

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**YILDIRIM ELEKTROMANYETİK DARBELERİNİN YÜKSEK GERİLİM
HATLARINA ETKİLERİNİN İZOLATÖRLER VE TOPRAKLAMA
AÇISINDAN İNCELENMESİ**

Ahmet Yaşar YOLDAŞ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2019

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**YILDIRIM ELEKTROMANYETİK DARBELERİNİN YÜKSEK GERİLİM
HATLARINA ETKİLERİNİN İZOLATÖRLER VE TOPRAKLAMA
AÇISINDAN İNCELENMESİ**

Ahmet Yaşar YOLDAŞ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2019

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YILDIRIM ELEKTROMANYETİK DARBELERİNİN YÜKSEK GERİLİM
HATLARINA ETKİLERİNİN İZOLATÖRLER VE TOPRAKLAMA
AÇISINDAN İNCELENMESİ**

Ahmet Yaşar YOLDAŞ

ELETRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 10/06/2019 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Dr. Öğr. Üyesi H. Feza CARLAK

Dr. Öğr. Üyesi Gürkan BİLGİN

ÖZET

YILDIRIM ELEKTROMANYETİK DARBELERİNİN YÜKSEK GERİLİM HATLARINA ETKİLERİNİN İZOLATÖRLER VE TOPRAKLAMA AÇISINDAN İNCELENMESİ

Ahmet Yaşar YOLDAŞ

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Haziran 2019; 118 sayfa

Yıldırım, enerji iletim hatlarında en fazla arızaya sebep olan doğa olayıdır. Yıldırım hakkında yapılan çalışmalar genellikle yıldırım kaynaklı oluşan aşırı gerilimleri parafudr yardımıyla çözmek üzerinedir. Yine hat ve direk yükseklikleri, iletken diziliş ve sayıları üzerine de çalışmalar yoğunlaşmaktadır. Literatürde topraklama üzerine de çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada amaç ise yıldırım kaynaklı oluşan aşırı gerilimlerin sağlıklı bir şekilde toprağa akmasını sağlamak ve hatta yıldırımın oluşturduğu gerilim atlamasını engellemektir. Tez çalışması bilgisayar ortamında PSCAD programından destek alınarak, Bergeron modeli kullanılarak örnek bir iletim hattı modellenmiştir. Modellemede kullanılan direk bilgileri TEİAŞ literatüründen alınmıştır. Yıldırım bilgileri koordinat bazlı olarak MGM'den alınmıştır. Farklı yıldırım şiddetleri iletim hattına düşürülmüş, düşürülen yıldırıma göre hatta ve direklerde oluşan gerilim yükselmeleri incelenmiştir. Bu inceleme yapılırken direk ayak topraklama dirençleri ve izolatör boyları değiştirilerek optimal çalışma şartı oluşturulmuştur. TEİAŞ ve MGM verileri baz alınarak 2 farklı hatta ait arıza örnekleri değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda enerji iletim hattının işletme koşullarında olması gereken üst topraklama değerleri ve alt izolatör boylarına ilişkin değerlendirmeler yapılmıştır. Bu değerlendirmeler ışığında yıldırım kaynaklı arızaları düşürmek, enerji arz ve kalitesini yükseltmek adına ne gibi adımlar atılmalıdır sorularına cevap aranmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Aşırı Gerilim, Bergeron Modeli, Direk Ayak Direnci, Elektromanyetik Darbe, Geri Dönüş Darbe Akımı, İzolatör, LEMP, Öncü akım, PSCAD, RSC, Topraklama, Yıldırım,

JÜRİ: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Dr. Öğr. Üyesi H. Feza CARLAK

Dr. Öğr. Üyesi Gürkan BİLGİN

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF LIGHTNING ELECTROMAGNETIC STROKES FROM INSULATORS AND GROUNDING

Ahmet Yasar YOLDAŞ

MSc Thesis in Electrical And Electronical Engineering

Supervisor: Prof. Doc. Sukru OZEN

June 2019; 118 pages

Lightning is a natural phenomenon that causes the most disruption and failure in energy transmission lines. Lightning-related studies are usually about the solution of lightning-induced overvoltages through the help of surge arrester. Also, line and pole heights, conductor array and number of conductors are other study subjects. There are also lots of studies on earthing in the literature. The aim of this study is to ensure that the over-voltages caused by lightning are flowing to the ground in a healthy manner and even prevent the voltage jumps caused by lightning. A sample transmission line was modeled using the Bergeron model with support from the PSCAD program. Direct information used in modeling poles is taken from TEİAŞ literature. Lightning information is taken from the MGM on the basis of coordinates. Different lightning intensities were hit to the transmission line. According to the lightning, the voltage rises in the poles and the transmission line were examined. In this study, tower grounding resistors and isolator lengths have been changed and an optimal working condition has been established. In order to evaluate the accuracy of the simulation, again, samples of 2 different faults were evaluated based on TEİAŞ and MGM data. As a result of this, the evaluations were made about the highest grounding values and the lowest isolator heights that should be in the operating conditions of the energy transmission line. In the light of these evaluations, answers were sought to reduce the incidence of lightning-related failures and what steps should be taken to increase the energy supply and quality.

KEYWORDS: Bergeron Model, Electromagnetic Stroke, Grounding, Isolator, Lightning, Overvoltages, Pole Grounding Resistance, PSCAD, Return Stroke Current, Stepped Leader Current.

COMMITTEE: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Assist. Prof. Dr. H. Feza CARLAK

Assist. Prof. Dr. Gürkan BİLGİN

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı yapmamdaki en temel unsur iş hayatımda büyük bir yer tutmuş olan TEİAŞ 19. Bölge Müdürlüğünde işletme bakım mühendisi olarak görev yaptığım zamanlarda yıldırımdan kaynaklanan arızaların çokluğu ve yaşanan uzun süreli kesintilerdi. Anamurdan Fethiyeye, Konyadan, Denizliye kadar çalıştığım geniş bölgedeki arızaların fazlalığı ve bunun sonucunda yaşanan mali kayıplar göz önüne alındığında geç bile kalınmış bir çalışmadır.

Tezimin hazırlanması esnasında, takıldığım her noktada yardım ve yol göstermesiyle önümü açan, benden asla zamanını esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Şükrü ÖZEN'e, farklı bakış açılarını gösteren değerli hocam Sayın Prof. Dr. Selçuk HELHEL'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca son olarak tezimi yazarken onlardan çaldığım zaman için beni affeden ve destekleyen Sevgili Eşim Simge Nur YOLDAŞ'a ve 15 aylık canım kızım Melek Naz YOLDAŞ'a, beni sürekli teşvik eden Annem Seher YOLDAŞ'a ve Babam Hasan YOLDAŞ'a tüm minnet duygularıyla teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	4
2.1. Yıldırım Fenomeni	4
2.2. Yıldırım Oluşma Sürecine ait Genel Teoriler	4
2.2.1. Yıldırım oluşma süreci	6
2.2.2. RSC modellemesi	8
2.2.3. Gaz dinamik model.....	8
2.2.4. Elektromanyetik model.....	8
2.2.5. Dağıtılmış devre modeli (LCC)	8
2.2.6. Genel mühendislik modeli	9
2.3. Yıldırım Geri Dönüş Darbe Akımı Modelleri	9
2.3.1. Mühendislik modelleri	9
2.3.2. Bruce-Golde (BG) modeli	10
2.3.3. İletim hattı modeli (Transmission line model)	11
2.3.4. Master, Uman Lin ve Standler modeli (MULS)	11
2.3.5. Gezen akım kaynağı modeli (TCS: Travelling Current Source)	12
2.3.6. Modifiye iletim hattı modeli (Modified Transmission Line Model)	13
2.3.7. Üssel olarak zayıflama (MTLE) modeliyle iletim hattı.....	13
2.3.8. Doğrusal akım zayıflama (MTLL) modeli ile modifiye iletim hattı	13
2.3.9. Diendorfer – Uman modeli (DU)	13
2.3.10 Mühendislik modellerinin genellenmesi.....	14
2.4. Kapling Model.....	14
2.4.1. Rusck modeli	15
2.4.2. Taylor ve diğerleri modeli	16
2.4.3. Agrawal ve diğerleri modeli	17
2.4.4. Rachidi modeli.....	18

2.5. Yıldırım Deneyleri.....	20
2.6. Yıldırım Kaynaklı Aşırı Gerilimi Etkileyen Faktörler	21
2.6.1. Çoklu iletken.....	21
2.6.2. Topraklama teli /koruma teli	21
2.6.3. Toprak iletkenliği.....	22
2.6.4. Yıldırımın vurduğu nokta	22
2.6.5. İletim hattı yüksekliği	22
2.6.6. İletim hattı uzunluğu.....	22
2.6.7. Korona	22
3. MATERYAL VE METOD	24
3.1. Genel Tanımlar	24
3.2. Kullanılan Matematiksel Yöntemler	24
3.3. Kullanılan Direk Modeli.....	27
3.4. PSCAD Ortamında Direk Tasarımı.....	28
3.5. Simülasyon Bilgileri.....	33
4. BULGULAR	34
4.1. Direk Gövdesinde Oluşan Gerilimlerin Değerlendirilmesi.....	34
4.2. İzolatör ve Toprak Direnci arasındaki Bağlantının Değerlendirilmesi	39
4.2.1. İzolatör boyu 1460mm ve yıldırım akım değeri 10-100kA olması durumu.....	43
4.2.2. İzolatör boyu 1660mm ve yıldırım akım değeri 10-100kA olması durumu.....	47
4.2.3. İzolatör boyu 1860mm ve yıldırım akım değeri 10-100kA olması durumu.....	52
4.2.4. İzolatör boyu 2060mm ve yıldırım akım değeri 10-100kA olması durumu.....	57
4.2.5. İzolatör boyu 2260mm ve yıldırım akım değeri 10-100kA olması durumu.....	61
4.2.6. İzolatör boyu 2460mm ve yıldırım akım değeri 10-100kA olması durumu.....	65
4.2.7. İzolatör boyu 2660mm ve yıldırım akım değeri 10-100kA olması durumu.....	69
4.3. Yıldırım Akım Şiddetine Göre Direnç - Gerilim Değerlendirmesi.....	73
4.4. İzolatör Boyuna Göre Akım - Direnç Değerlendirmeleri.....	78
4.5. Sabit Direk Ayak Direncinde Yıldırım Şiddetinin Değerlendirilmesi	82
4.6. Örnek Arızalara Göre Simülasyon	89
5. TARTIŞMA	104
6. SONUÇLAR	106
7. KAYNAKLAR	110
8. EKLER.....	114
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yıldırım Elektromanyetik Darbelerinin Yüksek Gerilim Hatlarına Etkilerinin ızalatörler ve Topraklama Açısından İncelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

10/06/2019

Ahmet Yaşar YOLDAŞ

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Amper
c	: Işık Hızı
C	: Sığa
E	: Elektrik Alan
H	: Manyetik Alan
I	: Akım
J	: Joule
L	: Endüktans
m	: Metre
M	: Mega
μ	: Mikro
n	: Nano
R	: Direnç
s	: Saniye
t	: Zaman
Ω	: Ohm
V	: Volt
Z ₀	: Karakteristik Empedans

Kısaltmalar

AG	: Alçak Gerilim
AÜ	: Akdeniz Üniversitesi
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü

GIS : Gaz İzoleli Transformatör Merkezi (Gas Insulated Substation)

EA : Elektrik Alan

EİH : Enerji İletim Hattı

EMA : Elektro Manyetik Alan

EMTDC: Electro Magnetic Transient Design and Control

ICLRT: Uluslar arası Yıldırım Araştırma ve Test merkezi (International Center for Lightning Research and Testing)

MCM : Million Circular Mile

PSCAD: Bigisayar Destekli Güç Sistemi Programı (Power System Computer Aided Design)

OG : Orta Gerilim

OPGW:Optical Ground Wire (Fiber Optik koruma teli)

RSC : Geri Dönüş Darbe Akımı (Return Stroke Current)

TEİAŞ : Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi

TM : Transformatör Merkezi

YG : Yüksek Gerilim

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Yıldırımın düşme anı	1
Şekil 2.1. Yıldırım bulutu yük yayılımı	5
Şekil 2.2. Adım lider oluşumu	6
Şekil 2.3. Yıldırımın oluşması	7
Şekil 2.4. RSC'nin zamana göre değişimi	8
Şekil 2.5. BG modeline göre RSC yayılımı (Bermudez 2003; Djalel vd. 2007)	10
Şekil 2.6. BG modeline göre RSC yayılımı (Bermudez 2003; Djalel vd. 2007)	11
Şekil 2.7. Dolaylı yıldırım darbesinin havai hatlarda indüklediği aşırı gerilimleri hesaplamak için kullanılan geometri	14
Şekil 2.8. Rusck modeli ile ilişkilendirilmiş iletim hattı kublaj modeli	16
Şekil 2.9. Eş iletim hattı modeli	17
Şekil 2.10. Agrawal kuplaj devresi modeli	18
Şekil 2.11. Rachidi modeli iletim hattı	19
Şekil 2.12. Chowdhuri-Gross modeli ile ilişkilendirilmiş iletim hattı kublaj modeli	19
Şekil 3.1. Norton eşdeğer devresi tek fazlı ideal dağıtılmış hat modeli	25
Şekil 3.2. Direnç eklenmiş kayıpsız hat modeli	26
Şekil 3.3. Kayıpsız direnç ekli eşdeğer devre	26
Şekil 3.4. PSCAD ortamında direğin tasarımı	28
Şekil 3.5. İletim hattı Bergeron modeli	29
Şekil 3.6. İzolatör devresi tasarımı	29
Şekil 3.7. Faz, koruma teli ve direk konfigürasyonu tasarımı	30
Şekil 3.8. Koruma teli ve faz tasarımı	30
Şekil 3.9. Yıldırım modellemesi	31
Şekil 3.10. İncelenen kısmi hattın simülasyon görünümü	32
Şekil 4.1. Direk direnci 1Ω olması halinde indüklenen gerilim ve akım	35
Şekil 4.2. Direk direnci 5Ω olması halinde indüklenen gerilim ve akım	35
Şekil 4.3. Direk direnci 20Ω olması halinde indüklenen gerilim ve akım	36
Şekil 4.4. Direk direnci 100Ω olması halinde indüklenen gerilim ve akım	37
Şekil 4.5. Direk direnci 500Ω olması halinde indüklenen gerilim ve akım	37
Şekil 4.6. Direk direnci 2000Ω olması halinde indüklenen gerilim ve akım	38
Şekil 4.7. Direncin 1Ω olması durumunda fazlar arası gerilim karşılaştırması	38
Şekil 4.8. Direncin 2000Ω olması durumunda fazlar arası gerilim karşılaştırması	39
Şekil 4.9. Örnek TM enterkonnekte bağlantısı ve arıza hali	41

Şekil 4.10. Antalya bölgesi arıza örneği	42
Şekil 4.11. Antalya ili arıza görseli.....	42
Şekil 4.12. Yıldırım şiddeti 10kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	43
Şekil 4.13. Yıldırım şiddeti 20kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	44
Şekil 4.14. Yıldırım şiddeti 30kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	44
Şekil 4.15. Yıldırım şiddeti 40kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	45
Şekil 4.16. Yıldırım şiddeti 50kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	45
Şekil 4.17. Yıldırım şiddeti 60kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	46
Şekil 4.18. Yıldırım şiddeti 75 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	46
Şekil 4.19. Yıldırım şiddeti 100kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	47
Şekil 4.20. Yıldırım şiddeti 10kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	48
Şekil 4.21. Yıldırım şiddeti 20kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	48
Şekil 4.22. Yıldırım şiddeti 30kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	49
Şekil 4.23. Yıldırım şiddeti 40kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	49
Şekil 4.24. Yıldırım şiddeti 50kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	50
Şekil 4.25. Yıldırım şiddeti 60kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	50
Şekil 4.26. Yıldırım şiddeti 75 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	51
Şekil 4.27. Yıldırım şiddeti 100kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	51
Şekil 4.28. Yıldırım şiddeti 100kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	52
Şekil 4.29. Yıldırım şiddeti 10kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	52
Şekil 4.30. Yıldırım şiddeti 20kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	53
Şekil 4.31. Yıldırım şiddeti 30kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	53
Şekil 4.32. Yıldırım şiddeti 40kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	54
Şekil 4.33. Yıldırım şiddeti 50kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	54
Şekil 4.34. Yıldırım şiddeti 60kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	55
Şekil 4.35. Yıldırım şiddeti 75kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	55
Şekil 4.36. Yıldırım şiddeti 100kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	56
Şekil 4.37. Yıldırım şiddeti 10kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	57
Şekil 4.38. Yıldırım şiddeti 20kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	57
Şekil 4.39. Yıldırım şiddeti 30kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	58
Şekil 4.40. Yıldırım şiddeti 40kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	58
Şekil 4.41. Yıldırım şiddeti 50kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	59
Şekil 4.42. Yıldırım şiddeti 60kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	59
Şekil 4.43. Yıldırım şiddeti 75 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	60

Şekil 4.44. Yıldırım şiddeti 100kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	60
Şekil 4.45. Yıldırım şiddeti 10 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	61
Şekil 4.46. Yıldırım şiddeti 20kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	61
Şekil 4.47. Yıldırım şiddeti 30kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	62
Şekil 4.48. Yıldırım şiddeti 40kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	62
Şekil 4.49. Yıldırım şiddeti 50kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	63
Şekil 4.50. Yıldırım şiddeti 60kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	63
Şekil 4.51. Yıldırım şiddeti 75 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	64
Şekil 4.52. Yıldırım şiddeti 100kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	64
Şekil 4.53. Yıldırım şiddeti 10kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	65
Şekil 4.54. Yıldırım şiddeti 20kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	66
Şekil 4.55. Yıldırım şiddeti 30 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	66
Şekil 4.56. Yıldırım şiddeti 40kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	67
Şekil 4.57. Yıldırım şiddeti 50kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	67
Şekil 4.58. Yıldırım şiddeti 60kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	68
Şekil 4.59. Yıldırım şiddeti 75 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	68
Şekil 4.60. Yıldırım şiddeti 100 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	69
Şekil 4.61. Yıldırım şiddeti 10kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	69
Şekil 4.62. Yıldırım şiddeti 20kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	70
Şekil 4.63. Yıldırım şiddeti 30kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	70
Şekil 4.64. Yıldırım şiddeti 40kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	71
Şekil 4.65. Yıldırım şiddeti 50kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	71
Şekil 4.66. Yıldırım şiddeti 60kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	72
Şekil 4.67. Yıldırım şiddeti 75 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	72
Şekil 4.68. Yıldırım şiddeti 100 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim	73
Şekil 4.69. 154 kV Oymapınar – Alanya II EİH arıza noktası	90
Şekil 4.70. Yıldırımın 10kA olduğu an için gerilim incelemesi	93
Şekil 4.71. Yıldırımın 10 kA olması halinde toprağa akan akım.....	93
Şekil 4.72. Yıldırımın 25kA olduğu an için gerilim incelemesi	94
Şekil 4.73. Yıldırımın 25kA olması halinde toprağa akan akım.....	94
Şekil 4.74. Mesafe koruma rölesinden alınan arıza kaydı	96
Şekil 4.75. 154kV Alanya II -Yalnızardıç EİH arıza noktası	97
Şekil 4.76. Yıldırımın 13kA olduğu an için gerilim incelemesi	100
Şekil 4.77. Yıldırımın 13kA olması halinde toprağa akan akım.....	100

Şekil 4.78. Yıldırımın 59 kA olduğu an için gerilim incelemesi	101
Şekil 4.79. Yıldırımın 59kA olması halinde toprağa akan akım.....	101
Şekil 4.80. Mesafe koruma rölesinden alınan arıza kaydı	102



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Yıldırım akım değerinin 10 kA olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri	74
Çizelge 4.2. Yıldırım akım değerinin 20 kA olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri	74
Çizelge 4.3. Yıldırım akım değerinin 30 kA olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri	75
Çizelge 4.4. Yıldırım akım değerinin 40 kA olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri	75
Çizelge 4.5. Yıldırım akım değerinin 50 kA olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri	76
Çizelge 4.6. Yıldırım akım değerinin 60 kA olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri	76
Çizelge 4.7. Yıldırım akım değerinin 75 kA olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri	77
Çizelge 4.8. Yıldırım akım değerinin 100 kA olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri	77
Çizelge 4.9. İzolatör boyunun 1460mm olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri	78
Çizelge 4.10. İzolatör boyunun 1660mm olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri	79
Çizelge 4.11. İzolatör boyunun 1860mm olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri	79
Çizelge 4.12. İzolatör boyunun 2060mm olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri	80
Çizelge 4.13. İzolatör boyunun 2260mm olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri	80
Çizelge 4.14. İzolatör boyunun 2460mm olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri	81
Çizelge 4.15. İzolatör boyunun 2660mm olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri	82
Çizelge 4.16. İzolatör boyu 1460mm ve Direncin 10 Ohm olması durumu.....	83
Çizelge 4.17. İzolatör boyu 1660mm ve Direncin 10 Ohm olması durumu.....	84
Çizelge 4.18. İzolatör boyu 1860mm ve Direncin 10 Ohm olması durumu.....	85
Çizelge 4.19. İzolatör boyu 2060mm ve Direncin 10 Ohm olması durumu.....	86
Çizelge 4.20. İzolatör boyu 2260mm ve Direncin 10 Ohm olması durumu.....	87
Çizelge 4.21. İzolatör boyu 2460mm ve Direncin 10 Ω olması durumu.....	88
Çizelge 4.22. İzolatör boyu 2660mm ve Direncin 10 Ohm olması durumu.....	89

Çizelge 4.23. 154kV 1272 MCM tek devre Oymapınar - Mahmutlar enerji iletim hattı yıldırım alan bölgede kalan direklerin direnç değerleri	91
Çizelge 4.24. 154kV 1272 MCM Oymapınar - Mahmutlar enerji iletim hattı için alınan meteorolojik bilgiler	92
Çizelge 4.25. 154kV 1272 MCM Mahmutlar - Yalnızardıç EİH için alınan meteorolojik bilgiler	98
Çizelge 4.26. 154 kV 1272MCM Tek Devre Yalnızardıç - Mahmutlar enerji iletim hattı yıldırım alan bölgede kalan direklerin direnç değerleri	99



1. GİRİŞ

Yıldırım, insanlık tarihi boyunca bütün toplumları etkileyen, korkutan, yönlendiren, değişik yüzlerce anlam yüklenmesine sebep olan çok büyük güçteki doğa olaylarından birisidir. Aynı zamanda yıldırım; İnsan ölümleri, orman ve bina yangınları, toplu hayvan ölümleri vb. gibi onlarca noktada hayatımıza etki etmektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü verilerine göre bir insana yıldırım çarpma olasılığı 600.000’de 1’dir Genellikle ortalama 20-30kA 500 MJoule enerjiye sahip olan yıldırım, geçtiği noktanın sıcaklığını 30.000 dereceye kadar çıkartabilmektedir. Türkiye’de sadece 2018 Mayıs ayında yıldırım çarpması sonucu 9 kişi hayatını kaybetmiş, 26 kişi yaralanmış ve 120’den fazla hayvan telef olmuştur (Anonim 1). Dünya genelinde yılda ortalama 6.000 kişi hayatını kaybetmekte, 240.000 kişi ise yaralanmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri sınırları içinde en fazla yıldırım alan bölge Florida’dır. Yıllık ortalama bazda günlük 3500 civarı buluttan yere; yılda ise toplamda 1,2 milyon yıldırım gözlenmektedir.(Anonymous 1)



Şekil 1.1. Yıldırımın düşme anı

İnsanlık tarihi boyunca yıldırım korkutucu ve kötü bir üne sahiptir. Bu ün tarih boyunca öyle noktalara ulaşmış ki hem Yunan mitolojisinde tanrıların tanrısı olarak bilinen Zeus, hem de İskandinav mitolojisinde yıldırım tanrısı olan Thor’un ortak özellikleri insanları cezalandırmak için yıldırımını yeryüzüne fırlatıyor olmalarıydı.

Yıldırımın dünyada yaklaşık 3 milyar yıldır var olduğu tahmin edilmektedir. Hatta evrim biyologlarına göre bazı canlı moleküllerinin oluşmasında büyük öneme sahip olduğu düşünülmektedir. Amerikalı kimyagerler Harold C. Urey ve Stanley Miller, ılık su ile dört gazı (su buharı, metan, amonyak ve moleküler hidrojen) bir araya getirerek yıldırım yerine elektrik akımı vererek suni atmosfer oluşturmuştur. Bir hafta sonra protein yapı taşları olan basit organik moleküllerin oluştuğunu görmüşlerdir. Yani dünyada ilk canlının oluştuğu anı simüle ederek yıldırım sayesinde canlılığın oluşabileceğini keşfettiler. Harland ve Hecker 1966 yılında 250 milyon yaşında olan cam fosili bulduklarını bildirmişlerdir. Günümüzde bile değişik modellerle açıklanmaya

çalışılan yıldırım fenomeni hakkında tarih boyunca birçok bilim insanı çalışmalar yürütmüştür. Tarihte bu deneylerin en meşhurlarından biri 1800'lü yılların ortalarında Benjamin Franklin'in fırtınalı havada uçurtma uçurarak gerçekleştirdiği deneyin sonucu yıldırımın elektriksel bir olay olduğunu bulmasıdır. Bu deney sonucu iki yardımcısının ölmesiyle sonuçlanmış olup, paratonerin mucidi olarak bilim tarihindeki yerini almıştır. Franklin ile başlayan deneyler günümüzde halen daha yıldırımın işleme mekanizmasını ve sonuçlarını analiz etmeye devam etmektedir. Günümüzde bu konuda dünyada en geçerli isimlerden olan Martin A. Uman (Yıldırım kaynaklı elektromanyetik alan konusunda birçok öncü çalışmayı ortaya koymuştur) ve Vladimir A. Rakov Florida Üniversitesinde çalışmalarına devam etmektedir. Florida dünyanın en fazla yıldırım alan noktasıdır. Bu noktada Florda Üniversitesi Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği departmanı Yıldırım Araştırma Grubu bu konuda en önemli veri kaynağı olmakta ve gerçek zamanlı deneylerle suni yıldırımları yeryüzüne düşürmektedir (Anonymous 2).

Bu tezin konusu olan yıldırım ise enerji dağıtım ve iletim şebekelerinde bozulmalara, patlamalara, enerji kesintilerine, şebeke dalgalanmalarına yani harmoniklere sebep olan kısımdır. Elektriksel güç sistemleri açısından bakıldığında yıldırıma maruz kalan sistemler ilave yöntemlerle korunmalıdır. Elektrik sistem bileşenleri yıldırım kaynaklı aşırı gerilimlere maruz kalabilir. Bu aşırı gerilimler Orta Gerilim (OG) ve Yüksek Gerilim (YG) sistemindeki herhangi bir gerilim büyüklüğüne göre çok yüksek gerilimlerdir. Bu sebepten dolayı OG ve YG ağında yetersiz koruma olduğunda, tesisi ve üretim maliyeti çok yüksek olan teçhizatlara aşırı gerilim ve atlama sonucu oluşan arklarla, sargılarında ve yüzeylerinde dolaşan aşırı akımların oluşturduğu aşırı ısınmalarla zarar vermektedir. Bu aşırı gerilim ve akım doğrudan olarak güç kalitesi, arz güvenliği, sistem kalitesi ve sistemin güvenilirliğini etkiler. Bu durumun önüne geçmek için koruma teli, parafudr, darbe eklatörleri vb gibi birçok koruyucu, yüksek gerilim enerji iletim hatları sistemine dâhil edilmiştir.

Yıldırım konusunda günümüze gelene kadar temel oluşturan belli başlı yapıtlar vardır. K.W. Wagner 1908 yılında yıldırımın neden iletim hatlarına düştüğüne dair teorilerin temelini ortaya koymuştur. S. Rusck 1958 yılında enerji iletim ve dağıtım hatlarında oluşan aşırı gerilimler için günümüzde kullanılan bir denklem sistemi ortaya koymuştur. Gross ve Chowdhuri 1967 de 2 farklı teori ortaya atmıştır. 2001 de Hoidalen FDTD ile alternatif yöntem getirmiştir.

Türkiye'de özellikle sahil kesimlerinde yaşanan fırtınalar ve bu fırtınalara bağlı olarak iletim, dağıtım hatlarının ve hatlar üzerinden de trafo merkezlerinin yıldırıma maruz kalması sonucu oluşan arızalar sıkça yaşanmaktadır. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. ve dağıtım şirketlerinin iletim ve dağıtım ağları sıklıkla yıldırım kaynaklı aşırı gerilimlere maruz kalmaktadır. Bu maruziyet karşısında küçük dağıtım transformatörleri (<200 kVA) geleneksel olarak kıvılcım boşlukları (atlama mesafesi) ve daha büyük olanları parafudrlarla korunur.

Dağıtım şebekelerindeki yıldırım aşırı gerilimleri, genellikle atlama aralıklarının bozulmasına veya delinmesine neden olur. Güç dağıtım trafosundaki aynı baraya bağlı tüm besleyicilerin (fider) atlama aralıklarındaki arızaları sırasında gerilim düşüşü meydana gelir. Arıza esnasında; atlama mesafesi ve yük durumuna göre kısa devre akımını belirleyen faktörler bulunmaktadır. Diğer faktör ise barayı besleyen şebekenin veya diğer bir deyişle bara kısa devre empedansının zayıf olmasıdır. Kısa

devre esnasında aşırı yüklenmeler oluşur. Bu yüklenme ile ilgili olarak, iki tür koruma stratejisi vardır. İlk tip, tüm küçük transformatörleri korumayı amaçlayan tam koruma stratejisi olarak adlandırılır (200 kVA'dan küçük). Amaç tüm dağıtım sistemini atlama aralığı sağlayarak ve arestörler kullanarak korumaktır. Gerilim sınırlayıcı arestörler, topraklama sistemi, eş potansiyel bara sistemi ve iç yıldırımlık sistemi ile küçük güçlü trafolar korunur. Büyük güçlü trafolar ise dâhili ve harici ölçü trafoları ve parafudr ile korunmaktadır. Bu ise ikincil tip koruma olarak da adlandırılır.

Özellikle OG sistemlerde indirici trafo merkezinden (TM) belirli bir mesafeye kadar gerilim sınırlayıcı parafudrılar sıklıkla kullanılır. Yüksek gerilim trafolarındaki korumada ise hat bilgileri düzenli olarak ölçü trafoları (Akım ve Gerilim Transformatörleri) ile okunarak, arıza esnasında gerilim ve akım bilgisinin röle aracılığıyla kesiciye açma göndermesiyle sağlanır. YG Hatlarda bu durum genellikle mesafe koruma röleleri ile sağlanır. Bu rölelerin çalışma mantığı hat empedansı ve üç fazlı kısa devre sırasında minimum artık (rezidüel) gerilime bağlıdır. Bu noktadan itibaren hattın geri kalanını korumak için geleneksel koruma stratejisi yani aşırı gerilim artış veya düşüşü, dalgalanmalar ve empedans farkları kullanılır. OG dağıtım transformatörleri genelde geleneksel olarak korunmaktadır. Koruyucu sistem olarak atlama aralıklarını kullanarak yapılır ve büyük bir kısmı halen daha da bu yöntemle korunmaktadır (Pykälä ve Palva 1997). Bu geleneksel yöntemin de ivedilikle değiştirilmesi gerekmektedir. Günümüzde dağıtım şirketleri de bu geleneksel koruma yöntemlerini terk etmekte ve akıllı sistemlere geçmektedir. Akıllı sistemlerin tamamı arızayı kaynağında yok etmek için değil, gelen arızanın teçhizata zarar vermesini önlemek veya azaltmak için tasarlanmıştır.

Literatür açısından, atlama aralığı özellikleri sadece dalgalanmalara maruz kalması üzerinden tanımlanmıştır, ancak fiiliyatta dalgalanmalar AC gerilimlerle birleştirilmiştir. Bununla birlikte, fazlar ve fazlarda eşit olarak indüklenen aşırı gerilimler arasında 120 derecelik bir faz kayması vardır. Bu durum her fazın farklı gerilim değeri olarak anlık bir durum oluşturur. Bu nedenle, her faz için atlama aralığı olasılığı farklıdır. Klasik koruma mantığının hatalarından birisi de budur.

Atlama boşluklarının ark oluşturabilme olasılığı ve dolayısıyla aşırı gerilimi boşaltma olasılığı olduğu için, gerilim dalga şekli kesilmesi nedeniyle sekonder taraftan dağıtım transformatörünün üzerine aşırı gerilim aktarma olasılığı vardır. Bu nedenle, bu aşırı gerilimler müşteri soketine kadar ulaşabilir. Evlerde ve sanayide kullanılan cihazların bu dalgalanmalar ve gerilim düşümleri sonucu çalışması için gereken güç miktarını sağlamak için daha fazla akım çekmek isterler. Bu aşırı gerilimler ise cihaz sargı ve devrelerinde ısınmaya bağlı olarak yanmasıyla sonuçlanmaktadır.

Bu çalışmada AG ve OG kısımdan ziyade ağırlık YG iletim hatlarına verilmiştir. Tüm bu bilgiler ışığında elektrik sistemimizdeki ana sorun kaynağı olan yıldırımdan korunabilmek için bu çalışmaya karar verilmiştir. Bu tezin hedefleri 3 ana kategoriye ayrılabilir. Birincisi, yıldırım sonucu oluşacak aşırı gerilimleri incelemek, ikincisi oluşan aşırı gerilimlerin incelenen direk grubu içindeki direk ayak ve gövde topraklama dirençleriyle bağıntısını kurmak, üçüncüsü ise yıldırım ile izolatör boyları ve topraklama arasında bir bağıntı yakalayabilmektir.

2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Yıldırım Fenomeni

Temel olarak yıldırım meteorolojik bir fenomendir. Yıldırım, fırtına esnasında elektrostatik deşarj olarak oluşan, elektromanyetik radyasyon üreten doğal bir süreçtir. Yıldırım genellikle yıldırım kanalından geçen elektrik akımı sebebiyle gök gürültüsü ile alakalıdır. Bu yıldırım kanalından geçen yükler geçtiği noktada havanın aniden ısınmasına yol açar ve bu ani genişleme sonucu yıldırımın sesi ortaya çıkar. Genellikle çatırdamalı olan seslerde ana yıldırım kanalının dışında bolca küçük saçakların olduğu tahmin edilebilir. Ses hızının 340m/s olduğundan yola çıkarak yıldırımı duyduktan sonra geçen süreyle ses hızını çarptığımızda tahmini uzaklığını bulabiliriz. Yıldırımın ana kaynağı yağmur fırtınalarıdır fakat nadiren kar fırtınalarında da görülebilmektedir.

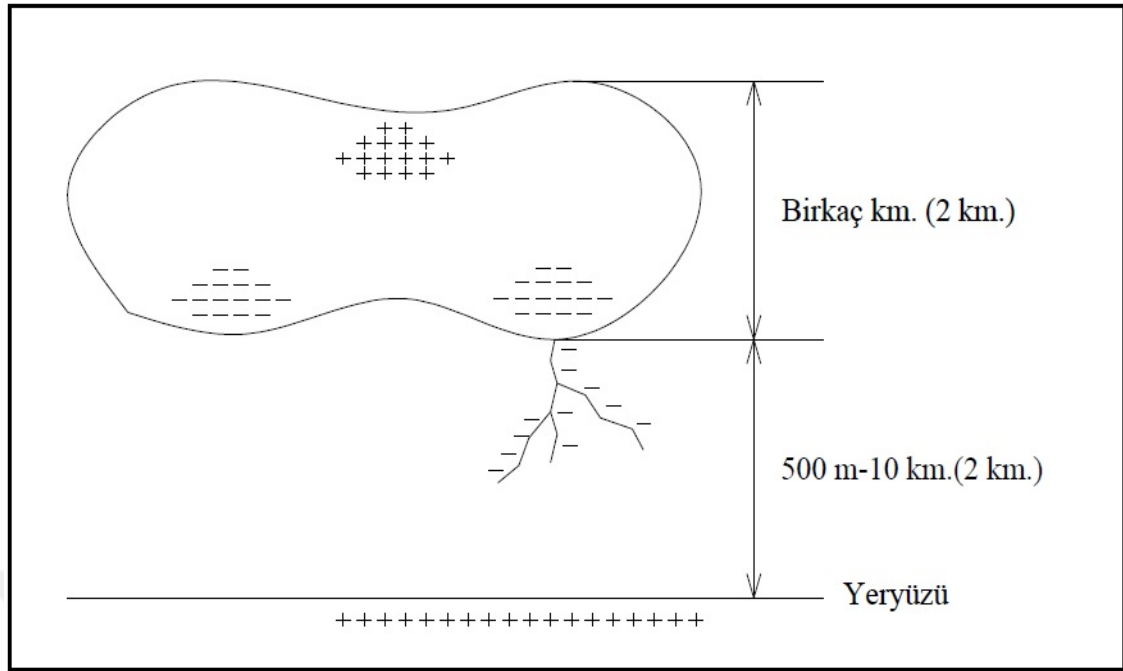
Yıldırım deşarjları üç ana tipe ayrılabilir. (Thanasaksiri 2004; IEEE Standards 2004)

1. Bulut içi deşarj
2. Buluttan buluta deşarj
3. Buluttan yere deşarj

Güç sistemleri ve Enerji İletim Hatları açısından baktığımızda bizi bağlayan kısmı buluttan yere olan deşarjdır. OG ve YG havai hatlarda bu yıldırım tipi aşırı gerilim üretir.

2.2. Yıldırım Oluşma Sürecine ait Genel Teoriler

Yıldırımın oluşabilmesi için yıldırım bulutu ile yeryüzü arasında iletkenliğin oluşması gerekmektedir. Bununla ilgili teorilerden birisi Elster ve Geitel, yıldırım bulutundaki yüklerin, etki ile elektriklenme yoluyla meydana geldiğini öne sürmüşlerdir [Özkaya 1979]. Buna göre yerkürenin toplam elektrik yükü $5,4 \times 10^{-5}$ C olduğu kabul edilir. Bu yükün oluşturduğu elektrik alanı içinde bulunan su zerreciklerinin alt tarafı pozitif ve üst tarafı negatif olmak üzere kutuplaşır. Yere doğru inmeye başlayan zerrecikler; havanın, su zerreciğine göre yavaş hareket eden iyonlarına yaklaşır. Su zerreciğinin pozitif tarafı negatif iyonu çekerken, pozitif iyonu iter. Bu durumun sonucu olarak su zerrecikleri pozitif yüklü elektrik halini alır. Bu durumu toplama vurduğumuzda yıldırımın oluşacağı bulutun tabanı negatif elektrik yüklerini bir araya getirir. Yıldırım bulutu yük yayılımı Şekil 2,1’de gösterilmiştir.



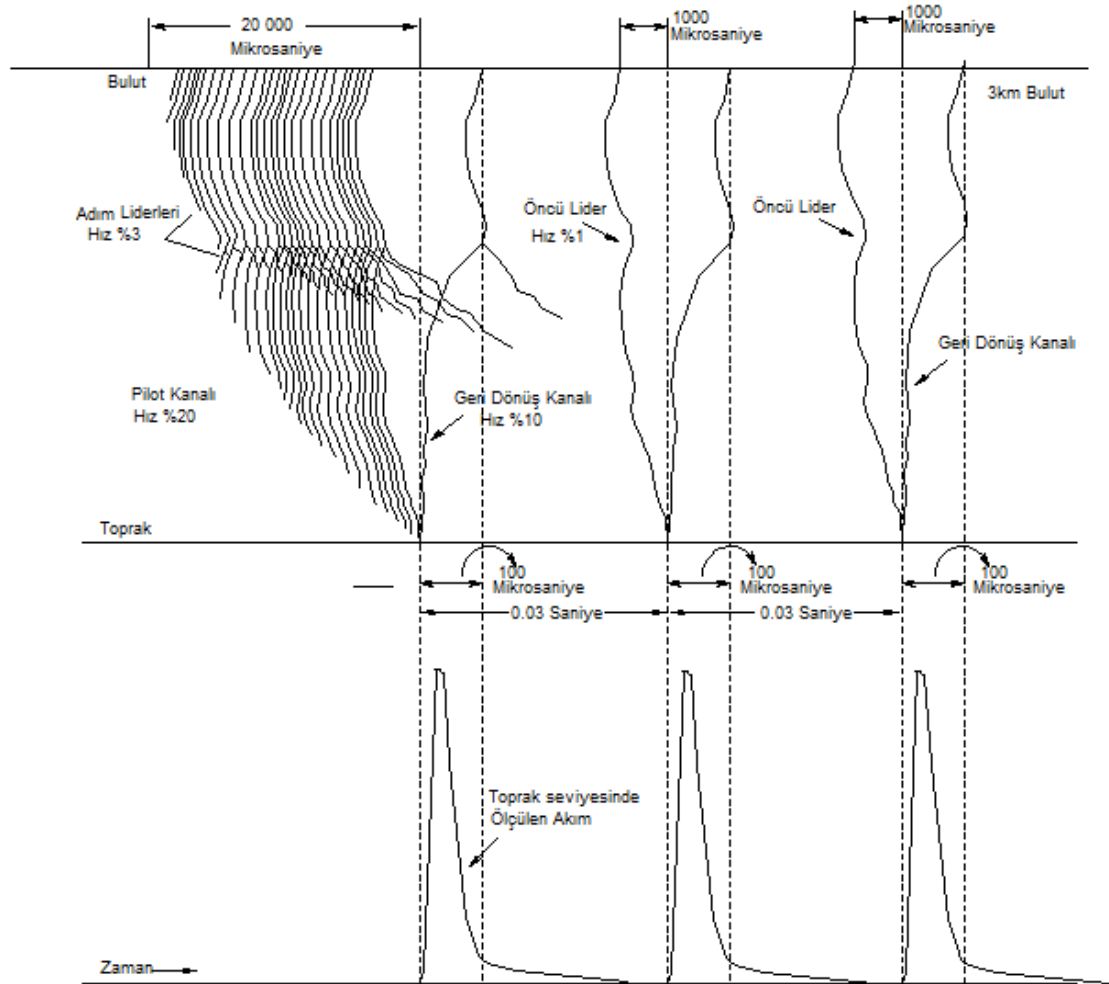
Şekil 2.1. Yıldırım bulutu yük yayılımı

Simpson ve Lomonossow'un teorisine göre yıldırım bulutundaki elektrik yükleri atmosferdeki sıcaklık farkından dolayı oluşan hava akımlarının yer değiştirmesi ile oluşur. Hareket eden hava akışları buluttaki su zerreciklerine etki eder. Bu durum kinetik hareketi ortaya çıkartır. Hareket sonucu zerreciklerin sürtünmesiyle elektrik yükleri oluşur (Özkaya 1979).

Diğer bir teori sahibi Frenkel'e göre ise havada pozitif ve negatif yükler bulunur. Bu yükler, yer kürenin negatif yüklerini itirmeye ve iyonosferin pozitif yükleri ile bir araya gelmeye yönlendirir (Özkaya 1979). Teoriye göre yer küre sürekli olarak yük kaybetmektedir. Azalan elektrik yükünü takviye etmesi gerekmektedir. Bu takviye işleminin sürekli olarak yaşanması gerekmektedir. Dünyanın elektrik yükünün sabit kalması için, pozitif yıldırım boşalmalarının, negatif yıldırım boşalmalarına göre oranı %10-20 civarındadır. Bu teoride pozitif ve negatif iyonları içeren hava ile bu zerreciklerinden oluşan (nadiren buz ve kar kristalleri) durum göz önüne alınır. Negatif iyonlar su zerrecikleriyle birleşir. Son tahlilde yıldırım kaynağı negatif ve pozitif su iyonlardan oluşur. Kütle gereği, kütle çekimi zerreciklere etki ederken havadaki iyonlara çok küçük kütleli oldukları için pek etki etmez. Uygun hava basıncı olduğunda su zerrecikleri yeryüzüne doğru düşmeye başlar. Top şeklinde iki bulut olduğu ve bu bulutlardan birinin su zerrecikleri, diğerinin havadaki iyonlar olduğu varsayıldığında V hızıyla yere doğru inen su zerrecikleri t kadar zaman sonra Vt kadar yol kat eder. Top şeklindeki bulutun üst kısmında pozitif, alt kısmında negatif yük bulunur. Su zerreciklerinin birleşmesiyle su damlaları oluşur. Frenkel'in teorisinde su damlalarının oluşması ve yıldırımın başlamasında elektrik alanın aniden kuvvetlenmesine bağlamaktadır (Özkaya 1979). Yıldırımın oluşma adımları içinde Elster ve Geitel'e göre bulut içinde pozitif ve negatif yükler arasında takribi 2-3 km'lik bir mesafe bulunmaktadır. Aynı bulut içinde birkaç yük merkezi olabilir.

2.2.1. Yıldırım oluşma süreci

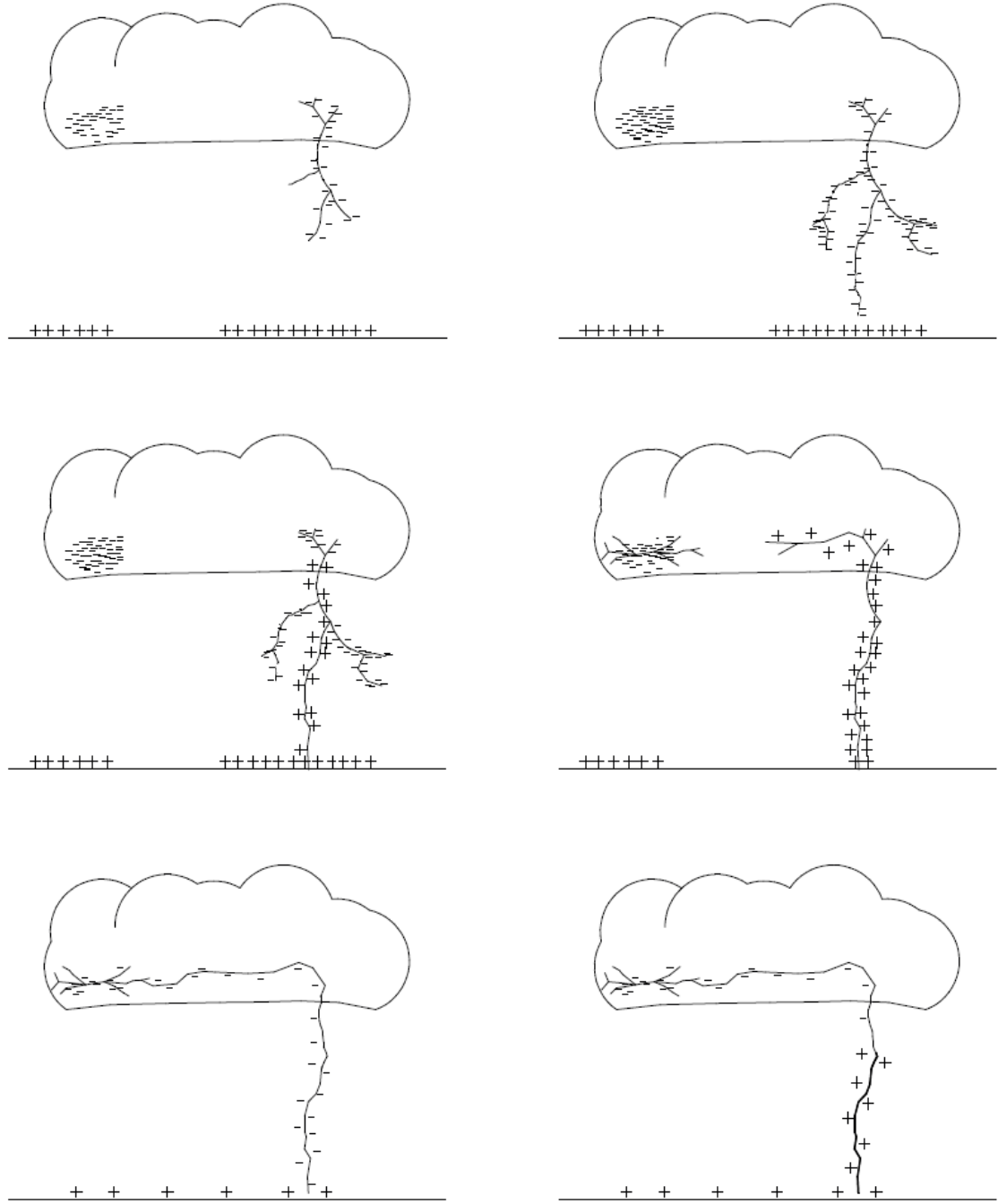
Elster ve Geitel'e göre bulut içinde negatif ve pozitif yük merkezleri arasında 2-3 km'lik mesafe bulunur. Negatif yükler altta, pozitif yükler üsttedir (Wagner vd.1942). Yıldırım kaynağı olan negatif yük merkezleri ile yeryüzü arasında 500 metreden 10 km'ye kadar aralık vardır. Negatif bir yük merkezi civarındaki elektrik alan 10kV/cm'ye ulaştığında (10 kV/cm büyük su damlaları bulunan havanın delinme gerilimi) iyonize olmuş olan kanal buluttan yere doğru oluşmaya başlar. İyonlaşmış kanalda elektron hızı, ışık hızının 1/10'u kadardır (Wagner vd. 1942). Şekil 2.2'de görüleceği gibi her seferinde ortalama 10m-200m yol alarak aşağıya doğru ilerleyen dalga 2-3 μs ilerler, durur ve daha sonra yoluna devam eder. Bu dalga adım adım ilerlediği için adım lider (stepped leader) olarak adlandırılır. Adım lider ile yeryüzü arasındaki mesafe yaklaşık 15m-50m olduğunda, bulut kaynaklı dalgaya karşılık yerden pozitif bir kanal buluta doğru oluşmaya başlar.



Şekil 2.2. Adım lider oluşumu

Şekil 2.3'den görüleceği üzere pozitif kanal ve adım lider birleşir. Ortalama 20 kA (maksimum 200 kA civarında) seviyesindeki akım, adım liderinin oluşturduğu

iyonize kanal boyunca yerden buluta doğru akar. Adım lider ve kollarındaki elektron yükü akan bu akım ile nötralize edilir.

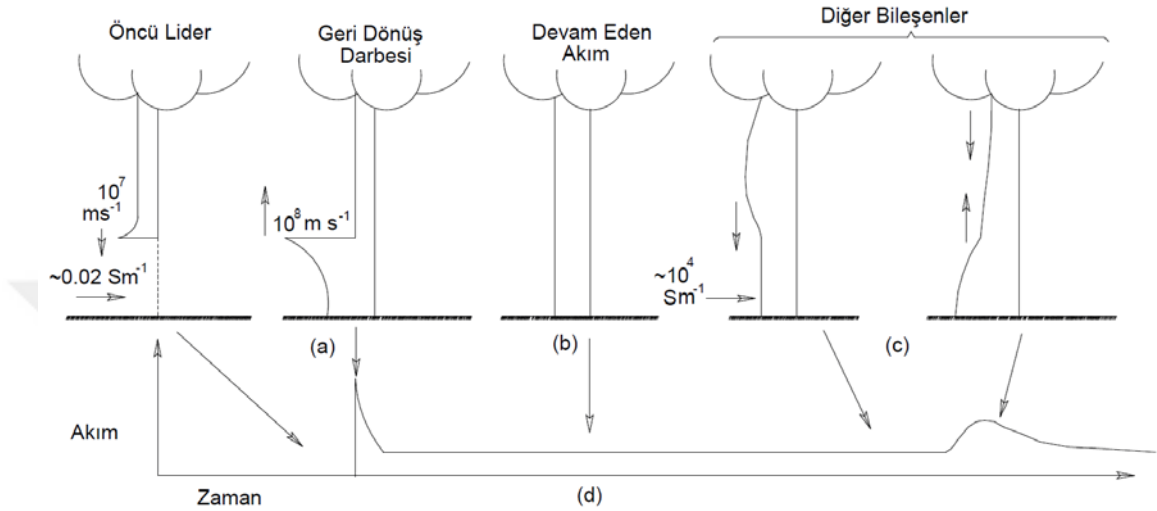


Şekil 2.3. Yıldırımın oluşması

Geri dönüş darbesi ya da Geri dönüş darbe akımı (Return Stroke Current: RSC) diye tabir edilen fenomen budur. İlk deşarjdan 40 μ s sonrası ikinci bir yük merkezi aynı kanalı takip ederek boşalır. Birinci deşarj gibi adım adım değil ikinci deşarj ışık hızına yakın ilk deşarjın 10 katı sürede gerçekleşir. Bu deşarj esnasında yine RSC olur (Wagner ve McCain 1942).

2.2.2. RSC modellemesi

Yıldırım analizlerinin gerçekçi temellere dayanması için belli matematiksel modeller oluşturulmalıdır. Geçerli bir model olabilmesi için kanal baz akımı, hızı, süreyi veya Elektromanyetik alanlardan birini tanımlaması gerekir. Yıldırım kaynaklı EMA elde edebilmek için karakteristik tanımlama ve RSC değişimleri bilinmelidir. Şekil 2.4 de RSC'nin zamana göre değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.4. RSC'nin zamana göre değişimi

Şekil 2.4 Negatif yıldırım alt-geçici darbesi için akım-yükseklik profilinin şematik gösterimidir. Bu gösterimde toprak seviyesinde meydana gelen akım, zaman eksenine göre gösterilmiştir (Rakov ve Uman 2003).

Literatürde yıldırım modelleyen farklı yaklaşımlar mevcut olup genel yaklaşım Mühendislik modeli üzerinde durmaktadır. Bu modeller;

2.2.3. Gaz dinamik model

Diğer adı fiziksel model olan bu modelde kütle, moment ve enerjinin bileşimi, zamana bağlı yıldırım akımını veri kabul eden hidrodinamik eşitlik denklemi elde edilir. Çıktılar ise sıcaklık, gaz ve kütle yoğunluğudur.

2.2.4. Elektromanyetik model

Anten teorisi ile bu yaklaşım elde edilmektedir. Monopol ve dipol teorileriyle Yıldırım baz akımının kaybindan yola çıkarak Maxwell denklemleriyle akım değerlendirilmesi yapılır.

2.2.5. Dağıtılmış devre modeli (LCC)

Oluşan boşalmayı direnç, indüktans ve kapasite ile tanımlayan iletim hattındaki geçici bir süreç olarak tanımlanır. Dağıtılmış-Model, kanal baz amperajının yolda geçen zamana ve kanalın yüksekliğe bağlı olarak belirlenmesinde işe yarar.

2.2.6. Genel mühendislik modeli

Kanal akımının zaman ve 3 boyutlu dağılımını belirler. Kanal-baz akımı, yukarı yayılım hızı gibi yıldırım geri dönüş akımı özelliklerini inceler. RSC aktif değildir. Mühendislik modellerinin en önemli özelliği değiştirilebilen az sayıda değişken olmasıdır. Mühendislik modelinde yıldırım kanalındaki saçaklanma göz önüne alınmadığı için darbeleri net bir şekilde tanımlar.

2.3. Yıldırım Geri Dönüş Darbe Akımı Modelleri

Önceki başlıkta bahsedildiği üzere yıldırım dönüş darbe modelleri dört sınıfa ayrılmıştır. Gaz dinamik veya fiziksel modeller, elektromanyetik modeller, Dağıtılmış devre veya (RLC) iletim hattı Modelleri ve Mühendislik modelleriydi. Daha fazla bilgi için Rakov ve Uman (1998) ve Djalel vd. (2007) incelenebilir. Yıldırım RSC akımını hesaplamak için en sık kullanılan mühendislik modelleri ayrıntılı olarak altta bahsedilmektedir.

2.3.1. Mühendislik modelleri

İlkelere göre bu model kategorisinde, yıldırım elektromanyetik alanları RSC akım modellerinde bir fonksiyon olarak ifade edilir. Bu fonksiyon da herhangi bir z yüksekliğinde t anındaki kanal akımının $I(z,t)$ kanalın başlangıçtaki akımı arasındaki bağıntıdır. Tanımın en genel formüle edilmiş hali

$$i(z',t) = u\left(t - \frac{z'}{v_f}\right) \cdot P(z') \cdot I\left(0, t - \frac{z'}{v}\right) \quad (2.1)$$

u Heaviside fonksiyonu ise

$$t \geq \frac{z'}{v_f} \text{ için } u = 1 \quad (2.2)$$

$$t < \frac{z'}{v_f} \text{ için } u = 0 \quad (2.3)$$

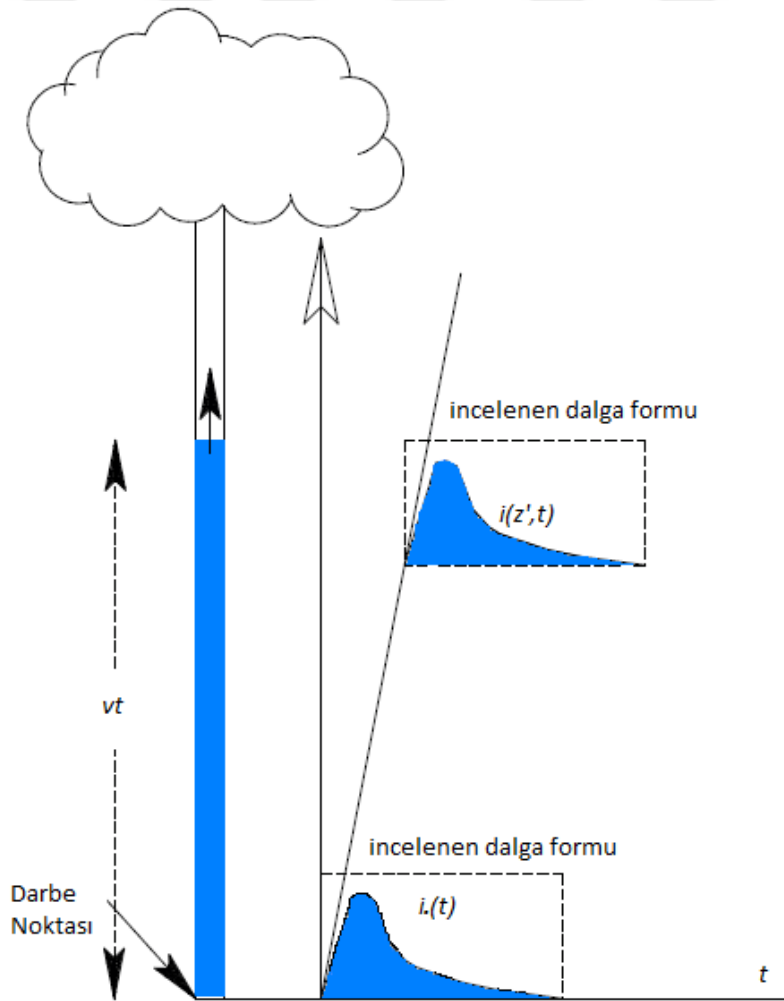
$P(z')$ Rakov ve Dulzon tarafından tanımlanmış, H ile bağıntılı akımın azalması bağıntısıdır. V_f Yukarı yayılım ön hızı aynı zamanda RSC hızıdır. İlk darbede ışık hızının onda biri ikinci ve diğer darbelerde ışık hızıdır. V Akım dalga yayılım hızıdır. Toprak, kanala akım basan akım jeneratörü gibi sabit kaynak olduğu için hızı da sabittir (Rakov ve Dulzon 1991). H kanal yüksekliği, c ışık hızı, λ akım zayıflama sabitidir. (Nucci 2000m kabul etmiş). z' ise, z yüksekliğindeki akım kanalının herhangi bir noktasında tanımlanması gereken yüksekliktir. İncelenmesi gereken fonksiyon grafiği altında kalan alandır.

2.3.2. Bruce-Golde (BG) modeli

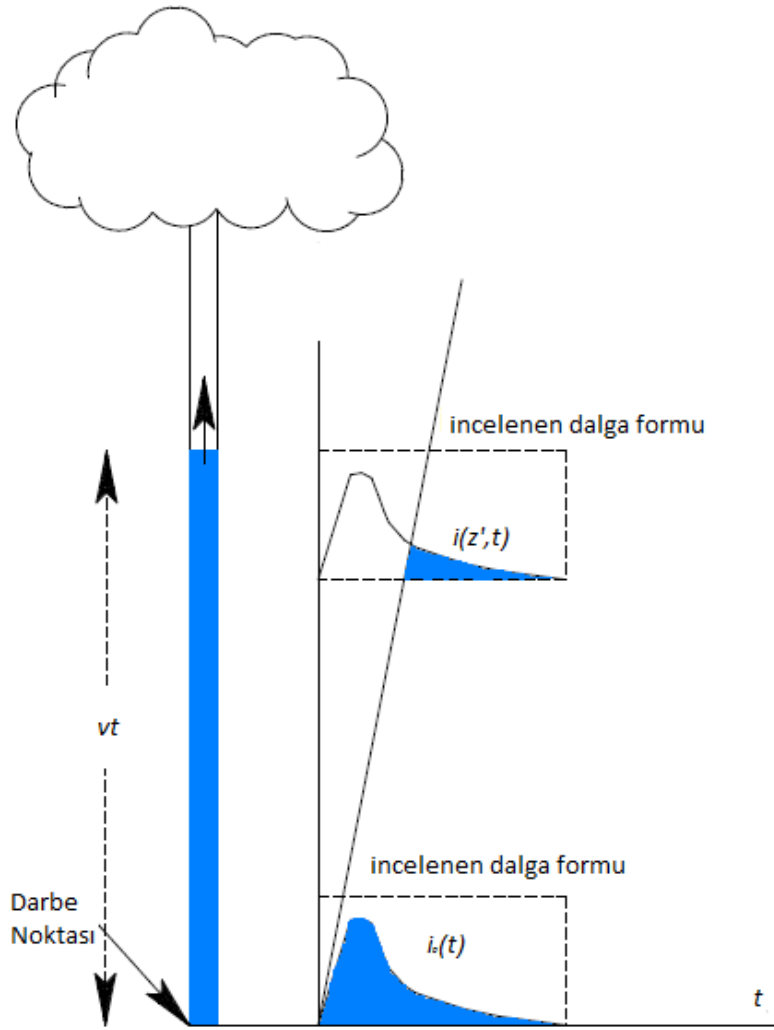
Bu modelde akımı tanımlayan denklem betimlenirken mühendislik modellerinin girişi olup altta tanımlanmaktadır.

$$i(z', t) = \begin{cases} i(0, t) & z' \leq vt \\ 0 & z' > vt \end{cases} \quad (2.4)$$

Burada $i(0, t)$ yıldırım kanalı boyunca yukarı doğru hareket eden; t, z' yukarı doğru hareket eden geri dönüş darbesinin öncü dalgasının altında bulunan toprak akımıdır. z' yıldırım kanalı boyunca herhangi bir noktayı temsil eder, v geri dönüş öncü dalgası yayılma hızını temsil eder. Bu model Şekil 2.5'de tasvir edilmiştir. Yıldırım darbe akımı için Bruce-Golde modeli fiziksel olarak tavsiye edilmez. Bu durum Bruce-Golde modelinde yıldırım darbesi öncü akımındaki süreksizlikten kaynaklanır. Bu öncül süreksizlikten kasıt Şekil 2.6'da gösterilen incelenen dalga formunun başlangıcından bahsedilemediği içindir. Şekil 2.5 ve 2.6 arasındaki fark da buradan gelmektedir.



Şekil 2.5. BG modeline göre RSC yayılımı (Bermudez 2003; Djalel vd. 2007)



Şekil 2.6. BG modeline göre RSC yayılımı (Bermudez 2003; Djalel vd. 2007)

2.3.3. İletim hattı modeli (Transmission line model)

Bu modelde, mevcut topraktaki dalga formu, kanalın alt kısmından en üste herhangi bir bozulma ve güç yitimi olmadan sabit bir hızla gittiği varsayılmaktadır.

$$i(z', t) = \begin{cases} i(0, t - z' / v) & z' \leq vt \\ 0 & z' > vt \end{cases} \quad (2.5)$$

Bu modelde yük kanalının altından üstüne kadar herhangi net yükte kayıp olmadan gider. Şekil 2.5’de bu model gösterilmektedir.

2.3.4. Master, Uman Lin ve Standler modeli (MULS)

Master, Uman, Lin ve Standler modeli (Lin vd. 1980) 'de tanıtıldı ve sonra (Master vd. 1981) de değiştirildi. Buna göre yıldırım dönüş darbe akım sürecinde, üç farklı akım türü vardır. Bu türler:

1. Tekdüze akım (I_u) bir yıldırım bulutundan sabit bir şekilde beslenen bir öncü akımı sunar ki burada H yüksekliğinde sabitlenmiş kapalı elektrik alanı tanımlar. $E_{kapalı}$ ($r=1$ den 10 km'ye kadar) (Lin vd. 1980) 'de bildirildiği gibi (1 -10 km'ye eşit).

Bu akım alttaki formda yazılabilir

$$I_u = \frac{2\pi\epsilon_0(H^2 + r^2)^{3/2}}{H} \frac{dE_{close}(r,t)}{dt} \quad (2.6)$$

2. Arıza darbesi akımı (i_p) yukarı doğru yayılan dalga akımı ile öncü geri dönüş dalgasındaki elektriksel kesilmenin arasındaki kombinasyonu açıklar. (Rusck 1997):

$$i_p(z',t) = \begin{cases} i_p(0,t - z'/v) \exp(-z'/\lambda_p) & z' \leq vt \\ 0 & z' > vt \end{cases} \quad (2.7)$$

Burada (λ_p) arıza darbesi akımının bozulma sabitidir.

3. Corona akımı (i_c), kanal etrafındaki korona kılıfındaki yükün radyal karşıt hareketi dikkate alınarak tahmin edilir. Akım corona kaynağı z' yüksekliğinde:

$$di_{cs}(z'',t) = \begin{cases} 0 & t \leq t' \\ I_0 \exp(z''/\lambda_c) \times \{\exp[-\alpha(t-t')] - \exp[-\beta(t-t')]\} dz & t > t' \end{cases} \quad (2.8)$$

Burada (i_o), α, β tekli korona kaynağı varsayılan çift üstel şeklini belirleyen parametrelerdir. λ_c zayıflama sabiti $t' = z''/v + t_{on}$ ve t_{on} arıza dalga akımının 0'dan zirveye kadar ki geçen süresidir. Bu modelin dezavantajları matematiksel karmaşıklıkların yanı sıra kanal baz akımının orijinal formülündeki eksikliğidir.

2.3.5. Gezen akım kaynağı modeli (TCS: Travelling Current Source)

Bu modelde akım kaynağı topraktan buluta v hızı ve z' yüksekliğiyle yayılır. Varsayımla yayılma hızı ışık hızı c olarak kabul edilir. Bu model akımı şu şekildedir (Heidler 1985):

$$i(z',t) = \begin{cases} i(0,t + z'/c) & z' \leq vt \\ 0 & z' > vt \end{cases} \quad (2.9)$$

Toprağa akan akımı sonsuz kabul edersek TCS Modelinden Bruce-Golde modeli, hareket eden akım kaynağı modelinden çıkarılabilir.

2.3.6. Modifiye iletim hattı modeli (Modified Transmission Line Model)

Modifiye iletim hattı modelinde yıldırım akım yoğunluğu (Nucci vd. 1988);

$$i(z', t) = \begin{cases} i(0, t - z'/v) \exp(-z'/\lambda) & z' \leq vt \\ 0 & z' > vt \end{cases} \quad (2.10)$$

Burada v geri dönüş darbe hızı ve λ bozulma sabitidir. Deneyisel sonuçlar ile ana kanaldan kaybolan net yük çıkartılabilir.

2.3.7. Üssel olarak zayıflama (MTLE) modeliyle iletim hattı

Bu modeli, korona akımının; üssel zayıflamayla yukarı hareket eden akımın modifiye iletim hattı modeli olarak tanımlarsak: (Rachidi ve Nucci 1990)

$$i_c(z', t) = \begin{cases} i_c(t - z'/v) \exp(-z'/\lambda_c) & z' \leq vt \\ 0 & z' > vt \end{cases} \quad (2.11)$$

Burada λ_c bozulma sabitidir

2.3.8. Doğrusal akım zayıflama (MTLL) modeli ile modifiye iletim hattı

Bu modelde, iletim hattı modelinin başka bir modifikasyonu eklenmiştir ki bu da akım dalgası yayılmasının kanal boyunca lineer olarak azalmasıdır. Akım yoğunluğu: (Rakov ve Dulzon 1987; Djalel vd. 2007)

$$i(z', t) = \begin{cases} i(0, t - z'/v)(1 - z'/H) & z' \leq vt \\ 0 & z' > vt \end{cases} \quad (2.12)$$

Burada H toplam kanal yüksekliğidir.

2.3.9. Diendorfer – Uman modeli (DU)

Bu model, ana deşarj için iki bağımsız süreç olduğunu varsayar. (Diendorfer ve Uman 1990)

1. Çok küçük zamanla ($1\mu s$ veya daha az) oldukça iyonize olan ana kanal çekirdeğinin deşarjı
2. Korona sabitinin daha büyük bir zaman sabiti ile deşarjı (ms cinsinden).

Bu nedenle, topraktaki akım, tahmini olarak korona akımı ve kesilme akımının toplamıdır.

$$i(z', t) = i_{bd}(0, t_m) - i_{bd}(0, z'/v^*) \exp(-t_e/\tau_{bd}) + i_c(0, t_m) - i_c(0, t + z'/v^*) \exp(-t_e/\tau_c) \quad (2.13)$$

$$\text{Burada } t_m = t + z'/c, v^* = 1/(1/v + 1/c), t_e = (t - z'/v) \text{ ve } i(0, t) = i_{bd}(0, t) + i_c(0, t) \quad (2.14)$$

2.3.10 Mühendislik modellerinin genellenmesi

Rakov tarafından verilen genelleştirilmiş akım denklemi (Nucci 2000; Djalel vd. 2007).

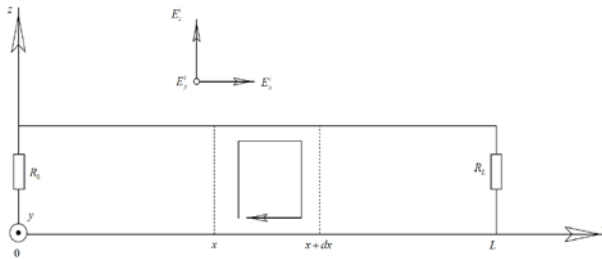
$$i(z', t) = g(t - z'/v^*)P(z')i(0, t - z'/v^*) \quad (2.15)$$

Burada g ; $t \geq z'/v$ için birim adım fonksiyonudur, v^* akım dalga yayılma hızıdır. $P(z')$ Yüksekliğe bağlı akım zayıflama faktörüdür. Genellikle, Bu model matematiksel olarak daha uygundur ve dahası birim adım fonksiyonu (Heaviside) g alan tahminlerini güçlendirir.

Yıldırım deşarjı, oluşumunun çok erken dönemlerinde, yukarıdaki modellerle doğru bir şekilde modellenememiştir çünkü bunların hepsi yıldırımın deşarj sürecini görmezden gelmektedir. Bu nedenle, böyle bir dezavantajın üstesinden gelmek için yüksek güçte darbeye ait kanala dair daha fazla deneysel veri gerekmektedir (Djalel vd. 2007). Yukarıda canlandırıldığı gibi, eksiklikleri gidermek için basit ve güvenilir modeller gereklidir. Bu yorum, aşağıdaki alt bölümlerde özetlenen bağlantı modelleri ile incelenecektir.

2.4. Kapling Model

Yıldırım darbe akımı ile elektromanyetik alanlar üretilir. Bu alanlar elektrik şebekesine büyük zararlar verebilir (Montano 2005). Darbe ve hat arasındaki (kapling, coupling, kublaj) bağlantı, çeşitli modeller kullanılarak elde edilir. İletkenlerin mükemmel iletken olarak toprağa bağlı olduğunu düşünerek ve dikkate alarak Şekil 2.7’deki ideal devre ortaya çıkar. Bu gösterim dolaylı yıldırım darbesinin havai hatlarda indüklediği aşırı gerilimleri hesaplamak için kullanılan geometridir (kayıpsız tek iletkenli havai hat x aksisine paralel, xy düzleminde biten R_0 ve R_L) (Nucci 1995) Kublaj modelinin üzerinde yapılan farklı çalışmalar aşağıdaki bölümlerde incelenmiştir.



Şekil 2.7. Dolaylı yıldırım darbesinin havai hatlarda indüklediği aşırı gerilimleri hesaplamak için kullanılan geometri

2.4.1. Rusck modeli

Rusck modeliyle ilişkili iletim hatları denklemleri, iletim hattı iletkeninin yüzeyindeki toplam elektrik alanının skaler ve vektör potansiyellerinin türevidir.

Rusck modelinde;

$$\frac{\partial \phi(x,t)}{\partial x} + L' \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C' \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial t} = C' \frac{\partial \phi^i(x,t)}{\partial t} \quad (2.17)$$

ϕ Skalar potansiyele bağlı olarak hattaki toplam indüklenen skaler potansiyeldir. (ϕ^i) yük alanı, $i(x,t)$ toplam hat akımı ve L' ve C' birim uzunluk başına karşılık gelen hat endüktansı ve hat kapasitansdır. Hat üzerindeki toplam indüklenen gerilim $u(x,t)$;

$$u(x,t) = \phi(x,t) + \int_0^h \frac{\partial A_z^i(x,z,t)}{\partial t} . dz \quad (2.18)$$

h iletkenin yerden yüksekliğidir ve A_z^i yük vektör potansiyelinin dikey bileşenidir. Bu nedenle, denklemlere karşılık gelen iletim için sınır şartları (2.14) ve (2.15):

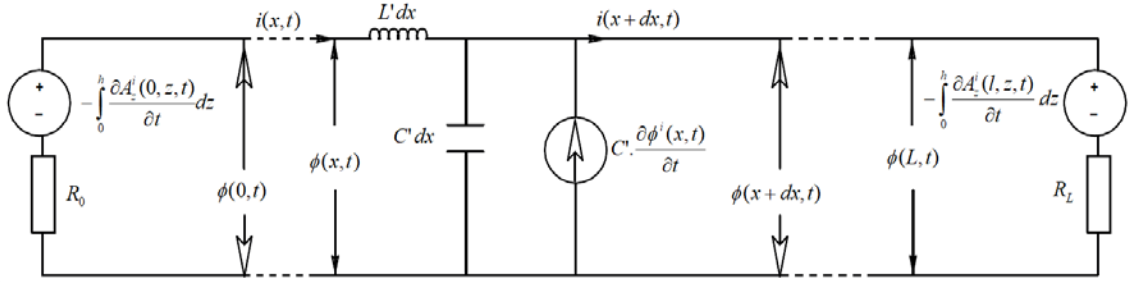
$$\phi(0,t) = -R_0 . i(0,t) - \int_0^h \frac{\partial A_z^i(0,z,t)}{\partial t} . dz \quad (2.19)$$

$$\phi(L,t) = -R_L . i(L,t) - \int_0^h \frac{\partial A_z^i(L,z,t)}{\partial t} . dz \quad (2.20)$$

Yukarıda belirtilen kuplaj hat denklemlerinden zorlama fonksiyonlar çıkartılabilir. Yük alanının skalar fonksiyonları, yük vektör potansiyelinin dikey bileşenidir. Diğer bir deyişle; hattaki gerilim; yük alanının skaler potansiyeli zorlamasının ürettiği elektrik alanın dikey bileşenidir (Cooray 1994). Yıldırım darbesinin elektrik hattına en yakın noktadaki indüklenmiş tepe aşırı gerilimi Rusck'un (1997)'de bildirildiği gibi darbe yeri ve genliğine bağlı eşitlik basitleştirilmiş bir şekilde Rusck tarafından tahmin edilmiştir.

$$U_{\max} = \frac{Z_o I_0 h}{d} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{v}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2}} \right) \quad (2.21)$$

Z_0 Karakteristik empedanstır. $(1/(4\pi)\sqrt{\mu_0/\epsilon_0})$, I_0 yıldırım tepe akım değeri ve d yıldırım darbe noktası ile hat arasındaki en yakın mesafedir. Bu eşitlik yıldırım tarafından indüklenmiş aşırı gerilimin tepe değerini verir. Tam anlamıyla bir açıklama yapmaz. Ayrıca, bu denklem mükemmel toprak iletkenliği ve toprağa doğru dik yıldırım kanalı olduğu yerde uygulanmasına yönelik kısıtlamalar vardır. Rusck modeli ile ilişkilendirilmiş iletim hattı kublaj modeli Şekil 2.8 de gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Rusck modeli ile ilişkilendirilmiş iletim hattı kublaj modeli

Formül 2.21, Z_0 değerinin 30Ω değiştirilmesiyle basitleştirilebilir ki burada Doğal yıldırım hızı için ölçülen yıldırım dönüşü darbesinin $0.29 \times 10^8 - 2.4 \times 10^8 m/s$ arasında değiştiği de belirtilmiştir (Idone ve Orville 1982). Dönüş darbe hızının $1.2 \times 10^8 m/s$ olduğu varsayılarak,

$$U_{\max} = 38.8 \frac{I_0 h}{d} [kV] \quad (2.22)$$

Daha önce de belirttiğimiz gibi, bu modelin eksikliği, yıldırım kaynaklı aşırı gerilimin ön ve bozunma süreleri ile ilgili herhangi bir bilgi içermemesidir (Montano 2005).

2.4.2. Taylor ve diğerleri modeli

Dağıtılmış gerilim ve akım kaynakları açısından bir başka model Taylor ve ark. (Taylor vd. 1965; Cooray 2003) modelidir. İletim hattı denklemleri toplam hat gerilim ve hat akımları açısından incelendiğinde;

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + L' \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h B_y^i(x,z,t) dz \quad (2.23)$$

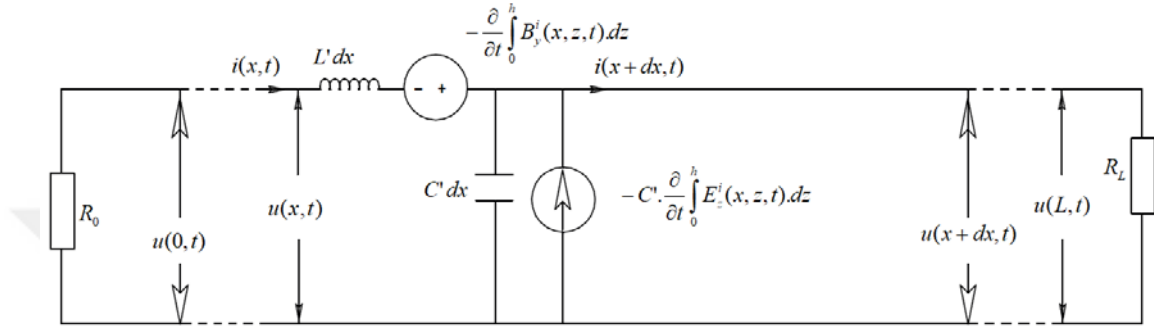
$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C' \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = -C' \cdot \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h E_z^i(x,z,t) dz \quad (2.24)$$

Sınır şartlar;

$$u(0,t) = -R_0 I(0) \quad (2.25)$$

$$u(L, t) = -R_L I(L) \quad (2.26)$$

Bu durumda iki zorlama kaynağı (fonksiyon) kullanılmıştır. Bu fonksiyonlar, Rusck modelinin aksine tahrik edilmiş dikey elektrik alan (B_z^i) ve tahrik edilmiş enine manyetik indüksiyondur (B_y^i). Eş iletim hattı modeli Şekil 2.8'de sunulmuş olup paralel akım kaynağı ve seri gerilim kaynağı bulunmaktadır. İlave bilgi olarak Nükleer elektromanyetik darbe (NEMP) ve iletim hatları arasındaki etkileşim Taylor formülasyonu tarafından tarif edilmiştir



Şekil 2.9. Eş iletim hattı modeli

2.4.3. Agrawal ve diğerleri modeli

Bu modelde, iletim hattı denklemlerini tanımlamak için dağılık gerilim kullanılmıştır. Bu durumda Maxwell denklemleri Şekil 2.9'da tanımlanan bütünleşme yolu boyunca entegre edilmiştir ve formdaki gibi dağılık gerilim cinsinden ifade edilir (Agrawal vd. 1980; Nucci 1995; Nucci vd. 1995)

$$\frac{\partial u^s(x, t)}{\partial x} + L' \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} = E_x^i(x, h, t) \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} + C' \frac{\partial u^s(x, t)}{\partial t} = 0 \quad (2.29)$$

$E_x^i(x, h, t)$ İletkenin boyundaki x eksenini boyunca gelen elektrik alanının yatay bileşenidir. $u^s(x, t)$ Alttaki formun tanımladığı dağılık gerilimdir.

$$u^s(x, t) = - \int_0^h E_z^s(x, z, t) dz \quad (2.30)$$

$E_z^s(x, z, t)$ Dağılmış elektrik alanının yatay bileşenidir. Toplam hat gerilimi $u(x, t)$ dağılmış gerilim olarak alttaki gibi gösterilir.

$$u(x, t) = u^s(x, t) + u^i(x, t) \quad (2.31)$$

Bu nedenle, hat boyunca belirli bir noktada toplam gerilim, dağılık gerilimlerin toplamıdır. (2.28) ve (2.29) çözümlerinden gelen gerilim ve tanımlanan gerilim:

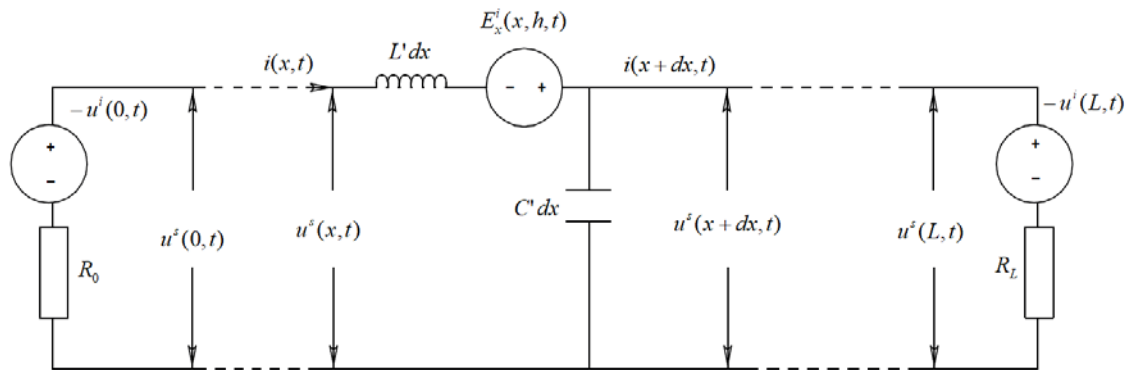
$$u^i(x,t) = -\int_0^h E_z^i(x,z,t) dz \quad (2.32)$$

Burada h iletkenin yüksekliğidir ve $E_z^i(x,z,t)$ yük dikey elektrik alanıdır. Dağılık gerilim sınır şartları:

$$u^s(0,t) = -R_0 i(0,t) - u^i(0,t) \quad (2.33)$$

$$u^s(L,t) = R_L i(L,t) - u^i(L,t) \quad (2.34)$$

Hat boyu yatay yük elektrik alanı E_x^i ve E_z^i dikey yük elektrik alanı, hat sonlarında dağılık gerilim üretir. Şekil 2.10'da gösterilmiş eşdeğer Agrawal kuplaj devresi modeline göre dağıtılmış gerilim kaynakları ve hat sonlarında iki gerilim kaynağı bulunmaktadır. Bu gerilim kaynakları yükselticiler olarak adlandırılır.



Şekil 2.10. Agrawal kuplaj devresi modeli

2.4.4. Rachidi modeli

Bu modelde elektrik alanının formülasyonu iletim hattı kuplaj denklemlerine yöneltmiştir. Rachidi tarafından türetilmiştir. Rachidi modelini türetmede, manyetik uyarılma alanı onun ana kaynağıdır. Bu model Agrawal ve ark. ve Taylor ve diğ. Rachidi kuplaj modeline dayanan ilgili iletim hattı denklemleri (Rachidi 1993; Cooray 2003)

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + L' \frac{\partial i^s(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial i^s(x,t)}{\partial x} + C' \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = \frac{1}{L'} \int_0^h \frac{\partial B_x^i(x,z,t)}{\partial y} dz \quad (2.36)$$

Hattaki x noktasındaki toplam akım ve karşılık gelen zaman t'deki dağılık akım:

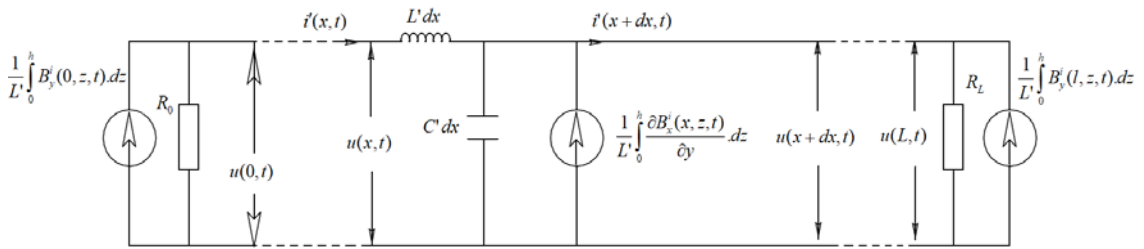
$$i(x,t) = i^s(x,t) - \frac{1}{L'} \int_0^h B_y^i(x,z,t) dz \quad (2.37)$$

Hat sonu sınır şartları:

$$i^s(0,t) = -\frac{u(0,t)}{R_0} + \frac{1}{L'} \int_0^h B_y^i(0,z,t) dz \quad (2.38)$$

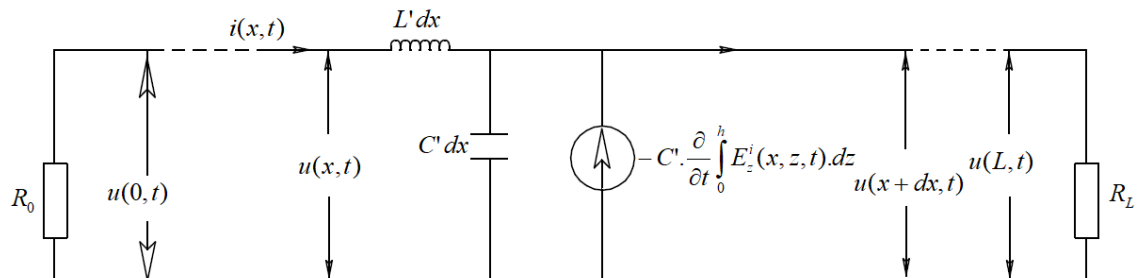
$$i^s(L,t) = -\frac{u(L,t)}{R_L} + \frac{1}{L'} \int_0^h B_y^i(L,z,t) dz \quad (2.39)$$

İletim hattı ile hat kublajı manyetik alan bileşenlerinden değerlendirilebilir. Genel olarak, manyetik alanların ölçümü, elektrik alan ölçümünden çok daha kolaydır. Bu nedenle, bu model daha ilginçtir çünkü manyetik alan sadece bu modelde ölçülür ve kullanılır (Rachidi 1993). Şekil 2.11, Rachidi modeli iletim hattını göstermektedir.



Şekil 2.11. Rachidi modeli iletim hattı

Şekil 2.12'de ise Chowdhuri - Gross modeli ile ilişkilendirilmiş iletim hattı kublaj modeli betimlenmiştir.



Şekil 2.12. Chowdhuri-Gross modeli ile ilişkilendirilmiş iletim hattı kublaj modeli

(Chowdhuri ve Gross 1967) tarafından sunulan iletim hattı, Rusck modelinin denklemleri benzerdir (Rusck 1958). Ancak, toplam hat gerilimi ve yük indüklenme gerilimleri; modelde toplam hat gerilimi ve yük skaler potansiyelleri yerine kullanılmıştır [22,33]. Chowdhuri iletim hattı denklemleri alttaki formdadır.

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + L' \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C' \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = -C' \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h E_z^i(x,z,t).dz \quad (2.41)$$

E_z^i Elektrik alan yükünün yatay bileşenidir. Sınır şartları ise:

$$u(0,t) = -R_0 i(0,t) \quad (2.42)$$

$$u(L,t) = R_L i(L,t) \quad (2.43)$$

Chowdhuri kuplaj modeline dayalı eşdeğer iletim hattı gösterimi Şekil 2.12'dedir. Bahsedilen kuplaj modelleri içinde iki model daha üstün bulunmuştur. Enerji iletim hatlarındaki yıldırım kaynaklı aşırı gerilimleri tahmin etmek için sıklıkla kullanılır. Bunlar Rusck model (Rusck 1958), Agrawal ve diğerleri modelleridir (Agrawal vd. 1980). Bu nedenle, bir karşılaştırma yapılmıştır (Cooray 1994). Bu karşılaştırma Rusck modelinin vektör potansiyel katkısını ihmal ettiğini gösterir ve sadece yatay elektrik alanın kaynağa bağımlı olmasına neden olur. Bu nedenle, tamamlanmamış yıldırım parametre hesaplarına rağmen Rusck modeli doğru sonuçlar verebilir. Bu doğruluk vektör potansiyel katkısı ihmal ile elde edilir. Araujo vd. (2001)'de tek fazlı iletim hattını kullanarak, Barker vd. (1996)'de rapor edilen deneysel ölçümler ile Agrawal kuplaj modelini kullanarak hesaplanan maksimum aşırı gerilimleri hesaplamışlardır. Jankov (1997) Rusck modelinden ortaya çıkan yıldırım kaynaklı aşırı gerilimleri hesaplamışlardır.

Yukarıda bahsedilen modeller hala araştırma aşamasında ve gelişmeye açıktır. Çünkü kanal dalları, yıldırım akımı bağlanma süreçleri ve yayılan elektromanyetik alan üzerindeki ilgili etkiler gibi eksiklikler dikkate alınmamıştır (Jankov 1997). Yıldırım kaynaklı aşırı gerilim, basitliği nedeniyle basitleştirilmiş Rusck formülü ile değerlendirilir. Sebebi ise düşük toprak dirençlerinde doğruluk payı yüksek sonuçlar vermektedir. Bu nedenle, IEEE Standards 1410 (2004)'de bildirilen durum altında güvenilir olabilir.

2.5. Yıldırım Deneyleri

Geleneksel olarak darbe (impuls) jeneratörleri kullanılarak yıldırım deneyleri gerçekleştirilir. Bu tür deneylerde kaynak derecelendirmelerinin sınırlamaları vardır ve bu nedenle deney prototipi yıldırım akımının yoğun olarak enjekte edilmesi için yeterli olamaz. Yıldırım testini gerçekleştirmede bu tür deneysel gelişmeler, yapay tetikleme ve doğal yıldırım çarpmaları açık alanda kurulan şebekelerde gerçekleştirilmiştir. Yıldırım darbe noktası doğal bulutların kullanılmasıyla kontrol edilir. Darbe noktası ince tellerle

topraklanmış küçük bir roket fırlatılarak kontrol edilir. Roket 200 m / s hızla yüklü bir buluta hareket ettirilir (Rakov 2010; Anonymous 3). Roket fırlatmanın sonucunda ise roket yaklaşık 200 ila 300 metre kadar yükseklikte, roketin yanında pozitif yüklü bir öncü alan meydana gelir. Bu yük buluta doğru yönelir. Bu nedenle, ince tel üzerinden yüzlerce amper gücünde öncü, sürekli akım akmaya başlar. Sonuç olarak; negatif yük, bulut yük kaynağından belirlenen noktaya hareket eder. Diğer yıldırım başlatma yaklaşımı, topraksız tel tekniğidir ki bu teknikte tetik teli yere yani toprağa bağlı değildir.

Üstte bahsedilen çalışmaların ana üssü olan Camp Blanding yıldırım tetikleme bölgesi ile ilgili genel bilgi verilecek olursa, Uluslararası Yıldırım Araştırma ve Test Merkezi olarak adlandırılmıştır. (ICLRT), 1994'ten beri düz, açık bir alanı kaplar ve Florida Üniversitesi ve Camp Blanding Florida Ordusu Ulusal Güvenlik üssü arasında anlaşma dâhilinde çalışmalar yürütülmektedir. Çalışmaları çok geniş kitlelere ulaşmıştır. Sahada test amaçlı 0,8 km'lik bir test yeraltı güç kablosu ve 0,7 km havai enerji iletim hattı bulunmaktadır.

2.6. Yıldırım Kaynaklı Aşırı Gerilimi Etkileyen Faktörler

Yıldırım kaynaklı aşırı gerilimleri etkileyen birden fazla faktör bulunmaktadır. Bu faktörler iletkenin tasarımından hattın yüksekliğine, korona kayıplarından topraklama teline kadar birçok başlık içermektedir. Bu başlıklar sırasıyla değerlendirilmiştir.

2.6.1. Çoklu iletken

Darbe noktasına yakın indüklenen aşırı gerilimler çok iletkenli kule yapısından etkilenir. Bu etki önemli ölçüde hat konfigürasyonuna, hatta dikey hat konfigürasyonuna bağlıdır. Ancak, yatay çizgi yapılandırmasında ise bu durum iletkenler arası mesafe ile darbe noktasının mesafesine bağlıdır (Chowdhuri 1990). Çok iletkenli bir hattaki bir iletken üzerindeki indüklenen aşırı gerilim diğer iletkenlerin etkisi ile azalır. Tek bir iletkenle karşılaştığında çoklu iletkende bu azalma her bir iletken için % 15 veya % 40 arasında olabilir. Diğer çalışma, çoklu iletkenin durumuna göre, indüklenen aşırı gerilim her iletken üzerinde % 15 ila % 25 azaltılır. İletkenlerin sayısını arttırmak, indüklenen aşırı gerilimin hat ucunda azalma oranını artırır (Idone 1982; Rachidi 1997; Kannu 2005). İletkenlerin sayısı artırılır ise indüklenen aşırı gerilimler azalır.

2.6.2. Topraklama teli /koruma teli

Topraklanmış teller kullanıldığında indüklenen aşırı gerilim azalır. Bu azalma topraklama telinin faz iletkenlerine veya topraklanmamış iletkenlere göre konuma göre değişir (Chowdhuri 1990). Koruma telleri, indüklenen aşırı gerilimlerin büyüklüğünü yaklaşık bir faktörle belirtildiği gibi % 20 ila 40 arasında azaltmaya yardımcı olur (Rusck 1958; Uman ve McInain 1969; Rachidi vd. 1997; Kannu ve Thomas 2005). Koruyucu tellerin etkinliği çoğunlukla iki bitişik topraklama noktası arasındaki boşluktan etkilenir (Paolone vd. 2004).

2.6.3. Toprak iletkenliği

Sonlu zemin iletkenliği durumunda indüklenen aşırı gerilimin büyüklüğü, hat boyunca hesaplama noktasından belirlenir. İndüklenen aşırı gerilim, hattın orta noktasında artar, hat sonlandırılırken azalır (Kannu ve Thomas 2005). Daha düşük iletken yüksekliklerinde (10m'dan az) sonlu toprak iletkenliğinin, dalga şeklinin yanı sıra indüklenen aşırı gerilim büyüklüğünün üzerinde önemli bir etkisi vardır. Yer iletkenliğini arttırmak, indüklenen aşırı gerilimi azaltmaya katkıda bulunur (Perez vd. 2003; Razzak 2004). Ancak, daha yüksek iletkenler için, sonlu toprak iletkenliğin indüklenmiş aşırı gerilim üzerinde bir etkisi yoktur (Perez vd. 2003). Sonlu toprak iletkenliği varsayımında, hattın orta noktasındaki indüklenen aşırı gerilim artarken hat sonlarında azalır. Daha fazla bilgi Kannu ve Thomas (2003)'de bulunabilir.

2.6.4. Yıldırımın vurduğu nokta

Yıldırımın düştüğu nokta için; yük açısının artırılmasıyla indüklenmiş aşırı gerilim azalır. Darbe noktası hattan uzaklaştıkça, indüklenen aşırı gerilim büyüklüğü azalır (Perez 2003). Geri dönüş darbe parametrelerini ve mükemmel iletken olan bir toprağı varsayarak, hat boyunca verilen noktadaki indüklenen aşırı gerilim, uzaklığın azalmasıyla ters orantılıdır (Koga 1979). Gecikme süresi de mesafe arttıkça, Razzak (2004)'de belirtildiği gibi artar.

2.6.5. İletim hattı yüksekliği

İletim hattının yüksekliği ile ilgili durumda, hatta indüklenmiş aşırı gerilim genliğine ve ön dikliğine bağlı olarak; hat yüksekliğinin etkisi, hattın yüksekliği arttıkça artar (Razzak 2004). İndüklenen Aşırı gerilim büyüklüğü, mükemmel toprak iletkenliği halinde hat yüksekliği ile neredeyse doğru orantılıdır (Rachidi 1997; Borgetti 2000; Cooray 2003). Mükemmel toprak iletkenliği durumunda, indüklenen aşırı gerilimin büyüklüğü ve hattın yüksekliği arasında yakın bir oran vardır. Ancak, Sonlu toprak iletkenliği durumunda, indüklenen aşırı gerilim, toprak iletkenliği, darbe noktasının konumu ve hat boyu inceleme noktasının fonksiyonu olarak artar.

2.6.6. İletim hattı uzunluğu

Yıldırım elektromanyetik darbesi (LEMP) ve iletim hattı arasındaki bağlantı, hat uzunluğu 2 km'den fazla olduğuunda ihmal edilebilir. Gerilim genliğinin maksimum değeri, kayıpsız hattın, hat uzunluğu ile sabit kalır. Düşük toprak iletkenliği durumunda, gerilim genliğinin maksimum değeri azalır. (Guerrieri 1997; Cooray 2003).

2.6.7. Korona

Koronadan etkilenen indüklenmiş aşırı gerilim, yıldırım darbesinin türüne bağlıdır (doğrudan veya dolaylı darbe). Dolaylı darbede indüklenmiş aşırı gerilim genliği artar. Ancak, direkt inme durumunda azalır. İndüklenen aşırı gerilimin artışı, korona ile arttırılan hat kapasitansı arttıkça açıklanabilir. Bu yüzden yıldırım kaynaklı aşırı gerilim yayılma hızı azaldıkça, indüklenen toplam aşırı gerilimi arttırır. Genel olarak, korona, sonlu toprak iletkenliği durumunda indüklenen aşırı gerilim üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ancak, direkt inme durumunda, korona, indüklenmiş aşırı

gerilimi, sonlu toprak iletkenliğinden daha fazla etkiler. Bunun yanında, korona, indüklenmiş aşırı gerilim yükselme süresini arttırırken, ön dikliğini yani çıkış eğimini azaltır (Silva 2002).

2.6.8. Yıldırım parametreleri

Yıldırım parametreleri değerlendirilirken yıldırımın şeklini, şiddetini yapısını ve bozunum sürelerini göz önüne almak gerekir.

A. Öncül zaman

Yıldırım ön süresi arttığında indüklenen aşırı gerilim genliği azalır (Silva 2002; Perez vd. 2003). Hattın ortasında daha büyük bir etkiye sahip olur. Genellikle, indüklenen aşırı gerilim öncül zaman ile ters orantılıdır. İndüklenen aşırı gerilimdeki diğer önemli parametre ise yıldırımın öncül zamanı ile indüklenen aşırı gerilimin öncül zamanı orantılıdır (Perez 2003).

B. Bozulma süresi

Değişken bozulma süresince ve öncül zamanın $1\mu s$ den düşük olduğu zamanlarda bozulma süresi indüklenmiş aşırı gerilimleri etkilenmez. Geri dönüş darbesi akımının değişkenliğinin yarı değerinde etkilerken, indüklenmiş aşırı gerilim genliği üzerinde çok az etkisi vardır (Silva vd. 2002).

C. Akım Genliği

Genel olarak indüklenen aşırı gerilim, diğer parametrelerden herhangi bir etki olmaksızın tüm hat boyunca mevcut genlik ile orantılıdır fakat akım genliğinin, indüklenmiş aşırı gerilimin öncül zamanına herhangi bir etkisi yoktur. [Silva vd. 2002; Perez vd. 2003]

D. Geri dönüş darbe hızı

Geri dönüş darbe hızı, indüklenmiş aşırı gerilim büyüklüğünü, öncül zamanını ve bozulma süresini etkiler. Etkisi hat boyunca farklı olup, yıldırım çarpma yerine ve toprak iletkenliğine bağlıdır. Toprak iletkenliği düşük olduğunda, indüklenen aşırı gerilim büyüklüğünde hat sonunda daha büyük farklılıklar gözlemlenebilir (Perez vd. 2003).

Geri dönüş darbe hızı, indüklenmiş aşırı gerilim genliği kadar, dalga şekline ve öncül dikliğine de etki eder. Geri dönüş darbe hızı arttıkça, indüklenmiş aşırı gerilim genliği azalır ve öncül dalganın diklik şekli artar (Silva vd. 2002). İndüklenen aşırı gerilim tepe noktası uzak darbe yerleri için geri dönüş hızı ile yaklaşık olarak orantılıdır ancak bu mesafelerde indüklenen aşırı gerilimler yüksek değildir. Yakın darbe yerleri için, dönüş darbe hızının, indüklenen aşırı gerilim üzerinde etkisi yoktur (Nucci vd. 1993; Borgetti vd. 2000; Cooray 2003).

3. MATERYAL VE METOD

3.1. Genel Tanımlar

Bu çalışmadaki amaç yüksek gerilim hatlarındaki yıldırım kaynaklı arızaları değerlendirmek ve çözüm önerileri sunmaktır. Bu durum araştırılırken referans hat olarak 2 adet 154 kV tek devre 1272 MCM Pheasant iletkenli Oymapınar - Mahmutlar ve Yalnızardıç - Mahmutlar Enerji İletim Hattı kullanılmıştır. Bu hatlarda iletken kesiti 1272 MCM Pheasant, direk tipi ise PA serisidir. PSCAD ortamında hat modellemesi yapılırken bu hatlara ait veriler kullanılmıştır (direk tipi tanımlaması, direk ara mesafesi, yükseklik, iletken değerleri vb). 154 kV Oymapınar - Mahmutlar E.İ.Hattı tesisinde 1460mm izolatör, Yalnızardıç - Mahmutlar E.İ.Hattında 1660 mm izolatör kullanılmıştır. Meteoroloji 4. Bölge Müdürlüğü'nden alınan koordinat bazlı yıldırım verileri ve TEİAŞ 19. Bölge Müdürlüğü arıza verileri referans alınarak yıldırım yoğunluğunun en fazla olduğu alanlar belirlenmiştir.

3.2. Kullanılan Matematiksel Yöntemler

EMTDC tabanlı programlarda hat modellemesi yaparken karşılaşılan temel sorun hangi modellemenin yapılacağıdır. Daha önceki kısımlarda da belirtildiği üzere mühendislik modeli ile yapılan denemeler ile suni yıldırım ölçümlerinin yakın değerler verdiği görülmüştür. Model seçimden önce elektromanyetik anlamda geçici analizleri yapan programlarda canlandırma her zaman $t=0$ anındaki başlangıç koşulları ile başlatılır. İstenilen zamanda da sonlandırılır. Bu esnada $t=0$ anından $t=$ incelenecek zamana kadar ki geçen kısımda değerlendirmeler yapılır. Bu noktada belli bir aralıkta inceleme yapılacağı için belli verileri sınırlandırmak gerekir. Bu çalışmada yapılan simülasyonda hattın tamamı yerine 5 direklik bir kısmının modellenmesi bu durumun örneğidir. Ayrıca Yıldırım elektromanyetik darbesi (LEMP) ve iletim hattı arasındaki bağlantı, hat uzunluğu 2 km'den fazla olduğunda ihmal edilebilir (Guerrieri 1997; Cooray 2003). Bu programda Bergeron Modeli üzerinden işlem yapılmıştır. Karakteristik modeli olarak da literatürde yer almaktadır. EMTDC elektrik şebekelerinde geçici analizlerin sürelerini hesaba katarak analiz etmek için Dağıtılmış parametrelerle incelenen iletim hatları kullanılmıştır (Dommel 1969). Her birim uzunluk için endüktans L ve kapasitans C olan ideal (kayıpsız) bir iletim sistemi gibi düşünüldüğünde; Sistem boyunca x noktasında, gerilim ve akım aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dx} &= -L \cdot \frac{di}{dt} \\ \frac{di}{dx} &= -C \cdot \frac{dv}{dt} \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$V(x, t) + Z_0 \cdot i(x, t) = 2Z_0 \cdot f_1(x - v) \quad (3.2)$$

$$V(x, t) - Z_0 \cdot i(x, t) = -2Z_0 \cdot f_2(x + v) \quad (3.3)$$

Z_0 .: Karakteristik Empedans [Ω]

v :Faz hızı [m/s]

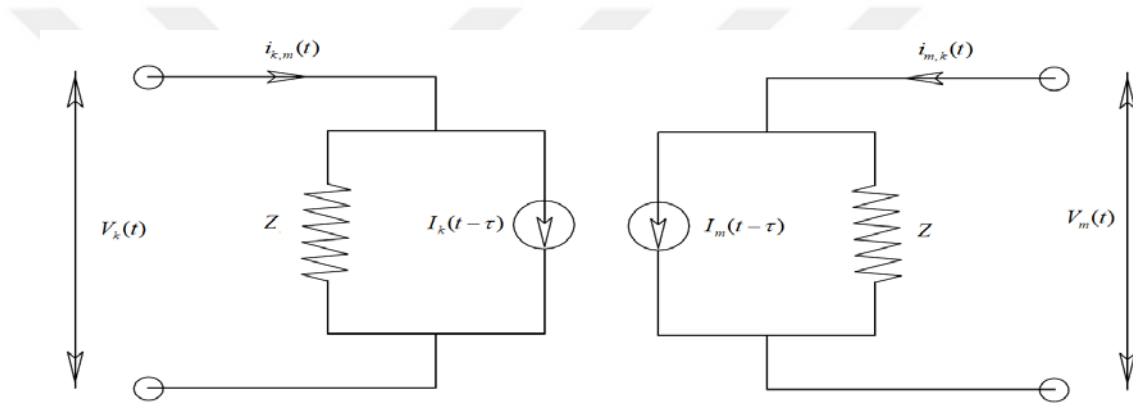
Bu durum belli bir uzunluktaki iletim hattı için matematik olarak ifade edilecek olursa;

$$I_k(t - \tau) = -\frac{1}{Z_0} \cdot V_m(t - \tau) - i_{mk}(t - \tau) \quad (3.4)$$

$$I_m(t - \tau) = -\frac{1}{Z_0} \cdot V_k(t - \tau) - i_{km}(t - \tau)$$

Burada $\tau = l\sqrt{LC}$ iletim sistemi gezi süresi [s] ve l = İletim hattı uzunluğu [m]

Bu durumun Norton Eşdeğer devresinde tek fazlı İdeal dağıtılmış hat modeli Şekil 3.1’de gösterilmektedir.

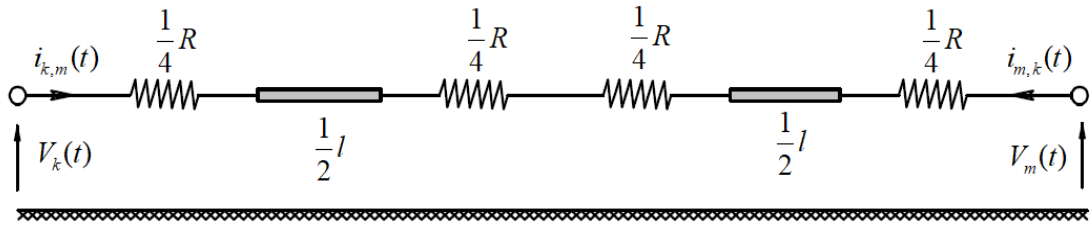


Şekil 3.1. Norton eşdeğer devresi tek fazlı ideal dağıtılmış hat modeli

Bu model kayıpsız olarak değerlendirirse $Z_0 = Z$ olacaktır. Bergeron modeli, açıklanan Karakteristikler Metodu ile yakından ilgilidir. Yani, esasen dağıtılmış bir endüktans L ve bir C kapasitansı ile temsil edilen ideal (kayıpsız) bir modeldir. Bununla birlikte, Bergeron modeli, yaklaşık sistem kayıplarına tahmini bir eğimli direnç özelliği eklemek için bir adım daha ileri gider. Bergeron modelinin tek frekanslı bir model olduğuna dikkat etmek önemlidir. Yani, karakteristik empedans Z_0 gibi hesaplanan tüm parametreler belirtilen bir frekansta hesaplanır. Bir AC iletim hattı için genellikle 50 veya 60 Hz. olarak kullanılır. Mevcut simülasyonda ise 50 Hz üzerinden tüm tanımlamalar yapılmıştır. Her ne kadar Bergeron modeli, zaman alanındaki (tüm frekansları içeren) geçici simülasyonlar için kullanılabilse de, yalnızca belirtilen kararlı durum frekansındaki sonuçlar anlamlıdır. Bu nedenle, Bergeron modeli yalnızca röle testi veya eşleşen yük akışı sonuçları gibi genel temel frekans empedansı çalışmaları için kullanılmalıdır. Bu durum ise referansı röle bilgisi olan bu çalışma için yeterli gerçekliği sağlamaktadır.

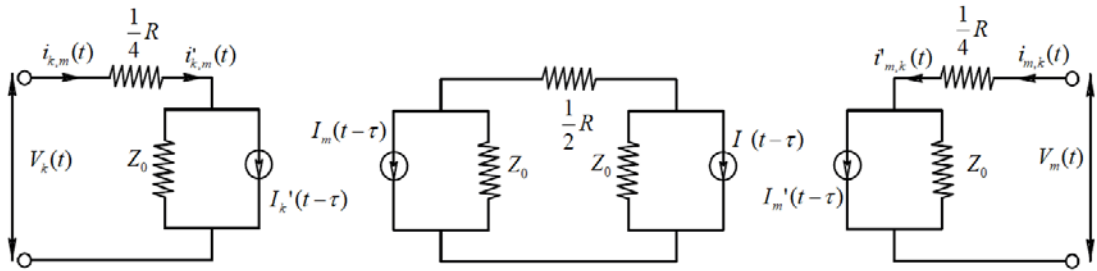
Bergeron ile çoklu pi devresi modeli karşılaştırıldığında sistem uzunluğu, dalgaların yayılmasının (yaklaşık ışık hızında) hattın tüm uzunluğu boyunca

ilerlemesine yetecek kadar yeterli olduğunda, tek bir zaman adımında genellikle bir pi-eşdeğeri üzerinde seçilmelidir. Bu, $\Delta t = 50 \mu s$ 'lık tipik bir simülasyon süresi için, yaklaşık 15 km uzunluğundaki iletim sistemlerinin, pi-bölümünün aksine Bergeron modeliyle temsil edilmesi gerektiği anlamına gelir. Elbette, Bergeron modelinde yayılma gecikmesinin göz önünde bulundurulması gerçek dünyada önemlidir. Aynı zamanda seri bağlantılı pi-bölümlerinin yüksek frekanslarda yapay rezonanslara neden olabileceği şüphesizdir (Dommel 1969). Hat direncinin eklenmesi durumunda; Şekil 3.2'de görülen Bergeron modeli, Karakteristikler Metodu ile tanımlanan kayıpsız, dağıtılmış parametre devresine seri direnç elemanları ekleyerek kayıplara yaklaşır. Toplam sistem direnci R (PSCAD Line Constants Programı tarafından hesaplandığı şekilde) göz önüne alındığında, kayıpsız hat, her biri her bir ucunda R direnci olan iki parçaya bölünür. Bu segmentler birleştirildiğinde, ortada $\frac{1}{2} R$ ve son R 'nin her iki ucunda da yüksek bir direnç vardır (Dommel 1969; Gole 1998). Burada R iletim sisteminin toplam direncidir. [Ω]



Şekil 3.2. Direnç eklenmiş kayıpsız hat modeli

Sistemin iki bölüme ayrılması, ek direnç elemanları ile birlikte, alttaki şekilde gösterilen kayıpsız hattın Norton temsiliinde bu değişiklik ile sonuçlanır. Kayıpsız bir hattın kesik hat direncine sahip eşdeğer devresi aşağıda verilmiştir:



Şekil 3.3. Kayıpsız direnç ekli eşdeğer devre

Zaman alanı uygulamasında (Time Domain) Şekil 3.3'deki Dağıtılmış Arayüzü ile aynı iki bölüm biçiminde daraltılabilir. Bu durumda hattın her bir ucundaki Norton empedansı:

$$Z = Z_0 + \frac{R}{4} \quad (3.5)$$

Norton empedansı Z' 'deki değişiklik, I_k ve I_m enjeksiyonlarının tanımına şu şekilde yansır:

$$\begin{aligned} I_k(t-\tau) &= \frac{1+H}{2} \cdot \left\{ -\frac{1}{Z} \cdot v_m(t-\tau) - H \cdot i_{m,k}(t-\tau) \right\} + \left(\frac{1-H}{2} \right) \cdot \left\{ -\frac{1}{Z} \cdot v_k(t-\tau) - H \cdot i_{k,m}(t-\tau) \right\} \\ I_m(t-\tau) &= \frac{1+H}{2} \cdot \left\{ -\frac{1}{Z} \cdot v_k(t-\tau) - H \cdot i_{k,m}(t-\tau) \right\} + \left(\frac{1-H}{2} \right) \cdot \left\{ -\frac{1}{Z} \cdot v_m(t-\tau) - H \cdot i_{m,k}(t-\tau) \right\} \end{aligned} \quad (3.6)$$

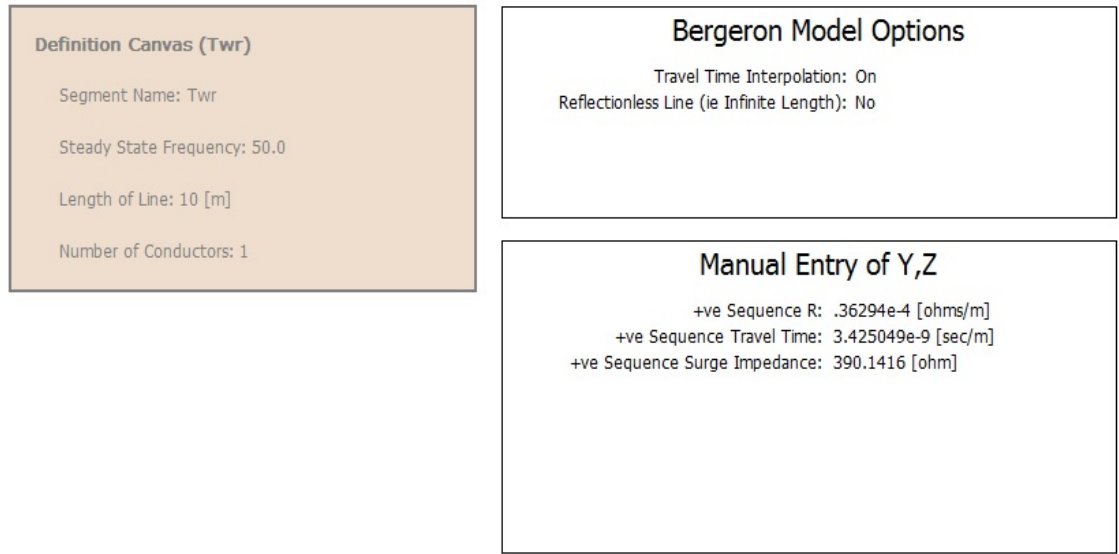
Burada:

$$H = \frac{Z_0 - \frac{R}{4}}{Z_0 + \frac{R}{4}} \quad (3.7)$$

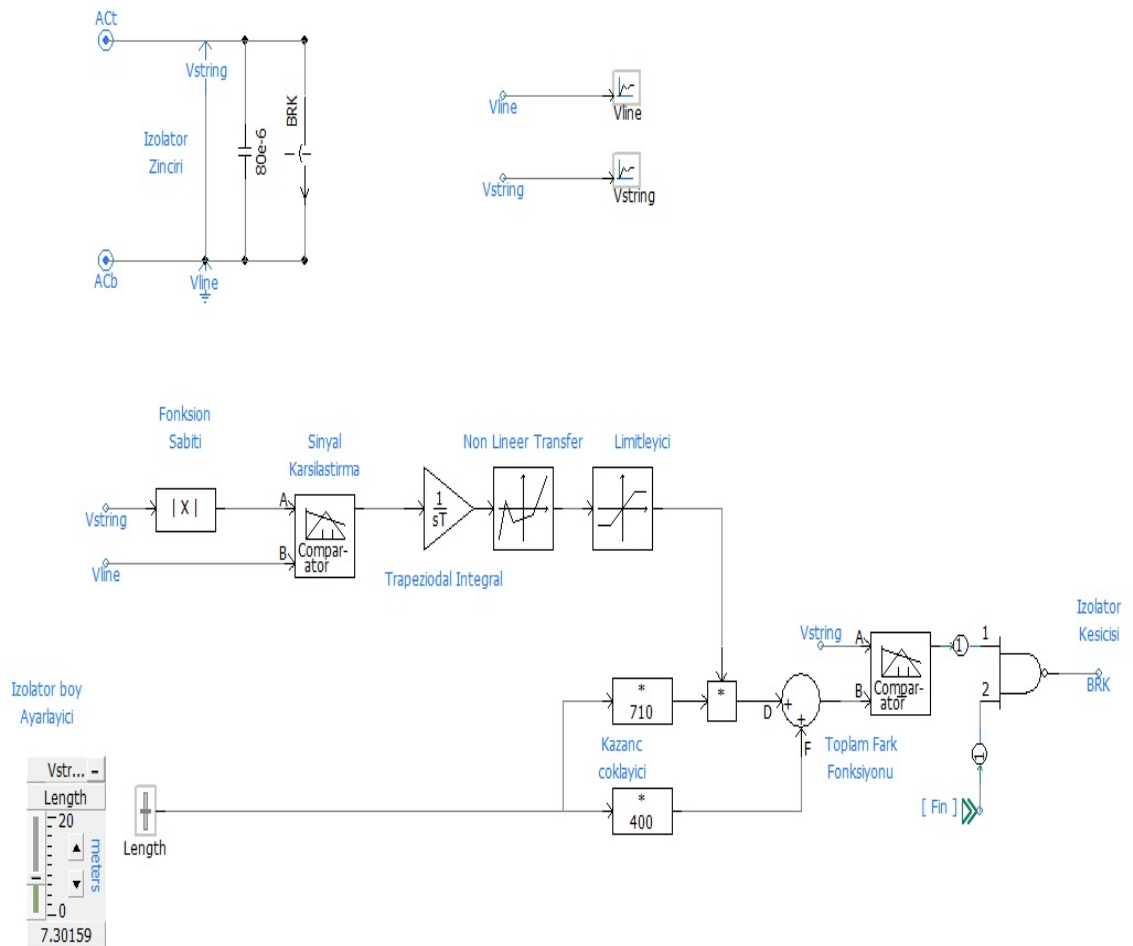
Frekans için kayıp yaklaşımı ele alındığında PSCAD içinde Bergeron modeli iki farklı frekans noktasında da hesap yapabilir. Burada, ikinci nokta, yüksek frekanslarda ek zayıflama sağlama amacıyla, "kullanıcı tarafından seçilen" (temelden büyük) bir frekanstır. İletim sistemi tam olarak daha yüksek bir frekansta modellenmemektedir. Çünkü karakteristik empedans, seyahat süresi, vb. halen temel frekansta hesaplanabilmektedir. Kayıp yaklaşımı ω için frekans normal olarak 100 Hz ila 2 kHz arasında olmak üzere seçilir ve ilgilenilen belirli rezonans koşullarına uyması için seçilebilir. Bahsedilen durum ışığında PSCAD ile dağıtılmış devre modeli için Bergeron modeli, frekans bağımlı analizler üzerinden çözümlenmiştir.

3.3. Kullanılan Direk Modeli

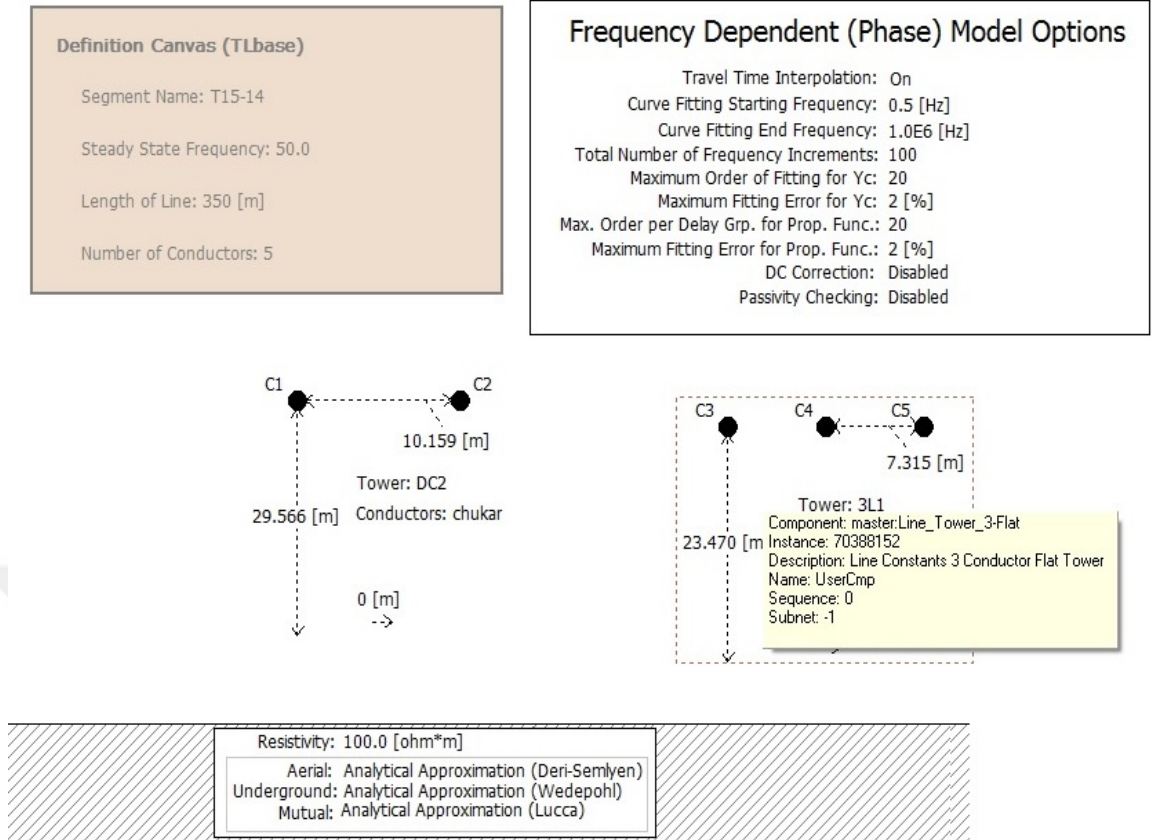
Hattın değerlendirilmesinde 154kV tek devre 1272 MCM Pheasant iletkenli direkler değerlendirilmiştir. Bu direk modelleri PA, PB, PC, PD ve PE'dir (PE nihayet direğidir). Direklerin önden görüntüsü ek-1'de verilmektedir. Bu direkler mevcutta Türkiye enerji sisteminde kullanılmakta olan 154 kV tek devre 1272 MCM Pheasant iletkenli direklerdir. Kullanılan ve ekte bulunan direk tasarımları simülasyonda kullanılan direk modelleridir. Şekil 3.4'de PSCAD ortamında tasarlanan direk modellemesi görülmektedir. Direğin gövdesi 20metrelik, konsolları da direk tipine göre 10metrelik bir iletim hattı olarak modellenmiştir. Şekil 3.5'de görüleceği üzere Bergeron modelinin temel özellikleri istenilen empedans ve frekans değerlerine göre tanımlanmaktadır. Şekil 3.6'de ise izolator kısımları gösterilmektedir. 1660 mm izolator boyuna karşılık gelen 80pF'lık kapasitans girilmiştir. Bu kapasitenin paraleline de devre kesici tanımlanmıştır. Hat ve izolator bilgileri program içinde tasarlanan komperatöre gitmektedir. Yine aynı kısımda manuel olarak izolator boyunu arttırıp, azaltan bir anahtar girilmiş ve bu anahtar izolator boyunun değişimine göre izolator kapasitesinde değişiklik yapmaktadır. Her değişiklik sonrası kayıt altına alınmakta ve program tekrar çalıştırılmaktadır. Yapılan karşılaştırma sonucunda değişken gerilim bilgisi, atlama eşik değerinin üzerine çıkması halinde kesici bilgisi sisteme dâhil olmaktadır. Grafiklerde görülen izolator bilgisi bu noktada devreye girmektedir. Ve kapısı ile gelen sinyal



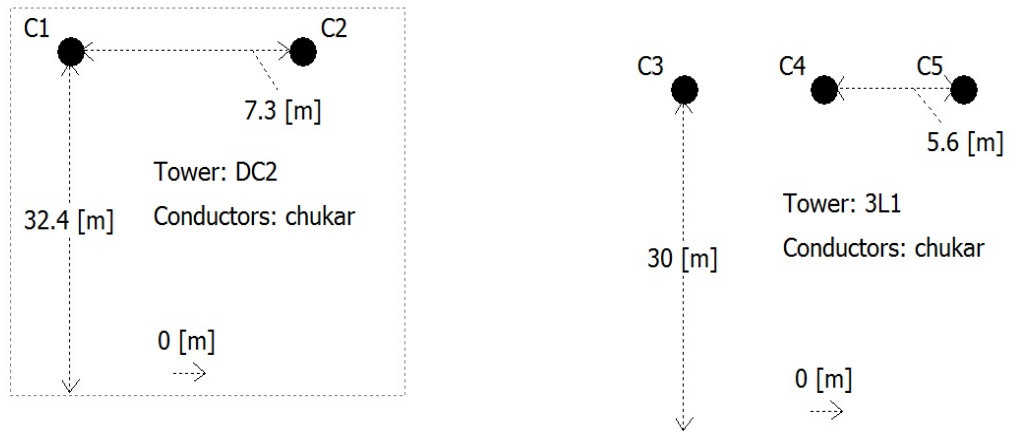
Şekil 3.5. İletim hattı Bergeron modeli



Şekil 3.6. İzolator devresi tasarımı



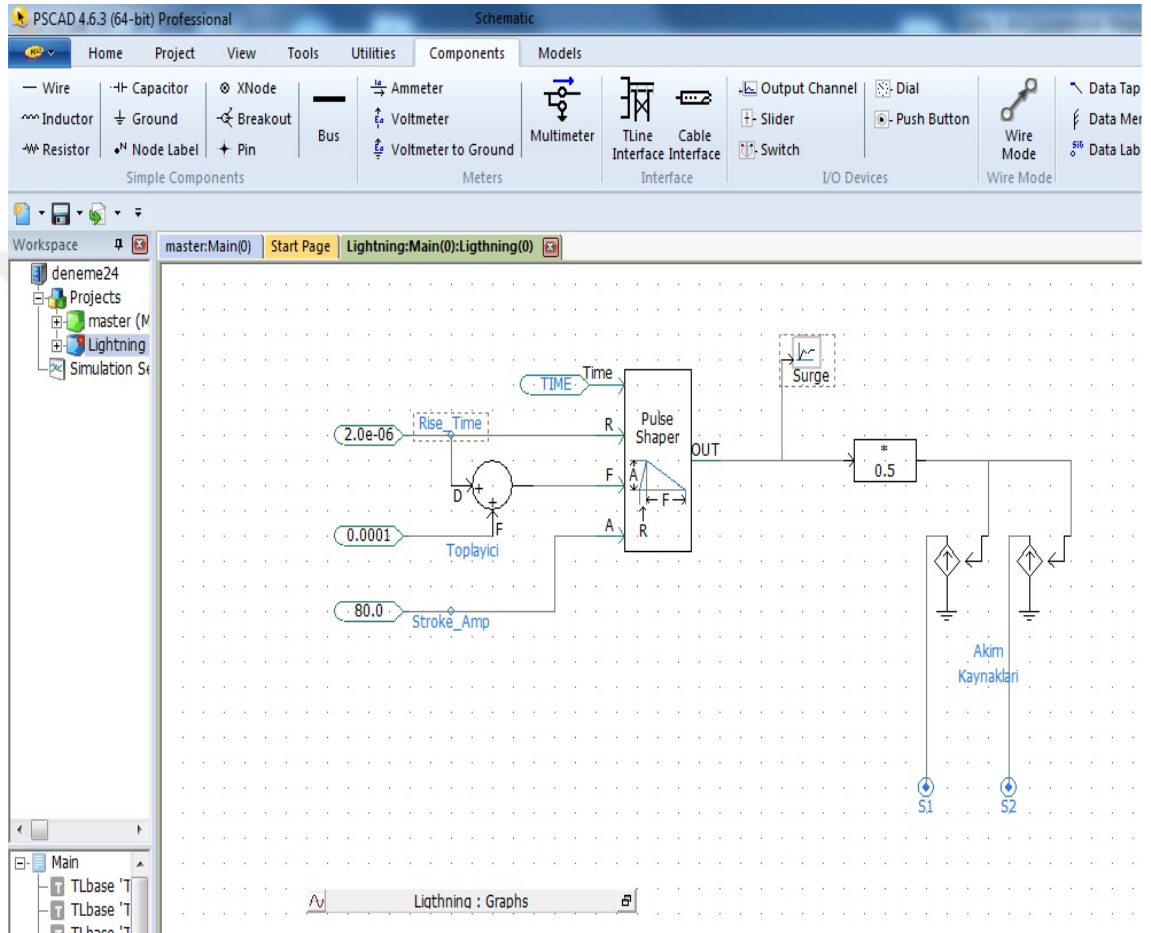
Şekil 3.7. Faz, koruma teli ve direk konfigürasyonu tasarımı



Şekil 3.8. Koruma teli ve faz tasarımı

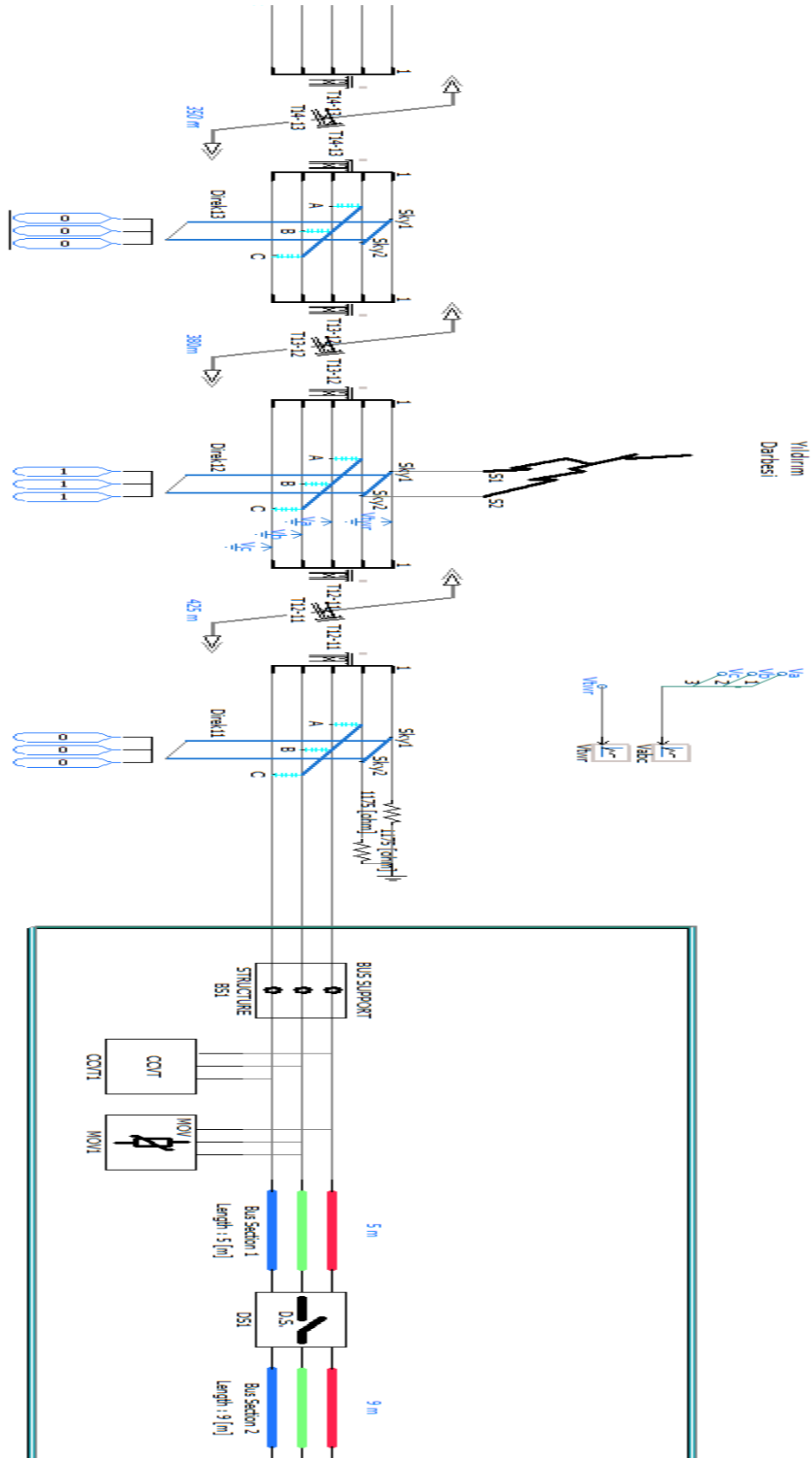
Şekil 3.8’de Koruma teli ve faz iletkenleri tanımlanırken aynı koordinatlarda ayrı 2 direk olarak tanımlanmıştır. Koruma teli için DC direk modeli baz alınmıştır. Hem 2 farklı direnç olmaması için hem de oluşabilecek mantık hatalarının önüne geçebilmek için DC direk için gövde direnci 0Ω alınmıştır. Bu iki direk aynı noktada

tanımlandığı için üst üste bindirilmiş gibi düşünülebilir. Direk tanımlaması yapılırken direnci olmadığı için koruma tanımlamasında problem yaşanmamıştır. İletken için düz direk tipi modellenmiştir (Flat tower). Bu modelleme yapılırken PA serisi direk tiplerinin iletken yerleşimleri baz alınmıştır. Koordinat girişi TM referans noktası alınarak (0,0) alınmıştır. Her direk için bir sonraki direğe olan mesafesi tanımlanarak ara mesafeler belirlenmiştir. Ayrıca faz iletkeni ve koruma telinin bu yerleşimde direk üzerinde kot farklarıyla belirlendiği ve direğin gövdesi ayrı bir iletim hattı olarak modellendiği için herhangi bir sorun teşkil etmemektedir.



Şekil 3.9. Yıldırım modellemesi

Şekil 3.9’da Yıldırım modellemesi yapılırken zaman mikro saniye olarak tanımlanmıştır. Dalga şekli modellemesi IEEE 1410 standartlarından alınmış olup devredeki kazanç katsayısı 132kA maksimum yıldırım değeri üzerinden incelenmiştir. Kazanç katsayısı 1 alındığında hatta 132kA’lık yıldırım enjekte edilmekte, 0,075 alındığında 10kA’lık bir yıldırım hatta enjekte edilmektedir. Şekil 3.10’da ise incelenecek olan hattın 5 direklik kısmı ve örnek trafo merkezi bulunmaktadır.



Şekil 3.10. İncelenen kısmi hattın simülasyon görünümü

3.5. Simülasyon Bilgileri

Simülasyon tasarlanırken 1 model esas alınmıştır. Bu modelde 1 hatla bir barası beslenen TM'ye gelen iletim hattının aynı anda 2 koruma teline düşen yıldırım değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme yapılırken fazlarda ve direk gövdesinde gerilimler incelenmiş, toprağa akan akım miktarları değerlendirilmiştir. Toprağa akan akım ve direk üzerindeki ekipmanda okunan gerilim değerleri incelenmiştir. Toprak direncine göre direk üzerinde bulunan teçhizatındaki gerilim miktarlarındaki artış incelenmiştir. Ayrıca yine yüksek topraklama direnci uygulaması yapılarak hattın açmasının önüne geçmek için izolatör boylarında artışa gidilmiştir. İzolatör boylarındaki artış sonucunda topraklama şebekesindeki akım ve gerilim değerleri genel olarak incelenmiştir. 5 ve 10 kA den başlayarak 20, 30, 40, 50, 60, 75 ve 100 kA değerlerine kadar akım kaynaklarıyla yıldırımlar üretilmiştir. Bu farklı akım seviyelerinde hatta ve izolatörlerde oluşan gerilimler değerlendirmeye tabi tutulmuştur.

Bu değerlendirmeler yapılırken PSCAD programında örnek olarak bulunan GIS TM (Gas Insulated Substation: Gaz izoleli Transformatör Merkezi) modeli revize edilerek TEİAŞ sorumluluğunda bulunan TM'lere ait bara değerleri baz alınmıştır. Hat modeli değerlendirilirken 1272 MCM Pheasant iletken için kilometrik direnç, endüktans ve reaktans değerleri referans alınmıştır. Hat gerilimleri 170kV TEİAŞ işletme gerilimi baz alınarak tasarlanmıştır. PSCAD içinde modelleme yapılırken iletim hatları iki tip şeklinde modellenmektedir. Bu modelleme için iletim hattı ara yüzü ve komponent olarak tanımlamaları yapılmıştır. Program dâhilinde hat modellemesi yapılırken frekans bağımlı faz modeli kullanılmıştır. Bu duruma alternatif olarak hatlar Bergeron modeli ile birlikte hat sabiti olan değerlerinin tamamı elle girilerek tanımlamalar yapmaya imkân sunmaktadır. PSCAD ortamında program çalıştırma süresi 100 mikro saniyenin üzerine çıkartılamamaktadır. Çıkartıldığı anda çözümleme süreleri katlanarak artmaktadır. Grafiklerin değerlendirilmesi genellikle 20 mikro saniyelik dilimlerde belirlenmiştir. Çoğu grafik için bu süre yeterli olmuştur.

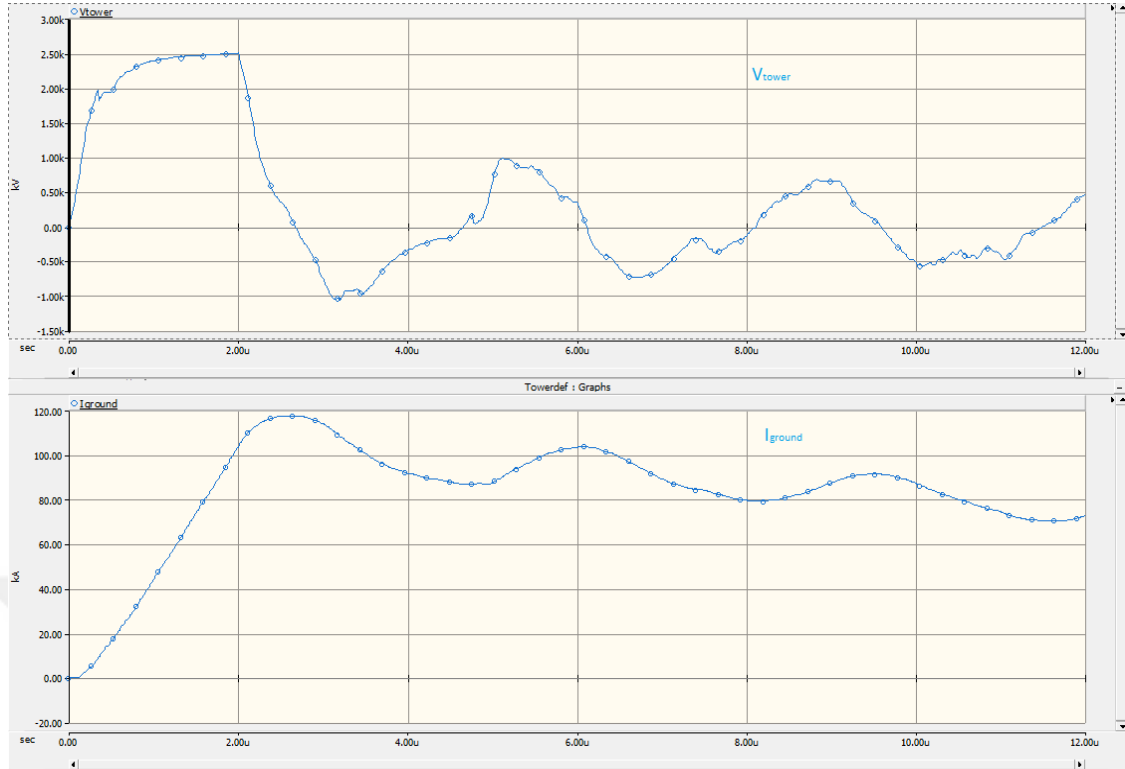
4. BULGULAR

Bulgular kısmında yıldırım esnasında direk gövdesinde, hatta ve izolatörde oluşan gerilimler incelenmiştir. Direnç değerleri 1'den 2000 Ω 'a kadar alınmıştır. Yıldırım ile topraklama karşılaştırılması, yıldırım ile izolatör karşılaştırılması ve izolatör boyları ile topraklama değerleri arasında karşılaştırmalar yapılmıştır. Yıldırım ile topraklama karşılaştırması yapılırken izolatör boyu sabit tutulmuştur. Yıldırım ile izolatör boyu değerlendirilirken topraklama dirençleri sabit tutulmuştur. İzolatör boyu ile topraklama direnci değerlendirilirken yıldırım şiddeti sabit tutulmuştur.

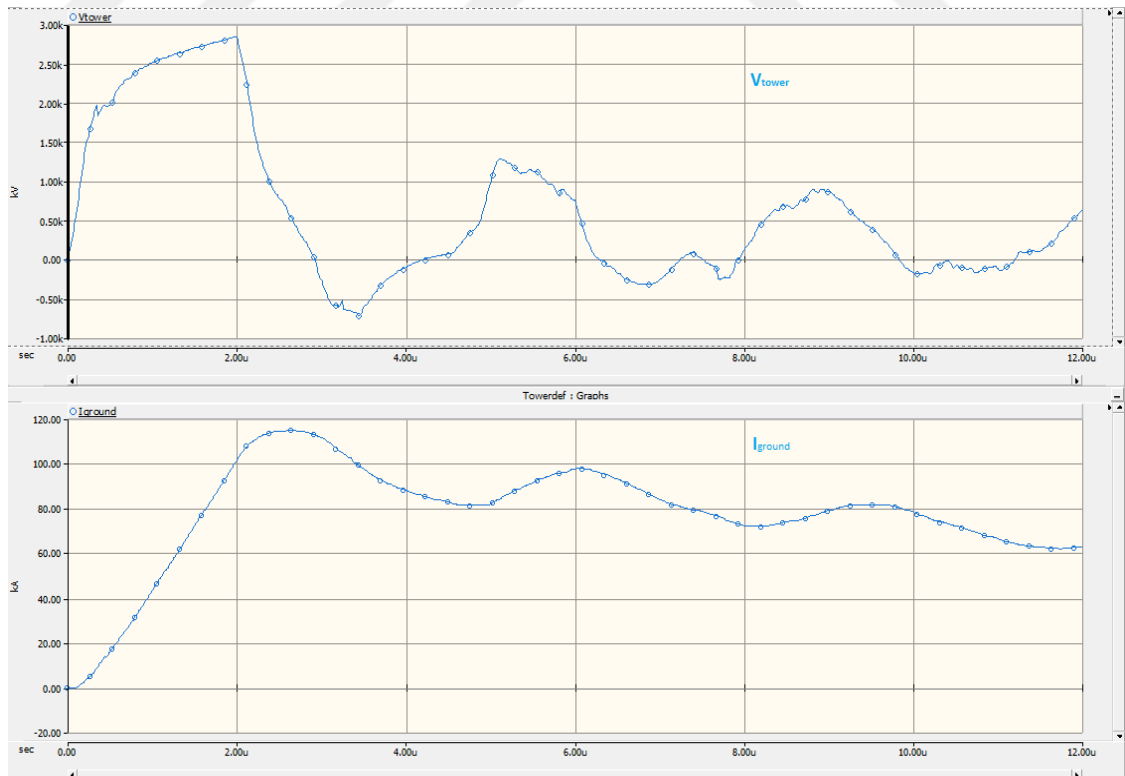
4.1. Direk Gövdesinde Oluşan Gerilimlerin Değerlendirilmesi

Bu kısımda direk ayak direnci 1 Ω 'dan başlayarak 2000 Ω 'a kadar alınmıştır. Bu direnç değerine göre uygulanan yıldırımda, izolatör boyu 1660mm göre başlangıç kapasitesi 80pF alınmıştır. Bu süreçteki amaç direkte, kulede ve fazlarda oluşan gerilim değerleri ile toprakta oluşan akım değerlerini incelemektir. Aynı yıldırım genliğinde direk ayak topraklama değerlerini yükselttiğimizde direkte oluşan gerilimler gözlenmiştir. 1 Ω direk ayak toprak direncinde direk üzerinde 130 kA yıldırımda 2.5MV civarında gerilim indüklenirken bu değer direk ayak direnci 2000 Ω 'a çıktığında 14.3MV mertebelerine ulaşmaktadır.

$I_{lightning}$:130kA, R_{Direk} 1 Ω - 2000 Ω , L_{String} :1650mm olduğu durumda gerilim incelemeleri yapılarak, Yıldırım şiddeti $I_{lightning}$:130kA değerinde alınmış, direk ayak direnci R_{Direk} 1 Ω dan başlayarak arttırılarak alınmış ve izolatör boyu L_{String} :1650mm olarak alınmıştır. Bu durumda direğin gövdesinde tepe değeri 2500 kV civarında olan gerilim ve 117,8 kA Akım oluşmaktadır. 2 μs sonra düşüşe geçip 10 μs sonra gerilim ve 50 μs sonra ise akım sıfırlanmaktadır. Bu durumu gösteren program çıktısı Şekil 4.1'de bulunmaktadır.

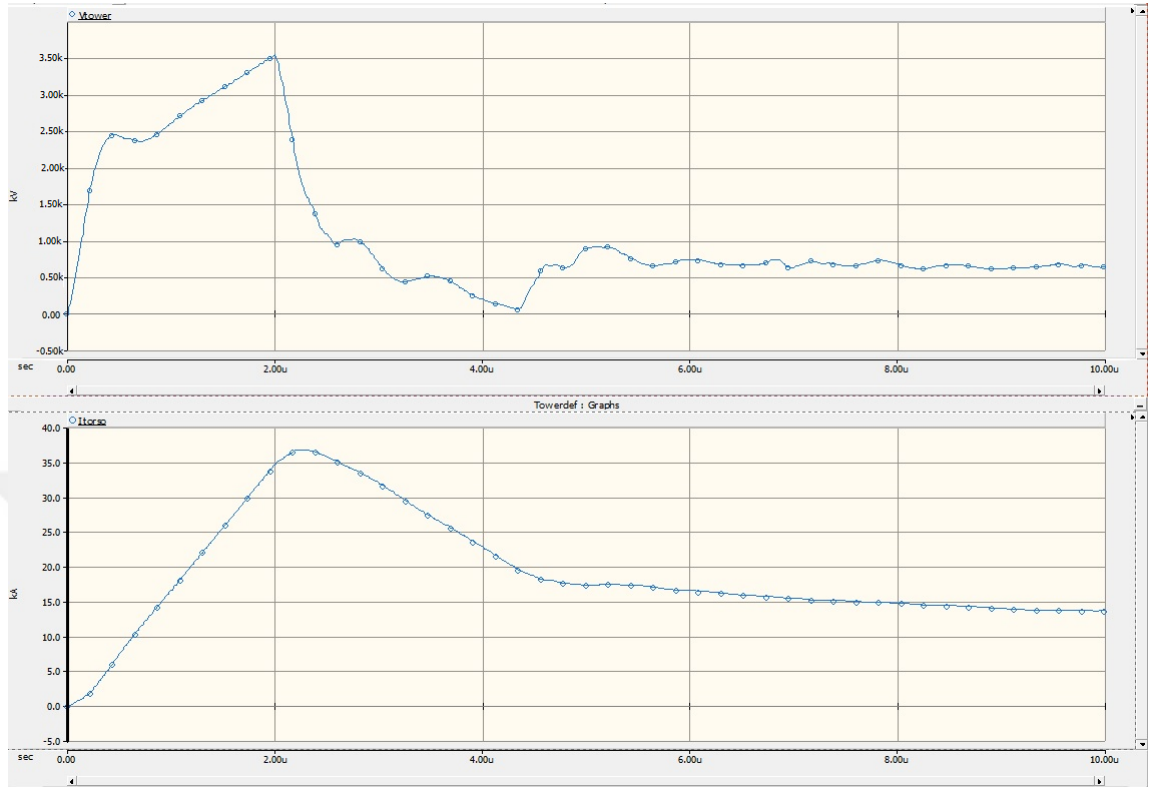


Şekil 4.1. Direk direnci 1 Ω olması halinde indüklenen gerilim ve akım



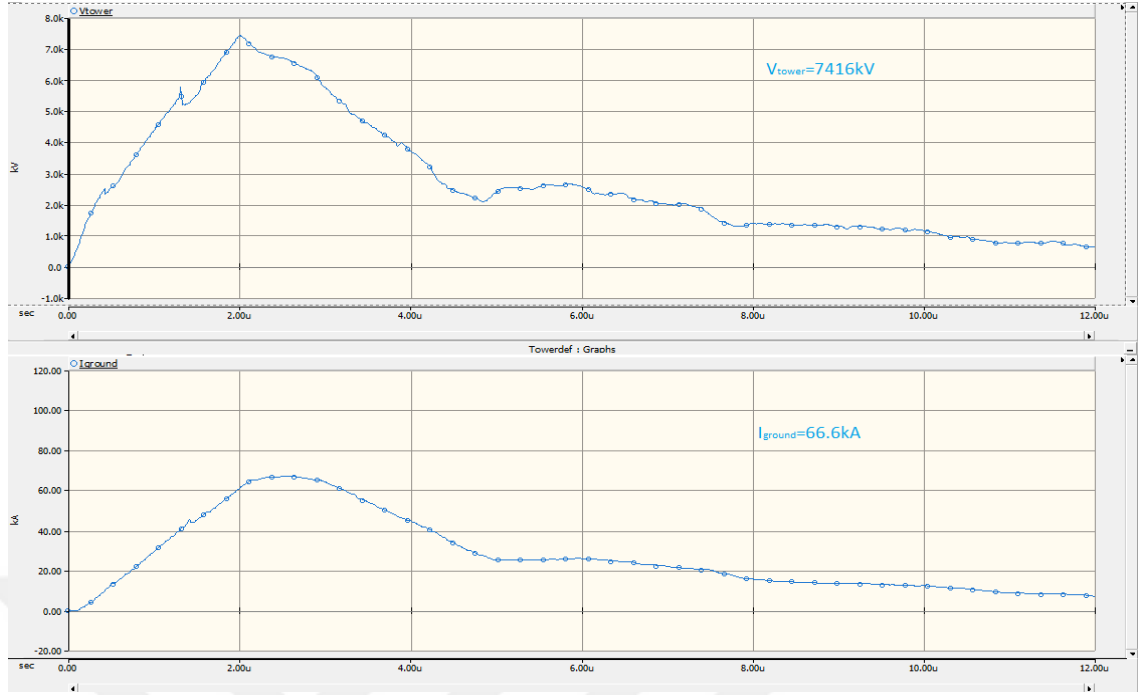
Şekil 4.2. Direk direnci 5 Ω olması halinde indüklenen gerilim ve akım

Şekil 4.1'deki durumdan yola çıkarak Şekil 4.2'de direncin artmasına paralel olarak gerilim artışı gözlemlenmektedir.



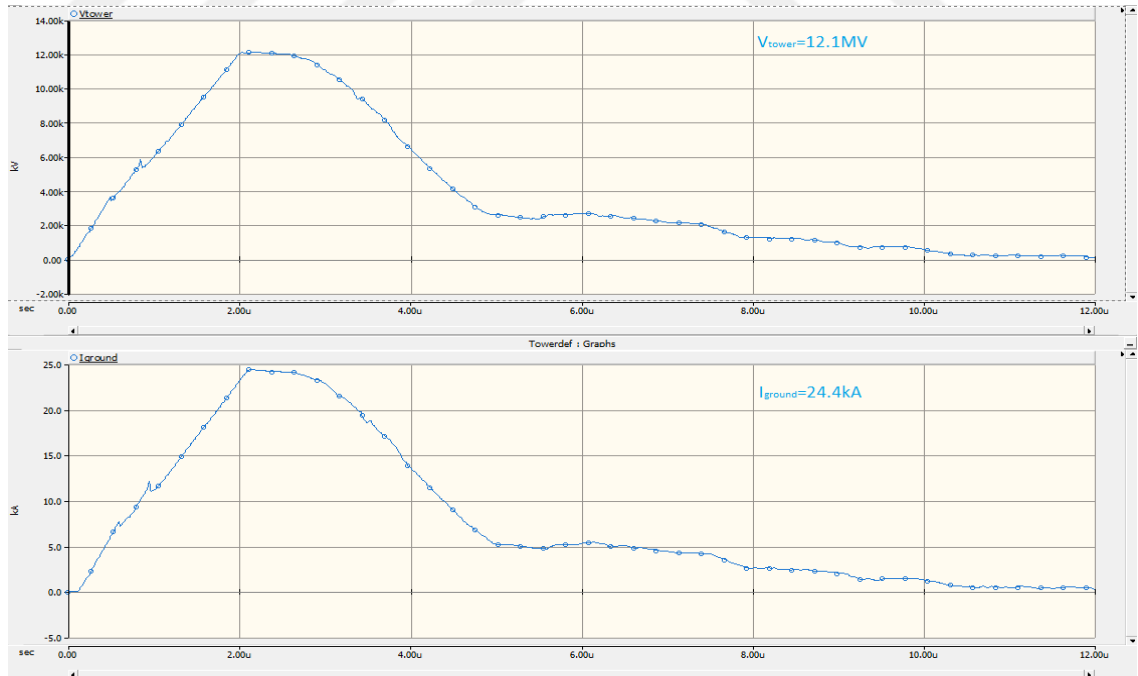
Şekil 4.3. Direk direnci 20 Ω olması halinde indüklenen gerilim ve akım

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 arasında akım bakımından karşılaştırma yapılması halinde 118kA civarında olan toprak akımı 37 kA değerine düşmektedir. Direnç yükseldikçe direk üzerindeki istenmeyen akım toprağa akmamak için direnç göstermektedir. Bu durumda direk üzerinde indüklenen gerilim miktarında artışlar gözlemlenmektedir.



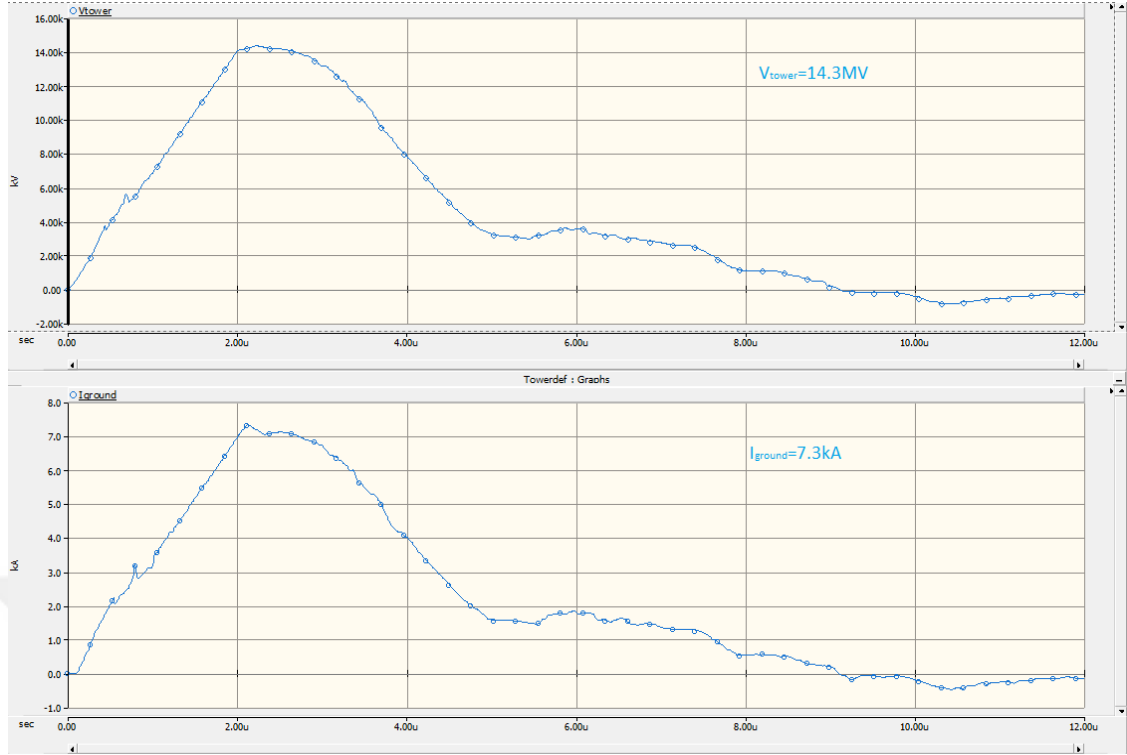
Şekil 4.4. Direk direnci 100 Ω olması halinde indüklenen gerilim ve akım

Şekil 4.4'ü incelediğimizde 100 Ω dirençte gözlenen durumda direk üzerinde indüklenen gerilim miktarındaki ani artış dikkat çekmektedir. Ani gerilim yükselmesi sonucu direk üzerinde 7.4MV gibi çok büyük gerilimler oluşmaktadır.



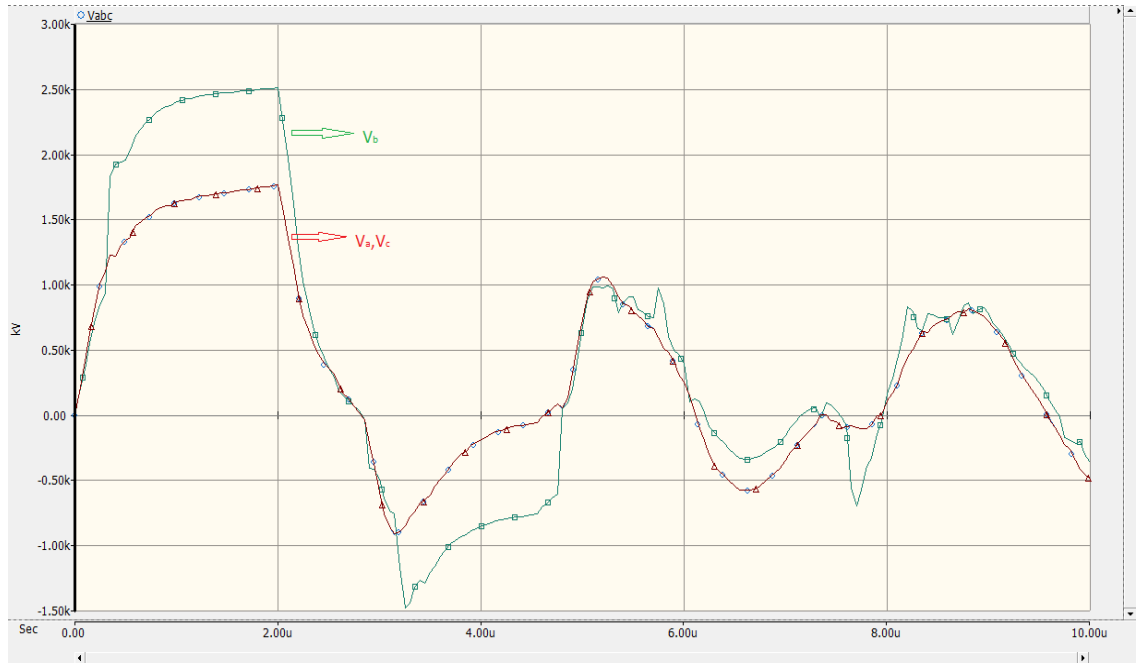
Şekil 4.5. Direk direnci 500 Ω olması halinde indüklenen gerilim ve akım

Şekil 4.5'de ise Gerilim 12.1 MV değerlerine ulaşmakta, akım değerleri ise 24.4kA değerine düşmektedir.



Şekil 4.6. Direk direnci 2000Ω olması halinde indüklenen gerilim ve akım

Direnç sınırlarını zorladığımızda 2000Ω değerinde 14,3MV mertebelerine kadar direk üzerinde gerilim değerleri zirve yapmaktadır.



Şekil 4.7. Direncin 1Ω olması durumunda fazlar arası gerilim karşılaştırması

Şekil 4.7’de A ve C fazların gerilim değerlerinin aynı olduğu, B fazda ise daha fazla gerilim indüklendiği görülmüştür. Bu durumun sebebi 2 koruma kulesine de aynı anda yıldırım düşmesi sonucudur. 2 kulenin de yıldırım yolu aynıdır. 2 si de B fazda daha fazla gerilim oluşmasına sebep vermektedir. Bu tezin genelinde B faz üzerinden (düz direklerde; aynı hizada bulunan 2 koruma kulesi ve bunların altında aynı hizada olan 3 faz) değerlendirmeler yapılacaktır. Bu durum, PSCAD ortamında yapılan hat tasarımının bize sağladığı avantajlardan biridir



Şekil 4.8. Direncin 2000Ω olması durumunda fazlar arası gerilim karşılaştırması

Şekil 4.1’den Şekil 4.6’ya kadar olan kısımda artan gerilim ve azalan akım bilgileri ayrıntılı şekilde gözlemlenmektedir. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’den de görüleceği üzere B fazdaki dalgalanma daha uzun sürmektedir. Bu kısımda çıkarılacak sonuç en temelde yıldırımın oluşturduğu EMA kaynaklı gerilimler direk üzerindeki direnç noktalarına göre indüklenmektedir. Başka bir deyişle direnç miktarındaki artış ile gerilim miktarındaki artış arasında doğrusal bir bağ vardır. Direnç arttıkça hatta, direkte ve izolatörlerde indüklenen gerilim artmaktadır. Direğin kendi yapısından kaynaklanan direnci dışında toprak geçiş direnci 1Ω iken indüklenen gerilim ile direncin 2000Ω olması arasındaki artış rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. Yıldırım değeri sabit alındığında 1Ω ’da A fazda 1.7MV gerilim okunurken bu durum 2000Ω ’a geldiğinde 14.3MV mertebelerine çıkmaktadır. Atlamaların kaçınılmaz olduğu durumlar sıklıkla gözlemlenmektedir.

4.2. İzolatör ve Toprak Direnci arasındaki Bağlantının Değerlendirilmesi

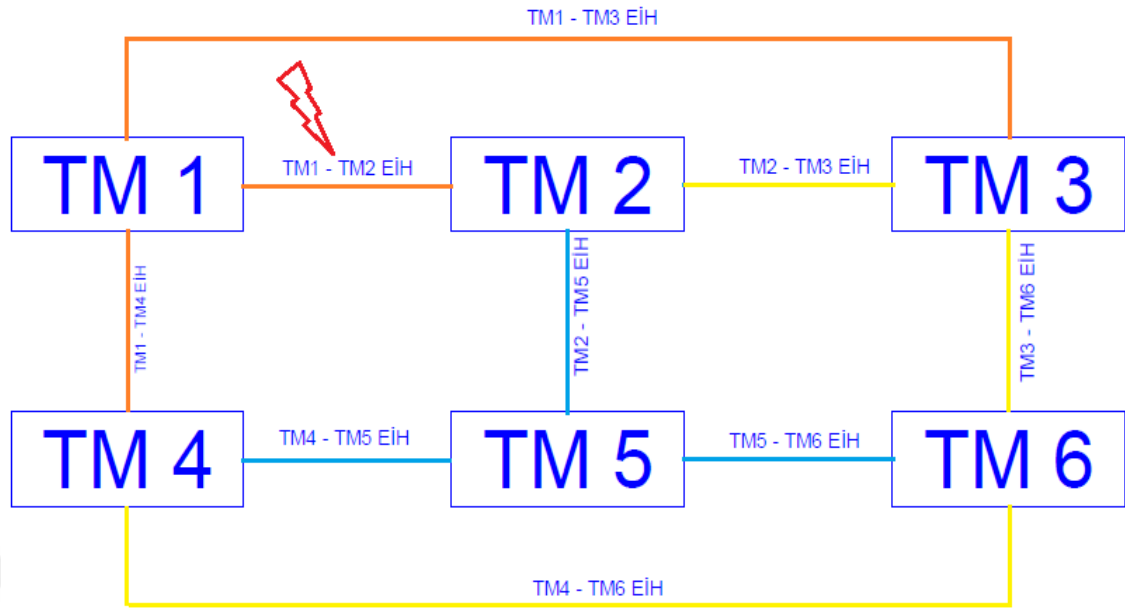
Bölüm 4.1’de görüldüğü üzere yıldırım şiddeti sabit kaldığı halde direk ayak toprak direncinde yapılan değişiklikler sonucu hem direğin kulesinde ve gövdesinde hem de fazlarda oluşan gerilim artışı tespit edilmiştir. Bu gerilim artışına istinaden

karşılaşılan temel sorun, fazlarda oluşacak istenmeyen gerilim ve kesintilerdir. Bu gerilim dalgalanmaları fazlar arasında faz farkı oluşturarak geçici arızaya sebep olmaktadır. Yine bu istenmeyen ani gerilim artışları sonucunda izolatörün yalıtkanlığı delinmekte, atlama ihlalleri görülmekte ve üzerinden akım akmaktadır. Akan bu akım sonucu izolatörler hasar almakta, yanma ve patlamalar görülmektedir. Bunun sonucu olarak kalıcı arızalar meydana gelmektedir. Topografyanın durumu da göz önüne alındığında arızaya müdahale süreleri oldukça uzun olmaktadır.

Bu noktada geçici arıza denen durum açıklandığında; hattaki gerilim dalgalanmaları sonucu oluşacak fazlar arası gerilim farkından dolayı hatta ait gerilim trafosundan alınan gerilim bilgisiyle röle faz uyuşmazlığını tespit ederek kesiciye açma sinyali gönderecektir. Bunun sonucunda hat açma yapacaktır. Koruma felsefesine göre birkaç ms sonra hat otomatik tekrar kapama yapacaktır. Gerilim dalgalanmaları kesileceği için hat kapalı kalacak yani enerji akışı devam edecektir. Kalıcı arızada ise röle faz farklarını okuduktan sonra açma yapacak tekrar hat bilgisini okuduğu anda tekrar kapama yapacak fakat faz farkı devam ediyorsa kesici açmaya gidecektir. Bu durum ya harmoniklerin devam ettiği anlamına gelecek ya da hattın her hangi bir noktasında fazlardan biri veya bir kaçından gerilim bilgisinin gelmediği anlamına gelecektir. Bu durumda kesici açma yapacak ve otomatik tekrar kapama konumundan çıkacaktır. Sonuç olarak enerji akışı tamamen kesilmiş olacaktır.

Kalıcı arıza halinde izolatör ya da iletkenin zarar gördüğü, koptuğu ya da lif atıklarından dolayı fazlar arası kısa devre olduğu durumlardır. Kalıcı arıza izolatördeyse, yani izolatörün değişimi gerekli ise, ortalama bir fazda izolatör değişim süresi iletken kopması ya da iletkenin düşmesi söz konusu değilse 2 saattir. İletken kopması halinde ya da izolatörün tamamen dağılıp iletkenin konsola ya da yere düşmesi durumu varsa; bu arızanın giderilmesi çok fazla değişkene bağlı olsa da (direğin konumu, hava şartları, bakım ekibi performansı vb) yaklaşık olarak 8 saat civarındadır.

Enterkonnekte sistemin avantajı olarak TM'ler genellikle birden fazla noktada birbirine bağlanmakta ve genel felsefe üçgenleme mantığı ile çalışılmaktadır. Üçgenleme tabiri ise Şekil 4.9'un üst kısmında bulunan 3 TM ele alınır ve alttaki TM'ler ile bağlantısının olmadığı düşünülürse; TM1, TM2 ve TM3 gibi üç TM'nin birbirlerine bağlantısının üçgen şeklinde olması demektir. Bağlantılardan biri koptuğunda enerji akışı diğeri üzerinden sağlanacaktır. Aynı ili veya ilçeyi beslenen TM'ye giren hat sayısı birden fazla olduğu için kalıcı kesintiler eskisi kadar sıklıkla yaşanmamaktadır. Şekil 4.9'dan da görüleceği üzere TM1-TM2 arasında arıza olması halinde TM1, TM3 ve TM4 üzerinden, TM2 ise TM3 ve TM5 üzerinden kesinti olmaksızın beslenebilmektedir. Bu şekilde sistematik bir bağlantımız olması halinde bile enerji kesintisiyle sonuçlanan arızalar meydana gelebilmektedir.

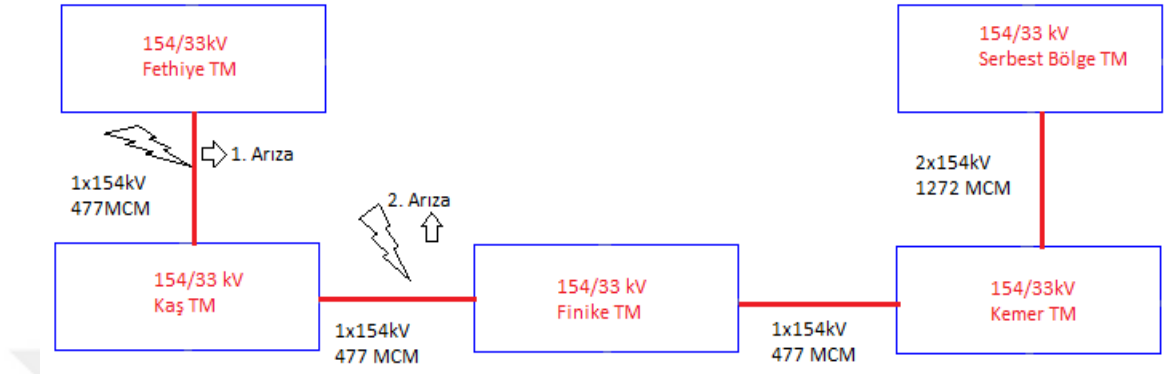


Şekil 4.9. Örnek TM enterkonnekte bağlantısı ve arıza hali

Ayrıca unutulmamalıdır ki ülkemizde hem OG hem de YG sistemde halen daha tek hat ya da tek transformatör ile beslenen çok fazla yerleşim bulunmaktadır. Tek hat ile bir noktadan beslenen transformatör merkezi var ise güç transformatörleri beslenemediği için servis harici olacak ve bundan kaynaklı OG dağıtım hatları da enerjisiz kalacaktır. Şekil 4.9’da gösterilen bir şebekemiz olması halinde bile arızalar meydana gelebilmektedir. 154kV sistemde kullanılan en yüksek kesitli iletken 1272 MCM Pheasant iletkenin akım taşıma kapasitesi en iyi ortam şartlarında 1300 A iken yaz dönemi koşullarında en fazla 1000 A’dır. Bu noktayı örneklemek gerekirse yüksek güç tüketimi olan TM’yi besleyen 3 adet EİH olsun. Bunların ikisinin iletken kesiti 1272 bir diğeri 795 MCM olsun. Yenileme veya onarım kapsamında 1272MCM hatlardan birinin devre dışı olduğunu ve bu esnada kalan 2 hattın birinin arızadan açtığı varsayalım. Bu noktada bütün yük tek hat üzerine kalacaktır. Bu tek 795 MCM kesitindeki hat aşırı akımdan açma yapacak ve beslenen noktada kalıcı kesinti meydana gelecektir. 760 A akım taşıma kapasitesine sahip 795MCM kesitli hattın yükü dışında üretim kaynağının TM1 üzerinden olduğu öngörülürse diğer 5 TM için de aynı durum söz konusu olacaktır. Tüm yükü 9 hat çekerken önce 6’ya oradan 3 hatta oradan da 0 hatta inecek ve bütün sistemde çökme meydana gelecektir. Bu durumda sistem çökmesi (black out), inkitaya sebep olan mantık domino etkisidir. 31 Mart 2015 tarihinde bütün ülkeyi etkileyen kesintinin temel mantığı da bu domino etkisidir. Bu duruma benzer senaryolar sadece ülkemizde değil dünyanın birçok noktasında yaşanmaktadır.

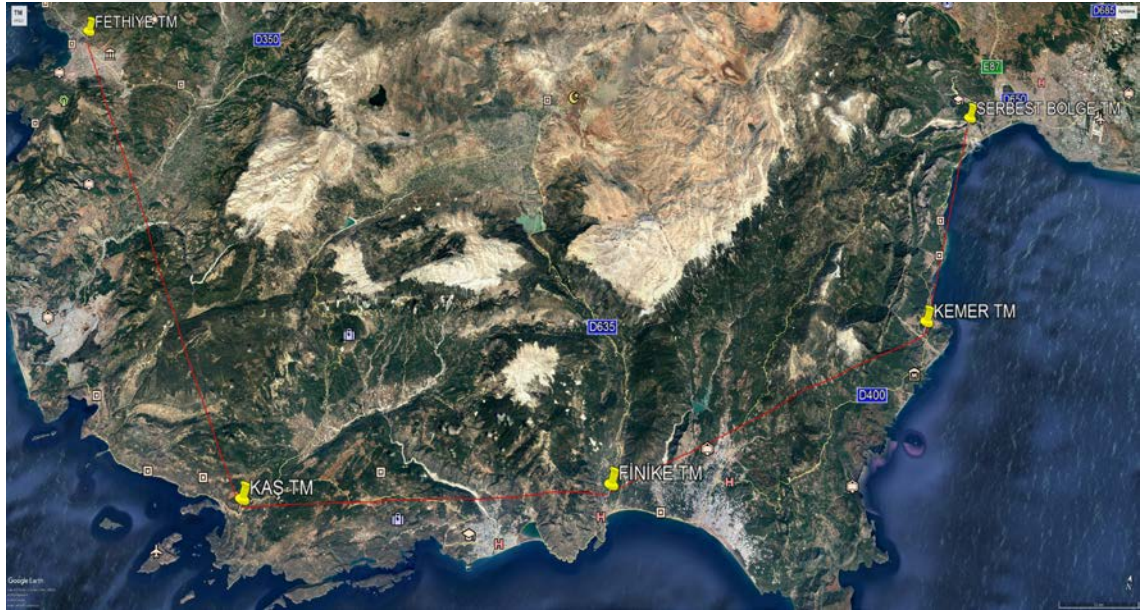
Yıldırım kaynaklı arızalarda tek noktada hava şartları kötü değildir. Antalya bölgesi gibi dağların kıyıya paralel uzandığı coğrafyalarda hattın tesisi de mecburen bu istikamette dağlara paralel olacağı için enerji iletim hatları birden fazla noktada kötü hava koşullarına maruz kalacaktır. Aynı anda birden fazla noktada arıza olabileceği gibi

zaman farklı arızalar da meydana gelmektedir. Bu durumu basit bir örnekle açıklanacak olursa; Şekil 4.10'da 154/33kV Kaş TM, 154/33kV Fethiye TM ve 154/33kV Finike TM üzerinden beslenmekte olup harici bir enerji üretim veya santral, baraj vb. kaynağı bulunmamaktadır.



Şekil 4.10. Antalya bölgesi arıza örneği

154kV Kaş - Fethiye E.İ.Hattının yıldırımdan dolayı açtığı varsayılın. Bölgedeki hâkim rüzgâr yönü genellikle batıdan doğuya doğrudur. Yıldırım bulutları önce Fethiye istikametinden başlayarak Kaş'a oradan da Finike istikametine hareket edecektir. Şekil 4.11'de hat ve rüzgâr yolu görülmektedir.



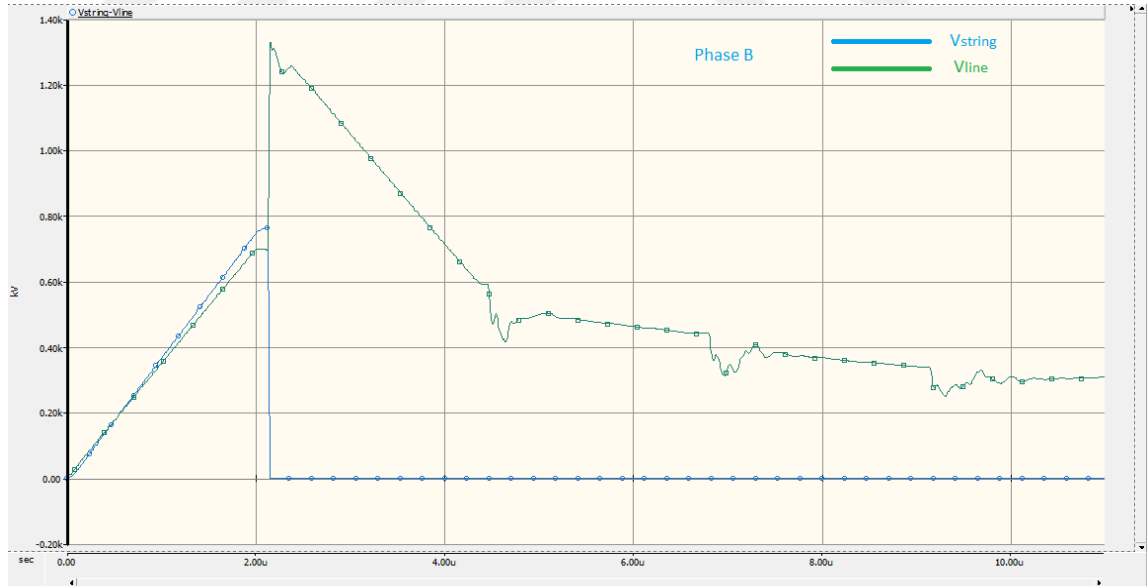
Şekil 4.11. Antalya ili arıza görseli

Bu esnada 154kV Kaş Fethiye EİH "X" no'lu direğinde B fazda kalıcı arıza oluştuğunu, iletkenin orta konsola düştüğü kabul edilsin. Bu arızaya, arıza ekiplerinin ulaşım sorunu giderip enerji altına almaları yaklaşık 8 saat sürsün. Bu esnada saatte hızı 60km olan rüzgâr bulutları 1 saat yol aldırın ve Kaş - Finike arasında bulunan "Y" no'lu direğe yıldırım düştüğü varsayılın. Y no'lu direkte de benzer arıza meydana gelsin. Her hatta

ya da her TM'ye arıza bakım ekibi koyma şansı bulunmadığı için en az 7 saatlik süreyle Kaş TM de kalıcı kesinti yaşanacak ve Kaş TM'den beslenen tüm köy ve mahalleler elektriksiz kalacaktır. Bu noktada dağıtım şirketi Kaş TM'den beslenen noktaları Finike TM'nin OG çıkışı üzerinden beslemeyi denerse 200 MVA kurulu gücü olan Finike TM'nin güç transformatörleri çekilen aşırı akımdan servis harici kalacaktır. Kemer TM'den Fethiye'ye kadar kalan kısımda elektrik olmayacaktır. Bu tür senaryolar oldukça sık yaşanmaktadır. Böylesi durumların önüne geçmek için enterkonnekte sistemin güçlenmesi ve hat sayısının artırılması gibi çok yüksek maliyetli çözümler dışında kalan çözüm önerisi olarak bu çalışma devreye girmektedir. İzolatör boyu ile direk ayak toprak direnci arasındaki bağıntı doğru değerlendirildiği takdirde bu arızaların birçoğunun önüne geçilebilecektir. PSCAD programı yardımıyla farklı izolatör boyu ve farklı yıldırım şiddetleri girilerek yapılan değerlendirmeler aşağıda bulunmaktadır.

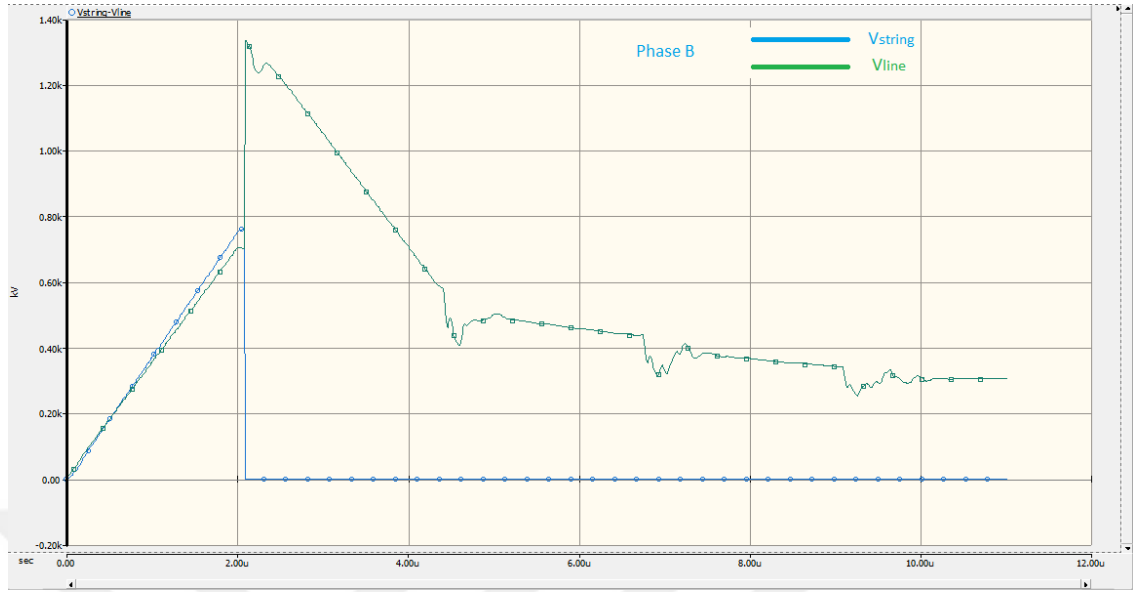
4.2.1. İzolatör boyu 1460mm ve yıldırım akım değeri 10-100kA olması durumu

İzolatör boyu 1460mm ve yıldırım 10-100kA olması durumunda değişken toprak dirençlerine göre atlama durum değerlendirmesi yapılırken koruma teline yıldırım düşmesi durumunda en fazla gerilim indüklenmesinin ortada kalan B fazda yaşandığı tespit edilmiştir. Bundan dolayı tüm grafiklerde B faz üzerinden atlama gerilimleri hesaplanmıştır. Yine direğin ayak topraklama değerleri de baz alınırken gerilimlerin tamamı B faz üzerinden hesaplanmıştır. Sonuç olarak gerilimin en fazla tahrik edildiği nokta atlamanın ilk yaşanacağı noktadır.



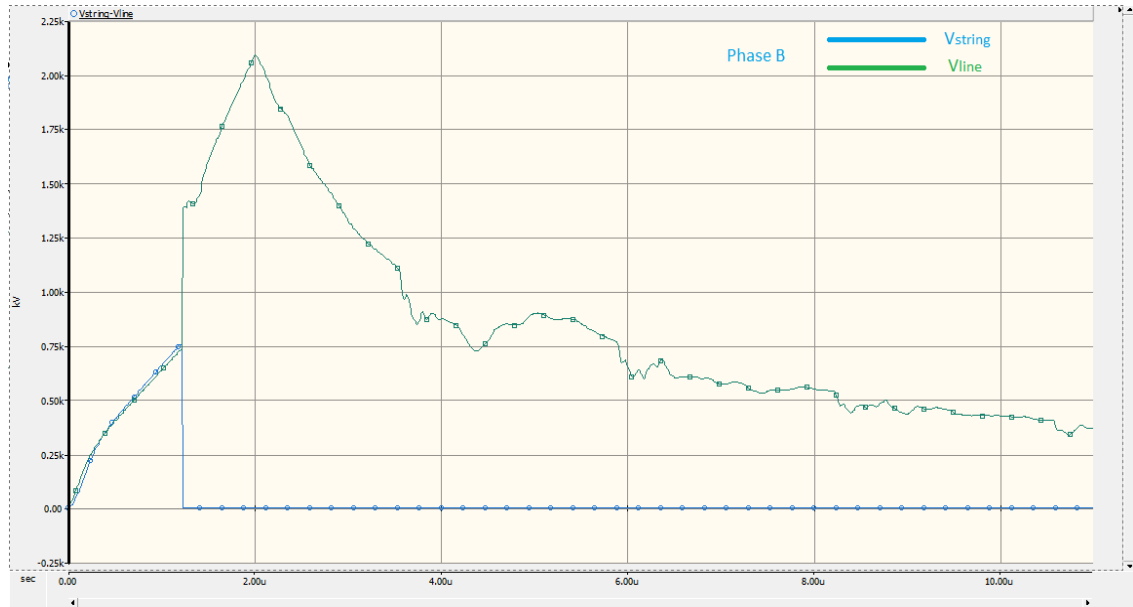
Şekil 4.12. Yıldırım şiddeti 10kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.12’de görüldüğü üzere 10kA yıldırım şiddetinde 357Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 700kV pik gerilim 1300kV olmuştur.



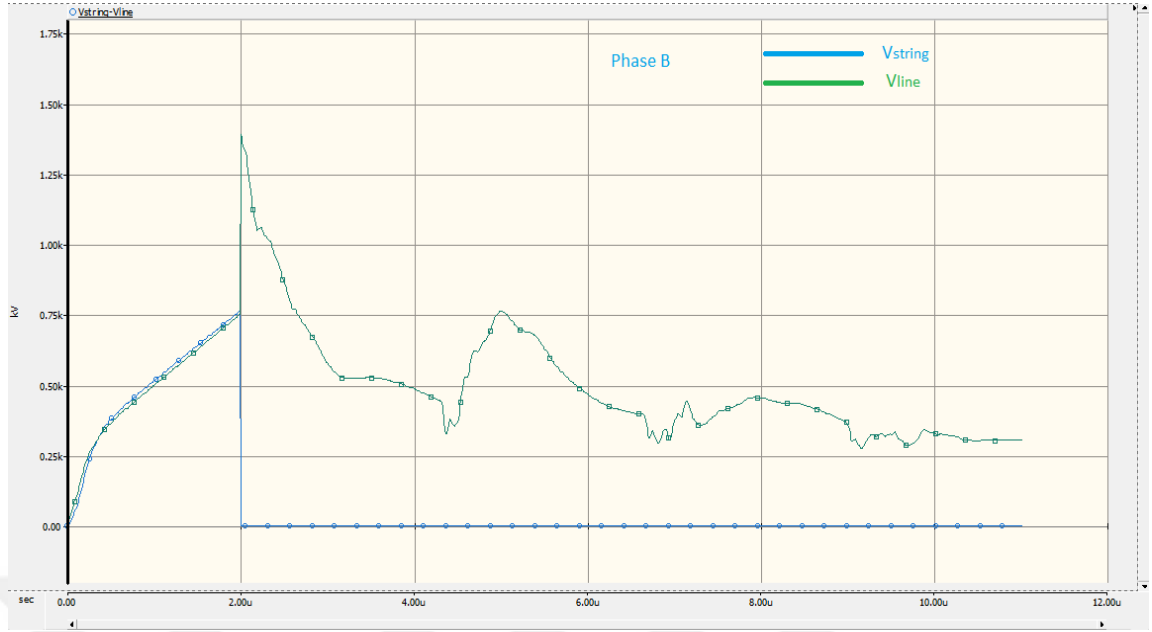
Şekil 4.13. Yıldırım şiddeti 20kA’de atlamanın olduğu direnç ve gerilim

Şekil 4.13’de görüldüğü üzere 20kA yıldırım şiddetinde 74 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 710kV pik gerilim 1350kV olmuştur. Yıldırım şiddeti arttıkça gerilim de artmaktadır.



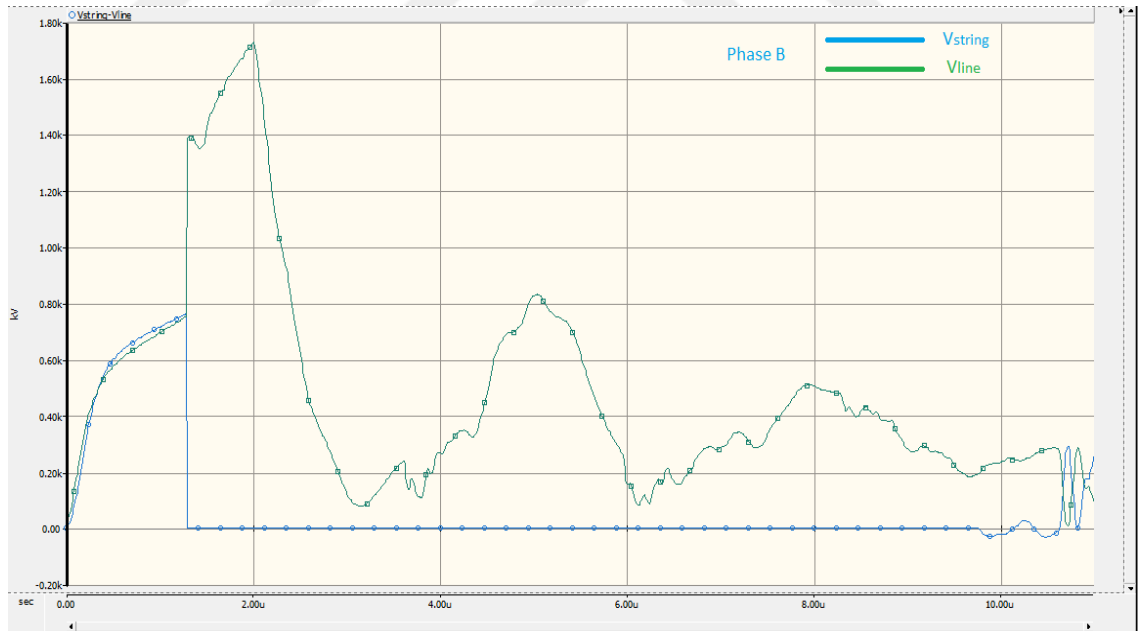
Şekil 4.14. Yıldırım şiddeti 30kA’de atlamanın olduğu direnç ve gerilim

Şekil 4.14’de görüldüğü üzere 30kA yıldırım şiddetinde 74 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilim 750kV pik gerilim 1370kV olmuştur. Gerilim artışı devam etmektedir.



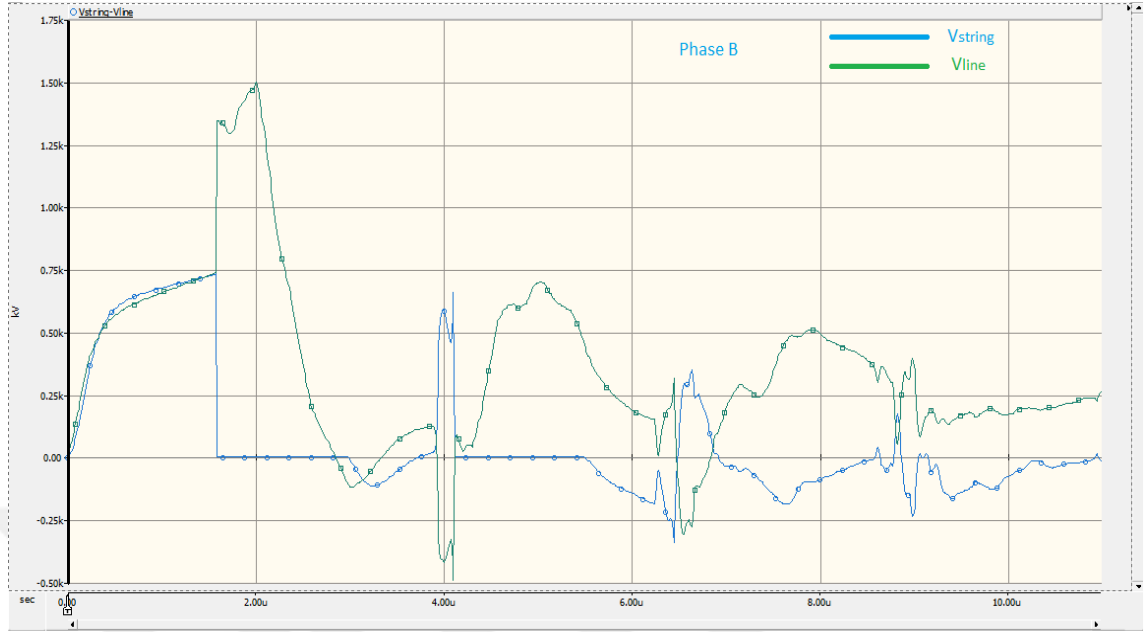
Şekil 4.15. Yıldırım şiddeti 40kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.15’de görüldüğü üzere 40kA yıldırım şiddetinde 13Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 740kV pik gerilim 1700kV olmuştur. Atlamanın yaşandığı direnç değeri düşmüştür.



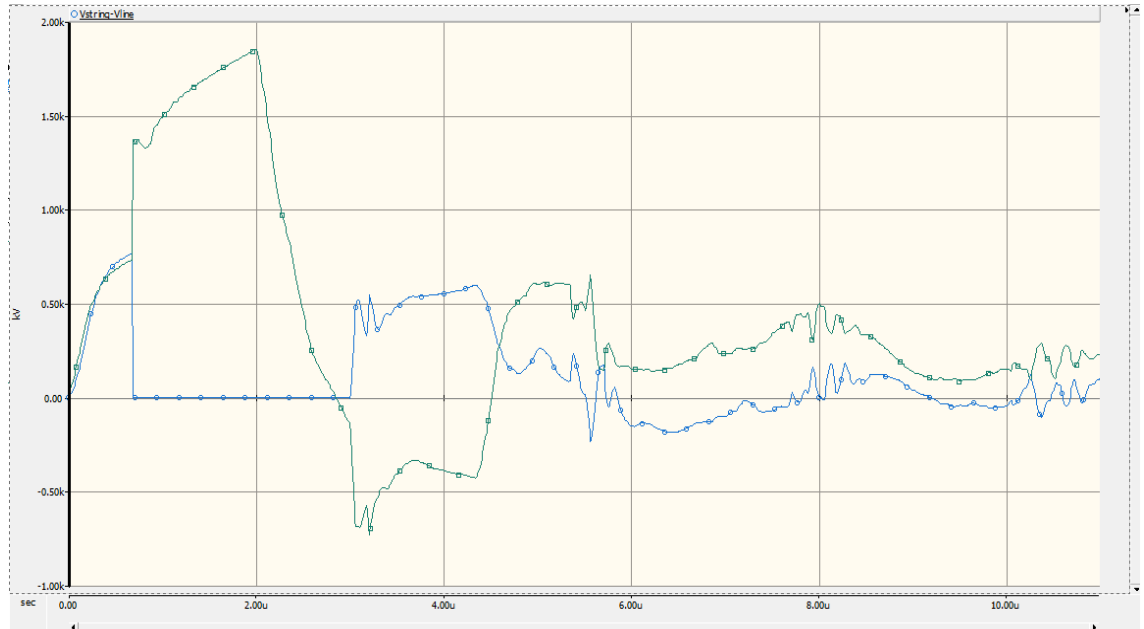
Şekil 4.16. Yıldırım şiddeti 50kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.16’da görüldüğü üzere 50kA yıldırım şiddetinde 7Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1710kV olmuştur. Gerilim artmış, direnç düşmüştür.



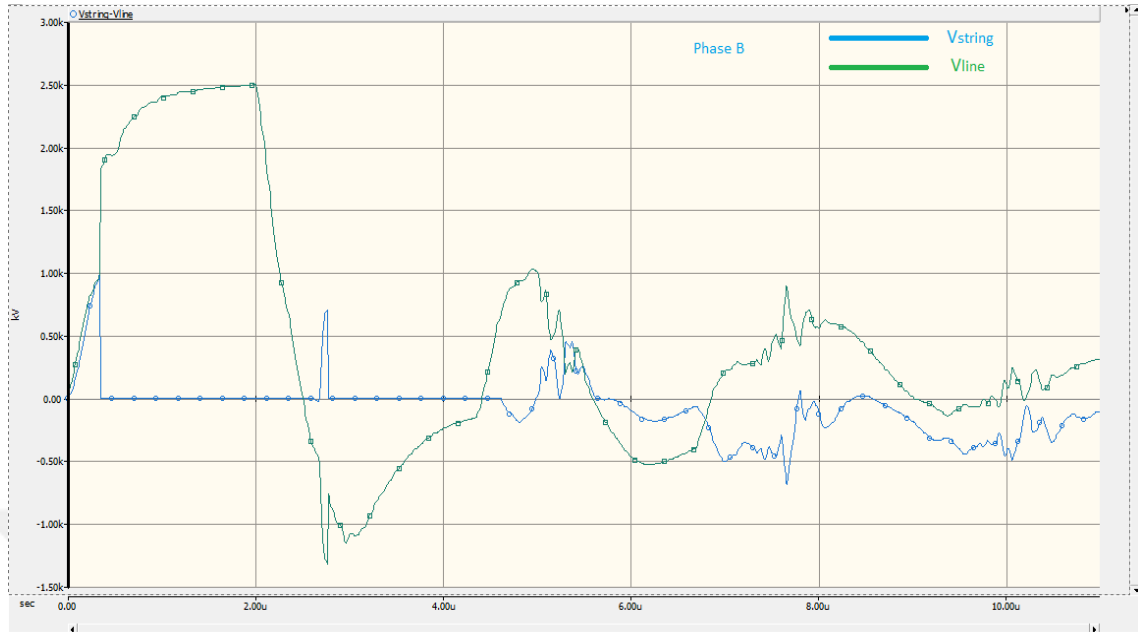
Şekil 4.17. Yıldırım şiddeti 60kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.17’de görüldüğü üzere 60kA yıldırım şiddetinde 1 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1300kV olmuştur.



Şekil 4.18. Yıldırım şiddeti 75 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.18’de görüldüğü üzere 75kA yıldırım şiddetinde 1 Ω ’da açma gözlenmiş ve pik gerilimi 1825kV olmuştur.



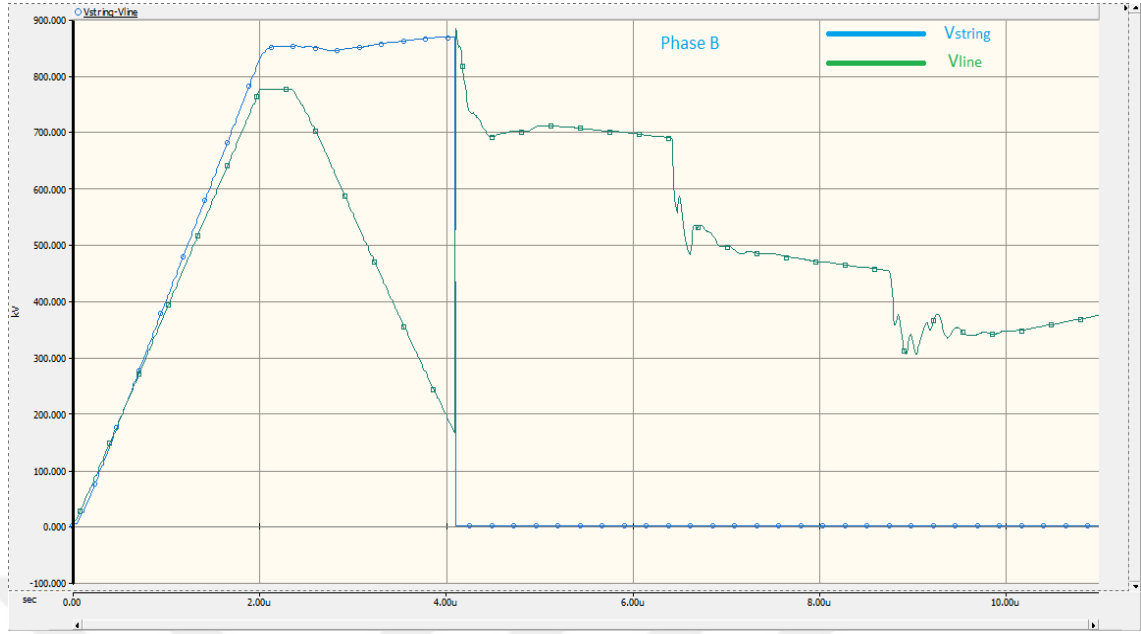
Şekil 4.19. Yıldırım şiddeti 100kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.19’da görüldüğü üzere 100kA yıldırım şiddetinde 1 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 2500kV olmuştur.

İzolatör boyunun 1460 mm olması durumunda 60kA’lık bir yıldırım düşmesi halinde direk ayak direnci 1 Ω olsa bile hatta açma meydana gelmektedir. Ayrıca ülkemiz 154kV sisteminde bir dönem 1660 mm izolatör yerine bu tip 1460mm kompozit izolatörler kullanılmıştır. Bu tip izolatörlerin kullanıldığı bölgelerde hattın direklerinin ayak dirençleri düşük dahi olsa da; hatlar yıldırıma karşı tamamen savunmasız bir hale gelmektedir. TEİAŞ Genel Müdürlüğü anahtar teslim sözleşmelerinde direk ayak eşdeğer direncinin 20 Ω olması zorunluluğu göz önüne alındığında 35kA’lık yıldırım düşmesi halinde hatta atlama ve açmalar meydana gelecektir. Bununla birlikte 40kA’lık bir yıldırım düşmesi halinde 13 Ω ’un altında bir değerde topraklama direnci olmalıdır ki açma meydana gelmesin. Bu bilgiler ışığında 154kV sistemlerde 1460mm boyutunda izolatörlerin kesinlikle kullanılmaması gerekmektedir.

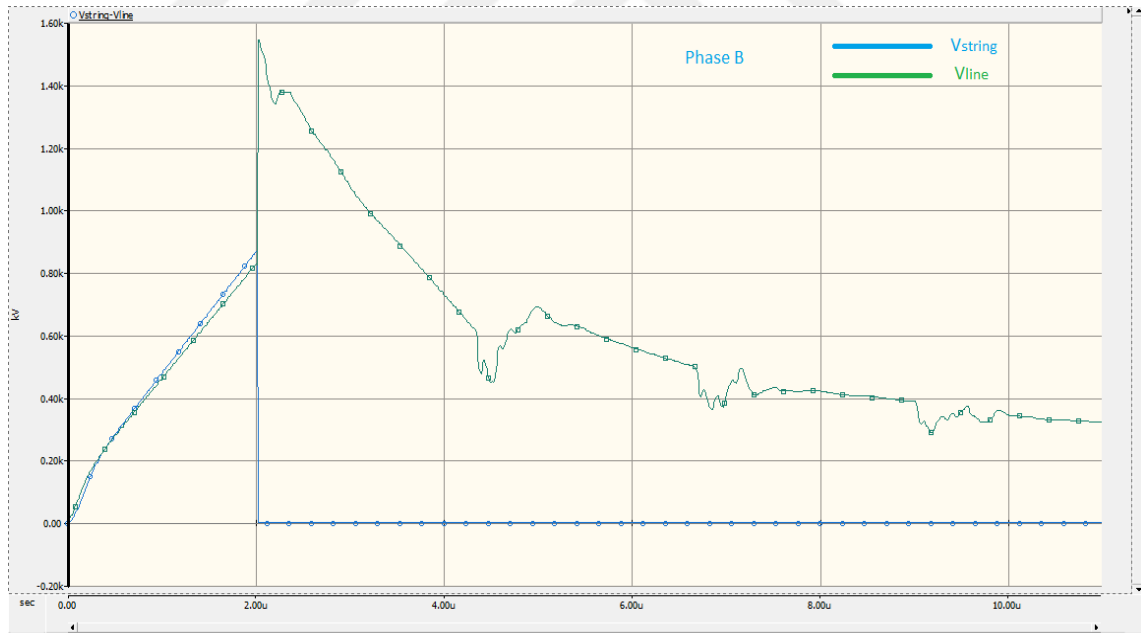
4.2.2. İzolatör boyu 1660mm ve yıldırım akım değeri 10-100kA olması durumu

Ülkemiz standartlarında günümüzde 154kV iletim hatlarının tamamı kompozit izolatör kullanılması halinde 1660mm’lik izolatörler kullanılmaktadır. Bu durum ışığında simulasyon yapıldığında;



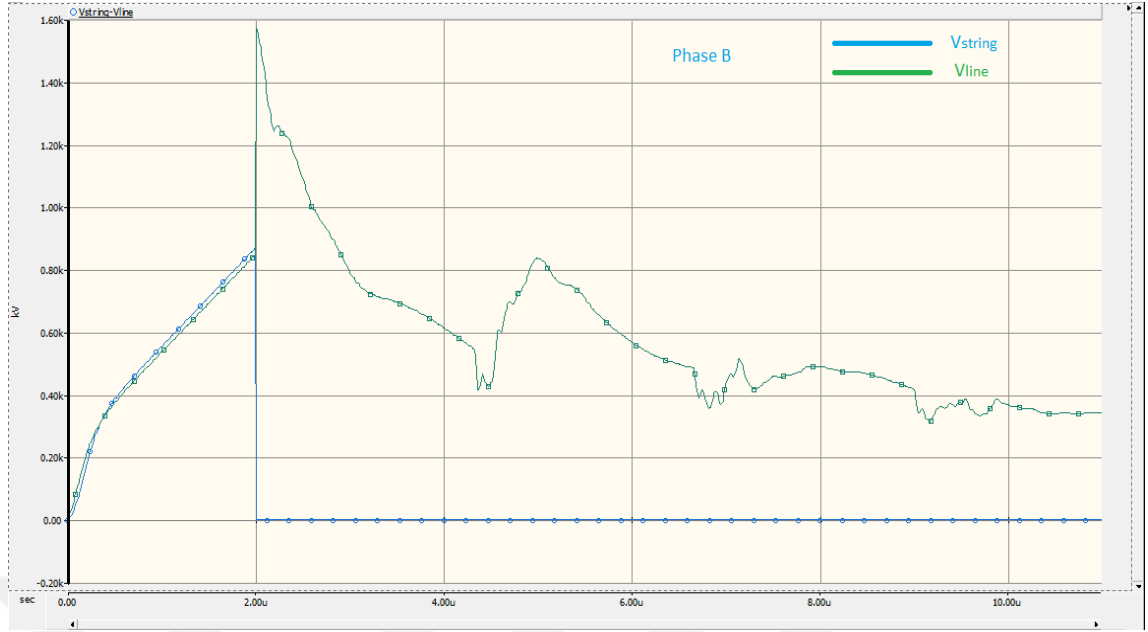
Şekil 4.20. Yıldırım şiddeti 10kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.20’de görüldüğü üzere 10kA yıldırım şiddetinde 525Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 850kV olmuştur.



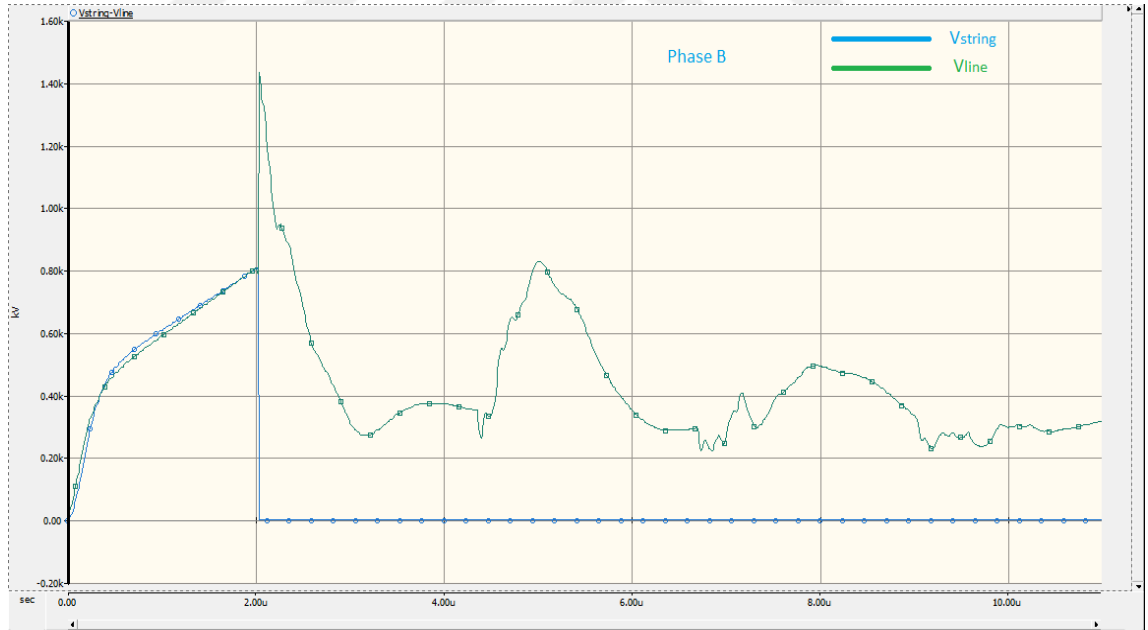
Şekil 4.21. Yıldırım şiddeti 20kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.21’de görüldüğü üzere 20kA yıldırım şiddetinde 120Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 870kV pik gerilim 1550kV olmuştur.



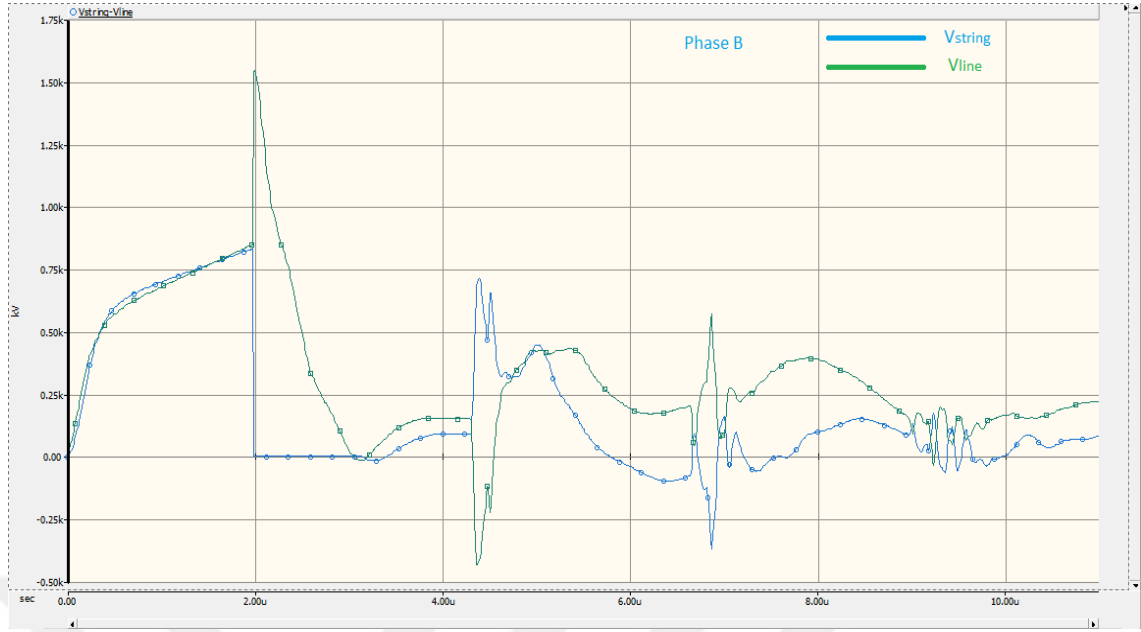
Şekil 4.22. Yıldırım şiddeti 30kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.22’de görüldüğü üzere 30kA yıldırım şiddetinde 95 ohm’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 880kV pik gerilim 1550kV olmuştur.



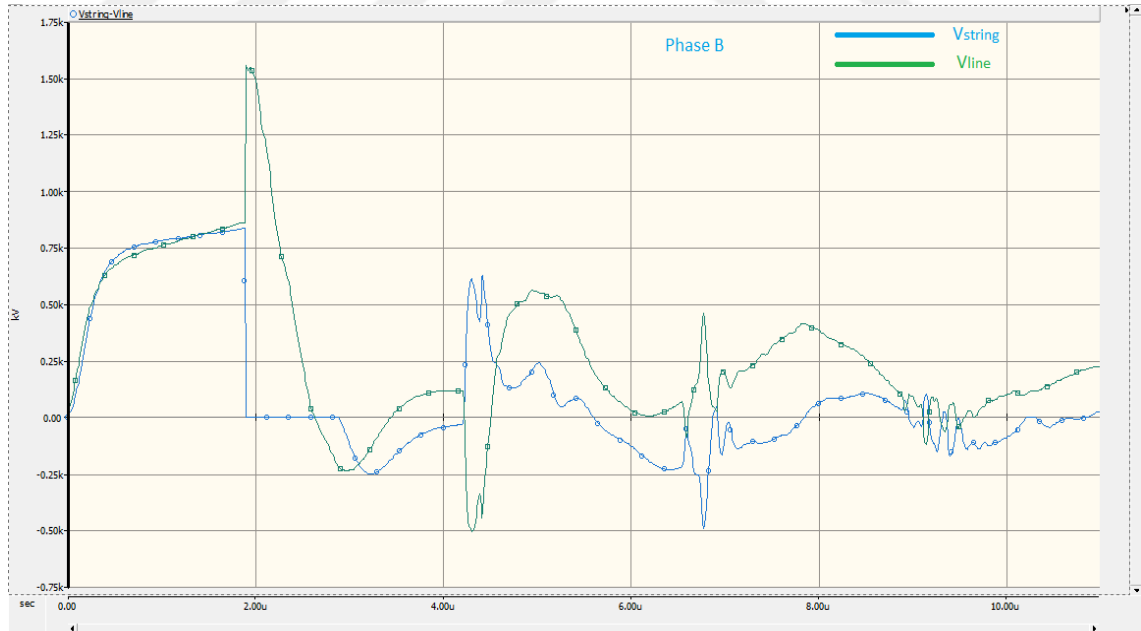
Şekil 4.23. Yıldırım şiddeti 40kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.23’de görüldüğü üzere 40kA yıldırım şiddetinde 19 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 840kV pik gerilimi 1500kV olmuştur.



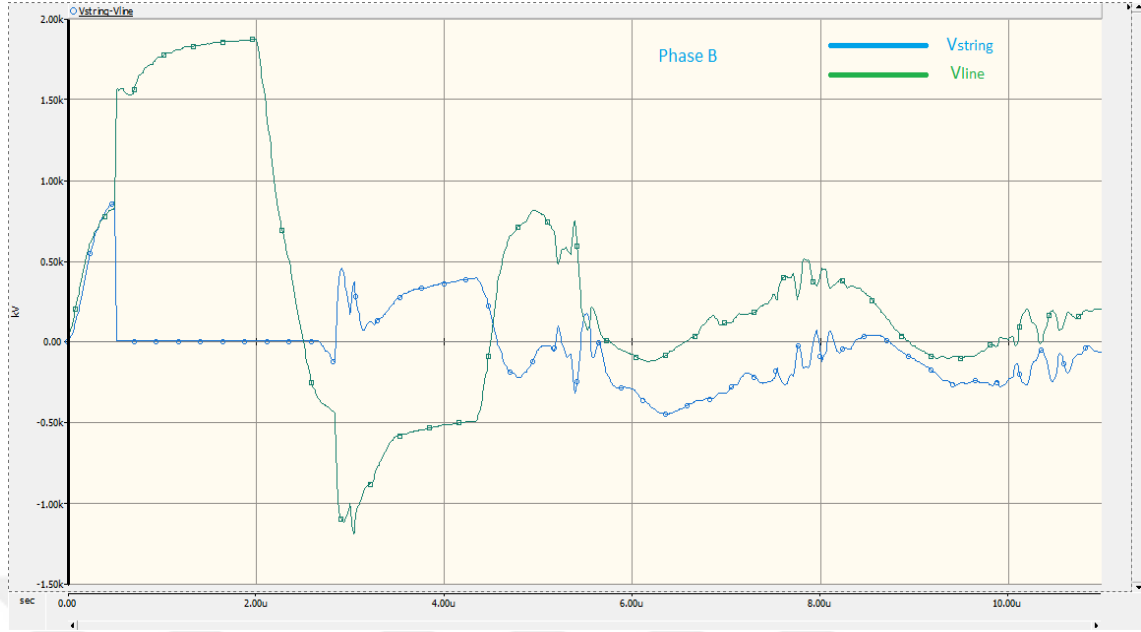
Şekil 4.24. Yıldırım şiddeti 50kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.24’de görüldüğü üzere 50kA yıldırım şiddetinde 11 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 870kV pik gerilim 1550kV olmuştur.



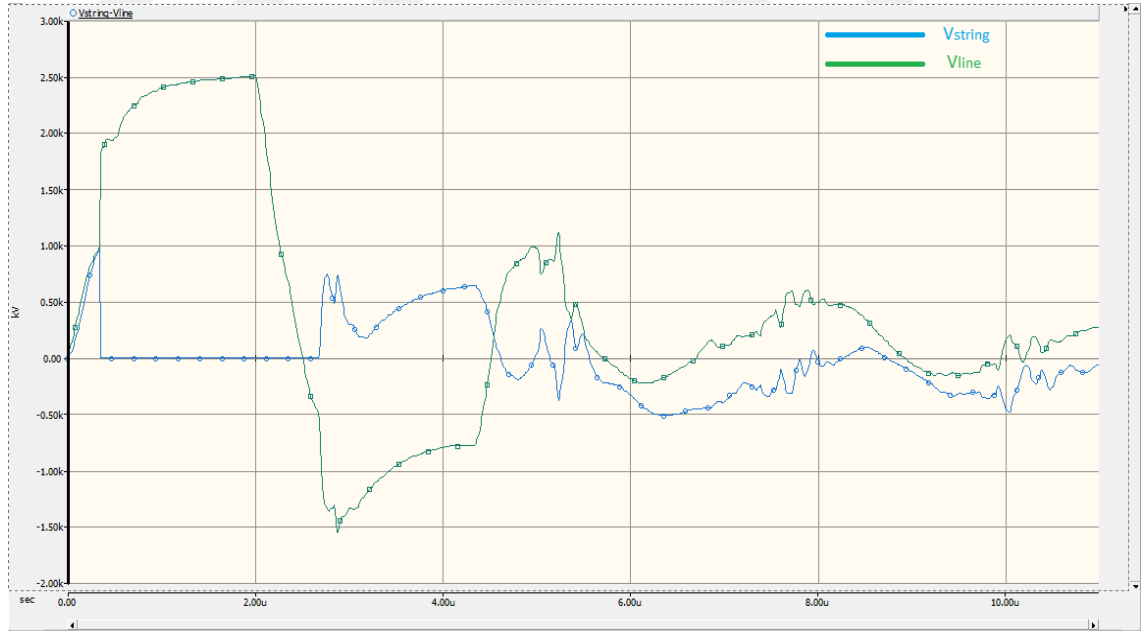
Şekil 4.25. Yıldırım şiddeti 60kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.25’de görüldüğü üzere 60kA yıldırım şiddetinde 5 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 880kV pik gerilim 1590kV olmuştur.



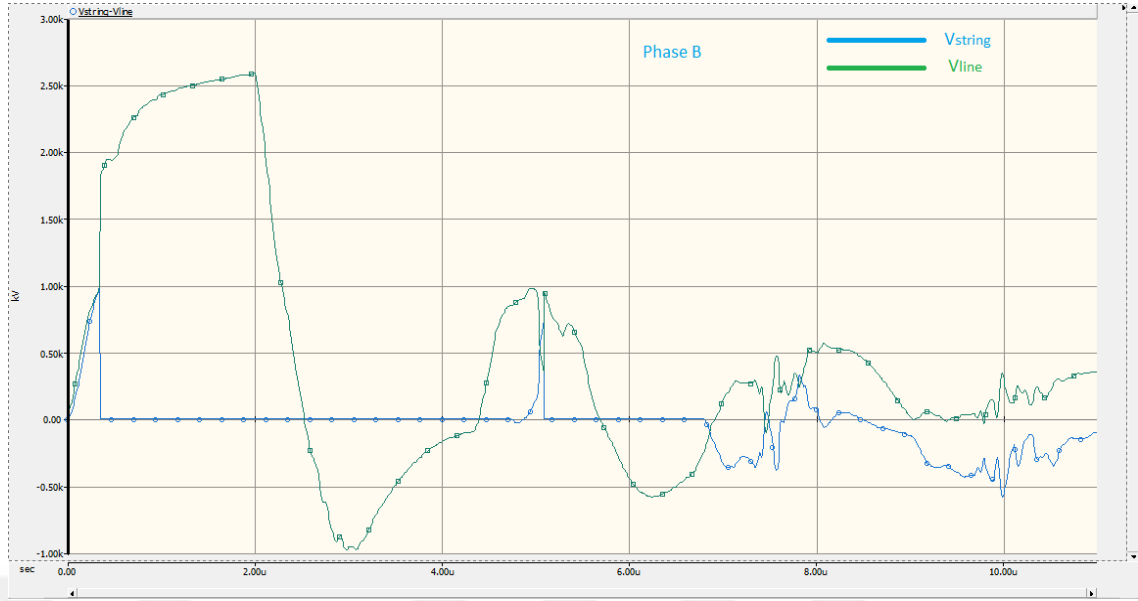
Şekil 4.26. Yıldırım şiddeti 75 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.26’da görüldüğü üzere 75kA yıldırım şiddetinde 1 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 900kV pik gerilim 1800kV olmuştur.



Şekil 4.27. Yıldırım şiddeti 100kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.27’de görüldüğü üzere 100kA yıldırım şiddetinde 1 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 970kV pik gerilim 2620kV olmuştur.

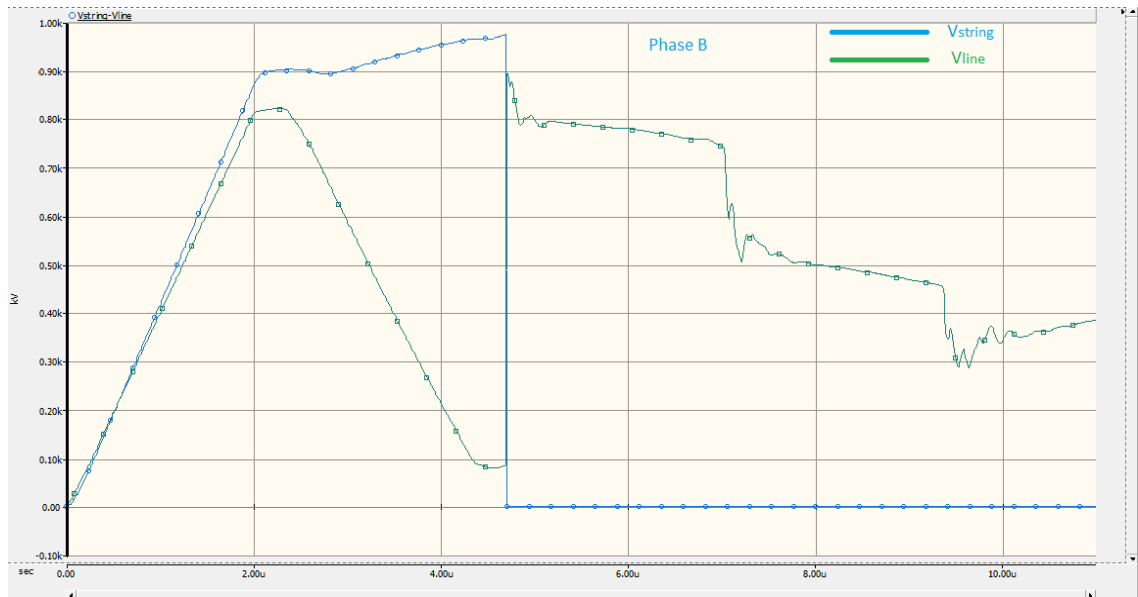


Şekil 4.28. Yıldırım şiddeti 100kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.28’de görüldüğü üzere 100kA yıldırım şiddetinde 2Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1MV pik gerilim 2620kV olmuştur.

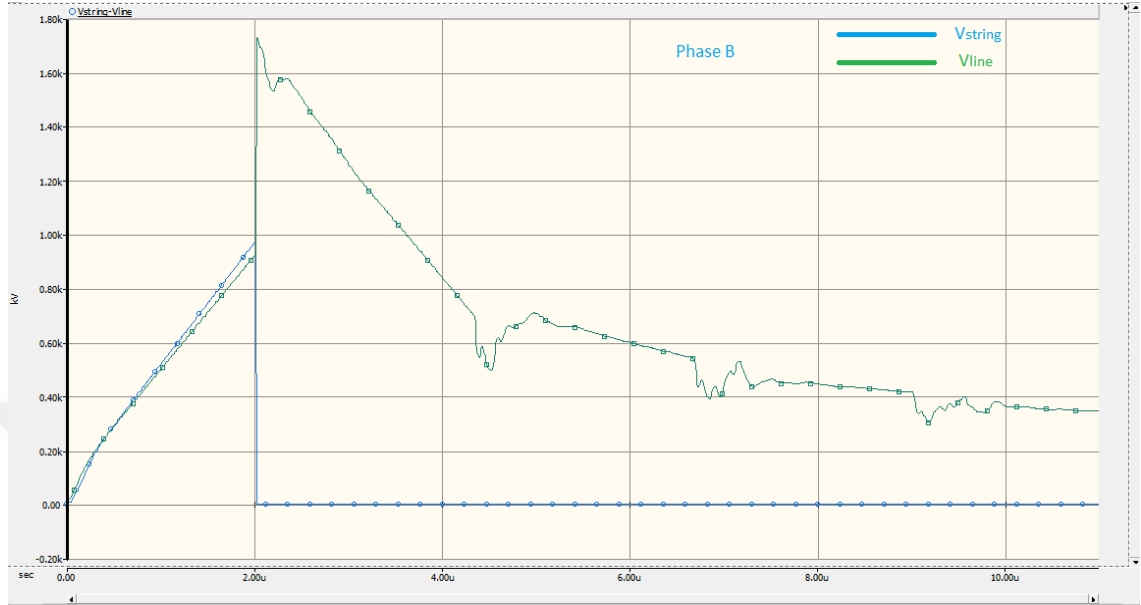
1660mm izolator kullanımı elbette ki 1460 mm izolatöre göre iyi olmakla birlikte yıldırım dayanımı açısından 40kA ve üzeri yıldırım alan noktalarda zayıflık oluşturmaktadır. Bu noktalarda ya izolator boyunda değişikliğe gidilmeli ya da topraklama dirençlerinde iyileştirmeye ağırlık verilmelidir. Bu durumların düzeltilmemesi halinde ilave topraklama yöntemlerine ya da aktif parafudr gibi çözümlere ağırlık verilebilir.

4.2.3. İzolator boyu 1860mm ve yıldırım akım değeri 10-100kA olması durumu



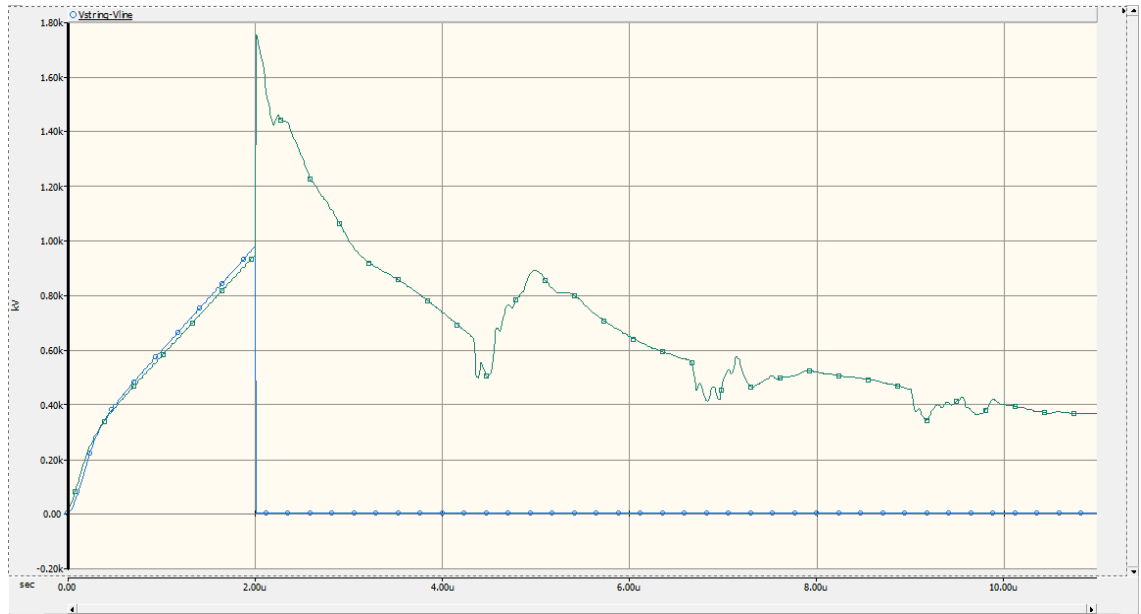
Şekil 4.29. Yıldırım şiddeti 10kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.29’da görüldüğü üzere 10kA yıldırım şiddetinde 664 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 900kV pik gerilim 990kV olmuştur.



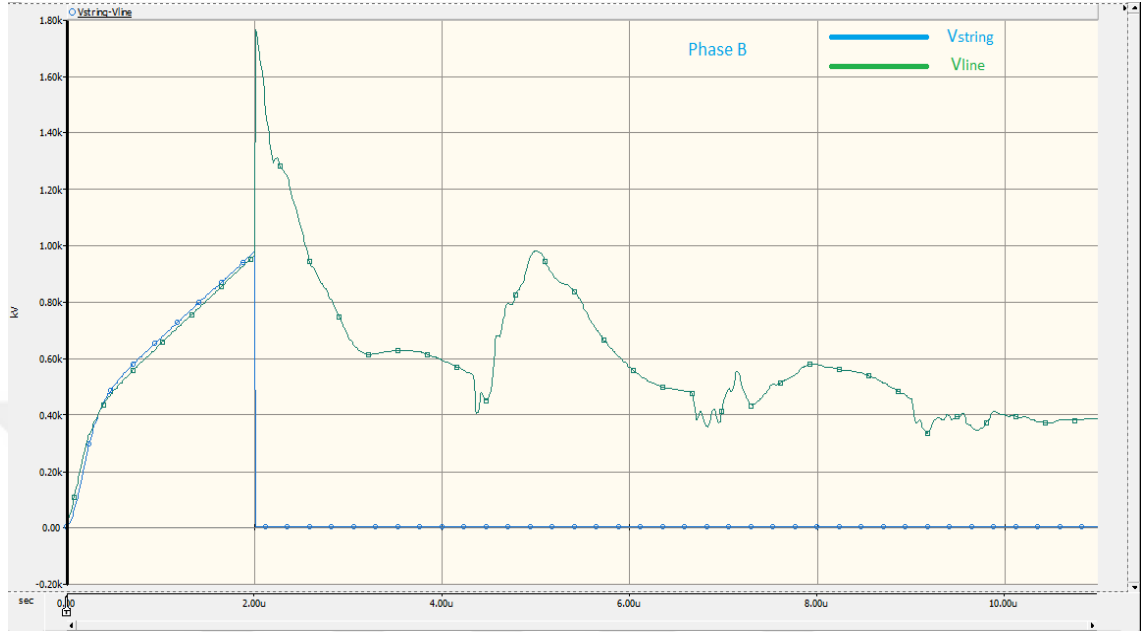
Şekil 4.30. Yıldırım şiddeti 20kA’de atlamamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.30’da görüldüğü üzere 20kA yıldırım şiddetinde 120 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 950kV pik gerilim 1710kV olmuştur.



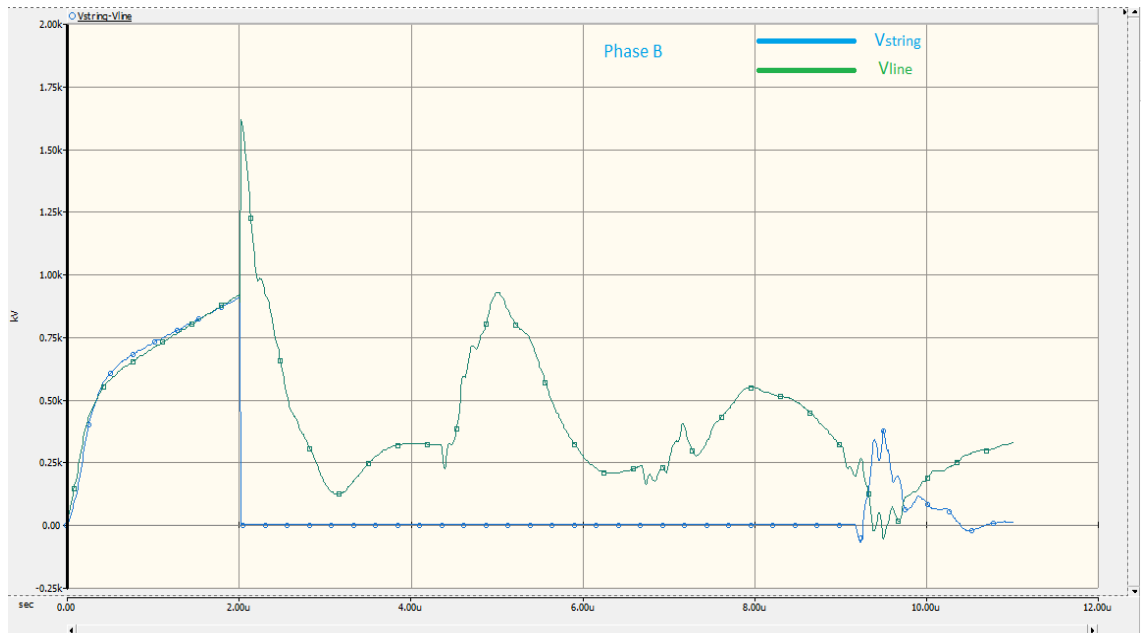
Şekil 4.31. Yıldırım şiddeti 30kA’de atlamamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.31’de görüldüğü üzere 30kA yıldırım şiddetinde 54 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 900kV pik gerilim 1750kV olmuştur.



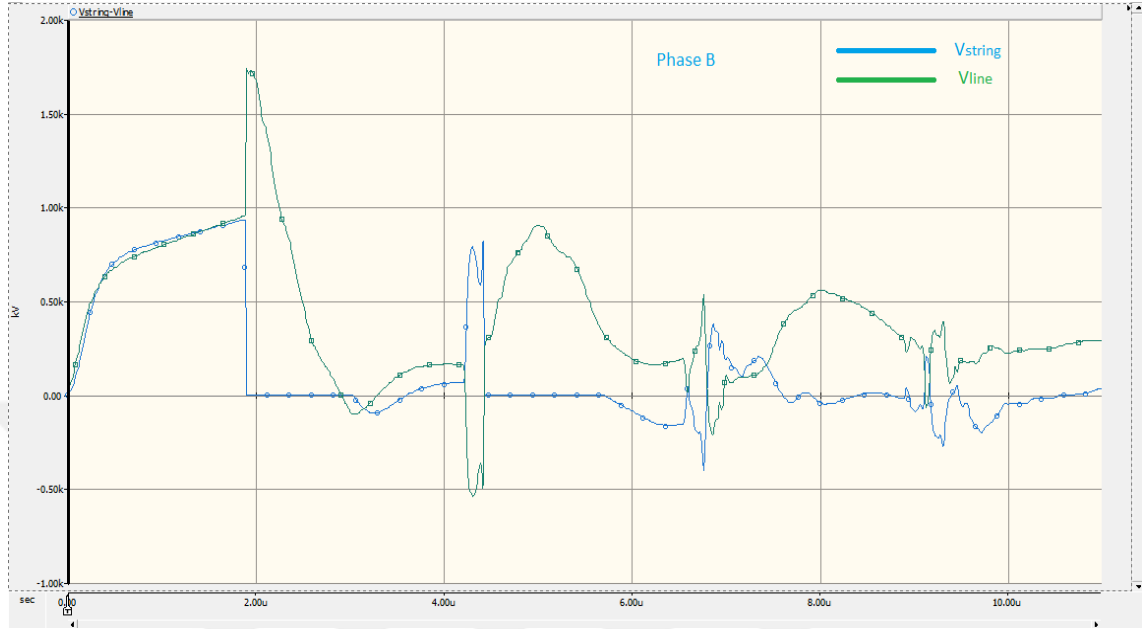
Şekil 4.32. Yıldırım şiddeti 40kA’de atlamının oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.32’de görüldüğü üzere 40kA yıldırım şiddetinde 30 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 950kV pik gerilim 1760kV olmuştur.



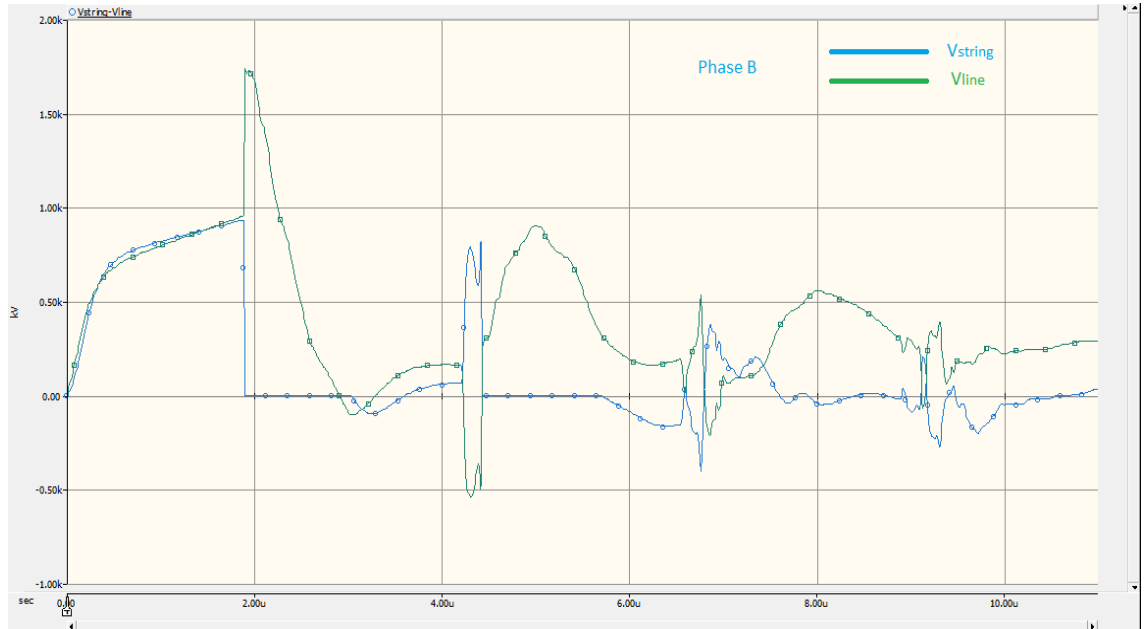
Şekil 4.33. Yıldırım şiddeti 50kA’de atlamının oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.33’de görüldüğü üzere 50kA yıldırım şiddetinde 14 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 910kV pik gerilim 1610kV olmuştur.



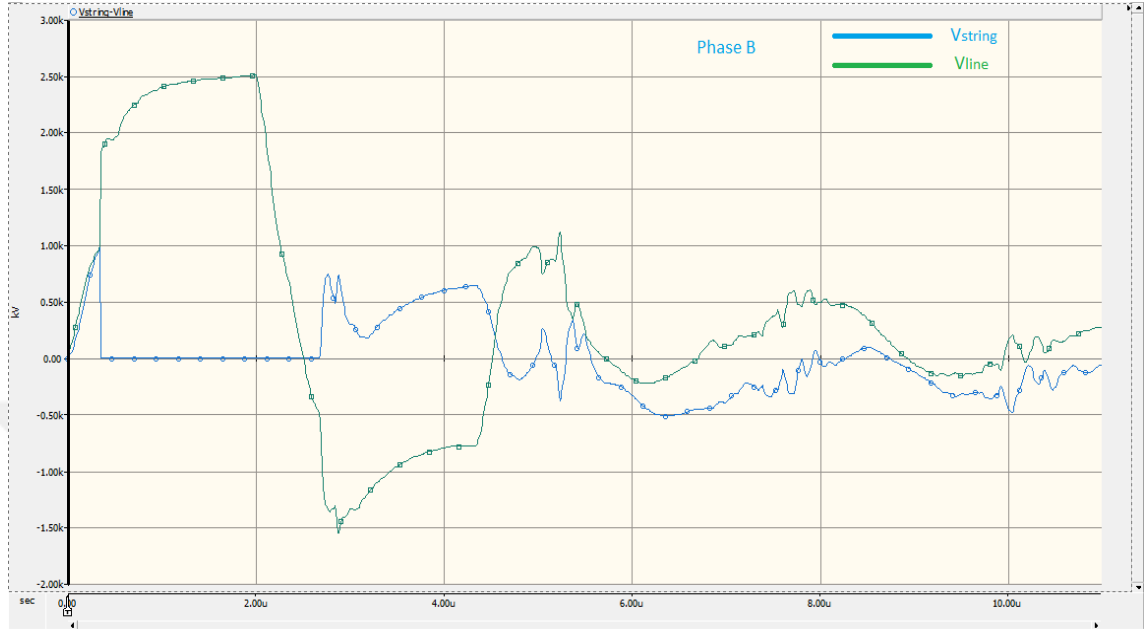
Şekil 4.34. Yıldırım şiddeti 60kA’de atlamanın olduğu direnç ve gerilim

Şekil 4.34’de görüldüğü üzere 60kA yıldırım şiddetinde 9 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 950kV pik gerilim 1700kV olmuştur.



Şekil 4.35. Yıldırım şiddeti 75kA’de atlamanın olduğu direnç ve gerilim

Şekil 4.35’de görüldüğü üzere 75kA yıldırım şiddetinde 1 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 980kV pik gerilim 1750kV olmuştur.

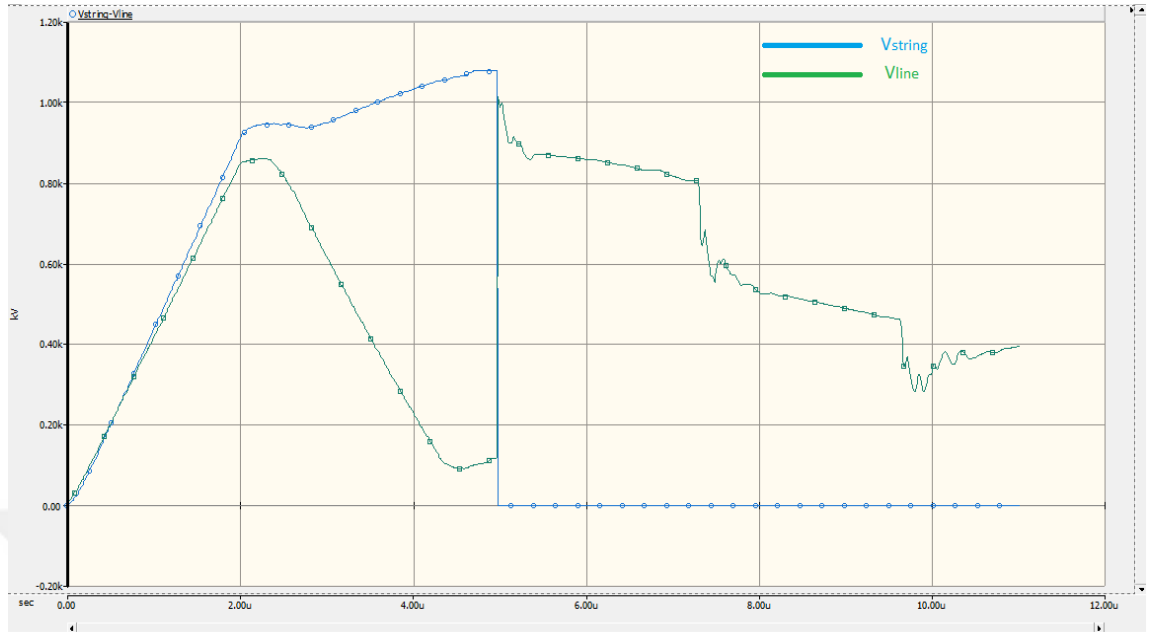


Şekil 4.36. Yıldırım şiddeti 100kA’de atlamanın olduğu direnç ve gerilim

Şekil 4.36’de görüldüğü üzere 100kA yıldırım şiddetinde 1 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 975kV pik gerilim 2500kV olmuştur.

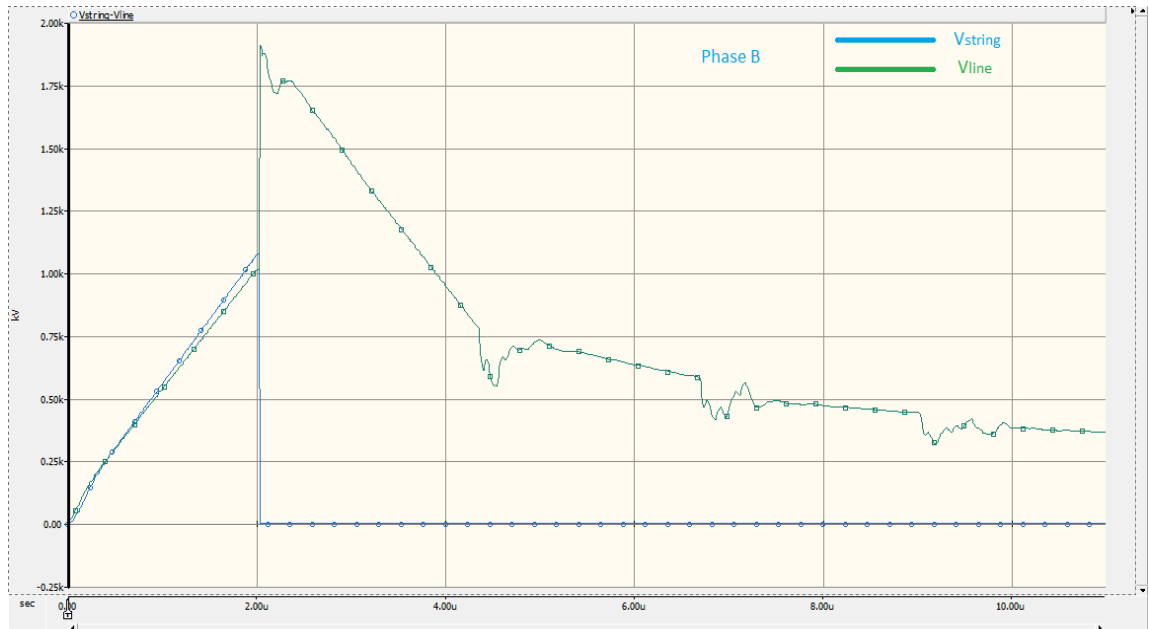
1860 mm’lik izolatör kullanımında işletmede bulunan hattın 60kA’lık yıldırımlara kolaylıkla dayandığını söyleyebiliriz. Elimizde ülkemize ait GFD (Ground Flash Density) üzerinde bir çalışma olmadığı ve yine ülkemize ait yıldırım haritaları bulunmadığı için güvenliği ne kadar yükseltirsek o kadar sağlıklı hat işletmesi yapılabilir.

4.2.4. İzolatör boyu 2060mm ve yıldırım akım değeri 10-100kA olması durumu



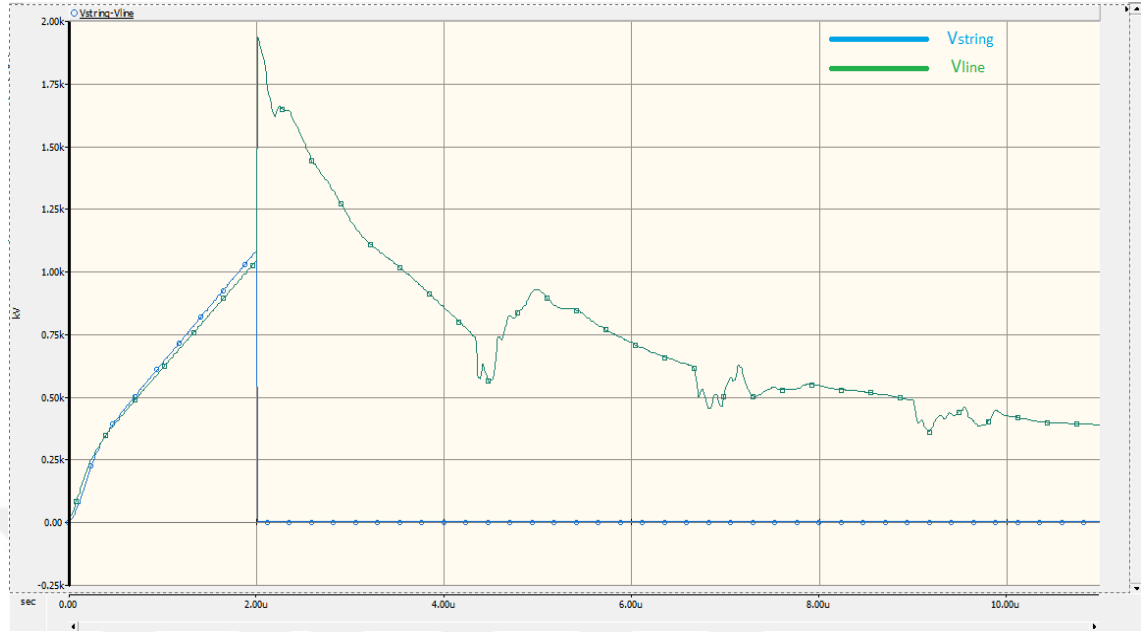
Şekil 4.37. Yıldırım şiddeti 10kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.37’de görüldüğü üzere 10kA yıldırım şiddetinde 835 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1MV pik gerilim 1100kV olmuştur.



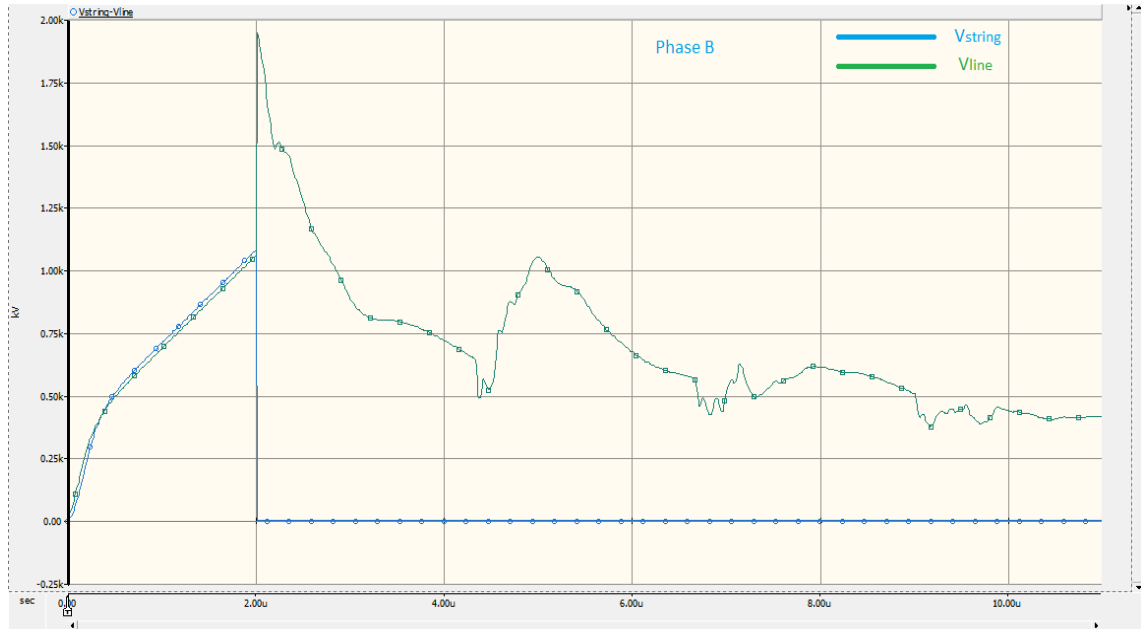
Şekil 4.38. Yıldırım şiddeti 20kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.38’de görüldüğü üzere 20kA yıldırım şiddetinde 149 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1050kV pik gerilim 1850kV olmuştur.



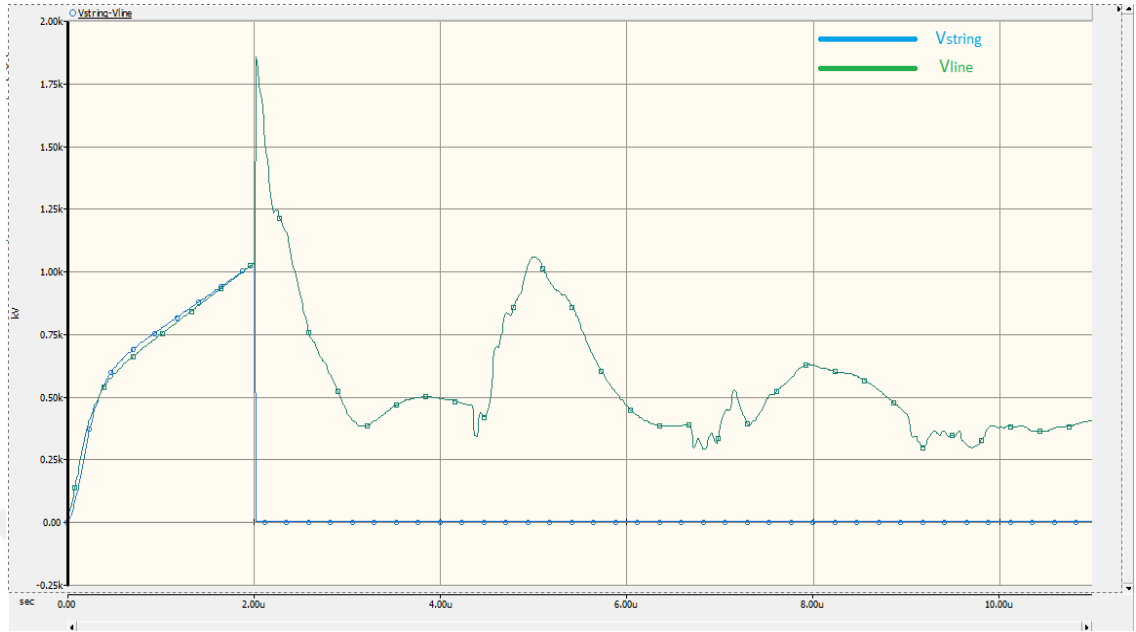
Şekil 4.39. Yıldırım şiddeti 30kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.39’da görüldüğü üzere 30kA yıldırım şiddetinde 66 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1075 kV pik gerilim 1900kV olmuştur.



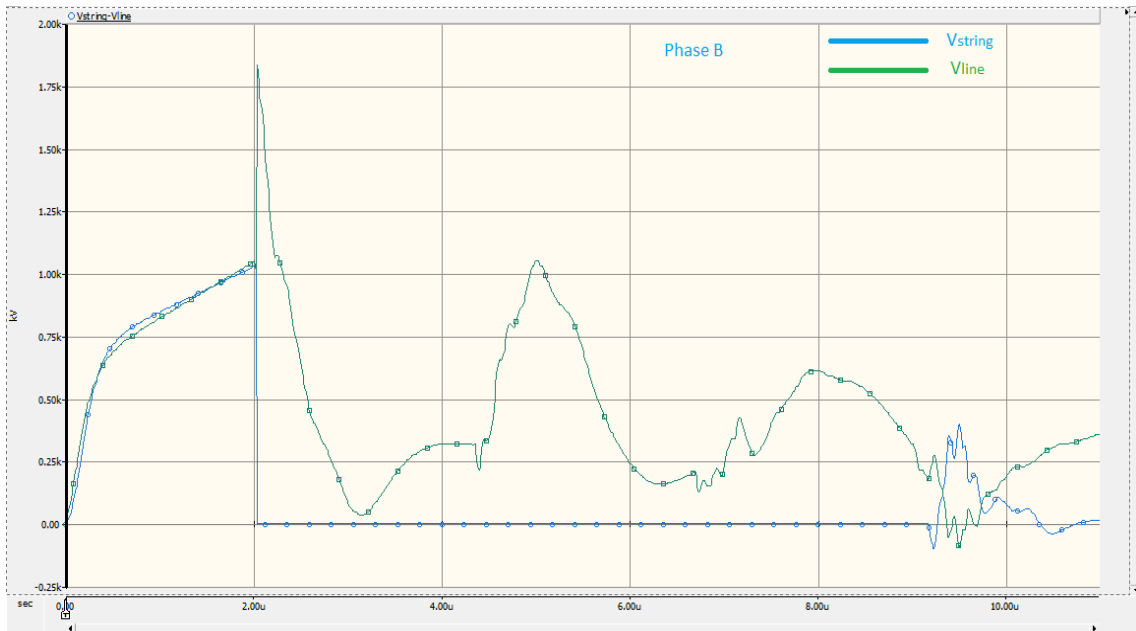
Şekil 4.40. Yıldırım şiddeti 40kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.40’da görüldüğü üzere 40kA yıldırım şiddetinde 37 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1100kV pik gerilim 1920kV olmuştur.



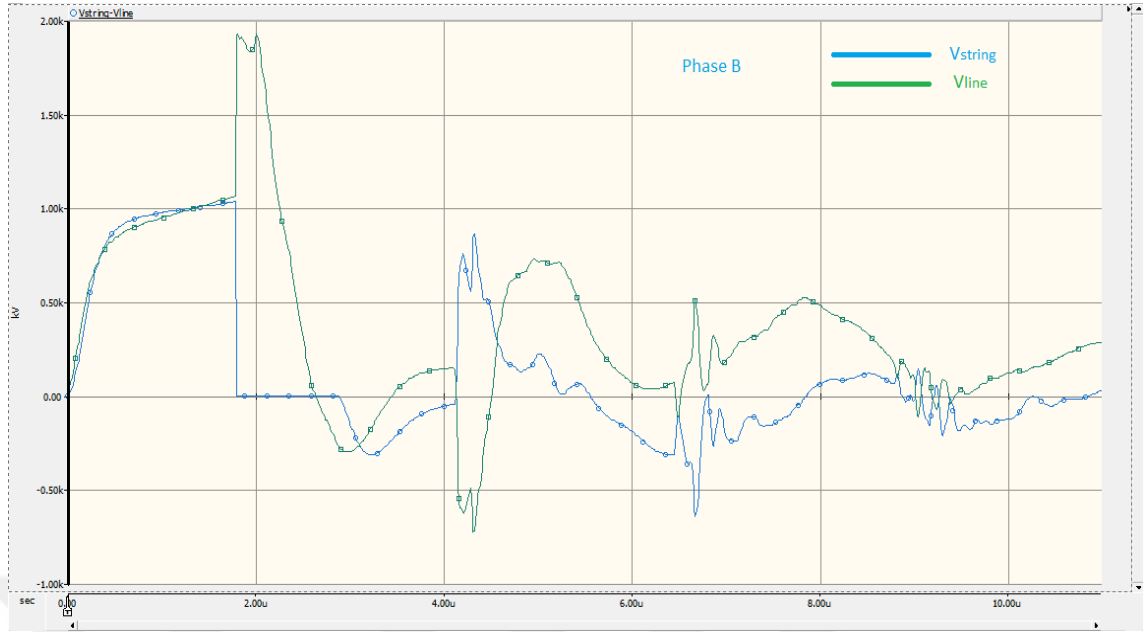
Şekil 4.41. Yıldırım şiddeti 50kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.41’de görüldüğü üzere 50kA yıldırım şiddetinde 20 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1100kV pik gerilim 1980kV olmuştur.



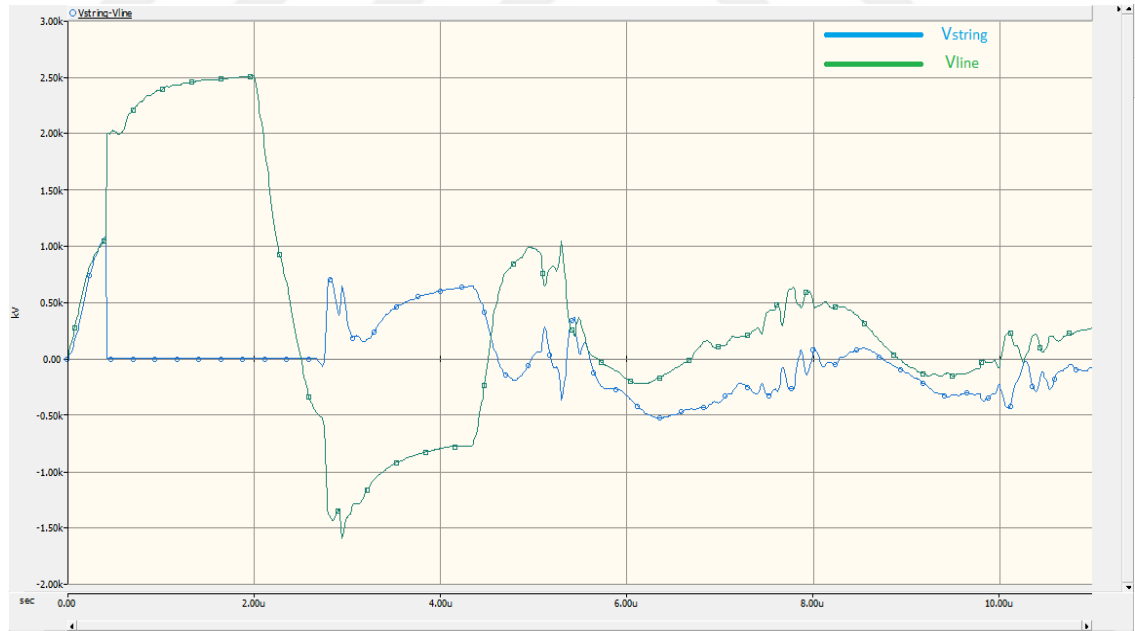
Şekil 4.42. Yıldırım şiddeti 60kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.42’de görüldüğü üzere 60kA yıldırım şiddetinde 12 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1030kV pik gerilim 1950kV olmuştur.



Şekil 4.43. Yıldırım şiddeti 75 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.43’de görüldüğü üzere 75kA yıldırım şiddetinde 5 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1040kV pik gerilim 1900kV olmuştur.

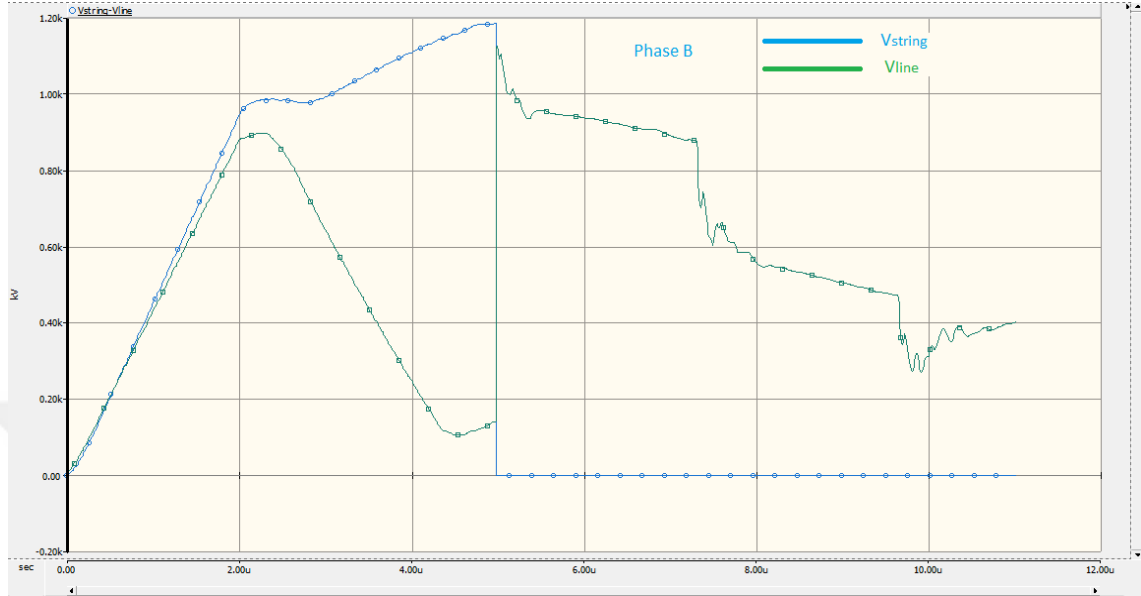


Şekil 4.44. Yıldırım şiddeti 100kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.44’de görüldüğü üzere 100kA yıldırım şiddetinde 1 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1070kV pik gerilim 2500kV olmuştur. 75kA şiddetindeki yıldırımda 5 Ω açma sınırıdır. Aşırı yıldırım alan yerlerde mevcut kompozit izolatlara

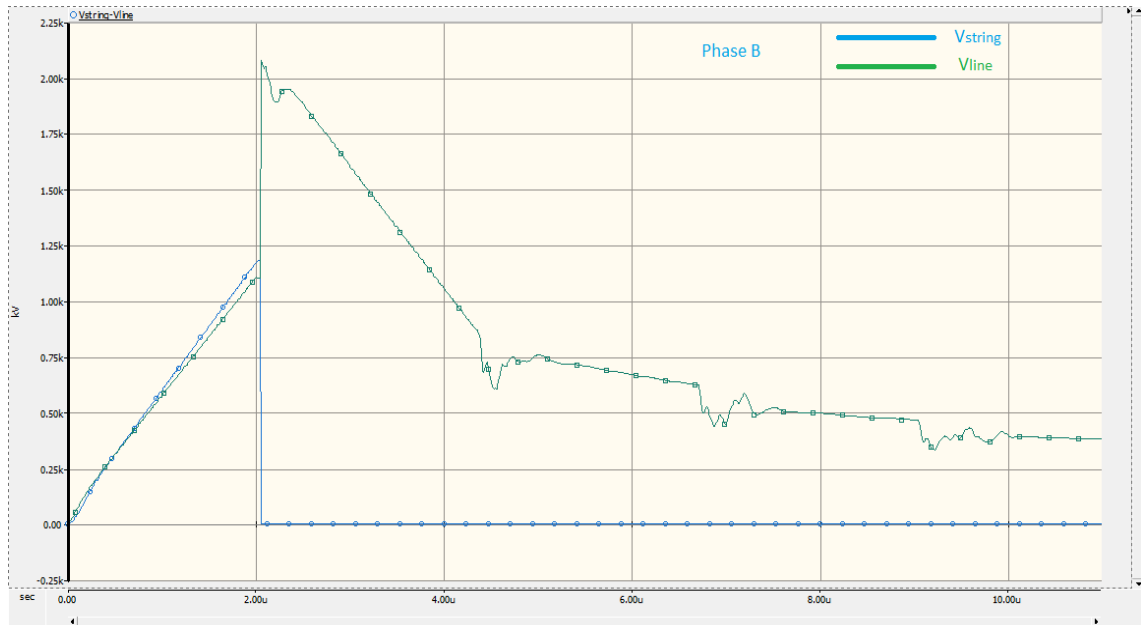
ekleme yapılarak ya da değişime gidilerek atlamaların önüne geçilebilir. Bu durum yeni tesis yapımı aşamalarında göz önünde bulundurulmalıdır.

4.2.5. İzolatör boyu 2260mm ve yıldırım akım değeri 10-100kA olması durumu



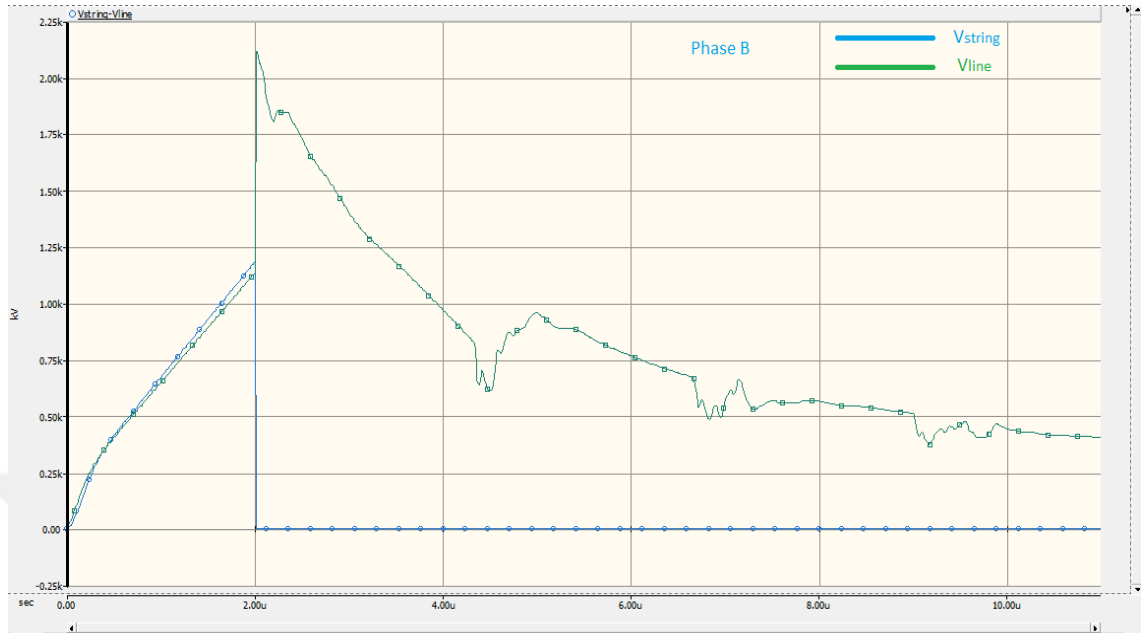
Şekil 4.45. Yıldırım şiddeti 10 kA’de atlamanın olduğu direnç ve gerilim

Şekil 4.45’de görüldüğü üzere 10kA yıldırım şiddetinde 1068 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1100kV pik gerilim 1180kV olmuştur.



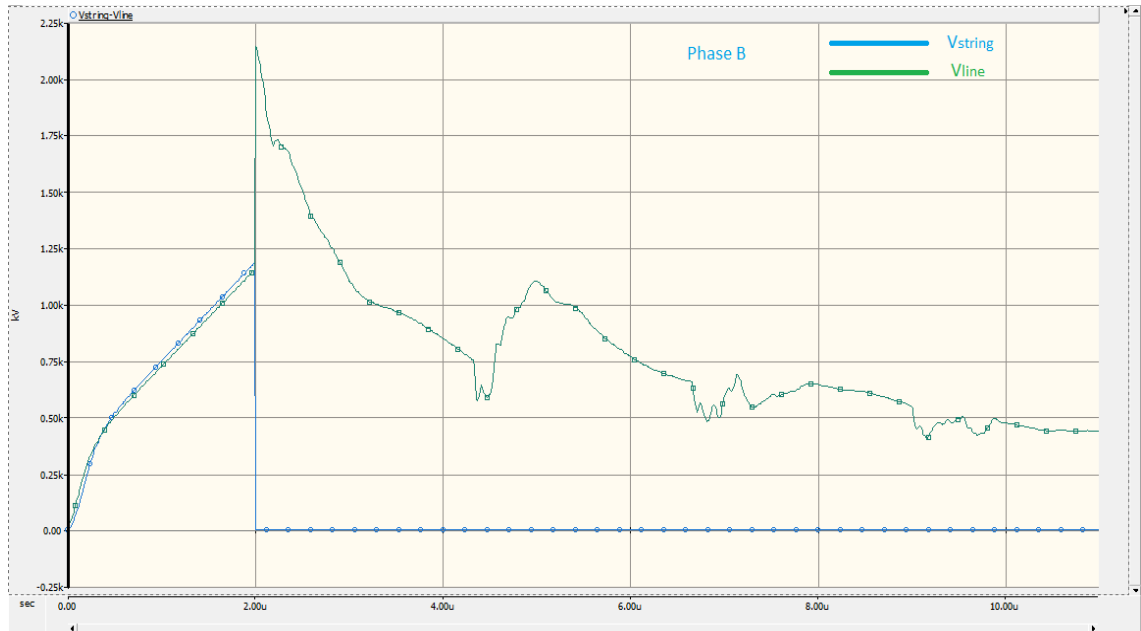
Şekil 4.46. Yıldırım şiddeti 20kA’de atlamanın olduğu direnç ve gerilim

Şekil 4.46'da görüldüğü üzere 20kA yıldırım şiddetinde 183 Ω 'da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1100kV pik gerilim 2100kV olmuştur.



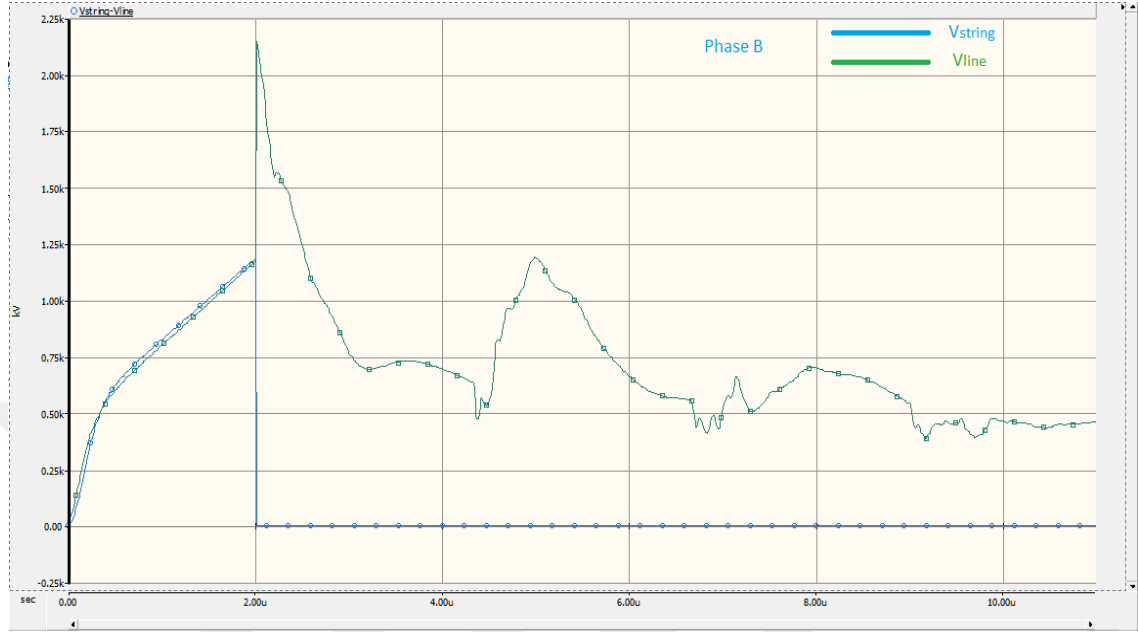
Şekil 4.47. Yıldırım şiddeti 30kA'de atlamının oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.47'de görüldüğü üzere 30kA yıldırım şiddetinde 79 Ω 'da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1150kV pik gerilim 2120kV olmuştur.



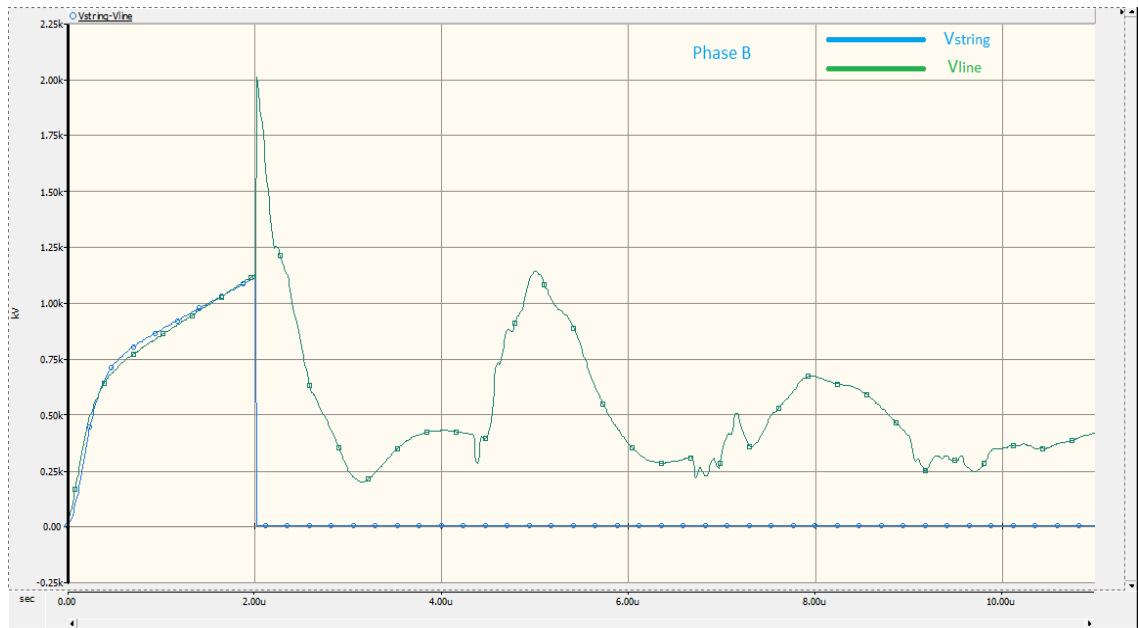
Şekil 4.48. Yıldırım şiddeti 40kA'de atlamının oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.48’de görüldüğü üzere 40kA yıldırım şiddetinde 45 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1.17MV pik gerilim 2150kV olmuştur.



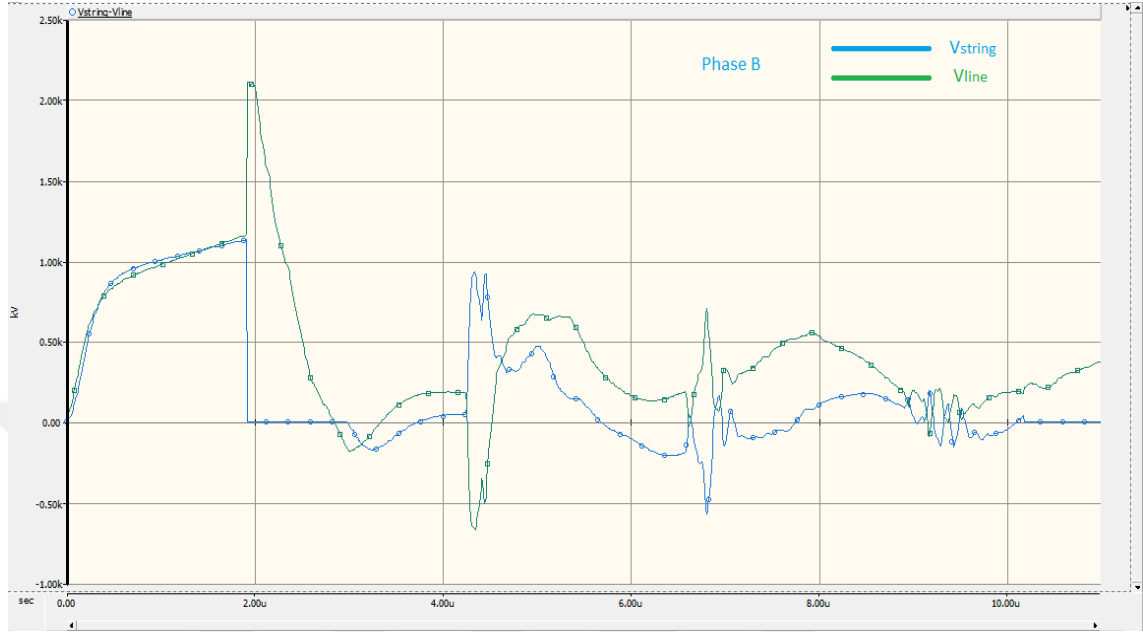
Şekil 4.49. Yıldırım şiddeti 50kA’de atlamamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.59’da görüldüğü üzere 50kA yıldırım şiddetinde 28 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1.2MV pik gerilim 2180kV olmuştur.



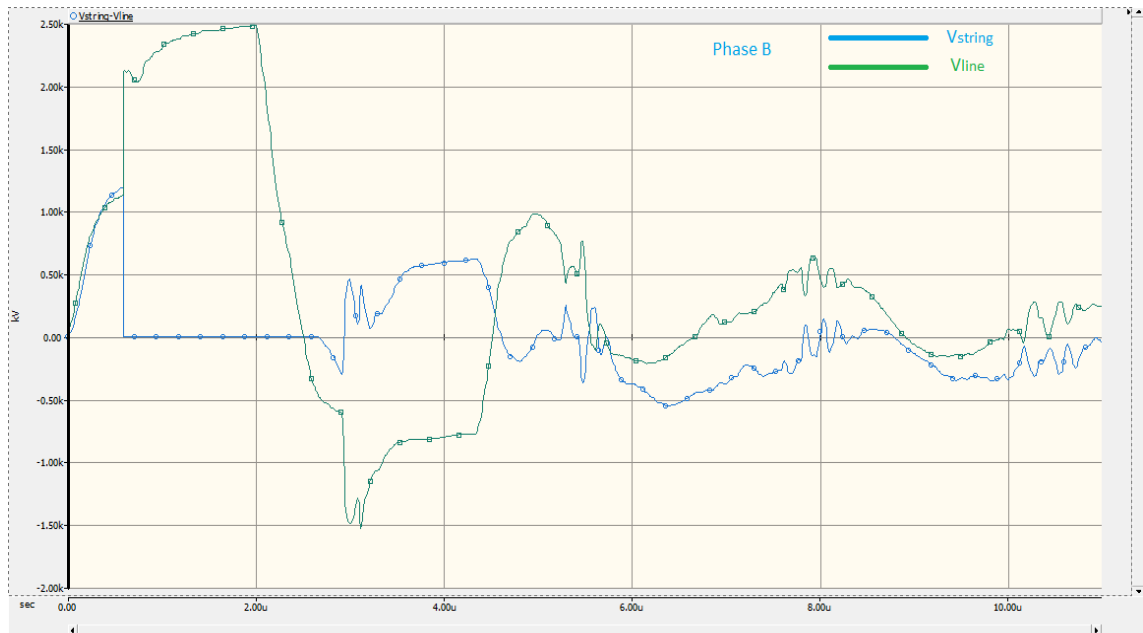
Şekil 4.50. Yıldırım şiddeti 60kA’de atlamamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.50’de görüldüğü üzere 60kA yıldırım şiddetinde 15 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1125kV pik gerilim 2200kV olmuştur.



Şekil 4.51. Yıldırım şiddeti 75 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

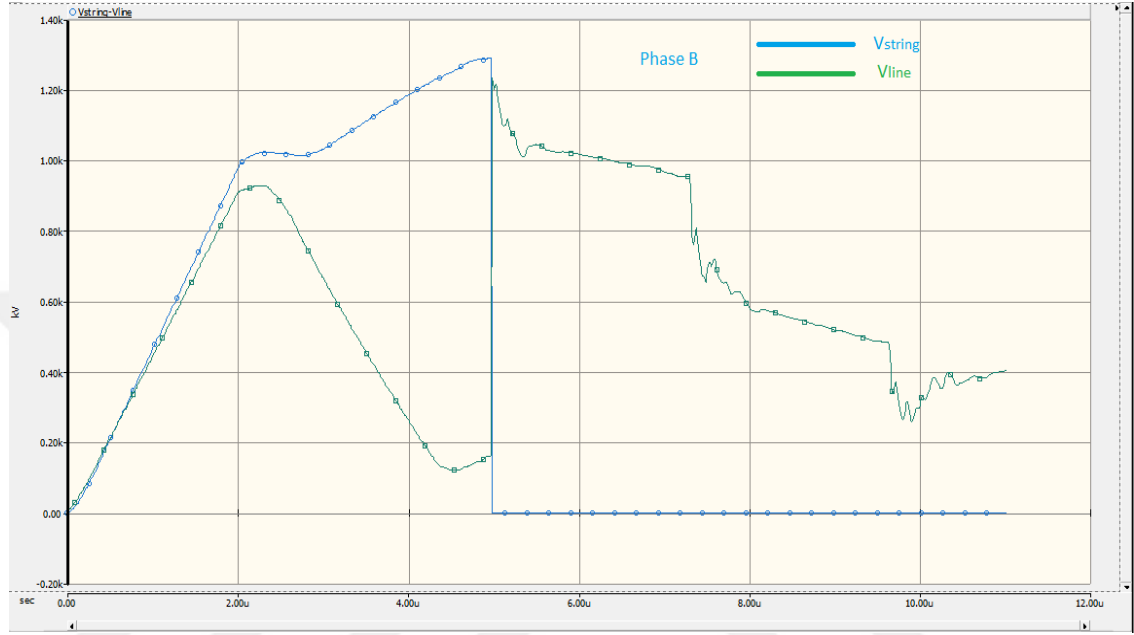
Şekil 4.51’de görüldüğü üzere 75kA yıldırım şiddetinde 8 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1170kV pik gerilim 2100kV olmuştur.



Şekil 4.52. Yıldırım şiddeti 100kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

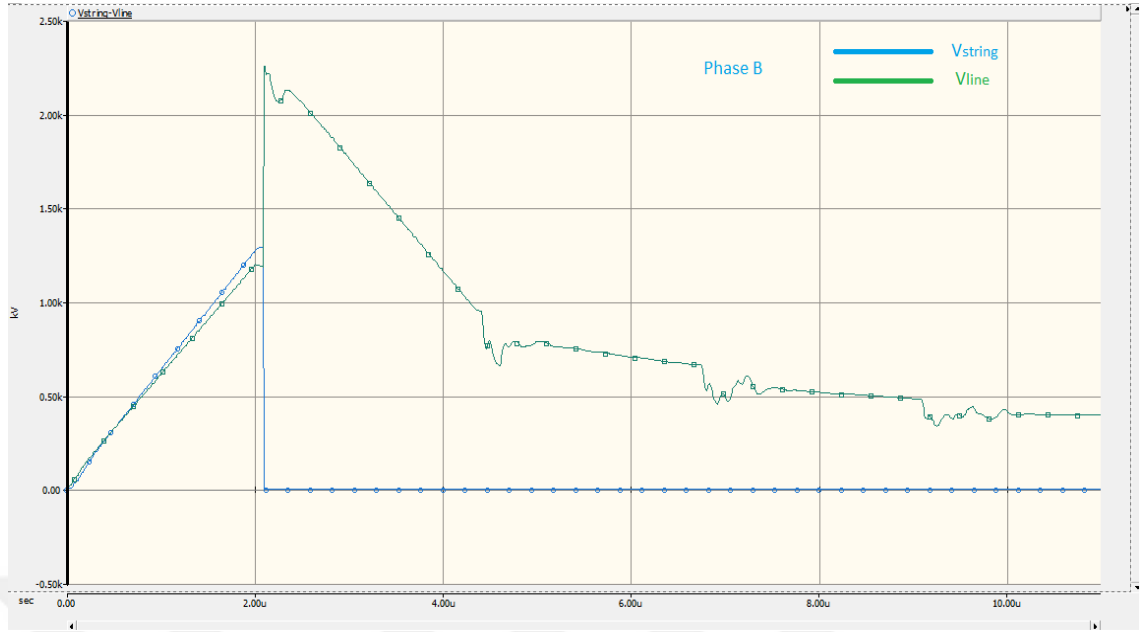
Şekil 4.52’de görüldüğü üzere 100kA yıldırım şiddetinde 1 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1.25MV pik gerilim 2500kV olmuştur. 75kA de 8 Ω seviyesi büyük rahatlık sağlamaktadır. Bu noktada 2260mm izolatör için direk tasarımlarında değişikliğe gidilmesi gerekebilir. Çünkü iletken bağlantı noktası ile direk gövdesi arasında meydana gelebilecek yaklaşım mesafelerinin önüne geçilemeyebilir.

4.2.6. İzolatör boyu 2460mm ve yıldırım akım değeri 10-100kA olması durumu



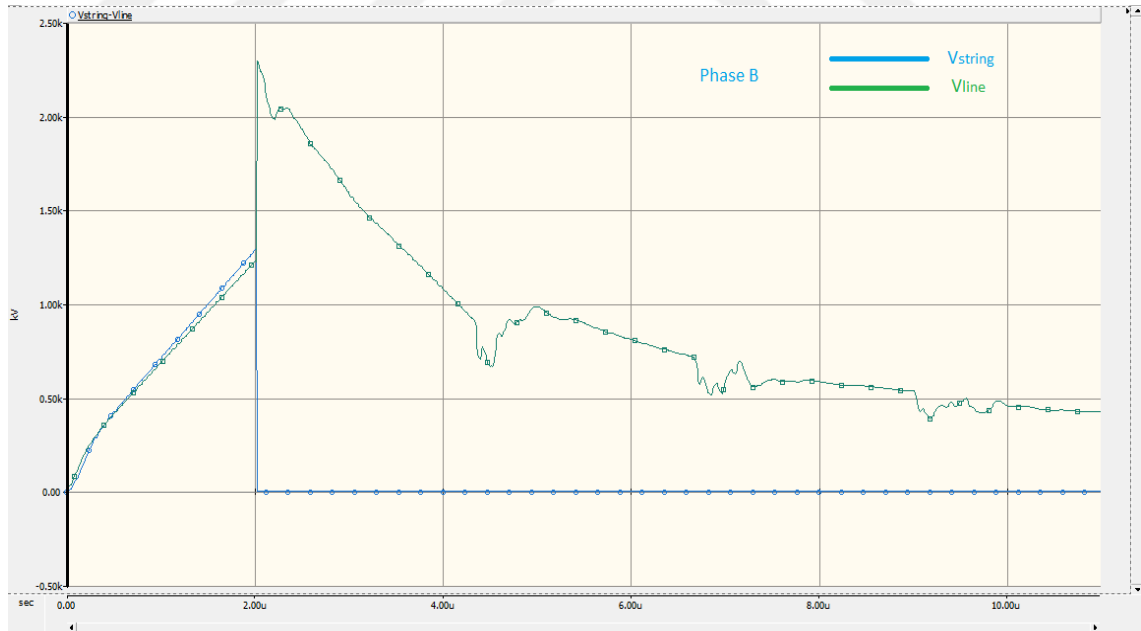
Şekil 4.53. Yıldırım şiddeti 10kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.53’de görüldüğü üzere 10kA yıldırım şiddetinde 1411 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1.25MV pik gerilim 1300kV olmuştur.



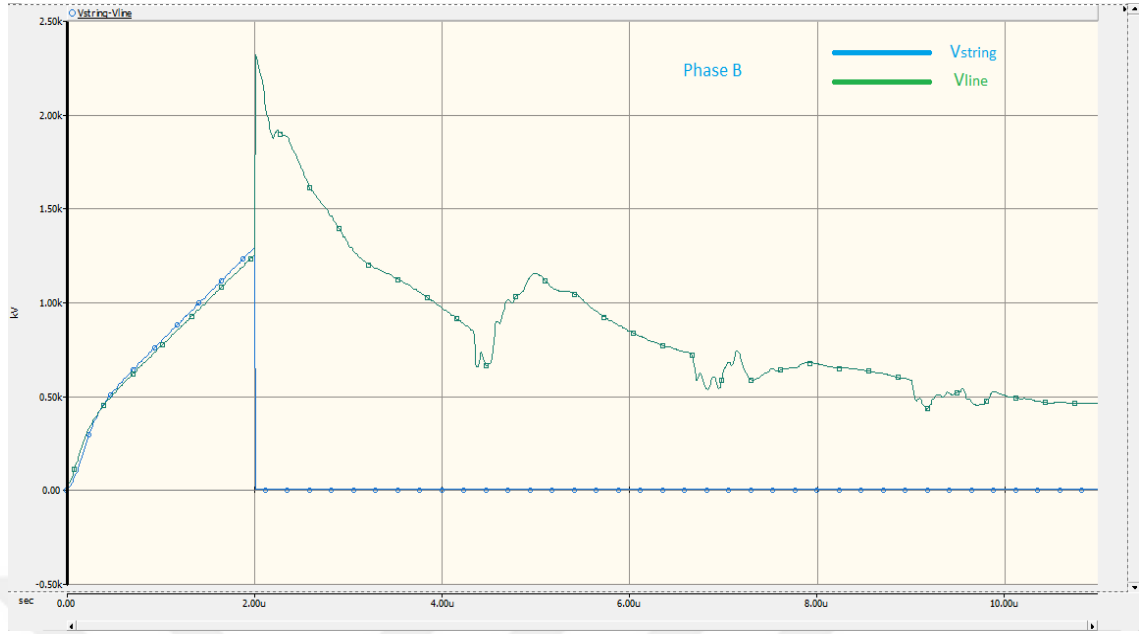
Şekil 4.54. Yıldırım şiddeti 20kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.54’de görüldüğü üzere 20kA yıldırım şiddetinde 240Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1,3MV pik gerilim 2260kV olmuştur.



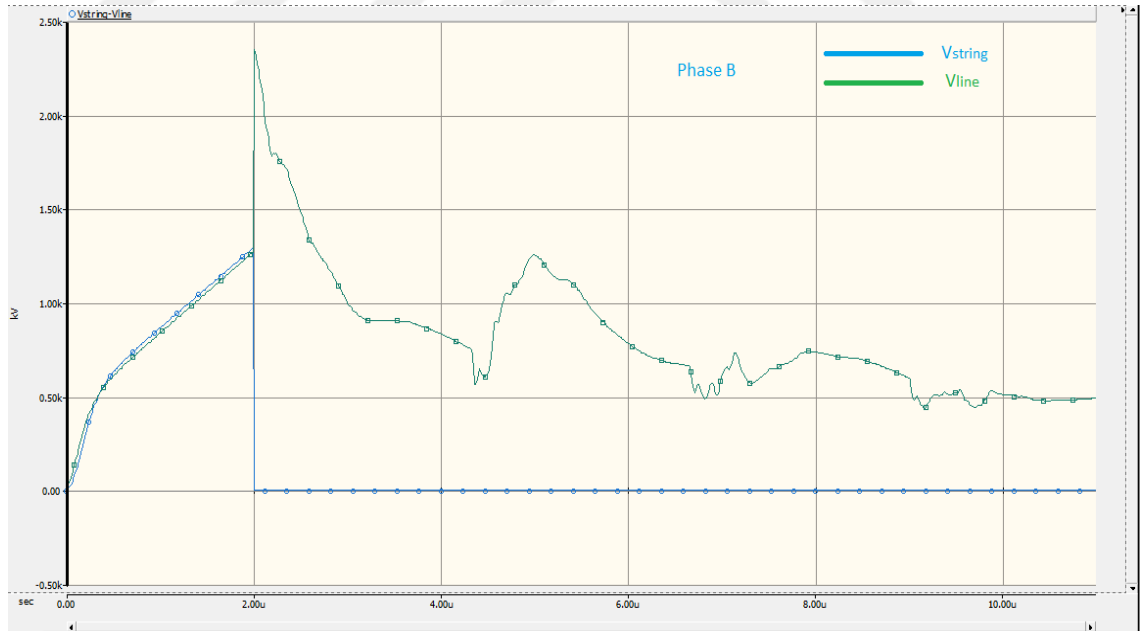
Şekil 4.55. Yıldırım şiddeti 30 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.55’de görüldüğü üzere 30kA yıldırım şiddetinde 93Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1,3MV pik gerilim 2300kV olmuştur.



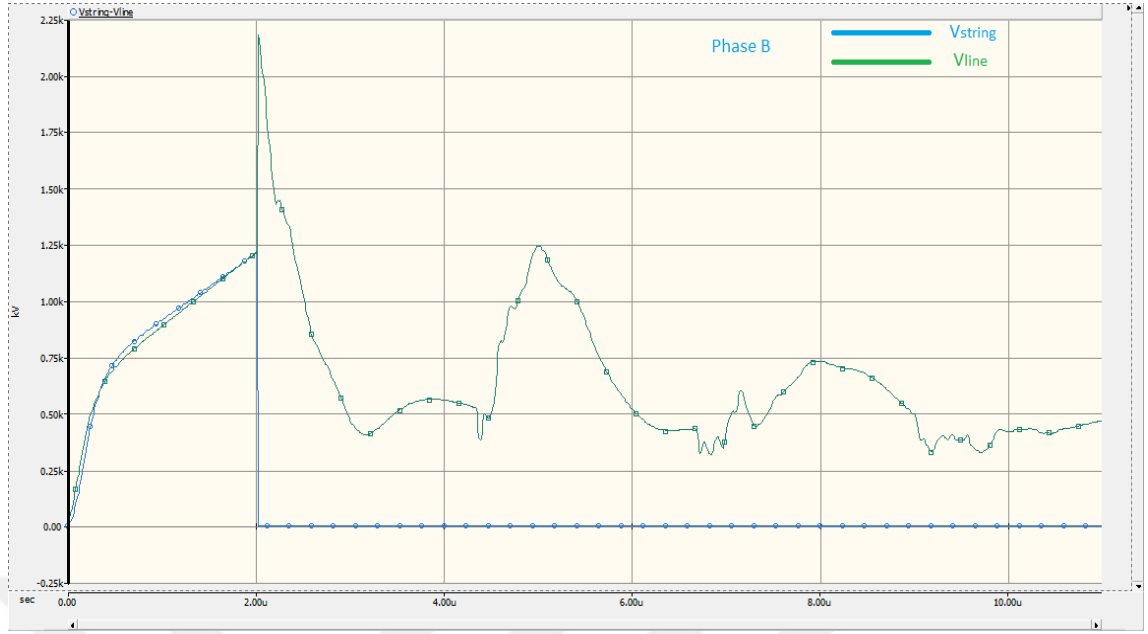
Şekil 4.56. Yıldırım şiddeti 40kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.56’da görüldüğü üzere 40kA yıldırım şiddetinde 53 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1,3MV pik gerilim 2350kV olmuştur.



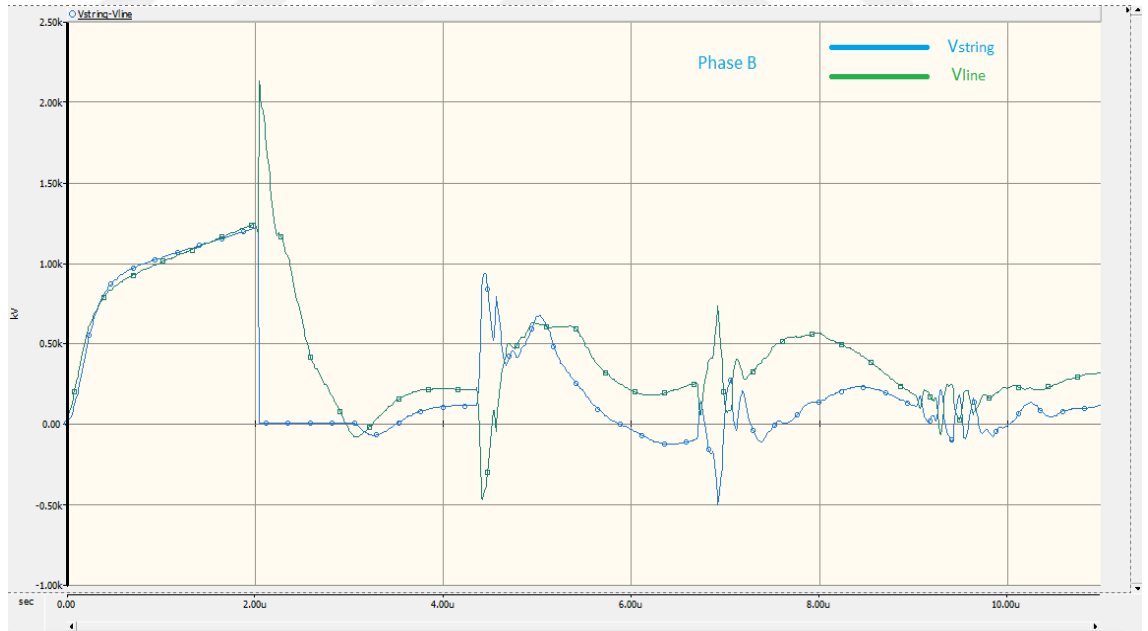
Şekil 4.57. Yıldırım şiddeti 50kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.57’de görüldüğü üzere 50kA yıldırım şiddetinde 34 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1,28MV pik gerilim 2380kV olmuştur.



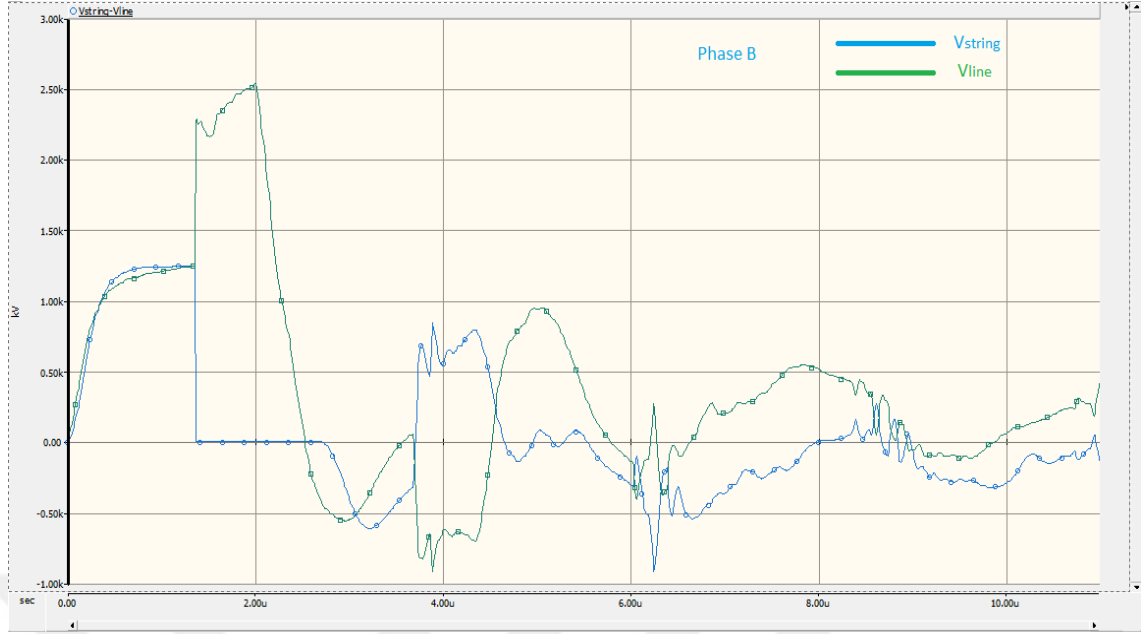
Şekil 4.58. Yıldırım şiddeti 60kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.58’de 19Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1,25 MV pik gerilim 2180kV olmuştur.



Şekil 4.59. Yıldırım şiddeti 75 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

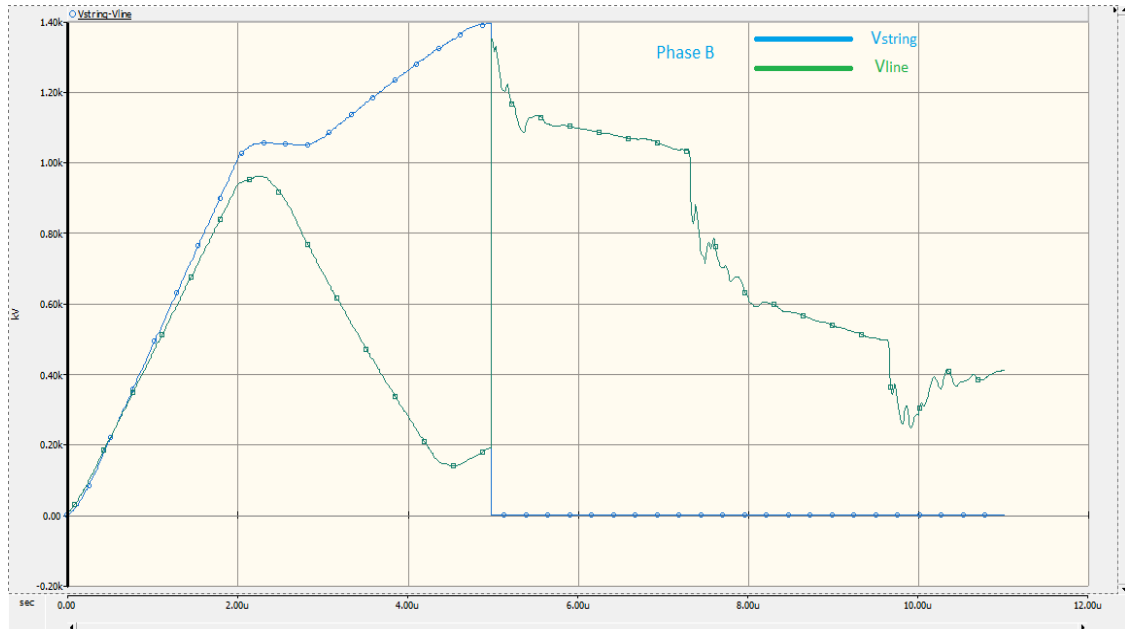
Şekil 4.59’da 10Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1,25MV pik gerilim 2100kV olmuştur.



Şekil 4.60. Yıldırım şiddeti 100 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

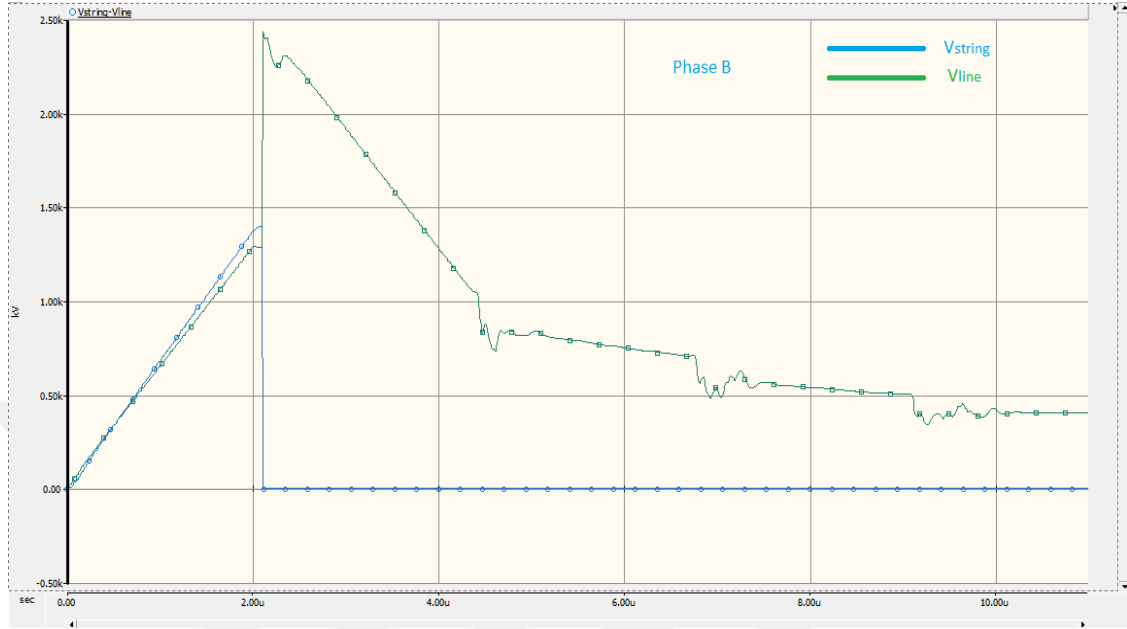
Şekil 4.60’da görüldüğü üzere 100kA yıldırım şiddetinde 2Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1,25MV pik gerilim 2500kV olmuştur. 100kA gibi çok büyük şiddetteki akımda bile 2Ω toprak direnci ile iletim sağlanabilmektedir.

4.2.7. İzolatör boyu 2660mm ve yıldırım akım değeri 10-100kA olması durumu



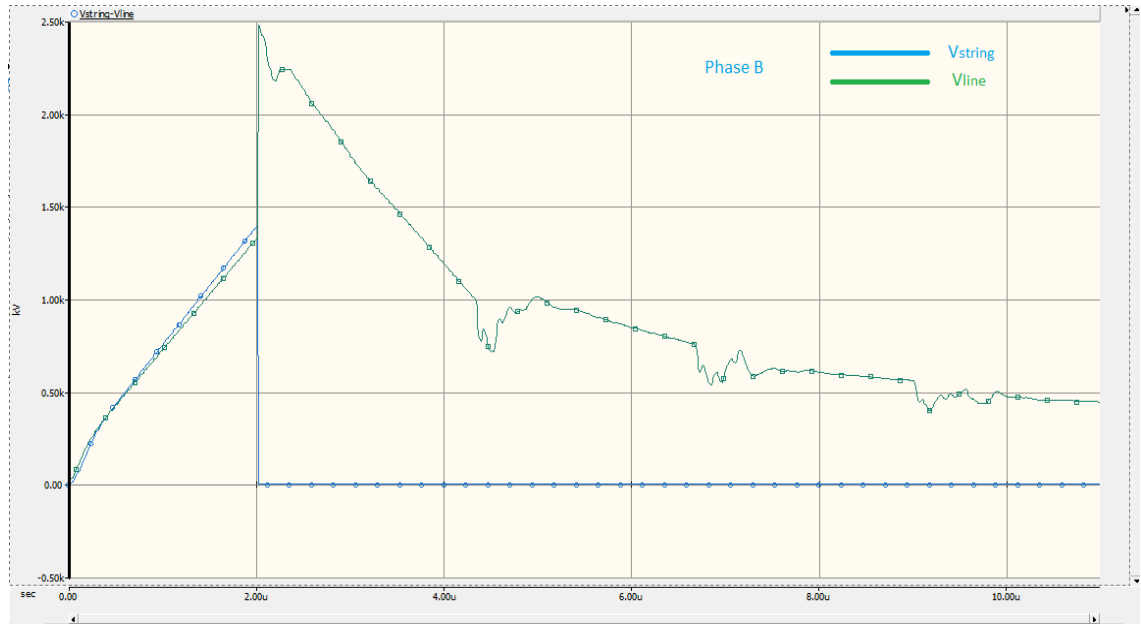
Şekil 4.61. Yıldırım şiddeti 10kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.61’de görüldüğü üzere 10kA yıldırım şiddetinde 1953 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1,35MV pik gerilim 1400kV olmuştur.



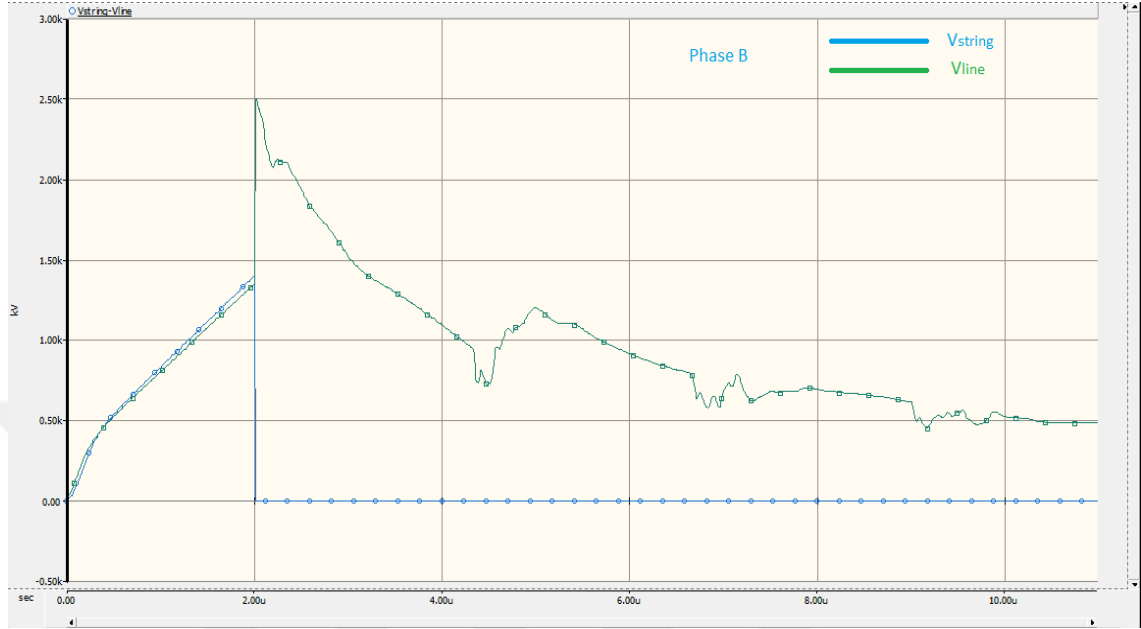
Şekil 4.62. Yıldırım şiddeti 20kA’de atlamanın olduğu direnç ve gerilim

Şekil 4.62’de görüldüğü üzere 20kA yıldırım şiddetinde 275 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1,35MV pik gerilim 2450kV olmuştur.



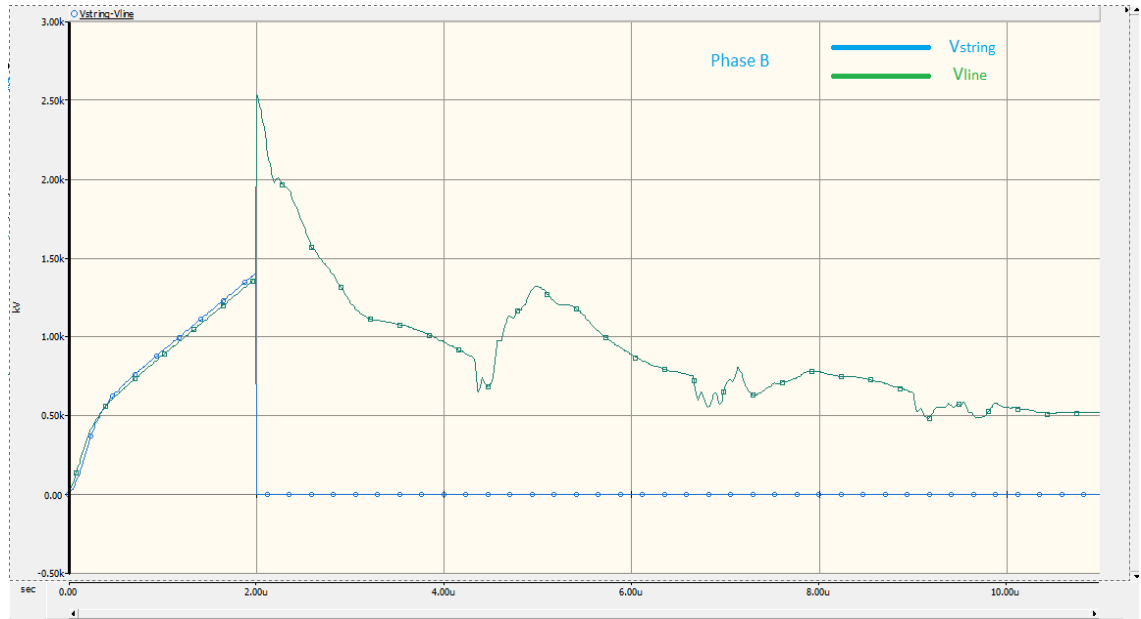
Şekil 4.63. Yıldırım şiddeti 30kA’de atlamanın olduğu direnç ve gerilim

Şekil 4.63’de görüldüğü üzere 30kA yıldırım şiddetinde 109Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1,35MV pik gerilim 2500kV olmuştur.



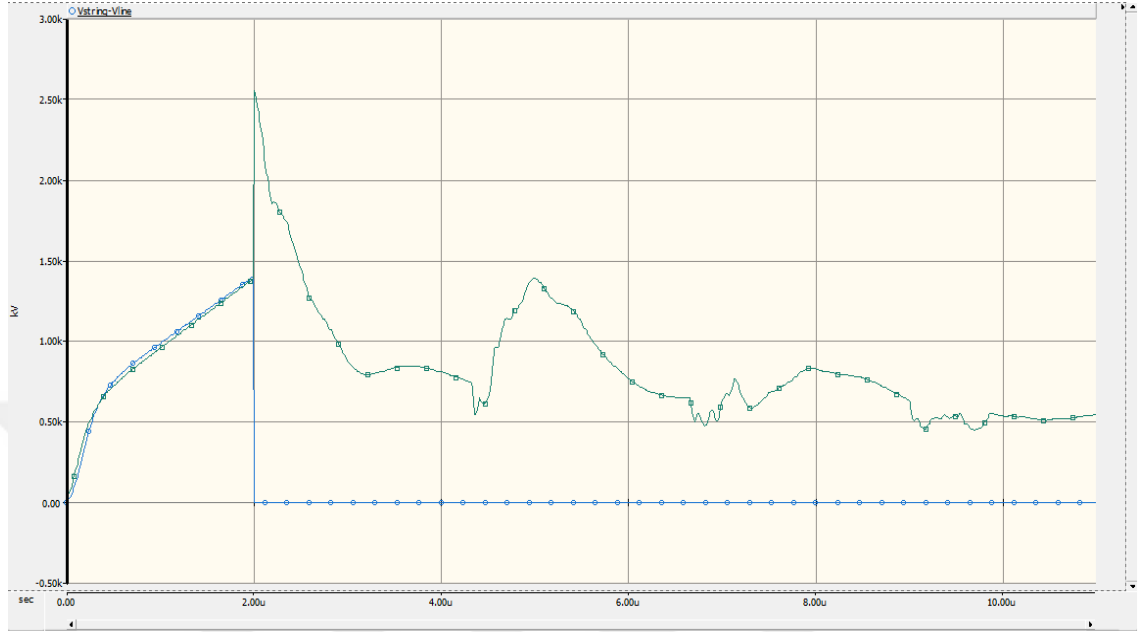
Şekil 4.64. Yıldırım şiddeti 40kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.64’de görüldüğü üzere 40kA yıldırım şiddetinde 62Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1,35MV pik gerilim 2500kV olmuştur.



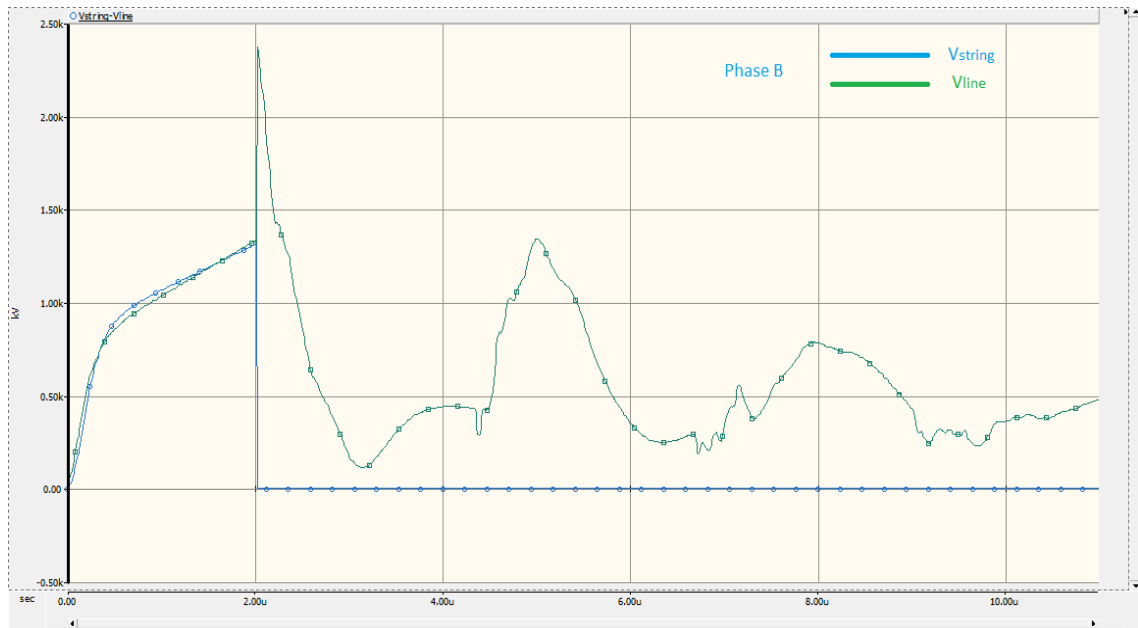
Şekil 4.65. Yıldırım şiddeti 50kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.65’de görüldüğü üzere 50kA yıldırım şiddetinde 40 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1,35MV pik gerilim 2550kV olmuştur.



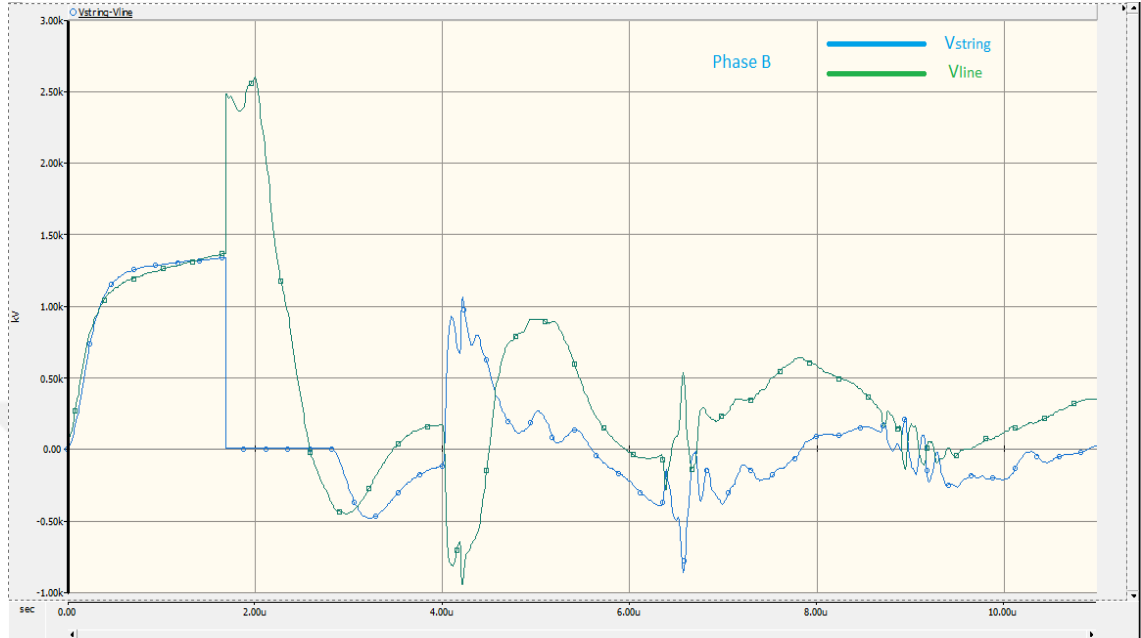
Şekil 4.66. Yıldırım şiddeti 60kA’de atlamanın olduğu direnç ve gerilim

Şekil 4.66’da görüldüğü üzere 60kA yıldırım şiddetinde 27 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1,35MV pik gerilim 2580kV olmuştur.



Şekil 4.67. Yıldırım şiddeti 75 kA’de atlamanın olduğu direnç ve gerilim

Şekil 4.67’de görüldüğü üzere 75kA yıldırım şiddetinde 13 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1,35MV pik gerilim 2370kV olmuştur.



Şekil 4.68. Yıldırım şiddeti 100 kA’de atlamanın oluştuğu direnç ve gerilim

Şekil 4.68’de görüldüğü üzere 100kA yıldırım şiddetinde 4 Ω ’da açma gözlenmiş ve atlama gerilimi 1,35MV pik gerilim 2610kV olmuştur.

İzolatör boyunun artmasıyla direncin artması arasında doğrusal oran mevcuttur. Bu noktada yapılan değerlendirme ise yıldırımdan dolayı sıklıkla açmaların yaşandığı noktalarda çözüm önerisi olarak direk tasarımının izin verdiği ölçüde izolatör boyunun artırılması atlamaların önüne geçecektir.

4.3. Yıldırım Akım Şiddetine Göre Direnç - Gerilim Değerlendirmesi

Çalışmanın bu kısmında yıldırım akım şiddetleri sabit tutularak direnç ve hatta okunan gerilim değerleri incelenmiştir. Çalışmanın bu kısmında hangi izolatör boylarında hangi direnç değerinde hangi gerilimlerin okunduğu ve izolatörde atlamaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yapılan gözlemlerde gerilim miktarındaki artışa takribi olarak şahit olmakla birlikte, izolatör boyu arttıkça aynı yıldırım şiddetinde direğin atlama yaşanmadan işletilebileceği ayak direncinin üst değeri belirlenmiştir.

Bu bulgular birçok noktada geleceğe dönük çözüm önerilerine olanak sağlamaktadır. Bu olanaklar eğer sağlıklı yıldırım bilgileriyle ve haritalarıyla desteklenirse (yoğunluk, sayı ve şiddet vb.) hatların tesisinde çok sağlıklı adımlar atılmış olacaktır. Bu sağlıklı adımların getirisi de sorunsuz hat işletmeciliği ve arıza sayısında düşüş olarak geri dönecektir. Arıza sayısındaki düşüş ise arz kalitesindeki artış anlamına da gelecektir.

Çizelge 4.1. Yıldırım akım değerinin 10 kA olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri

İzolatör Boyu (mm)	Direk Ayak Direnci $R_{TWR} \Omega$	Hatta Okunan Gerilim (kV)
1460	357	710
1660	525	875
1860	664	990
2060	835	1100
2260	1068	1180
2460	1411	1300
2660	1953	1400

Çizelge 4.1’de 10kA yıldırım şiddetindeki durum incelenmiş olup, izolatör boyu arttıkça gerilimdeki artış da tespit edilmektedir. Ayrıca bu durum izolatör boyu arttıkça direncin artışı anlamına da gelmektedir.

Çizelge 4.2. Yıldırım akım değerinin 20 kA olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri

İzolatör Boyu (mm)	Direk Ayak Direnci $R_{TWR} \Omega$	Hatta Okunan Gerilim (kV)
1460	74	1350
1660	95	1550
1860	120	1710
2060	149	1850
2260	183	2100
2460	224	2250
2660	275	2450

Çizelge 4.2’de Çizelge 4.1’de gözlemlenen durumun benzeri gözlenmektedir. Aynı 20kA yıldırım şiddetinde izolatör boyu arttıkça atlamanın meydana geldiği direnç değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.3. Yıldırım akım değerinin 30 kA olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri

İzolatör Boyu (mm)	Direk Ayak Direnci R_{TWR} Ω	Hatta Okunan Gerilim (kV)
1460	33	1500
1660	43	1590
1860	54	1750
2060	66	1900
2260	79	2120
2460	93	2300
2660	109	2500

Yıldırım şiddeti arttıkça Çizelge 4.3'den de görüleceği üzere 2660mm izolatör boyunda 109 Ω 'a kadar hattımız çalışmaktadır.

Çizelge 4.4. Yıldırım akım değerinin 40 kA olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri

İzolatör Boyu (mm)	Direk Ayak Direnci R_{TWR} Ω	Hatta Okunan Gerilim (kV)
1460	13	1350
1660	19	1500
1860	30	1760
2060	37	1900
2260	45	2150
2460	53	2330
2660	62	2500

Çizelge 4.4'de arttırılan yıldırım şiddetine karşı direnç değerindeki artışın azalarak artmaya devam ettiği görülmektedir.

Çizelge 4.5. Yıldırım akım değerinin 50 kA olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri

İzolatör Boyu (mm)	Direk Ayak Direnci R_{TWR} Ω	Hatta Okunan Gerilim (kV)
1460	7	1510
1660	11	1550
1860	14	1610
2060	20	1800
2260	28	2180
2460	34	2380
2660	40	2580

Çizelge 4.5’de 2660mm izolatör için 62 Ω olan değer Çizelge 4.5’de 40 Ω a düşmüştür.

Çizelge 4.6. Yıldırım akım değerinin 60 kA olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri

İzolatör Boyu (mm)	Direk Ayak Direnci R_{TWR} Ω	Hatta Okunan Gerilim (kV)
1460	1	1400
1660	5	1590
1860	9	1700
2060	12	1830
2260	15	2000
2460	19	2180
2660	27	2580

Çizelge 4.6’da 2660 mm izolatör için 27 Ω ’a düşen direnç değerine karşın 2500 kV olan gerilim değeri ise 2580kV mertebesine çıkmıştır.

Çizelge 4.7. Yıldırım akım değerinin 75 kA olması durumunda atlamamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri

İzolator Boyu (mm)	Direk Ayak Direnci R_{TWR} Ω	Hatta Okunan Gerilim (kV)
1460	1	1850
1660	1	1800
1860	1	1750
2060	5	1900
2260	8	2100
2460	10	2100
2660	13	2370

Çizelge 4.8. Yıldırım akım değerinin 100 kA olması durumunda atlamamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri

İzolator Boyu (mm)	Direk Ayak Direnci R_{TWR} Ω	Hatta Okunan Gerilim (kV)
1460	1	2500
1660	1	2500
1860	1	2500
2060	1	2500
2260	1	2500
2460	2	2500
2660	2	2610

Sonuç olarak Çizelge 4.7 ve 4.8’den görüldüğü üzere yıldırımın şiddeti arttıkça direkte indüklenen gerilim miktarları da artmaktadır. Atlamaların yaşanmasındaki temel unsur budur. Ölçümlerde anlık değerler okunmuş olup μs mertebesinde değişiklikler göz önünde bulundurulmuştur. Bu durum ışığında izolator boyunu arttırdıkça direk ayak dirençlerindeki artış değerlendirilebilmektedir.

4.4. İzolatör Boyuna Göre Akım - Direnç Değerlendirmeleri

İzolatör boyu sabit tutularak yıldırım şiddetinde hangi seviyelerde atlamanın meydana geleceği belirlenmiş ve bu atlamanın meydana geldiği gerilim seviyelerinde direk ayak dirençlerinin ne olacağı belirlenmiştir.

Çizelge 4.9. İzolatör boyunun 1460mm olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri

$I_{lightning} (kA)$	Direk Ayak Direnci $R_{TWR} \Omega$	Hatta Okunan Gerilim (kV)
10	357	1300
20	74	1350
30	33	1500
40	13	1660
50	7	1710
60	1	1800
75	1	1850
100	1	2500

Çizelge 4.9’da izolatör boyu 1460mm iken 10kA’de 357 ohm olan atlamanın meydana geldiği direnç, yıldırım şiddeti 60kA’e çıktığında 1ohm’a düşmektedir. 1460 mm boyunda izolatör kullanılması halinde direğin kendi gövdesinden oluşan dirençleri göz ardı etsek dahi 60kA şiddetindeki bir yıldırımında atlama kaçınılmazdır. Gerilimdeki artış neredeyse %40 oranında olmuştur. Mükemmel yani sıfır toprak direncinde dahi atlamanın önüne geçme olasılığı yoktur. İletkenliği zamanla paslanma, korozyon vb. sebeplerle azalan direklerin durumu düşünüldüğünde 1460mm izolatör kullanılması halinde atlamalar meydana gelecek ve kesintiler yaşanacaktır. İzolatörün boyunun önemi bu noktada karşımıza çok açık şekilde çıkmaktadır. İzolatör boyu ne kadar uzun olursa atlamanın da o kadar az olacağı aşikar olup, bu durum toprak direncinin yüksek olduğu noktalarda büyük önem kazanmaktadır.

Çizelge 4.10. İzolatör boyunun 1660mm olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri

$I_{lightning} (kA)$	Direk Ayak Direnci $R_{TWR} \Omega$	Hatta Okunan Gerilim (kV)
10	525	870
20	95	1550
30	43	1590
40	19	1500
50	11	1550
60	5	1590
75	1	1800
100	1	2500

Çizelge 4.10'da 60kA yıldırım şiddetinde 1660mm izolatörde 5 Ω 'a çıkmaktadır.

Çizelge 4.11. İzolatör boyunun 1860mm olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri

$I_{lightning} (kA)$	Direk Ayak Direnci $R_{TWR} \Omega$	Hatta Okunan Gerilim (kV)
10	664	970
20	120	1710
30	54	1750
40	30	1760
50	14	1610
60	9	1700
75	1	1750
100	1	2500

Çizelge 4.11'de izolatör boyu 1860 mm olup, 60kA'de atlama olmamaktadır. 75 kA ve üzeri şiddetteki akım değerlerinde atlama gözlenmiştir.

Çizelge 4.12. İzolatör boyunun 2060mm olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri

$I_{lightning} (kA)$	Direk Ayak Direnci $R_{TWR} \Omega$	Hatta Okunan Gerilim (kV)
10	835	1100
20	149	1850
30	66	1900
40	37	1900
50	20	1800
60	12	1830
75	5	1900
100	1	2500

Çizelge 4.12’de 2060 mm olan izolatör için 75k’lik yıldırımda iyi bir toprak direncimiz var ise açma gözlenmeyecektir. İyi toprak direnci değerlendirmesi 5ohm değerine kadar geçerli denilebilir. 10 Ω üzerindeki dirençler için kesinlikle düzenleme yapılması gerekmektedir.

Çizelge 4.13. İzolatör boyunun 2260mm olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri

$I_{lightning} (kA)$	Direk Ayak Direnci $R_{TWR} \Omega$	Hatta Okunan Gerilim (kV)
10	1068	1180
20	183	2100
30	79	2120
40	45	2150
50	28	2180
60	15	2000
75	8	2100
100	1	2500

Çizelge 4.13’de izolatör boyu 2260mm olup, işletme esnasında oldukça büyük rahatlık sağlamaktadır. Bu rahatlık atlama konusundadır. 75kA yıldırım şiddetinde 8ohm’a kadar direnç dayanımı elde edilmektedir. 100kA gibi çok büyük güçte bir yıldırım şiddetinde atlama meydana gelmiştir.

Çizelge 4.14. İzolatör boyunun 2460mm olması durumunda atlamaların meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri

$I_{lightning}(kA)$	Direk Ayak Direnci $R_{TWR} \Omega$	Hatta Okunan Gerilim (kV)
10	1411	1300
20	224	2250
30	93	2300
40	53	2330
50	34	2380
60	19	2180
75	10	2200
100	2	2500

Çizelge 4.14’de izolatör boyunun 2460 mm olması halinde 100kA şiddetindeki bir yıldırımda bile mükemmel yakın bir topraklama yapılarak hattaki atlamaların önüne geçilebilir. 10kA yıldırım şiddetinde 1411 Ω direk ayak direncine kadar dayanım sağlanmaktadır. Kesin olmamakla birlikte ülkemizdeki ortalama 30kA civarında olduğu düşünülürse 92 Ω gibi çok kötü bir topraklama direncinde bile atlama meydana gelmeyecektir. Gerilim değerlerinin tamamında atlama meydana geldiği anda direk üzerinde okunan değerlerdir. Bu değerlerdeki artış yıldırım şiddetiyle paralel olarak artmaktadır. Değerlerdeki değişikliklerin temel sebebi ise programın yapmış olduğu analizlerin bandının çok kısa mikro saniyeler mertebesinde olmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.15. İzolatör boyunun 2660mm olması durumunda atlamanın meydana geldiği direnç ve gerilim değerleri

$I_{lightning} (kA)$	Direk Ayak Direnci $R_{TWR} \Omega$	Hatta Okunan Gerilim (kV)
10	1953	1400
20	275	2450
30	109	2500
40	62	2500
50	40	2550
60	27	2580
75	13	2590
100	2	2610

Çizelge 4.15'i incelediğimizde izolatör boyu 2660mm iken 10kA yıldırım şiddetinde 1953 Ω 'a kadar dayanım görülmüştür. İzolatör boyunu arttırdığımız ölçüde atlama gerilimlerinin arttığını görebiliyoruz. 1460 mm için 870kV olan atlama gerilimi, 2660 mm için 1400kV seviyelerine çıkmaktadır. İzolatör boyu 1460 mm iken direnç 357 Ω , izolatör boyu 260mm iken 1953 Ω seviyelerine kadar direk ayak direnci yükselmiştir.

4.5. Sabit Direk Ayak Direncinde Yıldırım Şiddetinin Değerlendirilmesi

Bölüm 4.4'de görüldüğü üzere izolatör boyunda oynama yapmak, en rahatlatıcı çözüm yöntemi gibi görünmektedir. Bu noktada izolatör boyunu uzatınca alt konsola ya da direk gövdesine yaklaşılacağını göz önüne almak gerekir. Bu durumla ilgili olarak tekel konumunda bulunan TEİAŞ'ın direk portföyünde kullanılan 154kV tek ve çift devre direklerle ilgili direk tasarımları ek-4 ve ek-5'de verilmektedir. Ek 4'de bulunan 1272 MCM tek devre PA serisi direkler için durum incelendiğinde 2460mm izolatör boyunda; faz ile direğin gövdesindeki mesafe 2.1 metreye düşmektedir. Bu durum ek-5'de verilen 154kV 1272 MCM çift devre CP serisi direkler için göz önüne alındığında; 1660 mm izolatör kullanımında, iletken maksimum açısında direk gövdesi ile iletken arasında kalan mesafe 1200 mm'dir. Bu durumda izolatörün 200 mm uzatılması halinde faz ile direğin gövdesi arasındaki mesafe 1metreye düşecektir. Atlama mesafesi 1metre olması halinde herhangi bir yıldırıma ihtiyaç duymadan, işletme geriliminde hatta iletkenlerden direğin gövdesine atlamalar meydana gelecektir. Bu sebepten dolayı izolatörlerin boylarını uzatmak her zaman sağlıklı sonuçlar vermeyecektir. Mecbur kalınması halinde bir üst gerilim mertebesindeki direklerin kullanılmasıyla sorun çözülebilir.

Çizelge 4.16. İzolatör boyu 1460mm ve Direncin 10 Ohm olması durumu

$I_{lightning}$ (kA)	İzolatör Gerilimi V_{STRING} (kV)	Hatta Okunan Gerilim V_{LINE} (kV)	$I_{lightning}$ (kA)	İzolatör Gerilimi V_{STRING} (kV)	Hatta Okunan Gerilim V_{LINE} (kV)
5	81	83	55	741	1773 (atlama)
10	161	165	60	730	1926 (atlama)
15	243	248	65	722	2088 (atlama)
20	325	333	70	746	2268 (atlama)
25	408	417	75	742	2423 (atlama)
30	486	497	80	791	2580 (atlama)
35	569	582	85	704	2760 (atlama)
40	651	667	90	890	2908 (atlama)
45	728	1272 (atlama)	95	912	3070 (atlama)
50	741	1575 (atlama)	100	941	3212 (atlama)

Çizelge 4.16'dan itibaren 10 Ω ortalama toprak direncinde ve 1460mm izolatör kullanımında atlamamanın meydana geldiği yıldırım şiddeti hakkında değerlendirmelerde bulunulmuştur. 45kA yıldırım şiddetinde atlama meydana gelmiş izolatörde okunan gerilim ile hatta okunan gerilim arasındaki ani artış rahatlıkla gözlenmektedir.

Çizelge 4.17. İzolatör boyu 1660mm ve Direncin 10 Ohm olması durumu

$I_{lightning}$ (kA)	İzolatör Gerilimi V_{STRING} (kV)	Hatta Okunan Gerilim V_{LINE} (kV)	$I_{lightning}$ (kA)	İzolatör Gerilimi V_{STRING} (kV)	Hatta Okunan Gerilim V_{LINE} (kV)
5	81	83	55	830	1733 (atlama)
10	162	166	60	851	1924 (atlama)
15	243	249	65	809	2105 (atlama)
20	323	330	70	825	2268 (atlama)
25	407	416	75	833	2419 (atlama)
30	488	500	80	827	2581 (atlama)
35	583	569	85	860	2734 (atlama)
40	652	667	90	869	2908 (atlama)
45	731	748	95	951	3070 (atlama)
50	812	1404 (atlama)	100	960	3226 (atlama)

Çizelge 4.17’de 50kA de atlama meydana gelmiş ve bu yıldırım şiddetinden sonra tüm yıldırım şiddetlerinde atlama normal olarak gözlenmiştir.

Çizelge 4.18. İzolatör boyu 1860mm ve Direncin 10 Ohm olması durumu

$I_{lightning}$ (kA)	İzolatör Gerilimi V_{STRING} (kV)	Hatta Okunan Gerilim V_{LINE} (kV)	$I_{lightning}$ (kA)	İzolatör Gerilimi V_{STRING} (kV)	Hatta Okunan Gerilim V_{LINE} (kV)
5	81	83	55	893	913
10	163	167	60	928	1819 (atlama)
15	244	250	65	969	2053 (atlama)
20	323	332	70	949	2257 (atlama)
25	405	414	75	975	2424 (atlama)
30	488	499	80	968	2580 (atlama)
35	571	584	85	972	2747 (atlama)
40	648	662	90	970	2912 (atlama)
45	735	753	95	959	3070 (atlama)
50	811	829	100	1009	3231 (atlama)

Çizelge 4.18 de 1860mm izolatör boyuna karşın atlamanın meydana geldiği yıldırım şiddeti 60kA olup, hat ve izolatör gerilimleri arasında 2 kat fark bulunmaktadır.

Çizelge 4.19. İzolatör boyu 2060mm ve Direncin 10 Ohm olması durumu

$I_{lightning}$ (kA)	İzolatör Gerilimi V_{STRING} (kV)	Hatta Okunan Gerilim V_{LINE} (kV)	$I_{lightning}$ (kA)	İzolatör Gerilimi V_{STRING} (kV)	Hatta Okunan Gerilim V_{LINE} (kV)
5	81	83	55	890	910
10	163	167	60	975	998
15	244	249	65	1033	1911 (atlama)
20	325	333	70	1040	2206 (atlama)
25	407	417	75	1058	2409 (atlama)
30	486	497	80	1035	2578 (atlama)
35	569	582	85	1030	2733 (atlama)
40	650	656	90	1029	2908 (atlama)
45	732	750	95	1069	3055 (atlama)
50	814	835	100	1078	3236 (atlama)

Çizelge 4.19’da izolatör boyu 2060mm’ye çıkarılmış olup atlama gerilimi ile izolatör gerilimi arasında %90 civarında fark görülmektedir. İzolatör boyunun artmasıyla atlamanın oluşacağı yıldırım şiddeti arasındaki doğrusal artış gözlemlenmektedir.

Çizelge 4.20. İzolatör boyu 2260mm ve Direncin 10 Ohm olması durumu

$I_{lightning}$ (kA)	İzolatör Gerilimi V_{STRING} (kV)	Hatta Okunan Gerilim V_{LINE} (kV)	$I_{lightning}$ (kA)	İzolatör Gerilimi V_{STRING} (kV)	Hatta Okunan Gerilim V_{LINE} (kV)
5	81	83	55	894	915
10	163	167	60	977	1000
15	244	250	65	1055	1079
20	325	333	70	1123	2104 (atlama)
25	406	416	75	1136	2357(atlama)
30	488	500	80	1180	2540(atlama)
35	569	582	85	1183	2736(atlama)
40	649	663	90	1186	2905(atlama)
45	733	750	95	1184	3078(atlama)
50	811	829	100	1189	3236(atlama)

Çizelge 4.20’de görüldüğü üzere 10ohmtopraklama direncinde ve 2260 mm izolatör boyunda 70kA’de atlama gözlenmiştir. %90 civarındaki atlama anındaki artış bu noktada da gözlenmiştir. Atlama gerçekleştikten sonraki değerlerde yani gerilimde yükselme gözlenmemektedir.

Çizelge 4.21. İzolatör boyu 2460mm ve Direncin 10 Ω olması durumu

$I_{lightning}$ (kA)	İzolatör Gerilimi V_{STRING} (kV)	Hatta Okunan Gerilim V_{LINE} (kV)	$I_{lightning}$ (kA)	İzolatör Gerilimi V_{STRING} (kV)	Hatta Okunan Gerilim V_{LINE} (kV)
5	81	83	55	894	915
10	163	167	60	977	1000
15	244	250	65	1055	1079
20	325	333	70	1138	1164
25	406	416	75	1220	2146 (atlama)
30	488	500	80	1230	2477(atlama)
35	569	582	85	1283	2685(atlama)
40	649	663	90	1284	2886(atlama)
45	733	750	95	1289	3071(atlama)
50	811	829	100	1287	3241(atlama)

Çizelge 4.21 de 2460 mm izolatör için atlama 75kA’de gerçekleşmiştir. 75 kA için 1200 kV mertebelerinde meydana gelen atlama gözlenmiştir.

Çizelge 4.22. İzolatör boyu 2660mm ve Direncin 10 Ohm olması durumu

$I_{lightning}$ (kA)	İzolatör Gerilimi V_{STRING} (kV)	Hatta Okunan Gerilim V_{LINE} (kV)	$I_{lightning}$ (kA)	İzolatör Gerilimi V_{STRING} (kV)	Hatta Okunan Gerilim V_{LINE} (kV)
5	81	83	55	894	915
10	163	167	60	977	1000
15	244	250	65	1055	1079
20	325	333	70	1138	1164
25	406	416	75	1217	1245
30	488	500	80	1305	2151 (atlama)
35	569	582	85	1331	2569 (atlama)
40	649	663	90	1364	2804 (atlama)
45	733	750	95	1392	3048 (atlama)
50	811	829	100	1394	3229 (atlama)

Çizelge 4.22’de 10 ohm toprak direncinde 80kA’de atlama meydana gelmiştir. Bu noktada tüm verileri değerlendirdiğimizde karşımıza çok net bilgiler çıkmaktadır. Çizelge 4.22’den geriye doğru gittikçe izolatör boyunun belirlenmesinde direk ayak direnci ve yıldırım akım şiddeti korelasyonu önem arz etmektedir. Sabit direnç değerinde yıldırım şiddetini arttırdığımızda izolatör ve hatta okunan gerilim artmaktadır. İzolatör boyunu arttırdıkça atlama olasılıkları düşmektedir.

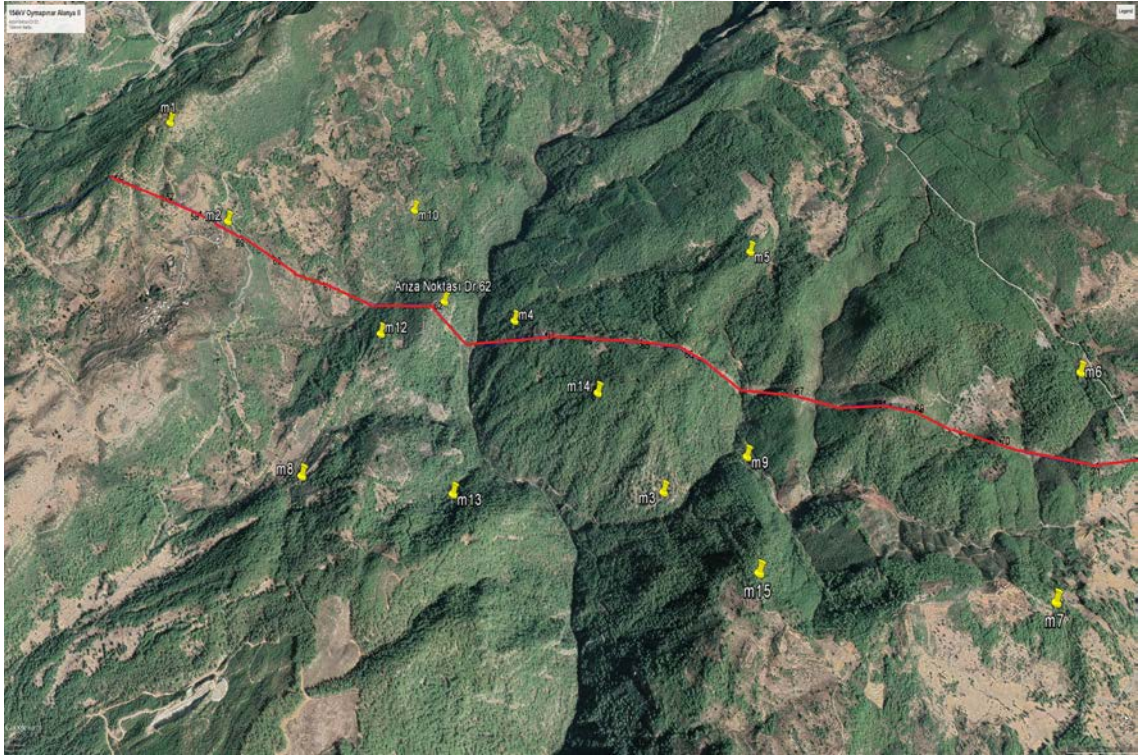
Bu durumu TEİAŞ 19.Bölge Müdürlüğünden aldığımız arıza anında meydana gelen akım ve gerilimlerle direğin ayaklarının toprak dirençlerini kullanarak simülasyonu devam ettireceğiz.

4.6. Örnek Arızalara Göre Simülasyon

Oluşturulan simülasyonun doğruluğunu kontrol etmek için 2 örnek arıza karşılaştırılması yapılmıştır. Bunlar 154kV 1272 MCM Oymapınar – Alanya II (Mahmutlar) ve 154kV 1272 MCM Alanya II (Mahmutlar) – Yalnızardıç enerji iletim hatlarıdır. 154kV 1272 MCM Oymapınar - Alanya II (Mahmutlar) ve 154kV 1272 MCM Mahmutlar - Yalnızardıç E.İ.Hatları Yük Tevzi Bilgi Sisteminden alınan arıza bilgileri ışığında 308.32 saat boyunca (261,32 saat – 47 saat) enerjisiz kalmıştır. Ayrıca yine bu iki hatta toplamda 144 sefer geçici ve kalıcı arıza yaşanmıştır (101-43). 154kV Mahmutlar - Yalnızardıç E.İ.H'nın Yalnızardıç TM kısmı havza TM olup 4 adet hidroelektrik santralde üretilen enerji Yalnızardıç TM’de toplanmaktadır. Üretilen 100MW gücündeki enerji bu hat vasıtasıyla Antalya Bölgesindeki enterkonnekte

sisteme dahil olmaktadır. 154kV 1272 MCM Oymapınar - Mahmutlar EİH ise Alanya bölgesini besleyen en önemli hattır. Bu hatta Mayıs – Ekim ayları arasındaki dönemde meydana gelebilecek herhangi bir arıza halinde Alanya bölgesini besleyen diğer hatlar talep edilen enerjiyi taşıyamamakta ve diğer hatlar aşırı akımdan açmaktadır. Aşırı akımdan açmadan kastedilen ise hattın iletkeninin akım taşıma kapasitesine yaklaşması veya üzerine çıkmasıdır. Bu durumda hattaki arıza ortadan kaldırılana kadar Alanya ve ahalisi enerjisiz kalmaktadır.

Çalışmanın bu kısmında Çizelge 4.23'te 154kV 1272 MCM Oymapınar – Mahmutlar E.İ.Hattının yıldırım alan ve en fazla açmanın olduğu kilometrelere isabet eden direk numaraları ve bu numaralara ait ayak topraklama dirençleri verilmiştir. Şekil 4.69'da arıza bölgesinin görseli ve bölgede yıldırımların nerelere düştüğü bulunmaktadır. Çizelge 4.24 ise arıza tarihinde hattın ilgili kısmında olan ve MGM 4.Bölge Müdürlüğünden alınan yıldırım bilgileri yer almaktadır.



Şekil 4.69. 154 kV Oymapınar – Alanya II EİH arıza noktası

Çizelge 4.23. 154kV 1272 MCM tek devre Oymapınar - Mahmutlar enerji iletim hattı yıldırım alan bölgede kalan direklerin direnç değerleri

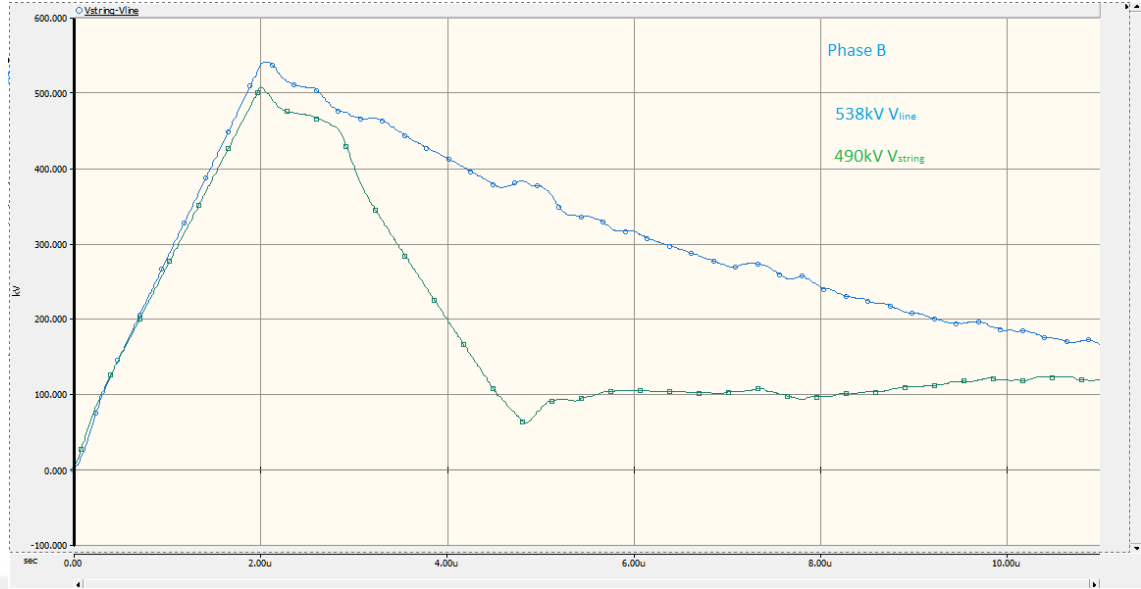
Direk No	A	B	C	D	Reş	Zemin
41	247	528	460	153	68.25	Parça Kayalık
53	68	73.6	67.7	79.7	17.98	Kayalık
54	207.1	388	426	yok	102.52	Parça Kayalık
55	90	218.7	127.9	442	38.81	Toprak Kayalık
56	116.5	791	366.1	141	50.83	Toprak Kayalık
57	241	78.1	47.1	193.7	23.06	Toprak Kayalık
58	81.8	0	47.8	0	30.17	Kayalık
62	3134	1211	398.8	326.4	148.9	Kayalık
92	161.9	175.4	74.7	117.5	29.6	Taşlı Toprak
93	43.2	209.1	173.1	74.4	21.2	Toprak Kayalık
104	111.9	94	121.1	89.4	25.62	Taşlı Kayalık
112	46.4	37.25	40.9	48.8	10.71	Toprak
116	(+)4000	891	646	(+)4000	315.43	Kayalık
124	219.3	0	369.3	0	137.59	Kayalık
125	VAR	VAR	VAR	VAR	158.3	Kayalık
130	151.9	3012	(+)4000	(+)4000	136.7	Kayalık

Çizelge 4.24. 154kV 1272 MCM Oymapınar - Mahmutlar enerji iletim hattı için alınan meteorolojik bilgiler

Olayın Zamanı Yıl/Ay/Gün Saat:Dakika	Enlem WGS84	Boylam WGS84	Yükseklik (km)	Akım (kA)	Mesafe (km)
15.01.2019 08:55	36.76449600	31.74172500	7	12	9
15.01.2019 08:57	36.75822800	31.74243700	10	21	8.1
15.01.2019 09:52	36.73052300	31.75985800	0	23	3.7
15.01.2019 11:54	36.74269200	31.78251600	8	25	3.3
15.01.2019 11:54	36.73631100	31.77498900	10	10	5.7
15.01.2019 13:35	36.71871200	31.78722200	0	20	6.7
15.01.2019 13:42	36.71270200	31.77373900	8	20	6.8
15.01.2019 14:56	36.74308600	31.73878100	0	11	9.1
15.01.2019 16:53	36.71716600	31.76603300	0	72	9.4
15.01.2019 20:17	36.75418900	31.75660600	4	151	4.6
15.01.2019 21:30	36.71045100	31.79946000	0	12	3.7
15.01.2019 21:32	36.75349700	31.73159000	11	51	3.3
15.01.2019 21:43	36.73688600	31.75698200	0	17	3
15.01.2019 21:46	36.74300600	31.76290700	2	53	0.7
15.01.2019 21:52	36.72284700	31.75935000	0	12	7.2

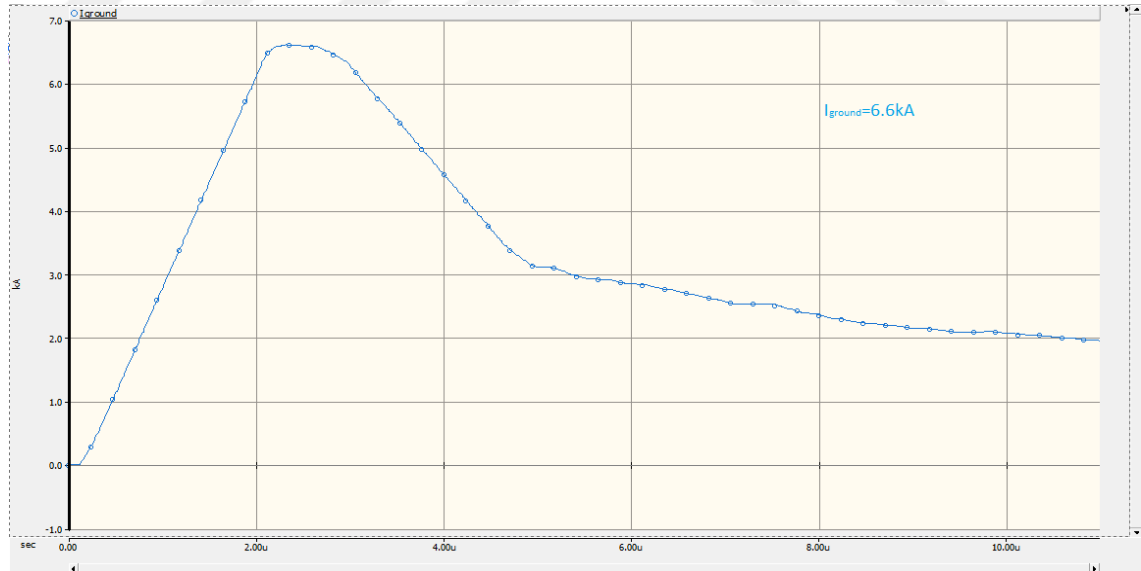
Yük tevzi bilgi sisteminden alınan 154kV Oymapınar – Mahmutlar E.İ.Hattına ait arıza bilgilerine göre; 01/05/2019 tarih 11:54'te meydana gelen arızanın türü A-C Faz Topraktır. 5 direk geride transpozisyon bulunmakta olup, A faz bu direkte, faz yerleşim sırası olarak orta konsolda kalmaktadır. Mesafe Koruma Rölesine göre Arıza km'si 18.23km'dir. Arıza noktasında direk tip ve boyları PB+12 yükseklik 31 metredir. Direkler arası mesafe ise 61-62 arası 380metre, 62-63 arası 425 metredir. 62 no'lu direğin eşdeğer ayak direnci 148.9 Ω , İzolatör Boyu: 1460mm'dir.

Şiddeti 10 ve 25 kA olan verilen direk koordinatlarına yakın 2 adet yıldırım tespit edilmiştir. Verilen bilgiler ışığında 10kA için simülasyon çalıştırılrsa;



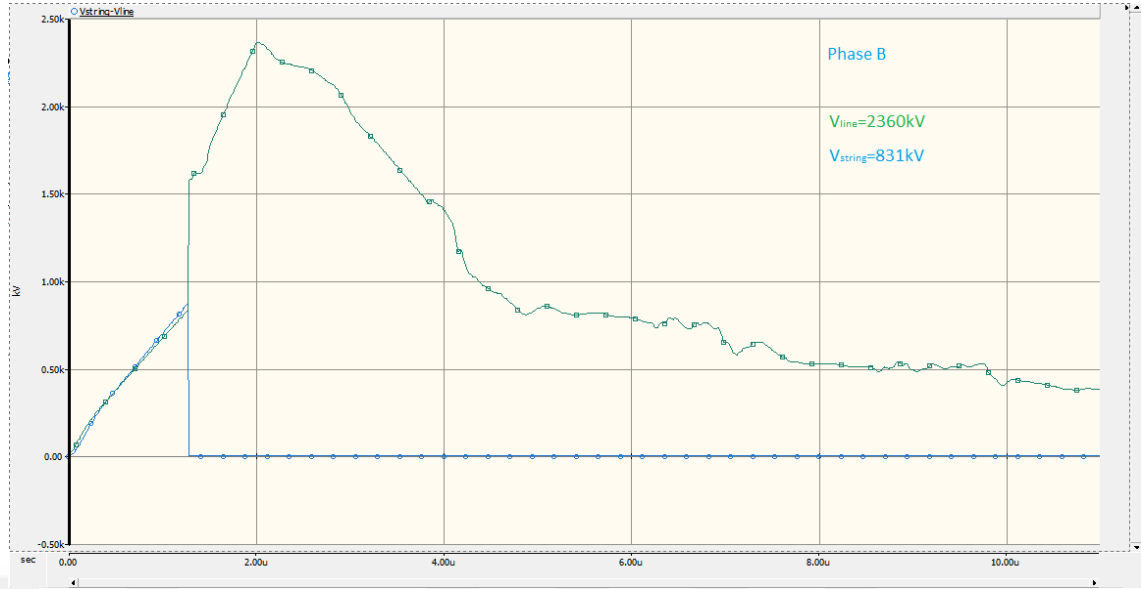
Şekil 4.70. Yıldırımın 10kA olduğu an için gerilim incelemesi

Şekil 4.70 incelendiğinde simülasyona göre arıza anında hatta 538kV izolatörde 490kV gerilim indüklenmiştir. Şekil 4.71'e göre ise simülasyon anında 6.6kA'lık arıza akımının toprağa aktığı tespit edilmiştir. Yapılan incelemede 10kA'lık yıldırım şiddeti esnasında hatta herhangi bir atlamanın meydana gelmediği görülmüştür.



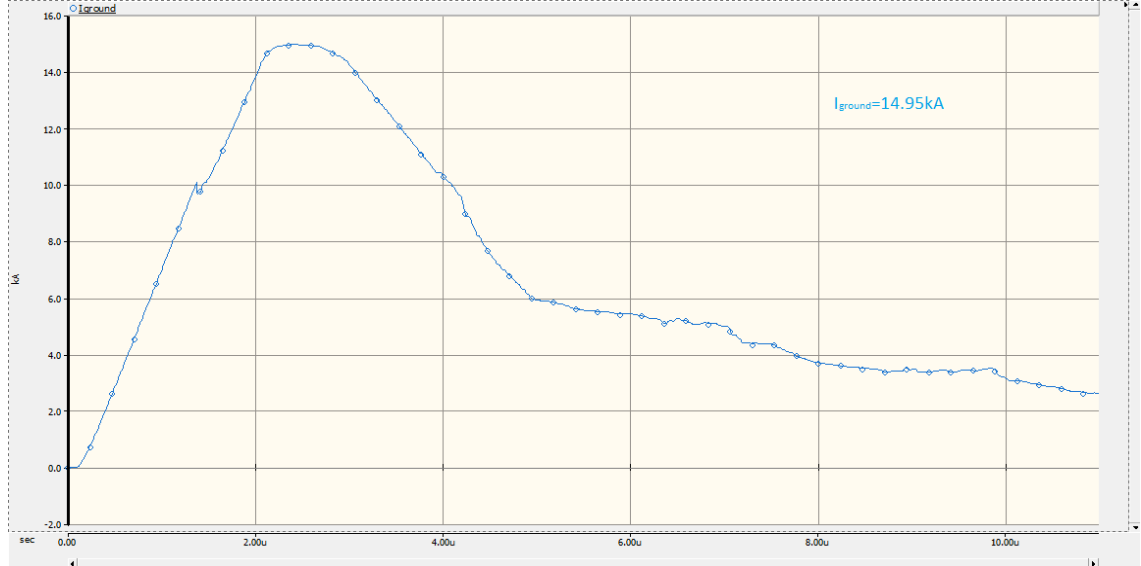
Şekil 4.71. Yıldırımın 10 kA olması halinde toprağa akan akım

Bu noktada yine meteorolojiden alınan diğer yıldırım bilgisi olan 25kA için simülasyon çalıştırıldığında;



Şekil 4.72. Yıldırımın 25kA olduğu an için gerilim incelemesi

Şekil 4.72'ye göre simülasyon sonucu hatta okunan pik gerilim 2360kV, izolatörde ise 831kV gerilim okunmuştur. Simülasyon sonuçlarına göre atlama meydana gelmiştir. Şekil 4.73 değerlendirildiğinde arıza anında 14.95kA'lık akım okunmuştur.



Şekil 4.73. Yıldırımın 25kA olması halinde toprağa akan akım

25kA şiddetindeki yıldırım için atlama meydana gelmiş ve kalıcı arıza oluşmuştur. Hatta 2360kV seviyelerinde gerilim indüklenmiş 871kV gerilim seviyesinde izolatörde atlama oluşmuştur. Bu esnada arıza akımı olarak 14.95 kA okunmuştur. Simülasyondan aldığımız veri ile Şekil 4.74 Mesafe koruma rölesinden aldığımız akım bilgilerini karşılaştırdığımızda; Mesafe koruma rölesinden alınan verilere göre hatta 940kV civarında bir gerilim arıza esnasında 6.9kA'lık bir akım

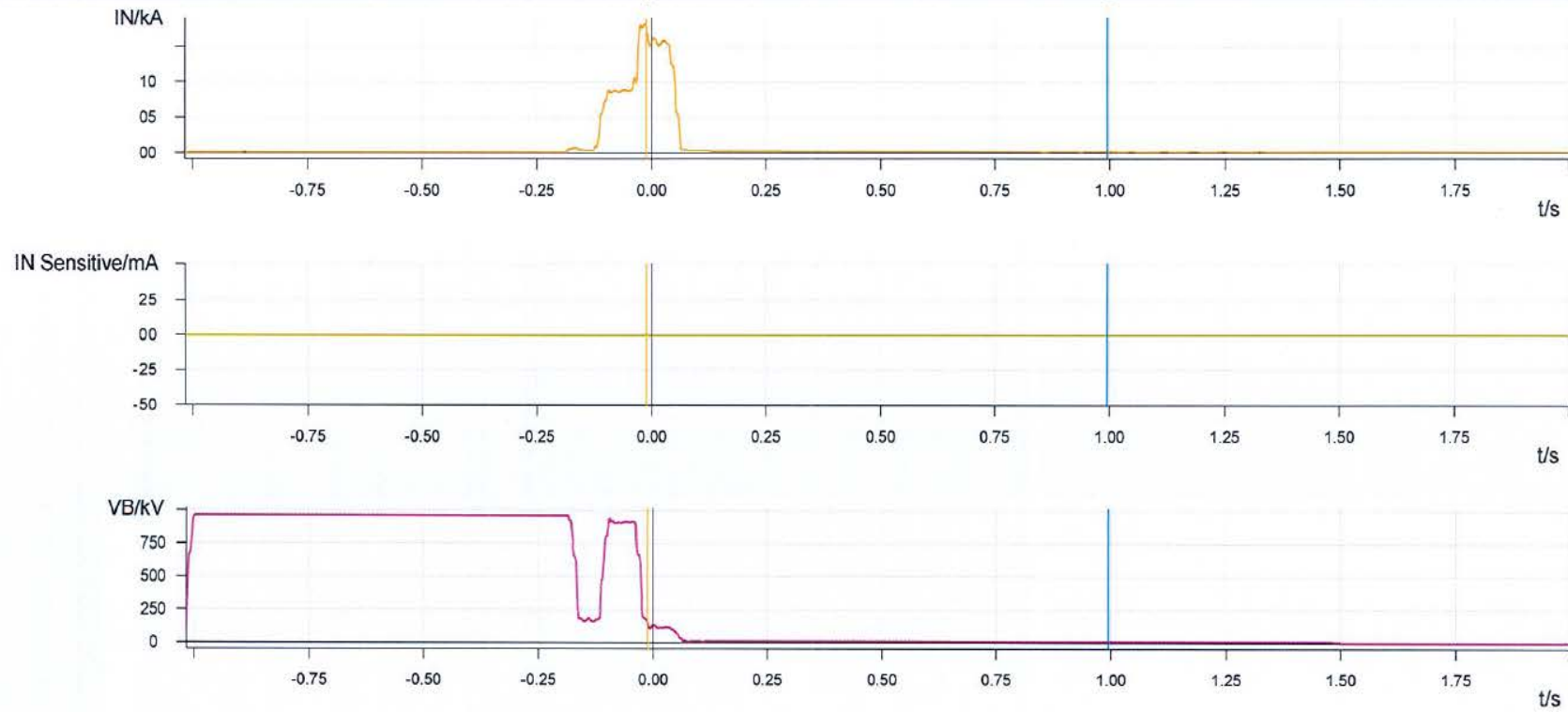
toprağa akmıştır. %7'lik hata payı ile simülasyon tamamlanmıştır. MGM verilerine göre belirlenen koordinat aralığında arıza noktası etrafında ortalama olarak 36.5 kA civarındadır. Bu değer baz alındığında 1660mm izolatör boyu için 19 Ω üzerinde toprak dirençlerinde söz konusu bölgede açmaların yaşanması kaçınılmazdır. Sonuç olarak söz konusu koordinatlarda kalan hattın bulunduğu kısımdaki direklerin ayak dirençlerinin hiçbir şekilde 19 Ω 'u geçmemesi gerekmektedir. Aksi halde bu hatta yıldırım kaynaklı arızalar devam edecektir.



MAHMUTLAR TM

- 3 -

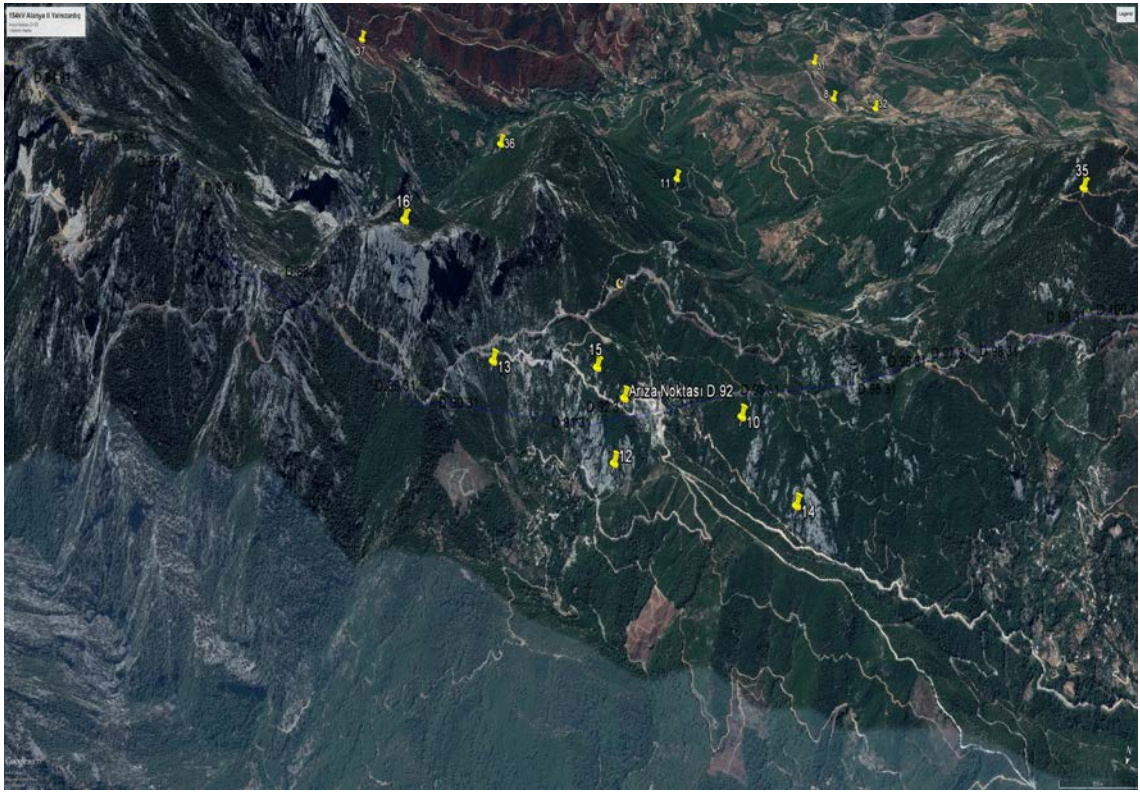
05.01.2019 / 11:54:40.926



Şekil 4.74. Mesafe koruma rölesinden alınan arıza kaydı

Atlamanın önüne geçebilmek için 25kA yıldırım şiddetinde bu noktadaki direğin ayak direncinin 60Ω değerinin üzerine çıkmaması gerekir. Ayrıca direğin bulunduğu noktadaki yıldırım şiddetleri 12 ile 151 kA arasında değişmektedir. İlgili bölgede 151 kA şiddetindeki akım bir defaya mahsus görülmüş olup göz ardı edilirse yıldırım ortalaması hattın geneli için 60kA şiddetindedir. Bu bölgede direk ayak direnci 5Ω 'un üzerinde olursa hatta açma meydana geleceği aşîkârdır.

Bir diğer örnek arıza incelemesi ise 154 kV 1272 MCM Mahmutlar – Yalnızardıç E.İ.H. hakkındadır. Üstteki örnekte olduğu gibi Çizelge 4.25’de verilen MGM 4.Bölge Müdürlüğü’nden alınan koordinat temelli akım bilgileri ve Çizelge 4.26’da TEİAŞ 19.Bölge Müdürlüğü’nden alınan topraklama dirençleri ışığında değerlendirme yapılmıştır. Şekil 4.75’de arıza noktasının görseli ve yıldırım düşen noktalar yer almaktadır.



Şekil 4.75. 154kV Alanya II -Yalnızardıç EİH arıza noktası

Çizelge 4.25. 154kV 1272 MCM Mahmutlar - Yalnızardıç EİH için alınan meteorolojik bilgiler

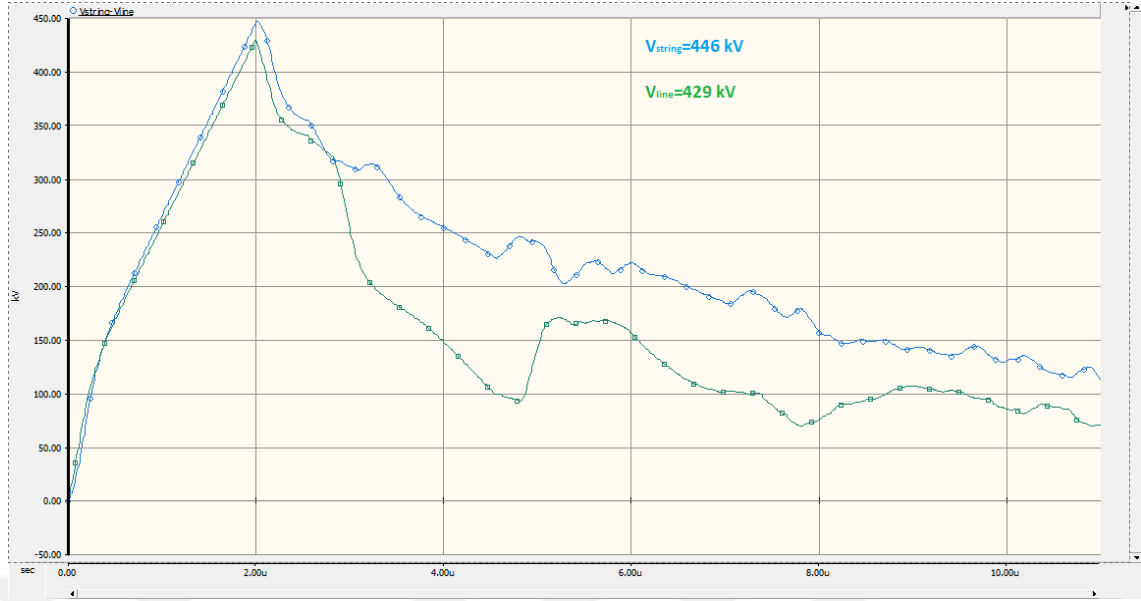
Olayın Zamanı Yıl/Ay/Gün Saat:Dakika	Enlem WGS84	Boylam WGS84	Yükseklik (km)	Akım (kA)	Mesafe (km)
05.01.2019 10:27	36.54657500	32.30384600	0	12	8
05.01.2019 10:42	36.52908400	32.30387500	14	21	7.1
05.01.2019 11:34	36.51991700	32.32489200	0	25	2.7
05.01.2019 11:34	36.52291700	32.28689200	0	10	4
05.01.2019 13:10	36.52391700	32.27789200	0	13	3.9
05.01.2019 13:10	36.34870000	32.22880000	0	59	2.9
05.01.2019 13:31	36.54604200	32.28069400	11	13	8
05.01.2019 13:31	36.52991700	32.25089200	11	10	5.7
05.01.2019 15:46	36.52391700	32.21089200	0	20	7.3
05.01.2019 15:51	36.52091700	32.20889200	0	20	2.9
05.01.2019 15:56	36.52591700	32.16989200	5	11	9.5
05.01.2019 16:18	36.56591700	32.27889200	0	72	7.4
05.01.2019 21:15	36.58091700	32.26989200	0	110	4
05.01.2019 21:20	36.57791700	32.27789200	0	12	3.7
05.01.2019 21:20	36.53479700	32.21928300	0	51	3.3
05.01.2019 21:21	36.51494700	32.20119500	0	17	3
05.01.2019 21:23	36.51401400	32.20693200	9	53	0.8
05.01.2019 22:16	36.51207500	32.21955800	0	12	4.7

Çizelge 4.26. 154 kV 1272MCM Tek Devre Yalnızardıç - Mahmutlar enerji iletim hattı yıldırım alan bölgede kalan direklerin direnç değerleri

Direk No	Ayak Topraklama Direnci (Ω)					Zemin
	A	B	C	D	Reş	
82	73.3	64.8	67.2	52.5	15.87	Kayalık
83	272.3	220.7	100.8	153.8	40.6	Kayalık
84	38.35	43.3	62.4	57.5	12.1	Toprak
85	579	155.3	391.9	337.9	73.11	Kayalık
86	2689	1384	681	552	288.6	Kayalık
87	232.9	312.5	173.1	273.4	59.07	Kayalık
88	128.3	149.9	106.9	147.8	32.7	Toprak
89	197.7	332.9	198.8	291.5	60.52	Parçalı Kayalık
90	95	91.3	83.7	49.4	23.17	Kayalık
91	66.5	57.2	128.3	107.4	20.15	Parça Kayalık
92	20.61	Yok	39.24	Yok	13.51	Toprak
93	28.23	36.87	49.1	Yok	12.06	Toprak
124	45.7	97.5	48.7	70.5	14.95	Parça Kayalık
125	Yok	Yok	24.01	Yok	24.01	Taşlı Toprak
126	99.2	122.5	121.9	54.8	22.37	Kayalık
127	42.2	Yok	28.88	Yok	17.14	Kayalık
128	109.5	Yok	85.4	Yok	47.98	Kayalık
129	129	32.49	23.67	66.7	10.44	Kayalık

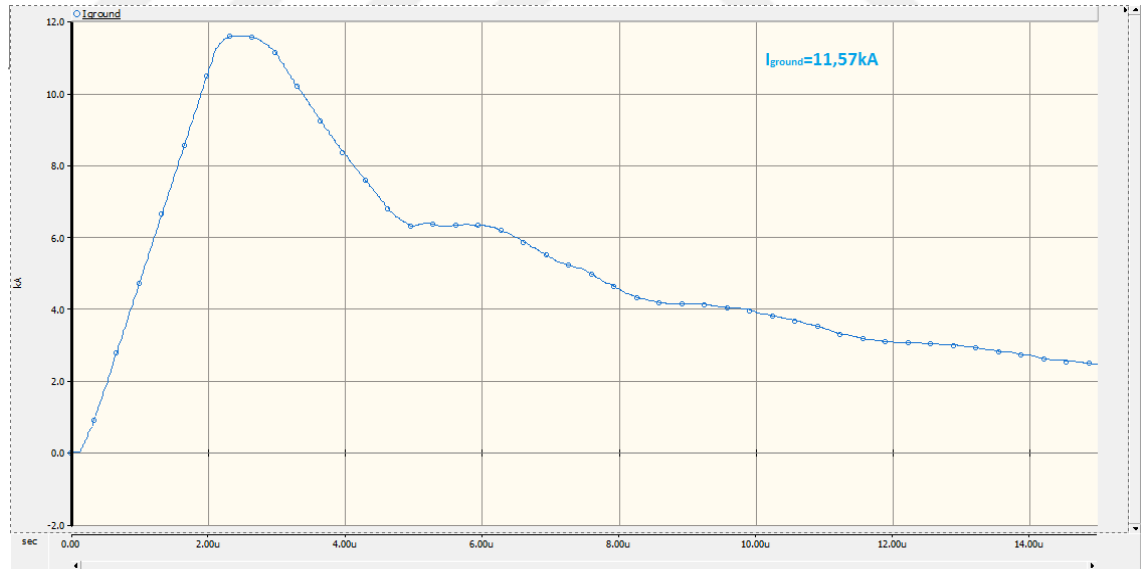
Arıza Tarihi ve Saati 05.01.2019 13.10'dur. Arıza Türü: A-C Faz Toprak, Mesafe Koruma Rölesine göre Arıza km'si 16.47km'dir. Direk Tip ve boyları arıza bilgisine göre Direk tipi PE+6 (ilave ayaklı) yükseklik 30 metredir. Direkler arası mesafe: 88-89 arası 350metre, 89-90 arası 800 metredir. Direğin Eşdeğer Ayak Direnci: 60.52 Ω İzolatör Boyu: 1660mm'dir.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında 13kA için simülasyon çalıştırıldığında;



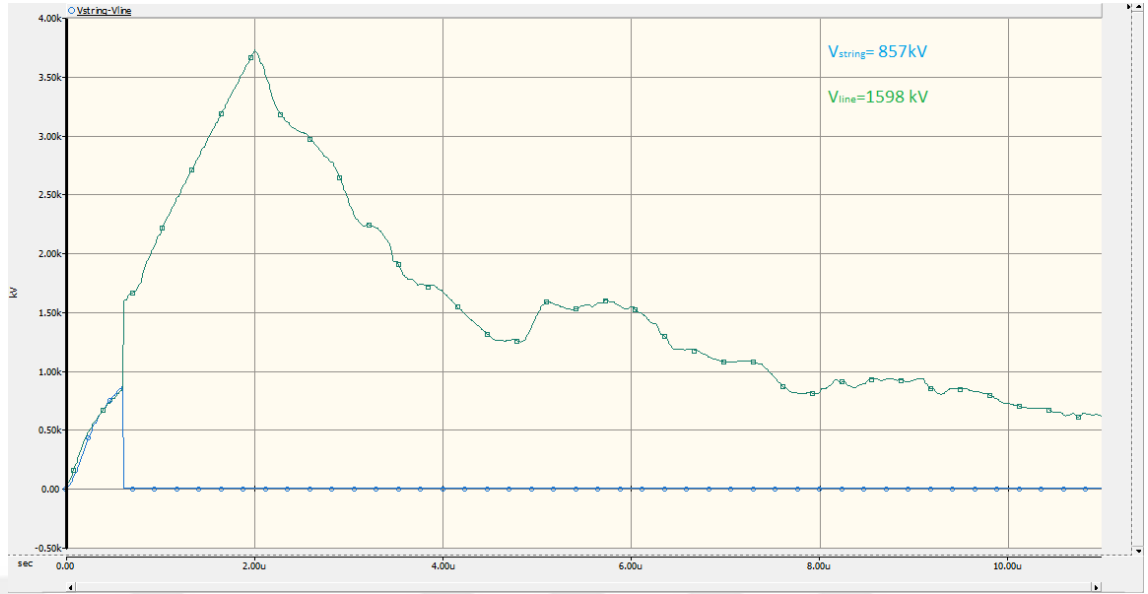
Şekil 4.76. Yıldırımın 13kA olduğu an için gerilim incelemesi

Şekil 4.76’da 13kA’lık yıldırım için gerilim incelemesi yapıldığında; hatta 446kV izolatörde 429kV gerilim simülasyondan okunmuştur. Şekil 4.77’de ise arıza anında simülasyona göre 11.57kA’lık akım toprağa akmaktadır.



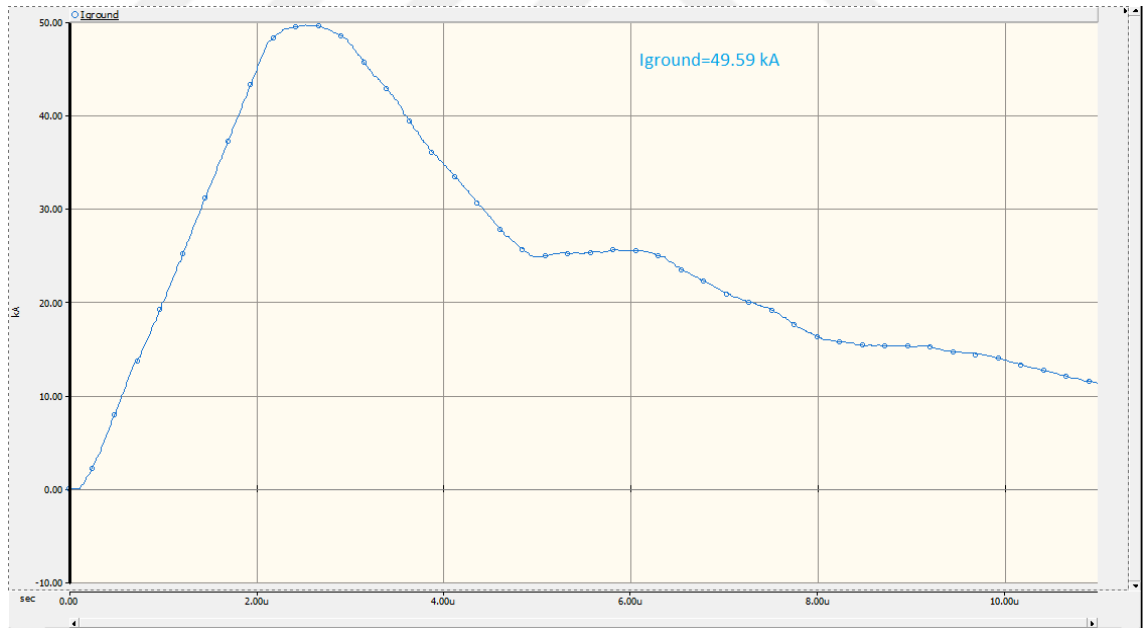
Şekil 4.77. Yıldırımın 13kA olması halinde toprağa akan akım

60.52 Ω ayak direncine sahip 89 no’lu direğin 13 kA yıldırım akım şiddetine maruz kalması halinde herhangi bir açma meydana gelmemiştir. Meteoroloji verilerine göre aynı saatte 2 adet yıldırım ölçülmüştür. Ölçülen diğer yıldırım verisine göre 59kA için simülasyon yapıldığında çıkan sonuçlar:



Şekil 4.78. Yıldırımın 59 kA olduğu an için gerilim incelemesi

Şekil 4.78’de simülasyon sonucuna göre 59kA için gerilim incelemesi yapıldığında, hatta arıza anında gerilim pik değeri 1598kV izolatörde 857kV gerilim okunmuştur. Simülasyon sonucuna göre açmanın meydana geldiği yıldırım şiddeti 59kA’dır.



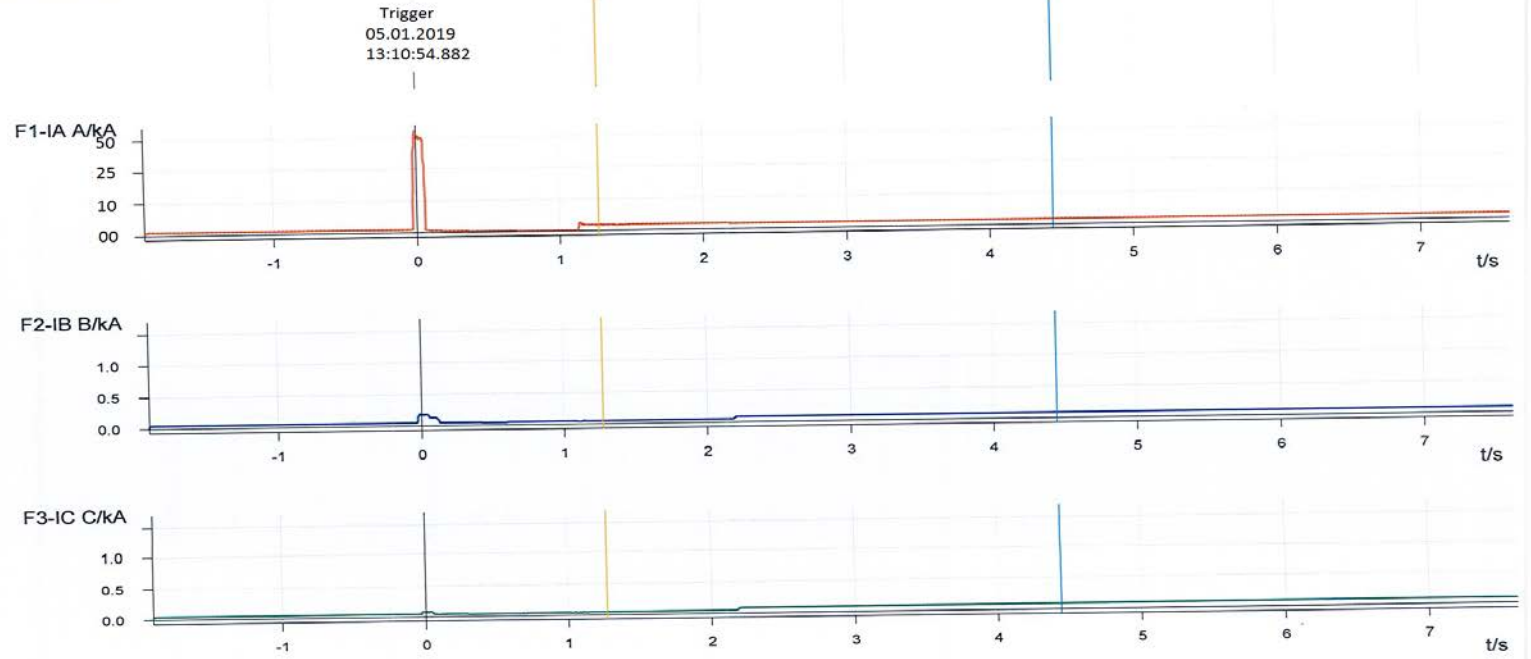
Şekil 4.79. Yıldırımın 59kA olması halinde toprağa akan akım

Görüldüğü üzere 59 kA yıldırım düştüğünde bu direğimizde indüklenen gerilim 3.7MV mertebelerine kadar çıkmakta arıza esnasında ise izolatördeki gerilim 857 kV, hattaki gerilim ise 1.6MV mertebelerine çıkmaktadır. Simülasyonda direktten toprağa akan akım Şekil 4.76’ya göre 49.59 kA’dır. Bu arıza değerlerini arıza esnasında rölelere

154kV Mahmutlar - EIH

- 2 -

05.01.2019 / 13:10:54.882



01.03.2019 / 10:09:21
SIGRA 4.59

2.CFG

Şekil 4.80. Mesafe koruma rölesinden alınan arıza kaydı

60kA'lık yıldırım için direğin en fazla ayak direnci 5Ω olmalıdır. Aksi halde atlama meydana gelecek ve enerji akışında kesinti meydana gelecektir. Bölgedeki yıldırımların aritmetik ortalamasını aldığımız takdirde bile 30kA civarında bir değer çıkmakta ve bu değerde bile 60.52Ω olan direk ayak topraklama direncinin 43Ω 'un altında olması gerekmektedir. Bu iki arıza karşılaştırıldığında toprak direncinin yüksekliği bize yıldırım sonucunda oluşan gerilimin ne kadar yükselebileceğine dair somut veriler sağlamaktadır. Bu durum ayrıntılı olarak tartışma kısmında değerlendirilmeye alınmıştır.



5. TARTIŞMA

Bu çalışmada yıldırımın oluşturduğu elektromanyetik etki sonucu oluşan aşırı gerilimler incelenmiştir. Aşırı gerilimlerin geçici (transient) olarak ani artışları sonucu yaşanan atlamalarda direkt indüklenen gerilimin iletkene atlaması üzerine çalışılmıştır. Bu çalışma yapılırken TEİAŞ sisteminde faal olarak kullanılan direk modelleri baz alınmıştır. Bu modeller PSCAD ortamına aktarılmıştır. Çalışmanın ilk kısmında direk ayak topraklama direnci ve izolator boylarıyla yıldırım arasındaki bağıntılar masaya yatırılmıştır. Yapılan çalışmada hat ve yıldırım devresi hazırlanarak koruma teline yıldırımın düşmesi canlandırılmıştır.

Hazırlanan simülasyonda yıldırım değerleri 5-100kA arasında hatta uygulanmıştır. Bu yıldırım şiddetlerine göre izolator boyları 1460mm'den başlayarak 200mm arttırılmış ve oluşan gerilim ve akım değerleri incelenmiştir. Hangi direk ayak topraklama dirençlerinde atlamaların meydana geldiği görülmüştür. Hatta ve direktte oluşan aşırı gerilim miktarlarındaki değişiklikler incelenmiştir. Akım miktarı sabit tutularak izolator boyu değiştirilerek inceleme detaylandırılmıştır. Sabit akım değerinde izolator boyu arttırılarak atlamanın meydana geldiği direnç ve hatta okunan gerilim değerleri belirlenmiştir. İzolator boyu kademeli arttırılarak hangi boydaki izolatorde ne kadar gerilim yükselmesinde atlamanın meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Çalışmanın özellikle izolatorlerle ilgili kısmında çok ilginç bilgilerle karşılaşmıştır. Bunların başında 1460mm boyundaki izolatorler gelmektedir. Bu boydaki izolatorlerin Antalya gibi yoğun yağış ve fırtına alan bölgelerde kesinlikle kullanılmaması gerekmektedir. En küçük yıldırım şiddetinde dahi atlama yapan bu izolatorlerin sistemden çıkartılması ya da en azından ilave eklemeler yaparak atlama aralığını arttırma yoluna gidilmelidir. 1460mm izolator boyunda 30kA yıldırım şiddetinde 33 Ω 'da açma meydana gelmektedir. Bu durum tüm şartlar uygun iken çıkan sonuçtur. Uygun şartla anlatılmak istenen, direk gövdesinden ve koruma teli veya OPGW bağlantı noktasından, topraklama kazığının direk ayağına bağlantı noktasından ilave direnç gelmeme halidir. Direklerin paslanma veya korozyonu, kılçak çatlaklar gövde direncini arttırmaktadır. Bağlantı noktalarında oluşan boşluklar önlenmezse yine ilave direnç noktası oluşturmaktadır. Bu noktaların dirençleri takribi olarak eklendiğinde 20 Ω 'da atlama meydana gelebilecektir.

Çalışmada izolator boyları sabit tutularak yıldırım şiddeti kademeli olarak arttırılmıştır. Artan yıldırım şiddetine göre direk ayak toprak direnci ve hatta okunan gerilimler incelenmiştir. Bir diğer kısımda direğin ayak direnci ve izolator boyu sabit tutulmuş, yıldırım şiddeti kademeli olarak arttırılmıştır. Bu noktada yıldırımın artmasına bağlı olarak izolator ve hatta oluşan gerilim değerleri incelenmiştir. Atlamanın olduğu noktalar belirlenmiştir.

Sırasıyla değerlendirdiğimizde yıldırımın düşmesine bağlı olarak düşük dirence sahip direklerle 130kA yıldırım uyguladığımızda indüklenen gerilimin 1.7MV iken bu değer direnç arttıkça 14 MV mertebelerine çıktığını gözlemlenmiştir. Direktte oluşan istenmeyen gerilimin direnç ve yıldırım şiddetine doğrudan bağlı olduğunu ve atlamanın hangi aralıklarda oluşabileceğinin analizleri yapılmıştır.

Şu ana kadar ki bulgulardan ortaya çıkan ana tartışma konusu yıldırımın düşmesi değil düştükten sonraki davranışdır. Yıldırımın düşmesi şu anda mevcut teknoloji ile önüne geçilebilecek bir durum değildir. Önemli olan yıldırımın davranışının oluşturduğu zararlı etkilerin en başında direk ayak topraklama direnci bulunmaktadır. Direnç ne kadar yüksekse oluşan potansiyel de o derece yüksektir. Elektrik akımının davranış biçimi en kolay yolu seçmesidir. Önüne çıkabilecek ilk engelde gördüğü en düşük dirençten geçmeye çalışacaktır. Bu durumda direncin yüksek olduğu yerde oluşan yüksek potansiyel gereği izolatörden iletkenine atlamaya çalışması öngörülebilir bir davranıştır. Dirence müdahale edilemediği noktalarda atlamaların değerlendirilmesinde karşımıza izolatör boyları çıkmaktadır. İzolatör boylarını arttırdıkça atlama gerilimlerinde yükselme gözlemlenmiş ve direk ayak direncinin de daha yüksek değerlerde olmasına müsaade etmiştir. Yani yüksek topraklama direncine sahip noktalarda daha uzun izolatör kullanılması halinde açmaların önüne geçilebilir.

Bulgular kısmında örnek olarak alınan 2 arıza karşılaştırıldığında, toprak direncinin yüksekliği ile yıldırım kaynaklı oluşan gerilim arasındaki doğru orantı görülmektedir. 154kV Oymapınar - Mahmutlar EİH için 25kA şiddetindeki yıldırımda 148 Ω dirençte hatta indüklenen gerilim arıza esnasında 1600kV seviyelerindedir. 154kV Mahmutlar - Yalnızardıç EİH için 59kA yıldırım şiddetinde 60 Ω ayak direncinde de 1600kV gerilim okunmuştur. Görüleceği üzere 25kA yıldırım kaynaklı indüklenen gerilim ile 59kA için indüklenen gerilim yaklaşık olarak aynıdır. 148 Ω 'da daha düşük şiddette yıldırım olmasına rağmen 60 Ω direnç seviyesindeki 59kA'lık yıldırım şiddetiyle aynı gerilim seviyelerine ulaşmıştır. Bu noktada daha yüksek şiddete sahip yıldırım ile daha düşük şiddete sahip yıldırımın aynı gerilim seviyelerine çıkmasının sebebi ayak dirençleridir. Arıza esnasında temel olarak incelenmesi gereken unsur direk ayak toprak geçiş dirençlerinin olduğu aşıkardır.

Çizelge 4.23 ve çizelge 4.26'da verilen 154kV 1272 MCM Oymapınar – Alanya II E.İ.H.'nın ve 154kV 1272 MCM Alanya II – Yalnızardıç E.İ.H.'nın arıza noktalarındaki toprak dirençleri incelendiğinde hatların 2'sinde de çok yüksek direnç değerlerinin olduğu görülmektedir. Çizelge 4.23'deki direnç değerlerinin ortalaması 82.2 Ω iken, çizelge 4.26'daki direnç değerlerinin ortalaması 43.8 Ω 'dur. Çizelge 4.23'ün kaynak olarak alındığı 154kV 1272 MCM Oymapınar- Alanya II EİH 101 kez, çizelge 4.26'nın kaynak alındığı 154kV 1772 MCM AlanyaII – Yalnızardıç EİH 43 kez arızadan açma yapmıştır. Toplamda 308,32 saat (261,32 - 47) boyunca enerjisiz kalan bu iki hat için diğer tüm şartlar göz ardı edilse bile (hatalı işletme, iklim, coğrafi koşullar, buz yükü bölgeleri, dış kaynaklı müdahaleler, terör, avcı vb) sadece toprak dirençleri üzerinden bile bu tahlil yapılabilir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmanın temel amacı yıldırım kaynaklı oluşan istenmeyen gerilimleri inceleyip olası çözüm önerileri getirebilmektir. Yapılan devre analizlerinde ve mevcut arıza bilgileri kullanılarak yapılan incelemelerde hatta yaşanan arıza değerlerine yakın değerler elde edilmiş ve çözüm önerileri sunulmuştur. Bu çözüm önerilerinin en başında mevcut 154kV sistemde kesinlikle 1460 mm uzunluğunda izolatör kullanılmamalıdır. Geçmiş yıllarda bu modelde kullanılan izolatörler ivedilikle değiştirilmelidir. 50kA yıldırımında direnç 7Ω olduğu anda açma gözlenmiştir. Değiştirme durumunda problem yaşanıyor ise (yüksek maliyet vb.) basit hırdavat çözümleriyle ilave cam izolatör ekleyerek atlama mesafesi en az 200 mm veya daha fazlası olacak şekilde arttırılmalıdır.

İzolatör boylarının 1660 mm olduğu noktalarda ise topraklama dirençleri en az 18Ω veya altına indirilmelidir. Bu durumun olabileceği en sağlıklı alt değer ise 5Ω olmalıdır. Bu ayak direnç limiti sadece bir direk için değil hattaki tüm direkler için öngörülmelidir. Elbette bu noktada direğin dikileceği bölge devreye girmektedir. Direğin dikildiği alanda her zaman düşük toprak direnci bulmak mümkün değildir. Topraklama direnci için ilave kimyasal, ilave topraklama kazığı, sondaj, hat yakınında toprak bulunan noktaya ilave pylon vb. gibi çözümler mevcuttur. Bu noktada tüm bu çözümler dışında eğer direk ayak direncinde herhangi bir iyileştirme sağlanamamışsa izolatör boyları devreye girmektedir. İzolatör boyunun özellikle zeminin kötü olduğu noktalarda bilinçli bir şekilde uzun seçilmesi gerekmektedir.

İzolatör boyunun uzun seçilmesi ise bir başka sorunu karşımıza getirmektedir. İzolatör boyunun uzatılması halinde iletken ile direğin gövdesi veya diğer konsol arasında kalan mesafenin azalması söz konusudur. Direkte oluşabilecek manyetik alan sonucu hatta indüklenerek gerilim havanın delinmesiyle direğin gövdesine atlayabileceği durumlar söz konusu olabilecektir. Bu durum da ayrıca bir arıza sebebi oluşturacaktır. İzolatör boylarını uzatırken bu duruma şiddetle dikkat edilmelidir.

İzolatör boylarını uzatırken karşımıza çıkan direk sorunu ile ilgili olarak kullanılan kısıtlı tip ve gövdedeki direklerde çeşitliliğe gidilmelidir. Mevcut 154kV sistemimizde tek devre 1272 MCM iletken için sadece PA serisi (Flat Tower) direk tipleri bulunmaktadır. Ek-4'de bu tip direkte izolatör uzatılması sonucu oluşabilecek yaklaşım mesafeleri gösterilmiştir. Yine 154kV sistemde çift devre hat projelendirilecek olursa, karşımıza 2 farklı tip direk çıkmaktadır. Bunlar ise CP serisi ve 2FA serisidir. Bu direklerde de konsollar arası mesafe 4100 - 4200 mm civarındadır. Bu direklerin hiçbirisi izolatör uzatılması için tasarlanmamıştır. İzolatörü 1860mm'ye uzattığımızda herhangi bir sorun olmamaktadır fakat bu boyu 200mm daha uzatıp 2060 mm boyuna geçtiğimizde iletken ile altında kalan konsol arası mesafe yaklaşık olarak 1300 mm'ye inmektedir. Ek-5'de çift devre direkler için izolatör boyunun uzatılması halinde atlama yaklaşım mesafeleri direk projesi üzerinden gösterilmiştir. Mühendislik temelinde değerlendirecek olursak mevcut 154kV direk tipleriyle değil ancak 380kV gerilim için tasarlanan direk tipleriyle bu sorun engellenebilecektir. Bu noktada direklerde çeşitliliğe gidilmesi gerekmektedir. Mühendisliğin temelinde olan maliyet analizi de burada karşımıza çıkmaktadır. Sistemimizde kullanılan 1272 MCM iletken için A tipi zayıf taşıyıcı direk 3.5 ton ağırlığa sahip iken 380kV direk kullandığımızda bu ağırlık 6 tona çıkmaktadır. Ek-6'da direk tonajları hakkında ayrıntılı bilgi mevcuttur. Bu artış durdurucu direklerde çok daha fazla olmaktadır. 154kV'dan 380kV direğe geçiş yerine

230kV direk tipleri de sistemimizde rahatlıkla kullanılabilir. Ara gerilim seviyelerine göre direk modelleri ile zenginleştirilmiş sistemde, bu maliyet artışları da uzun vadede azaltılabilecektir.

Tez üzerinde çalışılırken karşılaşılan bir diğer sorun da direklerin gövdelerine ait dirençtir. İdeal durumda direklerin gövdelerine ait dirençler hesaba katılırken sistemde kullanılan direklere ait standartlaştırılmış direnç değerleri bulunmamaktadır. Programa girilen bilgiler ışığında programın kullanıcıya sunduğu direğin direnci kullanılmaktadır. Bazı direklerimizde direğin gövdesinden kaynaklı direnç değeri, toprak direnci 0Ω bile olsa 20kA'lık bir yıldırım şiddetinde hatta açmalar meydana getirebilmektedir. Bu durum için de yine mevcut sistem içinde kullanılmakta olan ve arıza endekslerinin yüksek olduğu noktalarda direklerin topraktan bağımsız olarak gövde dirençlerinin ölçülmesi gerekmektedir.

Göz önüne alınması gereken bir diğer durum direk ile koruma teli bağlantı noktasında oluşan ilave dirençtir. Uygulamada ve simülasyonumuzda bu dirençlerin hepsi göz ardı edilmektedir. Özellikle koruma teli veya OPGW'nin direğe bağlantı noktalarında kullanılan zırh çubuğu, klemens vb. çelik malzemelerin özellikle incelenmesi gerekmektedir. Bu hırdavatların montajı yapılırken oluşabilecek en küçük boşlukların dahi iletken macun vb malzemelerde doldurulması gerekmektedir. 1Ω direnç değerinin bile çok büyük öneminin olduğu bu bağlantı noktalarında oluşabilecek ilave dirençlerin önüne geçmek için direnç değeri düşük ekipman (örneğin Alüminyum bazlı hırdavat vb) kullanmak bile arıza sayılarında ve arıza akımlarında azalmayla sonuçlanacaktır.

Hat tesisi ile ilgili karşılaşılan bir diğer problem ise; zemindeki direnç sorunun önceden öngörülebilmesi için direğin dikileceği noktaya özellikle yaz sonundan başlayarak zemin etüdü yapılması gerekir. Zemin etüdünden kastedilen şey sadece zemin emniyet katsayısı olarak değil, düzenli direk direnç ölçümleridir. En azından 1 yıl boyunca belli periyotlarda direnç ölçümlerinin yapılması, toprak öz dirençlerinin bilinmesi ve ortalama direnç değerlerinin bilinmesi gerekir. Bu çalışmanın yaz sonundan başlayarak yapılmasındaki temel amaç toprağın tamamen kuru olduğu anda direncin yüksek çıkmasıdır. Özellikle sahil bandında sonbaharda ilk yağmurlarda havanın çok şarjlı olduğu ve çok şiddetli yıldırımların düştüğü bilinmektedir. İlk yağmurlar esnasında toprağın alt tarafında kalan kısımlarına yeteri kadar su geçemeyeceği için direklerde direnç yüksek çıkacaktır. Arızaların değerlendirilmesi için gereken asıl kısım da budur.

Ülkemizde yıldırım konusunda temel bilgi ve veri eksikliği bu tez esnasında gözlemlenmiştir. Ülkemizin tam anlamıyla sağlıklı çalışan bir yıldırım haritası ya da yıldırım yoğunluk, sayı vb. haritası bulunmamaktadır. T.C. Enerji Bakanlığı ve T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığının ortak bir çalışması ile bu verileri oluşturabilirse çok daha sağlıklı analizler yapmak mümkün olacaktır. Akdeniz ülkelerinin tamamında ve okyanusa kıyısı olan bütün ülkelerde bu haritalar mevcuttur.

Ülkemizde ve dünyamızda elektriğin dağıtımı ve iletimi için iletim ve dağıtım hatları ile transformatörler dışında günümüzde bir alternatif yoktur. Bu, hatlar için en temel tehlike yıldırımın hatta veya hattın yakınına düşmesidir. Yıldırım koruma teline düştüğü andan itibaren başlayan süreçte; 154kV enerji iletim hatlarında baz aldığımız

örnek hatlarda arıza noktasında bulunan ortalama yıldırım yoğunluğu 30 - 40 kA aralığındadır. Bu aralıkta düşen yıldırım için kullanılması gereken minimum izolator boyu 1660 mm ve üzeri olmalıdır. Bu izolator boyunda ve 40kA yıldırım şiddetinde ise 19 Ω da açma yaşanmaktadır. Bir diğer deyişle en iyi şartlarda topraklama direncinin 19 Ω 'un altında olması gerekmektedir. 1460mm olarak belirlenen izolator boyunda 12 Ω üzerindeki bütün direnç değerlerinde atlama yaşanmaktadır. Mevcut EİH sisteminin ülkemizdeki tek işletmecisi olan TEİAŞ 2019 itibariyle izolator boylarını tekrar 1660 mm uzunluğa çekmiştir. 2019 öncesi yaklaşık 5 yıl boyunca yapılan 154 kV hatların birçoğunda 1460 mm'lik izolatorlar kullanılmıştır. Bu hatlardan özellikle yıldırıma maruz kalan kısımlarında sürekli arıza ve açmalar meydana gelmiştir. Hem arıza istatistikleri açısından hem de enerji ve sistem güvenilirliği açısından büyük sorun oluşturmıştır.

Bu durumla birlikte ülkemizde sadece TEİAŞ değil orta gerilim işletmecileri olan eski adıyla TEDAŞ, özelleştirme sonrasında bölgesel dağıtım şirketlerinin hiçbirinde yıldırım kaynaklı arızaların önüne geçebilmek için sistematik bir çalışma yapılmamıştır. Akademik anlamda herhangi bir hattın simülasyonu yapıp bu hatta düşecek ortalama yıldırım bilgileri üzerinden topraklama dirençlerinin hangi değerlerde olması gerektiği ya da izolator boylarının ne olması gerektiği üzerine bir çalışma yoktur. Belli emniyet katsayıları kullanılarak yapılan bu izolator boyları basit Elektrik Alan hesaplarıyla belirlenmiş işletme geriliminin biraz üstündeki gerilimlere dayanabilecek uzunluklardır. Bu bahsedilen değerlendirmeler üzerine OG dağıtım hatları tekrar gözden geçirilirse birçok noktada arıza ve kesintilerin önüne geçilebilecektir.

Yukarıda bahsedilen maddeler göz önünde bulunularak değişikliğe gidilirse yıldırım kaynaklı kesintilerde çok büyük azalma meydana gelecektir. Bu düşüş ise hem sistem harmoniklerinde azalmaya neden olacak hem de arz güvenliğinde gözle görülür bir yükselme yaşanacaktır. Sistem harmonikleri tamamen ayrı bir çalışma konusu olsa da üretim santrallerinden son tüketiciye kadar tüm sistem paydaşlarını olumsuz yönde etkilemekte ve sistemin içinde yer alan enerji ile ilgili tüm teçhizata zarar vermektedir. Arz güvenliğindeki yükselme ise enerji kayıplarının önüne geçerek yeni yatırımlara daha fazla bütçe ayırmak demek olacaktır.

Literatürde genellikle çalışmalar parafudr üzerine yoğunlaşmış, çözüm önerisi olarak şebekelerin başına ve sonuna parafudr konulması önerisi getirilmiştir. Mevcut iletim hatlarımızın başında ve sonunda hat parafudrları bulunmakta fakat yine de arızaların önüne yeteri kadar geçememektedir. Yine tüm TM'lerde güç transformatörlerinin önünde her faz için parafudrlar ve darbe sayıcılar bulunmakta fakat yine de güç transformatörleri aşırı akımlardan zarar görmekte ve yanmaktadır. İşte bu süreci engellemek ya da zararlarını minimize etmek için kaynağında müdahale şarttır. Bu müdahale de daha hattın tesisi başlamadan direğin dikileceği noktada zemin etüdü yaparak başlamalıdır. Devamında direğin dikileceği noktadaki yıldırım değerleri göz önünde bulundurularak direk ayak direnci ve izolator boylarında değişikliğe gidilmelidir. Bu çalışmalar yetersiz olduğu takdirde direk tipinde değişikliğe gidilerek izolator boyları daha da arttırılarak atlamaların önüne geçilebilmelidir ve bu noktaların en yakınına ilave topraklama çukurları vb. gibi önlemler alınmalıdır. Atlamaların azalması ya da bitmesi halinde sistemin arz ve güvenliği çok daha yüksek noktalara çıkacaktır. İlk üreticiden son tüketiciye kadar elektrik arz sisteminin her aşamasında tüm

sistem müşterekleri daha kaliteli ve sürekli bir enerji kullanabilecektir. Bu tez çalışması sonucu alttaki sonuçlar ortaya çıkmış ve literatüre sunulmuştur.

- 154kV sistemden 1460mm boyundaki izolatörler tamamen çıkartılmalıdır.
- 1660mm boyundaki izolatörlerin bulunduğu direklerin maksimum direnç değeri 5 Ω olmalıdır.
- Hatların tesisine başlamadan, direk yerleri netleştikten sonra en az bir yıl boyunca her direk yeri için en 4 az farklı dönemde (özellikle yaz –sonbahar geçişinde ilk yağmurlardan önce) direnç ölçümleri yapılarak, bu sonuçlara göre direk seçimi yapılmalıdır.
- Topraklama direncinin düşürülemediği noktalarda izolatör boylarında ayak direnç değerine göre uzatmaya gidilmelidir.
- İzolatörlerin yeteri kadar uzatılamaması halinde bir üst gerilim seviyesinde direkler kullanılmalıdır.
- Bir üst gerilim seviyesi olarak ülkemizde 380kV direkler bulunmakta olup, ağırlıkları fazladır. Bundan dolayı sistemdeki direk çeşitliliğinin 230 kV direk modelleriyle güçlendirilmesi gerekmektedir.
- Neme, tuza, aşırı toz ve güneşe maruz kalan direklerin direk gövde dirençleri ölçülerek, paslanmış noktaların temizlenmesi galvanizlenmesi gerekmektedir.
- İletken – direk, koruma teli – direk, direk – topraklama kazığı arasındaki bağlantıların tamamı sıkı şekilde ve daha yüksek iletkenliğe sahip malzemelerle yapılmalıdır.
- Üretim, İletim ve Dağıtım sisteminin tüm paydaşlarının tamamının yıldırım simülasyonu yapması gerekmektedir.
- İskeraunik bazdaki haritaların literatürde herhangi bir fonksiyonunun kalmadığı gözlenmiş olup, tamamen sayısal ve koordinat bazlı yıldırım haritalarının ortaya çıkartılması gerekmektedir.

Yapılan simülasyon sonuçlarından alınan veriler incelendiğinde; üstte maddeler halinde verilen başlıklar uygulandığı takdirde, meteorolojiden alınan veriler ışığında, hatların yıldırımdan açma sayılarında %60 ile %70 arasında azalma yaşanacaktır.

Unutulmamalıdır ki ülke çapında 1 saatlik enerji kesintisinin sadece sanayiye maliyeti 10 milyonlarca liralara ifade edilmektedir. 31 Mart 2015 de ülke çapında yaşanan kesintide; kesinti süresi en kısa süren yerde 8 saat olduğu ve bu sürenin birçok noktada çok daha uzun olduğu göz önüne alınırsa hatların ilk tesisinde yapılacak bu çalışmaların maliyeti rahatlıkla göz ardı edilebilir. En az 30 yıl boyunca işletilen bir hattın kaybı düşünüldüğünde bu tür çalışmaların ivedilikle yapılmasıyla uzun vadede fazlasıyla olumlu geri dönüşler sağlanacaktır.

7. KAYNAKLAR

Anonim 1: [https://mgm.gov.tr/site/yardim2.aspx?YILDIRIM](https://mgm.gov.tr/site/yardim2.aspx?=YILDIRIM)

Anonymous1: http://www.wikizero.biz/wiki/en/Lightning_strike [Son erişim tarihi: 12.05.2019]

Anonymous2: <http://www.lightning.ece.ufl.edu/> [Son erişim tarihi: 12.05.2019]

Anonymous3: <http://plaza.ufl.edu/rakov/sipda1999.htm#top> [Son erişim tarihi: 12.05.2019]

Agrawal, A. K., Price H. J. and Gurbaxani, S. H. 1980. Transient Response of a Multiconductor Transmission Line Excited by a Non Uniform Electromagnetic Field”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, (EMC-22): 119-129.

Araujo, A. E., Paulino, J. O., Silva J. P. and Dommel H. W. 2001. Calculation of Lightning- Induced Voltages with Rusck’s Method in EMTP. Part I: Comparison with Measurements and Agrawal’s Coupling Model. *Electric Power System Research*, 60(1): 49-54.

Barker, P. P., Short, T. A., Eybert-Berard, A. R., Berlandis, J. P. 1996. Induced Voltage Measurements on an Experimental Distribution Line during Nearby Rocket Triggered Lightning Flashes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(2): 980-995

Bermudez, J. L. 2003. Lightning Currents and Electromagnetic Fields Associated with Return Strokes to Elevated Strike Objects. PhD Thesis, Politechnique Federale de Lausanne, Switzerland, 178 p.

Borghetti, A., Nucci, C. A., Paolone, M. and Rachidi, F. 2000. Characterization of the Response of an Overhead Line to Lightning Electromagnetic Fields. 25th International Conference on Lightning Protection, ICLP’2000, pp. 223-228, Rhodos, Greece.

Chowdhuri, P., Gross, E.T.B. 1967. Voltage Surge Induced on Overhead Lines by Lightning Strokes. *Proceeding of IEE*, Vol. 114(12): 1899-1907.

Chowdhuri, P. 1990. Lightning Induced Voltages on Multiconductor Overhead Lines. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 5(2): 658-667.

Cooray, V. 1994. Calculating Lightning-Induced Overvoltages in Power Lines: A Comparison of Two Coupling Models. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 36(3): 179-182.

Cooray, V. 2003. The Lightning Flash. Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 928 p.

Diendorfer, G., Uman, M. 1990. An Improved Return Stroke Model with Specified Channel-Base Current. *Journal of Geophysics Research*, 95(D9):13621-13644.

Djalel, D., Ali H. and Fayçal, C. 2007. The Return-Stroke of Lightning Current, Source of Electromagnetic Fields: Study, Analysis and Modelling, *American Journal of Applied Sciences*, 4(1): 42-48.

Dommel, H. W. 1969. Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in

- Single and Multiphase Networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-88 (4) : 388-399.
- Gole, A. M. 1998. Power Systems Transient Simulation, Course Notes. University of Manitoba.
- Guerrieri, S., Nucci, C. A. and Rachidi, F. 1997. Influence of the Ground Resistivity on the Polarity and Intensity of Lightning Induced Voltages. Proceedings of 10th International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 1404-1411, 24-30 August, Montreal.
- Heidler, F. 1985. Travelling Current Source Model for LEMP Calculation. 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 1297-1302, March 5-7. Zurich.
- IEEE Standards 1410 "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines", 2004.
- Idone, V.P. and Orville, R. E. 1982. Lightning Return Stroke Velocities in the Thunderstorm Research International Program. *Journal of Geophysical Research*, 87(1): 4903-4915.
- Jankov, V. 1997. Estimation of the Maxital Voltage Induced on an Overhead Line due to the Nearby Lightning. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(1):315-324.
- Koga, H., Motomitsu, T. and Taniguchi, T. 1979. Lightning Surge Waves Induced on Overhead Lines. *Transactions on IECE of Japan*, E62(4): 216-223.
- Kannu, P. D., Thomas, M. J. 2003. Influence of Lightning Electric Field Components on the Induced Voltages on a Power Distribution Line. *Electric Power System Research*, 64(1): 247-255.
- Kannu P. D. and Thomas M. J. 2005. Lightning Induced Voltages on Multiconductor Power Distribution Line. *IEE Proceeding Generation, Transmission and Distribution*, 152(6): 855-863.
- Lin, Y. T., Uman, M. A., Standler R. B. 1980. Lightning Return Stroke Models. *Journal of Geophysical Research*, 85(C3): 1571-1583.
- Master, M. J., Uman, M. A., Lin Y. T. and Standler R. B. 1981. Calculations of Lightning Return Stroke Electric and Magnetic Fields above Ground. *Journal of Geophysics Research*, 86(C12):11959-12167.
- Montano, R. 2005. The Effects of Lightning on Low Voltage Power Networks. Ph.D Thesis, Uppsala University. Sweden. 83p.
- Nucci, C. A., Mazzetti, C., Rachidi, F., Ianoz, M. 1988. On Lightning Return Stroke Models for LEMP Calculations. 19th International Conference on Lightning Protection, 25-29 April, Graz, Austria.
- Nucci, C. A., Rachidi, F., Ianoz, M. and Mazzetti, C. 1993. Lightning Induced Voltages on Overhead Power Lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 35(1): 75-86.
- Nucci, C. A. 1995. Lightning-Induced Voltages on Overhead Power Lines. Part II: Coupling Models for the Evaluation of the Induced Voltages. *Electra*, 162(1): 121-145.

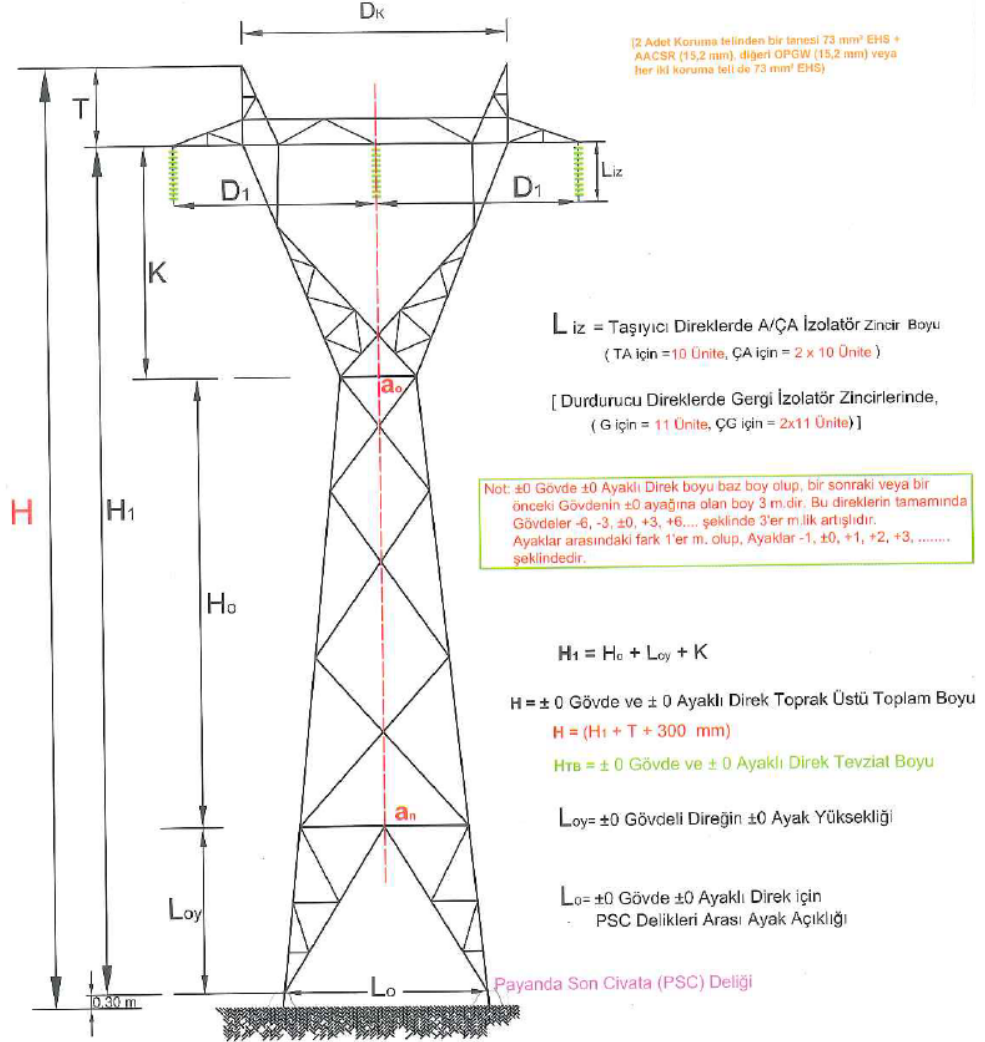
- Nucci, C. A., Rachidi, F., Ianoz, M., Mazzetti, C. 1995. Comparison of Two Coupling Models for Lightning-Induced Overvoltage Calculations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10 (1): 330-339.
- Nucci, C. A. 2000. Tutorial on Lightning-Induced Effects on Transmission Lines. 4th International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC, pp. 69-75, Zurich.
- Ozkaya, M. 1979. Yüksek gerilim tekniğinde deşarj olayları. İ.T.Ü. Kütüphanesi, Sayı 1152, İstanbul, 214 s.
- Paolone, M., Nucci, C. A., Petrache E. and Rachidi, F. 2004. Mitigation of Lightning-Induced Overvoltages in Medium Voltage Distribution Lines by Means of Periodical Grounding of Shielding Wires and of Surge Arresters: Modeling and Experimental Validation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(1): 423-431.
- Perez, E., Herrera, J. and Torres, H. 2003. Sensitivity Analysis of Induced Voltages on Distribution Lines. IEEE Bologna Power Tech Conference, pp.7-14, June 23-26, Bologna, Italy.
- Pykälä, M.L. and Palva, V. 1997. Protection Characteristics of Spark Gaps. Report 27, Helsinki University of Technology, High Voltage Institute, Espoo, Finland.
- Rachidi, F., Nucci, C. A. 1990. On the Master, Uman, Lin Standler and the Modified Transmission Line Lightning Return Stroke Current Models. *Journal of Geophysics Research*, 95(D12): 20389-20393.
- Rachidi, F. 1993. Formulation of the Field-to-Transmission line Coupling Equations in Terms of Magnetic Excitation Field. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 35(3):404-407
- Rachidi, F., Nucci, C.A., Ianoz, M., Mazzetti, C. 1997. Response of Multiconductor Power Lines to Nearby Lightning Return Stroke Electromagnetic Fields. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(1): 1404-1411.
- Rakov, V. A. and Dulzon, A. A. 1987. Calculated Electromagnetic Fields of Lightning Return Strokes. *Russian Tekhnicheskaya Elektrodinamika*, pp.87-89.
- Rakov, V. A. and Dulzon, A. A. 1991. A modified transmission line model for lightning return stroke field calculations., Proc. 9th Int. Zurich. Symp. Electromagn. Compat. pp.229-235 Zurich, Switzerland.
- Rakov, V. A. and Uman, M. A. 1998. Review and Evaluation of Lightning Return Stroke Models Including Some Aspects of Their Application. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 40(4): 403-426.
- Rakov, V. A. and Uman, M. A. 2003. Physics and Effects. Cambridge University Press, 309 s.
- Rakov, V. A. 2010. Rocket-Triggered Lightning Experiments at Camp Blanding, Florida. SIPDA 30th International conference on lightning protection, pp. 1-8, 13 -17 September, Cagliari, Italy.

- Razzak, S. M. A., Ali, M. M., Sarkar, M. Z. I. and Ahmad, H. 2004. Lightning Induced over Voltages on Overhead Distribution Lines Including Lossy Ground Effects. 3rd International Conference on Electrical and Computer Engineering ICECE, pp.151-155, 28-30 December, Dhaka.
- Rusck, S. 1958. Induced Lightning Overvoltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Overvoltage Protection of Low Voltage Networks. *Transactions of the Royal Institute of Technology*, pp. 1-120.
- Rusck, S. 1997. Protection of Distribution Lines in Lightning, London Academic Press: 711, London, 771 s.
- Silva, J. P., Araujo, A. E. A. and Paulino, J. O. S. 2002. Calculation of lightning-induced voltages with Rusck's method in EMTP, Part II: Effects of Lightning Parameter Variations. *Electric Power System Research*, 61(1): 133-137
- Taylor, C.D., Satterwhite R.S. and Harrison C.W. 1965. The response of a Terminated Two-Wire Transmission Line Excited by a Non-Uniform Electromagnetic Field. *IEEE Transaction on Antenna Propagation*, (13):987-989.
- Thanasaksiri, T. 2004. Improving the Lightning Performance of Overhead Distribution Lines. TENCON IEEE Region 10 Conference, pp. 369-372, 21-24 November. Chiang Mai.
- Wagner, C. F., McCann, G. D. 1942. Induced voltages on transmission lines. *AIEE Transactions*, 61:916-929.

8. EKLER

8.1. 154 kV'luk Tek Devre Enerji İletim Hattı Direklerinin Ana Hat Ölçüleri

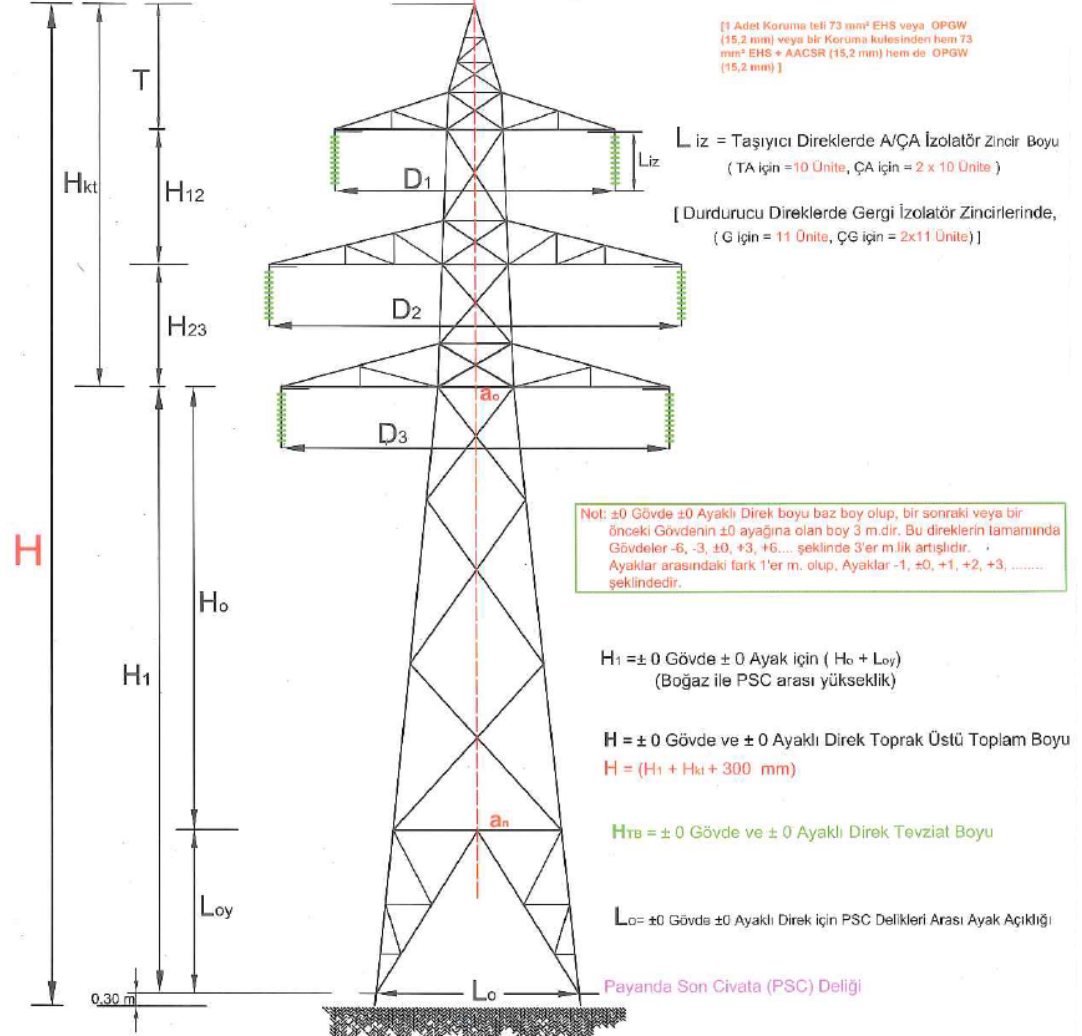
154 kV'LUK TEK DEVRE ENERJİ İLETİM HATTI DİREKLERİNİN ANA HAT ÖLÇÜLERİ



Kesit MCM	Direk Tipi	D ₁ (mm)	D _K (mm)	T (mm)	K (mm)	a _o (mm)	Gövde Eğimi (tg α)	a _n (mm)	L _{oy} (mm)	L _o (mm)	H _o (mm)	H ₁ (mm)	H _{TB} (mm)	H (mm)
1272 MCM	PA	6.000	7.300	2.400	7.400	2.050	0,09059833	3.952,50	2.300	4.369	10.500	20.200	18.250	22.900
	PB	6.650	8.300	2.250	7.400	2.200	0,10431655	4.296,34	2.800	4.870	10.000	20.200	18.250	22.750
	PC	7.500	9.500	2.800	7.400	2.400	0,11	4.626,40	2.680	5.216	10.120	20.200	18.250	23.300
	PD	6.800	8.600	4.350	7.000	3.500	0,115	5.605,42	1.996	6.065	9.154	18.150	18.350	22.800
	PE	9.800	12.000	6.500	8.000	4.000	0,175	6.621,50	2.660	7.553	7.490	18.150	18.350	24.950
795 ve 954 MCM	AS	6.000	7.600	2.000	7.350	1.900	0,07451923	3.330,00	2.200	3.658	9.595	19.145	17.195	21.445
	BS	6.200	7.800	2.100	7.400	2.050	0,09048507	3.787,00	2.200	4.186	9.598	19.198	17.248	21.598
	CS	6.300	7.600	2.500	7.800	2.200	0,10665111	4.144,00	2.150	4.598	9.200	19.150	17.200	21.950
	DT	6.000	7.600	4.000	6.800	3.000	0,14021164	5.047,00	2.800	5.776	7.300	16.700	16.900	21.000
	ET	6.800	8.200	4.800	7.000	3.300	0,15240642	5.464,00	2.600	6.256	7.099	16.699	16.899	21.599
477 MCM	A2	6.800	8.900	1.700	7.800	1.820	0,063489	3.166,00	1.747	3.407	10.758	20.305	18.355	22.305
	B2	6.800	8.300	2.500	8.000	2.100	0,090129	3.748,00	2.155	4.138	9.142	19.297	17.347	22.097
	C2	5.900	7.800	3.550	6.700	2.400	0,110048	4.106,00	2.400	4.634	7.751	16.851	17.051	20.701
	D2	7.150	8.900	4.600	7.000	2.900	0,128079	4.744,00	2.650	5.424	7.199	16.849	17.049	21.749

8.2. 154'lık Çift Devre Enerji İletim Hattı Direklerinin Ana Hat Ölçüleri

154 KV'LUK ÇİFT DEVRE ENERJİ İLETİM HATTI DİREKLERİNİN ANA HAT ÖLÇÜLERİ

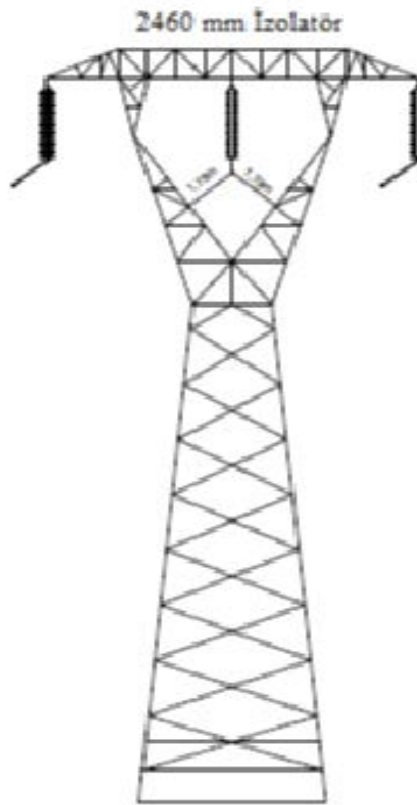
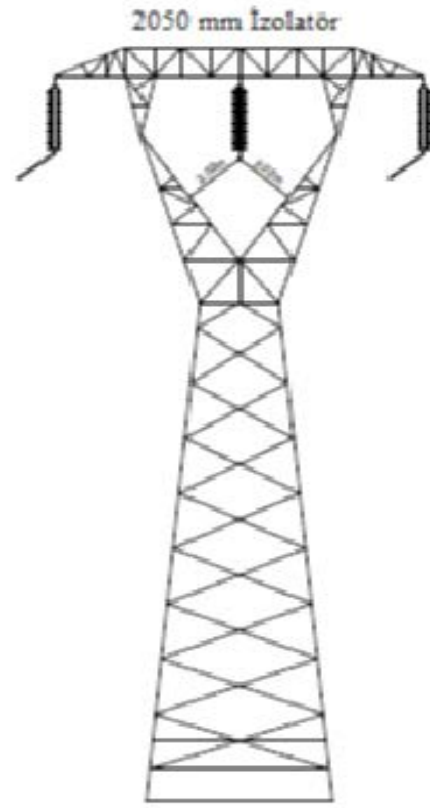
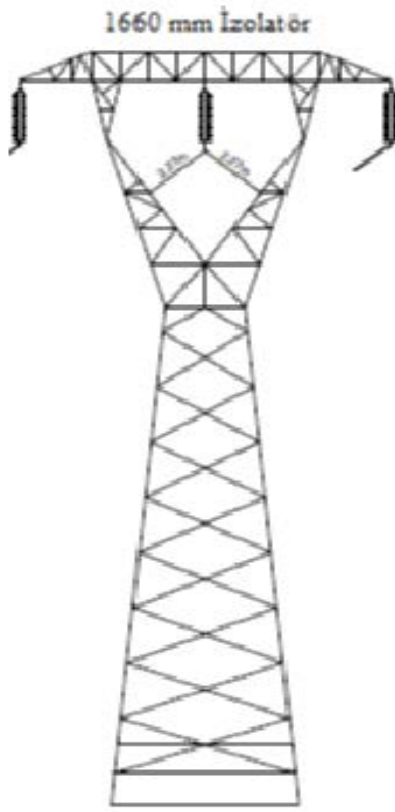


Kesit	Direk	D ₁	D ₂	D ₃	T	H ₁₂	H ₂₃	a ₀	Gövde Eğimi (lgα)	a _n	L _{oy}	L ₀	H ₀	H ₁	H _{1B}	H _{kt}	H
MCM	Tipi	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
2x1272	2FA	7.000	10.000	7.800	3.900	4.300	4.300	1.900	0,09	5.068,00	2.600	5.536	17.600	20.200	18.250	12.500	33.000
	2FB	7.600	10.600	8.200	4.400	4.300	4.300	2.000	0,10	5.510,00	2.650	6.040	17.550	20.200	18.250	13.000	33.500
	2FD	6.800	10.000	7.800	6.000	4.200	4.200	2.400	0,14	6.796,00	2.350	7.454	15.700	18.050	18.250	14.400	32.750
	2FN	7.600	11.600	9.400	6.900	4.300	4.300	3.200	0,17	8.300,00	3.050	9.337	15.000	18.050	18.250	15.500	33.850
2x1272	CP1	6.700	9.000	6.900	3.900	4.200	4.200	1.100	0,04	2.636,00	2.000	2.796	19.200	21.200	19.250	12.300	33.800
	CP2	5.600	8.200	6.100	4.900	4.100	4.100	2.000	0,0335	3.078,00	2.760	3.263	16.090	18.850	19.050	13.100	32.250
	CP3	6.200	8.700	6.600	5.450	4.200	4.200	2.315	0,05	3.946,50	2.535	4.200	16.315	18.850	19.050	13.850	33.000
	CP4	7.000	9.400	8.100	7.550	4.200	4.200	2.730	0,071364362	5.208,00	2.500	5.565	17.350	19.850	20.050	15.950	36.100
2x795	TA1	7.000	9.400	7.400	3.150	4.150	4.150	1.400	0,06242611	3.942,00	2.750	4.395	15.419	18.169	16.219	11.450	29.919
	RA1	7.400	10.000	8.000	4.100	4.200	4.200	1.600	0,089434	4.262,00	3.250	4.843	14.882	18.132	16.182	12.500	30.932
	VA1	6.400	9.000	7.000	5.300	4.150	4.150	1.800	0,133341	5.122,00	2.850	5.883	12.457	15.307	15.507	13.600	29.207
	ZA1	7.800	10.400	8.400	5.300	4.150	4.150	2.200	0,16825	6.190,00	3.527	7.378	11.857	15.384	15.584	13.600	29.284
2x477	N1	6.600	9.200	7.200	3.300	4.100	4.100	1.200	0,0673575	3.517,20	2.600	3.867	17.201	19.801	17.851	11.500	31.601
	P1	7.200	9.800	7.800	3.900	4.100	4.100	1.450	0,0764249	4.048,40	2.800	4.476	17.000	19.800	17.850	12.100	32.200
	F1	6.600	9.200	7.200	5.450	4.100	4.100	1.600	0,0991254	4.494,60	2.250	4.941	14.601	16.851	17.051	13.650	30.801
	E1	7.600	10.200	8.200	5.450	4.100	4.100	2.000	0,122449	5.391,80	3.000	6.126	13.850	16.850	17.050	13.650	30.800

8.3. 154kV Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Direk Ağırılıkları

154 kV'LUK ENERJİ İLETİM HATTI DİREKLERİNİN (0,0,0,0) AYAKLI AĞIRLIKLARI VE ± 0 AYAĞINA GÖRE AYAK AĞIRLIK FARKLARI (kg)									
20.08.2009 tarihinden itibaren TEİAŞ tarafından (galvaniz ağırlığı %5 olarak) esas alınan tip proje (galvanizli, civatalı, çelik kafes) direk ağırlıklarıdır. (Aksi belirtilmedikçe direk ağırlıkları iyi Zemin Temelli olarak dikkate alınacaktır.)									
154 kV TEK DEVRE 477 MCM (HAWK)									
Sıra No	Direk Tipi	Direk Gövdesi	0,0,0,0 Ayaklı	-1	+1	+2	+3	T.O.	
1	A2-3	2.257	-20	54	59	137	29		
2	A2-3	2.551	-20	39	69	113	34		
3	A2+0	2.797	-25	25	59	103	39		
4	A2+3	3.150	-25	34	74	108	44		
5	A2+6	3.484	-25	44	79	108	54		
6	B2-3	2.650	-25	39	69	108	34		
7	B2-3	2.993	-29	29	69	108	44		
8	B2+0	3.395	-25	39	79	118	49		
9	B2+3	3.857	-20	34	83	123	83		
10	B2+6	4.366	-5	39	108	186	88		
11	B2+9	4.907	-34	83	128	182	103		
12	C2-6	3.739	-34	99	118	152	34		
13	C2-3	4.337	-34	64	113	162	44		
14	C2+0	5.014	-29	69	123	172	59		
15	C2+3	5.495	-29	59	123	157	93		
16	C2+6	6.300	-49	59	113	108	98		
17	D2-6	5.741	-44	64	128	260	44		
18	D2-3	6.585	-39	59	147	191	59		
19	D2+0	7.458	-108	54	123	255	58		
20	D2+3	8.292	-54	83	152	285	113		
21	D2+6	9.421	-83	68	216	265	147		
T.O. = Taban Ormevi (fide eder, Değişik Ayaklı Direklerde Kullanılacaktır.)									
154 kV ÇİFT DEVRE 477 MCM (HAWK)									
Sıra No	Direk Tipi	Direk Gövdesi	0,0,0,0 Ayaklı	-1	+1	+2	+3	T.O.	
1	N1-6	3.543	-20	39					
2	N1-3	3.955	-20	44	88				
3	N1+0	4.436	-20	58	88				
4	N1+3	5.073	-34	49	88	127			
5	N1+6	5.682	-34	49	83	127			
6	P1-6	4.416	-25	44	83				
7	P1-3	4.936	-34	59	93				
8	P1+0	5.584	-34	59	98				
9	P1+3	6.320	-34	59	113	162			
10	P1+6	7.213	-29	54	98	107			
11	P1+9	8.125	-49	54	118	172			
12	F1-3	6.084	-44	74	113	182			
13	F1-3	6.908	-44	64	118	182			
14	F1+0	7.739	-44	69	123	211			
15	F1+3	8.822	-44	89	132	231			
16	F1+6	9.754	-49	98	162	240			
17	F1+9	10.951	-79	74	157	250			
18	E1-6	8.135	-49	64	137	211			
19	E1-3	9.185	-49	93	157	245			
20	E1+0	10.343	-69	123	221	285			
21	E1+3	11.678	-79	113	191	285			
22	E1+6	13.228	-74	123	206	299			
Solaşımca Direk Ağırlığına Dahil Edilir.									
154 kV TEK DEVRE 795 MCM (DRAKE) veya 154 kV ÇİFT DEVRE 954 MCM (CARDINAL)									
Sıra No	Direk Tipi	Direk Gövdesi	0,0,0,0 Ayaklı	-1	+1	+2	+3	+4	
1	TA1-6	4.023	-49	34	88				
2	TA1-3	4.612	-34	39	79				
3	TA1+0	5.152	-39	39	98	177			
4	TA1+3	5.741	-39	44	103	172			
5	TA1+6	6.329	-44	69	93	191			
6	RA1-6	5.122	-29	54	88				
7	RA1-3	5.760	-34	49	88	137			
8	RA1+0	6.457	-49	64	103				
9	RA1+3	7.232	-49	74	118	172			
10	RA1+6	8.174	-79	49	98	186			
11	RA1+9	9.440	-103	59	103	182			
12	RA1+15	12.888	-168	104	184	276			
13	VA1-6	7.448	-69	69	147	216			
14	VA1-3	8.508	-64	74	157	245			
15	VA1+0	9.697	-69	98	147	231			
16	VA1+3	11.000	-79	108	162	226			
17	VA1+6	12.904	-93	103	172	231			
18	VA1+9	13.984	-108	98	162	256			
19	ZA1-6	9.931	-59	79	167	285			
20	ZA1-3	11.897	-83	123	226	319			
21	ZA1+0	13.238	-89	103	240	383			
22	ZA1+3	15.280	-103	132	226	402			
23	ZA1+6	17.340	-59	128	294	442	540		
24	ZA1+9	19.901	-93	142	255	339			
25	ZA1+12	21.854	-113	137	295	343			
26	ZA1+15	25.190	-126	108	240	324			
27	ZA1+18	27.575	-126	137	280	383			
Taban Orme, Direk ağırlığına dahil olup, mülaka kullanılır.									
154 kV ÇİFT DEVRE 1272 MCM (PHEASANT)									
Sıra No	Direk Tipi	Direk Gövdesi	0,0,0,0 Ayaklı	-1	+1	+2	+3	+4	
1	PA-6	2.689	-25	25	59	98			
2	PA-3	3.130	-29	29	69	108			
3	PA+0	3.523	-20	34	69	103			
4	PA+3	4.004	-34	25	59	98			
5	PA+6	4.398	-39	44	84	118			
6	PA+9	5.173	-25	34	59	103			
7	PB-3	3.690	-29	33	83	113			
8	PB+0	4.141	-34	39	79	118			
9	PB+3	4.740	-39	44	83	118			
10	PB+6	5.319	-34	29	83	123			
11	PB+9	6.015	-29	25	84	123			
12	PB+12	6.791	-25	34	83	128			
13	PC-3	3.778	-29	29	69	123			
14	PC-3	4.269	-29	39	93	118			
15	PC+0	4.838	-39	44	88	137			
16	PC+3	5.525	-39	44	88	123			
17	PC+6	6.231	-39	25	83	132			
18	PD-6	7.048	-54	59	126	191			
19	PD-3	7.880	-64	49	113	182			
20	PD+0	8.891	-59	44	108	177			
21	PD+3	10.157	-54	54	123	191	260		
22	PD+6	11.226	-49	49	123	196	275		
23	PD+9	12.688	-49	49	132	201	275		
24	PE-6	9.980	-54	54	128	186			
25	PE-3	11.235	-64	49	118	186			
26	PE+0	12.325	-49	44	128	182			
27	PE+3	13.769	-44	59	137	201	275		
28	PE+6	15.387	-68	79	167	221	314		
T.O. = Taban Orme, Direk ağırlığına dahil olup, mülaka kullanılır.									
154 kV ÇİFT DEVRE 1272 MCM (PHEASANT)									
Sıra No	Direk Tipi	Direk Gövdesi	0,0,0,0 Ayaklı	-1	+1	+2	+3	+4	
1	CP1-6	5.270	-34	39	103				
2	CP1-3	6.035	-34	39	103				
3	CP1+0	6.702	-49	44	103				
4	CP1+3	7.389	-49	39	103				
5	CP1+6	7.978	-49	44	98				
6	CP1+9	8.675	-49	44	98				
7	CP1+12	9.264	-49	44	98				
8	CP2-0	10.264	-69	83	206				
9	CP2-3	11.801	-68	113	211				
10	CP2+0	12.808	-96	98	226				
11	CP2+3	14.288	-103	103	221				
12	CP2+6	15.387	-83	98	240				
13	CP2+9	16.780	-83	113	216				
14	CP2+12	19.432	-118	231					
15	CP2+15	27.748	-118	231					
16	CP2+18	32.063	-118	231					
17	CP3-6	11.962	-83	88	226				
18	CP3-3	13.414	-96	98	245				
19	CP3+0	14.749	-79	118	221				
20	CP3+3	16.417	-88	103	231				
21	CP3+6	17.968	-83	79	208				
22	CP3+9	24.150	-86	137	275	452	570		
23	CP4+0	18.733	-118	216					
24	CP4+3	20.794	-118	128	216				
25	CP4+6	22.452	-118	137	245				
26	CP4+9	24.876	-118	137	245				
27	CP4+12	27.437	-118	147	255				
28	CP4+15	29.832	-118	147	255				
29	CP4+18	31.698	-118	147	255				
T.O. = Direk ağırlığına dahil olup, mülaka kullanılır. Ağırlıklar Mülaka Kompakt direkler için verilmektedir.									
154 kV ÇİFT DEVRE 1272 MCM (PHEASANT)									
Sıra No	Direk Tipi	Direk Gövdesi	0,0,0,0 Ayaklı	-1	+1	+2	+3	+4	
1	M1+0	17.300	-	88	187				
2	M1+3	18.890	-	88	187				
3	M1+6	19.970	-	88	187				
4	M1+9	21.137	-	88	187				
5	M1+12	22.482	-	88	187				
6	M1+15	23.414	-	88	187				
7	M2+0	43.943	-	167	353				
8	M2+3	47.515	-	167	353				
9	M2+6	50.312	-	167	353				
10	M2+9	53.059	-	167	353				
11	M2+12	56.258	-	167	353				
12	M2+15	59.045	-	167	353				
13	M3+0	64.992	-	245	471				
14	M3+3	70.517	-	245	471				
15	M3+6	74							

8.4. PA Serisi Taşıyıcı Direkler



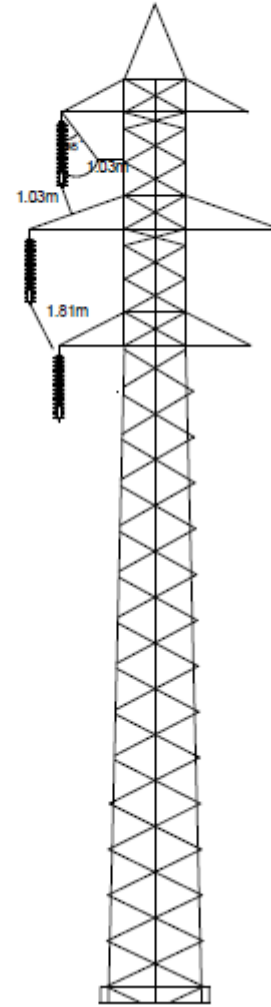
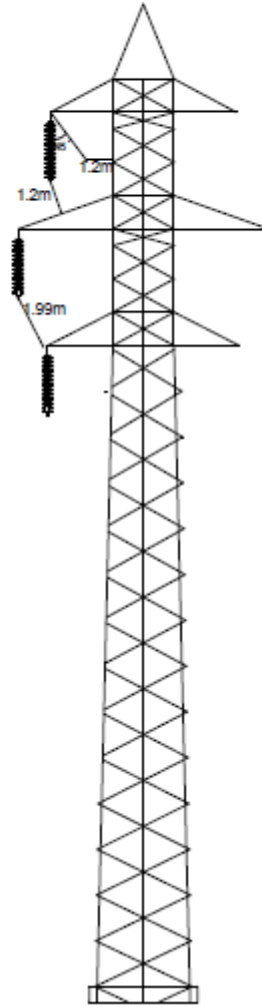
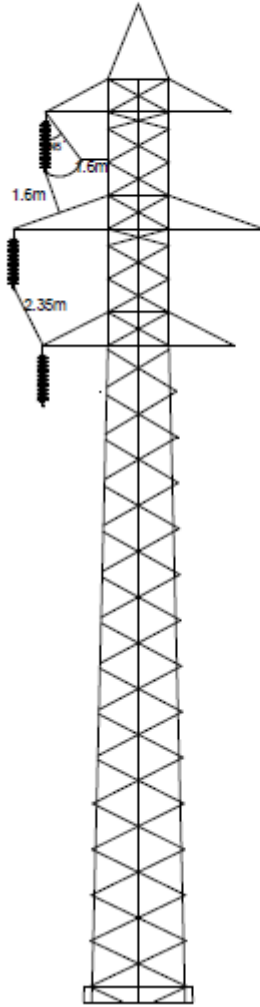
8.5. CP1 Tipi Direkler

CP1 Tipi Direk

1660 mm İzolatör için

2060 mm İzolatör için

2460 mm İzolatör için



ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Yaşar YOLDAŞ
ahmetyoldas@gmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2009-2019	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lisans 2001-2009	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik – Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Etüt ve Planlama Başmühendisi 20011-Devam Ediyor	TEİAŞ 19.Bölge Müdürlüğü Antalya
İşletme ve Bakım Mühendisi 20010-2011 Devam Ediyor	TEİAŞ 19.Bölge Müdürlüğü Antalya
Finike İşletme Başmühendisi (g) 20009-2010	TEİAŞ 19.Bölge Müdürlüğü Antalya