



**T. C.
SIVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE GEÇİCİ DURUMLARIN
ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM (ATP) İLE
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Beyza Nur ÖZDAMAR
(20219233025)**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mustafa ŞEKER**

**SİVAS
MAYIS 2025**

Beyza Nur ÖZDAMAR'ın hazırladığı ve “**GÜÇ SİSTEMLERİNDE GEÇİCİ DURUMLARIN ATP İLE İNCELENMESİ**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Mustafa ŞEKER
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

.....

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Serdar KOÇKANAT
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

.....

Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Cemal KELEŞ
İnönü Üniversitesi

.....

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nail ALTUNAY

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.





Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Beyza Nur ÖZDAMAR, 2025

ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

28.04.2025

Beyza Nur ÖZDAMAR

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın tüm aşamalarında her türlü bilimsel desteği sağlayarak bu süreç boyunca yardımlarını esirgemediği için değerli danışman hocam Doç. Dr. Mustafa ŞEKER' e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Eğitim ve öğretim hayatım boyunca maddi ve manevi olarak yardımlarını esirgemeyerek çalışma sürecim boyunca sevgi ve hoşgörüyle bana destek oldukları için değerli aileme teşekkürlerimi sunarım.



ÖZET

GÜÇ SİSTEMLERİNDE GEÇİCİ DURUMLARIN ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM (ATP) İLE İNCELENMESİ

Beyza Nur ÖZDAMAR

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mustafa ŞEKER

2025, 47+xiv sayfa

Elektrik enerjisine olan talebin artmasıyla birlikte elektrik üretim, iletim ve dağıtım ağı daha kapsamlı ve karmaşık bir yapıya dönüşmektedir. Bu sebepten büyüyen güç ağının analizi de zor bir hal almaktadır. Olası arızalar güç kalitesini ve ilgili cihazların çalışma hassasiyetlerini etkilediğinden dolayı güç sistemlerinin analizinin yapılması enerji sürekliliği için önem taşımaktadır. Bu yüzden enerji sürekliliğinin sağlanabilmesi adına güç sistemi içerisinde oluşabilecek arızalar için hızlı ve ekonomik çözümler bulunması gerekmektedir. Yıldırım çarpmaları, güç sistemlerinde önemli hasarlara yol açtığından dolayı önemli konulardan bir tanesidir. Yüksek gerilim direkleri ve transformatörleri, bu tür etkilerden korunmak amacıyla koruma topraklaması ile donatılmaktadır. Havai iletim hatlarında yıldırım genellikle koruma iletkenine ya da direğe isabet eder. İletim hattı yıldırım darbesinden etkilendiğinde, yıldırımdan kaynaklanan akım direğin topraklama sistemi üzerinden toprağa ulaşır. Ancak bu durumda direk üzerinde bulunan topraklama direnci sebebiyle yüksek gerilimlerin oluşması durumu ortaya çıkmaktadır. Eğer bu gerilim seviyesi, izolatörlerin darbe gerilim dayanımını aşarsa izolatörlerin zarar görmesi kaçınılmazdır. Bu yüzden yüksek gerilim iletim hatlarında direk topraklama direncinin doğru bir şekilde belirlenmesi hayati önem taşır. Bu problemlerden hareketle, bu tezde pilon direkli iletim hattının yıldırım çarpmasına maruz kalması durumunda oluşan aşırı gerilimler Alternatif Transients Programı (ATP) ile modellenerek analiz edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Güç Sistemleri, Güç Kalitesi, Yıldırım Aşırı Gerilimleri, Pilon Direk, Alternative Transients Program (ATP)

ABSTRACT

INVESTIGATION OF TRANSIENTS SITUATIONS IN POWER SYSTEMS WITH ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM (ATP)

Beyza Nur ÖZDAMAR

Master of Science Thesis

Department of Electrical & Electronic Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Mustafa ŞEKER

2025, 47+xiv pages

With the increasing demand for electrical energy, the power generation, transmission and distribution network is becoming more extensive and complex. Therefore, analyzing the growing power network becomes more difficult. Since possible failures affect the power quality and the operating sensitivity of the related devices, analyzing power systems is important for energy continuity. Therefore, in order to ensure energy continuity, it is necessary to find fast and economical solutions for failures that may occur in the power system. Lightning strikes are one of the important issues as they cause significant damage to power systems. High voltage poles and transformers are equipped with protective earthing to protect them from such effects. In overhead transmission lines, lightning usually strikes the protective conductor or the pole. When the transmission line is affected by the lightning strike, the lightning-induced current reaches the ground through the grounding system of the pole. However, in this case, high voltages are generated due to the grounding resistance on the pole. If this voltage level exceeds the impulse voltage resistance of the insulators, damage to the insulators is inevitable. Therefore, accurate determination of the pole grounding resistance in high voltage transmission lines is of vital importance. Therefore, it is vital to accurately determine the pole grounding resistance in high voltage transmission lines. Based on these problems, in this thesis, the overvoltages that occur in the event of a lightning strike on a pylon pole transmission line are modeled and analyzed with the Alternative Transients Program (ATP).

Key Words: Power Systems, Power Quality, Lightning Overvoltages, Pylon Mast, Alternative Transients Program (ATP)

İÇİNDEKİLER

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xii
SİMGELER DİZİNİ	xiii
KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tez Çalışmasının Amacı	2
1.2. Tezde Yapılan Çalışmalar	2
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1. Güç Sistemlerinde Geçici Durumların İncelenmesinde Kullanılan Programlar	4
2.1.1. CYME	4
2.1.2. DIGSILENT Power Factory	4
2.1.3. EMTP (Electromagnetic Transients Program)	5
2.1.4. ERACS (Electrical Engineering Analysis of Control Systems)	5
2.1.5. ETAP (Electrical Transient Analyzer Program)	6
2.1.6. NEPLAN Electricity	6
2.1.7. IPSA (Integrated Power System Analysis)	6
2.1.8. Power World	7
2.1.9. PSCAD (Power Systems Computer Aided Design)	7
2.1.10. PSSE (Power System Simulator for Engineering)	8
2.1.11. MATLAB.....	8
2.2. Güç Kalitesinde Meydana Gelen Bozukluklar	9
2.2.1. Harmonikler	9
2.2.2. Gerilim Çökmesi	10
2.2.3. Gerilim Kesintisi	11
2.2.4. Gerilim Yükselmesi	12
2.2.5. Gerilim Dalgalanmaları	13
2.2.6. Gerilim Titremesi	13
2.2.7. Yıldırım Aşırı Gerilimleri	13

3. MATERYAL VE YÖNTEM	16
3.1. EMTP'nin İşlevi ve Bileşimi.....	16
3.1.1. Toplu Parametre RLC.....	16
3.1.2. İletim Hattı.....	17
3.1.3. Transformatör	17
3.1.4. Doğrusal Olmayan Eleman.....	17
3.1.5. Anahtar.....	18
3.1.6. Gerilim ve Akım Kaynakları	18
3.1.7. Jeneratör ve Döner Makine.....	18
3.1.8. Kontrol.....	18
3.2. Hesaplama Yöntemi ve Ana Devrenin Formüle Edilmesi	19
3.2.1. Endüktans Devresi	19
3.2.2. Kapasitans Devresi	21
3.2.3. Direnç ve Dağıtılmış Parametre Hattı.....	22
3.2.4. Düğüm Denklemleri.....	24
3.3. TACS' de Hesap Yapma	25
3.4. Ana Devre ve TACS Arasındaki İlişki	26
4. İLETİM HATTININ ATP MODELİ VE YILDIRIM ETKİSİNİN SİMÜLASYONU	27
4.1. Eşdeğer Devre Modelinin Pilon Direk İçin Oluşturulması	27
4.2. İletim Hattı İçin Karakteristik Değerler	30
4.3. Yıldırım Dalga Şekli İçin Modelleme Yapılması.....	30
4.4. Direk Topraklama Direncinin Belirlenmesi	32
4.5. 154 kV İletim Sisteminin ATP Modeli	32
4.6. Yıldırım Akım Darbesinin Hattın Ortasında Yer Alan 3 Numaralı Direğin 2. Devre A Fazına Düşmesi Sonucunda İzolatör Aşırı Gerilimlerinin İncelenmesi ..	34
4.7. Yıldırım Akım Darbesinin Hattın Ortasında Yer Alan 3 Numaralı Direğin Gövdesine Düşmesi Sonucunda İzolatör Aşırı Gerilimlerinin İncelenmesi.....	36
4.8. Yıldırım Akım Darbesinin Koruma İletkenine Düşmesi Sonucunda İzolatör Aşırı Gerilimlerinin İncelenmesi	38
5. SONUÇ	41
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ.....	47

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 L endüktansı.	19
Şekil 3.2 ΔS alanı ve f fonksiyonu gösterimi.	20
Şekil 3.3 Endüktansın eşdeğer devresi	21
Şekil 3.4 Kapasitans.	21
Şekil 3.5 Kapasitansın eşdeğer devresi.	22
Şekil 3.6 Direnç devresi.	23
Şekil 3.7 Dağıtılmış parametre hattı.	23
Şekil 3.8 Dağıtılmış parametre hattının eşdeğer devresi.	24
Şekil 3.9 Dağıtılmış parametre hattı ile admittans matrisi.	25
Şekil 4.1 Türkiye’deki 154 kV iletim hatlarında genel olarak seçilen pilon direğin bölümleri.	28
Şekil 4.2 Pilon direk için fazlar ile koruma iletkeni arasındaki hat geometrisinin gösterimi.	28
Şekil 4.3 Çift devre pilon direğin eşdeğer ATP devre modeli.	29
Şekil 4.4 ATP programında yıldırım darbesi modelinin gösterimi.	31
Şekil 4.5 ATP simülasyonunda Heidler fonksiyonuyla oluşturulan 1.2/50 μs yıldırım akımı dalga şekli.	32
Şekil 4.6 154 kV iletim hattında bulunan beş adet pilon direğin ATP ile modellenmesi.	33
Şekil 4.7 154 kV iletim hattında bulunan beş adet pilon direğin ATP modelinde yıldırımın direk gövdesine düşme durumu.	33
Şekil 4.8 154 kV iletim hattında bulunan beş adet pilon direğin ATP modelinde yıldırımın faz iletkenine düşme durumu.	34
Şekil 4.9 154 kV iletim hattında bulunan beş adet pilon direğin ATP modelinde yıldırımın koruma iletkenine düşme durumu.	34
Şekil 4.10 Faz iletkenine yıldırım akım darbesi sonucu 3. direk gerilimleri.	35
Şekil 4.11 Faz iletkenine yıldırım akım darbesi sonucu 2. direk gerilimleri.	35
Şekil 4.12 Faz iletkenine yıldırım akım darbesi sonucu 1. direk gerilimleri.	36
Şekil 4.13 Direk gövdesine yıldırım akım darbesi sonucu 3. direk gerilimleri.	37
Şekil 4.14 Direk gövdesine yıldırım akım darbesi sonucu 2. direk gerilimleri.	37
Şekil 4.15 Direk gövdesine yıldırım akım darbesi sonucu 1. direk gerilimleri.	38
Şekil 4.16 Koruma iletkenine yıldırım akım darbesi sonucu 3. direk gerilimleri.	39
Şekil 4.17 Koruma iletkenine yıldırım akım darbesi sonucu 2. direk gerilimleri.	39
Şekil 4.18 Koruma iletkenine yıldırım akım darbesi sonucu 1. direk gerilimleri.	40

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 4.1 Pilon direğın ölçüleri.....	29
Tablo 4.2 İletim hattı için karakteristik değeriinin gösterimi.....	30
Tablo 4.3 Şekil 3 baz alınarak havai iletkenlerin konfigürasyonu.	30
Tablo 5.1 3 Numaralı direğın faz iletkenine düşmesi durumu.....	42
Tablo 5.2 Faz iletkenine düştükten sonra 1 numaralı direkte oluşan gerilimler.	43
Tablo 5.3 3 numaralı direğın gövdesine düşmesi durumu.	43
Tablo 5.4 Direkt gövdesine düştükten sonra 1 numaralı direkte oluşan gerilimler....	43
Tablo 5.5 3 numaralı direğın koruma iletkenine düşmesi durumu.....	44
Tablo 5.6 Koruma iletkenine düştükten sonra 1 numaralı direkte oluşan gerilimler.	44

SİMGELER DİZİNİ

C	Kapasitans
C'	Birim uzunluk başına düşen kapasitans
d	Mesafe (m)
Hz	Hertz
I	Akım
kA	Kiloamper
kV	Kilovolt
kHz	Kilohertz
L	Endüktans
L'	Birim uzunluk başına düşen endüktans
n	Yıldırım akımının diklik katsayısı
R	Direnç
RMS	Root Mean Square (Etkin Değer)
s	Laplace operatörü
τ_1	Akımın artma süresine bağlı olarak zaman sabiti
τ_2	Akımın azalma süresine bağlı olarak zaman sabiti
μs	Mikrosaniye
ρ	Yoğunluk
v	Yayılma hızı
pF	Pikofarad
Y	Düğüm iletkenlik matrisi
Z	Dalgalanma empedansı

KISALTMALAR DİZİNİ

ATP	: Alternative Transients Program
EMTP	: Electromagnetic Transients Program
ERACS	: Electrical Engineering Analysis of Control Systems
ETAP	: Electrical Transient Analyzer Program
IPSA	: Integrated Power System Analysis
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
MATLAB	: Matrix Laboratory
NEPLAN	: Network Planning
PSCAD	: Power Systems Computer Aided Design
PSSE	: Power System Simulator for Engineering
TACS	: Transient Analysis of Control Systems

1. GİRİŞ

Elektrik, günümüz toplumunun en temel ihtiyaçlarından biridir. Elektronik cihazların yaygınlaşmasıyla birlikte elektrik enerjisine olan ihtiyaç da artmaktadır. Yüksek kalitede elektrik ancak yeterli bakımı yapılmış elektrik şebekeleri ile mümkündür. Elektrik şebekesi, üretilen elektrik enerjisini kullanıcılara iletmek için oluşturulan bir ağıdır ve üretim, iletim ve dağıtım olmak üzere üç ana aşamadan oluşmaktadır. Artan yük talebiyle birlikte yeni iletim hatlarının kurulmasındaki zorluklar, değişen üretim ve yük tipleri ile pazar gereksinimlerindeki değişim gibi nedenlerle elektrik güç sistemleri üzerindeki baskı artmaktadır. Bu koşullar altında güç sistemlerinin kararlılığı üzerinde çeşitli olumsuz etkiler ortaya çıkmakta ve bu etkilerin sonucunda güç sistemlerinin kararlılık sınırlarını zorlamaktadır. Bu nedenle güç sistemlerinin tasarımı ve işletmesi sırasında sistem kararlılığına yönelik çalışmalar büyük önem taşımaktadır.

Elektrik enerjisi, güç sistemlerinin karmaşık yapısında, kaliteli, ucuz ve kesintisiz bir şekilde kullanıcıya ulaştırılmalıdır. Bu sebepten elektrik üretiminden iletimine ve kullanıcıya ulaştırılmasına kadar tüm süreçlerde dikkatlice yönetilmesi gerekir. Elektriğin kalitesi sabit genlikli ve sabit frekansta sinüs şeklinde bir gerilim ile sağlanabilir. Artan taleple birlikte tüketilen elektrik enerjisinin üretimini sağlamak için daha fazla enerji üretim tesisi kurulmalı ve bununla birlikte enerji iletimi ve dağıtımı konusunda yeni güç sistemlerinin kurulması gerekmektedir. Güç sistemlerinde kullanılacak olan malzemenin ve ekipmanın belirlenen özelliklere ve kriterlere uygun olması sistemin verimliliği ve güvenilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca kullanılması gereken malzemeler ve araçlar, iletimi ve dağıtımı yapılması planlanan sistemin güç bilgisine göre seçilmelidir. Yoksa güç sistemlerinde sürekli arızaların ortaya çıkması ve dolayısıyla sürekli enerji kesintilerinin yaşanması kaçınılmaz olacaktır. Bu durum, sürekli olmayan elektrik enerjisi tedariki açısından istenmeyen bir durum oluşturacağından güç sistemlerinin tasarımında iletim yapılacak olan sistemin gücüne uygun olarak optimal bir seçim yapılmasının önemini vurgulamaktadır. Standartlara uygun malzeme ve ekipman seçimine rağmen enerji iletim sistemlerinde arızalar meydana gelebilmektedir. Güç sistemlerindeki arızaların birçok farklı faktöre bağlı olmasından dolayı elektriksel, mekanik ve çevresel

etkenlerden kaynaklanabilmesi nedeniyle tamamen ortadan kaldırılması zor ve maliyetlidir. Oluşan arızalar istenmeyen sonuçları beraberinde getirebileceğinden, arıza sebeplerini önceden belirleyerek çözümler üretilmeli ve tekrarlanmaması için gerekli önlemler alınarak geliştirilmelidir. Bu yüzden tüketicilerin olumsuz etkilenmemesi ve üretimin aksamaması adına güç sistemlerinde oluşabilecek arızaların öngörülmesi veya önceden bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Böylelikle güç sistemlerinin tasarımı esnasında alınacak tedbirlerle üretim ve tüketiciler için oluşabilecek arızaların minimize edilmesi veya ortadan kaldırılması mümkün olacaktır. Bu sorunlardan yola çıkarak bu tezde elektromanyetik ve elektromekanik olayları modellemek ve analiz etmek için kullanılan ve EMPT programı baz alınarak geliştirilen, güç sistemlerinde sıklıkla kullanılan Alternative Transients Program (ATP) ile geçici durumlar incelenmiştir.

1.1. Tez Çalışmasının Amacı

Türkiye’de 154 kV iletim hatlarında yıldırım aşırı gerilimlerinin neden olduğu etkileri analiz edebilmek adına Alternative Transients Program (ATP) aracılığıyla bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yıldırım aşırı gerilimleri iletim hatlarında izolatör kopmaları ve diğer elektriksel ekipmanların bozulmaları gibi birçok olumsuz etkiye neden olmaktadır. Çalışmada faz iletkenine, iletim hattını taşıyan direğin gövdesine ve koruma iletkenine yıldırım düşmesi durumunda oluşacak gerilimler ATP ile incelenerek, iletim hatlarında yıldırım aşırı gerilimlerin neden olduğu olumsuzlukları gidermek için çözüm önerileri sunulmaktadır.

1.2. Tezde Yapılan Çalışmalar

Çalışmada 5 direkli bir iletim hattında faz iletkenine, direğe ve koruma iletkenine yıldırım düşmesi durumunda oluşabilecek aşırı gerilimler ATP programı ile incelenmiştir. Bu doğrultuda direk modeli, hat tipleri ve iletkenlerin birbirlerine göre konfigürasyonları ATP programında modellenerek sistem modeli oluşturulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Fatma Yaprakdal vd. (2016) Türkiye enerji iletim sisteminde kullanılan 154 kV'luk, çift devre, tek koruma hatlı, kafes direkli havai iletim hatlarına direkt yıldırım düşmesi durumunu ATP- EMTP programını kullanarak analiz etmişlerdir. ATP-EMTP simülasyonları aracılığıyla bu tip direk üzerindeki izolatörlerde koruma hattı hatasından kaynaklı iletim hattına direkt düşebilecek ve gerilim atlamasına neden olabilecek minimum ve maksimum yıldırım akımları incelenmiştir. [1]

Kaygusuz ve Şeker (2011) 154 kV' luk enerji nakil hatlarında kullanılan kafes direklerle yıldırım düşmesi sonucu meydana gelen aşırı gerilimler Alternative Transients Program (ATP) kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada pilon ve çatal pilon direk tipi kullanılmıştır. Direkler için basit ve çift katlı model oluşturularak iletim sistemiyle birlikte incelenmiştir. İletim sisteminde kullanılan kafes direk modellerinde toprak iletkenine yıldırım düşmesi durumunda meydana gelen aşırı gerilimler direğin uniform olmayan modeli kullanılarak simülasyonu gerçekleştirilmiştir. [2]

Yoldaş ve Özen (2019) yıldırımdan dolayı oluşan aşırı gerilimlerin sağlıklı bir şekilde toprağa akmasını sağlamak ve hatlarda yıldırımın oluşturduğu aşırı gerilim atlamalarını engellemek amacıyla PSCAD programı ile bir iletim hattı modellemiştir. Modellemede kullanılan direk bilgileri TEİAŞ literatüründen, yıldırım bilgileri ise koordinat bazlı olarak Meteoroloji Genel Müdürlüğü 4. Bölge Müdürlüğü'nden alınmıştır. Farklı yıldırım şiddetleri kullanılarak seçilen iletim hattına düşürülmüştür. Direk ayak topraklama dirençleri ve arıza verileri TEİAŞ 19. Bölge Müdürlüğü'nden alınarak değerlendirilmiştir ve enerji iletim hattının işletme koşullarında olması gereken üst topraklama değerleri ve alt izolatör boylarına ilişkin değerlendirmeler yapılmıştır. [3]

Şeker ve Çıkan (2019) tarafından çatal pilon direkli iletim hattının koruma iletkenine ve taşıyıcı direğine yıldırım çarpması ile ortaya çıkabilecek aşırı gerilimler ATP kullanılarak analiz edilmiştir. Yıldırım akımı dalga formu 8/20 μ s' lik yıldırım darbesine sahip Heidler fonksiyonu olarak modellenmiştir. Direk topraklama elektrotunun farklı pozisyonları ve uzunlukları için direk toprak direncinin yıldırım çarpmalarında oluşan aşırı gerilimler üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. [4]

2.1. Güç Sistemlerinde Geçici Durumların İncelenmesinde Kullanılan Programlar

Güç sistemlerini meydana getiren iletim hatları ve sistemde kullanılan ekipmanların karmaşık yapıda olmasından kaynaklı sistem arızalarının tespiti ve sorunların giderilmesi maliyetli bir durumdur. Güç sistemlerinde oluşan arızalar çeşitli sebeplerden oluşabilmektedir. Bu yüzden sistem detaylı bir şekilde incelenmelidir. Giderek artan enerji talebiyle birlikte üretim, iletim ve dağıtım şebekesi de genişlemekte ve karmaşık hale gelmektedir. Bu nedenle güç sistemlerinin planlanması, geçici durumların incelenmesi ve analiz edilmesi için bilgisayar tabanlı yazılımlar geliştirilmiştir. Geliştirilen programlar sayesinde güç sistemlerinde olası arıza durumlarında, farklı arıza türlerinin sistemdeki etkilerini ve boyutlarını analiz ederek, bu arızaların sisteme olan etkilerinin incelenmesi ve değerlendirilmesiyle birlikte enerji sürekliliğinin sağlanması hedeflenmiştir. Bu bağlamda, çeşitli arıza durumlarının güç sistemindeki etkilerinin büyüklükleri hesaplanarak, güç akışı analizi ve arıza analizi gerçekleştirilerek maliyet ve zaman açısından da büyük katkıda bulunmaktadır. Güç sistemlerinin modellenmesinde kullanılan programlara örnek olarak CYME, DIGSILENT Power Factory, EMTP, ERACS, ETAP, NEPLAN, IPSA, Power World, PSCAD, PSSE ve MATLAB verilebilir.

2.1.1. CYME

CYME simülasyon programı güç sistemlerinin analizi, tasarımı ve yönetimi için tasarlanmış elektrik mühendisliği alanında kullanılan grafik tabanlı bir yazılım programıdır ve analiz sonuçlarını görselleştirerek detaylı raporlar oluşturur. CYME, elektrik dağıtım sistemlerini modelleyerek analiz etmeye yardımcı olan çeşitli araçlar sunar. Güç akışı, kısa devre durumu analizi, dinamik analiz gibi çeşitli özellikleri sayesinde mühendislerin ve araştırmacıların karmaşık enerji sistemlerini daha iyi anlamalarına, tasarımlarına ve optimize etmelerine yardımcı olur.

2.1.2. DIGSILENT Power Factory

Bu program güç sistemlerinin grafik tabanlı simülasyonunu yaparak görsel olarak modellenmesi ve planlanması için kullanılan bir yazılımdır. Enerji tüketimini optimize etmek ve güç sistemlerini daha etkili yönetmek için endüstriyel tesislerde bölümler

tarafından uygulanır. Elektrik sistemlerinde oluşan harmoniklerin etkisini değerlendirir ve gerekli filtreleme çözümlerini önerir. Enerji üretim maliyetlerini en düşük seviyede tutabilmek için optimizasyon senaryoları oluşturur. Zamanla değişen durumları simüle ederek sistemin tepkisini analiz eder. Bu yazılım etkili bir simülasyon ve analiz yöntemleri sağlayarak sistem performansını artırmaya yardımcı olur.

2.1.3. EMTP (Electromagnetic Transients Program)

Simülasyon programı Hermann Dommel tarafından 1966 yılında tasarlanmıştır. Elektromanyetik geçişlerin (transient) analizi için tasarlanmıştır. EMTP, güç sistemlerinde yıldırım etkilerini, kısa devre analizini ve diğer geçici olayların dinamik davranışını modellemek ve simüle etmek için kullanılır. Karmaşık güç sistemlerini ve bileşenlerini modellemek için gelişmiş bir grafik arayüz sunar, böylece kullanıcılar şebekeleri görsel olarak tasarlayabilir ve analiz edebilir. Program, belirli bir zaman aralığında sistemin davranışını inceleyerek, zamanla değişen akım ve gerilim değerlerini hesaplayabilir. Geçici olayların analizi için geniş bir uygulama yelpazesine sahip olmasından dolayı araştırma laboratuvarlarında ve üst düzey mühendisliklerde sıklıkla kullanılmaktadır.

2.1.4. ERACS (Electrical Engineering Analysis of Control Systems)

Güç sistemleri analizinde kullanılan kapsamlı bir yazılımdır. Bu program, elektrik şebekelerinin tasarımı, analizi ve simülasyonu için yaygın olarak kullanılır. ERACS, güç sistemindeki yük akışının hesaplanması, enerji transferinin analizi ve gerilim seviyelerinin kontrolü gibi temel işlevler sunar. Yük dengesi ve sistem performansını değerlendirmek için kararlı durum analizi yapar. Sistemdeki harmoniklerin analiz edilmesine ve filtreleme yöntemlerinin uygulanmasına olanak sağlar. Harmoniklerin sistem üzerindeki olumsuz etkilerini belirlemek ve çözmek için kullanılır. Üç fazlı kısa devreler, faz-toprak arızaları veya ara faz kısa devreleri gibi çeşitli arıza türlerini analiz eder. Güç sisteminin dinamik durumdaki davranışını değerlendirir. Arıza ve toparlanma sürelerini simüle ederek sistem kararlılığını artırmaya yardımcı olur. Elektrik sistemindeki geçici olayların ve aşırı gerilimlerin etkilerini analiz etmek için kullanılır.

2.1.5. ETAP (Electrical Transient Analyzer Program)

Güç sistemlerinin analizi ve tasarımı için geliştirilmiştir. Yazılım, güç akışı analizi, kısa devre analizi, dinamik analiz, sistem güvenilirliği analizi ve kontrol sistemleri gibi bir dizi mühendislik uygulamasını destekler. ETAP, elektrik şebekelerinin güç akışını hesaplayarak, gerilim düşüşlerini, akımları ve diğer ilgili parametreleri detaylı bir şekilde analiz eder. Büyük ölçekli sistemlerin, endüstriyel tesislerin ve ticari binaların güç sistemlerinin analizinin modellenmesinde oldukça sık kullanılır.

2.1.6. NEPLAN Electricity

Elektrik şebekelerini analiz etmek, planlamak, optimize etmek ve simüle etmek için kullanılan bir yazılım aracıdır. Kapsamlı kütüphanesi ile kullanıcı dostu grafik arayüzüdür. IEC, ANSI, IEEE vb. gibi uluslararası standartlara sahiptir. Şebekelerde güç akışını hesaplayarak, gerilim düşüşleri, akımlar ve güç kayıpları gibi parametreleri analiz eder. Analiz sonuçlarını rapor olarak verir ve şebeke performansını artırmaya yardımcı olur. Şebeke projelerinin tasarımında ve geliştirilmesinde optimizasyon sağlar ve böylece maliyetler düşürülür. Kısa devre olaylarını simüle eder ve sistem tepkisini ve ekipmanların korunma gereksinimlerini değerlendirir. Güneş, rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının etkilerini değerlendirmek için kullanılır. NEPLAN' ı kullanarak karmaşık güç sistemleri daha etkin bir şekilde yönetilebilir ve güvenli enerji hizmeti sağlanabilir.

2.1.7. IPSA (Integrated Power System Analysis)

Karmaşık elektrik şebeke sistemlerinin tasarlanmasına, planlanmasına ve işletilmesine olanak sağlayan görsel tasarım ve analiz programıdır. Geniş bir uygulama yelpazesi sunan IPSA, şebeke performansını arttırmaya yardımcı olur ve şebekenin güvenilirliğini analiz ederek potansiyel sorunları tanımlar. Yazılımın sağladığı analitik araçlar, çeşitli senaryoların değerlendirilip optimize edilmesini sağlar. Şebekedeki güç akışını hesaplayarak gerilim, akım ve gücü analiz eder. Sistem içindeki harmoniklerin etkilerini değerlendirir ve bu durum güç kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sistem içerisinde meydana gelen hataları algılayarak arızaya ait grafikleri verir ve böylece kullanıcıya kolaylık sağlar.

2.1.8. Power World

1990'lı yılların başında Illinois Üniversitesi hocalarından Profesör Thomas Overbye ve öğrencilerinin güç sistemlerinin karmaşık yapısını analiz edebilmek için bir araca ihtiyaç olduğunu anlamalarıyla ortaya çıkmıştır. Güç sistemlerinin analizinin elle yapılan yöntemlerle gerçekleştirilmesi, özellikle sistemdeki baraların sayısı arttıkça matematiksel hesaplamaların çözümünü oldukça zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, güç sistemlerinin daha anlaşılır, yönetilebilir ve sade bir şekilde analiz edilebilmesi için bir programın tasarlanmasına karar verilmiş ve bu doğrultuda çalışmalara başlamışlardır. Elektrik güç sistemlerinin simülasyonu, analizi ve görselleştirilmesi için geliştirilmiş bir yazılımdır. Elektrik mühendisliği ve güç sistemleri alanında eğitim, araştırma, planlama ve analiz çalışmalarında kullanılmaktadır. Kolay bir arayüze sahip olduğundan güç sistemlerini modellemeyi ve analiz etmeyi kolaylaştırır.

2.1.9. PSCAD (Power Systems Computer Aided Design)

Güç sistemi geçici süreç analizine odaklandığı ve sade bir ara yüz sunduğu için özellikle enerji üretim, iletim, dağıtım sistemleri ve akademik araştırmalarda yaygın olarak kullanılır. PSCAD, güç sistemlerinde meydana gelen geçici olayları modeller ve sistemin dinamik tepkisini simüle eder. Kısa devre, dinamik yük değişimleri gibi durumları inceler. Güneş ve rüzgâr enerjisi sistemlerinin davranışlarını analiz eder. Enerji iletim ve dağıtım sistemlerinin performansını değerlendirerek güvenilirliğini arttırmanın yollarını sunar. Ayrıca jeneratörler, trafo, iletim hatları, yükler ve diğer elektrik bileşenlerini içeren geniş bir kütüphane içermektedir ve bu bileşenlerle farklı senaryolar oluşturularak incelenebilir. Bu sayede, güç sistemi daha tasarım aşamasında analiz edilebilir, karşılaşılabilecek olası sorunlar simüle edilebilir ve sistemin kararlılık analizi gerçekleştirilebilir. Bu durum, zaman tasarrufu sağlarken ekonomik açıdan da önemli bir katkı sunar. Gerilim, akım, güç, frekans gibi önemli elektriksel parametreleri detaylı bir şekilde analiz etmelerine olanak tanır. Simülasyon sonuçlarını grafikler ve raporlar şeklinde sunar. Kullanıcılar, bu verilerle sistem performansını değerlendirerek olası problemleri tespit edebilir ve gerekli optimizasyonları uygulayabilir. PSCAD, ulusal ve bölgesel elektrik şebekelerinin analizi için oldukça önemli ve güçlü bir araçtır. Geçici durum analizi için sunduğu çözümler ve kolay bir ara yüze sahip olmasından kaynaklı enerji üretimi, iletim, dağıtım sistemleri ve akademik araştırmalarda yaygın olarak kullanılır.

2.1.10. PSSE (Power System Simulator for Engineering)

Siemens tarafından geliştirilen ve güç sistemleri analizi, planlaması ve simülasyonu için kullanılan kapsamlı bir yazılımdır. Enerji iletim sistemlerinin tasarımında, analizi ve optimizasyonunda endüstri standardı olarak kabul edilmektedir. PSSE, mühendislik çözümleri sunarak elektrik şebekelerinin dinamik davranışını anlamayı ve performanslarını değerlendirmeyi sağlar. Şebekelerde güç akışını hesaplayarak gerilim seviyeleri, akımlar ve güç kayıpları gibi parametreleri analiz eder. Bu, şebeke tasarımında ve işletiminde kritik öneme sahiptir. Rüzgâr türbinleri sistemlerinde dinamik yük akışının incelenmesini gerçekleştirir. Dengeli ve dengesiz güç sistemlerinin analizini gerçekleştirir. Zamanla değişen olayların simülasyonunu yaparak, jeneratörlerin, motorların ve diğer ekipmanların dinamik tepkilerini değerlendirir. Program dinamik ve statik analizleri ve kolay kullanımı ile güç sistemlerinde önemli bir yere sahiptir.

2.1.11. MATLAB

MathWorks şirketi tarafından geliştirilmiştir ve matris tabanlı bir programlama dili ve sayısal hesaplama ortamıdır. Mühendislik, bilim ve ekonomi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Matris temellidir ve sayısal işlemleri, matris ve vektörlerle çalışmayı sağlayan kolay ve güçlü bir yazılımdır. Diferansiyel denklemler, matematiksel optimizasyon ve istatistiksel analiz gibi matematiksel problemleri çözer ve kodlar. Fiziksel sistemlerin dinamik davranışlarını modeller ve simülasyonunu gerçekleştirir. Grafikler, çizelgeler, 3D modeller gibi görselleştirmeler oluşturmak için güçlü araçlar sunmaktadır. Makine öğrenimi gibi alanlarda veri analizi yapabilmek için algoritmaların uygulanabileceği araç kutuları sağlar. Görüntü ve sinyal işleme uygulamalarında kullanılır. C, C++ ve Python gibi programlama dillerine entegre edilebilir ve özelleştirilebilir bir yazılım olduğu için mühendislik projelerinde ve AR-GE çalışmalarında oldukça yaygın kullanılmaktadır. Teorik ve akademik çalışmalarda, güç elektroniği projelerinde, kararlı ve geçici durum analizlerinde de tercih edilen ve kolaylık sağlayan bir yazılımdır.

2.2. Güç Kalitesinde Meydana Gelen Bozukluklar

Elektrik güç sistemlerinde kullanıcıların cihazlarını etkileyen herhangi bir gerilim, akım veya frekans bozukluğu güç kalitesi sorunu olarak tanımlanmaktadır ve bu durum olası bir güç sorunu anında cihazların zarar görmesine sebep olmaktadır. Çoğu elektrikli cihaz, şebekedeki gerilim ve frekans dalgalanmalarına karşı fazla duyarsız olsa da son yıllarda yaygınlaşan elektronik devrelerle beslenen ve kontrol edilen cihazlar enerji kalitesine son derece hassastır. Bu yüzden güç kalitesi sorunlarının azaltılması son derece önemlidir. Karmaşık devreler, şebekedeki bozulma etkilerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu durum, elektronik devreler ile kontrol edilen cihazların veya endüstriyel tesislerin hatalı işler yapmasına ya da tamamen devre dışı kalmasına sebep olabilmektedir. Bu nedenle, gelişen sanayi tesisleri ve elektrikli cihazların güvenilir bir şekilde çalışabilmesi için hem tüketiciler hem de şebeke açısından enerji kalitesi ile ilgili bazı düzenlemeler ve sınırlamalar getirilmesi gerekmektedir. Elektrostatik boşalmalar, elektromanyetik dalgalar ve işletme sırasında meydana gelen hatalar gibi bozulma kaynaklarının büyük bir kısmı tüketiciden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, aşırı sıcaklık artışı, istenmeyen titreşimler ve iletken bağlantılarındaki gevşeklikler gibi mekanik veya elektriksel problemler de bozulma sebepleri arasındadır.

2.2.1. Harmonikler

Harmonikler, besleme geriliminin belirli frekans katları olan sinüzoidal dalga biçimleri olarak tanımlanır. Alternatif akım sistemlerinde, akımın ve gerilimin şekli sinüs fonksiyonu olarak görülmelidir. Fakat artan doğrusal olmayan yükler, bu dalga formlarını bozarak sinüs formundan uzaklaşmasına sebep olmaktadır. Temel frekanstan farklı frekans değerlerine sahip akım ve gerilim sinyallerinin elektrik dağıtım sistemlerinde oluşmasına harmonik “bozunma” adı verilir [5]. Enerjinin etkin bir şekilde üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması için akım ve gerilimin 50 Hz frekansta sinüs şekline yakın olması önemlidir; bu, enerji kalitesi için kritik bir faktördür. Harmonikler, bu bozulmalar sonucunda oluşarak enerji kalitesini olumsuz etkiler. Harmonikler, elektrik sistemlerinin genel işleyişini durdurmaz, ancak bir fabrikanın yüksek harmonik üretmesi, yakınındaki tesisleri olumsuz etkileyebilir. Harmoniklerin ekonomik etkileri tesisat ömründe kısalma, enerji verimliliğinde düşüş ve beklenmeyen kesintilere karşı hassasiyet şeklinde ifade edilebilir. Harmonik

problemlerinin sebebi büyük ölçüde tüketicilere aittir. Tesisatlardaki harmonik akımlar, ortak bağlantı noktasına döndüğünde besleme empedansında harmonik gerilim oluşturur. Bu gerilim bozulmaları, iletim sistemine yayılır ve transformatörler gibi lineer olmayan özelliklerden dolayı mevcut harmonik bozulmalarla birleşir. Tüketiciler, belirli gerilim dalgalanmalarına rağmen faaliyetlerini sürdürebilir; ancak harmonik kaynaklarının saptanması zor olduğundan genellikle tedarikçiler suçlu bulunur. Oysaki, harmonik sorunların çoğunlukla tesisatta kullanılan cihazlardan ve uygulamalardan kaynaklandığı görülmektedir. Doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan harmonik bozulma, elektrik besleme sisteminde beklenenden daha yüksek akımlara yol açar. Bu akımlar, uzman kişiler tarafından kullanılan temel cihazlarla efektif olarak ölçülemeyebilir. Oluşan harmonik frekans bileşenleri, transformatörlerde girdap akımı kayıplarına yol açar. Bu kayıplar, transformatörün çalışma sıcaklığını artırır ve ömrünün kısılmasına sebep olur. Kullanım ömürleri uzun yıllar olmasına rağmen kısa sürelerde transformatörlerin değiştirilmesi ise ciddi maliyet sorunları oluşturmaktadır. Tesisatın doğru uygulanması ve uygun teçhizat seçimi, önemli harcamalar gerektirmeden yeterli önlemler olarak değerlendirilebilir. Hesaplanan kesit değerinden daha büyük kesitli kablo seçimi ilk etapta pahalı bir yol olarak görünebilir fakat ileride yaşanabilecek arızaların oluşturacağı maliyete oranla daha iyimser bir tablodur.

2.2.2. Gerilim Çökmesi

Gerilim çökmesi, RMS gerilimindeki anlık bir düşüştür ve tesis içindeki veya şebeke sistemindeki kısa devre arızaları sonucu meydana gelmektedir. Güç sistemlerinde nominal şartlar dışında kabul edilen gerilim çökmesi, istenmeyen durum olarak değerlendirilir. Gerilim çökmeleri tesislerin yaşadığı önemli güç kalitesi problemleri arasında yer almaktadır. Bu problemin tesisler üzerindeki etkisinin büyük olmasının sebebi kontrol cihazları ve bilgisayarlar gibi donanımlar üzerinde bıraktığı hasar durumudur. Bu tür cihazlarda çalışma geriliminin etkin değeri bir veya iki periyodu aşan bir süre boyunca %90 seviyesinden aşağılara düşerse cihazlar olumsuz yönde etkilenebilir. Endüstri tesislerinde kullanılan cihazların sayısının ve karmaşıklığının giderek artmasından kaynaklı tesisler gerilim çökmesine karşı daha hassas hale gelmektedir. Gerilim çökmelerinin tesisler üzerinde bıraktığı olumsuz etkiler, gerilim

kesintilerinin etkisi kadar değildir. Gerilim kesilmelerine göre gerilim çökmeleri daha çok yaşandığından sebep olduğu zarar tesisler için daha büyük bir problemdir. Gerilim çökmelerinin etkili bir şekilde çözülebilmesi için, öncelikle sistemdeki belirtilerin doğru tespit edilmesi ve bu sorunları ortaya çıkaran temel nedenlerin detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra çeşitli yöntemler kullanarak gerilim çökmelerine karşı önlemler alınabilir. Bunlara örnek olarak, güç kalitesi izleme sistemleri kurarak gerilim çökmelerini tespit etmek ve analiz etmek mümkündür. Bu sistemler, anlık gerilim değerlerini ve enerji kalitesini sürekli olarak izler. Tesislerdeki elektrik yüklerinin dengeli bir şekilde dağıtılması, gerilim çökmesini önlemeye yardımcı olabilir. Aşırı yüklenme durumları engellenmelidir. Endüstriyel tesislerde kullanılan elektrikli ekipmanların kalitesi, gerilim çökmesi üzerindeki etkisini azaltır. Düzenli bakım ve modern ekipman kullanımı önemlidir. Gerilim çökmesine karşı koruma sağlamak için gerilim stabilizatörleri veya kesintisiz güç kaynakları (UPS) kullanılabilir. Bu cihazlar, anlık gerilim düşüşlerinde elektrik akışını stabilize eder. Bu işlemler sayesinde gerilim çökmesinin etkilerini azaltarak endüstriyel faaliyetlerin aksamadan devam etmesi sağlanabilir.

2.2.3. Gerilim Kesintisi

Kesintiler, güç kalitesinde yaşanan önemli problemlerden biridir. Elektrik şebekesinde elektrik akımı tamamen veya kısmen kesilebilir. Bu durum, tamamen elektriksiz kalmayı yani tam kesintiyi ya da şebeke geriliminin normal seviye altına inmesi durumu olan kısmi kesintiyi kapsar. Çoğu zaman kısa süreli olaylar olmasına rağmen uzun sürdüğü zamanlarda bulunmaktadır ve ciddi maddi kayıplara sebep olmaktadır. Gerilim kesintisi yaşanmasının birçok sebebi olabilir. Bunlar arasında yeni hatların ihtiyacı veya şebeke bakımı gibi nedenlerden dolayı elektrik şirketleri tarafından uygulanan planlı kesintiler bulunmaktadır. Bu tür kesintiler gerçekleşmeden önce elektrik şirketleri tarafından haber verilmektedir. Plansız kesintiler ise beklenmeyen olaylar sonucu oluşan kesintilerdir ve doğal afetler, hava koşulları, kazalar gibi olumsuz durumlar sonucunda elektrik direklerinin zarar görmesi, şebeke kapasitesinin aşılması ve ekipman arızaları gibi nedenlerden dolayı meydana gelmektedir. Bina veya tesisdeki tesisattan kaynaklı oluşan arızalarda gerilim kesintisine sebep olarak bütün sistemi enerjisiz bırakabilir. Uzun süreli güç kesilmelerini önlemek için iki önemli

husus bulunmaktadır. Birincisi tesisat için gerekli olan malzemelerin doğru seçilmesi ve uygulanmasıdır. İkincisi ise yedek güç kaynağı ihtiyacının belirlenerek ona göre bir seçim yapılmasıdır. Bu iki durumu tesisin başlangıç aşamasında dikkate almak, tesisin ileride yaşayabileceği arızalarda ciddi kazançlar sağlayacaktır. Tesisin ihtiyacının ve güç kaynağı şeklinin de dikkatli seçilmesi gerekmektedir. Kısa ya da uzun süreli güç kesintilerine karşı jeneratör kullanmak tesis için doğru bir karar olacaktır. Fakat jeneratörlerin devreye girmesi birkaç dakikayı bulduğundan dolayı önemli veriler için UPS kullanılmalıdır. UPS'ler elektrik kesintisi, ani voltaj dalgalanmaları ve şebeke sorunları gibi beklenmeyen durumlarda kesintisiz güç kaynağı sağlamaktadır. Bu sayede veri kaybı yaşanmaz ve cihazlarda bir hasar meydana gelmez. Gerilim kesintisinin sonuçları, kesintinin süresine, şiddetine, etkilenen bölgenin büyüklüğüne ve bölgedeki altyapının sağlamlığına göre değişmektedir. Gerilim kesintilerinin sıklığını ve etkilerini azaltmak için elektrik şirketleri tarafından şebeke güçlendirme ve altyapıyı geliştirme çalışmaları titizlikle yürütülmelidir.

2.2.4. Gerilim Yükselmesi

Gerilim yükselmesi, gerilim çökmesinin zıttı bir durum olup daha nadir görülür. Bu olay, normal gerilim değerinin %110 ile %180 seviyesine, yarım periyottan bir dakikaya kadar olan sürede yükselmesi olarak ifade edilir. Gerilim çökmelerinin sonuçları daha görünür olsa bile gerilim yükselmesinin sonuçları genellikle daha tahrip edicidir. Bu durum, güç kaynaklarındaki parçaların zamanla bozulmasına yol açabilir ve etkileri hemen fark edilmeyebilir. Bunun sonucunda aşırı ısınmaya bağlı sistem arızaları ve özellikle hassas elektronik cihazlarda kalıcı hasarlar oluşabilir. Kısacası gerilim yükselmesinin etkileri, hem kısa vadeli iş kesintileri ve verim kayıpları, hem de uzun vadeli ekipman hasarı ve yangın riski gibi ciddi sorunlar içerir. Bu nedenle, gerilim yükselmelerine karşı etkili koruma önlemlerinin alınması büyük önem taşır. Bunlardan birkaçını sıralayacak olursak parafudur kurulumu, düzgün topraklama sistemlerinin kurulması, gerilim regülatörleri, elektrik tesisatının periyodik bakımı, gerilim seviyelerinin sürekli olarak izlenmesi, kablo kesitlerinin uygun seçilmesi ve yük dengelemesinin yapılması gibi örnekler verilebilir.

2.2.5. Gerilim Dalgalanmaları

Gerilim dalgalanmaları genlikteki kısa süreli değişimlerden kaynaklanan geçici voltaj değişiklikleridir. Kısa süreli olan bu olaylar genellikle birkaç mikro saniye ile milisaniye arasında sürer ve elektrik sistemindeki sürekliliğin bozulmasına neden olarak gerilim darbesi ve yüksek voltaj zirvesi gibi durumları da beraberinde getirir. Bu dalgalanmalar, elektrikli cihazların düzgün çalışmasına engel olarak önemli hasarlara yol açar. Yıldırım gibi doğa olayları sonucunda elektrik hatlarında büyük bir enerji yüklenir ve gerilim dalgalanmasına yol açar. Ayrıca ark hataları, aşırı yüklenme, cihaz arızaları gibi durumlar da bu tür dalgalanmalara neden olabilir. Bu zararlı etkilerden korunmanın en yaygın ve etkili yolu endüstriyel sınıf aşırı gerilim sönümleyiciler kullanmaktır. Bu cihazlar özellikle yıldırım, elektrik şebekesindeki ani gerilim artışları ve diğer dalgalanmalara karşı koruma sağlar. Gerilim dalgalanmaları, güç kalitesinde önemli bir parametre olarak değerlendirilir ve modern enerji sistemlerinin güvenilir çalışmasını sağlamak için dikkatle kontrol edilmelidir.

2.2.6. Gerilim Titremesi

Gerilim titremesi (Flicker), elektrik şebekesinde voltajın sabit genliğinde meydana gelen hızlı değişimlere verilen isimdir. Bu değişimler, genellikle yük değişimleri ya da sistemdeki dengesizlikler nedeniyle ortaya çıkar ve özellikle aydınlatma cihazlarında titreşimli bir ışık etkisi olarak fark edilir. Titremenin şiddeti ise gerilimin büyüklüğüne ve frekansına bağlıdır. Işıkların titremesi en basit ve fark edilebilir belirtilerinden biridir. Ayrıca diğer elektrikli cihazların düzgün çalışmasını da etkileyebilir.

2.2.7. Yıldırım Aşırı Gerilimleri

Yıldırım, bulut ile yeryüzü arasındaki gerilim farkının atmosferin dayanamayacağı bir seviyeye ulaşmasıyla oluşan bir elektrik boşalmasıdır [6]. Yıldırım çarpmalarının oldukça yüksek yıldırım akımına neden olabileceği araştırmacılar tarafından ele alınmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, yıldırım akımlarının tepe değerlerine bağlı olarak “kümülatif olasılık dağılımları” tanımlanmıştır [7]. Kümülatif olasılık dağılımlarına göre, yıldırım akımları 30 kA değerini aşarak 100 kA değerlerine çıkabilir. Ancak, yıldırım akımının 100 kA’i geçme ihtimali düşüktür [7]. Yüksek

gerilim havai iletim hatlarının direkleri ve transformatörleri, yıldırım çarpmasına karşı koruma topraklaması ile donatılmıştır. Başka bir koruma sistemi bulunmamaktadır [8]. Yıldırım, yüksek gerilim hatlarına isabet ettiğinde yıldırım akımı direk topraklama direnci aracılığıyla toprağa geçer. Oluşan akım, direk topraklama direnci sebebiyle direkte oldukça yüksek bir gerilim oluşturur. Eğer bu gerilim, izolatörlerin dayanabileceği gerilimden fazla olursa, izolatörler hasar görür ve elektrik kesintilerine yol açar [9]. Yüksek gerilim havai hat direklerine yüksek akımlı yıldırımların çarpması sık rastlanan bir olaydır. Ayrıca yıldırım çarpması olayı, yıldırımın faz iletkenlerine ya da koruma iletkenine düşmesi şeklinde de gerçekleşebilir. Fakat üç durum içinde yıldırım aşırı gerilimleri iletim hatlarında normal değerden daha fazla yüksek gerilim artışlarına yol açar [10][11]. Yıldırım çarpmaları genelde yıldırımın koruma iletkenine düşmesiyle ya da iletim hattının taşıyıcı direğine düşmesiyle meydana gelmektedir. Yıldırım aşırı gerilimlerinin oluşması elektrik iletim hatlarında çok yüksek voltajlara neden olur ve bu da elektrik sistemine bağlı diğer cihazların hasar görmesine veya bozulmasına sebep olur [4]. Özellikle güç transformatörleri, yıldırım aşırı gerilimlerinden etkilenecek izolasyonlarında sorunlar yaşayabilir. Bu yüzden, yıldırım aşırı gerilimlerinin elektrik iletim hatlarında bıraktığı etkileri analiz etmek güç sistemlerinin istikrarını sağlamak için çok önemli bir konudur. Yıldırım aşırı gerilimlerinin laboratuvar ortamında nasıl oluştuğunu ve nasıl etkilendiğini deneysel olarak incelemek hem çok zor hem de çok pahalıdır. Bu nedenle, bu konuda çalışan araştırmacılar için çeşitli simülasyon programları geliştirilmiştir. Bu programlar sayesinde, yıldırım çarpması sonucu oluşan aşırı gerilimlerin analizi yapılabilir. Ancak, doğru bir şekilde analiz yapabilmek için yıldırım dalgasının şekli, elektrik hattının özellikleri, direklerin ve izolatörlerin modelleri gibi elektrik sistemine ait unsurların doğru bir şekilde modellenmesi şarttır. Dommel'in çalışmalarına dayanan Alternative Transients Program (ATP), elektrik sistem unsurlarının modellenmesine imkân vermektedir ve elektrik sistemlerinin araştırılmasında sıkça tercih edilmektedir [12] [13]. Yıldırım akımı ve gerilimi dalga formlarını belirlemek için Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından belirlenen standartlar kullanılır. IEC standartlarına göre, yıldırım akımı dalga formu $10/350 \mu s$ ve $8/20 \mu s$ olarak tanımlanır. Bu değerler, akımın maksimum değerine ulaşması için gereken süre ve akımın maksimum değerinin yarısına düşmesi için gereken süre olarak yorumlanır (IEC Standartları, 61643-11). IEC standartlarına göre yıldırım geriliminin dalga şekli 1.2/50

μs olarak tanımlanır. Bu değer, gerilimin maksimum değerine ulaşması için gereken süre ve gerilimin maksimum değerinin yarısına düşmesi için gereken süre olarak yorumlanır (IEC Standartları, 61000-4-5). İletim hatlarının farklı özelliklerini tanımlamak için PI ve J. Marti gibi modeller kullanılmaktadır. PI model, kısa iletim hatları için basit bir modelleme sunmaktadır. J. Marti model ise, uzun iletim hatlarının daha gerçekçi bir şekilde modellenmesi için uygundur ve iletim hatlarının yüksek frekans davranışlarını dikkate alır [14]. Elektrik direkleri ve iletim hatlarının analizi için elektromanyetik alan etkisinden yararlanılmıştır. Direklerin geometrik yapısı, elektromanyetik alan etkisine göre tasarlanmıştır. Geometrik şekiller kullanılarak, elektrik direkleri için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Kawai, iletkenlerin karakteristik empedansı ile dalga boyunun nasıl ilişkili olduğunu göstermiştir [15]. Chow ve arkadaşları, iletkenlerin karakteristiklerini belirten empedans değerleri ve yayılma sabitleri konusunda araştırmalar yapmışlardır [16]. Başlangıçta elektrik direkleri ve hatlarının modellenmesinde, direklerde bulunan koruma iletkeninin rolü göz ardı edilmiştir. Ishii ve arkadaşları ise koruma iletkenlerinin de direk modeline dahil edilmesi gerektiğini belirtmiş ve sayısal yöntemler kullanarak çok katlı direk modelini oluşturmuşlardır [17]. Türkiye’de 2017 yılından bu yana 154 kV’luk Enerji İletim Hatlarında oluşan arızaların endeksi 7,19 şeklindedir [18]. Yağışlı ve fırtınalı hava koşullarında yaşanan arızaların, normal hava koşullarından daha fazla ortaya çıktığı görülmektedir [19]. Yağışlı, şarjlı ve fırtınalı hava koşullarında ortaya çıkan arızaların büyük bir bölümü, yıldırım aşırı gerilimlerinin etkisinden dolayı meydana gelmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. EMTP'nin İşlevi ve Bileşimi

Elektrik güç sistemleri, doğrusal olmayan ve dinamik bir yapıya sahiptir. Devre kesicilerin açılıp kapanması, arızaların onarılması, üretim ve tüketim dengelerinin değişmesi, ayrıca yıldırım gibi atmosferik olaylar, sistemin kararlı durumdan geçici durumlara geçmesine neden olabilmektedir. Güç sisteminde enerji, bileşenler arasında sürekli olarak yeniden paylaşılır fakat bu süreç anlık gerçekleşmez ve bir geçici durum süreci gerektirir. Bu geçiş sırasında akımlar, gerilimler, torklar gibi parametrelerdeki değişiklikler, bileşenleri zorlayabilir ve sistemde anlık dengesizlikler yaratabilir. Güç sistemlerindeki geçici durumların analizi ve simülasyonu, bu tür enerji değişimlerinin ve etkilerinin anlaşılmasını amaçlar. Bu amaçla güç sistemlerindeki devre olayları için EMTP programı kullanılmaktadır. EMTP, güç sistemlerinde yıldırım etkilerini, kısa devre analizini ve diğer geçici olayların dinamik davranışını modellemek ve simüle etmek için kullanılan güçlü bir analiz aracıdır ve elektromanyetik geçişlerin analizinde kullanılmaktadır. Geçici olayların analizi için geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Program, belirli bir zaman aralığında sistemin davranışını inceler ve zamanla değişen akım ve gerilim değerlerini hesaplar. Güvenilir sonuçlar için doğru modellerin ve parametrelerin seçilmesi önemlidir. Güç sistemlerinde sıklıkla kullanılan ATP programı, EMTP programı baz alınarak tasarlanmıştır. Basit arayüzü sayesinde karmaşık sistemleri kolaylıkla modelleme imkânı sunar.

3.1.1. Toplu Parametre RLC

Toplu parametrelili sistemde herhangi bir noktadaki bir bozulma sistemin diğer noktalarına yayılmaktadır. Bu durum yalnızca sistemin fiziksel boyutunun, sistemdeki en yüksek frekansın dalga boyuna oranla daha küçük olduğu durumlar içindir. Toplu parametrelili sistemlerin modellenmesi adi diferansiyel denklemlerle gerçekleştirilebilir. Güç sistemi devrelerini tanımlamak için seri RLC dal modeli oluşturulmuştur ve yük, şönt reaktör, şönt kondansatör, filtre ve diğer toplu parametre bileşenleri bu model ile temsil edilir.

3.1.2. İletim Hattı

Çok fazlı PI eşdeğer devre modeli, basit bir hat modelidir. Bu model, karşılıklı bağlanmış indüktörleri içerir ve hem transpoze edilmiş hem de transpoze edilmemiş üç fazlı iletim hatlarına uygulanabilir. Ayrıca, toplu dirençli ve dağıtılmış parametrelili hat modeli ile kayıpsız dağıtılmış parametrelili hat modelinde sabit dirençler bulunur. Direnç, moddaki kayıpsız hatta eklenir ve genellikle temel frekansa denk gelen değer alınır. Direnç genellikle temel frekans için seçilir ve model, 1-2 kHz aralığındaki harmonik frekans analizleri için uygundur. J. Marti ve Semlyen'in geliştirdiği frekansa bağlı dağıtılmış parametrelili hat modeli, transpoze edilmemiş hatlarda bile yüksek frekanslı kayıpları hesaba katar ve dalgalanma analizi için doğru simülasyonlar sağlar.

3.1.3. Transformatör

Tek fazlı doyurulabilir transformatör modeli, çoklu sargı konfigürasyonlarıyla çalışabilen ve doygunluk özelliklerini sözde doğrusal olmayan bir indüktörle modelleyen temel bir bileşendir. Giriş verileri olarak sargıların direnç ve endüktans değerleri kullanılır. Üç fazlı modeller de geliştirilmiş olup, sıfır dizi bileşenleri için hava boşluğu akısı yolu olan çekirdek tipi transformatörlere uygulanabilir. Histerezis özellikleri gerektiğinde, sözde doğrusal olmayan indüktör yerine histeretik indüktör kullanılır. Ayrıca, çok sargılı transformatörlerin modellenmesinde karşılıklı bağlı RL elemanları kullanılır ve sargıların karşılıklı endüktansları giriş verisi olarak gereklidir. Bu model, transformatörlerdeki geçici gerilim analizleri için uygundur.

3.1.4. Doğrusal Olmayan Eleman

Gerçek doğrusal olmayan endüktanslar için her zaman adımında iteratif bir yakınsama hesaplaması gerekir, bu da devrede birden fazla doğrusal olmayan elemana izin verilmemesi gibi bir sınırlama getirir. Birden fazla doğrusal olmayan elemana ihtiyaç duyulursa, bunların ayrı devrelerde veya dağıtılmış parametre hatlarıyla ayrılması gerekir. Bunun yerine, sözde doğrusal olmayan elemanlar kullanıldığında, iteratif hesaplamaya gerek kalmaz ve zaman adımları arasında doğrusal olmayan karakteristik eğrilerden bir değer kabul edilir. Ancak, bu yöntemde küçük zaman adımları seçilerek büyük voltaj veya akım değişiklikleri sınırlandırılmalıdır.

3.1.5. Anahtar

Açma-kapama işlemleri ve arıza durumları için zaman kontrollü anahtarlar kullanılır ve bu anahtarlar, akım sıfır noktasını geçtiği andan itibaren açma işlemini gerçekleştirir. Gerilim kontrollü bir anahtar, geçiş anahtarı şeklinde kullanılır. Anahtarların kontrolü için Kontrol Sistemlerinin Geçici Analizi (TACS) modülünden yararlanılır. TACS kontrollü anahtarlar, ateşleme sinyali olmayan diyotları veya ateşleme sinyali olan tristörleri simüle edebilir. TACS kontrollü bir anahtar açma-kapama sinyali 1 olduğunda kapanır sinyal 0 olduğunda ise açılır. Bu tür anahtarlarla yalıtımlı kapı bipolar transistörü veya kendi kendini söndüren güç elektroniği elemanı simüle edilebilir.

3.1.6. Gerilim ve Akım Kaynakları

Genellikle 50 veya 60 Hz'lik bir güç kaynağı için sinüzoidal bir fonksiyon kullanılır. Başlangıç zamanı kaynak için negatif seçilirse EMTP kararlı durumu hesaplayarak akım ve gerilim değerlerini ayarlar. Topraklanmamış bir voltaj kaynağı, devre tarafında topraklanmamış bir voltaj kaynağı ve ideal bir transformatörden oluşmaktadır. TACS kontrollü kaynak, TACS tarafından hesaplanan sinyali ana devreye güç kaynağı olarak iletir.

3.1.7. Jeneratör ve Döner Makine

Üç fazlı senkron makineler, geçici hesaplamaları destekler ve bu makinelerdeki üç fazlı devrelerin dengeli olduğunu kabul eder. Makinenin iç değişkenleri TACS' ye aktarılabilir ve tork ile alan voltajı, TACS üzerinden makine için giriş sinyalleri olarak bağlanabilir. Bu modelde, kütle-yay eşdeğer denklemi ile temsil edilen türbin ve jeneratörler içeren bir mekanik şaft sistemi yer alır ve bu, alt-senkron rezonans olaylarının analizine olanak tanır. Ayrıca bir indüksiyon ya da DC makinesinin modellenmesi için evrensel makine modülü kullanılmaktadır.

3.1.8. Kontrol

TACS, bir kontrol bileşenini simüle etmektedir. Giriş sinyalleri düğüm voltajları, anahtar akımları, dönen makinenin iç değişkenleri ve anahtar durumunu içerir. Çıkış

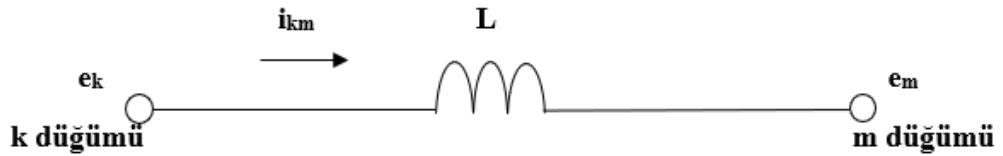
sinyalleri, TACS kontrollü anahtar için açma-kapama sinyali ve senkron makine için tork ve alan voltajını içerir.

3.2. Hesaplama Yöntemi ve Ana Devrenin Formüle Edilmesi

EMTP’ de sayısal integrasyon için trapez (yamuk) yöntemi uygulanır. Trapez yöntemi, arka arkaya gelen iki noktanın bir doğru ile birleştirilmesinin ardından yamuk şekilli parçalar elde edilmesi ile uygulanır. Bu şekilde integrali yamukların alanlarının toplamına çevirmiş olur. Devre bir düğüm denklemi ile temsil edilir. Zaman adımı simülasyon için sabittir ve $t=0$ [s] ile $T\text{-max}$ [s] arasında değişir.

3.2.1. Endüktans Devresi

Şekil 3.1’de k ve m düğümleri arasındaki L endüktansı gösterilmektedir. Bu devre için oluşturulan denklem, Denklem (3.1)’ de verilmiştir.



Şekil 3.1 L endüktansı. [20]

$$e_k - e_m = L \frac{di_{km}}{dt} \quad [3.1]$$

t' deki i_{km} , $t - \Delta t$ ' nin integrali ile oluşturulur ve Denklem (3.2) ortaya çıkar.

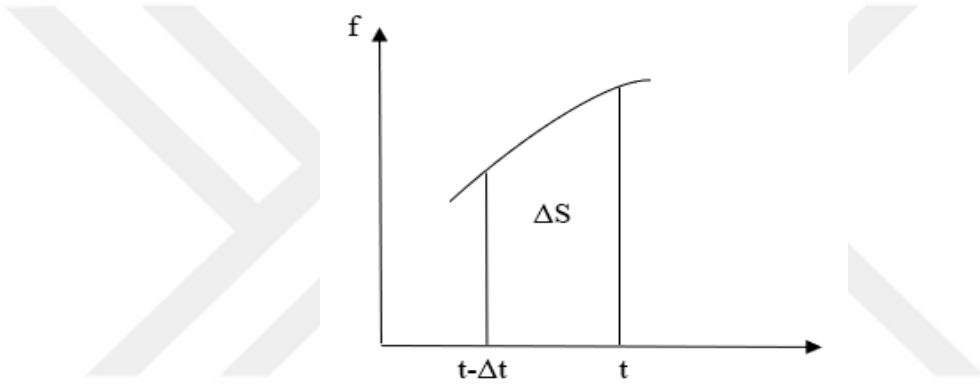
$$i_{km}(t) = i_{km}(t - \Delta t) + \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t (e_k - e_m) dt \quad [3.2]$$

f 'nin zaman fonksiyonuna trapez yöntemi uygulanarak Şekil 3.2'de gösterilen ΔS alanı elde edilir. Buradan da Denklem (3.3) meydana gelir.

$$\Delta S = \int_{t-\Delta t}^t f(t) dt$$

[3.3]

$$\Delta S = \frac{\Delta t}{2} (f(t) + f(t - \Delta t))$$



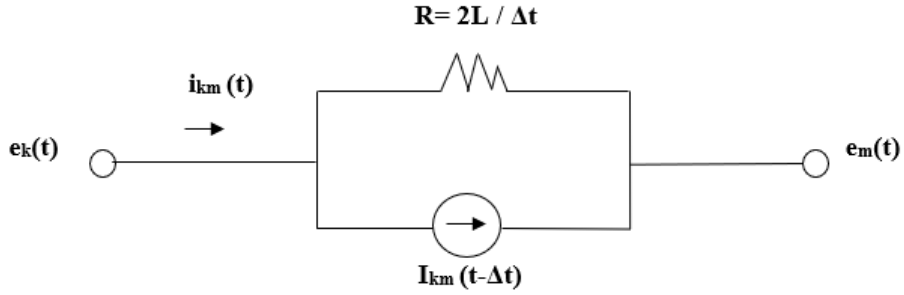
Şekil 3.2 ΔS alanı ve f fonksiyonu gösterimi. [20]

Burada $f(t) = e_k(t) - e_m(t)$ eşitliği yerine konulursa Denklem (3.4) ve Denklem (3.5) elde edilir.

$$i_{km}(t) = \frac{\Delta t}{2L} (e_k(t) - e_m(t)) + I_{km}(t - \Delta t) \quad [3.4]$$

$$I_{km}(t - \Delta t) = i_{km}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} (e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t)) \quad [3.5]$$

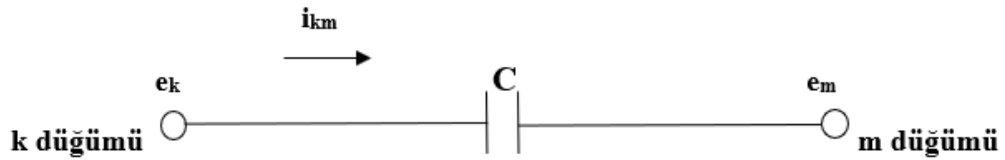
Denklem (3.5) önceki adımın değeridir ve t süresinin hesaplanmasında bilinen bir değerdir. R direnci ise zaman adımı hesaplamasından önce hesaplanmaktadır. Şekil 3.3'te endüktansın eşdeğer bir direnç ve bir akım kaynağı ile paralel bağlantısı gösterilmektedir.



Şekil 3.2 Endüktansın eşdeğer devresi. [20]

3.2.2. Kapasitans Devresi

Şekil 3.4'te k ve m düğümleri arasındaki C kapasitansı gösterilmektedir. Bu devre için oluşturulan denklem, Denklem (3.6)'da verilmiştir.



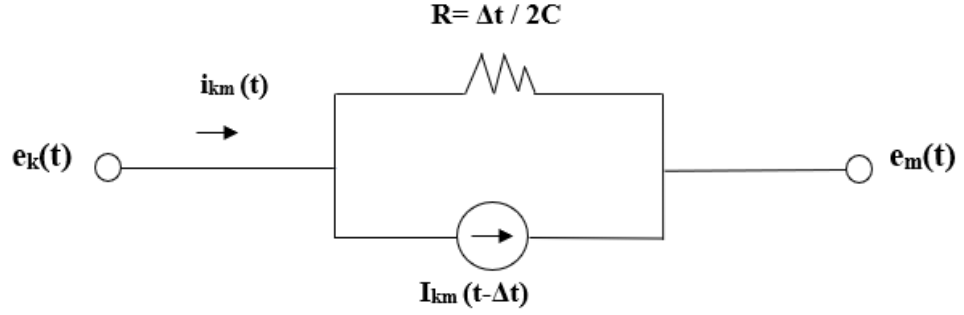
Şekil 3.3 Kapasitans. [20]

$$i_{km} = C \frac{d(e_k - e_m)}{dt} \quad [3.6]$$

Denklem (3.7) ve Denklem (3.8), trapez yönteminin Denklem (3.6)'ya uygulanması sonucu elde edilir. Kapasitans için oluşturulan devre eşdeğer bir direnç ve akım kaynağı ile Şekil 3.5'te gösterilmektedir.

$$i_{km}(t) = \frac{2C}{\Delta t} (e_k(t) - e_m(t)) + I_{km}(t - \Delta t) \quad [3.7]$$

$$I_{km}(t - \Delta t) = -i_{km}(t - \Delta t) - \frac{2C}{\Delta t} (e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t)) \quad [3.8]$$



Şekil 3.4 Kapasitansın eşdeğer devresi. [20]

3.2.3. Direnç ve Dağıtılmış Parametre Hattı

k ve m düğümü arasında kullanılan direnç Şekil 3.6'da gösterilmektedir. İki düğümü birbirine bağlayan dağıtılmış parametre hattı ise Şekil 3.7'deki gibidir. Gerilim ve akım arasındaki bağlantı, direnç göz ardı edilerek Denklem (3.9)'da verilen diferansiyel denklemlerle oluşturulmaktadır.

$$-\frac{\partial e}{\partial x} = L' \left(\frac{\partial i}{\partial t} \right) \quad [3.9]$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C' \left(\frac{\partial e}{\partial t} \right)$$

Denklemlerde ifade edilen L' ve C' birim uzunluk başına düşen endüktansı ve kapasitansı göstermektedir. Denklem (3.10)'da verilen Z , v ve τ sırasıyla dalgalanma empedansını, yayılma hızını ve süreyi temsil etmektedir.

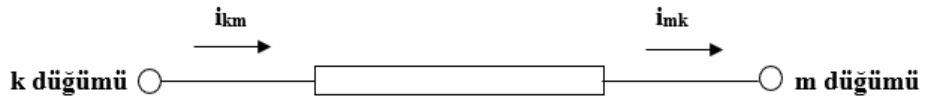
$$e_k(t - \tau) + Z^* i_{km}(t - \tau) = e_m(t) - Z^* i_{mk}(t)$$

$$e_k(t) - Z^* i_{km}(t) = e_m(t - \tau) + Z^* i_{mk}(t - \tau) \quad [3.10]$$

$$Z = \sqrt{L' / c'} , \quad v = 1/\sqrt{(L' * C')} , \quad \tau = 1/v$$



Şekil 3.5 Direnç devresi. [20]



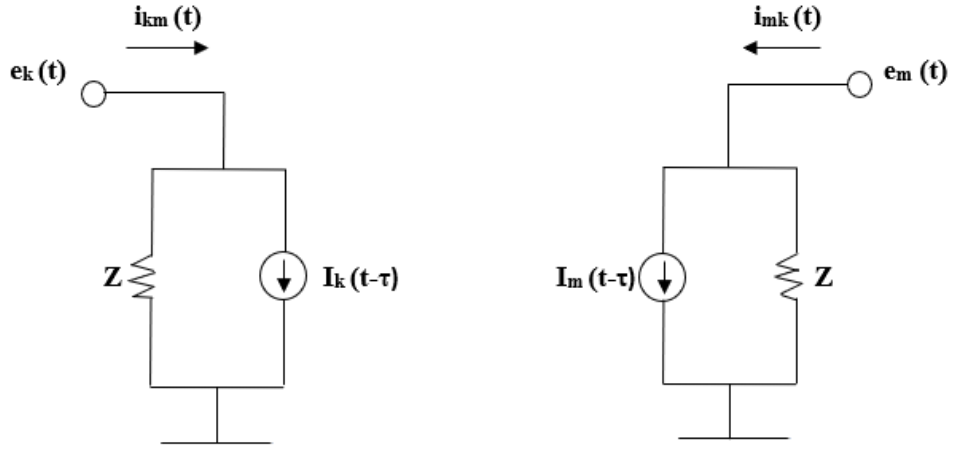
Şekil 3.6 Dağıtılmış parametre hattı. [20]

$i_{km}(t)$ akımının k düğümündeki gerilim ve τ seyahat süresinden önce bilinen bir akım ile ifade edilmesiyle iki düğümü ayrı devreler olarak Şekil 3.8'deki gibi göstermek mümkündür. k düğümünde gerilim ve akım Denklem (3.11) ile ifade edilir.

$$i_{km}(t) = \frac{1}{Z} e_k(t) + I_k(t - \tau)$$

[3.11]

$$I_k(t - \tau) = -\frac{1}{Z} e_m(t - \tau) - i_{mk}(t - \tau)$$



Şekil 3.7 Dağıtılmış parametre hattının eşdeğer devresi. [20]

3.2.4. Düğüm Denklemi

Düğüm denklemi, trapez yöntemi ile oluşturularak Denklem (3.12)' de gösterilmektedir.

$$[Y] * [e(t)] = [i(t)] - [I] \quad [3.12]$$

Denklemden verilen Y ifadesi düğüm iletkenlik matrisini, $i(t)$ enjeksiyon akımı vektörünü ve I bilinen akım vektörünü temsil etmektedir. Denklem (3.12), bilinen ve bilinmeyen değer şeklinde ikiye ayrılarak Denklem (3.13)'te açık haliyle gösterilmektedir. Denklem (3.14) ise bilinmeyen değeri formüle etmektedir.

$$\begin{bmatrix} Y_{AA} & Y_{AB} \\ Y_{BA} & Y_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_A(t) \\ e_B(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \end{bmatrix} \quad [3.13]$$

$$[e_A(t)] = [Y_{AA}]^{-1} * \{[i_A(t)] - [I_A] - [Y_{AB}] * [e_B(t)]\} \quad [3.14]$$

YAA =

	0	0	0
0		0	0
0	0		0
0	0	0	

0 boş matristir

Şekil 3.8 Dağıtılmış parametre hattı ile admittans matrisi. [20]

T-max değeri elde edilene kadar her adımda $e_A(t)$ hesaplanır. Devre için dağıtılmış bir parametre hattı kullanıldığında Y_{AA} matrisi Şekil 3.9'daki gibi küçük boyutlu matrise dönüşür. Bu durum daha az bir hesaplama süresi ve daha az hata oranı sunar

3.3. TACS' de Hesap Yapma

Trapez yöntemi TACS sisteminde de uygulanmaktadır ve bir transfer fonksiyonu ile Denklem (3.15)' de açıklanmaktadır. Denklemde verilen U giriş, X çıkış ve s Laplace operatörünü ifade etmektedir.

$$X(s) = G(s) * U(s)$$

[3.15]

$$G(s) = \frac{N_0 + N_1s + N_2s^2 + \dots + N_ms^m}{D_0 + D_1s + D_2s^2 + \dots + D_ns^n}$$

S Laplace operatörü geçici analiz için d/dt şeklinde yazılarak diferansiyel denklemlerle Denklem (3.16)'da ki gibi ifade edilebilir.

$$D_0x + D_1 \frac{dx}{dt} + D_2 \frac{d^2x}{dt^2} + \dots + D_n \frac{d^nx}{dt^n} = N_0u + N_1 \frac{du}{dt} + N_2 \frac{d^2u}{dt^2} + \dots + N_m \frac{d^mu}{dt^m}$$

$$x_1 = \frac{dx}{dt} \quad , \quad x_2 = \frac{dx_1}{dt} \quad , \quad x_n = \frac{dx_{(n-1)}}{dt} \quad [3.16]$$

$$u_1 = \frac{du}{dt} \quad , \quad u_2 = \frac{du_1}{dt} \quad , \quad u_n = \frac{du_{(m-1)}}{dt}$$

$x_1 = dx/dt$ eşitliğine trapez yöntemi uygulanırsa Denklem (3.17) elde edilir.

$$x_1 = \frac{2}{\Delta t} x(t) - \{x_1(t - \Delta t) + \frac{2}{\Delta t} x(t - \Delta t)\} \quad [3.17]$$

3.4. Ana Devre ve TACS Arasındaki İlişki

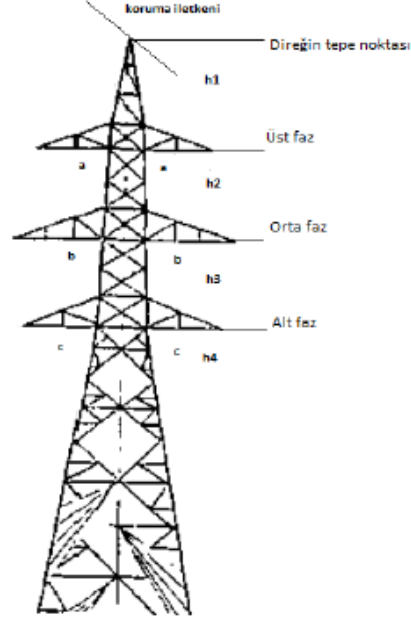
Ana devre ve TACS bölümünün birlikte ele alınması gerekmektedir. Ancak EMTP programı ikisini ayrı olarak hesaplamaktadır. İlk etapta t zamanındaki ana devre hesap edilir. Sonrasında TACS' ye aktarılan gerilim ve akım sinyalleri ile TACS hesaplanmış olur. Bir sonraki zamanın ana devre hesabı için TACS' nin çıkışı kullanılır. TACS kontrollü anahtarda açma-kapama darbe sinyali için TACS' nin çıkışı uyarıcı gerilim niteliğindedir. Denetleyicinin giriş ve çıkış aşamalarında genellikle bir gecikme yaşanır. Bu sebepten mümkün olduğunca küçük bir zaman adımı seçilerek hata göz ardı edilir ve işleme devam edilebilir. Büyük bir zaman adımı seçildiğinde hesaplama hatasının oluşabileceği unutulmamalıdır. Başlangıç ayarı yapılırken kaynak için negatif bir T başlangıcı seçilirse bütün dalların başlangıç değerleri otomatik olarak ayarlanmış olur. EMTP, karmaşık düzlemle kararlı durum halini hesaplayarak bütün dallar için gerçek kısmın değerini ayarlar. Başlangıç DC değeri kullanıcı tarafından girilir ve kararlı durum hesabı sadece bir frekansa izin verir.

4. İLETİM HATTININ ATP MODELİ VE YILDIRIM ETKİSİNİN SİMÜLASYONU

Türkiye’de 154 kV’luk iletim hatlarında yaygın olarak kullanılan pylon direkli iletim hattının yıldırım çarpmasına maruz kalması durumunda oluşan aşırı gerilimler bu çalışma kapsamında Alternative Transients Program (ATP) üzerinden analiz edilmiştir. Benzetimde, iletim hattı 5 direkten oluşmaktadır. Direğe, faz iletkenine ve koruma iletkenine yıldırım isabet ettiğinde, yıldırım düşen direkte ve yanındaki diğer iki direkteki izolatörlerde meydana gelen aşırı gerilimler incelenmiştir. Yıldırım darbesi, 1.2/50 μ s’lik 20 kA olarak yıldırım dalga formu biçiminde belirlenmiştir. Yıldırım akımının modellenmesinde Heidler fonksiyonu kullanılmıştır. Heidler fonksiyonunda yıldırım akımının maksimum değeri 20 kA olarak seçilmiştir [7]. J. Marti frekans bağımlı model kullanılarak iletim hattının karakteristiği belirlenmiştir [14]. Uniform olmayan direk modeli ile pylon direğin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. İletim hattı direkleri için yıldırım akım darbesinin koruma iletkeni, direk gövdesi ve faz iletkenine düşmesi sonucu oluşan aşırı gerilimler araştırılmıştır. Direğin farklı noktalarına yıldırım akım darbesinin düşmesi sonucunda izolatörlerde oluşan aşırı gerilimlerin etkileri değerlendirilmiştir. İletim hattının yıldırım aşırı gerilimlerine karşı analizi için iletim hattının modellenmesinin doğru olarak yapılması gereklidir. İletim hattında bulunan iletkenlerin özellikleri, geometrik şekli, iletkenlerin yeryüzüne ve birbirlerine olan uzaklıkları, iletim hattında kullanılan direğin şekli ve boyu gibi birçok faktör göz önüne alınarak modelleme yapılmalıdır.

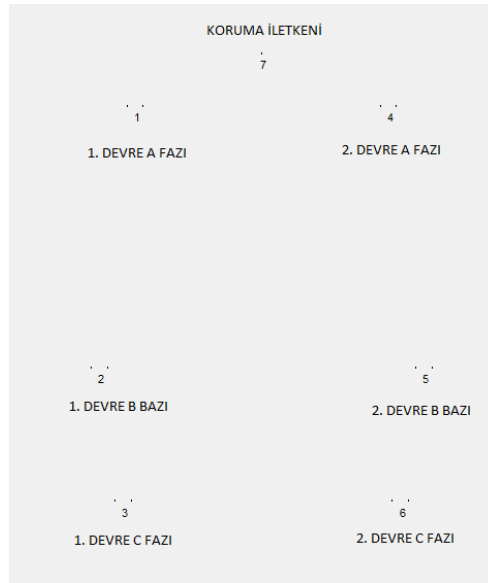
4.1. Eşdeğer Devre Modelinin Pylon Direk İçin Oluşturulması

Türkiye’de 154 kV iletim sistemlerinde tercih edilen pylon direğin parçaları Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Pylon direklerde iki adet devre ve bir adet koruma iletkeni bulunmaktadır.



Şekil 4.1 Türkiye’deki 154 kV iletim hatlarında genel olarak seçilen pylon direğin bölümleri. [2]

Üç fazlı iletim sisteminde, iki devreye ait olan A-B-C fazları ve koruma iletkeni Şekil 4.2’deki gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 4.2 Pylon direk için fazlar ile koruma iletkeni arasındaki hat geometrisinin gösterimi.

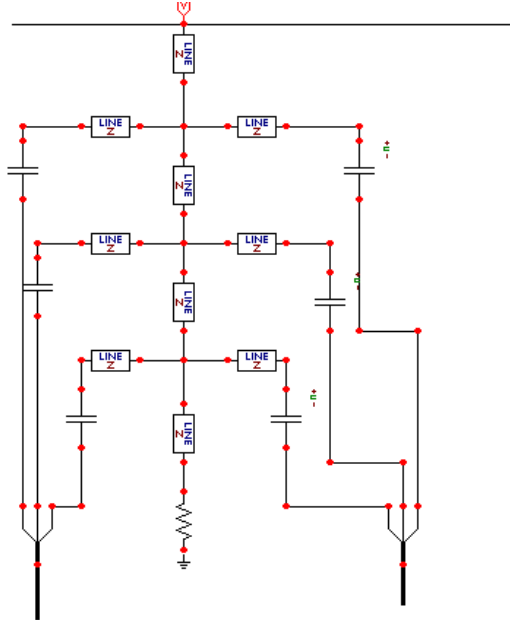
Şekil 4.1’de verilen pylon direğin şekline ve yapısına göre, bu çalışma için kullanılan direk ölçüleri Tablo 4.1’de sunulmuştur. Pylon direğin direk modelinin oluşturulmasında üniform olmayan iletim hattı modeli kullanılmıştır. Modelde direk eşit olacak şekilde bölümlere ayrılır ve bütün bölümler için karakteristik empedanslar seçilir. Bu durum üstel fonksiyon olarak Denklem (4.1)’de gösterilmektedir [9].

$$Z_0(x) = 150 \cdot e^{q \cdot x} \quad [4.1]$$

Denklemde verilen q terimi direk yüksekliğine bağlı bir sabit olarak tanımlanır. X ise yerden olan yüksekliği ifade etmektedir.

Tablo 4.1 Pylon direğin ölçüleri.

a	b	c	h1	h2	h3	h4
3.20m	4.10m	3.50m	3.15m	4.15m	4.15m	17.90m



Şekil 4.3 Çift devre pylon direğin eşdeğer ATP devre modeli.

4.2. İletim Hattı İçin Karakteristik Değerler

Türkiye’de 154 kV iletim hatlarında kardinal tip iletken çok sık ve verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada yapılan modellemede kardinal tipi iletken kullanılmıştır. 7N8 tipi iletken ise koruma iletkeni olarak belirlenmiştir. TEİAŞ’dan alınan verilere göre karakteristik değerler Tablo 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.2’de verilen hat geometrisine göre havai iletkenin nasıl yerleştirildiği Tablo 4.3’te gösterilmiştir. Bu tablodan yararlanarak J. Marti modelinin bileşenleri belirlenmiştir ve LCC iletim hattının modeli yapılmıştır.

Tablo 4.2 İletim hattı için karakteristik değerlerinin gösterimi.

İletken	Tip	İletken Çapı (mm)	Direnç (Ω/km)
Faz İletkenleri	Kardinal	30,35	0,0586
Koruma İletkeni	7N8	9,78	1,4625

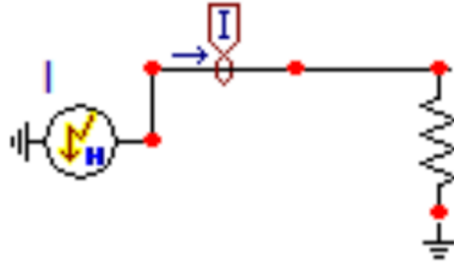
Tablo 4.3 Şekil 3 baz alınarak havai iletkenlerin konfigürasyonu.

	Ph · No ·	R _{in}	R _{out}	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	0.3505	1.517	0.0586	-3.2	29.35	24.2	40	0	2
2	2	0.3505	1.517	0.0586	-4.1	22.05	17.9	40	0	2
3	3	0.3505	1.517	0.0586	-3.5	17.9	14.9	40	0	2
4	4	0.3505	1.517	0.0586	3.2	29.35	24.2	40	0	2
5	5	0.3505	1.517	0.0586	4.1	22.05	17.9	40	0	2
6	6	0.3505	1.517	0.0586	3.5	17.9	14.9	40	0	2
7	7	0.2445	0.489	0.0586	0	29.35	26.2	0	0	0

4.3. Yıldırım Dalga Şekli İçin Modelleme Yapılması

Simülasyonlarda kullanılacak yıldırım akımı ve gerilimi dalga formlarını belirlemek için IEC tarafından belirlenen ve kullanıma sunulan standartlar kullanılır. IEC standartlarına göre yıldırım akımı dalga formu 10/350 μs ve 8/20 μs olarak tanımlanır. 10/350 μs ’lik dalga formu yıldırımın doğrudan etkisini ifade etmektedir. 8/20 μs ’lik

dalga formu ise yıldırımın dolaylı etkisini ifade etmektedir. Bu ifadelerde yer alan 8/20 μ s'lik dalga formu yıldırım akımının 8. μ s'de maksimum değerine ulaştığını ve 20. μ s'de maksimum akım değerinin yarısına indiğini gösterir. Yıldırım akımının maksimum genliği en çok 10 kA ile 20 kA arasında oluşmaktadır [21]. Bu çalışmayla yıldırım akımlarının iletim hattında yer alan direklerde bulunan izolatörlerde oluşan minimum etkisini incelemek amacıyla, yıldırım akımı için maksimum değer 20 kA olarak seçilmiştir. Yıldırım akımı dalga formu, Şekil 4.4'teki gibi ifade edilmektedir. [22]



Şekil 4.4 ATP programında yıldırım darbesi modelinin gösterimi. [2]

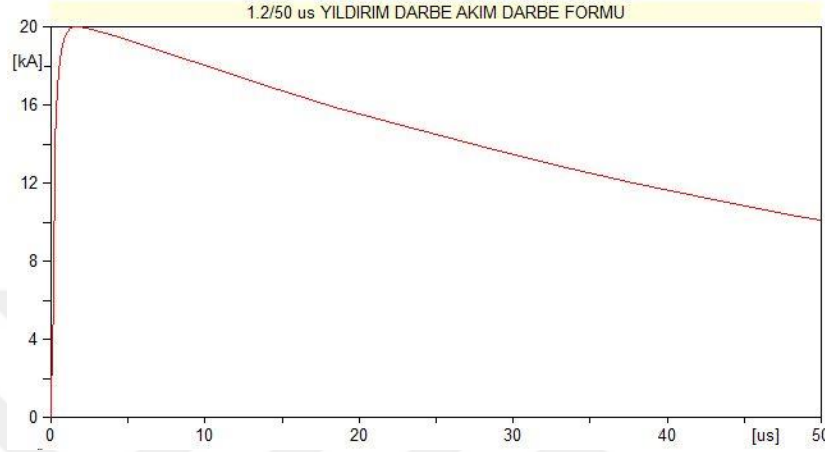
Yıldırım akımı dalga formunun belirlenmesinde Heidler fonksiyonundan yararlanılmıştır. Bu fonksiyonda, yıldırım akımının tepe değeri 20 kA, paralel direnç değeri ise 400 Ω olarak kabul edilmiştir [23]. Heidler fonksiyonunu, matematiksel olarak Denklem (4.2) ve Denklem (4.3) ile tanımlanmak mümkündür.

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{(t-\tau_1)^n}{\left(\frac{t}{\tau_2}\right)^n + 1} \cdot e^{\frac{-t}{\tau_2}} \quad [4.2]$$

Denklem (4.2)'de denkleminde; I_0 yıldırım akımının maksimum değerini, τ_1 akımın artma süresine bağlı olarak zaman sabitini, τ_2 akımın azalma süresine bağlı olarak zaman sabitini ve n yıldırım akımının diklik katsayısını temsil etmektedir.

$$\eta = e^{\left[-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \cdot \left(n \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)\right]^{\frac{1}{n}}} \quad [4.3]$$

Denklem (4.3)'te denkleminde yer alan diklik katsayısı, yıldırım akımının en yüksek değerine ulaşma zamanını etkiler. 8/20 μ s'lik yıldırım akımı sağlamak için n katsayısı 2 olarak seçilmiştir. Bu çalışma için seçilen 1.2/50 μ s'lik yıldırım akımının dalga şekli Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 9 ATP simülasyonunda Heidler fonksiyonuyla oluşturulan 1.2/50 μ s yıldırım akımı dalga şekli.

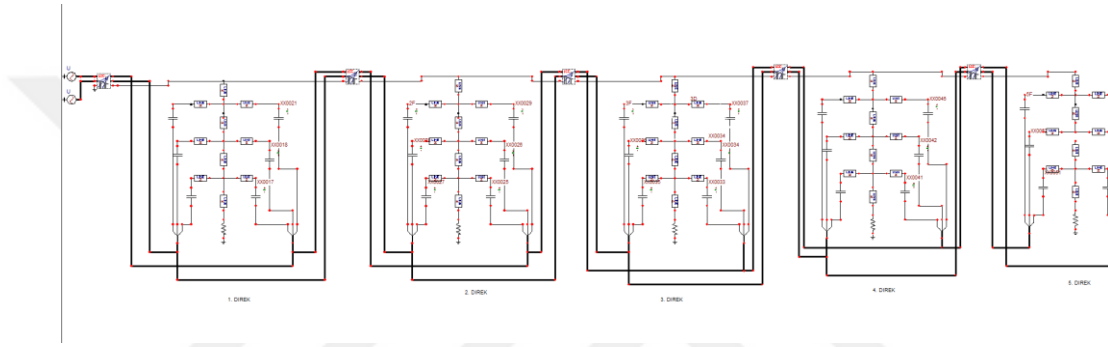
4.4. Direk Topraklama Direncinin Belirlenmesi

Elektrik direkleri ve havai iletim hatlarının topraklanması hem canlı hem de iletim hattının korunması için gerekli ve zorunludur. Bu çalışmada iletim hattında yer alan 5 adet direkte de topraklama direnç değerleri 15 Ω olarak belirlenmiş ve simülasyon bu değere göre gerçekleştirilmiştir.

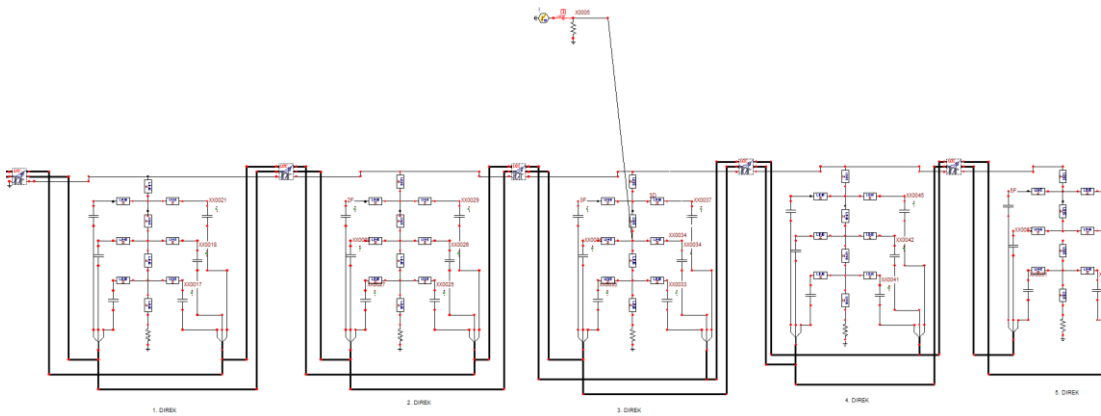
4.5. 154 kV İletim Sisteminin ATP Modeli

Tablo 4.3'te verilen parametrelere göre, iletim hattının ATP simülasyon modeli Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Bu modelde, iletim hattında yer alan direklerin arasındaki mesafe 400 metre olarak kabul edilmiştir. Modellemede elektrot çapı 2,5 mm², d=0,8 metre, $\rho=50$ ve $\mu=10^{-6}$ olarak kullanılmıştır. Ayrıca analizlerde izolatörleri temsil eden 80 pikofarad (pF) değerinde kapasitör kullanılmıştır [24]. İletim hattı modeli oluşturulurken iletim hattında yer alan tüm direkler aynı parametrelere sahiptir. Tüm direkler için topraklama direnç değeri 15 Ω olarak kabul edilmiştir. Direk modellerindeki tüm ZLINE modellerinde R/I oranı 4 ve $v \approx 300$ m/ μ s olarak kabul

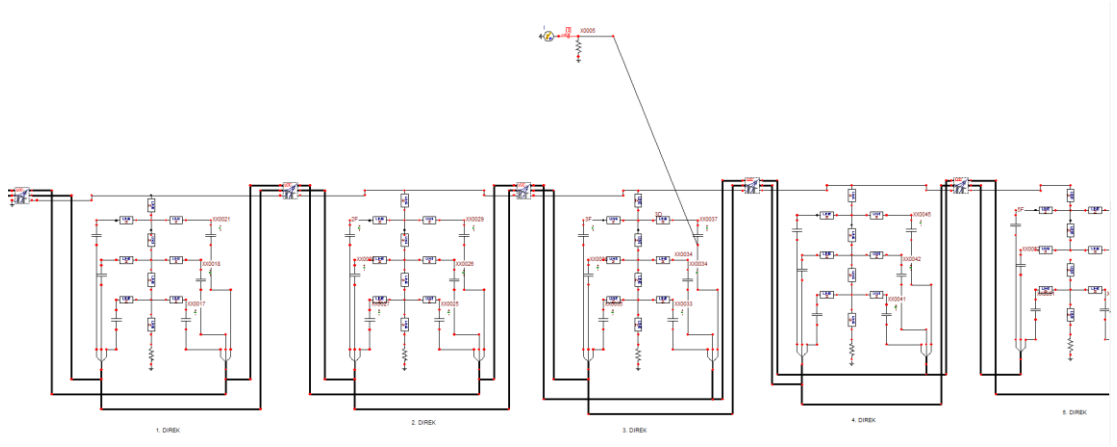
edilmiştir. Direklerde düşey ekseninde yer alan ZLINE modellerinde Z değeri direğin en üstünden alt kısmına doğru sırasıyla 220 Ω , 200 Ω , 180 Ω ve 150 Ω olarak; yatay ekseninde ise ZLINE modellerinde Z değeri direğin üst kısmından alt kısmına doğru sırasıyla 210 Ω , 200 Ω ve 180 Ω olarak belirlenmiştir. Beş adet pylon direkli 154 kV iletim hattı çeşitli durumlar için ATP programında modellenmiştir. Şekil 4.7’de yıldırımın direk gövdesine düşme durumu, Şekil 4.8’de yıldırımın faz iletkenine düşme durumu, Şekil 4.9’da ise yıldırımın koruma iletkenine düşme durumu incelenmiştir.



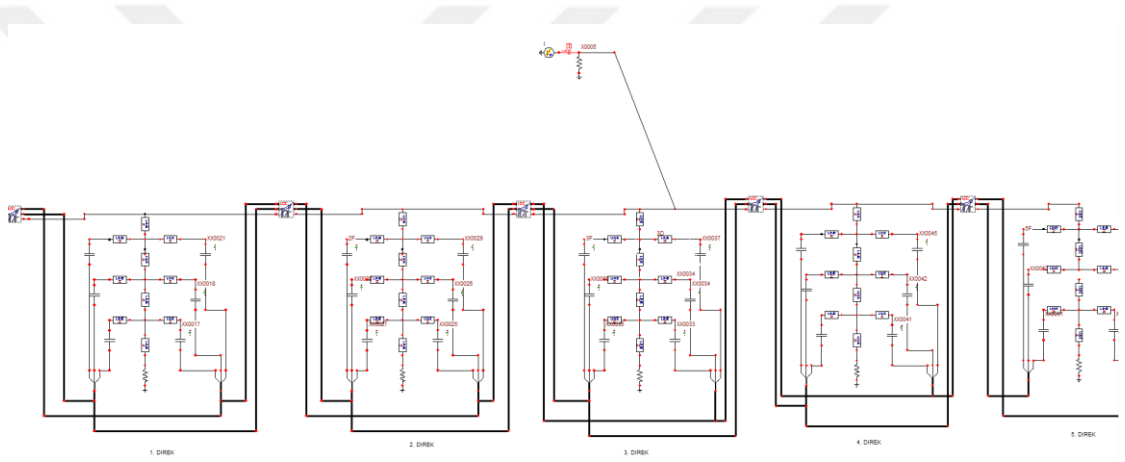
Şekil 10 154 kV iletim hattında bulunan beş adet pylon direğin ATP ile modellenmesi.



Şekil 4.7 154 kV iletim hattında bulunan beş adet pylon direğin ATP modelinde yıldırımın direk gövdesine düşme durumu.



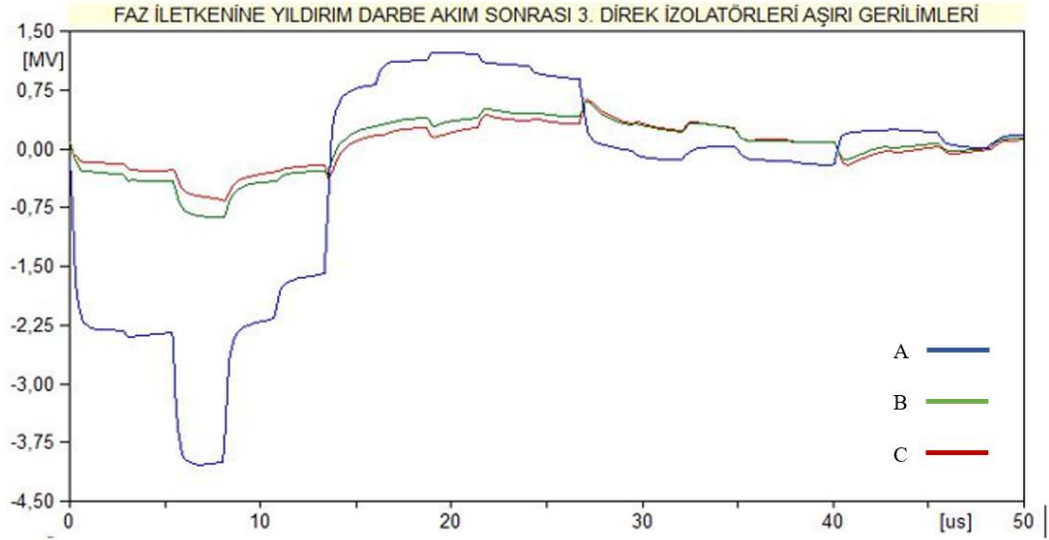
Şekil 4.8 154 kV iletim hattında bulunan beş adet pylon direğin ATP modelinde yıldırımın faz iletkenine düşme durumu.



Şekil 4.9 154 kV iletim hattında bulunan beş adet pylon direğin ATP modelinde yıldırımın koruma iletkenine düşme durumu.

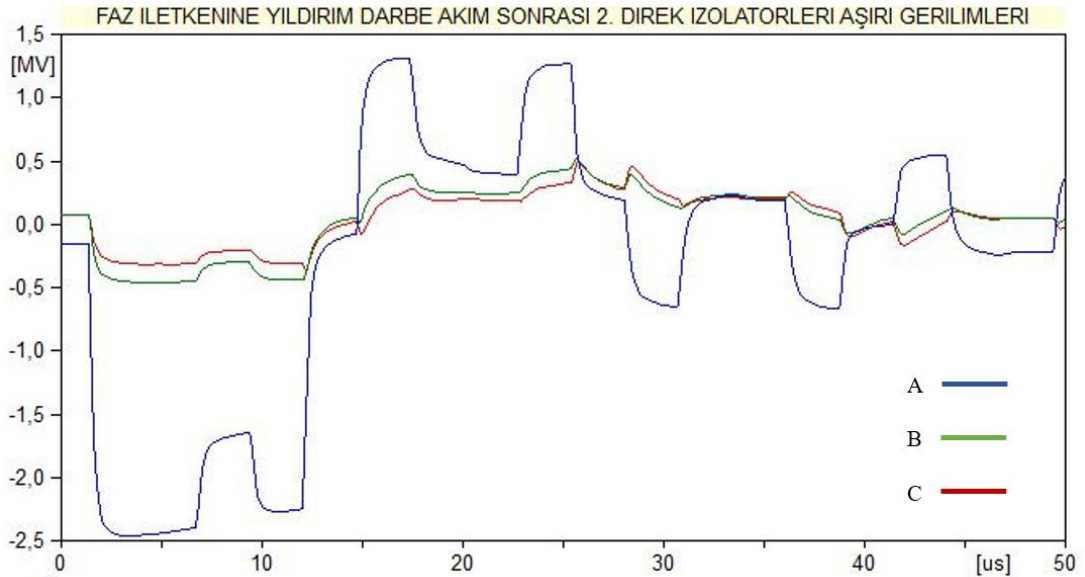
4.6. Yıldırım Akım Darbesinin Hattın Ortasında Yer Alan 3 Numaralı Direğin 2. Devre A Fazına Düşmesi Sonucunda İzolatör Aşırı Gerilimlerinin İncelenmesi

Aşağıda yer alan grafiklerde mavi renge sahip olan grafik iletim hattı direğinde yer alan A fazını, yeşil renge sahip olan grafik B fazını, kırmızı renge sahip olan grafik ise C fazını temsil etmektedir. Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direk ikinci devre A faz iletkenine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 3 numaralı direkte bulunan ikinci devre A-B-C fazlarındaki izolatörlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



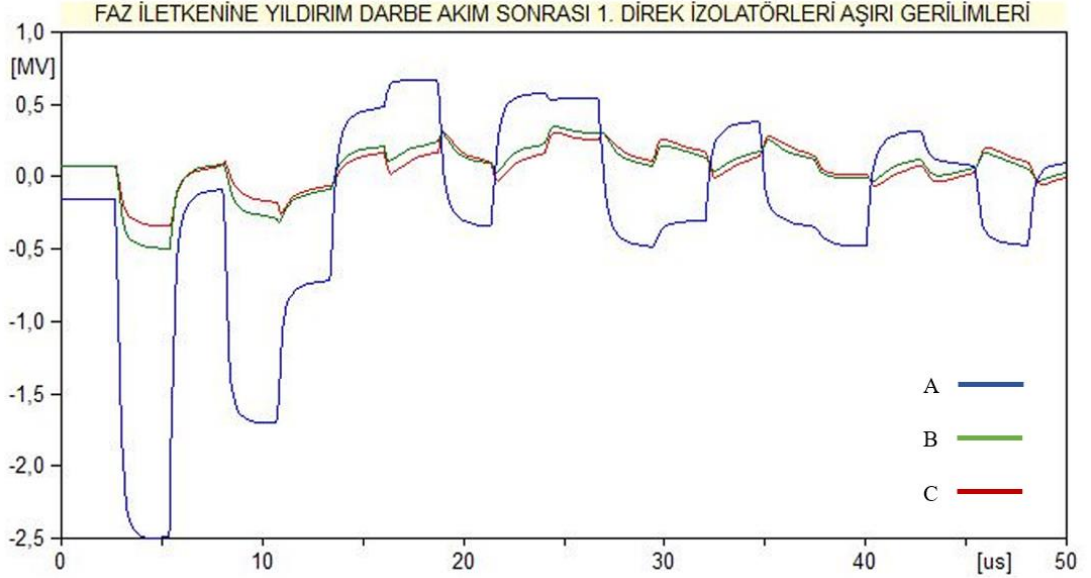
Şekil 1110 Faz iletkenine yıldırım akım darbesi sonucu 3. direk gerilimleri.

Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direk ikinci devre A faz iletkenine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 2 numaralı direkte bulunan ikinci devre A-B-C fazlarındaki izolatörlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 Faz iletkenine yıldırım akım darbesi sonucu 2. direk gerilimleri.

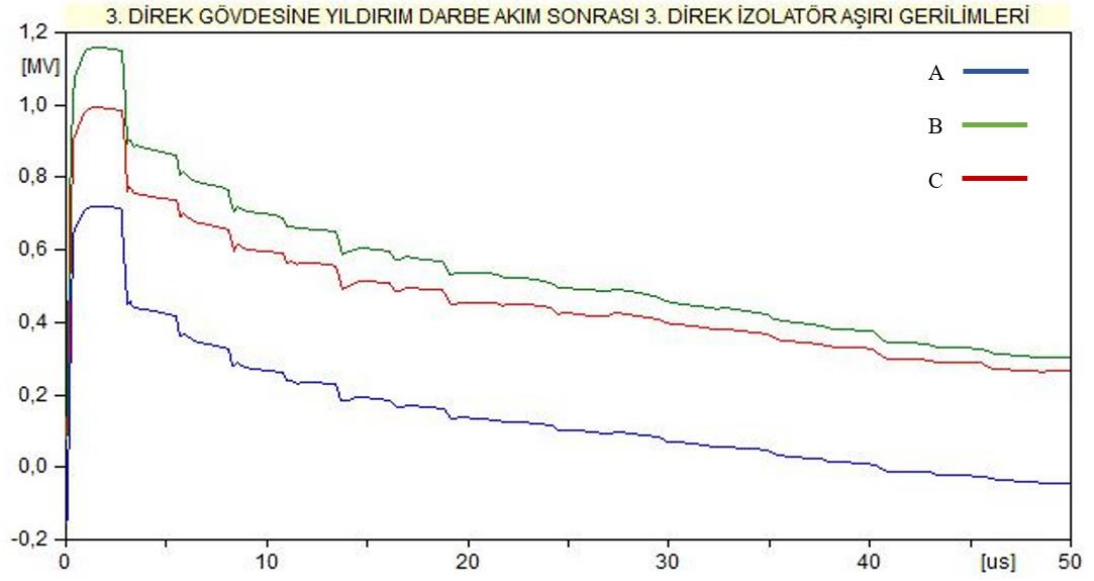
Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direk ikinci devre A faz iletkenine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 1 numaralı direkte bulunan ikinci devre A-B-C fazlarındaki izolatörlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 Faz iletkenine yıldırım akım darbesi sonucu 1. direk gerilimleri.

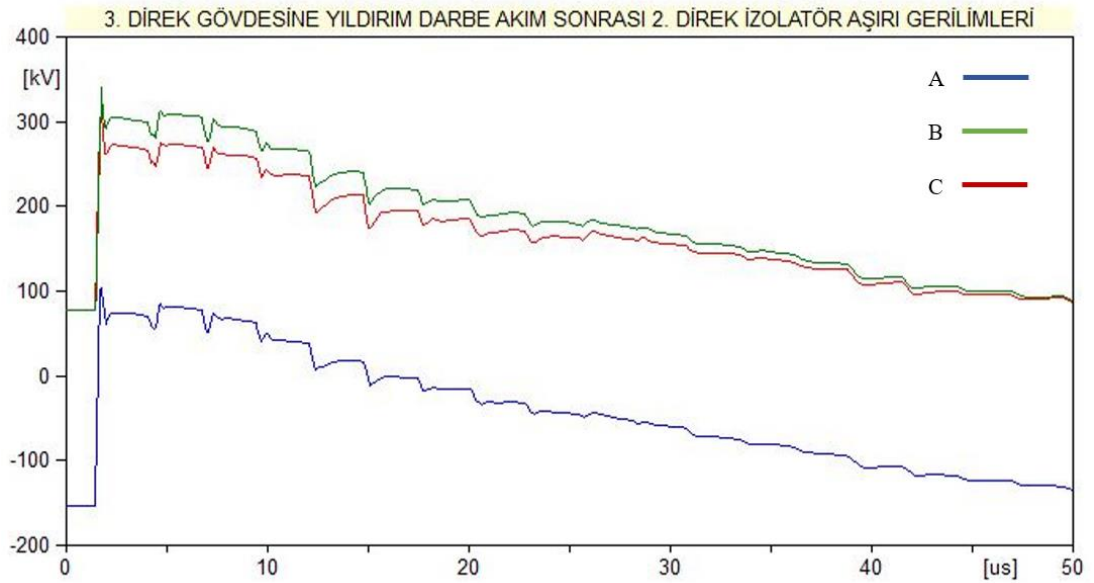
4.7. Yıldırım Akım Darbesinin Hattın Ortasında Yer Alan 3 Numaralı Direğin Gövdesine Düşmesi Sonucunda İzolatör Aşırı Gerilimlerinin İncelenmesi

Aşağıda yer alan grafiklerde mavi renge sahip olan grafik iletim hattı direğinde yer alan A fazını, yeşil renge sahip olan grafik B fazını, kırmızı renge sahip olan grafik ise C fazını temsil etmektedir. Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direğin gövdesine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 3 numaralı direkte bulunan ikinci devre A-B-C fazlarındaki izolatörlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 4.13’te gösterilmektedir.



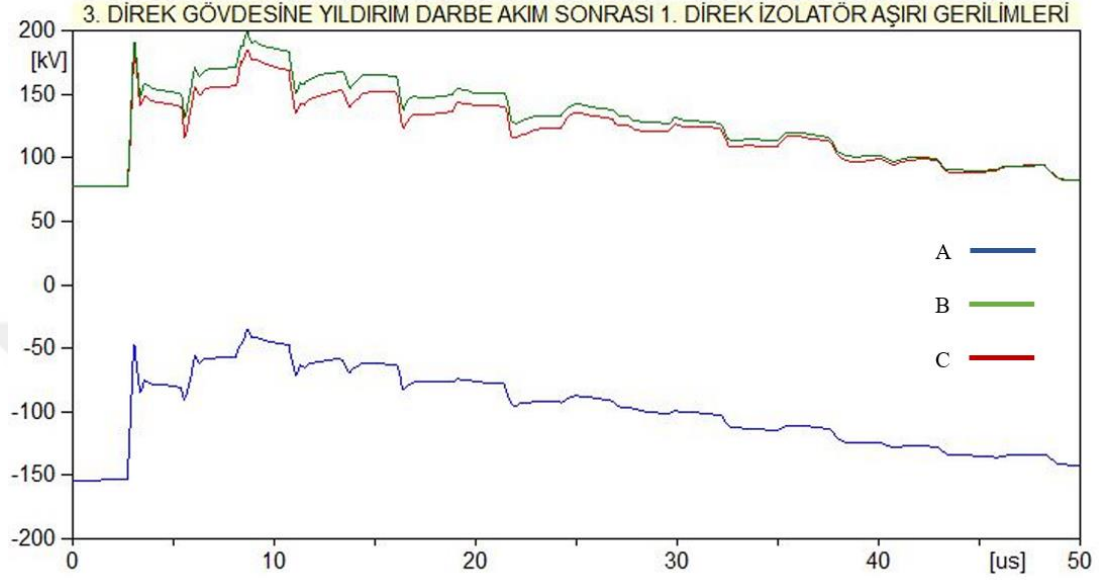
Şekil 4.13 Direk gövdesine yıldırım akım darbesi sonucu 3. direk gerilimleri.

Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direğin gövdesine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 2 numaralı direkte bulunan ikinci devre A-B-C fazlarındaki izolatörlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 4.14’te gösterilmektedir.



Şekil 4.14 Direk gövdesine yıldırım akım darbesi sonucu 2. direk gerilimleri.

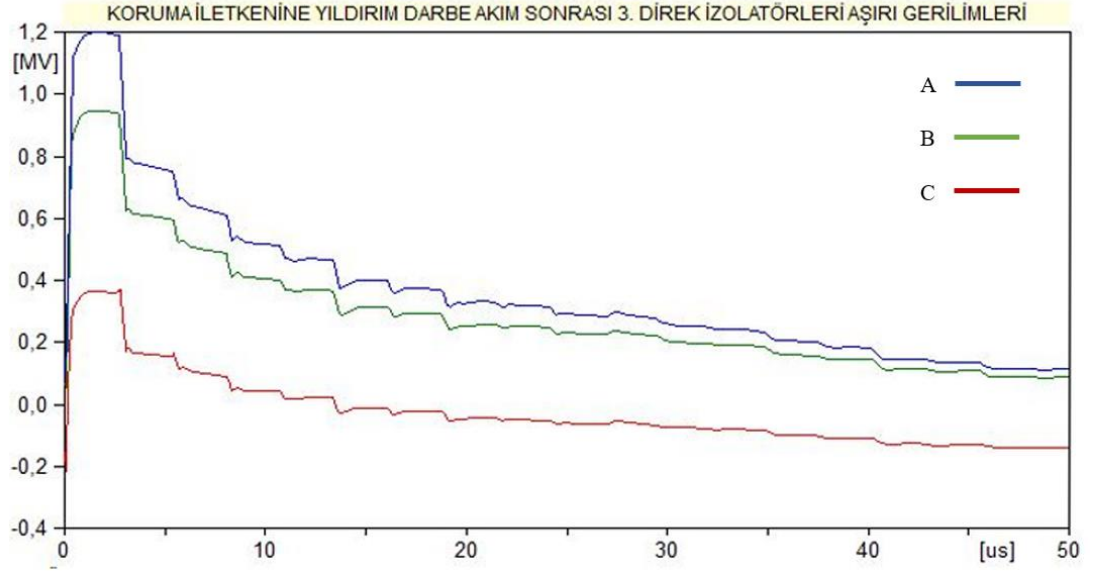
Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direğin gövdesine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 1 numaralı direkte bulunan ikinci devre A-B-C fazlarındaki izolatörlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 4.15'te gösterilmektedir.



Şekil 4.15 Direk gövdesine yıldırım akım darbesi sonucu 1. direk gerilimleri.

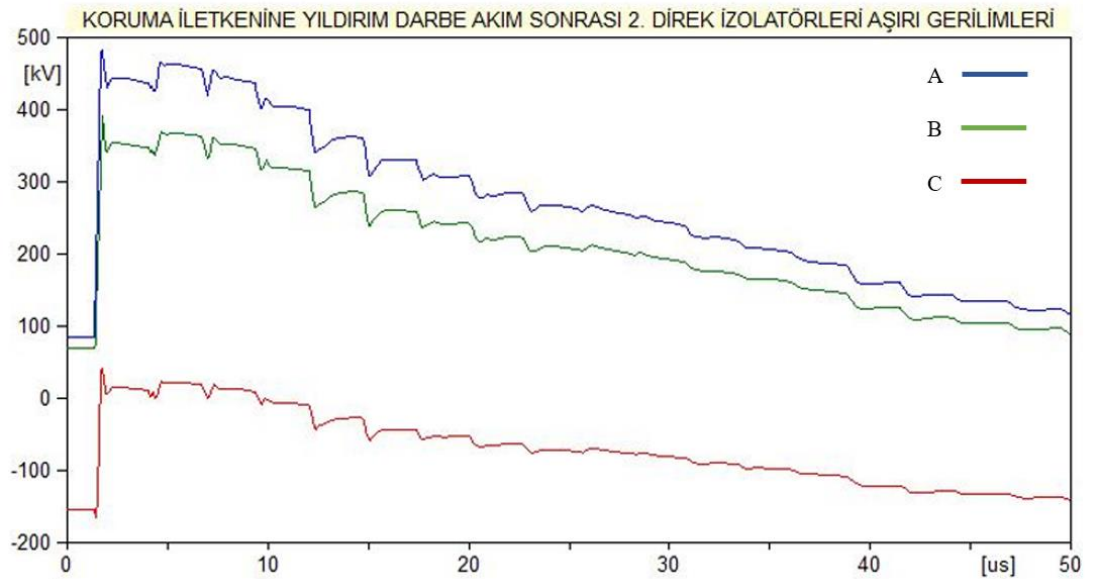
4.8. Yıldırım Akım Darbesinin Koruma İletkenine Düşmesi Sonucunda İzolatör Aşırı Gerilimlerinin İncelenmesi

Aşağıda yer alan grafiklerde mavi renge sahip olan grafik iletim hattı direğinde yer alan A fazını, yeşil renge sahip olan grafik B fazını, kırmızı renge sahip olan grafik ise C fazını temsil etmektedir. Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direğin üstünde koruma iletkenine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 3 numaralı direkte bulunan birinci devre A-B-C fazlarındaki izolatörlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 4.16'da gösterilmektedir.



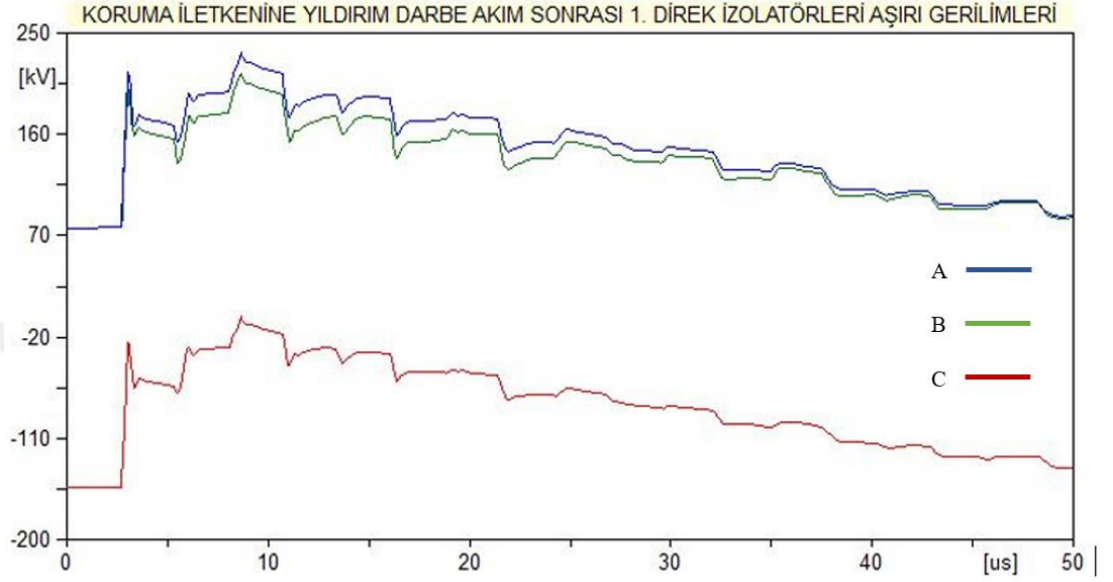
Şekil 4.16 Koruma iletkenine yıldırım akım darbesi sonucu 3. direk gerilimleri.

Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direğin üstünde koruma iletkenine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 2 numaralı direkte bulunan birinci devre A-B-C fazlarındaki izolatörlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 4.17’de gösterilmektedir.



Şekil 4.17 Koruma iletkenine yıldırım akım darbesi sonucu 2. direk gerilimleri.

Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direğin üstünde koruma iletkenine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 1 numaralı direkte bulunan birinci devre A-B-C fazlarındaki izolatörlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 4.18’de gösterilmektedir.



Şekil 4.18 Koruma iletkenine yıldırım akım darbesi sonucu 1. direk gerilimleri.

5. SONUÇ

ATP programı yardımıyla gerçekleştirilen bu çalışmadaki grafiklerden de görüleceği üzere yıldırım akım darbesinin hattın ortasında yer alan 3 numaralı direğin A faz iletkenine düşmesi sonucu A fazında indüklenen gerilimin maksimum değerinin 19,2 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık olarak 8,63 katı olan 1,33 MV, B fazından indüklenen gerilimin maksimum değerinin 27 μ s'de hattın nominal değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 4,06 katı olan 625 kV, C fazına indüklenen gerilimin maksimum değerinin de 27,1 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 3,9 katı olan 601 kV olduğu gözlemlenmiştir. Yıldırım darbesi düştükten sonra 1 numaralı direğin A fazında indüklenen gerilimin maksimum değerinin 17,8 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık olarak 4,36 katı olan 672 kV, B fazından indüklenen gerilimin maksimum değerinin 24,5 μ s'de hattın nominal değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 2,25 katı olan 347 kV, C fazına indüklenen gerilimin maksimum değerinin de 26,9 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 1,99 katı olan 307 kV olduğu gözlemlenmiştir.

Araştırma sırasında değerlendirilen diğer bir durum yıldırımın 3 numaralı direğin gövdesine düşmesi durumudur. Bu durumda elde edilen grafikler incelenir ise; A fazında indüklenen gerilimin maksimum değerinin 1,7 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık olarak 4,68 katı olan 721 kV, yıldırım darbesinin düştüğü direk gövdesi ile aynı seviyede olan B fazında indüklenen gerilimin maksimum değerinin 1,67 μ s'de hattın nominal değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 7,53 katı olan 1,16 MV, C fazına indüklenen gerilimin maksimum değerinin de 1,53 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 6,44 katı olan 993 kV olduğu gözlemlenmiştir. Yıldırım darbesinin düştüğü nokta C faz iletkenine A faz iletkeninden daha yakın olduğu için iletim hattında en altta yer alan C fazının izolatörleri üzerinde en üstte yer alan A fazının izolatörlerine göre yaklaşık olarak 272 kV daha fazla gerilim indüklenmiştir. Yıldırım darbesi düştükten sonra 1 numaralı direğin A fazında indüklenen gerilimin maksimum değerinin 8,71 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık olarak -0,233 katı olan -36 kV, B fazından indüklenen gerilimin maksimum değerinin 8,68 μ s'de hattın nominal değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 1,28 katı olan 198 kV, C fazına indüklenen

gerilimin maksimum değerinin de 8,65 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 1,19 katı olan 184 kV olduğu gözlemlenmiştir.

Araştırma sırasında değerlendirilen son durum ise yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direğin üzerinde yer alan koruma iletkenine düşmesi durumudur. Bu durumda elde edilen grafikler incelenir ise; iletim hattının ortasında yer alan 3 numaralı direğin A fazında indüklenen gerilimin maksimum değerinin 1,6 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık olarak 7,72 katı olan 1,19 MV, B fazında indüklenen gerilimin maksimum değerinin 1,59 μ s'de hattın nominal değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 6,15 katı olan 948 kV, C fazına indüklenen gerilimin maksimum değerinin de 2,74 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 2,39 katı olan 368 kV olduğu gözlemlenmiştir. Yıldırım darbesinin koruma iletkeni üzerinde düştüğü nokta düşey ekseninde A fazının yer aldığı noktadan B ve C fazlarının yer aldığı noktalara doğru uzaklığı arttığından A, B ve C fazlarında yer alan izolatörler üzerinde indüklenen gerilimlerin de uzaklık arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Yıldırım darbesinin koruma iletkenine düştüğü durumda 1 numaralı direğin A fazında indüklenen gerilimin maksimum değerinin 8,68 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık olarak 1,506 katı olan 232 kV, B fazından indüklenen gerilimin maksimum değerinin 8,65 μ s'de hattın nominal değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 1,39 katı olan 214 kV, C fazına indüklenen gerilimin maksimum değerinin de 8,65 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık -0,149 katı olan -23 kV olduğu gözlemlenmiştir. Bütün analiz sonuçları Tablo 5.1 ile Tablo 5.6 arasında özet olarak gösterilmektedir.

Tablo 5.1 3 Numaralı direğin faz iletkenine düşmesi durumu.

3 Numaralı Direğin Faz İletkenine Düşmesi Durumu	
A Fazı	19,2 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin 8,63 katı olan 1,33 MV değeri gözlenmiştir.
B Fazı	27 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin 4,06 katı olan 625 kV değeri gözlenmiştir.
C Fazı	27,1 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin 3,9 katı olan 601 kV değeri gözlenmiştir.

Tablo 5.2 Faz iletkenine düştükten sonra 1 numaralı direkte oluşan gerilimler.

Faz İletkenine Düştükten Sonra 1 Numaralı Direğe Etkisi	
A Fazı	17,8 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin 4,36 katı olan 672 kV değeri gözlenmiştir.
B Fazı	24,5 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin 2,25 katı olan 347 kV değeri gözlenmiştir.
C Fazı	26,9 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin 1,99 katı olan 307 kV değeri gözlenmiştir.

Tablo 5.3 3 numaralı direğin gövdesine düşmesi durumu.

3 Numaralı Direğin Gövdesine Düşmesi Durumu	
A Fazı	1,7 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin 4,68 katı olan 721 kV değeri gözlenmiştir.
B Fazı	1,67 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin 7,53 katı olan 1,16 MV değeri gözlenmiştir.
C Fazı	1,53 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin 6,44 katı olan 993 kV değeri gözlenmiştir.

Tablo 5.4 Direk gövdesine düştükten sonra 1 numaralı direkte oluşan gerilimler.

Direk Gövdesine Düştükten Sonra 1 Numaralı Direğe Etkisi	
A Fazı	8,71 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin (-0,233) katı olan (-36) kV değeri gözlenmiştir.
B Fazı	8,68 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin 1,28 katı olan 198 kV değeri gözlenmiştir.
C Fazı	8,65 μ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin 1,19 katı olan 184 kV değeri gözlenmiştir.

Tablo 5.5 3 numaralı direğin koruma iletkenine düşmesi durumu.

3 Numaralı Direğin Koruma İletkenine Düşmesi Durumu	
A Fazı	1,6 μ s’de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin 7,72 katı olan 1,19 MV değeri gözlenmiştir.
B Fazı	1,59 μ s’de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin 6,15 katı olan 948 kV değeri gözlenmiştir.
C Fazı	2,74 μ s’de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin 2,39 katı olan 368 kV değeri gözlenmiştir.

Tablo 5.6 Koruma iletkenine düştükten sonra 1 numaralı direkte oluşan gerilimler.

Koruma İletkenine Düştükten Sonra 1 Numaralı Direğe Etkisi	
A Fazı	8,68 μ s’de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin 1,51 katı olan 232 kV değeri gözlenmiştir.
B Fazı	8,65 μ s’de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin 1,39 katı olan 214 kV değeri gözlenmiştir.
C Fazı	8,65 μ s’de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin (-0,149) katı olan (-23) kV değeri gözlenmiştir.

Yapılan analizlerin sonucunda iletim hattının tamamında veya herhangi bir noktasında analizi ve tasarımı yapılacak nokta ile şalt elemanlarının, yıldırım akım darbesinin düştüğü noktaya göre hem yatay hem de düşey ekseninde uzaklıklarının iletim hattında yer alan izolatörler üzerinde indüklenerek istenmeyen durumlara neden olabilecek aşırı gerilimler üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmüştür. Kurulacak iletim hatlarının tasarım, proje ve uygulama aşamalarında ATP gibi simülasyon programlarından yardım alınarak iletim hatlarında istenmeyen durumlar incelenerek analiz edilebilir. Bu analizlere göre iletim hattının kurulumu gerçekleştirilir ve koruma ekipmanlarının nominal değerleri seçilir ise hem iletim hatları hem de iletim hatlarının beslediği çeşitli tüketiciler yıldırım aşırı gerilimlerin neden olabileceği istenmeyen durumlardan maddi ve manevi olarak korunmuş olacağı sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Yaprakdal Fatma, Kalenderli Özcan, and Arıkan Oktay** (2016), “A12-ISITES2016ID238,”.
- [2] **A. Kaygusuz, M. Şeker** (2011), and D. Nuri Demirağ MYO Cumhuriyet Üniversitesi, “Fırat Üniversitesi-Elazığ 154 kV’ luk Enerji Nakil Hatlarında Kullanılan Kafes Direklerin Yıldırım Analizi,” 2011.
- [3] **A. Yaşar YOLDAŞ, Ş. Özen** (2019), A. Üniversitesi, and E.-E. Mühendisliği Bölümü Dumlupınar Bulvarı Konyaaltı, “YILDIRIM ELEKTROMANYETİK DARBELERİNİN YÜKSEK GERİLİM HATLARINA ETKİLERİNİN İZOLATÖR VE TOPRAKLAMA AÇISINDAN İNCELENMESİ,”.
- [4] **M. Şeker and M. Çıkan** (2019), “ATP-EMTP Kullanılarak 154 kV Çatal Pilon Direkli Havai İletim Hatları için Direk opraklama Direncinin Yıldırım Aşırı Gerilimine Etkisinin İncelenmesi,” *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 9, no. 4, pp. 1989–2001, Dec., doi: 10.21597/jist.549039.
- [5] **Dugan R., Mcgranaghan M., Santoso S. and Beaty W.** (2002), *Electrical Power Systems Quality*. New York: McGraw Hill.
- [6] **U. J. Minnaar, C. T. Gaunt, and F. Nicolls**, “Characterisation of power system events on South African transmission power lines,” *Electric Power Systems Research*, vol. 88, pp. 25–32, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.epsr.2012.01.015.
- [7] **Özkaya M.** (1996), “Aşırı Gerilimler ve Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma, Yüksek Gerilimlerin Üretilmesi, Yüksek Gerilimlerin Ölçülmesi,” in *Yüksek Gerilim Tekniği Cilt 2*, p. 34.
- [8] **N. Cahit Genç** (2015), “Yıldırım Ve Aşırı Gerilimlerin Yüksek Gerilim Hatlarına Etkileri-Direklerin Topraklama Direnci İle izolatörlerin Atlama Gerilimi İlişkisi – Eklatörlerinin Etkin (!) liği,” pp. 15–20,.
- [9] **Asım Kaygusuz, M. Salih Mamiş, and Erhan Akın** (2002), “s-DOMAIN ANALYSIS OF LIGHTNING SURGES ON TRANSMISSION TOWERS s - DOMAIN ANALYSIS OF LIGHTNING SURGES ON TRANSMISSION TOWERS,” May.
- [10] **Beaty HW** (2006), *Standart Handbook for Electrical Engineers*, New York: McGrawHill Professional.
- [11] **T. Ueda, T. Ito, H. Watanabe, T. Funabashi, and A. Ametani** (2000), “A Comparison between two tower models for lightning surge analysis of 77 kV system,” *PowerCon 2000 - 2000 International Conference on Power System Technology, Proceedings*, vol. 1, pp. 433–437, doi: 10.1109/ICPST.2000.900096.
- [12] **H. W. Dommel** (1969), “Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks,” vol. PAS-88, no. 4, pp. 388–399,.

- [13] **Dommel HW** (1995), *EMTP Theory Book, Bonneville Power Administration, Conversion into Electronic Format by Canadian/American EMTP user Group.*
- [14] **O. PH** (1999), *Alternative Transient Program: Comparison of Transmission Line Models, Revista Latinoamericana del ATP.*
- [15] **A.-S. H. Hamza** and **N. M. K. Abdel-Gawad** (1994), “Digital computer studies of the surge response of a transmission line tower,” *Energy Convers Manag*, vol. 35, no. 12, pp. 1097–1105, Dec., doi: 10.1016/0196-8904(94)90013-2.
- [16] **K. . Chislom, W.A., Chow Y.L., and Strivastova** (1991), “Lightning Surge Responce of Transmission Towers,” pp. 3232–3242,.
- [17] **Ishii ve ark.** (1991), “*Multistory Transmission Tower Model for Lightning Surge Analysis*,” pp. 1327–1335,.
- [18] **TEIAS**, “TEIAS Annual Report 2017.”
- [19] **Ahmet Çifci, Emine Altundağ, Özgür Bulut, and Hasan Hüseyin Uysal**, “Burdur İli Elektrik Dağıtım Şebekesinde Meydana Gelen Arızalara Genel Bir Bakış ve Çözüm Önerileri,” vol. 55, no. 1, pp. 44–55, 2017.
- [20] **Eiichi Haginomori**, Tadashi Koshiduka, Junichi Arai, and Hisatochi Ikeda, “Power SyStem tranSient analySiS,” 2016.
- [21] **Uman MA** (1986), *All About Lightning*. Dover Publications, 1986.
- [22] **A. Ametani and T. Kawamura** (2005), “A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP,” *IEEE Trans. Power Deliv*, vol. 20, no. 2I, pp. 867–875,.
- [23] **Bewly BV** (1963), “*Travelling Waves on Transmission Systems*, New York Dover,”.
- [24] **Noor Shahida Bt Jamoshid** (2008), “*Lightning Simulation Study on Line Surge Arresters and Protection Design of Simple Structures*,” Degree Of Master Of Engineering (Electric – Power) Faculty of Electrical Engineering University Technology,.