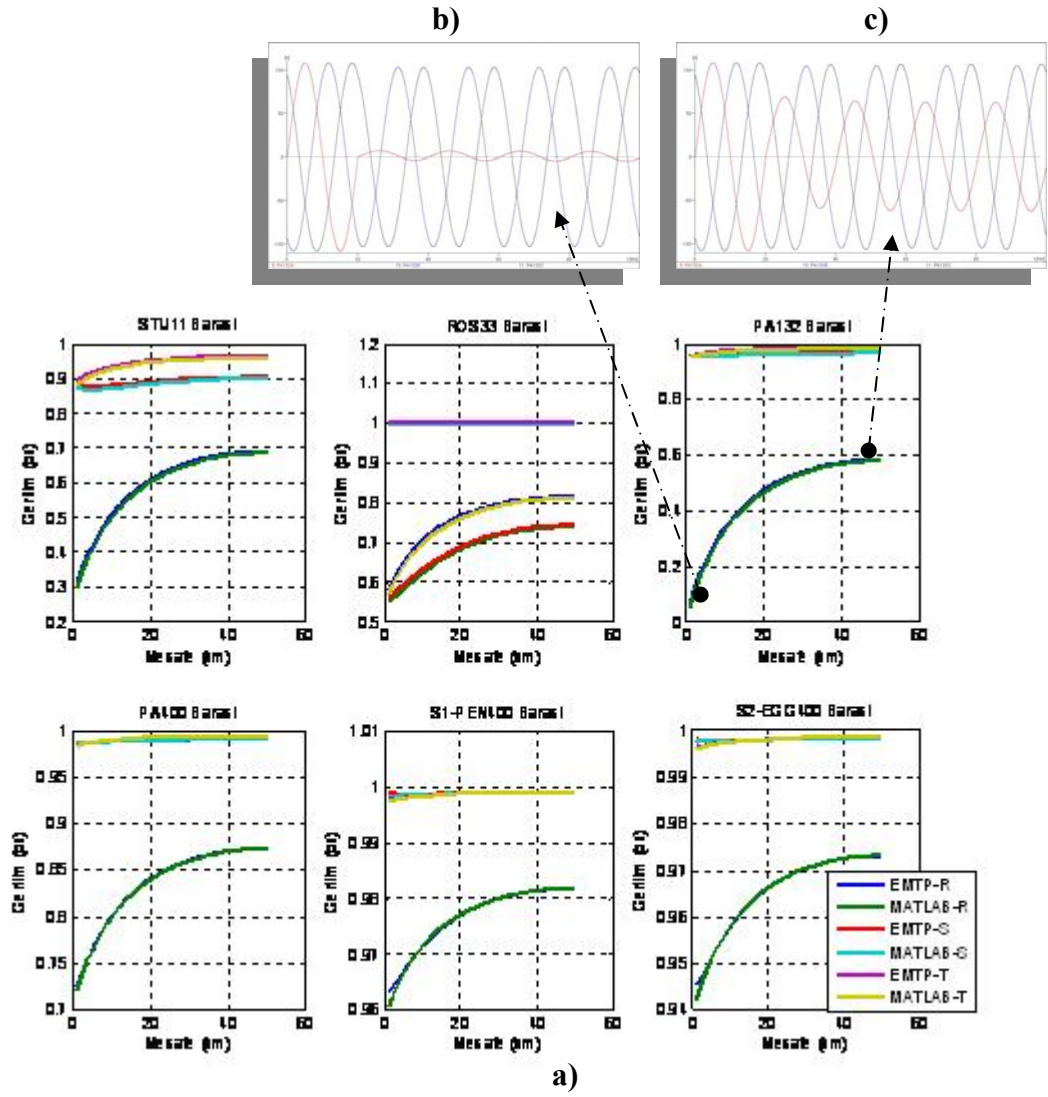


Şekil 5.11. a) 132 kV barası besleme hatlarında meydana gelen üç faz kısa devresinde gerilim seviyesinin mesafeyle değişimi. b) PAD132 barası ATP 1 km gerilimleri, c) PAD132 barası ATP 50 km gerilimleri.

132 kV barası besleme hatlarında meydana gelen bir faz kısa devresinde gerilim seviyesinin mesafeyle değişimi Şekil 5.12-a’da verilmiştir. 1 km uzunluğundaki besleme hattının sonunda bir faz kısa devresi olması durumunda MATLAB modeli ile yapılan analitik hesaplar, PAD132 barasında arıza meydana gelen faz geriliminin 0.05 pu’ ya kadar düştüğünü, bunun yanında sağlam iki fazın değerlerinin de 0.95 pu’ ya düştüğünü göstermektedir. Kısa devre noktasının mesafesi 50 km’ ye geldiğinde arızalı faz gerilimi 0.57 pu’ ya, sağlam iki faz gerilimi ise sırasıyla 0.96 ve 0.98 pu’ ya yükselmektedir.

ATP modeli ile yapılan analizler 1 km sonunda meydana gelen bir faz kısa devresinin, arızalı faz gerilimini 0.059 pu’ ya düşürdüğünü arızasız fazlarda ise herhangi bir değişim olmadığını ve 1 km’ de olduğu gibi 0.95 pu gerilim değerini aldığını göstermektedir. 50 km sonunda ise gerilim değerlerinin sırasıyla 0.58, 0.97, 0.98 pu olduğu görülmektedir.

PAD132 barasında meydana gelen bir faz kısa devresi sonucunda oluşan gerilim çökmesi PAD400’ de hafif bir şekilde hissedilse de üst kademelerde önemli bir etki yapmamaktadır. Ancak alt kademelerde hissedilen gerilim çökmesi son derece şiddetlidir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta PAD132’ de meydana gelen bir faz kısa devresi’ nin ROS33’ de iki fazda çökmeye neden olmasıdır. Bunun sebebi PAD132-ROS33 arasındaki transformatör’ ün gerilim üzerinde yıldız-üçgen dönüşüme neden olması ve kısa devre olan faz ile ilişkili iki fazında faz arası gerilimlerinin çökmeden etkilenmesidir. Bunun yanında STU11 kademesinde buradaki transformatörün üçgen-yıldız dönüştürme etkisi sebebiyle çökmeye uğrayan faz sayısı tekrar bire inmektedir. Şekil 5.12-b ve Şekil 5.12-c’ de ATP ile yapılan analizler sonucunda PAD132 barasındaki gerilim değerinin besleme hattı uzunluğunun artmasıyla nasıl değişim gösterdiği görülmektedir.

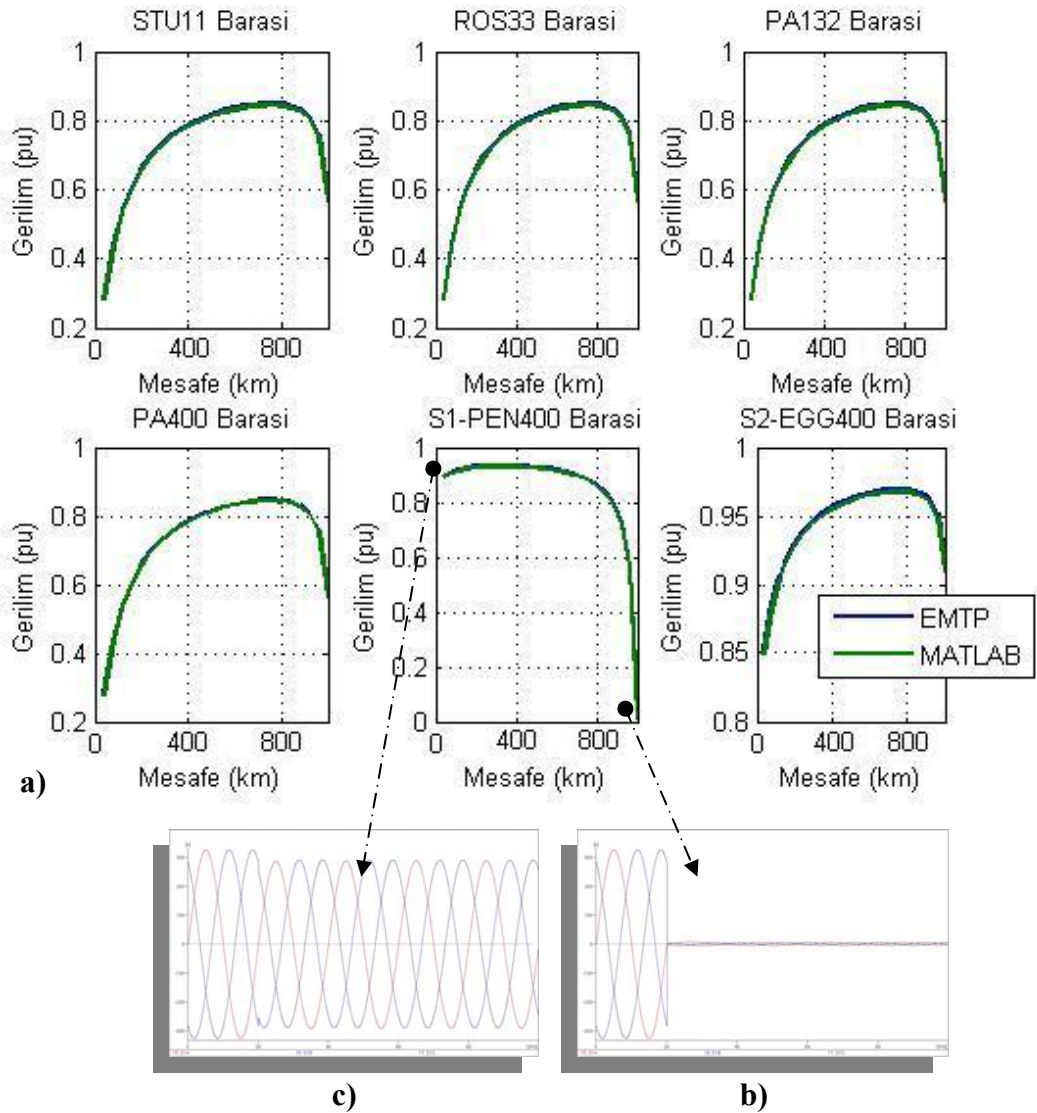


Şekil 5.12. 132 kV barası besleme hatlarında meydana gelen bir faz kısa devresinde her bir fazın gerilim seviyelerinin mesafeyle değişimi. b) PAD132 barası ATP 1 km gerilimleri, c) PAD132 barası ATP 50 km gerilimleri.

PEN400 kV barası besleme hatlarında meydana gelen üç faz kısa devresinde gerilim seviyelerinin mesafeyle değişimi Şekil 5.13-a’da verilmiştir. 1 km uzunluğundaki besleme hattının sonunda üç faz kısa devresi olması durumunda MATLAB modeli ile yapılan analitik hesaplar PEN400 barasındaki gerilim değerinin 1 pu’ dan 0.012 pu’ ya, ATP modeli ile yapılan analizler ise aynı gerilimin 0.016 pu’ ya kadar düştüğünü göstermektedir. Mesafe 1000 km’ ye çıktığında MATLAB modelinde gerilim değeri 0.88 pu ATP modelinde ise 0.89 pu’ ya çıkmaktadır .

Şekil 5.13-b ve Şekil 5.13-c’ de ATP ile yapılan analizler sonucunda PEN400 barasındaki gerilim değerinin besleme hattı uzunluğunun artmasıyla nasıl değişim

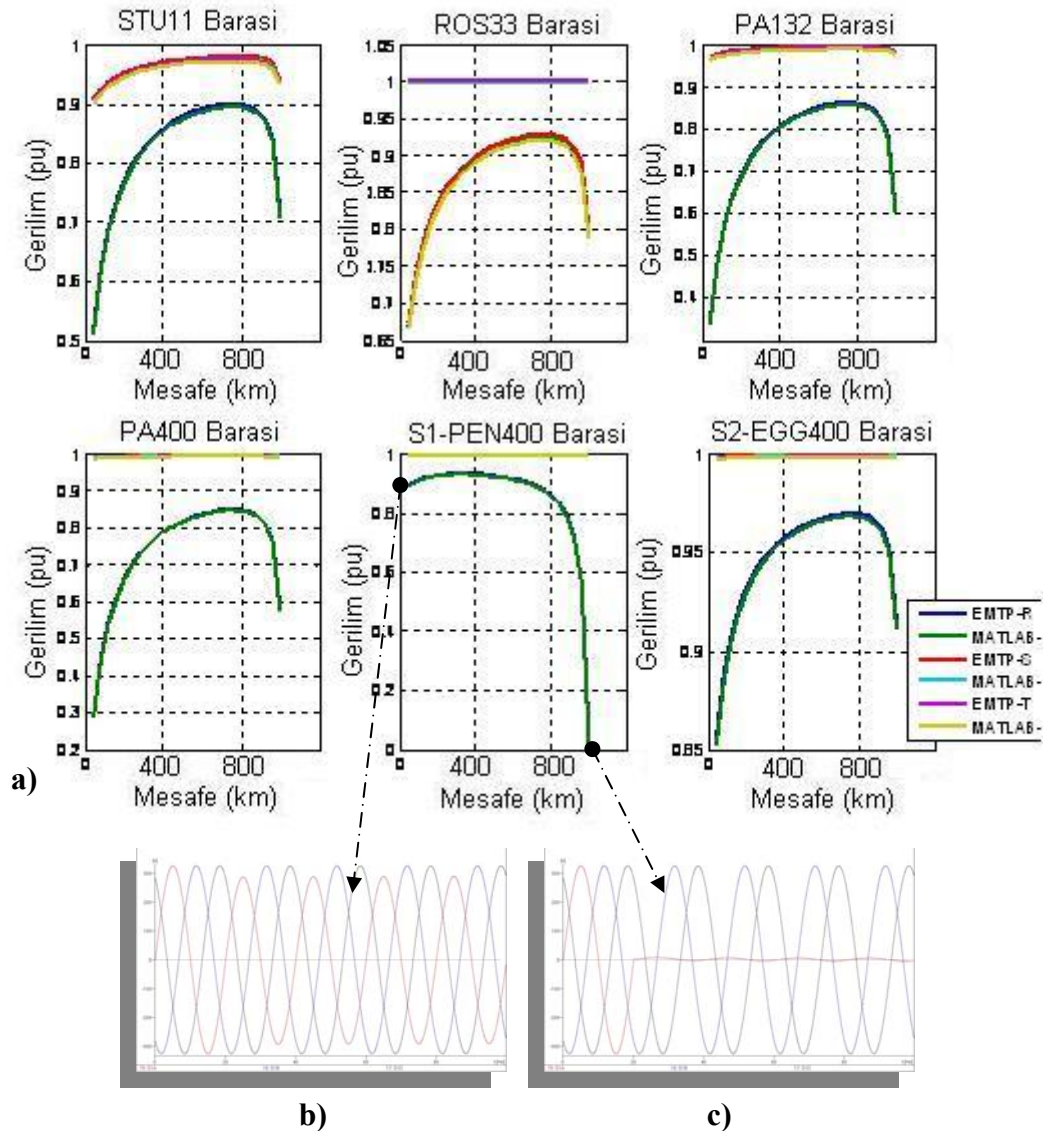
gösterdiği görülmektedir. Grafiğin diğer baralara göre ters olmasının nedeni mesafenin artmasıyla kısa devre noktasının ilgili baraya yaklaşıyor olmasıdır.



Şekil 5.13. a) PEN-400 barası besleme hatlarında meydana gelen üç faz kısa devresinin tüm baralardaki gerilim seviyelerine mesafeye bağlı etkisi. b) PEN400 barası ATP 1 km gerilimleri, c) PEN400 barası ATP 1000 km gerilimleri.

PEN400 kV barası besleme hatlarında meydana gelen bir faz kısa devresinde gerilim seviyesinin mesafeyle değişimi Şekil 5.14-a' da verilmiştir. 1 km uzunluğundaki besleme hattının sonunda bir faz kısa devresi olması durumunda MATLAB modeli ile yapılan analitik hesaplar, PEN400 barasında arıza meydana gelen faz geriliminin 0.005 pu' ya kadar düştüğünü, bunun yanında sağlam iki fazın değerlerinin de 0.99 pu' ya düştüğünü göstermektedir. Kısa devre noktasının mesafesi 1000 km' ye geldiğinde arızalı faz gerilimi 0.89 pu' ya erişirken, sağlam iki faz gerilimi 0.99 pu' da sabit kalmaktadır.

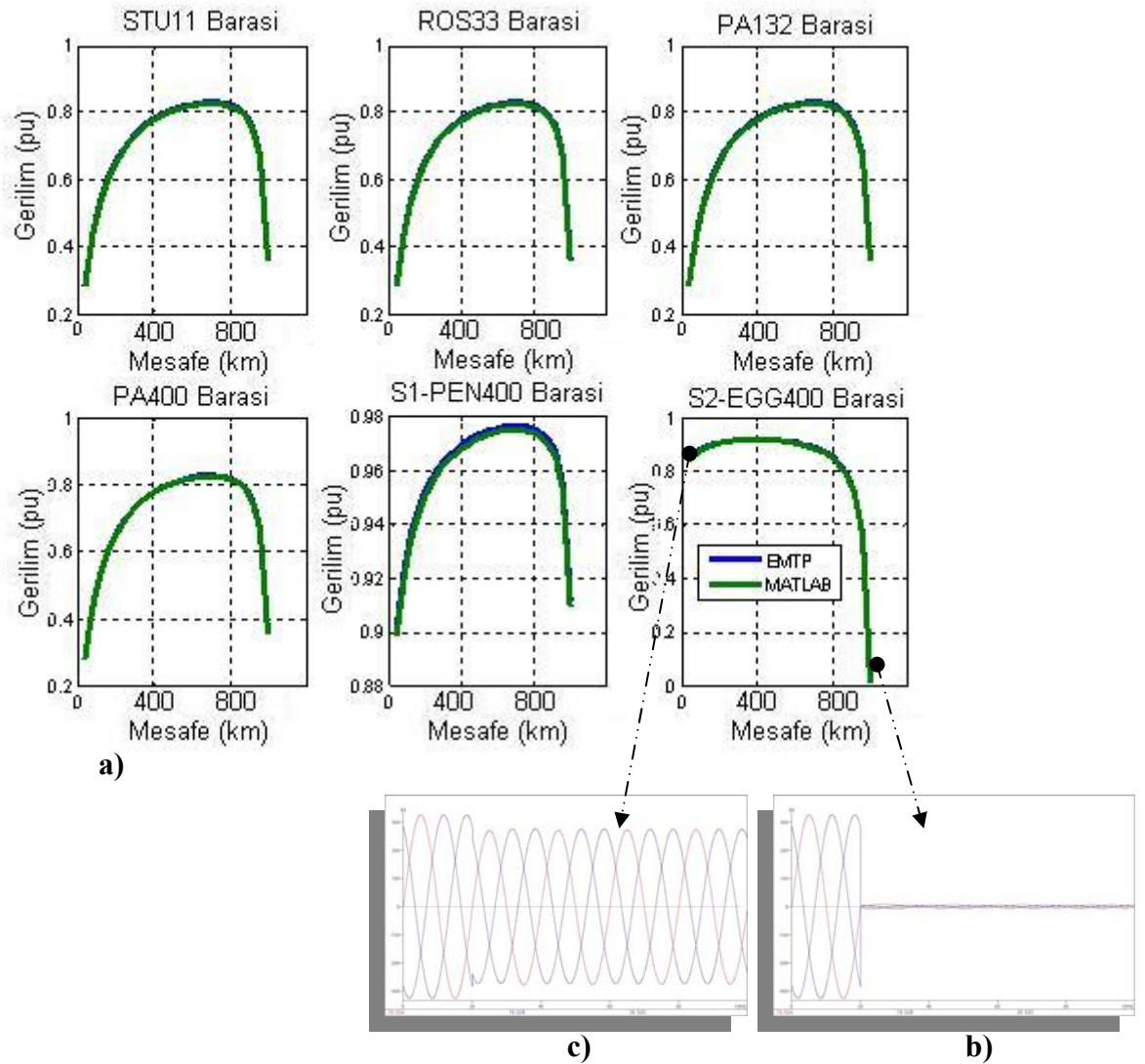
ATP modeli ile yapılan analizler 1 km sonunda meydana gelen bir faz kısa devresinin, arızalı faz gerilimini 0.01 pu'ya düşürdüğünü arızasız fazlarda ise herhangi bir değişim olmadığını 1 pu gerilim değerinin de kaldığını göstermektedir. 1000 km sonunda arızalı faz gerilim değeri 0.89 pu'ya yükselirken arızasız fazlar yine 1 pu gerilim değerinde kalmaktadır.



Şekil 5.14. PEN-400 barası besleme hatlarında meydana gelen bir faz kısa devresinin tüm baralardaki gerilim seviyelerine mesafeye bağlı etkisi. b) PEN400 barası ATP 1 km gerilimleri, c) PEN400 barası ATP 1000 km gerilimleri.

PEN400 barasında meydana gelen bir faz kısa devresi sonucunda oluşan gerilim çökmesi aynı gerilim seviyesinde bulunmalarına rağmen EGG400' de de bir kaynak bulunduğu hafif bir şekilde hissedilmektedir. Alt gerilim kademelerinin tümünde şiddetli gerilim çökmeleri yaşanmasına rağmen EGG400' deki gerilim

kaynağının etkisiyle, yaşanan çökmeler 0.3-0.4 pu civarlarında kalmakta ve 0.01 pu'ya kadar düşmemektedir. PAD132 gerilim seviyesinde olduğu gibi ROS33' de iki fazda çökmeye neden olmaktadır. Şekil 5.14-b ve Şekil 5.14-c' de ATP ile yapılan analizler sonucunda PEN400 barasındaki gerilim değerinin besleme hattı uzunluğunun artmasıyla nasıl değişim gösterdiği görülmektedir. Grafiğin diğer baralara göre ters olmasının nedeni mesafenin artmasıyla kısa devre noktasının ilgili baraya yaklaşıyor olmasıdır.



Şekil 5.15. a) EGG-400 barası besleme hatlarında meydana gelen üç faz kısa devresinde gerilim seviyesinin mesafeyle değişimi. b) EGG400 barası ATP 1 km gerilimleri, c) EGG400 barası ATP 1000 km gerilimleri.

EGG400 kV barası besleme hatlarında meydana gelen üç faz kısa devresinde gerilim seviyelerinin mesafeyle değişimi Şekil 5.15-a' da verilmiştir. 1 km uzunluğundaki besleme hattının sonunda üç faz kısa devresi olması durumunda

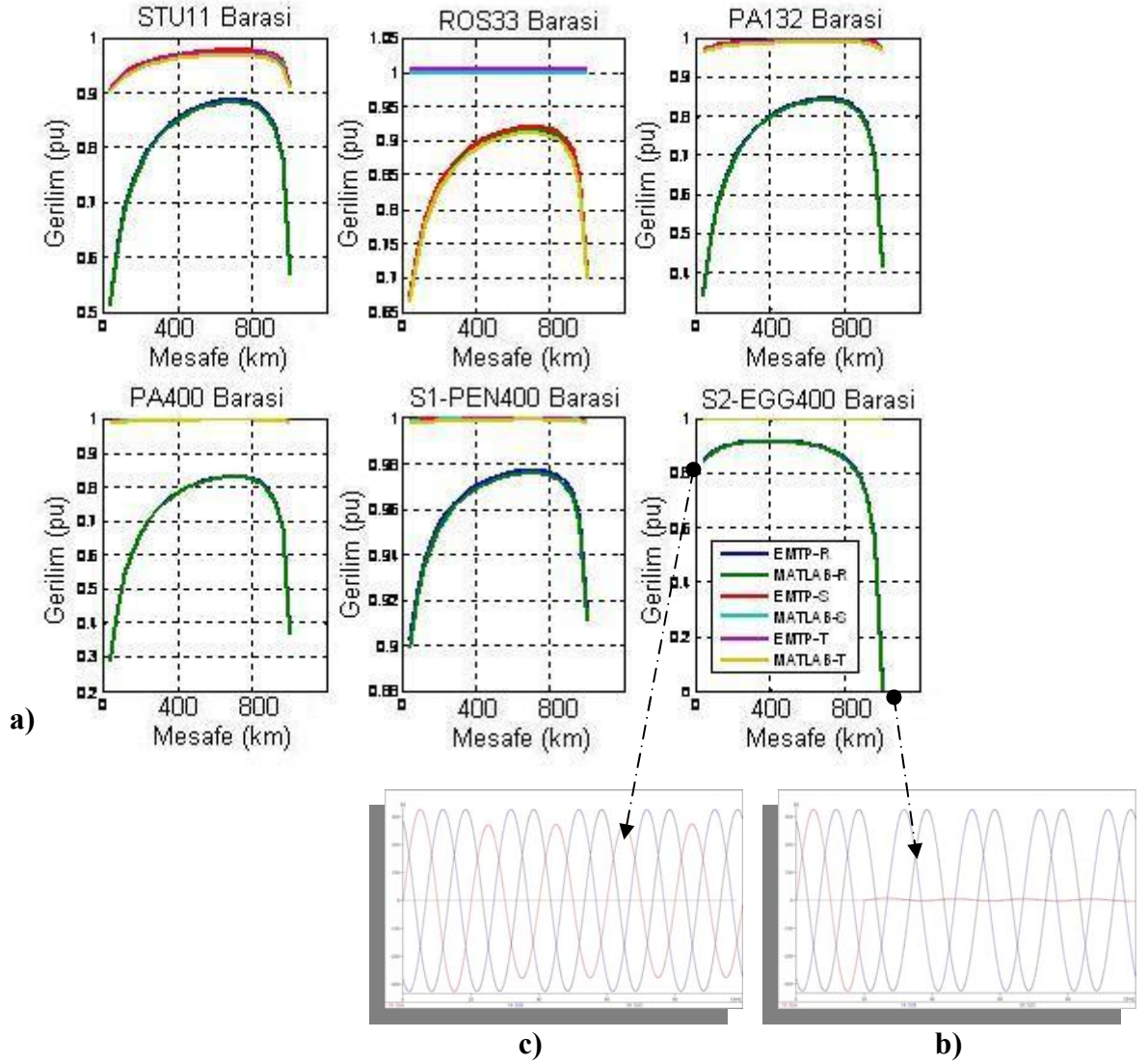
MATLAB modeli ile yapılan analitik hesaplar EGG400 barasındaki gerilim değerinin 1 pu' dan 0.012 pu' ya, ATP modeli ile yapılan analizler ise aynı gerilimin 0.016 pu' ya kadar düştüğünü göstermektedir. Mesafe 1000 km' ye çıktığında her iki modelde de hesaplar 0.84 pu gerilim seviyesine ulaşmaktadır.

Şekil 5.11-b ve Şekil 5.11-c' de ATP ile yapılan analizler sonucunda EGG400 barasındaki gerilim değerinin besleme hattı uzunluğunun artmasıyla nasıl değişim gösterdiği görülmektedir. Grafiğin diğer baralara göre ters olmasının nedeni mesafenin artmasıyla kısa devre noktasının ilgili baraya yaklaşıyor olmasıdır.

EGG400 kV barası besleme hatlarında meydana gelen bir faz kısa devresinde gerilim seviyesinin mesafeyle değişimi Şekil 5.16-a' da verilmiştir. 1 km uzunluğundaki besleme hattının sonunda bir faz kısa devresi olması durumunda MATLAB modeli ile yapılan analitik hesaplar, EGG400 barasında arıza meydana gelen faz geriliminin 0.005 pu' ya kadar düştüğünü, bunun yanında sağlam iki fazın değerlerinin de 0.99 pu' ya düştüğünü göstermektedir. Kısa devre noktasının mesafesi 1000 km' ye geldiğinde arızalı faz gerilimi 0.84 pu' ya erişirken, sağlam iki faz gerilimi 0.99 pu' da sabit kalmaktadır.

ATP modeli ile yapılan analizler 1 km sonunda meydana gelen bir faz kısa devresinin, arızalı faz gerilimini 0.01 pu' ya düşürdüğünü arızasız fazlarda ise herhangi bir değişim olmadığını 1 pu gerilim değerinde kaldığını göstermektedir. 1000 km sonunda arızalı faz gerilim değeri 0.84 pu' ya yükselirken arızasız fazlar yine 1 pu gerilim değerinde kalmaktadır.

EGG400 barasında meydana gelen bir faz kısa devresi sonucunda oluşan gerilim çökmesi aynı gerilim seviyesinde bulunmalarına rağmen PEN400' de de bir kaynak bulunduğundan hafif bir şekilde hissedilmektedir. Alt gerilim kademelerinin tümünde şiddetli gerilim çökmeleri yaşanmasına rağmen PEN400' deki gerilim kaynağının etkisiyle, yaşanan çökmeler 0.3-0.4 pu civarlarında kalmakta ve 0.01 pu' ya kadar düşmemektedir. PAD132 ve PEN400 gerilim seviyelerinde olduğu gibi ROS33' de iki fazda çökmeye neden olmaktadır. Şekil 5.16-b ve Şekil 5.16-c' de ATP ile yapılan analizler sonucunda EGG400 barasındaki gerilim değerinin besleme hattı uzunluğunun artmasıyla nasıl değişim gösterdiği görülmektedir. Grafiğin diğer baralara göre ters olmasının nedeni mesafenin artmasıyla kısa devre noktasının ilgili baraya yaklaşıyor olmasıdır.



Şekil 5.16. EGG-400 barası besleme hatlarında meydana gelen bir faz kısa devresinde her bir fazın gerilim seviyelerinin mesafeyle değişimi. b) EGG400 barası ATP 1 km gerilimleri, c) EGG400 barası ATP 1000 km gerilimleri.

5.8. Sonuç

Gerilim çökmelerinin etkisi şebeke içerisinde kullanılan transformatör'lerin bağlantı şekillerine, topraklama türlerine, kısa devre noktasının bulunduğu gerilim kademesine ve kısa devre noktasının gerilim kademesine olan mesafesine bağlı olarak değişmektedir.

MATLAB ve ATP modelleri kullanılarak incelenen gerçek şebekede görülmektedir ki transformatörler, büyük empedans değerleri sebebiyle hem üç faz hem de bir faz kısa devresi sonrasında meydana gelen gerilim çökmesi etkilerini üst

gerilim kademelerine azaltarak iletirler. Ancak üst gerilim kademelerinde oluşan bir kısa devre alt gerilim kademelerinde çok şiddetli hissedilmektedir.

Transformatör topraklama türlerine göre bir faz kısa devresinin gerilim çökmelerine etkisi değişkendir. Şebeke üzerinde yapılan modellerde görülmüştür ki rezistans topraklı bir transformatör'ün bulunduğu gerilim kademesinde kısa devre olmayan fazların geriliminde %70'e varan artışlar olmaktadır. Ne var ki direkt topraklı çalışan transformatörlerin bulunduğu kademelerde kısa devre olmayan faz gerilimleri 1 pu civarında kalmaktadır. Topraklama'nın gerçek şebekemiz üzerine olan etkileri Bölüm 6'da daha detaylı incelenecektir.

Bunun yanında bir faz kısa devrelerinde transformatör sargılarının yıldız veya üçgen bağlı olması durumuna göre gerilim çökmesinin alt gerilim kademesine yayılımı esnasında etkilenen fazlarda değişiklik olmaktadır. Üçgen bağlantıda faz-arası gerilimlerden bahsedildiğinden üst gerilim kademesinde meydana gelen bir faz kısa devresi alt gerilim kademesinde 2 fazda çökmeye neden olmaktadır.

Kısa devre noktasının gerilim kademesine olan uzaklığı hem üç faz hem de bir faz kısa devrelerinde hissedilen gerilim çökmesi üzerinde oldukça etkilidir. Mesafe arttıkça artan besleme hattı empedansı ile gerilim çökmesi etkisi azalmaktadır. Kısa devre noktası gerilim kademesine ne kadar yakın ise çökmenin etkisi o derece yüksektir.

Eldeki verilerin yetersizliği nedeniyle yapılan bazı kabullere ve bilinmeyen veriler için mümkün olduğunca tipik değerler kullanılmasına rağmen genel olarak MATLAB ve ATP modelleri hem üç faz hem de bir faz kısa devre analizleri için birbirlerine son derece yakın sonuçlar vermiştir. STU11 ve ROS33 gerilim kademelerinde %95'lere, PAD132 ve yukarı gerilim kademelerinde %100'lere varan oranlarda yaklaşık sonuçlara ulaşılmış olması MATLAB ile yapılan analitik modeller ile ATP ile yapılan elektirksel modellerin birbirini tuttuğunu göstermektedir.

6. NÖTR NOKTASI BAĞLANTI ŞEKLİNİN GERİLİM ÇÖKMESİNE ETKİLERİ

6.1. Giriş

Güç sistemlerinde “Nötr Topraklaması”, sistemin nötr noktasının transformatör, döner makine veya başka bir nokta üzerinden toprakla temas ettirilmesine verilen isimdir. Buna göre topraklanmış bir şebeke, en az bir nötr noktası toprağa direkt veya akım sınırlayıcı bir elaman üzerinden bilerek ve isteyerek temas ettirilmiş şebekedir. Örneğin iletim-dağıtım sistemlerinde kullanılan bir çok trafo nötr noktası direkt olarak topraklanmıştır. Buna karşın generatör nötr noktaları ise kısa devre akımını sınırlayıcı elemanlar üzerinden topraklanırlar [27].

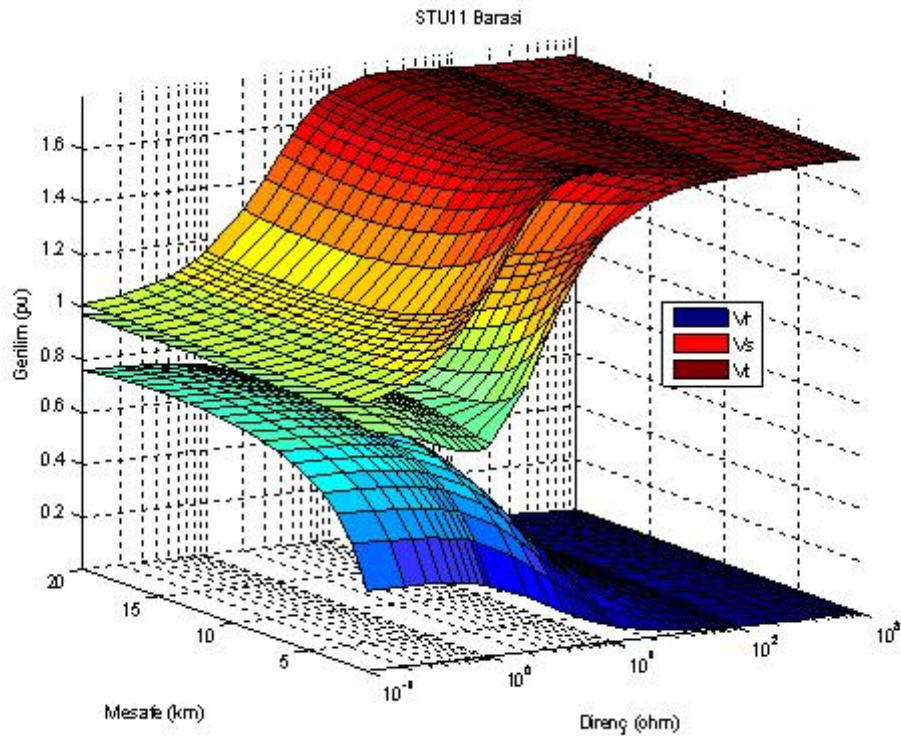
Orta gerilim şebekelerinde topraklama şekilleri ülkeden ülkeye farklılık göstermektedir. Şebekenin büyüklüğü, yük yoğunluğu, yük türü, topraklama noktalarının kalitesi, şebeke türü (havaii, yeraltı veya karışık olması durumu) gibi etkenler işletmecilerin farklı topraklama türü seçmelerinde rol almaktadır. Ayrıca Bir faz veya çok fazlı bir kısa devre durumunda oluşacak arıza akımı, koruma devrelerinin güvenilirliği ve hassaslığı, arıza esnasındaki faz-toprak veya faz arası gerilim seviyeleri, kaynak kalitesi ile sistem ve insan güvenliği gibi durumlarda göz önüne alınmalıdır [28].

6.2. Topraklamanın Gerçek Şebeke Üzerindeki Etkileri

Literatürde üç faz ve bir faz kısa devreleri durumunda gerilim kademelerinde yaşanacak gerilim çökmeleri incelenmiş olup, bunun kısa devre noktasının gerilim kademesine olan mesafesi ile değişimi analiz edilmiştir. Ancak şebeke içerisinde kullanılan transformatör yıldız noktası topraklamasının aynı gerilim çökmesi üzerinde ne gibi bir etki yaratacağı üzerinde durulmamıştır. Tezin bu bölümünde yıldız tarafı direnç üzerinden topraklı 33/11 kV trafosundaki topraklama direncinin büyüklüğünün, bir faz kısa devresi durumunda STU11 barası ve diğer gerilim kademelerindeki gerilim değerlerine nasıl etki ettiği incelenmiştir. Bölüm 5’ de incelemiş olduğumuz gerçek şebekede 33/11 kV transformatörü topraklama direnci kullanılan tüm modellerde elimizdeki verilere göre 6.3Ω olarak alınmıştır. Bu

bölümde yapacağımız analiz için bu değer sonuçların görsel olarak anlaşılır olabilmesi amacıyla logaritmik olarak arttırılmış olup 0.1 ile 1000 Ω arasında değişen 37 değer kullanılmıştır. Bunun için 4. bölüm’de bahsedilen MATLAB modelinde topraklama direnci de mesafede olduğu gibi değişken olarak tanımlanmıştır. ATP modelinde ise yine MATLAB’da yazılan kod ile her bir toprak direnci değeri için değişken mesafe ile gerilim değerleri otomatik olarak hesaplatılmış ve çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tezin son kısmında yer alan Ek.1.4’de hesaplamada kullanılan MATLAB kodlarına bir örnek verilmiştir.

6.2.1. STU-11 Barası



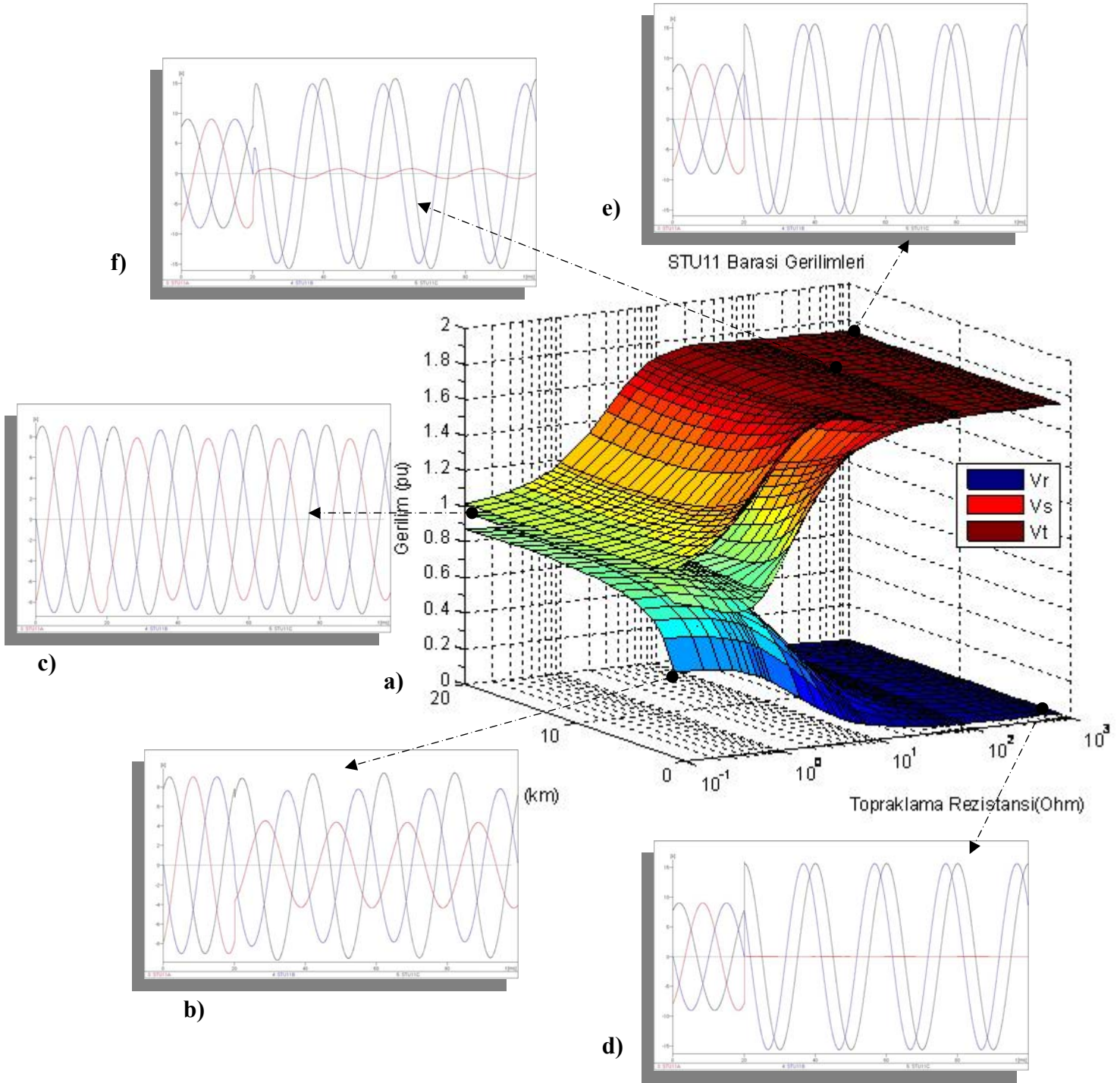
Şekil 6.1. STU11 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. (MATLAB modeli ile)

Şekil 6.1’de 33/11 kV trafosu nötr noktası değişken direnç üzerinden topraklanmışken STU11 gerilim kademesinde bir faz kısa devresi olması durumunda mesafeye bağlı olarak değişen faz toprak gerilimi değerlerinin MATLAB analiz sonuçlarından elde edilen grafikler verilmiştir. Buna göre kısa devre noktasının gerilim kademesine 1 km mesafede olması durumunda topraklama direnci 0.1 Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.3109 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri

de sırasıyla 0.91 ve 1.02 pu' dur. Topraklama direnci arttırıldıkça gerilim çökmesi etkisinin faz toprak gerilimleri için yükseldiği şekilden görülmektedir. Buna göre direnç değeri 1 Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.2704 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri sırasıyla 0.8103 ve 1.4182 pu, 10 Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.0622 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri sırasıyla 1.5815 ve 1.7912 pu, 100 Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.0065 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri sırasıyla 1.7187 ve 1.7408 pu ve son olarak da 1000 Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de faz arası gerilim değerine denk gelen 1.73 pu olarak hesaplanmıştır.

Kısa devre noktasının gerilim kademesine 20 km mesafede olması durumunda ise topraklama direnci 0.1 Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.7603 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de sırasıyla 0.969 ve 1.0105 pu' dur. Direnç değeri 1 Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.7217 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri sırasıyla 0.8933 ve 1.1584 pu, 10 Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.348 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri sırasıyla 1.2985 ve 1.7045 pu, 100 Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.044 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri sırasıyla 1.6883 ve 1.745 pu ve son olarak da 1000 Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de faz arası gerilim değerine denk gelen 1.73 pu olarak hesaplanmıştır.

Buna göre kısa devre noktası direnç değeri 0.1-1 Ω aralığında iken şebeke transformatör yıldız noktası direkt topraklı şebeke gibi, 100-1000 Ω aralığında ise yıldız noktası yalıtılmış şebeke gibi davranmaktadır. Kısa devre noktasının mesafesinin artması gerilim çökmesi etkisini genel olarak azaltmaktadır.



Şekil 6.2. a) STU11 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. (ATP modeli ile) b) 0.1Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede gerilimler, c) 0.1Ω topraklama direnci ve 20 km mesafede gerilimler, d) 1000Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede gerilimler, e) 1000Ω topraklama direnci ve 20 km mesafede gerilimler, f) 50Ω topraklama direnci ve 10 km mesafede gerilimler.

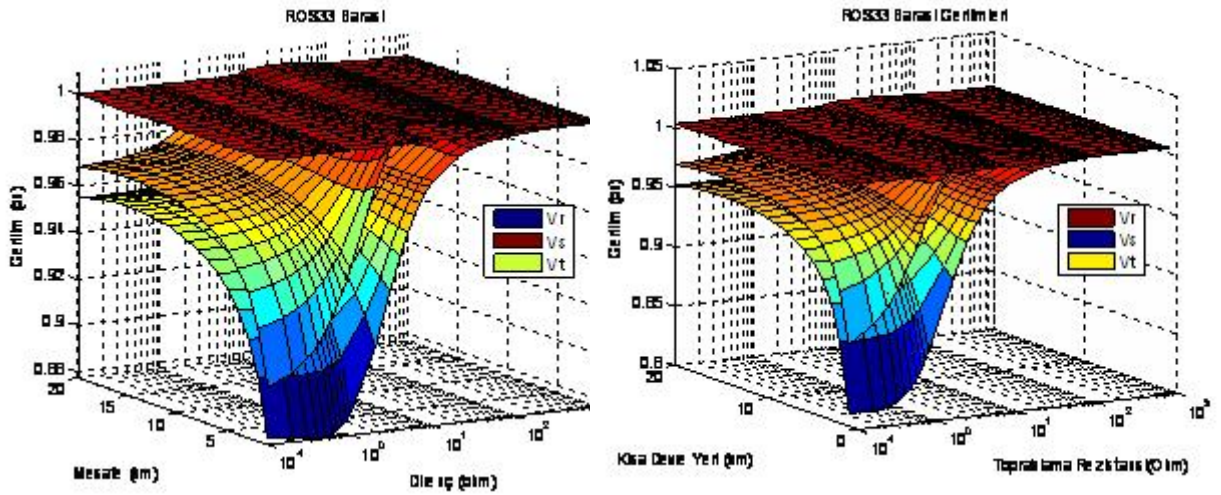
Şekil 6.2-a' da 33/11 kV trafosu nötr noktası değişken direnç üzerinden topraklanmışken STU11 gerilim kademesinde bir faz kısa devresi olması durumunda, mesafeye bağlı olarak değişen faz toprak gerilimi değerlerinin ATP analiz

sonuçlarından elde edilen grafikler verilmiştir. Buna göre kısa devre noktasının gerilim kademesine 1 km mesafede olması durumunda topraklama direnci 0.1Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.4859 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de sırasıyla 0.87 ve 1.05 pu'dur. Topraklama direnci arttırıldıkça gerilim çökmesi etkisinin faz toprak gerilimleri için yükseldiği şekilden görülmektedir. Buna göre direnç değeri 1Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.3644 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri sırasıyla 0.915 ve 1.57 pu, 10Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.063 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri sırasıyla 1.6385 ve 1.7792 pu, 100Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.0069 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri sırasıyla 1.73 ve 1.7446 pu ve son olarak da 1000Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.001 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de faz arası gerilim değerine denk gelen 1.73 pu olarak hesaplanmıştır.

Kısa devre noktasının gerilim kademesine 20 km mesafede olması durumunda ise topraklama direnci 0.1Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.87 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de sırasıyla 0.968 ve 1.0177 pu'dur. Direnç değeri 1Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.8142 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri sırasıyla 0.8936 ve 1.185 pu, 10Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.3582 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri sırasıyla 1.3491 ve 1.7156 pu, 100Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.0444 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri sırasıyla 1.699 ve 1.7488 pu ve son olarak da 1000Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.047 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de faz arası gerilim değerine denk gelen 1.73 ve 0.74 pu olarak hesaplanmıştır.

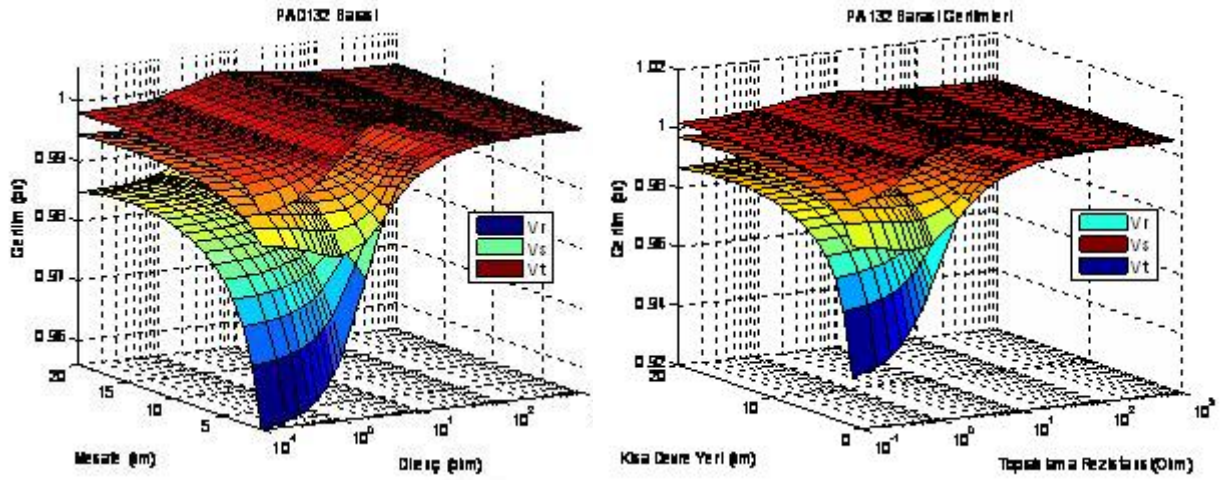
Şekil 6.2-b' de ATP ile yapılan analizlere göre 0.1Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede, Şekil 6.2-c' de de ATP ile yapılan analizlere göre 0.1Ω topraklama direnci ve 20 km mesafede faz gerilimleri verilmiştir. Bir faz kısa devresi sonucunda arızalı faz geriliminin mesafe ile değişimi, arızasız fazlarda ise kısa devre sonucu herhangi bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Şekil 6.2-d' de ATP ile yapılan analizlere göre 1000Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede, Şekil 6.2-e' de de ATP ile yapılan analizlere göre 1000Ω topraklama direnci ve 20 km mesafede faz gerilimleri verilmiştir. Bir faz kısa devresi sonucunda arızalı faz geriliminin mesafe ile değişimi, arızasız fazlarda ise kısa devre sonucu yaşanan gerilim yükselmesinin durumu görülmektedir. Şekil 6.2-f' de ATP ile yapılan analizlere göre 50Ω topraklama direnci ve 10 km mesafede faz gerilimlerinin durumu görülmektedir.

Her ne kadar Şekil 6.1'de MATLAB modeli için, Şekil 6.2-a'da da ATP modeli için verilen faz toprak gerilimi grafiklerinde topraklama direnci arttırıldıkça gerilim çökmesinin etkisi artıyor gibi görünüyorsa da bu gerilim kademesindeki gerilim çökmesinin etkisini doğru olarak yorumlayabilmek için Bölüm 4'deki nötr noktası topraklaması konusunda Şekil 4.4'de anlatıldığı gibi faz arası gerilimlere bakmak gerekmektedir. Zira bir faz kısa devresi meydana geldiği anda, arıza olan faz gerilimi toprak gerilimine eşit olurken sağlıklı faz gerilimlerinde de faz toprak gerilimi değerine ulaşmaktadır. Bu sebeple faz arası gerilim değerlerine bakıldığında STU11 barasında yaşanan gerilim çökmesinin etkisi diğer baralarda görüldüğü şekilde topraklama direnci arttıkça azalacak şekilde olacaktır.



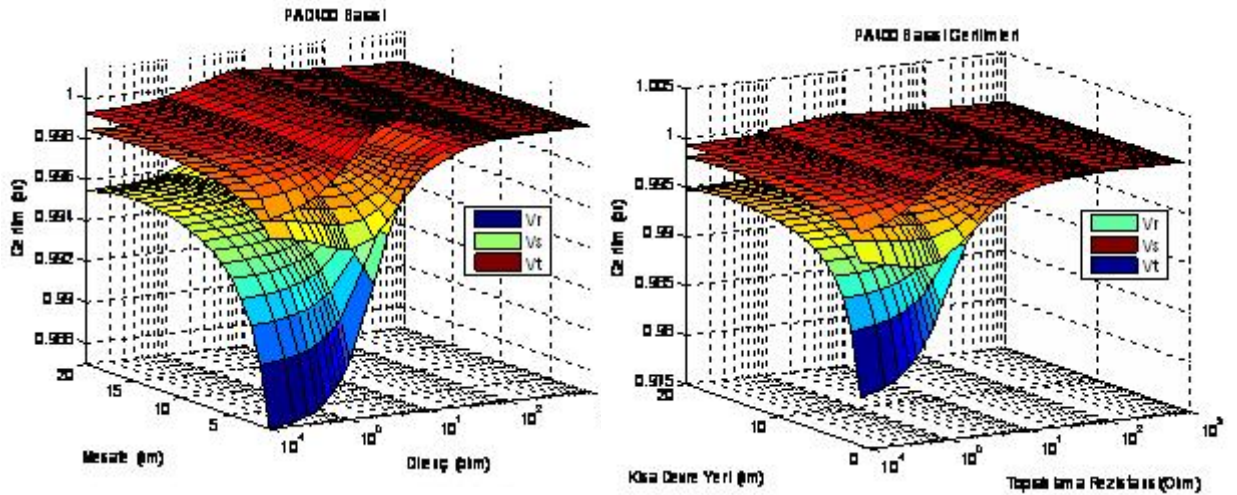
Şekil 6.3. ROS33 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.

Şekil 6.3' de ROS33 gerilim kademesindeki her bir fazın gerilim seviyesi 33/11 kV trafosu' nun değişken topraklama direnci değerlerine ve STU11 gerilim kademesi besleme hattında meydana gelen bir faz kısa devresinin mesafesine bağlı olarak kıyaslanmaktadır. Hem MATLAB hem de ATP modeli sonuçlarına göre bir üst gerilim kademesi olan ROS33' de önemli bir gerilim çökmesi hissedilmemektedir ancak bu kademedeki trafonun üçgen sargısı nedeniyle iki fazın kısa devreden etkilendiği görülmektedir.



Şekil 6.4. PAD132 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.

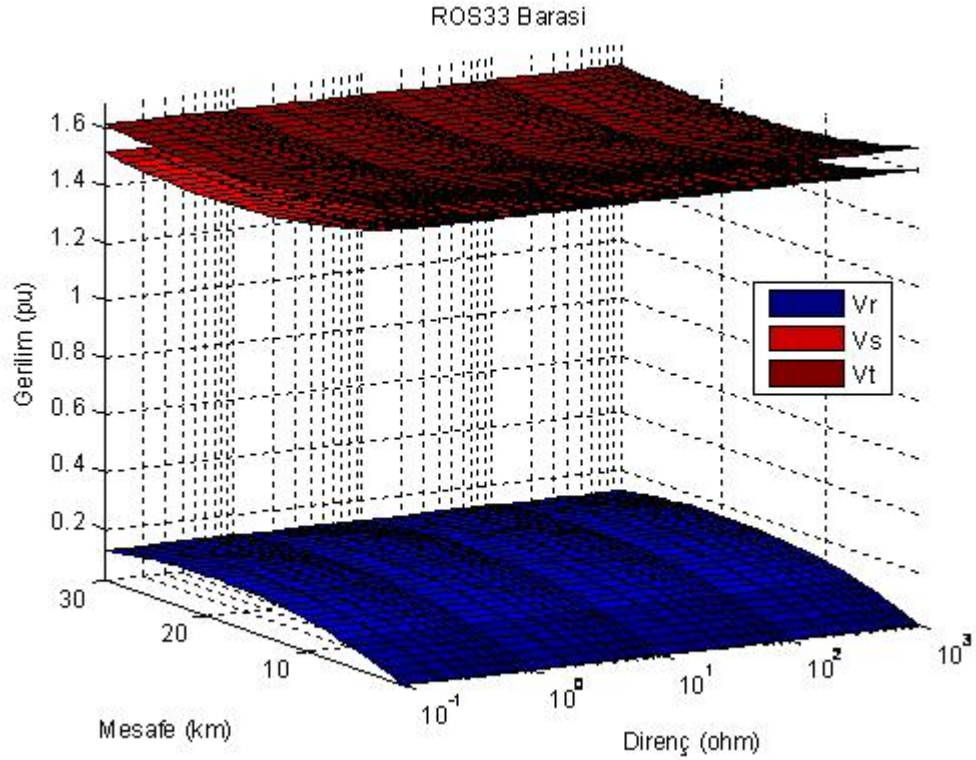
Şekil 6.4’ te PAD132 gerilim kademesindeki her bir fazın gerilim seviyesi 33/11 kV trafosu’ nun değişken topraklama direnci değerlerine ve STU11 gerilim kademesi besleme hattında meydana gelen bir faz kısa devresinin mesafesine bağlı olarak kıyaslanmaktadır. Hem MATLAB hem de ATP modeli sonuçlarına göre bu gerilim kademesinde önemli bir gerilim çökmesi hissedilmemektedir



Şekil 6.5. PAD400 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.

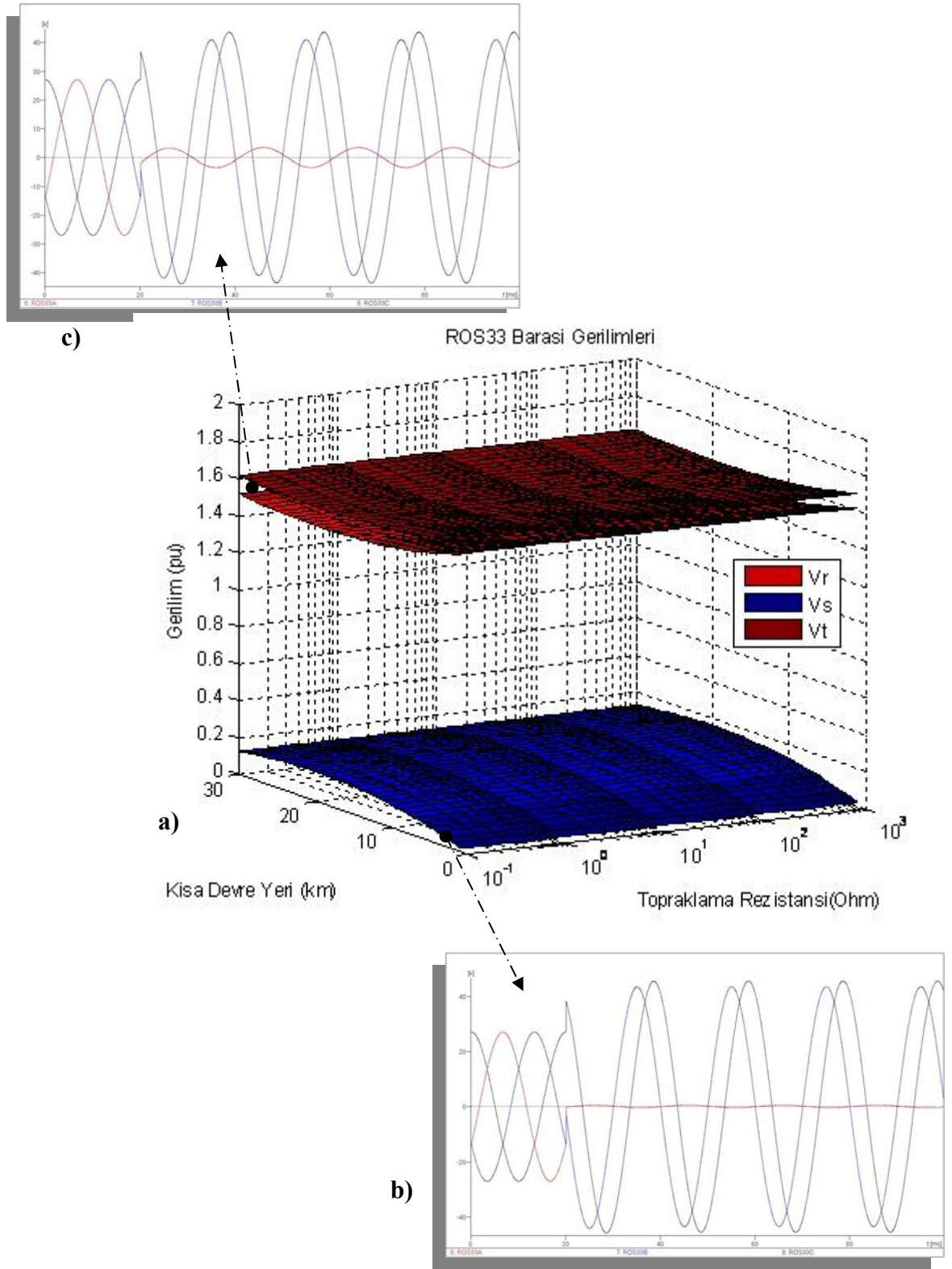
Şekil 6.5’ de PAD400 gerilim kademesindeki her bir fazın gerilim seviyesi 33/11 kV trafosu’ nun değişken topraklama direnci değerlerine ve STU11 gerilim kademesi besleme hattında meydana gelen bir faz kısa devresinin mesafesine bağlı olarak kıyaslanmaktadır. Hem MATLAB hem de ATP modeli sonuçlarına göre bu gerilim kademesinde neredeyse hiç gerilim çökmesi hissedilmemektedir.

6.2.2. ROS-33 Barası



Şekil 6.6. ROS33 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. (MATLAB modeli ile)

Şekil 6.6' da 33/11 kV trafosu nötr noktası değişken direnç üzerinden topraklanmışken ROS33 gerilim kademesinde bir faz kısa devresi olması durumunda, mesafeye bağlı olarak değişen faz toprak gerilimi değerlerinin MATLAB analiz sonuçlarından elde edilen grafikler verilmiştir. Buna göre kısa devre noktasının gerilim kademesine 1 km mesafede olması durumunda topraklama direnci 0.1Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.0183 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de sırasıyla 1.6083 ve 1.6852 pu' dur. Kısa devre noktasının gerilim kademesine uzaklığı 30 km' ye çıkartıldığında kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.1261 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de sırasıyla 1.5161 ve 1.6138 pu' dur. Topraklama direncinin arttırılması durumunda hiç bir topraklama direnci değeri için gerilim seviyesinde değişim gözlenmemektedir. ROS33 gerilim kademesi 33/11 kV trafosu topraklama direncinden tamamen bağımsızdır.

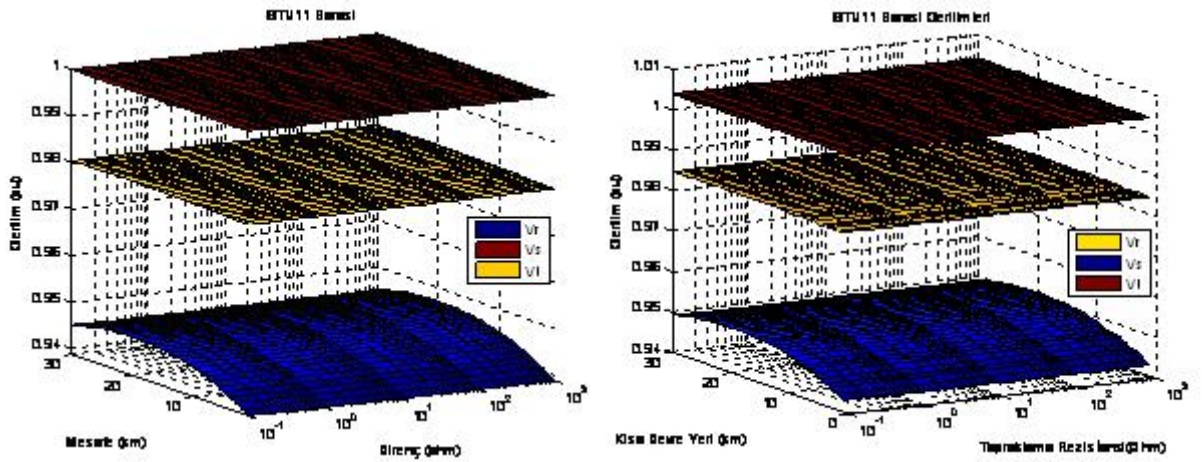


Şekil 6.7. a) ROS33 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. (ATP modeli ile), b) 0.1Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede gerilimler, c) 0.1Ω topraklama direnci ve 30 km mesafede gerilimler

Şekil 6.7-a' da 33/11 kV trafosu nötr noktası değişken direnç üzerinden topraklanmışken ROS33 gerilim kademesinde bir faz kısa devresi olması

durumunda, mesafeye bağlı olarak değişen faz toprak gerilimi değerlerinin ATP analiz sonuçlarından elde edilen grafikler verilmiştir. Buna göre kısa devre noktasının gerilim kademesine 1 km mesafede olması durumunda topraklama direnci 0.1Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.0185 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de sırasıyla 1.615 ve 1.6931 pu'dur. Kısa devre noktasının gerilim kademesine uzaklığı 30 km'ye çıkartıldığında kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.127 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de sırasıyla 1.5235 ve 1.6212 pu'dur. Topraklama direncinin artırılması durumunda hiç bir topraklama direnci değeri için gerilim seviyesinde değişim gözlenmemektedir. ROS33 gerilim kademesi 33/11 kV trafosu topraklama direncinden tamamen bağımsızdır.

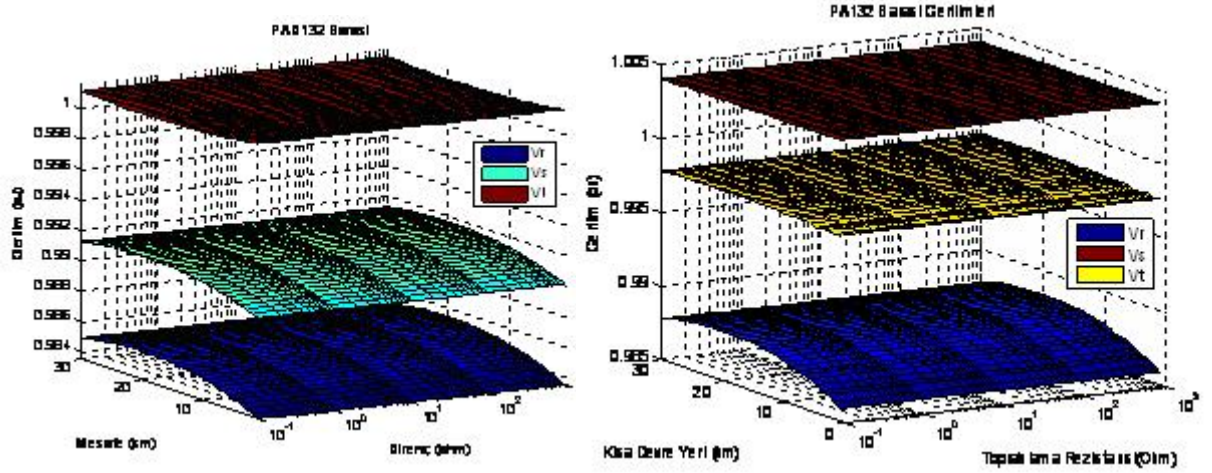
Şekil 6.7-b' de ATP ile yapılan analizlere göre 0.1Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede, Şekil 6.7-c' de de ATP ile yapılan analizlere göre 0.1Ω topraklama direnci ve 30 km mesafede faz gerilimleri verilmiştir. Bir faz kısa devresi sonucunda arızalı faz geriliminin mesafe ile değişimi, arızasız fazlarda ise kısa devre sonucu yaşanan gerilim yükselmesinin durumu görülmektedir.



Şekil 6.8. STU11 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.

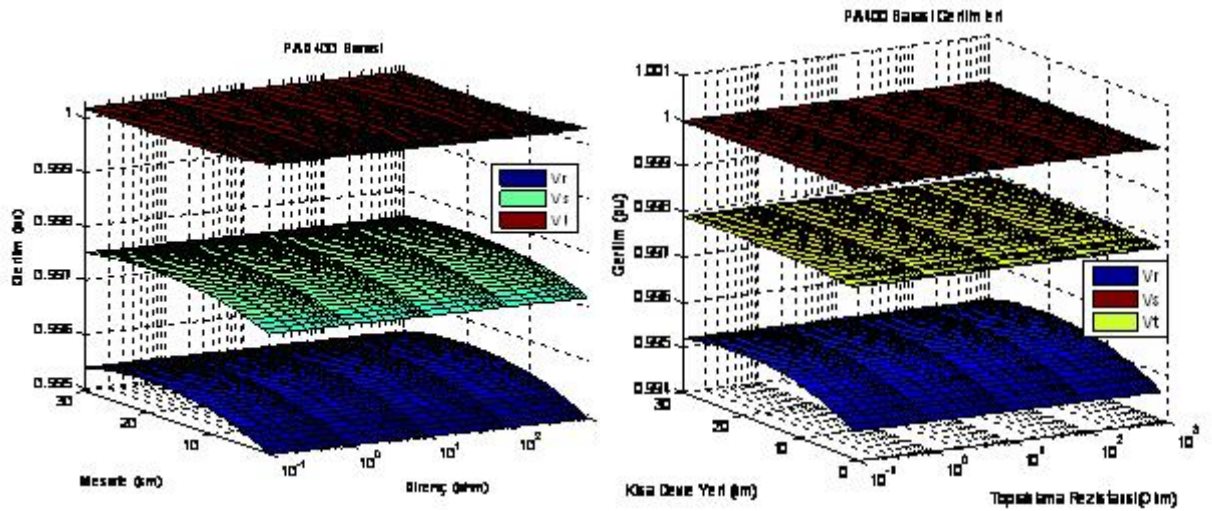
Şekil 6.8' de STU11 gerilim kademesindeki her bir fazın gerilim seviyesi 33/11 kV trafosu'nun değişken topraklama direnci değerlerine ve ROS33 gerilim kademesi besleme hattında meydana gelen bir faz kısa devresinin mesafesine bağlı olarak kıyaslanmaktadır. Hem MATLAB hem de ATP modeli sonuçlarına göre bu gerilim kademesinde bir fazda derin gerilim çökmesi hissedilirken diğer iki faz

etkilenmemektedir. Bunun yanında topraklama direncindeki değişikliğin gerilim seviyelerinde etkisi görülmemektedir.



Şekil 6.9. PAD132 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.

Şekil 6.9’ da PAD132 gerilim kademesindeki her bir fazın gerilim seviyesi 33/11 kV trafosu’ nun değişken topraklama direnci değerlerine ve ROS33 gerilim kademesi besleme hattında meydana gelen bir faz kısa devresinin mesafesine bağlı olarak kıyaslanmaktadır. Hem MATLAB hem de ATP modeli sonuçlarına göre önemli bir gerilim çökmesi hissedilmemektedir. Bunun yanında topraklama direncindeki değişikliğin gerilim seviyelerinde etkisi görülmemektedir.

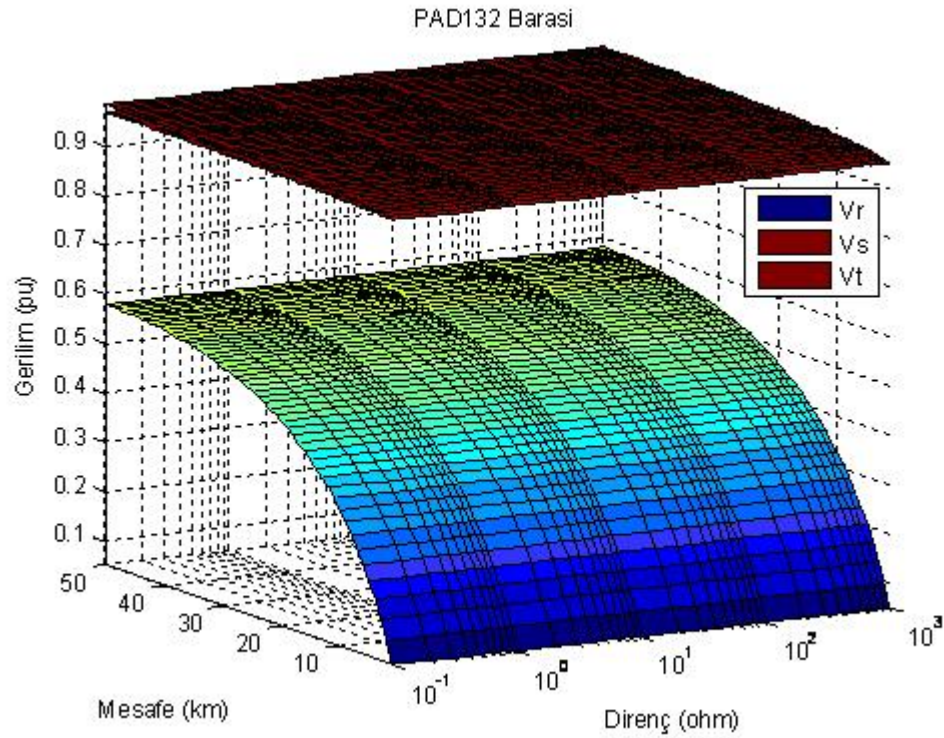


Şekil 6.10. PAD400 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.

Şekil 6.10’ da PAD400 gerilim kademesindeki her bir fazın gerilim seviyesi 33/11 kV trafosu’ nun değişken topraklama direnci değerlerine ve ROS33 gerilim

kademesi besleme hattında meydana gelen bir faz kısa devresinin mesafesine bağlı olarak kıyaslanmaktadır. Hem MATLAB hem de ATP modeli sonuçlarına göre önemli bir gerilim çökmesi hissedilmemektedir. Bunun yanında topraklama direncindeki değişikliğin gerilim seviyelerinde etkisi görülmemektedir.

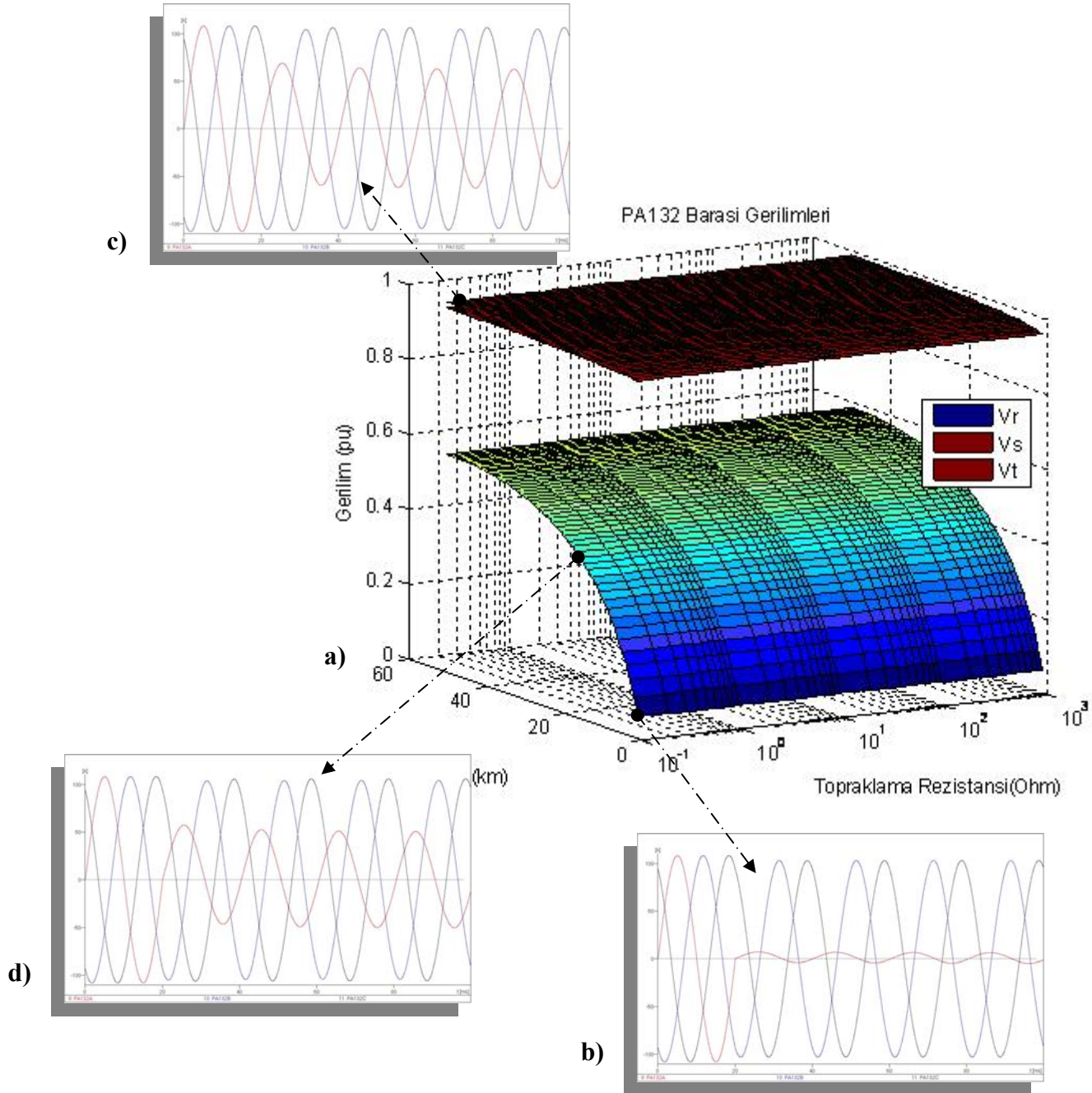
6.2.3. PAD-132 Barası



Şekil 6.11. PAD132 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. (MATLAB modeli ile)

Şekil 6.11’de 33/11 kV trafosu nötr noktası değişken direnç üzerinden topraklanmışken PAD132 gerilim kademesinde bir faz kısa devresi olması durumunda, mesafeye bağlı olarak değişen faz toprak gerilimi değerlerinin MATLAB analiz sonuçlarından elde edilen grafikler verilmiştir. Buna göre kısa devre noktasının gerilim kademesine 1 km mesafede olması durumunda topraklama direnci 0.1Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.05 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de 0.9522 pu’ dur. Kısa devre noktasının gerilim kademesine uzaklığı 50 km’ye çıkartıldığında kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.5789 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de sırasıyla 0.9697 ve 0.9852 pu’ dur. Topraklama direncinin arttırılması durumunda hiç bir topraklama direnci değeri için gerilim

seviyesinde değişim gözlenmemektedir. PAD132 gerilim kademesi 33/11 kV trafosu topraklama direncinden tamamen bağımsızdır.

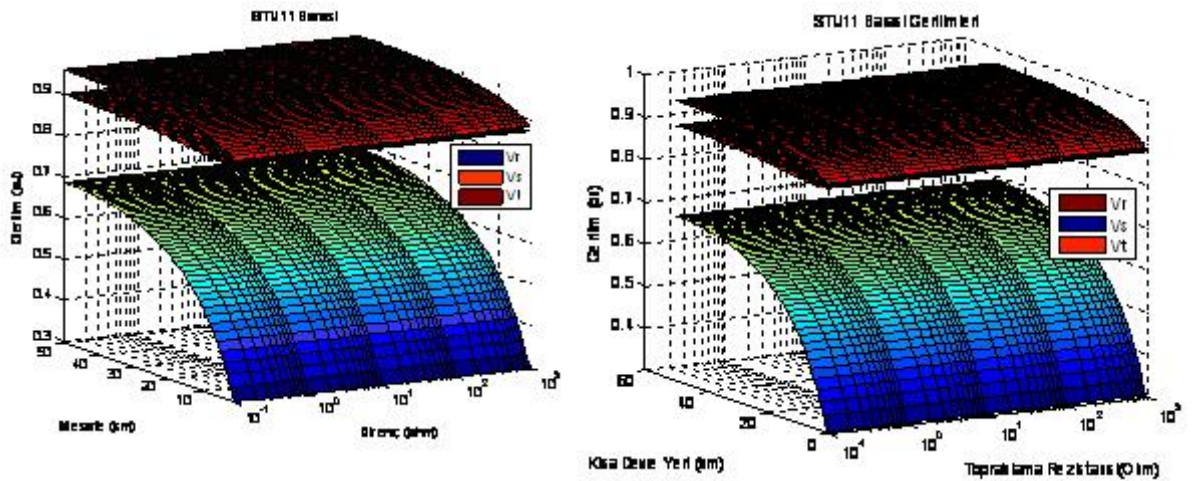


Şekil 6.12. a) PAD132 barasında toprak direncinin mesafeye bağı olarak gerilime etkisi. (ATP modeli ile), b) 0.1 Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede gerilimler, c) 0.1 Ω topraklama direnci ve 50 km mesafede gerilimler, d) 0.1 Ω topraklama direnci ve 10 km mesafede gerilimler

Şekil 6.12-a' da 33/11 kV trafosu nötr noktası değişken direnç üzerinden topraklanmışken PAD132 gerilim kademesinde bir faz kısa devresi olması

durumunda, mesafeye bağlı olarak değişen faz toprak gerilimi değerlerinin ATP analiz sonuçlarından elde edilen grafikler verilmiştir. Buna göre kısa devre noktasının gerilim kademesine 1 km mesafede olması durumunda topraklama direnci 0.1Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.059 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de 0.9562 pu'dur. Kısa devre noktasının gerilim kademesine uzaklığı 50 km'ye çıkartıldığında kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.5835 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de sırasıyla 0.9738 ve 0.9893 pu'dur. Topraklama direncinin artırılması durumunda hiç bir topraklama direnci değeri için gerilim seviyesinde değişim gözlenmemektedir. PAD132 gerilim kademesi 33/11 kV trafosu topraklama direncinden tamamen bağımsızdır.

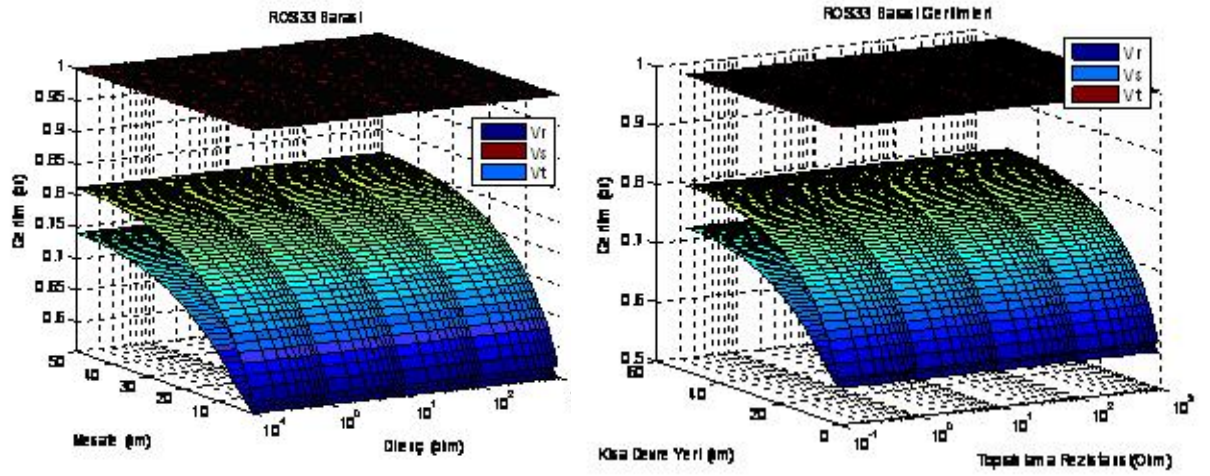
Şekil 6.7-b' de ATP ile yapılan analizlere göre 0.1Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede, Şekil 6.7-c' de de ATP ile yapılan analizlere göre 0.1Ω topraklama direnci ve 50 km mesafede faz gerilimleri verilmiştir. Bir faz kısa devresi sonucunda arızalı faz geriliminin mesafe ile değişimi, arızasız fazlarda ise kısa devre sonucu herhangi bir gerilim yükselmesinin olmadığı görülmektedir. Şekil 6.7-d' de ATP ile yapılan analizlere göre 0.1Ω topraklama direnci ve 10 km mesafede faz gerilimlerinin durumu görülmektedir.



Şekil 6.13. STU11 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.

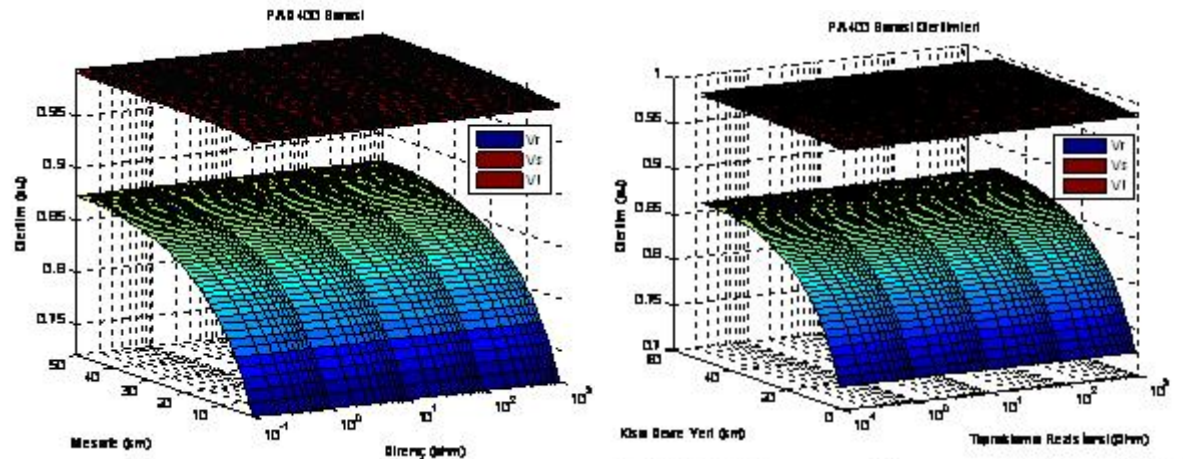
Şekil 6.13' de STU11 gerilim kademesindeki her bir fazın gerilim seviyesi 33/11 kV trafosu' nun değişken topraklama direnci değerlerine ve PAD132 gerilim kademesi besleme hattında meydana gelen bir faz kısa devresinin mesafesine bağlı olarak kıyaslanmaktadır. Hem MATLAB hem de ATP modeli sonuçlarına göre bir

fazda şiddetli gerilim çökmesi hissedilmektedir. Bunun yanında topraklama direncindeki değişikliğin gerilim seviyelerinde etkisi görülmemektedir.



Şekil 6.14. ROS33 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.

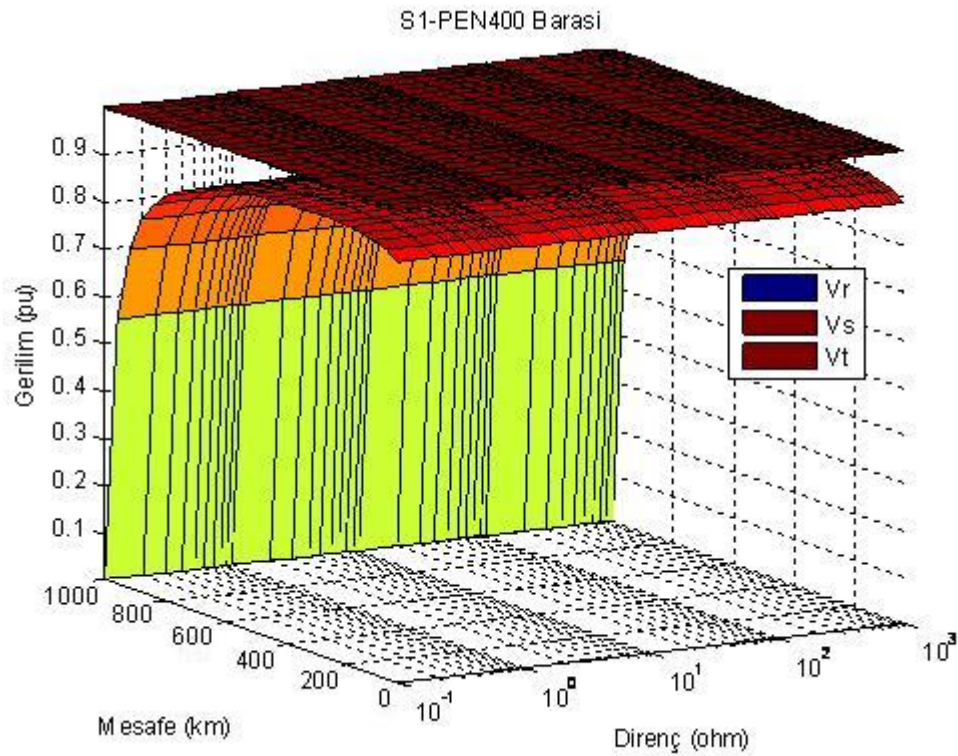
Şekil 6.14’ de ROS33 gerilim kademesindeki her bir fazın gerilim seviyesi 33/11 kV trafosu’ nun değişken topraklama direnci değerlerine ve PAD132 gerilim kademesi besleme hattında meydana gelen bir faz kısa devresinin mesafesine bağlı olarak kıyaslanmaktadır. Hem MATLAB hem de ATP modeli sonuçlarına göre ROS33 trafosu üçgen sargısı sebebi ile iki fazda şiddetli gerilim çökmesi yaşanmaktadır. Diğer faz gerilim seviyesi 1 pu’ dur. Topraklama direncindeki değişikliğin gerilim seviyelerinde etkisi görülmemektedir.



Şekil 6.15. PAD400 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.

Şekil 6.15’ de PAD400 gerilim kademesindeki her bir fazın gerilim seviyesi 33/11 kV trafosu’ nun değişken topraklama direnci değerlerine ve PAD132 gerilim kademesi besleme hattında meydana gelen bir faz kısa devresinin mesafesine bağlı olarak kıyaslanmaktadır. Hem MATLAB hem de ATP modeli sonuçlarına göre gerilim seviyesinde hafif bir düşüş gözlenmektedir. Topraklama direncindeki değişikliğin gerilim seviyelerinde etkisi görülmemektedir.

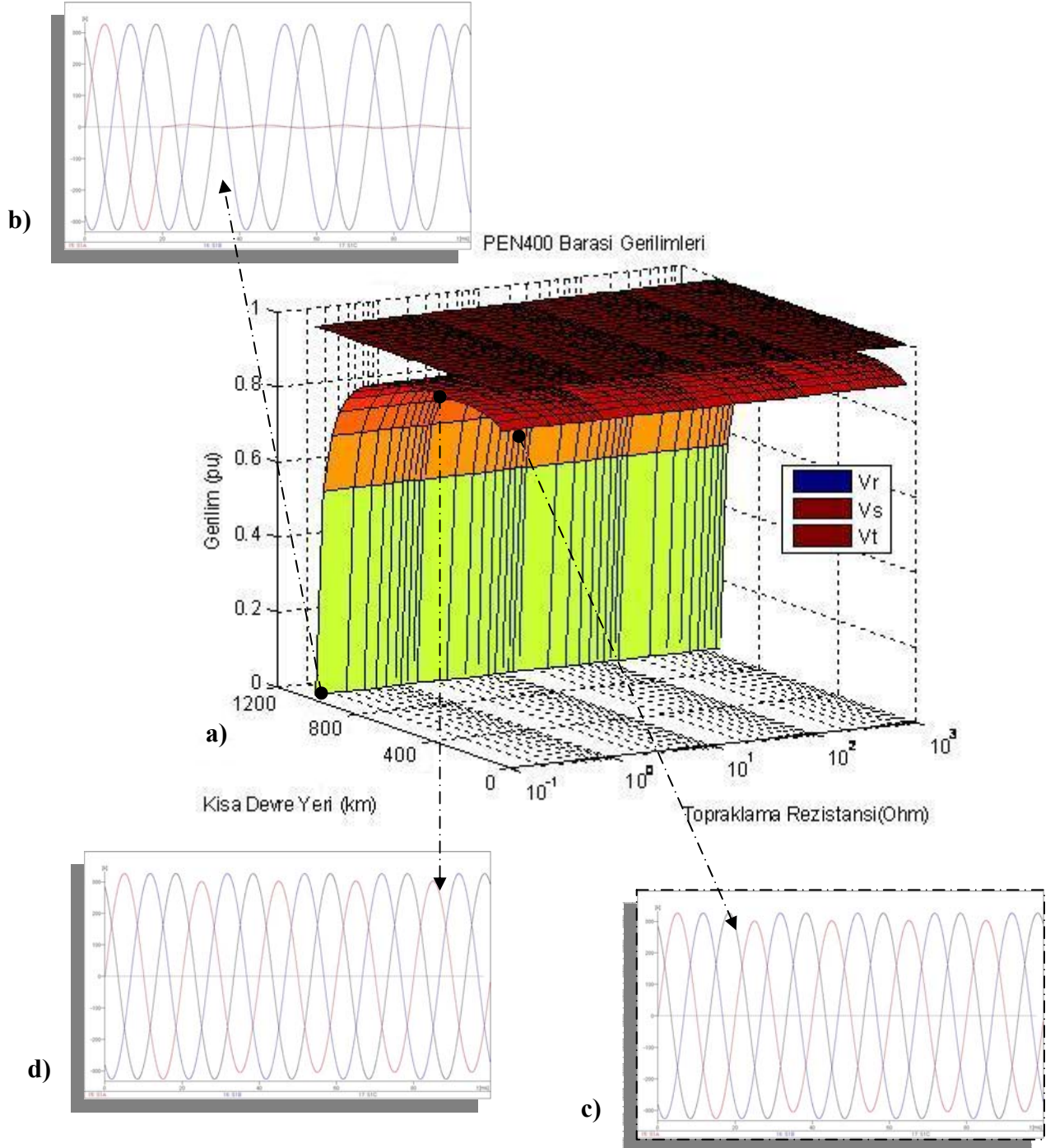
6.2.4. PEN-400 Barası



Şekil 6.16. PEN400 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. (MATLAB modeli ile)

Şekil 6.16’ da 33/11 kV trafosu nötr noktası değişken direnç üzerinden topraklanmışken PEN400 gerilim kademesinde bir faz kısa devresi olması durumunda, mesafeye bağlı olarak değişen faz toprak gerilimi değerlerinin MATLAB analiz sonuçlarından elde edilen grafikler verilmiştir. Buna göre kısa devre noktasının gerilim kademesine 1 km mesafede olması durumunda topraklama direnci 0.1Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.052 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de sırasıyla 0.9994 ve 0.9988 pu’ dur. Kısa devre noktasının gerilim kademesine uzaklığı 1000 km’ ye çıkartıldığında kısa devre olan fazın

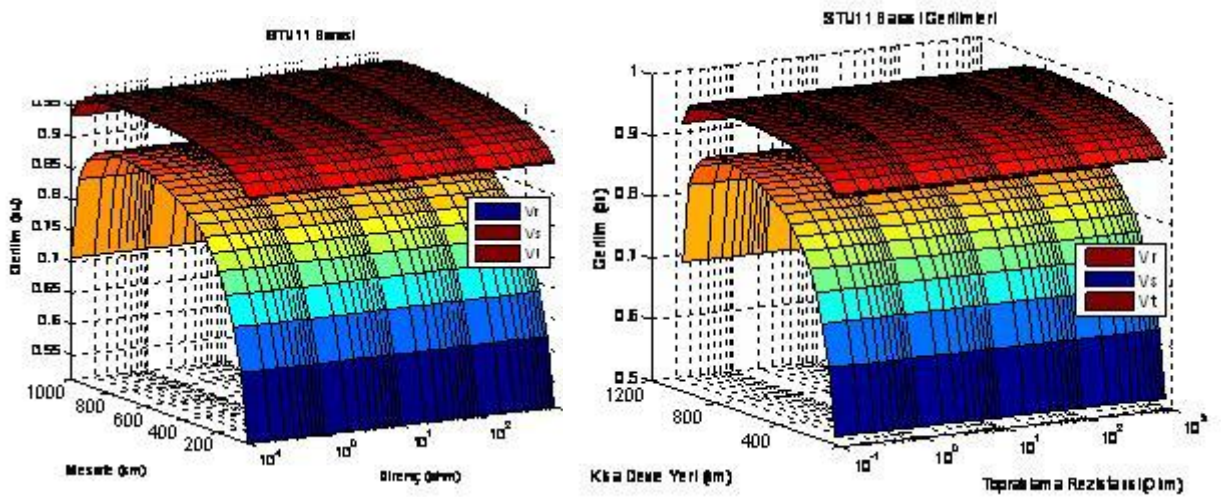
gerilim seviyesi 0.89 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de sırasıyla 0.999 ve 0.9981 pu' dur. Topraklama direncinin artırılması durumunda ise hiç bir topraklama direnci değeri için gerilim seviyesinde değişim gözlenmemektedir. PEN400 gerilim kademesi 33/11 kV trafosu topraklama direncinden tamamen bağımsızdır.



Şekil 6.17. a) PEN400 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. (ATP modeli ile), b) 0.1 Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede gerilimler, c) 0.1 Ω topraklama direnci ve 1000 km mesafede gerilimler, d) 0.1 Ω topraklama direnci ve 10 km mesafede gerilimler

Şekil 6.17-a' da 33/11 kV trafosu nötr noktası değişken direnç üzerinden topraklanmışken PEN400 gerilim kademesinde bir faz kısa devresi olması durumunda, mesafeye bağlı olarak değişen faz toprak gerilimi değerlerinin ATP analiz sonuçlarından elde edilen grafikler verilmiştir. Buna göre kısa devre noktasının gerilim kademesine 1 km mesafede olması durumunda topraklama direnci 0.1Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.016 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de 0.99 pu' dur. Kısa devre noktasının gerilim kademesine uzaklığı 1000 km' ye çıkartıldığında kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.8934 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de değişmeyerek 0.99 pu' da kalmaktadır. Topraklama direncinin arttırılması durumunda hiç bir topraklama direnci değeri için gerilim seviyesinde değişim gözlenmemektedir. PEN400 gerilim kademesi 33/11 kV trafosu topraklama direncinden tamamen bağımsızdır.

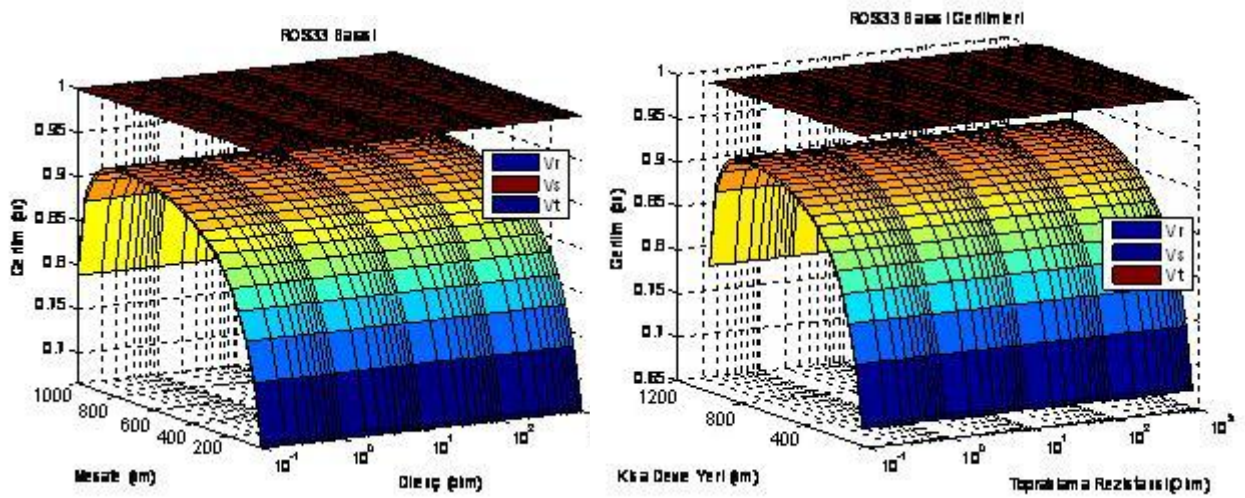
Şekil 6.17-b' de ATP ile yapılan analizlere göre 0.1Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede, Şekil 6.17-c' de de ATP ile yapılan analizlere göre 0.1Ω topraklama direnci ve 1000 km mesafede faz gerilimleri verilmiştir. Bir faz kısa devresi sonucunda arızalı faz geriliminin mesafe ile değişimi, arızasız fazlarda ise kısa devre sonucu herhangi bir gerilim yükselmesinin olmadığı görülmektedir. Şekil 6.7-d' de ATP ile yapılan analizlere göre 0.1Ω topraklama direnci ve 10 km mesafede faz gerilimlerinin durumu görülmektedir.



Şekil 6.18. STU11 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.

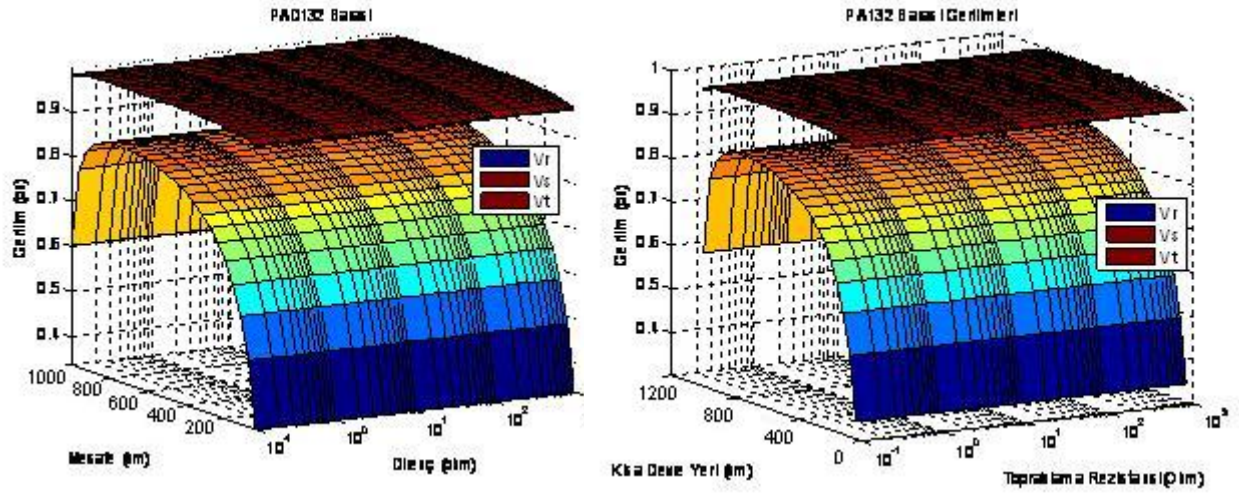
Şekil 6.18' de STU11 gerilim kademesindeki her bir fazın gerilim seviyesi 33/11 kV trafosu' nun değişken topraklama direnci değerlerine ve PEN400 gerilim

kademesi besleme hattında meydana gelen bir faz kısa devresinin mesafesine bağlı olarak kıyaslanmaktadır. Hem MATLAB hem de ATP modeli sonuçlarına göre bir fazda şiddetli gerilim çökmesi yaşanmaktayken diğer iki faz etkilenmemektedir. Bunun yanında topraklama direncindeki değişikliğin gerilim seviyelerinde etkisi görülmemektedir. Her iki modelde de bir faz kısa devresi sonucunda besleme hattı mesafesi uzadıkça gerilim çökmesinin etkisi azalmaktayken bir noktadan sonra tekrar artış gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi kısa devre noktasından bakıldığında görülmekte olan eşdeğer devre empedansının besleme hattı ortasında maksimum değere ulaşması, hattın ortasından itibaren ise azalmaya başlamasıdır.



Şekil 6.19. ROS33 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.

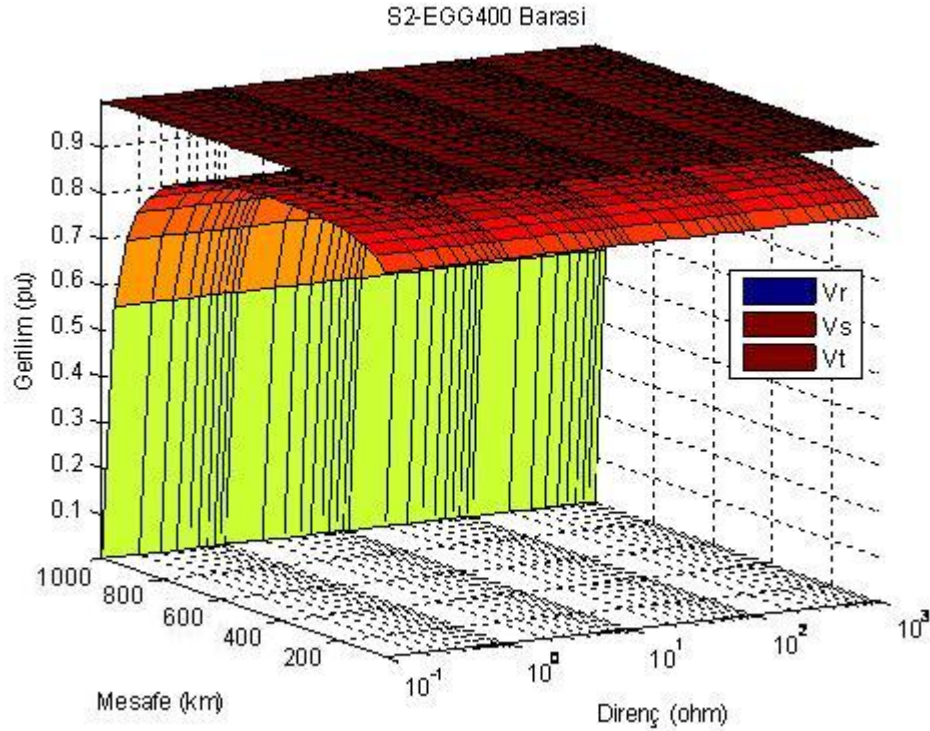
Şekil 6.19’ da ROS33 gerilim kademesindeki her bir fazın gerilim seviyesi 33/11 kV trafosu’ nun değişken topraklama direnci değerlerine ve PEN400 gerilim kademesi besleme hattında meydana gelen bir faz kısa devresinin mesafesine bağlı olarak kıyaslanmaktadır. Hem MATLAB hem de ATP modeli sonuçlarına göre ROS33 trafosu üçgen sargısı sebebi ile iki fazda şiddetli gerilim çökmesi yaşanmaktadır. Topraklama direncindeki değişikliğin gerilim seviyelerinde etkisi görülmemektedir. Her iki modelde de bir faz kısa devresi sonucunda besleme hattı mesafesi uzadıkça gerilim çökmesinin etkisi azalmaktayken bir noktadan sonra tekrar artış gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi kısa devre noktasından bakıldığında görülmekte olan eşdeğer devre empedansının besleme hattı ortasında maksimum değere ulaşması, hattın ortasından itibaren ise azalmaya başlamasıdır.



Şekil 6.20. PAD132 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.

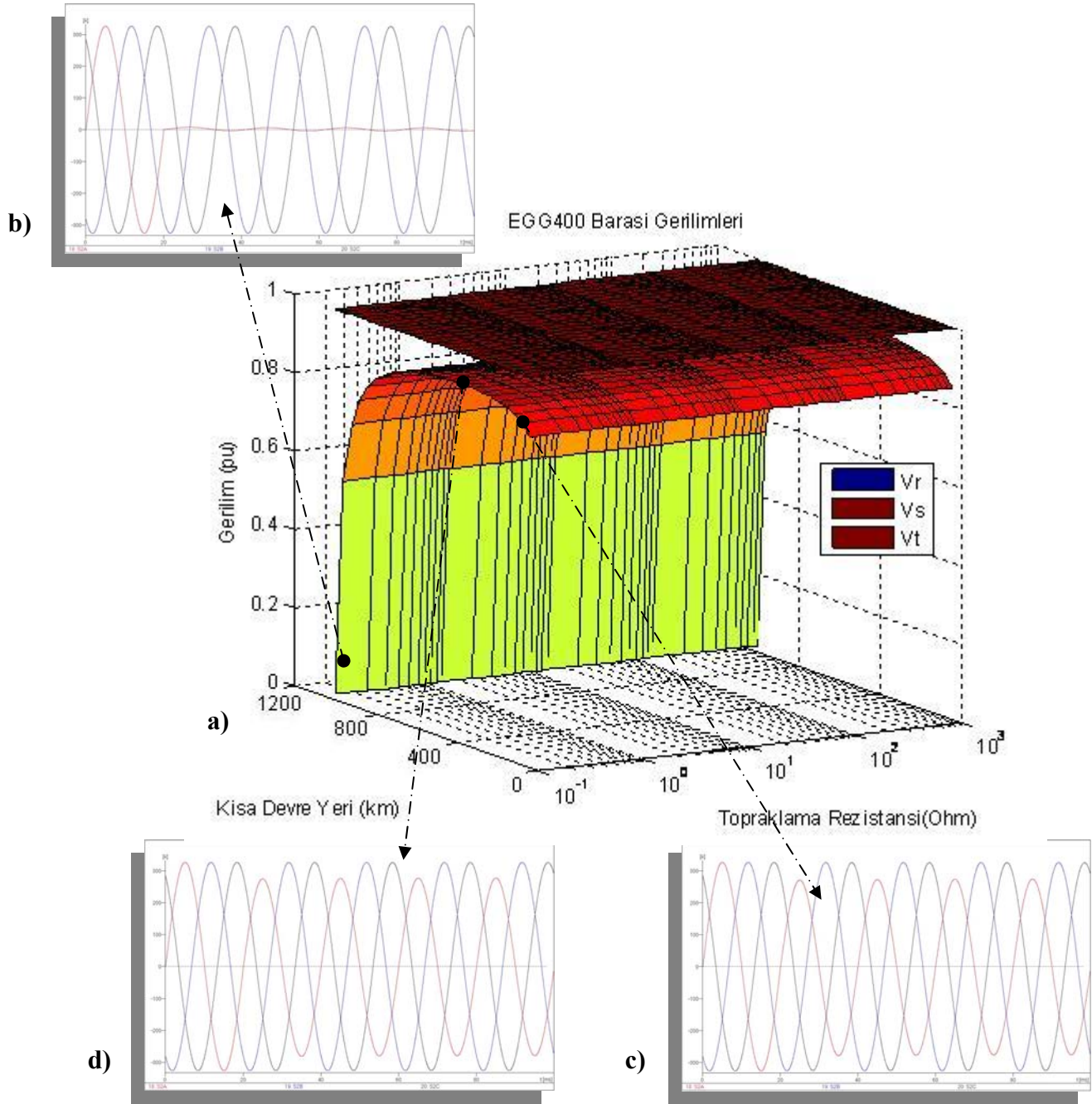
Şekil 6.20’ de PAD132 gerilim kademesindeki her bir fazın gerilim seviyesi 33/11 kV trafosu’ nun değişken topraklama direnci değerlerine ve PEN400 gerilim kademesi besleme hattında meydana gelen bir faz kısa devresinin mesafesine bağlı olarak kıyaslanmaktadır. Hem MATLAB hem de ATP modeli sonuçlarına göre bir fazda şiddetli gerilim çökmesi yaşanmaktayken, diğer iki fazda ise 1 pu. Gerilim seviyesi korunmaktadır. Topraklama direncindeki değişikliğin gerilim seviyelerinde etkisi görülmemektedir. Her iki modelde de bir faz kısa devresi sonucunda besleme hattı mesafesi uzadıkça gerilim çökmesinin etkisi azalmaktayken bir noktadan sonra tekrar artış gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi kısa devre noktasından bakıldığında görülmekte olan eşdeğer devre empedansının besleme hattı ortasında maksimum değere ulaşması, hattın ortasından itibaren ise azalmaya başlamasıdır.

6.2.5. EGG-400 Barası



Şekil 6.21. EGG400 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. (MATLAB modeli ile)

Şekil 6.21’de 33/11 kV trafosu nötr noktası değişken direnç üzerinden topraklanmışken EGG400 gerilim kademesinde bir faz kısa devresi olması durumunda, mesafeye bağlı olarak değişen faz toprak gerilimi değerlerinin MATLAB analiz sonuçlarından elde edilen grafikler verilmiştir. Buna göre kısa devre noktasının gerilim kademesine 1 km mesafede olması durumunda topraklama direnci 0.1Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.052 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de sırasıyla 0.9986 ve 0.9975 pu’ dur. Kısa devre noktasının gerilim kademesine uzaklığı 1000 km’ye çıkartıldığında kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.843 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de sırasıyla 0.9985 ve 0.9972 pu’ dur. Topraklama direncinin arttırılması durumunda ise hiç bir topraklama direnci değeri için gerilim seviyesinde değişim gözlenmemektedir. EGG400 gerilim kademesi 33/11 kV trafosu topraklama direncinden tamamen bağımsızdır.

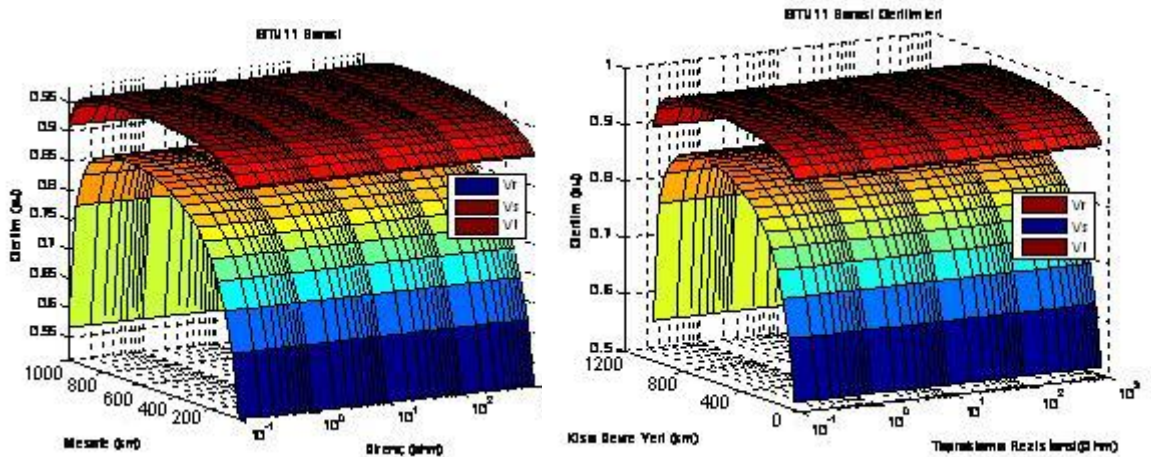


Şekil 6.22. a) EGG400 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. (ATP modeli ile) , b) 0.1 Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede gerilimler, c) 0.1 Ω topraklama direnci ve 1000 km mesafede gerilimler, d) 0.1 Ω topraklama direnci ve 10 km mesafede gerilimler

Şekil 6.22-a' da 33/11 kV trafosu nötr noktası değişken direnç üzerinden topraklanmışken EGG400 gerilim kademesinde bir faz kısa devresi olması durumunda, mesafeye bağlı olarak değişen faz toprak gerilimi değerlerinin ATP analiz sonuçlarından elde edilen grafikler verilmiştir. Buna göre kısa devre noktasının gerilim kademesine 1 km mesafede olması durumunda topraklama direnci

0.1 Ω iken kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.016 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de 0.99 pu'dur. Kısa devre noktasının gerilim kademesine uzaklığı 1000 km'ye çıkartıldığında kısa devre olan fazın gerilim seviyesi 0.847 pu, sağlıklı fazların gerilim seviyeleri de değişmeyerek 0.99 pu'da kalmaktadır. Topraklama direncinin artırılması durumunda hiç bir topraklama direnci değeri için gerilim seviyesinde değişim gözlenmemektedir. EGG400 gerilim kademesi 33/11 kV trafosu topraklama direncinden tamamen bağımsızdır.

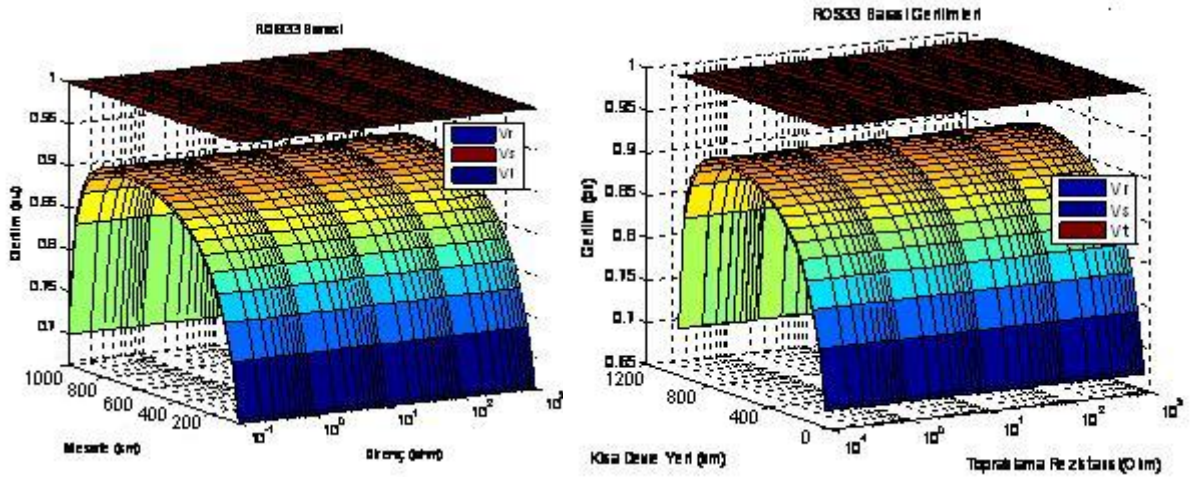
Şekil 6.17-b' de ATP ile yapılan analizlere göre 0.1 Ω topraklama direnci ve 1 km mesafede, Şekil 6.17-c' de de ATP ile yapılan analizlere göre 0.1 Ω topraklama direnci ve 1000 km mesafede faz gerilimleri verilmiştir. Bir faz kısa devresi sonucunda arızalı faz geriliminin mesafe ile değişimi, arızasız fazlarda ise kısa devre sonucu herhangi bir gerilim yükselmesinin olmadığı görülmektedir. Şekil 6.7-d' de ATP ile yapılan analizlere göre 0.1 Ω topraklama direnci ve 10 km mesafede faz gerilimlerinin durumu görülmektedir.



Şekil 6.23 STU11 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.

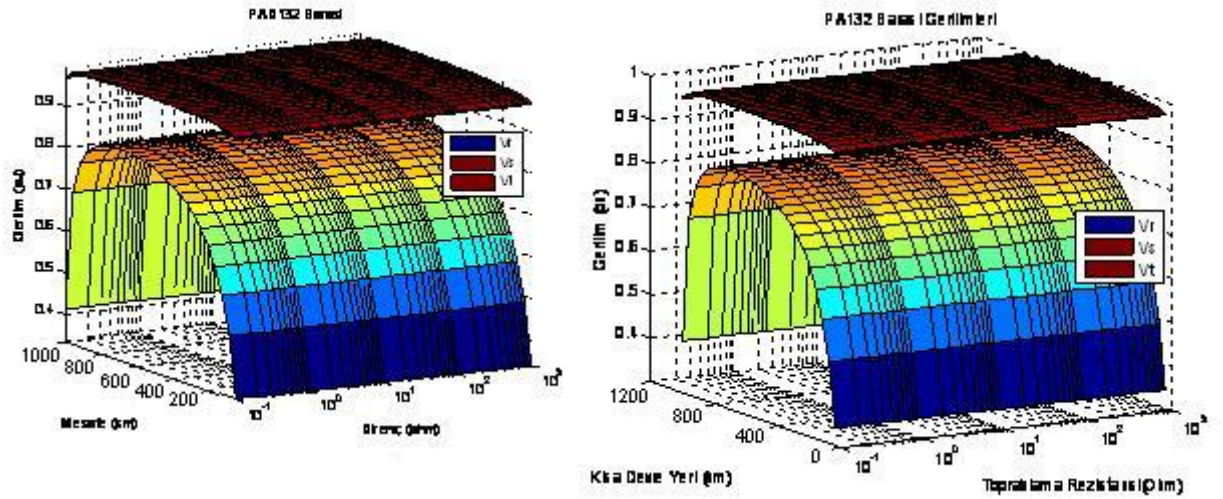
Şekil 6.23' de STU11 gerilim kademesindeki her bir fazın gerilim seviyesi 33/11 kV trafosu' nun değişken topraklama direnci değerlerine ve EGG400 gerilim kademesi besleme hattında meydana gelen bir faz kısa devresinin mesafesine bağlı olarak kıyaslanmaktadır. Hem MATLAB hem de ATP modeli sonuçlarına göre bir fazda şiddetli gerilim çökmesi hissedilmektedir. Topraklama direncindeki değişikliğin gerilim seviyelerinde etkisi görülmemektedir. Her iki modelde de bir faz kısa devresi sonucunda besleme hattı mesafesi uzadıkça gerilim çökmesinin etkisi

azalmaktayken bir noktadan sonra tekrar artış gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi kısa devre noktasından bakıldığında görülmekte olan eşdeğer devre empedansının besleme hattı ortasında maksimum değere ulaşması, hattın ortasından itibaren ise azalmaya başlamasıdır.



Şekil 6.24. ROS33 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.

Şekil 6.24’ de ROS33 gerilim kademesindeki her bir fazın gerilim seviyesi 33/11 kV trafosu’ nun değişken topraklama direnci değerlerine ve EGG400 gerilim kademesi besleme hattında meydana gelen bir faz kısa devresinin mesafesine bağlı olarak kıyaslanmaktadır. Hem MATLAB hem de ATP modeli sonuçlarına göre ROS33 trafosu üçgen sargısı sebebi ile iki fazda şiddetli gerilim çökmesi yaşanmaktadır. Topraklama direncindeki değişikliğin gerilim seviyelerinde etkisi görülmemektedir. Her iki modelde de bir faz kısa devresi sonucunda besleme hattı mesafesi uzadıkça gerilim çökmesinin etkisi azalmaktayken bir noktadan sonra tekrar artış gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi kısa devre noktasından bakıldığında görülmekte olan eşdeğer devre empedansının besleme hattı ortasında maksimum değere ulaşması, hattın ortasından itibaren ise azalmaya başlamasıdır.



Şekil 6.25. PAD132 barasında toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilime etkisi. a) MATLAB modeli ile; b) ATP modeli ile.

Şekil 6.25’ de PAD132 gerilim kademesindeki her bir fazın gerilim seviyesi 33/11 kV trafosu’ nun değişken topraklama direnci değerlerine ve EGG400 gerilim kademesi besleme hattında meydana gelen bir faz kısa devresinin mesafesine bağlı olarak kıyaslanmaktadır. Hem MATLAB hem de ATP modeli sonuçlarına göre bir fazda şiddetli gerilim çökmesi yaşanmaktayken, diğer iki fazda ise 1 pu. Gerilim seviyesi korunmaktadır. Topraklama direncindeki değişikliğin gerilim seviyelerinde etkisi görülmemektedir. Her iki modelde de bir faz kısa devresi sonucunda besleme hattı mesafesi uzadıkça gerilim çökmesinin etkisi azalmaktayken bir noktadan sonra tekrar artış gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi kısa devre noktasından bakıldığında görülmekte olan eşdeğer devre empedansının besleme hattı ortasında maksimum değere ulaşması, hattın ortasından itibaren ise azalmaya başlamasıdır.

6.3. Sonuç

Transformatör yıldız noktası topraklamasının amacı kısa devre durumunda değeri değişen kısa devre akımı dolayısıyla gerilimlerde meydana gelebilecek dengesizliklerin sınırlandırılmasıdır.

Çalışma boyunca incelediğimiz gerçek şebekede, en düşük gerilim seviyesinde değişken direnç üzerinden yapılan topraklamanın aynı gerilim seviyesinde meydana gelen bir faz kısa devresi sonucunda oluşan aşırı gerilim ve gerilim çökmesi problemlerinde etkin olduğu görülmüştür. Buna göre, kısa devre noktası direnç değeri 0.1-1 Ω aralığında iken şebeke transformatör yıldız noktası direkt topraklı

şebeke gibi davranmakta olup kısa devre olan hattın faz toprak geriliminde çökme yaşanmakta ancak sağlıklı hatların faz toprak gerilim değerlerinde kayda değer bir değişiklik olmamaktadır. Aynı zamanda gerilim çökmesinin kısa devre noktasının gerilim kademesine olan mesafesine bağlı olduğu ve mesafe arttıkça etkisini kaybettiği görülmektedir. Kısa devre noktası direnç değeri 1-100 Ω aralığında iken şebeke direnç üzerinden topraklı şebeke gibi davranmakta olup topraklama direnci değeri arttıkça arızalı hattın faz toprak geriliminde yaşanan çökmenin etkisinin arttığı, sağlıklı fazların faz toprak gerilimlerinin yükseldiği görülmektedir. Kısa devre noktasının gerilim kademesine olan mesafesinin gerilimler üzerinde halen etkili olduğu görülmektedir. Kısa devre noktası direnç değeri 100-1000 Ω aralığında iken ise şebeke yıldız noktası yalıtılmış şebeke gibi davranmakta olup kısa devre olan faz gerilimi 0 pu, sağlıklı faz gerilimleri faz arası gerilim değerine denk gelen 1.73 pu'ya erişmektedir. Ancak kısa devre noktasının gerilim kademesine olan uzaklığının ne olursa olsun çökme ve aşırı gerilim aynı değerde kalmaktadır. Her ne kadar nötr noktası topraklaması değişken direnç ile incelenen gerilim kademesi STU11' de faz-toprak gerilimi grafiklerinde topraklama direnci arttırıldıkça gerilim çökmesinin etkisi artıyor gibi görünüyorsa da bu gerilim kademesindeki gerilim çökmesinin etkisini doğru olarak yorumlayabilmek için faz arası gerilimlere bakmak gerekmektedir. Zira bir faz kısa devresi meydana geldiği anda, arıza olan faz gerilimi toprak gerilimine eşit olurken sağlıklı faz gerilimlerinde de faz toprak gerilimi değerine ulaşmaktadır. Bu sebeple faz arası gerilim değerlerine bakıldığında STU11 barasında yaşanan gerilim çökmesinin etkisi diğer baralarda görüldüğü şekilde topraklama direnci arttıkça azalacak şekilde olacaktır.

Aynı kısa devre durumunun üst gerilim kademelerine olan etkisi incelendiğinde değerlerden ve grafikten her bir faz için çökme ve aşırı gerilim olaylarının benzer eğilim gösterdiği ancak son derece sığ kaldıkları görülebilir. 5. bölüm' den de görüldüğü üzere kısa devre sonucu oluşan gerilim çökmeleri transformatörler üzerinden üste gerilim kademelerine geçerken etkilerini yitirmektedir.

En düşük gerilim seviyesinde değişken direnç üzerinden yapılan topraklamanın üst gerilim kademelerinde bir faz kısa devresi olması durumunda oluşacak olan gerilim çökmesine etkileri incelendiğinde topraklama direncinin diğer hiç bir gerilim

kademesinde etkisinin olmadığı, yalnızca kısa devre noktasının gerilim kademesine olan mesafesinin çökme üzerinde etkisi olduğu görülmektedir.

7. SONUÇ

Bu çalışmada güç kalitesi problemlerinden en sık rastlanana olan gerilim çökmesi problemleri üzerinde durulmuştur. Gerilim çökmesi teorik hesaplamaları açıklanmış, gerçek bir şebeke üzerinde meydana gelen üç faz ve bir faz kısa devrelerinin şebekenin değişik gerilim kademelerinde meydana getirdikleri etkiler bu hesaplamalara göre bulunmuştur. Gerçek şebekenin MATLAB ve ATP programları kullanılarak analitik ve elektriksel modelleri hazırlanmış, kısa devreler sonucunda her bir baranın nasıl etkilendiği hesaplanmıştır. Literatürde incelenmemiş bir konu olan, şebekede kullanılan transformatörün yıldız noktası topraklamasının üç faz ve bir faz kısa devreleri sonunda gerilim çökmesine etkisi yine gerçek şebeke için hazırlanan MATLAB ve ATP modelleri ile incelenmiştir. Bunların sonucunda gerilim çökmesi etkilerinin kısa devre türü, kısa devre noktasının pcc'ye olan uzaklığı, transformatör yıldız noktası topraklaması, şebeke kısa devre gücü gibi çeşitli etkenlere bağlı olduğu görülmüştür.

Analitik ve elektriksel modeller birbiriyle karşılaştırıldığında kabul edilebilecek mertebede farklılıklar dışında sonuçların birbiriyle tuttuğu görülmektedir. Hesaplar arasındaki küçük farklılıkların en önemli nedenlerinden biri, MATLAB ile yapılan analitik modellerde kullanılan hesaplama yöntemlerinin bara admitans matrisi ve simetrik bileşenlere, ATP ile oluşturulan elektriksel modellerde kullanılan hesaplama yönteminin ise diferansiyel denklemlere dayanıyor olmasıdır. Kullanılan yöntemlere özgü yapılan kabullerin etkisi de başka bir neden olarak belirtilebilir.

Simetrik bir kısa devre olan üç faz kısa devresinde meydana gelen gerilim çökmesi, simetrik olmayan bir kısa devre olan bir faz kısa devresine göre daha sığdır. Bunun nedeni bir faz kısa devresinde hesaplara simetrik bileşenler ve dolayısıyla sıfır sıra devresi empedans değerlerinin de katılıyor olmasıdır. Kısa devre noktası pcc'ye yaklaştıkça pcc'deki ve diğer gerilim kademelerindeki gerilim çökmeleri daha şiddetli hissedilir. Bunun yanında kullanılmakta olan kaynak ne kadar güçlü ise oluşacak olan gerilim çökmesi o derece az hissedilecektir. Aynı zamanda yüksek gerilim kademelerinde meydana gelen bir arıza durumunda gerilim çökmesi etkisi şiddetini kaybetmeden alt kademelere iletilirken, düşük gerilim kademelerinde

meydana gelen bir arıza transformatörlerin yüksek empedans değerlerinde filtrelenerek etkisini kaybeder.

Şebekede kullanılan transformatörlerin topraklama ve sargı biçimleri de gerilim çökmesi üzerinde son derece belirleyici rol oynamaktadır. Yüksek gerilim kademelerinden düşük gerilim kademelerine doğru yayılan bir gerilim çökmesi, transformatör sargı biçimine göre değişikliğe uğrayabilir. Çalışma içerisinde incelenen şebekede buna örnek olarak yıldız-üçgen dönüşümü nedeniyle gerilim çökmesinin iki fazda birden hissedildiği, faz açısı ve büyüklüklerinin değiştiği görülmüştür. Bunun yanında transformatör yıldız noktası topraklaması da kısa devre olan gerilim kademesindeki gerilim değerlerini etkilemektedir. Nötr noktası topraklaması değişken direnç ile incelenen gerilim kademesinde faz toprak gerilim değerleri direnç değeri yükseldiğinde yıldız noktası yalıtılmış şebeke gibi davranmaya başlarken sistemde kısa devre olan hattın faz toprak gerilimi derin çökmeye maruz kalmakta, sağlıklı hatların faz toprak gerilimleri ise faz arası değerlerine kadar yükselmektedir. Direnç değeri düştüğünde ise kısa devre olan fazda gerilim çökmesi daha az hissedilmekte sağlıklı faz gerilimleri ise kısa devreden çok az etkilenmektedir. Her ne kadar nötr noktası topraklaması bulunan gerilim kademesinde faz toprak gerilimi topraklama direnci arttırıldıkça gerilim çökmesinin etkisi artıyor gibi görünüyorsa da bu gerilim kademesindeki gerilim çökmesinin etkisini doğru olarak yorumlayabilmek için faz arası gerilimlere bakmak gerekmektedir. Zira bir faz kısa devresi meydana geldiği anda, arıza olan faz gerilimi toprak gerilimine eşit olurken sağlıklı faz gerilimlerinde de faz toprak gerilimi değerine ulaşmaktadır. Bu sebeple faz arası gerilim değerlerine bakıldığında STU11 barasında yaşanan gerilim çökmesinin etkisi diğer baralarda görüldüğü şekilde topraklama direnci arttıkça azalacak şekilde olacaktır.

Çalışma süresince hem üç faz hem de bir faz kısa devreleri için yalnızca sürekli hal durumları incelenmiştir. Özellikle bir faz kısa devresinde çok daha önem kazanan geçicilikler esnasında oluşan dengesiz gerilimler üzerinde durulmamıştır. Bunun yanında bir faz kısa devresi dışındaki simetrik olmayan kısa devreler de çalışma dışında tutulmuştur. Çalışmanın devamı olarak bu iki konunun ele alınması gerilim çökmelerinin tüm şartlar için karakteristiklerinin belirlenmesi açısından faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **BOLLEN Math H. J.:** '*Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions*', IEEE Publication, Newyork, 2000, ISBN 0-7803-4713-7
- [2] **SARMA Glover:** '*Power System Analysis & Design: with personal computer applications*', PWS Publishing, Boston, 1994, ISBN 0-53493-960-0
- [3] **BOLLEN Math H. J., SABIN D. Daniel, THALLAM R.S.:** '*Voltage Sag Indices-Draft 5* ', Technical report, Working document for IEEE P1564, November 2003.
- [4] **THALLAM R.S., HEYDT G.T.:** '*Power acceptability and voltage sag indices in the three phase sense*', IEEE PES Summer Meeting, July 2000, Seattle.
- [5] **KARACASU Özgür:** 'Orta Gerilim Şebekelerinde Kısa Süreli Gerilim Değişimlerinin Topraklama Metodlarına Bağlı İncelenmesi', GYTE Enerji Sistemleri Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Gebze, 2002
- [6] **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
- [7] **SABIN D. Daniel, GREBE E. Thomas, SUNDARAM Ashok:** '*RMS Voltage Variation Statistical Analysis for a Survey of Distribution System Power Quality Performance*', IEEE Power Engineering society: 1999 Winter meeting: 31 Jan-4 Feb, 1999, New York City, New York, USA/IEEE Power Engineering Society, IEEE, Piscataway, New Jersey, USA, 1999, Vol. 2, pp. 1235-1240.
- [8] **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
- [9] **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

- [10] **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.
- [11] **KENNEDY, B.:** ‘*Power Quality Primer*’, McGraw-Hill, New York, 2000, ISBN 0-07-134416-0
- [12] **BOLLEN Math H. J., STYVAKTAKIS E. :** ‘Characterization of Three-Phase Dips (As Easy As One-Two-Three) 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings., Volume: 1 ,Page(s): 81 - 86 vol.1
- [13] **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
- [14] **ARRILLAGA, J., WATSON, N.R., CHEN, S.:** ‘*Power Systems Quality Assessment*’, John Wiley & Sons Inc., New York, 2000, ISBN 0-471-98865-0
- [15] **BOLLEN, M.H.J., ZHANG, L.:** ‘*Characterization of three-phase unbalanced voltage dips due to faults*’, Electric power system research, Vol.66, No.1, July 2003, pp.59-69.
- [16] **BOLLEN M.H.J.:** ‘Fast Assessment Methods for Voltage Sags in Distribution Systems’, Industry Applications, IEEE Transactions on , Volume: 32 Issue: 6 , Nov.-Dec. 1996 Page(s): 1414 -1423
- [17] **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
- [18] **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
- [19] **Enerji Piyasası Denetleme Kurumu:** “*Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği*”, Resmi Gazete - Şubat 2003
- [20] **IEEE 1250:1995:** ‘*IEEE Guide for service to equipment sensitive to momentary voltage disturbances*’, ISBN 1-55937-528-0
- [21] **IEEE 1159:1995:** ‘*IEEE recommended Practice on monitoring Electric Power Quality*’, ISBN 1-55937-549-3

- [22] **BS EN 50160:2000:** ‘*Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems*’, BRITISH STANDART INSTITUTION, 2000
- [23] **IEC 61000-2-5:1995:** ‘*Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 2: Environment, section 5*’: Classifications of Electromagnetic Environments Descriptions of the Environments
- [24] **ITIC (Information Technology Industry Council):** ‘*ITIC Curve Application Note*’ www.itic.org, 2000 revision
- [25] **IEEE std 142-1991:** IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems
- [26] **IEEE Std C62.92.1-2000:** ‘*IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems – Part I*’, ISBN 0-7381-2633-0
- [27] **GÖNEN Turan:** ‘*Modern Power System Analysis*’, A Wiley-Interscience Publication, New York, 1988
- [28] **FOLLIOT P., BOYER JM., BOLLE S.:** ‘*Neutral Grounding Reactor For Medium Voltage Networks*’, CIRED2001, 18-21 June 2001, Conference Publication No.482, IEE 2001
- [29] **HEATCOTE J. Martin:** “*The J & P Transformer Book*”, 12th Edition, October 1998, ISBN: 0750611588
- [30] **PRIKLER L.; HOIDALEN K.H.:** ‘ATPDRAW User’s Manuel’, Preliminary Release No.1.1, October 2002
- [31] **CAN/AM EMTP USER GROUP:** ‘Alternative Transients Program (ATP) Rule Book’, (Canadian/American EMTP User Group, 1992).

EK.1. MATLAB MODELLERİ

ATP programında hazırlanan elektriksel modelden elde edilen sonuçların kıyaslandığı analitik modeller MATLAB programında yazılan kodlarla hazırlanmıştır. Her bir gerilim kademesinin üç faz ve bir faz kısa devresi durumlarına göre modelleri bulunmaktadır. Ekler CD' sindeki Ek.1.1. dosyası altında Şekil 3.9' daki tüm gerilim kademeleri için üç faz kısa devresi modeli kodları, Ek.1.2. dosyası altında tüm gerilim kademeleri için bir faz kısa devresi modeli kodları, Ek 1.3 dosyası altında ise tüm gerilim kademeleri için STU-11 barasında kullanılan topraklama direncinin mesafeye bağlı olarak gerilim seviyesine etkisi modellenmiş kodları verilmiştir.

Tez içerisinde incelenmiş olan grafikler burada örnekleri verilen kodların sonuna eklenen ayrı kodlarla, ATP sonuçlarını okuyup ayıklayarak aynı grafikte üst üste çizdirilmesi ile elde edilmiştir.

EK.2. ATP MODELLERİ

EK.2.1. Giriş

ATPDraw programı ile Şekil 3.9’ da görülen şebekenin her bir gerilim kademesi için hem üç faz hem de bir faz kısa devrelerinin modelleri oluşturulmuştur. Modelleme yapılırken yerleştirilen her bir elemanın bilgileri “.atp” uzantılı bir dosya içinde program tarafından otomatik olarak oluşturulur. Program çalıştırıldıktan sonra hesaplanan değerlerin bulunduğu “.lis” uzantılı diğer bir dosya yine program tarafından oluşturulur. “.lis” dosyaları ile elde edilen sonuçlar, üç faz ve bir faz kısa devresi durumlarını inceleyerek grafiklerini çizdiren MATLAB programının sonuna eklenen kodlar ile okunarak aynı grafik üzerinde MATLAB ve ATP değişimleri olarak ayrı ayrı gösterilmek üzere çizdirilmiştir.

EK.2.2. Üç Faz Kısa Devresinin Gerilim Çökmesine Etkileri ATP Model ve Kodları

Ekler CD’ sindeki Ek.2.2. dosyası altında Şekil 3.9’ daki tüm gerilim kademeleri için ATPDraw programı ile oluşturulan üç faz kısa devresi modelleri ve bunlardan elde edilen “.atp” ve “.lis” uzantılı dosya çıktıları görülmektedir.

EK.2.3. Bir Faz Kısa Devresinin Gerilim Çökmesine Etkileri ATP Model ve Kodları

Ekler CD’ sindeki Ek.2.3. dosyası altında Şekil 3.9’ daki tüm gerilim kademeleri için ATPDraw programı ile oluşturulan bir faz kısa devresi modelleri ve bunlardan elde edilen “.atp” ve “.lis” uzantılı dosya çıktıları görülmektedir.

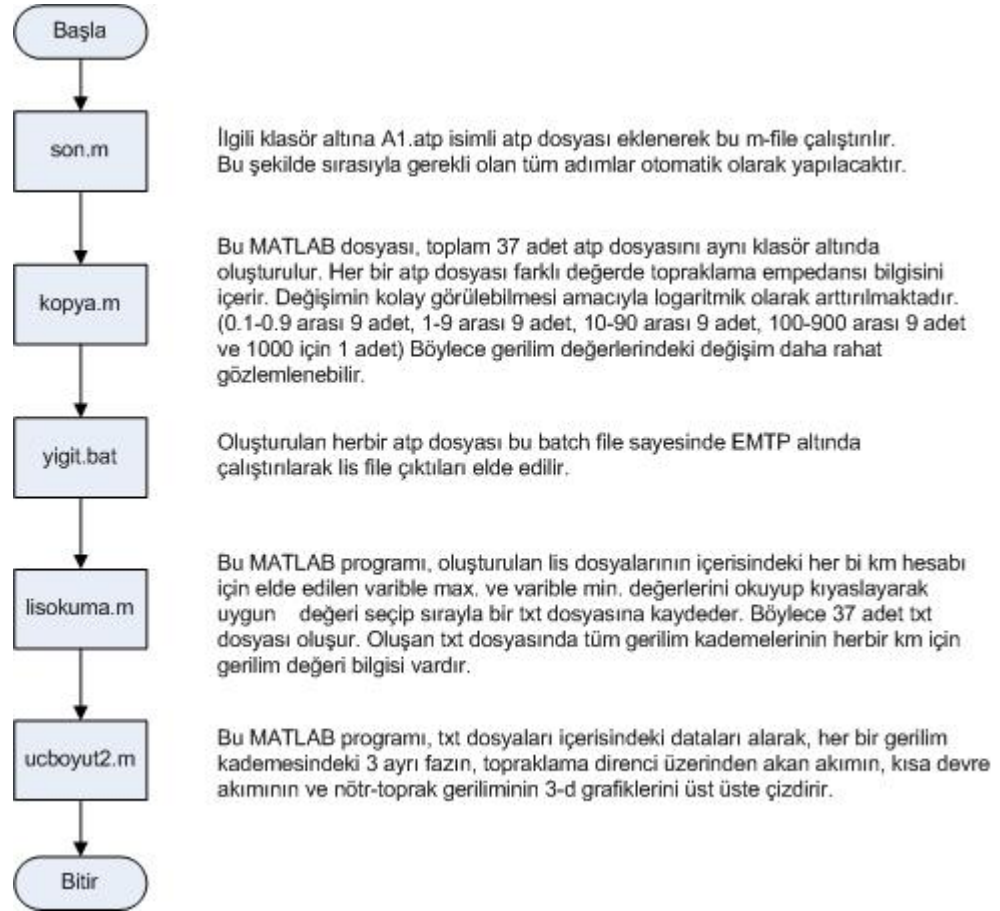
EK.2.4. 33-11 kV Trafosu Topraklama Direncinin Mesafeye Bağlı Olarak Gerilim Seviyesine Etkileri ATP Model ve Kodları

Topraklama direncinin mesafeye bağlı olarak gerilim seviyesine etkilerinin ATP ile incelenmesi, MATLAB ile incelenmesinden farklı olarak daha detaylı ve titiz bir çalışma gerektirdi. Bunun en önemli sebebi olarak ATPDraw/EMTP programının çalışma mantığının farklılığı gösterilebilir.

Kısaca özetlemek gerekirse ATP programı, ATPDraw ile oluşturulan sistem modelinin tüm giriş bilgilerinin bulunduğu ve Ek.2.2. ve Ek.2.3’ de örnekleri görülen “.atp” dosyalarını kullanarak hesaplamaların sonuçlarının bulunduğu ve yine Ek.2.2. ve Ek.2.3’ de örnekleri görülen “.lis” dosyalarını oluşturur. Topraklama direncinin mesafeye bağlı olarak gerilim seviyesine etkilerini grafiksel olarak görebilmek için her bir direnç değerine karşılık gelen gerilim seviyesi bilgilerinin bu “.lis” dosyaları içerisinde doğru olarak bulunması ve grafik çizdirecek programa girilmesi gerekir.

Bu amaçla her bir grafik için yapılan çalışmayı hızlandırmak ve insan arızası ihtimalini sıfıra indirebilmek amacıyla bir dizi MATLAB kodu yazılmış ve toprak direncinin mesafeye bağlı olarak gerilim seviyesine etkilerini gösteren üç boyutlu grafik çıktıları bu kodlar sayesinde elde edilmiştir. Aşağıdaki akış diyagramında belirtilen programların çalışma sırası ve işlevleri görülmektedir.

Ekler CD’ sindeki Ek.2.4. dosyası altında Şekil 3.9’ daki tüm gerilim kademeleri için ATPDraw programı ile oluşturulan 33/11kV trafosu topraklama direncinin mesafeye bağlı olarak gerilim seviyesine etkisi modelleri ve bunlardan elde edilen “.atp” dosyaları verilmiştir. Yine Ek.2.4. dosyası altında verilen data ayıklama dosyaları yardımıyla tüm “.lis” dosyalarına ulaşılabilir. Ayrıca ayıklama dosyaları için bir kullanma kılavuzu da mevcuttur.



Şekil Ek2.1. ATP ile yapılan 33/11kV trafosu topraklama direncinin mesafe ile gerilim çökmesine etkisi analizinde kullanılan programların akış diyagramı.

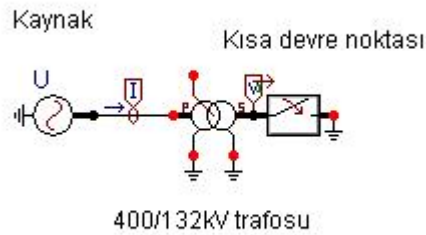
EK.3. TRAF0 KISA DEVRE TESTLERİ

EK.3.1. Giriş

MATLAB ile yapılan matematiksel çözümlerin ATP ile yapılan çözümler ile örtüşmesi için ATPDraw ile yapılan modellerin kaynak, trafo, hat vb. parametrelerinin programın kabul edeceği şekilde uygun değerlerle girilmesi gerekmektedir. Çalışma süresince gerçek şebekemizin ATP modellemesinde en çok problem çıkartan elemanlar trafo modelleri olduğundan, sonuçların güvenilirliğinden emin olabilmek amacıyla basit test sitemlerinde çeşitli testler yapıldı. Testlerin sonuçlarına göre en doğru sonuçları veren trafo modelleri gerçek şebekemiz içerisinde kullanıldı. Eklerin bu kısmında gerçek şebekemizde kullanılan trafo modeli parametrelerinin hesaplanmasında izlenen yol ve örnek hesaplamalardan bahsedilmektedir.

EK.3.2. 400/132kV Trafosu

Şebekede kullanılan 400/132kV trafosu yıldız-yıldız bağlı olup her iki gerilim kademesi de direkt topraklıdır. Şekilde ATPDraw programı ile oluşturulan kısa devre modeli görülmektedir.



Şekil Ek3.1. 400/132kV trafosu kısa devre testi şeması.

ATPDraw programında kaynak ve trafo modelleri bir faz içindir. Bu sebeple baz akımı ve empedansı hesaplamalarında elimizdeki üç faz güç ve gerilim değerlerini bir faza çevirerek kullanmak gerekmektedir. ATPDraw programı kaynak

gerilimi değeri olarak gerilimin tepe değerini kullandığından bir faz geriliminin tepe değeri bulunmalıdır;

$$S_{B3\Phi} = 100 MVA$$

$$S_{B1\Phi} = \frac{100}{3} MVA$$

$$V_{Source} = \frac{400 \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 326598V$$

Trafo yıldız-yıldız bağlı olduğundan hem primer hem de sekonder tarafında kullanılacak gerilim değeri faz-nötr değeridir;

$$V_P = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230kV$$

$$V_S = \frac{132}{\sqrt{3}} = 76.21kV$$

Test sisteminin baz akım ve empedans değerleri yukarıda bulunan kaynak gücü ve gerilimi kullanılarak hesaplanır;

$$I_B = \frac{S_{B1\Phi}}{V_{Bf-n}} = \frac{\frac{100}{3} \times 10^6}{\frac{400}{\sqrt{3}} \times 10^3} = 144.3375 A$$

$$Z_B = \frac{V_{Bf-n}}{I_B} = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}} \times 10^3}{144.3375} = 1600\Omega$$

Baz güç değişmediğinden dolayı trafo empedansı hesabında yapılan dönüştürmede işlemi sonucunda empedans değerinde değişme olmaz;

$$x_{newT} = x_T \cdot \frac{S_{Bnew}}{S_B} = j0.08166 \times \frac{100 \times 10^6}{100 \times 10^6} = j0.08166\Omega$$

Transformatör datalarından elde edilen trafo empedansı değeri baz empedans ile çarpıldığında pu değerden kurtulunarak gerçek değere ulaşılır.

$$X_T = x_T \cdot Z_B = j0.08166 \times 1600 = j130.65\Omega$$

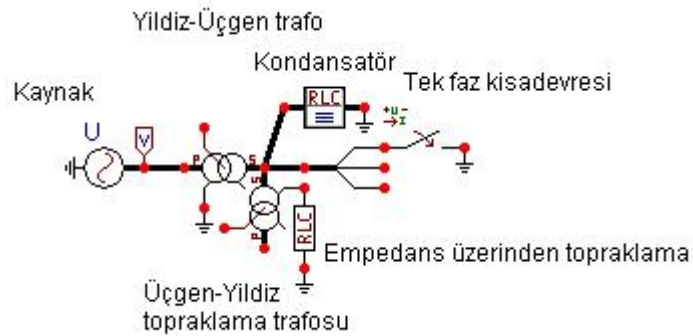
Kullanılan transformatör ideal kabul edildiğinden, primer tarafın empedansı toplam empedansın yarısı olarak alınabilir. Sekonder taraf ise dönüştürme oranının karesiyle ters orantılıdır.

$$X_p = \frac{X_r}{2} = \frac{j130.65}{2} = j65.328\Omega$$

$$X_s = X_p \times \left(\frac{132.10^3}{400.10^3} \right)^2 = j7.114\Omega$$

EK.3.3. 132/33kV Trafosu

Şebekede kullanılan 132/33kV trafosu yıldız-üçgen bağlı olup primer tarafı direkt, sekonder tarafı ise zigzag trafo üzerinden direnç topraklıdır. Her iki özelliği bir arada bulundurması sebebiyle tez çalışması süresince modellenmesi en çok problem olan trafo modeli bu oldu. Ancak elde edilen sonuçlar modellemenin başarılı olduğunu gösteriyor. Şekilde ATPDraw programı ile oluşturulan kısa devre modeli görülmektedir.



Şekil Ek3.2. 132/33kV trafosu kısa devre testi şeması.

EMTP Rule Book [31]'da belirtildiği üzere, ATP programının yapısı gereği üçgen sargılı transformatörlerin çıkış gerilimlerinde üçgen sargının topraklamasının olmaması sebebiyle dengesizlikler olmaktadır. Bunun önüne geçmek için önerilen, her bir sargının kondansatör üzerinden topraklanmasıdır. Test şebekesinde kullanılan modelde üçgen sargının her bir köşesini aynı değerli kapasiteler ($1 \times 10^{-7} \mu F$) üzerinden dengeli bir şekilde topraklayan topraklama elemanı kullanılmıştır. Sonuç olarak problem çıkartan sekonder tarafı çıkış gerilimlerinin gerçekte düzeldiği görülmüştür.

Kaynak gücü ve gerilimi hesapları bir önceki trafo modeli ile aynı şekilde yapılmıştır;

$$S_{B3\Phi} = 100 MVA$$

$$S_{B1\Phi} = \frac{100}{3} MVA$$

$$V_{Source} = \frac{132 \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 107770V$$

Trafo yıldız-üçgen bağlı olduğundan primer tarafında kullanılacak gerilim değeri faz-nötr değeri iken, sekonder taraf gerilimi faz arası değere karşılık gelmektedir.;

$$V_P = \frac{132}{\sqrt{3}} = 76.21kV$$

$$V_S = 33kV$$

Test sisteminin geri kalan hesaplamaları 400/132kV trafosu test sistemi hesaplamaları ile aynı akışı takip etmektedir. Baz akım ve empedans değerleri yukarıda bulunarak trafonun primer ve sekonder empedans değerleri hesaplanır;

$$I_B = \frac{S_{B1\Phi}}{V_{Bf-n}} = \frac{\frac{100}{3} \times 10^6}{\frac{132}{\sqrt{3}} \times 10^3} = 437.387 A$$

$$Z_B = \frac{V_{Bf-n}}{I_B} = \frac{\frac{400}{\sqrt{3}} \times 10^3}{437.387} = 174.24\Omega$$

$$x_{newT} = x_T \times \frac{S_{Bnew}}{S_B} = j0.2756 \times \frac{100 \times 10^6}{100 \times 10^6} = j0.2756\Omega$$

$$X_T = x_T \cdot Z_B = j0.2756 \times 174.24 = j48.021\Omega$$

$$X_P = \frac{X_T}{2} = \frac{j48.021}{2} = j24.01\Omega$$

$$X_S = X_P \times \left(\frac{33 \times 10^3}{132 \times 10^3} \right)^2 = j1.501\Omega$$

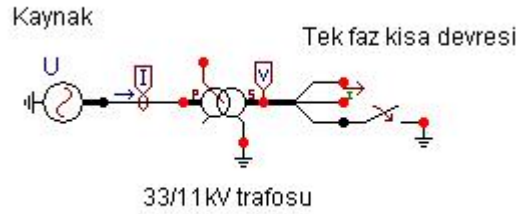
400/132kV trafosu test sistemi'nden farklı olarak, elimizdeki trafo datalarında bu gerilim kademesindeki transformatörler için topraklama empedans değerleri bulunmaktadır. Buna göre transformatör modelinin üçüncü sargısını oluşturan zigzag trafonun empedans değeri şu şekilde hesaplanır;

$$X_0 = x_0 \times Z_B = 2.47 \times 10.89 = 26.89\Omega$$

$$R_T = 25\Omega$$

EK.3.4. 33/11kV Trafosu

Test sisteminde kullanılan 33/11kV trafosu üçgen-yıldız bağlı olup sekonder tarafı direnç topraklıdır. Şekilde ATPDraw programı ile oluşturulan kısa devre modeli görülmektedir.



Şekil Ek3.3. 33/11kV trafosu kısa devre testi şeması.

Test sisteminin trafo parametreleri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır;

$$S_{B3\Phi} = 100MVA$$

$$S_{B1\Phi} = \frac{100}{3}MVA$$

$$V_{Source} = \frac{33 \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 26944V$$

$$V_p = 33kV$$

$$V_s = \frac{11}{\sqrt{3}} = 6.35kV$$

$$I_B = \frac{S_{B1\Phi}}{V_{Bf-n}} = \frac{\frac{100}{3} \times 10^6}{\frac{33}{\sqrt{3}} \times 10^3} = 1749.5A$$

$$Z_B = \frac{V_{Bf-n}}{I_B} = \frac{\frac{33}{\sqrt{3}} \times 10^3}{1749.5} = 10.89\Omega$$

$$x_{newT} = x_T \times \frac{S_{Bnew}}{S_B} = j0.941 \times \frac{100.10^6}{100.10^6} = j0.941\Omega$$

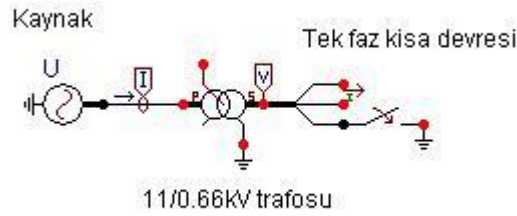
$$X_T = x_T \cdot Z_B = j0.941 \times 10.89 = j10.247\Omega$$

$$X_P = \frac{X_T}{2} = \frac{j10.247}{2} = j5.124\Omega$$

$$X_S = X_P \times \left(\frac{11 \cdot 10^3}{33 \cdot 10^3} \right)^2 = j0.569\Omega$$

EK.3.5. 11/0.66kV Trafosu

Test sisteminde kullanılan 11/0.66kV trafosu üçgen-yıldız bağlı olup sekonder tarafı direnç topraklıdır. Şekilde ATPDraw programı ile oluşturulan kısa devre modeli görülmektedir.



Şekil Ek3.4. 11/0.66kV trafosu kısa devre testi şeması.

Test sisteminin trafo parametreleri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır;

$$S_{B3\Phi} = 100 MVA$$

$$S_{B1\Phi} = \frac{100}{3} MVA$$

$$V_{Source} = \frac{11 \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 8981V$$

$$V_P = 11kV$$

$$V_S = \frac{0.66}{\sqrt{3}} = 0.381kV$$

$$I_B = \frac{S_{B1\Phi}}{V_{Bf-n}} = \frac{\frac{100}{3} \times 10^6}{\frac{11}{\sqrt{3}} \times 10^3} = 5248.63 A$$

$$Z_B = \frac{V_{Bf-n}}{I_B} = \frac{\frac{11}{\sqrt{3}} \times 10^3}{5248.63} = 1.21\Omega$$

$$x_{newT} = x_T \times \frac{S_{Bnew}}{S_B} = j0.97 \times \frac{100.10^6}{100.10^6} = j0.97\Omega$$

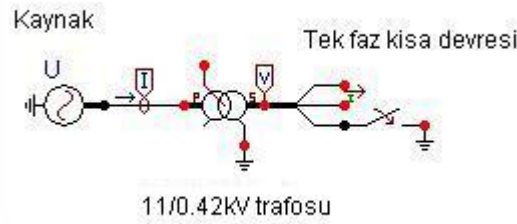
$$X_T = x_T \cdot Z_B = j0.97 \times 1.21 = j1.1737\Omega$$

$$X_P = \frac{X_T}{2} = \frac{j1.1737}{2} = j0.587\Omega$$

$$X_S = X_P \times \left(\frac{0.66.10^3}{11.10^3} \right)^2 = j0.002113\Omega$$

EK.3.6. 11/0.42kV Trafosu

Test sisteminde kullanılan 11/0.66kV trafosu üçgen-yıldız bağlı olup sekonder tarafı direnç topraklıdır. Şekilde ATPDraw programı ile oluşturulan kısa devre modeli görülmektedir.



Şekil Ek3.5. 11/0.42kV trafosu kısa devre testi şeması.

Test sisteminin trafo parametreleri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır;

$$S_{B3\Phi} = 100MVA$$

$$S_{B1\Phi} = \frac{100}{3} MVA$$

$$V_{Source} = \frac{11 \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 8981V$$

$$V_P = 11kV$$

$$V_S = \frac{0.42}{\sqrt{3}} = 0.242kV$$

$$I_B = \frac{S_{B1\Phi}}{V_{Bf-n}} = \frac{\frac{100}{3} \times 10^6}{\frac{11}{\sqrt{3}} \times 10^3} = 5248.63A$$

$$Z_B = \frac{V_{Bf-n}}{I_B} = \frac{\frac{11}{\sqrt{3}} \times 10^3}{5248.63} = 1.21\Omega$$

$$x_{newT} = x_T \times \frac{S_{Bnew}}{S_B} = j0.99 \times \frac{100.10^6}{100.10^6} = j0.99\Omega$$

$$X_T = x_T \cdot Z_B = j0.99 \times 1.21 = j1.1979\Omega$$

$$X_P = \frac{X_T}{2} = \frac{j1.1979}{2} = j0.598\Omega$$

$$X_S = X_P \times \left(\frac{0.42.10^3}{11.10^3} \right)^2 = j0.00087\Omega$$

EK.4. MATHCAD MODELLERİ

Bölüm 3.2.3' de, Şekil 3.9' deki gerçek şebekenin farklı gerilim kademelerinde meydana gelen üç faz ve bir faz kısa devreleri sonucunda gerilim seviyelerinin durumu Math H.J.Bollen' in teorik hesaplama metotları kullanılarak incelenmişti [1, 3, 6]. İncelemede kullanılan hesaplamalar Tablo 3.5, 3.6 ve 3.7' deki değerler kullanılarak MATHCAD programı kullanılarak yapılmış ve sonuçların Math H.J.Bollen' in çalışmalarındaki ile bire bir örtüştüğü görülmüştür [1].

Ekler CD' sindeki Ek.4. dosyası altında Şekil 3.9' deki şebekenin tüm gerilim kademeleri için MATHCAD programında yapılan hesaplamalar bulunmaktadır. Hesaplar üç faz ve bir faz için ayrı ayrı yapılmış olup gerilim çökmesi değerleri kısa devre noktasının mesafesine göre değişim göstermektedir. Hesaplamaların sonucunda elde edilen grafikler ise bölüm 3.2.3.1 ve 3.2.3.2 altında açıklanarak verilmişti.

ÖZGEÇMİŞ

1978’ de İstanbul’da doğdu. Orta ve lise öğrenimini 1989 senesinde girdiği Özel Eyüboğlu Lisesinde sürdürdü. 1996’ da Hollanda’ da yapılan Uluslararası ECIS Matematik Yarışmasına okulunu temsilen katıldı ve aynı sene İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Elektrik-Elektronik Fak. Elektrik Müh. Bölümü’ nü kazandı. Bölümünden 2001 senesinde mezun olduktan hemen sonra Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü (GYTE) Enerji Sistemleri bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı. 2006 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 1992’ den günümüze kadar Galatasaray Yelken Klübünde aktif sporcu olarak yarıştı. Halen özel bir şirkette Network Uzmanı olarak çalışmaktadır.