

**T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE YILDIRIM AŞIRI  
GERİLİMLERE KARŞI KORUMA**

**AHMET TURAN ÖZCAN**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**MALATYA  
2005**

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne

Bu çalışma Jürimiz tarafından Elektrik-Elektronik Anabilim Dalında  
YÜSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

.../.../....

---

Prof. Dr. Z. Hafız ALİSOY  
Başkan

---

Doç. Dr. M. Salih MAMIŞ  
Üye

---

Yrd. Doç. Dr. Müslüm ARKAN  
Üye

---

Onay,  
Yukarıdaki imzaların isimleri yazılı öğretim üyelerine ait olduğunu onaylıyorum.

Prof. Dr. Ali ŞAHİN  
Enstitü Müdürü  
.../.../....

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasını değerli fikirleri ve tecrübeleriyle yönlendiren değerli hocam Doç. Dr. M. Salih MAMIŞ'e göstermiŐ olduğu yakın ilgi ve yardımlarından dolayı teşekkür eder, Őukranlarımı sunarım.

Bu alıőmayı İ..A.F. 2005/29 nolu proje ile destekleyen İnon Üniversitesi Bilimsel Projelerini Destekleme Birimi'ne teşekkür ederim.

Bu çalışmada bana vermiŐ olduğu desteklerinden dolayı ArŐ.Grv. Dr. Asım KAYGUSUZ'a ve İnon Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümündeki Tüm Oğretim Elemanlarına teşekkür ederim.

Ayrıca hayatım boyunca bana göstermiŐ oldukları manevi desteklerinden dolayı aileme en içten sevgi ve Őukranlarımı sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. YILDIRIMIN FİZİKSEL OLAYI VE KORUMA.....	7
2.1. Yıldırım Boşalmaları.....	8
2.2. Yıldırım Boşalmasının Özellikleri .....	9
2.3. Yıldırım Akımları.....	10
2.4. Güç Sistemlerinde Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma Ve Parafudrlar.....	12
3. İLETİM HATLARI VE DİREKLERİN MODELLENMESİ.....	16
3.1. Hat parametrelerinin Bulunması.....	16
3.2. Üç Fazlı İletim Hatlarının Modeli.....	18
3.2.1. Üç Fazlı İletim Hattının Seri Empedansı.....	18
3.2.2. Üç Fazlı İletim Hattının Şönt Kapasitesi.....	21
3.2.3. $T_e$ ve $T_i$ Dönüşüm Matrisleri.....	22
3.3. Direklerin Modellenmesi.....	26
4. YILDIRIM DÜŞMESİYLE MEYDANA GELEN AŞIRI GERİLİMLER.....	28
4.1. Yıldırımın Faz Hattına Düşmesi Hali.....	28
4.2. Yıldırımın Direğe Düşmesi Hali.....	30
4.3. Yıldırımın Koruma Hattına Düşmesi Hali.....	31
4.4. Yıldırımın Hattın Yanına Düşmesi Hali.....	32
4.4.1. Elektrik Alanları.....	32
4.4.2. Hatlar Arası Kuplaj.....	34
4.4.3. Tesis.....	36
4.4.4. Tasarım.....	37
4.4.5. Rusck Modeli.....	38
5. YILDIRIMLA İNDÜKLENEN GERİLİMLERİN ANALİZİNDE KULLANILAN PROGRAMLAR.....	40
5.1. EMTP(Electromagnetic Transient Program) Programı.....	40
5.1.1. Microtran.....	40
5.1.2. mtData.....	41
5.1.3. mtPlot.....	41
5.1.4. mtLine.....	42
5.1.5. fdData.....	42
5.2. EMTP/ATP(Alternative Transient Program) Programı.....	42
5.2.1. Çalıştırma Prensipleri.....	43
5.2.2. Bileşenleri.....	43
5.2.3. Tamamlanmış Simülasyon Modelleri.....	44
6. UYGULAMALAR.....	46
6.1. ÖRNEK 1 (Tek Hat Sistemi).....	46
6.2. ÖRNEK 2 (Paralel İki Hat Sistemi).....	49
6.3. ÖRNEK 3 (Paralel İki Hat Sistemi).....	53
6.4. ÖRNEK 4 (Birbirine Paralel İletim Hattı Dağıtım Hattı Modeli).....	55

6.5.	ÖRNEK 5 (İndüklenen Gerilimin Hattın Yerden Yüksekliğine Göre Değişimi).....	57
6.6.	ÖRNEK 6 (İndüklenen Gerilimin EMTP ve MATLAB kullanılarak Karşılaştırılması).....	59
6.7.	ÖRNEK 7 (Rusck Modeli Uygulaması).....	62
6.8.	DeneySEL İnceleme.....	63
7.	TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	66
	KAYNAKLAR.....	68
	EKLER.....	75
	ÖZGEÇMİŞ.....	81

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Yıldırım akımı $i(t)$ eğrisi. ....	10
Şekil 2.2	Yıldırım akımlarının birikmeli olasılık eğrileri.....	11
Şekil 2.3	Değişken dirençli parafudurların karakteristik büyüklükleri.....	13
Şekil 2.4	Değişken dirençli parafudurların karakteristik büyüklükleri.....	13
Şekil 3.1	İki iletken modelin karşıdan ve yerden yansıyan görünüşü.....	17
Şekil 3.2	Üç fazlı iletim sisteminin seri empedansı.....	19
Şekil 3.3	Üç fazlı iletim hattının şönt kapasitesi.....	21
Şekil 3.4	Çok katlı direk modeli.....	27
Şekil 4.1	Yıldırımın faz hattına düşmesi hali.....	29
Şekil 4.2	Yıldırımın direğe düşmesi hali.....	30
Şekil 4.3	Yıldırımın koruma hattına düşmesi hali.....	32
Şekil 4.4.	Hat yakınına yıldırım düşmesi.....	33
Şekil 4.5	Havai hattın elektriksel modeli.....	36
Şekil 4.6	ATPDraw’da Tesis.....	38
Şekil 6.1	Örnek 1 için tek iletken hat modeli.....	46
Şekil 6.2	Örnek 1’de kullanılan parafudurun gerilim-akım karakteristiği.....	47
Şekil 6.3	Tek iletkenli parafudursuz sistemde DUGY noktasına tepe değeri 8 birim olan akım uygulanması sonucu DUG3 ve DUG4 düğümlerdeki gerilimlerin değişimi.....	48
Şekil 6.4	Tek iletkenli parafudurlu sistemde DUGY noktasına tepe değeri 8 birim olan akım uygulanması sonucu DUG3 ve DUG4 düğümlerdeki gerilimlerin değişimi.....	49
Şekil 6.5	Birbirine paralel iletim-dağıtım hat modeli.....	50
Şekil 6.6	İki iletken arası mesafe 5 metre, yerden yükseklikleri 10 metre ve GMR’ları 3.99mm olan birbirine paralel iletim-dağıtım hattı modelinde dağıtım hattında indüklenen gerilimin EMTP’de bulunan karakteristiği.....	51
Şekil 6.7	İki iletken arası mesafeye göre indüklenen gerilimin EMTP’de elde edilen sonuçların karakteristiği.....	52
Şekil 6.8	İki iletken arası 5 metre, yerden yükseklikleri 10m ve GMR’ları 8.74mm olan birbirine paralel iletim-dağıtım hattı modeli için dağıtım hattında indüklenen gerilimin EMTP’de bulunan karakteristiği.....	54
Şekil 6.9	İki iletken arası mesafeye göre indüklenen gerilimin EMTP’de bulunan değerlere göre değişimi.....	55
Şekil 6.10	Paralel iletim-dağıtım hattı modeli için EMTP’de indüklenen gerilimin değişimi.....	56
Şekil 6.11	İletim-dağıtım hattı modeli için iletkenler arası mesafeye göre indüklenen gerilimin değişimi.....	57
Şekil 6.12	İki iletken arası 100 metre olan bir sistemde indüklenen gerilimin değişimi..	58
Şekil 6.13	İndüklenen gerilimin iletkenin yerden yüksekliğine göre değişimi.....	59
Şekil 6.14	GMRi 0.0373m, yerden yüksekliği 10m, uzunlukları 1500m ve arası 100m olan iki iletkenli bir sistemde indüklenen gerilimin EMTP’de elde edilen grafiği... 60	
Şekil 6.15	GMRi 0.0373 m, yerden yüksekliği 10 m, uzunlukları 1500 m ve aradaki mesafesi 100m olan iki iletkenli bir sistemde indüklenen gerili MATLAB’da elde edilen grafiği.....	61
Şekil 6.16	İndüklenen gerilimin EMTP ve MATLAB’da elde edilen maksimum değerleri grafiği.....	61
Şekil 6.17	Yıldırımın iletim hattının yanına düşmesi hali.....	62

Şekil 6.18 Rusck'a göre hat yakınına düşen yıldırımın hat üzerinde indüklediği gerilimin yıldırımın düşme noktası ile hat arası mesafeye göre değişimi.....	63
Şekil 6.19 İndüklenen gerilimin incelenmesinde deney şeması.....	64
Şekil 6.20 Deneysel incelemede uygulanan gerilimin değişimi.....	64
Şekil 6.21 Deneysel incelemede indüklenen gerilimin osiloskopta elde edilen değişimi...	65
Şekil 6.22 Deneysel incelemede indüklenen gerilimin osiloskopta elde edilen değişimi...	65

## SEMBOLLER

I	Yıldırım boşalma akımı
$\sigma$	Birim uzunluğa düşen yük yoğunluğu
v	Ana boşalma hızı
L	İndüktans
C	Kapasitans
l	Hat uzunluğu
$Z_0$	Kompleks karakteristik empedans
$\gamma$	Yayılm sabiti
h	İletkenin topraktan olan yüksekliği
r	İletkenin yarıçapı
GMRi	İletkenin ortalama geometrik yarıçapı
$\sigma$	toprağın iletkenliği
$\epsilon_r$	toprağın bağıl dielektriği
$D_{ik}$	i. iletken ile k. iletkenin topraktan yansıyan görüntüsü arasındaki mesafe
$d_{ik}$	i. ve k. iletkenler arasındaki direk mesafe
$Z_{ii}$	İletkenin self empedansı
$Z_{ik}$	İki iletken arasındaki kuplaj empedans
v	Dalga hızı
c	Işık hızı (300 m/ $\mu$ s)
$\epsilon_0$	Boşluğun elektrik geçirgenliği ( $8.854 \times 10^{-12}$ ), Fm <sup>-1</sup>
$\mu_0$	Boşluğun manyetik geçirgenliği ( $4\pi \times 10^{-7}$ ), Hm <sup>-1</sup>

## 1. GİRİŞ

Yıldırım, enerji kesintilerine sebep olan en büyük etkenlerden birisidir. Amerika ve Kanada'da 14 yıllık periyot halinde yapılan araştırmalar sonucunda yıldırımın 230 kV'luk hatlarda %65 oranında kayıplara sebep olduğu tespit edilmiştir [1]. Bu analizler 386 yüksek gerilim hattı üzerinde yapılmıştır. Benzer bir alışma İngiltere'de yapılmış ve 33 kV'luk hatlarda 50.000 hata raporu analiz edilmiştir [1].

Enerji iletim sistemlerinde faz iletkenlerine, direklere ve toprak iletkenlerine yıldırım dūřmesi sonucunda meydana gelen kısa süreli gerilim dalgası izolatorlerin kırılmasına ve transformatör izolasyonlarının bozulmasına neden olmaktadır. Ayrıca iletim hatlarına yakın mesafelere yıldırım dūřtüğünde hat üzerinde bir gerilim indüklemektedir. Yıldırım aşırı gerilimlerinin hattın taşıdığı gerilimden çođu zaman daha büyük olması nedeniyle enerji iletim sistemleri zarar görmektedir. Bu nedenle güç sistemlerinde yıldırım dalgalarının analizi büyük önem taşımaktadır. Yıldırım dalgalarının analizinde genellikle bilgisayar simülasyonları tercih edilmektedir. Yıldırımın gerçek sistem üzerindeki etkilerinin gerçek bir yıldırım dalgasının dikkate alınması suretiyle tespit edilmesi zordur. Bunun yerine sistem basit olarak laboratuvarında modellenerek deneysel çalışma yapılabilir. Ancak toprak etkisi v.b. nedenlerle direk, iletim hattı gibi bazı güç sistemi elemanlarının laboratuvar ortamında tam olarak modellenmesi mümkün olmamaktadır.

Enerji iletim sistemlerinde meydana gelen aşırı gerilimler, ya doğrudan doğruya yıldırım dūřmesiyle veya elektromanyetik etkileşim suretiyle oluşur. Yıldırımın faz iletkenine, direğe veya koruma iletkenine dūřmesi halinde meydana gelen aşırı gerilimler “direkt yıldırım dūřmesiyle meydana gelen aşırı gerilimler” olarak ifade edilir. Yıldırım bulutundaki elektrik yükü ile iletim hattında elektromanyetik etkileşim suretiyle bir yük dalgası meydana geldikten sonra, yıldırımın yüksek gerilim hattının dışında her hangi bir yere dūřmesiyle hatta serbest kalan yük dalgasının her iki tarafa doğru hareketiyle meydana gelen aşırı gerilimler de “elektromanyetik etkileşim suretiyle meydana gelen aşırı gerilimler” olarak tanımlanır. Mühendisler ve bilim adamları, şimşek ve yıldırım konusunda çalışmalar yapmaktadırlar. Bu alışmalar yıldırım etkisini azaltabilmek için koruma iletkeni ve parafudur kullanılmasının gerekli olduğunu göstermektedir [1].

İletim hatları ve řalt sahalarındaki izolasyonun ekonomik olması için elektrik güç sistemlerinde meydana gelen yıldırım dūřmesi anındaki maksimum gerilim aşmasının doğru tahmin edilmesi gerekir. Bir řalt sahasına ulaşan yıldırım dalgasının şekli ve genliğini belirleyen en önemli etkenlerden biri iletim hatlarındaki direklerin yıldırım dalgası cevabıdır.

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda değişik direk modelleri alınarak ve paket programlar kullanılarak analizler yapılmıştır. Bu çalışmaların büyük bir bölümünde yıldırım dalgası akım kaynağı ile modellenmiş, programlar genellikle EMTP kullanılarak yapılmış ve direk modelleri için de çoğu zaman toplu parametrelili endüktans ve rezistanslar kullanılmıştır [1-2].

Yıldırım konusunda çalışma yapılırken yürüyen dalgalara önem vermek gerekir. Çünkü iletim hattına yıldırım düştüğünde yürüyen dalgalar oluşur. Eğer bir yıldırım akımı iletim hattına enjekte olursa bu akım ikiye ayrılır ve yaklaşık olarak  $I_{Z_0}/2$  şeklinde bir gerilim oluşturur [1-3]. Burada I yıldırım akımı,  $Z_0$  ise karakteristik empedanstır.

Kısa devrelere birinci derecede neden olan yıldırım ve ağaçlardır. Bu nedenle enerji iletim sistemlerinin güç kalitesini geliştirebilmek ve güvenilirliğini arttırabilmek amacıyla hatlarda ani kesilmeler denenmekte ve bunun sonucunda yıldırıma karşı koruma sistemleri geliştirilmektedir. Dağıtım hatlarının yıldırıma karşı korunması zordur. Çünkü yıldırımla indüklenen gerilimler izolasyonu bozmaktadır. Bu sakıncayı giderebilmek için koruma iletkenleri ve parafudrlar kullanılabilir. Fakat her iki koruma düzenin karşılaştığı sorunlar mevcuttur [1].

Konu ile ilgili olarak Indian Araştırma Enstitüsü Yüksek Gerilim Mühendisliği Bölümünde P. Durai Kannu ve M. Joy Thomas havai hat yakınına düşen yıldırımın, farklı yükseklikteki havai hat iletkenleri üzerinde indüklediği gerilimler üzerinde çalışma yapmışlardır [4]. Bu çalışmada indüklenen gerilimler üzerinde sonsuz toprak iletkenliğinin daha düşük yükseklikteki ( <20 m ) iletkenler üzerinde indüklenen gerilimi önemli ölçüde etkilediğini, çok büyük yükseklikteki ( >100 m ) iletkenlerde önemli bir etkiye sahip olmadığını tespit etmişlerdir. Yıldırımın indüklediği gerilimin hesabında şu temel adımlar kullanılmıştır:

- Geri dönen yıldırım dalgasının modellenmesi,
- Hem yıldırım kapsamı ile oluşan alanların, hem de sonsuz iletken toprak ile tespit edilen şekil değişikliklerinin tasarlanması,
- Toprak empedansı etkisini ihtiva eden alan-havai hat kuplajı modellenmesi.

Diğer bir çalışma, Universidad Simon Bolivar, Caracas, Venezuela üniversitesinde Andres Hernandez-Telleria ve diğ. tarafından yapılmış ve konusu havai hatlar üzerinde yakın yıldırım etkisi simülasyon metodlarının karşılaştırmasıdır. Bu karşılaştırma Master ve Uman [5] ile Chowdhury [6]'nin atmosferik boşalmaya benzetimi yapılan elektromanyetik alanın bu benzetimi için kurdukları yaklaşımlar arasında yapılmıştır. Bazı yetkililer endirekt yıldırım kuvvetlerinin, yüksek frekans meydana getirmeleri nedeniyle devrelerin performansında

direkt kuvvetlerin üstün etkisine karşın güç dağıtım devrelerinde arızanın büyük bir nedeni olduğunu ifade etmektedirler. Bir elektrik devresi yakınında yıldırım aktivitesi nedeniyle indüklenen gerilimlerin hesaplarında dört farklı alan ayırt edilebilir.

- Elektrik boşalmasının modellenmesi,
- Yıldırım boşalması ile meydana gelen elektromanyetik alanın simülasyonu,
- Elektrik devrelerinin iletkenlerinde indüklenen gerilimlerin tayini,
- Elektrik devrelerinin iletkenleri üzerinde hareket eden dalganın simülasyonu.

Elektrik boşalmasının modeli için Bewley [7], bulutun boşalması nedeniyle devrenin yakınında elektrostatik alanın oluşmasını içeren analizinde, geri dönen dalga kuvvetine ortak olan elektromanyetik alanın etkisini ihmal ederek temel oluşturmuştur. Wagner ve Mc Cann [8], geri dönen dalga kuvvetine ortak olan elektromanyetik alanların etkisinin yakın elektrik devreleri üzerinde indüklediği aşırı gerilimin, bulutun elektrostatik alanların etkisinden daha önemli olduğunu göstermişlerdir. Sonuçların anlamlı bir şekilde değişiminde atmosferik boşalmanın modelinde boşalma hızı çok önemli bir değişkendir [2, 9]. Berger 20 ile 100m/μs arasında bir değer bulmuştur[10] . Bruce ve Golde yerden buluta doğru hareket eden boşalmada geri dönen dalganın (return stroke) boşalma hızının üssel olarak azaldığını ve bunu ifade eden aşağıdaki bağıntıyı tespit etmişlerdir [11];

$$v(t) = v_0 \exp(-\gamma t) \text{ m/sn}$$

$$v_0 = 8 \times 10^7 \text{ m/sn}, \quad \gamma = 3 \times 10^4 \text{ sn}^{-1}$$

Lundholm ve Rusck boşalmanın hızı ve akım genliği arasında aşağıdaki bağıntıyı tesis etmişlerdir:

$$v = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{500}{I}}} \text{ m/sn}$$

Burada;

$c$  : Işık hızı

$I$  : Boşalmada geri dönen dalga kuvveti akımının genliğidir.

Yapılan bu çalışmada hesaplamalar esnasında geri dönen dalganın (return stroke) hızı için ışık hızınının 0,3 katı bir sabit değer farz edilmiştir. Genelde atmosferik boşalmanın plazmatik kanalı, kendi uzunluğu boyunca uzayda ve zamanda bir elektrik akım dağılımı ile toprak düzlemi üzerinde dikey bir anten boyutu şeklinde matematiksel model benzetimi yapılarak göz önüne alınmıştır. Hareket eden akım kaynağı modeli olarak; geri dönen dalganın (return stroke) hızı (20 ile 110 m/μs) ve ışık hızı ile hareket eden ve kaynaktan

toprağa akan bir serbest elektrik akım ile plazmatik kanal tarafından yükselen bir eşdeğer akım kaynağı kabul edilmiştir. Aşağıdaki değişkenler kullanılarak plazmatik kanalın z pozisyonundaki elektrik akımı formülü yazılmıştır [9].

$$I(z',t) = I(0, t+z'/c) \quad z' \leq vt$$

$$I(z',t) = 0 \quad z' > vt$$

$I(z',t)$  : Plazmatik kanalın  $z'$  pozisyonunda elektrik akımı (kA),

$z'$  : Plazmatik kanalda yükseklik pozisyonu (m),

$t$  : Zaman (s),

$c$  : Işık hızı (m/s),

$v$  : Geri dönen dalganın hızı.

Değiştirilmiş iletim hattı modelinde [12] elektrik akımı plazmatik kanal boyunca yerden yükseklikle azalmaktadır.

$$I(z',t) = \exp(-z'/\lambda) \times I(0, t-z'/v) \quad [\text{kA}]$$

Burada;

$\lambda$ : Geri dönen dalga ilerlemesi (1'den 2 km'ye) boyunca oluşmuş plazmatik kanalın korona muhafazasında biriken yükün dikey dağılımının etkisini hesaba katmak için kullanılan bir gecikme sabitidir.

Uniform yük dağılımı modelinde [13] ana fikir, bulut ile toprak arasında plazmatik kanal boyunca uniform şekilde dağılmış elektrik yüküdür. Yıldırım boşalması ile meydana gelen elektromanyetik alanın simülasyonu için elektromanyetik alanın hesabında iki ana eğilim vardır; Master ile Uman tarafından önerilen yaklaşımda [5] boşalmanın plazmatik kanalın ekseninde merkezlenmiş silindirik koordinatların terimlerinde formüle edilmesidir. Chowdhury tarafından önerilen yaklaşımda ise [6] dikdörtgen biçimindeki koordinatların terimlerinde formüle edilmesidir.

Elektrik devrelerinin iletkenlerinde indüklenen gerilimlerin tespitinde temel olarak harici elektromanyetik alanlar için iletim hattı elemanlarının gerilim ve akımlarının davranışının benzetimine yönelik yazılan eşitlikler sistemi için üç farklı durum önerilmiştir; Agrawal [28] tarafından önerilen formülasyonda, iletim hattını tahrik eden güç fonksiyonları olarak, iletkenlere aksel yatay bileşen ve elektrik alanın dikey bileşeni ortaya çıkartılmıştır. Taylor tarafından önerilen formülasyonda, manyetik alan ve dikey elektrik alan güç fonksiyonları olarak önerilmiştir. Chowdhury tarafından kullanılan formülasyonda ise Taylor tarafından önerilen ile benzerdir. Sadeleştirme için manyetik alanın etkisi ihmal edilmiştir [6].

Elektrik devresinde hareket eden dalga simülasyonu için elektrik devresinin tanımlanan yerleşiminde gerilimin hesabı için iki faktör göz önüne alınır. Birincisi, atmosferik boşalmadan dolayı meydana gelen elektromanyetik alanlar tarafından direkt olarak indüklenen gerilimlerdir. İkinci faktör, elektrik devresinin belirli yerleşiminde çalışma altında bir noktaya ulaşan gerilim dalgalarının elektrik devresinin diğer yerleşimine gelişi, atmosferik boşalmanın daha yakın olması ve orada indüksiyon fikrinin yerleşmesidir.

Diğer bir çalışma Raul Montano C.A. Electricidad de Caracas Venezuela, ve diğ. [54] tarafından dağıtım sistemi yakınında yıldırım kuvveti tarafından indüklenen aşırı gerilimin ATP-EMTP kullanarak hassas analizinin yapılmasıdır. Bu analizde ana obje, aşırı gerilimin göz önünde bulundurulmuş maksimum genliğinde değişkenlerin etkisini ve hat boyunca yerleşimini gözlemektir. Bu analiz ATP (Alternative Transient Program) Chowdhury-Gross modeli düzenlemesi ile simülasyon yapmak için gerekli dosyaları sadeleştirmeyi, düzenlemeyi bilgisayar kullanarak yapılmıştır. Bu analizde göz önünde bulundurulmuş galeri değişkenleri, geri dönen dalga akımının ( $I_0$ ) tepe değeri, boşalma ve hat arasındaki dikey mesafe ( $y_0$ ), geri dönen dalga akımının cephe süresi ( $T_f$ ), geri dönen dalganın hızı ile ışık hızı arasındaki oran ( $\beta$ ) ve iletkenin yüksekliği ( $h$ ) dir. Aşırı gerilimin hat boyunca yerleşiminde  $y_0$  değerinin önemli olduğu,  $I_0$ 'ın değerinin aşırı gerilimin maksimum genliğinde çizgisel bir etkiye sahip olduğu ve aşırı gerilimin hat boyunca yerleşimi  $I_0$ 'a göre hassas olmayan bir durum gösterir.

Diğer bir çalışmada M. S. Mamiş ve diğ. tarafından üniform olmayan tek faz hat modeli kullanarak yıldırım aşırı gerilimler hesaplanmıştır [60]. Bu çalışmada iletim hatlarında yıldırım analizi için bir s-domeni metodu sunulmuştur. Elektrik direği üniform olmayan bir hat olarak göz önüne alınmış ve sonra üniform kabul edilen uygun sayıda kısımlara bölünmüştür. Üniform olmayan hat için uç denklemi, üniform hat kısımlarının uç denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Sınır koşulları kullanılarak s-domeninde sistemin toplam cevabı bulunmuştur. Bu metot iletim direği yıldırım dalgası cevabının hesabı için kullanılmıştır. Yöntem, frekans bağımlı parametrelerin etkisini de içermektedir.

Enerji iletim sistemlerinde faz iletkenlerine, direklere veya koruma iletkenlerine yıldırım düşmesi halinde geçici rejimler oluşmaktadır. Bu çalışmada amaç, enerji dağıtım sistemlerine yıldırım düşmesi sonucu oluşan geçici rejimlerin analiz edilmesidir. Enerji dağıtım sistemi toplu parametrelili olarak modellenip, EMTP programı kullanılarak yıldırımın dağıtım hattı yakınına, doğrudan iletim hattına düşmesi durumları için bilgisayar simülasyonu gerçekleştirilmiştir. İletim hatlarında yayılan bir yıldırım dalgasının kendisine yakın bulunan

bir dağıtım Őebekesinde meydana getirdiği gerilimin tespiti yapılmıŐtır. Laboratuar ortamında sistem modellenerek deđiŐik durumlar iŐin simülasyonla elde edilen sonuçlarla aynı sonuçlar elde edilmeye ŐalıŐılmıŐtır. Bu Őekilde, meydana gelen yıldırım geŐici rejimleri analiz edilerek sistemin korunmasına yönelik öneriler sunulmuŐtur. Enerji iletim hatlarının fiziki konstrüksiyonu dikkate alınarak elde edilecek sistem modeline iliŐkin veriler EMTP programına giriş bilgisi olarak verilmiŐtir. ŐeŐitli yıldırım dűŐmesi durumları dűŐünölerek, deđiŐik sistem parametreleri ile bu program ŐalıŐtırılmıŐ ve elde edilen sonuçlar irdelenmiŐtir. Parametrelere ve sistem özelliklerine bağlı olarak aŐırı gerilimlerin en büyük değerleri ve buna etki eden faktörler tespit edilmiŐtir.

## 2. YILDIRIMIN FİZİKSEL OLAYI VE KORUMA

Yıldırım, bulut ile yeryüzü arasında meydana gelen bir elektrik yük akışıdır. Bu yük akışının oluşabilmesi, yani yıldırım oluşabilmesi için bulutların elektrikle yüklenmesi ve bulut ile yeryüzü arasında iletken bir ortamın sağlanması gerekir. Bulutların elektrik yükü ile nasıl yüklendikleri hakkında bir çok teori vardır. Simpson ve Lomonossow'a göre [14,51], bir yıldırım bulutundaki elektrik yükleri düşey hava akımları ile, yani sıcak ve soğuk havanın yer değiştirmesi ile meydana gelir. Hava akımları buluttaki su damlacıklarını hareket ettirir ve bunların sürtünmesi sonucu elektrik yükleri oluşur [14].

Yıldırım bulutunun oluşumu, nemli havanın devamlı ve kuvvetli bir şekilde yukarıya doğru çekilmesine bağlıdır. Bu sırada belirli bir yükseklikten sonra havanın nemi ince su damlacıklarına veya buz kristallerine dönüşür. Buluttaki kuvvetli hava akımları, büyük hızlarla su damlacıklarının devamlı olarak dağılmasına ve tekrar birleşmesine neden olurlar. Buna göre, ağır su damlacıklarında bulunan pozitif yükler, bulutun aşağı kısmında olmalı ve daha çok rüzgar hızının büyük olduğu bölgelerde toplanmalıdır. Buna karşılık küçük su damlacıklarında bulunan negatif yükler ise rüzgar tarafından itilmeli ve az veya çok düzgün olmak üzere bulutun üst kısmına dağılmalıdır [15]. Elektrik yüklerinin bu teoriye göre üretimi halinde yıldırım boşalmalarının pozitif kutbiyette olması gerekir. Oysa yıldırım boşalmalarının çoğu negatif kutbiyettedir [15].

Yıldırım bulutunda elektrik yüklerinin oluşumu hakkında ikinci teori, Elster ve Geitel tarafından ortaya atılmıştır [14]. Bu araştırmacılara göre, yıldırım bulutundaki yükler, etki ile elektriklelenme yoluyla meydana gelir. Dünya yüzeyindeki elektrik yükü  $-5,4 \times 10^5$  C kabul edilirse, bu yükün meydana getirdiği elektrik alanı içinde bulunan su damlacıkları alt uçları pozitif ve üst uçları negatif olmak üzere polarize olurlar. Yerçekimi etkisiyle aşağıya doğru düşen büyük su damlacıkları, havanın nispeten yavaş hareket eden iyonlarına yaklaşırlar ve bu sırada su damlacığının pozitif alt ucu havanın negatif iyonunu absorbe ederken pozitif iyonunu da iter. Böylece hafif su damlacıkları da pozitif elektrikli parçacıklar haline dönüşürler. Bu teoriye göre bulutun alt tarafı negatif elektrik yüklerini ihtiva etmek zorundadır. Şüphesiz bu teori ile yıldırım boşalmalarının daha çok negatif kutbiyette olmaları açıklanmış olur.

Bu teoriye de itiraz edilebilir. Bir yıldırım bulutunun çoğu su damlacıklarından değil de buz kristallerinden ve kar parçacıklarından oluşur ve bunların dünyanın elektrik alanı ile polarize olmaları olasılığı çok zayıftır. Elektrik alan çizgileri pozitif yükte başlar ve negatif

yükte sonlanır. Burada toprak üzerinde meydana gelen elektrik alanının oluşturduğu gerilimin, bulutun toprak üzerinde veya yapıların üzerinde yüklenmesine veya bulutun hareket etmesi sebebiyle bulut içerisindeki yük dağılımının değişmesine bağlı olduğu Simson ve Scrase tarafından belirtilmiştir [15].

Yeryüzü aşağıya doğru olan atmosferik elektrik alan ile birlikte yaklaşık 0,13 kV/m şiddetinde  $5 \times 10^5$  C negatif yük taşır. Atmosferin daha aşağı kısımlarında pozitif elektrik eşit miktarda dağılmış olarak yerleşir. Böylece atmosferik elektrik alanının gücü yükseklikle azalır. Dikey elektrik alanının bir sonucu olarak atmosferin üst kısımlarında yeryüzüne ilişkin potansiyel yaklaşık olarak +300 kV olur.

Yıldırım bulutunda elektrik yüklerinin oluşumu hakkında bir başka teori Frenkel tarafından ortaya atılmıştır [14]. Frenkel'e göre havada her iki işaretli iyonlar mevcut olduğundan dünyanın negatif elektrik yükleri, kaçmaya ve iyonosferin pozitif elektrik yükleri ile birleşmeye yatkındır. Dolayısı ile dünyanın azalan elektrik yükünü devamlı olarak besleyecek bir olayın meydana gelmesi gerekir. Dünyanın elektrik yükünün sabit kalmasında ana rolü, negatif yıldırım boşalmaları oynadığı kabul edilebilir.

Bu teoride her iki işaretli iyonları içeren hava ile çok küçük su damlacıkları veya buz kristallerinden oluşan bir ortam göz önüne alınır ve havanın negatif iyonlarının daha çok küçük su damlacıklarına veya buz kristallerine konduğu kabul edilir. Buna göre bulut, negatif elektrikli su damlacıkları ve pozitif iyonlu havadan (pozitif iyonlara karşılık olan negatif iyonlar su damlacıkları tarafından yutulmuştur) oluşur. Yerçekimi, iyonlara hemen hemen hiç etki etmediği halde, su damlacıklarına etki eder. Su damlacıkları etraftaki havaya göre daha ağır olduğundan hızı birkaç mm/s'i bulan bir  $v$  hızı ile aşağıya doğru düşerler.

Başlangıçta su damlacıklarının ve havanın iyonlarının üst üste iki küresel bulut üzerinde oldukları kabul edilirse,  $t$  zaman sonra su damlacıklarını içeren küre  $vt$  kadar aşağıya iner. Bulutun üst tarafında havanın pozitif yükleri ve alt tarafında da su damlacıklarının negatif yükleri bulunur. Frenkel, boşalmanın başlamasını su damlacıklarının büyümesine ve elektrik alanının yer yer kuvvetlenmesine bağlamaktadır. Gerçekten su damlacıklarının büyümesi bulutun stasyoner durumunu bozar [14].

## **2.1. Yıldırım Boşalmaları**

Yıldırımın büyük bir elektrik boşalması olduğu uzun yıllardan beri bilinmektedir. Özellikle son altmış yıl içinde yıldırım, yüksek gerilim tekniği ile uğraşan araştırmacılar tarafından iyice incelenmiştir. Çünkü yüksek gerilim şebekelerinin hızla gelişmesi, enerji

iletim hatlarının, santral ve transformatör gruplarının yıldırım boşalmalarına karşı korunmasını gerektiriyor ve bu boşalmalar, uzun yıllar şebeke arızalarının ana nedenleri olarak kabul edilmiştir [1].

Yıldırımın araştırılması, gazlarda boşalma olaylarının incelenmesi ile aynı zamanda olmuştur. Bu araştırmaların bir kısmı, kanal boşalma teorisinin kurulmasına yardım etmiştir. Gerçekten her iki konunun aynı zamanda incelenmesi çok yararlı olmuştur. Laboratuvar deneyleri boşalmanın parametrelerini değiştirmeye, olayların fotoğrafını ve osilogramlarını çekmeye olanak vermiştir. Yıldırımla, laboratuvarda elde edilen uzun kıvılcımlı bir boşalma arasındaki benzerlik yıldırım teorisinin kurulmasına yardımcı olmuştur [14].

## 2.2. Yıldırım Boşalmasının Özellikleri

Yıldırım genel olarak çok kademeli boşalmalar şeklindedir. Bunun nedeni şöyle açıklanmaktadır: Bulutta mevcut girdaplı hava akımları dolayısıyla elektrik yükleri birbirinden ayrı merkezlerde toplanırlar [14].

Yıldırım boşalması, elektrik alanı en büyük olan yük birikmesi durumunda başlar. Birinci merkezin ön boşalması toprağa erişmediği sürece, bu merkezin potansiyeli pratik olarak değişmez ve buluttaki yük merkezleri arasında karşılıklı bir etki söz konusu değildir. Ana boşalmadan sonra bulutun birinci yük merkezi pratik olarak toprak potansiyelinde olur. Boşalan birinci merkez ile komşu merkez arasında potansiyel farkı büyür. Dolayısıyla bu iki merkez arasında boşalma meydana gelir. Her ne kadar bu boşalma sırasında birinci boşalmanın kanalı deiyonize olur ise de yine de belirli bir iletkenliği mevcut kalır. Boşalma komşu merkezden birinci boşalmanın kanalına eriştikten sonra, bu yol boyunca ok şeklinde bir ön boşalma oluşur. Ok şeklindeki ön boşalma, pilot ön boşalmadan daha yüksek hızla büyür. Bu durum, ok şeklindeki ön boşalmanın daha önce iyonize olmuş yol üzerinde yayılması ile açıklanır. Ön boşalmanın kademe şeklinde oluşumunu açıklamak için bir çok teori ortaya atılmıştır.

Ana boşalmanın en önemli karakteri, akım şiddetidir. Yıldırım kanalından ve objeden geçen bu akım, kanalda biriken yüklerin nötralizasyon hızı ile tayin edilir. Eğer ana boşalma hızı  $v$  ile ve birim uzunluğa düşen yük yoğunluğu da  $\sigma$  ile gösterilirse, boşalma akımı;

$$I = \sigma \cdot v \text{ olur.}$$

Ana boşalmadan sonra, bulutun artık yükleri kanal üzerinden toprağa akarlar ve toprağa girdiği yerlerde de belirli bir akım meydana getirirler [14].

### 2.3. Yıldırım Akımları

Yıldırım akımı darbe karakterinde olup, değeri sıfırdan tepe değerine kadar hızla yükselir ve nispeten yavaş bir seyirle tekrar sıfır değerine düşer. Kutbiyeti pozitif veya negatif olabilir ( %70 ile %90 negatiftir ). Genel olarak bir yıldırım akımı;

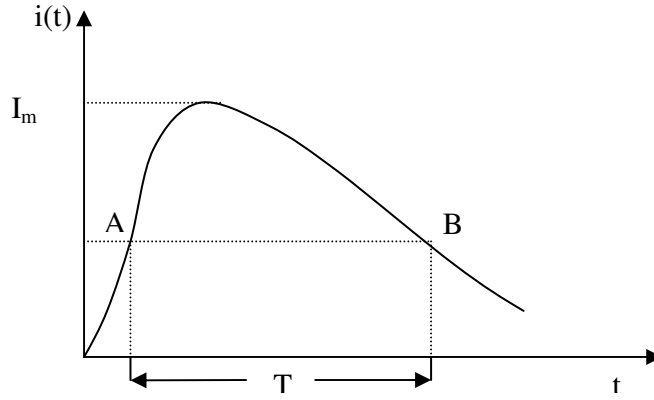
$$i(t) = I_0( e^{-\alpha t} - e^{-\beta t} ) \quad (2.1)$$

denklemini ile verilebilir.

$I_0$  : Başlangıç boşalma akımı

$\alpha$  ve  $\beta$  yıldırım dalgasının karakteristiğine uygun sabit değerlerdir.

Sistem ekipmanının yıldırıma karşı darbe dayanma kuvveti standart darbe dalgası gerilimi olan  $v = v_0( e^{-\alpha t} - e^{-\beta t} )$  uygulanarak bulunur. Burada standart darbe dalgası geriliminde  $\alpha$  ve  $\beta$ ,  $1.5 \times 10^4$  ve  $6 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$  olarak, t saniye biriminde 1/50'lik dalgayı temsil etmektedir. 1/50 standart dalga şekli 1 $\mu$ s'de sıfırdan tepe değerine ulaşır ve 50  $\mu$ s'de tekrar yarı değerine düşer. Cephe süresi  $t_1$ 'in direkt olarak bir osilogramda ölçülmesi zordur ve  $t_1$  tepe değerinin %90 ile %30 (ya da %10)'u arasında hesap edilir.

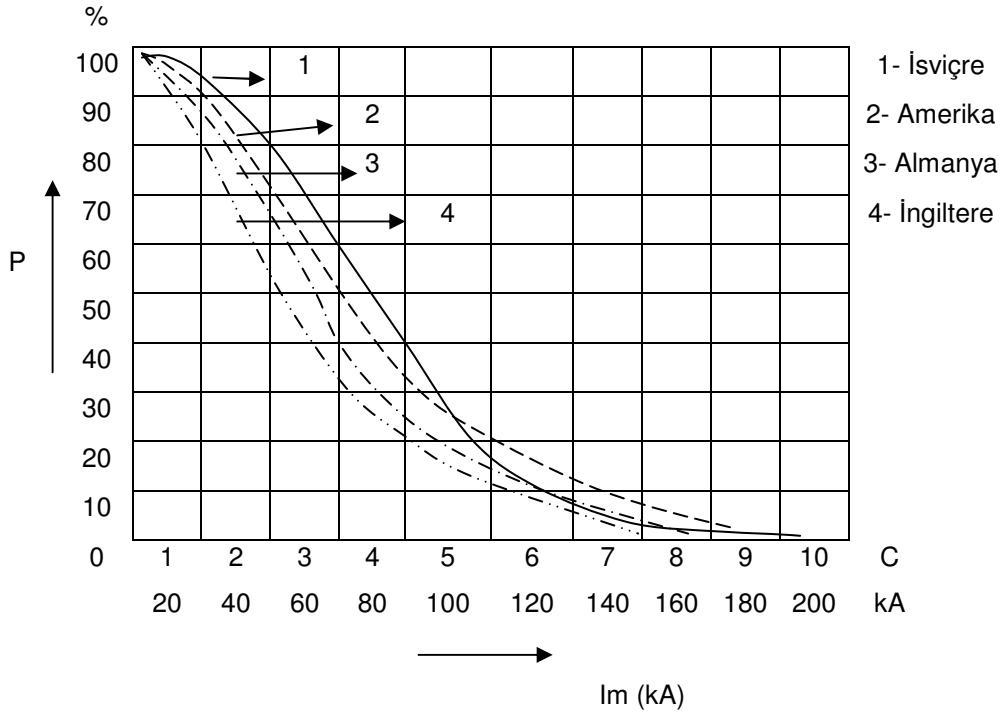


Şekil 2.1. Yıldırım akımı  $i(t)$  eğrisi. T: Yarı değer süresi.

Genel olarak yıldırım akımlarının yarı değer süreleri 30 ile 100  $\mu$ s arasında değişir. Eğer  $T=50 \mu$ s kabul edilirse, yıldırım akımının en büyük değeri  $I_m$  ile yıldırımdaki elektrik yükü arasında;

$$Q = 50 \times 10^{-6} I_m$$

bağıntısı yazılabilir. Buna göre  $I_m = 20 \text{ kA}$  olan bir yıldırımın elektrik yükü  $Q = 50 \times 10^{-6} \times 20 \times 10^3 = 1 \text{ C}$  olur. Maksimum yıldırım akımları bir çok araştırmacılar tarafından ölçülmüştür. İsviçre, Amerika, Almanya ve İngiltere’de yapılan ölçmeler sonucunda bir bölgeye düşen yıldırım akımlarının tepe değerlerinin ( $I_m$ ) “ birikmeli olasılık dağılımları”, yani absis eksenindeki akım değerine eşit veya bundan daha büyük akım değerine haiz yıldırım sayısının düşen toplam yıldırım sayısına oranları tesbit edilmiş ve birikmeli olasılık eğrileri çıkartılmıştır [14]. Birikmeli olasılık eğrileri Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Yıldırım akımlarının birikmeli olasılık eğrileri.

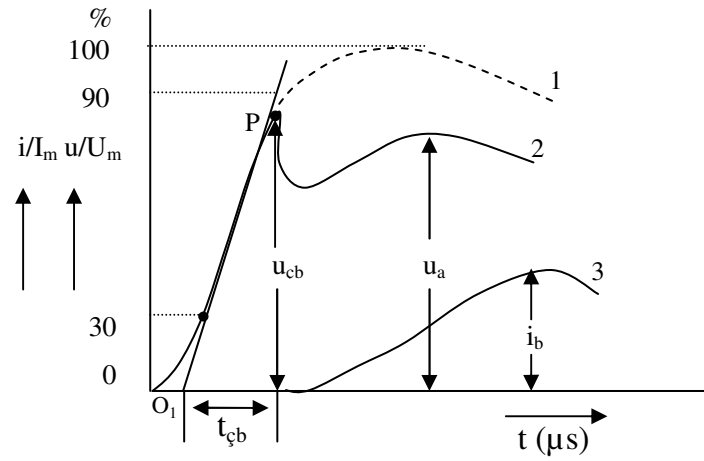
Bu eğrilere göre yıldırım akımları birkaç kA ile 200 kA arasında oldukça geniş sınırlar içinde değişmektedir. En çok meydana gelen yıldırım akımları 10 kA’ın altında olanlardır. 200 kA’dan büyük yıldırım akımlarına nadiren rastlanır. Bu eğriler yardımıyla bir yere düşen yıldırımın kaç kA veya Coulomb olacağını kolayca tespit edilebilir. Örneğin Almanya’da çıkarılan eğriye göre ( Şekil 2.2. 2-3 eğrisi) bir yere düşen yıldırımın 20 kA veya daha büyük olması olasılığı ise %85’dir. Dağlık bölgede düşme olasılığı düzlük bölgelere göre iki kat yüksektir.

## 2.4. Güç Sistemlerinde Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma ve Parafudurlar

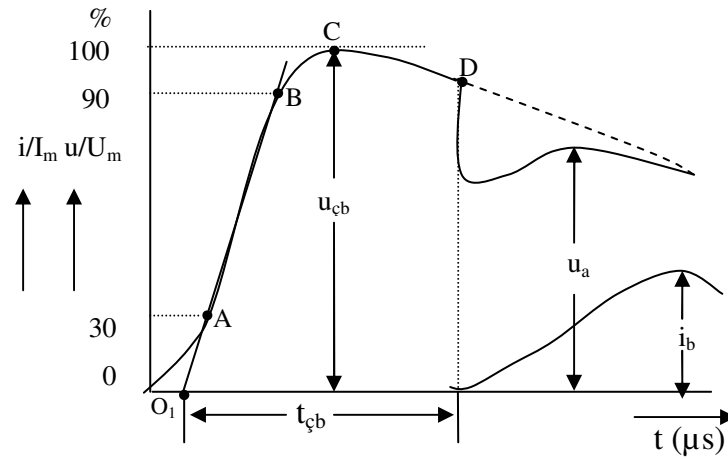
Bir yüksek gerilim tesisini veya bunun bir kısmını müsaade edilmeyen aşırı gerilimlere karşı koruyan aygıtlara “aşırı gerilimlere karşı koruma aygıtları” denir. Bunların başlıcaları değişken dirençli parafudrlar, metal oksit parafudrlar, borulu parafudrlar, koruma elektrotları (ark boynuzları), deşarj tüplü parafudrlar ve kondansatörlerdir [15].

Değişken dirençli parafudurlar, aşırı gerilimleri gerilime bağlı değişken dirençler üzerinden topraklamak suretiyle sınırlarlar. Bunlarda ard akım, değişken dirençler yardımıyla kolayca kesilebilecek bir değere kadar indirilir ve bu dirençlerle seri bağlı elektrotlar yardımıyla kesilir. Genel olarak ard akımı dolayısıyla şebekede fark edilir bir gerilim düşmesi meydana gelmez. Metal oksit parafudurlarda aktif eleman olarak değişken direnç yerine yarı iletken malzeme, çinko oksit bloklar kullanılır. Bunlarda seri eklatör yoktur. Dolayısıyla bunlar değişken dirençli parafudurlara göre daha basit ve güvenli çalışırlar. Borulu parafudurlar, aşırı gerilimleri bir ark üzerinden dirençsiz bir bağlantı yardımıyla topraklamak suretiyle sınırlarlar. Ard akımı, boru içinde meydana gelen basınçlı gaz ile kesilir. Koruma elektrotları ve deşarj tüplü parafudrlar, aşırı gerilimleri bir ark üzerinden ve dirençsiz bir bağlantı ile topraklamak suretiyle sınırlarlar. Fakat bunlarda ard akımın kesilmesi, şebeke şartlarına bağlıdır. Kondansatörler ise kapasite değerine göre, daha çok darbe geriliminin eğiminin veya titreşimlerin frekansını azaltırlar. Aşırı gerilimlere karşı koruma aygıtları ile ilgili önemli büyüklükler şöyle sıralanabilir:

- Çalışmaya başlama, bir parafudurun muhafazası içinde bulunan seri eklatörün hepsinde atlama meydana gelmesi olayıdır.
- Çalışmaya başlama (veya atlama) gerilimi ( $u_{cb}$ ), parafudurun çalışmaya başladığı anda, uçları arasında gerilimin eriştiği en büyük değeridir.
- Çalışmaya başlama (veya atlama oluşum) süresi ( $t_{cb}$ ): Bir darbe geriliminin anma başlangıç noktasından itibaren parafudurun çalışmaya başladığı ana kadar geçen süredir.
- Çalışmaya başlama karakteristiği,  $u_{cb} = f(t_{cb})$ : çalışmaya başlama geriliminin çalışmaya başlama süresine göre değişimini veren eğridir.



Şekil 2.3 Değişken dirençli parafudurların karakteristik büyüklükleri.



Şekil 2.4 Değişken dirençli parafudurların karakteristik büyüklükleri.

Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'de;

- $O_1$  : Anma başlangıç noktası,
- $u_{çb}$  : Çalışmaya başlama gerilimi,
- $u_a$  : Artık gerilim,
- $i_b$  : Darbe boşalma akımı,
- $t_{çb}$  : Çalışmaya başlama süresi,
- $U_m$  : Tam darbe geriliminin tepe değeri,
- 1 : Parafudurun çalışmasından önceki darbe gerilimi,
- 2 : Parafudurdaki darbe gerilimi,
- 3 : Parafudurdan geçen darbe akımıdır.

- %100- darbe çalışmaya başlama gerilimi ( $u_{\text{çb100}}$ ), parafuduru her defasında çalıştıran en küçük 1.2/50'lik darbe geriliminin tepe değeridir.
- Alternatif çalışmaya başlama gerilimi ( $U_{\text{çb}}$ ), parafudurun hat ucu ile toprak ucu arasına sinüzoidal bir alternatif gerilim uygulandığında seri eklatörlerin hepsinde atlama meydana getiren en küçük alternatif gerilimin etkin değeridir.
- Darbe boşalma akımı ( $i_b$ ), bir atlama olayında parafudurdan geçen darbe akımıdır. Bunun değeri tepe değer olarak verilir. Anma-darbe boşalma akımı ( $i_{bN}$ ), 8/20'lik darbe akımı için verilir ve değeri 20, 15, 10, 5, 2.5, 1.5 kA'dır.
- Ard veya izleme akımı ( $I_a$ ), darbe boşalma akımının geçişini izleyen ve şebeke gerilimi altında parafudurdan geçen akımdır. Tepe değer olarak verilir.
- Yüksek darbe akımı ( $i_{yd}$ ), dalga şekli 4/10 olan bir deney akımıdır.
- Uzun (veya dikdörtgen dalga) darbe akımı ( $i_{ud}$ ), en büyük değerine hızla yükselen, bu değerinde bir süre kalan ve sonra tekrar sıfır değerine hızla inen darbe akımıdır. Böyle bir akım tepe değeri, kutbiyeti ve anma süresi ile tanımlanır.
- Artık gerilim ( $u_a$ ), darbe boşalma akımının geçişi sırasında parafudurun hat ucu ile toprak ucu arasında meydana gelen en büyük gerilimdir.
- Anma (veya söndürme) gerilimi ( $U_n$ ), ard akımın kesildiği parafudur uçlarındaki en büyük alternatif gerilimdir. Bu gerilim sürekli olarak parafudura uygulanabilir ve etkin değer olarak verilir. Bir parafudurun iyi çalışması için anma veya söndürme gerilimi, müsaade edilen en büyük işletme gerilimine eşit veya ondan büyük olmalıdır. Söndürme gerilimi parafudurun anma gerilimi olarak kabul edilebilir. Diğer tanıtma büyüklükleri, anma-darbe boşalma akımı, uzun dalga darbe akımı ve kısa devre yüklenme yeteneğidir.
- Sınırlama gerilimi, bir parafudurun uçları arasında oluşan darbe gerilimlerinden en büyüğünün tepe değeridir. Bu değer, darbe geriliminde:
  - i. Cephede çalışmaya başlama geriliminin 1.15 ile bölümü,
  - ii. %100-darbe çalışmaya başlama gerilimi,
 veya anma-darbe boşalma akımında artık gerilim, değerlerinin en büyüğüdür.

Genel olarak aşırı gerilimlere karşı koruma aygıtları aşağıdaki şartları yerine getirmelidir:

1. Çalışmaya başlama gerilimi, mümkün olduğu kadar aşırı gerilimin şekline ve cinsine bağlı olmamalıdır. Yağmur, sis veya kar gibi dış etkilerin etkisi, mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır.

2. Parafudurlar imal edildikleri anma darbe boşalma akımlarının geçmesine müsaade etmeli, fakat bu sırada artık gerilim, müsaade edilen sınırı aşmamalı ve parafudur fazla zorlanmamalıdır.

3. Söndürme gerilimi, dış etkiler altında dahi müsaade edilen en büyük işletme geriliminin altına düşmemelidir. Aksi halde parafudur parçalanabilir ve şebeke arızalanır.

4. Parafudurlar, büyük zaman aralıklarında da, beklemesiz çalışmalıdırlar.

5. Parafudurlar, şebekeyi herhangi bir şekilde etkilememelidirler.

Parafudurlar anma gerilimleri, darbe boşalma akımları, kısa devre yüklenme yetenekleri ve işletme koşullarına göre seçilirler. Bir parafudurun anma gerilimi ile artık gerilimi ve çalışmaya başlama gerilimi arasında belirli bağıntılar vardır [15].

### 3. İLETİM HATLARI VE DİREKLERİN MODELLENMESİ

Bir güç iletim sistemi, kaynaklar, toplu parametrelerle gösterilen yükler ve dağılmış elektriksel parametrelere sahip iletim hatlarının birleşiminden meydana gelir. İletim hattı ise faz iletkenleri, toprak (koruma) iletkeni ve direklerinden oluşur. Çok yüksek frekanslar içeren geçici rejim analizinde, hat uzunluğu dikkate alınarak çok sayıda nominal  $\Pi$  devresinin birleşiminden oluşan eşdeğer  $\Pi$  devresinin ya da hattın dağılmış parametrelili modelinin kullanılması gerekir.

#### 3.1. Hat parametrelerinin Bulunması

Şekil 3.1'de  $Z_{ii}$  ve  $Z_{ik}$  formüllerinde kullanılan değişkenlerin durumunu göstermektedir.

$$Z_{ii} = (R_i + \Delta R_{ii}) + j(2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{2h_i}{GMR_i} + \Delta x_{ii}) \Omega / \text{km} \quad (3.1)$$

$$Z_{ik} = \Delta R_{ik} + j(2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} + \Delta x_{ik}) \Omega / \text{km} \quad (3.2)$$

$R_i$  : i iletkenin direnci ( $\Omega/\text{km}$ )

$h_i$  : i iletkeninin yerden ortalama yüksekliği (metre)

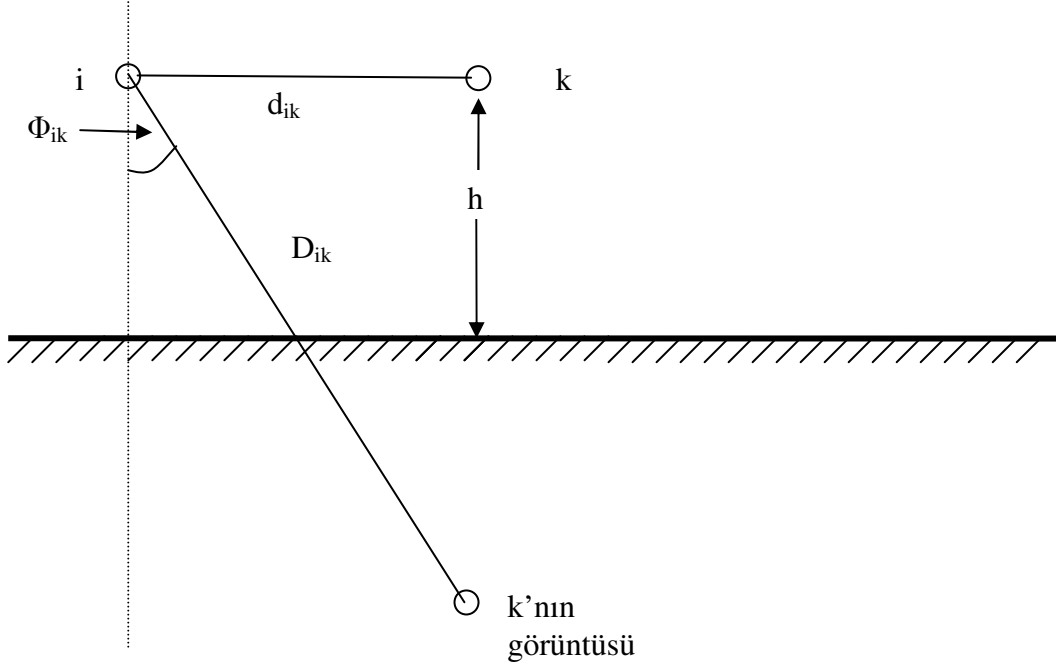
$D_{ik}$  : i. iletken ile k. iletkenin topraktan yansıyan görüntüsü arasındaki mesafe (metre)

$d_{ik}$  : i. ve k. iletkenler arasındaki direk mesafe (metre)

$GMR_i$  : i iletkenin geometrik yarıçapı (metre)

$\omega$  : açısal frekans

$\Delta R, \Delta x$  : Toprakta geri dönme etkileri için Carson düzeltme terimleri



Şekil 3.1. İki iletken modelin karşıdan ve yerden yansıyan görünüşü.

Şönt kapasitans matrisini bulmak için önce Maxwell'in potansiyel katsayılar matrisini bulmalıyız. [C] matrisi potansiyel katsayılar matrisinin tersidir.

$$[C] = [P]^{-1}$$

Potansiyel katsayılar matrisi:

Carson düzeltmeleri ihmal edilmiştir.

$$p_{11} = 18 \cdot 10^6 \ln\left(\frac{2h_1}{GMR_1}\right) \text{ km/F} \quad (3.3)$$

$$p_{22} = 18 \cdot 10^6 \ln\left(\frac{2h_2}{GMR_2}\right) \text{ km/F} \quad (3.4)$$

$$p_{12} = p_{21} = 18 \cdot 10^6 \ln\left(\frac{D_{ik}}{d_{ik}}\right) \text{ km/F} \quad (3.5)$$

$$z_{11} = R_1 + j(2\omega 10^{-4} \ln\left(\frac{2h_1}{GMR_1}\right)) \text{ } \Omega/\text{km} \quad (3.6)$$

$$z_{22} = R_2 + j(2\omega 10^{-4} \ln\left(\frac{2h_2}{GMR_2}\right)) \text{ } \Omega/\text{km} \quad (3.7)$$

$$z_{12} = z_{21} = j(2\omega 10^{-4} \ln\left(\frac{D_{ik}}{d_{ik}}\right)) \text{ } \Omega/\text{km} \quad (3.8)$$

$$[P] = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix}$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix}$$

$$Y = j\omega [P]^{-1}$$

İletim hattında faz iletkenlerinin demet iletken olması halinde eşdeğer yarıçapı  $r_{eşdeğer}$  hesaplamak için aşağıdaki eşitlik kullanılır [39]:

$$r_{eşdeğer} = \sqrt[N]{NrA^{N-1}} \quad (3.9)$$

burada;

- N : Demetteki iletken sayısı,
- r : İletkenlerin yarıçapı,
- A : Demedin yarıçapıdır.

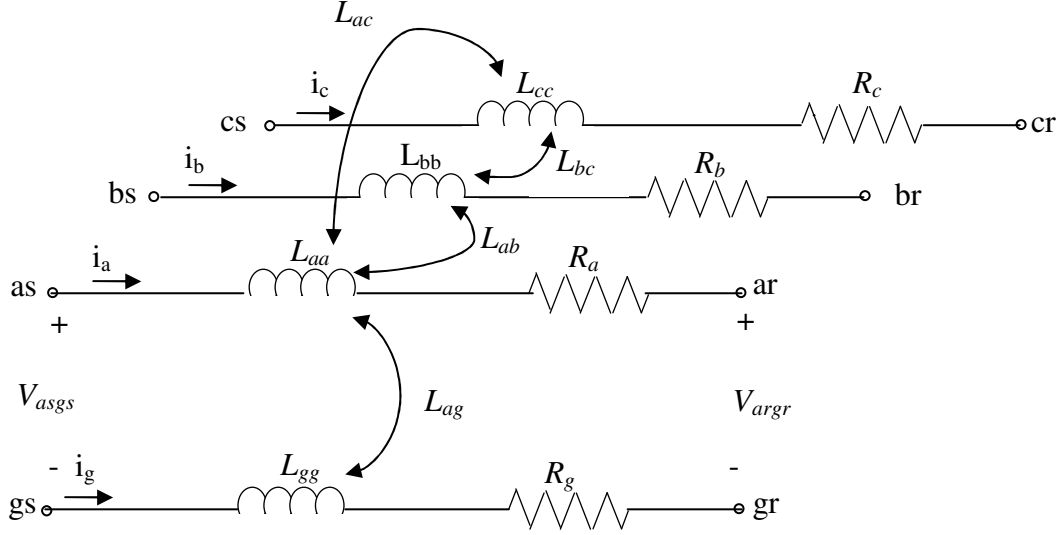
Bu eşdeğer yarıçap değeri Z ve Y matrislerinin elemanlarının hesaplanmasında GMR veya yarıçap yerine yazılarak demet halindeki iletkenlerin parametreleri bulunur.

### 3.2. Üç Fazlı İletim Hatlarının Modeli

Güç sistemlerinde faz iletkenlerinin yanında koruma amaçlı olarak toprak iletkenleri de bulunmaktadır. Korona kayıplarını önlemek için demet halinde iletkenler kullanılır. Doğru bir analiz yapmak için sadece faz iletkenleri değil aynı zamanda toprak iletkeni ile birlikte, iletkenler arasında ortak kuplaj etkisinin de dikkate alınması gerekir. Üç fazlı iletim sistemi için iletim hattının seri empedans ve şönt kapasiteleri hesaplanacaktır.

#### 3.2.1. Üç Fazlı İletim Hattının Seri Empedansı

İletim hattının seri empedans eşdeğeri, toprak iletkeninin direğe bağlı olduğu durumda toprak iletkeni üzerindeki gerilimin sıfır olmasından dolayı azaltılmış boyutta çıkarılmıştır. Şekil 3.2’de üç fazlı iletim sisteminin seri empedans eşdeğeri görülmektedir.



Şekil 3.2 Üç fazlı iletim sisteminin seri empedansı.

Şekil 3.2’de görüldüğü üzere  $V_{asgs}$  gerilimi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$V_{asgs} = i_a R_a + L_{aa} \frac{di_a}{dt} + L_{ab} \frac{di_b}{dt} + L_{ac} \frac{di_c}{dt} + L_{ag} \frac{di_g}{dt} + V_{argr} + V_{grgs} \quad (3.10)$$

Ayrıca toprak üzerindeki gerilim düşümü eşitliği;

$$V_{grgs} = -V_{gsgr} = -i_g R_g - L_{gg} \frac{di_g}{dt} - L_{ag} \frac{di_a}{dt} - L_{bg} \frac{di_b}{dt} - L_{cg} \frac{di_c}{dt} \quad (3.11)$$

şeklindedir ve  $i_g = -(i_a + i_b + i_c)$ ’nin yerine yazılmasıyla

$$V_{grgs} = R_g (i_a + i_b + i_c) + (L_{gg} - L_{ag}) \frac{di_a}{dt} + (L_{gg} - L_{bg}) \frac{di_b}{dt} + (L_{gg} - L_{cg}) \frac{di_c}{dt} \quad (3.12)$$

eşitliği bulunur ve bu gerilim değeri (3.10)’da yerine yazılırsa aşağıdaki denklemdeki matris formu elde edilir:

$$[V_S] - [V_R] = [R][i] + p[L][i] \quad (3.13)$$

burada;

$$p = \frac{d}{dt}$$

$$[V_S] = \begin{bmatrix} V_{asgs} \\ V_{bsgs} \\ V_{csgs} \end{bmatrix}, \quad [V_R] = \begin{bmatrix} V_{argr} \\ V_{brgr} \\ V_{crgr} \end{bmatrix},$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_a + R_g & R_g & R_g \\ R_g & R_b + R_g & R_g \\ R_g & R_g & R_c + R_g \end{bmatrix},$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{aa} + L_{gg} - 2L_{ag} & L_{ab} + L_{gg} - L_{bg} - L_{ag} & L_{ac} + L_{gg} - L_{cg} - L_{ag} \\ L_{ab} + L_{gg} - L_{ag} - L_{bg} & L_{bb} + L_{gg} - 2L_{bg} & L_{bc} + L_{gg} - L_{cg} - L_{bg} \\ L_{ac} + L_{gg} - L_{ag} - L_{cg} & L_{bc} + L_{gg} - L_{bg} - L_{cg} & L_{cc} + L_{gg} - 2L_{cg} \end{bmatrix}$$

dir. Düzgün olarak transpoze edilmiş hat için,  $R_a = R_b = R_c$ ,  $L_{ab} = L_{bc} = L_{ca}$  ve  $L_{ag} = L_{bg} = L_{cg}$  'dir.  $L_s = L_{aa} + L_{gg} - 2L_{ag}$ ,  $L_m = L_{ab} + L_{gg} - 2L_{ag} = L_s - L_{aa} + L_{ab}$ ,  $R_s = R_a + R_g$  ve  $R_m = R_g$  kısaltmalarının kullanılmasıyla yeni direnç ve indüktans matrisleri basit olarak aşağıdaki gibi bulunur;

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & R_m & R_m \\ R_m & R_s & R_m \\ R_m & R_m & R_s \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad [L] = \begin{bmatrix} L_s & L_m & L_m \\ L_m & L_s & L_m \\ L_m & L_m & L_s \end{bmatrix}$$

Tam transpoze edilmiş iletim hattı için frekans domeninde empedans matrisi  $[Z] = [R] + j\omega[L]$  'den aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix}$$

Burada;

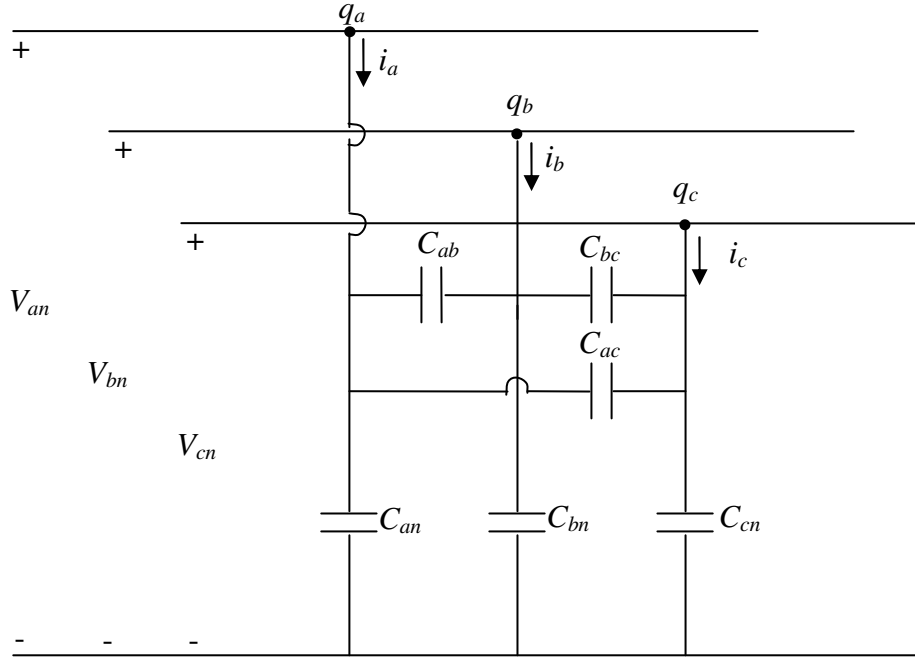
$$Z_s = \frac{Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc}}{3}, \quad (3.14)$$

$$Z_m = \frac{Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{bc}}{3}, \quad (3.15)$$

olarak hesaplanır [17].

### 3.2.2. Üç Fazlı İletim Hattının Şönt Kapasitesi

Üç fazlı iletim hattının şönt kapasiteli eşdeğer modelini çıkarmak için önce fazlar arasındaki ve toprağa bağlanmış varsayılan ortak kapasiteleri göz önüne almak gerekmektedir. Bu durum Şekil 3.3' de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Üç fazlı iletim hattının şönt kapasitesi.

Üç fazlı bir iletim hattı için  $C$  kapasitans matrisini hesaplamak için, öncelikle toprak iletkeninin etkisi atılarak potansiyel sabitleri matrisi elde edilir. Daha sonra bu matrisin tersi alınarak kapasitans matrisi  $[C]$  elde edilir. Potansiyel sabitleri matrisini hesaplamak için gerilimler ve yükler arasında, iletkenlerin geometrik yerleşim planlarına göre,  $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$  gerilimleri yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \begin{bmatrix} \ln \frac{2h_a}{r} & \ln \frac{D_{ab}'}{D_{ab}} & \ln \frac{D_{ac}'}{D_{ac}} \\ \ln \frac{D_{ab}'}{D_{ab}} & \ln \frac{2h_b}{r} & \ln \frac{D_{bc}'}{D_{bc}} \\ \ln \frac{D_{ac}'}{D_{ac}} & \ln \frac{D_{bc}'}{D_{bc}} & \ln \frac{2h_c}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix},$$

potansiyel sabitleri matrisi elde edilir. Burada  $h_a, h_b, h_c$  iletkenlerin yüksekliklerini,  $r$  iletkenin yarıçapını,  $D_{ab}$   $a$  ve  $b$  iletkenleri arasındaki uzaklığı ve  $D_{ab}$ ,  $a$  iletkeni ile  $b$  iletkeninin yeryüzünden ayna gibi yansıyan görüntüsü arasındaki uzaklığı göstermektedir. Potansiyel matrisinin tersi alınırsa;

$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = [P]^{-1} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix},$$

sonuçta aşağıdaki kapasitans matrisi elde edilir;

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{aa} & -C_{ab} & -C_{ac} \\ -C_{ba} & C_{bb} & -C_{bc} \\ -C_{ca} & -C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix},$$

Tam transpoze edilmiş hat için kapasitans matrisi, aşağıdaki gibi indirgenmiş olur;

$$[C] = \begin{bmatrix} C_s & -C_m & -C_m \\ -C_m & C_s & -C_m \\ -C_m & -C_m & C_s \end{bmatrix},$$

burada;

$$C_s = \frac{C_{aa} + C_{bb} + C_{cc}}{3}, \quad (3.16)$$

$$C_m = \frac{C_{ab} + C_{ac} + C_{bc}}{3}, \quad (3.17)$$

olarak hesaplanır [17].

### 3.2.3. $T_e$ ve $T_i$ Dönüşüm Matrisleri

Çok iletkenli hatların modellenmesi prosesi,  $\Delta x$  uzunluğunda farklı hat bölümleri üzerinde gerilim ve akım bilgisinin kısmi diferansiyel eşitlikleri ile başlar. Tek iletken

durumu için  $\Delta x \rightarrow 0$  limit bu hat bölümünü tasvir eden kısmi diferansiyel eşitlikler matris eşitlikleri olmaktadır ve aşağıdaki gibi gösterilmektedir [18];

$$-\frac{\partial e}{\partial x} = [R']i + [L']\frac{\partial i}{\partial t} \quad (3.18)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = [C']\frac{\partial e}{\partial t} \quad (3.19)$$

Üç iletkenli bir hat için;

$$[R'] = \begin{bmatrix} R_{aa}' & R_{ab}' & R_{ac}' \\ R_{ba}' & R_{bb}' & R_{bc}' \\ R_{ca}' & R_{cb}' & R_{cc}' \end{bmatrix}$$

$$[L'] = \begin{bmatrix} L_{aa}' & L_{ab}' & L_{ac}' \\ L_{ba}' & L_{bb}' & L_{bc}' \\ L_{ca}' & L_{cb}' & L_{cc}' \end{bmatrix}$$

$$[C'] = \begin{bmatrix} C_{aa}' & C_{ab}' & C_{ac}' \\ C_{ba}' & C_{bb}' & C_{bc}' \\ C_{ca}' & C_{cb}' & C_{cc}' \end{bmatrix}$$

Bu matrisler simetriktir. Eğer hat transpoze edilmişse, her bir matrisin ana köşegeni üzerindeki elemanlar tümü birbirine eşittir ve hatta her bir matrisin köşegen olmayan terimleri de eşittir. Eğer sistem belirli bir  $\omega$  frekansında işletilirse, eşitlikler şöyle olur;

$$-\frac{\partial E}{\partial x} = [Z']I \quad (3.20)$$

$$-\frac{\partial I}{\partial x} = [Y']E \quad (3.21)$$

burada;  $Z'_{ij} = R'_{ij} + j\omega L'_{ij}$  ve  $Y'_{ij} = j\omega C'_{ij}$ 'dir. Eğer eşitliklere Fourier Dönüşüm uygulanırsa bu sonuç bulunur. (3.20) ve (3.21) eşitlikleri tek faz durumu için aynı tarzda tekrar yazılabilir ve aşağıdaki gibi olur;

$$-\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = [Z'] [Y'] E \quad (3.22)$$

$$-\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = [Y'] [Z'] I \quad (3.23)$$

Bu matris eşitliklerini ayırmak için bir modal dönüşüm kullanılabilir. Bu durumda iki modal matris bulabiliriz;  $T_e$  ve  $T_i$ . Burada  $T_e$ ,  $[Z'] [Y']$  için bir eigen (özdeğer) matristir ve  $T_i$ ,

$[Y'] [Z']$  bir eigen vektör matristir. Bunları hesaplamak için daha etkin bir yol, MATLAB'da EIG fonksiyonu gibi bir öz değer düzeltme kullanmaktır. Bunlar zamana ve pozisyona ( $x$ ) bağlı sabit matrislerdir. Dönüştürülmüş modal domeninde değişkenleri göstermek için  $E_m$  ve  $I_m$  vektörleri tarif edebiliriz:

$$E = T_e E_m \quad (3.24)$$

$$I = T_i I_m \quad (3.25)$$

$E_m$  ve  $I_m$  (3.22) ve (3.23) eşitliklerine aktarılırsa;

$$-[T_e] \frac{\partial^2 E_m}{\partial x^2} = [Z'] [Y'] [T_e] E_m \quad (3.26)$$

$$-[T_i] \frac{\partial^2 I_m}{\partial x^2} = [Y'] [Z'] [T_i] I_m \quad (3.27)$$

yazılabilir. Bunlar tekrar düzenlenirse;

$$-\frac{\partial^2 E_m}{\partial x^2} = [T_e]^{-1} [Z'] [Y'] [T_e] E_m = \Lambda E_m \quad (3.28)$$

$$-\frac{\partial^2 I_m}{\partial x^2} = [T_i]^{-1} [Y'] [Z'] [T_i] I_m = \Lambda I_m \quad (3.29)$$

$[Z'] [Y']$  ve  $[Y'] [Z']$  aynı öz değerlere sahiptir. Önceden söylenen bu sonuç teoremi lineer sistemler konularında bir çok kademeli düzeyde açıklanabilir.  $\Lambda$  matrisi  $m$ 'ye ayrılmış eşitliklerde ortaya çıkan öz değerlerin köşegen matrisidir. Burada  $m$  modların sayısıdır. Hem gerilim hem de akım aynı öz değerlerle açıklanmış olarak yayılımın aynı modlarına sahip olacaktır. Dönüşüm matrisi  $T_e$  eşsiz değildir.  $[D] [T_e]$  formunun herhangi bir matrisi bir modal matristir. Burada;  $[D] = d[I]$ ,  $I$  birim matristir. Bunlar aynı eigen değerlere rehberlik ettiği için, beklenildiği gibi  $T_e$  ve  $T_i$  birbirine bağlıdır.

$$\Lambda = [T_e]^{-1} [Z'] [Y'] [T_e] \quad (3.30)$$

$\Lambda$  transpoze edilirse;

$$\Lambda^t = [[T_e]^{-1} [Z'] [Y'] [T_e]]^t \quad (3.31)$$

olur.  $\Lambda$  köşegen ise  $\Lambda = \Lambda^t$ 'dir. Bu ifadeleri şöyle basitleştirebiliriz:

( $[Y']$  ve  $[Z']$  simetriktir.)

$$\Lambda = [T_e^t] [Y'] [Z'] [T_e^t]^{-1} \quad (3.32)$$

$[T_e^{-1}]^{-1}$ ,  $[Y'] [Z']$  için bir modal matristir ve hatta aşağıda ifade edilen bir  $T_i$  modal matrisine sahiptir.

$$\Lambda = [T_i]^{-1} [Y'] [Z'] [T_i] \quad (3.33)$$

buradan şu sonuç çıkartılabilir:

$$[T_e] [T_i] = [D] \quad (3.34)$$

burada;  $[D] = d[I]$  ve  $d$  belki bir eşitlik olabilir. Şimdi (3.20) ve (3.21) eşitlikleri şöyle köşegenleştirilebilir;

$$-\frac{\partial E_m}{\partial x} = [T_e]^{-1} [Z'] [T_i] I_m = [Z_m'] I_m \quad (3.35)$$

$$-\frac{\partial I_m}{\partial x} = [T_i]^{-1} [Y'] [T_e] E_m = [Y_m'] E_m \quad (3.36)$$

Hem  $[Z_m']$  hem de  $[Y_m']$ 'nün köşegen olduğunu şöyle gösterebiliriz:

$$\Lambda = [T_e]^{-1} [Z'] [Y'] [T_e] = ([T_e]^{-1} [Z'] [T_i]) (T_i^{-1} [Y'] [T_e]) = [Z_m'] [Y_m'] \quad (3.37)$$

Hatta şunu görebiliriz ki;

$$\Lambda = [T_i]^{-1} [Y'] [Z'] [T_i] = ([T_i]^{-1} [Y'] [T_e]) (T_e^{-1} [Z'] [T_i]) = [Y_m'] [Z_m'] \quad (3.38)$$

$\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m) = [Z_m'] [Y_m'] = [Y_m'] [Z_m']$ ,  $[Y_m']$  ve  $[Z_m']$ 'nin köşegen olduğunu ifade etmektedir. Bu hem transpoze edilmiş hem de transpoze edilmemiş durumlar için kullanılabilir. (3.37) ve (3.38)'de matris diferansiyel eşitliklerin köşegenleştirilmiş formları ile ayrılmış olan eşitlikler, tek faz hatlar için kullanılan metotlardaki skaler eşitlikler gibi çözümlenebilir. Eğer rezistans terimleri hat uçlarında toplu parametrelili ve hatlar kayıpsız olarak işlenirse ortaya çıkan eşitlikler daha kolay çözümlenebilir.  $E_m = [E_1, E_2, E_3, \dots, E_n]^t$  ve  $I_m = [I_1, I_2, I_3, \dots, I_n]^t$  olmak üzere hatlarda dalgaların benzetimi için modal yayılım hızları ve karakteristik empedansları aşağıda gösterildiği gibi bulabiliriz;

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0' C_0'}} \quad \text{ve} \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L_0'}{C_0'}} \quad (3.39)$$

$$v_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1' C_1'}} \quad \text{ve} \quad Z_1 = \sqrt{\frac{L_1'}{C_1'}} \quad (3.40)$$

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2' C_2'}} \quad \text{ve} \quad Z_2 = \sqrt{\frac{L_2'}{C_2'}} \quad (3.41)$$

$$v_n = \frac{1}{\sqrt{L_n' C_n'}} \quad \text{ve} \quad Z_n = \sqrt{\frac{L_n'}{C_n'}} \quad (3.42)$$

Görüldüğü gibi çözümlenmiş gerilim eşitliğinde kullanılan  $T_e$  modal dönüşüm matrisi ve akım eşitliğinde kullanılan  $T_i$  matrisi karakteristik empedanslar için farklı değerlerde sonuç çıkartacaktır. Yayılım hızları ise eşitlikler takımı için eigen değerlerden geldiklerinden dolayı herhangi bir durumda aynı olacaktır [18].

### 3.2 Direklerin Modellenmesi

Bir elektrik direği, iletim hattına benzetilerek dalga yayılımından söz edilirse, bu direğin temel parametreleri, karakteristik empedansı ve yürüyen dalganın yayılım hızı (yürüyen dalganın zayıflama ve deformasyon karakteristikleri) olur. Elektrik direklerinin zayıflama ve deformasyon karakteristikleri, direğin temelinden yansıyıp gelen dalganın en yüksek değerinden sonra dalganın kuyruğuna kadar olan kısmıyla belirlenir [19]. Geleneksel model olarak konik ve silindirik direk modelleri için, yıldırım yolunun dikey ve yatay olması durumundaki ortalama karakteristik empedans ifadeleri aşağıda verilmiştir. Bu ifadelere göre, ölçme altındaki konik bir direk için karakteristik empedans 170  $\Omega$ 'dur ve bu dalga yayılım hızı ışık hızına eşittir. Diğer taraftan Kawai, Japonya'da tasarlanan gerçek direkler üzerinde yaptığı deneylerinde karakteristik empedansın 100-115  $\Omega$  aralığında, dalga yayılım hızının 210-240 m/ $\mu$ s aralığında (%70-80 ışık hızında) ve zayıflama sabitini ise 0.8-0.9 aralığında olduğunu ölçmüştür [20]. Chisholm ve diğ. de dalga yayılım hızının azaldığını ölçmelerinde belirlemiştir [21, 22]. Ishii ve diğ. tarafından yapılan deneysel çalışma sonucunda, Şekil 4.3'te görülen çok katlı direk modelinin karakteristik empedansları  $Z_{T1} = Z_{T2} = Z_{T3} = 220 \Omega$  ve  $Z_{T4} = 150 \Omega$  olarak belirlenmiştir [23]. Şekil 3.4'te direğin her bir bölmesinde dirence paralel bağlanan endüktanslar zayıflama sabitini daha doğru olarak hesaplamak için bağlanmıştır ve bu sabit 0.8 olarak belirlenmiştir.

Almeida ve Correia de Barros direği sonlu farklı kayıpsız iletim hattı modeli kullanarak simülasyon yapmışlardır [24]. Burada direğin karakteristik empedansı Ishii'nin deneyinden elde edilen direğin tepe noktasında 220  $\Omega$  ve temelinde 150  $\Omega$  alınarak ayırık adımlarla değişmektedir ve direk 314 parçalı hat olarak düşünülmüştür. Direkteki dalga yayılımı ışık hızına eşit olarak alınmıştır.

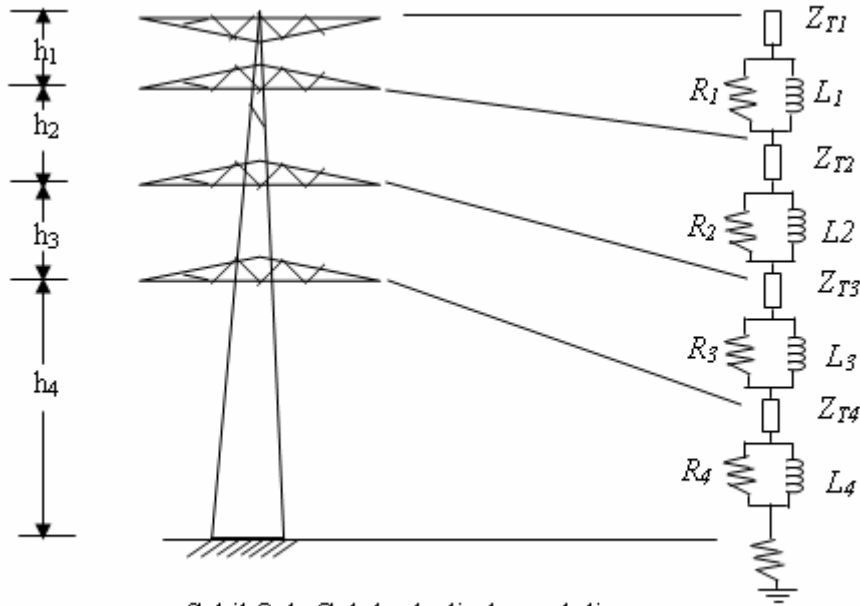
Menemenlis ve Chun yüksek gerilim elektrik direğini uniform olmayan iletim hattına benzeterek modellemiştirler [25]. Çalışmalarında direğin karakteristik empedansı,

$Z_c = 50 + 35\sqrt{x}$ , şeklinde ifade etmiştir. Burada  $x$  yer seviyesinden ölçülen yüksekliktir. Direkteki dalga yayılım hızı ışık hızı olarak alınmıştır. Direk modeline kayıpları da dahil etmek için Mamiş ve Köksal [26] tarafından kayıplı empedans ifadesi,

$$Z_c = (50 + 35\sqrt{x})\sqrt{1 + \frac{\alpha}{s}}, \quad (3.43)$$

olarak verilmiştir. Burada  $\alpha$  direğin omik kayıplarını gösteren sabittir.

Qufi ve diğ. tarafından önerilen [27] uniform olmayan iletim hattı tipindeki direk modelinin karakteristik empedansının  $Z_c(x) = Z_0 e^{qx}$  şeklinde değiştiği varsayılmıştır. Burada  $x$  yer seviyesinden ölçülen yükseklik,  $l$  direğin yüksekliği olmak üzere  $q = (1/l)\ln(Z_{üst}/Z_{alt})$  şeklindedir.  $Z_{üst}$  ve  $Z_{alt}$  Ishii'nin deneyinde elde ettiği direğin tepesindeki karakteristik empedans  $220 \Omega$  ve temelindeki karakteristik empedans ise  $150 \Omega$ 'dur. Burada dalga yayılım hızı ışık hızı olarak alınmıştır.



Şekil 3.4. Çok katlı direk modeli.

## 4. YILDIRIM DÜŞMESİYLE MEYDANA GELEN AŞIRI GERİLİMLER

### 4.1. Yıldırımın Faz Hattına Düşmesi Hali

Yıldırımın bir faz hattına düşmesi halinde, düşme noktasından itibaren her iki yönde ilerleyen birer yürüyen dalga meydana gelir. Dalgaların şekli yıldırım boşalmasındaki akım şekline benzer, yani yıldırım akımı

$$i(t) = I_0( e^{\alpha t} - e^{\beta t} ) \quad (4.1)$$

şeklinde olduğuna göre yürüyen gerilim dalgaları da;

$$u(t) = \frac{1}{2} Z i(t) = \frac{1}{2} Z I_0( e^{\alpha t} - e^{\beta t} ) = U_0( e^{\alpha t} - e^{\beta t} ) \quad (4.2)$$

şeklinde olurlar. Burada  $Z$  faz hattının karakteristik empedansını,  $U_0$  da  $Z I_0/2$  değerini gösterirler. Örneğin karakteristik empedansı  $Z = 300$  ohm olan bir faz hattına düşen yıldırımın tepe değeri 20 kA ise, faz hattında meydana gelen aşırı gerilimin tepe değeri;

$$U_m = \frac{1}{2} Z I_m \quad (4.3)$$

$$U_m = 300 \times \frac{20}{2} = 3000 \text{ kV olur.}$$

3000 kV gibi büyük bir tepe değeri olan yürüyen gerilim dalgası, ilk direktte izolatör zinciri üzerinde bir atlama meydana getirir. Direğin karakteristik empedansı  $Z_d$  ile gösterilirse, direktte meydana gelen gerilim ( Şekil 4.1.) yaklaşık olarak;

$$U_d \approx Z_d I_d = Z I_L \quad (4.4)$$

$$\frac{1}{2} i = i_d + i_L \quad (4.5)$$

denklemleri yardımıyla hesaplanabilir ve

$$U_d \approx \frac{1}{2} i \frac{Z_d Z}{Z_d + Z} \quad (4.6)$$

bulunur. Topraklama direnci  $R_d$ 'nin etkisi ancak  $2\tau_t$  zaman sonra görülebilir; burada  $\tau_t$  direğin dalga yayılma zamanı olup,  $d$  uzunluğunda bir direk için  $\tau_t \approx d/c$ ' dir. Direk toplu parametrelerle ifade edildiğinde ise direkte meydana gelen gerilim için;

$$U_d = R_d i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - u_k - M \frac{di_L}{dt} + u_\varnothing \quad (4.7)$$

denklemini yazılabilir [14]. Burada;

$R_d i_d$  : Direğin darbe topraklama direncindeki gerilim düşümünü,

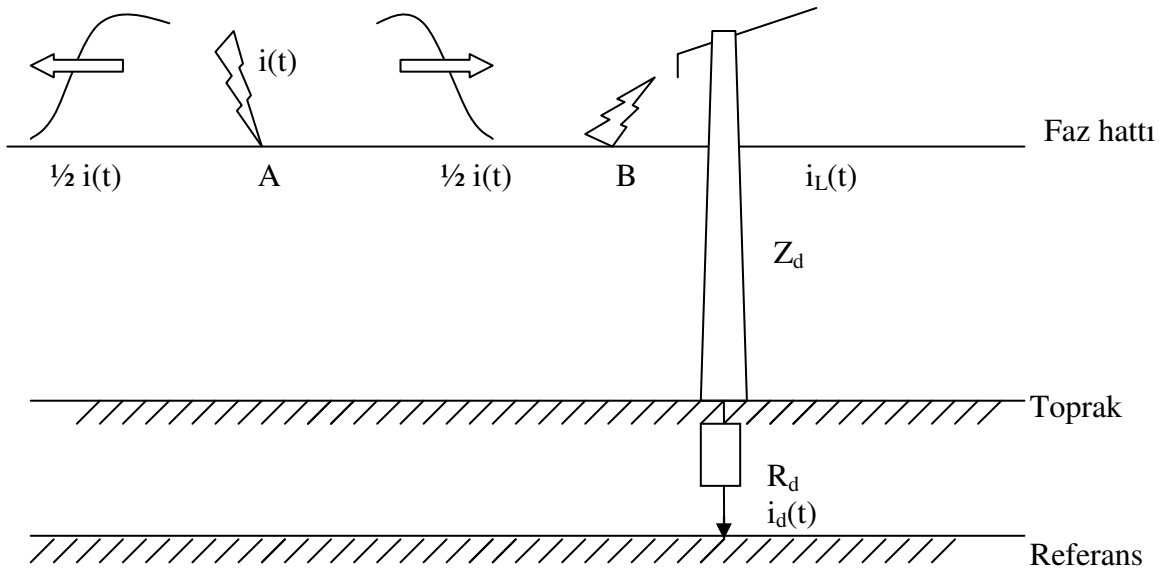
$L_d \frac{di_d}{dt}$  : Direğin endüktansında meydana gelen endüktif gerilim düşümünü,

$u_k$  : Koruma hattı ile faz hattı arasındaki kapasitif kuplajdan dolayı, koruma hattının faz hattında meydana getirdiği gerilimi,

$M \frac{di_L}{dt}$  : Faz hattında yürüyen yıldırım akımı tarafından direkte endüklenen gerilimi,

$u_\varnothing$  : Şebeke geriliminin anlık değerini göstermektedir.

Genel olarak  $R_d i_d$  yanında diğer terimler ihmal edilebilir.



Şekil 4.1. Yıldırımın faz hattına düşmesi hali.

## 4.2. Yıldırımın Direğe Düşmesi Hali

Yıldırımın direğe düşmesi halinde de aşırı gerilimler meydana gelir. Ancak bunların etkisi yıldırımın faz hattına düşmesi kadar tehlikeli değildir. Direkler iyi topraklanmışsa etkileri giderilebilir.

Şekil 4.2.'den;

$$i = i_d + 2i_L \quad (4.8)$$

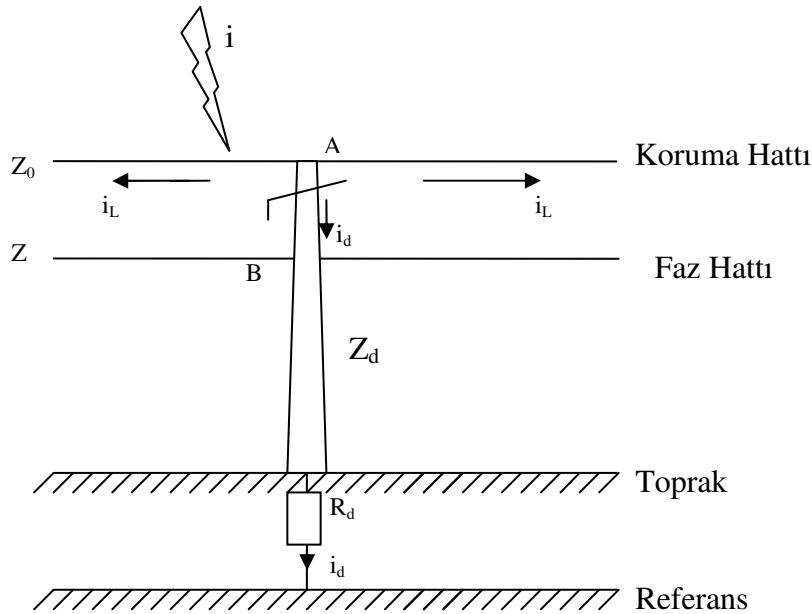
$$U_d = Z_d i_d + \frac{Z_0}{2} i_L \quad (4.9)$$

denklemleri yazılabilir. Dolayısıyla direkte meydana gelen gerilim yükselmesi;

$$U_d = \frac{Z_d Z_0}{2Z_d + Z_0} i \text{ olur.} \quad (4.10)$$

Burada  $R_d$  direğin topraklama direncini,  $Z_0$  da koruma hattının karakteristik empedansını gösterir. Eğer  $Z_0 = 400$  ohm,  $I_m = 20$  kA ve  $Z_d = 220$  ohm [36] ise, direkte meydana gelen gerilim;

$$U_d = \frac{220 \times 400}{440 + 400} \times 20 = 2095 \text{ kV olur.}$$



Şekil 4.2. Yıldırımın direğe düşmesi hali.

Bu gerilim direktten faz hattına doğru izolatör üzerinden bir "geri atlama" meydana getirerek yüksek gerilim şebekesinin arızalanmasına neden olabilir.

### 4.3. Yıldırımın Koruma Hattına Düşmesi Hali

Yıldırımın koruma hattına düşmesi halinde de aşırı gerilimler meydana gelebilir. Eğer direkler iyi topraklanmamışsa, yıldırımın direğe düşmesinde olduğu gibi burada da geri atlama söz konusu olur.

Şekil 4.3. 'den;

$$\frac{1}{2}i = i_d + i_L \quad (4.11)$$

$$u_d = Z_d i_d = Z_0 i_L \quad (4.12)$$

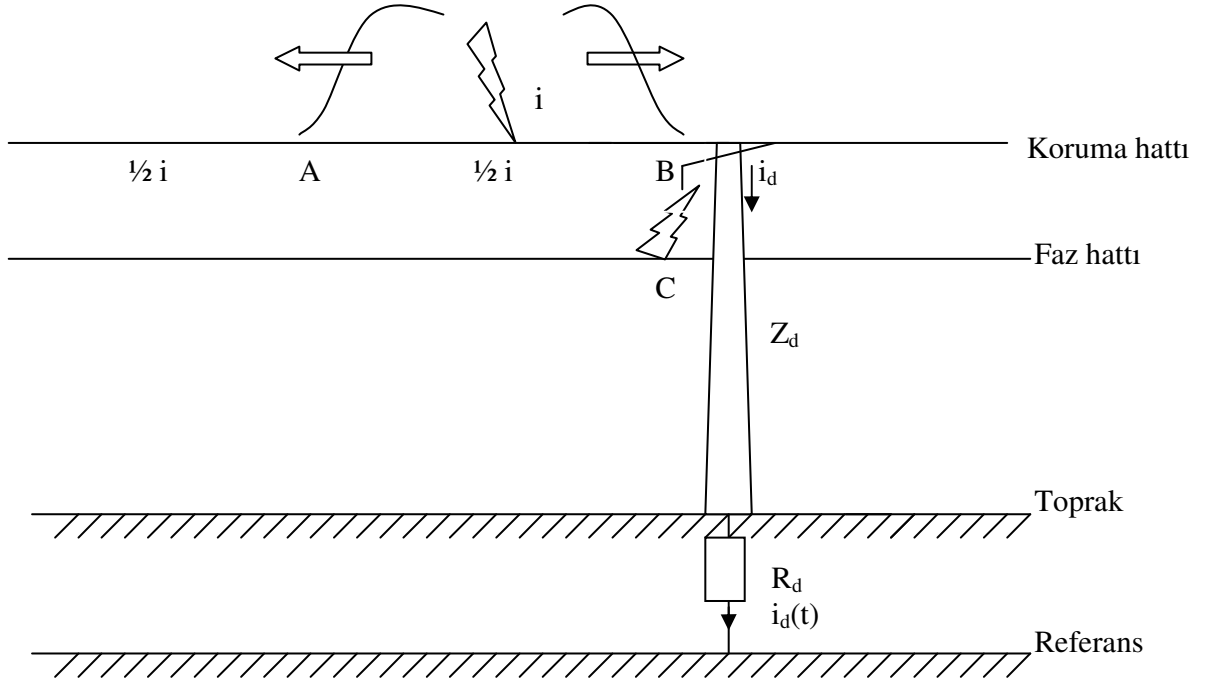
denklemleri yazılabilir. Dolayısıyla direkte meydana gelen aşırı gerilimin ani ve tepe değerleri;

$$u_d = \frac{Z_d Z_0}{2(Z_d + Z_0)} i \quad \text{ve} \quad u_d = \frac{Z_d Z_0}{2(Z_d + Z_0)} I_m \quad (4.13)$$

olurlar. Yine yukarıdaki sayısal değerler için  $Z_0 = 400$  ohm,  $I_m = 20$  kA ve  $Z_d = 220$  ohm için  $u_d$  gerilimi;

$$u_d = \frac{220 \times 400}{2(220 + 400)} \times 20 = 1420 \text{ kV}$$

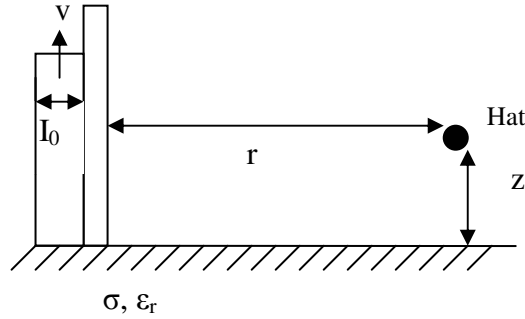
değerini alır. Bu gerilim izolatörün darbe atlama geriliminden yüksek olduğu takdirde izolatörde bir geri atlama olur ki, bu da yüksek gerilim şebekesinin arızalanmasına yol açar.



Şekil 4.3. Yıldırımın koruma hattına düşmesi hali.

#### 4.4. Yıldırımın Hattın Yanına Düşmesi Hali

Yıldırımın hattın yanına düşmesi durumu Şekil 4.4'de basit olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Hat yakınına yıldırım düşmesi.

$I_0$  yıldırım başlangıç boşalma akımını ve  $v$  yıldırım düştükten sonra geri dönen dalganın hızını,  $r$  güç noktası ile hat arasındaki mesafeyi,  $z$  hattın yerden yüksekliğini göstermektedir.

##### 4.4.1. Elektrik Alanları

Eğer  $I_0$  akımı sabit kabul edilirse, kayıpsız toprak üzerinde elektromanyetik alanlar analitik olarak hesaplanabilir. Rusck modeli yaklaşımı şöyledir [2]:

$$E_{x0}(x,y,z,t) \approx \frac{\mu_0 c I_0}{2\pi\beta} xz \left[ -\frac{1-\beta^2}{\xi^3} + \frac{1}{r^3} \right] \quad (4.14)$$

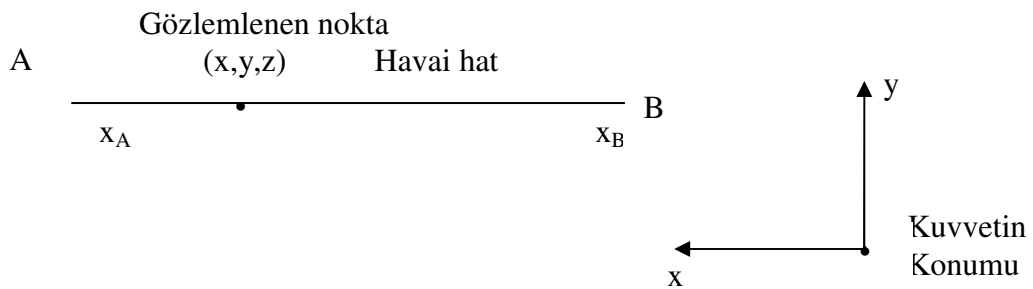
$$E_{z0}(x,y,z=0,t) = \frac{\mu_0 c I_0}{2\pi\beta} \left[ \frac{1-\beta^2}{\xi} + \frac{1}{r} \right] \quad (4.15)$$

$$B_{y0}(x,y,z=0,t) = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi r^2} \frac{vtx}{\xi} \quad (4.16)$$

$$\xi = \sqrt{(vt)^2 + (1-\beta^2)r^2} \quad \text{ve} \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4.17)$$

Modellemede şu temel kabuller yapılmaktadır;

- Yıldırım kanalı doğru ve dikey
- Geri dönme kuvveti akımı v sabit hızı ile yukarı doğru zayıflamadan yayılıyor.
- Yıldırım akımının biçimi zamanda lineerdir.
- Toprak sabit iletkenlik ve dielektrik ile homojendir.
- Havai hat kayıpsız olarak göz önüne alınıyor. Kayıplı toprağın sadece yatay elektrik alanı etkilediği farz ediliyor.



$E_{x0}$  havai hat boyunca B terminalinden A terminaline doğrudur.

$E_{z0}$  topraktan yukarı doğrudur.

$B_{y0}$  havai hata dikey yöndedir.

Pozitif yıldırım akımının yönü yukarı doğrudur.

Cooray-Rubinstein'e göre kayıplı toprak üzerinde yatay elektrik alanı yaklaşımı, kayıpsız elektrik alan ve yatay manyetik alana bağlı yüzey empedansın toplamıdır.

$$E_x^\sigma(x, y, z, t) = E_{x0}(x, y, z, t) - g_0(t) * B_{y0}(x, y, 0, t) \quad (4.18)$$

Burada \* konvolüsyon ve  $g_0(t)$  zaman domeninde yüzey fonksiyonudur. Yüzey fonksiyonu frekans domeninde;

$$g_0(\omega) = c \sqrt{\frac{\epsilon_0 j \omega}{\sigma + \epsilon_r \epsilon_0 j \omega}} \quad (4.19)$$

$I_0$ : Başlangıç boşalma akımı

$c$ : ışık hızı

$\sigma$ : toprağın iletkenliği,

$\epsilon_0$ : boşluğun elektrik geçirgenliği ( $8.854 \times 10^{-12}$ ),  $Fm^{-1}$

$\epsilon_r$ : toprağın bağlı dielektriği

$\mu_0$ : Boşluğun manyetik geçirgenliği ( $4\pi \times 10^{-7}$ ),  $Hm^{-1}$

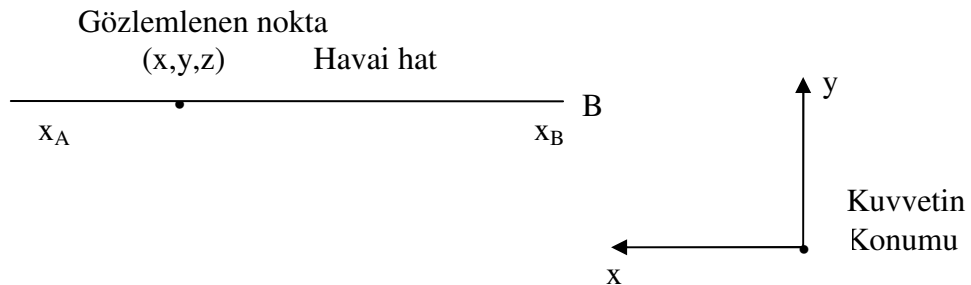
$v$ : Geri dönen dalganın hızı

$\beta$ : Geri dönen dalganın hızı ile ışık hızı arasındaki orandır.

Dikey elektrik alan ve manyetik alan üzerinde kayıplı toprağın etkisi ihmal edilir. Bu 10 km mesafe için iyi bir yaklaşımdır.

#### 4.4.2. Hatlar Arası Kuplaj

$x_A > x_B$  olmak üzere



hattın uzunluğu  $l$ , topraktan yüksekliği  $z = h$

Agrawal bileşim modeli [28] bir havai hatta LIV ( yıldırımdan indüklenen gerilim )' i hesaplamak için kullanılır. Toplam hat voltajı, yayılan voltaj  $U^s$  ve gelen voltaj  $U^i$ 'nin toplamıdır.

$$U(x,t) = U^s(x,t) + U^i(x,t) \quad (4.20)$$

$$U^i(x,t) = - \int_0^h E_z(x,y,z,t) dz \approx -hE_z(x,y,0,t)$$

$$\frac{\partial U^s(x,t)}{\partial x} + (R' + L' \frac{\partial}{\partial t}) . i(x,t) = E_x^\sigma(x,y,h,t) \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + c' \frac{\partial}{\partial t} U^s(x,t) = 0$$

Bu eşitlikler için frekans domeninde genel çözüm şudur:

$$\begin{aligned} U(x, \omega) &= -hE_{z0}(x,y,0, \omega) + K_1 e^{\gamma x} + K_2 e^{-\gamma x} \\ &+ \frac{1}{2} \int_{-\infty}^x E_x^\sigma(\lambda, y, h, \omega) e^{-(x-\lambda)\gamma} d\lambda \\ &- \frac{1}{2} \int_x^\infty E_x^\sigma(\lambda, y, h, \omega) e^{(x-\lambda)\gamma} d\lambda \end{aligned} \quad (4.22)$$

Burada;

$$\gamma = \sqrt{j\omega c'(R' + j\omega L')} \text{ dir.}$$

$K_1$  ve  $K_2$  sınır koşullarından bulunan sabitlerdir.

A terminalinde 4.22'deki formülde en son integral sönüyor. İndüklenen gerilim olarak adlandırılan  $U_{ind0}^\sigma(x_A, \omega)$ , her iki terminalde yatay ve dikey alanların her iki integralinin birleştirilmesi olarak tarif edilir. Artık integral 4.22'deki iki terimde ayrılır.

$$U_{ind0}^\sigma(x_A, \omega) = \int_{x_B}^{x_A} E_x^\sigma(\lambda, y, h, \omega) e^{-(x-\lambda)\gamma} d\lambda - hE_{z0}(x_A, y, 0, \omega) + hE_{z0}(x_B, y, 0, \omega) e^{-\gamma L} \quad (4.23)$$

$$= U_0(x_A, \omega) - g_0(j\omega)U_\Delta(x_A, \omega)$$

burada;

$$U_0(x_A, \omega) = \int_{x_B}^{x_A} E_{x_0}(\lambda, y, h, \omega) e^{-(x-\lambda)\gamma} d\lambda - hE_{z_0}(x_A, y, 0, \omega) + hE_{z_0}(x_B, y, 0, \omega) e^{-\gamma L} \quad (4.24a)$$

kayıpsız parçadır ve

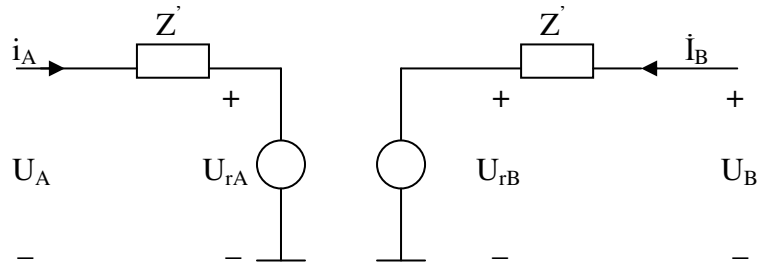
$$U_\Delta(x_A, \omega) = \int_{x_B}^{x_A} B_{y_0}(\lambda, y, 0, \omega) e^{-(x-\lambda)\gamma} d\lambda \quad (4.24b)$$

kayıplı toprak ifadesidir [28].

#### 4.4.3. Tesis

İndüklenen gerilimin modellerde hesabını tesis edebilmek için temel kabul havai hattın kayıpsız olmasıdır. Bu kabul kısa hatlar (< 2 km ) için uygundur [29]. Bu kayıpsız hat kabulü ile 4.24'deki integraller tam olarak zaman domeninde analitik olarak çözülebilir [30].

Havai hat Şekil 4.5'de gösterildiği gibi klasik Bergeron modeli ile modellenebilir.



Şekil 4.5. Havai hattın elektriksel modeli.

Burada voltaj kaynakları şöyle formüle edilir[31] ;

$$U_{rA}(t) = U_{ind0}^\sigma(x_A, t) + U_B(t - \tau) + Z' i_B(t - \tau) \quad (4.25)$$

$$U_{rB}(t) = U_{ind0}^\sigma(-x_B, t) + U_A(t - \tau) + Z' i_A(t - \tau)$$

$\tau$  : Dalganın seyahat süresi ( $\tau = L/c$ ), burada L hat uzunluğu ve c ışık hızıdır.

A terminalindeki  $U_{rA}$  kaynağı,  $U_{ind0}^\sigma(x_A, t)$  olarak adlandırılan indüklenen gerilim terimi bileşkesini ihtiva eder ve B terminalinden yansıma hareket süresi  $\tau$  kadar gecikir.

Şimdiye kadar adım akımı farz edilmekteydi. İstenen bir akım şekli son konvolüsyon integrali ile hesaba katılabilir.

$$U_{ind}^{\sigma}(x,t) = g_1(t) * U_{ind}^{\sigma}(x,t) \quad (4.26)$$

$$g_1(t) = \frac{1}{I_0} \frac{\partial i(t)}{\partial t} = \frac{I_m}{I_0 t_c} (1 - H(t - t_c) b) \quad (4.27)$$

4.27'ün en son parçası lineer yükselen bir yıldırım akımı için uygulanır.  $t_c$ ,  $b$  akım kuyruğu faktörü iken sönme zamanıdır.

$b = (t_h - t_c / 2) / (t_h - t_c)$  'dir.  $H$  birim adım fonksiyonudur. Temel olarak toplam indüklenen gerilim;

$$U_{ind}(x,t) = U_{ind}^0(x,t) + U_{ind}^{\Delta}(x,t) \quad (4.28a)$$

$$U_{ind}^0(x,t) = g_1(t) * U_0(x,t) \quad (4.28b)$$

$$U_{ind}^{\Delta}(x,t) = -g_1(t) * g_0(t) * U_{\Delta}(x,t) \quad (4.28c)$$

Lineer yıldırım akımı kabul edilmesi sayesinde  $g_1(t) * g_0(t)$  analitik olarak çözümlenebilir. Bessel fonksiyonundaki bu sonuçlar [30]'da gösterildiği gibi onun büyük argüment yaklaşımı ile daha basite indirgenebilir.

4.25 eşitliği şimdi etkili bir şekilde havai hat akımı ve karakteristik empedans matrisi olmadan tekrar yeni bir ifade içerisinde formüle edilir [30]. Kayıpsız yardım  $U_{ind}^0(x,t)$  iletken  $j$ 'nin  $h_j$  yüksekliği ile derecelenir ( Kayıplı toprak yardımı ifadesi  $U_{ind}^0(x_A,t)$  yükseklikten bağımsızdır). Tüm iletkenlerin yıldırım kuvvetine aynı mesafede olduğu kabul edilir. Böylece

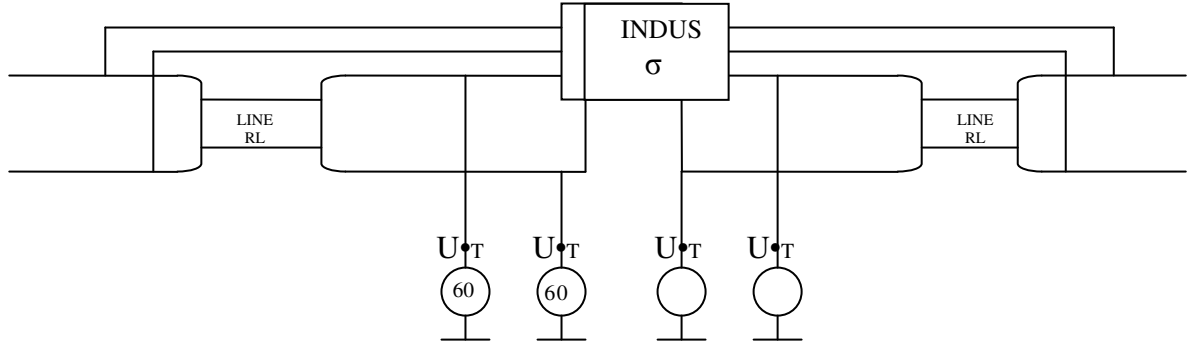
$$U_{rA}^j(t) = \left[ \frac{h_j}{h} U_{ind}^0(x_A,t) + U_{ind}^{\Delta}(x_A,t) \right] + 2U_B^j(t - \tau) - U_{rB}^j(t - \tau) \quad (4.29a)$$

$$U_{rB}^j(t) = \left[ \frac{h_j}{h} U_{ind}^0(x_B,t) + U_{ind}^{\Delta}(-x_B,t) \right] + 2U_A^j(t - \tau) - U_{rA}^j(t - \tau) \quad (4.29b)$$

yazılabilir, burada  $j$  faz sayısıdır.

#### 4.4.4. Tasarım

$U_{rA}$  ve  $U_{rB}$  gerilim kaynaklarının hesabı MODELS dilinde tesis edilir. ATPDraw'da bu sonuçlar Şekil 4.6'de gösterildiği gibi devre olur, burada iki faz desteklenmektedir [30].



Şekil 4.6 ATPDraw'da Tesis.

Tip 60 kaynaklar  $U_{rA}$  ve  $U_{rB}$  voltajlarını temsilen kullanılmaktadır [30]. Sadece terminal gerilimleri hesaplanabilir ve hat boyunca gerilimleri bulmak için hat bölümlenmek zorundadır.

Eğer havai hat terminalleri A, B'nin pozisyonu  $(x'_A, y'_A)$  ve  $(x'_B, y'_B)$  ile ve yıldırım pozisyonu  $(x'_0, y'_0)$  ile verilirse İndüklenen gerilimin belirli koordinat sistemindeki koordinatlar şöyle olacaktır:

$$\begin{aligned} x_A &= (x'_A - x'_0) \cos(\alpha) + (y'_A - y'_0) \sin(\alpha) \\ x_B &= (x'_B - x'_0) \cos(\alpha) + (y'_B - y'_0) \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (4.30)$$

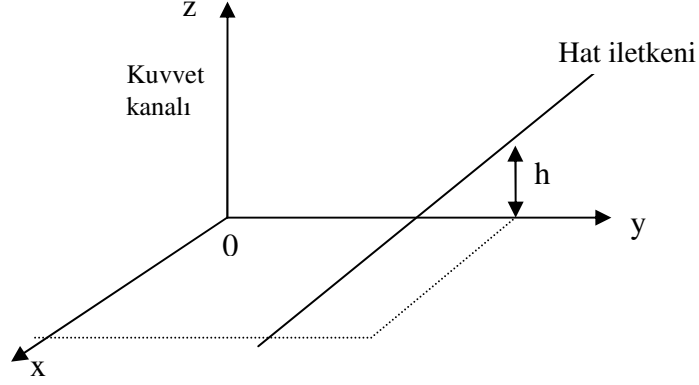
$$y = \left| (y'_A - y'_0) \cos(\alpha) - (x'_A - x'_0) \sin(\alpha) \right|$$

$$\tan(\alpha) = \frac{y'_A - y'_B}{x'_A - x'_B}$$

$x'_A \setminus x'_B$  ve hat uzunluğu  $L = x'_A - x'_B$  'dir.

#### 4.4.5. Rusck Modeli

Bu bölümde Hans Kr. Høidalen'nun [36]'dan alınan Rusck Modeli uygulaması verilmiştir. Kayıpsız bir durumda hattın orta noktasında indüklenen gerilimin maksimum değerinin Rusck tarafından bulunan ifadesi aşağıda verilmiştir [36].



$$\text{Maksimum Voltaj: } U_{\max} = \frac{Z_0 I_0 h}{y} \left[ 1 + \frac{\beta}{\sqrt{2 - \beta^2}} \right] \quad (4.31)$$

İletkenden bir adım uzakta ve yerden bir adım yukarda olan 1 kA kuvvet için voltaj:

$$V_{\text{base}} = Z_0 \left[ 1 + \frac{\beta}{\sqrt{2 - \beta^2}} \right] \quad (4.32)$$

$$\beta = \frac{v}{c}$$

$$\text{Yakın bir kuvvet için kritik mesafe: } y = \frac{V_{\text{base}}}{CFO} I_0 h \quad (4.33)$$

*CFO* : Kritik flashover voltage ( Kritik geri atlama gerilimi)

Burada;

$Z_0$  : Hattın karakteristik empedansı,

$v$  : Dalganın hızı,

$c$  : Işık hızı,

$h$  : Hattın yerden yüksekliğidir.

## **5. YILDIRIMLA İNDÜKLENEN GERİLİMİN ANALİZİNDE KULLANILAN PROGRAMLAR**

Yıldırımla indüklenen gerilimlerin analizinde kullanılan bazı programlar SDTAP (s-Domain Transient Analysis Program), EMTP (Elektromagnetic Transient Program), ATP (Alternative Transient Program), PSPICE (Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis), MATLAB-SIMULINK'dır. Yıldırımla indüklenen gerilimlerin analizinde en çok kullanılan bilgisayar programı EMTP (Electromagnetic Transient Program)'dır.

### **5.1. EMTP (ELECTROMAGNETİC TRANSİENT PROGRAM) Programı**

Bu çalışmada EMTP'nin MicroTran version 3.110 programı kullanılmıştır. Microtran 1987 yılında Hermann W. Dommel (University of British Columbia), Jose R. Marti ((University of British Columbia) ve Luis Marti (University\_of Toronto, Hydro One Networks Inc.) tarafından kurulmuştur.

Microtranın 3.10 versiyonu Windows temelli ve 32 bit DOS temelli uygulamaların bir kombinasyonuna sahiptir. Bu program daha çok pratik ihtiyaçları adreslemek için dizayn edilmiş şu programları içermektedir [32]:

- Microtran
- mtData
- mtplot
- mtline
- fdData

Ana program microtrandır.

#### **5.1.1. Microtran**

Bu program, elektrik ağlarının geçici durumlar altında simülasyonu için kullanılan bir programdır. Bilgisayar esaslı programaların en seri olanı ve şimdilik en uygun olanıdır. Microtran çok güvenilir ve etkilidir. 2000 düğüm ve 2000 branş olan bir ağ için en az 2 MB hafıza gereklidir. Bu program şu modellemeleri ihtiva etmektedir:

- Direnç, indüktans, kapasitans toplu parametreleri,
- Çok fazlı pi-devreleri,
- Tek ve üç faz n sargılı transformatörler,
- Dengeli ve dengesiz dağıtım hatları parametreleri ile sabitleri ya da frekans bağımlı parametreler,

- Lineer olmayan rezistanslar ve dalga kesici modeller, lineer olmayan indüktanslar ile kullanıcı tanımlı artık akı,
- Anahtarlar ile herhangi bir sayıda açma-kapama sıralaması ve devre kesiciler ile çoklu açma-kapama sıraları, kıvılcım aralıkları simüle etmek için anahtar kontrol kriterleri,
- Diyotlar, tristörler ve paralel olmayan tristör modelleri ile her iki montaj durumları ya da kullanıcı tanımlı kıvılcım kontrolleri,
- Gerilim ve akım kaynakları, standart matematiksel fonksiyonlar (sinüzoidal, dalga fonksiyonları, adımlar, rampalar), kullanıcı zamanın fonksiyonu olarak noktadan noktaya özel kaynaklar ya da kullanıcı tanımlı kaynaklar içinde hesaplamalar yapabilir.
- Senkron makinalar ile armatürleri, alan ve damper sargıları. Bu model hatta burulma osilasyonlarının simülasyonunu tasvir etmek için bir mil-kütle sistemi ihtiva etmektedir.
- Başlangıç koşulları otomatik olarak program tarafından tanımlanabilir ya da kullanıcı tarafından sağlanabilir. Bu program iletim hattında verilen frekansta ya da kullanıcı tanımlı frekansta sabit durum faz çözümleri ortaya çıkartmak için de kullanılabilir. Frekans tarama kabiliyeti özellikle harmonikler, rezonans ve temel senkron rezonans çalışmaları için yararlıdır.

### **5.1.2. mtData**

Bu bir data giriş işlemidir. mtData'nın ihtiva ettiği bazı özellikler şunlardır:

- Yeni bir data durumu oluşturmak için adım adım destekleri sağlayan bilgi durumunu tesis eden sürücü menüsü,
- Bilgi hata kontrolü ile akıllı bilgi editörü,
- Uygun online referansın gerçek bir parçası ile hassas destek,
- İhmaller ve akıllı data kontrolleri içinde tesis ile transformatörler gibi cihazları birleştirmek için kolaylık,

### **5.1.3. mtPlot**

Çıkış prosesin en son versiyonu ve çizim programı mtPlot basit bir ayırma alanına sahiptir, fakat grafik cihazı oldukça güçlüdür. Bu program çoğu EMTP tip programların dosya formatlarını teşhis eder ve şu özelliklere sahiptir;

- Doğrusal ya da logaritmik skalada otomatik skalama,
- Çizilen resim için metin ve çizgiler eklemek,

- Hat, bar ve yayılma çizimleri,
- Çoklu dosyalardan çizim datası,
- Aynı çizim dosyası içinde başka kaynaklardaki bilgi ile birleşik sonuçlar,
- Sistem yazıcısı için yazma ya da “jpg”, “gif”, “bmp” ve diğer popüler grafik formatlarında dosyalar
- Eğri matematiği,

#### **5.1.4. mtLine**

Microtran tam özellikli parametreler programı mtLine olarak isimlendirilen bir yardımcı programı da ihtiva etmektedir. mtLine'nın bazı yetenekleri şunlardır;

- 100'ün üzerinde faz iletkeni ya da toprak iletkeni ile birlikte havai hatların seri empedans ve şönt kapasitans matrislerinin hesabı,
- Faz çıkışı ya da modal nicelikler ya da simetrik bileşenler,
- Toprak iletkenleri ve demetlerin çıkartılması,
- Çok fazlı pi-devreleri. Parazit çalışmaları için güç hatları ile iletişim devreleri arasındaki kuplaj empedansların hesabı,
- İletim hatları altında kuvvetli elektrik alanının hesabı.

#### **5.1.5. fdData**

Bu program havai hatların frekans bağımlı modellenmesi için destek sağlar. Microtran'ın frekans bağımlı hat modelleri hat asimetriklerini, yüzey etkisini, toprak geri dönüş yolu etkisini ve delme derinlik değişkeni etkisini doğru bir şekilde hesaba katar.

### **5.2. EMTP/ATP(Alternative Transient Program) Programı**

EMTP'nin başka bir gelişmiş versiyonu EMTP/ATP (Alternative Transient Program) programıdır. ATP, elektromekanik tabiat gibi elektromanyetiğin geçici durumlarının dijital simülasyonunu yapmak için bir universal programdır. Bu program ile istenilen tesisin kompleks ağları ve kontrol sistemlerinin simülasyonu yapılabilmektedir. ATP, kapsamlı modelleme yeteneklerine ve geçici durumların hesaplanması yanı sıra ilave önemli özelliklere sahiptir [33].

ATP Drs. W. Scott ve Tsu-huei Liu, Kanada/Amerika EMTP kullanıcı grubu başkanı tarafından uluslar arası yardımlarla sürekli olarak geliştirilmektedir.

Dr. Liu DCG (EMTP Geliştirme Koordinasyon Grubu) başkanı olarak atanmadı ve Dr. Meyer özel zamanlarını kullanarak BPA (Bonneville Power Administration)'nin genele açık versiyonu EMTP'nin bir kopyasından yeni bir programa başladı.

### 5.2.1. Çalıştırma Prensipleri

- Temel integrasyonun trapezoidal kuralı, zaman domeninde sistem bileşenlerinin diferansiyel eşitliklerini çözmektir.
- Sıfır olmayan başlangıç koşulları hem sabit durum faz çözümü ile otomatik olarak tanımlanabilir hem de daha basit bileşenler için kullanıcı tarafından giriş yapılabilir.
- Program modülleri TACS ( kontrol sistemlerinin geçici durum analizi) için interface yeteneği ve MODELS, ark ve korona gibi lineer olmayan karakteristikler ile kontrol sistemleri ve bileşenlerinin modellenmesine olanak sağlar.
- Arızalar, yıldırım dalgaları, valflerin değişimini kapsayan anahtar operasyonlarının herhangi bir türü gibi simetrik ya da simetrik olmayan parazitlere izin verilir.
- Frekans tarama özelliğini kullanarak faz ağlarının frekans cevabının hesaplanması.
- Harmonik frekans tarama kullanarak frekans domeninde harmonik analizleri.
- Her hangi bir elektrik ağı olmaksızın TACS ve MODELS kontrol sistemi modellenmesi kullanarak dinamik sistemler simüle edilebilir.

### 5.2.2. Bileşenleri

EMTP/ATP şu bileşenleri içermektedir:

- Çift olmayan ve çift olan lineer, toplu parametrelili R, L, C elemanlar.
- Dağılmış ve frekans bağımlı parametreler ile iletim hatları ve kablolar.
- Lineer olmayan dirençler ve endüktanslar, histerik endüktör, zamanla değişen direnç, TACS/MODELS kontrollü rezistans.
- Doğru olmayan bileşenler: doyma ve histeris ihtiva eden transformatörler, dalga kesiciler, arklar.
- Sıradan anahtarlar, zamana bağımlı ve gerilime bağımlı anahtarlar, istatistik anahtarlar (Monte Carlo çalışmaları).
- Valfler ( diyotlar, tristörler, triyaklar), TACS/MODELS kontrollü anahtarlar.
- Analitik kaynaklar, adım, rampa, sinüzoidal, üstel, dalga fonksiyonları, TACS/MODELS tanımlı kaynaklar.
- Makinalar: 3 faz senkron makine, universal makine modeli.

- Sıralı etki eden MODELS ihtiva eden kullanıcı tanımlı bileşenler.

### 5.2.3. Tamamlanmış Simülasyon Modelleri

ATP'de MODELS ifade ve zaman değişkenli sistemlerin çalışması için simülasyon takımlarının kapsamlı yerleştirilmesi ile desteklenen genel amaçlı bir tanımlama dilidir.

- Her bir modelin serbest formatta tanımlanmasına olanak sağlar.
- ATP'de MODELS keyfi kullanıcı tanımlı kontrol ve devre bileşenlerinin tanımlanmasına izin verir, ATP için diğer programlara ve modellere bağlantı için basit bir arayüz sağlar.
- Genel amaçlı programlayabilme takımı MODELS hem frekans domeninde hem de zaman domeninde proses simülasyon sonuçları için kullanılabilir.

TACS kontrol sistemlerinin zaman domeni analizleri için bir simülasyon modülüdür. HVDC (Yüksek Voltaj DC) dönüştürme kontrollerinin simülasyonu için orijinal olarak geliştirilmiştir. TACS için kontrol sistemlerinin bir blok diyagram benzetimi kullanılır. TACS aşağıda belirtilen işlemlerin simülasyonu için kullanılabilir:

- HVDC dönüşüm kontrolleri.
- Senkron makinaların uyarma sistemleri.
- Güç elektroniği ve sürücüleri.
- Elektrik arkları ( Devre kırıncılar ve arıza arkları).

Elektrik ağı ve TACS arasındaki arayüz düğüm gerilimi, anahtar akımı, anahtar durumu, zaman değişkenli rezistans, gerilim ve akım kaynakları gibi sinyallerin değişimi ile tesis edilir.

Programa hat parametreleri doğru bir şekilde girilmeli, aksi halde program çalışmaz ve hata gösterir. Örneğin; hat parametresi olarak  $Z_0$  karakteristik empedans ve dalga hızı girildiğinde hat uzunluğu için metre cinsinden boyu yazılmalıdır. Hat uzunluğu yerine dalganın yayılım süresi de yazılabilir. Bu durumda hat uzunluğunun dalga hızına bölümünde elde edilen değer girilmelidir.  $Z_c$  ve dalga hızı girildiğinde INPUT opsiyon kısmına 1, NPHASE kısmına iletken sayısı girilmelidir. Eğer  $\omega L$  ve  $\omega C$  değerleri girilecekse durum kimlik kartında XOPT ve COPT kısımlarına 60 değeri girilmelidir. Hat parametreleri girilirken ITYPE kısmına faz sayıları -1, -2, -3 ...-N şeklinde sırayla girilmelidir. Eğer çıkışta branş akımı isteniyorsa IOU kısmına 1, branş voltajı isteniyorsa 2, hem branş akımı hem de branş voltajı isteniyorsa 3 girilmelidir. Uygulanacak kaynak ise uygun kodları ile yazılmalıdır. Adım fonksiyonu şeklinde ise ITYPE kısmına 11, dikdörtgen rampa fonksiyonu şeklinde ise

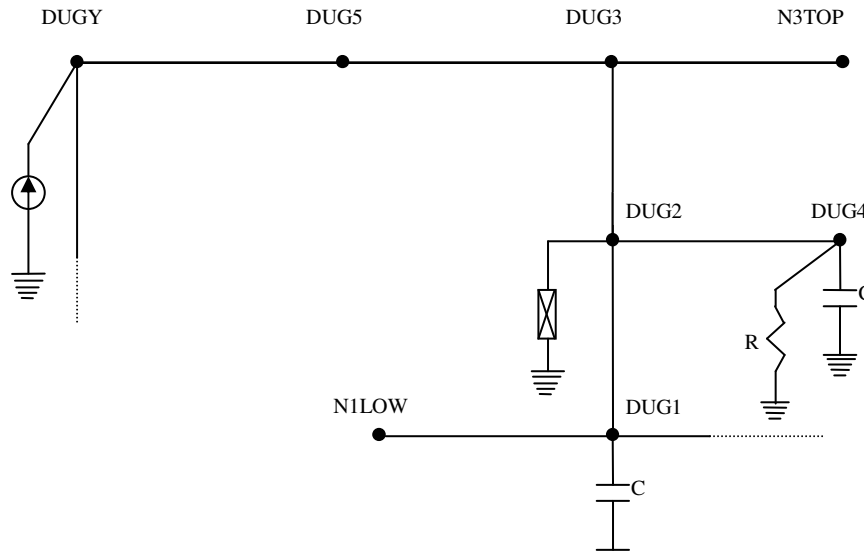
12, üçgen rampa fonksiyonu şeklinde ise 13, sinüzoidal fonksiyon ise 14, dalga fonksiyonu ise 15,yüksek DC gerilim dönüştürücüler için DC kaynağı 16 olarak girilmelidir.

## 6. UYGULAMALAR

### 6.1. ÖRNEK 1 (Tek Hat Sistemi)

Bu örnekte Şekil 6.1'deki devre [31] incelenmiştir. DUGY ile DUG5 , DUGY ile toprak , DUG5 ile DUG3, N3TOP ile DUG3, DUG2 ile DUG3, DUG2 ile DUG1 ve DUG1 ile toprak arasındaki hatların herbirinin karakteristik empedansı 370 ohm, DUG2 ile DUG4 arasındaki hattın karakteristik empedansı 30 ohm'dur. DUG1 ile toprak arasında  $4.4 \times 10^{-3}$  F, DUG4 ile toprak arasında  $1 \times 10^{-3}$  F kapasitans ve DUG4 ile toprak arasında 5 k $\Omega$  bir direnç mevcuttur.

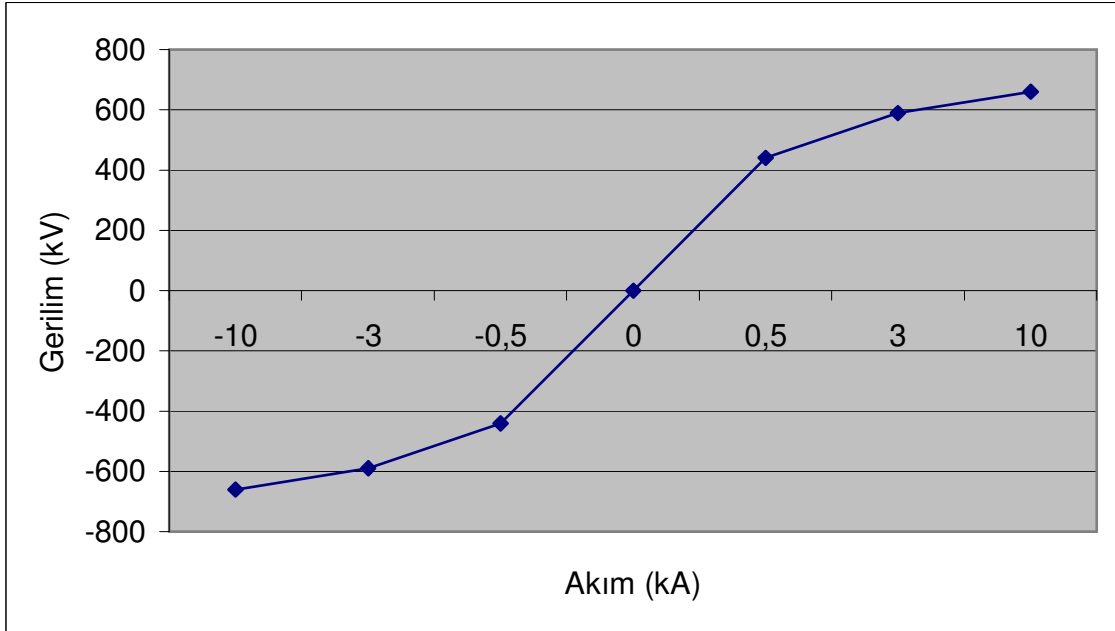
Bu sistemde DUGY noktasına tepe değeri 8 birim olan  $1/50$   $\mu$ s üssel akım dalgası uygulanmıştır. Bu sistemde kullanılan parafudrum akım-gerilim karakteristiği Şekil 6.2'de verilmiştir. Microtran programı ile elde edilen DUGY, DUG3 ve DUG4 düğümlerindeki gerilimler Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü üzere, parafudur kullanılan sistemde, aynı düğümlerde meydana gelen gerilimler parafudursuz sisteme göre daha düşüktür.



Şekil 6.1. Örnek 1 için tek iletken hat modeli.

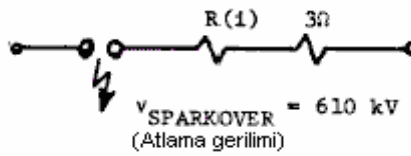
TABLO 1. Örnek 1’de kullanılan parafurdun akım-gerilim tablosu

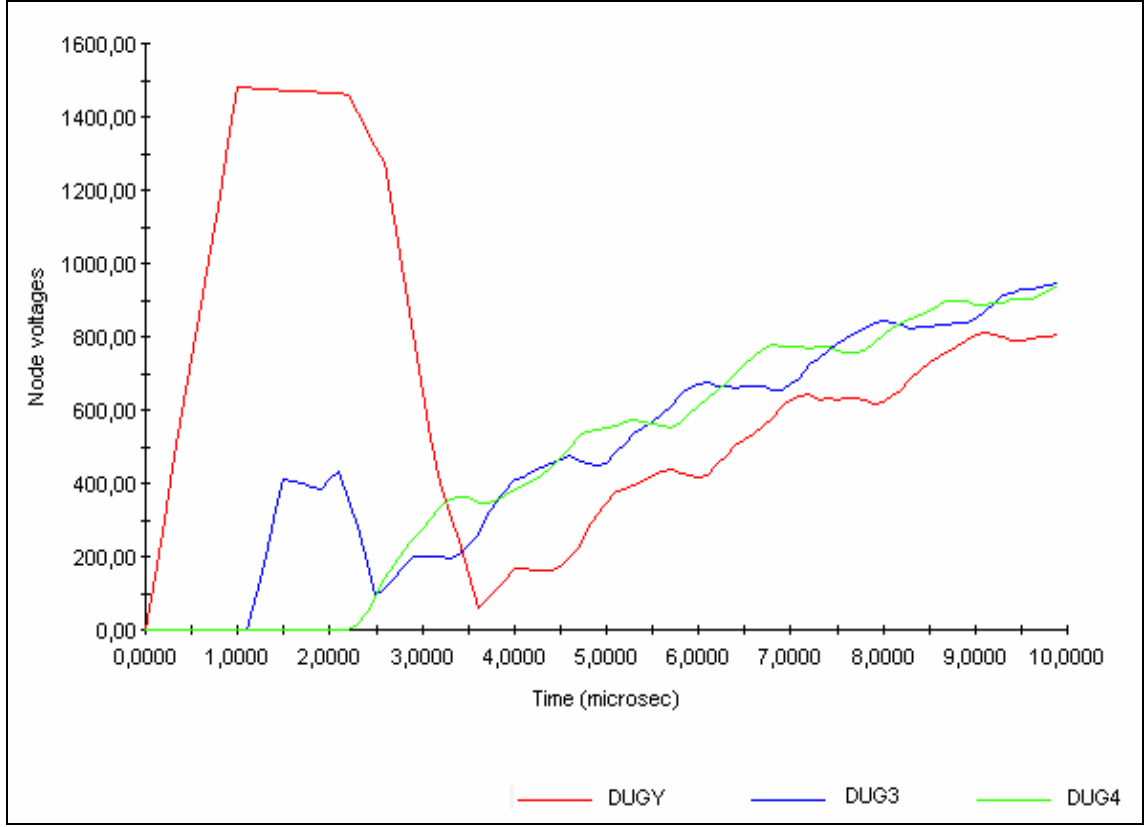
I (kA)	V (kV)
0,5	440
1,0	510
1,5	540
2,5	580
3,0	590
10,0	660



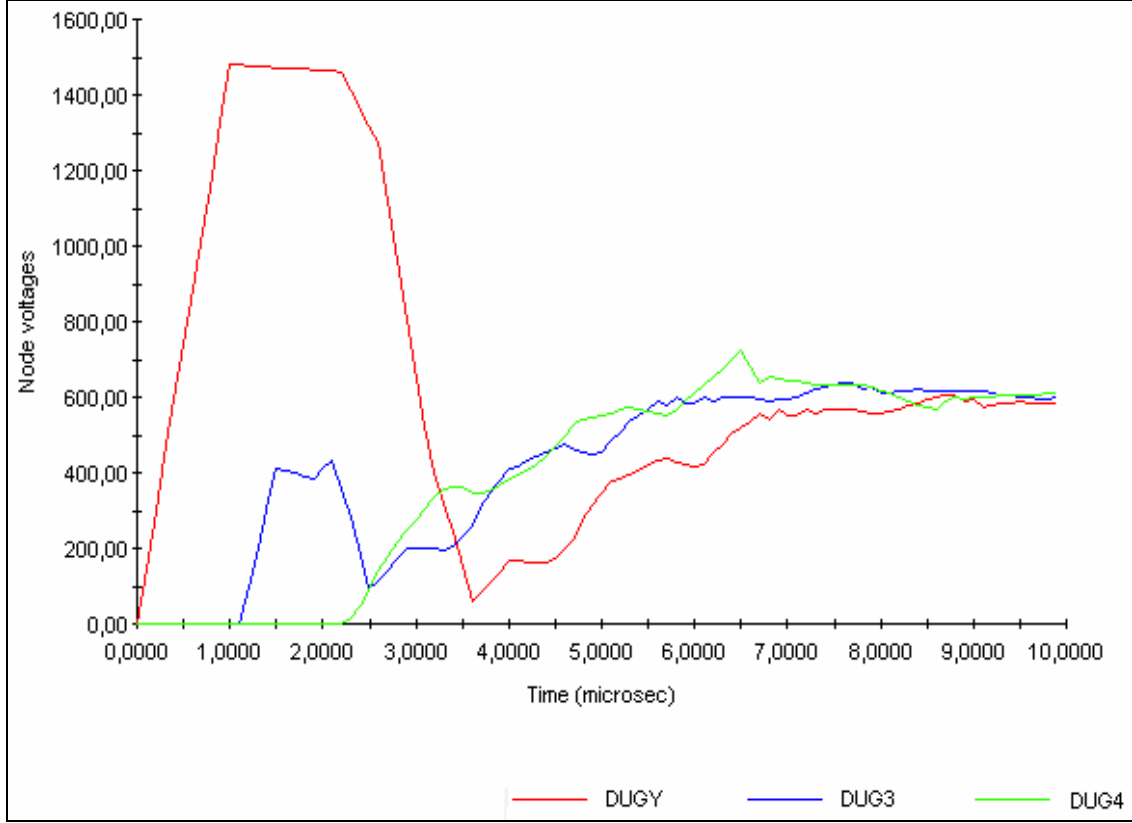
Şekil 6.2. Örnek 1’de kullanılan parafurdun gerilim-akım karakteristiği.

Kullanılan parafurdun şematik gösterimi aşağıda verilmiştir.





Şekil 6.3. Tek iletkenli parafudrsuz sistemde DUGY noktasına tepe değeri 8 birim olan akım uygulanması sonucu DUG3 ve DUG4 düğümlerdeki gerilimlerin değişimi.

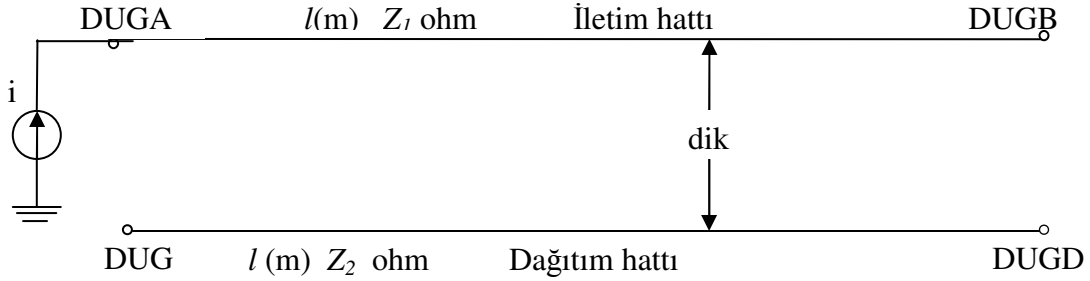


Şekil 6.4. Tek iletkenli parafudrlu sistemde DUGY noktasına tepe değeri 8 birim olan akım uygulanması sonucu DUG3 ve DUG4 düğümlerdeki gerilimlerin değışimi.

## 6.2. ÖRNEK 2 (Paralel İki Hat Sistemi)

Dağıtım şebekesindeki iletim hatlarının enerji iletim hatlarıyla paralel olma olasılığı yüksektir. Yıldırımların çoğu iletim hatlarına düşmektedir. Bu nedenle, bu örnekte birbirine paralel iletim hattından birine (iletim hattı) yıldırım düşmesi durumunda diğer iletken (dağıtım hattı) manyetik kuplaj yoluyla endüklenen gerilim incelenmiştir. Şekil 6.5’de gösterilen birbirine paralel iki iletken den biri iletim hattını diğer iletken ise dağıtım hattını temsil etmektedir.  $Z_1$  ve  $Z_2$  iletim hatlarının karakteristik empedanslarını temsil etmektedir. İletim hattının başlangıç noktası olan DUGA noktasına tepe değeri 1 birim olan  $1/50\mu s$  üssel akım dalgası uygulanmıştır. DUGA’ya tepe değeri 1 birim olan  $1/50 \mu s$  üssel akım dalgası uygulanarak, iletkenler arası mesafe ile iletkenlerin GMR değeri ve iletkenlerin yerden yükseklikleri değıştirilip EMTP programına giriş bilgisi olarak verilmiş, dağıtım şebekesinde meydana gelen gerilimin tepe değeri bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar TABLO 2, TABLO 3, TABLO 4 tablolarında gösterilmiştir.

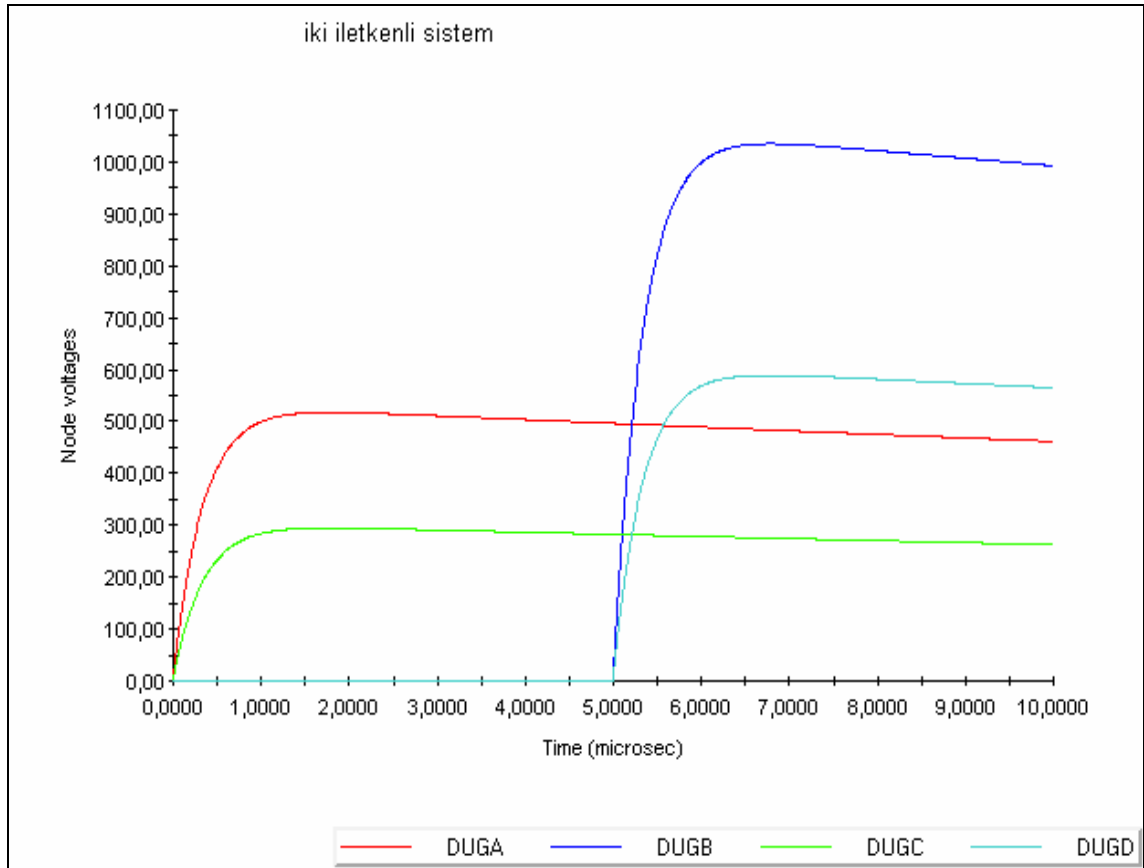
Elde edilen sonuçlar irdelendiğinde, örneğin hatlar arası mesafe 100 m olduğunda bir birim akıma karşılık ikinci iletkende 34.5 birim gerilim meydana gelmektedir. Yıldırım akımının tepe değeri 20 kA olduğu varsayılırsa, meydana gelen gerilim  $20 \times 10^3 \times 34.5 = 690$  kV olur. Ayrıca, iletkenler arası mesafenin çok büyük olması durumunda (10 km gibi) da diğer iletkende bir gerilim indüklendiği görülmektedir. İletim hattına düşen yüksek tepe değerine haiz yıldırım akımı nedeniyle dağıtım sistemlerinin etkilenebileceği ve koruma sistemlerinin geliştirilmesi gerektiği görülmektedir.



Şekil 6.5. Birbirine paralel iletim-dağıtım hat modeli.

Şekil 6.5’de gösterilen iletim hattına paralel dağıtım hattı modelinde iletkenlerin uzunluğu 1.5 km, iletim hattının  $GMR_i = 3.99$  mm, dağıtım hattının  $GMR_i = 3.99$  mm, iletkenlerin yerden yüksekliği 10 m’dir. Bu modelde tepe değeri 1 birim olan  $1/50 \mu s$ ’lik üssel bir akım dalgası iletim hattının başlangıç noktası DUGA’ya uygulanmıştır. EMTP’de iki iletken arası 5 metre alınarak (toprak-faz iletkenleri arasında küçük mesafeler söz konusu olduğundan toprak iletkeninden yayılan yıldırım dalgasının faz iletkeninde endüklendiği gerilimin de hesaplanması amacıyla) dağıtım hattında indüklenen gerilimin bir birim akıma karşılık değişim grafiği Şekil 6.6’da gösterildiği gibi elde edilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere iletim hattında DUGA düğümüne enjekte olan gerilim dalgası DUGB düğümüne  $5 \mu s$ ’de ulaşmakta ve bu noktada yansıma nedeniyle DUGA’daki gerilim değerinin iki katına ulaşmaktadır. Aynı şekilde dağıtım hattında da DUGC düğümünde enjekte olan gerilim dalgası DUGD düğümüne  $5 \mu s$ ’de ulaşmakta ve yansıma nedeniyle bu noktada gerilimin tepe değeri DUGC’deki değerinin iki katına ulaşmaktadır. Hat uzunluğu 1.5 km, dalga hızı 300km/s olduğu göz önüne alındığında,  $t = \frac{l}{v}$ ’den dalganın hat sonuna ulaşma süresi  $5 \mu s$  bulunur.

154 kV iletim hatları, standart 468 mm<sup>2</sup> 795 MCM Drake, 546 mm<sup>2</sup> 954 MCM Cardinal ve 726 mm<sup>2</sup> 1272 MCM Pheasant olan çelik takviyeli (ACSR) alüminyum iletken ve tek veya çift devre direkleri kullanılarak tesis edilir. 154 kV hatlarda genellikle her fazda bir iletken bulunur. Çok yüksek talep bölgelerinde iletim hatlarının taşıma kapasitesini arttırmak için 154 kV ikili demet cardinal iletkenli çift devre stratejik kısa hatlar tesis edilir. 380 kV iletim hatları, standart 954 MCM Cardinal (546 mm<sup>2</sup>) ve 1272 MCM Pheasant (726 mm<sup>2</sup>) kesitli, her bir fazda iki veya üçlü demet halinde çelik takviyeli (ACSR) alüminyum iletkenler kullanılarak tesis edilir [34].

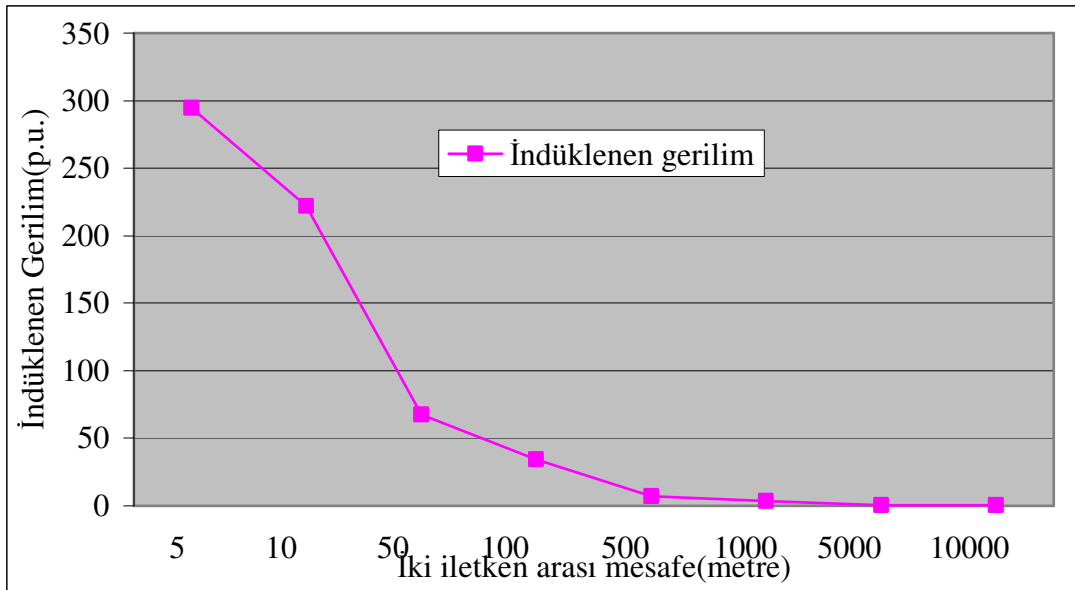


Şekil 6.6. İki iletken arası mesafe 5 metre, yerden yükseklikleri 10 metre ve GMR değerleri 3.99 mm olan birbirine paralel iletim-dağıtım hattı modelinde dağıtımhattında indüklenen gerilimin EMTP’de bulunan karakteristiği.

TABLO 2. GMR değerleri 3.99mm olan iki iletken arası mesafeye göre bir birim akıma karşılık indüklenen gerilimin.

İletkenler arası mesafe (m)	Yıldırımın düştüğü iletim hattının DUGA noktasının gerilimi (p.u.)	Dağıtım hattında DUGC noktasında indüklenen gerilim (p.u.)
5	517,510	294,5050
10	513,010	222,0004
50	510,510	67,50130
100	510,510	34,50060
500	511,010	7,000130
1000	510,051	3,500070
5000	510,510	0,500009
10000	511,160	0,350007

Şekil 6.7’de görüldüğü üzere iki iletken arası mesafe 10.000 m olsa dahi bir indükleme söz konusudur. Hassas iletişim şebekeleri için bu önem arz etmektedir. Çünkü bu gibi indüklemeler parazitlere yol açar. Sesli ve görüntülü telekomünikasyon ağları için istenmeyen bir durumdur. Bu parazitlerin önlenmesi için iletkenlerin kesitleri, yerden yükseklikleri fiziksel yapıları dikkate alınmalı ve en uygun değerler tespit edilmelidir. Ayrıca iletkenler elektro manyetik alandan etkilenmeyecek şekilde imal edilmelidir. Bunun için fiber optik kablolar uygun olmaktadır.

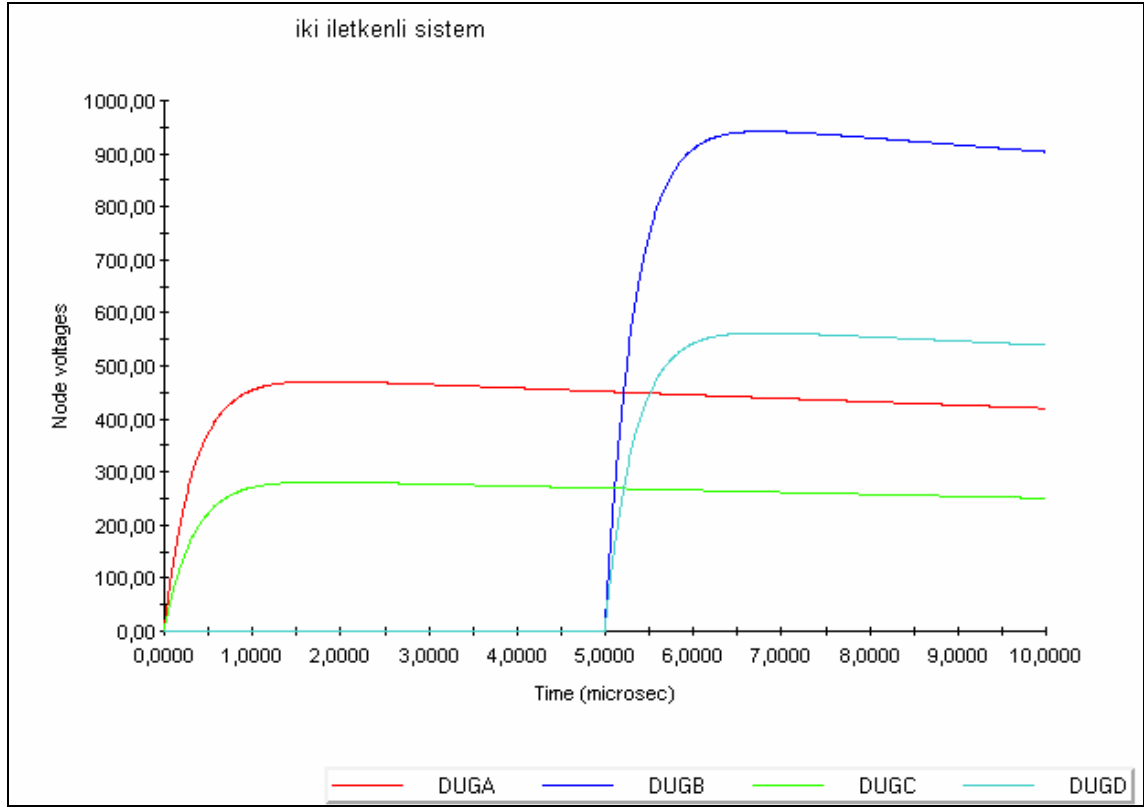


Şekil 6.7. İki iletken arası mesafeye göre indüklenen gerilimin EMTP’de elde edilen sonuçların karakteristiği.

Yıldırım gibi yüksek akım değerine sahip olaylarda, iletim hattına ve yakınına düşmesi durumlarında enerji iletim hatlarını etkilediği gibi bu hatlara yakın, hatta yukarda bahsettiğimiz gibi 10.000 m mesafeye kadar uzakta olan ağları etkileyebileceği görülmektedir. Bu nedenle yıldırım akımlarına karşı parafudrlar, koruma iletkenleri ve koruma röleleri kullanılmalıdır.

### **6.3. ÖRNEK 3 (Paralel İki Hat Sistemi)**

Bu örnekte, Şekil 6.5’de gösterildiği gibi birbirine paralel iki iletkenen biri iletim hattını diğer iletken ise dağıtım hattını temsil eden iletim-dağıtım hattı modeli için iletkenlerin GMR’ları değiştirilmiş ve dağıtım hattında indüklenen gerilim incelenmiştir. İletken uzunluğu 1.5 km, iletim hattının ortalama geometrik yarıçapı  $GMR_i = 8.74$  mm, dağıtım hattının  $GMR_i = 8.74$  mm, iletkenlerin yerden yüksekliği 10 m’dir. Bu sistemde iletim hattının başlangıç noktası olan DUGA’ya tepe değeri 1 birim olan  $1/50$   $\mu s$ ’lik üssel bir akım dalgası uygulanmıştır. EMTP’de iki iletken arası mesafe 5 metre alınarak dağıtım hattında indüklenen gerilimin grafiği Şekil 6.8’deki gibi elde edilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere DUGA düğümüne enjekte olan gerilim dalgası DUGB düğümüne  $5\mu s$ ’de ulaşmakta ve bu noktada yansıma nedeniyle gerilimin tepe değeri DUGA noktasındaki değerin iki katına ulaşmaktadır. Hat uzunluğu 1.5 km ve dalganın hızı 300 km/s olarak alındığında, dalganın hat sonuna ulaşma süresi 5  $\mu s$  bulunur.

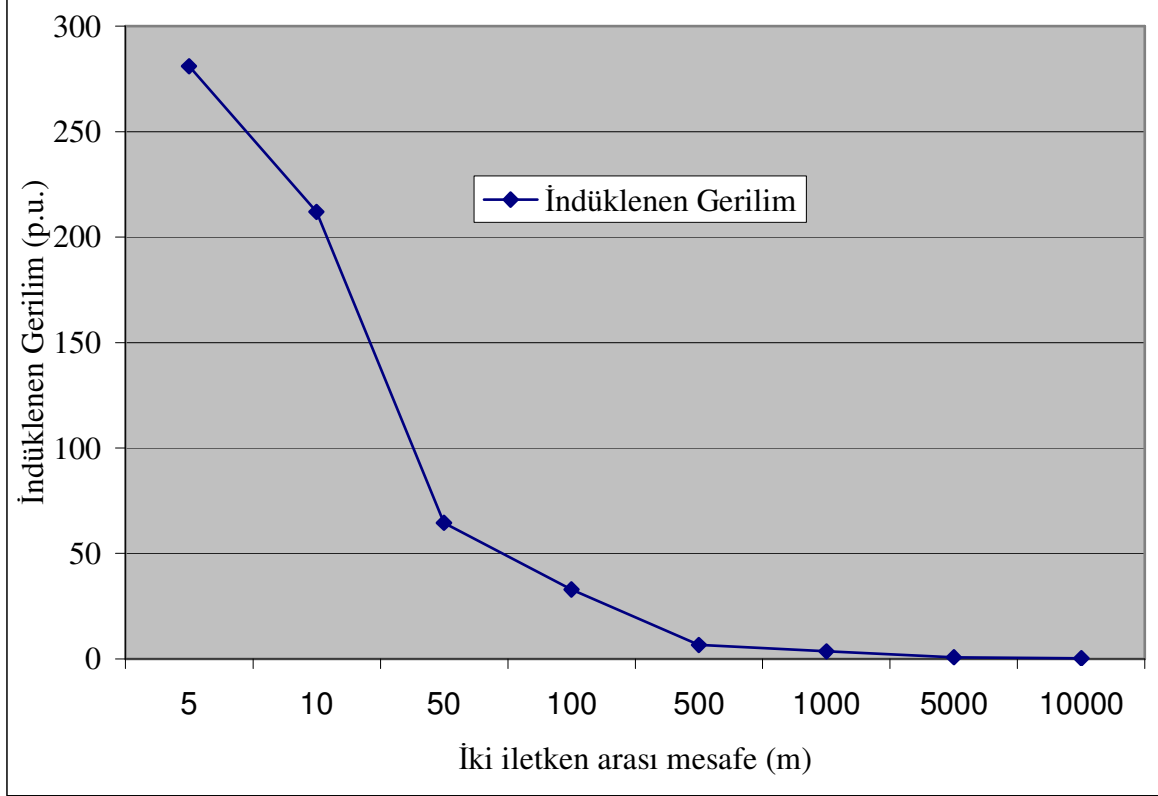


Şekil 6.8. İki iletken arası 5 metre, yerden yükseklikleri 10 ve GMR'ları 8.74 mm olan birbirine paralel iletim-dağıtım hattı modeli için dağıtım hattında indüklenen gerilimin EMTP'de bulunan karakteristiği.

TABLO 3. GMRi değeri 8.74 mm olan iki iletken arası mesafeye göre indüklenen gerilimin değişim tablosu

İletkenler arası (m)	Yıldırımın düştüğü noktanın gerilimi (p.u.)	İkinci iletkende indüklenen gerilim (p.u.)
5	471,009	281,005
10	466,009	212,004
50	463,509	64,5012
100	464,009	33,0006
500	463,509	6,50012
1000	463,509	3,50007
5000	464,109	0,700013
10000	464,109	0,300006

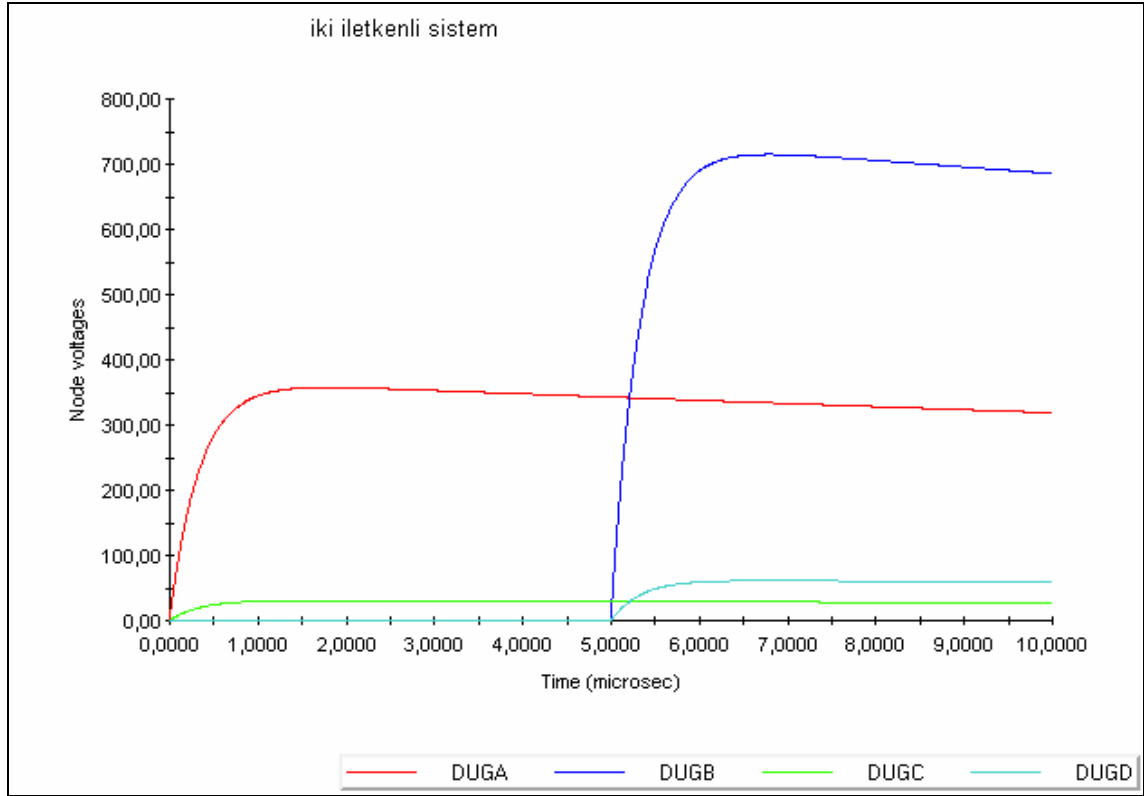
Şekil 6.9’de indüklenen gerilimin iletkenler arası mesafeye göre değişimi üssel azalan bir fonksiyon şeklindedir. Dağıtım şebekesi tasarımında koruma cihazları yerleştirilirken iletim hattına olan uzaklığına dikkat edilmesi gerekmektedir.



Şekil 6.9. İki iletken arası mesafeye göre indüklenen gerilimin EMTP’de bulunan değerlere göre değişimi.

#### 6.4. ÖRNEK 4 (Birbirine Paralel İletim Hattı Dağıtım Hattı Modeli)

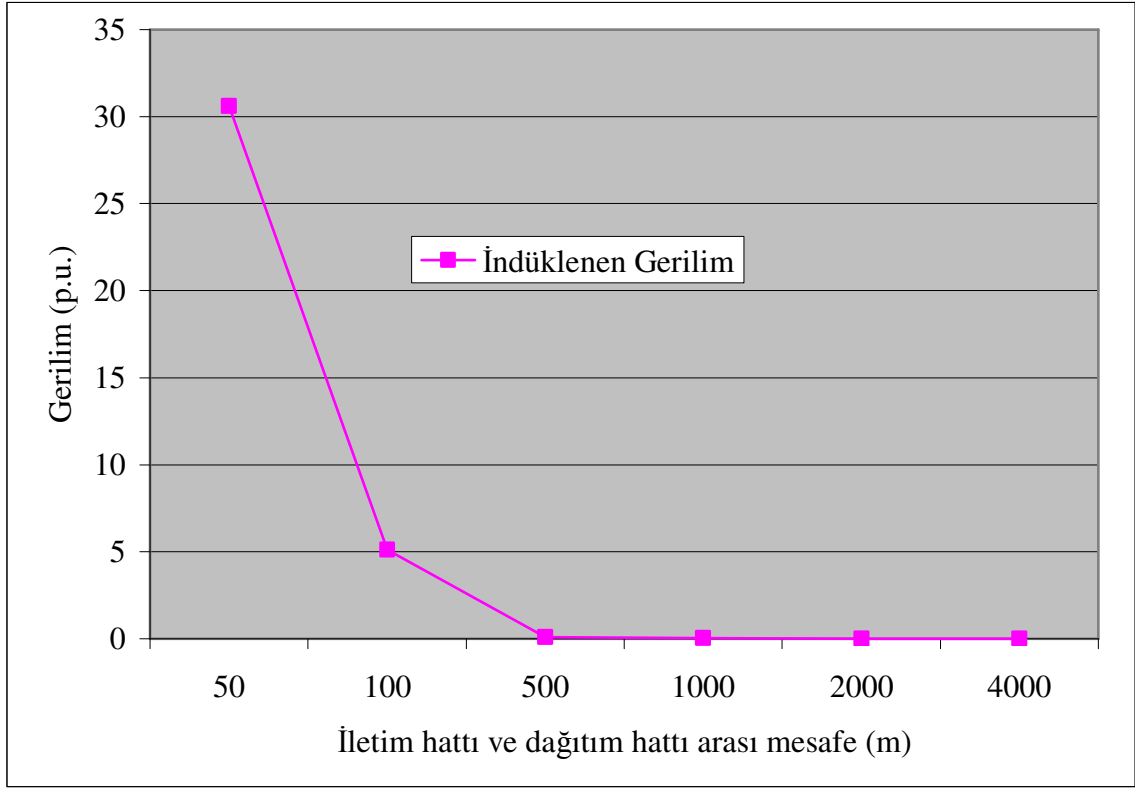
Bu örnekte Şekil 6.5’deki paralel iletkenler modelinde iletim hattı için Drake  $GMR_i=0.0373$  m, dağıtım hattı için  $GMR_i=0.00874$  m olan iletken kullanılarak DUGA düğümüne tepe değeri 1 birim olan  $1/50$   $\mu s$ ’lik bir yıldırım dalgası uygulanıp, EMTP programı kullanılarak DUGB, DUGC ve DUGD düğümlerinde iletkenler arası mesafeye göre indüklenen gerilimler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar TABLO 4, Şekil 6.10 ve Şekil 11’de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere yüksek mesafelerde de dağıtım hattı üzerinde bir gerilim indüklenmektedir.



Şekil 6.10. Paralel iletim-dağıtım hattı modeli için EMTP’de indüklenen gerilimin değişimi.

TABLO 4 İletim hattı Drake GMR’ı 0.0373m ve dağıtım hattı GMR’ı 0.00874m olan bir sistemde iletkenler arası mesafeye göre birim akıma karşılık indüklenen gerilim.

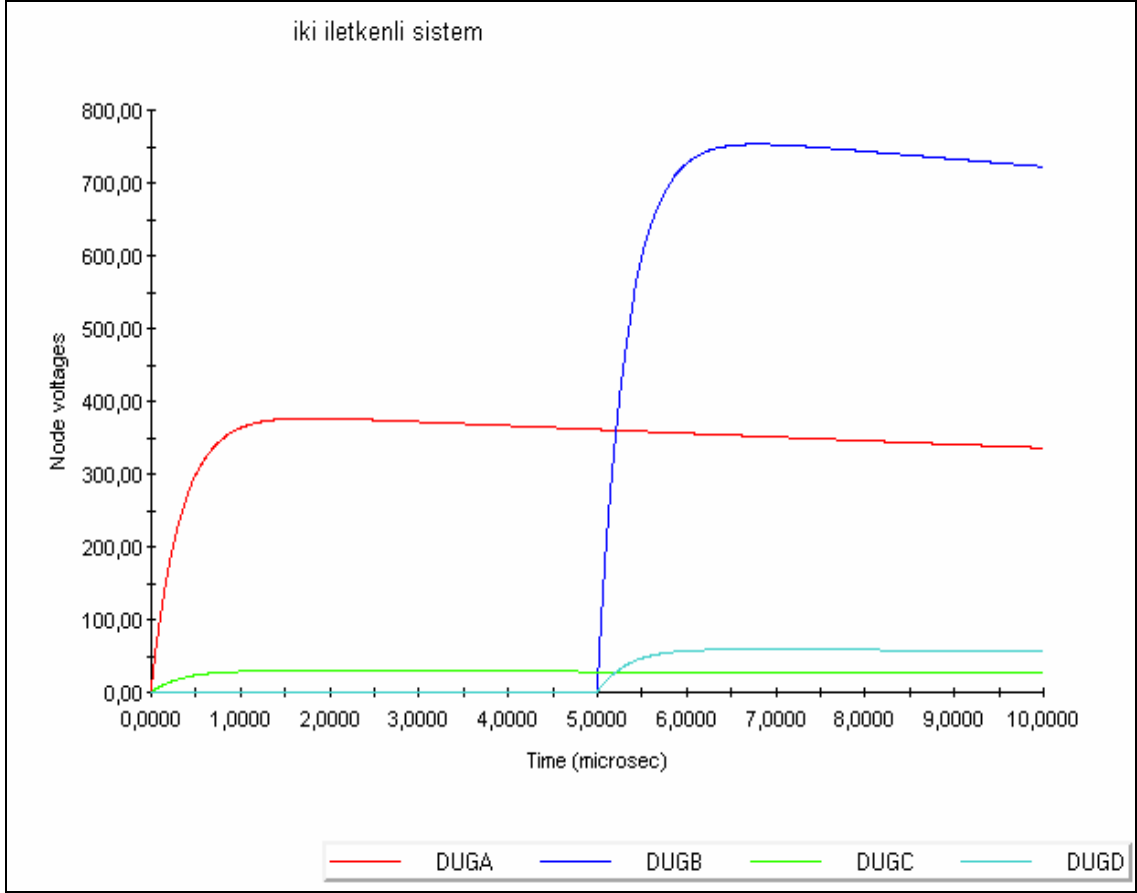
İki iletken arası mesafe (m)	DUGA Gerilimi (p.u.)	DUGC Gerilimi (p.u.)
50	357,4480	30,6203
100	390,2730	5,1043
500	415,9980	0,1029
1000	418,0000	0,0230
2000	418,6000	0,0046
4000	418,6000	0,0000



Şekil 6.11 İletim-dağıtım hattı modeli için iletkenler arası mesafeye göre indüklenen gerilimin değişimi.

### 6.5. İndüklenen Gerilimin Hattın Yerden Yüksekliğine Göre Değişimi

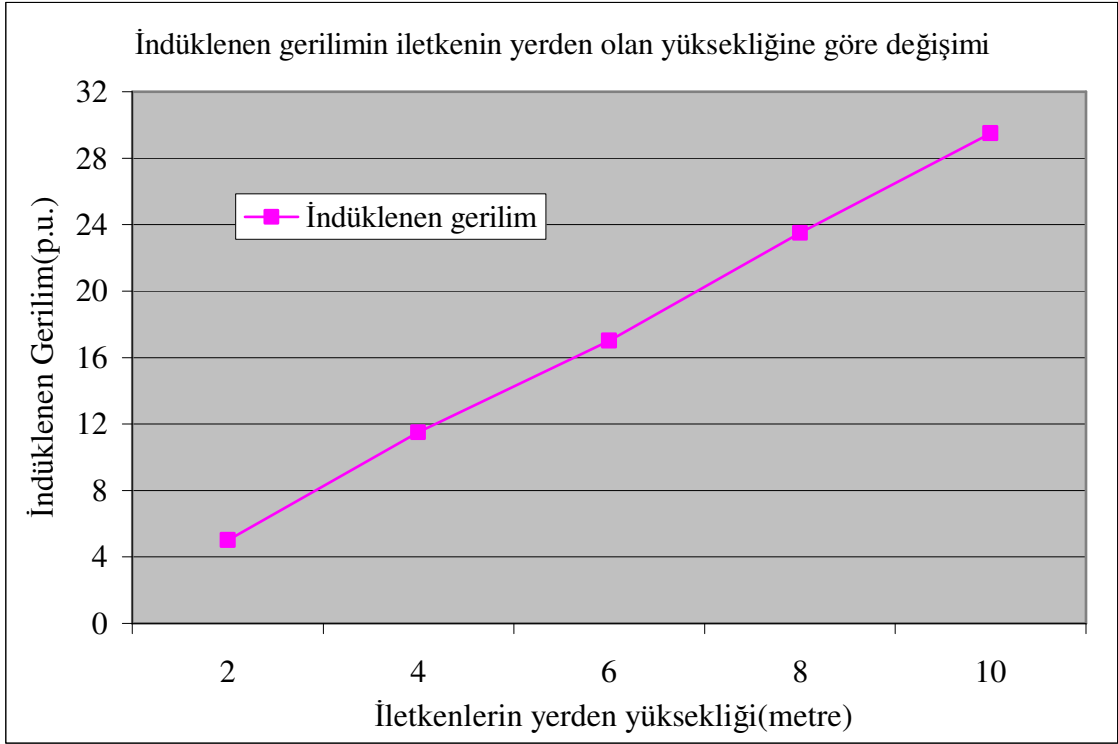
**ÖRNEK 5:** Bu örnekte yine Şekil 6.5'deki birbirine paralel iletim-dağıtım hattı modeli göz önüne alınmış, iletkenlerin tipi Drake, hatların uzunluğu 10km, GMRi 0.0373m, iletim ve dağıtım hattının yerden yüksekliği 10m, iki iletken arasındaki dik uzaklık 100m ve DUGA noktasına tepe değeri 1 birim olan  $1/50\mu s$ 'lik üssel bir akım uygulanarak hatların yerden yüksekliği değiştirilip dağıtım hattında indüklenen gerilimin değişimi incelenmiştir. İndüklenen gerilimin EMTP'de bulunan değişimi Şekil 6.12'da gösterilmiştir. Ayrıca bu veriler girilerek, iletkenlerin yerden yüksekliği değiştirilerek elde edilen sonuçlar Tablo 5'de ve yerden yüksekliğe göre indüklenen gerilimin değişim karakteristiği Şekil 6.13'de gösterilmiştir. Sonuçlarda görüldüğü üzere iletkenlerin yerden yüksekliği arttıkça hem akım uygulanan DUGA noktasında hem de dağıtım hattında indüklenen gerilimde artış olmaktadır.



Şekil 6.12. İki iletken arası 100 metre olan bir sistemde indüklenen gerilimin değişimi.

TABLO 5 İndüklenen gerilimin iletkenlerin yerden yüksekliğine göre değişim tablosu.

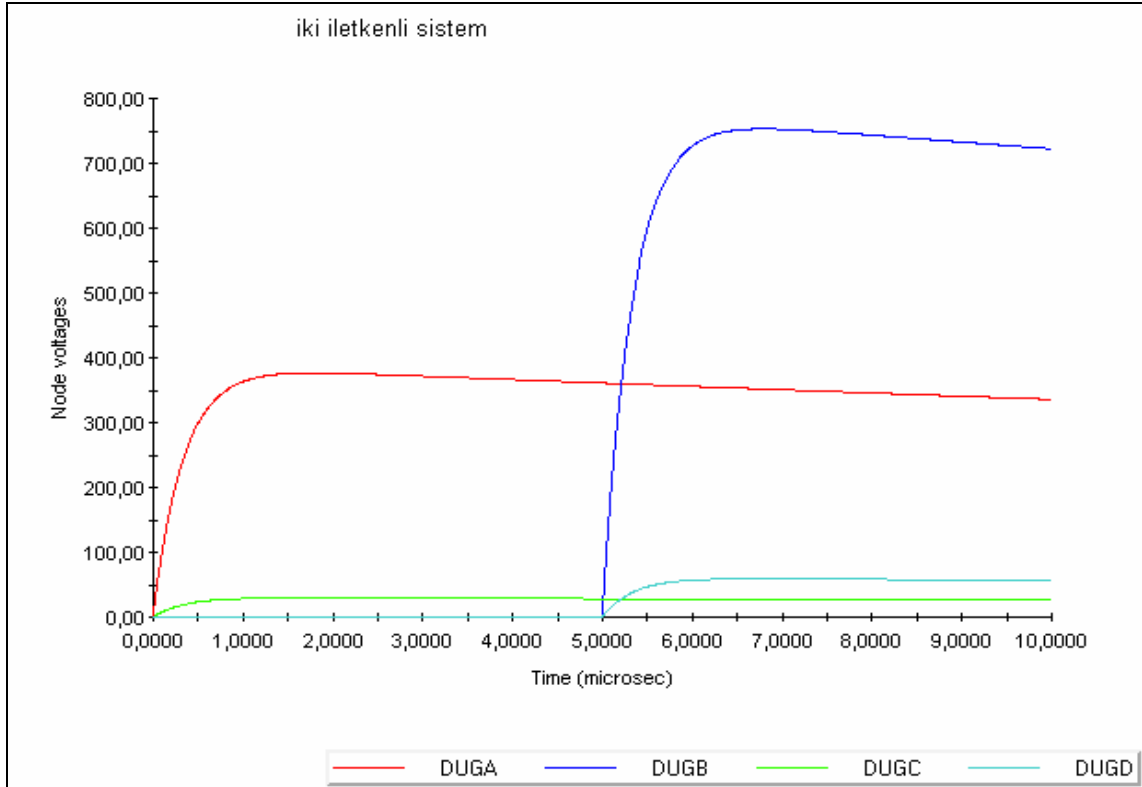
h (m)	$V_A$ (p.u.)	$V_C$ (p.u.)
2	280,005	5,00009
4	321,506	11,5002
6	346,006	17,0003
8	363,507	23,5004
10	376,507	29,5006



Şekil 6.13. İndüklenen gerilimin iletkenin yerden yüksekliğine göre değişimi.

### 6.6. İndüklenen Gerilimin EMTP ve MATLAB kullanılarak Karşılaştırılması

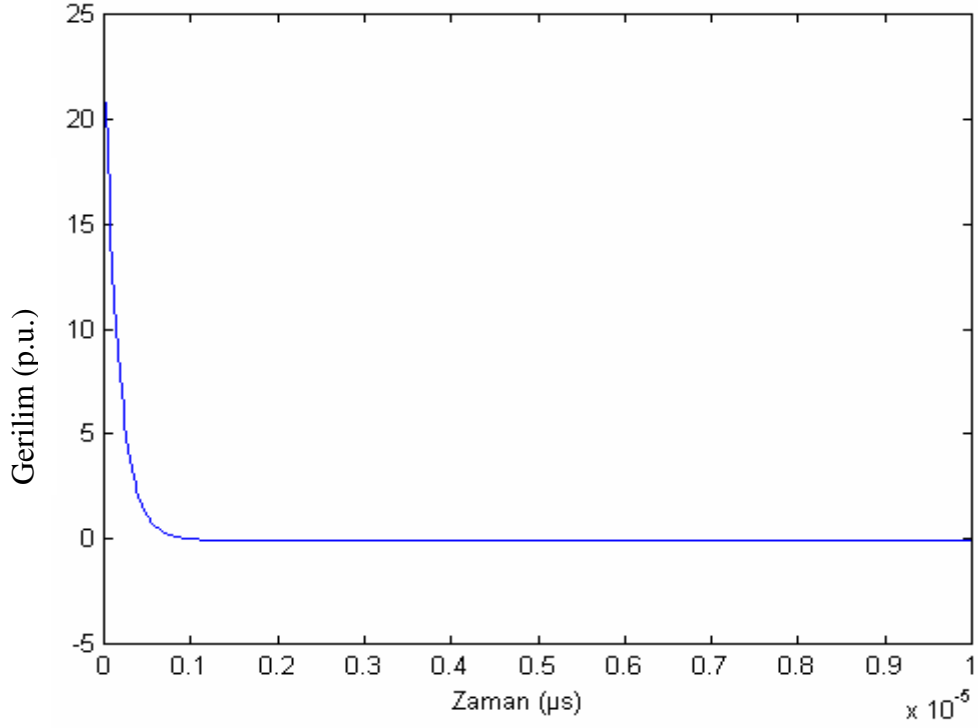
**ÖRNEK 6:** Bu örnekte, uzunlukları 1,5 km, ortalama geometrik yarıçapları 0.0373m ve yerden yükseklikleri 10m olan birbirine paralel iki iletkenli bir sistemde indüklenen gerilimin EMTP ve MATLAB kullanılarak karşılaştırması yapılmıştır. EMTP’de elde edilen sonuçlar TABLO 6’da ve Şekil 6.14’deki gibi elde edilmiştir. MATLAB’da alınan sonuçlar yine TABLO 6’da ve Şekil 6.15’deki gibi elde edilmiştir. MATLAB’da girilen formülasyon  $U_i = M \frac{di}{dt}$  olduğundan  $t = 0$ ’da  $U_i$ ’nin maksimum değerleri elde edilmiştir. İletkenler arası mesafeye göre EMTP ve MATLAB’da elde edilen sonuçlar Şekil 6.16’de gösterilmiştir.



Şekil 6.14 GMRI değerleri 0.0373 m, yerden yüksekliği 10 m, uzunlukları 1500 m ve arası 100 m olan iki iletkenli bir sistemde indüklenen gerilimin EMTP’de elde edilen grafiği.

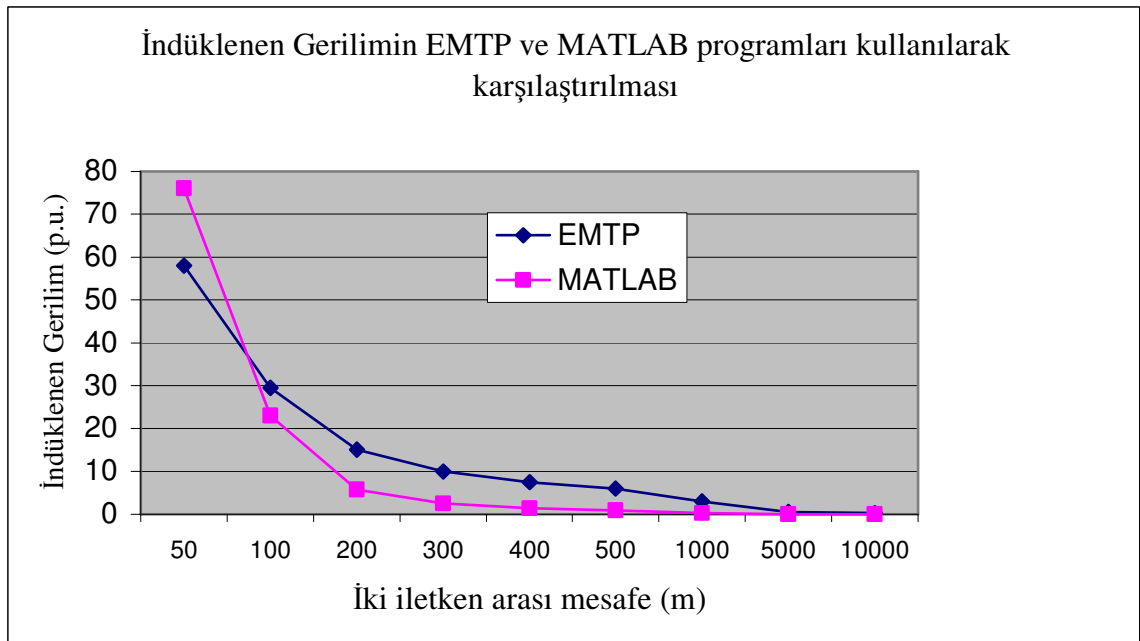
TABLO 6 İndüklenen gerilimin EMTP ve MATLAB’da iki iletken arası mesafeye göre elde edilen değerleri.

İki iletken arası mesafe (m)	EMTP (p.u)	MATLAB (p.u)
50	58,0011	76
100	29,5006	23
200	15,0003	5,7
300	10,0002	2,5
400	7,50014	1,4
500	6,00011	0,9
1000	3,00006	0,25
5000	0,500009	0,009
10000	0,300006	0,0025



Şekil 6.15. GMRi 0.0373 m, yerden yüksekliği 10 m, uzunlukları 1500 m ve aradaki mesafesi 100 m olan iki iletkenli bir sistemde indüklenen gerilimin MATLAB’da elde edilen grafiği.

İndüklenen gerilimin EMTP ve MATLAB programları kullanılarak elde edilen maksimum değerleri Şekil 6.16’de gösterilmiştir.

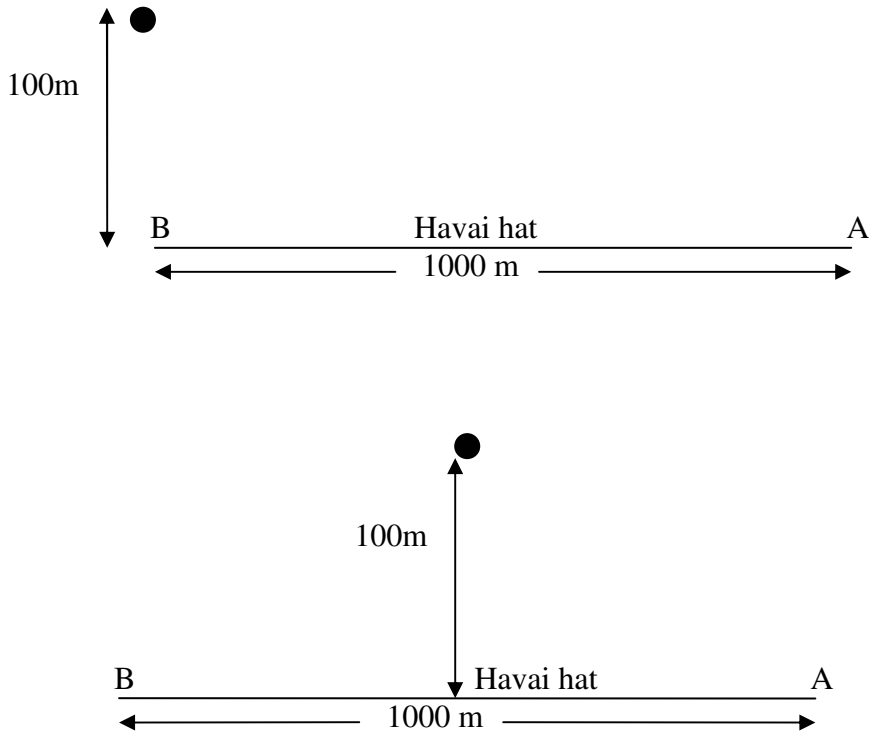


Şekil 6.16. İndüklenen gerilimin EMTP ve MATLAB’da elde edilen maksimum değerleri grafiği.

Şekil 6.16’de görüldüğü üzere indüklenen gerilimin EMTP ve MATLAB programları kullanılarak iletkenler arası mesafeye göre elde edilen maksimum değerleri grafikleri benzerlik göstermektedir.

### 6.7. ÖRNEK 7 (Rusck Modeli Uygulaması)

Bu örnek, bölüm 4.4.5’de anlatılan Rusck modeli uygulaması için verilmiştir. Yıldırım akımının tepe değeri 20 kA, cephe süresi 2 µs, sırt yarı değer süresi 50 µs ve hızı  $v = c/2 = 1,5 \cdot 10^8$  m/s, havai hattın yüksekliği  $h = 10$  m ve karakteristik empedans 400 ohmdur. Yıldırımın düşme noktası ile hat arasındaki uzaklığa göre hat üzerinde indüklenen gerilimin değişimi Şekil 6.18’de verilmiştir.



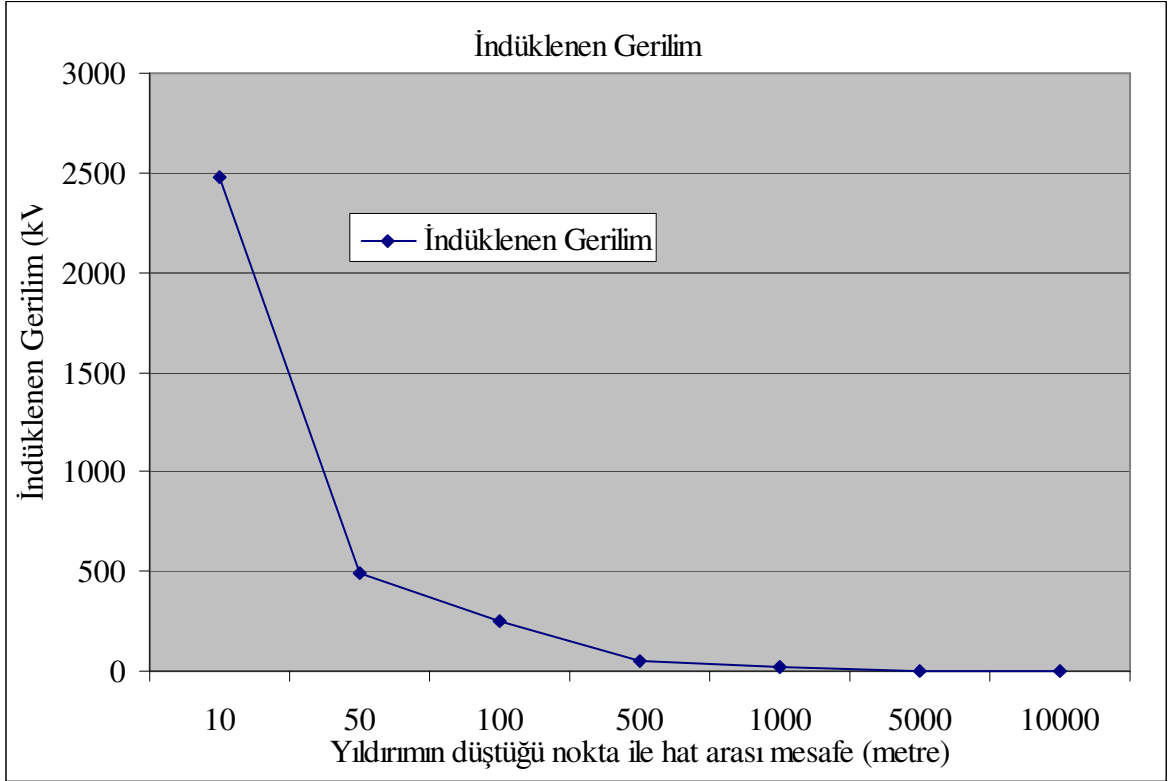
Şekil 6.17. Yıldırımın iletim hattının yanına düşmesi hali.

Rusck'a göre;

$$U_{\max} = 60I_m \frac{h}{y} \left[ 1 + \frac{\beta}{\sqrt{2 - \beta^2}} \right] = 248 \text{ kV}$$

TABLO 7 Rusck'a göre hat yakınına düşen yıldırımın hat üzerinde indüklediği gerilimin yıldırımın düşme noktası ile hat arası mesafeye göre değişimi.

Yıldırımın düştüğü nokta ile hat arası mesafe (metre)	İndüklenen Gerilim (kV)
10	2480
50	495
100	248
500	49,6
1000	24,8
5000	4,95
10000	2,47

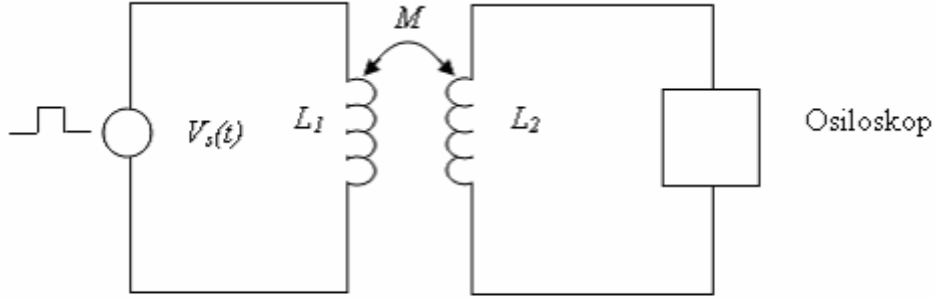


Şekil 6.18. Rusck'a göre hat yakınına düşen yıldırımın hat üzerinde indüklediği gerilimin yıldırımın düşme noktası ile hat arası mesafeye göre değişimi.

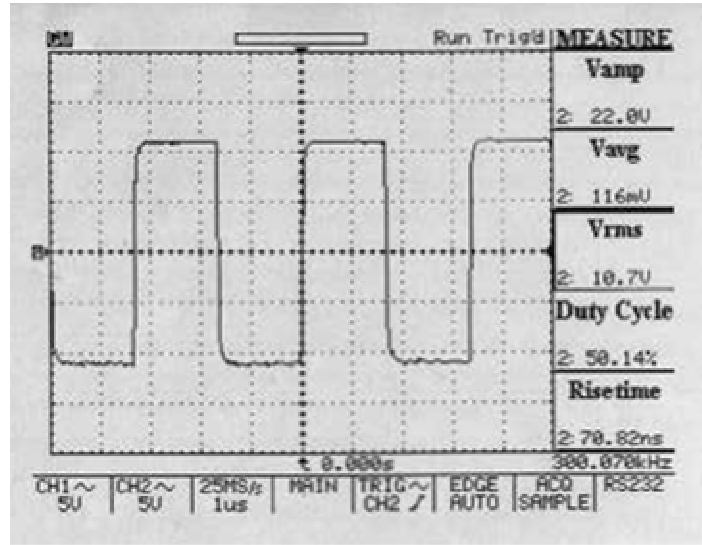
### 6.8. Deneysel İnceleme

Bu deneyde iki adet aynı tip endüktans kullanılarak, birine güç kaynağından 11 Volt 300 kHz gerilim uygulanarak diğer endüktans üzerinde indüklenen gerilimin değişimi osiloskopta gözlemlenmiştir. Deney şeması Şekil 6.19'da gösterilmiştir. Uygulanan gerilimin karakteristiği Şekil 6.20'de verilmiştir. Daha sonra endüktansların arası değişik mesafelere ayarlanarak indüklenen gerilimin değişimi incelenmiş, elde edilen sonuçlar TABLO 7'de

verilmiştir. İki endüktans arası 5 cm alınarak elde edilen sonuçlar Şekil 6.21’da verilmiştir. İki endüktans arası 20 cm alınarak elde edilen sonuçlar Şekil 6.22’de verilmiştir.



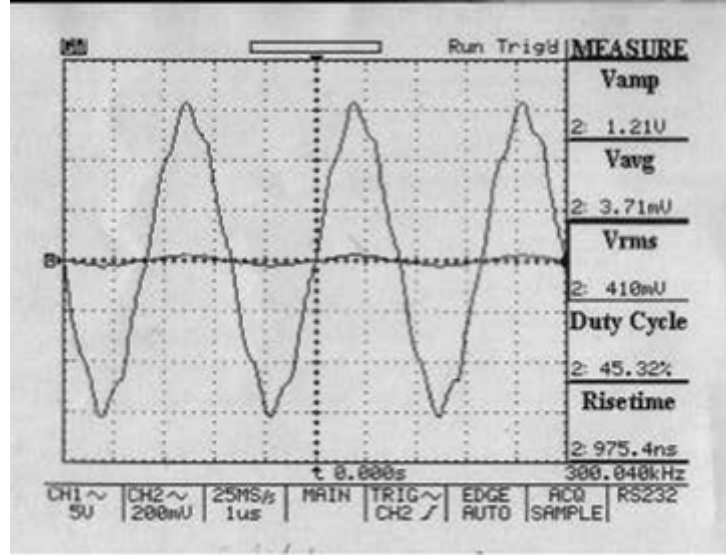
Şekil 6.19 İndüklenen gerilim incelemesinde deney şeması.



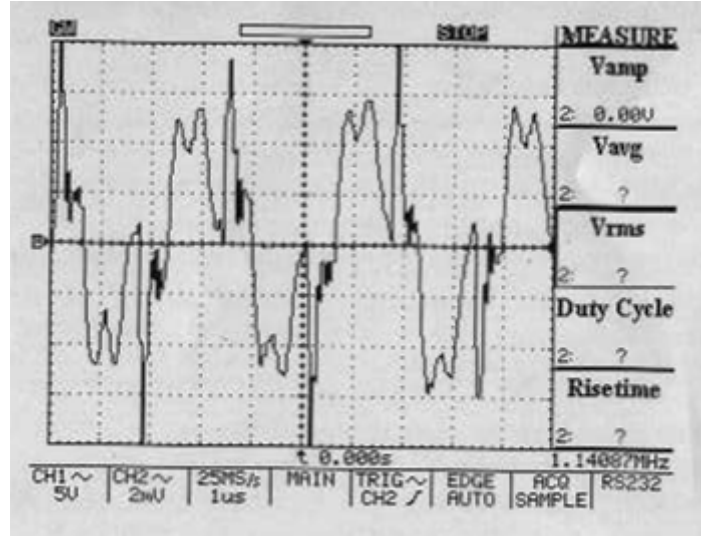
Şekil 6.20 Deneysel incelemede uygulanan gerilimin değişimi.

TABLO 8 Deneysel incelemede osiloskopta bulunan değerler tablosu.

Endüktanslar arası mesafe (cm)	Uygulanan Gerilim (mV)	İndüklenen Gerilim (mV)
5	11.000	600
10	11.000	65
20	11.000	8



Şekil 6.21 Deneysel incelemede indüklenen gerilimin osiloskopta elde edilen değışimi.



Şekil 6.22 Deneysel incelemede indüklenen gerilimin osiloskopta elde edilen değışimi.

Bu deneyde daha yüksek frekans ve genlikte gerilim elde edilemediğinden daha uzun mesafeler için indüklenen gerilimin değışimi gözlemlenememiştir. Deneysel ortamda yüksek genlikte ve frekansta gerilim elde edilerek daha uzun mesafeler için indüklenen gerilimin değışiminin incelenmesi ileride bir araştırma konusu olarak önerilmektedir.

## 7. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Enerji iletim sistemlerinde faz iletkenlerine, direklere, toprak iletkenlerine yıldırım düşmesi sonucu kısa süreli gerilim dalgası meydana gelmektedir. Ayrıca iletim hattı yakınına yıldırım düşmesi sonucunda hatlarda bir gerilim indüklenmektedir. Bu kısa süreli gerilimler, çoğu zaman hattın taşıdığı gerilimden daha büyük olduğundan, izolatörlerin kırılmasına, transformatör izolasyonlarının bozulmasına ve diğer şebeke elemanlarının zarar görmesine neden olmaktadır. İletim hattında meydana gelen bu aşırı gerilim dalgası o bölgede tesis edilmiş dağıtım hattında da bir gerilim indüklemektedir. Bu aşırı gerilim dalgası, dağıtım şebekesi elemanlarına zarar verebilmekte, enerjinin kesilmesine, istenilen kalitede enerjinin sürekli olarak sağlanamamasına neden olabilmektedir. İletim ve dağıtımda kaliteli ve sürekli bir enerji sağlamak, iletim ve dağıtım sistemleri ile elemanlarını korumak için, değişik yıldırım düşmesi durumlarında meydana gelen bu aşırı gerilimlerin analizi büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, önce yıldırım hakkında teorik bilgiler ve konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalarda uygulanan metotlar sunulmuş, bir iletkenli ve iki iletkenli modeller tasarlanıp, EMTP ve MATLAB programları kullanılarak, değişik yıldırım düşmesi durumlarında meydana gelebilecek aşırı gerilimler araştırılmıştır. İlk önce 8 düğümlü tek iletkenli bir dağıtım sisteminde parafudr kullanılması ve kullanılmaması halleri için, yıldırım olarak tepe değeri 8 birim olan  $1/50\mu\text{s}$ 'lik bir akım kaynağı sisteme enjekte edilmiş ve meydana gelen aşırı gerilim dalgaları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, beklendiği gibi parafudr kullanılması halinde, aşırı gerilim dalgasının bir değerde sınırlandırıldığı ve etkisinin yok edildiği tespit edilmiştir.

Daha sonra biri iletim hattını diğeri dağıtım hattını tasvir eden iki iletkenli bir sistem ele alınmış, iletim hattına yıldırım olarak yine tepe değeri 1 birim olan  $1/50\mu\text{s}$ 'lik bir akım kaynağı enjekte edilerek iletim hattında meydana gelen gerilim dalgasının ve bunun dağıtım hattında indüklediği gerilimin tespiti yapılmıştır. İletkenlerin GMR (ortalama geometrik yarıçapları)'ları değiştirilerek indüklenen gerilim incelenmiş ve GMR arttıkça indüklenen gerilimde bir azalma olduğu, iletkenlerin yerden yükseklikleri değiştirilerek indüklenen gerilim incelenmiş ve yükseklik arttıkça indüklenen gerilimde bir artış olduğu tespit edilmiştir. İletkenler arası mesafe artırılarak indüklenen gerilim incelenmiş ve çok büyük mesafelerde (10000 metre gibi) bile dağıtım hattında bir gerilim indüklendiği görülmüştür. EMTP ve

MATLAB programları kullanılarak iletkenler arası mesafeye göre indüklenen gerilimin maksimum değerleri elde edilmiş ve birbirine benzer eğriler elde edilmiştir.

Laboratuvarda sistem modellenerek deney yapılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Laboratuvar ortamında yüksek frekans ve genlikte gerilime ihtiyaç duyulduğundan, daha uzun mesafeler için sistemin modellenmesi ve indüklenen gerilimlerin incelenmesi başka bir çalışma konusu olarak önerilmektedir.

Gelecekte çok iletkenli sistemler düşünülerek indüklenen gerilimin tespiti yapılabilir. Ayrıca iletkenlerin yerleşim durumları değiştirilerek örneğin dikey bir iletkene düşen yıldırımın yatay bir iletken üzerinde indüklediği gerilimin tespiti yapılabilir ya da dikey bir iletken yakınına düşen yıldırımın yatay bir iletkende indüklediği gerilimin tespiti yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Greenwood, A., "Electrical Transients in Power Systems", John Wiley & Sons, Inc., pp.463-490, 1991
- [2] Rusck, S. , "Induced lightning over-voltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low voltage networks", Trans. Roy. Inst. Of Tech., No.120, Stockholm, Sweden, 1958.
- [3] Bewley, L.V., "Travelling Waves on Transmission Systems", 2<sup>nd</sup> ed., 1951
- [4] P. Durai Kannu and M. Joy Thomas "Lightning induced voltages on overhead conductors at different heights", IEEE Bologna PowerTech Conference, June 23-26 Bologna 2003.
- [5] Master, M.J. and Uman, M.A., "Lightning Induced Voltages on Power Lines Theory", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-013, No.9,p. 2502-2518, (1984).
- [6] P. Chowdhuri, "Analysis of Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-4, No. 1, pp. 479-493, January 1989.
- [7] L. V. Bewley, "Travelling Waves on Transmission Systems, Dover Publications, New York, 1963.
- [8] Wagner, C.F., and McCann, G.D., "Induced Voltage on Transmission Lines", Trans. AIEE, 61, 916-930, 1942.
- [9] R. Lundholm, "Induced Overvoltage Surges on Transmission Lines and their Bearing on Lightning Performance at Medium Voltage Networks", Trans. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, No. 120, 1958.
- [10] K. Berger, "The Earth Flash", Lightning, Vol. 1, Academic Press, New York, 1977.
- [11] Golde, R.H. , "Lightning surges on overhead distribution lines caused by indirect and direct lightning strokes ", Trans. AIEE, 73, 437-447, 1954.
- [12] C. A. Nucci, F. Rachidi, M. V. Ianoz, C. Mazzetti, "Lightning – Induced Voltages on Overhead Lines", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-35, No. 1, pp. 75-85, February 1993.
- [13] P. Chowdhuri, "Estimation of Flashover Rates of Overhead Power Distribution Lines by Lightning Stroke to Nearby Ground", Trans. On Power Delivery, Vol. PWRD-4, No. 3, pp.1982-1989, July 1989.

- [14] Ozkaya, M., “ Yüksek Gerilim Tekniğinde Deşarj Olayları”, İ.T.Ü. Kütüphanesi, Sayı 1152, İstanbul 1979
- [15] Ozkaya, M., 1996, Yüksek Gerilim Tekniği, Birsen Yayınevi, Cilt 2, İstanbul.
- [16] Dommel, H.W., 1985, Overhead line parameters from handbook formulas and computer programs, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 2, pp. 366-372.
- [17] Guile, A.E. and Paterson, W., 1977, Electrical Power Systems, Volume-2, Pergamon Pres Inc., Elmsford, U.K.
- [18] UI:EE524, Transients in Power Systems, Session 19, Fall 1999/2000, Multiphase Transmission Line Modeling Revised, December 1999.
- [19] Kaygusuz, A., 2003, Uniform olmayan iletim hatlarında yıldırım aşırı gerilimlerin s-domeni kullanılarak analizi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi FBE.
- [20] Kawai, M., 1964, Studies of the surge response on a transmission line tower, IEEE Trans., PAS-83, pp. 30-34.
- [21] Chisholm, W.A., Chow, Y.L. and Strivastava, K.D. 1983, Lightning surge response of transmission towers, IEEE Trans., PAS-102, (8), pp. 3232-3242.
- [22] Chisholm, W.A., Chow, Y.L. and Strivastava, K.D. 1985, Travel Time of Transmission Towers, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, PAS-104, (10), pp. 2922-2928.
- [23] Baba, Y. And Ishii, M., 2001, Numerical electromagnetic field analysis of lightning current in tall structures, IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 16, no. 2, pp. 324-328.
- [24] Almeida, M.E., and Correia De Barros, M. T., “Tower modelling for lightning surge analysis using Electro-magnetic transient Program”, IEE Proc.-Gener, Transm. Distrib., Vol. 141, No.6, November 1994.
- [25] Menemenlis, C. And Chun, Z.T., 1982, Wave propagation on nonuniform lines, IEEE Trans., PAS-10, 1 (4), pp. 833-839.
- [26] Mamis, M.S., and Köksal, M., “Transient analysis of nonuniform lossy transmission lines with frequency dependent parameters”, Electric Power Systems Research, vol. 52, no. 3, Nov. 1999, pp. 223-238.
- [27] Oufi, E.A., A.S. Alfuhaid, M.M. Saied, “Transient Analysis of Lossless Single-Phase Nonuniform Transmission Lines”, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.9 No. 3 pp. 1694-1701, 1994.

- [28] A.K. Agrawal, H.J. Price, S. Gurbaxani, "Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field". IEEE trans. On EMC, Vol. 22, No. 2, May 1980, pp. 119-129.
- [29] F. Rachidi, C.A. Nucci, M. Ianoz, C. Mazzetti, "Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines" IEEE trans. On EMC, vol. 38, No. 3, pp. 250-264, Aug. 1996.
- [30] H. K. Hoidalen, "Analytical Formulation of Lightning-Induced voltages on Multi-conductor Overhead Lines above Lossy Ground", IEEE trans. On EMC, pp. 92-100, Vol. 45, No. 1 Feb. 2003.
- [31] Dube, L., v.d, "Using the simulation language 'MODELS' with EMTP", Proceeding of Eleventh Power System Computation Conference, Avignon 1993, pp. 1063-1069.
- [32] Meyer, W.S., 1984, EMTP Rule Book(Mode 39), B.P.A.
- [33] Alternative Transients Program (ATP) – Rule Book, Canadian/American EMTP User Group, 1987-1998.
- [34] Elektrik iletim sistemi arz güvenilirliği ve kalitesi yönetmeliği.
- [35] Owa, G., "Study of induced lightning surges and their frequency of occurrence", Elec. Engg. In Japan, 84. 44-45, December 1964.
- [36] H. K. Hoidalen, "Calculation of Lightning-induced Voltages in MODELS Including Lossy Ground Effects", International Conference on Power Systems Transients - IPST 2003 in New Orleans, USA.
- [37] Singarajah, C., "Surges induced on overhead transmission lines by indirect lightning strokes", with particular reference to Nigeria, Ph.D. Thesis, Univ. Of London, september 1971.
- [38] Kaygusuz, A., Mamiş, M.S. ve Akın E., 2002, s-Domain analysis of lightning surges on transmission towers', First International Conference on technical and Physical Problems in Power Engineering(TPE), Baku, Azerbaijan, 23-25 April, pp. 91-94.
- [39] Popolansky, F., "Frequency Distribution of Amplitudes of Lightning Currents", Electra, No.22 (1972), pp. 139-147.
- [40] Kaygusuz, A., Mamiş, M.S. ve Akın, E., 2003, İletim direklerinde oluşan yıldırım aşırı gerilimlerinin Laplace dönüşümü ile analizi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Adapazarı/SAKARYA.
- [41] Hamelin, J., Djebari, B., Barreau, R. And Fontaine, J., "Electromagnetic field resulting from a lightning discharge, surges induced on overhead lines, mathematical model." Presented at the Symposium on Electromagnetic Compatibility, Rotterdam. May 1979.

- [42] Koga, H., Motamitsu, T., and Taguchi, M., ‘‘Lightning surge waves induced in transmission lines’’, Review of the Electrical Communication Laboratory, 29, 797-810, 1981.
- [43] Kaygusuz, A., Mamiş, M.S. ve Akın E., 2002, s-Domain analysis of lightning surge response of a transmission tower with phase conductors, Int. Conference on Power Systems Transients IPST’03, Hong Kong.
- [44] Dengiz, H.H., 1991 Enerji Hatları Mühendisliği, Kardeş Kitabevi Yay. No. 2, Ankara.
- [45] Carson, J.R., 1926. Wave propagation in overhead wires with ground return, Bell System Tech. Journal, vol. 5, pp. 539-554.
- [46] Eriksson, A.J., Stringfellow, M.F., and Meal, D.V. ‘‘Lightning-induced overvoltages on overhead distribution lines’’, Trans. IEEE, PAS-101, 960-968, 1982.
- [47] Nguyen, H.V., Dommel, H.W. and Marti, J. R., 1997, Modelling of single-phase nonuniform transmission lines in electromagnetic transient simulations, IEEE Trans., PWRD-12, (2), pp. 916-921.
- [48] MathWorks, 1998, MATLAB User’s Guide, Natick, MA, USA.
- [49] Anderson, R.B., 1975, Transmission line reference book 345 kV and above (Lightning performance of transmission lines), EPRI, USA, 2nd edn..
- [50] Chisholm, W.A., Chow, Y.L., and Strivastava, K.D., ‘‘Lightning Surge Response of Transmission Towers’’, IEEE Trans., 1983, PAS-102, (8), pp. 3232-3242.
- [51] Simson, G.B. and Scrase, F.J., ‘‘ The Distribution of Electricity in Thunderclouds,’’ Proc. Royal Soc. , Series A, Vol. 161 (1937), p. 309.
- [52] Anderson, R.B. and Eriksson, A.J., ‘‘Lightning Parameters for Engineering Applications’’, Pretoria, South Africa: CSIR, June 1979, Report ELEK 120.
- [53] Chowdhuri, P y Gross, E.T.B. ‘‘ Voltages Surges Induced on Overhead Lines by Lightning Strokes’’. Proc. IEE, Vol. 114, No.12, Dec 1967, pp. 1899-1907.
- [54] Rodriguez, J. And Montafio R. ‘‘ Analysis of the Overvoltage Induced by Atmospheric Discharge Near Distribution Circuits Using TACS-EMTP’’. 29 North American Power Symposium, Wyoming University, October 1997.
- [55] Griscom, S.B., 1958, The Prestrike Theory and Other Effects in the Lightning Stroke, Trans. IEE, Vol. 77, p. 919.
- [56] IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines, 1985, A simple method for estimating lightning performance of transmission lines, Trans. IEEE, Vol. PAS-104, pp. 919-932.

- [57] IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines, 1986 IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines, Proposed IEEE, P1243 draft.
- [58] Stevenson, D.W.:, 1982, Elements of Power System Analysis, McGraw-Hill Inc.
- [59] Uram, K. And Miller, R. W., 1964, Mathematical analysis and solution of transmission line transient: I-Theory. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 1116-1123.
- [60] Mamis, M.S. and Köksal, M., “Computation of lightning Overvoltages using Nonuniform, Single-Phase Line Model”, IPST’99, International Conference on Power System Transients, Budapest-Hungary, June 1999.
- [61] Akçin, M., 2002, Enerji iletim sistemlerinde yıldırım geçici rejimlerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi FBE.
- [62] Ong, C., 1998, Dynamic simulation of electric machinery using MATLAB/Simulink, Prentice Hall Ptr, Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- [63] Ito T., Ueda T., Watanabe H., Funabashi T. And Ametani, A., 2003, Lightning flashovers on 77-kV systems: Observed voltage bias effects and analysis, IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 18, no. 2, pp. 545-550.
- [64] Cannor, R. A. W. And Parkins, R. A., “Operations Statistics in the Management of Large Distribution System”, Proc. IEE, Vol. 113(1966),p. 1823.
- [65] Hara, N., and Yamamoto, O., “Modelling of a transmission tower for lightning surge analysis”, IEE Proc.-Gener, Transm. Distrib., Vol. 143, No.3, May 1996.
- [66] C. A. Nucci and F. Rachidi, “Lightning-induced overvoltages,” IEEE Transmission and Distribution Conference, Panel Session “Distribution Lightning Protection,” New Orleans, April 14, U.S.A., 1999.
- [67] J. P. Silva, A. E. A. Araujo and J. O. S. Paulino, “Implementation of Rusck’s theory of lightning induced voltages on d.istribution lines in the EMTP-phase and neutral systems.”Proceedings of the V International Symposium on Lightning Protection, Sao Paulo, Brazil, pp. 225-228, May 1999.
- [68] Mamis, M.S., and Köksal, M., “Transient analysis of tranmission lines using fast Laplace transform(in Turkish)”, Proceedins of the 7<sup>th</sup> National Congress on Electrical-Electronics-Computer Engineering, v. 2, pp. 583-586, METU, Ankara. Sept. 8-14, 1997.
- [69] A. E. A. Araujo, J. O. S. Paulino and J. P. Silva, “Lightning induced voltage calculation in multi-conductor transmission lines: EMTP simulations,” 12<sup>th</sup> Conference on the Computation of Electromagnetic Fields – COMPUMAG, Sapporo, Japan, vol. 1, pp. 276-277, October 1999.

- [70] Mamis, M.S., Köksal, M., "A new lumped parameter model for frequency dependent transmission lines(in Turkish)", Proceedins of the 7<sup>th</sup> National Congress on Electrical-Electronics-Computer Engineering, v. 2, pp. 587-590, METU, Ankara. Sept. 8-14, 1997.
- [71] V. Jankov, "Estimation of the maximal voltage induced on an overhead line due to the nearby lightning." IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, no.1, January 1997, pp. 315-324.
- [72] C. A. Nucci, Task Force 33.01.01 of Study Committee 33, "Lightning induced overvoltages on overhead power lines. Part II: Coupling models for the evaluation of the induced voltages" ELECTRA no.162, October 1995, pp. 121-145.
- [73] J. O. S. Paulino, I. J. S. Lopes, W. C. Boaventura and J. Pissolato Filho. "Lightning induced overvoltages on distribution lines with shield wire." Proceedins of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Rome, vol. 2, pp. 761-766, September 1994.
- [74] S. Rusck, "Induced lightning over-voltages on power transmission lines with special reference to over-voltage protection of low voltage network." Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 1957.
- [75] Microtran Power System Analysis Corporation, Transients Analysis Program Reference Manual, Vancouver, Canada 1992.
- [76] M.S. Mamis and A. Nacaroglu, "Voltage and current distributions on transmission lines," IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol. 149 (6), pp. 705-712, 2002.
- [77] M.S. Mamiş and M. Köksal, "Lightning surge analysis using nonuniform, single-phase line model", IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, Vol. 148, Issue 1, pp.85-90, January 2001.
- [78] M. S. Mamiş and M. Köksal, "Solution of eigenproblems for state-space transient analysis of transmission lines", Electric Power Systems Research, vol. 55: (1), pp. 7-14, Jul 5, 2000 .
- [79] M. S. Mamiş, "Transient analysis of transmission systems involving nonlinear components", Colloquium of Turkish National Control Comity TOK'2002, Ankara.
- [80] R. H. Golde, "Lightning Surges on Overhead Distribution Lines Caused by Indirect and Direct Lightning Strokes", AIEE Trans., Vol. 61, pp. 916-930, 1942.
- [81] P. Chowdhuri, "Parametric Effects on the Induced Voltages on Overhead Lines by Lightning Strokes to Nearby Ground", Trans. On Power Delivery, Vol. PWRD-4, No. 2, pp.1185-1194, April 1989.
- [82] Singarajah, C., "Surges induced on overhead transmission lines by indirect lightning strokes", with particular reference to Nigeria, Ph.D. Thesis, Univ. Of London, september 1971.

- [83] Dommel, H.W., "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks", IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems Vol. PAS-88, No. 4, pp. 388-399, 1969.
- [84] Dommel, H.W., EMTP Theory Book, 2nd edn., Microtran Power system Analysis Corporation, Vancouver, B.C., Canada, pp. 4-94 to 4-96, 1992.
- [85] Marti, J.R., 1982, Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulation, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-101, No. 1, pp. 147-157.



```

$ === End of level 2: Switches and piecewise linear elements =====
*
* . . . . . Voltage or current sources
13 DUGY-1 8.0 1.0E-6 50.0E-6
$ === End of level 3: Sources =====
*
* . . . . . Voltage-output nodes
DUG3 DUG4 DUGY
$ === End of level 4: User-defined voltage output =====
$ === Level 5: End of data case =====

```

## **EK 2: Matlab Programı İle $T_i$ ve $T_e$ Matrisleri Ve Karakteristik Empedansların Bulunması:**

```

s=j*2*pi*50e-4;
L=10; %hat uzunluğu km
h1=10.0; %1.hattın yüksekliği m
h2=10.0; %2.hattın yüksekliği
R1=0; %ohm/km
R2=0; %ohm/km
GMR1=0.00874; %1.iletkenin yarıçapı m
GMR2=0.00874; %2.iletkenin yarıçapı m
dik=10000; %iki iletken arası uzaklık m
Dik=sqrt((dik^2+(2*h1)^2));
p11=18e+6*(log(2*h1/GMR1));
p22=18e+6*(log(2*h2/GMR2));
p2=18e+6*(log(Dik/dik));
z11=R1+2*s*(log(2*h1/GMR1));
z22=R2+2*s*(log(2*h2/GMR2));
z2=2*s*log(Dik/dik);

P=[p11,p2;p2,p22];
Y=j*2*pi*50*inv(P);
Z=[z11,z2;z2,z22];
[Ti,Di]=eig(Y)
[Te,De]=eig(Z);
[Tie,Die]=eig(Z*Y);

```

```
Zo=eig(sqrt(inv(Y)*Z));
```

```
zo1=Zo(1,1)
```

```
zo2=Zo(2,1)
```

### EK 3: Örnek 2 için EMTP programı

```
*
* . . . . . Case identification card
iki hat sistem
*
* . . . . . Time card
0.01e-6 10.0e-6
*
* . . . . . Constant-parameters line (Standard precision)
-1 duga dugb .0 812.03.0e+8 10000 1 2
-2 dugc dugd .0 223.03.0e+8 10000 1

0.7071 -0.7071
0.7071 0.7071
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
$ === End of level 2: Switches and piecewise linear elements =====
*
* . . . . . Voltage or current sources
15 duga-2 1.0 1.0e-6 50.0e-6
$ === End of level 3: Sources =====
*
* . . . . . Voltage-output nodes
duga dugc
$ === End of level 4: User-defined voltage output =====
$ === Level 5: End of data case =====
```

#### EK 4: Örnek 3 için EMTP programı

```
*
* . . . . . Case identification card
iki iletkenli sistem
*
* . . . . . Time card
0.01e-6 10.0e-6
*
* . . . . . Constant-parameters line (Standard precision)
-1 duga dugb .0 352.03.0e+8 1500 1 2
-2 dugc dugd .0 530.03.0e+8 1500 1
0.9846 0.1747
-0.1747 0.9846
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements ==
$ == End of level 2: Switches and piecewise linear elements ==
*
* . . . . . Surge function
15 duga-2 1.0 1.0e-6 50.0e-6
$ == End of level 3: Sources ==
*
* . . . . . Voltage-output nodes
duga dugb dugc dugd
$ == End of level 4: User-defined voltage output ==
$ == Level 5: End of data case ==
```

#### EK 5: Örnek 4 için EMTP programı

```
*
* . . . . . Case identification card
iki hat sistem
*
* . . . . . Time card
0.01e-6 10.0e-6
*
* . . . . . Constant-parameters line (Standard precision)
-1 duga dugb .0 190.03.0e+810000 1 2
-2 dugc dugd .0 752.03.0e+810000 1
0.7071 0.7071
-0.7071 0.7071
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements ==
$ == End of level 2: Switches and piecewise linear elements ==
*
```

```

* . . . . . Voltage or current sources
15 duga-2    1.0  1.0e-6  50.0e-6
$ === End of level 3: Sources =====
*
* . . . . . Voltage-output nodes
  duga dugc
$ === End of level 4: User-defined voltage output =====
$ === Level 5: End of data case =====

```

### EK 6: Örnek 5 için EMTP programı

```

.*
* . . . . . Case identification card
  iki iletkenli sistem
*
* . . . . . Time card
  0.01e-6  10.0e-6
*
* . . . . . Constant-parameters line (Standard precision)
-1 duga dugb      .0 194.03.0e+8 10000 1  2
-2 dugc dugd      .0 202.03.0e+8 10000 1
   0.7071   0.7071
   -0.7071   0.7071
$ == End of level 1: Linear and nonlinear elements =====
$ === End of level 2: Switches and piecewise linear elements =====
*
* . . . . . Voltage or current sources
15 duga-2    1.0  1.0e-6  50.0e-6
$ === End of level 3: Sources =====
*
* . . . . . Voltage-output nodes
  duga dugc
$ === End of level 4: User-defined voltage output =====

```

\$ === Level 5: End of data case =====

## EK 7: Yakın Yıldırım Akımı Hesaplamalar İçin Rusck Modeli Matlab Programı (Örnek 6 için):

```
Zo=400; %karakteristik empedans (ohm)
Im=20; %yıldırım akımı (kA)
h=10; %iletkenin yerden yüksekliği (m)
y=100; %yıldırımın düştüğü nokta ile iletken arası dik mesafe(m)
v=1.5e+8; %dalğanın hızı (m/s)
c=3e+8; %ışık hızı (m/s)
β=v/c;
CFO=200 %kritik atlama gerilimi (kV)
Vmax=60*Im*h/y*(1+β/sqrt(2-β^2)) %Maximum voltaj (kV)
Vbase=Zo*(1+β/sqrt(2-β^2))%yerden 1 adım yüksekteki iletkende 1 adım
uzaktaki 1kA akımın indüklediği gerilim
y=Vbase*Io*h/CFO %yakın yıldırım kuvveti için kritik mesafe(m)
```

## EK 8: İndüklenen Gerilimin Matlab'da Yaklaşık Hesaplanması (Örnek 6 için):

Burada yazılan program ile EMTP'de bulunan indüklenme geriliminin değeri Matlab'da elde edilmeye çalışılmıştır. Örnek 6 için Matlab programı aşağıda verilmiştir;

```
f=50; %Hz
w=j*2*pi*50;
μ0=4*pi*1e-7 %H/m
GMRi=0.0373 %m
h1=10; %m
h2=10; %m
L=1.5; %km
dik=100; %m
Dik=sqrt((dik^2+(2*h1)^2)); %m
M=μ0/(2*pi)*log(Dik/dik)*1000 %H/m
tmax=10e-6; %s
N=500;
Dt=tmax/N;
for i=1:N;
tv(i)=i*Dt;
I(i)=1.0*(exp(-1.5e4*tv(i))-exp(-6e6*tv(i)));
d(i)=6e6*exp(-6e6*tv(i))-1.5e4*exp(-1.5e4*tv(i));
Uv(i)=M*d(i);
plot(tv,Uv)
end
```

## ÖZGEÇMİŞ

1969 yılında Baskil'de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Malatya'da tamamladı. 1988 yılında girdiği İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümünden 1993 yılı Güz döneminde mezun oldu. 1993 yılında TÜMAŞ'ta görev yaptı. 1993 yılı Ekim ayında girdiği Tekel Malatya Sigara Fabrikası'nda 1996-2002 yılları arası Bakım Şefi, 2002 yılından beri İşletme Şefi ve Başmühendis olarak çalışmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.