

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

**YILDIRIM ELEKTROMANYETİK DARBELERİNİN YÜKSEK GERİLİM
ELEKTRİK TESİSLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Turan ÇAKIL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

2017

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

**YILDIRIM ELEKTROMANYETİK DARBELERİNİN YÜKSEK GERİLİM
ELEKTRİK TESİSLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Turan ÇAKIL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

2017

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

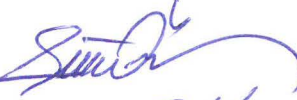
YILDIRIM ELEKTROMANYETİK DARBELERİNİN YÜKSEK GERİLİM
ELEKTRİK TESİSLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Turan ÇAKIL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez ~~10/07~~2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği/~~Oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN



Prof. Dr. Selçuk ÇÖMLEKÇİ



Yard. Doç. Dr. Feza CARLAK



ÖZET

YILDIRIM ELEKTROMANYETİK DARBELERİNİN YÜKSEK GERİLİM ELEKTRİK TESİSLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Turan ÇAKIL

**Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN
Haziran 2017, 90 sayfa**

Tüm Dünyada ve Türkiye’de enerji sisteminin beyni üretimden tüketime giden süreçte Yüksek Gerilim enerji tesisleridir. Yıldırım elektromanyetik darbeleri (YEMD) kaynaklı harmonikler ve arızalar yüksek gerilim sisteminin tümünde büyük zararlara sebebiyet vermekte ve aynı zamanda oluşan kalıcı arızalardan ötürü enerji tüketiminde aksamalara neden olmaktadır. Bu arızaların önüne geçmek için önleyici tedbir olarak ilk etapta Yüksek Gerilim (YG) sistemlerinin, diğer benzetim programları ile modellenip analiz edilmiş ve bu analiz sonuçlarına göre alınabilecek tedbirler araştırılmıştır.

Bu temelde, tez çalışması MATLAB ile enerji iletim hatlarında ve bu hatlarla ilişkili tesislerde YEMD kaynaklı oluşabilecek elektriksel arızaların analizi ve etkilerinin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu konuda uluslararası literatürde çok az sayıda çalışma yer almakta olup, ulusal düzeyde önerilen kapsamda yapılmış detaylı bir araştırma bulunmamaktadır. Yapılan çalışmalarda analitik ve analitik yöntemler tekil olarak kullanılmış olup, reel hat verilerine dayanan model ve benzetim çalışmaları yetersizdir. Tez çalışmasında MATLAB, EMTP gibi diğer benzetim programları ile gerçek zamanlı transient analizlerin yapılmış olması çalışmanın özgün değerini oluşturmuştur. Çalışma sayesinde daha basit ve pratik bir matematiksel modelleme geliştirilmeye çalışılmış, elde edilen yazılımlar ile ulusal şebekede YEMD kaynaklı arızaların çözümüne önemli derecede kolaylık sağlanmıştır. Elde edilen matematiksel model ve blok modelleri bu alanda yürütülecek ileri araştırmalara ışık tutacak olmakla birlikte, çalışma sonuçlarının uluslararası literatürde yer alması bakımından da bir yenilik olarak görülmektedir. Ayrıca YEMD analizi sonucu elde edilen benzetim modellerinin gelişmekte olan akıllı şebeke çalışmalarına da katkı sağlayacağı beklenmektedir.

Çalışmada, ülkemizde ulusal enerji ağında kullanılan enerji nakil hatları incelenmiştir. Bu incelemeler yapılırken Türkiye Elektrik İletim A.Ş (TEİAŞ) den temin edilen veriler temel alınmıştır. YEMD matematiksel modelleri oluşturularak enerji iletim hatlarında ve yüksek gerilim şalt tesislerinde YEMD sonucu oluşabilecek aşırı akım ve gerilimlerin kolayca hesaplanması sağlanmıştır. EMTP-ATP programı ile de ulusal enerji hat şemaları göz önüne alınarak modellenen YG sistemi ise benzetim analizleri olarak gerçekleştirilmiştir. Bu analitik ve benzetim çözümlerinde, hattın tipine, iletken kesitine ve hattın geçtiği bölgedeki şartlar da göz önüne alınmıştır. Bu analizler gerçekleştirilirken, iletkenlerin çapı, hat yükü, iletkenlerin akım taşıma kapasitesi, gerilim seviyesi, hattın geçtiği bölgenin yapısı, direklerin ve şalt sahasının topraklanması gibi birçok parametreye bağlıdır. Bütün dünyada YEMD kaynaklı arızaların engellenmesi için yapılan çalışmaların son zamanlarda artması, enerji nakil hatları kaynaklı arızaların belirlenmesine dönük çalışmaları da hızlandırmıştır. Ayrıca enerji nakil hatları ile ilgili olarak akıllı sistemlerin kullanılması temeline dayanan çok az sayıda çalışma bulunmakta

olup, bu çalışmalar daha çok enerji kalitesi ve harmoniklerin (FFT) analizi gibi konularda yoğunlaşmıştır. Tez çalışmasında enerji nakil hatlarında oluşabilecek hata analizleri yapılmış, sonuçlar analitik hesaplar ile karşılaştırılmıştır.

Bu şekilde daha basit ve pratik bir matematiksel modelleme geliştirilmeye çalışılacak, elde edilecek yazılımlar ile ulusal şebekede YEMD kaynaklı arızaların çözümüne önemli derecede kolaylık sağlanması hedeflenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: YEMD, Transient Analiz, Matlab, Emtp-Atp, YG ve AG Sistemleri

JÜRİ: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN (Danışman)
Prof. Dr. Selcuk ÇÖMLEKÇİ
Yard. Doç. Dr. Feza CARLAK

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF LIGHTNING ELECTROMAGNETIC STRUCTURES ON HIGH VOLTAGE ELECTRICAL FACILITIES

Turan CAKIL

MSc Thesis in Electrical-Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Sukru OZEN

June 2017, 90 pages

High Voltage energy installations in the process of consuming the energy system in the whole world and Turkey from the production of the brain. Harmonics and failures originating from lightning electromagnetic pulses (LEMP) cause large losses in the whole of the high voltage system and cause disruption in energy consumption due to permanent failures at the same time. As a precautionary measure to avoid these failures, it is aimed to model and analyse High Voltage (HV) systems with MATLAB and other simulation programs in the first place and to define correct measures according to these analysis results.

On this basis, it is aimed to minimize the analysis and effects of electrical failures, which may occur due to LEMP in the thesis study and in energy transmission lines and related facilities. There are few studies in the international literature and there is no detailed research on the national level. Analytical and numerical methods are used singularly in the studies that are done; model and simulation studies based on real line data are insufficient. In the thesis study, real-time transient analysis with other simulation programs such as MATLAB, EMTP has created the original value of the study. Through the study, a simpler and more practical mathematical modelling has been tried to be developed, and with the obtained software, the solution of the failures originating from the YEMD in the national network has been facilitated considerably. The mathematical model and block models obtained will be shed light on the future research that will be carried out in this area and it is seen as an innovation in terms of the fact that the study results are included in the international literature. Moreover, it is expected that the simulation models obtained because of LEMP analysis will also contribute to the development of smart grid.

In the study, the energy transmission lines used in the national energy network are examined in our country. When these examinations are made, the data to be supplied by Turkish Electricity Transmission Company (TEIAS) is taken as basis. Mathematical modelling of LEMP was created in MATLAB environment and it was possible to easily calculate the over currents and voltages that could occur in LEMP results in energy transmission lines and high voltage switchgear installations. With the EMTP-ATP program, the HV system modelled by taking into account the national energy line schemes was implemented as a simulation analysis. In these analytical and simulation solutions, the type of the line, the cross-section of the conductor and the conditions in the region where the line passes are taken into consideration. These analyses depend on many parameters such as the diameter of the conductors, the line load, the current carrying capacity of the conductors, the voltage level, the structure of the line the line passes

through, and the grounding of the poles and switchgear. The recent increase in work done to prevent failures originating from LEMP in all over the world has also accelerated the work towards determining failures originating from energy transmission lines. In addition, there are very few studies based on the use of intelligent systems for energy transmission lines, and these studies are more focused on such issues as the analysis of energy quality and harmonics (FFT). In the thesis study, error analysis, which can occur in energy transmission lines, was made and results were compared with analytical calculations.

In this way, it is aimed to provide a simpler and more practical mathematical modelling with considerable ease in solving the failures originating from LEMP in the national network with the software to be obtained.

KEYWORDS: LEMP, Transient Analyses, Matlab, Emtp-Atp, HV and LV Systems

COMMITTEE: Prof. Dr. Sukru OZEN (Supervisor)
Prof. Dr. Selcuk CÖMLEKÇİ
Assist. Prof. Dr. Feza CARLAK

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, yıldırım elektromanyetik darbeleri hakkında yapılmış analizler sonucunda elde edilen bilgiler sunulmuştur. Bu çalışma alanının seçilme nedeni ise bu konuda uluslararası literatür de çok az sayıda çalışma yer almakta olup, ulusal düzeyde önerilen kapsamda yapılmış detaylı bir araştırma bulunmamaktadır. Yapılan çalışmalarda analitik yöntemler tekil olarak kullanılmış olup, reel hat verilerine dayanan model ve benzetim çalışmaları yetersiz olduğundandır. Bu çalışmayı yapmakta ki bir diğer neden ise yıldırım elektromanyetik darbelerinin elektrik tesislerine en çok zarar veren durumlardan biri olmasıdır. Elde edilen matematiksel model ve blok modelleri bu alanda yürütülecek ileri araştırmalara ışık tutacaktır. Ayrıca bu çalışma sonucu elde edilen benzetim modellerinin gelişmekte olan akıllı şebeke çalışmalarına da katkı sağlayacağı beklenmektedir.

Bu çalışmaya beni yönlendiren ve çalışmanın hazırlanma sürecinin her aşamasında bilgilerimi, tecrübelerini ve değerli zamanlarını esirgemeyerek bana her fırsatta yardımcı olan, akademik alanda da kendimi geliştirmeme yardımcı olan çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Şükrü Özen' e de teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca maddi ve manevi desteğini her an yanımda hissettiğim aileme, arkadaşlarıma ve Kemal Ünal Akdemir arkadaşşıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. YEMD Kaynaklı Aşırı gerilimlere Dair Yapılan Master Çalışmalar	1
2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI	3
2.1. YEMD Kuramı	3
2.1.1. YEMD tipleri	3
2.1.2. YEMD oluşma süreci	3
2.1.2.1. Elektrostatik indüksiyon	4
2.1.2.2. Elektromanyetik indüksiyon	5
2.1.3. YEMD kanalı	5
2.2. Direkt Ve Endirekt YEMD Hareketleri Arasındaki Fark	6
2.2.1. Direkt YEMD darbesi	6
2.2.2. Endirekt YEMD darbesi.....	6
2.3. YEMD Kaynaklı Problemler	7
2.3.1. İletim hatlarında oluşan aşırı gerilimler	7
2.3.1.1. YEMD’ in hatta yakın düşmesi sonucu indüklenmiş aşırı voltaj.....	7
2.3.1.2. YEMD’ in koruma iletkenine düşmesi sonucu indüklenmiş aşırı voltaj ...	7
2.3.1.3. YEMD’ in faz iletkenine düşmesi sonucu indüklenmiş aşırı voltaj.....	7
2.3.2. Zeminde (Toprakta) oluşan potansiyel artış.....	8
2.4. YEMD Kaynaklı Aşırı Gerilimi Etkileyen Faktörler.....	9
2.4.1. Çok iletkenli direkler	9
2.4.2. Topraklama kablosu ve koruma iletkeni	10
2.4.3. Zemin (Yer) iletkenliği	10
2.4.4. YEMD’ in düştüğü noktanın konumu.....	10
2.4.5. Enerji nakil hatlarının yüksekliği	10
2.4.6. Enerji nakil hatlarının uzunluğu.....	10
2.4.7. Korona etkisi	10
2.5. YEMD Parametreleri	11
2.5.1. Başlangıç zamanı	11
2.5.2. Sönümlenme zamanı	11
2.5.3. Akım genliği	11
2.5.4. YEMD filizinin hızı	11
3. MATERYAL VE METOT	12
3.1. YEMD’ in Güç Hatlarında Oluşturduğu Aşırı Gerilimin İncelenmesi	12
3.1.1. Yıldırım elektromanyetik darbe akım modelleri.....	12
3.2. Mühendislik Modelleri.....	13
3.2.1. Bruce-Golde (BG) modeli.....	13
3.2.2. Enerji nakil hattı (ENH) modeli.....	14
3.2.3. Hareketli akım kaynağı (HAK) modeli.....	15
3.2.4. Değişken iletim hattı modeli	15

3.2.5. Üstel azaltma yöntemi ile değiştirilen iletim hattı modeli	16
3.3. YEMD Kanalının Akım Tespiti İçin Kullanılan Modeller	17
3.3.1. Bruce ve Golde modeli.....	17
3.3.2. Pierce ve Cianos (PC) modeli	18
3.3.3. Heidler modeli.....	19
3.4. Modellerin Doğruluğunun Tespiti	20
3.4.1. Tipik yansıyan darbe yaklaşımı	21
3.5. Kublaj Modelleri	21
3.5.1. Rusk modeli	23
3.5.2. Taylor modeli	24
3.5.3. Agrawal modeli.....	25
3.5.4. Rachidi modeli	26
3.5.5. Chowdhuri modeli.....	27
3.5.6. Kublaj modellerine genel bakış.....	28
3.6. Endirekt YEMD Kaynaklı Aşırı Voltaj Hesaplamaları	28
4. BULGULAR	31
4.1. YEMD'in Enerji Tesislerinde Meydana Getirdiği Geçici Olayların Analizi ve Koruma Önlemleri	32
4.1.1. Teorik analiz ve prototip modeli	32
4.1.2. Enerji tesislerinin YEMD' den korunma yöntemleri	33
4.1.2.1. Parafudurların yapısı ve modeli	33
4.1.3. Enerji Tesisi ve enerji nakil hatlarının ATP-EMTP modeli	34
4.1.3.1. Enerji nakil hatlarının modeli	35
4.1.3.2. Yüklerin modellenmesi	35
4.1.4. Yıldırım elektromanyetik darbesinin enerji tesislerinde meydana getirdiği geçici olayların analiz sonuçları	35
4.1.4.1. Senaryo I	35
4.1.4.2. Senaryo II.....	39
4.2. Direk Tiplerine Göre Enerji Nakil Hatlarında YEMD Düşmesi Sonucunda Transient Analizi	43
4.2.1. 380 kV' lık iletim hattının karakteristik özelliği.....	44
4.2.2. YEMD modeli.....	44
4.2.3. Yüksek gerilim taşıyan enerji nakil hatlarında kullanılan direk modelleri ...	45
4.2.3.1. Çatal pylon direk modeli.....	46
4.2.3.2. Basit ve çok katlı pylon direk modeli	47
4.2.4. Uygulama ve analiz.....	48
4.3. Enerji Nakil Hatlarına YEMD Düşmesi Sonucunda İzolatörlerde Gerilim Dağılımı Ve Korunma Prensipleri.....	52
4.3.1. İzolatörlere laboratuvar ortamında yapılan gerilim testleri.....	53
4.3.1.1. Up-Down testi	54
4.3.1.2. Gelişmiş Up-Down testi	54
4.3.1.3. Çok seviyeli testler	54
4.3.2. Teorik analiz ve prototip model	54
4.3.3. Uygulama ve analiz.....	56
4.4. Enerji Tesislerinde Kullanılan Parafudurların Koruma Davranışı.....	58
4.4.1. Aşırı gerilimlere karşı koruma ekipmanları	58
4.4.1.1. Birincil (Primer) koruma cihazları	59
4.4.1.2. İkincil (Sekonder) koruma cihazları.....	59

4.4.2. Koruma modları	59
4.4.3. Parafudurların koruma ömrü.....	59
4.4.4. Parafudurların aktif koruma koordinasyonu	59
4.4.5. Parafudurların çalışma prensibi	60
4.4.6. Parafudurların seçimi	60
4.4.7. Koruma seviyesi seçimi	60
4.4.8. Parafudur yerleşiminde kullanılan modeller	61
4.4.8.1. Frekansa bağlı model (IEEE modeli).....	61
4.4.8.2. Fernandez & Diaz modeli	61
4.4.8.3. Pinceti modeli	62
4.4.9. Parafudur modellerinin doğrulanması ve analizi	63
4.5. YEMD Kaynaklı Aşırı Gerilimlerin Hesaplarına İlişkin Analitik Bulgular	68
4.5.1. Rusk formülasyonu	68
4.5.1.1. Rusk' a göre YEMD'in oluşturduğu elektromanyetik alan	68
4.5.1.2. Rusk' a göre alanlar ile hat arasında ilişki	73
4.5.2. Liew ve Mar formülasyonu.....	76
4.5.2.1. YEMD kanalı boyunca akan akım nedeniyle indüklenen gerilim	76
4.5.3. Tam kapalı formülasyon çözümleri	77
4.5.3.1. YEMD filizinin başlangıçta yüksüz kanalında oluşan elektrik alan değişimi	78
4.5.3.2. YEMD filizinin başlangıçta yüklü kanalında oluşan elektrik alan değişimi	79
5. TARTIŞMA	81
6. SONUÇ	83
7. KAYNAKLAR	84
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

c: Boşlukta ışık hızı

c': Birim uzunluk başına kapasite değeri

d: YEMD kanalı ile hat arasındaki yatay mesafe

E_r : Elektrik alanın radyal bileşeni

E_x : Elektrik hattının x eksenindeki elektrik alan bileşeni

E_z : Elektrik alanın düşey bileşeni

H: Hat uzunluğu

H_y : Manyetik alanın y bileşeni

H_ϕ : Manyetik alanın açılma bileşeni

$i(x,t)$: Hat boyunca bulunan akım

I_0 : Yansıyan darbenin tepe akımı

L', l' : Birim uzunluk başına endüktans değeri

L: Hat uzunluğu

Q: yüklenme dağılımı

R: Kaynak noktası mesafesine olan uzaklığı

T: L/c

$u(t)$: Birim fonksiyon

v: YEMD filizinin hızı

$v(x,t)$: Hat boyunca bulunan gerilim

$u(x,t)$: Hat boyunca bulunan gerilim

z' : Kaynak noktasına dikey uzaklık

Z_c : Hattın karakteristik empedansı

β : v/c (Bağıl Hız)

γ : $1/\sqrt{1-\beta^2}$

δ : $\sqrt{d^2 + x^2} / \gamma$

δ_1 : $\sqrt{d^2 + x_1^2} / \gamma$

ϵ_0 : Dielektrik sabiti

μ_0 : boşluğun (uzay) manyetik geçirgenliği

τ : $\beta \cdot c \cdot t - h$

τ_m : $\beta \cdot (c \cdot t - x) - h$

τ_p : $\beta \cdot (c \cdot t - x) + h$

ζ_0, Z_0 : Boşluğun (uzay karakteristik) empedansı

C_1 : Bulut ve hat arasındaki kapasitans

C_2 : Hat ve toprak arasında kapasitans

V: Yerdeki potansiyel artışı

xx: YEMD filizinin düştüğü yere olan uzaklık

RLC: YEMD filizinin yansıyan akımı için dağıtılmış devre modelinde, direnç, endüktans ve kapasitans

$i(z',t)$: YEMD kanalı boyunca akım

z' : YEMD kanalı boyunca herhangi bir noktada yükseklik

t: Zaman

I_u : Uniform yapısında akım

i_p : Bir arıza darbe akım

λ_p :Arıza darbe akımının bozunma sabiti
 λ_c :Korona akımının bozunma sabiti
 λ : Bozunma sabiti
 i_c : Korona akımı
 z' :Korona kaynağından herhangi bir noktadaki yüksekliği
 i_{cs} :Korona kaynaklı oluşan akım
 v^* :Akım dalgasının yayılma hızı
 ϕ : Darbenin düştüğü hattın olduğu bölgedeki skaler potansiyel
 ϕ^i : Toplam uyarılmış skaler potansiyeldir
 E_z^i : Elektrik alanın dikey bileşeni
 B_y^i : Transvers kaynaklı manyetik indüksiyon alanı
 E_x^i : Elektrik alanın yatay bileşeni
 u^s : Saçılan voltaj
 E_z^s : Saçılan elektrik alanın dikey bileşeni
 u^i : Olay voltajı
 i^s : Saçılan akım

Kısaltmalar

YEMD: Yıldırım elektromanyetik darbe
NEMD: Nükleer elektromanyetik darbe
YG: Yüksek gerilim
OG: Orta gerilim
TPA: Toprak potansiyel artışı
EMTP: Elektromanyetik transient programı
ATP: Alternatif transient programı
BG: Bruce ve Golde modeli
ENH: Enerji nakil hattı (iletim hattı)
HAK: Hareketli akım kaynağı modeli
DEİH: Değiştirilmiş enerji nakil hattı modeli
DU: Diendorfer-Uman modeli
PC: Pierce ve Cianos modeli
LEMP: Lightning electromagnetic pulses
ICLRT: International center for lightning research and testing
IEEE: Institute of electrical and electronics engineers
TEİAŞ: Türkiye elektrik iletim anonim şirketi
TEDAŞ: Türkiye elektrik dağıtım anonim şirketi
TM: Transformatör merkezi
MOV: Metal oksit varistör
IEC: Uluslararası elektroteknik komisyonu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Bir doğa olayı olan yıldırımın görünümü	1
Şekil 2.1. Farklı sıcaklıkta indüklenen yükler	3
Şekil 2.2. Elektriksel Potansiyelin hesaplanmasını gösteren kapasitans yapı	4
Şekil 2.3. Elektrostatik indüksiyon süreçleri.....	5
Şekil 2.4. Elektromanyetik indüksiyonun oluşum süreci.....	5
Şekil 2.5. Yıldırım kanalının yayılımı.....	6
Şekil 2.6. YEMD filizinin vuruş ve iletim hattının geometrisi	7
Şekil 2.7. Zeminde oluşan potansiyel artış.....	8
Şekil 2.8. YEMD filizinin vuruş ve iletim hattının geometrisi	9
Şekil 3.1. YEMD yansıyan darbe modeli.....	12
Şekil 3.2. BG modeline göre kanalda ilerleyen akım modeli	13
Şekil 3.3. BG modeline göre kanalda ilerleyen çift darbeli akımın değişimi	14
Şekil 3.4. ENH modeline göre kanalda ilerleyen akım modeli.....	14
Şekil 3.5. HAK modeline göre kanalda ilerleyen YEMD akımın değişimi.....	15
Şekil 3.6. Kanalda ilerleyen YEMD akımın değişimi.....	16
Şekil 3.7. BG modelinin YEMD kanal tabanında oluşan akımın değişimi	17
Şekil 3.8. PC modeline göre YEMD kanal tabanında oluşan akımın değişimi	18
Şekil 3.9. Heidler modeline göre YEMD kanal tabanında oluşan akımın görüntüsü.....	19
Şekil 3.10. Heidler' a göre YEMD kanal tabanında oluşan akımın detaylı görünümü ..	20
Şekil 3.11. Nucci görüşüne göre YEMD kanal tabanında oluşan akımın görüntüsü.....	20
Şekil 3.12. Kublaj Modeli	21
Şekil 3.13. Tipik düşey elektrik alan yoğunluğu ve yatay manyetik akı yoğunluğu	22
Şekil 3.14. Rusck modeli ile iletim hattının kublaj devresi	24

Şekil 3.15. Taylor, Satterwhite ve Harrison modelinin iletim hattı kublaj devresi.....	25
Şekil 3.16. Agrawal modelinin eşdeğer kublaj devresi.....	26
Şekil 3.17. Rachidi modelinin eşdeğer kublaj devresi	27
Şekil 3.18. Chowdhuri modelinin eşdeğer kublaj devresi	28
Şekil 3.19. YEMD aşırı gerilimin hesaplanması için problemin geometrisi	29
Şekil 3.20. 1 km uzunluğunda ve 10 m yüksekliğindeki bir havai hat üzerinde endirekt olarak YEMD kaynaklı aşırı gerilimler	30
Şekil 4.1. YEMD darbesi matematiksel modeli.....	32
Şekil 4.2. YEMD darbesinin ATP-EMTP simülasyonunda ki dalga formu.....	32
Şekil 4.3. ATP programındaki ABB- ELK14 tipi parafudurun I-V karakteristik grafiği	33
Şekil 4.4. Modellemede kullanılan YG şebekesinin tek hat diyagramı	34
Şekil.4.5. YG güç şebekesinin ATP-EMTP modeli.....	35
Şekil.4.6. I. Senaryoya göre TM'ye 20 km de YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilim.....	36
Şekil 4.7. I. Senaryoya göre Yük1'in bağlı olduğu bara da YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilim	36
Şekil 4.8. I. Senaryoya göre ana bara da YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilim	37
Şekil 4.9. I. Senaryoya göre koruma iletkeninde indüklenen YEMD kaynaklı kısa süreli oluşan aşırı gerilim	37
Şekil 4.10. Güç şebekesine düşen YEMD darbesinin enerji kapasitesi.....	38
Şekil 4.11. I. Senaryoya göre Yük2'in bağlı olduğu bara da YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilim.....	38
Şekil 4.12. I. Senaryoya göre Yük3'ün bağlı olduğu bara da YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilim.....	39
Şekil 4.13. I. Senaryoya göre hattın sonunda oluşan YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilim	39
Şekil 4.14. II. senaryoya göre TM'ye 20 km uzakta YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilimin filtre edilmesi.....	40

Şekil 4.15. II. senaryoya göre Yük1'in bağlı olduğu YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilimin filtre edilmesi.....	40
Şekil 4.16. II. senaryoya göre ana bara da YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilimin filtre edilmesi	41
Şekil 4.17. II. senaryoya göre koruma iletkeninde indüklenen YEMD kaynaklı kısa süreli oluşan aşırı gerilim.....	41
Şekil 4.18. II. senaryoya göre Yük2'nin bağlı olduğu YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilimin filtre edilmesi.....	42
Şekil 4.19. II. senaryoya göre Yük3'ün bağlı olduğu YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilimin filtre edilmesi.....	42
Şekil 4.20. II. Senaryoya göre hattın sonunda oluşan YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilimin filtre edilmesi.....	43
Şekil 4.21. ATP-EMTP programında YEMD.....	45
Şekil 4.22. Çalışmada kullanılan YEMD akımının şekli	45
Şekil 4.23. Çatal Pilon direğin görünümü (154 kV)	46
Şekil 4.24. Çatal Pilon direk modelinin ATP-EMTP' deki modeli (154 kV için).....	46
Şekil 4.25. Basit Pilon direğin görünümü (380 kV).....	47
Şekil 4.26. Basit Pilon direğin ATP-EMTP' deki modeli (380 kV için).....	47
Şekil 4.27. Çok katlı Pilon direğin eşdeğer devre modeli ve ATP-EMTP' deki modeli	48
Şekil 4.28. 380 kV gerilime sahip basit pilon direğin koruma iletkenine YEMD düşmesi durumunda fazlar üzerinde oluşan gerilimler	49
Şekil 4.29. 380 kV gerilime sahip basit pilon direğin koruma iletkenine YEMD düşmesi durumunda izolatörler üzerinde oluşan gerilimler	49
Şekil 4.30. 380 kV gerilime sahip çok katlı pilon direğin koruma iletkenine YEMD düşmesi durumunda izolatörler üzerinde oluşan gerilimler	50
Şekil 4.31. 380 kV gerilime sahip çok katlı pilon direğin koruma iletkenine YEMD düşmesi durumunda fazlar üzerinde indüklenen gerilimler	50
Şekil 4.32. 154 kV gerilime sahip çatal pilon direğin koruma iletkenine YEMD düşmesi durumunda fazlar üzerinde indüklenen gerilimler	51

Şekil 4.33. 154 kV gerilime sahip çatal pylon direğın koruma iletkenine YEMD düşmesi durumunda izolatörler üzerinde oluşan gerilimler	51
Şekil 4.34. İzolatörlerde atlama gerilimi testi	53
Şekil 4.35. İzolatörlerde Kombine (birleşmiş) atlama gerilimi testi.....	53
Şekil 4.36. İzolatörlerin Voltaj Testi Devresi	55
Şekil 4.37. İzolatörün yapısı	55
Şekil 4.38. ATP-EMTP programında YG izolatörünün voltaj testi.....	56
Şekil 4.39. Farklı başlangıç açılarında (θ) ölçülen gerilim dalga şekilleri.....	56
Şekil 4.40. Farklı başlangıç açılarında (θ) ölçülen gerilim dalga şekilleri.....	57
Şekil 4.41. Farklı başlangıç açılarında (θ) ölçülen gerilim dalga şekilleri.....	57
Şekil 4.42. Farklı başlangıç açılarında (θ) ölçülen gerilim dalga şekilleri.....	58
Şekil 4.43. IEEE (frekansa bağılı) model.....	61
Şekil 4.44. Fernandez- Diaz Modeli	62
Şekil 4.45. Pinceti Modeli.....	62
Şekil 4.46. Parafudurların V-I karakteristiğı.....	63
Şekil 4.47. ATP-EMTP programında Pinceti Modeli.....	64
Şekil 4.48. Sisteme enjekte edilen akımın A0-A1 arasındaki oluşturduğu akım.....	64
Şekil 4.49. Sisteme enjekte edilen nominal deşarj akımına göre oluşan artık voltaj.....	65
Şekil 4.50. Sisteme enjekte edilen nominal deşarj akımına göre absorbe edilen enerji kapasitesi	65
Şekil 4.51. Sisteme enjekte edilen nominal deşarj akımı.....	66
Şekil 4.52. Sisteme enjekte edilen maksimum deşarj akımı	66
Şekil 4.53. Sisteme enjekte edilen maksimum deşarj akımına göre oluşan artık voltaj .	67
Şekil 4.54. Sisteme enjekte edilen maksimum deşarj akımına göre absorbe edilen enerji kapasitesi.....	67
Şekil 4.55. Parafudur modellerinin karşılaştırılması.....	67

Şekil 4.56. Rusk formülasyonuna göre sorunun geometrisi	68
Şekil 4.57. YEMD kanalı boyunca dağıtılan yüke bağlı olarak düşey elektrik alanın skaler bileşeni.....	71
Şekil 4.58. YEMD kanalı boyunca dağıtılan yüke bağlı olarak düşey elektrik alanın vektörel bileşeni	72
Şekil 4.59. YEMD kanalı boyunca dağıtılan yüke bağlı olarak Manyetik alan bileşeni	72
Şekil 4.60. Rusk bağlantı modelini temsil eden iletim hattı kesimi.....	73
Şekil 4.61. Rusk formülüne göre $x = 0'$ da indüklenen voltaj	74
Şekil 4.62. Rusk formülüne göre $x = 0'$ da indüklenen voltajın detaylı görünümü	75
Şekil 4.63. Liew ve Mar formülasyonuna göre sorunun geometrisi	75
Şekil 4.64. Rusck formülasyonunun da kabul edilen geri dönüş darbe akımı	77
Şekil 4.65. Liew ve Mar formülüne göre $x = 0'$ da indüklenen voltaj	77
Şekil 4.66. YEMD Olayları Modelleri.....	78
Şekil 4.67. YEMD kanalının başlangıçta yüksüz olması durumunda oluşan elektrik alan değişimi	78
Şekil 4.68. YEMD kanalının başlangıçta yüklü olması durumunda oluşan elektrik alan değişimi	80

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. BG ve Pierce, Caicos modellerinin kanal taban akımı için önerilen değerleri	18
Çizelge 4.1. İletim Hattının karakteristiği.....	44
Çizelge 4.2. Çalışmada kullanılan çatal pilon direğe ait boyut ölçümleri	46
Çizelge 4.3. Çalışmada kullanılan basit pilon direğe ait boyut ölçümleri	47
Çizelge 4.4. Hat gerilimine bağlı olarak koruma cihazları için gerekli olan gerilim.....	60
Çizelge 4.5. A0 ve A1 parafudurları için V-I karakteristiği parametreleri	63

1. GİRİŞ

Yıldırım, medeniyetin başlangıcından beri insanları hayrete düşüren doğal olaylardan biridir. İlk olarak 1847 yılında Benjamin Franklin, yıldırım flaşının elektriksel olarak yüklerin hareketlerinin bir sonucu olduğunu göstermek için uçurtma deneyini önerdi. O zamandan beri çeşitli deneyler ile bilim camiası, yıldırımın fiziksel mekanizmasını ve sonuçlarını anlamaya çalıştı. Günümüzde de güç sistemi alanında, yıldırım etkinliği dağıtım kalitesinde ciddi etkiler yaratan periyodik bozulmaların temel nedenlerinden biridir. Yüksek, orta ve düşük gerilim hatlarının çevrelerindeki yapılarla karşılaştırıldığında yükseklikleri daha belirgin olduğundan dolayı YEMD darbeleri doğrudan bu hatlara düşmektedir. Yıldırım olayının incelenmesinin nedeni de budur.



Şekil 1.1. Bir doğa olayı olan yıldırımın görünümü

1.1. YEMD Kaynaklı Aşırı Gerilimlere Dair Yapılan Master Çalışmalar

Günümüze kadar yıldırım ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Ama bu literatürün oluşmasına öncelik eden ana çalışmalar vardır. 1908 yılında K.W Wagner güç iletim hatlarında indüklenmiş yıldırım dalgalanmalarının ilk teorik araştırmasını gerçekleştirdi. Bu çalışmada yıldırım dalgalarının iletim hatlarına düşmesinin nedenleri teorik olarak belirtilmiştir (K. W. 1908). 1929’ da Bewley yıldırım kaynaklı indüklenmiş alanın anında kaybolamayacağını Wagner teorisi ile ortaya çıkarmıştır (L. Bewley 1929). 1935’ te Aigner tarafından yazılmış olan makale mevcut konuyla ilgili literatürde, yıldırım çarpması sonucu düşey yıldırım yolunun zemine indükleyici etkisinin hesaba katılmasını ilk kez dile getirmiştir (V. Aigner 1935). 1942’ de C. F. Wagner ve Mc. Cann uyarılan aşırı voltajlar hakkında bir bildiri yayınladılar. Bu yazıda Aigner tarafından yapılan

çalışmaya ek olarak yansıyan darbenin de yıldırım kanalında akım etkisi oluşturduğu gösterilmiştir. Ayrıca gök gürültüsü oluşmasında ortam sıcaklığının önemli bir parametre olduğunu da belirtmiştir (C. F. Wagner vd 1942).

1948’ de yayımlanan bir makalede Szpor, Wagner ve Mc Cann’ den farklı olarak daha karmaşık varsayımları kullanarak düşey yıldırım çarpması sonucu oluşan indüklenmiş gerilimleri hesaplamıştır. Szpor, elektrostatik indüksiyondan olduğu kadar manyetik etkinin de hesaba katılmasını söylemiştir. Bu sonuçların yıldırımın düştüğü noktaya yakın bölgeler için geçerli olduğunu belirtmiştir (S. Szpor 1948). 1954’ te Golde, güç iletim hatlarının arıza frekansı üzerine indüklenen voltajların etkisi ile ilgili bir araştırma yayınladı. İndüklenen gerilimlerin hesaplanmasında kullandığı varsayımlar Wagner ve Mc Cann’ inginden biraz farklıdır. Bununla birlikte farklı varsayımlar ile indüklenmiş gerilimlerin maksimum değeri arasındaki farkın küçük olduğunu tespit etmiştir. Analitik yöntemler ile gerçekleştirilen Golde hesabı, yalnızca skaler potansiyel olarak hesaplanır (R. Golde 1954). 1955 yılında R. Lundholm, Wagner ve Mc Cann’ ın varsayımları ile yaklaşık olarak kısa ve uzun menzile sahip yüksek gerilim (YG) taşıyan iletim hatlarındaki indüklenmiş voltajları hesapladı. İndüklenen gerilimin formülünü çıkarırken, Lundholm manyetik alanı ihmal etmiştir. Bununla teorik açıdan elde edilen sonuçlarla tatmin edici olmadığı gösterilmiştir (R. Lundholm 1955). 1958’ de Rusk, indüklenen voltajların kısa ve uzun menzile sahip, alçak gerilim (AG) taşıyan enerji nakil hatları (ENH) için hesaplamıştır. Hala önemli uluslararası standarda sahip ve kullanılan kapalı bir form ifadesi oluşturmuştur (S. Rusck 1958).

1967’de Chowduri ve Gross, Rusk’ ın aynı hipotezinde indüklenen aşırı voltajları hesaplamak için iki farklı form ifadesi önerdiler ve farklı sonuçlar elde ettiler (P. Chowdhuri 1967). 1986’da Chowduri-Brüt yaklaşımını değiştiren Liew ve Mar, kapalı form çözümlerini önermişlerdir (A. C. Liew vd 1968). 2001’de Hoidalen sonlu yer iletkenliğini FDTD (finite differantion time domain) yöntemi ile açıklayan kapalı bir form önerdi (H. Hoidalen 2003). Buna ek olarak 90’lı yılların başından itibaren giderek artan güç kalitesi talebi doğrultusunda daha özel sayısal yaklaşımlarla sorunu çözen birçok çalışmaya zorlanmıştır. Bu çalışmaya kaynak olan ekstra bazı çalışmalar ise 154 kV lık ve 77 kV lık enerji nakil hatlarının yıldırım analizi, elektrik direklerinde oluşan yıldırım aşırı gerilimlerinin Lablas dönüşümü ile analizi, direk tiplerine bağlı olarak yıldırım aşırı gerilimlerinin analizi, yıldırım elektromanyetik dalgaların neden olduğu aşırı voltajlara karşı parafudur ve izolatörlerin koruma analizi gibi birçok çalışma kaynak olmuştur (Shaida vd 2008, Kawai vd 1986, Ferete vd 2010, Çakıl T vd 2017).

2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI

2.1. YEMD Kuramı

YEMD, fırtınada elektromanyetik radyasyon üreten elektrostatik deşarj yoluyla oluşan doğal bir olaydır. YEMD, yıldırım kanalından geçen elektrik akımını nedeniyle zaman zaman gök gürültüsü ile ilişkilendirilir.

2.1.1. YEMD tipleri

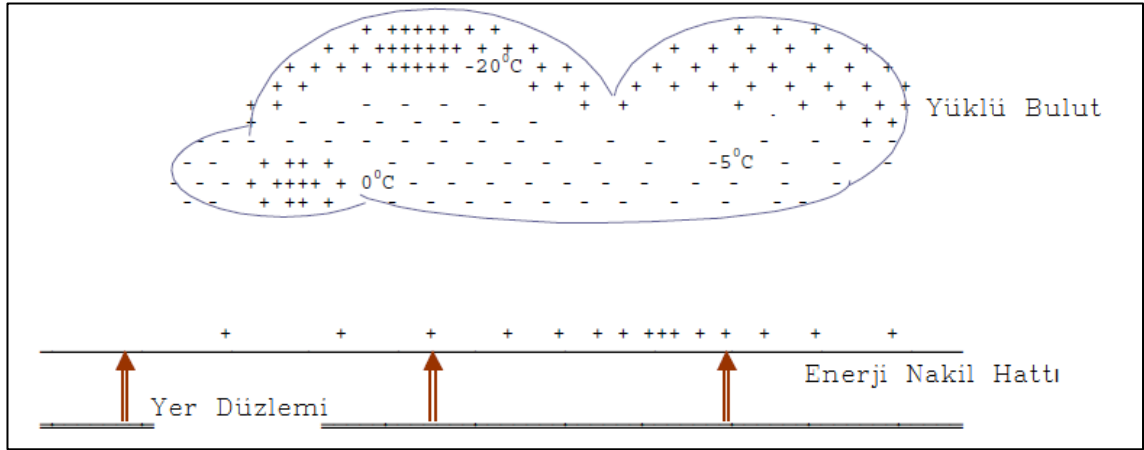
YEMD deşarjları üç tipte meydana gelir (T. T 2004, IEEE St. 2004):

- Bulut içi boşalması
- Buluttan buluta boşalma
- Buluttan yere doğru boşalma

Güç sistemleri açısından, buluttan yere doğru boşalma, havai hatlarda aşırı gerilimin oluşmasına sebebiyet veren en sık görülen boşalma tipidir.

2.1.2. YEMD oluşma süreci

Şekil 2.1' de ENH' nin üstünde bulunan yüklü bir bulutun iletim hattına yönelik indüklenmiş yükleri gösterilmektedir. Şekli 2.1' de yüklü bulutun negatif ve pozitif yüklerin dağılımı farklı sıcaklık değerleri ile gösterilmiştir. Yüklü bulutun tabanında negatif yükler -5°C sıcaklıkta ve bulutun alt kısmına dağılmıştır. Daha yüksek rakımlarda sıcaklık -20°C ' den daha düşük olan pozitif bir yük merkezi bulunur. Bu yüklü bulutların tabanında kısmi olarak pozitif yüklerin oluşturduğu bölgeler de bulunur. Bu küçük bölgelerin sıcaklığı 0°C ' dir (J. R. 2001).



Şekil 2.1. Farklı sıcaklıkta indüklenen yükler

Şekil 2.2' de bulut ile ENH boyunca bir kondansatör aralığı meydana geldiği kabul edilir. Bu örnek kondansatör gösteriminde indüklenen yükler deşarj olduğu anda yaklaşık ışık hızıyla ENH boyunca ilerlemektedir. İndüklenen yüklerin hat boyunca ilerlemesi hattın her iki tarafında aşırı gerilim dalgası üretir. Bu aşırı gerilim aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$e_i = -E \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2} = \frac{q}{C} \quad (\text{Volt}) \quad (2.1)$$

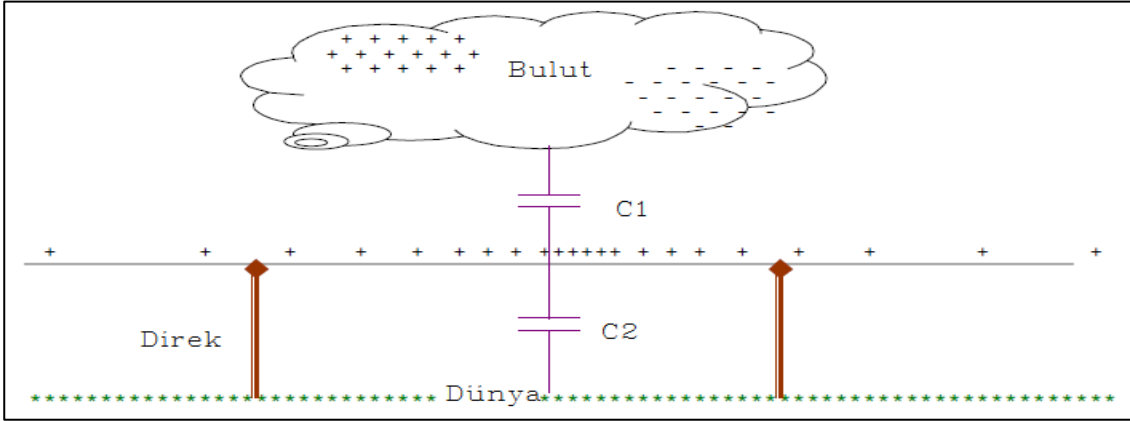
Burada;

E: Hat boyunca oluşan gerilimin tepe (maksimum) değeridir.

C1: Bulut ile hat arasındaki kapasitans

C: Hattın birim uzunluğu başına kapasitans değeri

C2: Hat ile zemin arasındaki kapasitans değeri

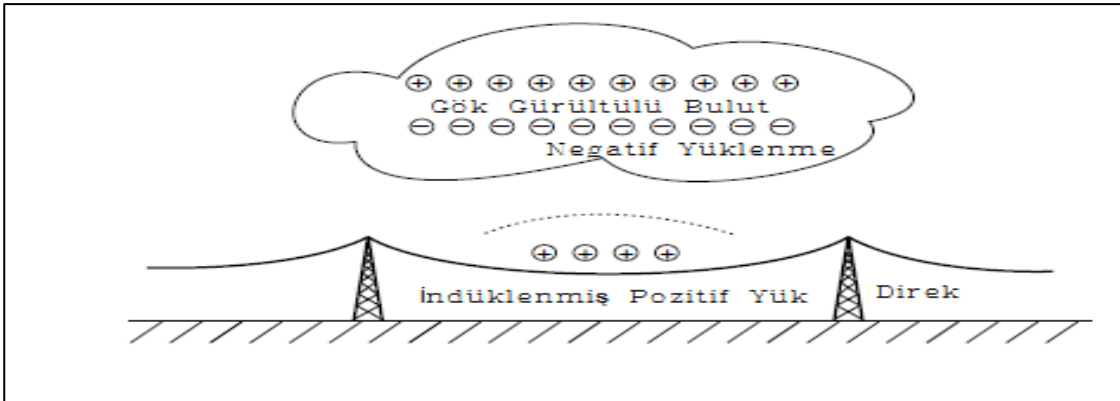


Şekil 2.2. Elektriksel Potansiyelin hesaplanmasını gösteren kapasitans yapı

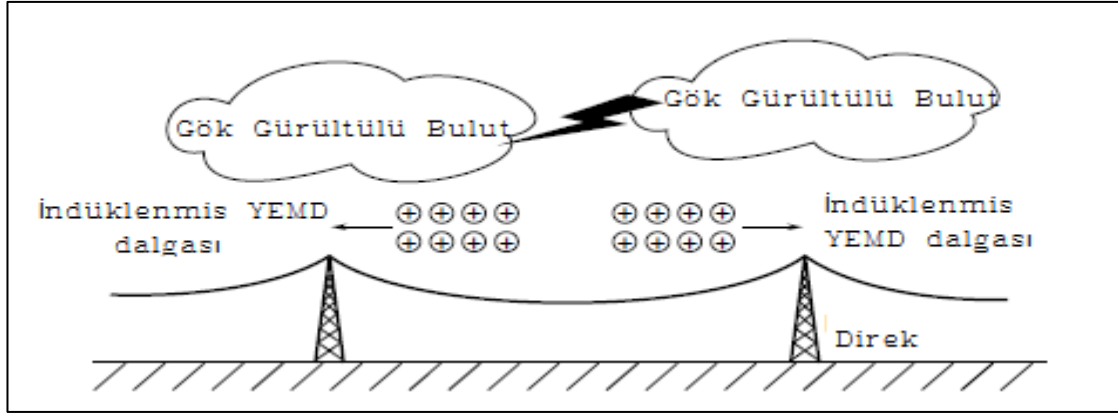
YEMD' e bağlı aşırı gerilimlerin oluşması bazı kuramlara bağlıdır. Bu kuramlar aşağıda sunulmuştur.

2.1.2.1. Elektrostatik indüksiyon

Şekil 2.3.a' da pozitif yükler, yüklü olan bulutun alt kısmında negatif yüklerin yükseldiği sırada hat üzerinde elektrostatiksel olarak indüklenme meydana getirir. Bulutlar ile yer arasında veya bulutlar arasındaki boşalma meydana geldiğinde bulutun alt kısmındaki negatif yükler kaybolur. Boşalmanın ardından aşırı gerilim Şekil 2.3.b' de gösterildiği gibi hat boyunca, pozitif yükler hattın her iki yönüne doğru ilerlemeye başlar.



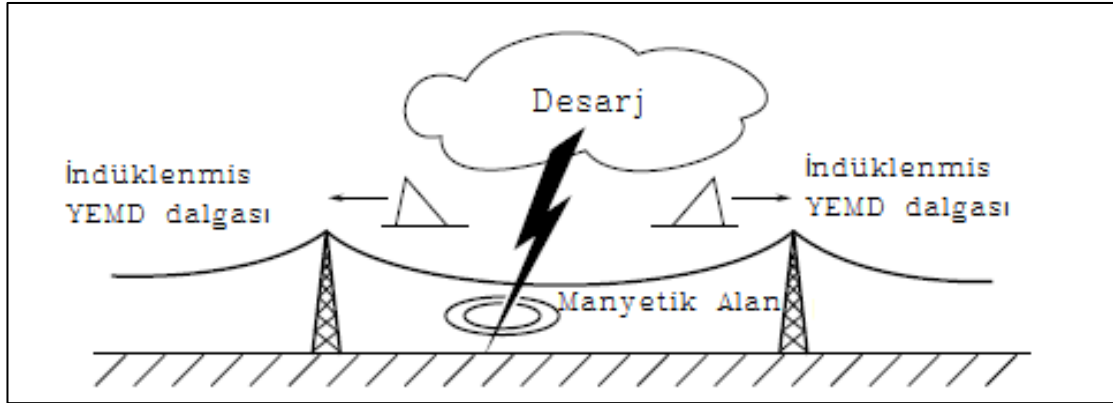
Şekil 2.3.a. YEMD' in oluşumunda ilk yüklenme



Şekil 2.3.b. YEMD deşarjı

2.1.2.2. Elektromanyetik indüksiyon

Elektromanyetik indüksiyonun dinamik süreci Şekil 2.4' de gösterilmektedir. YEMD düştüğü bölgede bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alan, deşarj işlemi ile ilgili dalgalanma akımından kaynaklanmaktadır. Bu tür bir elektromanyetik alan oluşumu göz önüne alındığında çok yüksek değere sahip gerilimler oluşturur. Oluşan aşırı gerilim hat üzerinden ilerleyebilir.

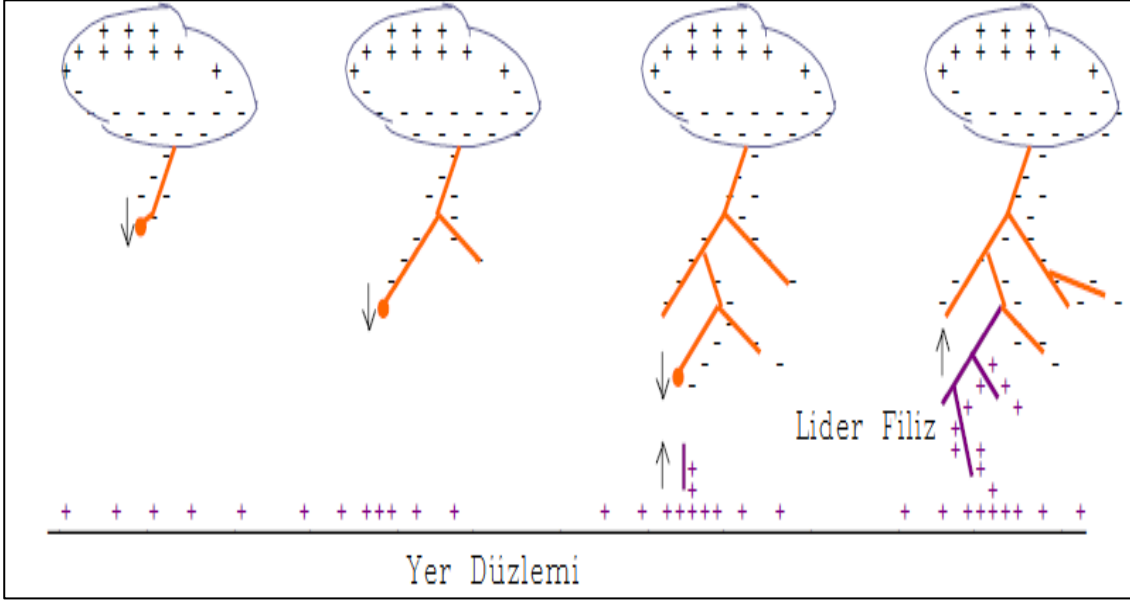


Şekil 2.4. Elektromanyetik indüksiyonun oluşum süreci

2.1.3. YEMD kanalı

Negatif yük merkezinin elektrik alanı 10 kV/cm ' ye ulaştığında yüklü bir buluttan zemine bir YEMD filizi oluşur. Bu filiz yüksek hızda yayılır. (ışık hızının onda biri) Birinci filizin oluşumundan sonra, birinci filizin aynı yolunu izleyen ikinci bir filiz oluşur. Bunun sonucunda iyonize olmuş kanal biraz daha açılır. Bu işlem birkaç kez aynı şekilde devam eder. İyonize olan kanal her defasında 10-100m arasında artış gösterir. Filizlerin uzaması Şekil 2.5' de gösterilmiştir. Son olan lider filiz, 15m ile 50m aralığında yeryüzüne yaklaştığında, yer ile bulut arasındaki hava iyonize olur. Yer ile bulut arasında iletimin meydana gelmesini sağlayan uygun elektrik alan değeri oluşur. Lider filiz yükü nötralize etmek için kanaldan akan yüksek akım üretir. Bu akım geri dönüş akımı olarak adlandırılır ve değeri 200 kA ' ya ulaşabilecek kadar yükselebilir. Bununla birlikte

ortalaması 20 kA olarak istatistiksel olarak belirtilmiştir. Türkiye’de bu değer yaklaşık olarak 10-15 kA olarak ölçülmüştür.



Şekil 2.5. Yıldırım kanalının yayılımı (IEEE St. 2004)

2.2. Direkt Ve Endirekt YEMD Hareketleri Arasındaki Fark

Doğrudan (direkt) veya dolaylı (endirekt) YEMD deşarjları aşırı gerilime neden olur. Bu nedenle iletim hatlarında enerji kesilmeleri muhtemelen artar. Direkt darbelerde yakın çizgilerdeki dönen darbe akımı YEMD’ den kaynaklanan aşırı voltaj üreten elektromanyetik alanı oluşturur (S. Viscaro 2007).

2.2.1. Direkt YEMD darbesi

YEMD, doğrudan elektrik şebekesinin herhangi bir bölümüne çarpmak (düşmek) olarak tanımlanabilir. Güç dağıtım hatlarındaki çoğu durumlarda, yalıtım seviyesine kıyasla çok yüksek olan aşırı gerilim nedeniyle geri dönüş akımı küçük olsa da yalıtımlarda çakma meydana gelir. Örneğin, darbe akımı 10 kA olan YEMD’ in ürettiği gerilim 2000 kV olabilir. Bu nedenle doğrudan çarpmalarda, hatlarda oluşan aşırı gerilimler yalıtım malzemelerinin (izolatörler) hasarlanmasına veya parçalanmasına neden olur (S. Viscaro 2005).

2.2.2. Endirekt YEMD darbesi

Dolaylı (endirekt) YEMD deşarjı, elektrik şebekesinin herhangi bir bölümüne doğrudan çarpmayan YEMD çarpması (düşmesi) olarak tanımlanabilir. Bununla birlikte, indüklenen aşırı gerilim ağ üzerinden üretilir ve yayılır. Bu tür darbeler, düşük izolasyona sahip hatların kesilmesine neden olabilir. Hattın yanına yaklaşan YEMD’ in çoğu 300 kV’ dan daha düşük aşırı voltaj üretir. Dolaylı darbeler, doğrudan düşen darbeler ile karşılaştırıldığında küçük endüktif gerilimler üretse de genelde havai hatlarının

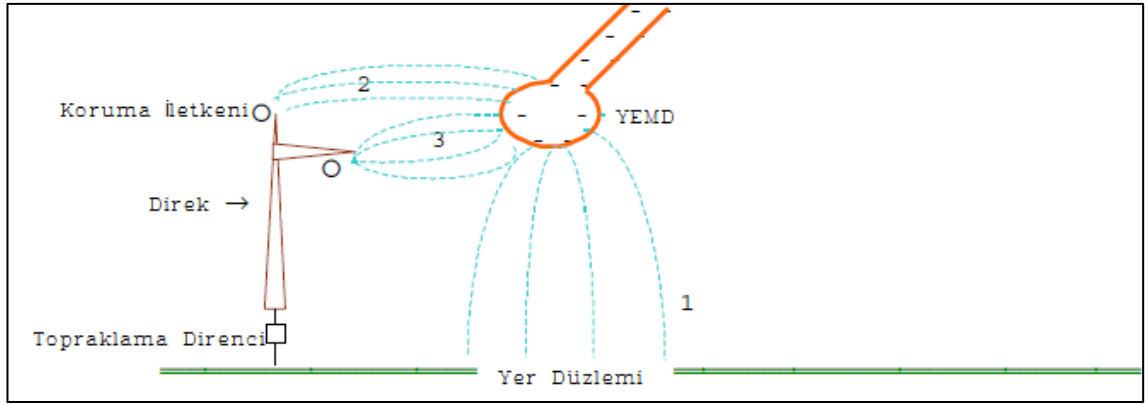
performansını etkileyen bir durum oluşturur. Örnek olarak orta gerilim (OG) dağıtım hatlarında dolaylı vuruşlar kaydedilen arızaların ana kaynağıdır.

2.3. YEMD Kaynaklı Problemler

Bilindiği gibi YEMD doğal deşarjlardan meydana gelir. Bu boşalma sırasında aşırı gerilimler üretir. Bu aşırı gerilimler aşağıdaki alt bölümlerde ele alınmıştır.

2.3.1. İletim hatlarında oluşan aşırı gerilimler

Yüklü bulutun alt kısmında negatif yüklerin varlığı nedeniyle hatta bulunan pozitif yükler tetiklenir. Daha sonra YEMD deşarjı sonucunda hat üzerindeki bu pozitif yükler hareketlenir ve hat boyunca ilerlemesine neden olur. Şekil 2.6' da hat üzerinde dalgalanmalara neden olan farklı yollar gösterilmiştir. Aşırı gerilim Şekil 2.6' ya atıfta bulunarak üç deşarj yolu boyunca üretilir.



Şekil 2.6. YEMD filizinin vuruş ve iletim hattının geometrisi (IEEE St. 2004)

2.3.1.1. YEMD' in hatta yakın düşmesi sonucu indüklenmiş aşırı voltaj

Şekil 2.6' da gösterilen Yol1, lider filizin toprağa boşalmasıdır. Bu yol hızla meydana gelir. Bununla birlikte YEMD flaşı topraklama kablosu ile iletken arasındaki yalıtım şeridi boyunca aşırı gerilim oluşturur. Bu gerilim, hatta doğru ilerleyen bir dalga hareketiyle etki eder.

2.3.1.2. YEMD' in koruma iletkenine veya direğe düşmesi sonucu indüklenmiş aşırı voltaj

Şekil 2.6' da gösterilen Yol2, YEMD filizinin koruma iletkenine veya direğe düşmesidir. Bu durumda yalıtkan üzerinde voltaj farkı oluşur. Bunun sonucunda direktten iletkenine doğru bir aşırı gerilim darbesi oluşur.

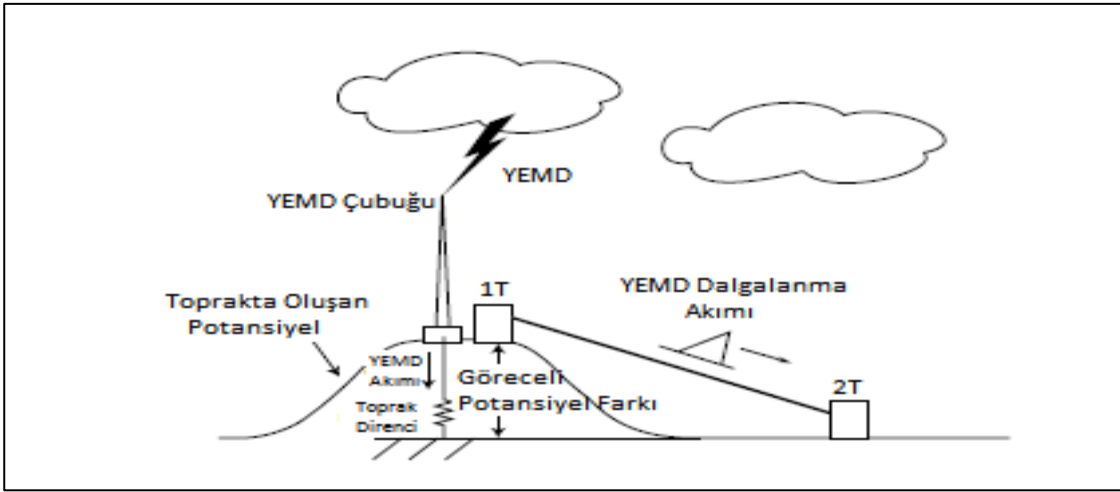
2.3.1.3. YEMD' in faz iletkenine düşmesi sonucu indüklenmiş aşırı voltaj

Şekil 2.6' da gösterilen Yol3, YEMD filizinin direk faz iletkenine düşmesidir. Bu deşarj tipi en tehlikesidir. Hatlarda çok yüksek aşırı gerilimlerin oluşmasına neden olur.

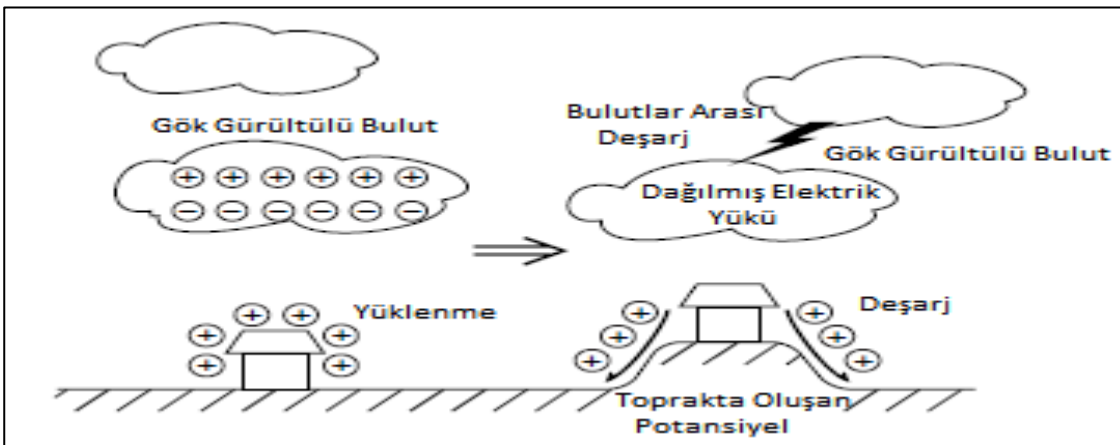
Deşarj yolu ise direk üzerinden olduğu gibi enerji tesislerinde bulunan parafudurlar üzerinden de oluşabilir.

2.3.2. Toprakta (Zeminde) oluşan potansiyel artışı (TPA)

Zemin (toprak) potansiyeli, toprağa yüksek akım akması nedeniyle yükselir, bu da binaya, elektrik tesislerinin üzerine tahsis edilen topraklama çubuğuna veya şeritlerine etki eder. Örneğin, Şekil 2.7.a' da gösterildiği gibi iki tesis bulunmaktadır. Bunlardan biri paratonerin yakınında, diğeri paratoner çubuğuna uzakta olduğu görülmektedir. YEMD paratonere düştüğünde I. tesis de toprak potansiyelinde artış olur. Bu potansiyel artış topraklama kablosu üzerinden tesiste bulunan cihazlara ulaşır. Öte yandan Şekil 2.7.b' de gösterildiği gibi elektrostatik olarak yüklü bir bina varsa bu yükler bulutlar arasında veya bulut ile yer arasında boşalma gerçekleştiğinde yeryüzüne iner. Bu nedenle boşalmanın gerçekleştiği bölgeye yakın binalarda yüksek bir toprak potansiyel artışı oluşur. Toprak da oluşan bu potansiyel farklılıklar dalgalanmaya yol açabilir.



Şekil 2.7.a. YEMD filizinin paratonere çarpması (Zeminde oluşan potansiyel artışı)



Şekil 2.7.b) Binalarda Oluşan Yüklenme ve deşarj (Zeminde oluşan potansiyel artışı)

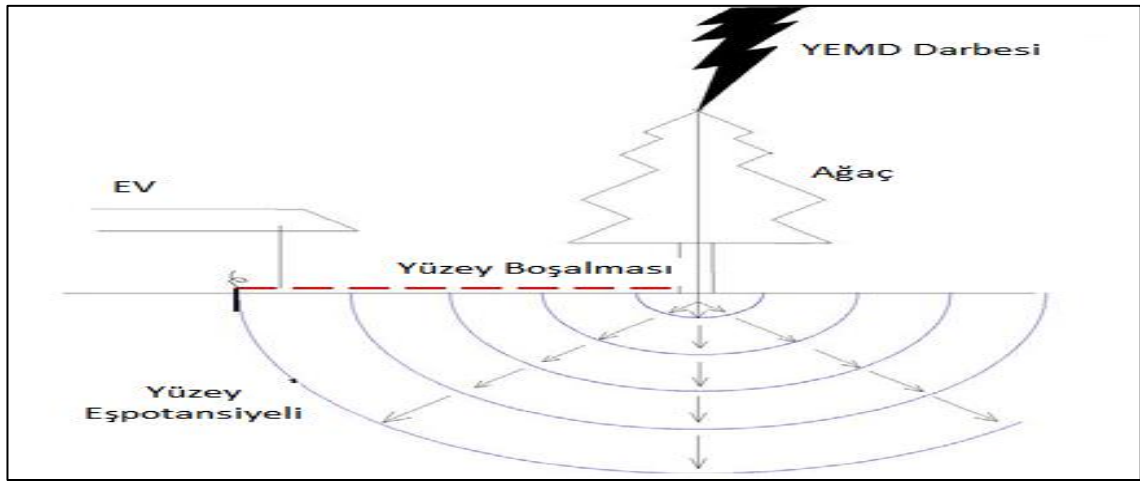
Şekil 2.8’ de gösterildiği gibi bir toprak elektrot veya ağaç vasıtasıyla YEMD akımının toprağa düzgün akışı olduğu varsayılarak toprak potansiyelinin yükseldiği tahmin edilmektedir. YEMD filizinin a mesafesindeki toprakta oluşturduğu potansiyel yükselmesi aşağıdaki form gibidir (S. Sekioka vd 2007):

$$V_a = \frac{V_0}{a} \text{ (Volt)} \quad (2.2)$$

Burada:

V_a: a mesafesindeki toprakta oluşan potansiyel yükseliş

V₀: YEMD düşme noktasındaki potansiyel yükseliş



Şekil 2.8. YEMD’ in konutlara olan etkisinin basitleştirilmiş modeli

TPA voltajı ile YEMD’ den kaynaklanan aşırı voltaj arasındaki karşılaştırma da tepe değeri darbenin gecikme süresine ve darbenin yönüne bağlıdır. Bu iki aşırı gerilim tipi de zıt yönde olduğu sürece yaklaşık aynı tepe değerine sahiptir. YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilimin tesiste gezinme süresi TPA voltajına göre kısadır. Toprak direnci, TPA’ yı etkileyen önemli bir faktördür. Toprak direncinin artırılması toprak potansiyelinin artmasına neden olur. Bu nedenle toprak direnci göz ardı edilemez. TPA’ yı etkileyen diğer bir parametre YEMD’ de ait geri dönüş darbesinden yayılan elektromanyetik alan deformasyonudur (H. Koga vd 1979).

2.4. YEMD Kaynaklı Aşırı Gerilimi Etkileyen Faktörler

2.4.1. Çok iletkenli yapılar

Yakın bölgeye düşen YEMD’ in oluşturduğu aşırı voltaj, çok iletkenli direklerden etkilenir. Bu etki dikey çizgi konfigürasyonu için daha kapsamlı hale geldiği hat konfigürasyonuna bağlıdır. Bununla birlikte yatay hat konfigürasyonunda, iletkenler arasındaki ayrılma mesafelerine göre doğrultma noktasının mesafesine bağlıdır. Çok iletkenli bir hattaki bir iletken üzerindeki aşırı voltaj, diğer iletkenlerin etkisiyle azaltılır. Bu azalma, tek bir hat için karşılık gelenlerden %15 ila %40 arasında düşük olabilir.

Yapılan benzer çalışmalarda çoklu iletkenlerin varlığına bağlı olarak, indüklenen aşırı gerilimin tek iletken ile karşılaştırıldığında her iletkende %15 ila %25 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır (V. Cooray 2003, F. Rachidi vd 1997). İletken sayısının artırılması, indüklenen aşırı gerilimin azalmasını sağlar (E. Perez vd 2003). Bununla birlikte iletkenlerin sayısı arttıkça karşılıklı bir ekranlama devreye girer ve dolayısıyla aşırı gerilimi indükler. Bu etki YEMD çarpmasına dik konumdaki indüklenmiş aşırı gerilim için geçersizdir (P. D. Kannu vd 2005).

2.4.2. Topraklama kablosu ve koruma iletkeni

YEMD kaynaklı aşırı gerilim, koruma iletkeni veya topraklama kablosu kullanıldığında azalır. Bu azalma, faz iletkenlerine veya topraklanmamış iletkenlere göre toprak telinin konumuna bağlıdır. Koruma iletkenleri aşırı gerilimlerin yaklaşık %20 ila %40 oranında azalmasına yardımcı olur. Koruma iletkenlerinin etkinliği çoğunlukla iki komşu topraklama noktası arasındaki aralıktan etkilenir (M. Paolone vd 2004). Bu aralık, izolatörler için atlama gerilimini etkileyen bir faktördür (Uman vd 1969, S. Rusck 1958, S. Yokoyama 1984).

2.4.3. Zemin (Yer) iletkenliği

İndüklenen aşırı gerilim hattın orta noktasında artarken, hat sonuna doğru azalır. Yer iletkenliğinin artırılması, indüklenen aşırı gerilimi azaltmaya katkıda bulunur (Razzak vd 2004).

2.4.4. YEMD' in düştüğü noktanın konumu

İndüklenen aşırı gerilimin büyüklüğü YEMD' in zemin ile yaptığı düşme açısına bağlıdır. Bu açı arttıkça indüklenen gerilim azalır. Düşme noktasından uzaklaştıkça indüklenen aşırı gerilim büyüklüğü azalır. Darbenin gecikme süresi de mesafedeki artışla birlikte artar (Razzak vd 2004).

2.4.5. Enerji nakil hatlarının yüksekliği

İletim hattının, yüksekliği arttıkça indüklenen aşırı gerilim artar. Mükemmel bir şekilde topraklanmış bir iletim hattında indüklenen aşırı gerilimin büyüklüğü ile hattın yüksekliği arasında orantılı bir değer vardır (Razzak vd 2004).

2.4.6. Enerji nakil hatlarının uzunluğu

YEMD ile ENH arasındaki bağlantı hat uzunluğu 2 km' den fazla olmadığında ihmal edilebilir. İndüklenen aşırı gerilimin maksimum değeri, kayıpsız bir hat için hat uzunluğuna bağlıdır (S. Guerrieri vd 1997).

2.4.7. Korona etkisi

Korona tarafından etkilenen aşırı gerilim, YEMD düşme türüne (direkt veya endirekt) bağlıdır. Endirekt darbe durumunda, indüklenen aşırı gerilim artar. Bununla birlikte, direkt darbe inmesi durumunda korona etkisi, indüklenen aşırı gerilimi azaltır.

Korona etkisi iletkenler arasındaki karşılıklı etkileşime engel olur. (Kublaj Etkisi) Koronaya en çok maruz kalmış iletkenlerde indüklenen aşırı gerilim seviyesi artar.

2.5. YEMD Parametreleri

2.5.1. Başlangıç zamanı

YEMD kaynaklı voltajın şiddeti başlangıç zamanı arttıkça azalır (E. Perez vd 2003). Hattın ortasında daha fazla etki yaratır. Genellikle indüklenen aşırı gerilim başlangıç zamanı ile ters orantılıdır (Silva vd 2002, M. Jordan vd 1983).

2.5.2. Sönümlenme zamanı

Sönümlenme zamanı değiştiğinde ve başlangıç zamanı $1\mu s$ ' den düşük olduğunda indüklenen aşırı gerilimin genliğini etkilemez. Geri dönüş YEMD akımının üzerinde de çok az etkiye sahiptir.

2.5.3. Akım genliği

YEMD kaynaklı aşırı gerilimin, diğer parametrelerin sabit olduğu varsayıldığında tüm hat boyunca akım genliği ile doğru orantılı bir ilişkisi vardır.

2.5.4. YEMD filizinin hızı

YEMD filizinin hızı indüklenen aşırı gerilimin büyüklüğünü, başlangıç zamanını ve sönümlenme süresini etkiler. Etkisi hat boyunca farklıdır. YEMD' in düşme konumuna ve zemin iletkenliğine bağlıdır. Toprak iletkenliği düşük olduğu durumlarda indüklenmiş aşırı gerilim seviyesi artar. YEMD filizinin hızı indüklenen aşırı gerilim değerine etki ettiği gibi dalga şekli üzerinde de etkilidir. Özellikle dalganın ön eğiminde etkilidir. YEMD' in düştüğü noktaya uzak yerlerde indüklenen aşırı gerilimin maksimum değeri YEMD filizinin hızı ile orantılıdır. Darbenin düştüğü noktaya yakın yerlerde hızın, indüklenen aşırı gerilim üzerinde herhangi bir etkisi yoktur (A. Borghetti vd 2000, Nucci vd 1993).

3. MATERYAL VE METOT

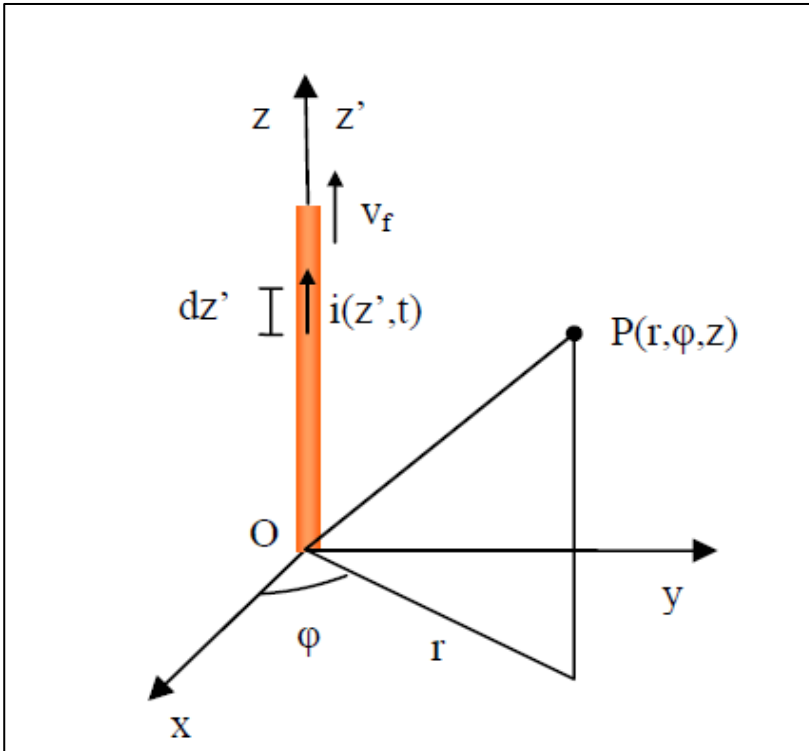
3.1. YEMD' in Güç Hatlarında Oluşturduğu Aşırı Gerilimin Analitik Olarak İncelenmesi

Havai hatlarda ve enerji tesislerinde YEMD kaynaklı aşırı gerilimler sıklıkla oluşur. Bu aşırı gerilimler, güç sistemlerine, iletim şebekelerine ve elektronik cihazlara zarar verir. YEMD kaynaklı aşırı gerilimlerin tespiti iki genel model ile tespit edilir:

- I) YEMD tarafından üretilen elektromanyetik alan ile YEMD' in yansıma akımı kullanılarak oluşturulan modeldir. Bu model geri yansıyan darbe akım modelidir. Bu model de YEMD akımı, kanal boyunca yükseklik ve zamanın bir fonksiyonu olarak tanımlanır.
- II) Elektromanyetik alanlar arasındaki etkileşimi sağlamak için uygun bir model oluşturulur. Bu model de ise bir önceki aşama da hesaplanan hat iletkenlerinin elektromanyetik alan ifadesi ile YEMD' in çarptığı anda iletkende oluşan elektromanyetik alan ifadesi karşılaştırılarak aşırı gerilim hesaplanır.

3.1.1. Yıldırım elektromanyetik darbe akım modelleri

YEMD darbe akım modelleri dört sınıfa ayrılır. Gaz dinamiği veya fiziksel modeller, elektromanyetik modeller, RLC iletim hattı modelleri ve mühendislik modelleridir (M. Master vd 1981, G. D. 1990). YEMD kaynaklı yansıyan akımların hesaplanmasında en sık kullanılan modeller mühendislik modelleridir. Bu nedenle çeşitli mühendislik modelleri alt bölümlerde ele alınmaktadır.



Şekil 3.1. YEMD yansıyan darbe modeli

3.2. Mühendislik Modelleri

3.2.1. Bruce-Golde (BG) modeli

Bu modelde akım formu şu şekildedir (R. Thottappillil vd 1997):

$$i(z', t) = \begin{cases} i(0, t), & z' \leq vt \\ 0, & z' > vt \end{cases} \quad (3.1)$$

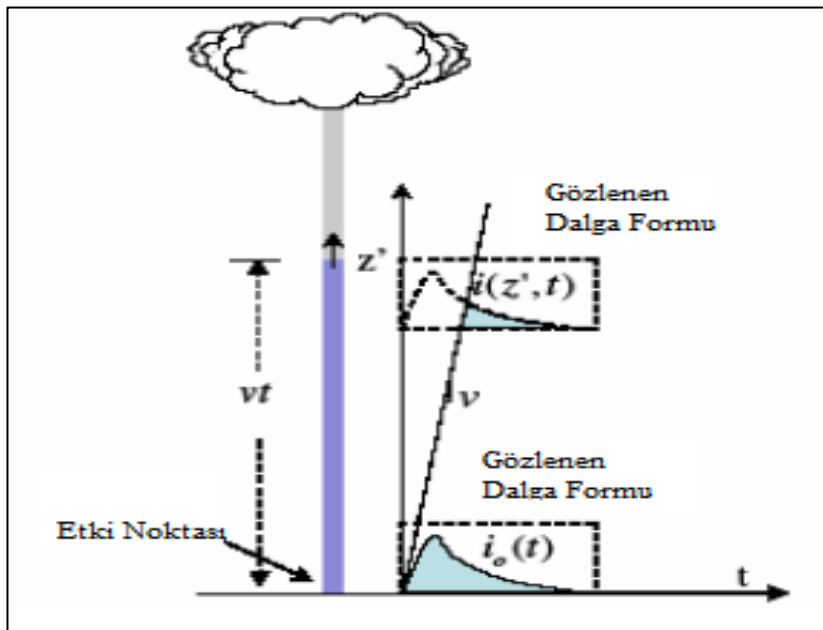
Buradaki $i(0, t)$ t zamanında yukarı doğru hareket eden geri dönüş darbesinin dalga önünün altındaki zemin akımıdır. z' yıldırım kanalı boyunca herhangi bir noktayı temsil eder. v ise yansıyan darbenin ilerleme hızıdır. Bu model yansıyan darbenin süreksizliği nedeniyle BG model fiziksel olarak önerilmez. Şekil 3.3' de analitik olarak çıktısı gösterilmektedir.

BG model ile şebeke yük yoğunluğu $\rho(z', t)$ açısından eşdeğer bir ifade Thottappillil tarafından önerilmiştir. Önerilen şebeke yük yoğunluğu aşağıdaki matematiksel denklem ile ifade edilir:

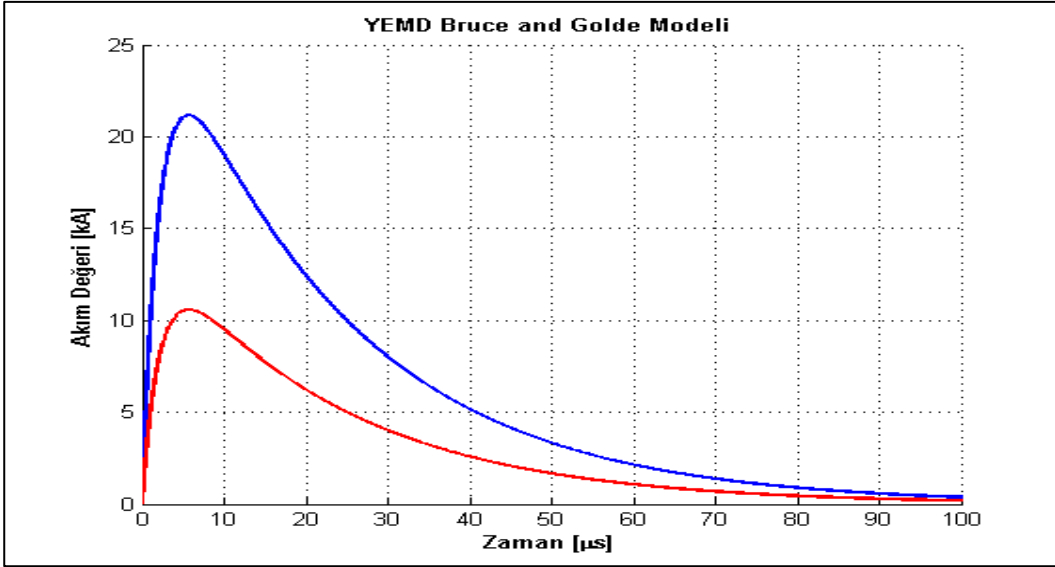
$$\lim_{\Delta z' \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta z'} \left[\int_0^t i(z'+\Delta z', \tau) d\tau - \int_0^t i(z', \tau) d\tau \right] \quad (3.2)$$

Anlık yükün yok olma hipotezine göre çıkarılan yük denklemi ise zamandan bağımsızdır.

$$\rho(z', t) = \frac{i(0, z'/v_f)}{v_f} \quad (3.3)$$



Şekil 3.2. BG modeline göre kanalda ilerleyen akım modeli



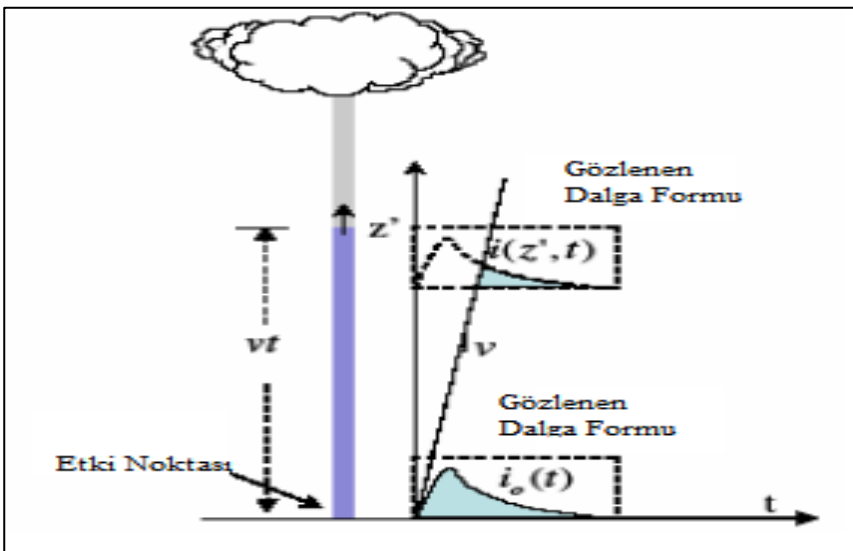
Şekil 3.3. BG modeline göre kanalda ilerleyen çift darbeli akımın değişimi

3.2.2. Enerji nakil hattı (ENH) modeli

Bu modelde, yerdeki akım dalga biçimi herhangi bir zayıflatma veya dağılma olmaksızın sabit bir hızda yukarı doğru yayılmış olarak kabul edilir. Bu modele göre akım şu şekildedir (M. Uman 1987).

$$i(z', t) = \begin{cases} i(0, t - z'/v), & z' \leq vt \\ 0, & z' > vt \end{cases} \quad (3.4)$$

Bu modelde yük kanaldan geçerek kanalın altından üste aktarılır (R. Thottappillil vd 1993). Enerji nakil hattı modeline göre yukarı doğru ilerleyen YEMD akımı Şekil 3.4' te gösterilmektedir.



Şekil 3.4. ENH modeline göre kanalda ilerleyen akım modeli

3.2.3. Hareketli akım kaynağı (HAK) modeli

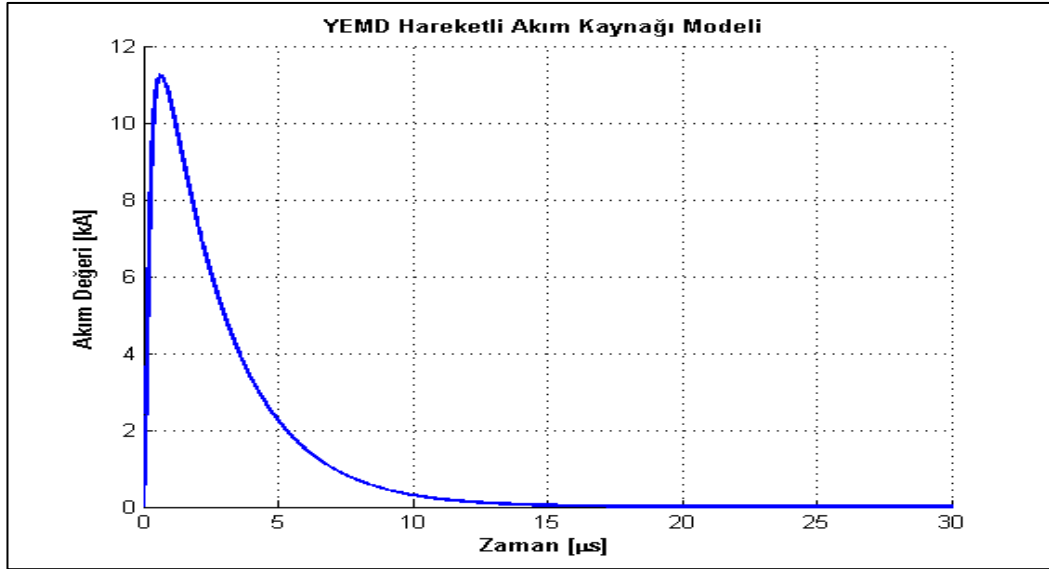
Bu model, akım kaynağının v hızında z' yükseklikte zeminden buluta geçtiği varsayılmaktadır. Bu varsayımda akımın YEMD kanalı boyunca ışık hızı c ile enjekte edildiği ve yayıldığıdır. Bu model ise aşağıdaki matematiksel denklemlerle ifade edilir (E. T Pierce 1972):

$$i(z', t) = \begin{cases} i(0, t + z'/c), & z' \leq vt \\ 0, & z' > vt \end{cases} \quad (3.5)$$

BG modeli ile akan akımın zemine olan hızı $v=\infty$ olduğunda hareketli akım kaynağı modelinden de çıkarılabilir. Bu modelin yük dağılımı bakımından eşdeğer formülü ise;

$$\rho(z', t) = \frac{i(0, z'/v_f)}{c} + \frac{i(0, z'/v_f')}{v_f'} \quad (3.6)$$

Burada $V_f' = V_f / (1 + V_f / c)$ aşağıya doğru akan akım yayılım hızı, ışık hızı yerine sonsuza eşit olarak ayarlanırsa bu model BG modeline indirgenir. HAK modeline göre yukarı doğru ilerleyen YEMD akımı Şekil 3.5' te gösterilmektedir.



Şekil 3.5. HAK modeline göre kanalda ilerleyen YEMD akımının değişimi

3.2.4. Değişken iletim hattı modeli

Bu modelde YEMD akımının yoğunluğu şu şekilde ifade edilir (Pierce vd 1972):

$$i(z', t) = \begin{cases} i(0, t - z'/v) \cdot (1 - z'/H), & z' \leq vt \\ 0, & z' > vt \end{cases} \quad (3.7)$$

Burada H belirtilen kanal yüksekliğidir. Bu modelin yük dağılımı aşağıdaki matematiksel denklem ile ifade edilir:

$$\rho(z',t) = \frac{1-z'/H}{H} + \frac{i(0,t-z'/v_f)}{v_f} + \frac{1}{H}Q(t) \quad (3.8)$$

Burada $Q(t)$ t zamanda topraktan kanala toplam yükün şarj transferidir:

$$Q(t) = \int_{z'/V}^t i(0,\tau - z'/v) d\tau \quad (3.9)$$

3.2.5. Üstel azaltma yöntemi ile değiştirilen iletim hattı modeli

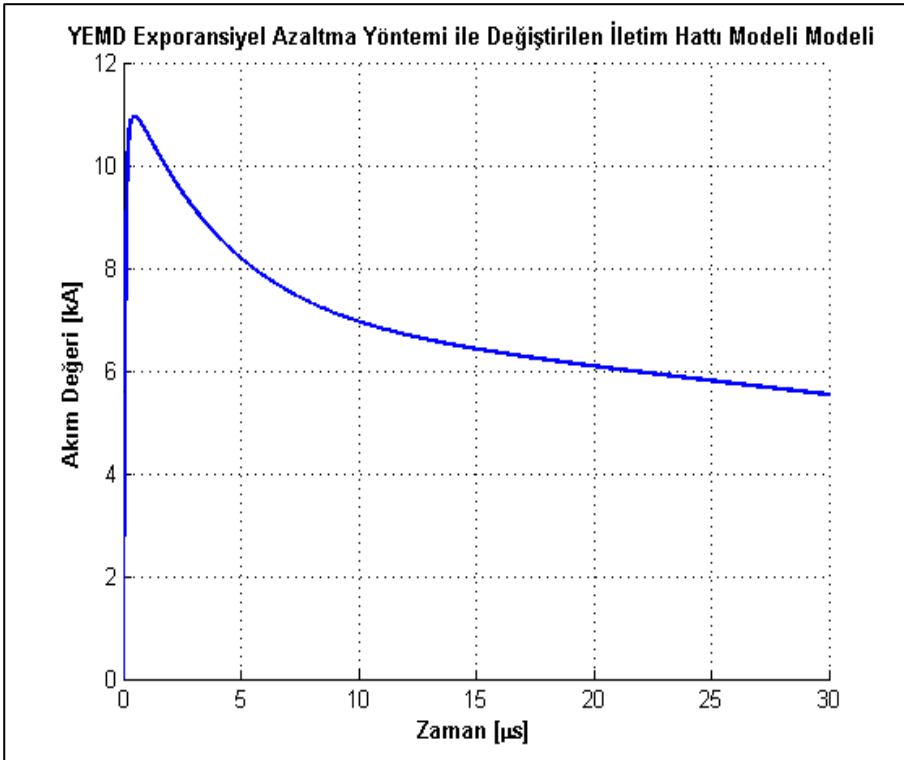
Bu modelin akımı, korona akımı biçiminde olduğu gibi katlanarak ve bozularak yukarı doğru hareket eden değişken akımlı bir iletim hattı modeli olarak tanımlanabilir.

$$i_c(z',t) = \begin{cases} i_c\left(0, t - \frac{z'}{v}\right) \cdot \exp(-z'/\lambda_c), & z' \leq vt \\ 0, & z' > vt \end{cases} \quad (3.10)$$

Burada λ_c bozunma sabitidir. Yük dağılım ifadesi ise:

$$\rho(z',t) = \exp(-z'/\lambda_c) \cdot \frac{i(0,t-z'/v)}{v} + \frac{\exp(-z'/v)}{\lambda_c} \cdot Q(t) \quad (3.11)$$

$Q(t)$, (Denklem 3.9)' da gösterilen toplam yük transferidir.



Şekil 3.6. Kanalda ilerleyen YEMD akımının değişimi

3.3.YEMD Kanalının Akım Tespiti İçin Kullanılan Modeller

Kanal bazlı akım ölçümleri bazı ülkelerde özel direkler vasıtasıyla gerçekleştirilir. Ancak analitik olarak da tespiti için bazı modeller kullanılır. Alt bölümlerde ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu modellerin analizi ile YEMD akımının oluştuğu ilk andaki durumlar incelenmiştir.

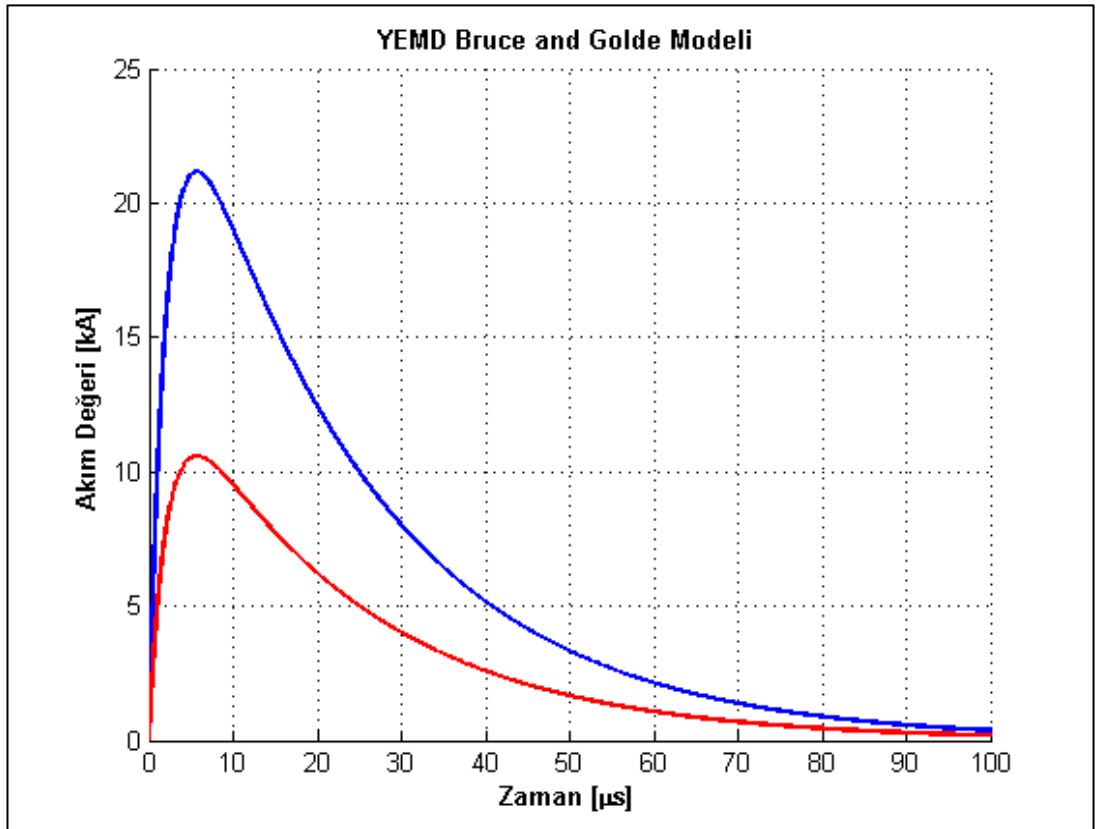
3.3.1. Bruce ve Golde modeli

Bruce ve Golde tarafından önerilen kanal-taban akım modeli çift üstel fonksiyona sahiptir. Özellikle Bruce ve Golde hem ilk hem de sonraki dönüş çarpması için bir kanal tabanlı akım ifadesi önerdiler. Bu denklemler aşağıdaki gibi ifade edilmiştir. Burada α , β , γ ve δ ifadeleri zaman sabitleridir (C.E.R. vd 1941).

$$\begin{aligned} i_{birincil}(0,t) &= I_0.(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \\ i_{sonraki}(0,t) &= \frac{I_0}{2}.(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Burada:

I_0 : YEMD kanalı, taban akımının maksimum değeridir. Diğer parametrelerin değeri Çizelge 3.1' de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. BG modeline göre YEMD kanal tabanında oluşan akımın değişimi

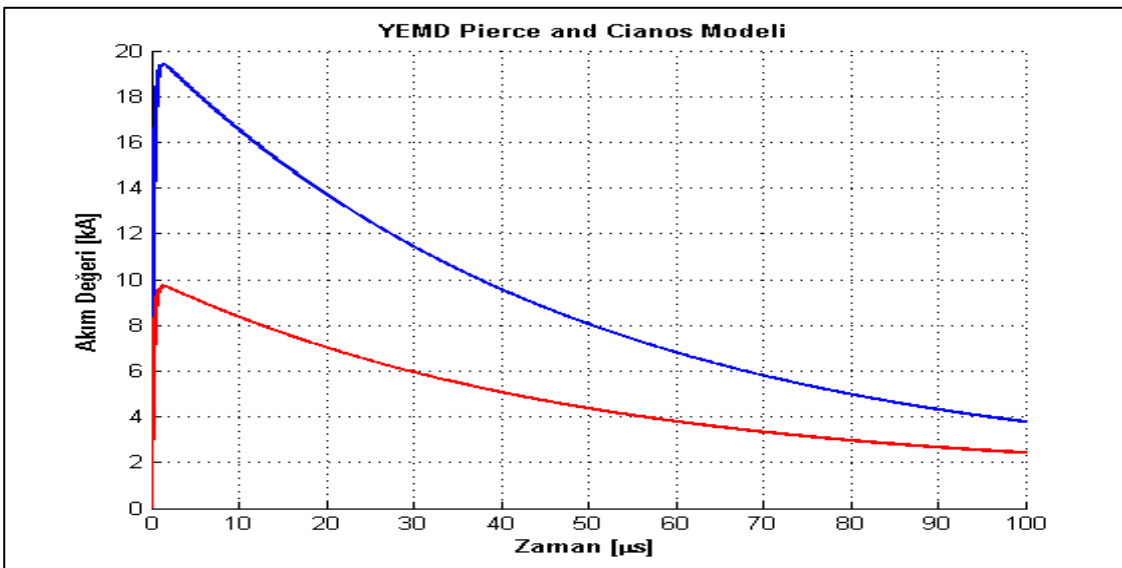
Çizelge 3.1		BG ve Pierce, Caicos modellerinin kanal taban akımı için önerilen değerleri			
Parametreler	Birincil Darbe	Birincil Darbe	İkincil Darbe	İkincil Darbe	
	B.G Modeli	Pierce ve Cianos Model	B.G Modeli	Pierce ve Cianos Model	
I_0 [kA]	22	20	15	10	
I_{oi} [kA]	-	2.1	-	2,1	
α [s^{-1}]	4.4×10^4	2×10^4	4.4×10^4	2×10^4	
β [s^{-1}]	4.6×10^5	2×10^6	4.6×10^5	2×10^6	
γ [s^{-1}]	-	10^3	-	10^3	
δ [s^{-1}]	-	10^4	-	10^4	

3.3.2. Pierce ve Cianos (PC) modeli

Pierce ve Cianos, BG' ye benzer bir model önermişlerdir. Ancak mevcut parametrelerde I_0 , α ve β için farklı değerler düşünmüşlerdir. Pierce ve Cianos güncel bir temel akım modeli önerdiler. Burada ikincil bir akım bileşeninin çift üstel bir fonksiyon olarak daha gerçekçi bir dalga boyuna sahip olacağını önerdiler. Önerdikleri matematiksel denklem aşağıda gösterilmiştir:

$$i(0, t) = I_0.(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) + I_{oi}(e^{-\gamma t} - e^{-\delta t}) \quad (3.13)$$

Burada I_{oi} , γ ve δ parametreleri Çizelge 3.1' de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. PC modeline göre YEMD kanal tabanında oluşan akımın değişimi

Sonraki ikincil darbe vuruşları içinde aynı parametreler ve önerilen parametre değerleri Çizelge 3.1’ de verilmiştir. Pierce ve Cianos tarafından önerilen kanal modelinin temel akım biçimi Şekil 3.8’ de gösterilmiştir. Sonunda hem BG modeli hem de PC modeli $t=0$ anına yakın değerlerde maksimum akım değerine ulaştığı görülmüştür. Bu modeller gerçekçi olmayan bir konveks şeklinde kanal taban akım darbesi ile karakterize edilebilir.

3.3.3. Heidler modeli

Heidler modeli ifadesi şu şekildedir (F. Heidler 1985).

$$i(0,t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{(t/\tau_1)}{1+(t/\tau_2)} \cdot \exp(-t/\tau_2) \cdot u(t) \quad (\text{Amper (A)}) \quad (3.14)$$

$$\eta = \exp\left[-(\tau_1/\tau_2) \cdot (n\tau_2/\tau_1)^{1/n}\right] \quad (3.15)$$

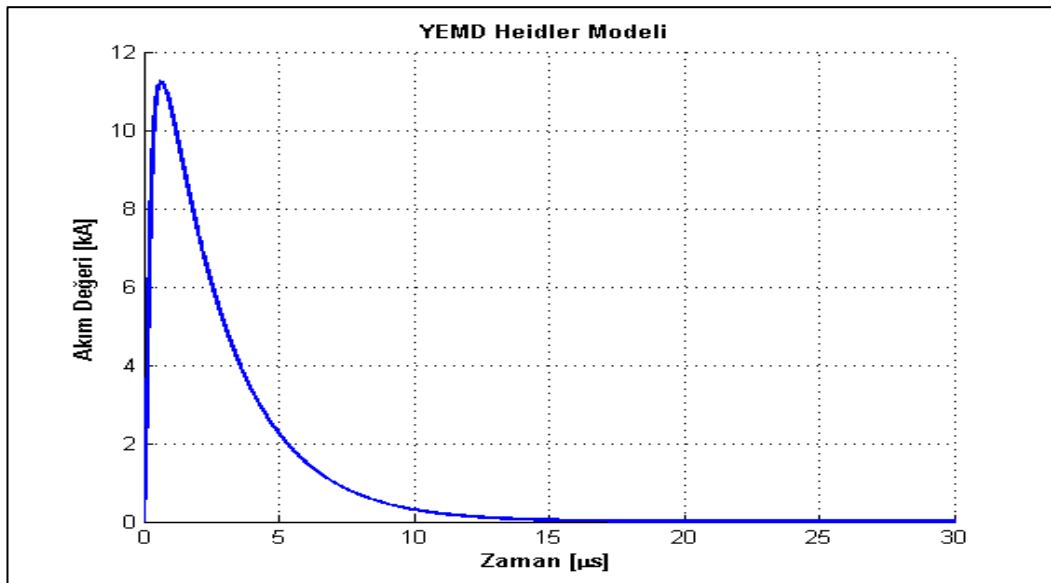
Burada:

τ_1 : yükselen akımın zaman sabiti

τ_2 : yükselen akımın dalga formunun bozunma sabiti

n : belirtilen diklik faktörü (2-10 arasında)

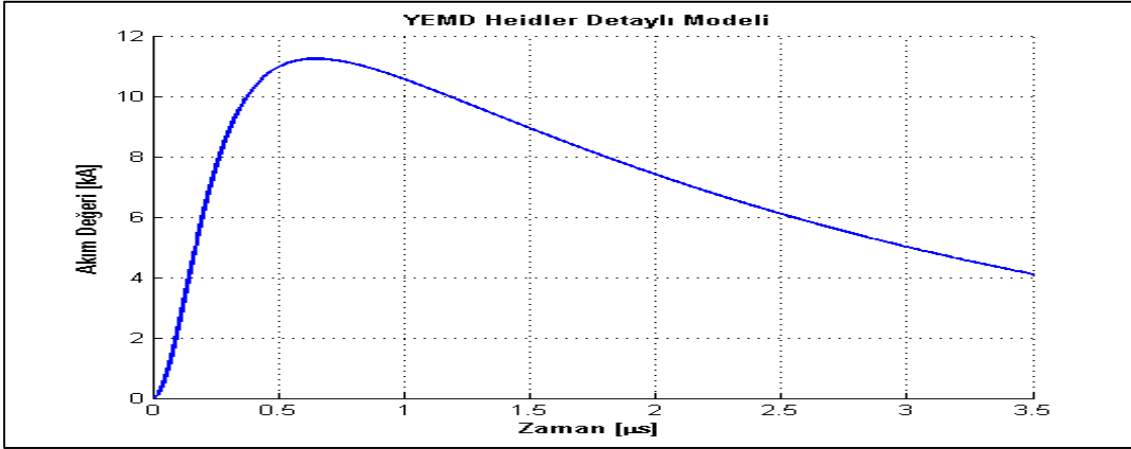
I_0 : kanal taban akımının genlik değeri



Şekil 3.9. Heidler modeline göre YEMD kanal tabanında oluşan akımın görüntüsü

Şekil 3.9’ da Heidler modeli kullanılarak elde edilen YEMD formu gösterilmiştir. Şekil 3.10’ da ise detaylı bir kısmı gösterilmiştir. Heidler modelindeki I_0 , τ_1 ve τ_2 değerleri değiştirilerek sonraki yansıyan darbelerde modellenebilir. Bazen istenen akım dalga biçimini yaklaşık olarak bulmak için farklı parametrelerle iki Heidler fonksiyonu toplanır. Örneğin, Diendorfer ve Uman (DU) modeli, YEMD kanalı tabanındaki akım dalga formu ile (3.14)’ te verilen ifadenin toplamı olarak tanımlanmıştır.

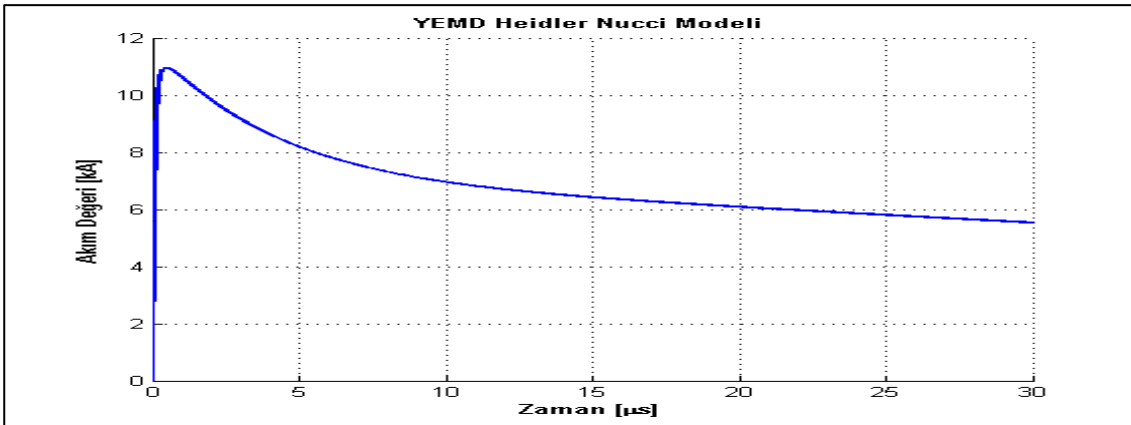
$$i(0,t) = \left[\frac{I_{01}}{\eta_1} \cdot \frac{(t + \tau_{11})^{\eta_1}}{1 + (t/\tau_{11})} \cdot \exp(-t/\tau_{12}) + \frac{I_{02}}{\eta_2} \cdot \frac{(t/\tau_{21})}{1 + (t/\tau_{21})} \cdot \exp(-t/\tau_{22}) \right] \cdot u(t) \quad (A) \quad (3.16)$$



Şekil 3.10. Heidler modeline göre YEMD kanal tabanında oluşan akımın detaylı görünümü

Heidler modelini ele alarak bir çalışma yapan Nucci ve arkadaşları ise yeni bir matematiksel ifade elde etti. Bu ifade çift üstel yapıya sahiptir. Denklem 3.14' e göre tahmin edilen mevcut dalga biçiminden daha gerçekçidir. Nucci' nin önerdiği matematiksel denklem ise aşağıdaki gibidir:

$$i(0,t) = \left[\frac{I_{01}}{\eta} \cdot \frac{(t + \tau_1)^{\eta}}{1 + (t/\tau_1)^{\eta}} \cdot \exp(-t/\tau_2) + I_{02}(\exp(-t/\tau_3)) - \exp(-t/\tau_4) \right] \cdot u(t) \quad (3.17)$$



Şekil 3.11. Nucci görüşüne göre YEMD kanal tabanında oluşan akımın görüntüsü

3.4. Modellerin Doğruluğunun Tespiti

Mühendislik modellerini doğrulamak için kullanılan yöntemler bazı aşamalara dayanmaktadır. Düşen bir YEMD filizi için elektromanyetik alanlar bir veya daha fazla mesafede hesaplanır. Daha sonra gözlemlenen durumlarla karşılaştırılır. Hesaplanan ve

ölçülen alanlar arasındaki fark ne kadar az ise o kadar iyi bir YEMD modeli analizde kullanılmıştır. En çok kullanılan doğrulama yöntemi ‘Tipik Yansıyan Darbe Yaklaşımı’ yöntemidir.

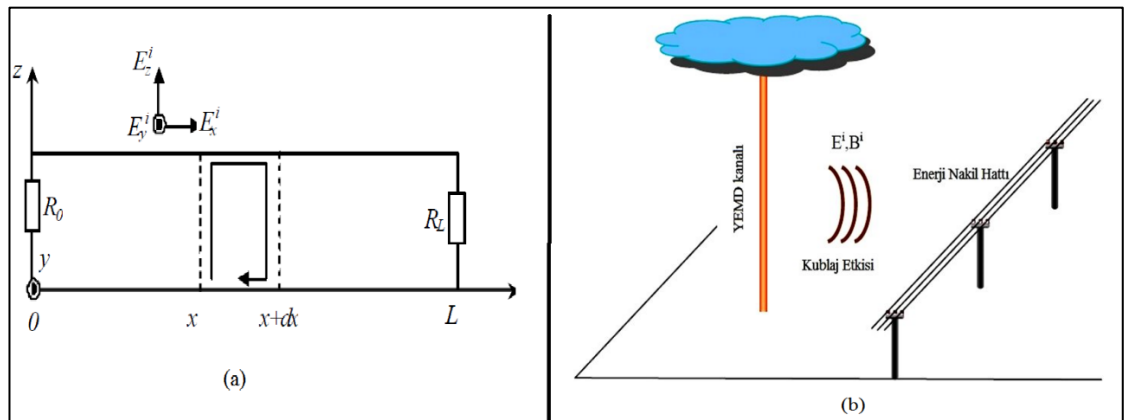
3.4.1. Tipik yansıyan darbe yaklaşımı

Bu yaklaşımın, model girdileri olarak tipik bir YEMD kanalına ait taban akımı formu ile tipik bir YEMD filizinin yayılma hızı kullanarak oluşturulan model sonucu oluşan elektromanyetik alanlar tipik olarak incelenir. Gözlemlenen elektromanyetik alanlarla karşılaştırılmayı içerir. Bu yaklaşım Rakov ve Dulzon tarafından benimsenmiştir (Rakov vd 1991). Nucci ve Thottappillil tarafından ölçülen 1-200 km’ lik alanlarda dört karakteristik özellik tespit etmiştir (Nucci vd 1990). Bu tespitler ENH, değişken enerji nakil hattı, BG ve HAK modellerinin doğruluğu için bir referans olarak kullanılmıştır. Bu tespitler aşağıda adımlarla birlikte Şekil 3.13’ te gösterilmiştir:

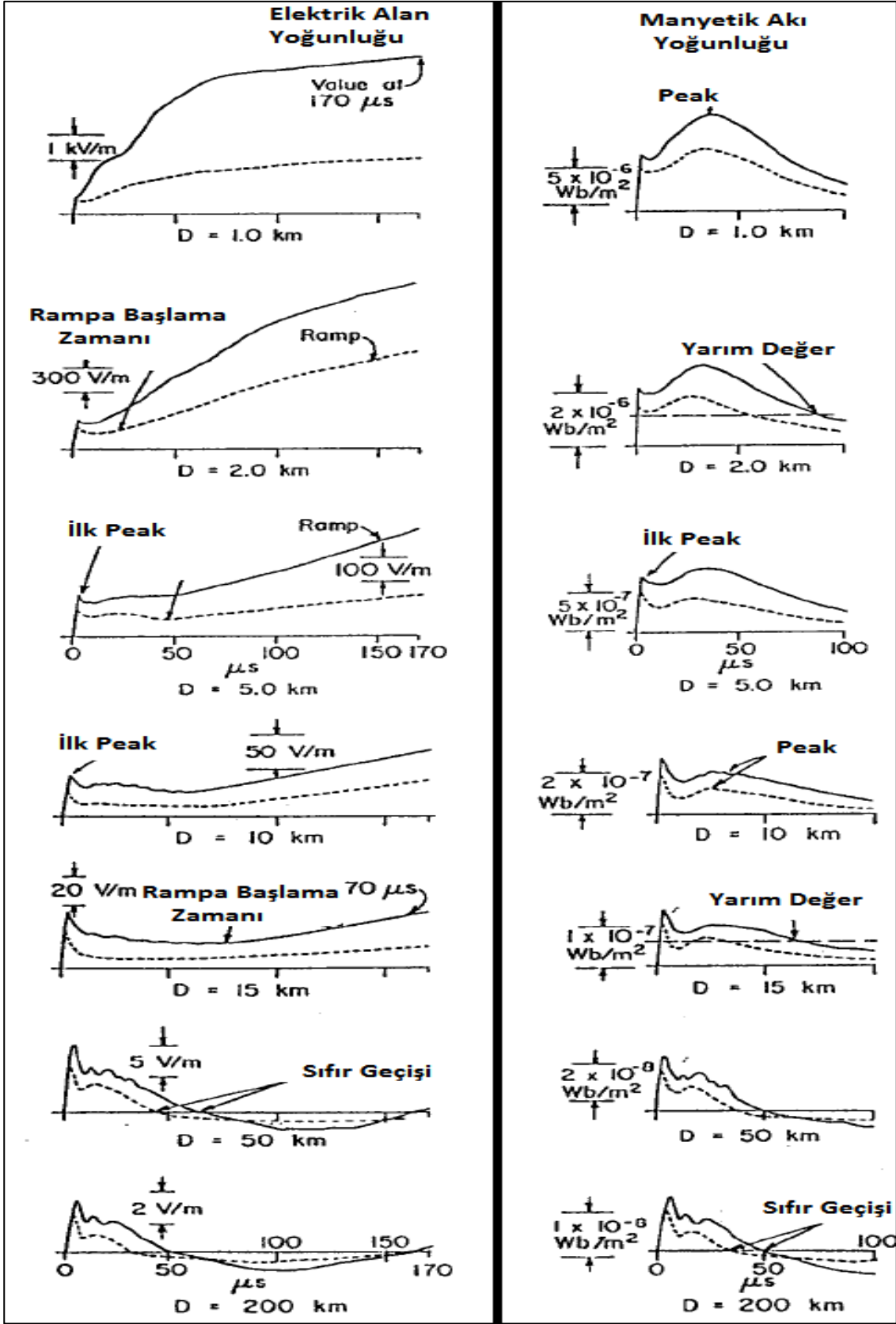
- Elektrik alanlarda ve manyetik akılarda yaklaşık 1 km’yi geçmeyen uzaklıklarda (tepe değerine kısa sürede ulaşan bir darbe)
- İlk maksimum değerini takip eden ve 1-10 km içinde ölçülen elektrik alan için 100 μ s’den daha uzun süren yavaş bir rampa fonksiyonu
- Azami 10 ila 40 μ s arasında meydana gelen 1-10 km içinde ölçülen manyetik akı yoğunluğu değeri
- 50 ila 200 km’lik mesafe de hem elektrik hem de manyetik akı ölçümü sonucunda uygulanan modelin karşılaştırılması

3.5. Kublaj Modelleri

Elektromanyetik alanlar YEMD akımı sonucu oluşur. Bu elektromanyetik alanlar elektrik şebekesine zarar verebilir (Montano vd 2005). Darbe ile hatlar arasındaki kublaj, alan hat bağlantısına ilişkin çeşitli modeller kullanılarak elde edilir. Bu modeller, iletkenlerin mükemmel iletken bir zeminin üzerinde bulunduğu ve Şekil 3.12.a’ da sunulan geometri dikkate alınarak kısaca açıklanacaktır. Şekil 3.12.b’ de ise kublaj etkisinin ENH’ yi elektrik alan ve manyetik alan çifti olarak nasıl etkilediği gösterilmektedir (Nucci 1995).



Şekil 3.12. Kublaj Modeli a) Kublaj modellerinin geometrik yapısı b) YEMD’ in ENH’lere olan kublaj etkisi



Şekil 3.13. Tipik düşey elektrik alan yoğunluğu ve yatay manyetik akı yoğunluğunu gösteren dalga biçimleri, ilk darbe (düz çizgi) ve sonraki darbe (kesikli çizgi)

3.5.1. Rusk modeli

Rusk modeli ile ilişkili iletim hattı denklemleri, iletken yüzeydeki toplam elektrik alanı skaler ve vektör potansiyelleriyle ilişkilendirilerek türetilmiştir. Rusk tarafından verilen ilgili iletim hattı eşleşme denklemleri türevi aşağıdaki matematiksel denklemlerle gösterilmiştir (S. Rusck 1958).

$$\begin{aligned}\frac{\partial \phi(x,t)}{\partial x} + L' \cdot \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C' \cdot \frac{\partial \phi(x,t)}{\partial t} &= C' \cdot \frac{\partial \phi^i(x,t)}{\partial t}\end{aligned}\quad (3.18)$$

Burada:

ϕ : Darbenin düştüğü hattın olduğu bölgedeki skaler potansiyel

ϕ^i : Bağlı olarak toplam uyarılmış skaler potansiyeldir.

$i(x,t)$ toplam hat akımı ve L' ve C' hatta karşılık gelen endüktans ve kapasitanstır. Hat üzerindeki toplam uyarılmış voltaj $u(x,t)$ şu şekilde verilir.

$$u(x,t) = \phi(x,t) + \int_0^h \frac{\partial Az^i(x,z,t)}{\partial t} dz \quad (3.19)$$

Burada h , iletkenlerin yüksekliğidir. Az^i , vektör potansiyelinin dik bileşenidir. Denklemlere benzerlik gelen iletim için sınır koşulları şunlardır:

$$\begin{aligned}\phi(0,t) &= -R_0 \cdot i(0,t) - \int_0^h \frac{dAz^i(0,z,t)}{dt} dz \\ \phi(L,t) &= -R_L \cdot i(L,t) - \int_0^h \frac{dAz^i(L,z,t)}{dt} dz\end{aligned}\quad (3.20)$$

YEMD çarpmasına en yakın bölgede bulunan bir güç hattındaki YEMD kaynaklı aşırı gerilime karşı oluşturulan basitleştirilmiş bir denklem Rusk tarafından ileri sürülmüştür. İlgili matematiksel denklem aşağıda gösterilmiştir (S. Rusck 1977):

$$V_{\max} = \frac{Z_0 \cdot I_0 \cdot h}{d} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{v}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2}} \right) \quad (3.21)$$

$$Z = \frac{1}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cong 377\Omega \quad (\text{ohm}) \quad (\text{boşluk için}) \quad (3.22)$$

Burada:

Z: karakteristik empedans

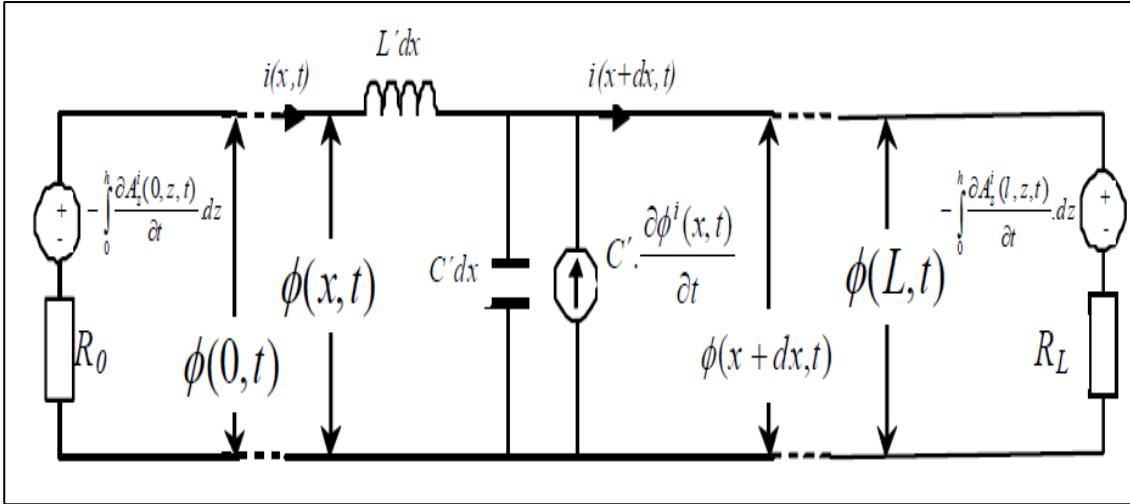
I_0 : YEMD akımının tepe değeri

d: YEMD filizinin düştüğü yer ile hat arasındaki en yakın uzaklık

Ayrıca bu denklemi sadece mükemmel zemin iletkenliği ve zemin için dikey YEMD kanalı uygulandığında bazı uygulanacak kısıtlamalar vardır. Şekil 3.14' te Rusk iletim hattı modeli gösterilmektedir.

Denklem 3.21' de Z_c değeri 30Ω alındığında şu hale gelir. Burada doğal YEMD hızı 0.29×10^8 m/sn ile 2.4×10^8 m/sn arasında değişir. Yansıyan darbenin hızı ise 1.2×10^8 m/sn olduğu varsayılarak denklem şu hale gelir (Idone vd 1982):

$$V_{\max} = 38.8 \cdot \frac{I_0 \cdot h}{d} \quad (\text{Volt}) \quad (3.23)$$



Şekil 3.14. Rusck modelinin iletim hattı kublaj devresi

Bu modelin eksikliği ise YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilimlerin bozulma süreleri ile ilgili hiçbir tespitte bulunmadığıdır.

3.5.2. Taylor modeli

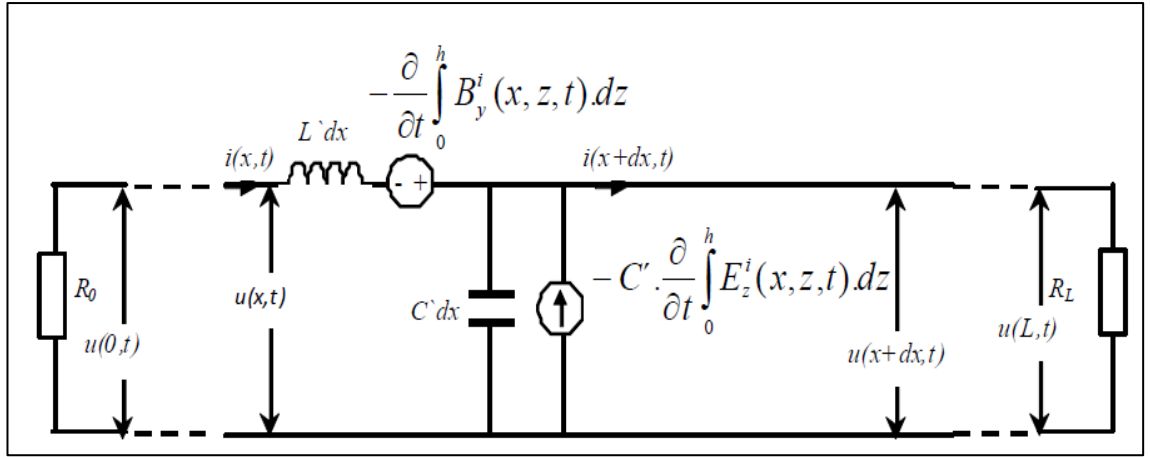
Dağınık gerilim ve akım kaynakları açısından türetilen bir başka model Taylor ve arkadaşları tarafından sunulmuştur (V. Cooray 2003, Taylor vd 1965). İletim hattı denklemleri ile toplam hat voltajı ve akımları şu şekilde sunulmuştur:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + L' \cdot \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} &= - \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h B_y^i(x,z,t) dz \\ \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C' \cdot \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} &= -C' \cdot \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h E_z^i(x,z,t) dz \end{aligned} \quad (3.24)$$

Sınır koşulları şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} u(0,t) &= -R_0 \cdot I(0) \\ u(L,t) &= -R_L \cdot I(L) \end{aligned} \quad (3.25)$$

Bu durumda iki zorlayıcı kaynak fonksiyonu kullanılır. Bu fonksiyonlardan biri dikey elektrik alanı (B_z^i) diğeri ise transvers manyetik indüksiyon (B_y^i)' dur. Rusk modelinden farklı olarak Taylor ve arkadaşları, paralel akım kaynağı ve seri bağlantılı voltaj kaynağı ile modellen bir kublaj modeli oluşturmuştur. (Şekil 3.15.) Nükleer elektromanyetik darbe (NEMD) ile iletim hatları arasındaki etkileşim ilk kez Taylor modeli tarafından tanımlanmıştır (Agrawal vd 1980).



Şekil 3.15. Taylor, Satterwhite ve Harrison modelinin iletim hattı kublaj devresi.

3.5.3. Agrawal modeli

Bu modelde, iletim hattı denklemlerini tanımlamak için dağılık voltaj kaynakları kullanılmıştır. Bu durumda maxwell denklemleri Şekil 3.12.a' da tanımlanan integrasyon yolu boyunca entegre edilmiş ve saçılan voltaj açısından şu şekilde ifade edilmiştir (Nucci vd 1995):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^s(x,t)}{\partial x} + L' \cdot \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} &= E_x^i(x, h, t) \\ L' \cdot \frac{\partial u^s(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \quad (3.26)$$

Burada $E_x^i(x, h, t)$ x eksenı boyunca oluşan elektrik alanının iletken yüksekliğindeki yatay bileşenidir. $u^s(x, t)$ dağılık gerilim bileşenidir.

$$u^s(x, t) = - \int_0^h E_z^s(x, z, t) dz \quad (3.27)$$

$E_z^s(x, z, t)$, dağılmış olan elektrik alanının dikey bileşenidir.

Toplam hat gerilimi $u(x,t)$, aşağıdaki denklemle dağılan voltaj açısından ifade edilebilir:

$$u(x,t) = u^s(x,t) + u^i(x,t) \quad (3.28)$$

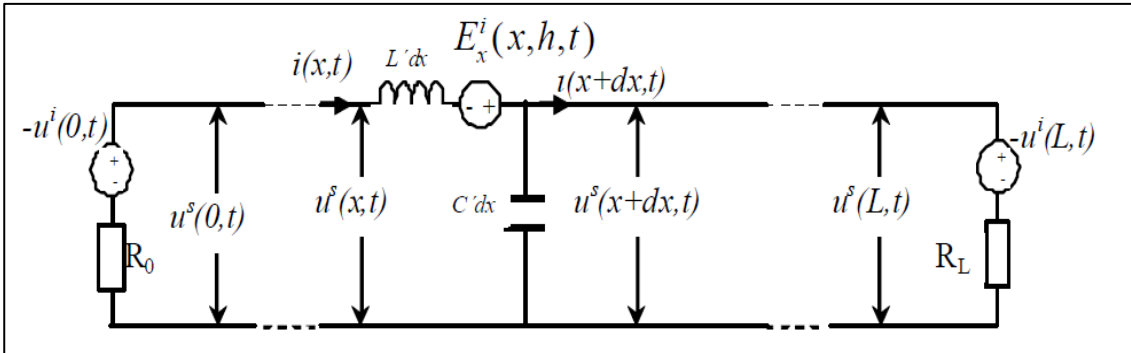
Bu nedenle hat boyunca belirli bir noktadaki toplam voltaj denklemi (3.26) kullanılarak dağılık voltajın toplamı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$u^i(x,t) = -\int_0^h E_z^i(x,z,t) dz \quad (3.29)$$

Burada h iletkenin yüksekliği, $E_z^i(x,z,t)$ YEMD düştüğü anda oluşturduğu elektrik alanın dikey bileşenidir. Dağılmış olan voltaj değerinin sınır koşulları ise şunlardır:

$$\begin{aligned} v^s(0,t) &= -R_0 i(0,t) - u^i(0,t) \\ v^s(L,t) &= -R_L i(L,t) - u^i(L,t) \end{aligned} \quad (3.30)$$

Hat boyunca oluşan elektrik alan E_x^i ve hat sonlanmalarındaki oluşan dikey bileşenli elektrik alan ise E_z^i dir. Bu oluşan elektrik alanlar sonucu dağılan gerilimlerin meydana geldiği sonucuna varılabilir. Agrawal modeline göre eşdeğer kublaj devresi, hat sonlandırmalarında dağılmış iki gerilim kaynağından oluştuğu Şekil 3.16' da gösterilmiştir. Bu sonlandırılmış gerilim kaynaklarına gerilim yükselticisi de denilebilir.



Şekil 3.16. Agrawal modelinin eşdeğer kublaj devresi

3.5.4. Rachidi modeli

Rachidi tarafından sunulan iletim hattı kublaj denklemleri aşağıda gösterilmiştir. Rachidi modelinde, manyetik uyarılma alanı ana etkindir. Bu model Agrawal ve Taylor modellerine dayanan iletim hattı denklemlerine benzer ifadelerle sahiptir (F. Rachidi 1993):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + L' \frac{\partial i^s(x,t)}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial i^s(x,t)}{\partial x} + C' \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} &= \frac{1}{L_0} \int_0^h \frac{\partial B_x^i(x,z,t)}{\partial y} dz \end{aligned} \quad (3.31)$$

Hattın x noktasında ve t zamanındaki toplam akım, aşağıdaki şekilde toplam dağılmış akım açısından ifade edilir:

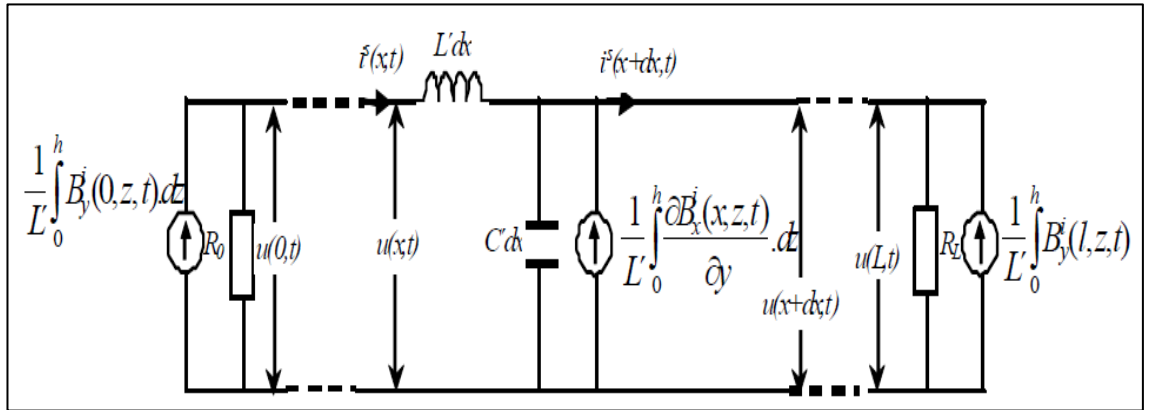
$$i(x,t) = i^s(x,t) + \frac{1}{L} \int_0^h \frac{\partial B_y^i(x,z,t)}{\partial y} dz \quad (3.32)$$

Hat sonlanmasındaki sınır koşulları ise:

$$i^s(0,t) = -\frac{u(0,t)}{R_0} + \frac{1}{L} \int_0^h B_y^i(0,z,t) dz$$

$$i^s(L,t) = -\frac{u(L,t)}{R_L} + \frac{1}{L} \int_0^h B_y^i(L,z,t) dz \quad (3.33)$$

İletim hattı bağlantısına ait alanlar, manyetik alan bileşenleri üzerinden değerlendirilir. Genellikle, manyetik alanların ölçümü, elektrik alanlarının ölçülmesinden çok daha kolaydır. Bu nedenle bu model daha çok kullanılabilir. Çünkü yalnızca manyetik alan ölçülerek akım ve gerilimler tespit edilebilir. Şekil 3.17' de Rachidi modelinin eşdeğer kublaj devresi gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Rachidi modelinin eşdeğer kublaj devresi

3.5.5. Chowdhuri modeli

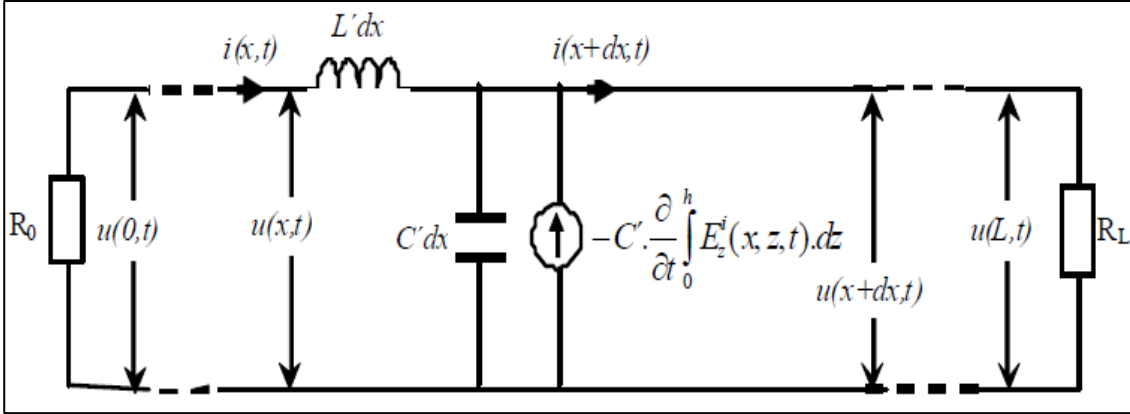
Chowdhuri ve Brüt tarafından sunulan iletim hattı denklemleri Rusk modeline benzerdir (Chowdhuri vd 1967). Bununla birlikte, toplam hat voltajı YEMD sonucu oluşan aşırı gerilimler, nominal hat gerilim değerleri ve skaler potansiyel bileşeni modelde kullanılır (Chowdhuri 1990). Chowdhuri iletim hattı denklemleri şu şekildedir:

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

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C' \cdot \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = -C' \cdot \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h E_z^i(x,z,t) dz \quad (3.34)$$

Burada E_z^i YEMD'in düştüğü bölgedeki elektrik alanının dikey bileşenidir. Şekil 3.18' de Rachidi modelinin eşdeğer kublaj devresi gösterilmiştir. Sınır koşulları ise aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} u(0,t) &= -R_0 \cdot i(0,t) \\ u(L,t) &= -R_L \cdot i(L,t) \end{aligned} \quad (3.35)$$



Şekil 3.18. Chowdhuri modelinin eşdeğer kublaj devresi

3.5.6. Kublaj modellerine genel bakış

Yukarıda bahsedilen kublaj modellerinde üstün bulunan iki model vardır. Bunlar güç hatlarındaki YEMD kaynaklı aşırı voltajları tahmin etmek için sıklıkla bu modeller kullanılır. Bu modellerden en çok kullanılanı Rusk modeli ve Agrawal modelleridir. Bu iki model arasında karşılaştırma yapılırsa Rusk modelinin vektör potansiyelini ihmal ettiğini yalnızca yatay elektrik alanının kaynak bağımlılığına neden olan kısmını kullanmaktadır. Buna rağmen YEMD parametreleri eksik olmasına rağmen Rusk modeli doğru sonuçlar verebilir. Agrawal modelinde ise bu vektör bileşeni hesaba katılmaktadır. Rachidi modelinde ise manyetik alan değeri aşırı gerilimlerin tespiti için kullanılan ana etmendir.

3.6. Endirekt YEMD Kaynaklı Aşırı Voltaj Hesaplamaları

Havai tipteki enerji nakil hatlarındaki YEMD kaynaklı aşırı voltajların analizinde kullanılan sayısal yöntemlerin çoğunda zaman-etki analizi kullanılır. Zaman domeninde ki iletim hattı eşleşme denklemlerini çözmek için en popüler yaklaşımlardan biri olan sonlu farklar yöntemi (FDTD) tekniğidir. Bu teknik Agrawal modelinde kullanılmıştır. Kublaj denklemlerinin sayısal çözümlerini içeren denklemler kapsamlı bir şekilde anlatılmıştır (F. Rachidi vd 1996).

$$\begin{aligned} \frac{\partial V(x)}{\partial x} + Z' \cdot I(x) &= jw \int_0^h B_y^i(x,z) dz \\ \frac{\partial I(x)}{\partial x} + Y' \cdot V(x) &= -Y' \int_0^h E_x^i(x,z) dz \end{aligned} \quad (3.36)$$

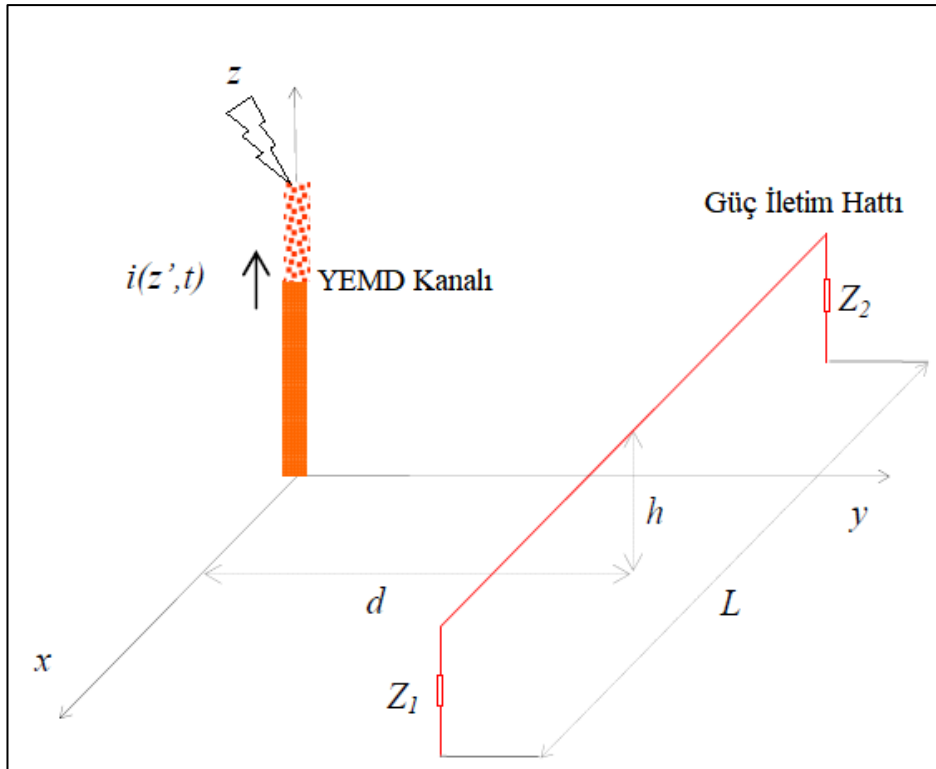
Burada sırasıyla, hat boyunca voltaj ve akım parametreleri olan $V(x)$ ve $I(x)$, sırasıyla verilen Z' ve Y' hat iletkenleri dağıtılan seri empedans ve şönt değerleridir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial V^s(x)}{\partial x} + Z' I(x) &= E_x^i(x, h) \\ \frac{\partial I(x)}{\partial x} + Y' V^s(x) &= 0 \end{aligned} \quad (3.37)$$

Burada $E_x^i(x, h)$ elektrik alanının yatay bileşeni, Z' ve Y' sırasıyla uzunlamasına ve enine birim başına uzunluk empedansı olarak ifade edilmiştir. $V^s(x)$, dağılan (saçılan) voltaj ifadesidir.

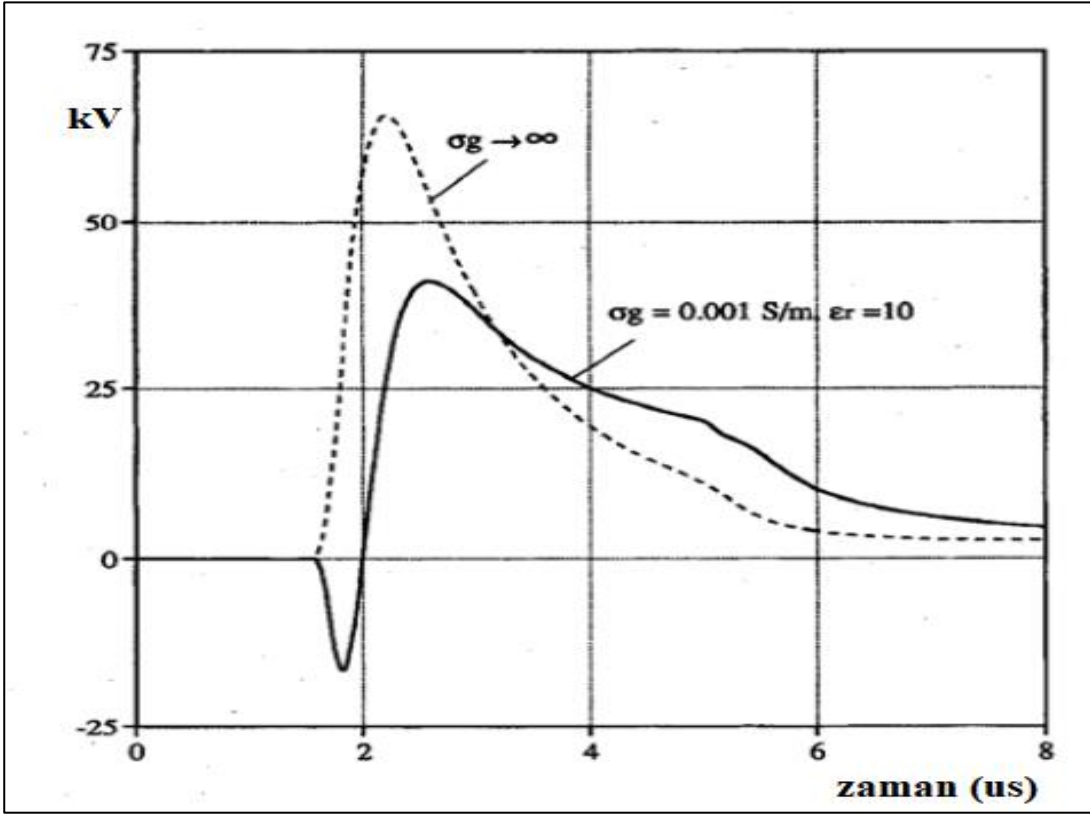
$$\begin{aligned} \frac{\partial V(x)}{\partial x} + Z' I^s(x) &= 0 \\ \frac{\partial I^s(x)}{\partial x} + Y' V(x) &= -\frac{1}{Z'} \int_0^h \frac{\partial B_x^i(x, z)}{\partial y} dz \end{aligned} \quad (3.38)$$

Burada $B_x^i(x, z)$ manyetik alanın iletken boyunca yatay bileşeni, $I^s(x)$, dağılan (saçılan) voltaj ifadesidir. Frekans domanin de sunulan iletim hattı kublaj denklemleri (3.36), (3.37) ve (3.38) zaman domenine dönüştürülebilir. İletken ve yer empedansları gibi frekansa bağlı parametreler konvolüsyon integrali kullanılarak gösterilebilir. Atıfta bulunan makalede önerilen FDTD kodu vasıtasıyla indüklenmiş voltajlar tespit edilmiştir (Uman vd 1975).



Şekil 3.19. YEMD aşırı gerilimin hesaplanması için problemin geometrisi

FDTD çözümünde kullanılan geometrik yapı, kayıplı bir zemin üzerinde kayıpsız bir faz iletkeninden oluşan yapılardır. İletkenin uzunluğu 1 km, yüksekliği 10 m olarak belirlenmiştir. YEMD' in düşme noktası hattan 50 m uzaktadır. İki hat ucu arasındaki mesafe eşittir. Hatta indüklenen voltaj Şekil 3.20' de gösterilmiştir. Şekil 3.20' de hatta indüklenmiş voltaj hem sonlu hem de sonsuz toprak iletkenleri için çizilmiştir. Gösterildiği gibi yer iletkenliği hem büyüklük hem de polarite için indüklenen voltajları etkiler (F. Rachidi vd 1996).



Şekil 3.20. 1 km uzunluğunda ve 10 m yüksekliğindeki bir havai hat üzerinde endirekt olarak YEMD kaynaklı aşırı gerilimler

4. BULGULAR

4.1.Yıldırım Elektromanyetik Darbesinin Enerji Tesislerinde Meydana Getirdiği Geçici Olayların Analizi ve Koruma Önlemleri

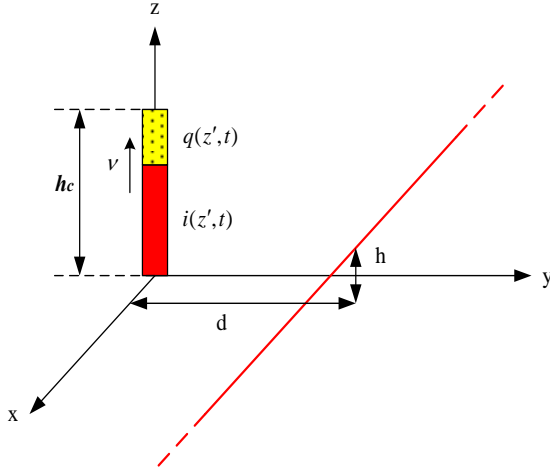
Bu çalışmada yıldırım elektromanyetik dalgasının (YEMD), enerji nakil hatlarına veya güç sistemlerine yakın yerlere düşmesi sonucunda oluşturduğu etkiler incelenmiştir. Problemin modellenerek simülasyon olarak çözülmesinde ATP-EMTP programı kullanılmıştır. Örnek bir güç şebekesinin tek hat şemasından yararlanarak bir bölümüne YEMD uygulanmıştır. Simülasyon çalışmasında, paratoner bulunmayan bir enerji tesisi veya yüksek kesimde bulunan bir enerji nakil hattının faz iletkenine YEMD düşmesi durumu incelenmiştir. YEMD'in enerji tesisine bir kez düştüğü düşünülmüştür. YEMD kaynağı için ATP-EMTP programında bulunan Heidler dalga modeli ve rampa fonksiyonları kullanılmıştır. Voltaj kademesi 380/154 kV gerilim değerine sahip indirici bir transformator merkezi (TM) ve merkeze bağlı enerji şebekesinde bulunan enerji nakil hatları birebir programda modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar YEMD' den kaynaklanan voltajların 154 kV güç sistemi için yalıtım aşınma seviyesinin üzerinde MV' lara ulaşabileceğini göstermiştir. YEMD, enerji iletim ve dağıtım sistemlerinde aşırı gerilim oluşumunun en önemli nedenidir. Temel olarak YEMD, bulutların birbiri ile elektrostatik etkisinden dolayı oluşan bir doğa olayıdır. Yüklü durumda olan bulutlar yeryüzüne yakın yerlerde bu yüklenmeleri boşaltırlar. Bu boşalma, milyonlarca voltluğun gelişmesinden kaynaklanan dev bir kıvılcım olup büyük bir kondansatörün dielektrik parçalanmasına benzemektedir. YEMD boşalma gerilimi bulut ile toprak arasında milyonlarca voltla başlayabilirler. Bu aşırı gerilimler binalara, ağaçlara, enerji tesislerine ve enerji nakil hatlarına isabet etmektedir (Beaty 2006). YEMD geçici (transient) bir olay olarak sınıflandırılır (Burke 1994). YEMD etkisini anlayabilmek buna neyin sebep olduğunu ve nerede oluşacağı hakkında bilgi sahibi olmak gerekir (Uman 1986). Bu çalışmada YEMD darbesinin 380/154 kV bir indirici TM' ye ait enerji nakil hattının belirli bir bölgesine düşmesi sonucundaki geçici (transient) olaylar incelenmiştir.

4.1.1. Teorik analiz ve prototip modeli

YEMD darbesinde bulunan enerji miktarı çok yüksektir. Bir enerji nakil hattına veya enerji tesislerine tek darbe olarak bile düşse son derece yıkıcı hasarlar verebilmektedir. YEMD, dağıtım ve iletim hatlarındaki kesintilerin başlıca nedenlerinden biridir. YEMD darbesi bir güç hattına düştüğünde büyük bir akım kaynağı ile elektrik hattı devresi arasındaki büyük bir anahtarı kapatmak gibidir. Bu anahtarın kapanması devrenin koşullarında ani bir değişime neden olarak geçici bir (transient) durum oluşturur. YEMD darbesi enerji nakil hattına (ENH) yakın yerlere düşmesi durumunda YEMD darbesi kaynaklı akım yüzünden ortamda büyük bir manyetik alan oluşur. Bunun sonucunda ENH ile YEMD arasında kublaj etkisi meydana gelir. Kublaj etkisi sonucunda yine bir transient olay oluşur. YEMD darbesinin ENH etkisinin araştırılması çok önemlidir. Genellikle yüksek rakımlı bölgelerde bulunan ENH için çok ciddi bir sorun olabilir. YEMD darbesinin bir yapıya düşme ihtimali yüksekliği ile birlikte artmaktadır.

YEMD darbesi bulutlar ile yer arasında tek vuruş veya çok sayıda bileşen vuruşu şeklinde meydana gelebilir. Çok vuruşlu YEMD darbeleri 3-4 vuruşa sahiptir. Darbeler genellikle 40 ila 50 ms aralıklarında meydana gelir. YEMD darbeleri genellikle 10 kA ile 20 kA

aralığında ölçülen tipik pik akımlarına sahiptirler. YEMD darbesi pik akımlarına saniyenin birkaç milyonda birinde ulaşır. Sönümlenmesi ise saniyenin binde birinde meydana gelir. YEMD darbesinden korunma konusunda ulusal ve uluslararası standartların neredeyse tamamı İsviçre’ de yapılan yıldırım akım ölçümlerine dayanmaktadır. YEMD teorik olarak Şekil 4.1 ’ de gösterilen modelle temsil edilmektedir.

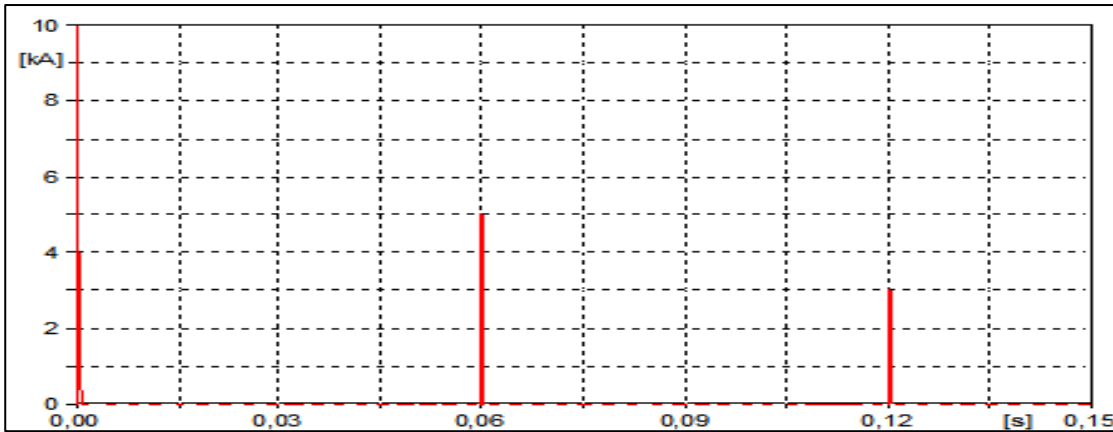


Şekil 4.1. YEMD darbesi matematiksel modeli (Çakıl T vd 2017)

$$\frac{dv^\phi}{dx}(x,t) + l' \frac{di}{dt}(x,t) = 0 \quad (4.1)$$

$$c' \cdot \frac{dv^\phi}{dx}(x,t) + \frac{di}{dt}(x,t) = c' \cdot \frac{d\phi'(x,h,t)}{dt} \quad (4.2)$$

YEMD çalışmada üç darbeli olarak modellenmiştir. Çalışmada kullanılan YEMD darbesi birinci darbesi 10 kA olup 0,6 ms kadar sürmekte, ikincil darbe 5 kA olup 0,6 ms'den başlayarak aniden düşmekte ve 3 kA lik üçüncül darbe ise 0,12 ms'den başlayıp aniden sönümlenmekte olup YEMD darbeleri Heidler modeli (3.14) ve (3.15) kullanılarak benzetim programında modellenmiştir. Şekil 4.2' de gösterilmiştir.



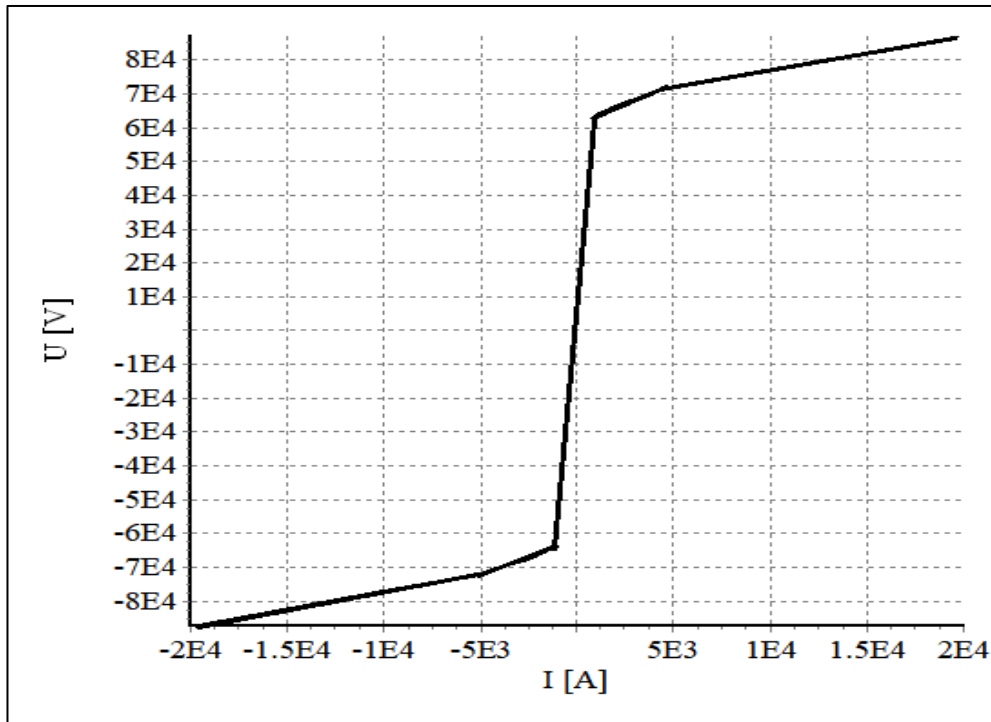
Şekil 4.2. YEMD darbesinin ATP-EMTP simülasyonunda ki dalga formu

4.1.2. Enerji tesislerinin YEMD' den korunma yöntemleri

YEMD' den korunmak için enerji tesislerinde ve ENH' lerde belirli önleyici mekanizmalar kullanılabilir. Yüksek gerilim (YG) taşıyan iletim hatlarını korumak için kule yapısındaki direklerin tepe noktasından koruma iletkenleri yerleştirilmektedir. Bu koruma iletkeni, toprakla bağlantısı sağlanarak direğin üst tarafı teorik olarak bir Faraday kafesi olarak modellenmektedir. Bu topraklanmış koruma iletkenleri, faz iletkenlerine YEMD darbelerinin düşmesini engellemek için kullanılmaktadır (L. Grcev 2009). Fazların taşınmasında kullanılan izolatörlerin sınır uçları demir çubuklarla eklenti yapılarak (ark boynuzları) YEMD' de karşı fazlar koruma altına alınabilir. Ancak bazı durumlarda YEMD fazlara isabet etmekte veya gerilim atlama şeklinde de etki etmektedir.

4.1.2.1. Parafudurların yapısı ve modeli

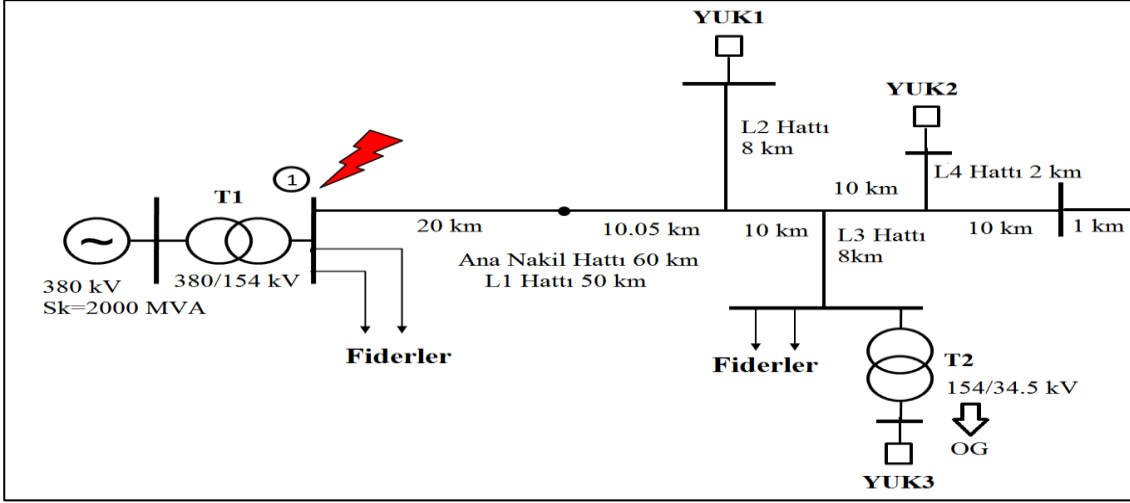
Bir YEMD darbesi, enerji tesisi veya ENH' e düşerse bunları korumanın tek yolu parafudurlardır. Parafudurlar lineer olmayan direnç yapıları sayesinde bu pik akımların zemine çekilmesini sağlarlar. Parafudurların çalışma prensibi, her zaman devrede açık konumda bulunmalarıdır. Güç hattındaki veya güç tesisindeki gerilim ne zaman ki nominal voltaj değerini aşarsa, enjekte olan YEMD akımını toprağa ileten düşük dirençli bir yol oluştururlar (Ishii vd 1991). Çalışmada kullanılan parafudur tipleri ABB firmasının YG tipindeki ELK-14 parafuduru ile orta gerilim (OG) parafuduru olan ABB Polim-D tipi metal oksit varistör (MOV) tipindeki parafudur ATP-EMTP programına uyarlanmıştır (Teiaş 2015). Şekil 4.3' te ise kullanılan parafudurun akım-gerilim karakteristiği gösterilmiştir.



Şekil 4.3. ATP programındaki ABB- ELK14 tipi parafudurunun akım-gerilim karakteristik grafiği

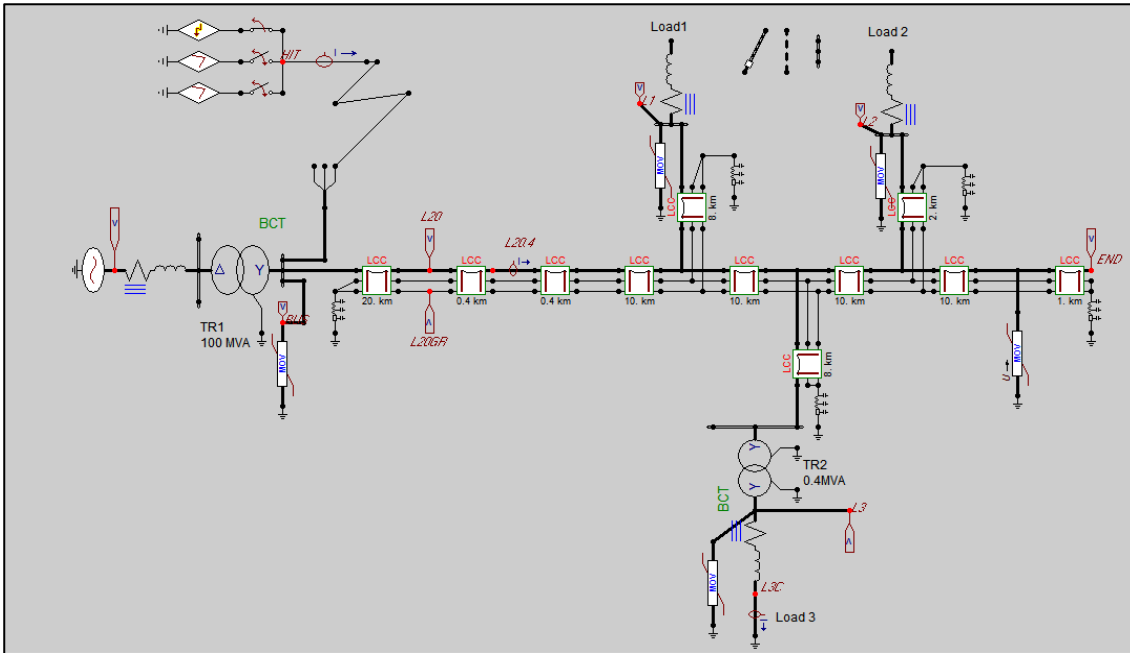
4.1.3. Enerji tesisi ve enerji nakil hatlarının ATP-EMTP modeli

YEMD darbe düşmelerinin enerji sistemleri üzerindeki etkisinin görülebilmesi için bir test sistemi ATP-EMTP programı kullanılarak modellenmiştir. Test edilen sistem bir YG indirici TM ve buna bağlı olan ENH' den oluşmaktadır. 380/154 kV indirici oto transformatör ile 154 kV'luk gerilime sahip çatal pilon tipinde direk tiplerinden oluşan ENH, programa birebir aktarılmıştır. Test edilen sistemde, YEMD'in ana nakil hattının bağlı olduğu bus barasına düştüğü kabul edilmiştir.



Şekil 4.4. Modellemede kullanılan YG şebekesinin tek hat diyagramı

Modellemede kullanılan tek hat şeması Şekil 4.4' te gösterilmiştir. ATP programına bire bir aktarılan bu güç şebekesinin benzetim düzlemi ise Şekil 4.5' te gösterilmiştir.



Şekil.4.5. YG güç şebekesinin ATP-EMTP modeli

4.1.3.1. Enerji nakil hatlarının modeli

Çalışmada 154 kV lık ENH' ler kullanılmıştır. İletkenler ve koruma iletkenleri birebir programa aktarılmıştır. ATP programında ENH' ler LCC bloğunda bulunan J-Marti modeline göre yapılmıştır. Bu modelin kullanılmasının nedeni geçici (transient) analizlerde genellikle bu model kullanılmaktadır. Modellemede kullanılan direkler ise 3'lü demet yapısına sahip iletkenlerden oluşan çatal pylon direklerdir (Şekil 8.). Faz iletkeni olarak ise ülkemizde en çok kullanılan 154 YG havai hattı, 477 MCM (Hawk) iletkeni kullanılmıştır (Prikler vd 2017).

4.1.3.2. Yüklerin modellenmesi

Modellenen enerji sisteminde Yük1, Yük2 ve Yük3 olmak üzere 3 tane yük modellenmiştir. Yük1 için yaklaşık 5 MW aktif güç, 2,5 MVAr reaktif güç, Yük2 için yaklaşık 4 MW aktif güç, 2 MVAr reaktif güç ve Yük3 için de yaklaşık 40 kW aktif güç ve 20 kVAR reaktif güç değerlerine sahip endüstriyel değerler girilmiştir. Yüklerin güç faktörleri TEDAŞ'ın belirlediği güç faktörüne göre belirlenmiştir. Yükler ATP programının RLC bloğu ile modellenmiştir. ATP programında R ve L değerleri girilerek güçler tespit edilir. Bu değerler (4.3) ve (4.4) kullanılarak elde edilmiştir.

$$R = \frac{U^2}{P} \text{ (Ohm)} \quad (4.3)$$

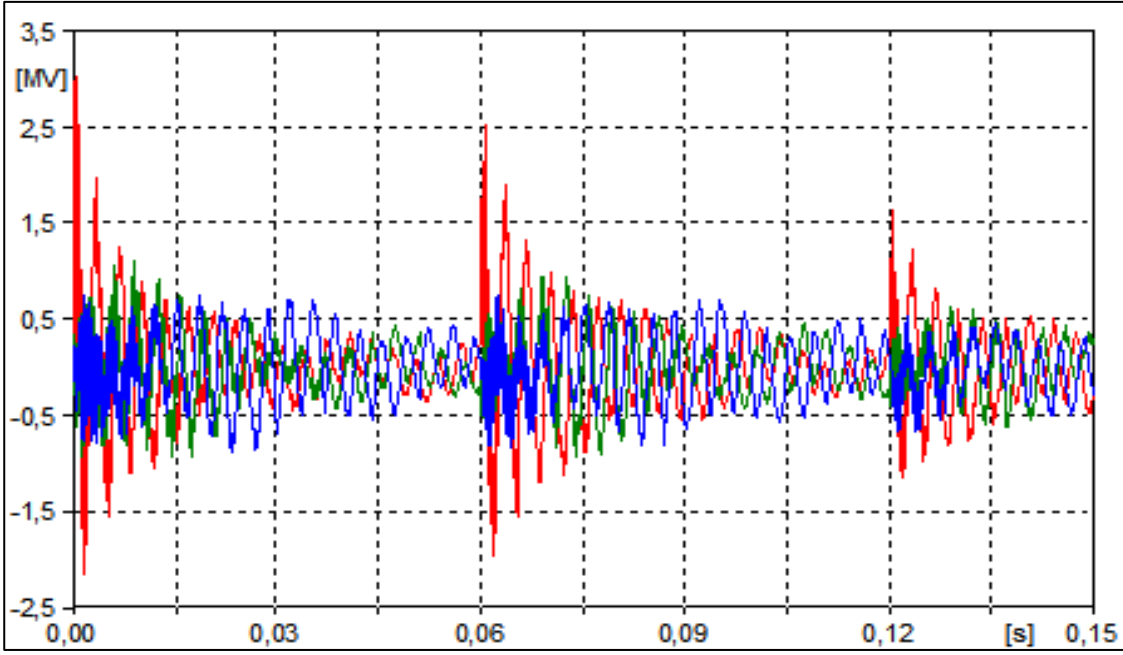
$$L = \frac{U^2 / Q}{2 \cdot \pi \cdot f} \text{ (Henry (H))} \quad (4.4)$$

4.1.4. Yıldırım elektromanyetik darbesinin enerji tesislerinde meydana getirdiği geçici olayların analiz sonuçları

Bu çalışmada birden çok farklı durum incelenmiştir. Senaryolardan biri 380/154 kV indirici TM' de bulunan bara hattının L1 fazına, YEMD düşmesi sonucundaki geçici olaylar incelenmiştir. Farklı bir senaryoda aynı bölgeye düşen YEMD darbesinin koruma elemanları devrede iken, meydana gelen geçici olaylar incelenmiştir. Bunun sonucunda iki durum birbiriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan güç şebekesinin ATP-EMTP şeması Şekil 4.5' de gösterilmiştir.

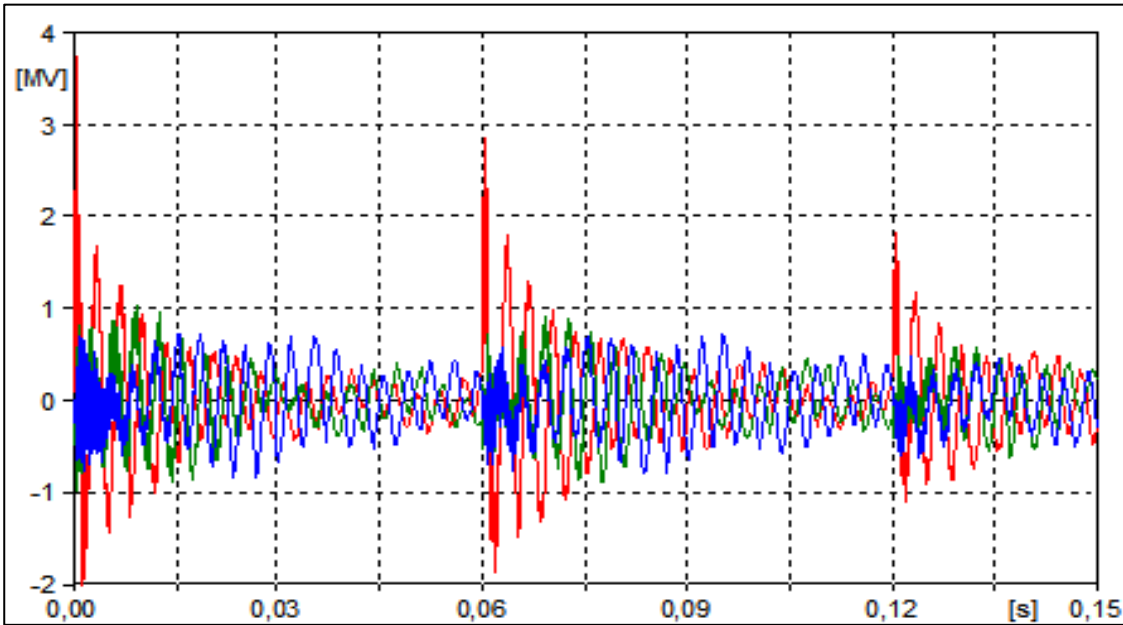
4.1.4.1. Senaryo I

Beklendiği gibi YEMD' de karşı parafudur sistemlerinin bulunmadığı durumlarda bu etki yıkıcıdır. Bu yıkıcı etki hat yapılarında izolasyon arızasına ve bağlı olan elektriksel ekipmanlara (transformatörler, kesiciler, röleler) hasar verir. Senaryo I' de 380/154 kV indirici trafo merkezinde bulunan bara hattının L1 fazına YEMD düşmesi sonucunda (parafudurların devrede olmaması koşulu) geçici olaylar incelenmiştir. Bu olay incelenirken ilginç bir ayrıntı göze çarpmıştır. Trafo merkezinin bağlı olduğu enerji nakil hattı boyunca meydana gelen yansımalar dalgalanmayı artırmıştır ve yüksek değerlere ulaşan gerilimler meydana gelmiştir.



Şekil.4.6. I. Senaryoya göre TM'ye 20 km uzakta YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilim. Kırmızı L1 fazı, mavi: L2 fazı, yeşil: L3 fazı

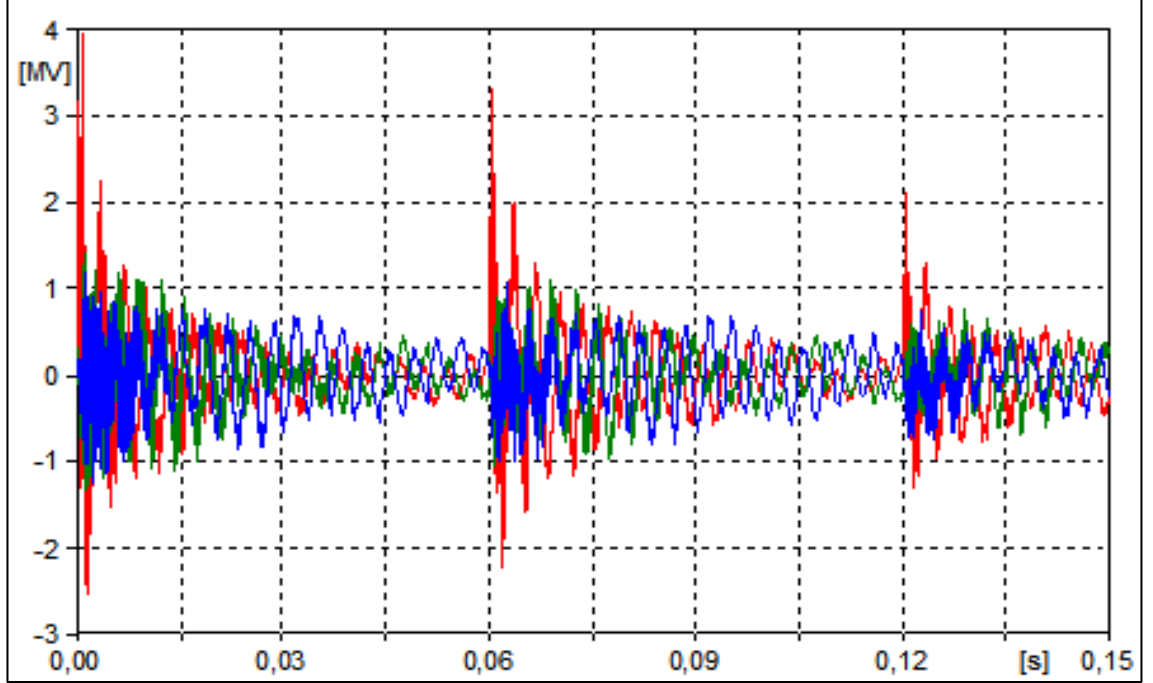
Şekil 4.5' te gösterilen YG güç şebekesinde bulunan L20 voltaj probundan okunan değer Şekil 4.6' da gösterilmiştir. Yük1' in bulunduğu bara da bulunan L1 voltaj probundan okunan değer Şekil 4.7' de gösterilmiştir.



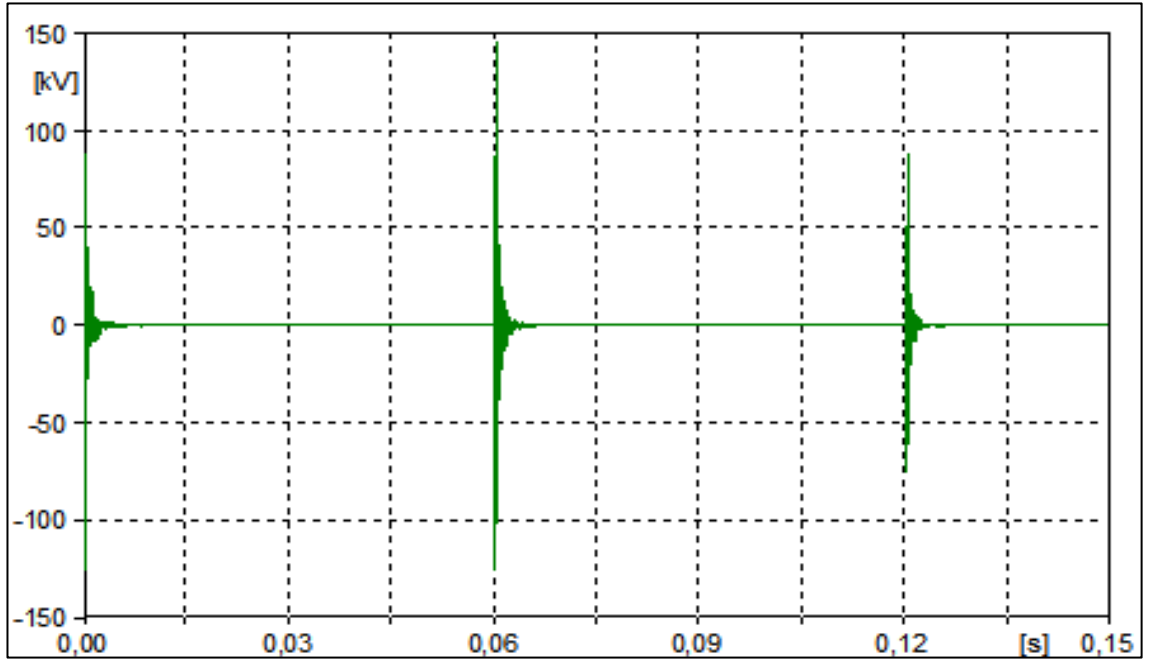
Şekil 4.7. I. Senaryoya göre Yük1'in bağlı olduğu bara da YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilim. Kırmızı L1 fazı, mavi: L2 fazı, yeşil: L3 fazı

Şekil 4.5' de gösterilen YG güç şebekesinde bulunan ana baranın ölçümünde kullanılan VBUS voltaj probundan okunan değer Şekil 4.8' de gösterilmiştir.

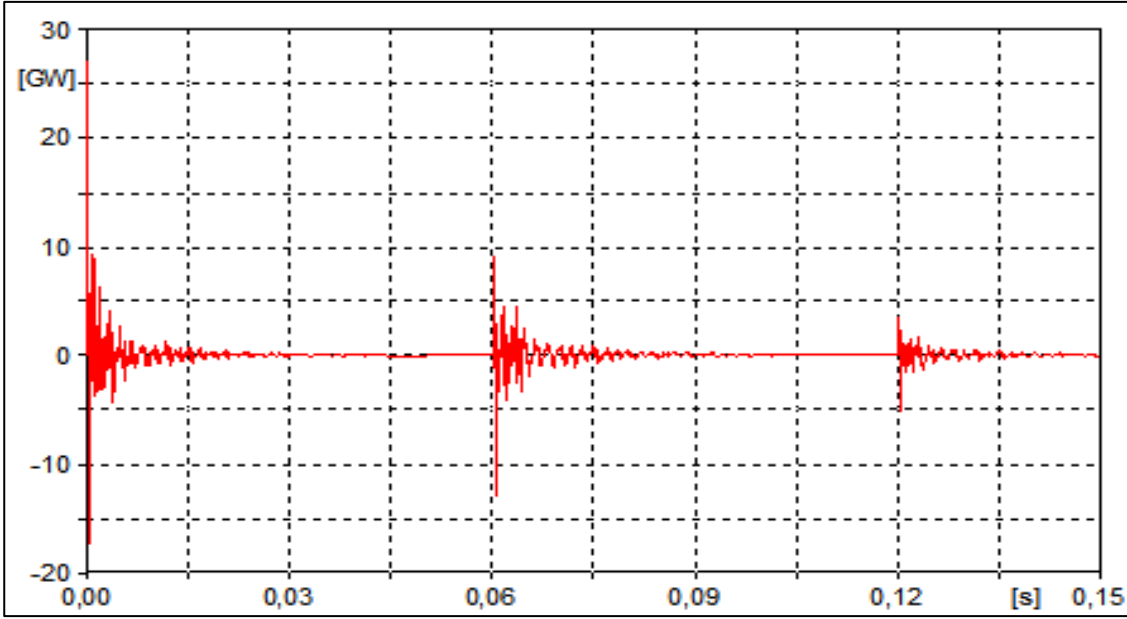
Güç şebekesine YEMD darbesi düştüğü anda ana hattın sonunda bulunan enerji nakil hattının koruma iletkeninde indüklenen gerilim Şekil 4.9 'da gösterilmiştir. Bu sonuç izolatörler için belirlenen sınır gerilimidir. Modellenen güç şebekesine, düşen YEMD darbesinin enerji kapasitesi ise Şekil 4.10' da gösterilmiştir.



Şekil 4.8. I. Senaryoya göre ana bara da YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilim. Kırmızı L1 fazı, mavi: L2 fazı, yeşil: L3 fazı

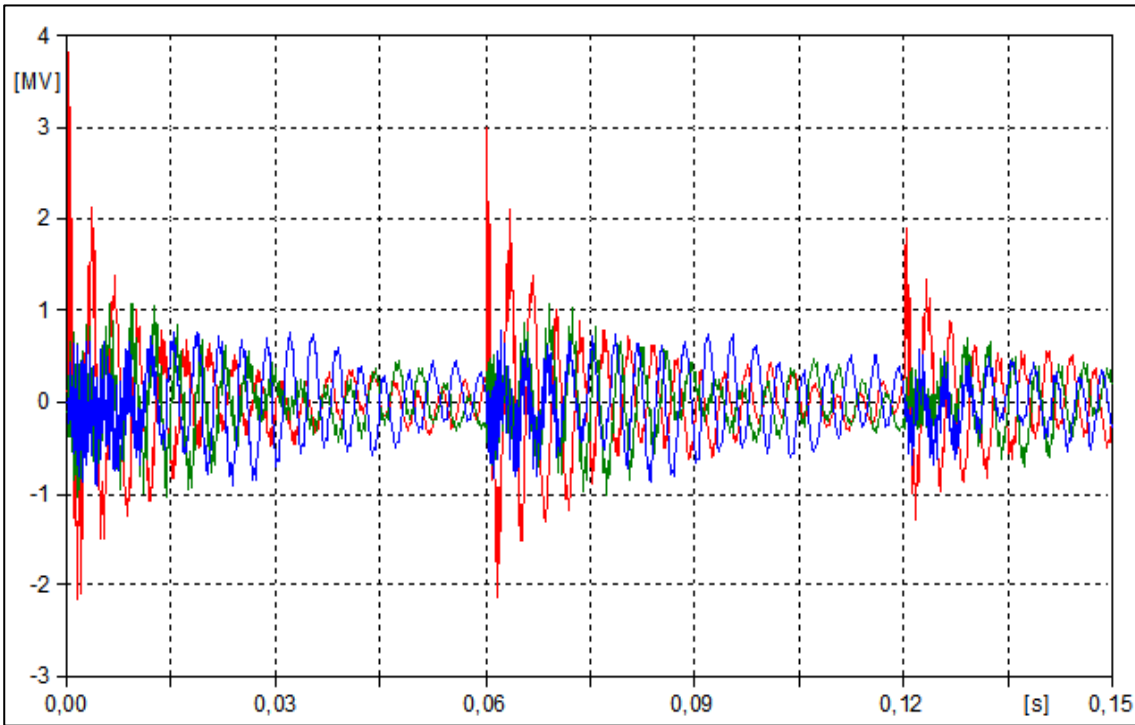


Şekil 4.9. I. Senaryoya göre koruma iletkeninde indüklenen YEMD kaynaklı kısa süreli oluşan aşırı gerilim.

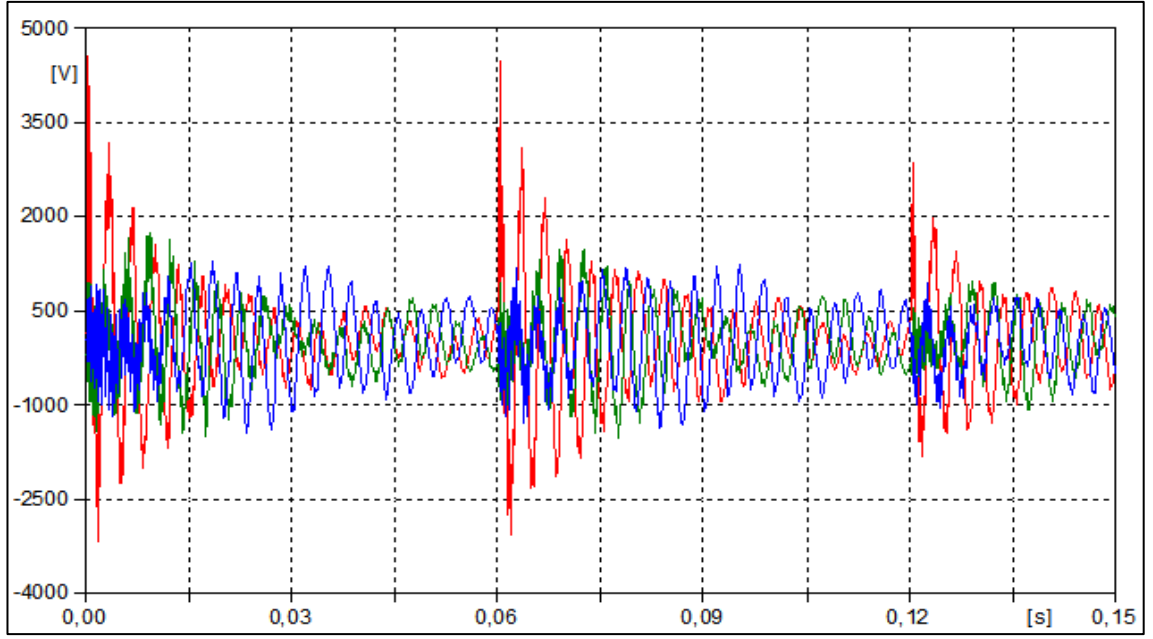


Şekil 4.10. Senaryoya göre güç şebekesine düşen YEMD darbesinin enerji kapasitesi

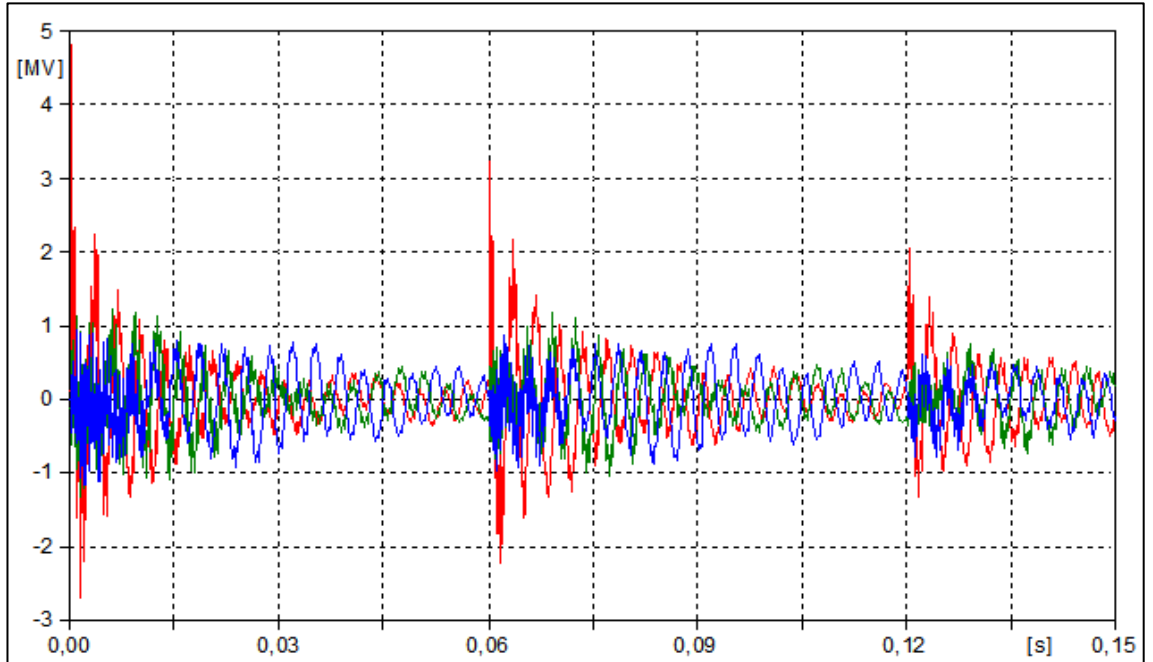
Şekil 4.5’ de gösterilen YG güç şebekesinde bulunan V_L2 ölçüm probundan okunan değer Şekil 4.11’ de gösterilmiştir. AG seviyesinde bulunan V_L3 ölçüm probundan okunan değer ise Şekil 4.12’ de gösterilmiştir. Güç şebekesine YEMD darbesi düştüğü anda ana hattın sonunda bulunan V_END ölçüm probundan okunan değeri ise Şekil 4.13’ te gösterilmiştir



Şekil 4.11. I. Senaryoya göre Yük2’in bağlı olduğu bara da YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilim. Kırmızı L1 fazı, mavi: L2 fazı, yeşil: L3 fazı



Şekil 4.12. I. Senaryoya göre Yük3'ün bağlı olduğu bara da YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilim. Kırmızı L1 fazı, mavi: L2 fazı, yeşil: L3 fazı

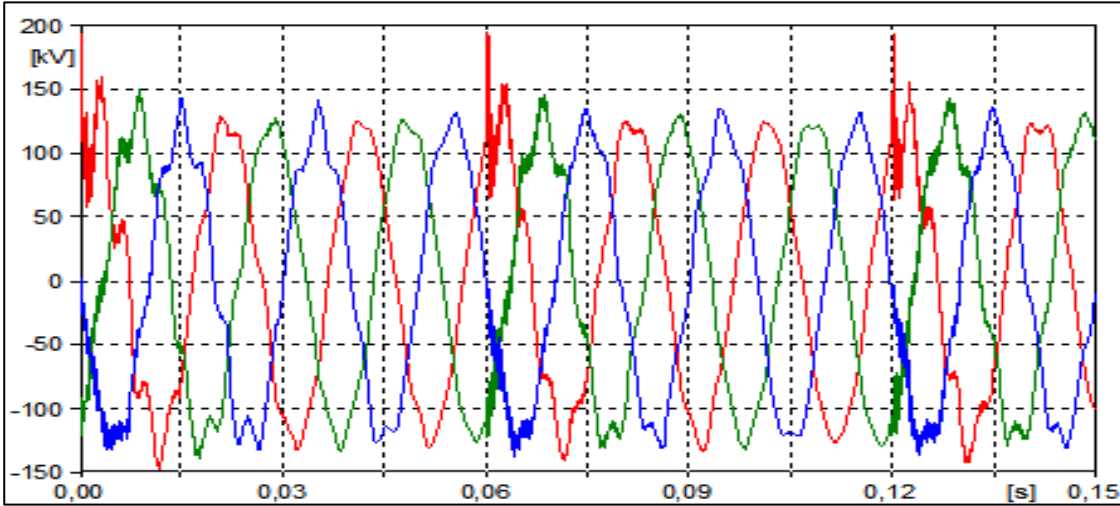


Şekil 4.13. I. Senaryoya göre hattın sonunda oluşan YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilim. Kırmızı L1 fazı, mavi: L2 fazı, yeşil: L3 fazı

4.1.4.2. Senaryo II

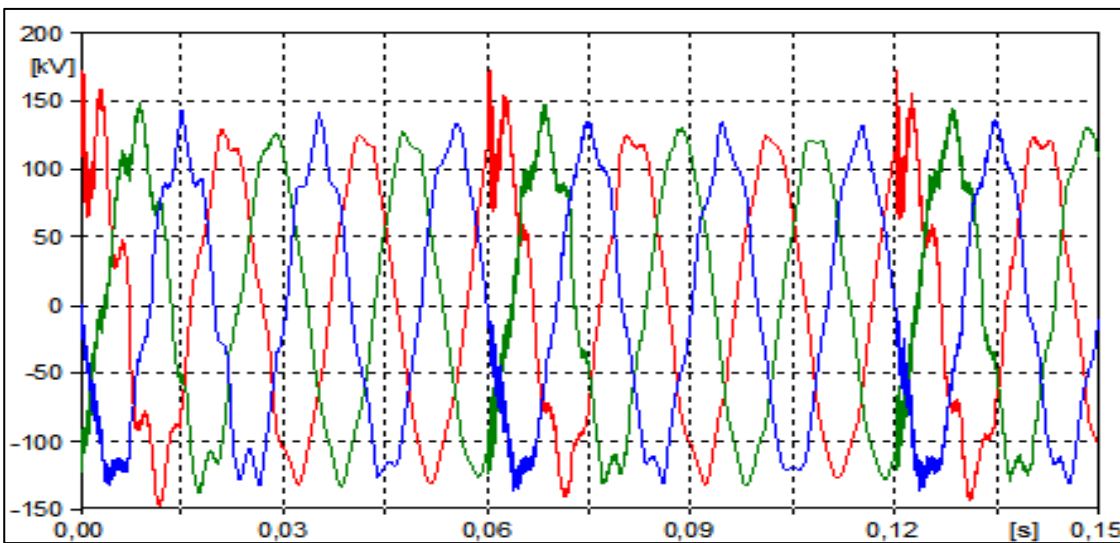
YEMD darbesi senaryo I'deki gibi aynı bölgeye düşmekte ancak bu senaryoda farklı olarak parafudur sistemleri devrededir. Buna göre YEMD darbesinin sistemde nasıl absorbe edildiği gösterilmiştir. Parafudurların enerji tesisleri için çok önemli bir donanım

olduğu bu analizle görülmüştür. Sonuçlarda parafudurların güç sistemlerinde YEMD darbelerinin oluşturduğu voltaj seviyelerinde büyük düşüş sağladığı görülmektedir. Parafudurlar genellikle birkaç metre ile on metre arası sınırlı bir bölgeyi aktif olarak korurlar. Bu koruma bölgeleri IEC 60099-5 standardına göre yalıtım koordinasyon gereksinimlerini tamamlayan maksimum ayırma mesafesi olarak tanımlanır. Bu nedenle parafudurlar korunacak cihazlara yakın konulmalıdır. Genellikle parafudurlar, enerji tesislerinde önemli bir yapı olan transformatörlere yakın bölgelere yerleştirilmektedir.



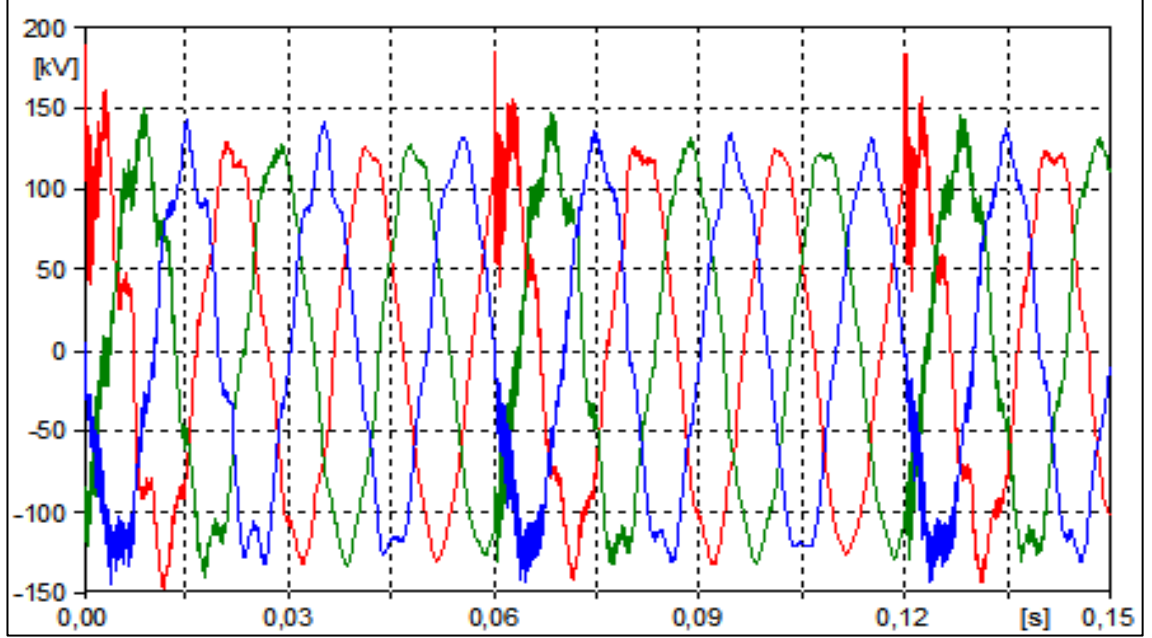
Şekil 4.14. II. senaryoya göre TM'ye 20 km uzakta YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilimin filtre edilmesi. Kırmızı L1 fazı, mavi: L2 fazı, yeşil: L3 fazı

Modellenen güç şebekesinde Şekil 4.5' te bulunan parafudurların devrede olduğu durumda ana hatta YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilim Şekil 4.14' te gösterildiği gibi absorbe edilmiştir. Aynı durumda yük1' in bağlı olduğu bara da ki aşırı gerilim ise Şekil 4.15' te gösterildiği gibi absorbe edilmiştir.

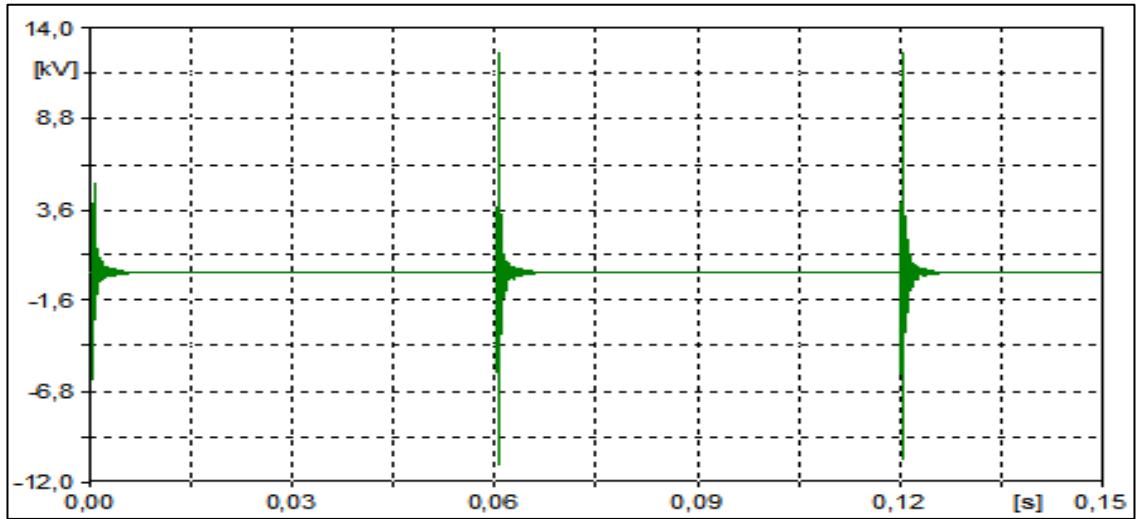


Şekil 4.15. II. senaryoya göre Yük1'in bağlı olduğu YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilimin filtre edilmesi. Kırmızı L1 fazı, mavi: L2 fazı, yeşil: L3 fazı

II senaryo'ya göre ana baranın L1 fazına düşen YEMD darbesinin oluşturduğu aşırı gerilim Şekil 4.8' de parafudurlar sayesinde Şekil 4.16' da gösterildiği gibi absorbe edilmiştir. Aynı durumda ana hattın sonunda bulunan direğin koruma iletkeninde indüklenen gerilimin, parafudurlar sayesinde düştüğü Şekil 4.17' de görülmektedir.

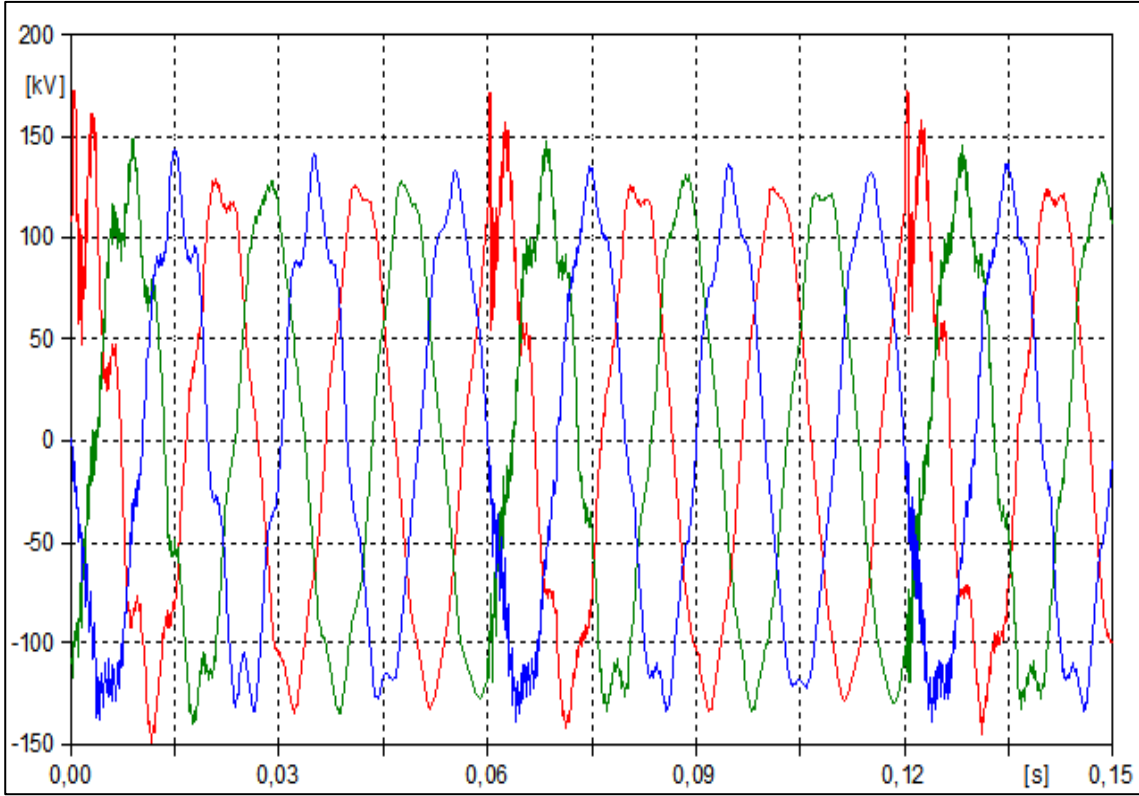


Şekil 4.16. II. senaryoya göre ana bara da YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilimin filtre edilmesi. Kırmızı L1 fazı, mavi: L2 fazı, yeşil: L3 fazı

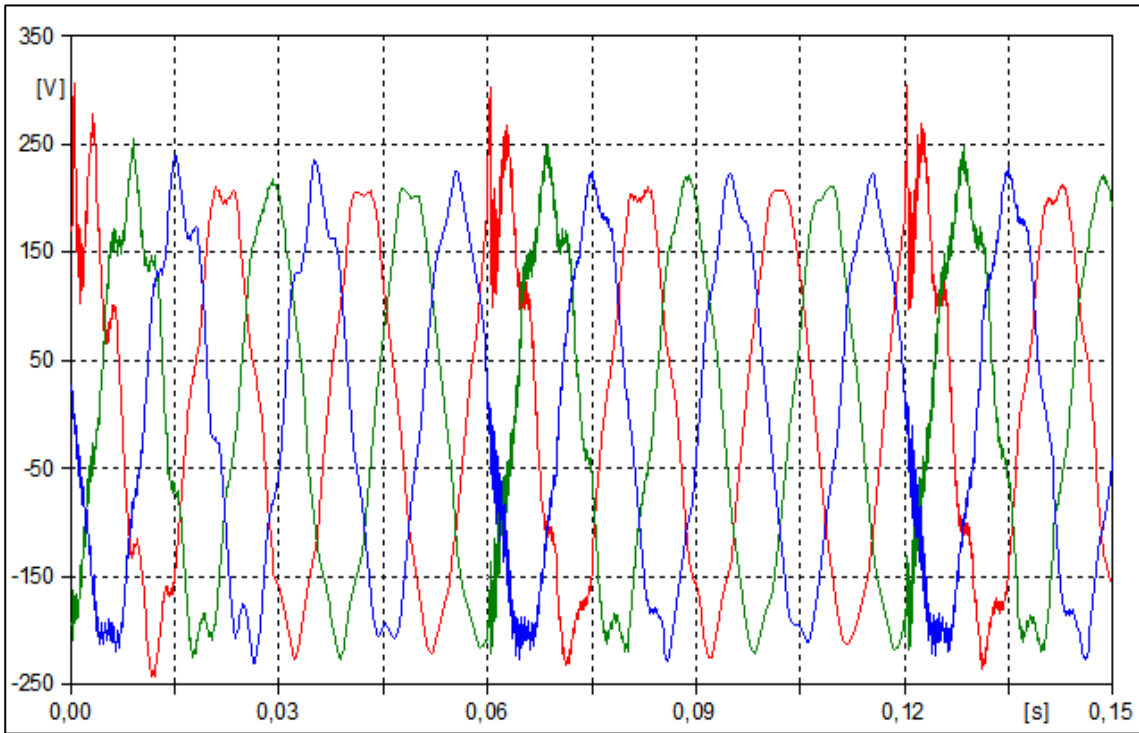


Şekil 4.17. II. senaryoya göre koruma iletkeninde indüklenen YEMD kaynaklı kısa süreli oluşan aşırı gerilim.

Modellenen güç şebekesinde Şekil 4.5' te bulunan parafudurların devrede olduğu durumda yük2' nin bağlı olduğu bara da ki aşırı gerilim ise Şekil 4.18' de gösterildiği gibi absorbe edilmiştir. Yük3' ün bağlı olduğu bara da ki oluşan aşırı gerilimde AG parafuduru sayesinde Şekil 4.19' da absorbe edilmiştir.

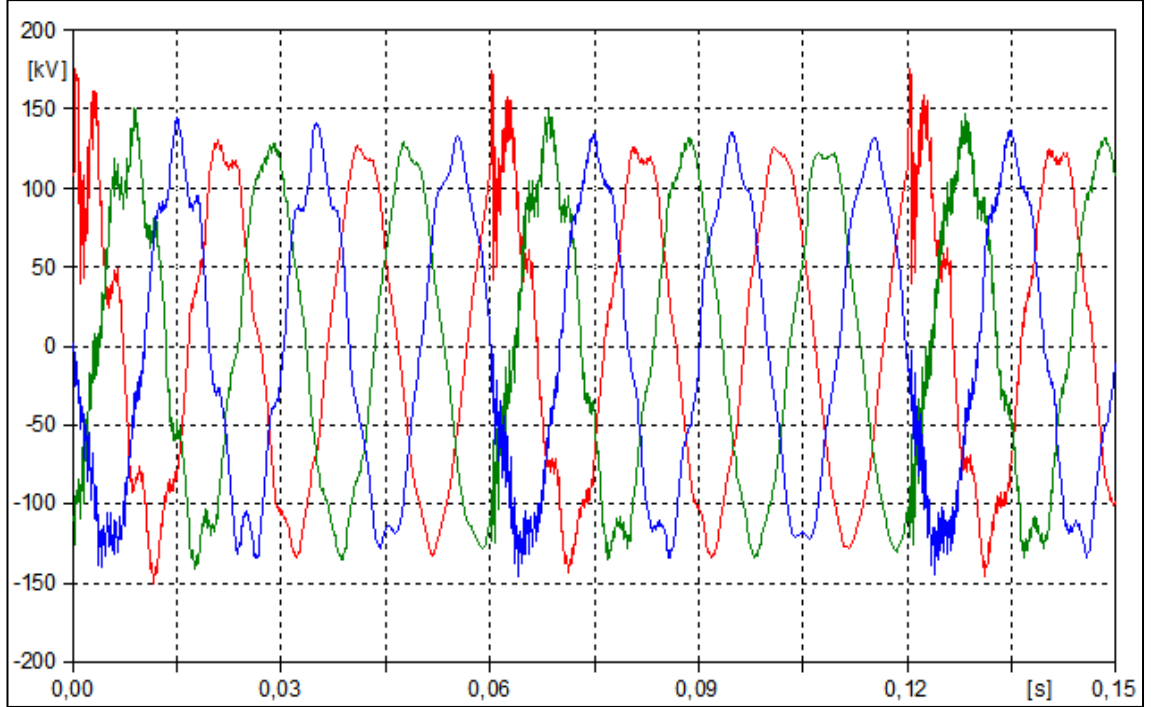


Şekil 4.18. II. senaryoya göre Yük2'nin bağlı olduğu YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilimin filtre edilmesi. Kırmızı L1 fazı, mavi: L2 fazı, yeşil: L3 fazı



Şekil 4.19. II. senaryoya göre Yük3'ün bağlı olduğu YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilimin filtre edilmesi. Kırmızı L1 fazı, mavi: L2 fazı, yeşil: L3 fazı

Modellenen güç şebekesine YEMD darbesi düştüğü anda ana hattın sonunda bulunan parafudur sayesinde hattın sonundaki aşırı gerilim Şekil 4.20’ de absorbe edildiği gösterilmiştir.



Şekil 4.20. II. Senaryoya göre hattın sonunda oluşan YEMD kaynaklı oluşan aşırı gerilimin filtre edilmesi. Kırmızı: L1 fazı, mavi: L2 fazı, yeşil: L3 fazı

4.2. Direk Tiplerine Göre Enerji Nakil Hatlarında YEMD Düşmesi Sonucunda Transient Analizi

Bu çalışmada enerji nakil hatlarında kullanılan kafes direklere YEMD düşmesi sonucu meydana gelen aşırı gerilimler ATP-EMTP kullanılarak analiz edilmiştir. YEMD kaynaklı aşırı gerilimlerin etkilerini verimli olarak inceleyebilmek için direk tiplerinin gerçeğe yakın modellenmesi gerekir. Analizlerde daha doğru sonuçlar elde edebilmek için elektrik direklerinin yüksekliğe göre değişen Uniform olmayan hatlar ile modellenmesi gerekir. YEMD’ in faz iletkenine düşmesi çalışması bir önceki çalışmada analiz edilmişti. Bu çalışmada ise en çok karşılaşılan YEMD’ in toprak iletkenine veya koruma iletkenine düşmesi sonucunda ortaya çıkabilecek transient olaylar incelenmiştir. YEMD akımının karakteristik parametreleri elektrik mühendisliği ve fizik dalında çalışan bilim adamları tarafından, yalıtım koordinasyonundaki önemi nedeniyle uzun yıllardır yoğun bir şekilde araştırılmıştır. ENH ve elektrik tesislerinin içindeki elektrik ve elektronik ekipmanların YEMD akımına karşı koruma amaçlandığı için bu alanda çalışma ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

YEMD düşmesi güç sistemlerinde izolatörlerin kırılmasına, iletkenlerin kopmasına ve elektrik kesintileri gibi önemli arızalara yol açmaktadır (Kaygusuz vd 2003). ENH’ lerde YEMD düşmesi sonucunda izolatörlerde bir gerilim yükselmesi oluşur. Bu gerilim yükselmesinden dolayı bir atlama meydana gelebilmektedir. Bu da izolatörlerin

kırılmasına ve YEMD darbesinin şebekeye yayılması ile sonuçlanır. Bunun sonucunda enerji dağıtım sistemleri ve şalt sahalarında kullanılan aygıtlar, jeneratörler, elektronik cihazlar ve transformatörler zarar görebilir. Bunun sonucunda enerji kesintileri oluşmaktadır. Bu durumlar dikkate alındığında YEMD düşmesi sonucu hatlarda oluşan aşırı gerilimlerin hesaplanması ve YEMD düşmesi sonucu meydana gelecek durumlar için gerekli önlemlerin alınması enerjinin iletiminde büyük önem taşır.

YEMD enerji iletim hatlarındaki etkisi incelenirken oluşan aşırı gerilimlerin analizi ve etkisi incelenirken birçok deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ancak pratikte yapılan bu çalışmalar pahalı olması ve deneylerin tekrarlanma zorluğundan dolayı günümüzde elektromanyetik dalgaların analizinde benzetim programları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bölümde ise özellikle ülkemizde 380 kV'lık enerji nakil hatlarında kullanılan direk tiplerine göre YEMD düşmesi sonucu aşırı gerilimler ATP-EMTP programı yardımıyla analiz edilmiştir.

4.2.1. 380 kV'lık iletim hattının karakteristik özelliği

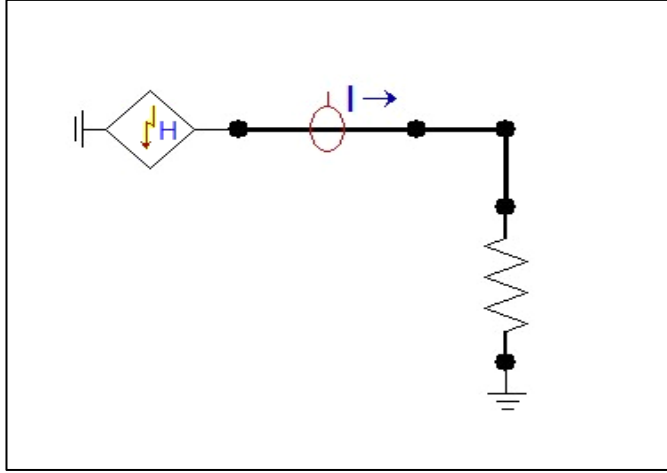
Bu çalışmada simülasyon için iletim hattında kullanılan faz iletkeni ve koruma iletkenlerine ait TEİAŞ katalog bilgilerinden alınan değerler Tablo 4.1' de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1		İletim Hattının karakteristiği	
İletkenler	Tip	Çap (mm)	Direnç (Ω/km)
Faz İletkenleri	Rail	29.61	0.0597
Koruma İletkeni	7N8	9.78	1.4625

YEMD analizi yapılırken iletim hattının doğru olarak modellenmesi gerekir. Ayrıca direğin geometrik yapısı ile birleştirilmesinin çok dikkatli bir biçimde yapılması önemlidir (Ueda T vd 2000). Bunun için iletim hattının geometrisi iletim hattında kullanılan iletken çapları, yeryüzüne olan yükseklikleri gibi bilgiler ATP programında görülen LCC alt birimi yardımıyla kullanıma hazır hale gelir.

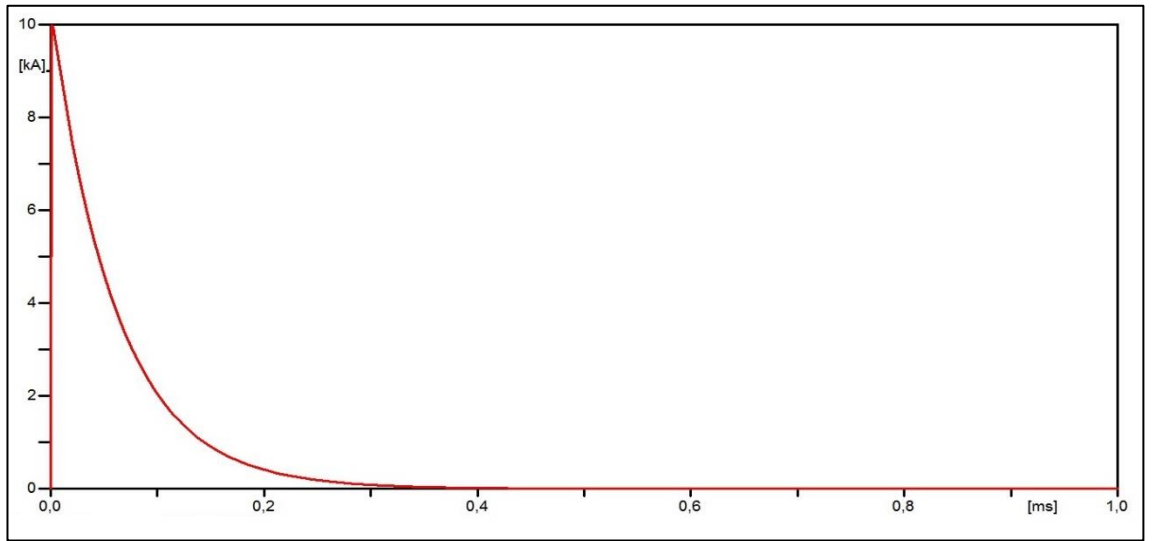
4.2.2. YEMD modeli

YEMD, ATP-EMTP programında yıldırım yolu empedansı olan paralel bir direnç ve akım kaynağı olarak modellenmektedir. Çalışmada kullanılan YEMD modeli Heidler fonksiyonu (3.14) ve (3.15) denklemleri ile tanımlı model Şekil 4.21' de kullanılmıştır.



Şekil 4.21. ATP-EMTP programında YEMD Modeli

Bu çalışmada kullanılan Heidler fonksiyonunun parametreleri sırasıyla $I_0 = 10$ kA ve 60 kA, $\tau_1 = 1.2$ μ s, $\tau_2 = 61.7$ μ s ve $n = 2$ olarak alınmış ve Şekil 4.22’ de gösterilen bir diğer YEMD akımı dalga formu analizde kullanılmıştır.



Şekil 4.22. Çalışmada kullanılan YEMD akımının şekli

4.2.3. Yüksek gerilim taşıyan enerji nakil hatlarında kullanılan direk modelleri

Bu çalışmada Türkiye’ de 154 ve 380 kV’ lık iletim hatlarında kullanılan pylon direklerin toprak (koruma) iletkenine YEMD düşmesi sonucunda meydana gelebilecek durumlar incelenmiştir. YEMD analizinin doğru sonuçlara yakın olabilmesi için direklerin karakteristik empedanslarının uygun bir model olarak tasarlanması gerekmektedir. Analizde kullanılan direkler, pylon direk (6 faz- 1 nötr), çatal pylon direk(3 faz-2 nötr) ve çok katlı pylon direk (6 faz-1 nötr) kullanılmıştır.

Burada ele alınan pylon direk modelleri ATP-EMTP programında modellenmiştir. Bu model de elektrik direğinin üst bölümünde 220Ω ve direğin temelinde 150Ω ’ luk

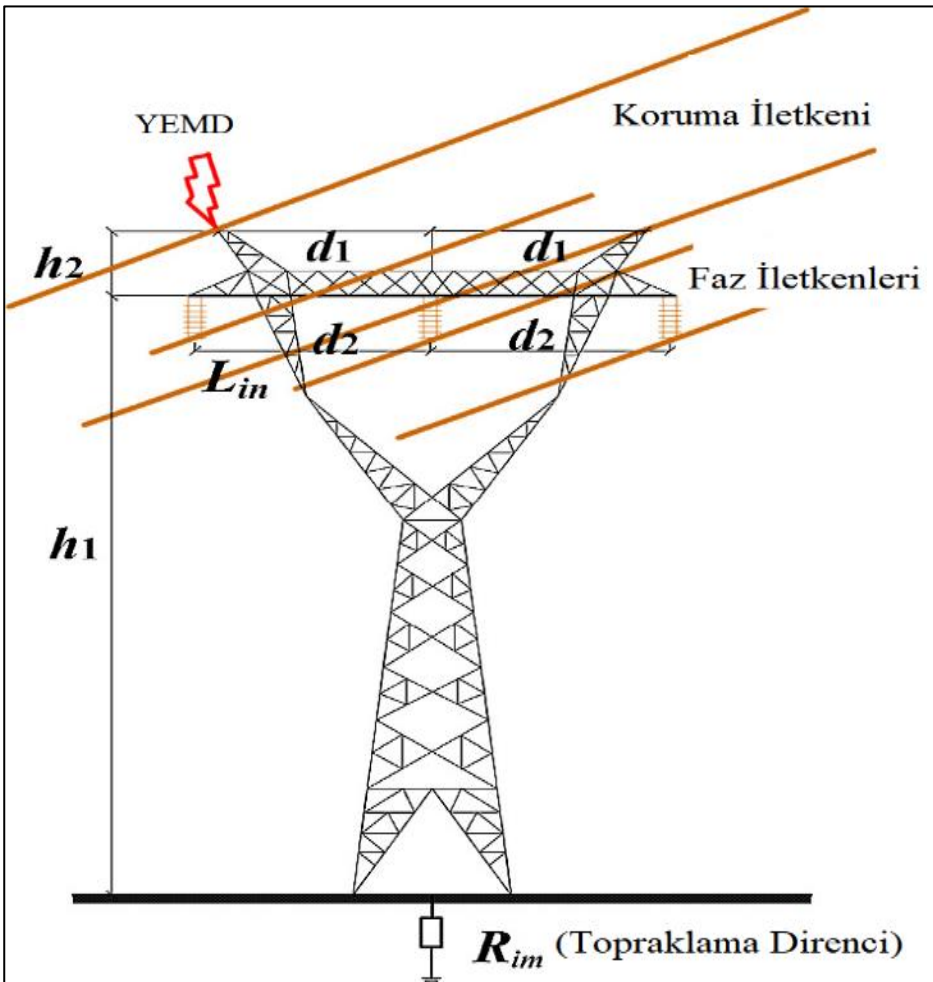
karakteristik empedans değeri alınmıştır. Bu karakteristik empedans değışimi üstel bir fonksiyon olarak ifade edilmiş ve fonksiyon denklem (4.5)' te gösterilmiştir.

$$Z_0 = 150 \cdot \exp^{qx} \quad (4.5)$$

Burada ($q=0.142$) direk yüksekliği ile ilgili bir sabittir, x ise yer seviyesinden ölçülen yüksekliktir.

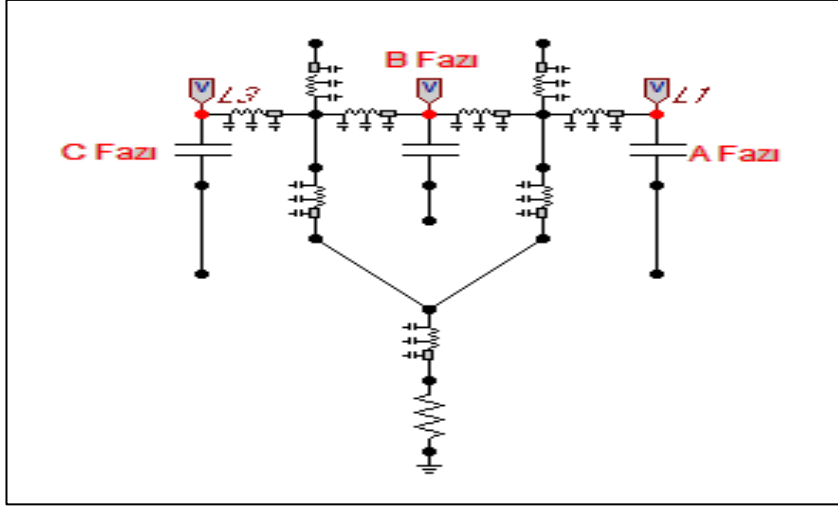
4.2.3.1. Çatal pylon direk modeli

Pylon direklerden çatal pylon direğin şekli Şekil 4.23' de ve direğe ait ölçülendirme değerleri TEİAŞ kataloğundan alınmış Tablo 4.2' de verilmiştir. Direğin görünümü Şekil 4.24' te gösterilmiştir.



Şekil 4.23. Çatal Pylon direğin görünümü (Demet iletkenli 154 kV)

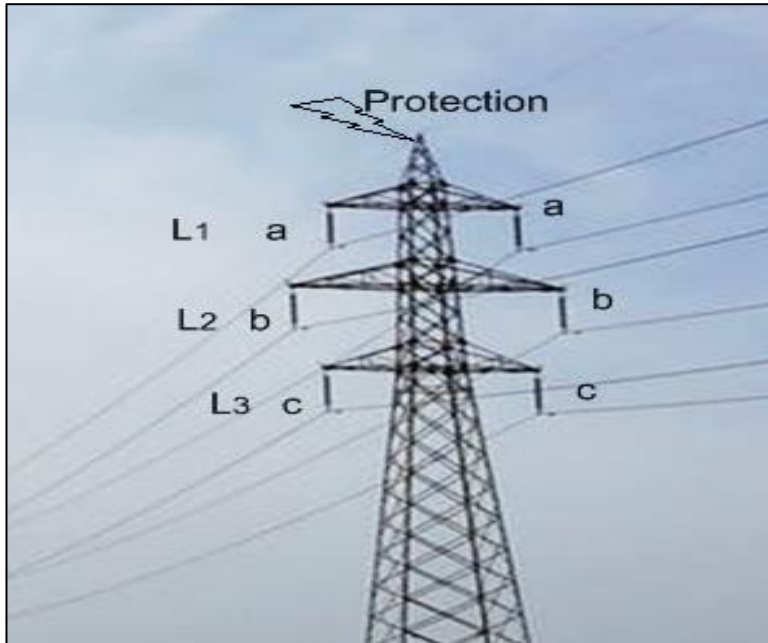
Çizelge 4.2		Çalışmada kullanılan çatal pylon direğe ait boyut ölçümleri			
d2	d2	d1	h2	h1	h
5.9m	5.9m	3.6m	3.85m	23.15m	27m



Şekil 4.24. Çatal Pilon direk modelinin ATP-EMTP' deki modeli (154 kV için)

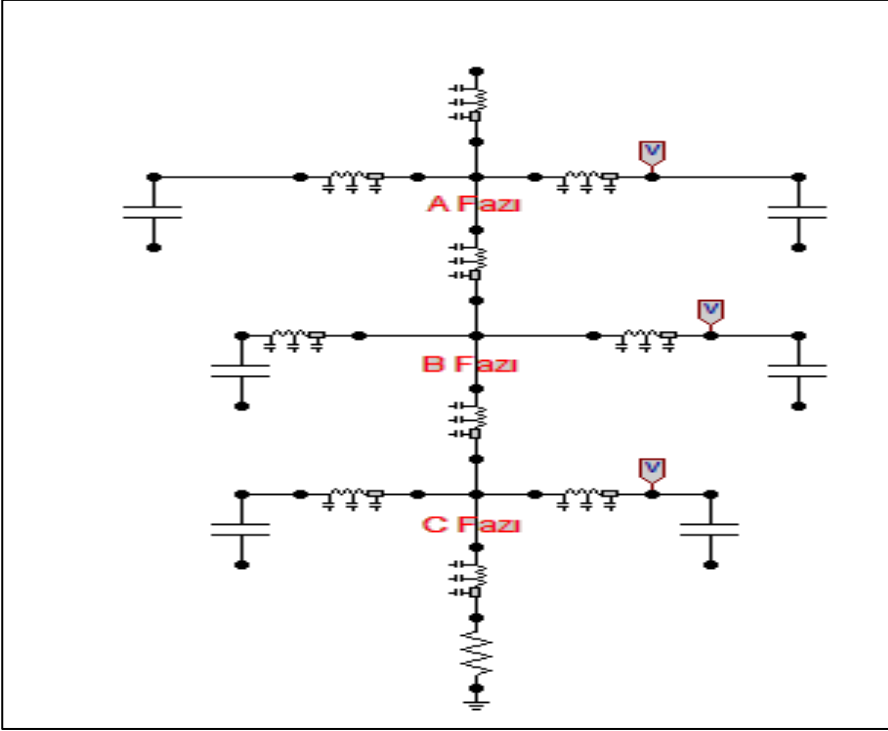
4.2.3.2. Basit ve çok katlı pylon direk modeli

Çalışmada kullanılan pylon direğe ait direk şekli Şekil 4.25' te gösterilmiştir. Direğe ait ölçülendirme boyutları TEİAŞ kataloğundan alınmış olup Tablo 4.3' te verilmiştir. Analizde kullanılan pylon direğin yüksekliği 30m' dir. Direğin topraklama direnci ise 20Ω alınmıştır. Direğin görünümü Şekil 4.26' da gösterilmiştir.

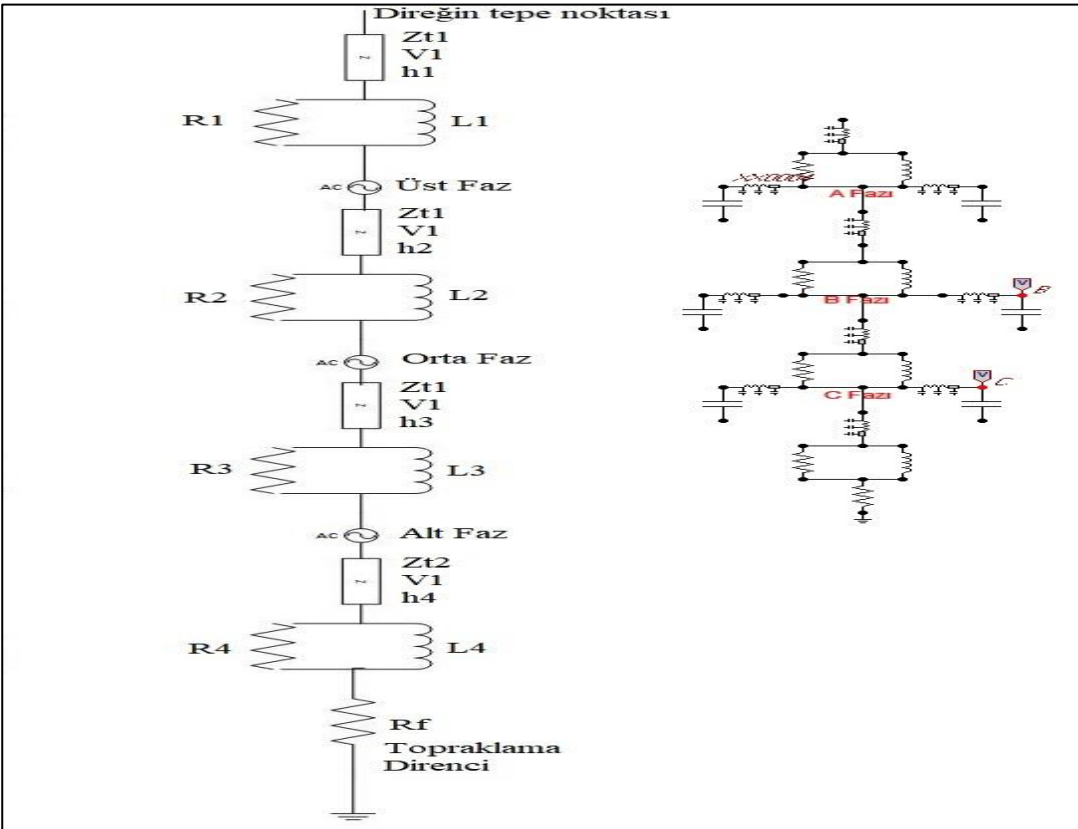


Şekil 4.25. Basit Pylon direğin görünümü (Çift Devre 380 kV)

Çizelge 4.3		Çalışmada kullanılan basit pylon direğe ait boyut ölçümleri				
a	a'	f	h1	h2	h3	h4
3.20m	4.10m	3.50m	3.80m	4.15m	4.15m	17.90m



Şekil 4.26. Basit Pilon direğin ATP-EMTP’ deki modeli (380 kV için)



Şekil 4.27. Çok katlı Pilon direğin eşdeğer devre modeli ve ATP-EMTP’ deki modeli

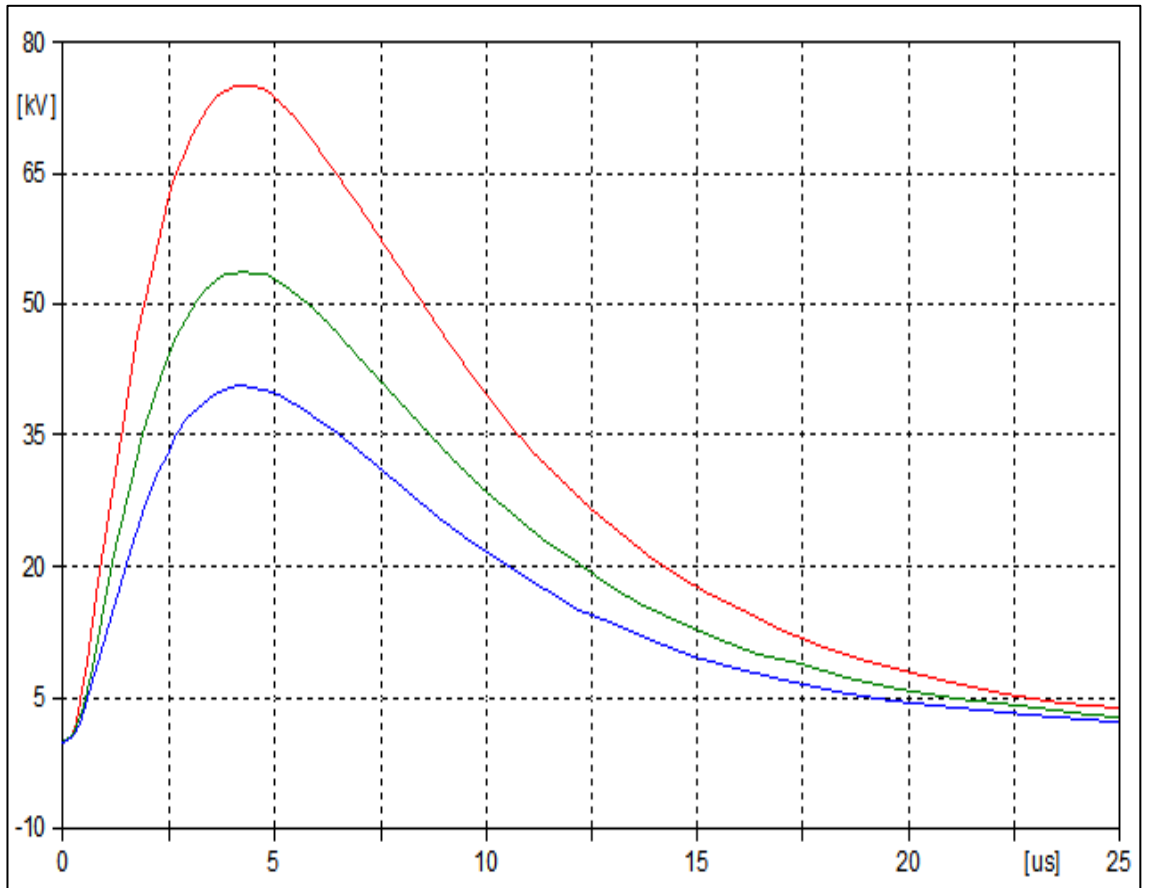
$$R_i = \frac{-2Z_{11} \cdot \ln \sqrt{Y}}{h_1 + h_2 + h_3} \cdot h_i$$

$$R_4 = -2Z_{12} \cdot \ln \sqrt{Y} \quad (i=1, 2, 3 \text{ ve } 4) \quad (4.6)$$

$$L_i = \alpha \cdot R_i \cdot \frac{2H}{V_1}$$

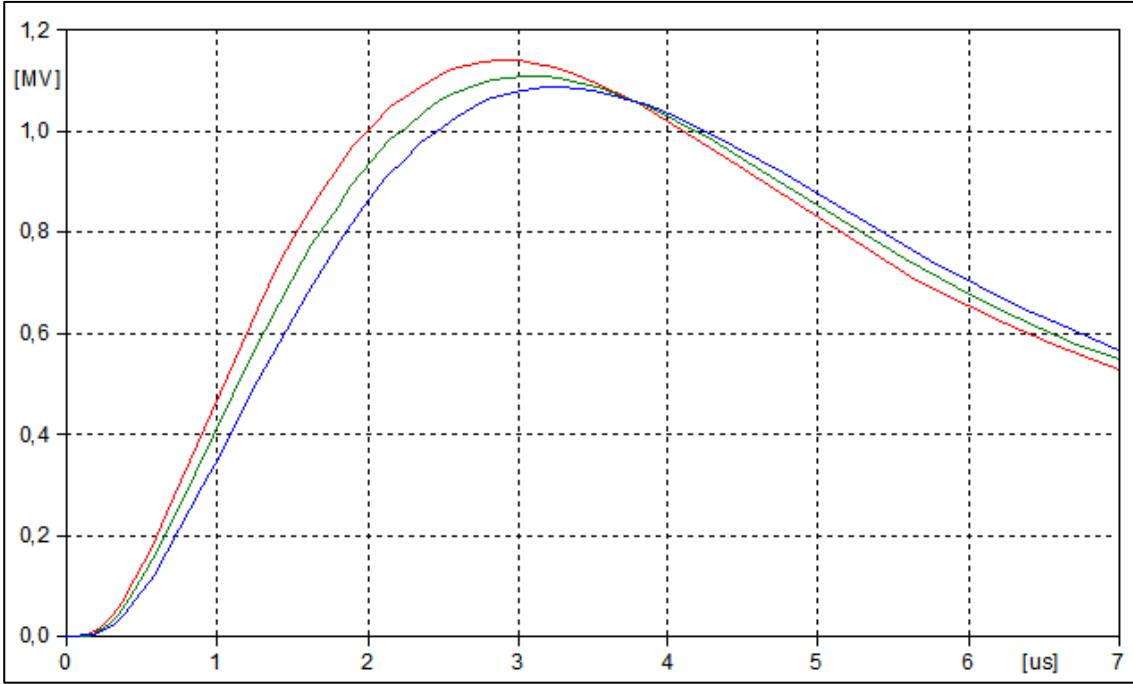
4.2.4. Uygulama ve analiz

Bu çalışmada ele alınan çatal pylon direğın yüksekliği 27 m, basit ve çok katlı pylon direk yüksekliği ise 30 m' dir. YEMD oluşumunda kullanılan kaynağın empedansı 400Ω ve darbenin yayılım hızı ışık hızına eşit olduğu kabul edilmiştir. Analizde 40 km'lik bir iletim hattı LCC alt menüsü ile tasarlanmış ve hatta pylon direk ve çatal pylon direkler kullanılmıştır. YEMD'in direğın koruma iletkenine düşmesi sonucunda izolatörlerde ve fazlarda oluşan aşırı gerilimler ATP-EMTP kullanılarak analiz edilmiştir. Modellerde izolatörlerin yerine zincir izolatörün eşdeğeri olan 80 pF'lık kondansatörler kullanılmıştır (Ueda T vd 2000).

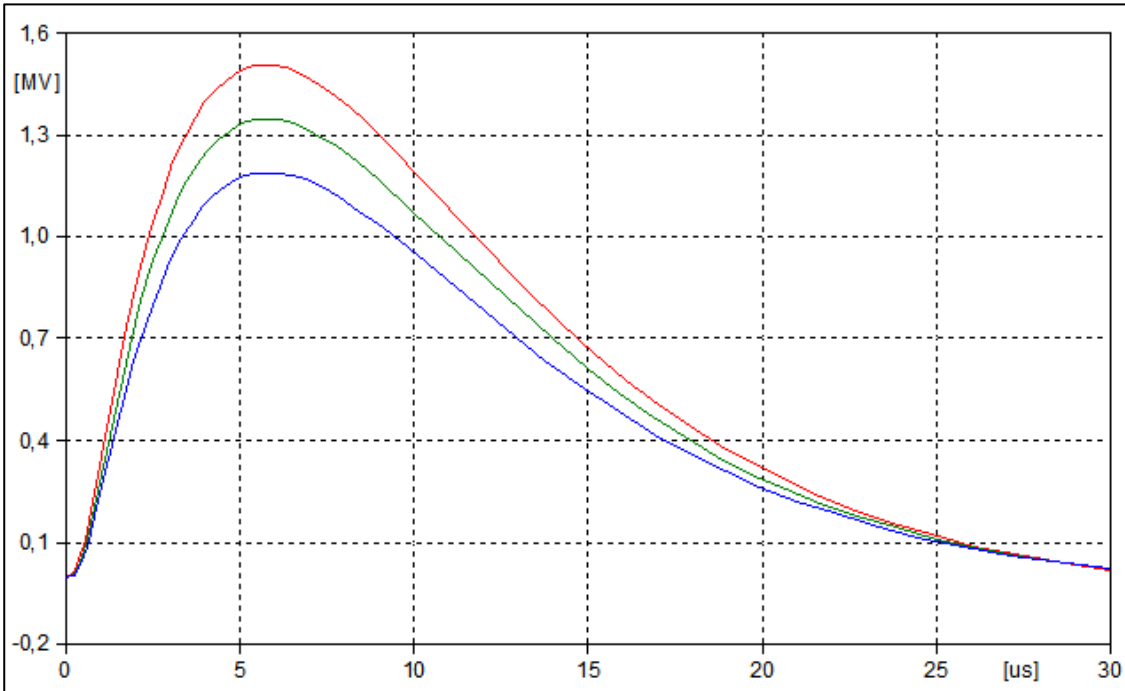


Şekil 4.28. 380 kV gerilime sahip basit pylon direğın koruma iletkenine YEMD düşmesi durumunda fazlar üzerinde oluşan V_{ekstra} gerilimler ($V_{nom} + V_{ekstra}$)

Analiz sonucunda basit pylon direğine ait elde edilen izolatör gerilimleri ve YEMD'in fazlara geçmesi durumunda indüklenen gerilimler Şekil (4.28 ve 4.29)'da gösterilmiştir.

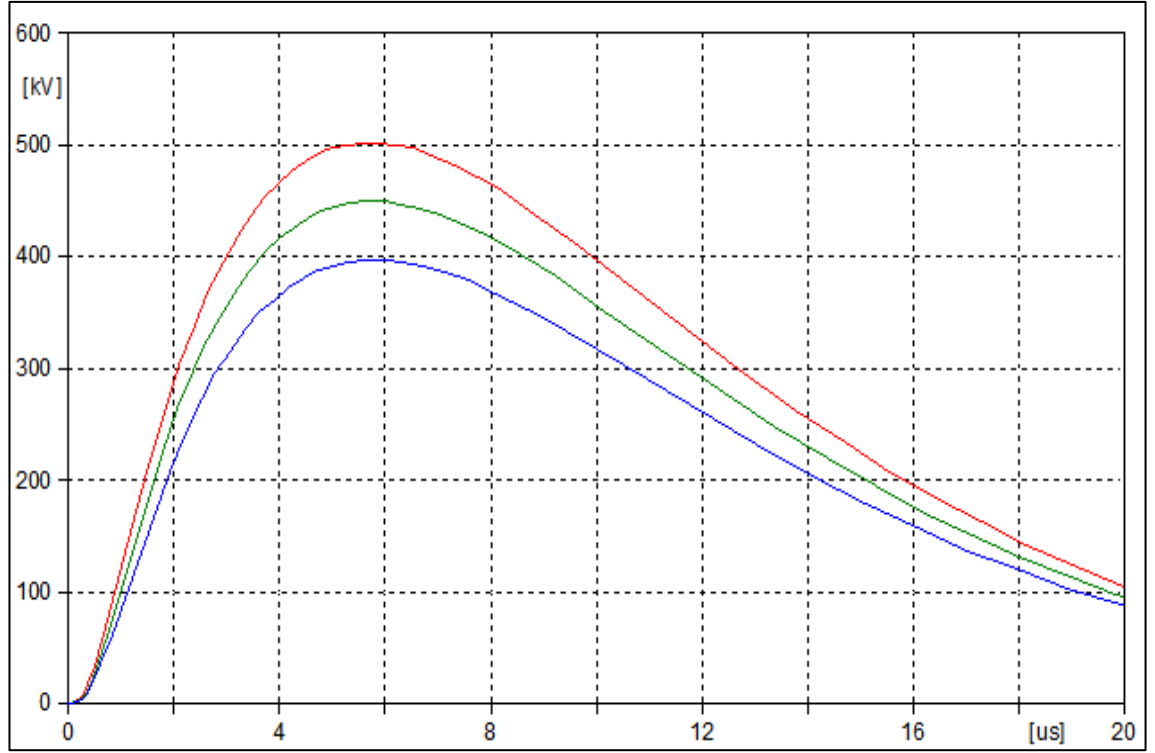


Şekil 4.29. 380 kV gerilime sahip basit pylon direğın koruma iletkenine YEMD düşmesi durumunda izolatörler üzerinde oluşan gerilimler

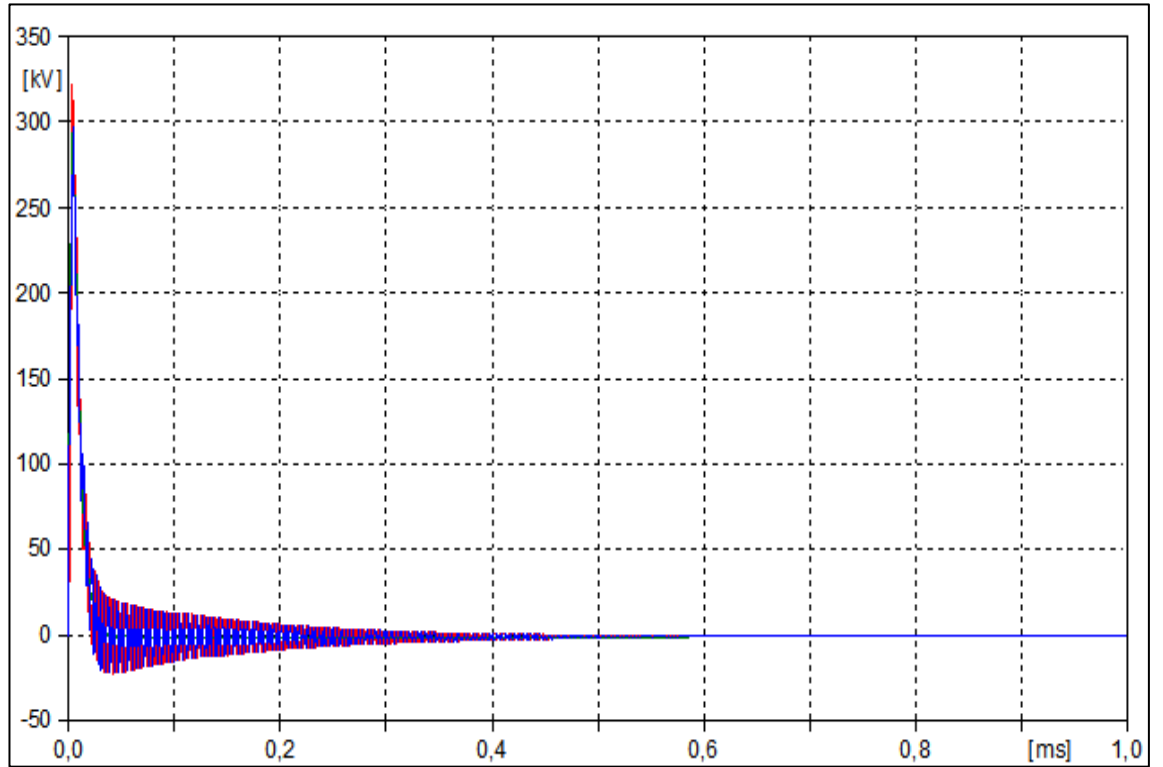


Şekil 4.30. 380 kV gerilime sahip çok katlı (multi) pylon direğın koruma iletkenine YEMD düşmesi durumunda izolatörler üzerinde oluşan gerilimler

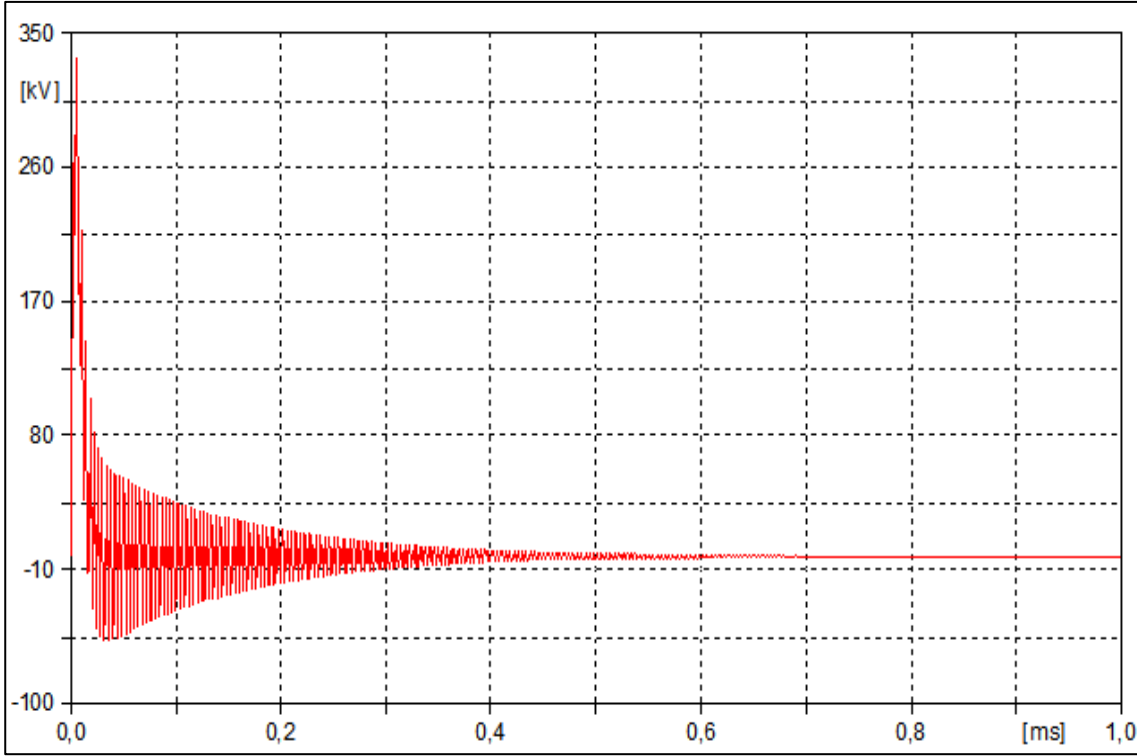
Analiz sonucunda çok katlı model olarak tasarlanan pylon direğine ait elde edilen izolatör gerilimleri ve YEMD' in fazlara geçmesi durumunda indüklenen gerilimler Şekil (4.30 ve 4.31)' de gösterilmiştir.



Şekil 4.31. 380 kV gerilime sahip çok katlı (multi) pylon direğin koruma iletkenine YEMD düşmesi durumunda fazlar üzerinde indüklenen gerilimler



Şekil 4.32. 154 kV gerilime sahip çatal pylon direğin koruma iletkenine YEMD düşmesi durumunda fazlar üzerinde indüklenen gerilimler



Şekil 4.33. 154 kV gerilime sahip çatal pilon direğin koruma iletkenine YEMD düşmesi durumunda izolatörler üzerinde oluşan gerilimler (demet iletken yapısında)

Analiz sonucunda çok katlı model olarak tasarlanan pilon direğine ait elde edilen izolatör gerilimleri ve YEMD' in fazlara geçmesi durumunda indüklenen gerilimler Şekil (4.32 ve 4.33)' de gösterilmiştir.

Bu çalışmada ATP-EMTP programı yardımıyla 380 ve 154 kV' lık enerji nakil hatlarında kullanılan çeşitli pilon direklerinin koruma iletkenine YEMD düşmesi durumunda, izolatörlerin ve fazların maruz kaldığı aşırı gerilimler incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda izolatörler üzerinde oluşan YEMD kaynaklı gerilimler, fazlarda oluşan gerilim seviyesinden çok yüksek olduğu görülmüştür. Bu nedenle enerji nakil hattı projelerinde tehlikeli gerilim atlamalarına karşı izolatörler seçimi çok önemlidir. Pilon direk için kullanılan basit direk modeli ve çok katlı iletim direk modeli (multi pylon) ile elde edilen analizler karşılaştırıldığında çok katlı iletim direk modelindeki paralel bağlı direnç ve indüktanslardan kaynaklanan etki dikkate alındığında izolatörler ve fazlar üzerinde basit direk modeline göre daha yüksek gerilim seviyeleri oluştuğu görülmektedir. Gerçeğe daha yakın olan direk modeli kullanılarak YEMD analizi yapılması ve buradan elde edilen sonuçların kullanılması, güç iletim sistemlerinde oluşan aşırı gerilimler karşısında koruma ve izolasyon seviyelerinin belirlenmesine yardımcı olabilir.

4.3. Enerji Nakil Hatlarına YEMD Düşmesi Sonucunda İzolatörlerde Gerilim Dağılımı ve Korunma Prensipleri

Bu çalışmada ise YEMD oluşturan uygun matematiksel denklemler kullanılarak benzetim programları ile YG seviyesinde kullanılan izolatörlerin aşırı gerilime karşı davranışları incelenmiştir. Özellikle Türkiye' de kullanılan 154 kV' lık ENH' lerde

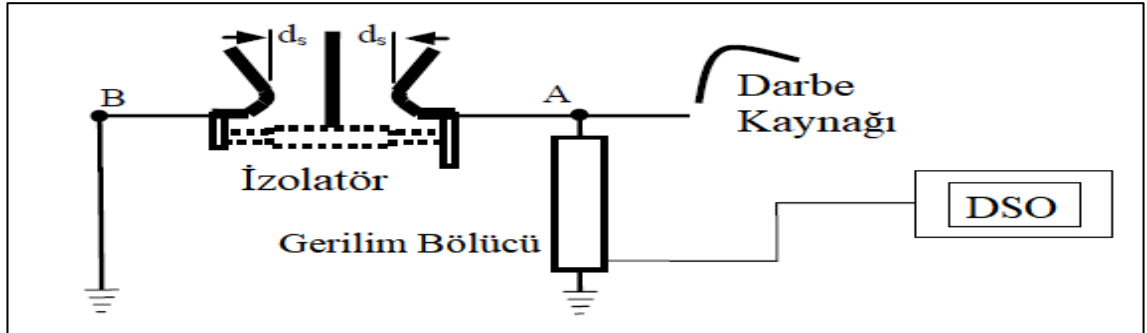
kullanılan izolatörlerin YG laboratuvarlarında gerilim testlerinin nasıl yapıldığı ve benzetim programlarında ise atlama geriliminin nasıl tespit edildiği hakkında incelemeler yapılmıştır.

4.3.1. İzolatörlere laboratuvar ortamında yapılan gerilim testleri

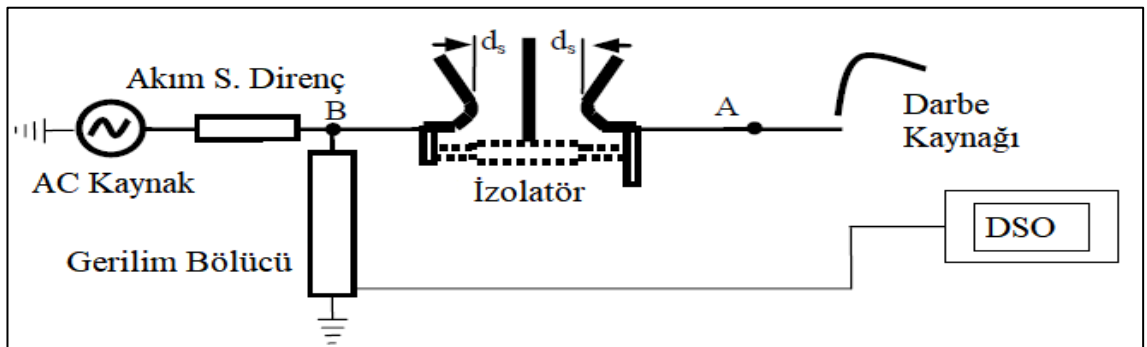
İzolatörlerde gerilim testi deneysel olarak yapıldığı takdirde aşağıdaki donanımlara ihtiyaç vardır:

- Darbe Üreten Akım Kaynağı
- Gerilim Bölücü
- Akım sınırlayıcı direnç
- AC Voltaj Kaynağı
- Dijital Osiloskop (DSO)
- Osiloskop verilerini bilgisayara aktaran program (arayüz)

Şekil 4.34' te gösterilen ilk devre şeması kıvılcım aralığını (atlama gerilimi) ölçmek için kullanılır. Şekil 4.35' te gösterilen ikinci devre şeması nominal faz gerilimine sahip hattın üstüne YEMD darbesi düştüğü durumda üst üste binen dalgaların atlama gerilimini ölçmek için kullanılır. İkinci devrede iki kaynak, darbe üreten AC bir kaynak ve güvenlik nedeniyle küçük bir akım sınırlayıcı direnç bağlanılmıştır. Bu testler yüksek gerilim laboratuvarında yapılırsa atmosferik basınç, sıcaklık ve nemin standart değerlere çok yakın olduğu durumda yapılmalıdır. Bu gerilimleri tespit etmek için uygulanan üç test vardır (P Verho vd 2007, Iec 60060-1):



Şekil 4.34. İzolatörlerde atlama gerilimi testi



Şekil 4.35. İzolatörlerde Kombine (birleşmiş) atlama gerilimi testi

4.3.1.1. Up-Down testi

Up-down testi, beklenen kıvılcım değerine yakın gerilimi (U_j) kullanarak ilk atışını başlatır. Daha sonra bu değişimin ilk seçilen voltaja göre up veya down olduğu yerde basamak voltaj değişimini düşürmektedir. Up-Down testi, U_j gerilimde kıvılcım aralığının ölçülen performansına bağlıdır. Bu ölçüm U_j - ΔV gerilimlerinin çıkarılması ile elde edilir. ΔV , voltaj değişimidir. Buna göre U50 (%50 olasılık) ve U10 (%10 olasılık) parametreleri, bu olasılıkların U_j gerilimine karşı çizildiği bu ölçüm verileri kullanılarak çıkarılabilir. Daha sonra grafikten U50 ve U10 değerleri elde edilir. U10, U50' nin bir fonksiyonu olarak ifade edilir (E Kuffel vd 2000).

$$U_{10} = 0.96 * U_{50} \quad (4.7)$$

4.3.1.2. Gelişmiş Up-Down testi

Up-down testi, şu şekilde genişletilmiştir. Bu voltaj seviyesinde olasılığı bulmak için belirli bir voltaj seviyesinde uygun sayıda impuls (darbe) uygulanır. Olasılık %50' den az ise voltaj uygun şekilde artırılır. Elde edilen olasılık %50'den büyükse voltaj uygun şekilde azaltılır.

$$0.5 = 1 - (1 - p)^n \quad (4.8)$$

Burada, n en az bir kıvılcım olma olasılığı, p olasılık değerleri için ifade edilmiştir.

4.3.1.3. Çok seviyeli testler

Çok düzeyli testlerin adımları aşağıdaki gibidir:

- Önceden tanımlanmış voltaj seviyelerinde, her seviyede kıvılcım aralığı belirlenerek belirli sayıda vuruş uygulanır,
- Her voltaj seviyesinde kıvılcım aralığı değerlerinin sayısı tanımlanır (X),
- U (kV) karşısında p(U) (X_j/n) ölçülen noktalarına çizilmiş çizim,
- P(u)=%50' de U50 olarak tanımlanır,
- Standart sapma $\sigma = U50-U10$ olarak tanımlanır,

Bu test yöntemi genellikle araştırma ve canlı hat testleri için tercih edilir.

4.3.2. Teorik analiz ve prototip model

YEMD, ATP programında yıldırım yolu empedansı olan paralel direnç ve akım kaynağı olarak modellenmektedir (Şekil 4.21). Çalışmada analitik model olarak Heidler fonksiyonunu gösteren denklem (3.14) ve (3.15) kullanılmıştır. Çalışmada analizi yapılan izolatörlerin gerilim testinde kullanılan darbe kaynağı için $V = 800$ kV, $\tau_1 = 1.6$ μ s, $\tau_2 = 50$ μ s ve $n = 4$ olarak alınmıştır.

Enerji nakil hatlarında yalıtım görevi yapan izolatörlerde koruma armatürlerinin olmadığı durumlarda gerilim dağılımı düzgün değildir.

$$U_x = \frac{U_n}{C'_E + C'_H} \left[C'_E + C'_H \cdot \frac{sh\gamma x}{sh\gamma h} - C'_H \cdot \frac{sh\gamma(h-x)}{sh\gamma h} \right] \quad (V) \quad (4.9)$$

$$U_{load} = U_m \cdot \sin(\theta) \quad (V) \quad (4.10)$$

Burada:

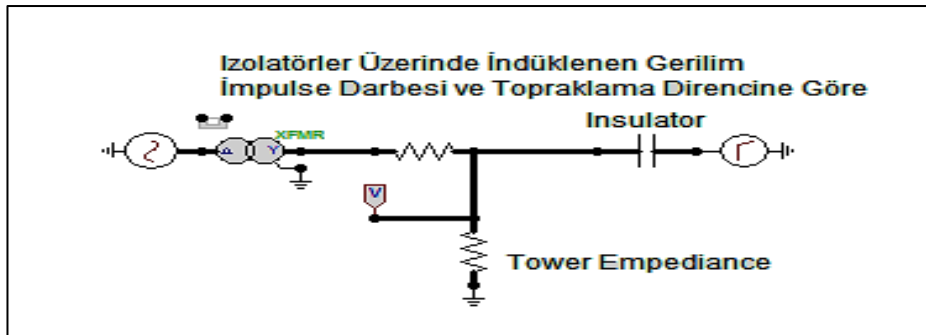
C'_E : Toprağa karşı kapasite,

C'_H : Hattın karşı kapasite,

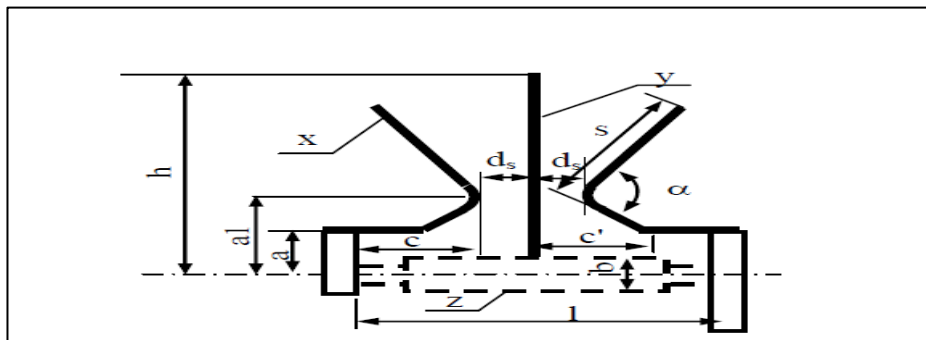
U_n : İletkene bağlı izolator elemanının uçlarındaki gerilim

H : İzolator yüksekliği

Normal gerilimin altında olan bir izolator için gerilim dağılımı (4.9)' da gösterilmiştir. 154 kV gerilim seviyesindeki iletim hatlarına ait izolator zincirleri, 750 kV standart yıldırım darbe gerilimi dayanımına sahip olup 1.60 m uzunluğundadır. YG izolatorlerinin darbe dayanma gerilimi ise 170 kV dan daha büyük bir değere ulaştığında geri atlama yaparak direk üzerinden iletkenlere atlar ve bu sırada izolatorlerin hasarlanmasına yol açarlar. İşte bu nedenle direklerin topraklama direncinin bu geri atlamayı önleyecek değere düşürülmesi gerekir. Şurası muhakkak ki eğer topraklayıcı üzerinden YEMD akımı geçmesi esnasında darbe halinde meydana gelen gerilim, havai hatlarda kullanılan izolatorlerin darbe atlama geriliminden küçük olması durumunda izolatorler üzerinden geri atlama imkânı oluşmaz (K. Üçleröglü 1980). İzolatorlerin yapısı ve iletken ile arasındaki açışekil 4.37' de gösterilmiştir.



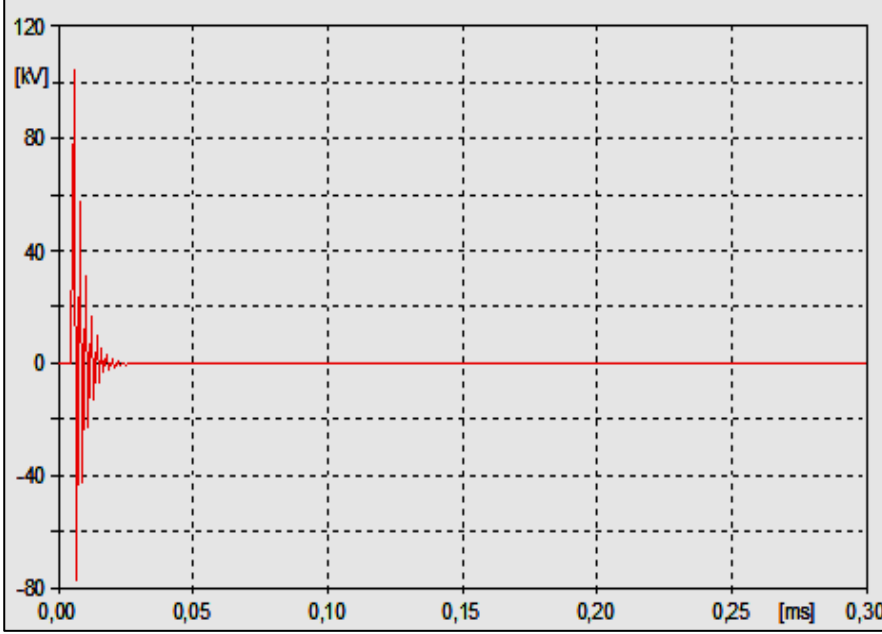
Şekil 4.36. İzolatorlerin Voltaj Testi Devresi



Şekil 4.37. İzolatorün yapısı

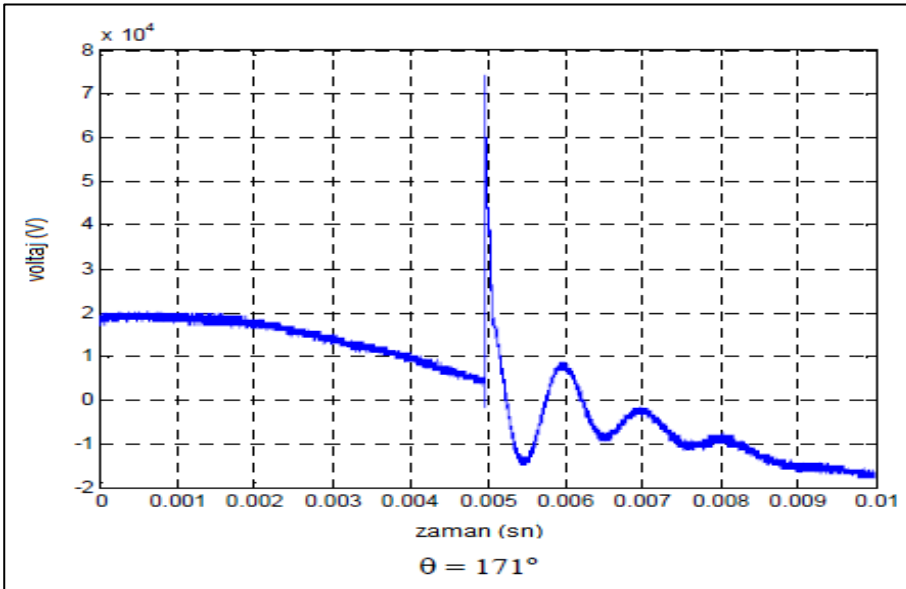
4.3.3. Uygulama ve analiz

Çalışmada YG izolatörleri için yapılan voltaj testi ise Şekil 4.36' da gösterilen ATP-EMTP modeli ile yapılmıştır. Bir diğer analizde ise darbe gerilimi düştüğü anda fazlarda farklı başlangıç açlarına bağlı olarak izolatörlerde oluşan yüklenme gerilimi denklem (4.9) ve (4.10)' da gösterilen formüllere göre MATLAB ortamında yapılmıştır.

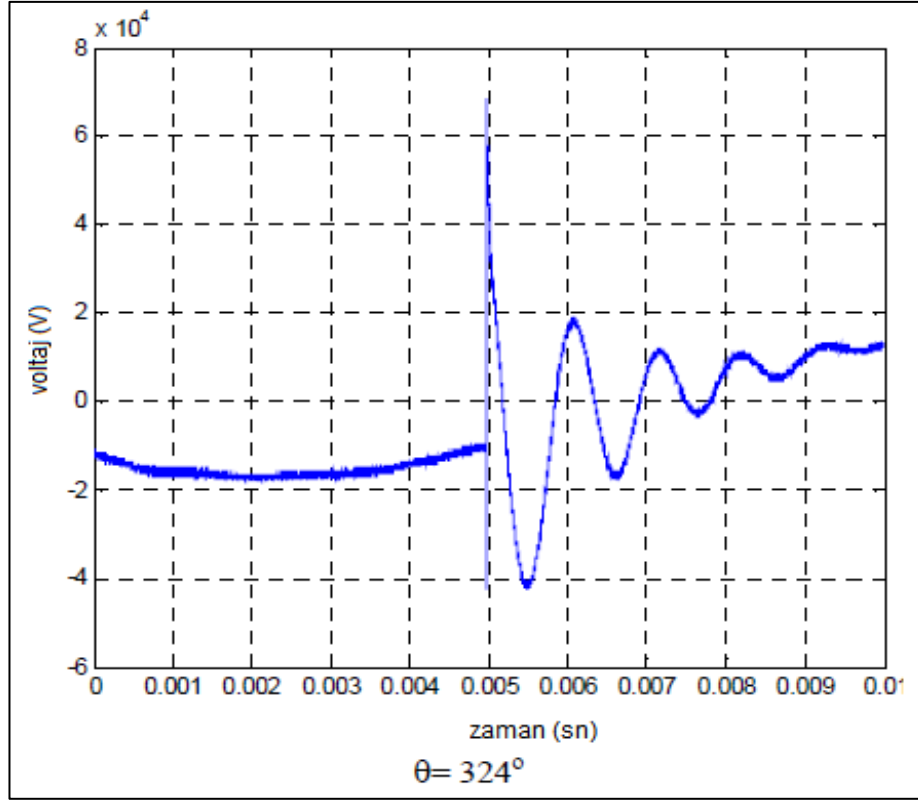


Şekil 4.38. ATP-EMTP programında YG izolatörünün voltaj testi

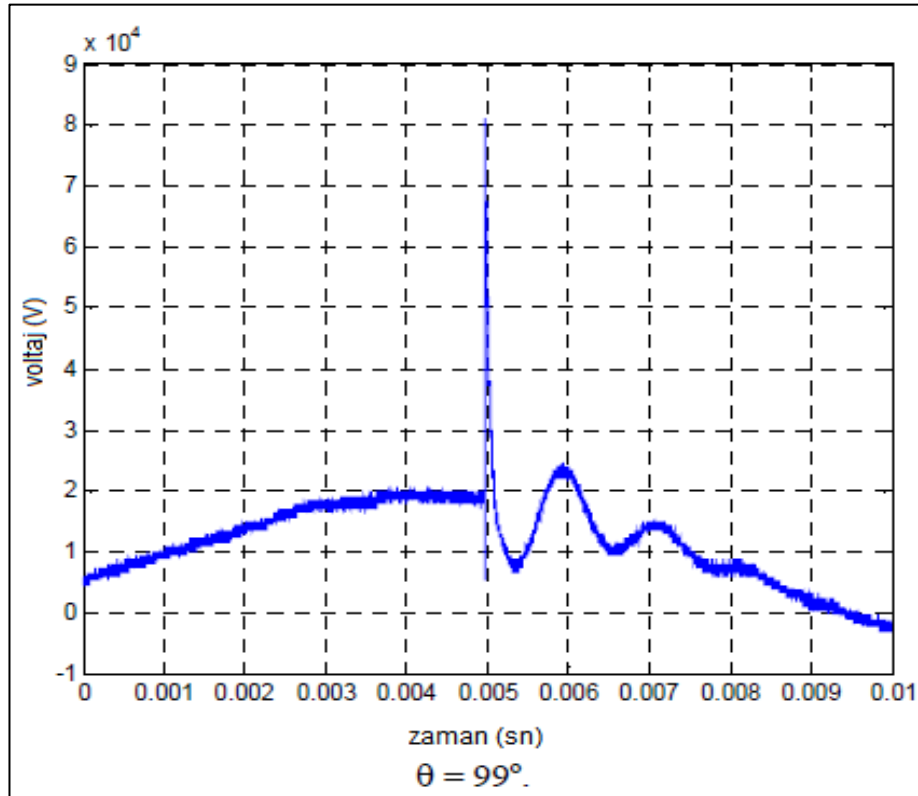
YEMD düşmesi sonucu izolatördeki L1 fazındaki anlık gerilim yükselişi (Şekil 4.38) 'de gösterilmiştir.



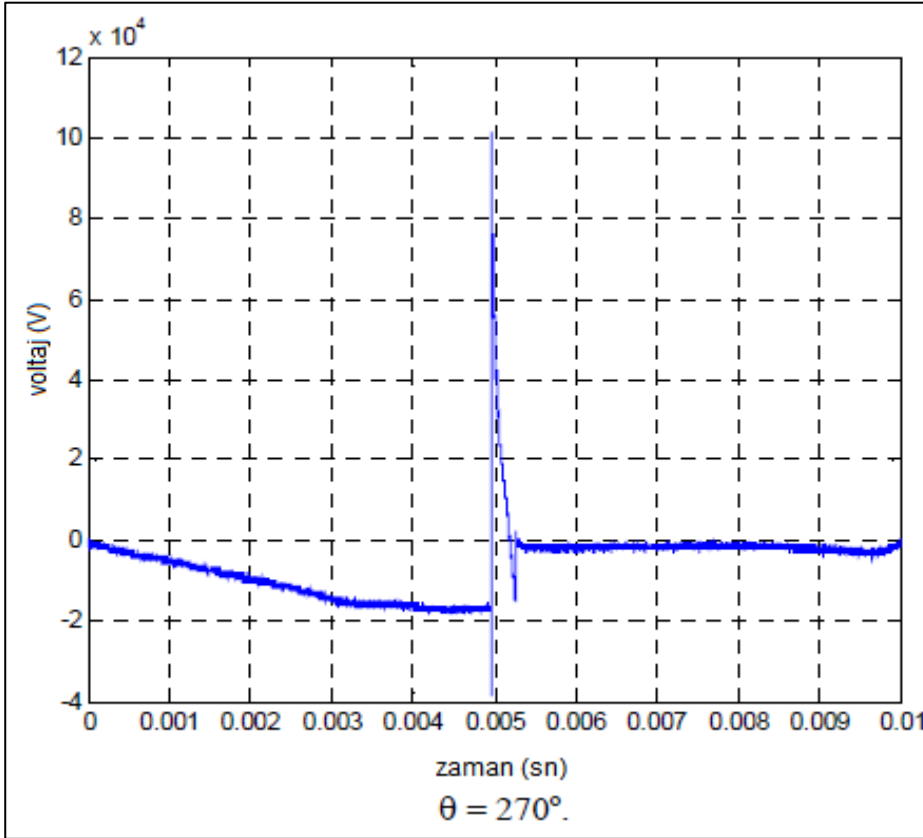
Şekil 4.39. Farklı başlangıç açlarında (θ) ölçülen gerilim dalga şekilleri



Şekil 4.40. Farklı başlangıç açılarında (θ) ölçülen gerilim dalga şekilleri



Şekil 4.41. Farklı başlangıç açılarında (θ) ölçülen gerilim dalga şekilleri



Şekil 4.42. Farklı başlangıç açılarında (θ) ölçülen gerilim dalga şekilleri

Bu çalışmada izolatörlerin gerilim testi benzetim programlarında yapılmıştır. Bu analizde ATP-EMTP programında yapılan analizde izolatörler, kondansatör olarak temsil edilmiştir. Bu kondansatörlerin değeri zincir izolatörlerinin eşdeğeri olan 500 pF sığa değeri alınmıştır. Çalışmada kullanılan izolatörlerin 170 kV gerilim seviyesinden düşük bir gerilim oluştuğu bu nedenle hat için uygun olduğu tespit edilmiştir.

4.4. Enerji Tesislerinde Kullanılan Parafudurların Koruma Davranışı

Güç sistemlerinde meydana gelen transient kaynaklı aşırı voltajlar, elektrik sistemlerindeki ekipmanların zarar görmesinde ana faktördür. YEMD darbesini azaltabilen, aşırı gerilim veya aydınlatma anahtarlamasında kullanılan parafudurlar, YG ve AG sistemlerinde koruma ekipmanı olarak kullanılırlar. Bu çalışmada ise IEEE, Pinceti ve Fernandez & Diaz modelleri matematiksel olarak incelenmiştir. Çalışmada ayrıca Pinceti modeli, ATP-EMTP programı ile incelenmiştir. Buna göre Pinceti modelinin diğer modellere göre daha iyi aşırı gerilimleri sönümlediği tespit edilmiştir. Bu sonuç benzetim programında yapılan analizle de doğrulanmıştır.

4.4.1. Aşırı gerilimlere karşı koruma ekipmanları

Aşırı gerilimlere karşı koruma cihazları iki sınıfa ayrılır. Bunlar birincil ve ikincil koruma cihazlarıdır.

4.4.1.1. Birincil (Primer) koruma cihazları

Birincil koruma cihazları genellikle YEMD' in doğrudan vuruşlarına karşı enerji tesislerini korumak için kullanılır. Ayrıca işlevleri tesisatlar da indüklenen YEMD enerjisini dağıtmaktır. Bu koruma türünde üç temel koruma tipi bulunur. Paratonerler, havai hatlarda kullanılan topraklama kabloları ve Faraday kafesleridir (M. Darveniza vd 1989).

4.4.1.2. İkincil (Sekonder) koruma cihazları

Seri koruma ve paralel koruma cihazları olmak üzere iki tip bulunur. Paralel koruma cihazları güç şebekesinin dağılmış hatları için ve baralar arası geçişte kullanılır. Paralel koruma, elektrik güç şebekesinde en çok uygulanan koruma türüdür.

4.4.2. Koruma modları

Elektrik cihazlarını korumak için parafudur kullanılması güç dağıtım sistemi içerisinde belirli bölgelere konulmaktadır. Genellikle trafo merkezlerinde bulunan transformatörlerin sekonder tarafına konulmaktadır. Örneğin üç fazlı yıldız sistemlerinde kullanılan mod diferansiyel moddur.

4.4.3. Parafudurların koruma ömrü

Parafudurların ömrü sonsuz değildir. Her bir parafudurun belirli bir ömrü vardır. Parafudurların ömrü YEMD vuruşların büyüklüğüne ve sayısına bağlıdır. Parafudur sayısı, parafudurun aşırı akım kapasitesi ve iki faktör birlikte artırılarak kullanım ömrü arttırılabilir. İdeal parafudurlar, bulunduğu güç dağıtım şebekesinin ömrü ile aynıdır

Elektrik tesislerinde nominal bir parafudurun şu koşulları sağlaması gerekir:

- Güç frekansına ait gerilimleri absorbe(sönüm) etmemesi gerekir.
- Elektrik sistemine göre tasarlanmış olan ayara göre çalışması gerekir.
- Korunan ekipmanla aynı ortamda bulunması

4.4.4. Parafudurların aktif koruma koordinasyonu

Parafudurlar için en uygun koruma koordinasyonunu sağlamak için aşağıdaki maddeler göz önüne alınarak gerçekleştirilmelidir:

- YEMD dalga formu ve süresi
- Şebeke koruyucu cihazın (parafudur) güç dağıtım sistemine göre konumu
- YEMD ile korunan donanım arasındaki mesafe
- Koruma cihazlarının operasyonel (sınırlayıcı) gerilimi
- Koruma cihazlarının aşırı akım kapasitesi
- Koruma cihazının yaşı (ömrü)
- Koruma cihazlarının koruma modu
- Koruma cihazlarının bulunduğu tesiste ki topraklanma tasarımı

➤ Güç dağıtım sisteminin konfigürasyonu

4.4.5. Parafudurların çalışma prensibi

Parafudurların pasif durumu μA cinsinden çok küçük bir akım ileten çalışma sırasında elde edilir. Öte yandan aşırı gerilim parafudurun üzerine geldiğinde aşırı gerilim dalgalarını topraklama hattına yönlendirerek, voltajı sınırlar (S. Kershaw vd 1989).

Parafudurlar normal ve anormal (aşırı gerilim) koşullarında doğrusal olmayan V-I karakteristiğine bağlı olarak çalışır. Doğrusal olmayan bu grafik parafudurlar için hayati unsurdur. Parafudurdan geçen yüksek akım, normal voltaj operasyonuna kıyasla daha yüksek gerilime sahiptir. Aşırı gerilimi çabucak dışarı atmayı başaran aşırı gerilim arestörü (parafudur) normal durumuna geri döner.

4.4.6. Parafudurların seçimi

Aşırı gerilim (U_c) parafuduru seçmek için tanımlanan parametrelerden biridir. Bu gerilim türü RMS cinsindedir. Diğer parametre ise maksimum çalışma gerilimidir. Üçüncü parametre ise (I_n) voltajın tepe değerinde nominal deşarj akımıdır. U_c ' nin seçimi için iki faktör göz önüne alınmalıdır. Birinci faktör, fazlar arasında toprağa veya topraklama transformatörünün nötr noktası arasında bağlanabilen parafudurun konumudur. İkinci faktör ise maksimum faz voltajıdır (U_o). Parafudurlar Tablo 4.4 yardımıyla hesaplanan değerlere eşit veya daha yüksek olacaktır. Bu tablo IEC61643-1 standartlarına göre tasarlanmıştır (J. Cigré/Cired 1997).

Çizelge 4.4 Koruma Cihazlarının Bağlantı Şekilleri	Hat gerilimine bağlı olarak koruma cihazları için gerekli olan U_c gerilimi				
	TT	TN-C	TN-S	IT dağıtılmış nötr noktaları	IT dağıtılmamış nötr noktaları
Hat iletkeni ve nötr iletkeni	$1.1U_o$	NA	$1.1U_o$	$1.1U_o$	NA
Hat iletkeni ve PE iletkeni	$1.1U_o$	NA	$1.1U_o$	$\sqrt{3}U_o$	Faz-Faz Gerilimi
Nötr iletkeni ve PE iletkeni	U_o	NA	U_o	U_o	NA
Hat iletkeni ve PE+N iletkeni	NA	$1.1U_o$	NA	NA	NA

**NA: mevcut değil, TT, TN-C, TN-S ve IT, farklı topraklama şemalarıdır.

4.4.7. Koruma Seviyesi Seçimi

Parafudur koruma seviyesi, U_p/U_c oranı ile tanımlanabilir. Burada U_p , nominal deşarj akımının (I_n) akışı sırasında parafudur da oluşturduğu voltajın maksimum

değeridir. Bu oran (U_p/U_c) parafudur seçimi için çok önemlidir. Bu oranın azaltılması korunan ekipmanın korunma düzeyini artırılmasına katkıda bulunur. Bu çalışmada parafudur tipi olarak ABB firmasının AG seviyesindeki parafuduru seçilmiştir. Bu parafudurun etiket değerleri aşağıda listelenmiştir.

- Çalışma voltajı: 220 V
- Nominal deşarj akımı (I_n) 8/20 μ s: 5 kA
- Maksimum deşarj akımı (I_{max}) 8/20 μ s: 25 kA
- Gerilim korunma seviyesi (U_p) I_n : 1.1 kV
- I_{max} ' da gerilim korunma seviyesi (U_p): 1.5 kV
- Enerji absorbe kapasitesi: 1.8 kJ
- Uzun süreli dalgalanma durumunda gerilim koruma seviyesi (U_p) 2ms: 850 V

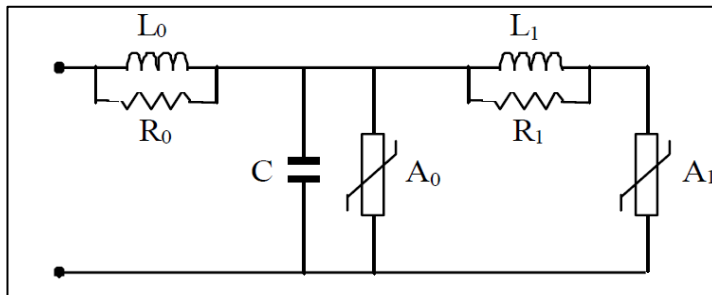
Bu seçilen aşırı gerilim parafuduru EMTP-ATP ortamında modellenmiş ve simule edilmiştir.

4.4.8. Parafudur yerleşiminde kullanılan modeller

Parafudurların aşırı gerilimlere karşı davranışını belirlemek için birkaç model önerilmiştir. Bu modellerin kıyaslanması için testlerinin yapılması gerekir. Bilinen kullanılmış modeller aşağıdaki alt bölümlerde ele alınmıştır.

4.4.8.1. Frekansa bağlı model (IEEE modeli)

IEEE çalışma grubu Şekil 4.43' te gösterilen metal oksit aşırı gerilim arestörü (MOV) modelini önerdi (IEEE Working G. 1992). Bu model de arestörler doğrusal olmayan iki direnç kullanılarak tespit edilir. Bunlar yavaş ön dalgalanmalar altında çok az empedansa sahip olan R-L filtresi ile ayırırlar. Bununla birlikte, filtrenin empedansı hızlı bir şekilde artar ve A0 da A1' den daha yüksek akım akmasına katkıda bulunur. Bu nedenle A0, A1' den daha yüksek bir gerilime sahip olur. Bu nedenle artan voltaj parafuduru uyarır. Direnç sayısı artırıldığı takdirde daha fazla doğruluk elde etmek için modele eklenebilir.

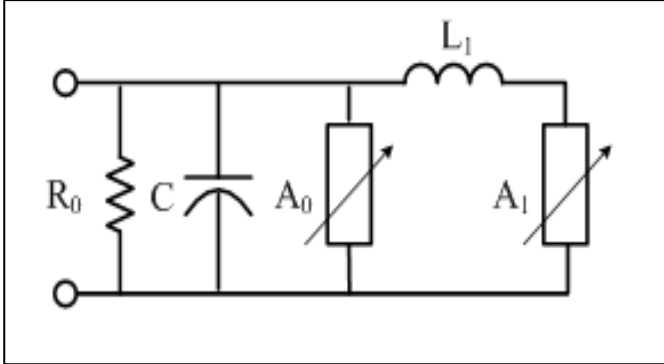


Şekil 4.43. IEEE (frekansa bağlı) model

4.4.8.2. Fernandez & Diaz modeli

Fernandez ve Diaz modeli, IEEE modeli temel alınmıştır. Fernandez ve Diaz modeline A0 ve A1 arası L1 endüktansı ile ayrılmıştır. Kapasitans elemanı da bu modele

dâhil edilmiştir. L0 endüktansı ise ihmal edilmiştir. Bu modelin avantajı iterasyona ihtiyaç duyulmamasıdır. Direnç değeri (R0) için sayısal salınımı önlemek amacıyla 1MΩ olarak değer belirlenmiştir. Devre şeması ise Şekil 4.44' te gösterilmiştir.



Şekil 4.44. Fernandez- Diaz modeli

$$L1: \frac{1}{5} \cdot \frac{U_{R8/20} - U_{R1/T2}}{U_{R8/20}} \cdot U_n (\mu H) \quad (4.11)$$

$$C: \frac{1}{55} \cdot \frac{U_{R8/20} - U_{R1/T2}}{U_{R8/20}} \cdot U_n (pF)$$

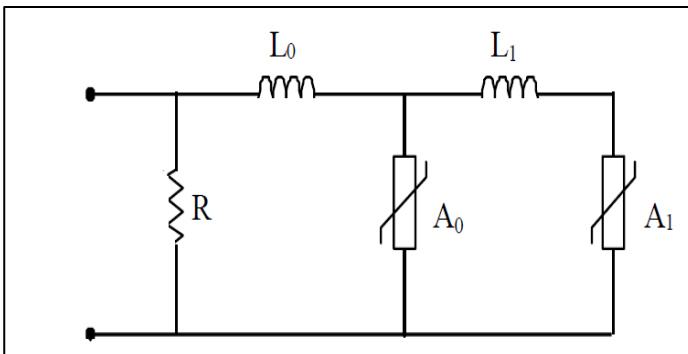
Un: Parafudurun anma (nominal) gerilimi

UR8/20: 10 kA' lık akım darbesinden oluşan gerilim

UR1/T2: 1 kA' lık akım darbesinden oluşan gerilim

4.4.8.3. Pinceti modeli

Pinceti Modeli de IEEE modelinden elde edilmiştir. Bu model IEEE modelinin basitleştirilmiş bir versiyonudur. Şekil 4.43' te gösterilen iki direnç (R0 ve R1) ortadan kaldırılmıştır ve dolayısıyla endüktanslar (L0 ve L1) sadece Şekil 4.45' te gösterilen yeni model de düşünülmüştür. Şebekenin dijital çözümü sırasında sayısal istikrarsızlıklardan kaçınmak için 1MΩ değerinde bir direnç modele eklenmiştir. A0 ve A1 ait sayısal veriler Tablo 4.5 ve Şekil 4.46' da gösterilmiştir. Modeldeki L1 ve L0 endüktansları μH cinsinden aşağıdaki gibi tanımlanır (Pinceti vd 1999):



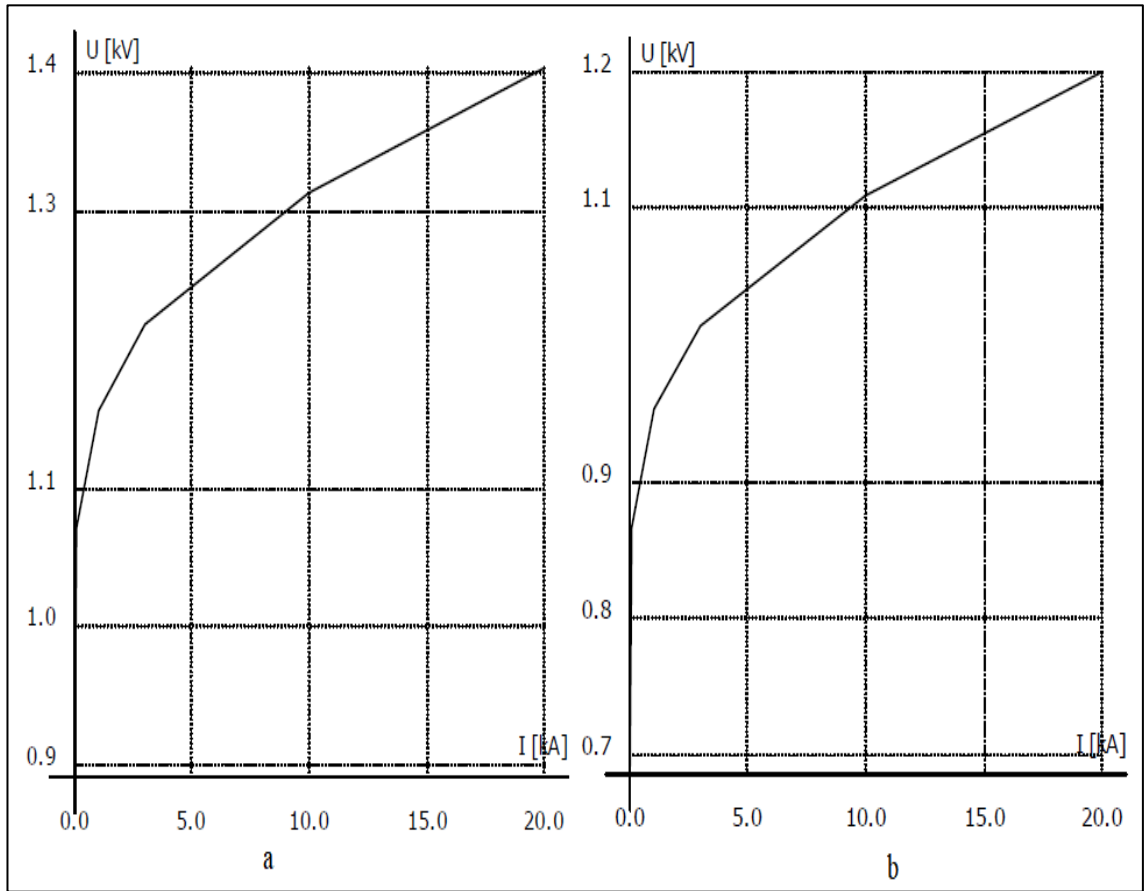
Şekil 4.45. Pinceti modeli

$$L1: \frac{1}{4} \cdot \frac{U_{R1/T2} - U_{R8/20}}{U_{R8/20}} \cdot U_n (\mu H) \quad (4.12)$$

$$L0: \frac{1}{12} \cdot \frac{U_{R1/T2} - U_{R8/20}}{U_{R8/20}} \cdot U_n (\mu H)$$

Çizelge 4.5 A0 ve A1 parafudurları için V-I karakteristiği parametreleri

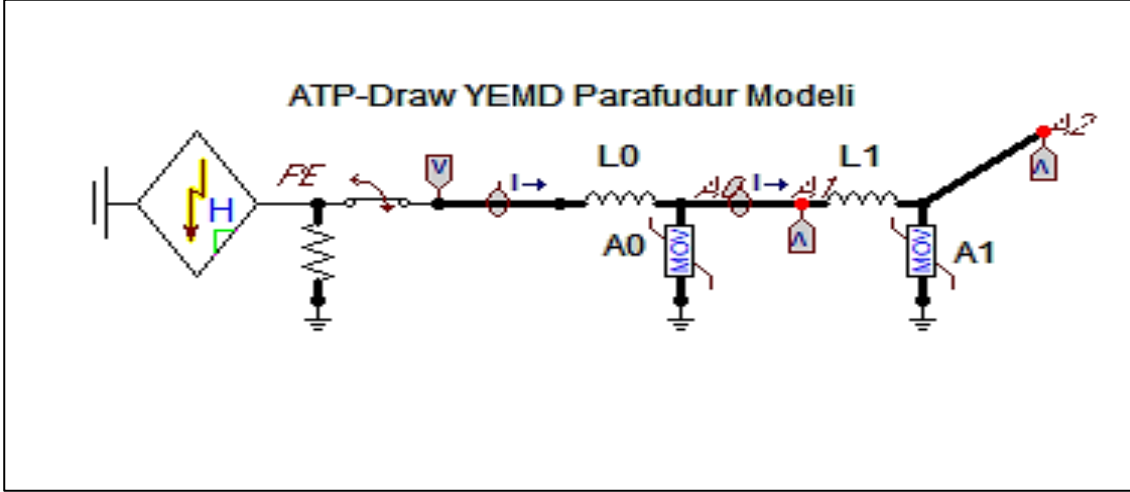
I(kA)	A0(pu)	A1(pu)
2×10^{-6}	0.81	0.623
0.1	0.974	0.788
1	1.052	0.866
3	1.108	0.922
10	1.195	1.009
20	1.277	1.091



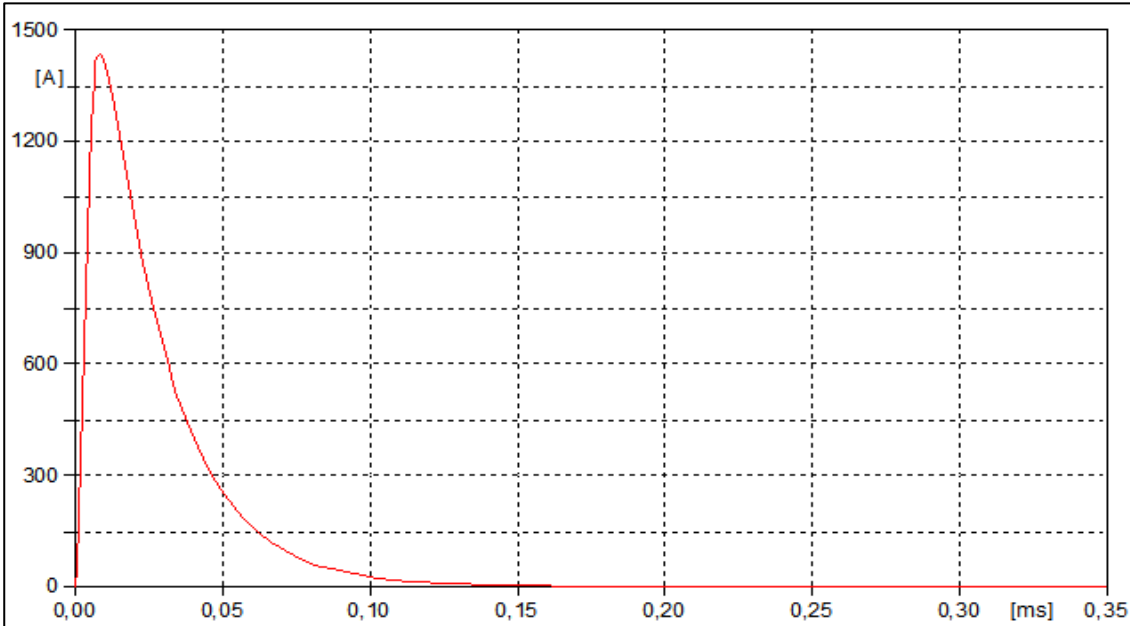
Şekil 4.46. Parafudurların V-I karakteristiği a) A0 arestörü V-I karakteristiği b) A1 arestörü V-I karakteristiği

4.4.9. Parafudur modellerinin doğrulanması ve analizi

Bu çalışmada IEEE, Fernandez & Diaz ve Pinceti modelleri matematiksel olarak incelenmiştir. Ayrıca Pinceti modeli ATP-EMTP programında incelenmiştir. Pinceti modeli Şekil 4.47’ de gösterilmiştir.

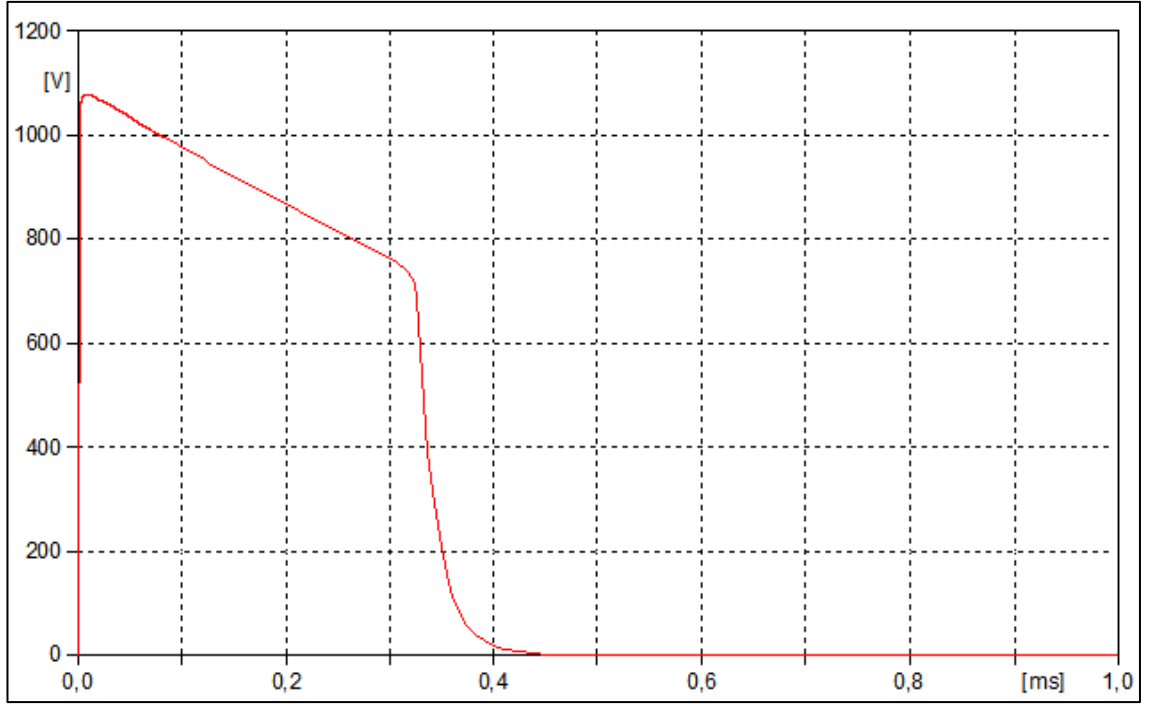


Şekil 4.47. ATP-EMTP programında Pinceti Modeli

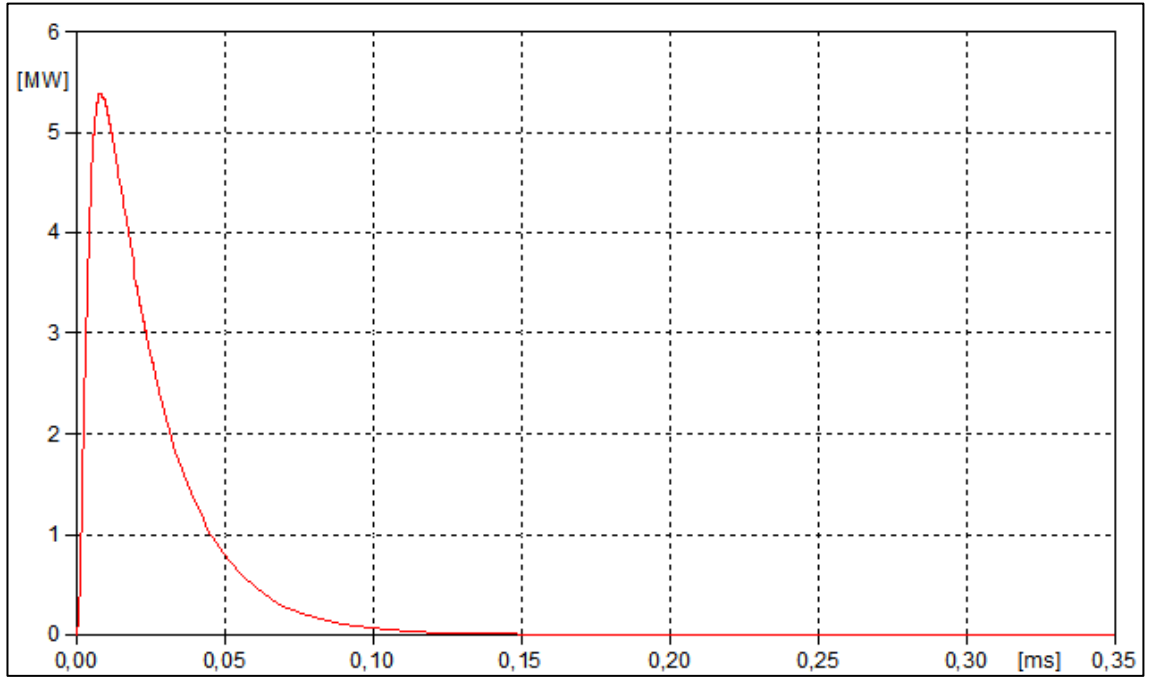


Şekil 4.48. Sisteme enjekte edilen akımın A0-A1 arasındaki oluşturduğu akım (nominal deşarj akımı).

Pinceti modelinin analizinde, endüktans parametreleri denklem (4.12) kullanılarak tespit edilmiştir. Buna göre L1 değeri 0.0084, L2 değeri ise 0.0028 μH olarak bulunmuştur. Şekil 4.48’ de ise A0 parafuduru ile A1 parafuduru arasında bulunan akım trafosunun ölçüm sonucunu göstermektedir. Şekil 4.49’ da ise A0 arestörünün aşırı gerilime karşı sistemde belirli süre içinde oluşturduğu artık voltaj gösterilmiştir.

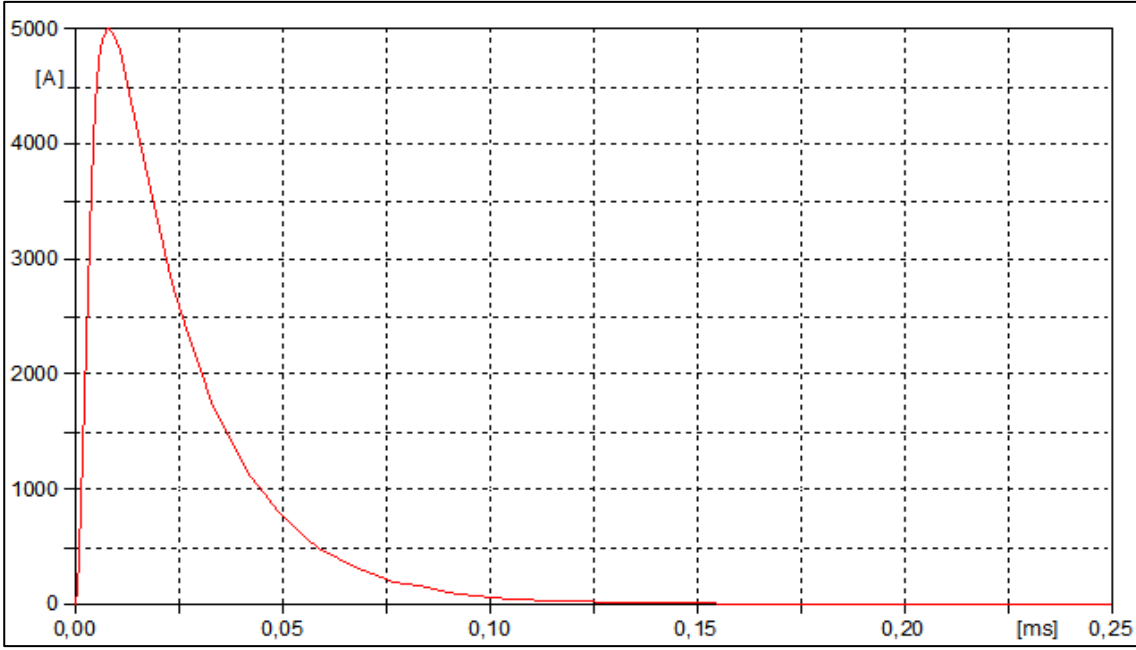


Şekil 4.49. Sisteme enjekte edilen nominal deşarj akımına göre oluşan artık voltaj



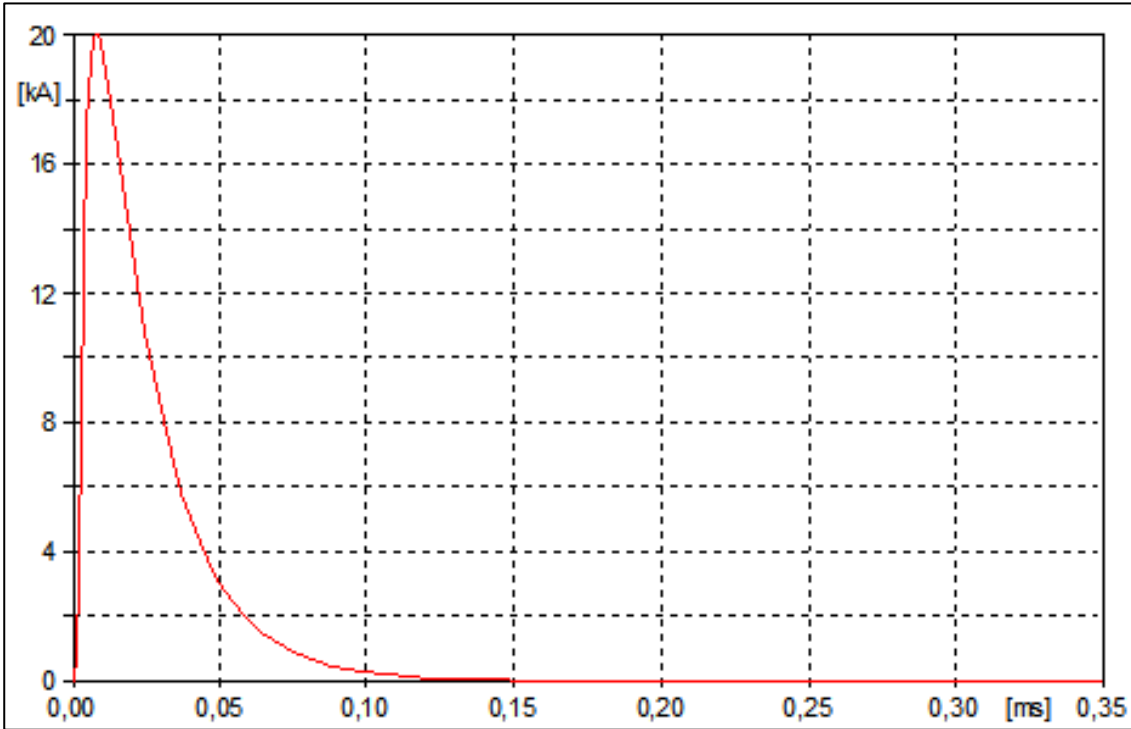
Şekil 4.50. Sisteme enjekte edilen nominal deşarj akımına göre absorbe edilen enerji kapasitesi

A0 ve A1' in doğrusal olmayan özellikleri Tablo 4.5' te gösterilen pu (per-unit) verilerine dayanmaktadır. A0 ve A1 için karşılık gelen değerler Şekil 4.46' dan tespit edilmiştir. Sisteme düşen YEMD filizinin oluşturduğu enerji kapasitesi Şekil 4.50' de gösterilmiştir. Sisteme enjekte edilen YEMD filizinin akım seviyesi Şekil 4.51' de gösterilmiştir.

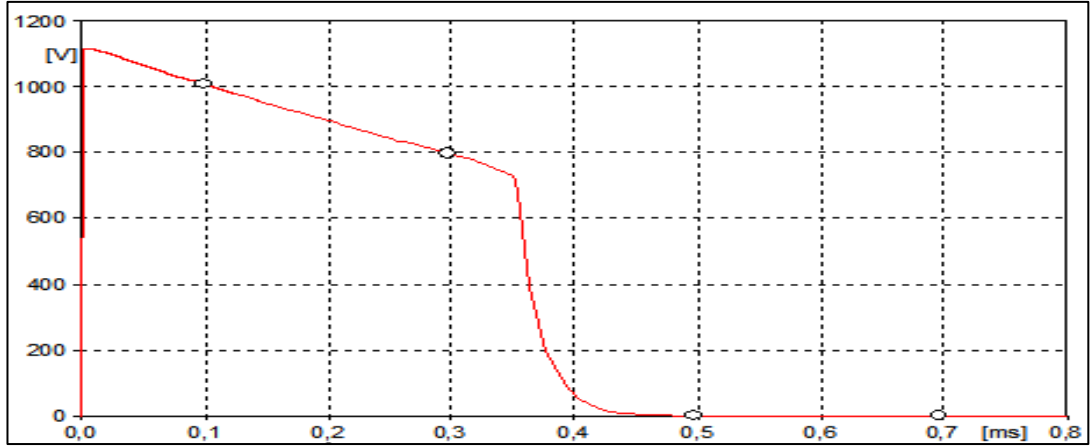


Şekil 4.51. Sisteme enjekte edilen nominal deşarj akımı

Sisteme enjekte edilen maksimum deşarj akımı Şekil 4.52’de gösterilmiştir. Ayrıca sisteme enjekte edilen maksimum deşarj akımına göre Şekil 4.53’ de ise A0 arestörünün aşırı gerilime karşı sistemde belirli süre içinde oluşturduğu artık voltaj gösterilmiştir. Sisteme düşen YEMD filizinin oluşturduğu maksimum enerji kapasitesi ise Şekil 4.54’ te gösterilmiştir.



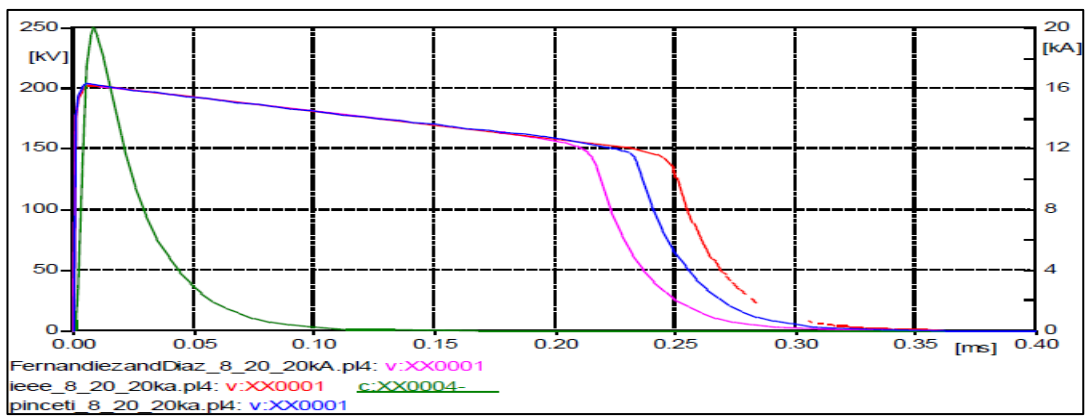
Şekil 4.52. Sisteme enjekte edilen maksimum deşarj akımı



Şekil 4.53. Sisteme enjekte edilen maksimum deşarj akımına göre oluşan artık voltaj



Şekil 4.54. Sisteme enjekte edilen maksimum deşarj akımına göre absorbe edilen enerji kapasitesi



Şekil 4.55. Parafudur modellerinin karşılaştırılması

Şekil 4.55 ' te gösterilen artık voltajlar üç parafudur modeli kullanılarak elde edilmiştir. Pinceti modeli diğer iki modeli arasında olup nominal bir değerde sonuç verdiği tespit edilmiştir.

4.5. YEMD Kaynaklı Aşırı Gerilimlerin Hesaplarına İlişkin Analitik Bulgular

Literatürde YEMD olgusunun bilgisini ve güç devrelerine etkilerini inceleme yönünde birçok çaba gösterildi. Özellikle Bölüm 3'te tartışıldığı gibi doğrudan YEMD filizi bir havai hata veya bir güç tesisine düştüğünde hat ve güç tesisi üzerinde indüklenen aşırı gerilimleri değerlendirmek için birçok sayısal yöntem önerilmiştir.

Literatürde iki temel analitik formülasyon popülerdir. Rusk tarafından önerilen formüller ve Chowdhuri Gross tarafından önerilen formüller en çok kullanılan analitik yöntemlerdir (Rusk 1958, Chowdhuri vd 1967). Özellikle Rusk tarafından önerilen kapalı form çözümleri IEEE-1410 standartlarına göre çok önemlidir (Barker vd 1996, Nucci vd 1995). Bu çalışmada kapalı form çözümleri altında yatan modellerin geçerliliği ve bu modellerde kullanılan yaklaşımlar analiz edilmiştir.

4.5.1. Rusk formülasyonu

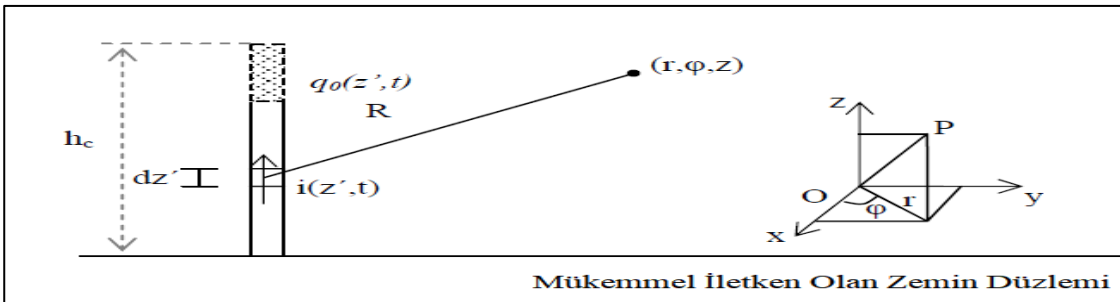
Bu formülasyon 1958 yılında önerilmiştir. Rusk YEMD olayını dikey ve düz bir kanal ile göstermektedir. (Şekil 4.1.) YEMD etkisini hesaba katmak için geri vuruş başlamadan önce YEMD yolu boyunca bir negatif yük dağılır. Geri dönüş darbesi, yükü nötralize ederek sabit v hızıyla YEMD kanalı boyunca yukarı doğru ilerleyen bir basamak fonksiyonu şeklindeki akım dalgalanmasıdır.

YEMD kanalı boyunca bu tip yayılım ENH modeli olarak bilinir. Güç hattının, mükemmel iletken olan bir zemin üzerinde sonsuz uzunlukta kayıpsız tek iletken hattı olarak kabul edilir. Alt başlıklarda Rusk tarafından değerlendirilen elektromanyetik alan sunulacak, Rusk coupling modeli ve Rusk formülleriyle öngörülen indüklenmiş voltajlar gösterilecek ve tartışılacaktır.

4.5.1.1. Rusk' a göre YEMD'in oluşturduğu elektromanyetik alan

Rusk dönüş vuruş modeli Şekil 4.1' de gösterildiği gibi başlangıçta eşit dağılan yüklerle yüklenen bir dikey ve düz YEMD kanalı için geçerlidir. Alanın değerlendirilmesi için sorunun geometrisi Şekil 4.56'da gösterilmiştir. Dönüş vuruş akımı, kanal boyunca bozulmamış ve azaltılmamış halde yayılmış bir basamak akımıdır. Çalışma modeli için geçerli dağılımı açıklayan ifade:

$$i(z', t) = I_0 u(t - z'/v) \quad (A) \quad (4.13)$$



Şekil 4.56. Rusk formülasyonuna göre sorunun geometrisi

Kanal boyunca hareket ettiği için bu geri dönüş akımı başlangıçta negatif yük dağılımını nötrleştiren pozitif bir yük dağılımı olan q_0 ile yüklenir. Şekil (4.56)'da gösterildiği gibi başlangıçta yüklü kanalın uzunluğu sonlu olup h_c olduğu varsayılmıştır. Akım ve yük dağılımları arasındaki q_0 ilişkisi:

$$I_0 = q_0 \cdot v \quad (4.14)$$

Rusk formülasyonun da ϕ skaler potansiyel, \vec{A} vektör potansiyeli olarak tanımlanmıştır.

$$\phi(r, z, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \int_{s_1}^{h_c} \frac{q(z', t - \frac{R}{c})}{R} dz' \quad (4.15)$$

$$\vec{A}(r, z, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \int_0^{s_1} \frac{\dot{i}(z', t - \frac{R}{c})}{R} dz' \quad (4.16)$$

Skaler potansiyel denklemi basitçe ifade edildiğinde:

$$\phi(r, z, t) = \frac{-q_0}{4\pi\epsilon_0} \cdot \int_{s_1}^{h_c} \frac{dz'}{\sqrt{(z_s - z)^2 + r^2}} \quad (4.17)$$

İntegralin alt limiti s_1 zeminden $z=s_1$ noktasına dönüşünde geçen t zamanında oluşturduğu potansiyel ise aşağıdaki denklem ile elde edilir:

$$t = \frac{s_1}{v} + \frac{\sqrt{(s_1 - z)^2 + r^2}}{c} \quad (4.18)$$

s_1 çözümü ise:

$$s_1 = \beta \cdot \gamma^2 \left[ct - \beta z - \sqrt{(vt - z)^2 + \left(\frac{r}{\gamma}\right)^2} \right] \quad (4.19)$$

Bu çözüm sonrası skaler potansiyel formülasyonu yeniden yazıldığı takdirde:

$$\phi(r, z, t) = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left[\ln \left(vt - z + \sqrt{(vt - z)^2 + \left(\frac{r}{\gamma}\right)^2} \right) - \ln(1 + \beta) - \ln(h_c - z + \sqrt{(h_c - z)^2 + r^2}) \right] \quad (4.20)$$

şeklinde elde edilmiş olur.

Vektör potansiyeli ise denklem (4.16)' a göre şu şekilde yazılabilir.

$$\vec{A}(r, z, t) = \frac{\mu_0 \cdot I_0}{4\pi} \cdot z' \cdot \int_0^{s1} \frac{dz'}{\sqrt{(z'-z)^2 + r^2}} \quad (4.21)$$

Vektör potansiyelinin (4.21)' e göre ve s1 genel ifadesinin yerine konulmasıyla vektör potansiyelinin dikey bileşeni aşağıdaki şekildeki gibi hesaplanabilir:

$$A_z(r, z, t) = \frac{\mu_0 \cdot I_0}{4\pi} \left[\ln \left(vt - z + \sqrt{(vt - z)^2 + \left(\frac{r}{\gamma}\right)^2} \right) - \ln(1 + \beta) - \ln(-z + \sqrt{z^2 + r^2}) \right] \quad (4.22)$$

elde edilmiş olur. Şimdi ise elektrik alanı E ve manyetik alanı B aşağıdaki denklemlerle değerlendirilebilir:

$$\vec{e}(r, z, t) = -\nabla \phi(r, z, t) - \frac{\partial}{\partial t} \vec{A}(r, z, t) \quad (4.23)$$

$$\vec{b}(r, z, t) = \nabla \times \vec{A}(r, z, t)$$

Rusk formülasyonuna göre elektrik alan iki kısma ayrılmıştır. Birinci kısım 'e_φ' skaler potansiyel olarak ve 'e_A' vektör potansiyeli olarak ifade edilmiştir.

$$e_\phi(r, z, t) = \frac{Z_0 \cdot I_0}{4\pi\beta} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{(vt-z)^2 + \left(\frac{r}{\gamma}\right)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(vt+z)^2 + \left(\frac{r}{\gamma}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(h_c-z)^2 + r^2}} - \frac{1}{\sqrt{(h_c+z)^2 + r^2}} \right) \quad (4.24)$$

$$e_A(r, z, t) = -\frac{Z_0 \cdot I_0 \cdot \beta}{4\pi} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{(vt-z)^2 + (r/\gamma)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(vt+z)^2 + (r/\gamma)^2}} \right) \quad (4.25)$$

Yerde oluşan elektrik alan kuvvetinin iki bileşeni elde edilir. z=0 olduğunda yani yer eksenini üzerinde olduğu varsayıldığında, formüller şu şekle dönüşür:

$$e_\phi(r, z=0, t) = \frac{Z_0 \cdot I_0}{2\pi\beta} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{(vt)^2 + (r/\gamma)^2}} - \frac{1}{\sqrt{h_c^2 + r^2}} \right] \quad (4.26)$$

$$e_A(r, z=0, t) = -\frac{Z_0 I_0 \beta}{4\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{(vt)^2 + (r/\gamma)^2}} \quad (4.27)$$

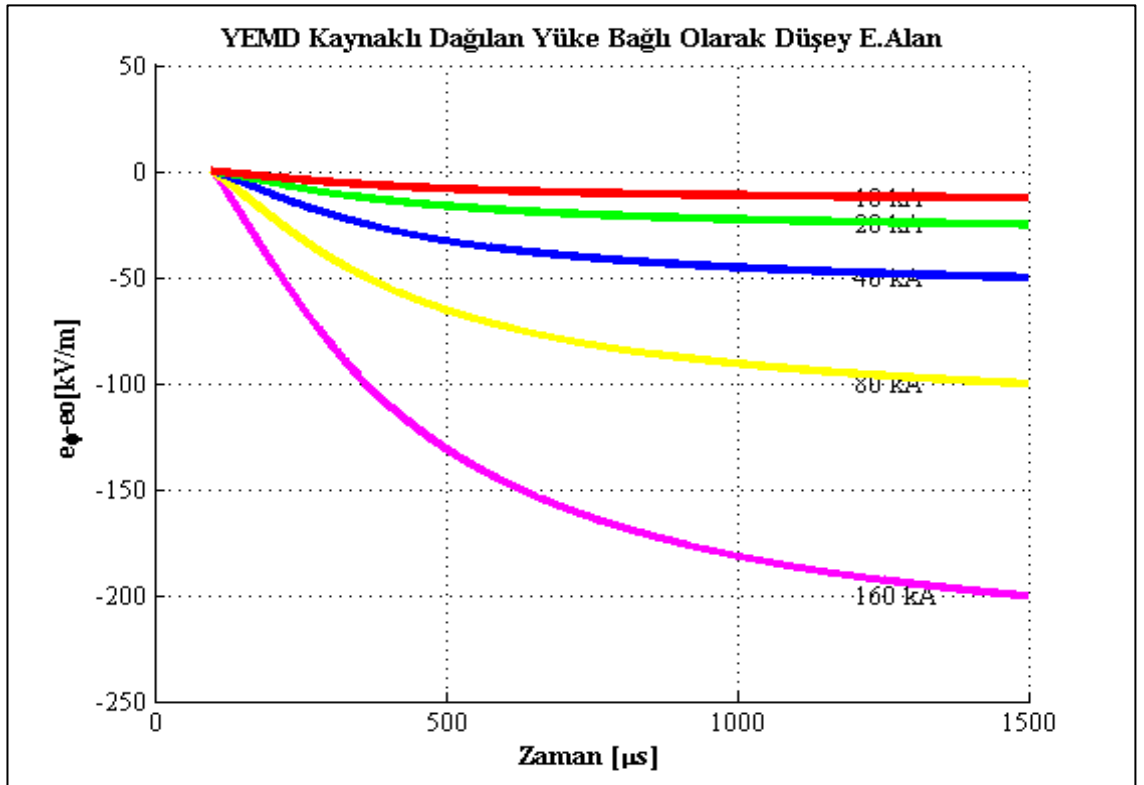
Yerde oluşan manyetik alan kuvveti ise Rusk formülüne göre yazılırsa:

$$b_\phi(r, z=0, t) = \frac{2 Z_0 I_0}{r^2} \cdot \left[\frac{\beta t}{\sqrt{1 + \beta^2 [(ct/r)^2 - 1]}} \right] \quad (T) \quad (4.28)$$

Elde edilmiş olur.

Yüke bağlı e 'nin bileşeni pozitif bir değerle $e_{\phi 0}$ ile başlar. Geri dönüş darbesi buluta yaklaştığında sıfıra iner. YEMD akımına bağlı e_A bileşeni sıfırdan artmaya başlar. Denklem (4.27) ve (4.28)'deki denklemlerde t yerine $t = \frac{r}{c}$ eşitliği yazılırsa başlangıç değerleri elde edilmiş olur.

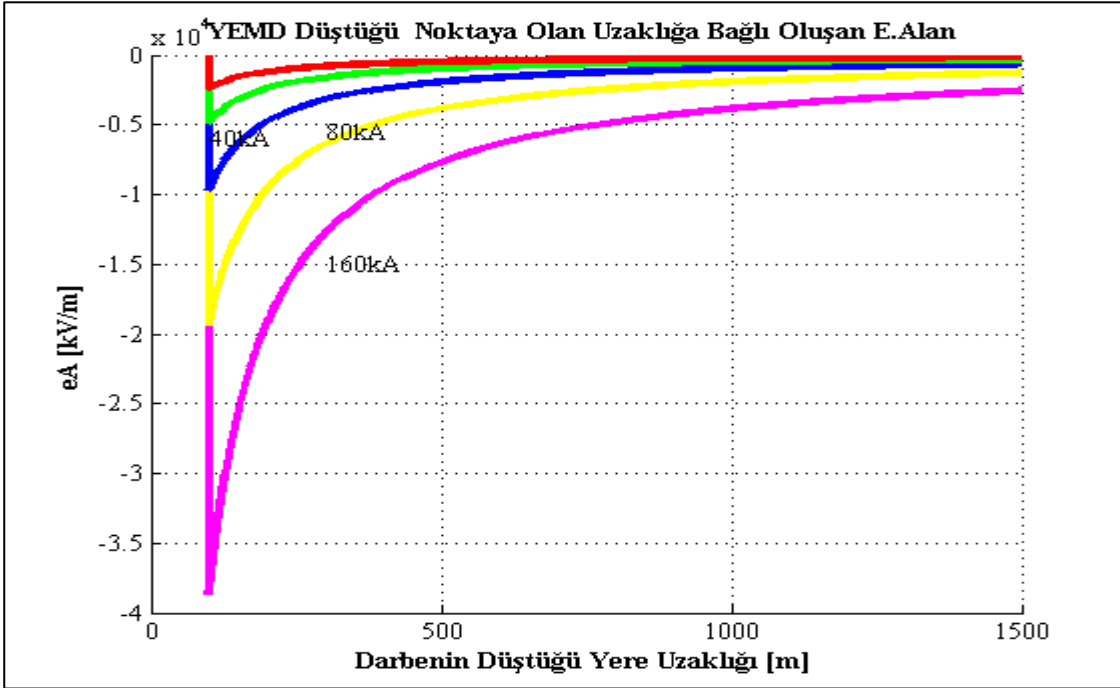
Şekil (4.57), (4.58) ve (4.59)'da $e_\phi - e_{\phi 0}$, e_A ve b_ϕ analitik olarak incelenmiş ve gösterilmiştir.



Şekil 4.57. YEMD kanalı boyunca dağıtılan yüke bağlı olarak Düşey elektrik alan bileşeni, $r = 100$ m ve $z = 0$ için farklı YEMD akımları için (skaler bileşen)

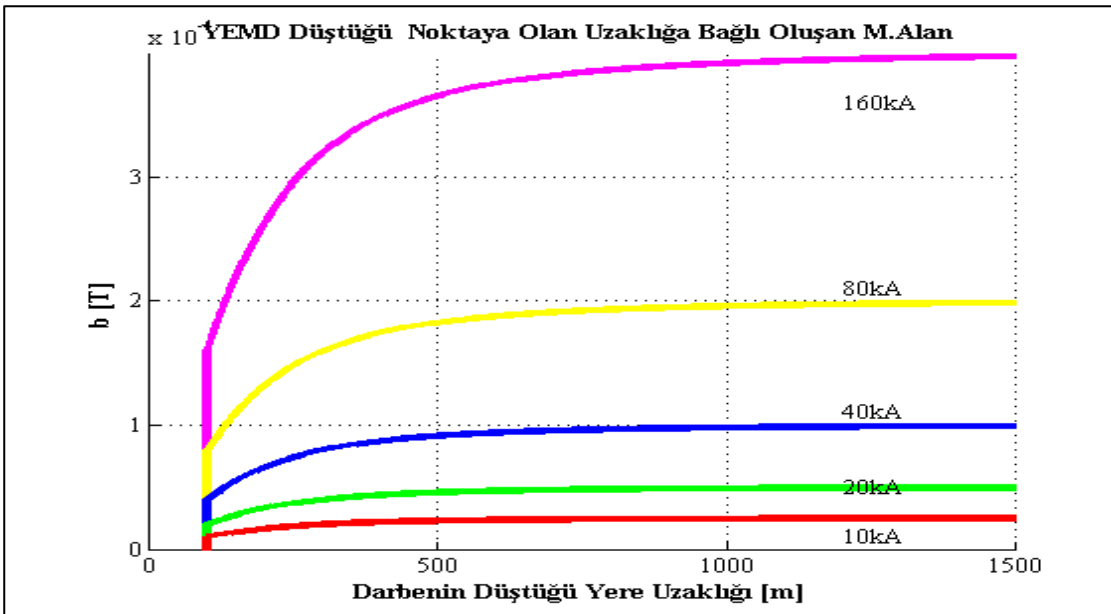
Şekil 4.57' de YEMD darbesinin farklı akım değerlerine göre düştüğü noktaya 100m uzaklıkta oluşturduğu düşey elektrik alan değeri gösterilmiştir. Şekil 4.58' de YEMD

darbesinin farklı akım değerlerine göre düştüğü noktaya 100m uzaklıkta oluşturduğu elektrik alanın vektörel bileşen değeri gösterilmiştir.



Şekil 4.58. YEMD kanalı boyunca dağıtılan yüke bağlı olarak $r = 100$ m ve $z = 0$ için farklı YEMD akımları için (vektörel bileşen)

Şekil 4.59' da ise YEMD darbesinin farklı akım değerlerine göre düştüğü noktaya 100m uzaklıkta oluşturduğu manyetik alan değeri gösterilmiştir.



Şekil 4.59. YEMD kanalı boyunca dağıtılan yüke bağlı olarak Manyetik alan bileşeni, $r = 100$ m ve $z = 0$ için farklı YEMD akımları için

4.5.1.2. Rusk' a göre Alanlar ile Hat arasında İlişki

Rusk hat boyunca dağılık akımlar ve voltajlar açısından türetilen bir kablo bağlama modeli sunmuştur. Önerilen iletim hatları, iletken yüzeyindeki toplam elektrik alanı skaler ve vektör potansiyelleriyle ilişkilendirilerek modelle ilişkili denklemler türetilmiştir. Şekil 4.56' da sunulan geometri göz önüne alındığında, Rusk tarafından türetilen iletim hattı denklemleri şöyledir (V. Cooray 1994):

$$\frac{dv^\phi}{dx}(x,t) + l' \frac{di}{dt}(x,t) = 0 \quad (4.29)$$

$$c' \cdot \frac{dv^\phi}{dx}(x,t) + \frac{di}{dt}(x,t) = c' \cdot \frac{d\phi'(x,h,t)}{dt} \quad (4.30)$$

Burada;

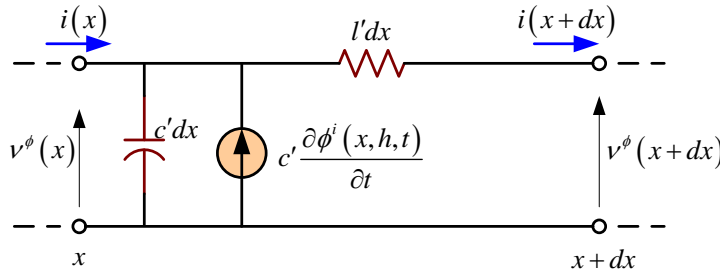
ϕ' : Skaler potansiyel gösterimi

l' : Hattın endüktans gösterimi

c' : Hattın kapasitans gösterimi

Hat boyunca toplam voltaj ise $v(x,t)$ olarak ifade edilmiştir.

$$v(x,t) = v^\phi(x,t) + \int_0^h \frac{\partial A_z^i(x,z,t)}{\partial t} dz \quad (4.31)$$



Şekil 4.60. Rusk bağlantı modelini temsil eden iletim hattı kesimi

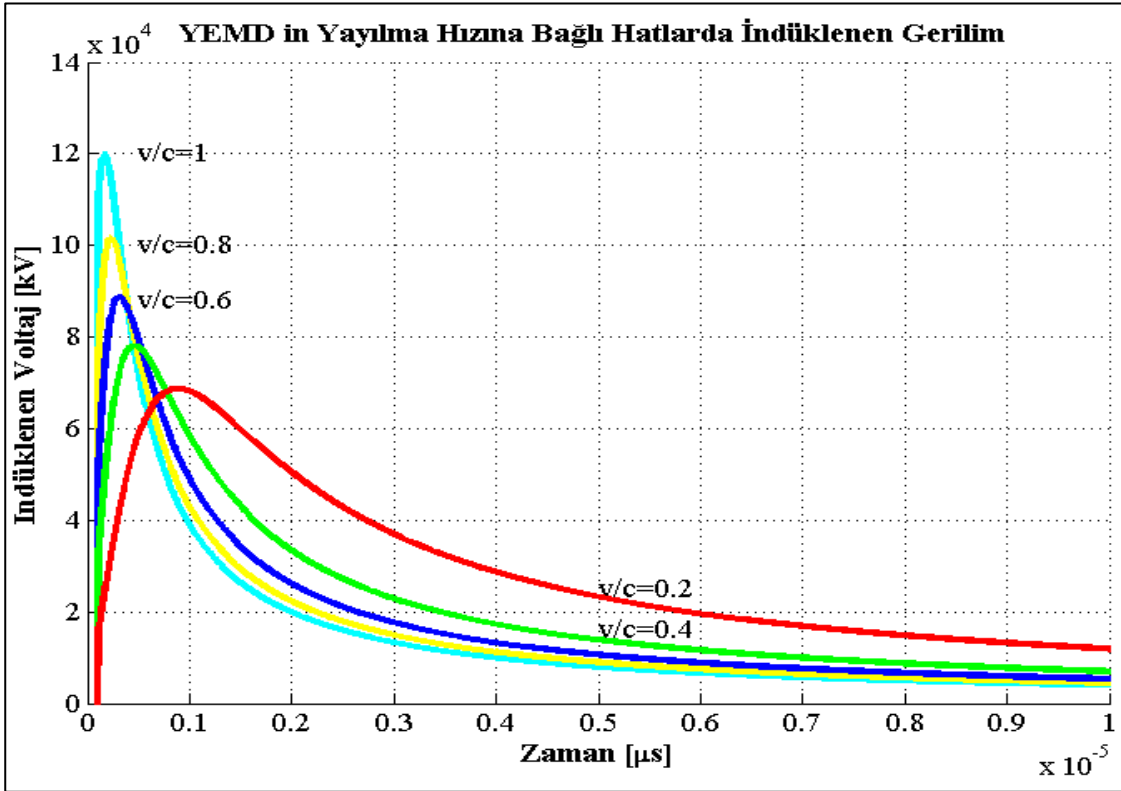
Şekil 4.60' da Rusk modelinin iletim hattı gösterimini göstermektedir. Rusk, elektrik alanı, zemin ve hat yüksekliği arasındaki skaler ve vektör potansiyellerini sabit ve zemin yüzeyindeki potansiyellere eşit olduğu varsayılmıştır. Rusk tarafından bu varsayımlarla elde ettiği denklemler şu şekildedir:

$$v(x,t) = \frac{Z_o \cdot I_o \cdot h \cdot \beta}{4\pi} \left[\frac{ct-x}{d^2 + \beta^2 \cdot (ct-x)^2} \cdot \left(1 + \frac{x + \beta^2 \cdot (ct-x)}{\sqrt{(\beta ct)^2 + (x^2 + d^2)/\gamma^2}} \right) + \frac{ct+x}{d^2 + \beta^2 \cdot (ct+x)^2} \cdot \left(1 + \frac{x + \beta^2 \cdot (ct+x)}{\sqrt{(\beta ct)^2 + (x^2 + d^2)/\gamma^2}} \right) \right] \quad (4.32)$$

YEMD darbesine en yakın noktadaki gerilimi tespit etmek için ($x=0$) yazılır:

$$v(0,t) = \frac{Z_0 \cdot I_0 \cdot h}{4\pi \cdot d^2} \cdot \frac{2\beta ct}{1 + (\beta ct/d^2)} \left(1 + \beta^2 \frac{ct/d}{\sqrt{1 + \beta^2 \left[\left(\frac{ct}{d} \right)^2 - 1\right]}} \right) \quad (4.33)$$

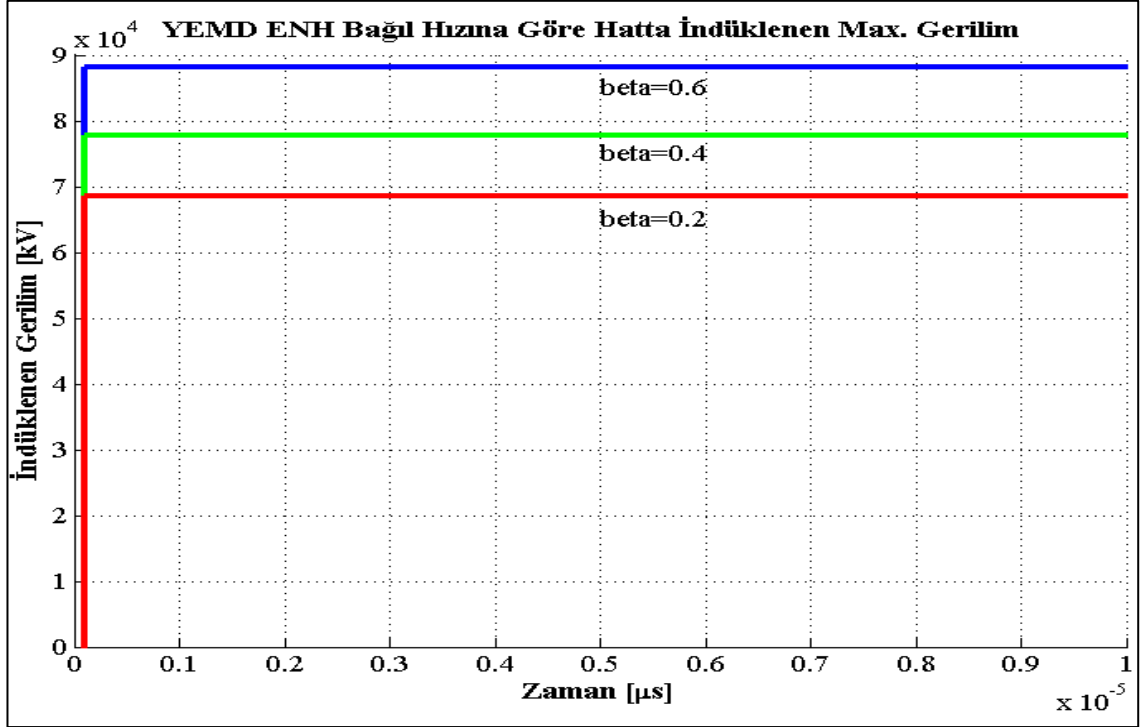
Şekil 4.61' te YEMD'in düştüğü noktaya 10 m yüksekliğinde ve 50m uzaktaki bir hat da indüklenen gerilim elde edilmiştir. Gerilim, 10 kA' lik bir YEMD akımı ve farklı β (bağıl hız) değerleri için gösterilmiştir.



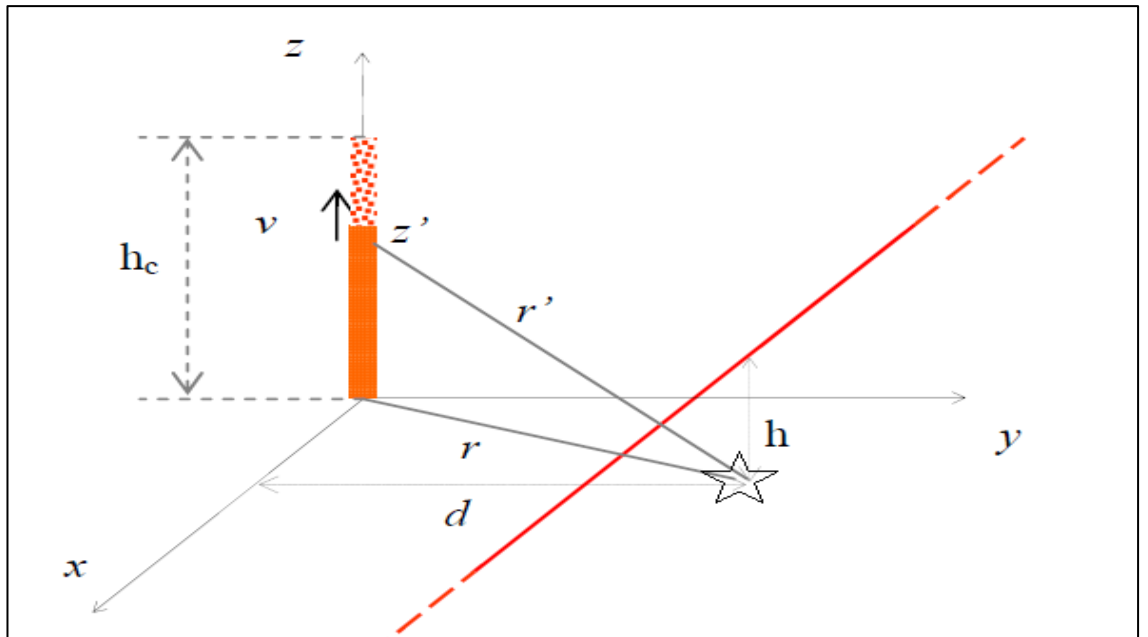
Şekil 4.61. Rusk formülüne göre $x = 0$ ' da indüklenen voltaj. YEMD akımı $I_0 = 10$ kA için YEMD filizinden 50 m uzakta 10 m yükseklikte bir hat da indüklenen gerilim

$\beta \cdot \frac{ct}{d} = 1$ İfadesi denklem (4.33)' te yazılırsa V_{peak} değeri elde edilir. Denklem (4.34)' teki ifade IEEE standardı 1410' un önerdiği indüklenen gerilimin zirve (tepe) değerini gösterir (IEEE st. 2004). Şekil 4.62' de ise bağıl hızla göre indüklenen gerilimin tepe değeri detaylı gösterilmiştir. Özellikle çözümlerin altında yatan modelin geçerliliği ve bu model de kullanılan yaklaşımlar analiz edilmiştir. Burada β değeri bağıl hızı göstermektedir.

$$v_{peak} = \frac{Z_0 \cdot I_0 \cdot h}{4\pi d} \left[1 + \frac{\beta}{\sqrt{2 - \beta^2}} \right] \quad (\text{Volt}) \quad (4.34)$$



Şekil 4.62. Rusk formülüne göre $x = 0$ 'da indüklenen voltaj. YEMD akımı $I_0 = 10$ kA için YEMD filizinin bağlı hızına göre düştüğü noktaya 50 m uzakta 10 m yükseklikte bir hat da indüklen gerilimin tepe değerinin detaylı görünümü



Şekil 4.63. Liew ve Mar formülasyonuna göre sorunun geometrisi

4.5.2. Liew ve Mar formülasyonu

Liew ve Mar formülasyonu temel olarak Rusk tarafından önerilen formüllere benzer yeni bir kapalı form çözümü önerdiler. Önerdikleri formülasyon genellikle uzun hatların analizi için kullanılmaktadır. Temel varsayımlar Chowdhuri ve Rusk tarafından kullanılanlarla aynıdır. Sorunun geometrisi Şekil 4.63' te gösterilmiştir. Liew ve Mar' a göre indüklenen gerilim:

$$v_i(x,t) = -\int_0^h \frac{\partial A_z}{\partial t} dz \cong -h \frac{\partial A_z}{\partial T} \quad (4.35)$$

4.5.2.1. YEMD kanalı boyunca akan akım nedeniyle İndüklenen Gerilim

YEMD kanalında akan akım boyunca Şekil 4.64' te gösterilmiştir. Liew ve Mar formülasyonuna göre indüklenmiş gerilim aşağıdaki denklem de gösterilmiştir:

$$v(x,t) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ v_1 + v_2, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (4.36)$$

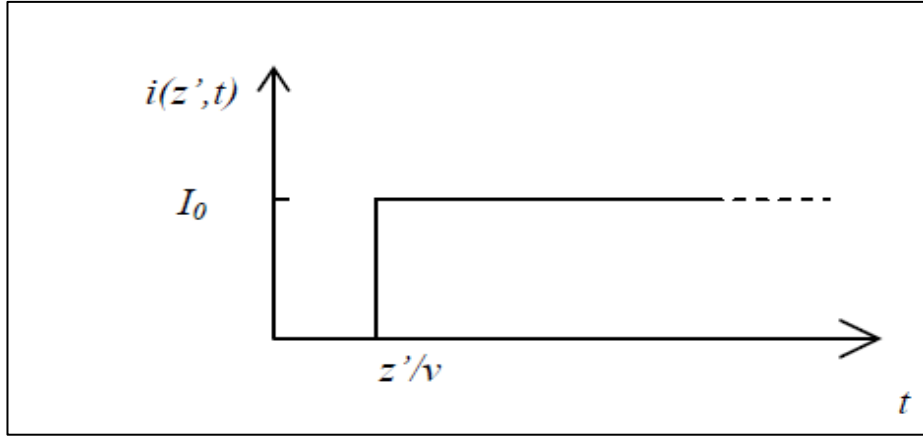
$$k_1 = \frac{2hc(ct-x)}{d^2 + (ct-x)^2} \quad (4.37)$$

$$k_2 = \frac{2hc^2t}{d^2 + ct^2}$$

$$v_1 = \frac{30.I_0.h}{\beta^2.(ct-x)^2 + d^2} \cdot \left[\beta ct + \frac{ctx - d^2}{\sqrt{(ct)^2 + \frac{d^2}{\beta^2 \cdot \gamma^2}}} \right] - \frac{30.I_0.h}{\beta} \cdot \left[\left(1 - \frac{1}{\sqrt{k_1^2 + 1}} \right) \cdot \frac{1}{ct} \right. \\ \left. + \frac{1}{ct} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{k_2^2 + 1}} \right) \right] \\ + \frac{30.I_0.h}{\beta^2.(ct)^2 + d^2} \cdot \left[\beta(ct+x) - \frac{d^2}{\sqrt{(ct)^2 + \frac{d^2}{\beta^2 \cdot \gamma^2}}} \right] \quad (4.38)$$

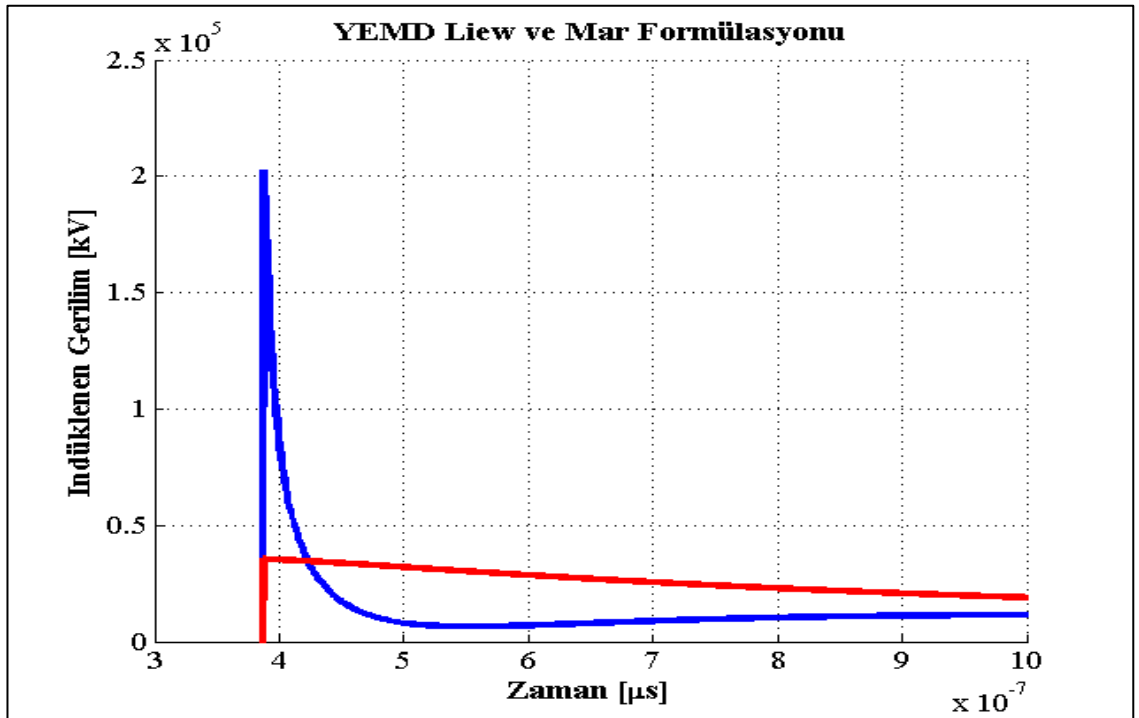
$$v_2 = \frac{60.I_0.h}{\beta} \cdot \left[\frac{\beta^2}{\sqrt{(\beta ct)^2 - \frac{d^2}{\gamma^2}}} \right] \quad (4.39)$$

Toplam indüklenen gerilim, $V_{ind} = V_1 + V_2$ ' dir.



Şekil 4.64. Rusk formülasyonunun da kabul edilen geri dönüş darbe akımı

Şekil 4.65' te YEMD filizinin düştüğü noktaya 50 m uzaklıkta 10m yükseklikte bulunan 5 km uzunluğundaki hat da YEMD' in bağıl hızına göre indüklenen gerilim gösterilmiştir. Liew ve Mar formülasyonu uzun hatlar için kullanılmaktadır.

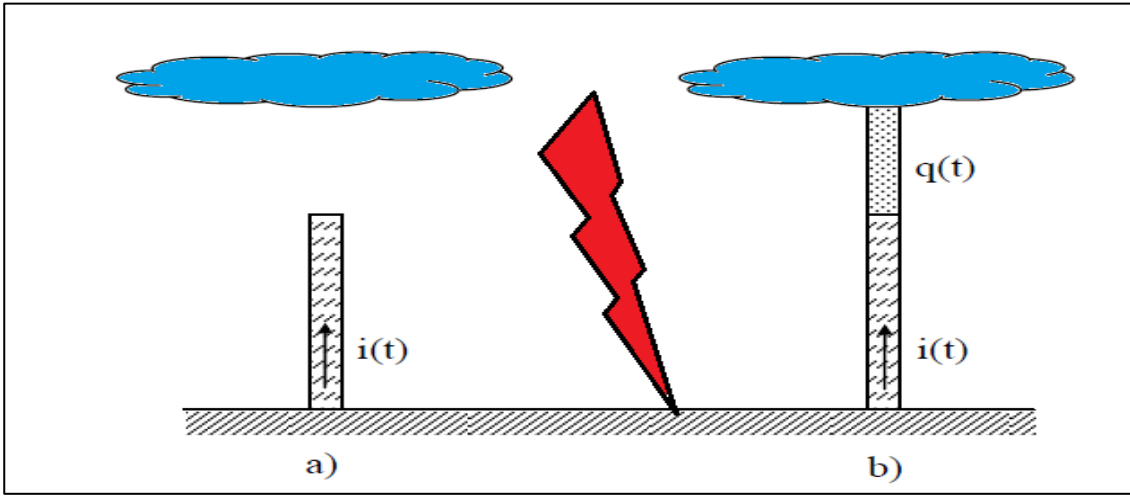


Şekil 4.65. Liew ve Mar formülüne göre $x = 0'$ da indüklenen voltaj. YEMD akımını $I_0 = 10$ kA için YEMD filizinden 50 m uzakta 10 m yükseklikte 5km uzunluğunda ki bir hat da bağıl hız değerleri olan $\beta=0.4$ (mavi) ve $\beta=1$ (kırmızı) için indüklenen gerilimler

4.5.3. Tam kapalı formülasyon çözümleri

Önceki bölümlerde literatür de kullanılan en önemli formülasyonlar özetlenmiştir. Analizlerde iki YEMD modeli kullanılmaktadır. Bunlardan ilki, Høidalen tarafından

kullanılan Şekil 4.66.a' da, ikincisi ise Rusk, Chowdhuri ve Brüt, Liew ve Mar tarafından kullanılan Şekil 4.66.b' de gösterilmektedir (Hoidalen 2003, A C Liew vd 1986). Gösterilen her iki YEMD olayında dikey ve düz YEMD kanalı kullanılmıştır. Her iki olayda da darbenin hızı, sabit v hızı (ENH modeli), ile herhangi bir zayıflama ve bozulma olmaksızın YEMD kanalı boyunca yayıldığı varsayılmıştır. Zemin mükemmel bir iletken olarak kabul edilmiştir. İncelenen elektrik hattı kayıpsızdır (F Rachidi vd 1999). Literatürde sunulan tüm kapalı form çözümleri birçok bilim adamı tarafından araştırılmıştır. Kapalı form çözümlerinin olumsuz yönü ise kesin analitik sonuçlar vermemesidir. Bu bölümde ise ilk YEMD filizinin başlangıçta yüksüz kanalı için analiz yapılmıştır (Şekil 4.66.a). İkinci alt başlıkta ise YEMD filizinin başlangıçta yüklü kanalı için analiz yapılmıştır (Şekil 4.66.b).



Şekil 4.66. YEMD Olayları Modelleri. a) Düz ve dikey bir YEMD akımı yukarı doğru hareket eder (yüksüz model). b) Negatif yük, lider filizin vuruşunu hesaba katmak için, dönüş vuruşu başlamadan önce YEMD yolu boyunca eşit olarak dağılır (yüklü model).

4.5.3.1. YEMD filizinin başlangıçta yüksüz kanalında oluşan elektrik alan değişimi

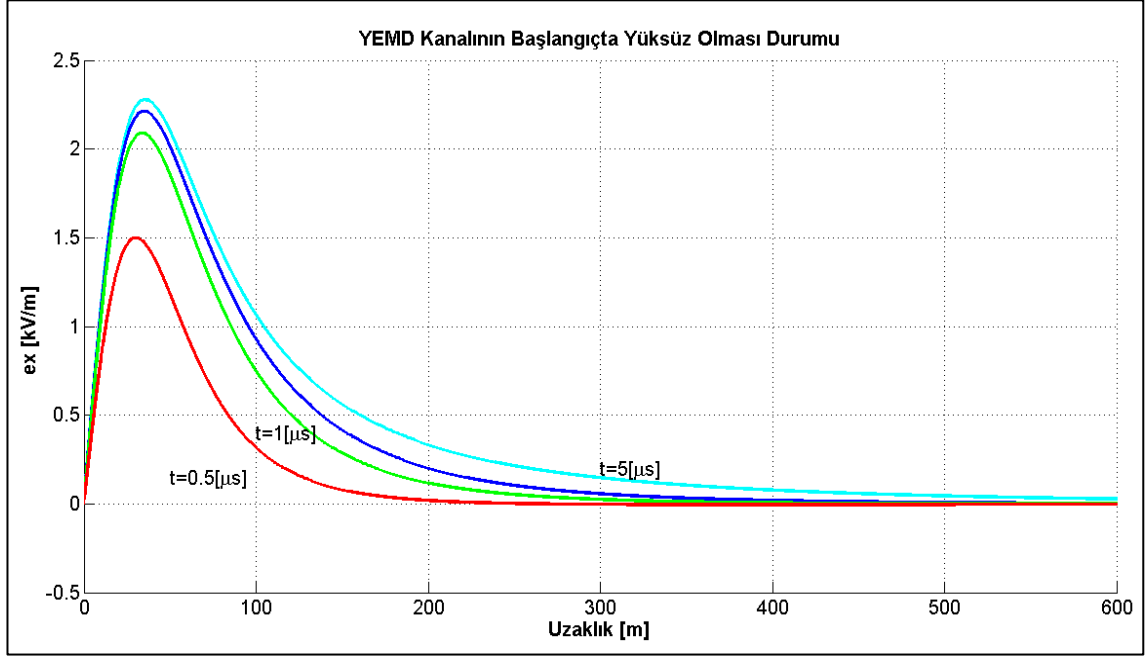
YEMD filizinin henüz yere düşmeden önce yüklenme durumundan bahsetmiştik. Toprağa (zemine) düşmeden önce negatif yüklenmenin başladığı, toprağa ilk düştüğü anda negatif yüklenmenin yerini artık pozitif yüklenmenin aldığını II. Bölümde söylemiştik. Bu alt başlıklarda ise YEMD filizinin toprağa düşmeden önceki anda YEMD kanalının yüksüz olması durumunda elektrik alan değişimi incelenmiştir. Dolayısıyla bu durumun incelenmesine yardımcı olan denklemler aşağıda gösterilmiştir: Bu ifadeler de 'ct' alınan yolu, 'd' hattın uzunluğu, x ise YEMD kanalının yeryüzüne düşme derecesine göre konumunu, 'δ' zaman sabiti ve 'γ' bağlı hızı ile ilgili değeri ifade etmektedir. e_x^{-1} yüksüz kanalda oluşan elektrik alanı ifade etmektedir.

$$ct > \sqrt{x^2 + d^2 + h^2} \quad (4.40)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{d^2 + x^2}{\gamma^2}} \quad (4.41)$$

$$e_x^1 = \frac{Z_0 \cdot I_0}{4\pi\beta} \cdot \frac{x}{d^2 + x^2} \cdot \left(\frac{\frac{\beta ct - h}{\sqrt{(\beta ct - h)^2 + \delta^2}} - \frac{\beta ct + h}{\sqrt{(\beta ct + h)^2 + \delta^2}}}{\frac{2h}{\sqrt{x^2 + d^2 + h^2}}} \right) \quad (4.42)$$

Şekil 4.67' de YEMD' in toprağa düştüğü anda YEMD kanalının yüksüz olması durumunda zamana ve uzaklığa bağlı olarak yayılan elektrik alan değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.67. YEMD kanalının başlangıçta yüksüz olması durumunda oluşan elektrik alan değişimi ($x=0$, $I_0 = 10$ kA, $\beta = 0.4$, $h=10$ m ve $d=50$ m)

4.5.3.2. YEMD filizinin başlangıçta yüklü kanalında oluşan elektrik alan değişimi

Bu incelemede elektrik alan ifadesi (e_x) ifadesi iki kademeye ayrılmıştır. Birinci kademe statik elektrik alan (e_x^s) diğer kademe ise dinamik elektrik alan (e_x^d) olarak ifade edilmiştir. Yine bu iki elektrik alan ifadesi $ct > \sqrt{x^2 + d^2 + h^2}$ aralığında gerçekleşmektedir. Bu durumda denklemler şu şekilde ifade edilir:

$$e_x^s = \frac{Z_0 \cdot I_0}{4\pi\beta} \cdot \frac{x}{d^2 + x^2} \cdot \frac{2h}{\sqrt{d^2 + x^2 + h^2}}$$

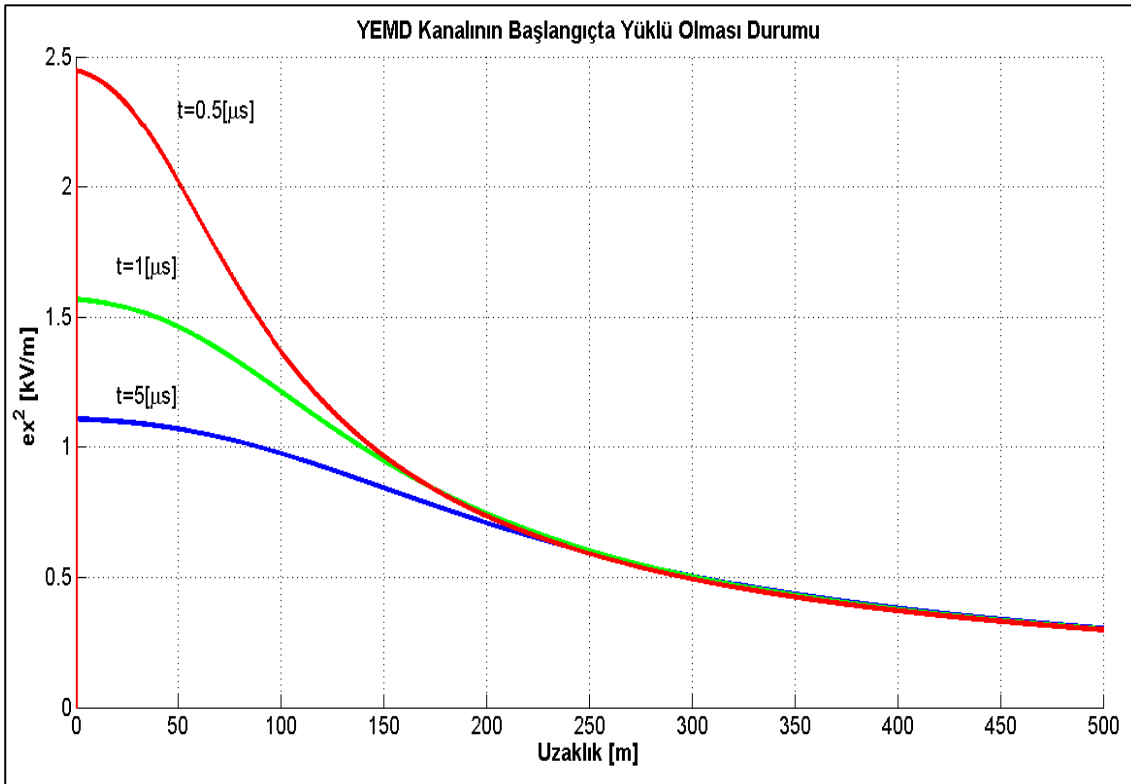
$$e_x^d = \frac{Z_0 \cdot I_0}{4\pi\beta} \cdot \frac{x}{d^2 + x^2} \cdot \left(\frac{\beta ct - h}{\sqrt{(\beta ct - h)^2 + \delta^2}} - \frac{\beta ct + h}{\sqrt{(\beta ct + h)^2 + \delta^2}} \right) \quad (4.43)$$

Burada δ , denklem (4.41)' de gösterilmiştir. Şekil 4.68' de YEMD kanalının başlangıçta yüklü olması durumunda oluşan elektrik alan değişimi gösterilmiştir. Bu elektrik alan değerini hesaplamak için kullanılan denklemler ise aşağıda gösterilmiştir:

$$x_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{(ct+x)^2 - h^2 - d^2}{ct+x} \quad (4.44)$$

$$\begin{aligned} \tau_m &= \beta \cdot (ct - x) - h \\ \tau_p &= \beta \cdot (ct - x) + h \end{aligned} \quad (4.45)$$

$$\int_x^{x_1} e_x^2 = \frac{Z_0 \cdot I_0}{4\pi\beta} \left[\begin{aligned} & \ln \left(\frac{\tau_p - \beta x_1 + \sqrt{(\beta x_1 - \tau_p)^2 + \delta_1^2}}{\tau_m - \beta x_1 + \sqrt{(\beta x_1 - \tau_m)^2 + \delta_1^2}} \right) + \ln \left(\frac{\tau_m - \beta x + \sqrt{(\beta x - \tau_m)^2 + \delta^2}}{\tau_p - \beta x + \sqrt{(\beta x - \tau_p)^2 + \delta^2}} \right) \\ & + \ln \left(\frac{-h + \sqrt{d^2 + h^2 + x_1^2}}{h + \sqrt{d^2 + h^2 + x_1^2}} \right) - \beta \ln \left(\frac{x_1 - \beta \tau_m + \sqrt{(\beta x_1 - \tau_m)^2 + \delta_1^2}}{x_1 - \beta \tau_p + \sqrt{(\beta x_1 - \tau_p)^2 + \delta_1^2}} \right) \\ & + \ln \left(\frac{x - \beta \tau_m + \sqrt{(\beta x - \tau_m)^2 + \delta^2}}{x - \beta \tau_p + \sqrt{(\beta x - \tau_p)^2 + \delta^2}} \right) \end{aligned} \right] \quad (4.46)$$



Şekil 4.68. YEMD kanalının başlangıçta yüklü olması durumunda oluşan elektrik alan değişimi ($x=0$, $I_0 = 10$ kA, $\beta = 0.4$, $h=10$ m ve $d=50$ m)

Bu bölümde elde edilen sonuçlar önemlidir. Çünkü Şekil 4.66' da gösterilen iki YEMD olayının analitik olarak eşdeğerliliği gösterilmiştir.

5. TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında YEMD ile ilgili birçok konu üzerine çalışma yapılmıştır. İncelenen bir konu üzerine yapılan çalışma da YEMD, bir enerji tesisine veya enerji nakil hattına düşmesi sonucu ATP-EMTP programı sayesinde modellenip geçici (transient) analizi yapılmıştır. Benzetim programında YEMD darbesi Heidler ve Rampa fonksiyonları kullanılarak birden çok YEMD darbesi, güç sistemlerinde geçici (transient) olayların etkisini araştırmak için kullanılmıştır. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlarla, YEMD' in güç sistemleri için ne kadar tehlikeli olduğu ortaya çıkmıştır. YEMD' in enerji tesislerine veya enerji nakil hatlarına düşmesi sonucunda tesisler de veya ENH' lerde gerilim değerleri çok yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu yüksek gerilim değerleri güç sistemlerinin performansı için çok zararlıdır. YEMD, yüklerin, elektronik cihazların ve elektriksel teçhizatların aşırı gerilime maruz kalmasına sebep olur. Bu da yalıtım ve cihaz arızalarına neden olabilir. Bu sonuçlar, YEMD darbesine karşı koruma ihtiyacını ortaya koyuyor. Parafudurlar, enerji tesisleri için YEMD' e karşı kullanılan en etkin koruma cihazlarından biridir. Senaryo II' de elde edilen sonuçlar, parafudurların güç sistemlerinde aktif olarak kullanılması sonucunda YEMD' in etkisini minimum seviyeye düşürdüğünü ve en etkin korumanın parafudurlar olduğunu ortaya koymuştur.

Bir diğer konu üzerine yapılan çalışmada ATP-EMTP programı yardımıyla Türkiye' de 380 kV' lık ENH' de kullanılan direk tiplerinin koruma iletkenine YEMD düşmesi durumunda, izolatörlerin ve fazların maruz kaldığı aşırı gerilimler hesaplanmıştır. Yapılan bu analiz sonucunda izolatörler üzerinde oluşan gerilim seviyesinin fazlarda oluşan gerilim seviyesinden çok yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sonucunda izolatörlerin ENH' ler için ne kadar önemli bir malzeme olduğu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle ENH projelerinde tehlikeli gerilim atlamalarına karşı uygun izolatörlerin seçimi son derece önemlidir. Kullanılan direk tiplerinden pylon direk tipinin, basit direk modeli ve çok katlı iletim direk modeli ile elde edilen analizler karşılaştırıldığında çok katlı iletim direk tipinin yapısındaki paralel bağlı rezistanslar ve indüktanslardan kaynaklanan etki dikkate alındığında izolatörler ve fazlar üzerindeki oluşan gerilim, basit pylon direk tipine göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Başka bir konu üzerinde yapılan çalışmada ise farklı YEMD filizlerinin yayılma hızlarına bağlı olarak fazlarda oluşturdukları aşırı gerilimler tespit edilmeye çalışılmıştır. Buna göre ışık hızına yakın olan YEMD filizinin her bir fazda oluşturduğu gerilim değeri daha yüksek çıktığı görülmüştür. Bu çalışma için analiz sonuçlarının gerçeğe daha yakın olan direk modelleri kullanılarak YEMD analizi yapılması ve buradan elde edilen sonuçların kullanılması güç iletim tesislerinde oluşan aşırı gerilimler karşısında koruma ve izolasyon seviyelerinin belirlenmesine yardımcı olacaktır.

Bir diğer konu üzerine yapılan çalışmada ise izolatörlerin voltaj testi ve parafudurların teorik modelleri incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda YEMD' in her bir izolatör üzerinde oluşturduğu gerilim değerleri incelenmiştir. Bu gerilim değerleri izolatörlerin fiziksel yapısına göre farklı değerlerde olduğu görülmüştür. Bu farklılıklardan dolayı fazlarda açısız olarak kaymaların meydana geldiği ortaya çıkmıştır. Bu faz kaymalarına bağlı olarak gerilim yükselmeleri belirlenmiştir. Fazlar arasındaki açı arttıkça oluşan aşırı gerilim değerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Aynı çalışmada izolatörlerin dayanma (gerilim atlama sınırı) gerilimleri çıkarılmaya çalışılmıştır. Yine parafudurların

teorik modelleri incelenmiştir. Buna bağlı olarak en uygun modelin hangisi olduğu tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu tez çalışmasında YEMD modelleri daha gerçekçi modeller kullanılarak güç iletim sistemlerinin aşırı voltajlara karşı koruma ve izolasyon davranışının saptanmasına yardımcı olabilir. Tesislerin inşası ve işletilmesi, güç tesislerinde kısa veya uzun süreli kesintilere neden olan YEMD' lerin oluşturduğu gerilim varlığı göz önüne alınarak gerçekleştirilirse kesintisiz ve ekonomik yüksek kaliteli enerji şebekesi sağlanmış olur.

6. SONUÇ

Son yıllarda literatürde YEMD olgusunun bilgisini artırmaya, güç sistemlerine olan etkilerini azaltma çabalarına gidilmeye başlanmıştır. Özellikle analitik olarak birçok modelleme ortaya çıkarılarak YEMD' etkileri incelenmiştir. Bu tez çalışmasında da en çok kullanılan matematiksel modellemeler model-model incelenmiştir. Bunun sonucunda modeller arasında karşılaştırma yapılarak en uygunu ve doğru olanı belirtmeye çalışılmıştır. Tabi ki şimdiye kadar literatüre sunulan bütün matematiksel modeller tezde incelenmemiştir. Bir kısmı anlatılmış ve analiz edilmiştir. Ancak literatürde en çok kullanılan modeller bizzat analitik olarak incelenmiştir ve YEMD filizlerinin her bir model de dalga formları çıkarılmıştır. Bu sonuçların YEMD literatürüne önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmüştür. Tezin bir diğer katkısı ise her bir model için çıkarılan dalga formları model-model karşılaştırılarak tutarlılığı incelenmeye çalışılmıştır. Yapılan benzetim analizlerinde ise YEMD filizinin koruma iletkeni olmayan bir direğe çarpması durumunda oluşturduğu aşırı gerilim ile koruma iletkenine sahip bir direğe çarpması sonucu oluşturduğu aşırı gerilimler karşılaştırılmıştır. Koruma iletkenli direktte bulunan fazlarda oluşan YEMD kaynaklı gerilimin değeri daha düşük çıktığı görülmüştür. Yine YEMD filizinin parafudur olmayan bir tesise düşmesi sonucunda ne büyük yıkıcı zararlar verdiği ortaya çıkarılmıştır. Yapılan bir diğer MATLAB analizinde YEMD filizinin yayılma hızına bağlı olarak oluşturduğu aşırı gerilimler incelenmiştir. Bunun sonucunda ışık hızına yakın bir YEMD filizinin gerilim kapasitesinin daha büyük olduğu ortaya çıkarılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan bir diğer YEMD modeli ise kapalı formda olan Rusk denklemleri kullanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışma da ise düzgün akan bir AC akımı üzerine düşen YEMD' in üç fazlı sistemlerde oluşturduğu aşırı gerilimler incelenmiştir. Rusk modeli ile oluşturulan YEMD'in YG tesisinde oluşturduğu aşırı gerilimler, benzetim programı ile incelenmiştir.

Literatürle ilgili parafudur çalışmasında ise Pinceti parafudur modeli kullanılarak, YEMD' in bir tesise veya ENH' ye düşmesi durumunda YG tarafından, AG tarafına iletilen indüklenmiş aşırı gerilimin nasıl azaldığı ve bunun sonucunda tesisin nasıl korunduğu araştırılmıştır. YEMD kaynaklı aşırı gerilimlerin zararını önlemek amacıyla parafudurlar transformatörlerin sekonder tarafına yerleştirilmiştir. Bunu nedeni AG şebekesindeki tüketicilere gitmeden önce birincil taraftan aktarılan aşırı gerilimi azalttığından dolayı transformatörlerin sekonder tarafına yerleştirilir. Dolayısıyla şebekenin başlangıcına yalnızca bir tane parafudur yerleştirilmesi şebekeye bağlanan tüm abonelerin korunması için yeterlidir. Bu koruma Türkiye' de TM' lerde sekonder tarafına her bir faz için parafudur yerleştirilerek yapılmaktadır. Ayrıca AG şebekesi kullanan aboneler içinde mesken girişlerinden önce ve ana panoya da minyatür parafudurlar konularak aşırı gerilimlere karşı korunma sağlanmış olur.

Bu tez çalışmasında YEMD etkileri, hem matematiksel olarak incelenmesi hem de benzetim programları ile incelenmesi bu alanda yürütülecek ileri araştırmalara ışık tutacağını ayrıca gelişmekte olan akıllı şebeke çalışmalarına, harmoniksiz ve kesintisiz bir enerji kullanmaya katkı sağlayacağı inancındayız.

7. KAYNAKLAR

- A. BORGHETTI, C. A. NUCCI, M. PAOLONE and F. RACHIDI, Characterization of Conference on Lightning Protection, ICLP'2000, Rhodos, Greece, Sep. 2000.
- A.C. LIEW, S.C. MAR, Extension of the Chowdhuri – Gross Model for Lightning Induced Voltage on Overhead Lines, *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 1, no. 2, pp. 240-247, 1986.
- A.C. LIEW, S.C. MAR, Extension of the Chowdhuri – Gross Model for Lightning Induced Voltage on Overhead Lines, *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 1, no. 2, pp. 240 247, 1986.
- BEATY, H. W. Standard Handbook for Electrical Engineers. New York: McGraw-Hill Professional, 2006. ISBN 978-0071762328.
- BURKE, Power Distribution Engineering Fundamentals and Applications. New York: CRC Press, 1994. ISBN 978-0824792374.
- C. A. NUCCI, F. RACHIDI, M. IANOZ and C. MAZZATTI, Lightning Induced Voltages on Overhead Power Lines”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 35, pp. 75-86, 1993.
- C. A. NUCCI, F. RACHIDI, M. IANOZ, C. MAZZETTI, Comparison of Two Coupling Models for Lightning-Induced Overvoltage Calculations, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 1, pp. 330-339, Jan. 1995.
- C. A. NUCCI, Lightning-Induced Voltages on Overhead Power Lines. Part II: Coupling Models for the Evaluation of the Induced Voltages, *Electra*, No.162, pp. 121-145, Oct. 1995.
- C.A. NUCCI, G. DIENDORFER, M.A. UMAN, F. RACHIDI, C. MAZZETTI, Lightning return-stroke models with channel-base specified current: a review and comparison, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No. D12, November 1990.
- C.D. Taylor, Satterwhite R.S., Harrison C.W., The response of a Terminated Two-Wire Transmission Line Excited by a Non-Uniform Electromagnetic Field, *IEEE Transaction on Antenna Propagation*, Vol. AP-13, 1965.
- C.E.R. BRUCE and R.H. GOLDE, The lightning discharge, *J. Inst. Elect. Eng. Pt.2*, vol.88, pp.487-520, 1941.
- C.F. WAGNER, G.D. MC CANN, Induced Voltages on Transmission Lines, *AIEE Transactions*, Vol. 61, pp. 916- 930, 1942.
- ÇAKIL T., CARLAK H.F., ÖZEN Ş. Protection Analysis of Surge Arresters and Isolators Against Over voltages Caused by Lightning Electromagnetic Pulses, International Conference on Advances and Innovations in Engineering, Elazığ, Turkey, 10-13 May 2017.

- ÇAKIL T., CARLAK H.F., ÖZEN Ş. The Analysis of Transient Phenomena on Power Transmission Lines Due to Lightning Electromagnetic Pulses, Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2017, St Petersburg, Russia, 22-25 May 2017.
- CATALOGUE CARD 2617pl082-W1-en. Edition 08.2008, Low Voltage Surge Arrester. http://www.cablejoints.co.uk/upload/Surge_Arresters.pdf, [Son erişim tarihi: 15.07.2016.]
- D. M. JORDAN, M. A. UMAN, Variation in Light Intensity with Height and Time from Subsequent Lightning Return Strokes, *Journal of Geophysics Research*, Vol. 88, pp.6555-6562, 1983.
- E. KUFFEL, W.S. ZAENGL and J. KUFFEL, High Voltage Engineering Fundamentals, *Published by Butterworth-Heinemann*, pp. 472-489, 2nd Ed., 2000.
- E. PEREZ, J. HERRERA and H. TORRES, Sensitivity Analysis of Induced Voltages on Distribution Lines, IEEE Bologna PowerTech Conference, June 23-26, Bologna, Italy, 2003.
- E. T. PIERCE, Triggered lightning and some unsuspected lightning hazards, *Naval Res. Rev.* vol. 25: pp.14-28, 1972.
- E.T. PIERCE, N. A. CIANOS, Ground-lightning environment for engineering usage, Stanford: Research Institute, 1972, Report, Technical Report 1.
- F. HEIDLER, Travelling current source model for LEMP calculation, Proc of the 6th Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zurich, March 5-7, 1985.
- F. RACHIDI, C. A. NUCCI, M. IANOZ, and C. MAZZETTI, Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines, *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 38, pp. 250–264, Aug. 1996.
- F. RACHIDI, C.A. NUCCI, and M. IANOZ, Transient Analysis of Multiconductor Lines Above a Lossy Ground, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol.14, no.1, pp. 294-302, Jan. 1999.
- F. RACHIDI, C.A. NUCCI, M. IANOZ, C. MAZZETTI, Response of Multiconductor Power Lines to Nearby Lightning Return Stroke Electromagnetic Fields, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, pp. 1404-1411, July 1997.
- F. RACHIDI, Formulation of the Field-to-Transmission line Coupling Equations in Terms of Magnetic Excitation Field, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 35, No. 3, Aug. 1993.

- FERETE, K., NIKOLOVSKI, S., KNEZEVIC, G., STOJKOV, M., KOVAC, Z.,
Simulation of Lightning Transients on 110 kV overhead-cable
Transmission Line Using ATP, EMTP, *IEEE*, 2010.
- G. DIENDORFER, M. A. UMAN, An improved return stroke model with specified
channel-base current, *Journal of Geophysical Research*, v. 95, p. 13621-13644,
1990.
- H. KOGA, T. MOTOMITSU, and T. TANIGUCHI, Lightning Surge Waves Induced on
Overhead Lines, *Transactions on IECE of Japan*, Vol. E62, No. 4, pp. 216-223,
1979.
- H.K. HOIDALEN, Analytical Formulation of Lightning-Induced Voltages on
Multiconductor Overhead Lines Above Lossy Ground, *IEEE Trans.
Electromagnetic Compatibility*, vol.45, no.1, pp.92-100, Feb. 2003.
- http://apa19.apator.com.pl/pdf/ASA_en.pdf [Son erişim tarihi: 15.06.2016].
- IEC 60060-1 International standard, High Voltage Test Techniques. Part 1: General
Definitions and Test Requirements, 2nd edition, 1989-11.
- IEEE Guide for improving the lightning performance of electric power overhead
distribution, IEEE Standard 1410, 2004.
- IEEE Standards 1410 “IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric
Power Overhead Distribution Lines”, 2004.
- IEEE Working Group 3.4.11, Application of Surge Protective Devices Subcommittee,
Surge protective devices committee, Modeling of Metal Oxide Surge Arresters,
Transactions on Power Delivery, Vol. 7 No.1, pp. 302-309, Jan. 1992.
- ISHII, M. VEDIG, Multistory Transmission Tower Model for Lightning Surge Analysis,
IEEE Trans. on Power Del., vol. 6, No.3, pp. 1327-1335, 1991.
- J. P. SILVA, A. E. A. ARAUJO, J. O. S. PAULINO, Calculation of lightning-induced
voltages with RUSCK’s method in EMTP, Part II: Effects of Lightning Parameter
Variations, *Electric Power System Research*, Vol. 61, pp. 133-137, 2002.
- J. R. LUCAS, High Voltage Engineering, 2001, Sri Lanka.
- JOINT CIGRE/CIRED Working Group 05, Lightning Protection of Distribution
Networks. Part II: Application to MV networks, 14th International Conference
Exhibition on Electricity Distribution, Birmingham, UK, Conference Publication
No.438, 1997.

- K. AGRAWAL, H. J. PRICE and S. H. GURBAXANI, Transient Response of a Multiconductor Transmission Line Excited by a Non Uniform Electromagnetic Field, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. EMC-22, pp. 119-129, 1980.
- K. ÜÇLEROĞLU, Yüksek Gerilim Elektrik Tesislerinde Koruma. 1980.
- K.W. WAGNER, Elektromagnetische Ausgleichs Vorgänge in Freileitungen und kabeln (in German), par. 5, Leipzig, 1908.
- KAWAI, M., Studies of The Surge Response on a Transmission Line Tower, *IEEE Trans*, Pas-83, pp. 30- 34, 1964. Lastname, F. M., Book Title, Wiley-Interscience, NewYork, 1986.
- L. W. BEWLEY Traveling Waves due to lightning, *AIEE Trans.* 48, pp. 1050 1064, 1929.
- KAYGUSUZ, A. MAMIŞ, M.S. AKIN, Yıldırım Düşmesi Nedeniyle İzolatörler Üzerinde Oluşan Aşırı Gerilimler, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, 2003.
- LEONID GRCEV, Modeling of Grounding Electrodes Under Lightning Currents, *IEEE Trans. on Elec. Comp.*, Vol: 51, Issue 3, pp. 559 - 571 2009.
- M. A. UMAN, All about Lightning. Toronto: Dover Publications, 1986. ISBN 978 0486252377.
- M. A. UMAN, D. K. MCLAIN, Magnetic Field of Lightning Return Stroke, *Journal of Geophysics Research*, Vol. 74, 1969.
- M. DARVENIZA and D. R. MERCER, Lightning Protection of Pole Mounted Transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, pp. 1087 1095, April 1989.
- M. PAOLONE, C. A. NUCCI, E. PETRACHE and F. RACHIDI, Mitigation of Lightning-Induced Over voltages in Medium Voltage Distribution Lines by Means of Periodical Grounding of Shielding Wires and of Surge Arresters: Modeling and Experimental Validation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 1, Jan. 2004.
- M.A. UMAN, D.K.MCLAIN, E.P.KRIDER, The electromagnetic radiation from a finite antenna, *American Journal of Physics*, vol.43, pp.33-38, 1975.
- M.A. UMAN, The lightning discharge, Academic Press, Orlando FL, 1987.
- M.J. MASTER, M.A. UMAN, Y.T. LIN, R.B. STANDLER, Calculations of lightning return stroke electric and magnetic fields above ground, *J. Geophys. Res.*, vol. 86, pp. 2,127-12,132, 1981.

- P. D. KANNU and M. J. THOMAS Lightning Induced Voltages on Multiconductor Power Distribution Line, *IEEE Proceeding Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 152, No. 6, pp. 855-863, Nov. 2005.
- P. CHOWDHURI and E.T.B. GROSS, Voltage surges induced on overhead lines by lightning strokes, *Proc. IEE*, Vol. 114, no.12, pp. 1899-1907, Dec. 1967.
- P. CHOWDHURI, E.T.B. GROSS, Voltage Surge Induced on Overhead Lines by Lightning Strokes, *Proceeding of IEE*, Vol. 114, No. 12, pp. 1899-1907, Dec. 1967.
- P. CHOWDHURI, Lightning Induced Voltages on Multiconductor Overhead Lines, *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 5, No. 2, pp.658-667, April 1990.
- P. P. BARKER, T.A SHORT, A.R. EYBERT-BERARD and J.P. BERLANDIS, Induced voltage measurement on an experimental distribution line during nearby rocket triggered lightning flashes, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol.11, no.2, pp. 980-995, April 1996.
- P. PINCETI and M. GIANNETTONI, A simplified Model For Zinc Oxide Surge Arresters, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 2, April 1999.
- P. VERHO, M. MARTTILLA, K. KANNUS, J. PYLYANAINEN and M. POUTTU "Optimization of Overvoltage Protection of Distribution Networks", 19th International Conference on Electricity Distribution, CIRED 2007, pp.1-272. Vienna, 21-24, May 2007.
- PRIKLER, L. and H. K. HOIDALEN. ATPDraw version 6.1 for Windows XP/7/8, 2017 <http://www.atpdraw.net/index.php> [Son erişim tarihi: 15.02.2017]
- R. H. GOLDE, Indirect lightning Surges on overhead distribution lines, *The electrical research associations*, S/T 75, Leatherhead, 1954.
- R. LUNDHOLM, Induced Over voltages on Transmission lines and their bearing on the lightning performance of medium voltage networks, Duplic Goteborg, 1955.
- R. MONTANO, The Effects of Lightning on Low Voltage Power Networks, Ph.D. Thesis, Uppsala university, 2005.
- R. THOTTAPPILLIL and M. A. UMAN, Comparison of lightning return stroke models, *J. Geophysics. Res.*, vol. 98, no. D12, pp. 22 903–22 914, 1993.
- R. THOTTAPPILLIL, V. A. RAKOV, and M. A. UMAN, Distribution of charge along the lightning channel: Relation to remote electric and magnetic fields and to return stroke models, *J. Geophysics. Res.*, vol. 102, pp. 6887–7006, 1997.

- S. GUERRIERI, C. A. NUCCI and F. RACHIDI, Influence of the Ground Resistivity on the Polarity and Intensity of Lightning Induced Voltages, Proceedings of 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, 24-30 Aug. 1997.
- S. M. A. RAZZAK, M. M. ALI, M. Z. I. SARKAR and H. AHMAD, Lightning Induced Over Voltages on Overhead Distribution Lines Including Lossy Ground Effects, 3rd International Conference on Electrical and Computer Engineering ICECE 2004, Dhaka, Bangladesh, 28-30 December 2004.
- S. RUSCK, Induced Lightning over-voltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low-voltage networks, Trans. Royal Inst. Of Tech., no. 120, pp.1-118, 1958.
- S. RUSCK, Protection of Distribution Lines in Lightning, Vol. 2, R. H. Golde, *London Academic Press*, pp. 747-771, 1977.
- S. S. KERSHAW, G. L. GAIBROIS and K.B. STUMP, Applying Metal-Oxide Surge Arresters on Distribution Systems, *IEEE Transactions on Power delivery*, Vol. 4, pp. 301-307, Jan. 1989.
- S. SEKIOKA, K. AIBA and S. OKABE, Lightning Over voltages on Low Voltage Circuit Caused by Ground Potential Rise, *International Power System Transients*, Lyon, France, June 4-7, 2007.
- S. SZPOR, A new theory of the induced over voltages, *Cigré Report 308*, 1948.
- S. VISCARO, Direct Strokes to Transmission Lines: Considerations on the mechanisms of Overvoltage Formation and their Influence on the Lightning Performance of Lines, *Journal of Lightning Research*, Vol. 1, pp. 60-68, 2007.
- S. VISCARO, Lightning: an Engineering Approach, Art Liber Edit-Sao Paulo, 2005.
- S. YOKOYAMA, Calculation of Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines, *IEEE Transactions PAS*, Vol. 103, No. 1, pp. 100-108, Jan. 1984.
- SHAIDA, N., JAMOSHID, B.T., Lightning Simulation Study on Line Surge Arresters and Protection Design of Simple Structures, Degree Of Master Of Engineering Faculty of Electrical Eng. Univ. Tech., Malaysia, 2008.
- T. THANASAKSIRI, Improving the Lightning Performance of Overhead Distribution Lines TENCON 2004. IEEE Region 10 Conference, 21-24 Nov. 2004.
- TEİAŞ, Türkiye Ulusal Elektrik Ağındaki Havai Hatların Trafoların ve Jeneratörlerin Elektrik’i Karakteristiği, Sistem Araştırma ve Kontrol Müdürlüğü.
- UEDA, T., and DIG. A, Comparison between Two Tower Models for Lightning Surge Analysis of 77 kV System, *IEEE Trans.*, 2000.

- V. AIGNER, Induzierte Blitzüberspannungen und ihre Beziehung zum ruck wertigen, *Überschlag*, ETZ 56, pp. 497-500, 1935.
- V. COORAY, Calculating lightning-induced over voltages in power lines. A comparison of two coupling models, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol.36, no.3, pp. 179- 182, Aug. 1994.
- V. COORAY, The Lightning Flash, Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 2003.
- V. P. IDONE, and R. E. ORVILLE, Lightning Return Stroke Velocities in the Thunderstorm Research International Program, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 87, pp. 4903- 4915, 1982.
- V.A. RAKOV and A.A. DULZON, A modified transmission line model for lightning return stroke field calculations, in Proc. 9th Int. Zurich Symp. Electromagnetic Compatibility, Zurich, Switzerland. Mar.1991.

ÖZGEÇMİŞ



18 Nisan 1991 yılında Elazığ'da doğdum. İlk ve Orta eğitimime 1996 yılında başladım. İyi bir eğitim dönemi geçirdiğim bu dönemlerde 2005 yılında yüksek bir diploma notuyla mezun oldum. Lise eğitimime ise lgs sınavına girerek, burslu olarak özel bir fen lisesinde okudum, 2009 yılında bu okuldan da yüksek bir diploma notuyla mezun oldum. 2010 yılında Ygs-Lys sınavında ilk 25000 (%2'lik) dilime girerek Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği (İng) Bölümüne girmeye hak kazandım. Bir senesi İngilizce hazırlık sınıfı olmak üzere 2015 yılında Akdeniz Üniversitesi'nden mezun oldum. 2015 yılında Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimime başladım ve 2017 yılında yüksek lisans eğitimimi tamamladım. Tezin yazıldığı tarihe kadar yapılan akademik çalışmalar ise uluslararası veri tabanında taranan dergilerde yayınlanan toplam 2 makale ve 2' si uluslararası toplam 8 adet bildiri sahibidir.