

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**RÜZGAR SANTRALLERİNDE TOPRAKLAMA
PERFORMANSLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

MELİH GÜNERİ

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

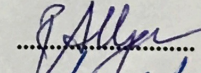
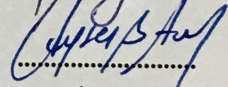
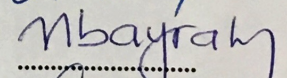
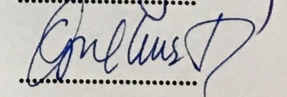
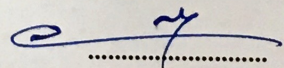
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

RÜZGAR SANTRALLERİNDE TOPRAKLAMA
PERFORMANSLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

MELİH GÜNERİ

Doç. Dr. Bora ALBOYACI
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Doç. Dr. Ayşen BASA ARSOY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Mehmet BAYRAK
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Gül AKALIN KURT
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi


.....

.....

.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 29.06.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Doktora çalışmalarım süresince bana desteğini esirgemeyen sevgili eşime ve kızıma çok teşekkür ederim. Onların sevgisi ve anlayışı olmadan bu çalışmayı tamamlamam mümkün olamazdı.

Sevgi ve ilgilerini her zaman yanımda hissettiğim anneme, babama ve ablama da çok teşekkür ediyorum.

Çalışmalarımın yoğunlaştığı dönemlerde işlerimi devralan değerli iş arkadaşlarıma da destek ve anlayışları için çok teşekkür ederim.

Bana doktora çalışmalarına başlama cesareti veren hocam Prof. Dr. Nevzat ÖZAY'a çok teşekkür ederim. Kendisinin bana olan güvenine layık olabildiğimi umuyorum.

Danışman hocam Doç. Dr. Bora ALBOYACI bu çalışmayı yapma konusunda bana en büyük motivasyon kaynağı oldu. Kendisine tüm doktora çalışmalarım boyunca göstermiş olduğu anlayış, ilgi ve nezaketi için çok teşekkür ederim.

Haziran – 2018

Melih GÜNERİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	viii
GİRİŞ	1
1. RÜZGAR TÜRBİNİ TOPRAKLAMA SİSTEMLERİ	4
1.1 Topraklama Sisteminin Düşük Frekans Bölgesindeki Performansı	6
1.2 Topraklama Sisteminin Yüksek Frekans Bölgesindeki Performansı	13
1.3 Yatay Topraklama İletkenlerinin Topraklama Sistemine Etkileri	15
1.4 Topraklama Alanının Artırılmasının Topraklama Sistemine Etkileri	21
1.5 Dikey Elektrotların Topraklama Sistemine Etkileri	24
1.6 Kablo Ekranlarının Topraklama Etkisi	25
2. KABLO MODELİ ANALİZİ	29
2.1 Modelleme Kapsamı	29
2.2 Temel Empedans Hesapları	30
2.2.1. Koaksiyel iletken empedansları	30
2.2.2. Toprak dönüş empedansları.....	31
2.3. Temel Kablo Modeli	33
2.3.1. Tek iletken modeli	33
2.3.2. Çoklu iletken modeli	35
2.4. Empedans ve Admitans Matrislerinin Oluşturulması	37
2.4.1. Seri empedans matrisi	37
2.4.2. Paralel admitans matrisi	41
2.5. Empedans Hesaplarında Kullanılan Yaklaşırma Yöntemleri	42
2.5.1. Koaksiyel iletken empedansı hesaplama yaklaşırmaları	43
2.5.2. Toprak dönüş empedansı hesaplama yaklaşırmaları	44
2.6. Kablo Modelinin Yüksek Frekans Alanında Geçerliliği	49
2.6.1. Displacement akımlarının değerlendirilmesi	49
2.6.2. Yayılım modunun geçerlilik bölgesi	51
2.7. Kablo Modeli Seçimi	53
2.7.1. π section modelleri	55
2.7.2. Bergeron modeli	56
2.7.3. Frekansa bağlı modeller	56
2.8. Kablo Modeli İçin Verilerin Hazırlanması	57
2.8.1. İletken	57
2.8.2. Yarı iletken katman	58
2.8.3. Yalıtkan katman	59
2.8.4. Kablo ekranı	59
3. YATAY TOPRAKLAMA İLETKENİ MODELİ ANALİZİ	60

4. RÜZGAR SANTRALİ TOPRAKLAMA SİSTEMİ MODELİ	65
4.1 Yıldırım Darbesi Modeli	65
4.2 Türbin Gövdesi ve Kanadı Modeli	67
4.3 Türbin Temel Topraklaması Modeli	67
4.4 Toprak Yapısı Modeli	68
4.5 OG Kablo Modeli	69
4.6 Yatay Topraklama İletkeni Modeli	74
5. BENZETİM ÇALIŞMALARI	76
5.1 Genel Açıklamalar	76
5.2 Çalışma 1-YTİ Etkin Uzunluk Analizi	79
5.3 Çalışma 2-İki RT Arası YTİ'nin Impulsive Empedans Analizi	81
5.4 Çalışma 3-Beşli RT Grubunda YTİ Uygulaması Analizi	83
5.5 Çalışma 4-Beşli RT Grubunda YTİ ve Kablo Ekranı Etkinliği Analizi	85
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	91
KAYNAKLAR	95
EKLER	101
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	110
ÖZGEÇMİŞ	111

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Rüzgar santrali örnek tek hat şeması	4
Şekil 1.2.	Örnek topraklama ağı yerleşimi	5
Şekil 1.3.	Örnek toprak yapısı	7
Şekil 1.4.	Topraklama sistemi izometrik görüntüsü	9
Şekil 1.5.	Rüzgar türbini çevresindeki temas gerilimleri	10
Şekil 1.6.	Genişletilmiş türbin topraklama sistemi yerleşimi	11
Şekil 1.7.	LPS sınıfına göre minimum l_1 uzunlukları	14
Şekil 1.8.	Impulsive topraklama empedansı grafiği	15
Şekil 1.9.	Toprak özgül direnci ve tepe zamanının etkin uzunlukla ilişkisi	17
Şekil 1.10.	Impulsive topraklama direncinin iletken uzunluğuyla ilişkisi	17
Şekil 1.11.	Akım ve gerilim darbelerinin iletken boyunca zayıflaması	19
Şekil 1.12.	Etkin uzunluk hesapları karşılaştırması	20
Şekil 1.13.	Etkin alanın tepe zamanı ile değişimi	22
Şekil 1.14.	Etkin alan gösterimi	22
Şekil 1.15.	Etkin alan hesaplamaları karşılaştırma grafiği	23
Şekil 1.16.	Impulsive empedansın dikey iletken uzunluğuyla ilişkisi	24
Şekil 1.17.	Kablo ekranlarının topraklama sistemlerine bağlantısı	25
Şekil 1.18.	Kablo ekranı akım taşıma yüzdeleri	26
Şekil 1.19.	Kablo ekranı ve topraklama iletkeni bağlantısı	27
Şekil 1.20.	Kablo ekranından geçen akım	27
Şekil 2.1.	Tek katmanlı silindirik iletken	30
Şekil 2.2.	Çift katmanlı silindirik iletken	31
Şekil 2.3.	Toprak dönüş empedansı hesabında kullanılan kablo geometrisi	32
Şekil 2.4.	Kablonun dağıtılmış parametre eşdeğer devresi	33
Şekil 2.5.	İletken, ekran ve zırh içeren kablo kesiti	36
Şekil 2.6.	İletken ve ekran içeren kablo kesiti	36
Şekil 2.7.	Sadece iletken içeren kablo kesiti	36
Şekil 2.8.	İletken, ekran ve zırh içeren tek damarlı kablo döngü devresi	37
Şekil 2.9.	İletken, ekran ve zırh içeren tek damarlı kablo admitansları	41
Şekil 2.10.	Çıplak bakır iletkenin dahili ve harici empedans oranları	43
Şekil 2.11.	Zati toprak dönüş empedansları karşılaştırması ($\sigma=10$ mS/m)	47
Şekil 2.12.	Zati toprak dönüş empedansları karşılaştırması ($\sigma=1$ mS/m)	47
Şekil 2.13.	Yaklaşırma yöntemlerin yüksek frekans bölgesindeki hataları	48
Şekil 2.14.	Düşük frekans varsayımının yarattığı hata yüzdesi	50
Şekil 2.15.	Ortak toprak dönüş empedansının rezistif bileşeni	52
Şekil 2.16.	Ortak toprak dönüş empedansının açısı	52
Şekil 2.17.	PSCAD/EMTDC kablo modelleri	54
Şekil 2.18.	PSCAD/EMTDC π section modeli	55
Şekil 2.19.	PSCAD/EMTDC Bergeron modeli	56
Şekil 3.1.	Yatay topraklama iletkeni dağıtılmış parametre modeli	60
Şekil 3.2.	Dağıtılmış parametre modeli etkin uzunluk değerlendirmesi	62
Şekil 3.3.	Yatay topraklama iletkeni iletim hattı modeli	63
Şekil 4.1.	Yıldırım darbeleri dalga yapıları	66

Şekil 4.2.	OG kablo bilgileri	69
Şekil 4.3.	OG kablo modeli doğrulama devresi	70
Şekil 4.4.	Yıldırım darbesi tepki karşılaştırması	71
Şekil 4.5.	Düşük frekans yaklaşırması karşılaştırması	72
Şekil 4.6.	Yatay topraklama iletkeni bilgileri	74
Şekil 4.7.	Düşük frekans yaklaşırması karşılaştırması	75
Şekil 5.1.	Örnek rüzgar santrali modeli	77
Şekil 5.2.	Benzetim çalışması 1-Düşük frek. yaklaşırması karşılaştırması	79
Şekil 5.3.	Benzetim çalışması 2-Analiz 1 grafikleri	81
Şekil 5.4.	Benzetim çalışması 2-Analiz 2 grafikleri	82
Şekil 5.5.	Benzetim çalışması 3 grafikleri	83
Şekil 5.6.	Benzetim çalışması 4 PSCAD/EMTDC modeli	85
Şekil 5.7.	Benzetim çalışması 4 grafikleri (1 kablo)	86
Şekil 5.8.	Benzetim çalışması 4 grafikleri (2 kablo)	88
Şekil 5.9.	Benzetim çalışması 4 PSCAD/EMTDC modeli (akım paylaşımı)	89
Şekil 5.10.	Benzetim çalışması 4 akım paylaşım grafikleri	90

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1.	Toprak özgül direnci değerleri	6
Tablo 1.2.	Hesaplanan topraklama dirençleri	7
Tablo 1.3.	CymGrd benzetim çalışması temel parametreleri	10
Tablo 1.4.	Topraklama alanının artırılması ile elde edilen topraklama dirençleri	12
Tablo 2.1.	Çeşitli toprak türlerinin göreceli permittivite değerleri	51
Tablo 4.1.	Yıldırım darbesi parametreleri	66
Tablo 4.2.	Toprak yapısı parametreleri	68
Tablo 4.3.	Düşük frekans yaklaşımını karşılaştırma çalışması parametreleri	73
Tablo 4.4.	Referans çalışmadaki yıldırım darbesi parametreleri	75
Tablo 5.1.	Benzetim çalışması 1 parametreleri	79
Tablo 5.2.	Benzetim çalışması 1 sonuçları	80
Tablo 5.3.	Benzetim çalışması 2 parametreleri	81
Tablo 5.4.	Benzetim çalışması 3 parametreleri	83
Tablo 5.5.	Benzetim çalışması 4 parametreleri	85
Tablo 5.6.	Kablo ekranı bağlantısının Zp değerine etkisi	87
Tablo 5.7.	İki kablo ekranı bağlantısının Zp değerine etkisi	89

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

m	: Yayılma sabiti (düşük frekans yaklaştırması ile), (1/m)
γ_g	: Yayılma sabiti (düşük frekans yaklaştırması olmadan), (1/m)
μ_o	: Uzay boşluğu manyetik geçirgenliği ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)
μ_c	: İletken manyetik geçirgenliği, (H/m)
μ_i	: Yalıtkan manyetik geçirgenliği, (H/m)
μ_g	: Toprak manyetik geçirgenliği, (H/m)
ρ_c	: İletken özgül direnci, ($\Omega \cdot m$)
ρ_g	: Toprak özgül direnci, ($\Omega \cdot m$)
σ_g	: Toprak iletkenliği, (S/m)
σ_{air}	: Hava iletkenliği, (S/m)
ϵ_o	: Uzay boşluğu dielektrik sabiti ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m)
ϵ_i	: Yalıtkan dielektrik sabiti, (F/m)
ϵ_g	: Toprak dielektrik sabiti, (F/m)
ϵ_{air}	: Hava dielektrik sabiti, (F/m)
$I_n(x)$: nth order modified Bessel function of the first kind
$K_n(x)$: nth order modified Bessel function of the second kind
C_{ins}	: Yalıtkan katman kapasitansı, (F/m)
Y_{ins}	: Yalıtkan katman admitansı, (F/m)
Y_{cs}	: İletken ile ekran arası admitans, (Ω)
Y_{sa}	: Ekran ile zırh arası admitans, (Ω)
Y_{ag}	: Zırh ile toprak arası admitans, (Ω)
Z_{ins}	: Yalıtkan katman empedansı, (Ω/m)
Z_g	: Toprak dönüş empedansı, (Ω/m)
$Z_{g-mutual}$: Ortak toprak dönüş empedansı, (Ω/m)
Z_{g-self}	: Zati toprak dönüş empedansı, (Ω/m)
Z_{aa}	: İç yüzey empedansı, (Ω/m)
Z_{bb}	: Dış yüzey empedansı, (Ω/m)
Z_{ab}	: Bir yüzeyden diğerine transfer empedansı, (Ω/m)
Z_{cc}	: İletken zati empedansı, (Ω)
Z_{ss}	: Ekran zati empedansı, (Ω)
Z_{aa}	: Zırh zati empedansı, (Ω)
Z_{cs}	: İletken ile ekran arası ortak empedans, (Ω)
Z_{ca}	: İletken ile zırh arası ortak empedans, (Ω)
Z_{sa}	: Ekran ile zırh arası ortak empedans, (Ω)
E_{step}	: Müsade edilebilir adım gerilimi, (V)
E_{touch}	: Müsade edilebilir temas gerilimi, (V)

Kısaltmalar

GPR	: Toprak Potansiyel Yükselmesi
YTI	: Yatay Topraklama İletkeni

RÜZGAR SANTRALLERİNDE TOPRAKLAMA PERFORMANSLARININ İYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Rüzgar santralleri genellikle rüzgar potansiyelinin yüksek olduğu dağlık ve kayalık bölgelerde kurulurlar. Bu bölgelerde toprak özgül dirençlerinin ve dolayısıyla türbin topraklama dirençlerinin yüksek olması sık karşılaşılan bir durumdur. Bir topraklama sisteminin sağlıklı çalışabilmesi için topraklama direncinin mümkün olduğunca düşük olması gerekir. Bu amaçla, rüzgar türbini topraklama sistemlerinin yatay topraklama iletkenleri üzerinden birbirleriyle irtibatlanması yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem güç frekansındaki toprak arıza akımları için etkili bir çözüm sunmaktadır. Ancak yıldırım darbeleri gibi yüksek frekanslı akımlarda, etkin uzunluk tabir edilen fenomen sebebiyle bu yöntemin etkisi oldukça sınırlı kalmaktadır. Rüzgar santrallerinin topraklama sistemleri, yatay topraklama iletkenleri haricinde bir de güç kablolarının ekranları üzerinden birbirlerine bağlanırlar. Ancak bu bağlantının etkisi genellikle ihmal edilir. Kablo ekranlarının yüksek frekans bölgesindeki topraklama etkisi ilgili literatürde yeterince detaylı olarak incelenmiş bir konu değildir. Bu tezin amacı literatürdeki bu eksikliğin giderilmesidir. Bu amaçla yüksek frekans bölgesinde sağlıklı çalışan kablo ve topraklama iletkeni modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmış ve kablo ekranları ile yatay topraklama iletkenlerinin yıldırım darbesi durumundaki etkileşimleri incelenmiştir. Yapılan analizlerde, kablo ekranların yüksek frekans bölgesindeki impulsive topraklama empedansını düşürmede önemli rol oynadıkları ve bu etkinin ihmal edilemeyeceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Etkin Uzunluk, Impulsive Topraklama Empedansı, Kablo Ekranı Topraklama Etkisi, Toprak Dönüş Empedansı, Yüksek Frekans Kablo Modeli.

IMPROVEMENT OF GROUNDING PERFORMANCES IN WIND POWER PLANTS

ABSTRACT

Wind power plants are generally installed at mountainous and rocky areas, where wind potential is high. It is a common case that the ground resistivities and therefore grounding resistances turn out to be very high in such locations. In order to have a properly working grounding system, it is important to have a low grounding resistance as much as possible. In order to achieve that, it is a common practice to connect all turbine grounding systems through horizontal ground wires. This method provides an effective solution for power frequency ground currents in case of earth faults. But for high frequency currents, such as lightning incidences, this method has a very limited contribution because of the so called effective length phenomena. Grounding systems of wind turbines are connected to each other not only through horizontal ground wires, but also through the sheaths of power cables. But the effect of this connection is generally ignored. Grounding effect of cable sheaths in high frequency region has not been investigated in detail in related literature. Purpose of this thesis study is to cover this subject. In order to accomplish this task, cable and horizontal ground wire models for high frequency region has been developed. Using these models, simulations have been conducted to evaluate the interaction of cable sheaths and horizontal ground wires for lightning incidences. The study has proven that the cable sheaths play an important role for reducing the impulsive grounding impedance of a grounding system, and their effect should not be ignored.

Keywords: Effective Length, Impulsive Grounding Impedance, Cable Sheath Grounding Effect, Ground Return Impedance, High Frequency Cable Model.

GİRİŞ

Rüzgar enerjisi günümüzde en çok rağbet gören yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. 2000'li yılların başında dünya genelindeki rüzgar enerjisi kurulu gücü 25.000 MW'ın altındayken, bu değer 2017 yılı itibarıyla yaklaşık 540.000 MW'a ulaşmıştır [1]. Benzer bir gelişme ülkemiz için de sözkonusudur. 2007 yılında ülkemizdeki rüzgar enerjisi kurulu gücü sadece 146 MW iken bu değer 2017 yılında 6.872 MW'a yükselmiştir [2]. Rüzgar enerjisi kurulumundaki bu gelişim, rüzgar santrallerine ait sorunların çözümüne dair artan bir ihtiyacı da beraberinde getirmiştir. Bu ihtiyaçlardan en başta gelenlerden biri de topraklama sistemlerinin geliştirilmesidir.

Rüzgar santralleri yükseklikleri sebebiyle sıklıkla yıldırıma maruz kalırlar. Türbinlere isabet eden bu yıldırım darbelerinin yol açabileceği hasarları en aza indirmek için etkin bir topraklama sistemi kurulması büyük önem arz etmektedir. Topraklama sisteminin temel görevi, güç frekansındaki toprak arıza akımlarını ya da yıldırım darbelerini, çevredeki canlılara ve elektromekanik sistemlere zarar vermeyecek şekilde toprağa aktarmaktır. Bu görevi yerine getirebilmek için topraklama empedansının mümkün olduğunca küçük olması gereklidir.

Topraklama empedansı temel olarak topraklama sisteminin kapsadığı alan ve bu alandaki toprak yapısı ile ilintilidir. Rüzgar santralleri çoğunlukla dağlık ve kayalık bölgelerde tesis edilirler. Bu bölgelerde topraklama özgül direnci oldukça yüksek olabilir. Rüzgar türbini çevresinde topraklama yapılabilecek alanın da sınırlı olduğu dikkate alınır, yeterince düşük empedansa sahip bir topraklama sistemi tesis etmenin zorluğu anlaşılabilir.

Topraklama empedansını istenilen seviyelere düşürebilmek için en sık kullanılan yöntem, rüzgar santralindeki türbin topraklama sistemlerinin bir kısmını ya da tamamını birbirleriyle irtibatlamaktır. Bu yöntem toprak arızalarından kaynaklanan güç frekansındaki akımlar için oldukça etkili bir çözüm sunmaktadır. Ancak yıldırım darbeleri gibi yüksek frekanslı bileşenlere sahip akımlar için aynı durum söz konusu değildir. Topraklama sistemlerini birbirlerine bağlayan iletkenler (yatay topraklama

iletkenleri), yüksek frekanslı akımlarda, “etkin uzunluk” tabir edilen bir mesafe sonrasında açık devre gibi davranırlar. Bu sebeple türbin topraklama sistemlerinin birbirleriyle irtibatlanması yıldırım darberleri için beklenen faydayı genelde sağlayamaz.

Bu durumda, topraklama empedansını düşürmek için alınacak tedbirlerin türbin bölgesinde ya da yakın çevresinde uygulanması gerekmektedir. Bu konudaki en etkili yöntemler topraklama alanının artırılması ve uzun topraklama kazıklarının kullanılmasıdır. Ancak çok yüksek özgül dirençli toprak yapılarında bu yöntemlerin getirileri de çoğu zaman sınırlı kalmaktadır. Dolayısıyla, rüzgar türbini topraklama sistemlerinde, topraklama empedansını beklentileri karşılayacak seviyelere düşürmek kimi zaman mümkün olamamaktadır.

Rüzgar santrallerinde, türbinler arası güç kablolarının ekranları genellikle iki taraftan topraklama sistemine bağlanırlar. Bu bağlantı topraklama sistemleri arasında, yatay topraklama iletkenlerine paralel bir patika daha oluşturur. Yatay ve dikey topraklama iletkenlerinin ya da topraklama alanını genişletmenin topraklama empedansına etkileri ilgili literatürde oldukça detaylı olarak incelenmiştir. Ancak kablo ekranlarının oluşturduğu bu paralel patikanın topraklama sistemine etkisi genellikle ihmal edilmiş ve bu etki yeterince kapsamlı olarak incelenmemiştir.

Böyle bir inceleme yapılabilmesi için öncelikle yüksek frekans bölgesinde sağlıklı çalışan kablo ve topraklama iletkeni modellerine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu tür çalışmalar için kullanılan EMT tipi programlarda birçok kablo ve topraklama iletkeni modeli bulunmaktadır. Ancak bu modeller alt bileşenleri ile birlikte detaylı olarak incelendiklerinde, yüksek frekans bölgesinde kullanılmaya bazı bakımlardan uygun olmadıkları görülmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, yüksek frekans bölgesinde kullanılmaya uygun kablo ve topraklama iletkeni modelleri oluşturarak, kablo ekranlarının rüzgar türbini topraklama sistemi performansına etkilerini incelemektir.

Tezin birinci bölümünde, rüzgar türbini topraklama sistemlerine dair geniş bir tanıtım yapılmıştır. Bu kapsamda topraklama sistemlerinin düşük ve yüksek frekans

bölgelerindeki performansları ayrı ayrı değerlendirilmiş ve topraklama performansının iyileştirilmesi için kullanılan yöntemler incelenmiştir.

Tezin ikinci bölümünde, literatürde bulunan kablo modelleri incelenmiş ve bu modellerin yüksek frekans bölgesindeki kullanılabilirlikleri değerlendirilmiştir. Bu çerçevede, toprak dönüş empedansı hesaplama yöntemleri detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca toprak yapısına bağlı olarak displacement akımlarının etkinliği ele alınmış ve modellemede kullanılan temel varsayımların geçerli olduğu frekans bölgesi değerlendirilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde yatay topraklama iletkeni modelleri incelenmiştir. İlgili literatürde bulunan modeller değerlendirildikten sonra bu tez çalışması kapsamında kullanılacak olan modele karar verilmiştir.

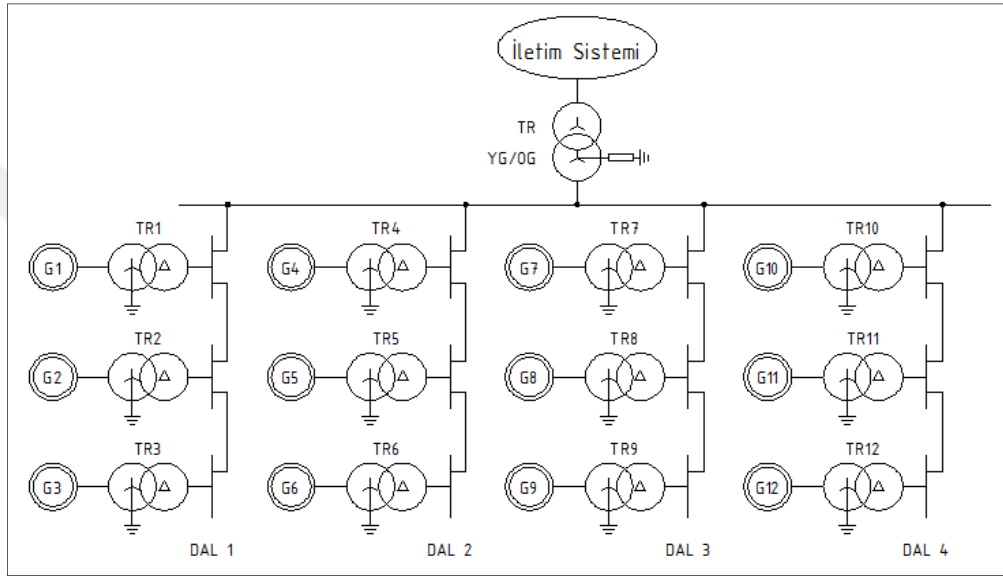
Tezin dördüncü bölümünde, benzetim çalışmalarında kullanılacak olan topraklama sistemi modelinin bileşenleri incelenmiştir. Bu çerçevede öncelikle yıldırım darbesi modeli, türbin gövde ve kanadı modeli ve toprak yapısı modeli ele alınmıştır. Daha sonra, çalışmalarda kullanılacak kablo ve topraklama iletkeni modellerinin nasıl oluşturulduğu izah edilmiş ve bu modellerin doğrulaması yapılmıştır.

Tezin beşinci bölümünde, örnek bir rüzgar santrali modeli üzerinde benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda öncelikle yatay topraklama iletkeninin tek başına ve türbin topraklama sistemi ile birlikte çalışması incelenmiştir. Daha sonra bu devreye kablo ekranları eklenerek topraklama sisteminin performansındaki değişim incelenmiştir.

Tezin altıncı bölümünde, yapılan benzetim çalışmalarında elde edilen sonuçlar özetlenmiştir. Ayrıca bu çalışmaların literatüre katkıları değerlendirilmiş ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar sıralanmıştır.

1. RÜZGAR TÜRBİNİ TOPRAKLAMA SİSTEMLERİ

Rüzgar santralleri, belirli bir bölgede bulunan rüzgar türbinlerinin bir toplayıcı sistem üzerinden bir araya getirilmesi ve iletim ya da dağıtım şebekesine bağlanması ile oluşurlar. Örnek bir rüzgar santrali tek hat şeması Şekil 1.1’ de verilmiştir;



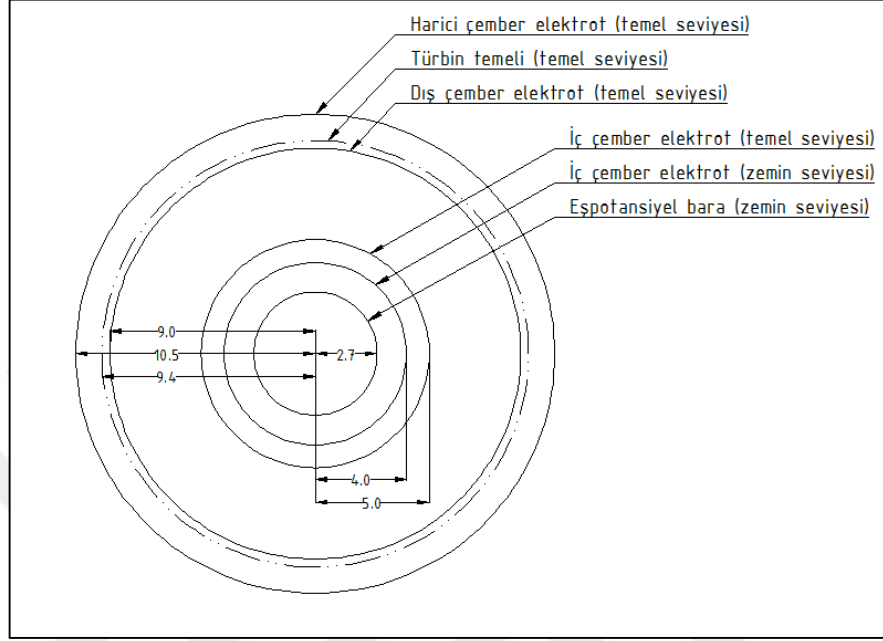
Şekil 1.1. Rüzgar santrali örnek tek hat şeması

Rüzgar santralleri genellikle yüksek rüzgar potansiyeline sahip, yüksek rakımlı dağlık arazilerde kurulur. Büyük güçlü modern rüzgar türbinleri, çok uzun olmaları (>100 m) ve çevrede genelde başka yapı bulunmaması sebebiyle, yıldırım darbelerine sıklıkla maruz kalırlar. Bu yıldırım darbelerinin etkileri, çevredeki insanlara, hayvanlara ve türbinin kendisine zarar verecek boyutta olabilir. Yıldırım darbeleri haricinde, rüzgar türbinini içerisindeki güç üretimi ve dağıtım devrelerinde meydana gelebilecek arızalar da çevredeki canlılara ve malzemelere zarar verebilir.

Yıldırım darbelerinden ya da kısa devrelerden kaynaklanabilecek potansiyel zararları önleyebilmek için etkin bir topraklama sistemi tesis edilmelidir. Bu bağlamda, topraklama sisteminin rüzgar santrallerinin hayati bir parçası olduğu söylenebilir.

Rüzgar türbinleri için tavsiye edilen toprak ağı yerleşimi IEC 61400-24’ te tanımlanmıştır [3]. Bu ağ yapısında, türbin temeli çevresinde, toplam uzunluğunun

en az %80'i toprakla temas eden çember şeklinde harici bir elektrot kullanılması ve bu elektrodun temel demir donatısına ve türbin kulesine irtibatlanması önerilmektedir. Tarif edilen ağ yerleşimine dair bir örnek Şekil 1.2' de verilmiştir.



Şekil 1.2. Örnek topraklama ağı yerleşimi

Rüzgar türbini topraklama sisteminden beklentiler aşağıdaki gibi sıralanabilir [3];

- Toprak arızaları sırasında oluşan adım ve temas gerilimlerine karşı personel güvenliğini sağlamak
- Ekipmanın zarar görmesini engellemek
- Bir arıza sırasında maruz kalacağı termal ve elektrodinamik kuvvetlere karşı dayanıklı olmak
- Uzun vadeli mekanik dayanıma ve paslanmazlığa sahip olmak

Topraklama sistemlerinin yukarıda belirtilen beklentileri hem toprak arızaları hem de yıldırım darbeleri için karşılaması gereklidir. Ancak topraklama sisteminin 50 Hz frekansındaki toprak arıza akımına verdiği tepki, birkaç MHz seviyesinde yüksek frekanslı bileşenlere sahip yıldırım darbelerine verdiği tepkiden farklıdır. Bu durum, güç frekansında düşük seviyede olup yüksek frekanslarda baskın hale gelen elektrot reaktansının doğal sonucudur. Dolayısıyla bir topraklama sisteminin düşük frekans (toprak arızaları) ve yüksek frekans (yıldırım darbeleri) bölgelerindeki performanslarının ayrı ayrı incelenmesi gerekir.

1.1. Topraklama Sisteminin Düşük Frekans Bölgesindeki Performansı

Rüzgar türbini topraklama sistemleri için düşük frekans bölgesindeki ana performans kriteri, bir toprak arızası sırasında oluşacak adım ve temas gerilimlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalması olarak ifade edilebilir. Bu kriteri sağlayabilmek için topraklama direncinin mümkün olduğu kadar düşük olması gereklidir.

Topraklama sisteminin toprak arızası durumundaki performansını değerlendirebilmek için, toprak özgül direncinin, topraklama ağı geometrisinin, zemin kaplama malzemesinin ve toprak arıza akımının bilinmesi gerekir. Kurulu gücü 150 MW olan ve 70 adet rüzgar türbininden oluşan örnek bir rüzgar santralinde yapılan toprak özgül direnci ölçümü sonuçları Tablo 1.1’de verilmiştir.

Tablo 1.1. Toprak özgül direnci değerleri

RT #	Özgül direnc	RT #	Özgül direnc	RT #	Özgül direnc	RT #	Özgül direnc
1	6.883 Ω.m	19	17.118 Ω.m	37	33.538 Ω.m	55	13.752 Ω.m
2	18.132 Ω.m	20	17.201 Ω.m	38	10.790 Ω.m	56	73.788 Ω.m
3	1.273 Ω.m	21	19.353 Ω.m	39	26.499 Ω.m	57	67.036 Ω.m
4	376 Ω.m	22	9.235 Ω.m	40	10.407 Ω.m	58	22.217 Ω.m
5	171 Ω.m	23	8.175 Ω.m	41	14.864 Ω.m	59	11.771 Ω.m
6	261 Ω.m	24	5.081 Ω.m	42	22.979 Ω.m	60	19.597 Ω.m
7	315 Ω.m	25	6.166 Ω.m	43	27.211 Ω.m	61	26.817 Ω.m
8	461 Ω.m	26	6.891 Ω.m	44	28.795 Ω.m	62	25.691 Ω.m
9	244 Ω.m	27	36.465 Ω.m	45	25.863 Ω.m	63	27.735 Ω.m
10	12.511 Ω.m	28	833 Ω.m	46	36.296 Ω.m	64	19.229 Ω.m
11	17.626 Ω.m	29	28.747 Ω.m	47	30.368 Ω.m	65	47.271 Ω.m
12	42.901 Ω.m	30	4.943 Ω.m	48	37.287 Ω.m	66	5.150 Ω.m
13	23.011 Ω.m	31	29.286 Ω.m	49	32.211 Ω.m	67	4.993 Ω.m
14	24.896 Ω.m	32	3.520 Ω.m	50	41.312 Ω.m	68	34.806 Ω.m
15	38.441 Ω.m	33	905 Ω.m	51	29.356 Ω.m	69	31.298 Ω.m
16	20.927 Ω.m	34	2.704 Ω.m	52	38.320 Ω.m	70	31.400 Ω.m
17	35.340 Ω.m	35	15.290 Ω.m	53	27.337 Ω.m		
18	13.973 Ω.m	36	18.058 Ω.m	54	22.556 Ω.m		

Rüzgar satralları genellikle yüksek ve kayalık bölgelere inşa edildikleri için toprak özgül dirençlerinin yüksek olması beklenir. Ancak bu örnekte toprak yapısı kalıştı ve mermerden oluştuğu için, elde edilen toprak özgül direnci değerleri istisnai ölçüde yüksek çıkmıştır. Söz konusu toprak yapısını gösteren bir fotoğraf Şekil 1.3’te verilmiştir.



Şekil 1.3. Örnek toprak yapısı

Bu rüzgar türbinleri için dış çapı 21 m olan tipik bir topraklama ağının kullanılması durumunda oluşacak topraklama dirençleri CymGrd [4] programı kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen değerler Tablo 1.2’de verilmiştir.

Tablo 1.2. Hesaplanan topraklama dirençleri

RT #	Topraklama direnci	RT #	Topraklama direnci	RT #	Topraklama direnci	RT #	Topraklama direnci
1	145,9 Ω	19	363,1 Ω	37	711,3 Ω	55	291,7 Ω
2	384,5 Ω	20	364,8 Ω	38	228,8 Ω	56	1.565,0 Ω
3	26,9 Ω	21	410,5 Ω	39	562,0 Ω	57	1.421,8 Ω
4	8,0 Ω	22	195,9 Ω	40	220,7 Ω	58	471,2 Ω
5	3,6 Ω	23	173,4 Ω	41	315,3 Ω	59	249,7 Ω
6	5,5 Ω	24	107,8 Ω	42	487,4 Ω	60	415,6 Ω
7	6,7 Ω	25	130,8 Ω	43	577,1 Ω	61	568,8 Ω
8	9,8 Ω	26	146,2 Ω	44	610,7 Ω	62	544,9 Ω
9	5,2 Ω	27	773,4 Ω	45	548,5 Ω	63	588,2 Ω
10	265,0 Ω	28	17,7 Ω	46	769,8 Ω	64	407,8 Ω
11	373,8 Ω	29	609,7 Ω	47	644,1 Ω	65	1002,6 Ω
12	909,9 Ω	30	104,8 Ω	48	790,8 Ω	66	109,2 Ω
13	488,0 Ω	31	621,1 Ω	49	683,2 Ω	67	105,9 Ω
14	528,0 Ω	32	74,7 Ω	50	876,2 Ω	68	738,2 Ω
15	815,3 Ω	33	19,2 Ω	51	622,6 Ω	69	663,8 Ω
16	443,8 Ω	34	57,3 Ω	52	812,7 Ω	70	666,0 Ω
17	749,5 Ω	35	324,3 Ω	53	579,8 Ω		
18	296,4 Ω	36	383,0 Ω	54	478,4 Ω		

Beklendiği üzere, toprak özgül direçlerinin çok yüksek olması sebebiyle hesaplanan topraklama dirençleri de çok yüksek çıkmaktadır. Topraklama dirençlerini düşürmek için en etkili çözüm, IEC 61400-24'te önerildiği gibi, santraldeki tüm topraklama ağlarını birbirlerine irtibatlayarak genişletilmiş bir topraklama sistemi tesis etmektir [3]. Bağlantı için kullanılan yatay topraklama iletkenlerinin (YTİ) empedanslarının, türbin topraklama sistemi dirençleri ile karşılaştırıldığında çok küçük olması sebebiyle, eşdeğer topraklama direnci tüm topraklama dirençlerinin paralel birleşimi olarak düşünülebilir. Tablo 1.2' de verilen direnç değerlerinin paralel bileşimi alındığında eşdeğer direnç $0,73 \Omega$ çıkmaktadır. Hatta yatay topraklama iletkenlerinin güzergah boyunca toprakla temas ettiği, dolayısıyla arıza akımının yayıldığı toprak alanını önemli ölçüde artırdığı dikkate alınır, eşdeğer direncin paralel bileşim değerinden de düşük olacağı söylenebilir.

Bir toprak arızası durumunda topraklama sistemi üzerinde oluşacak gerilim arıza akımıyla doğru orantılıdır. Şebeke transformatörünün orta gerilim tarafı genellikle direnç üzerinden topraklandığı için, rüzgar santrallerinin toplayıcı sistemlerinde toprak arıza akımı sınırlandırılmış olur. Bu akım değeri ülkemizde genellikle 1.000 A olarak seçilir. Ancak, yukarıda bahsedilen genişletilmiş topraklama sisteminin yüksek gerilim trafo merkezi topraklama ağına irtibatlanması durumunda, toprak ağı üzerinden geçebilecek akım önemli ölçüde artacaktır. Dolayısıyla, rüzgar santrali genişletilmiş topraklama sisteminin trafo merkezi topraklama ağına bağlanıp bağlanmayacağına karar vermeden önce, adım ve temas gerilimlerine dair bir inceleme yapılması tavsiye edilebilir.

Toprak arızaları sırasında oluşacak temas gerilimleri toprak yüzeyinde kullanılan zemin kaplama malzemesi ile kısmen kontrol altına alınabilir. Rüzgar santrallerinde türbin çevresinde genellikle estetik amaçlı olarak 10-15 cm kalınlığında çakıl taşı serilir. Bunun haricinde topraklama amacıyla ilave bir zemin kaplaması (asfalt, vs) genellikle kullanılmaz.

IEEE Std. 80' e göre, toprak arızaları sırasında oluşan adım ve temas gerilimleri (50 kg vücut ağırlığı için) aşağıda belirtilen şekilde hesaplanabilir [5];

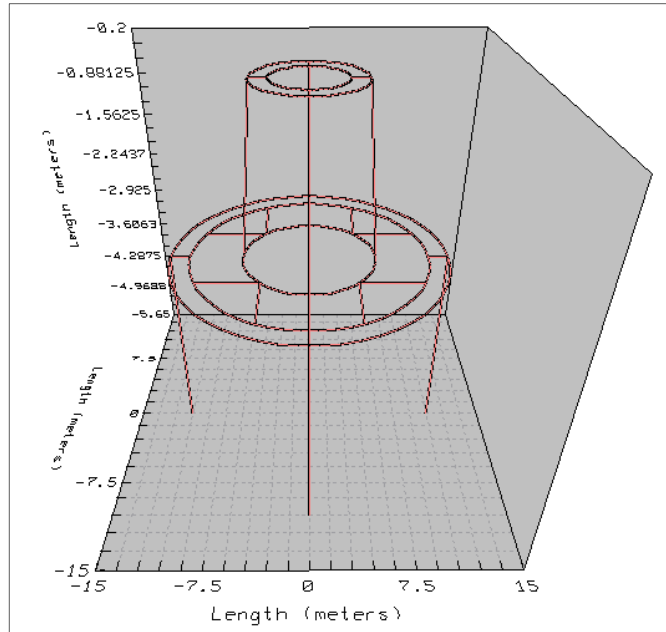
$$E_{\text{step}} = (1000 + 6C_s \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (1.1)$$

$$E_{\text{touch}} = (1000 + 1,5C_s \rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (1.2)$$

$$C_s = 1 - \frac{0,09 (1 - \rho/\rho_s)}{2h_s + 0,09} \quad (1.3)$$

Burada, ρ , toprak özgül direncini, ρ_s , zemin kaplama malzemesi özgül direncini, h_s , zemin kaplama malzemesi kalınlığını, t_s , ise arıza süresini ifade etmektedir.

Yukarıda belirtilen örnek rüzgar santralinde, bir toprak arızası durumunda oluşacak adım ve temas gerilimlerini hesaplamak için, sonlu elemanlar analizi yöntemiyle çalışan CymGrd programı kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmıştır [4]. Bu çalışmalarda kullanılan türbin topraklama sistemi Şekil 1.2’de verilmiştir. Bu topraklama sistemi, türbin temeli dışında 21 m çapında bir harici çember elektrot, bu elektroda bağlı topraklama kazıkları, türbin temeli içerisinde 18 m çapında bir dahili dış çember elektrot, türbin içerisinde bir eşpotansiyel bara ve bu bileşenleri birbirlerine bağlayan iletkenlerden oluşmaktadır. Topraklama sisteminin izometrik görüntüsü Şekil 1.4’te verilmiştir.



Şekil 1.4. Topraklama sistemi izometrik görüntüsü

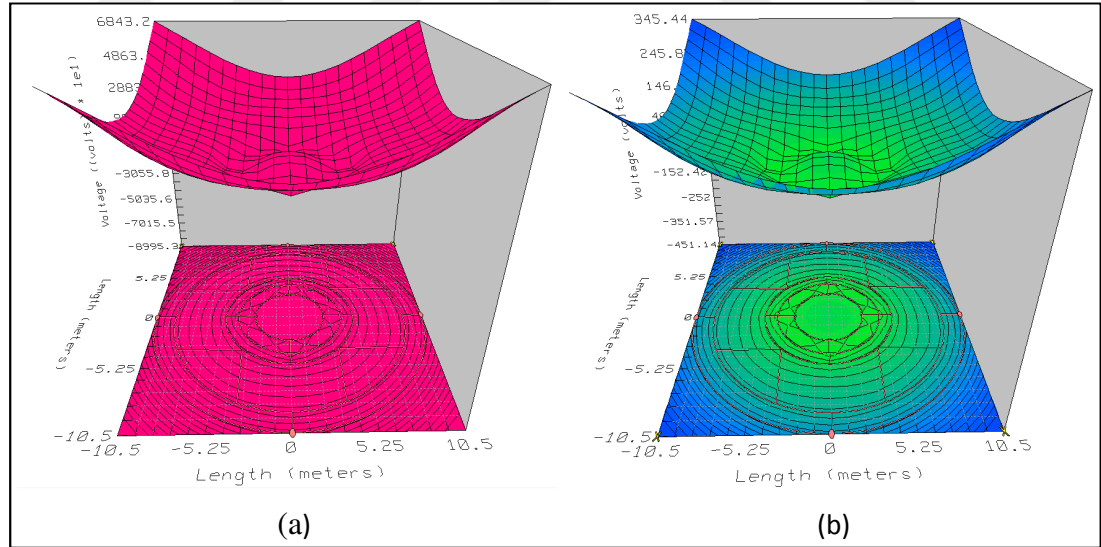
Benzetim çalışmalarında kullanılan temel parametreler Tablo 1.3'te verilmiştir.

Tablo 1.3. CymGrd benzetim çalışması temel parametreleri

Parametre	Değer
Toprak arıza akımı	1000 A
Arıza süresi	0,5 s
Zemin kaplama malzemesi özgül direnci	2500 Ω .m (çakıl)
Zemin kaplama malzemesi kalınlığı	10 cm

Bu parametreler kullanılarak hesap yapıldığında, müsaade edilebilir temas gerilimi 707 V çıkmaktadır. Temas gerilimi kriterinin sağlandığı durumlarda adım gerilimi de genellikle sağlandığı için sadece adım gerilimi kriteri incelenmiştir.

Topraklama sistemlerinin birbirlerine bağlandığı ya da müstakilen çalıştığı durumlarda, temas gerilimi seviyesinin ne ölçüde etkilendiğini incelemek amacıyla, 1 numaralı türbinde 1 kA büyüklüğündeki bir toprak arızası için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışma sonuçlarına göre, türbin temeli ve çevresinde oluşan temas gerilimi dağılımları Şekil 1.5'te verilmiştir.



Şekil 1.5. Rüzgar türbini çevresindeki temas gerilimleri, a) Müstakil topraklama sistemi, b) Genişletilmiş topraklama sistemi

Şekil 1.5'te görülebileceği üzere, genişletilmiş topraklama sisteminde, topraklama direnci müstakil topraklama sistemine göre çok daha düşük olduğu için, toprak arızası sırasında oluşan temas gerilimi, kabul edilebilir sınırların altında çıkmaktadır. Arıza akımının sınırlı olduğu ve eşdeğer topraklama direncinin birkaç ohm

Tablo 1.4. Topraklama alanının artırılması ile elde edilen topraklama dirençleri

RT #	Topraklama direnci	RT #	Topraklama direnci	RT #	Topraklama direnci	RT #	Topraklama direnci
1	78,4 Ω	19	194,9 Ω	37	381,8 Ω	55	156,6 Ω
2	206,4 Ω	20	195,8 Ω	38	122,8 Ω	56	840,1 Ω
3	14,5 Ω	21	220,3 Ω	39	301,7 Ω	57	763,2 Ω
4	4,3 Ω	22	105,1 Ω	40	118,5 Ω	58	253,0 Ω
5	1,9 Ω	23	93,1 Ω	41	169,2 Ω	59	134,0 Ω
6	3,0 Ω	24	57,9 Ω	42	261,6 Ω	60	223,1 Ω
7	3,6 Ω	25	70,2 Ω	43	309,8 Ω	61	305,3 Ω
8	5,2 Ω	26	78,5 Ω	44	327,8 Ω	62	292,5 Ω
9	2,8 Ω	27	415,2 Ω	45	294,5 Ω	63	315,8 Ω
10	142,4 Ω	28	9,5 Ω	46	413,2 Ω	64	218,9 Ω
11	200,7 Ω	29	327,3 Ω	47	345,8 Ω	65	538,2 Ω
12	488,4 Ω	30	56,3 Ω	48	424,5 Ω	66	58,6 Ω
13	262,0 Ω	31	333,4 Ω	49	366,7 Ω	67	56,8 Ω
14	283,5 Ω	32	40,1 Ω	50	470,4 Ω	68	396,3 Ω
15	437,7 Ω	33	10,3 Ω	51	334,2 Ω	69	356,3 Ω
16	238,3 Ω	34	30,8 Ω	52	436,3 Ω	70	357,5 Ω
17	402,4 Ω	35	174,1 Ω	53	311,2 Ω		
18	159,1 Ω	36	205,6 Ω	54	256,8 Ω		

Tablo 1.4' ten görülebileceği üzere, topraklama alanının büyütülmesi topraklama direncinde %46 mertebesinde bir iyileştirme sağlamaktadır.

Topraklama sistemlerinin birbirlerine bağlanması ile elde edilen genişletilmiş topraklama sisteminin eşdeğer direnci, çoğu uygulamada adım ve temas gerilimlerini kontrol altına almaya yetecek kadar düşük çıkmaktadır. Bağlanabilecek türbin sayısının sınırlı olduğu durumlarda, ya da sistemin toplam güvenilirliğini artırmak amacıyla, ilave bir tedbir olarak topraklama alanının genişletilmesi yöntemi de kullanılabilir.

Yukarıda tarif edilen yöntemler kullanılarak bir rüzgar santralinde düşük frekans bölgesinde beklentileri karşılayabilen bir topraklama sistemi tesis edilmesinin mümkün olduğu söylenebilir. Ancak bu yöntemlerin yüksek frekans bölgesindeki etkinlikleri ayrıca değerlendirilmelidir. Bu konu ilerleyen bölümlerde ele alınacaktır.

1.2. Topraklama Sisteminin Yüksek Frekans Bölgesindeki Performansı

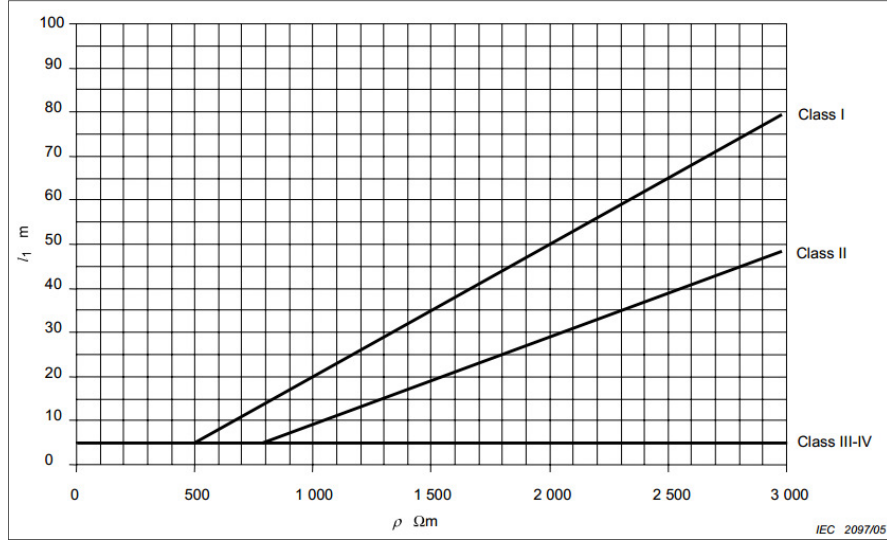
Yüksek topraklama direncine sahip türbinlere isabet eden yıldırım darbeleri, topraklama sistemi üzerinde çok yüksek ölçüde geçici toprak potansiyel yükselmesine (GTPY) yol açabilirler. Bu yüksek potansiyel, tehlikeli adım ve temas gerilimleri yaratarak çevredeki insanlar ve diğer canlılar için risk oluşturabilir. Ayrıca, toprak potansiyelinin yükselmesi, güç kablolarında, transformatörlerde ya da kumanda ve koruma devrelerinde faz-toprak yalıtımını zorlayarak çeşitli arızalara sebep olabilir.

Yıldırım darbeleri için topraklama sisteminin temel görevi, yüksek frekanslı yıldırım akımını, tehlikeli ısı ya da elektrodinamik etkilere yol açmadan toprağa iletmek ve dağıtmaktır. Topraklama sistemi aynı zamanda çevredeki insanları ve diğer canlıları da elektrik şoklarına karşı korumalıdır [3].

Düşük frekans bölgesinde topraklama sisteminin performans kriteri, daha evvel izah edildiği üzere, adım ve temas gerilimlerinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmasıdır. Ancak yıldırım darbeleri için, uluslararası standartlarda kabul edilebilir gerilim seviyeleri tanımlanmamıştır [5, 7, 8]. Geçici hal akımlarının süre, tepe zamanı ve kuyruk zamanına bağlı olarak değişik formlar alabildiği düşünülürse, bu konuda bir sınır değeri tarif edilememiş olması anlaşılabilir. IEEE Std. 80' de bir sınır değeri tanımlanmamış olmakla beraber, geçici hal durumları için kabul edilebilir adım ve temas gerilimlerinin, güç frekansındaki değerlerden daha yüksek olduğu belirtilmektedir [5].

IEC 61400-24 ve IEC 62305-3 standartlarında, düşük frekans bölgesinde ölçülen rüzgar türbini topraklama direncinin 10Ω değerinin altında olmasının yeterli kabul edilebileceği ifade edilmiştir [3, 9]. Dolayısıyla bu direnç değeri yüksek frekans bölgesinde topraklama sisteminin ana performans kriteri olarak düşünülebilir.

Topraklama direncinin 10Ω değerinin üzerinde olduğu durumlarda, ilave topraklama iletkenleri kullanılarak topraklama direncini mümkün olduğunca düşürmek gerekir. IEC 62305-3'te, türbin temeli dışına yerleştirilen çember şeklindeki topraklama elektrodu ile kapsanan alanın ortalama yarıçapının (r_e) Şekil 1.7'de verilen l_1 uzunluğundan kısa olmaması gerektiği belirtilmektedir [9].



Şekil 1.7. LPS sınıfına göre minimum l_1 uzunlukları [9]

Şekil 1.7' de belirtilen minimum elektrot uzunluğu şartının sağlanmadığı durumlarda, topraklama sistemine aşağıda belirtilen uzunluklarda en az ikişer adet yatay ve dikey topraklama elektrotları ilave edilmesi gereklidir [9];

$$l_r = l_1 - r_e \quad (1.4)$$

$$l_v = (l_1 - r_e)/2 \quad (1.5)$$

Burada, r_e , dış çember elektrot ortalama yarıçapını, l_r , ilave yatay elektrot uzunluğunu, l_v , ise ilave dikey elektrot uzunluğunu ifade etmektedir.

Şekil 1.7'de görülebileceği üzere, en yüksek LPS sınıfında ve çok yüksek bir toprak özgül direnci durumunda bile, eklenmesi önerilen iletken miktarı birkaç on metreyi aşmamaktadır. Bunun sebebi, ilerleyen kısımlarda anlatılacağı üzere, belirli bir uzunluğun üzerindeki ilave topraklama iletkenlerinin topraklama direncini düşürmeye bir katkısının olmamasıdır.

Bir önceki bölümde bahsedildiği üzere, topraklama sistemlerinin yatay topraklama iletkenleri ile birbirlerine bağlanması ve gerekirse topraklama alanının artırılması düşük frekans bölgesinde etkin bir topraklama sistemi tesisi için genellikle yeterli olmaktadır. Ancak yüksek frekans bölgesinde bu yöntemlerin etkisi düşük frekans bölgesine göre oldukça sınırlıdır. İlerleyen bölümlerde, yüksek frekans bölgesinde topraklama performansını iyileştirmek için kullanılan yöntemler incelenecektir.

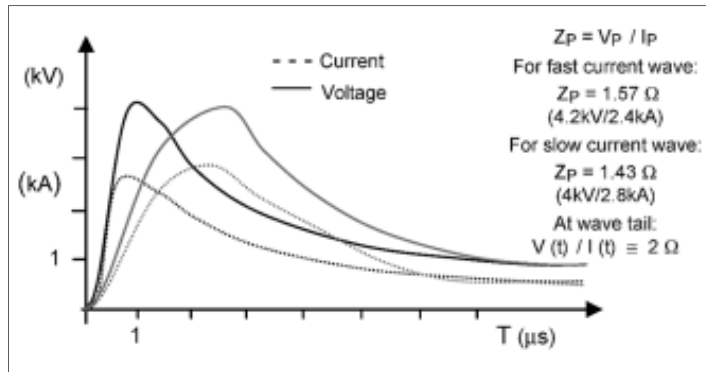
1.3. Yatay Topraklama İletkenlerinin Topraklama Sistemine Etkileri

Önceki bölümde bahsedildiği üzere, yatay topraklama iletkenlerinin topraklama sistemine etkileri, yüksek frekans bölgesinde düşük frekans bölgesine göre çok daha sınırlıdır. Bu durum genellikle etkin uzunluk kavramı ile izah edilir. Bu konuda daha detaylı değerlendirmelere geçmeden evvel yüksek frekans bölgesinde kullanılan bazı kavramları gözden geçirmek gereklidir.

Düşük frekans bölgesinde topraklama iletkeni reaktanslarının ihmal edilebilir seviyede olması sebebiyle topraklama direnci kavramı kullanılır. Ancak yüksek frekans bölgesinde reaktanslar baskın karakterde olduğu için topraklama empedansı kavramı kullanılmalıdır. Yatay topraklama iletkeni empedansları, ilerleyen bölümlerde izah edileceği üzere, frekansa bağlı olarak değişim gösterirler. Bu iletkenlerin yıldırım darbeleri gibi geniş bir frekans spektrumuna sahip uyarımlara tepkilerini değerlendirebilmek için, işlemleri frekans domeninde yapıp sonuçları zaman domeni aktarmak gereklidir. Bu işlemlerin karmaşıklığı sebebiyle, frekansa bağlı empedans değerleri yerine, genellikle impulsive topraklama empedansı kavramının kullanılması tercih edilir. Bu empedans, akımın uygulandığı noktadaki gerilim ve akımın tepe değerlerinin oranı olarak ifade edilebilir [10].

$$Z_p = V_p / I_p \quad (1.6)$$

Burada Z_p , impulsive topraklama empedansını, V_p , gerilim işaretinin tepe değerini, I_p , ise akım işaretinin tepe değerini ifade etmektedir. Uygulanan akım işaretinin ve ortaya çıkan gerilim işaretlerinin kuyruk kısımlarının oranı, iletkenin düşük frekans bölgesindeki direncine yakınsayacaktır. Bu durum Şekil 1.8' de görülebilir.



Şekil 1.8. Impulsive topraklama empedansı grafiği [10]

Yatay topraklama iletkenlerinin etkin uzunlukları konusunda literatürde birçok çalışma bulunmaktadır [11-15]. Bu çalışmalarda etkin uzunluğun tanımına dair iki farklı yaklaşım kullanılmıştır. Bunlardan ilkinde impulsive empedans değerinin değişimi esas alınmıştır. Bu yaklaşımda, iletken uzunluğunu artırmanın, impulsive empedans değerini daha fazla düşürmediği eşik uzunluk değeri etkin uzunluk olarak tarif edilmektedir [11]. Diğer yaklaşımda ise, iletken üzerinden yürüyen dalgaların yansımaları esas alınmaktadır. Bu yaklaşıma göre, alıcı taraftan yansıyan gerilim işaretinin gönderici taraftaki gerilimin tepe değerini etkilemediği uzunluk değeri, etkin uzunluk olarak tarif edilmektedir [12]. Bu tez çalışması çerçevesinde, etkin uzunluk tespiti için, impulsive empedans değerinin kararlılığını esas alan birinci yaklaşım kullanılacaktır.

Gupta ve Thapar, dağıtılmış parametrelili iletim hattı modeli kullandıkları çalışmalarında, yatay topraklama iletkenlerinin etkin uzunlukları için aşağıdaki deneysel formülü geliştirmişlerdir [11].

$$l_e = k \left(\rho_g \tau \right)^{0,5} \quad (1.7)$$

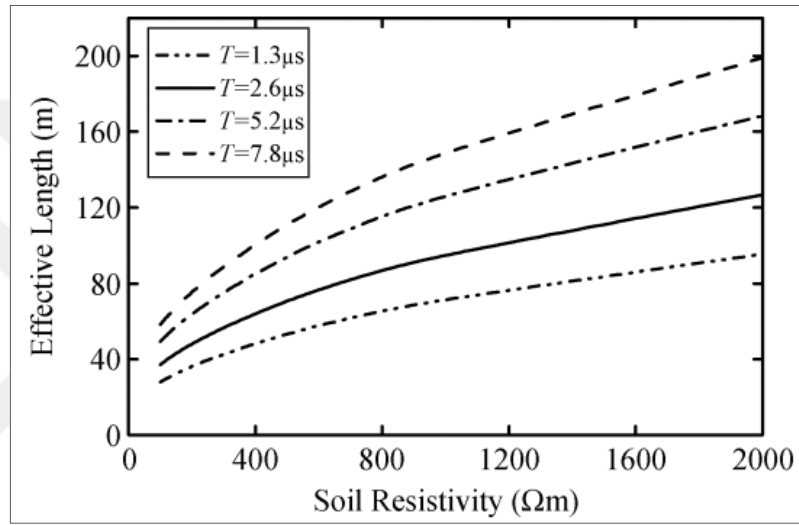
Burada, τ , uygulanan akımın tepe zamanını (μs), k , ise akım uygulama noktasına bağlı olarak değişen bir parametreyi ifade etmektedir. İletkenin ucundan uygulanan akım için k değeri 1,4 olarak alınırken, iletkenin ortasından uygulanan akım için aynı değer 1,55 olarak alınmaktadır. Eşitlik (1.7)' den görülebileceği üzere, bu çalışmaya göre, etkin uzunluk değeri toprak özgül direnci ve akım front time'ı ile doğru orantılıdır.

He vd., toprak iyonizasyonu etkisini de hesaba katarak etkin uzunluk için aşağıdaki formülü geliştirmişlerdir [13]. Bu çalışmada, her iletken bölümünde, iletken yarıçapı iyonize bölgeyi de içerecek şekilde modifiye edilmiş ve ilgili devre parametreleri bu değişime göre hesaplanmıştır;

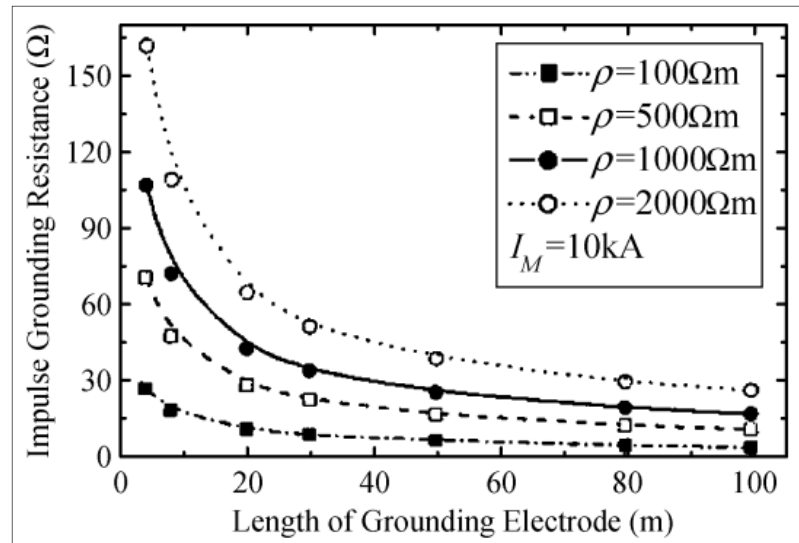
$$l_e = k \frac{\left(\rho_g T \right)^{0,379}}{I_M^{0,097}} \quad (1.8)$$

Burada, T , uygulanan akımın tepe zamanı (μs), I_M , uygulanan akımın tepe değerini (kA), k , ise akım uygulama noktası ve elektrot geometrisine göre değişen bir

parametreyi ifade etmektedir. İletkenin ucundan uygulanan akım için k değeri 6,528 olarak alınırken, iletkenin ortasından uygulanan akım için aynı değer 7,683 olarak alınmaktadır. Bu çalışmada, impulse empedans grafiği türevinin $\tan(5^\circ)$ 'ten küçük olduğu uzunluk değeri etkin uzunluk olarak kabul edilmiştir. Eşitlik (1.8)'den de görülebileceği üzere, bu çalışma da toprak özgül direnci ve wavefront time ile etkin uzunluk arasındaki doğru orantıyı teyit etmektedir. Buna ilave olarak, yıldırım darbesi akımı arttıkça etkin uzunluğun azaldığı görülmektedir. Toprak özgül direnci ve tepe zamanının etkin uzunluğa olan etkisi Şekil 1.9' da görülebilir [13].



Şekil 1.9. Toprak özgül direnci ve tepe zamanının etkin uzunlukla ilişkisi [13]



Şekil 1.10. Impulsive topraklama direncinin iletken uzunluğuyla ilişkisi [13]

He vd.' nin çalışmalarına göre, 2,6/50 µs dalga yapısına sahip bir yıldırım darbesi için, farklı toprak özgül direnci değerlerinde impulsive topraklama direncinin iletken uzunluğuna bağlı değişimi Şekil 1.10' da verilmiştir. Bu grafikten görülebileceği üzere, düşük özgül dirence sahip toprak yapılarında, yatay topraklama iletkeninin uzunluğunun artırılması impulsive topraklama direncinin düşürülmesine önemli bir katkı sağlamamaktadır. Ancak toprak özgül direnci artıkça bu etki daha görünür hale gelmeye başlamaktadır. Yüksek özgül dirence sahip toprak yapılarında topraklama direncinin de yüksek olacağı dikkate alındığında, uzun yatay topraklama iletkenlerinin topraklama performansına önemli katkı sağlayacağı söylenebilir.

Grcev, elektromanyetik alan teorisine dayalı çalışmasında, etkin uzunluğu “impulse katsayısı” kriterini dikkate alarak tanımlamıştır. Bu katsayı, impulse empedansı (Z_p) ile düşük frekans bölgesindeki direncin (R) oranı olarak ifade edilmiş ve impulse katsayısının 1 olduğu en yüksek uzunluk değeri etkin uzunluk olarak kabul edilmiştir. Bu tanıma göre, etkin uzunluk değerinin üzerine çıkıldığında impulse katsayısı 1'in üzerine çıkmaktadır. Bir başka deyişle, etkin uzunluğun üzerinde bir iletken kullanıldığında, düşük frekans bölgesindeki topraklama direnci impulsive topraklama empedansına göre daha fazla düşmektedir. Grcev, çalışmasında etkin uzunluk değerini aşağıdaki formüllerle ifade etmiştir [14];

$$l_e = (1-\beta)/\alpha \quad (1.9)$$

$$\alpha = 0,025 + e^{-0,82(\rho_g T_1)^{0,257}} \quad (1.10)$$

$$\beta = 0,17 + e^{-0,22(\rho_g T_1)^{0,555}} \quad (1.11)$$

Burada, T_1 , yıldırım dalgasının tepe zamanını (μs) ifade etmektedir. Grcev'in elde ettiği formülasyonda, yukarıda söz edilen diğer çalışmalarda bulunan sonuçlarla uyumlu olarak, etkin uzunluk değeri toprak özgül direnci ve akımın tepe zamanı ile doğru orantılı olarak artmaktadır.

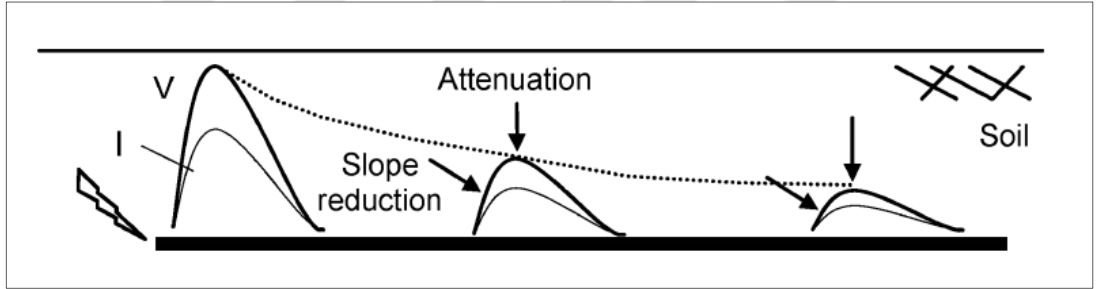
Yamamoto vd., çalışmalarında etkin uzunluk için, yıldırım darbesinin toprak içerisindeki yayılım hızını ve girişim derinliğini esas alan bir formül geliştirmişlerdir. Bu formül tanımlanırken temelde dağıtılmış parametrelili iletim hattı modeli kullanılmış ancak formüldeki bazı parametreler elektromanyetik alan teorisi

kullanılmıştır. Bu çalışma sonucunu göre elde edilen etkin uzunluk formülü aşağıda verilmiştir [15];

$$l_e = 0,98 \sqrt{\tau \rho_g} \quad (1.12)$$

Burada, τ , uygulanan akımın tepe zamanını ifade etmektedir (μs). Eşitlik (1.12) de diğer eşitliklerde belirtilen etkin uzunluk ile toprak özgül direnci ve tepe zamanı arasındaki ilişkiyi teyit etmektedir.

Visacro, topraklama iletkenlerinin yıldırım darbelerine karşı davranışlarını incelediği çalışmasında, etkin uzunluk fenomenini yaratan temel fiziksel işleyişi izah etmiştir [10]. Bu çalışmada, toprak iletkenliği ve frekans arttıkça yıldırım darbesinin iletken üzerindeki hareketi boyunca daha fazla zayıflamaya (attenuation) uğrayacağı ifade edilmiştir. Söz konusu sinyal dalga zayıflaması Şekil 1.11’de görsel olarak ifade edilmektedir.



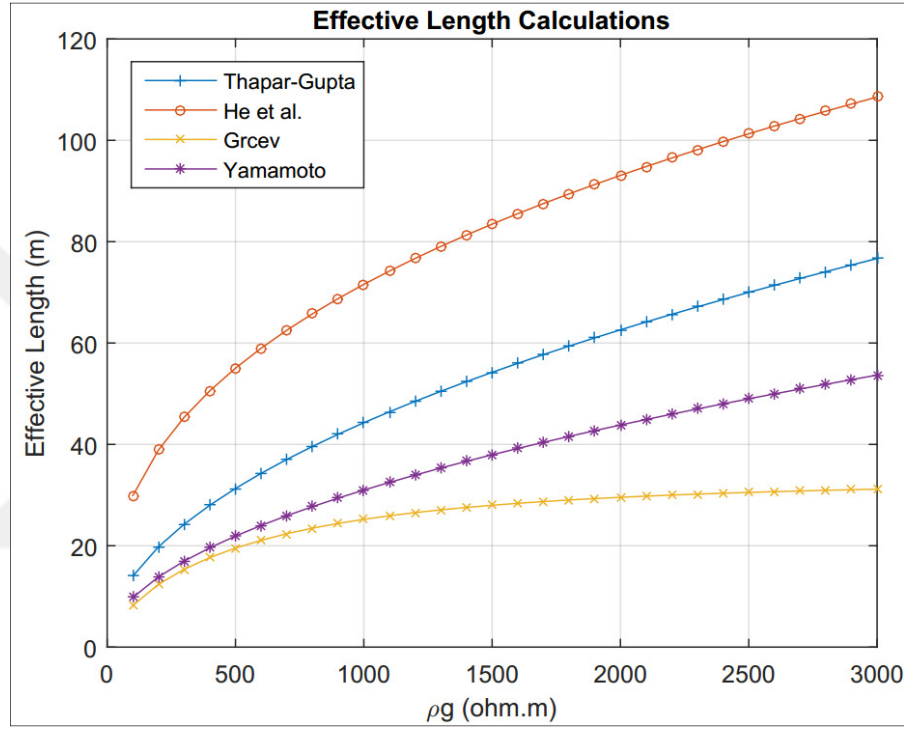
Şekil 1.11. Akım ve gerilim darbelerinin iletken boyunca zayıflaması [10]

Bu yaklaşıma göre, yıldırım darbelerinin yüksek frekanslı bileşenleri, iletkenin henüz başlangıç kısımlarında zayıflamakta (toprağa yayılmakta) ve ilerleyen kısımlarda etkinlik gösterecek yüksek frekans bileşeni kalmamaktadır. Yukarıda verilen tüm hesaplama yöntemlerinde, tepe zamanı arttıkça etkin uzunluğun arttığı belirtilmiştir. Tepe zamanının artması, yüksek frekanslı bileşenlerin azalması ve dolayısıyla yıldırım darbesinin iletkenin daha uzun bir kısmında ilerlemesi anlamına geleceği için, Visacro'nun yaklaşımının diğer formülasyonlarla uyumlu olduğu söylenebilir.

Bir diğer husus, toprak iletkenliği ile etkin uzunluğun ilişkisidir. Yukarıdaki örneklerde, iletkenlik arttıkça (özgül direnç azaldıkça) etkin uzunluğun azaldığı görülebilir. Visacro'nun yaklaşımına göre, yüksek iletkenlik yüksek zayıflamaya ve

buna bağı olarak iletkenin daha kısa bir bölümünün kullanılabilmesine yol açmaktadır. Dolayısıyla Visacro'nun yaklaşımının bu konuda da diğer formülasyonlar ile uyumlu olduğu söylenebilir.

Yukarıda verilen formüller kullanılarak yapılan etkin uzunluk hesapları Şekil 1.12'de verilmiştir. Bu hesaplarda, tepe zamanı 1 μ s, yıldırım darbesi akımı tepe değeri ise 10 kA olarak alınmıştır.



Şekil 1.12. Etkin uzunluk hesapları karşılaştırması

Şekil 1.12'de görülebileceği üzere, aynı fiziksel koşullar için farklı yöntemler kullanılarak yapılan hesaplarda elde edilen etkin uzunluk değerleri birbirlerinden önemli ölçüde farklı çıkmaktadır. Bu durum, kullanılan iletken modellerinin ve etkin uzunluk tanımlama kriterlerinin farklı olmasıyla açıklanabilir.

Yukarıda sunulan kısa literatür özetinde izah edildiği üzere, yatay topraklama iletkenlerinin yüksek frekans bölgesinde topraklama empedansının düşürülmesine katkıları sınırlıdır. Dolayısıyla topraklama performansının iyileştirilmesi için, topraklama alanının genişletilmesi gibi ilave başka tedbirler alınması gerekir.

1.4. Topraklama Alanının Artırılmasının Topraklama Sistemine Etkileri

Düşük frekans bölgesinde, topraklama direnci topraklama alanı ile ters orantılıdır. Bu sebeple, önceki bölümde anlatıldığı üzere, topraklama alanını artırmak, topraklama direncini düşürmek için oldukça etkili bir yöntemdir. Ancak yüksek frekans bölgesinde, tıpkı etkin uzunluk fenomeninde olduğu gibi, topraklama empedansının düşürülmesine fayda sağlayan alan sınırlıdır. Topraklama alanının artırılmasına rağmen impulsive topraklama empedansının daha fazla düşmediği eşik alan değeri literatürde etkin alan olarak ifade edilmektedir [16-18].

Gupta ve Thapar, kare şeklindeki simetrik topraklama ağlarında etkin alan hesaplamaları için yaptıkları çalışmada, etkin alanın eşdeğer yarıçapı için aşağıdaki deneysel formülü geliştirmişlerdir [16].

$$r_e = k (\rho_g \tau)^{0,5} \quad (1.13)$$

$$k_{center} = 1,45 - 0,05s \quad (1.14)$$

$$k_{corner} = 0,6 - 0,025s \quad (1.15)$$

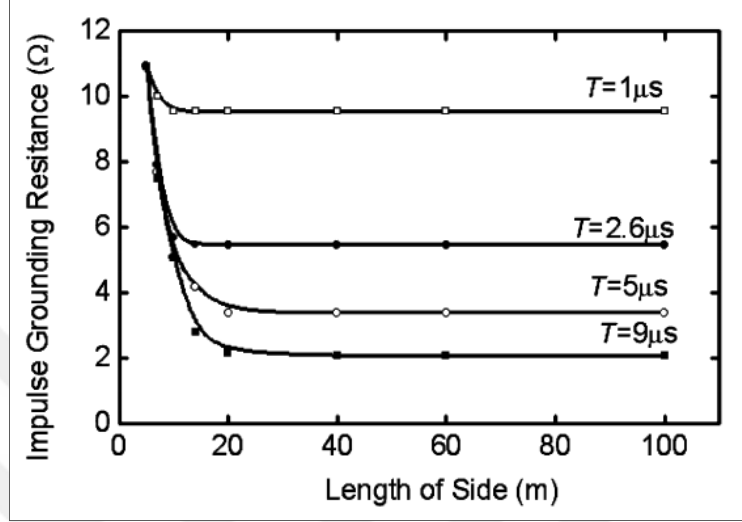
Burada, τ , uygulanan akımın tepe zamanını (μs), s , topraklama ağı iletkenleri arası mesafeyi (m), k , ise akım uygulama noktasına bağlı olarak değişen bir parametreyi ifade etmektedir. Yıldırım darbesi ağın merkezine uygulanıyorsa k değişkeni k_{center} değişkenine, köşesine uygulanıyorsa k_{corner} değerine göre belirlenir. Eşitlik (1.13) ve Eşitlik (1.14) 'ten görülebileceği üzere, ağın merkezine uygulanan akım için bulunan etkin alan değeri, ağ köşesine yapılan uygulamada bulunan değerden daha büyüktür.

Zeng vd., kare şeklindeki topraklama ağları için toprak iyonizasyonunu içeren bir iletim hattı modeli kullanarak, aşağıdaki deneysel formülü geliştirmişlerdir [17].

$$r_{e_center} = 0,34\rho_g^{0,42}\tau^{0,32} \quad (1.16)$$

$$r_{e_corner} = 0,21\rho_g^{0,42}\tau^{0,32} \quad (1.17)$$

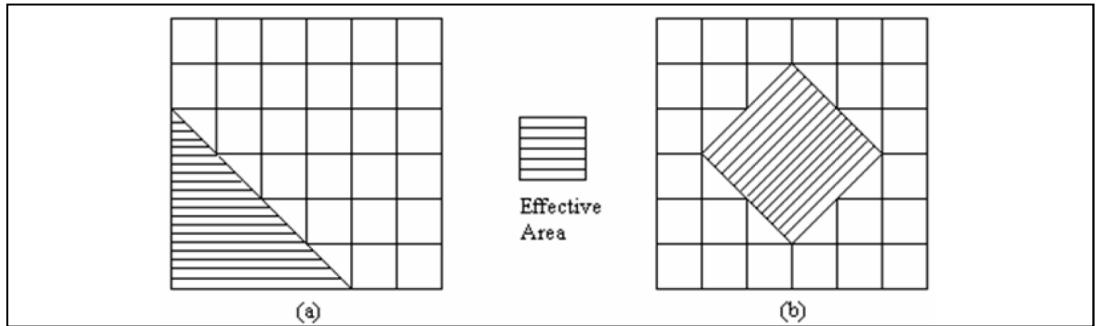
Burada, τ , uygulanan akımın tepe zamanını (μs), r_{e_center} ve r_{e_corner} sırasıyla ağ merkezine ve köşesine uygulanan akıma göre hesaplanan eşdeğer etkin alan yarıçaplarını ifade etmektedir. Bu yaklaşıma göre, $500 \Omega \cdot \text{m}$ özgül dirence sahip bir toprak yapısında etkin alanın tepe zamanına bağlı değişimi Şekil 1.13'te verilmiştir.



Şekil 1.13. Etkin alanın tepe zamanı ile değişimi [17]

Şekil 1.13'ten görülebileceği üzere, özellikle tepe zamanı düşük, dolayısıyla yüksek frekans bileşeni yoğun olan yıldırım darbelerinde, topraklama alanının artırılmasının impulsive topraklama empedansını düşürmeye etkisi oldukça sınırlı kalmaktadır.

Zeng vd.'nin çalışmalarında, Gupta-Thapar'ın çalışmalarında olduğu gibi, merkezden uygulanan akımın daha geniş bir etkin alana tekabül ettiği görülmektedir. Kare şeklindeki bir ağ için etkin alanların, akım uygulama noktasına göre farklılıkları Şekil 1.14' te verilmiştir.

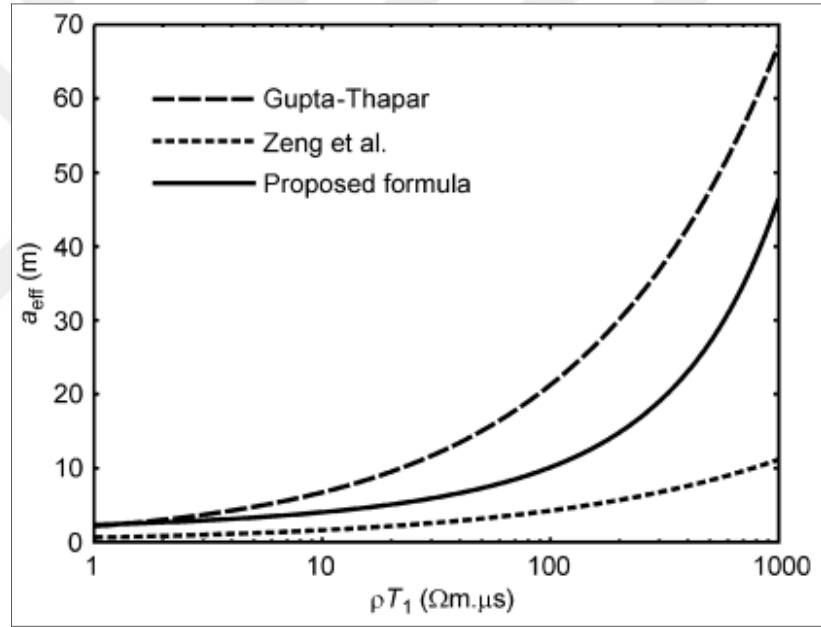


Şekil 1.14. Etkin alan gösterimi, a) köşe uygulaması, b) merkez uygulaması [17]

Grcev, etkin alan konusunu elektromanyetik alan modeli kullanarak incelediği çalışmasında, etkin alanı kare şeklinde tanımlamış ve bu karenin kenar uzunluğu (a_{eff}) için aşağıdaki formülü önermiştir [18];

$$a_{\text{eff}} = ke^{0,84(\rho_g T_1)^{0,22}} \quad (1.18)$$

Burada, T_1 , yıldırım dalgasının tepe zamanını süresini (μs) ifade etmektedir. k parametresi köşeden uygulanan akım için 0,5, merkezden uygulanan akım için ise 1,0 alınmaktadır. Grcev bu çalışmasında, Gupta-Thapar ve Zeng vd.'nin formülasyonlarıyla Eşitlik (1.18)'de verilen formülü karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırma grafiği Şekil 1.15'te verilmiştir.



Şekil 1.15. Etkin alan hesaplamaları karşılaştırma grafiği [18]

Grcev, önerdiği yöntemin elektromanyetik alan modeline dayalı olması sebebiyle daha doğru sonuç verdiği, bunun temel sebebinin ise iletim hattı modeline dayanan yöntemlerin yüksek frekans bölgesinde geçerliliklerinin şüpheli olduğunu ifade etmiştir. Ancak Şekil 1.15'te görülebileceği üzere, yüksek frekans bölgesinde, yani çok düşük tepe zamanına sahip darbelerde, farklı yöntemlerle hesaplanan etkin alanlar arasında büyük fark bulunmamaktadır. Bu durumun Visacro'nun çalışmasında ifade edildiği üzere [10], yüksek frekanslarda darbe zayıflamasının da yüksek olması ve darbe akımının iletkenin henüz başlangıç kısmında önemli ölçüde toprağa aktarılması ile ilgili olduğu söylenebilir

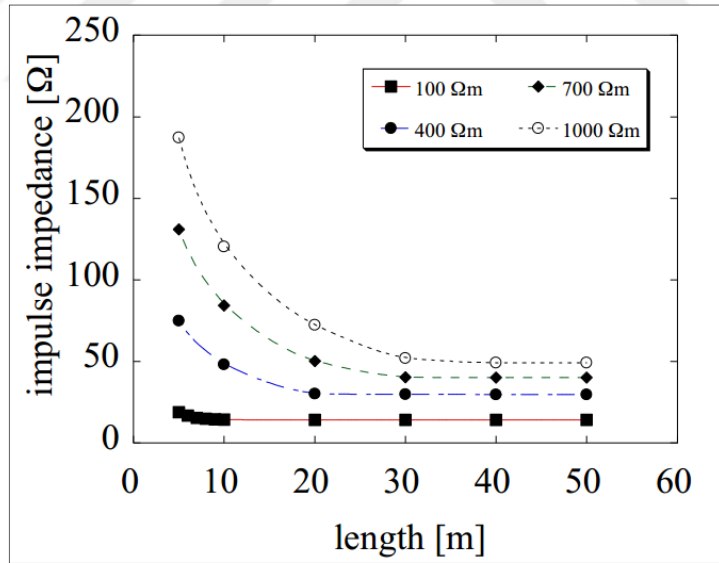
1.5. Dikey Elektrotların Topraklama Sistemine Etkileri

Yatay topraklama iletkenleri için anlatılan etkin uzunluk fenomeni, farklı oranlarda olmakla beraber, dikey topraklama iletkenleri için de geçerlidir.

Yamamoto vd., yukarıda bahsedilen makalelerinde yatay topraklama iletkenleriyle beraber dikey topraklama iletkenlerinin de etkin uzunluklarını incelemişlerdir. Bu çalışma sonucunu göre, dikey topraklama iletkenleri için elde edilen etkin uzunluk formülü aşağıda verilmiştir [15];

$$l_e = 0,87 \sqrt{\tau \rho_g} \quad (1.19)$$

Burada, τ , uygulanan akımın tepe zamanını ifade etmektedir (μ s). 1 μ s tepe zamanına sahip bir yıldırım darbesi için, farklı toprak özgül direnci değerlerinde impulsiv topraklama empedansının dikey iletken uzunluğuna bağlı değişimi Şekil 1.16'da verilmiştir.



Şekil 1.16. Impulsiv empedansın dikey iletken uzunluğuyla ilişkisi [15]

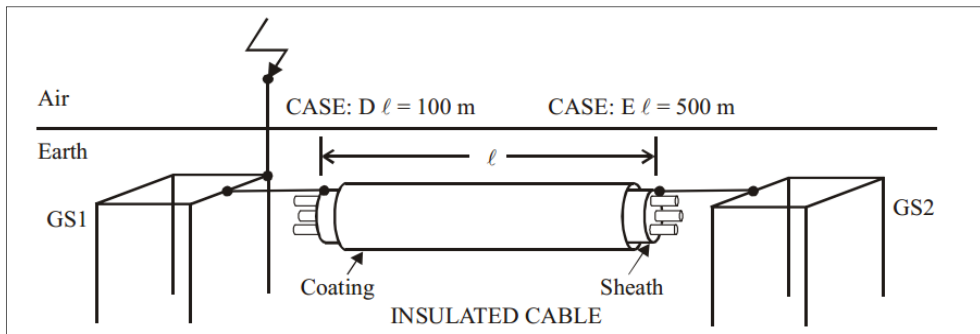
Şekil 1.16'dan görülebileceği üzere, çok uzun dikey topraklama iletkenleri kullanılarak topraklama empedansını önemli ölçüde düşürebilmek mümkündür. Ancak bu uzunluktaki (ör: >20 m) kazıkların toprağa çakılması oldukça zordur. Bu sebeple uzun dikey topraklama iletkeni kullanılması pratikte sık kullanılan bir yöntem değildir.

1.6. Kablo Ekranlarının Topraklama Etkisi

Rüzgar santrallerinde türbinler arası bağlantılarda kullanılan güç kablolarının ekranları karşılıklı olarak türbinlerin topraklama sistemlerine bağlanırlar. Bu bağlantı, komşu rüzgar türbinlerinin topraklama sistemleri arasında, yatay topraklama iletkenine paralel bir patika daha oluşturur. Bu durumda, türbinlerden birine isabet eden bir yıldırım darbesi, hem yatay topraklama iletkeni hem de kablo ekranları üzerinden komşu topraklama ağına ulaşacaktır. Dolayısıyla kablo ekranları üzerinde oluşan bu paralel patikanın topraklama sisteminin performansına etki etmesi beklenebilir.

Kablo ekranlarının topraklama performansına etkileri literatürde yeterince incelenmiş bir konu değildir. Bu konuda yapılmış çalışmalardan en önemlileri Grcev'in çalışmalarıdır [19-21]. Grcev, enerji iletim hattı direkleri üzerine monte edilen radyo istasyonlarının alçak gerilim beslemelerinde kullanılan güç kablolarının, yıldırım darbesi durumundaki davranışlarını incelemiştir. Bu çalışmalarda, topraklama sistemi bileşenleri ve kablo ekranları modellerinde elektromanyetik alan yaklaşımı kullanılmıştır.

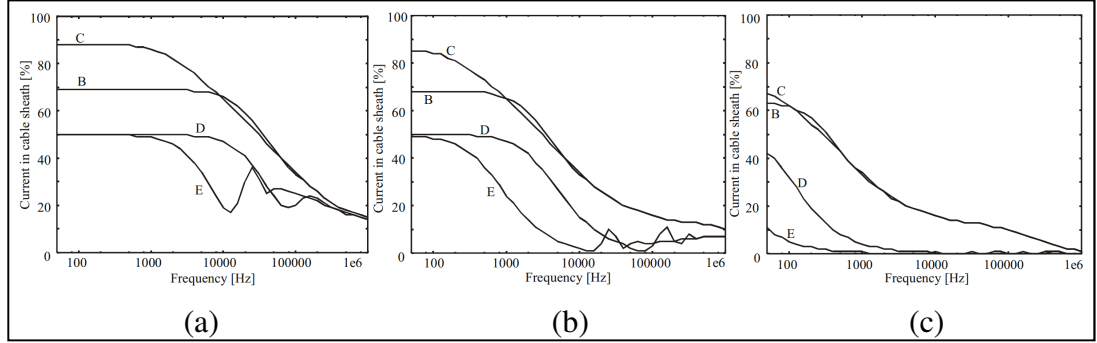
Bu çalışma çerçevesinde, ekranları kablonun iki ucunda, iki eşdeğer topraklama sistemine bağlı olan bir kabloya, bir ucundan yıldırım darbesi uygulanmış ve akımın topraklama sistemi ile kablo ekranı arasındaki paylaşımı incelenmiştir. İlgili kablo bağlantıları Şekil 1.17'de verilmiştir.



Şekil 1.17. Kablo ekranlarının topraklama sistemlerine bağlantısı [19]

Bu bağlantıda toprak özgül direnci ve kablo uzunluğuna bağlı olarak kablo ekranı üzerinden geçen akımın toplam akıma oranı (yüzdeler değeri) Şekil 1.18'de verilmiştir. Burada "D" grafiği 100 m uzunluğundaki kabloyu ve "E" grafiği ise 500

m uzunluğundaki kabloyu göstermektedir. “A”, “B” ve “C” grafiklerinin konumuzla doğrudan ilgisi yoktur.



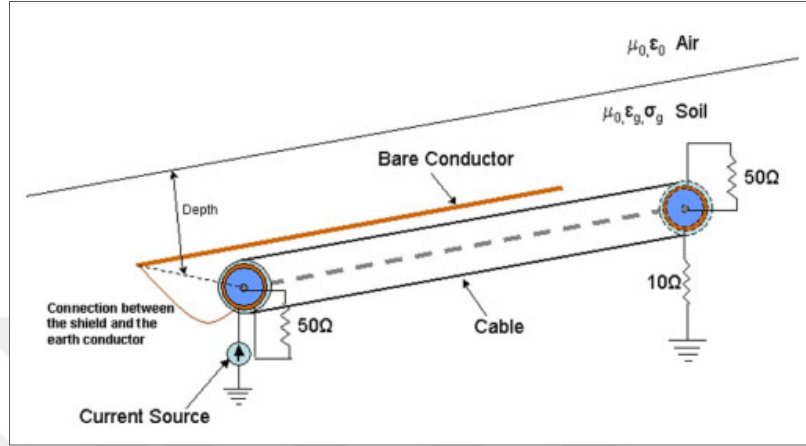
Şekil 1.18. Kablo ekranı akım taşıma yüzdeleri, a) $\rho_g = 1000 \Omega.m$, b) $\rho_g = 100 \Omega.m$, c) $\rho_g = 10 \Omega.m$ [19]

Şekil 1.18’den görülebileceği üzere, kablo ekranı üzerinden geçen akım yüzdesi belirli bir frekansa kadar sabit kalmakta, ancak bir eşik frekans değerinden sonra azalmaktadır. Bu eşik frekans “karakteristik frekans” olarak isimlendirilmektedir [22]. Karakteristik frekans değerinin uzunlukla ve toprak özgül direnci ile ters orantılı olduğu Şekil 1.18’den görülebilir. Bu çalışmadan çıkarılabilecek bir başka sonuç da, yüksek frekans bölgesinde kablo ekranı üzerinden geçen akımın çok düşük olduğu, hatta düşük özgül dirence sahip toprak yapılarında, bu akımın ihmal edilebilir seviyede olduğudur.

Yukarıda bahsedilen çalışmadaki bulgular, önceki bölümde anlatılan etkin uzunluk fenomeni ile uyumludur. Visacro’nun yatay topraklama iletkeni için tarif ettiği fiziksel işleyişi, bu örnekteki topraklama sistemine uyarlayacak olursak, yüksek frekans ve düşük özgül direnç durumlarında topraklama sistemi elemanları üzerindeki darbe zayıflamasının yüksek olacağı, dolayısıyla yıldırım darbesinin yüksek frekanslı bileşenlerinin kablo ekranı yerine topraklama sistemi üzerinden toprağa yayılacağı söylenebilir.

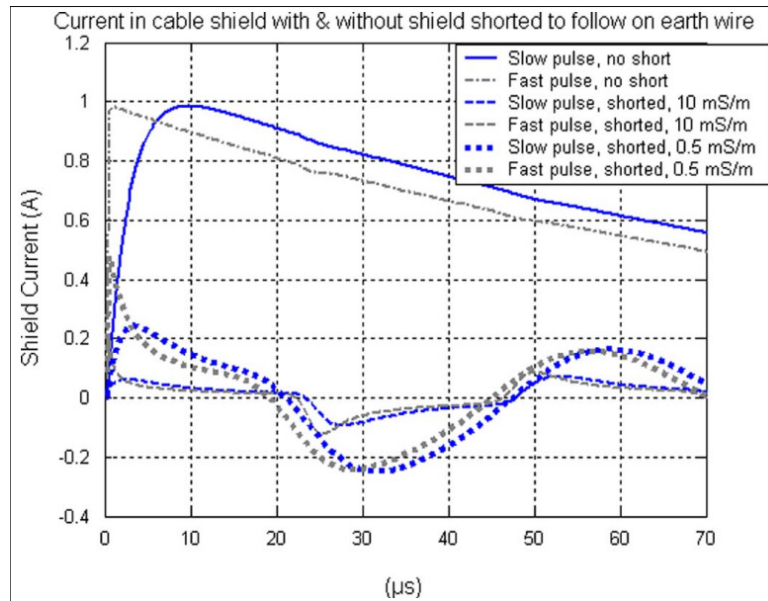
Kablo ekranlarının topraklama sistemlerine etkisine dair bir başka çalışma da Theethayi ve Thottappillil tarafından yapılmıştır [23]. Bu çalışmada haberleşme direklerine yıldırım isabet etmesi durumunda, direk topraklama sisteminde oluşan toprak potansiyel yükselmesinin, haberleşme sisteminin beslediği dağıtım sistemine olan etkileri incelenmiştir. Bu çerçevede, dağıtım sisteminden gelen besleme kablosu ve bu kabloya paralel olarak çekilen topraklama iletkeni, iletim hattı yöntemi

kullanılarak modellenmiştir. Kablo ekranı ve topraklama iletkenin birbirlerine irtibatlandırıldığı noktaya uygulanan yıldırım darbesinin ne kadarının ekran üzerinden komşu topraklama sistemine iletildiği incelenmiştir. İlgili kablo bağlantıları Şekil 1.19'da verilmiştir.



Şekil 1.19. Kablo ekranı ve topraklama iletkeni bağlantısı [23]

Çalışmada, uygulanan yıldırım darbesinin tepe zamanı 0,1 μs ve 10 μs olarak değiştirilerek hızlı yükselen ve yavaş yükselen uyarımlara karşı kablo ve topraklama iletkeninden oluşan sistemin tepkisi incelenmiştir. Ayrıca, akım bölüşümünün toprak özgül direncine bağlı değişimi de incelenmiştir. Bu çalışmada elde edilen kablo ekran akımı grafikleri Şekil 1.20'de verilmiştir.



Şekil 1.20. Kablo ekranından geçen akım [23]

Şekil 1.20'den görülebileceği üzere, kablo ekranından geçen akım toprak özgül direnci düşüğe azalmaktadır. Bu durum daha evvel bahsedilen örneklerle uyumlu olup, yıldırım akımının topraklama iletkeni üzerinden yüksek iletkenliğe sahip toprağa iletilmesini göstermektedir.

Literatürde kablo ekranlarının topraklama sistemine etkileri üzerine birkaç çalışma daha bulunmaktadır [24, 25]. Modelleme detaylarının verilmediği bu çalışmalarda daha ziyade kablo ekranı ve yatay topraklama iletkenleri üzerinden komşu topraklama sistemlerine sürüklenen potansiyel yükselmeleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar yıldırım darbelerinin başlangıç kısımlarının büyük oranda yıldırıma maruz kalan türbinin topraklama sistemi üzerinden toprağa iletilmesini, daha sonraki kısımlarının ise komşu topraklama sistemlerine aktarıldığını göstermektedir. Bu durum Grcev'in yukarıda bahsedilen çalışmasındaki bulgular ile uyumludur.

Grcev'in çalışmalarında, kablo ekranına paralel bir topraklama iletkeni kullanılmamıştır. Dolayısıyla türbin topraklamaları arasında kullanılan yatay topraklama iletkeni ile kablo ekranı arasındaki etkileşimi incelemek mümkün olamamaktadır. Theethayi ve Thottappillil'in çalışmalarında ise direk topraklama direnci dikkate alınmamış ve sistemin impulsive topraklama empedansının değişimi incelenmemiştir. Diğer çalışmalarda kablo ekranı ve topraklama iletkenleri dikkate alınmış olsa da, kullanılan kablo ve iletken modellerine dair detay verilmemiştir. Dolayısıyla bu çalışmalarda kullanılan modellerin yüksek frekans bölgesine uygunluğu konusunda bir değerlendirme yapmak mümkün olmamaktadır.

Türbin topraklama sistemi, yatay topraklama iletkenleri ve kablo ekranlarının oluşturduğu birleşik topraklama sisteminin, yüksek frekans bölgesindeki topraklama performansına dair kapsamlı bir değerlendirme literatürde bulunmamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında sözkonusu bağlantının etkinliği incelenecektir. Bu inceleme çerçevesinde yapılacak benzetim çalışmaları için yıldırım darbelerine karşı kablo ekranının ve yatay topraklama iletkeninin tepkilerini doğru olarak ölçebileceğimiz bir kablo modeline ihtiyaç bulunmaktadır. Sonraki bölümlerde, yıldırım darbelerine dair analizlerde kullanılmaya uygun kablo ve yatay topraklama iletkeni modelleri incelenecektir.

2. KABLO MODELİ ANALİZİ

Yıldırım darbeleriyle ilgili analizler ve benzetim çalışmaları için genellikle EMT-tipi tabir edilen programlar kullanılır (EMTP-ATP, PSCAD/EMTDC, EMTP-RV, v.b.). Bu programların içerisinde, kullanıcıdan geometrik verileri ve malzeme bilgilerini alarak bunları kablo parametrelerine çeviren kablo modelleri bulunur. Bu modeller, frekans bağımlılıkları, içerdikleri varsayımlar ve kullandıkları yaklaştırma yöntemleri bakımından birbirlerinden önemli farklılık gösterirler. Örneğin kısa devre analizlerinde sağlıklı sonuç veren bir model, yıldırım darbesi analizlerinde önemli ölçüde hatalı sonuç verebilir. Dolayısıyla benzetim çalışmalarında kullanılacak modelin doğru seçilmesi sağlıklı bir analiz yapabilmenin ön koşulu olarak değerlendirilebilir. Uygun bir program ve kablo modeli seçebilmek için öncelikle kablo modellerinin nasıl oluşturulduğunu incelemek ve modelin yıldırım darbeleri için kullanılmaya elverişli olup olmadığını değerlendirmek gerekir. İlerleyen bölümlerde, öncelikle kablo modelleme çalışmalarına dair kapsam tarif edilecek, sonrasında bir kablo modelinin nasıl oluşturulduğu ve parametrelerinin nasıl hesaplandığı incelenecektir. Daha sonra, bu tez çalışması kapsamında kullanılmaya uygun bir kablo modeli belirlenecektir.

2.1. Modelleme Kapsamı

Rüzgar santrallerinde genellikle yeraltı tipi, XLPE yalıtımlı, tek fazlı orta gerilim kabloları kullanılır. Dolayısıyla bu tez kapsamında yapılacak modelleme çalışmaları bu kablo tipiyle sınırlı olacaktır.

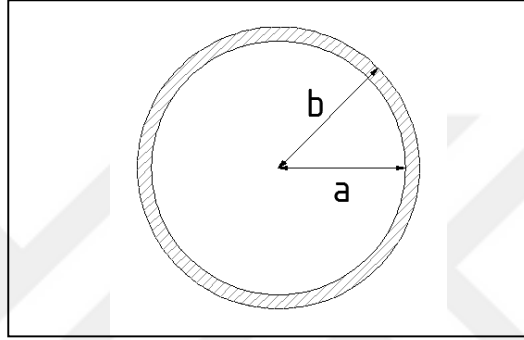
Sağlıklı bir modelleme yapılabilmesi için çalışılacak frekans aralığının belirlenmesi çok önemlidir. Yıldırım darbeleri yüksek frekanslı bileşenler içerirler. CIGRE WG 33-02 yıldırım darbeleri için geçerli frekans bandını 10 kHz ile 3 MHz arası olarak tanımlamaktadır [26]. Bu tez çalışması kapsamında yıldırım darbeleri 3 MHz'e kadar yüksek frekans bileşenleri içeren dalga şekilleri olarak ele alınacak ve kablo modelleri bu frekans aralığındaki performanslarına göre değerlendirilecektir.

2.2. Temel Empedans Hesapları

Bu bölümde kablo modellemesi için gerekli temel teorik altyapı gözden geçirilecektir.

2.2.1. Koaksiyel iletken empedansları

Kablolar, iletken, ekran, zırh gibi iç içe geçmiş koaksiyel katmanlardan oluşurlar. Bu katmanlar silindirik iletkenler olarak düşünülebilir.



Şekil 2.1. Tek katmanlı silindirik iletken

Şekil 2.1' de gösterilen birim uzunluktaki bir silindirik iletken için seri empedans değerleri Schelkunoff tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [27];

$$Z_{aa} = \frac{\rho_c m}{2\pi a} \cdot \frac{I_0(ma).K_1(mb) + K_0(ma).I_1(mb)}{I_1(mb).K_1(ma) - K_1(mb).I_1(ma)} \quad (2.1)$$

$$Z_{bb} = \frac{\rho_c m}{2\pi b} \cdot \frac{I_0(mb).K_1(ma) + K_0(mb).I_1(ma)}{I_1(mb).K_1(ma) - K_1(mb).I_1(ma)} \quad (2.2)$$

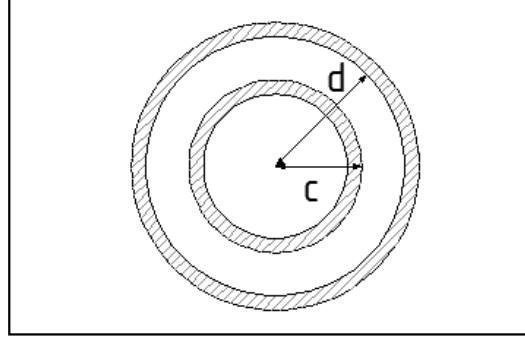
$$Z_{ab} = \frac{\rho_c}{2\pi ab} \cdot \frac{1}{I_1(mb).K_1(ma) - K_1(mb).I_1(ma)} \quad (2.3)$$

$$m = \sqrt{j\omega\mu_c/\rho_c} \quad (2.4)$$

Burada, a, iç yarıçapı, b, ise dış yarıçapı göstermektedir.

İçi dolu bir silindirik iletken için (ör: kablo ana iletkeni), iç yarıçap sıfır olacaktır. Dolayısıyla bu tip iletkenler için sadece aşağıda belirtilen dış yüzey empedansı mevcut olacaktır;

$$Z_{\text{solid}} = \frac{\rho_c m}{2\pi b} \cdot \frac{I_0(mb)}{I_1(mb)} \quad (2.5)$$



Şekil 2.2. Çift katmanlı silindirik iletken

Şekil 2.2’de gösterilen iç içe geçmiş silindirik iletkenler arası kapasitans ve empedans değerleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [28];

$$C_{\text{ins}} = \frac{2\pi\epsilon_i}{\ln(d/c)} \quad (2.6)$$

$$Z_{\text{ins}} = \frac{j\omega\mu_i}{2\pi} \cdot \ln(d/c) \quad (2.7)$$

Burada, c, iç iletkenin dış yarıçapını, d, ise dış iletkenin iç yarıçapını göstermektedir.

2.2.2. Toprak dönüş empedansları

Şekil 2.3’te gösterilen kabloların toprak dönüş empedansları Pollaczek tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [29];

$$Z_{\text{g-mutual}} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \left\{ K_0(md) - K_0(mD) + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-H\sqrt{\alpha^2+m^2}}}{|\alpha|+\sqrt{\alpha^2+m^2}} e^{jx\alpha} d\alpha \right\} \quad (2.8)$$

$$Z_{\text{g-self}} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \left\{ K_0(mR) - K_0\left(m\sqrt{R^2 + 4h^2}\right) + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-2h\sqrt{\alpha^2+m^2}}}{|\alpha|+\sqrt{\alpha^2+m^2}} e^{jR\alpha} d\alpha \right\} \quad (2.9)$$

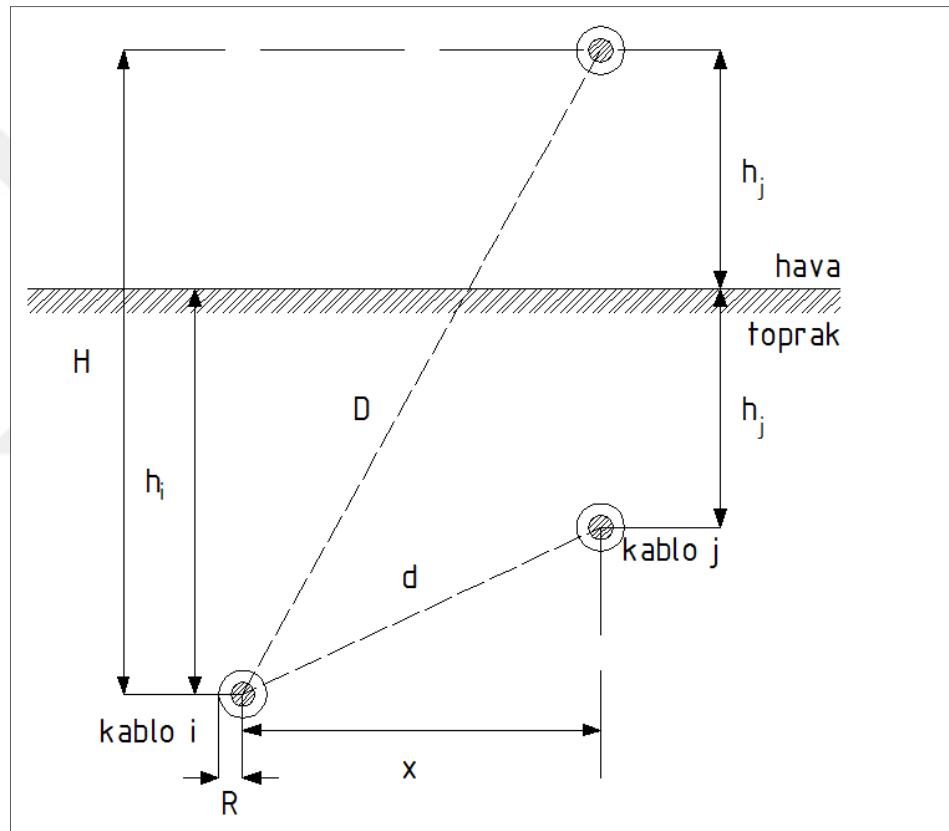
$$m = \sqrt{j\omega\mu_0/\rho_g} \quad (2.10)$$

$$d = \sqrt{x^2 + (h_i - h_j)^2} \quad (2.11)$$

$$D = \sqrt{x^2 + (h_i + h_j)^2} \quad (2.12)$$

$$H = h_i + h_j \quad (2.13)$$

Burada, h , kablunun gömülme derinliğini, x , kablolar arası yatay mesafeyi, R , iletken yarıçapını, α , ise integrasyon değişkenini göstermektedir.



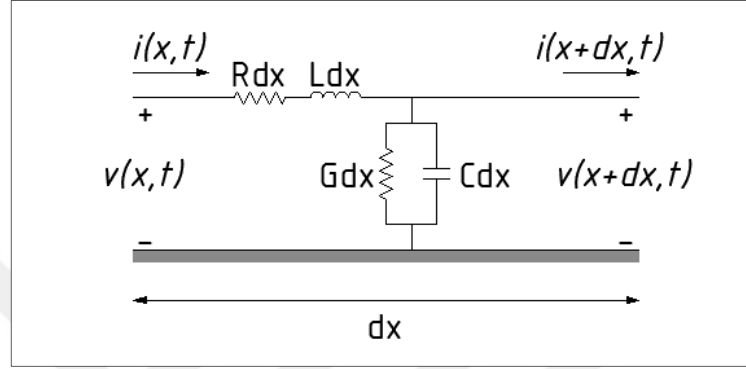
Şekil 2.3. Toprak dönüş empedansı hesabında kullanılan kablo geometrisi

Zati ve ortak toprak dönüş empedanslarını ifade eden Eşitlik (2.8) ve Eşitlik (2.9)'un integral kısımları literatürde “Pollaczek integrali” olarak bilinir. Bu integralin nümerik çözümü oldukça zor olduğu için, çoğu kablo modelinde bu değerlerin hesaplanması amacıyla bazı yaklaşımlar kullanılır. Bu yaklaşım yöntemlerinin geçerlilik sınırları, temel varsayımları ve yüksek frekans bölgesindeki hassasiyetleri bu tez çalışması çerçevesinde büyük önem arz etmektedir. Bu yüzden bu konu ilerleyen bölümlerde detaylı olarak incelenecektir.

2.3. Temel Kablo Modeli

2.3.1. Tek iletken modeli

Kablolar Şekil 2.4'te gösterilen dağıtılmış parametre eşdeğer devresi ile basitçe ifade edilebilir;



Şekil 2.4. Kablonun dağıtılmış parametre eşdeğer devresi

Bu devrede Kirchhoff'un akım ve gerilim kanunları uygulanarak aşağıdaki eşitlikler elde edilebilir (Telegrapher eşitlikleri);

$$v(x,t) - v(x+dx,t) = Rdx \cdot i(x,t) + Ldx \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (2.14)$$

$$i(x,t) - i(x+dx,t) = Gdx \cdot v(x,t) + Cdx \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \quad (2.15)$$

$$-\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = Ri(x,t) + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (2.16)$$

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = Gv(x,t) + C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \quad (2.17)$$

Burada, $v(x,t)$, gerilim işaretini, $i(x,t)$, akım işaretini, R , direnci, L , endüktası, G , kondüktansı, C , ise kapasitansı göstermektedir.

Bu eşitliklerdeki parametrelerin frekans bağımlılığı sebebiyle, hesaplamalar genellikle frekans domeninde yapılır. Bu eşitlikler frekans domenine aşağıdaki gibi aktarılabilir;

$$-\frac{dV(x,\omega)}{dx} = [R(\omega) + j\omega L(\omega)].I(x,\omega) \quad (2.18)$$

$$-\frac{dV(x,\omega)}{dx} = Z(\omega)I(x,\omega) \quad (2.19)$$

$$-\frac{dI(x,\omega)}{dx} = [G(\omega) + j\omega C(\omega)].V(x,\omega) \quad (2.20)$$

$$-\frac{dI(x,\omega)}{dx} = Y(\omega)V(x,\omega) \quad (2.21)$$

Burada akım ve gerilim sinyalinin uzunluğa göre türevini tekrar alacak olursak aşağıdaki eşitlikler elde edilir;

$$\frac{d^2V(x,\omega)}{dx^2} = \gamma^2(\omega)V(x,\omega) \quad (2.22)$$

$$\frac{d^2I(x,\omega)}{dx^2} = \gamma^2(\omega)I(x,\omega) \quad (2.23)$$

$$\gamma(\omega) = \sqrt{Z(\omega)Y(\omega)} \quad (2.24)$$

Burada $\gamma(\omega)$ yayılım sabiti olarak ifade edilmektedir. Eşitlik (2.22) ve Eşitlik (2.23)'ün tipik diferansiyel çözümü aşağıda verilmiştir [30];

$$V(x,\omega) = A_1e^{-\gamma x} + A_2e^{\gamma x} \quad (2.25)$$

$$I(x,\omega) = \frac{A_1}{Z_C}e^{-\gamma x} - \frac{A_2}{Z_C}e^{\gamma x} \quad (2.26)$$

$$Z_C = \sqrt{Z(\omega)/Y(\omega)} \quad (2.27)$$

Burada Z_C karakteristik empedansı ifade etmektedir. Uzunluk değişkeni hat başı ($x=0$) ve hat sonu ($x=l$) için tanımlanıp, eşitlikler yeniden düzenlenirse, hat sonu akım ve gerilimleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir [30]. Bu eşitlikler literatürde uzun iletim hattı modeli olarak ifade edilmektedir.

$$V_R(\omega) = V_S(\omega) \cosh(\gamma(\omega)l) - Z_C I_S(\omega) \sinh(\gamma(\omega)l) \quad (2.28)$$

$$I_R(\omega) = -\frac{V_S(\omega)}{Z_C} \sinh(\gamma(\omega)l) + I_S(\omega) \cosh(\gamma(\omega)l) \quad (2.29)$$

Burada, V_R ve I_R , sırasıyla gönderici taraf akım ve gerilimini, V_S ve I_S , ise sırasıyla alıcı taraf akım ve gerilimlerini ifade etmektedir. Uzun iletim hattı modelinde aşağıda verilen karakteristik admitans ve yayılım fonksiyonları tanımlanabilir [31];

$$Y_C = \sqrt{Y(\omega)/Z(\omega)} \quad (2.30)$$

$$H(\omega) = e^{-\gamma l} \quad (2.31)$$

Bu fonksiyonlar ile akım ve gerilim ilişkileri aşağıdaki gibi tanımlanabilir [31];

$$I_S(\omega) = Y_C V_S(\omega) - H(\omega)[Y_C V_R(\omega) + I_R(\omega)] \quad (2.32)$$

$$I_R(\omega) = Y_C V_R(\omega) - H(\omega)[Y_C V_S(\omega) + I_S(\omega)] \quad (2.33)$$

2.3.2. Çoklu iletken modeli

N sayıda iletken içeren bir çoklu iletken sistemi için, Eşitlik (2.19) ve Eşitlik (2.21) aşağıdaki basit notasyon ile gösterilebilir;

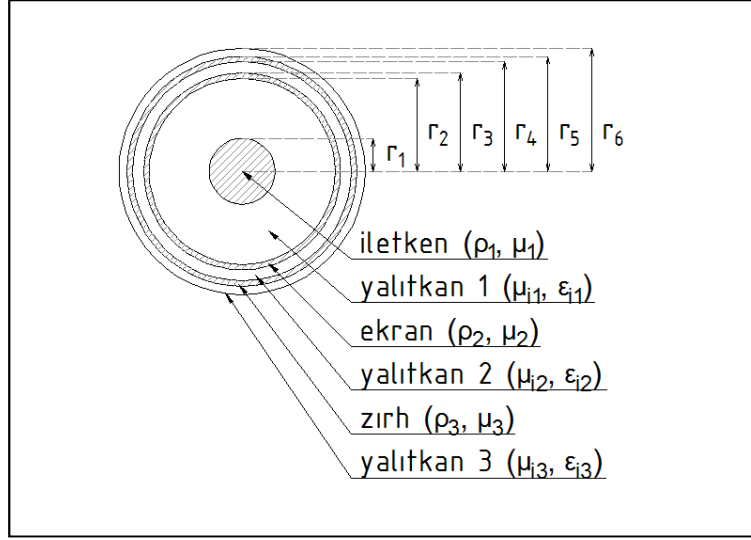
$$-\frac{d(\mathbf{V})}{dx} = [\mathbf{Z}](\mathbf{I}) \quad (2.34)$$

$$-\frac{d(\mathbf{I})}{dx} = [\mathbf{Y}](\mathbf{V}) \quad (2.35)$$

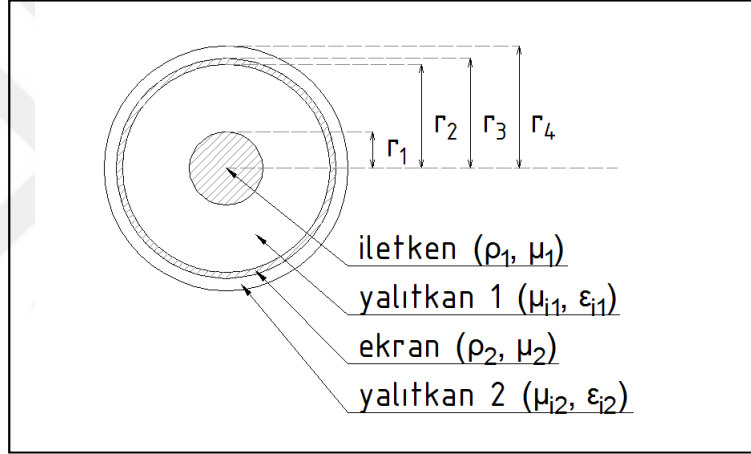
Burada, (\mathbf{V}) , gerilim vektörünü $[N \times 1]$, (\mathbf{I}) , akım vektörünü $[N \times 1]$, $[\mathbf{Z}]$, seri empedans matrisini $[N \times N]$, $[\mathbf{Y}]$, ise paralel admitans matrisini $[N \times N]$ göstermektedir.

İlerleyen bölümlerde seri empedans ve paralel admitans matrisleri aşağıdaki kablo tipleri için incelenecektir;

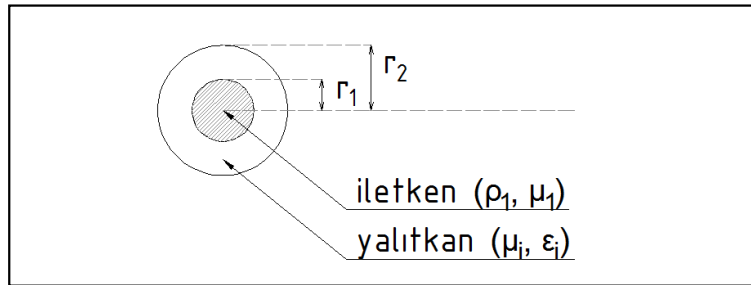
- İletken, ekran ve zırh içeren kablolar (Şekil 2.5)
- İletken ve ekran içeren kablolar (Şekil 2.6)
- Sadece iletken içeren kablolar (Şekil 2.7)



Şekil 2.5. İletken, ekran ve zırh içeren kablo kesiti



Şekil 2.6. İletken ve ekran içeren kablo kesiti



Şekil 2.7. Sadece iletken içeren kablo kesiti

2.4. Empedans ve Admitans Matrislerinin Oluşturulması

2.4.1. Seri empedans matrisi

İletken, ekran ve zırh içeren bir tek damarlı kablo için Eşitlik (2.34) aşağıdaki gibi genişletilebilir;

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} V_c \\ V_s \\ V_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{cc} & Z_{cs} & Z_{ca} \\ Z_{cs} & Z_{ss} & Z_{sa} \\ Z_{ca} & Z_{sa} & Z_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_c \\ I_s \\ I_a \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Burada, c indisi, iletkeni, s indisi, ekranı, a indisi, ise zırhı ifade etmektedir.

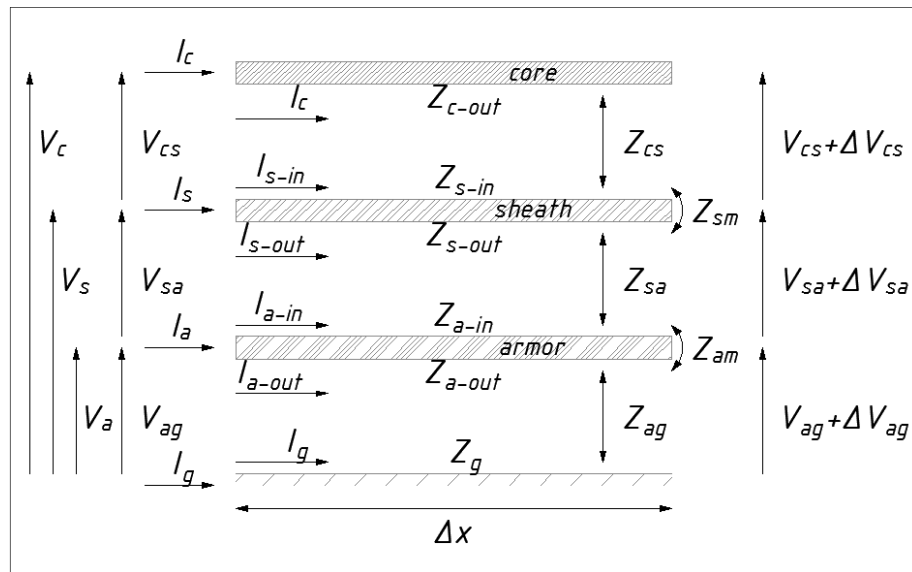
Zırhlı olmayan bir kablo için Eşitlik (2.36) şu şekilde sadeleşecektir;

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} V_c \\ V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{cc} & Z_{cs} \\ Z_{cs} & Z_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_c \\ I_s \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Sadece iletkenden oluşan bir kablo için Eşitlik (2.36) şu şekilde sadeleştirilebilir;

$$-\frac{d}{dx} [V_c] = [Z_{cc}] [I_c] \quad (2.38)$$

Seri empedans matrisinin parametrelerini bulmak için, iletken ve yalıtkan katmanların üzerinde dolaşan akım döngüleri kullanılır [30]. İletken, ekran ve zırh içeren bir kablo için örnek döngü devresi Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. İletken, ekran ve zırh içeren tek damarlı kablo döngü devresi

Şekil 2.8’ de, c indisi, iletkeni, s indisi, ekranı, a indisi zırhı, g indisi, ise toprağı ifade etmektedir. Ayrıca, “x-in” indisleri, iç yüzeylerdeki akım ya da empedansları, “x-out” indisleri, dış yüzeylerdeki akım ya da empedansları, “xm” indisleri, ise yüzeyler arası geçiş empedanslarını ifade etmektedir.

Şekil 2.8 dikkate alınarak aşağıdaki eşitlikler yazılabilir;

$$I_c = -I_{s-in} \quad (2.39)$$

$$I_{s-out} = -I_{a-in} \quad (2.40)$$

$$I_{a-out} = -I_g \quad (2.41)$$

$$I_s = I_{s-in} + I_{s-out} \quad (2.42)$$

$$I_a = I_{a-in} + I_{a-out} \quad (2.43)$$

$$I_{s-out} = I_c + I_s \quad (2.44)$$

$$I_{a-out} = I_c + I_s + I_a \quad (2.45)$$

Bu eşitlikleri kullanılarak devre eşitlikleri aşağıdaki gibi düzenlenebilir;

$$V_{cs} = I_c(Z_{c-out} + Z_{cs} + Z_{s-in}) - I_{s-out}Z_{sm} \quad (2.46)$$

$$V_{sa} = I_{s-out}(Z_{s-out} + Z_{sa} + Z_{a-in}) + I_{s-in}Z_{sm} - I_{a-out}Z_{am} \quad (2.47)$$

$$V_{ag} = I_{a-out}(Z_{a-out} + Z_{ag} + Z_g) + I_{a-in}Z_{am} \quad (2.48)$$

$$V_c = V_{cs} + V_{sa} + V_{ag} \quad (2.49)$$

$$V_s = V_{sa} + V_{ag} \quad (2.50)$$

$$V_a = V_{ag} \quad (2.51)$$

Eşitlik (2.39) – (2.45)'te verilen değerleri Eşitlik (2.46) – (2.51)'e girdiğimizde Eşitlik (2.36)'da gösterilen empedans matrisinin parametreleri aşağıdaki gibi bulunabilir;

$$Z_{cc} = Z_{c-out} + Z_{cs} + Z_{s-in} + Z_{s-out} + Z_{sa} + Z_{a-in} + Z_{a-out} + Z_{ag} + Z_g - 2Z_{sm} - 2Z_{am} \quad (2.52)$$

$$Z_{ss} = Z_{s-out} + Z_{sa} + Z_{a-in} + Z_{a-out} + Z_{ag} + Z_g - 2Z_{am} \quad (2.53)$$

$$Z_{aa} = Z_{a-out} + Z_{ag} + Z_g \quad (2.54)$$

$$Z_{cs} = Z_{s-out} + Z_{sa} + Z_{a-in} + Z_{a-out} + Z_{ag} + Z_g - Z_{sm} - 2Z_{am} \quad (2.55)$$

$$Z_{sa} = Z_{a-out} + Z_{ag} + Z_g - Z_{am} \quad (2.56)$$

$$Z_{ca} = Z_{a-out} + Z_{ag} + Z_g - Z_{am} \quad (2.57)$$

Benzer bir yöntem takip edilerek, zırhsız bir kablonun Eşitlik (2.37)'de gösterilen empedans matrisinin parametreleri aşağıdaki gibi bulunabilir;

$$Z_{cc} = Z_{c-out} + Z_{cs} + Z_{s-in} + Z_{s-out} + Z_{sg} + Z_g - 2Z_{sm} \quad (2.58)$$

$$Z_{ss} = Z_{s-out} + Z_{sg} + Z_g \quad (2.59)$$

$$Z_{cs} = Z_{s-out} + Z_{sg} + Z_g - Z_{sm} \quad (2.60)$$

Aynı yöntem sadece iletkenlerden oluşan bir kablo için uygulanırsa, Eşitlik (2.38)'de gösterilen empedans matrisinin parametreleri aşağıdaki gibi bulunabilir;

$$Z_{cc} = Z_{c-out} + Z_{cg} + Z_g \quad (2.61)$$

Eşitlik (2.52) – (2.61)'de kullanılan iletken yüzeyi ve yalıtım katmanı empedansları, Bölüm 2.2.1'de anlatıldığı şekilde hesaplanabilir. Benzer şekilde, bu eşitliklerdeki zati toprak dönüş empedansları Bölüm 2.2.2'de anlatıldığı şekilde hesaplanabilir.

Tek damarlı kablolardan oluşan üç fazlı kablo sistemlerinde, fazlar arası etkileşim dikkate alınmalıdır. Şekil 2.8'den de anlaşılacağı üzere, fazlar arası etkileşim kabloların yalnızca en dış iletken katmanlarını etkilemektedir. Bu etkileşimi hesaba katmak için Bölüm 2.2.2'de anlatılan ortak toprak dönüş empedansı kullanılır.

Dolayısıyla, tek damarlı kablolardan oluşan üç fazlı sistemler için Eşitlik (2.36) aşağıdaki gibi genişletilebilir;

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} V_{c1} \\ V_{s1} \\ V_{a1} \\ \dots \\ V_{c2} \\ V_{s2} \\ V_{a2} \\ \dots \\ V_{c3} \\ V_{s3} \\ V_{a3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{cc1} & Z_{cs1} & Z_{ca1} & \vdots & Z_{g12} & Z_{g12} & Z_{g12} & \vdots & Z_{g13} & Z_{g13} & Z_{g13} \\ Z_{cs1} & Z_{ss1} & Z_{sa1} & \vdots & Z_{g12} & Z_{g12} & Z_{g12} & \vdots & Z_{g13} & Z_{g13} & Z_{g13} \\ Z_{ca1} & Z_{sa1} & Z_{aa1} & \vdots & Z_{g12} & Z_{g12} & Z_{g12} & \vdots & Z_{g13} & Z_{g13} & Z_{g13} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{g12} & Z_{g12} & Z_{g12} & \vdots & Z_{cc2} & Z_{cs2} & Z_{ca2} & \vdots & Z_{g23} & Z_{g23} & Z_{g23} \\ Z_{g12} & Z_{g12} & Z_{g12} & \vdots & Z_{cs2} & Z_{ss2} & Z_{sa2} & \vdots & Z_{g23} & Z_{g23} & Z_{g23} \\ Z_{g12} & Z_{g12} & Z_{g12} & \vdots & Z_{ca2} & Z_{sa2} & Z_{aa2} & \vdots & Z_{g23} & Z_{g23} & Z_{g23} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{g13} & Z_{g13} & Z_{g13} & \vdots & Z_{g23} & Z_{g23} & Z_{g23} & \vdots & Z_{cc3} & Z_{cs3} & Z_{ca3} \\ Z_{g13} & Z_{g13} & Z_{g13} & \vdots & Z_{g23} & Z_{g23} & Z_{g23} & \vdots & Z_{cs3} & Z_{ss3} & Z_{sa3} \\ Z_{g13} & Z_{g13} & Z_{g13} & \vdots & Z_{g23} & Z_{g23} & Z_{g23} & \vdots & Z_{ca3} & Z_{sa3} & Z_{aa3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{s1} \\ I_{a1} \\ \dots \\ I_{c2} \\ I_{s2} \\ I_{a2} \\ \dots \\ I_{c3} \\ I_{s3} \\ I_{a3} \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

Burada, 1-2-3 indisleri, sırasıyla A-B-C fazlarını, Z_{gij} , ise i ve j fazlarının en dış iletken katmanları arası ortak toprak dönüş empedansını ifade etmektedir.

Benzer bir yöntem takip edilerek, Eşitlik (2.37)'de gösterilen empedans matrisi aşağıdaki gibi genişletilebilir;

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} V_{c1} \\ V_{s1} \\ \dots \\ V_{c2} \\ V_{s2} \\ \dots \\ V_{c3} \\ V_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{cc1} & Z_{cs1} & \vdots & Z_{g12} & Z_{g12} & \vdots & Z_{g13} & Z_{g13} \\ Z_{cs1} & Z_{ss1} & \vdots & Z_{g12} & Z_{g12} & \vdots & Z_{g13} & Z_{g13} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{g12} & Z_{g12} & \vdots & Z_{cc2} & Z_{cs2} & \vdots & Z_{g23} & Z_{g23} \\ Z_{g12} & Z_{g12} & \vdots & Z_{cs2} & Z_{ss2} & \vdots & Z_{g23} & Z_{g23} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{g13} & Z_{g13} & \vdots & Z_{g23} & Z_{g23} & \vdots & Z_{cc3} & Z_{cs3} \\ Z_{g13} & Z_{g13} & \vdots & Z_{g23} & Z_{g23} & \vdots & Z_{cs3} & Z_{ss3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{s1} \\ \dots \\ I_{c2} \\ I_{s2} \\ \dots \\ I_{c3} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

Aynı yöntem sadece iletkenlerden oluşan bir kablo için uygulanırsa, Eşitlik (2.38)'de gösterilen empedans matrisi aşağıdaki gibi genişletilebilir;

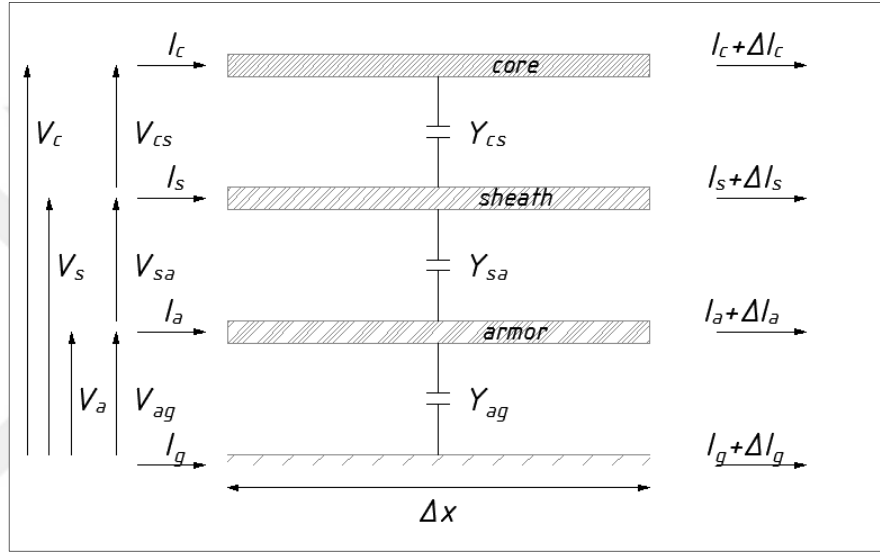
$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} V_{c1} \\ \dots \\ V_{c2} \\ \dots \\ V_{c3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{cc1} & \vdots & Z_{g12} & \vdots & Z_{g13} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{g12} & \vdots & Z_{cc2} & \vdots & Z_{g23} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{g13} & \vdots & Z_{g23} & \vdots & Z_{cc3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c1} \\ \dots \\ I_{c2} \\ \dots \\ I_{c3} \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

2.4.2. Paralel admitans matrisi

Dielektrik kayıpların ihmal edilmesi halinde, bir yalıtkan katmanın admitansı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$Y_{\text{ins}} = j\omega C_{\text{ins}} \quad (2.65)$$

İletken, ekran ve zırh içeren bir tek damarlı kablo admitansları Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. İletken, ekran ve zırh içeren tek damarlı kablo admitansları

Şekil 2.9' de, c indisi, iletkeni, s indisi, ekranı, a indisi zırhı, g indisi, ise toprağı ifade etmektedir. İletken, ekran ve zırh içeren bir tek damarlı kablo için Eşitlik (2.35) aşağıdaki gibi genişletilebilir;

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} I_c \\ I_s \\ I_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{cs} & -Y_{cs} & 0 \\ -Y_{cs} & Y_{cs} + Y_{sa} & -Y_{sa} \\ 0 & -Y_{sa} & Y_{sa} + Y_{ag} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_c \\ V_s \\ V_a \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

Zırhı olmayan bir kablo için Eşitlik (2.66) şu şekilde sadeleşecektir;

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} I_c \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{cs} & -Y_{cs} \\ -Y_{cs} & Y_{cs} + Y_{sg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_c \\ V_s \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

Sadece iletkenlerden oluşan bir kablo için Eşitlik (2.66) şu şekilde sadeleştirilebilir;

$$-\frac{d}{dx} [I_c] = [Y_{cg}] [V_c] \quad (2.68)$$

Yalıtkan katmanların kapasitansları Bölüm 2.2.1’de anlatıldığı şekilde hesaplanabilir

Yukarıdaki formülasyonda toprak admitansı ihmal edilmiştir. Ancak hem yalıtkanlı kablolar hem de çıplak iletkenler için (ör: yatay topraklama iletkeni) toprak admitansının ihmal edilmesi, özellikle yüksek frekans bölgesinde, önemli ölçüde hataya yol açmaktadır [32]. Bu admitansın hesaba katılabilmesi için, dış yalıtım admitansına seri olarak modellenmesi yeterlidir. Toprak admitansı aşağıdaki basit fomülle hesaplanabilir [33];

$$Y_g = \gamma_g^2 / Z_g \quad (2.69)$$

Burada γ_g toprak yayılım sabitini ifade etmektedir.

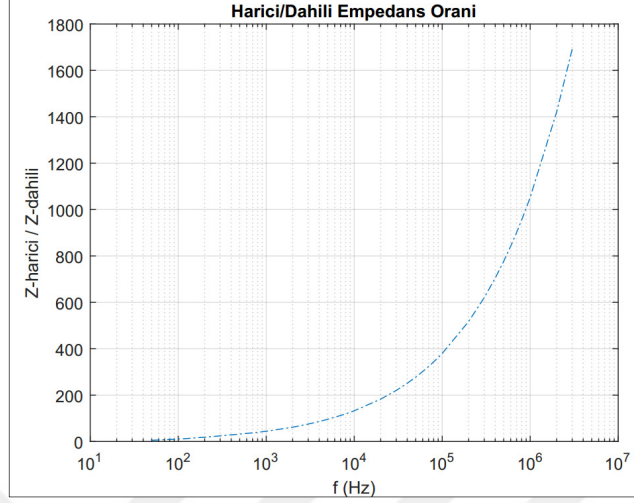
Tek damarlı kablolardan oluşan üç fazlı kablo sistemlerinde, fazlar arası etkileşim bulunmadığı için, her bir kablo bağımsız olarak düşünülebilir. Dolayısıyla, bu sistemlerin admitans matrisleri ortak admitans değerleri 0 olacaktır.

2.5. Empedans Hesaplarında Kullanılan Yaklaşırma Yöntemleri

Kablo modellemede kullanılan empedans hesapları oldukça karmaşıktır. Bu hesapları hızlı ve güvenilir bir şekilde yapabilmek için EMT tipi programlarda bazı yaklaşırma yöntemleri kullanılmaktadır. Bu bölümde empedans hesaplarında kullanılan yaklaşırma yöntemleri incelenecek ve bunların yıldırım darbesi analizleri için uygunlukları değerlendirilecektir.

Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere, yıldırım darbeleri yüksek frekanslı bileşenler içermektedir. Yüksek frekans alanında harici empedanslar (toprak dönüş empedansları), kablonun dahili empedanslarından çok daha büyüktür. 1000 Ω .m iletkenliğe sahip bir toprağa 1 m derinlikte gömülen 120 mm² kesitli çıplak bakır iletkenin dahili ve harici empedans oranlarının frekansa bağlı değişimi Şekil 2.10’ da verilmiştir. Bu örnekten de görülebileceği üzere, yüksek frekans alanında dahili empedanslar, harici empedanslarla karşılaştırıldığında, ihmal edilebilecek kadar

küçük kalmaktadır. Bu sebeple ilerleyen bölümlerde harici empedanslar için kullanılan yaklaşıma yöntemleri daha detaylı olarak incelenecektir.



Şekil 2.10. Çıplak bakır iletkenin dahili ve harici empedans oranları

2.5.1. Koaksiyel iletken empedansı hesaplama yaklaşımları

EMT tipi programlarda koaksiyel iletken empedansı hesaplarında bazı yaklaşıma yöntemleri kullanılır. Örneğin, EMTP-ATP polinom yaklaşımlar kullanırken [28, 34], PSCAD/EMTDC Wedepohl ve Wilcox tarafından önerilen yaklaşıma yöntemini kullanmaktadır [35]. Eşitlik (2.1), (2.2), (2.3) ve (2.5) için Wedepohl ve Wilcox tarafından önerilen yaklaşıma formülleri aşağıda verilmiştir;

$$Z_{aa} = \frac{\rho_c m}{2\pi a} \coth[m(b-a)] - \frac{\rho_c}{2\pi a(a+b)} \quad (2.70)$$

$$Z_{bb} = \frac{\rho_c m}{2\pi b} \coth[m(b-a)] + \frac{\rho_c}{2\pi b(a+b)} \quad (2.71)$$

$$Z_{ab} = \frac{\rho_c m}{\pi(a+b)} \operatorname{csch}[m(b-a)] \quad (2.72)$$

$$Z_{\text{solid}} = \frac{\rho_c m}{2\pi b} \coth(0,777mb) + \frac{0,356\rho_c}{\pi b^2} \quad (2.73)$$

Wedepohl-Wilcox yaklaşıma yönteminin gerçek çözüme göre en fazla %5 hata yaptığı ve bu hatanın iletken kalınlığının yarıçapına oranı azaldıkça daha da düştüğü belirtilmektedir [35].

2.5.2. Toprak dönüş empedansı hesaplama yaklaşımları

Bölüm 2.2.2’de belirtildiği üzere, toprak dönüş empedansları hesaplarında kullanılan Pollaczek integralinin sayısal çözümü oldukça karmaşıktır. Bu sebeple, toprak dönüş empedanslarının kabul edilebilir bir hassasiyetle hesaplanabilmesi için literatürde birçok yaklaşırma yöntemi geliştirilmiştir.

Bu bölümde Eşitlik (2.8) ve Eşitlik (2.9)’da verilen toprak dönüş empedanslarının hesaplanması için kullanılan yaklaşırma yöntemleri incelenecektir. Bu inceleme sırasında, tutarlı bir metin oluşturabilmek amacıyla orijinal makalelerdeki notasyon yerine ortak bir notasyon kullanılacaktır. Bu ortak notasyonda, düşük frekans yaklaşırması kullanılan yayılım sabitleri (m) ile bu yaklaşırmayı kullanmayan yayılım sabitleri (γ_g) farklı sembollerle gösterilecektir.

Düşük frekans bölgesinde ($|\alpha| \ll \alpha$), Pollaczek integrali daha ziyade enerji nakil hatları hesaplarında kullanılan Carson’un toprak dönüş empedansına eşit olmaktadır [36]. Bu yaklaşırma yönteminde toprak dönüş empedansları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır;

$$Z_{g\text{-mutual}} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \left\{ K_0(mD) - K_0(md) + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-H|\alpha|}}{|\alpha| + \sqrt{\alpha^2 + m^2}} e^{jx\alpha} d\alpha \right\} \quad (2.74)$$

$$Z_{g\text{-self}} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \cdot \left\{ K_0(mR) - K_0\left(m\sqrt{R^2 + 4h^2}\right) + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{-2h|\alpha|}}{|\alpha| + \sqrt{\alpha^2 + m^2}} e^{jR\alpha} d\alpha \right\} \quad (2.75)$$

Bu yöntem EMTP-ATP içerisinde kullanılan tek yöntemdir. Carson yaklaşırması 10 kHz’e kadar makul kabul edilebilecek bir hata seviyesinde kalmaktadır (hata < %5). Ancak bu seviyeden sonra hata yüzdesi önemli ölçüde artış göstermekte ve 3 MHz seviyesinde yaklaşık %20 seviyesinde hatalı sonuçlar üretmektedir [28]. Hata oranının yüksekliği dikkate alındığında, bu yaklaşırma yönteminin ve buna bağlı olarak EMTP-ATP programının, yıldırım darbelerinin incelenmesinde kullanılmak için uygun olmadığı söylenebilir.

Wedepohl ve Wilcox toprak dönüş empedansları için aşağıda verilen yaklaşırma yöntemini önermişlerdir [35];

$$Z_{g\text{-mutual}} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left\{ -\ln\left(\frac{\gamma md}{2}\right) + \frac{1}{2} - \frac{2mH}{3} \right\} \quad (2.76)$$

$$Z_{g\text{-self}} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left\{ -\ln\left(\frac{\gamma mR}{2}\right) + \frac{1}{2} - \frac{4mh}{3} \right\} \quad (2.77)$$

Burada, γ Euler sabitini (0,5772..) ifade etmektedir. Bu yöntem 100 kHz'e kadar oldukça başarılı sonuçlar üretmektedir (hata < %1). Ancak bu seviyeden sonra hata yüzdesi önemli ölçüde artmakta ve 3 MHz seviyesinde rezistif bileşen için yaklaşık %25 seviyesinde hatalı sonuçlar üretmektedir [28, 37]. Dolayısıyla bu yaklaşırma yönteminin yıldırım darbelerinin incelenmesi için uygun olmadığı söylenebilir. Bu yöntem PSCAD/EMTDC içerisinde opsiyonel olarak sunulmaktadır [38].

Saad, Gaba ve Giroux toprak dönüş empedansları için aşağıda verilen yaklaşırma yöntemini önermişlerdir [39];

$$Z_{g\text{-mutual}} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left\{ K_0(md) + \frac{2}{4+m^2x^2} e^{-Hm} \right\} \quad (2.78)$$

$$Z_{g\text{-self}} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left\{ K_0(mR) + \frac{2}{4+m^2R^2} e^{-2hm} \right\} \quad (2.79)$$

Bu yöntem 100 kHz'e kadar çok başarılı sonuçlar üretmektedir (hata < %1). Hata seviyesi bu frekanstan sonra artış gösterse de 1 MHz seviyesinde halen %3'ün altında kalmaktadır [39]. Bu yöntem de PSCAD/EMTDC içerisinde opsiyonel olarak sunulmaktadır [38].

EMT tipi programlarda kullanılmamakla beraber, literatürde sıklıkla atıf yapılan iki yöntem daha bulunmaktadır. Bunlardan ilki, Vance tarafından geliştirilmiştir [33];

$$Z_{g\text{-mutual}} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi\gamma_g d} \frac{H_0^1(j\gamma_g d)}{H_1^1(j\gamma_g d)} \quad (2.80)$$

$$Z_{g\text{-self}} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi\gamma_g R} \frac{H_0^1(j\gamma_g R)}{H_1^1(j\gamma_g R)} \quad (2.81)$$

$$\gamma_g = \sqrt{j\omega\mu(\sigma_g + j\omega\epsilon_g)} \quad (2.82)$$

Diğer yöntem ise Petrache vd. tarafından geliştirilmiştir [40];

$$Z_{g\text{-mutual}} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{1+\gamma_g d}{\gamma_g d}\right) \quad (2.83)$$

$$Z_{g\text{-self}} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{1+\gamma_g R}{\gamma_g R}\right) \quad (2.84)$$

Bu yöntemlerde, d , kablolar arası yatay mesafeyi, R , iletken yarıçapını, H_0^1 ve H_1^1 ise Hankel fonksiyonlarını ifade etmektedir. Her iki yöntemde de toprağın sonsuz derinlikte olduğu varsayılarak kablonun gömülme derinliği ihmal edilmiştir. Bu yöntemler 10 MHz seviyesine kadar oldukça başarılı sonuçlar üretmektedir [33, 40].

Theodoulidis toprak dönüş empedansı hesapları için birbirlerinden bağımsız üç ayrı çözüm yöntemi geliştirmiştir [41]. Aşağıda verilen üçüncü yöntemin hızlı ve yüksek doğrulukta çalıştığı ispat edilmiştir;

$$Z_{g\text{-mutual}} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[K_0(\gamma_g d) - K_0(\gamma_g D) + 2J_{\text{Pollaczek}} \right] \quad (2.85)$$

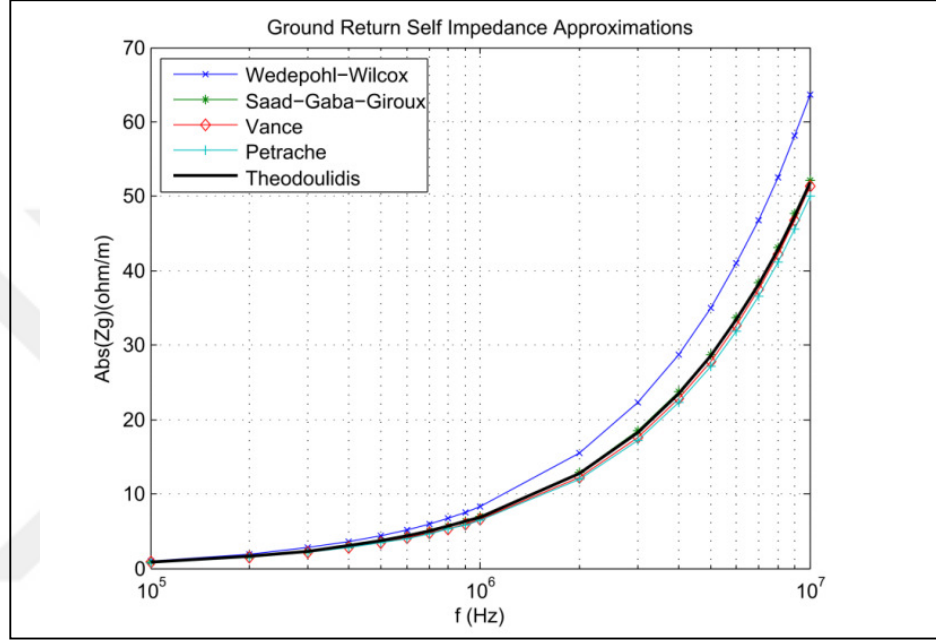
$$J_{\text{Pollaczek}} = \left(\frac{H}{D}\right)^2 K_0(\gamma_g D) + \frac{1}{\gamma_g D} \left[2\left(\frac{H}{D}\right)^2 - 1 \right] K_1(\gamma_g D) - \frac{1}{\gamma_g^2} I_{\text{Pollaczek}} \quad (2.86)$$

$$I_{\text{Pollaczek}} = \frac{H^2 - x^2}{D^4} e^{(-\gamma_g H)} (1 + \gamma_g H) + \frac{\gamma_g^2 x H}{D^2} \int_{H/D}^1 \left(2\sqrt{1-t^2} - \frac{1}{\sqrt{1-t^2}} \right) e^{-\gamma_g D t} dt \quad (2.87)$$

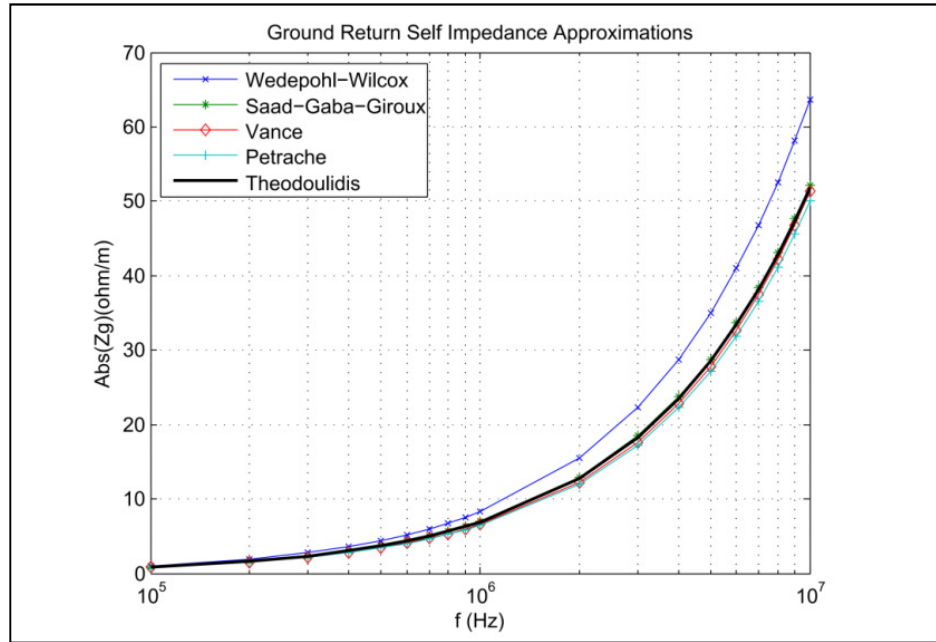
Yukarıda sadece ortak toprak dönüş empedansı verilmiştir. Ancak x , d ve H parametreleri sırasıyla R , R ve $\sqrt{R^2 + 4h^2}$ ile değiştirilirse zati toprak dönüş empedansı da hesaplanabilir. EMT tipi programlarda kullanılmayan bu yöntemde herhangi bir parametre aralığı için hata yüzdesinin 10^{-7} seviyesinde olduğu belirtilmektedir [41]. Bu yöntem yüksek hassasiyeti sebebiyle diğer yöntemlerin değerlendirilmesinde referans olarak kullanılacaktır.

Pollaczek integralinin nümerik çözümü için literatürde birçok hesaplama yöntemi geliştirilmiştir [42-46]. Ancak bu metodlar yaklaştırma yöntemlerine göre çok daha fazla işlem gerektirmektedir. Detayları verilmemiş olmakla beraber, Pollaczek integraline nümerik çözüm sağlayan bir yöntem PSCAD/EMTDC içerisinde opsiyonel olarak sunulmaktadır [38].

Yerden 1 m derinliğe gömülmüş 2,3 cm yarıçapındaki bir kablonun zati toprak dönüş empedansı yukarıda bahsedilen yöntemlerle hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 2.11 ve 2.12’de sunulmuştur. Bu karşılaştırmada Theodoulidis’in yöntemine göre elde edilen sonuçlar referans değer olarak kabul edilebilir. Carson’un yaklaşırma yönteminin yüksek frekanslar için uygun olmadığı ispatlanmış olduğu için bu karşılaştırmaya dahil edilmemiştir [28].



Şekil 2.11. Zati toprak dönüş empedansları karşılaştırması ($\sigma=10$ mS/m)

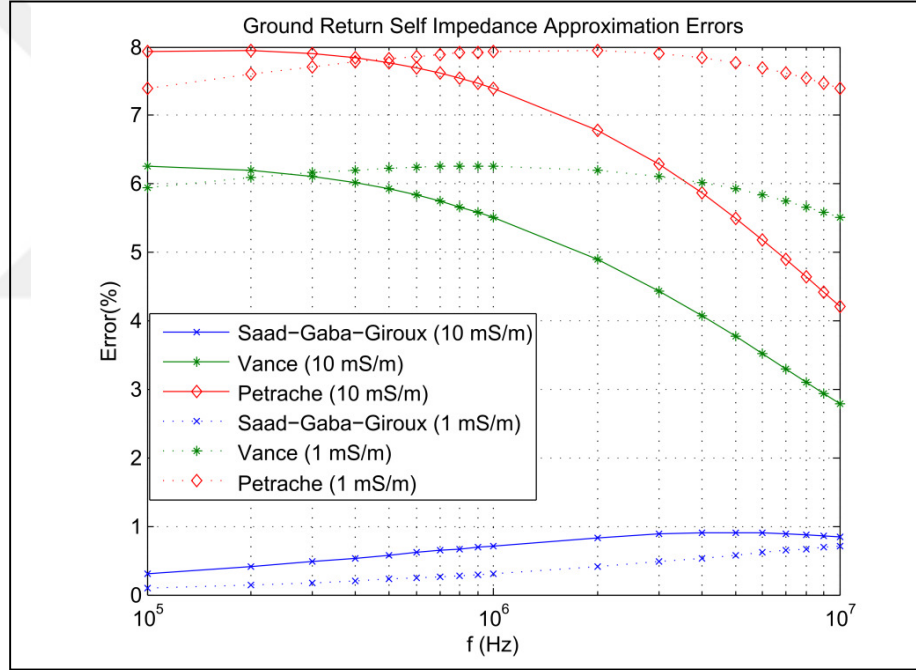


Şekil 2.12. Zati toprak dönüş empedansları karşılaştırması ($\sigma=1$ mS/m)

Şekil 2.11 ve 2.12’de açıkça görüldüğü üzere, Wedepohl-Wilcox yöntemi 1 MHz seviyesinden sonra diğer yöntemlerden önemli ölçüde ayrılmaktadır. Dolayısıyla bu yöntemin yıldırım darbelerinin incelenmesinde kullanılmak için uygun olmadığı söylenebilir. Diğer yöntemler benzer sonuçlar verdiği için yüksek frekans alanında daha detaylı olarak incelenecektir.

Şekil 2.13’te Saad-Gaba-Giroux, Vance ve Petrache yaklaştırma yöntemlerinin referans kabul ettiğimiz Theodoulidis yöntemine göre görece hata oranları gösterilmektedir. Bu karşılaştırmada hata yüzdesi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

$$\text{Error \%} = \frac{|Z_{\text{reference}} - Z_{\text{approximation}}|}{|Z_{\text{reference}}|} \times 100 \quad (2.88)$$



Şekil 2.13. Yaklaştırma yöntemlerin yüksek frekans bölgesinde hataları

Şekil 2.13’te görüldüğü üzere, Saad-Gaba-Giroux yöntemi 10 MHz seviyesine kadar referans yönteme çok yakın sonuçlar üretmektedir. Hata oranları diğer yöntemlerde daha yüksek olmakla beraber, yine de makul seviyelerde kalmaktadır.

Yukarıdaki karşılaştırma çalışmasında kullanılan tüm yöntemlerde displacement akımlarının etkileri ihmal edilmiştir. İlerleyen bölümlerde anlatılacağı üzere, displacement akımları yaklaştırma yönteminin başarısını, özellikle yüksek frekans alanında, önemli ölçüde etkilemektedir.

2.6. Kablo Modelinin Yüksek Frekans Alanında Geçerliliği

Pollaczek'in toprak dönüş empedansı hesaplama yöntemi aşağıdaki varsayımlar üzerine kurulmuştur [29];

- Displacement akımları ihmal edilebilir seviyededir
- Quasi-static TEM yayılım modu geçerlidir
- Toprak yarı-sonsuz ve homojendir
- Tüm iletkenler paralel ve sonsuz uzunluktadır
- İnce iletken yaklaşımını geçerlidir

Bu varsayımlardan ilk ikisi sadece düşük frekans bölgesinde geçerlidir [47]. Dolayısıyla, Pollaczek'in toprak dönüş empedansı hesaplama yönteminin yüksek frekans bölgesindeki geçerlilik sınırları daha detaylı olarak incelenmelidir.

2.6.1. Displacement akımlarının değerlendirilmesi

Displacement akımlarının toprak dönüş empedansı hesabına katılıp katılmayacağı yayılım sabitinin tanımlanmasında belirlenir. Pollaczek yayılım sabitini Eşitlik (2.10)'da belirtildiği gibi, düşük frekans bölgesinde geçerli olacak şekilde tanımlamıştır (m). Daha sonra Sunde, yayılım sabitini (γ_g) yüksek frekans alanında da geçerli olacak şekilde tekrar tanımlamıştır [48].

$$\gamma_g = \sqrt{j\omega\mu_g(\sigma_g + j\omega\epsilon_g)} = \sqrt{j\omega\mu_g\sigma_g - \omega^2\mu_g\epsilon_g} \quad (2.89)$$

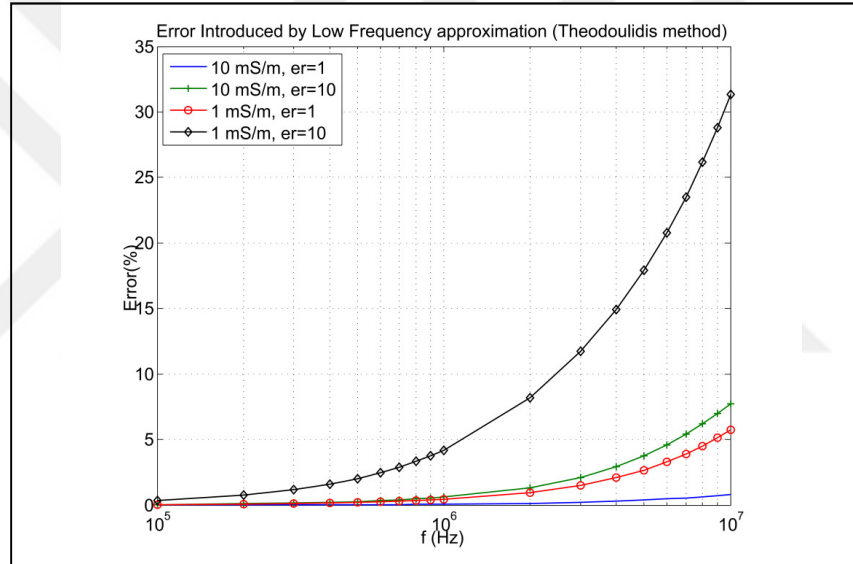
Bu eşitlikten de görülebileceği üzere, " γ_g " değeri, $\omega^2\mu_g\epsilon_g \ll j\omega\mu_g\sigma_g$ ya da $f \ll \sigma_g/2\pi\epsilon_g$ durumunda Eşitlik (2.10)'da verilen "m" değerine yakınsamaktadır.

Bu yaklaşıma göre, iletkenlik değeri 1 mS/m ve göreceli permittivity değeri 1 olan örnek bir toprak yapısında, displacement akımlarının ihmal edilebilmesi için çalışma frekansının 18 MHz'in çok altında olması gerekir. Bu frekans limiti göreceli permittivity değerinin 10 olduğu durumda 1,8 MHz'e kadar düşmektedir. Yıldırım darbeleri ile ilgili frekans aralığının birkaç MHz'e kadar çıkabildiği dikkate alındığında, düşük frekans yaklaşımının her zaman geçerli olmayacağı sonucuna varılabilir.

Düşük frekans yaklaşımının etkisini incelemek için, Bölüm 2.5.2’de verilen örnek kablo yapısında, düşük frekans yaklaşımının uygulandığı ve uygulanmadığı durumlarda, kablonun zati toprak dönüş empedansı Theodoulidis yöntemi ile hesaplanmış ve bu varsayımdan doğan farkın frekansa bağlı değişimi Şekil 2.13’te gösterilmiştir. Bu grafikte hata yüzdesi aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır;

$$\text{Error } \% = \frac{|Z_{g-w/o \text{ LFA}} - Z_{g-w/ \text{ LFA}}|}{|Z_{g-w/o \text{ LFA}}|} \times 100 \quad (2.90)$$

Burada, $Z_{g-w \text{ LFA}}$ düşük frekans yaklaşımıyla hesaplanan empedansı, $Z_{g-w/o \text{ LFA}}$ ise düşük frekans yaklaşımı kullanılmadan hesaplanan empedansı ifade etmektedir.



Şekil 2.14. Düşük frekans varsayımının yarattığı hata yüzdesi

Şekil 2.14’te görülebileceği üzere, hata yüzdesi düşük toprak iletkenliği ve yüksek toprak permittivity’si ile artış göstermektedir. Yayılım sabitinin tanımı dikkate alındığında bu durum beklenen bir sonuçtur. Bu noktada, düşük frekans varsayımının toprak dönüş empedansı değerini artırma yönünde hataya yol açtığı belirtilmelidir. Bir başka deyişle, displacement akımlarının ihmal edilmesi gerçekte olduğundan daha yüksek toprak dönüş empedansı hesaplanmasına yol açmaktadır.

Rüzgar santrallerinin genellikle dağlık ve kayalık alanlarda kurulduğu dikkate alındığında beklenen toprak iletkenliğinin düşük olduğu söylenebilir. Toprak permittivity’si ise toprak tipine bağlı olarak geniş bir bantta değişim göstermektedir. Çeşitli toprak türleri için permittivity değerleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Çeşitli toprak türlerinin görelî permittivity değerleri [49]

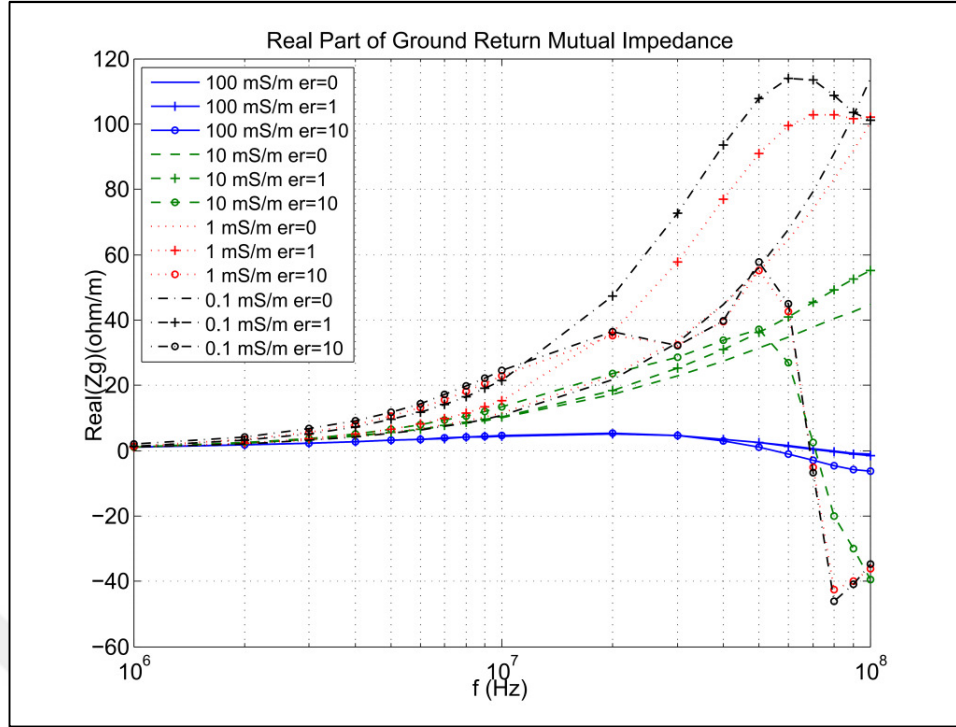
Toprak tipi	Görelî permittivity
Hava	1
Çakıl	5,5
Kuru kil	10
Islak kil	27
Kuru kum	4-6
Islak kum	30
Kuru granit	5
Islak granit	6,5
Organik toprak	64
Donmuş toprak	6
Orman arazisi	12

Bu veriler dikkate alındığında, displacement akımlarının ihmal edilmesinin yüksek frekans alanında toprak dönüş empedansı hesaplarını önemli ölçüde etkilediği söylenebilir. Diğer yandan, yapılan bazı araştırmalar, toprak iletkenliği ve permittivity'sinin yüksek frekans alanında düşük frekanslarda yapılan ölçümlere göre önemli oranda düştüğünü göstermektedir. Ancak toprak parametrelerinin frekansa bağlı değişimi konusunda literatürde yeterli çalışma bulunmadığı için bu etkiler genellikle ihmal edilir [10].

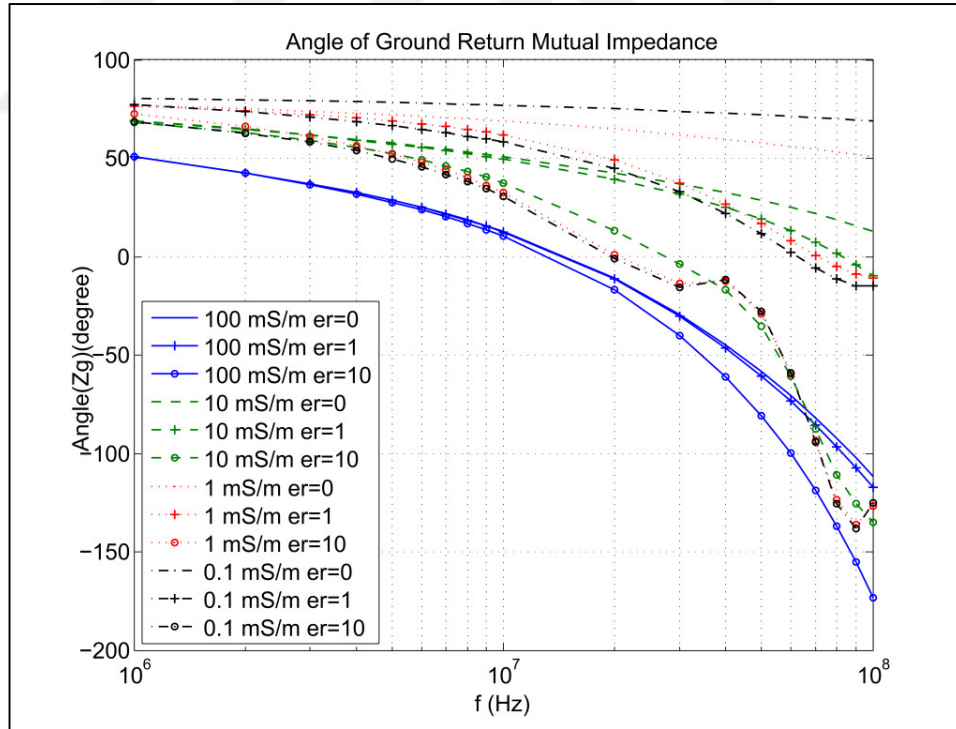
2.6.2. Yayılım modunun geçerlilik bölgesi

Pollaczek hesabının bir diğer önemli varsayımı quasi-static TEM yayılım modudur. Bu modda ortak mod akımları ihmal edilir ve sadece diferansiyel mod akımları dikkate alınır [50]. Quasi-static TEM yayılım modunda toprak dönüş empedansının hem resistif hem de endüktif kısımlarının pozitif olması beklenir [47]. Pollaczek hesabına dayalı bir analiz yapmadan önce, ilgili toprak parametreleri ve frekans aralığında bu hesap yönteminin geçerliliğini koruduğundan emin olunmalıdır.

Quasi-static TEM yayılım modunun geçerli olduğu frekans alanını incelemek amacıyla, yerden 1 m derinliğe gömülmüş aralarında 0,5 m mesafe bulunan, 2,3 cm yarıçapındaki iki kablo arası ortak toprak dönüş empedansı Theodoulidis yöntemi ile hesaplanmıştır. Elde edilen empedansların resistif bileşen değerlerinin ve empedans açılarının frekansa bağlı değişimleri Şekil 2.15 ve Şekil 2.16' da verilmiştir.



Şekil 2.15. Ortak toprak dönüş empedansının rezistif bileşeni



Şekil 2.16. Ortak toprak dönüş empedansının açısı

Şekil 2.15 ve Şekil 2.16’da görülebileceği üzere, rüzgar santralleri için genel montaj uygulamasına tekabül eden bu geometrik yerleşimde, quasi-static TEM yayılım modunun 3 MHz’e kadar geçerli olduğu söylenebilir.

Quasi-static TEM yayılım modunun geçerlilik sınırları aşağıda verilen formül ile bulunabilir [51];

$$f_{TL\text{-limit}} = \frac{\mu_0 \sigma_g \pi (3 \times 10^8)^2}{\sqrt{\epsilon_{rg} (\epsilon_{rg} + \mu_0 \epsilon_g [2\pi (3 \times 10^8)]^2)}} \quad (2.91)$$

Bu tez kapsamında özgül direnç değerlerinin çok yüksek olduğu toprak yapıları (ör: granit, çakıl, vs.) dikkate alınmaktadır. Bu tür toprak yapılarında görel permittivite değerinin nispeten düşük olduğu Tablo 2.1'den görülebilir. Bu hesaplama yöntemine göre yapılan hesaplarda sınır frekans değeri $\sigma=0,001$ S/m ve $\epsilon_{rg}=10$ değerleri için 5,6 MHz, $\sigma=0,0002$ S/m ve $\epsilon_{rg}=4$ değerleri için 2,8 MHz çıkmaktadır. Sağlıklı bir analiz çalışması yapılabilmesi için, her uygulama özelinde sınır frekans değerinin aşılp aşılmadığı kontrol edilmelidir. Ancak yukarıdaki hesaplar dikkate alındığında, tez kapsamındaki uygulamalarda frekans sınırının yıldırım darbeleri için en yüksek seviye olarak tanımlanan 3 MHz seviyesinin çok altına inmeyeceği öngörülebilir.

2.7. Kablo Modeli Seçimi

Bu tez çalışması kapsamında kullanılacak olan analiz programı ve buna bağlı kablo modeli seçilirken, önceki bölümlerde izah edilen önemli unsurların modellenenebilir olması esas alınmıştır. Bu unsurlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Model bileşenleri yüksek frekans bölgesinde yüksek doğrulukla çalışmalıdır
- Displacement akımları ihmal edilmemelidir. Bir başka deyişle, düşük frekans yaklaştırması yerine tam yayılım sabiti kullanılabilir olmalıdır.
- Toprak admitansı modellenenebilmelidir

Mevcut EMT tipi programların hiçbirinde bu özellikler bir arada bulunmamaktadır. Örneğin EMTP-ATP içerisindeki toprak dönüş empedansı modeli sadece Carson yaklaştırması kullanabildiği için yüksek frekans alanında hassas sonuç vermeyecektir. Displacement akımları ve toprak admitansı ise hiçbir programda modellenememektedir.

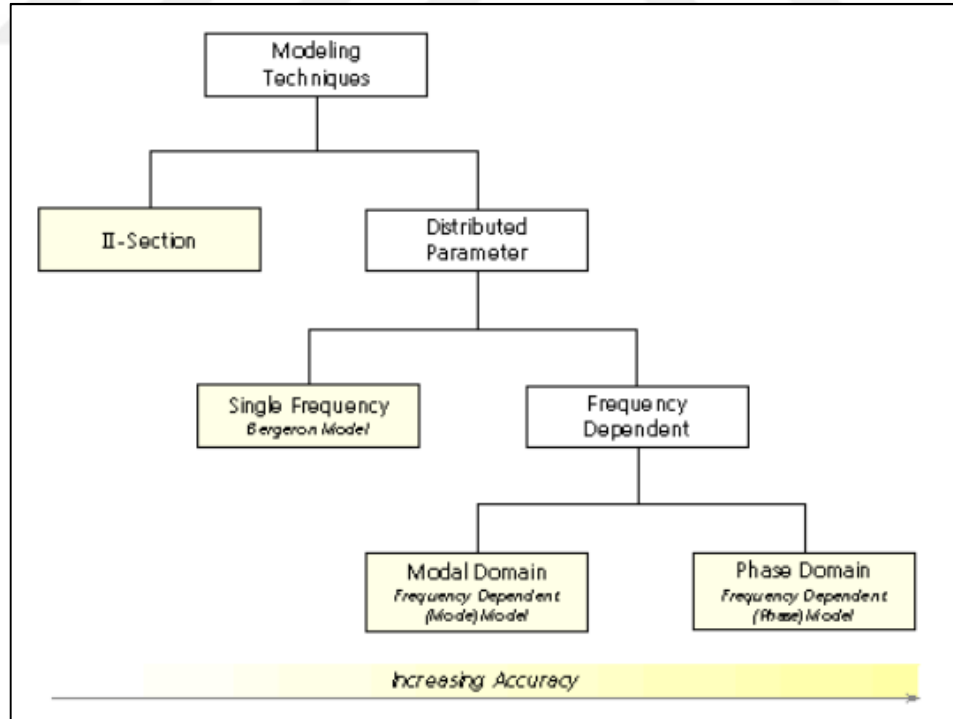
PSCAD-EMTDC içerisindeki kablo modeli yüksek frekans bölgesinde yüksek hassasiyetle çalışmaktadır. Ayrıca bu modelde program dışında hesaplanan

empedans ve admitans matrisleri de girilebilmektedir. Bu sayede uygun bir toprak dönüş empedansı modeli kullanmak ve displacement akımlarını ile toprak admitansını modele dahil etmek mümkün olabilmektedir. Sağladığı bu uygulama esnekliği sebebiyle bu tez çalışması kapsamında PSCAD-EMTDC programı kullanılacaktır.

Bu bölümde, PSCAD/EMTDC programında bulunan kablo modelleri incelenecek ve benzetim çalışmalarında kullanılmaya uygun kablo modeli belirlenecektir.

PSCAD/EMTDC içerisinde kablo modelleri π section ve dağıtılmış parametrelili modeller olmak üzere iki grup altında incelenebilir. π section modellerde lumped element gösterimi kullanılırken, dağıtılmış parametrelili modeller yürüyen dalgalar prensibi ile çalışır. Dağıtılmış parametrelili modeller sabit frekanslı olabileceği gibi, frekansa bağlı olarak da çalışabilirler.

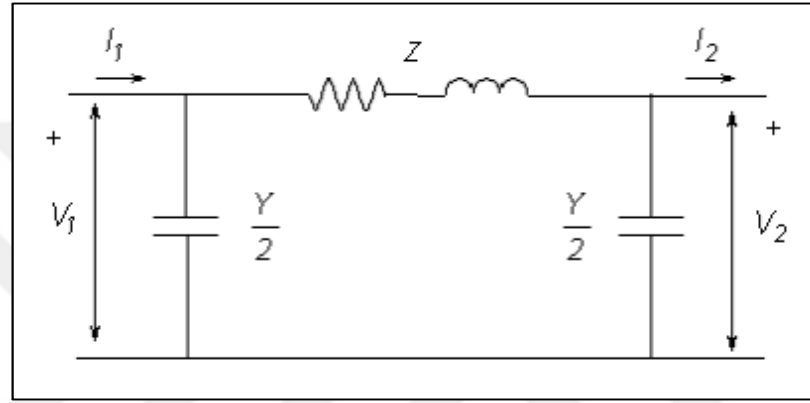
PSCAD/EMTDC içerisindeki kablo modellerinin gruplandırılması Şekil 2.17’de verilmiştir.



Şekil 2.17. PSCAD/EMTDC kablo modelleri [38]

2.7.1. π section modelleri

π section modelleri “nominal π ” ve “exact π ” olarak iki kısımda incelenebilir. Nominal π modelinde hattın toplam empedans ve admitansı tek bir devre üzerinde gösterilir. Bu model uygulanan dalganın hat üzerinde iletimini modelleyemediği için iletim gecikmesini dikkate alamaz. Bu sebeple π section modelinin sadece kısa hatlarda kullanılması önerilir. π section modelinin genel gösterimi Şekil 2.18’de verilmiştir.



Şekil 2.18. PSCAD/EMTDC π section modeli [38]

Exact π modelinde ise empedans ve admitansın dağıtılmış yapısını dikkate alan daha gelişmiş bir π modelidir. Bu modelde empedans ve admitans değerleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [38].

$$Z = Z_M \frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l} \quad (2.92)$$

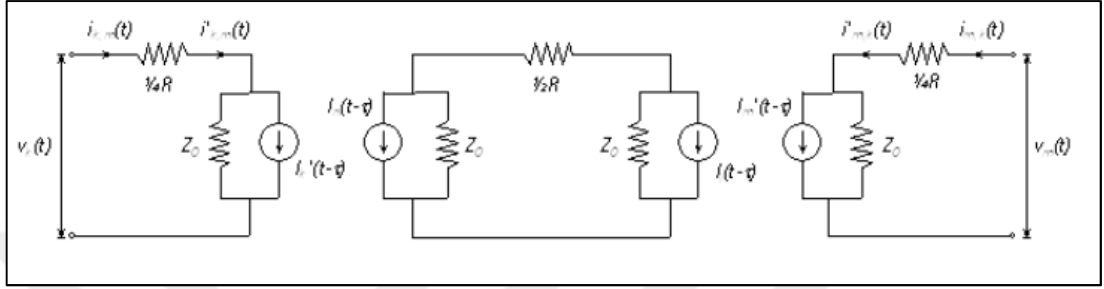
$$Y = Y_M \frac{\tanh(\gamma l/2)}{\gamma l/2} \quad (2.93)$$

Burada Z_M ve Y_M , sırasıyla modal dönüşüm matrislerini ifade etmektedir.

Exact π modeli uzun iletim hattı modeline dayalı olduğu için, nominal π modeline göre çok daha yüksek hassasiyet sunmaktadır. Bu model sadece tek bir frekansta geçerli olduğu için exact π modeli kararsız hal analizlerinde kullanılmaz. Bunun yerine, diğer modellerin belirli bir frekanstaki doğruluklarını değerlendirmek amacıyla kullanılır.

2.7.2. Bergeron modeli

Bergeron modeli, travelling wave teorisine bağlı olarak çalışan bir sabit frekans modelidir. Bu modelde hattın kayıpsız olduğu düşünülür ve hattın endüktans ve kapasitansı Norton eşdeğeri ile modellenir. Hattın seri direnci ise Şekil 2.19'da belirtildiği şekilde model içerisinde dağıtılır.



Şekil 2.19. PSCAD/EMTDC Bergeron modeli [38]

Bu modelin parametreleri tek bir frekansa göre belirlendiği için kararsız hal çalışmalarında kullanılmaz. Daha ziyade yük akışı gibi kararlı hal analizlerinde kullanılır.

2.7.3. Frekansa bağlı modeller

Bu modeller tüm parametreleri frekansa bağlı olarak belirlenen ve iletim hattı teorisine dayanan modellerdir. Temel olarak bu modeller Eşitlik (2.32) ve Eşitlik (2.33)'ün çözümü prensibine dayanırlar. Bu amaçla öncelikle yayılım matrisi $[H(\omega)]$ ve karakteristik admitans matrisi $[Y_C(\omega)]$ oluşturulur. Tüm işlemler frekans domeninde yapıldıktan sonra, elde edilen değerler Fourier dönüşümü ya da z-transform yöntemleriyle tekrar zaman domenine aktarılır.

PSCAD/EMTDC' de mode modeli ve phase modeli olmak üzere iki tip frekansa bağlı model bulunmaktadır. Universal Line Model (ULM) [52] modeline dayalı faz modeli, dahili dönüşüm matrislerinde frekans bağımlılığını dikkate alırken, mode modelinde sabit dönüşüm varsayımı kullanılır. Bu sebeple frekans bağımlı modellerden phase modelinin daha sağlıklı sonuç verdiği belirtilmektedir [38].

Bu tez çalışması kapsamında, hassasiyeti ve yüksek frekans bölgesindeki güvenilirliği sebebiyle frekansa bağlı faz modeli kullanılacaktır.

2.8. Kablo Modeli İçin Verilerin Hazırlanması

Kablo modelleri gerçek kablolar ile geometri, içerik ve fiziksel yapı bakımından birebir uyumlu olmayabilirler. Bu sebeple kablo modeli parametreleri belirlenirken gerçek kablo parametrelerinin bazı işlemlerden geçirilmesi gerekebilir. Bu bölümde bu işlemler izah edilecektir.

2.8.1. İletken

EMT tipi programlarda kablo iletkeninin boşluksuz dolu silindir biçiminde olduğu varsayılır. Ancak gerçek kabloların iletkenleri genellikle bükümlü yapıdadır. Bu sebeple, bükümler arasındaki boşlukları hesaba katabilmek için iletken özgül direncinin aşağıda belirtildiği şekilde değiştirilmesi gerekir [53];

$$\rho' = \rho_c \frac{\pi r_c^2}{A_c} \quad (2.94)$$

Burada, ρ' , modelde kullanılacak iletken özgül direncini, ρ_c , iletken malzemenin özgül direncini, r_c , iletken yarıçapını, A_c , ise iletken kesit alanını ifade etmektedir.

Bir iletkenin AC direnci aşağıdaki formül ile bulunabilir [54];

$$R_{AC} = R_{DC} (1 + y_s + y_p) \quad (2.95)$$

Burada, R_{AC} , iletkenin AC direncini, R_{DC} , iletkenin DC direncini, y_s , yüzey etkisi katsayısını, y_p , ise yakınlık etkisi katsayısını ifade etmektedir.

Yüzey etkisi iletken kesitindeki düzenli olmayan akım dağılımı ile ilgilidir. EMT tipi programlarda yüzey etkisi katsayısı IEC 60287-1-1 standardında tarif edildiği şekilde hesaplanır [54]. Yüzey etkisinin frekansa bağlılığı sebebiyle, yüksek frekans bölgesinde önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

Yakınlık etkisi iki ya da daha fazla iletkenin etkileşime girdiği durumlarda, iletkenin diğer iletkene bakan yüzeyinde akım yoğunluğunun artması şeklinde görülür. Yapılan çalışmalar, proximity effect'in özellikle yüksek kesitli kablolarda ve yüksek frekans bölgesinde dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuştur [55-57].

EMT tipi programlarda yakınlık etkisinin genelde ihmal edilebilir olduğu varsayılır. Orta gerilim kablolarında iletkenin bükümleri birbirlerinden izole edilmediği için yakınlık etkisi sınırlıdır. Bu sebeple bu etkinin ihmal edilmesi orta gerilim kablo modelinde bir hataya yol açmamaktadır [58].

2.8.2. Yarı iletken katman

İletken ve yalıtkan katmanlar arası elektrik alanı düzenlemek amacıyla, iletken ile yalıtkan arasında ve yalıtkan ile ekran arasında birer yarı iletken katman kullanılır. Bu katmanlar EMT tipi programlarda doğrudan modellenemezler. Bu sebeple kablo modelinin parametreleri belirlenirken kullanılacak fiziksel verilerin, yarı iletken katmanın eksiliği dikkate alınarak düzeltilmesi gereklidir.

Yarı iletken katmanın özgül direnci iletken katmanlara göre çok yüksektir. Permittivity'si ise yalıtkan katmana göre çok yüksektir. Yarı iletken katman, bu özellikleri dikkate alınarak, seri empedans hesaplarında yalıtkan katmana, kapasitans hesabı yapılırken de iletken katmana dahil edilir.

Yalıtkan katman permittivity'sinin aşağıda verildiği şekilde değiştirilerek modelde kullanılması gereklidir [53];

$$\epsilon_r = \epsilon_{r-ins} \frac{\ln(r_{s-in}/r_{c-out})}{\ln(r_{ins-out}/r_{ins-in})} \quad (2.96)$$

Burada, ϵ_r , modellemede kullanılacak yalıtkan katman görelî permittivity'sini, ϵ_{r-ins} , yalıtkan katman malzemesinin görelî permittivity'sini, r_{s-in} , kablo ekranı iç çapını, r_{c-out} , iletken dış çapını, $r_{ins-out}$, yalıtkan katman dış çapını, r_{ins-in} , ise yalıtkan katman iç çapını ifade etmektedir.

Bu yaklaşım yarı iletken katmanların boylamsal zayıflama etkisini ihmal etmektedir. Yüksek frekans bölgesine bu etki önemli olmakla birlikte, yıldırım darbelerini içeren frekans bölgesinde bu etki ihmal edilebilir seviyede kalmaktadır [59, 60].

2.8.3. Yalıtkan katman

Yalıtkan katman üzerindeki aktif kayıplar karmaşık permittivity değeri kullanılarak gösterilebilir [31];

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_r'(\omega) - j\epsilon_r''(\omega) \quad (2.97)$$

$$\tan \delta(\omega) = \epsilon_r''/\epsilon_r' \quad (2.98)$$

Burada ϵ_r , yalıtkan katman görel permittivity'sini ifade etmektedir.

XLPE tipi yalıtkan malzemelerin 1 MHz seviyesine kadar kayıpsız olduğu düşünülmektedir [61]. Bu frekans sınırı yıldırım darbesi analizleri için yeterli kabul edilebilir. Ayrıca yapılan çalışmalar karmaşık permittivity değerinin 100 MHz seviyesine kadar sabit kaldığını göstermektedir [62, 63]. Yalıtkan katman üzerindeki kayıpların uygulanan gerilimin karesiyle orantılı olduğu düşünülürse, bu kayıpların orta gerilim seviyesinde ihmal edilebilir seviyede olacağı söylenebilir. Bu sebeple, her ne kadar EMT tipi programlarda karmaşık permittivity tanımlamak mümkün olsa da, bu tez çalışması kapsamında permittivity'nin sadece reel bileşenden oluştuğu varsayılacaktır.

2.8.4. Kablo ekranı

Tek damarlı kabloların ekranları genellikle burgulu yapıda bir araya getirilmiş ince tellerden oluşur. Ancak EMT tipi programlarda, iletken olduğu gibi, ekranın da boşluksuz ve silindirik yapıda olduğu varsayılır. Bu sebeple, kablo modeli parametreleri belirlenirken, ekranın dış çapının aşağıda belirtildiği şekilde düzeltilmesi gereklidir [53];

$$r_{s-out} = \sqrt{\frac{A_s}{\pi} + r_{s-in}^2} \quad (2.99)$$

Burada, r_{s-in} , kablo ekranı iç çapını, r_{s-out} , modellemeye kullanılacak kablo ekran dış çapını, A_s , ise kablo ekran kesitini ifade etmektedir.

3. YATAY TOPRAKLAMA İLETKENİ MODELİ ANALİZİ

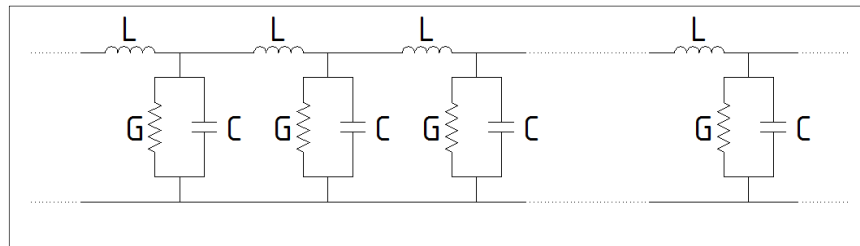
Yatay topraklama iletkenlerinin yıldırım darbelerine karşı tepkilerini incelemek amacıyla literatürde birçok model geliştirilmiştir. Bu modeller genel olarak, devre modelleri, elektromanyetik alan modelleri, dağıtılmış parametre modeli ve iletim hattı modelleri olarak gruplandırılabilir.

Devre modelinde topraklama iletkeni, mutual coupling'leri de içerecek şekilde parametreleri (R, L, C, G) tanımlanmış küçük parçalara bölünür ve bu parçalardan oluşan devrenin düğüm denklemleri çözülür. Bu yöntem basit ve kapsamlı olmakla beraber, darbe yayılım gecikmesini modelleyemediği için yetersiz kalabilmektedir [64-67].

Elektromanyetik alan modelleri, Maxwell denklemlerinin momentler metodu ya da sonlu elemanlar analizi yöntemleriyle çözümüne dayanırlar ve oldukça başarılı sonuçlar üretirler. Ancak bu yöntemlerin anlaşılması ve uygulanması diğer yöntemlere göre oldukça zordur [64, 68, 69].

Dağıtılmış parametre modelinde, topraklama iletkenleri küçük parçalar halinde frekanstan bağımsız parametreler ile modellenir. Bu modeller, sık kullanılan mühendislik yazılımlarında daha kolay uygulanabildiği için, literatürde diğer yöntemlere göre daha fazla tercih edilmektedir.

Bir yatay topraklama iletkeninin dağıtılmış parametrelerle ifade edilen modeli Şekil 3.1'de verilmiştir [31].



Şekil 3.1. Yatay topraklama iletkeni dağıtılmış parametre modeli

Bu modelde kullanılan birim uzunluk parametleri (1 m'lik bölümler için) Sunde tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [48];

$$G = \frac{\pi}{\rho_g} \left/ \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2ad}} - 1 \right) \right. \quad (3.1)$$

$$L = \frac{\mu_g}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2ad}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

$$C = \pi \epsilon_g / \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2ad}} - 1 \right) \quad (3.3)$$

Burada l, iletkenin toplam uzunluğunu, a, iletken yarıçapını, d, ise iletkenin gömülme derinliğini ifade etmektedir. Bu yaklaşım, iletken uzunluğunun iletken yarıçapı ve gömülme derinliğinden çok büyük olduğu durumlarda geçerlidir ($l \gg d$, $l \gg a$).

Bir ucu açık bırakılan iletkenin diğer uçtan görülen giriş empedansı (harmonik empedansı) aşağıdaki gibi ifade edilebilir [48];

$$Z(\omega) = Z_c \coth(\gamma l) \quad (3.4)$$

$$Z_c = \sqrt{j\omega L / (G + j\omega C)} \quad (3.5)$$

$$\gamma = \sqrt{j\omega L (G + j\omega C)} \quad (3.6)$$

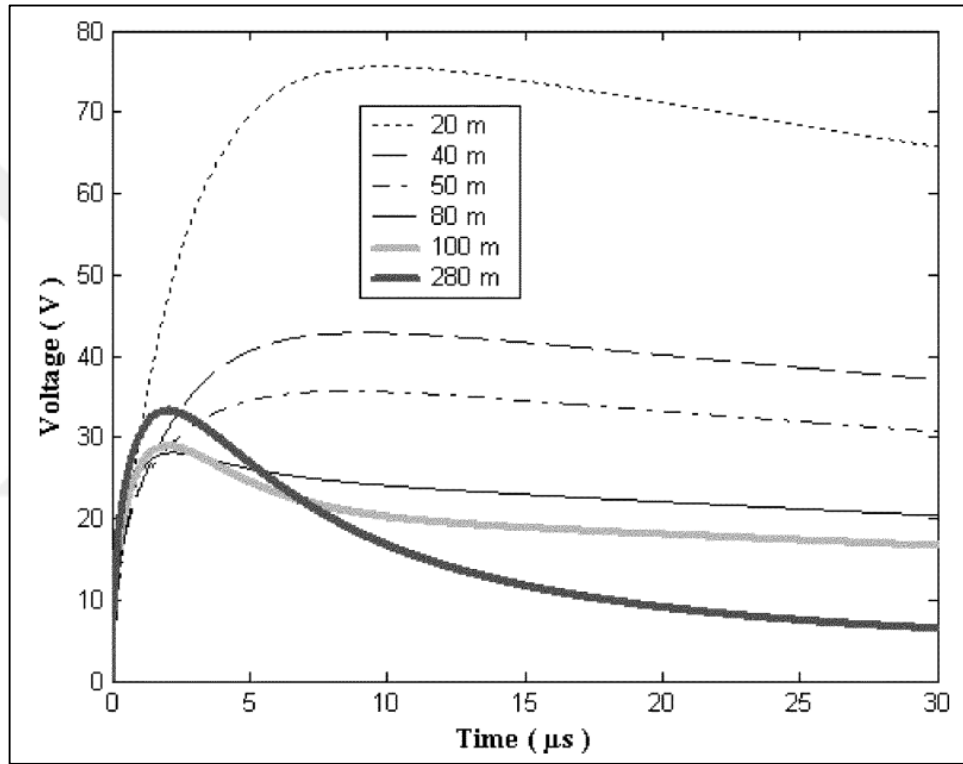
Burada, Z_c , iletkenin karakteristik empedansını, γ , ise iletkenin yayılım sabitini ifade etmektedir. Birim direnç, endüktans ve kapasitans değerleri yerlerine konulduğunda, iletkenin karakteristik empedansı ve yayılım sabiti aşağıdaki gibi bulunabilir [31];

$$Z_c = \frac{\left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2ad}} - 1 \right)}{\pi} \sqrt{\frac{j\omega \mu_g \rho_g}{2(1 + j\omega \epsilon_g \rho_g)}} \quad (3.7)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{j\omega \mu_g}{2\rho_g} (1 + j\omega \epsilon_g \rho_g)} \quad (3.8)$$

Eşitlik (3.4) – (3.8)’den yatay topraklama iletkeni empedansının karmaşık ve frekansa bağımlı olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, her bir frekans değeri için yatay topraklama iletkeninin farklı bir tepki vereceği söylenebilir.

Yatay topraklama iletkenlerinin dağıtılmış parametreler ile modellenmesine dair temel sorun, literatürde birim parametre değerleri üzerinde bir mutabakat bulunmamasıdır [70, 71]. Bu durum güvenilir bir parametre seti seçimini ve dolayısıyla modelin kullanımını zorlaştırmaktadır.

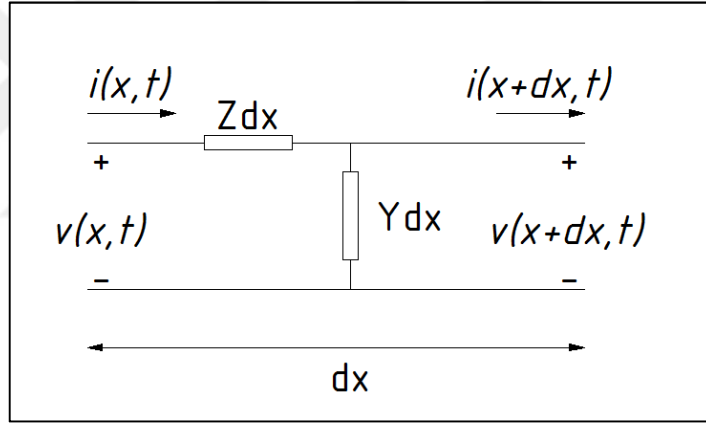


Şekil 3.2. Dağıtılmış parametre modeli etkin uzunluk değerlendirme [72]

Şekil 3.2’de, dağıtılmış parametreler ile modellenen bir yatay topraklama iletkeninin uzunluğu artırılarak, aynı yıldırım darbesine verdiği gerilim cevabı ölçülmüştür. Uzunluk değeri 20-100 m aralığında artırılınca impulsive empedans değeri yaklaşık 28 Ω değerinde sabitlenmiştir. Ancak uzunluk 280 m’ ye çıkarıldığında impulsive empedans değeri 33 Ω seviyesine yükselmiştir. Bu neticeye göre, topraklama iletkeninin uzunluğunun artırılması eşdeğer topraklama empedansını düşürmek yerine artırmaktadır. Bu durumun fiziksel gerçeklikle uyumlu olmayacağı açıktır.

Bu örnekte görülebileceği üzere, dağıtılmış parametre modeli impulsive empedans ve buna bağlı olarak etkin uzunluk değerini tespit etmekte yetersiz kalmaktadır. Bu sorunun, hesaplama yönteminin homojen ortam varsayımı sebebiyle toprak hava geçişini ihmal etmesinden ya da birim iletken parçaları arasındaki etkileşimin gerçekte olduğundan daha fazla hesaplanmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir [72].

Yatay topraklama iletkenleri için kullanılabilecek bir diğer model de Bölüm 2’de anlatılan döngü eşitliklerine dayalı iletim hattı modelidir. Şekil 2.7’de verilen tek iletkenli kablo modelinden yalıtkan katman çıkarıldığında yatay topraklama iletkeni elde edilebilir. Bu durumda yalıtkan admitansı da sonsuz olacağı için devrenin admitansı toprak admitansına eşit olacaktır. Bu yöntem ile modellenen bir yatay topraklama iletkeninin eşdeğer devresi Şekil 3.3’te verilmiştir [32].



Şekil 3.3. Yatay topraklama iletkeni iletim hattı modeli

Bu devrede akım ve gerilim arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$-\frac{dV}{dx} = Z \cdot I \quad (3.9)$$

$$-\frac{dI}{dx} = Y \cdot V \quad (3.10)$$

$$Z = Z_{c-out} + Z_{cg} + Z_g \quad (3.11)$$

$$Y = \gamma_g^2 / Z_g \quad (3.12)$$

Bu yöntem kullanılarak yatay topraklama iletkenlerini modellemek mümkün olmasına rağmen, literatürde bu model sıklıkla kullanılmamaktadır. Bunun temel sebeplerinin, parametrelerin frekansa bağımlı olması ve toprak dönüş empedansının hesaplanmasını gerektirmesi olduğu düşünülebilir.

Bu tez çalışmasında yatay topraklama iletkenleri ile kablo ekranlarının paralel çalışmaları durumları incelenecektir. Dağıtılmış parametrelili modelde yatay topraklama iletkeninin diğer iletkenler ile etkileşimin modellenmesi imkansız değilse de oldukça zordur. Ancak döngü eşitliklerine bağlı iletim hattı modelinde diğer iletkenler ile olan etkileşim nispeten kolayca modellenebilir. Bu amaçla kablo ile yatay topraklama iletkeni çoklu iletken modelinin alt unsurları olarak ele alınıp bu sistemin empedans ve admitans matrisleri Bölüm 2.4' te anlatıldığı şekilde bulunabilir.

Yukarıda anlatılan uygulama kolaylıkları dikkate alınarak, bu tez çalışması kapsamında döngü eşitliklerine dayalı iletim hattı modeli kullanılacaktır. Bu modelin PSCAD-EMTDC içerisinde uygulanmasına dair detaylar ilerleyen bölümlerde verilecektir.

4. RÜZGAR SANTRALİ TOPRAKLAMA SİSTEMİ MODELİ

Bu bölümde benzetim çalışmalarında kullanılacak topraklama sistemi bileşenlerinin nasıl modellendiği ele alınacaktır.

4.1. Yıldırım Darbesi Modeli

Yıldırım darbeleri tepe zamanları, kuyruk zamanları ve tepe değerleri ile tarif edilebilir. Bu parametreler keraunik seviye ve konum özelliklerine göre değişiklik gösterir. Ayrıca ilk darbe ve müteakip darbenin parametreleri de birbirlerinden önemli ölçüde farklıdır.

Rüzgar santrali topraklama sistemlerinin analizi konusunda yapılan çalışmalarda farklı karakteristiklere sahip birçok dalga şekli kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında modellenecek dalga şekilleri için IEC 62305-1’de tavsiye edilen parametreler kullanılacaktır [73]. Buna göre, tepe zamanı ve kuyruk zamanı değerleri ilk darbe için sırasıyla 10 µs ve 350 µs, müteakip darbe için ise sırasıyla 0,25 µs ve 100 µs olarak alınacaktır.

Yıldırım darbelerinin tepe zamanları darbenin frekans içeriğine de işaret etmektedir. Tepe zamanı kısa olan dik darbelerde yüksek frekans bileşenleri baskındır. Bu darbe türü bundan sonra “hızlı darbe” olarak ifade edilecektir. Tepe zamanı nispeten uzun olan darbeler ise daha düşük frekanslı bileşenler içerirler. Bu darbeler de bundan sonra “yavaş darbe” olarak ifade edilecektir.

Yıldırım darbeleri uygulama kolaylığı sebebiyle genellikle çift eksponansiyel dalga yapısı ile modellenirler. Bu modele dair eşitlik aşağıda verilmiştir;

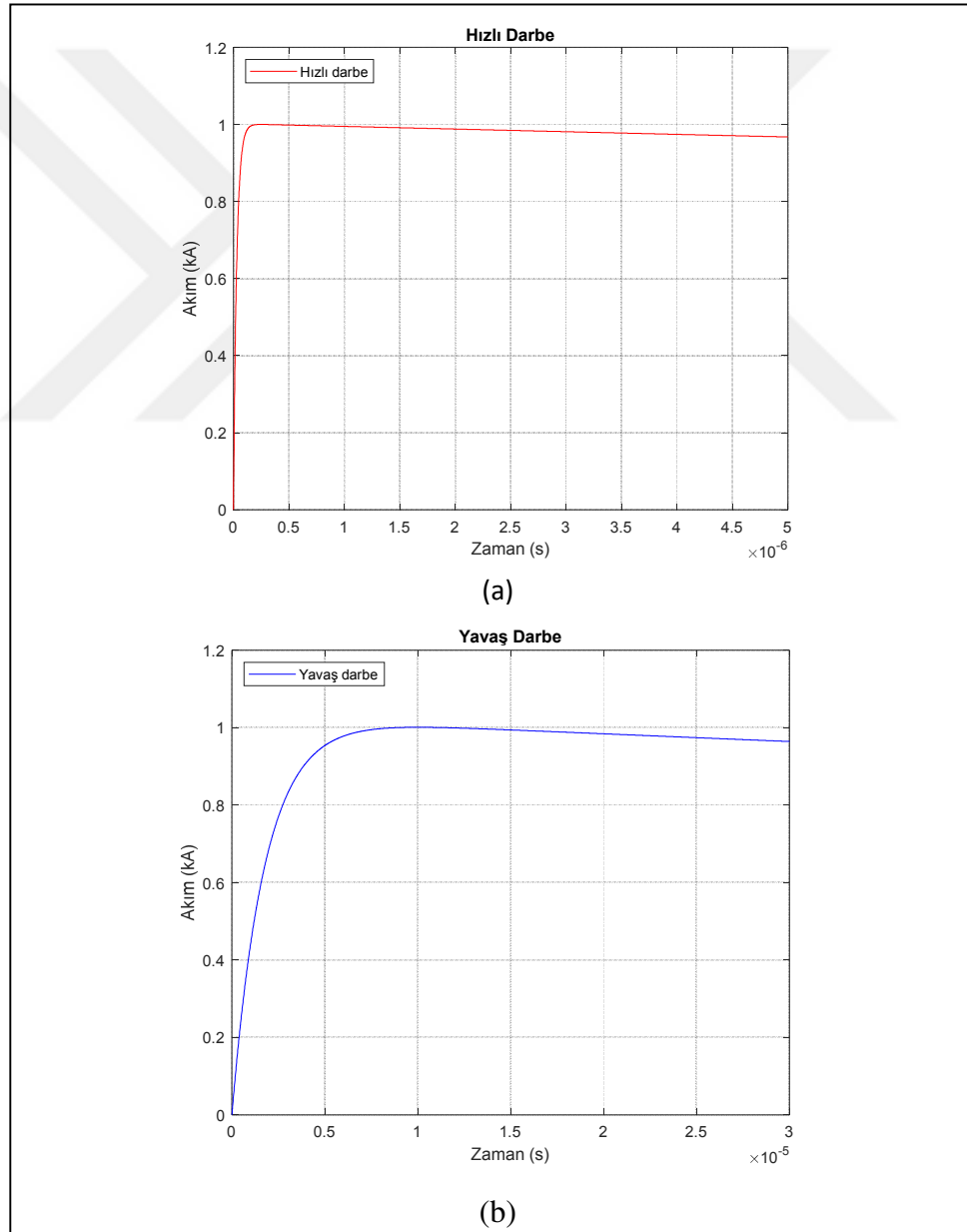
$$i(t) = A.I.(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (4.1)$$

Burada, I akım tepe değerini, A, α ve β ise dalga şekli parametrelerini ifade etmektedir. IEC 62305-1’de tavsiye edilen dalga şekillerine dair parametreler Tablo 4.1’de verilmiştir [74];

Tablo 4.1. Yıldırım darbesi parametreleri

Parametre	0,25/100 μs	10/350 μs
A	1,002	1,025
α	7e3	2,05e3
β	3,4e7	5,64e5

Yıldırım darbe akımının tepe değeri tüm benzetim çalışmalarında 1 kA olarak alınacaktır. Böylece elde edilen gerilim dalga şeklinin tepe değeri aynı zamanda impulsive empedans değerine eşit olacaktır. Tablo 4.1’ de verilen parametreler ile oluşturulan dalga şekilleri Şekil 4.1’ de verilmiştir;



Şekil 4.1. Yıldırım darbeleri dalga yapıları, a) Hızlı darbe, b) Yavaş darbe

4.2. Türbin Gövdesi ve Kanadı Modeli

Yıldırım darbeleri genellikle türbin kanatlarına monte edilen alıcılara isabet ederler. Dolayısıyla yıldırım toprağa ulaşana kadar türbin kanadı ve türbin gövdesi üzerinden geçer. Toprağa ulaşan dalga yapısının detaylı analizi için türbin gövde ve kanatlarının surge empedanslarını esas alan modeller kullanılması gerekebilir [75].

Bu tez çalışması çerçevesinde, tanımlı bir uygulamaya dair detaylı bir değerlendirme yapmak değil, daha ziyade yıldırım darbesinin türbin topraklama sistemi, yatay topraklama iletkeni ve kablo ekranı arasındaki dağılımını incelemek hedeflenmektedir. Bu sebeple türbin gövdesi ve kanadı tamamen ihmal edilecek, yıldırım darbesinin türbin tabanındaki eş potansiyel baraya uygulandığı varsayılacaktır.

4.3. Türbin Temel Topraklaması Modeli

Rüzgar türbini temel topraklaması Bölüm 1' de anlatıldığı gibi, genellikle temel dışındaki bir çember elektrot ve buna bağlı dikey elektrotlar ile temel içerisindeki çember elektrotlardan oluşmaktadır. Bu topraklama sisteminin detaylı olarak modellenebilmesi için elektromanyetik analiz yönteminin kullanılması gerekir.

Tüm elektrotların nispeten sınırlı bir alan içerisinde bulunduğu ve sistemin bir bütün olarak çalıştığı göz önüne alınırsa, bu topraklama sistemi eşdeğer bir direnç elemanı ile modellenebilir. Her ne kadar bu eşdeğer direnç doğrusal olmayan bir karakter gösterse de, analiz kolaylığı dikkate alınarak bu doğrusal olmayan karakter genellikle ihmal edilir [76, 77].

Bu tez çalışması kapsamında türbin topraklama sistemi düşük frekans bölgesinde ölçülen eşdeğer topraklama direnci ile modellenecektir.

4.4. Toprak Yapısı Modeli

Toprak özgül direncinin düşük olduğu, ya da çok yüksek olmadığı durumlarda, yatay topraklama iletkenleri kullanarak ve topraklama alanını genişleterek topraklama empedansını IEC 61400-24'te tanımlanan eşik değerin altına indirmek genellikle mümkün olabilmektedir. Ancak çok yüksek özgül dirence sahip toprak yapılarında topraklama sisteminin daha detaylı olarak incelenmesi gereklidir. Bu tez çalışması kapsamında yüksek özgül dirence sahip toprak yapılarında ve yüksek frekans bölgesinde topraklama sisteminin davranışı incelenmektedir. Bu bağlamda yapılacak benzetim çalışmalarında, yüksek özgül dirençli ve çok yüksek özgül dirençli olmak üzere iki tip toprak yapısı kullanılacaktır. Bu toprak yapılarına dair parametreler Tablo 4.2'de verilmiştir;

Tablo 4.2. Toprak yapısı parametreleri

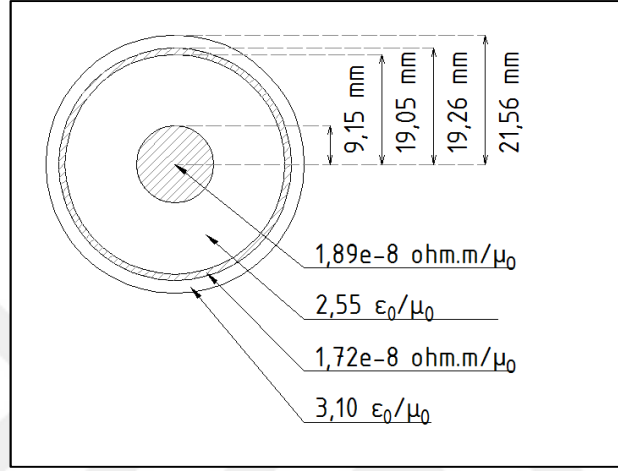
Parametre	Tip 1	Tip 2
Özgül direnç (ρ)	500 Ω .m	5.000 Ω .m
Görelî permittivity (ϵ_r)	4	4

Bu parametreler ile Eşitlik (2.91)'de verilen iletim hattı modeli geçerlilik bölgesi sınır frekansları hesaplandığında, Tip 1 ve Tip 2 toprak yapıları için sırasıyla 28 MHz ve 2,8 MHz değerleri bulunmaktadır. Bu sınır değerleri, yıldırım darbelerinin incelenmesi için yeterince yüksek kabul edilebilir.

Yıldırım darbeleri bir elektrot üzerinden toprağa yayılırken elektrot çevresinde oluşan yüksek akım yoğunluğu toprak içerisinde bir iyonizasyona yol açabilir. Bu iyonizasyon etkisi topraklama iletkeninin eşdeğer yarıçapını genişletilerek modellenebilir. Toprak iyonizasyonu kısa elektrotlar için önem arz etse de, uzun elektrotlar için bu fenomenin topraklama empedansına etkisi oldukça sınırlıdır [10]. Bu sebeple bu tez çalışması kapsamında toprak iyonizasyonu ihmal edilecektir.

4.5. OG Kablo Modeli

Bu tez çalışması kapsamında kullanılacak olan orta gerilim kablosu, rüzgar santrallerinde sıklıkla kullanılan 36 kV, XLPE izoleli, ekranlı, 240 mm² kesitli bir kablo olarak belirlenmiştir. Kablonun parametreleri Şekil 4.2’de verilmiştir. Kablonun gerçek boyut ve malzeme bilgileri ise Ek-A’ da verilmiştir.



Şekil 4.2. OG kablo bilgileri

Bölüm 2.7’ de bahsedildiği üzere, bu tez çalışması kapsamında PSCAD-EMTDC içerisindeki frekansa bağlı faz modeli kullanılacaktır. Ancak bu modelde tam yayılım sabiti kullanılamamakta ve toprak admitansı modellenememektedir. Bu hususlar yüksek frekans bölgesinde kablo modellemesi için önem arz ettiğinden, program içerisindeki modelde bazı değişiklikler yapılması gerekmiştir.

PSCAD/EMTDC kablo modellerinde toprak görelî permittivity’si modelde tanımlanamadığı için tam yayılım sabiti kullanmak mümkün olamamaktadır. Bir başka deyişle, bu modelde düşük frekans yaklaştırması kullanılmakta ve buna bağlı olarak displacement akımları tamamen ihmal edilmektedir. Bölüm 2.6.1’ de anlatıldığı üzere, yüksek özgül dirençli toprak yapılarında displacement akımlarının ihmal edilmesi yüksek frekans bölgesinde önemli ölçüde hataya yol açmaktadır.

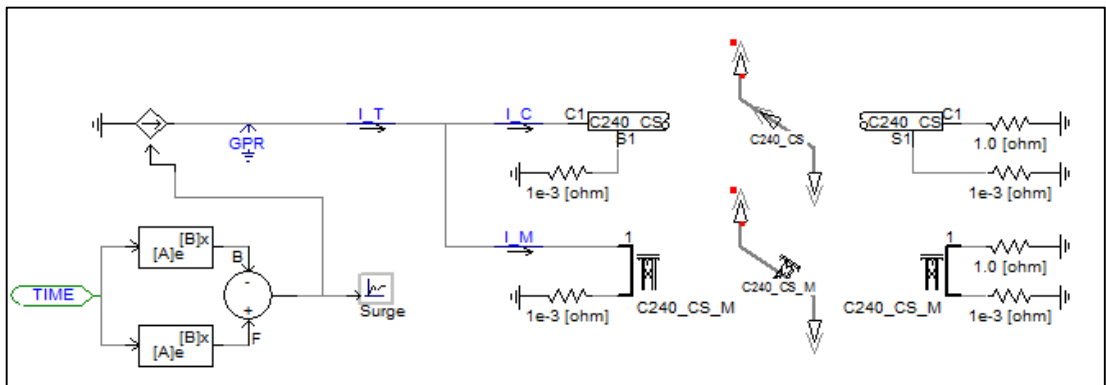
Söz konusu modeldeki bir diğer eksiklik de toprak admitansının ihmal edilmesidir. Bu admitansın hesaba katılması hem izole kablolar, hem de bir sonraki bölümde anlatılacağı üzere, çıplak iletkenler için büyük önem arz etmektedir.

Yukarıda anlatılan sorunların aşılabilmesi için PSCAD/EMTDC kablo modeli içerisindeki “Manual Data Entry” (MDE) bileşeni kullanılarak bir çözüm geliştirilmiştir. Bu uygulamada, kablo modelinin empedans ve admitans matrisleri program dışında hesaplanıp model içerisine yüklenebilmektedir. Böylece istenen temel hesaplama yöntemi değişiklikleri program dışında yapıлып, devre çözümü için yine PSCAD/EMTDC kullanılabilir.

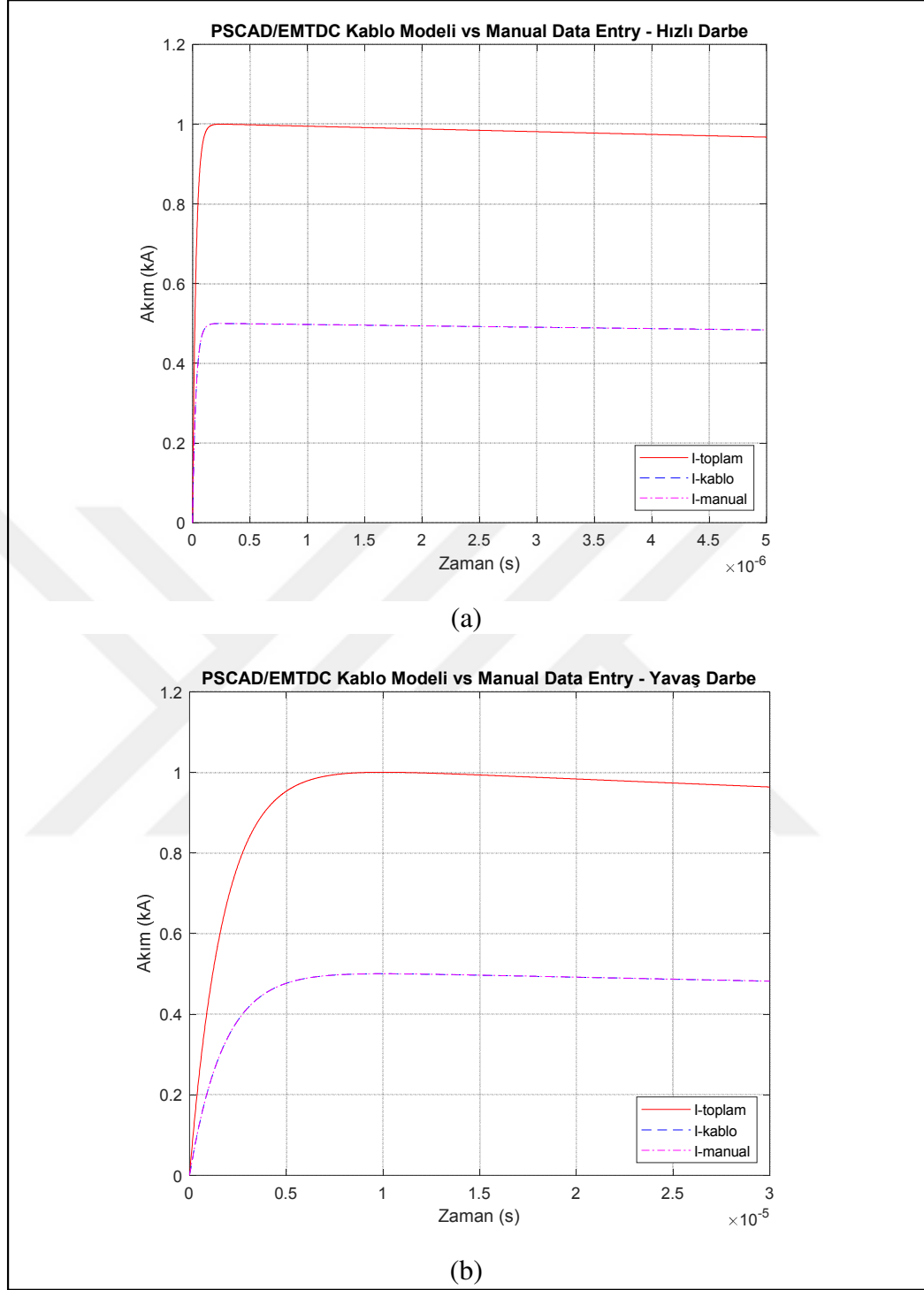
Frekansa bağlı faz modelinde, tanımlı bir frekans aralığında yine tanımlı sayıda empedans ve admitans matrisi hesaplanır ve dahili bir eğri uydurma metodu ile tüm frekans alanında geçerli bir model elde edilir. Bu tez çalışması kapsamında, söz konusu empedans ve admitans matrisleri Matlab programı ile hesaplanmış ve bu programdan alınan çıktılar PSCAD/EMTDC içerisinde kullanılmıştır.

Matlab kodu içerisinde, toprak dönüş empedansları Theodoulidis yöntemiyle ve tam yayılım sabiti kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca admitans matrislerinde toprak admitansı da hesaba katılmıştır. Empedans ve admitans matrisleri 0,5 Hz – 1 MHz aralığında logaritmik olarak eşit mesafeli 100 örnek için hesaplanmıştır. Matris hesaplarında kullanılan Matlab kodları Ek-B’de verilmiştir.

MDE yöntemi ile oluşturulan kablo modelinin doğru çalıştığını teyit etmek amacıyla, örnek kablo modeli hem tanımlanan yöntemle hem de PSCAD/EMTDC standart kablo elemanı ile modellenmiştir. Karşılaştırma yapılabilmesi için toprak görelî permittivity’si 0 alınmış ve toprak admitansı ihmal edilmiştir. Kullanılan benzetim devresi Şekil 4.3’te, hızlı ve yavaş darbelere verilen gerilim cevapları ise Şekil 4.4’te verilmiştir.



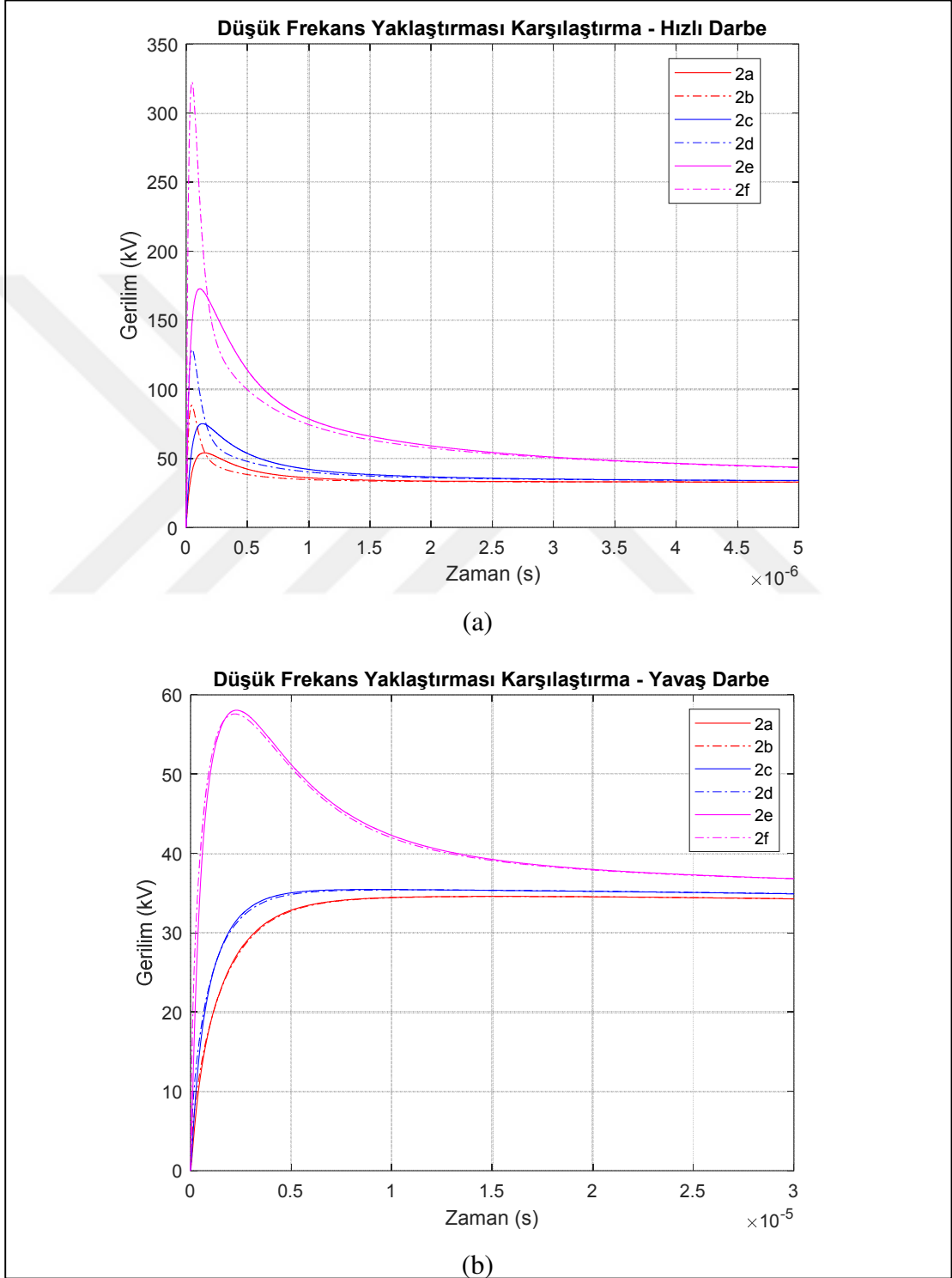
Şekil 4.3. OG kablo modeli doğrulama devresi



Şekil 4.4. Yıldırım darbesi tepki karşılaştırması, a) Hızlı darbe, b) Yavaş darbe

Şekil 4.4’ te görülebileceği üzere, PSCAD/EMTDC kablo modelinin tepkisi ile MDE modelinin tepkisi birebir örtüşmektedir. Aynı değerlendirme kablo ekranına uygulanan darbeler için de yapılmış ve yine aynı sonuç alınmıştır. Dolayısıyla MDE yöntemi ile oluşturul kablo modelinin PSCAD/EMTDC içerisinde sağlıklı çalıştığı teyit edilmiştir.

PSCAD/EMTDC standart kablo modelinin içerisinde uygulanan düşük frekans yaklaştırmasının ne ölçüde hataya yol açtığını tespit etmek amacıyla Tablo 4.3' te verilen parametrelerle bir karşılaştırma çalışması yapılmıştır. Çalışma sonuçları Şekil 4.5' te verilmiştir.



Şekil 4.5. Düşük frekans yaklaştırması karşılaştırması, a) Hızlı darbe, b) Yavaş darbe

Tablo 4.3. Düşük frekans yaklaştırması karşılaştırma çalışması parametreleri

Parametre	2a	2b	2c	2d	2e	2f
Uzunluk (m)	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Özgül direnç (ρ) ($\Omega.m$)	500	500	1000	1000	5.000	5.000
Görelî permittivity (ϵ_r)	40	0	20	0	4	0

Şekil 4.5'te görülebileceği üzere, hızlı darbeler için düşük frekans yaklaştırmasının kullanılması impulsive empedans (Z_p) değerinin ölçülmesinde %50'ye varan ölçüde hataya yol açmaktadır. Görelî permittivity değeri düştükçe hata oranının azaldığı, yavaş darbe durumunda ise düşük frekans yaklaştırmasının mühim bir etkisi olmadığı görülmektedir.

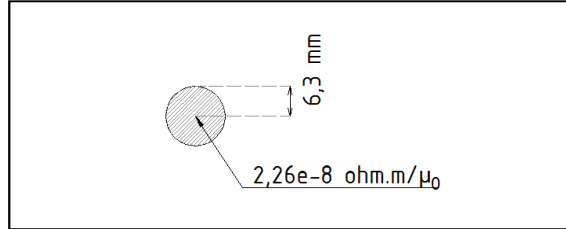
Yukarıda belirtilen bulgular, önceki bölümlerde teorik olarak izah edilen, yüksek frekans bölgesindeki toprak davranışını teyit etmektedir. Buna göre, displacement akımlarının ihmal edilmesi, hesaplanan toprak dönüş empedansının gerçekte olduğundan daha yüksek çıkmasına yol açmaktadır. Doğal olarak, ihmal edilen permittivity değeri arttıkça, gerçek değer ile hesap edilen değer arasındaki fark da artmaktadır.

Yavaş darbeler, hızlı darbelere göre daha düşük frekans bileşenlerine sahip oldukları için bu darbelerin karşılaştıkları toprak empedansları hızlı darbelere göre çok daha düşük olmaktadır. Dolayısıyla düşük frekans yaklaştırmasının etkisi hızlı darbelere göre çok daha sınırlı kalmaktadır.

MDE bileşeni kullanılarak oluşturulan kablo modeli, yüksek frekans bölgesinde hassasiyeti kanıtlanmış bir toprak dönüş empedansı modelini (Theodoulidis), displacement akımların etkisini dikkate alabilmek için düşük frekans yaklaştırması yerine tam yayılım sabitini ve kablo dış izolasyon admitansına seri bir toprak admitansı modelini içermektedir. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar teorik açıklamalar ile uyum göstermekte ve kullanılan modelin sağlıklı çalıştığını teyit etmektedir.

4.6. Yatay Topraklama İletkeni Modeli

Bu tez çalışması kapsamında kullanılacak olan yatay topraklama iletkeni 95 mm^2 çıplak bakır iletken olarak belirlenmiştir. İltkenin parametreleri Şekil 4.6'da verilmiştir. İletkenin gerçek boyut ve malzeme bilgileri ise Ek-A' da verilmiştir.



Şekil 4.6. Yatay topraklama iletkeni bilgileri

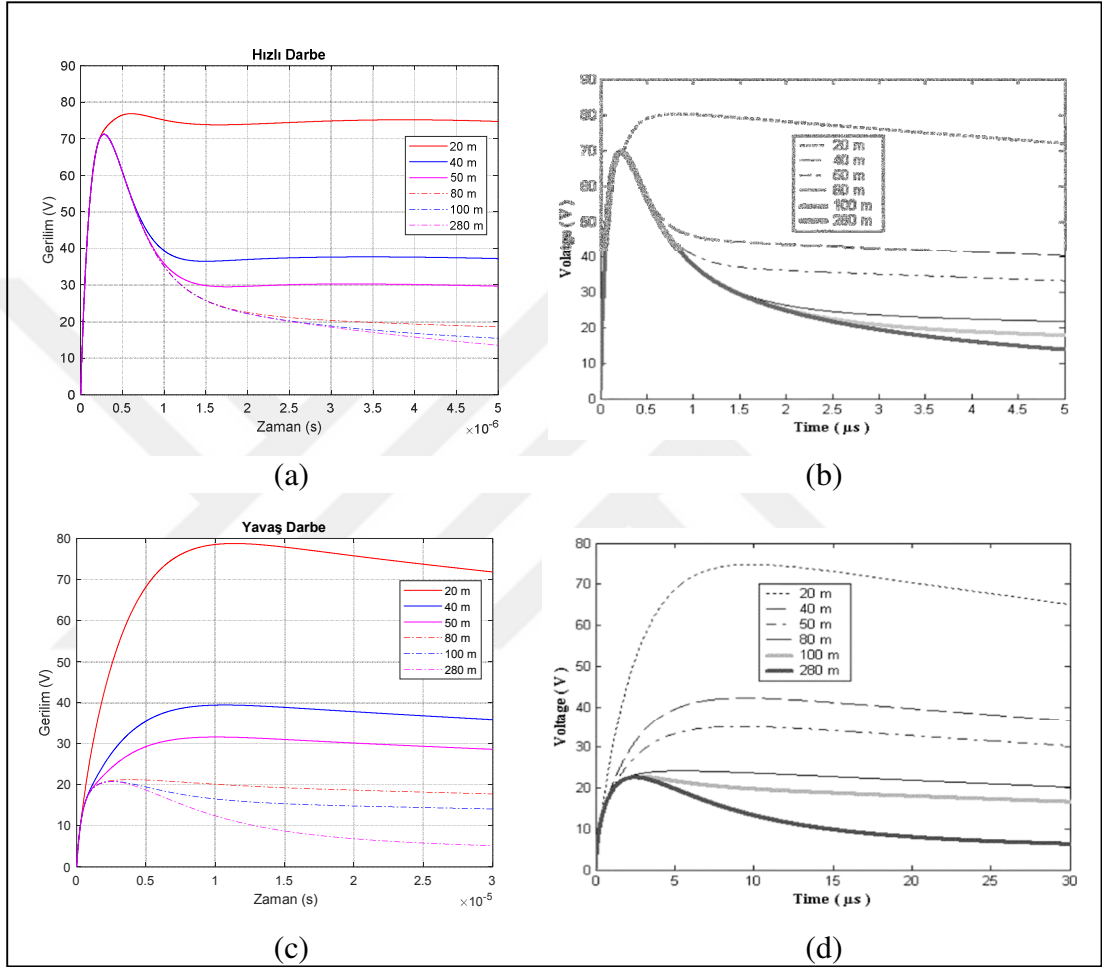
Bölüm 3'te anlatıldığı üzere, bu tez çalışması kapsamında yatay topraklama iletkenleri için döngü eşitliklerine dayalı iletim hattı modeli kullanılacaktır. Bu modelin PSCAD/EMTDC gibi programlarda uygulanması bir takım zorluklar içermektedir. Literatürdeki uygulamalarda genel kabul gördüğü üzere, toprak admitansı ihmal edildiği durumda, iletkenin tamamı toprak potansiyelinde olacaktır. EMT tipi programların tamamen toprak potansiyelinde olan iletkenler için empedans ve admitans matrislerinde satır ve sütun azaltma işlemi yapılır [38]. Bu durumda program iletkene bağlantı için bir terminal oluşturmamakta, dolayısıyla iletkene erişim imkanı bulunmamaktadır.

Bu sorun esasen toprak admitansının ihmal edilmesiyle ilintilidir. Toprak admitansı hesaba katıldığında, Şekil 3.3'te verildiği gibi iletken ile toprak arasındaki sürekli bağlantı kesilmekte ve iletken topraktan farklı bir potansiyel seviyesine ulaşmaktadır. Dolayısıyla, MDE bileşeni kullanılarak toprak admitansı modellenirse iletkene erişim mümkün olmaktadır. İlgili empedans ve admitans matrislerinin (1x1) parametreleri Eşitlik (3.11) ve Eşitlik (3.12)'de verilmiştir.

Yukarıda tarif edilen yöntem ile modellenen bir topraklama iletkeninin doğru çalıştığını teyit etmek amacıyla, referans olarak kabul edeceğimiz [72] makalesinde verilen örnek için bir karşılaştırma çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada toprak özgül direnci $1.000 \Omega.m$, göreceli permittivity değeri ise 4 olarak alınmıştır. Karşılaştırma çalışmasında kullanılan yıldırım darbesi parametreleri Tablo 4.4'te, karşılaştırma sonuçları ise Şekil 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.4. Referans çalışmadaki yıldırım darbesi parametreleri

Parametre	Hızlı darbe	Yavaş darbe
A	1,00	1,00
α	27e3	7.924
β	5,6e6	400.109



Şekil 4.7. Düşük frekans yaklaşıması karşılaştırması, a) MDE model (hızlı darbe), b) Referans model (hızlı darbe) [72], c) MDE model (yavaş darbe), d) Referans model (yavaş darbe) [72]

Şekil 4.7' den görülebileceği üzere, PSCAD/EMTDC içerisinde MDE bileşeni kullanılarak oluşturulan model referans model ile hem impulsive empedans hem de etkin uzunluk konusunda birebir uyumlu çalışmaktadır. Literatürdeki başka çalışmalar ile yapılan karşılaştırmalar da, tez kapsamında geliştirilen modelin literatür ile uyumlu çalıştığını teyit etmektedir.

5. BENZETİM ÇALIŞMALARI

5.1. Genel Açıklamalar

Bu bölümde, önceki bölümlerde detayları anlatılan modelleme yöntemleri kullanılarak oluşturulan örnek bir rüzgar santrali modeli üzerinde yıldırım darbesi analizleri yapılacaktır.

Bölüm 1.3' te anlatıldığı üzere, topraklama sistemlerinin yüksek frekans bölgesindeki performanslarını incelerken impulsive topraklama empedansı (Z_p) değerini referans almak en verimli yöntemdir. Bu bölümde yapılacak benzetim çalışmalarında, uygulanan yıldırım darbesinin topraklama sistemi üzerinde oluşturduğu gerilim cevabının tepe değeri, dolayısıyla topraklama sisteminin Z_p değeri incelenecektir. Uygulanacak akımın tepe değeri 1 kA olacağı için elde edilen gerilim cevabının tepe değeri doğrudan Z_p değerini verecektir.

Benzetim çalışmalarında, türbin topraklama direnci, yatay topraklama iletkeni ve kablo ekranından oluşan birleşik topraklama sisteminin performansı incelenecektir. Bu amaçla yıldırım darbe tipi, iletken uzunluğu, toprak özgül direnci, türbin eşdeğer topraklama direnci gibi parametreler değiştirilerek sistemin birleşik cevabı ve sistem bileşenleri arası etkileşim incelenecektir.

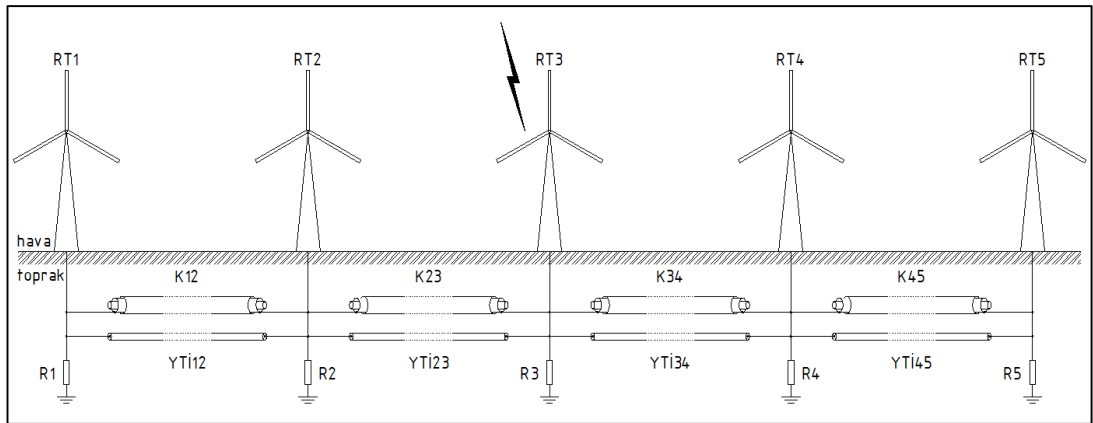
Benzetim çalışmalarında Bölüm 4.1'de detayları verilen hızlı ve yavaş yıldırım darbeleri kullanılacaktır. Bu darbelere verilen gerilim cevabının daha ziyade tepe değeri ile ilgilenileceği için analiz süresi hızlı darbe için 30 μ s, yavaş darbe için ise 5 μ s olarak alınacaktır.

PSCAD/EMTDC programı yürüyen dalgalar esasına göre çalıştığı için, benzetim çalışmalarında kullanılan adım süresinin iletkenin karşı ucuna varış süresinden daha kısa olması gereklidir. Birkaç metre uzunluğundaki iletkenleri bile modelleyebilmek için adım süresi 0,001 μ s olarak seçilmiştir.

Benzetim çalışmalarında kullanılan toprak modelleri seçilirken iletim hattı modelinin geçerlilik sınırlarının aşılmış aşılmadığı Eşitlik (2.91) kullanılarak kontrol edilmiştir. Ortak bir taban kullanmak amacıyla toprak görelî permittivity değeri tüm çalışmalarda 4 olarak alınmıştır.

Bölüm 1.1’de verilen örnek topraklama sisteminde yaklaşık 500 $\Omega.m$ olan bir toprak özgül direnci yine yaklaşık olarak 10 Ω değerinde bir türbin topraklama direncine tekabül etmektedir (bkz. RT #8). Yine benzeri şekilde, yaklaşık 5.000 $\Omega.m$ olan bir toprak özgül direnci yaklaşık olarak 100 Ω değerinde bir topraklama direncine tekabül etmektedir (bkz. RT #24). Bu değerlerden ilki IEC 61400-24’te tanımlanan kabul edilebilir en yüksek topraklama direncine, ikincisi ise bu çalışma kapsamında değerlendirilecek en kötü topraklama durumuna işaret etmektedir. Benzetim çalışmaları yüksek ve çok yüksek özgül dirençli toprak durumları için yapılacak ve toprakta özgül direnci için 500 $\Omega.m$ ve 5.000 $\Omega.m$ değerleri kullanılacaktır. Tablo 1.1’den görülebileceği üzere, toprak özgül direnci 5.000 $\Omega.m$ ’nin çok üzerinde olan örnekler de mevcuttur. Ancak bunların oldukça istisnai olduğu dikkate alınarak çalışmalarda 5.000 $\Omega.m$ değeri toprak özgül direnci için sınır değer kabul edilecektir.

Benzetim çalışmalarında kullanılacak rüzgar santrali modeli Şekil 5.1’de verilmiştir. Çalışmaların bazılarında bu sistemin tamamı, bazılarında ise sadece bir kısmı kullanılacaktır.



Şekil 5.1. Örnek rüzgar santrali modeli

Bölüm 4.2’de anlatıldığı üzere, bu tez çalışması kapsamında rüzgar türbini gövde ve kanatlarının empedansları ihmal edilecektir. Dolayısıyla yukarıdaki şekilde türbin gövde ve kanatları sadece görsel amaçlarla ifade edilmiştir.

Bu bölümde toplam dört benzetim çalışması yapılacaktır. İlk çalışmada yatay topraklama iletkeninin yıldırım darbesine karşı tepkisi incelenecektir. Bu çalışmada elde edilecek Z_p değerleri ilerleyen çalışmalar için referans teşkil edecektir.

İkinci benzetim çalışmasında, iki uçtan türbin topraklama sistemlerine bağlı bir yatay topraklama iletkeninin yıldırım darbesine tepkisi incelenecektir. Ayrıca, türbin topraklama dirençlerinin değişiminin toplam sistemin cevabına olan etkisi değerlendirilecektir.

Üçüncü benzetim çalışmasında, birbirlerine yatay topraklama iletkenleriyle bağlı beşli bir rüzgar türbini zincirinde, ortadaki türbine yıldırım darbesi uygulanarak sistemin cevabı incelenecektir. Burada komşu topraklama sistemlerindeki değişimin birleşik topraklama sisteminin gerilim cevabına etkisi ele alınacaktır.

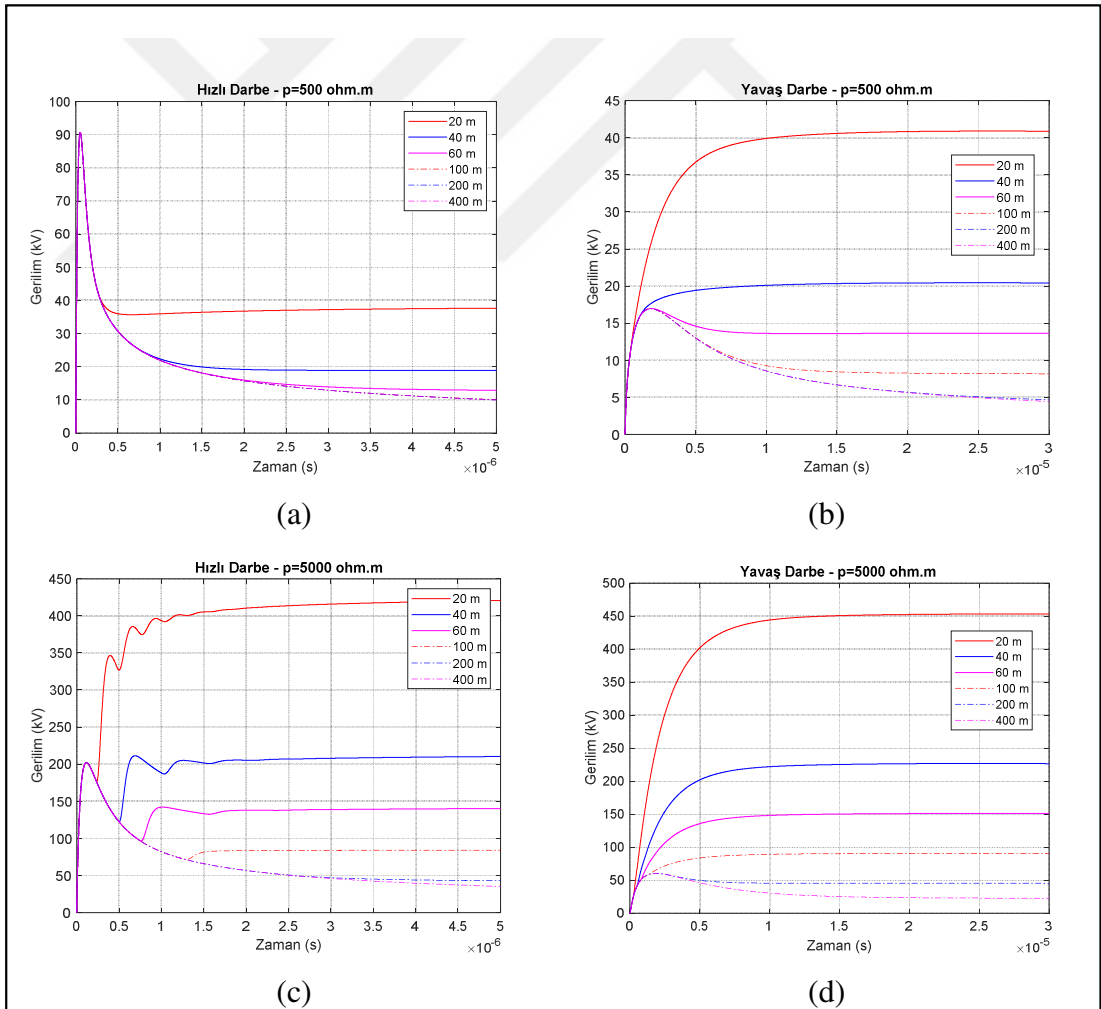
Dördüncü benzetim çalışmasında, bir önceki çalışmada kullanılan beşli rüzgar türbini zincirinde, yatay topraklama iletkenine paralel olarak bağlanan bir kablo ekranının topraklama sistemine olan etkisi incelenecektir. Bu çalışmanın genişletilmiş bir versiyonu olarak çoklu kablo sistemlerinin topraklama sistemine etkileri de değerlendirilecektir. Ayrıca yine bu çalışma içerisinde, iki uçtan türbin topraklama sistemlerine bağlı bir yatay topraklama iletkeni ve bir kablo ekranı arasındaki akım paylaşımı da incelenecektir.

5.2. Çalışma 1 - YTI Etkin Uzunluk Analizi

Bu benzetim çalışmasında iki ucu boşta duran bir yatay topraklama iletkenine yıldırım darbesi uygulanacak ve iletkenin yıldırım darbesine tepkisi incelenecektir. Benzetim çalışmasında kullanılan parametreler Tablo 5.1'de, analiz sonuçları ise Şekil 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Benzetim çalışması 1 parametreleri

Parametre	Analiz 1	Analiz 2
İletken uzunluğu	20-400 m	20-400 m
Özgül direnç (ρ)	500 Ω .m	5.000 Ω .m



Şekil 5.2. Benzetim çalışması 1 – Düşük frekans yaklaşırtması karşılaştırması, a) Analiz 1 (hızlı darbe), b) Analiz 1 (yavaş darbe), c) Analiz 2 (hızlı darbe), d) Analiz 2 (yavaş darbe)

Şekil 5.2'deki grafikler incelendiğinde, hızlı darbe için etkin uzunluk değerinin yavaş darbe için olan değerlerden çok daha kısa olduğu görülmektedir. Bu durum daha önceki bölümlerde izah edildiği üzere, yüksek frekanslı bileşenlerin düşük frekanslı bileşenlere göre çok daha hızlı zayıflamasından kaynaklanmaktadır.

Grafiklerden elde edilebilecek bir diğer sonuç, impulsive topraklama empedansı (Z_p) değerinin hem frekans hem de toprak özgül direnci ile doğru orantılı olarak artmasıdır. Yüksek frekans bölgesinde iletkenin dahili empedansları harici empedansı (toprak dönüş empedansı) karşısında ihmal edilebilecek ölçüde küçük kalmaktadır (bkz. Bölüm 2.5). Bu durumda iletken empedansının toprak dönüş empedansına eşit olduğu söylenebilir. Toprak dönüş empedansını hem frekans hem de özgül direnç ile doğru orantılı olduğu düşünülürse, Z_p değerinin toprak dönüş empedansı ile bağlantılı olarak arttığı söylenebilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, Z_p değerinin toprak dönüş empedansı ile eşit olmadığı, ancak buna bağlı olarak değişim gösterdiğidir.

Yine grafiklerden elde edilebilecek başka bir veri de etkin uzunluk değerleri ile ilgilidir. Etkin uzunluk değeri toprak özgül direnci ile birlikte artış göstermektedir. Bu durum daha evvel izah edilen fiziksel işleyiş ile uyumludur. Toprak özgül direnci arttıkça yüksek frekanslı bileşenlerin zayıflaması azalmakta ve iletken üzerinde daha uzak noktalara ilerleyebilmektedir. Bu ilerleyiş bir başka ifadeyle etkin uzunluğun artışı anlamına gelmektedir. Hızlı darbelerde etkin uzunluk değeri çok kısa olduğu için toprak özgül direnci değerinin değişiminden pratik olarak etkilenmemiştir.

Bu benzetim çalışmasında iletken uzunluğu 20 m ile 400 m arasında değiştirilmiştir. Pratik uygulamalarda iki rüzgar türbini arası en az mesafenin 250-300 m mertebesinde olabileceği düşünülürse, etkin uzunluk değerinin hemen her zaman türbinler arası mesafeden kısa olacağı söylenebilir. Şekil 5.2' den elde edilen sonuçlar Tablo 5.2'de özetlenmiştir.

Tablo 5.2. Benzetim çalışması 1 sonuçları

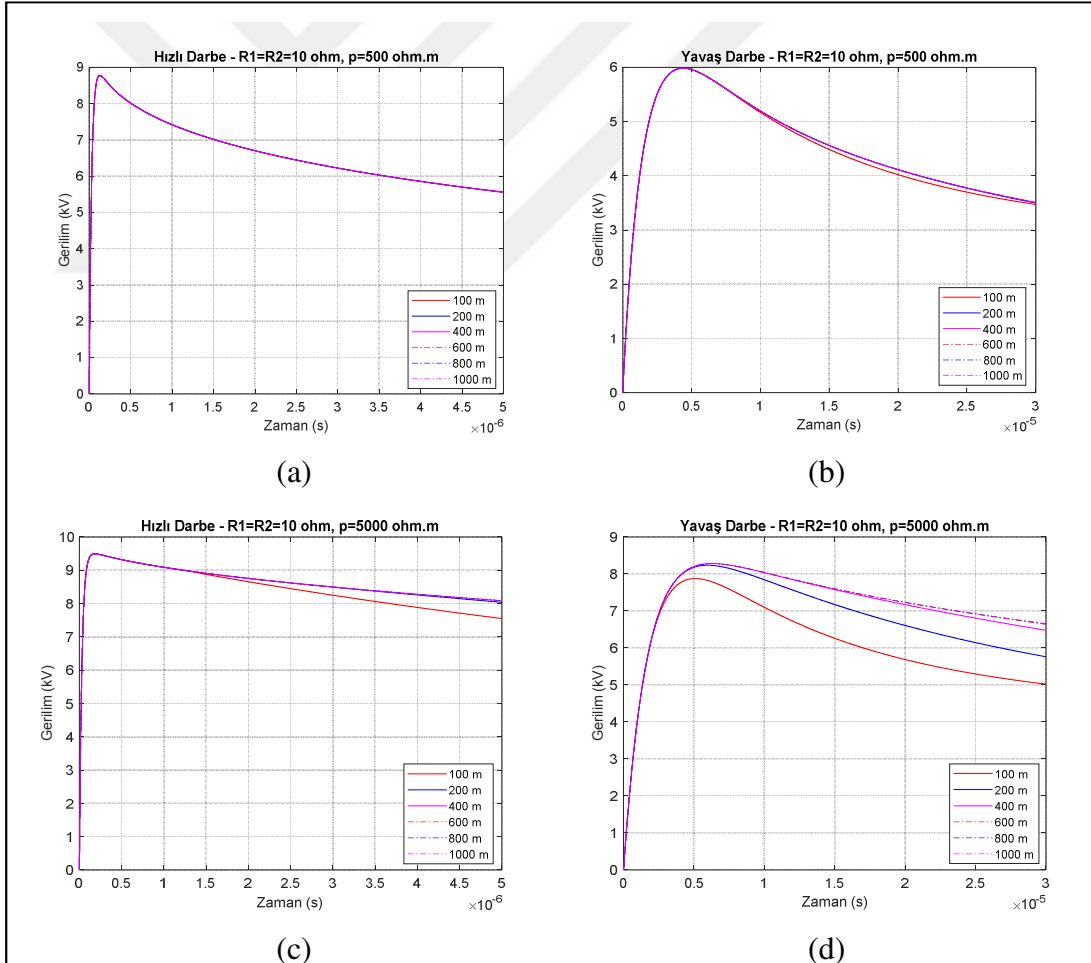
Parametre	Analiz 1		Analiz 2	
	Hızlı	Yavaş	Hızlı	Yavaş
Darbe tipi	Hızlı	Yavaş	Hızlı	Yavaş
Impulse empedansı (Z_p)	90 Ω	16 Ω	200 Ω	52 Ω
Etkin uzunluk	< 20 m	~ 60 m	< 20 m	~ 200 m

5.3. Çalışma 2 - İki RT Arası YTI'nin Impulsive Empedans Analizi

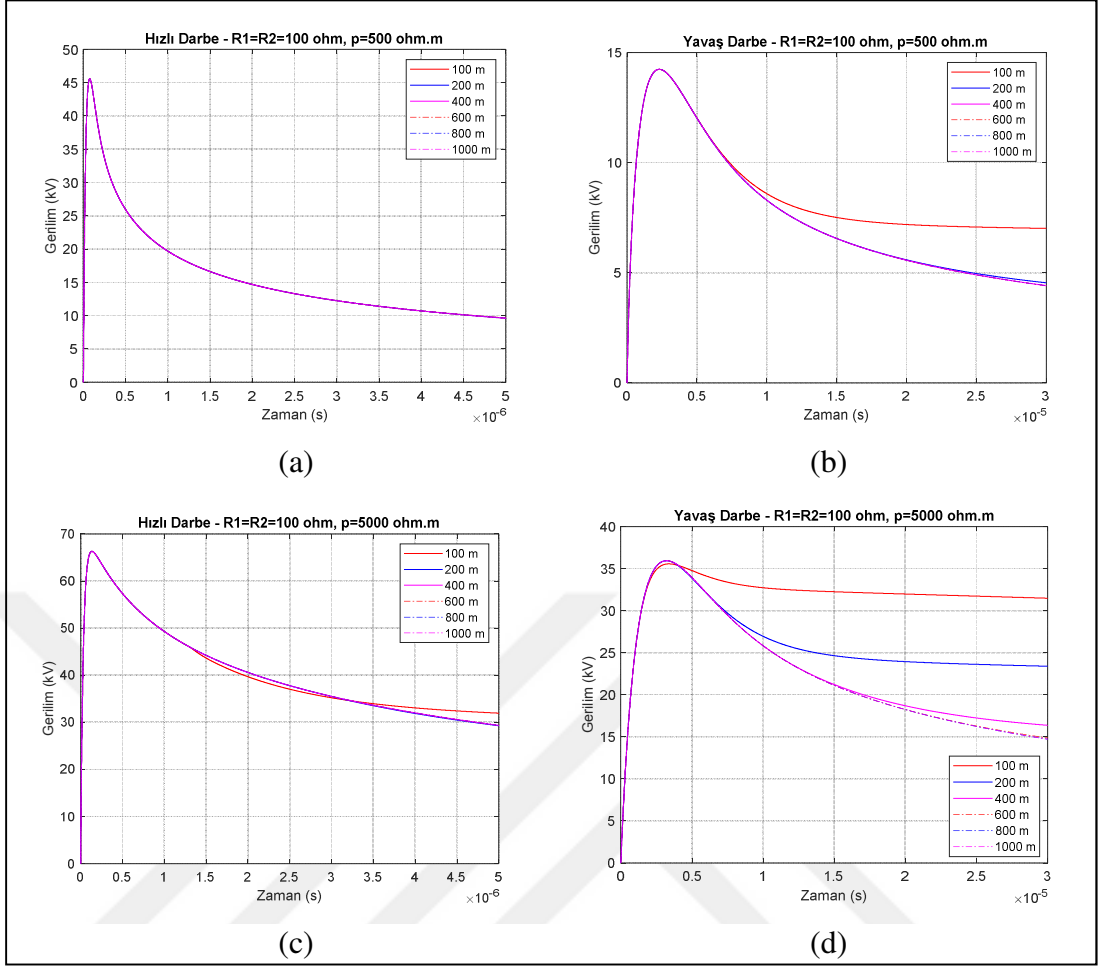
Bu benzetim çalışmasında iki uçtan türbin topraklama sistemlerine bağlı bir yatay topraklama iletkeninin yıldırım darbesine tepkisi incelenecektir. Analizlerde kullanılan parametreler Tablo 5.3'de, analiz sonuçları ise Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Benzetim çalışması 2 parametreleri

Parametre	Analiz 1a	Analiz 1b	Analiz 2a	Analiz 2b
İletken uzunluğu	100-1000 m	100-1000 m	100-1000 m	100-1000 m
R1	10 Ω	10 Ω	100 Ω	100 Ω
R2	10 Ω	10 Ω	100 Ω	100 Ω
Özgül direnç (ρ)	500 $\Omega.m$	5.000 $\Omega.m$	500 $\Omega.m$	5.000 $\Omega.m$



Şekil 5.3. Benzetim çalışması 2 – Analiz 1 grafikleri, a) Analiz 1a (hızlı darbe), b) Analiz 1a (yavaş darbe), c) Analiz 1b (hızlı darbe), d) Analiz 1b (yavaş darbe)



Şekil 5.4. Benzetim çalışması 2 – Analiz 2 grafikleri, a) Analiz 2a (hızlı darbe), b) Analiz 2a (yavaş darbe), c) Analiz 2b (hızlı darbe), d) Analiz 2b (yavaş darbe)

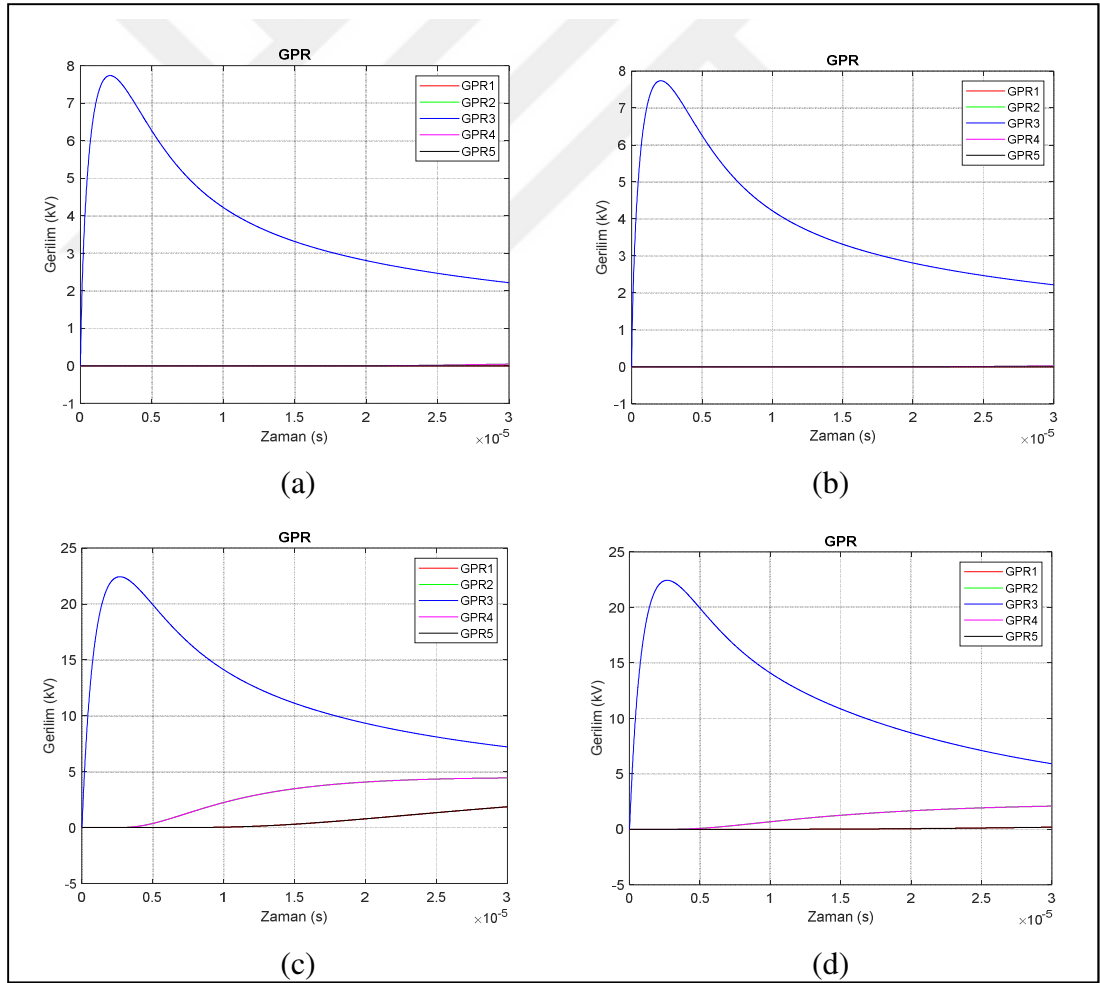
Bu benzetim çalışmasında kullanılan iletken uzunlukları pratik uygulamalarda karşılaşılabilecek türbinler arası mesafeler dikkate alınarak belirlenmiştir. Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’te verilen grafikler incelendiğinde iletken uzunluğunun artırılmasının Z_p değerini değiştirmedeği (Şekil 5.3d hariç) görülmektedir. Bu durumda pratik uygulamalarda, komşu türbin ile mesafenin uzun olmasının topraklama performansına bir katkı sağlamayacağı söylenebilir. Burada dikkat çeken bir diğer husus, Z_p değerinin türbin topraklama direnci ile yatay topraklama iletkeni Z_p değerinin paralel birleşimine yaklaşık eşit çıkmasıdır. Örneğin Analiz 1a’ da hızlı darbe için bulunan Z_p değeri $8,9 \Omega$ ’dur. Bu değer türbin topraklama direnci olan 10Ω ile yatay topraklama iletkeninin Z_p değeri olan 90Ω ’un paralel birleşimine yaklaşık eşittir. Bu durum diğer analizler için de geçerlidir. Bu sonuca bakarak sistemin eşdeğer Z_p değerinin yatay topraklama iletkeni ile türbin topraklama direncinin paralel birleşimine yaklaşık eşit olduğu söylenebilir.

5.4. Çalışma 3 - Beşli RT Grubunda YTİ Uygulaması Analizi

Bu benzetim çalışmasında birbirlerine yatay topraklama iletkenleriyle bağlı beşli bir rüzgar türbini zincirinde, ortadaki türbine yıldırım darbesi uygulanarak sistemin cevabı incelenecektir. Ayrıca komşu türbinin topraklama direncinin düşük olması durumunda türbinler arası etkileşim değerlendirilecektir. Analizlerde kullanılan parametreler Tablo 5.4'te, analiz sonuçları ise Şekil 5.5'te verilmiştir.

Tablo 5.4. Benzetim çalışması 3 parametreleri

Parametre	Analiz 1	Analiz 2	Analiz 3	Analiz 4
R3	100 Ω	100 Ω	100 Ω	100 Ω
R2 & R4	100 Ω	10 Ω	100 Ω	10 Ω
Özgül direnç (ρ)	500 $\Omega.m$	500 $\Omega.m$	5.000 $\Omega.m$	5.000 $\Omega.m$



Şekil 5.5. Benzetim çalışması 3 grafikleri, a) Analiz 1, b) Analiz 2, c) Analiz 3, d) Analiz 4

Şekil 5.5’ te verilen grafikler incelendiğinde, Z_p değerinin bir önceki benzetim çalışmasında ifade edildiği üzere, türbin topraklama direnci ve türbine bağlı yatay topraklama iletkenlerinin Z_p değerlerinin paralel birleşimine yaklaşık eşit olduğu görülmektedir. Örneğin Analiz 1’deki türbin topraklama direncinin (100Ω), bu türbine bağlı yatay topraklama iletkenlerinin Z_p değerleri (16Ω) ile paralel birleşimi alındığında $7,4 \Omega$ değeri elde edilmektedir. Bu değer Şekil 5.5a’ da görülen Z_p değeri ile uyumludur. Bu durum diğer analizler için de geçerlidir.

Analiz 1-2 ve Analiz 3-4 sonuçları karşılaştırıldığında, komşu türbinlerin topraklama dirençlerinin düşük olmasının, yıldırım darbesine maruz kalan türbinin topraklama performansına faydası olmadığı görülebilir. Bu durumda düşük topraklama direncine sahip türbin topraklama sistemlerinin diğer topraklama sistemlerine bir “sifon etkisi” sağlamadığı söylenebilir. Bu sonuca göre, türbin topraklama sistemlerini trafo merkezinin topraklama sistemine irtibatlanmanın bir getirisi olmayacağı söylenebilir.

Analiz 1-2’de benzetim süresi içerisinde komşu topraklama sistemlerinde bir gerilim yükselmesi görülmemiştir. Analiz 3-4 sonuçlarında ise benzetim süresi içerisinde komşu topraklama sistemlerinin gerilim yükselmeleri gözlemlenebilmiştir. Bu durum, analiz 1-2 ve analiz 3-4’te kullanılan toprak özgül dirençlerinin farklı olması ile izah edilebilir.

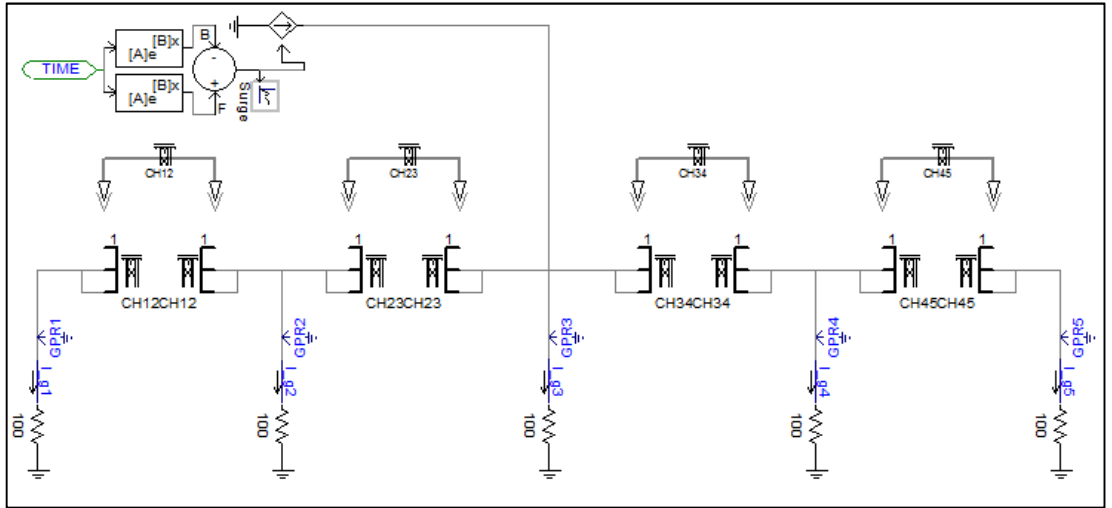
Toprak özgül direnci düşük olan 1 ve 2 numaralı analizlerde, yüksek frekanslı bileşenler güzergah boyunca önemli oranda zayıflamaya uğramaktadır, bu sebeple komşu türbine sadece düşük frekanslı bileşenler, yani yıldırım darbesinin kuyruk kısmı ulaşabilmektedir. Dolayısıyla, oldukça kısa tutulmuş olan benzetim süresi içerisinde komşu türbinlerdeki gerilim yükselmesi gözlemlenmemiştir. Aynı mantıkla, toprak özgül direncinin yüksek seçildiği 3 ve 4 numaralı analizlerde, yüksek frekanslı bileşenler, yani yıldırım darbesinin ön kısmı, nispeten daha az bozulmaya uğrayarak komşu topraklama sistemine ulaşabilmiş, ve sınırlı benzetim süresi içerisinde gözlemlenebilmiştir. Simülasyon süresi uzatılarak yapılan benzetim çalışmalarında yukarıda verilen açıklamaların geçerliliği teyit edilmiştir.

Şekil 5.5’te sadece yavaş darbenin sonuçları verilmiştir. Hızlı darbe için yapılan benzetim çalışmalarında elde edilen bulguların yukarıda sıralanan bulgular ile aynı olduğu görülmüştür.

5.5. Çalışma 4 - Beşli RT Grubunda YTI ve Kablo Ekranı Etkinliği Analizi

Bu benzetim çalışmasında bir önceki çalışmada kullanılan beşli rüzgar türbini zincirinde, yatay topraklama iletkenine paralel olarak bağlanan bir kablo ekranının topraklama sistemine olan etkisi incelenecektir. Bu çalışmada OG kablo ile yatay topraklama iletkenininin 400 m uzunluğunda oldukları, toprakta 1 m derinliğe gömüldükleri ve merkezleri arasında 100 mm mesafe olduğu düşünülmüştür.

Bu çalışma için OG kablo ile yatay topraklama iletkeni çoklu bir iletken seti olarak değerlendirilmiş ve bu iletken seti için bir Matlab kodu hazırlanarak sistemin empedans ve admitans matrisleri bulunmuştur. Böylece kablo ve yatay topraklama iletkeni bağımsız birer iletken den ziyade, aralarındaki ortak toprak dönüş empedansı üzerinden birbirleriyle etkileşimleri olan iletkenler olarak modellenenmiştir. Bu benzetim çalışması için PSCAD/EMTDC’ de kurulan devre Şekil 5.6’da verilmiştir.

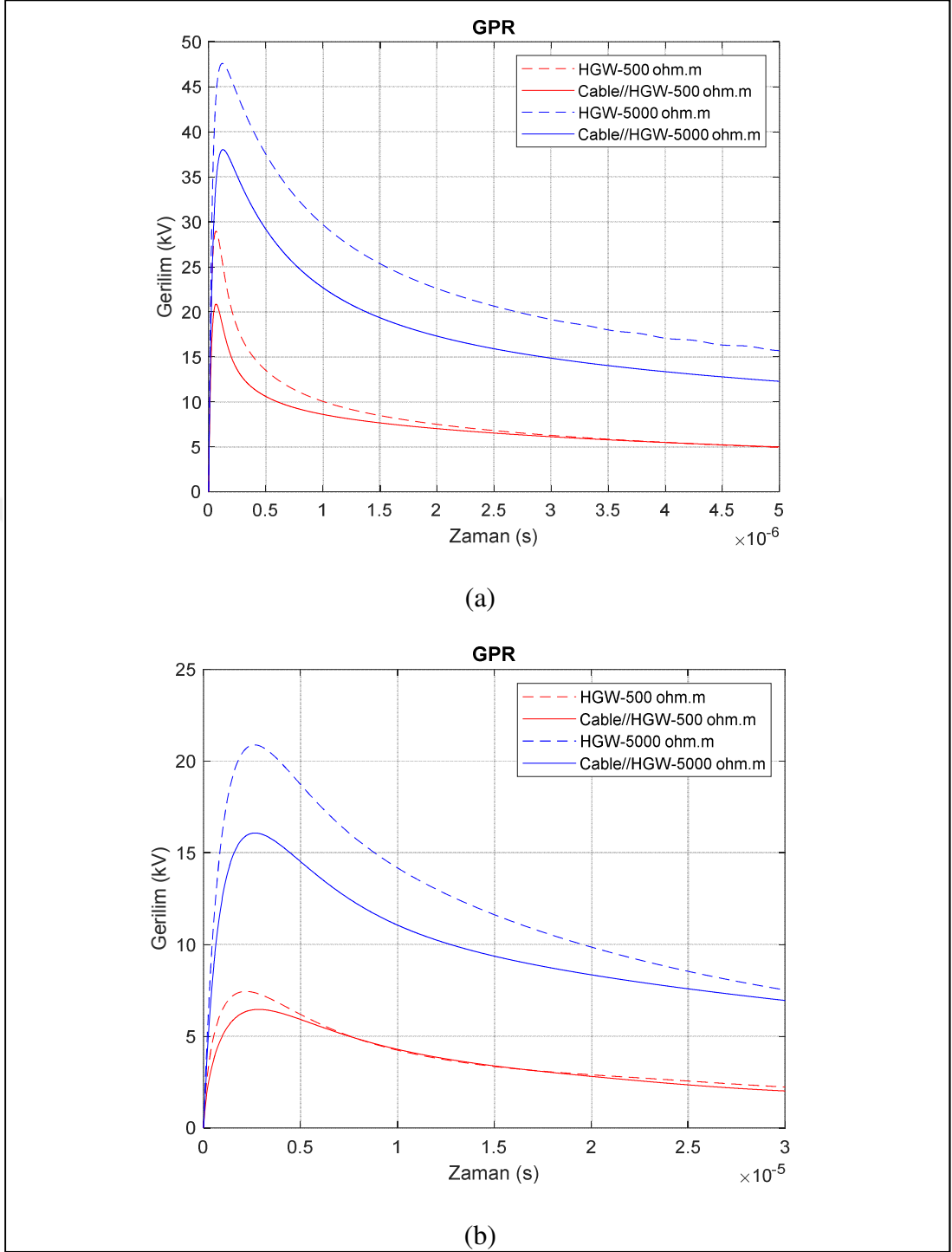


Şekil 5.6. Benzetim çalışması 4 PSCAD/EMTDC modeli

Analizlerde kullanılan parametreler Tablo 5.5’te, analiz sonuçları ise Şekil 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.5. Benzetim çalışması 4 parametreleri

Parametre	Analiz 1	Analiz 2
Darbe tipi	Hızlı	Yavaş
R2 & R3 & R4	100 Ω	100 Ω
Özgül direnç (ρ)	500/5.000 $\Omega.m$	500/5.000 $\Omega.m$



Şekil 5.7. Benzetim çalışması 4 grafikleri (1 kablo), a) Hızlı darbe, b) Yavaş darbe

Şekil 5.7’de görülebileceği üzere, türbin topraklama sistemleri arasında kullanılan yatay topraklama iletkenlerine paralel olarak bağlanan kablo ekranları, impulsive topraklama empedansının önemli ölçüde düşmesini sağlamaktadır. Bu sonuçlara göre yatay topraklama iletkeni ile kablo ekranı bağlantısının sistemin impulsive topraklama empedans değerine olan etkisi Tablo 5.6’da özetlenmiştir.

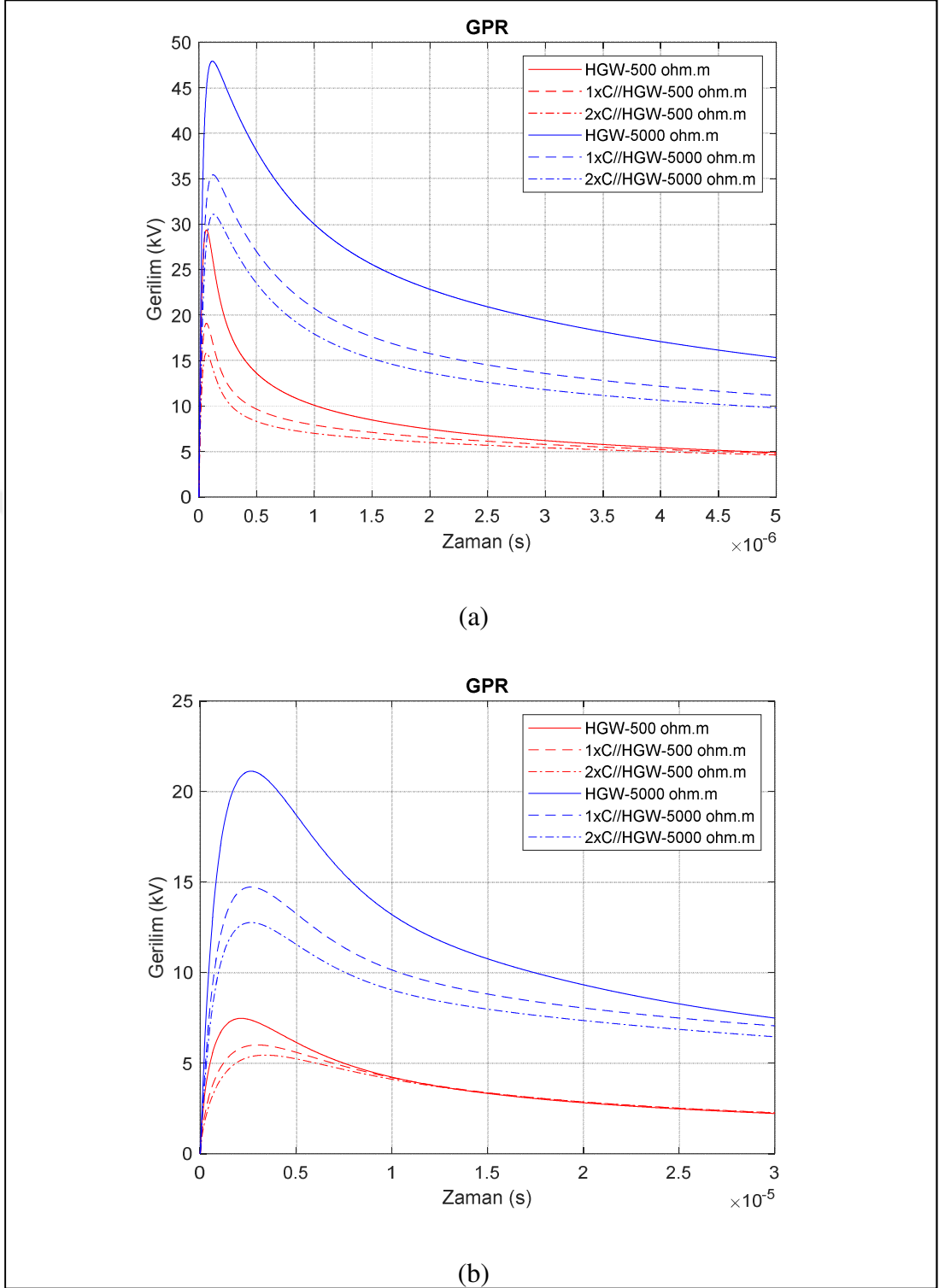
Tablo 5.6. Kablo ekranı bağlantısının Z_p değerine etkisi

Parametre	Analiz 1		Analiz 2	
	Hızlı	Hızlı	Yavaş	Yavaş
Darbe tipi	Hızlı	Hızlı	Yavaş	Yavaş
R2 & R3 & R4	100 Ω	100 Ω	100 Ω	100 Ω
Özgül direnç (ρ)	500 $\Omega.m$	5.000 $\Omega.m$	500 $\Omega.m$	5.000 $\Omega.m$
Z_p (sadece YTI)	29 Ω	47 Ω	7 Ω	22 Ω
Z_p (YTI // Kablo)	21 Ω	38 Ω	6 Ω	16 Ω
Değişim	%28	%19	%14	%27

Bu bulgu, önceki benzetim çalışmalarıyla karşılaştırıldığında önemli bir fark ortaya çıkmaktadır. Diğer benzetim çalışmalarında, yatay topraklama iletkeni uzunluğunun artırılmasının ya da komşu topraklama sisteminin topraklama direncinin düşük olmasının, yıldırım darbesinin isabet ettiği türbinde impulsive topraklama empedansı değerini düşürmeye bir faydası olmadığı görülmüştü. Ancak bu uygulamada, kablo ekranlarının hesaba katılmasının, Z_p değerini önemli ölçüde düşürdüğü görülmüştür. Türbin topraklama sisteminin esas performans kriterinin Z_p değerinin düşürülmesi olduğu dikkate alınır, kablo ekranını bağlantısının bu anlamda fayda sağlayan tek yöntem olduğu ve bu etkinin ihmal edilmemesi gerektiği söylenebilir.

Rüzgar türbinleri arası güç kabloları üç adet tek fazlı kablodan oluşurlar. Dolayısıyla pratik uygulamalarda yatay topraklama iletkenine paralel bağlanan kablo sayısı bir adet değil üç adet olacaktır. Bu bağlantının etkinliğini değerlendirmek amacıyla, üç adet ekranlı kablo ve bir adet yatay topraklama iletkeni olmak üzere toplamda yedi iletken oluşmuş bir sistemin çoklu iletken seti olarak modellenmesi gereklidir. Ancak Bölüm 4.5’ de bahsedilen PSCAD/EMTDC içerisindeki “manual data entry” bileşeninde en fazla altı iletken modellenebilmektedir. Bir başka deyişle, bu bileşen en fazla 6x6 boyutların matrisler üzerinden işlem yapabilmektedir. Dolayısıyla programdaki bu kısıtlama sebebiyle üç faz kabloların etkisini modellemek mümkün olamamıştır. Ancak pratik uygulamalarda bir karşılığı olmamakla beraber, iki adet güç kablosu ile yatay topraklama iletkenini birlikte modellemek mümkündür. Bu model üzerinden, topraklama sistemine ikinci bir kablo ekranı eklendiğinde eşdeğer devrenin davranışının nasıl etkilendiğini incelemek mümkün olmaktadır.

Önceki benzetim çalışmasındaki temel parametreler aynı kalmak kaydıyla, topraklama bağlantısına ikinci bir kablo ekranı eklendiğinde elde edilen analiz sonuçları Şekil 5.8’ de verilmiştir.



Şekil 5.8. Benzetim çalışması 4 grafikleri (2 kablo), a) Hızlı darbe, b) Yavaş darbe

Şekil 5.8’de görülebileceği üzere, sisteme ikinci bir kablonun eklenmesi impulsive empedans değerinin daha da düşmesini sağlamaktadır. Bu sonuçlara göre yatay topraklama iletkeni ile kablo ekranı bağlantısının sistemin impulsive topraklama empedans değerine olan etkisi Tablo 5.7’de özetlenmiştir.

Tablo 5.7. İki kablo ekranı bağlantısının Z_p değerine etkisi

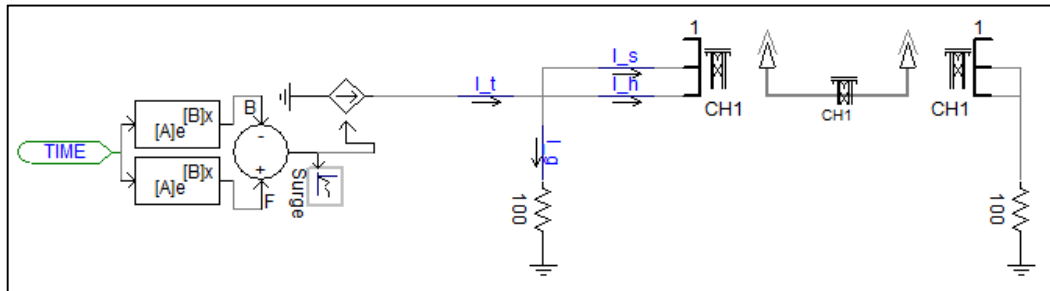
Parametre	Analiz 1		Analiz 2	
	Hızlı	Hızlı	Yavaş	Yavaş
Darbe tipi	Hızlı	Hızlı	Yavaş	Yavaş
R2 & R3 & R4	100 Ω	100 Ω	100 Ω	100 Ω
Özgül direnç (ρ)	500 $\Omega.m$	5.000 $\Omega.m$	500 $\Omega.m$	5.000 $\Omega.m$
Z_p (sadece YTI)	29 Ω	47 Ω	7 Ω	22 Ω
Z_p (YTI // 2xKablo)	16 Ω	31 Ω	5,5 Ω	13 Ω
Değişim	%45	%34	%21	%41

Yatay topraklama iletkenine bağlanan kablo sayısı artırıldığında sistemin eşdeğer impulsive topraklama empedansı önemli ölçüde düşmektedir. Bu düşüş sadece yavaş darbeler değil hızlı darbeler için de geçerlidir.

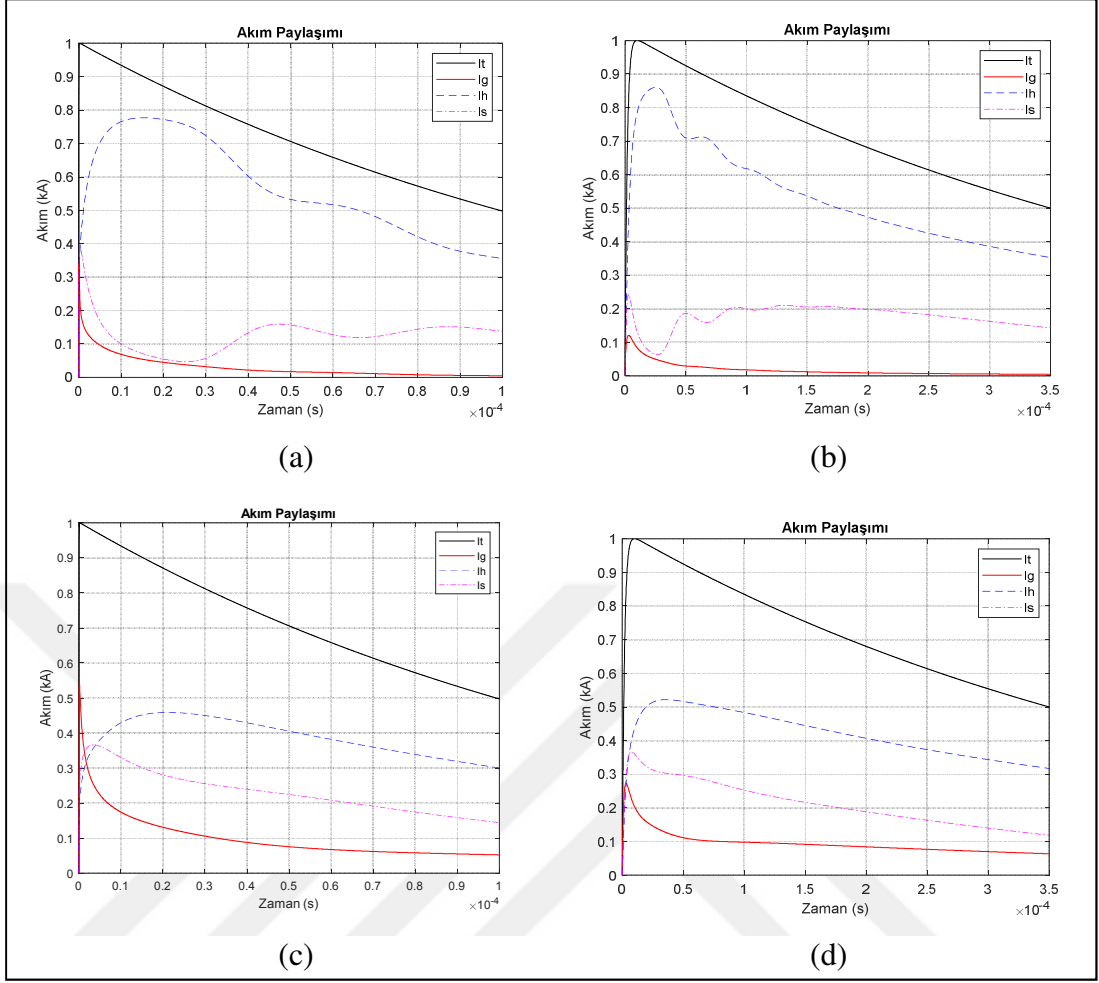
Kablo ekranları ve yatay topraklama iletkenlerinin birlikte değerlendirildiği analiz sonuçları dikkate alındığında, başka yöntemler ile düşürmenin mümkün olmadığı impulsive topraklama empedansı değerinin kablo ekranlarının etkisiyle önemli ölçüde azaldığı söylenebilir.

Literatürde kablo ekranı bağlantısının topraklama sistemine etkisi genelde ihmal edilmiştir. Ancak standart bir uygulama pratiği olan kablo ekranlarının karşılıklı olarak topraklanmasının, yıldırım darbelerinin sebep olduğu aşırı gerilimlerin azaltılmasında önemli katkı sağladığı görülmektedir.

Bu benzetim çalışması kapsamında kablo ekranları ile yatay topraklama iletkenleri arasındaki akım paylaşımı da incelenmiştir. Tek kablonun kullanıldığı bu devrede bir önceki analiz parametreleri kullanılmıştır. Akım paylaşımı için kurulan PSCAD/EMTDC devresi Şekil 5.9'da, dalga yarılanma süreleri boyunca yapılan analizlerin sonuçları ise Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Benzetim çalışması 4 PSCAD/EMTDC modeli (akım paylaşımı)



Şekil 5.10. Benzetim çalışması 4 akım paylaşım grafikleri, a) Analiz 1 (500 Ω .m), b) Analiz 2 (500 Ω .m), c) Analiz 1 (5.000 Ω .m), d) Analiz 2 (5.000 Ω .m)

Şekil 5.10'dan görülebileceği üzere, toprak özgül direncinin düşük olduğu durumlarda akımın büyük kısmı yatay topraklama iletkeni üzerinden dağılırken, toprak özgül direncinin yüksek olduğu durumlarda kablo ekranı yatay topraklama iletkeni ile mukayese edilebilir ölçülerde akım taşımaktadır.

Toprak özgül direncinin yüksek olduğu durumlarda yıldırım akımının yüksek frekanslı bileşenleri türbin topraklama sistemi üzerinden yayılırken, düşük özgül dirençli durumlarda bu bileşenlerin yatay topraklama iletkeni üzerinden yayıldığı görülmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, orta gerilim kablo ekranlarının, yüksek frekans bölgesinde, rüzgar türbini topraklama sistemlerinin etkinliğine olan katkıları incelenmiştir. Bu amaçla yüksek frekans bölgesinde kullanılmaya uygun kablo ve iletken modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller kullanılarak yapılan analizlerde, kablo ekranlarının rüzgar türbini topraklama sistemi performansına önemli ölçüde katkı sağladığı görülmüştür.

Rüzgar türbini topraklama sistemleri hem güç frekansındaki toprak arızalarında, hem de yıldırım darbelerinde beklenen topraklama performansını sağlayabilmelidirler. Topraklama sisteminin güç frekansındaki arızalar için temel performans kriteri, adım ve temas gerilimlerini kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutmaktır. Bunu sağlayabilmek için, topraklama direncini belirli bir seviyenin altında tutmak gereklidir. Bu amaçla, rüzgar türbinlerinin topraklama sistemlerini birbirleriyle irtibatlayarak genişletilmiş bir topraklama sistemi tesis etmek genellikle yeterli olmaktadır.

Topraklama sisteminin yıldırım darbeleri için temel performans kriteri, topraklama direncinin 10Ω değerinin altında olmasıdır. Ancak yüksek özgül dirence sahip toprak yapılarında bu değere ulaşmak oldukça zordur. Yüksek frekans bölgesinde genişletilmiş topraklama sistemi uygulaması “etkin uzunluk” fenomeni sebebiyle impulsive topraklama empedansını düşürmede yetersiz kalabilmektedir. Bu değeri düşürmek için topraklama alanının genişletilmesi ve uzun dikey topraklama elektrotları kullanılması gibi bazı iyileştirme yöntemleri bulunsa da, bu yöntemlerin getirisi oldukça sınırlı kalmaktadır. Dolayısıyla, yüksek frekans bölgesinde tanımlanan performans kriterini sağlamak kimi zaman mümkün olamamaktadır.

Rüzgar türbinleri topraklama sistemleri arasındaki irtibat sadece yatay topraklama iletkenleri üzerinden değil, aynı zamanda türbinler arasındaki güç kablolarının ekranları üzerinden de sağlanmaktadır. Bu bağlantının etkinliği ve bütünleşik topraklama sisteminin performansına katkıları ilgili literatürde yeterince detaylı

olarak incelenmemiştir. Bu tez çalışması ile literatürdeki bu eksikliğin giderilmesi hedeflenmiştir.

Kablo ekranlarının topraklama sistemine olan etkilerinin incelenmesi için, hem kablo hem de yatay topraklama iletkeninin yüksek frekans bölgesinde doğru sonuç verecek şekilde modellenmesi gereklidir. Yıldırım darbelerine dair analizler genellikle EMT tipi programlar ile yapılmaktadır. Bu programların içerisinde bulunan kablo ve iletken modelleri yüksek frekans bölgesinde çalışmaya uygunlukları yönünden incelenmiştir. Bu araştırma sonucunda, yüksek frekans bölgesinde baskın olan toprak dönüş empedansının hesaplanması konusunda mevcut modellerin güvenilir sonuç vermediği tespit edilmiştir.

Yapılacak analizler için PSCAD/EMTDC ve Matlab programları kullanılarak yeni kablo ve yatay topraklama iletkeni modelleri geliştirilmiştir. Bu modellerin geçerliliği test edildikten sonra örnek bir rüzgar santralinde yıldırım darbesi analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde hem yatay topraklama iletkeninin tek başına performansı, hem de kablo ekranı ve yatay topraklama iletkeninin ortak performansları incelenmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan analizlerde, aşağıda özetlenen sonuçlara ulaşılmıştır;

- Yatay topraklama iletkenlerinin etkin uzunlukları, rüzgar santrallerinde iki türbin arasındaki pratik mesafelerden (~250-300 m) genellikle kısa çıkmaktadır. Bu durumda türbin topraklama sistemlerini birbirlerine bağlayan yatay topraklama iletkenlerinin ancak sınırlı bir kısmının impulsiv topraklama empedansını düşürmede fayda sağladığı söylenebilir.

- Bir rüzgar türbinine isabet eden yıldırım darbesinin göreceği impulsiv topraklama empedansı, ilgili rüzgar türbininin topraklama direnci ile bu rüzgar türbinine bağlı yatay topraklama iletkenlerinin impulsiv topraklama empedanslarının paralel birleşimine yaklaşık eşit çıkmaktadır. Bu sonuç, rüzgar türbinlerine isabet eden yıldırım darbelerinin oluşturacağı aşırı gerilimlerin tepe değerlerini kolayca hesaplamak amacıyla kullanılabilir.

- Bir rüzgar türbini topraklama sisteminin düşük bir topraklama direncine sahip olması, komşu topraklama sistemleri için bir avantaj sağlamamaktadır. Bir başka deyişle, düşük topraklama direncine sahip komşu topraklama sistemleri sifon etkisi yaratmamaktadır. Bu durumda topraklama performansını iyileştirmek amacıyla düşük dirençli bir topraklama sistemine bağlantı yapmanın bir getirisi olmayacaktır.. Öyleyse, rüzgar türbinleri topraklama sistemleri ile topraklama direnci çok daha düşük olan trafo merkezi topraklama sistemlerini birbirlerine bağlamanın bir getirisi olmayacağı söylenebilir. Bu bağlantının düşük frekans bölgesinde toprak arıza akımı seviyesini önemli ölçüde artıracığı da dikkate alınır, rüzgar türbinleri topraklama sistemleri ile trafo merkezi topraklama sistemini birbirlerine bağlamamanın daha uygun bir tercih olacağı söylenebilir.

- Düşük özgül dirençli toprak yapılarında, bir rüzgar türbinine isabet eden yıldırım darbesinin komşu rüzgar türbinlerine sürükleyeceği potansiyel oldukça sınırlı kalmaktadır. Yüksek özgül dirençli toprak yapılarında ise komşu türbinlere sürüklenen potansiyel değeri daha yüksek olmaktadır.

- Yatay topraklama iletkenlerinin uzunluklarının artırılması, ya da düşük topraklama direncine sahip komşu rüzgar türbinlerine topraklama bağlantısı yapılması, bir rüzgar türbini topraklama sisteminin impulsive topraklama empedansını düşürmeye fayda sağlamamaktadır. Ancak kablo ekranlarının yatay topraklama iletkenlerine paralel bağlanması, impulsive topraklama empedansı değerini önemli ölçüde düşürmektedir. Devreye eklenen paralel kablo ekranı sayısı arttıkça, impulsive topraklama empedansı daha da düşmektedir. Kablo ekranları tehlikeli gerilimlerin oluşmasını engellemek amacıyla her iki ucundan topraklama sistemlerine bağlanmaktadır. Topraklama sistemleri analizlerinde bu bağlantıların etkileri genellikle ihmal edilmektedir. Ancak bu tez kapsamında yapılan çalışma sonuçlarına göre, bu bağlantının topraklama etkisinin ihmal edilemeyeceği, hatta impulsive topraklama empedansını düşürmeye yarayan tek yöntemin bu olduğu söylenebilir.

- Kablo ekranları ile yatay topraklama iletkenlerinin paralel bağlandığı durumlarda, düşük toprak özgül direncine sahip toprak yapılarında uygulanan yıldırım darbesinin büyük kısmı yatay topraklama iletkeni üzerinden toprağa yayılmaktadır. Toprak

özgül direncinin yüksek olduğu durumlarda ise, kablo ekranı yatay topraklama iletkeni ile mukayese edilebilecek ölçüde akım taşıyabilmektedir.

Bundan sonraki çalışmalarda, rüzgar türbini topraklama sistemi için bir iletim hattı modeli geliştirilmesi önerilebilir. Bu sayede topraklama sistemi elemanlarının birbirleriyle olan etkileşimleri daha detaylı olarak incelenebilir. Ayrıca, yatay topraklama iletkenleri ve kablo ekranlarının impulsive empedans değerlerinin EMT tipi analizlere ihtiyaç olmadan bulunabilmesini sağlayacak analitik formüller geliştirilmesi önerilebilir. Bu sayede çok detaylı analizlere ihtiyaç kalmadan, muhtemel bir yıldırım darbesi sonrasında oluşacak geçici toprak potansiyeli tepe değerinin kolayca hesaplanması sağlanabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] GWEC, Global Wind Statistics 2017, *Global Wind Energy Council*, 1-4, 2018.
- [2] TÜREB, Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu 2018 Ocak, *Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği*, 1-44, 2018.
- [3] IEC 61400-24, Wind Turbines – Part 24: Lightning Protection, Ed. 1.0, *The International Electrotechnical Commission*, Geneva, 2010.
- [4] CYME, *CymGrd User's Guide and Reference Manual*, 1st ed., CYME, Canada, 2006.
- [5] IEEE Std 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, *The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, New York, 2000.
- [6] Lorentzou M. I., Hatziargyriou N. D., Manos G., Sietis T., Integrated Grounding System of Wind Farms for Lightning and Fault Protection, *Proceedings of the 4th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission and Distribution, Medpower*, Lemesos, Cyprus, 14-17 November 2004.
- [7] IEC TS 60479-2, Effects of Current on Human Beings and Livestock - Part 2: Special Aspects, *The International Electrotechnical Commission*, Geneva, 2017.
- [8] EN 50522, Earthing of Power Installations Exceeding 1 kV a.c., *CENELEC*, Brussels, 2010.
- [9] IEC 62305-3, Protection Against Lightning - Part 3: Physical Damage to Structures and Life Hazard, Ed. 2.0, *The International Electrotechnical Commission*, Geneva, 2010.
- [10] Visacro S., A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, **22**(1) 381-386.
- [11] Gupta B., Thapar B., Impulse Characteristics of Grounding Electrodes, *Journal of the Institution of Engineering (India)*, 1981, **61**(4), 178-182.
- [12] Sekioka S., Funabashi T., Effective Length of Long Grounding Conductor in Windfarm, *International Conference on Power Systems Transients (IPST'07)*, Lyon, France, 3-7 June 2007.

- [13] He J., Gao Y., Zeng R., Zou J., Liang X., Zhang B., Lee J., Chang S., Effective Length of Counterpoise Wire Under Lightning Current, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, **20**(2), 1585-1591.
- [14] Grcev L., Impulse Efficiency of Ground Electrodes, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, **24**(1), 441-451.
- [15] Yamamoto K., Sumi S., Sekioka S., He J., Derivations of Effective Length Formula of Vertical Grounding Rods and Horizontal Grounding Electrodes Based on Physical Phenomena of Lightning Surge Propagations, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, **51**(6), 4934-4942.
- [16] Gupta B., Thapar B., Impulse Impedance of Grounding Grids, *IEEE Transactions on Power Apparatus Systems*, 1980, **PAS-99**(6), 2357-2362.
- [17] Zeng R., Gong X., He J., Zhang B., Gao Y., Lightning Impulse Performances of Grounding Grids for Substations Considering Soil Ionization, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, **23**(2), 667-675.
- [18] Grcev L., Lightning Surge Efficiency of Grounding Grids, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, **26**(3), 1692-1699.
- [19] Grcev L., van Deursen A. P. J., High Frequency Grounding Performance of Metal Sheathed Distribution Cables, *Cigre Session 2004*, Paris, France, 29 August-3 September 2004.
- [20] Grcev L., van Deursen A. P. J., van Waes J. B. M., Lightning Current Distribution to Ground at a Power Line Tower Carrying a Radio Base Station, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, **47**(1), 160-170.
- [21] Grcev L., Deursen A. P. J., Transient Grounding Performance of Metal Sheathed Power Cables, *International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Europe*, Hamburg, Germany, 8-12 September 2008.
- [22] Grcev L., Improved Earthing System Design Practices for Reduction of Transient Voltages, *Cigre Session 1998*, Paris, France, 15-17 September 1998.
- [23] Theethayi N., Thottappillil R., On Reducing the Lightning Transients in Buried Shielded Cables Using Follow-On Earth Wire, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, **49**(4), 924-927.
- [24] Cotton I., Windfarm Earthing, *11th International Symposium on High Voltage Engineering*, London, UK, 5-8 November 1999.
- [25] Hatziargyriou N. D., Lorentzou, M. I. Cotton ve N. Jenkins, Transferred Overvoltages by Windfarm Grounding Systems, *8th International Conference On Harmonics and Quality of Power Proceedings*, Athens, Greece, 14-16 October 1998.
- [26] CIGRE WG 33.02, Technical Brochure 39 - Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients, *CIGRE*, TB39, 1-28, 1990.

- [27] Schelkunoff S. A., The Electromagnetic Theory of Coaxial Transmission Lines and Cylindrical Shields, *Bell System Technical Journal*, 1934, **13**(4), 532-579.
- [28] Dommel H. W., *Electromagnetics Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book)*, 1st ed., Bonneville Power Administration, Portland, 1986.
- [29] Pollaczek F., Über das Feld Einer Unendlich Langen Wechselstromclurchflossenen Einfachleitung, *Elektrische Nachrichten Technik*, 1926, **9**, 339-359.
- [30] da Silva F. F., Bak C. L., *Electromagnetic Transients in Power Cables*, 1st ed., Springer-Verlag, London, 2013.
- [31] Martinez-Velasco J., *Power System Transients – Parameter Determination*, CRC Press, Boca Raton, 2010.
- [32] Theethayi N., Thottappillil R., Paolone M., Nucci C. A., Rachidi F., External Impedance and Admittance of Buried Horizontal Wires for Transient Studies Using Transmission Line Analysis, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2007, **14**(3), 751-761.
- [33] Vance E., *Coupling to Shielded Cables*, 1st ed., Wiley, New York, 1978.
- [34] Abramowitz M., Stegun I. A., *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables*, 1st ed., Dover, New York, 1965.
- [35] Wedepohl L. M., Wilcox D. J., Transient Analysis of Underground Power-Transmission Systems. System Model and Wave-Propagation Characteristics, *Proceedings IEE*, 1973, **120**(2), 253-260.
- [36] Carson J. R., Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return, *Bell System Technical Journal*, 1926, **5**, 539-554.
- [37] Srivallipurandan N., Series Impedance and Shunt Admittance Matrices of an Underground Cable Systems, Ph. D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, 1986.
- [38] Manitoba HVDC Research Centre, *EMTDC User's Guide v4.6.0*, 1st ed., Manitoba HVDC Research Centre, Winnipeg, 2016.
- [39] Saad O., Gaba G., Giroux M., A Closed-form Approximation for Ground Return Impedance of Underground Cables, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, **11**(3), 1536-1545.
- [40] Petrache E., Rachidi F., Paolone M., Nucci C. A., Rakov V., Uman M., Lightning Induced Disturbances in Buried Cables - Part I: Theory, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, **47**(3), 498-508.

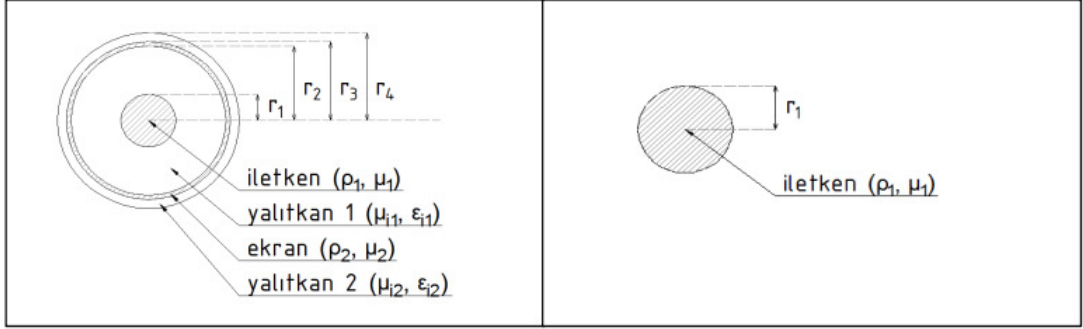
- [41] Theodoulidis T., Exact Solution of Pollaczek's Integral for Evaluation of Earth-Return Impedance for Underground Conductors, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2012, **54**(4), 806-814.
- [42] Uribe F. A., Naredo J. L., Moreno P., Guardad L., Algorithmic Evaluation of Underground Cable Earth Impedances, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, **19**(1), 316-322.
- [43] Legrand X., Xemard A., Fleury G., Auriol P., Nucci C. A., A Quasi-Monte Carlo Integration Method Applied to the Computation of the Pollaczek Integral, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, **23**(3), 1527-1534.
- [44] Papagiannis G., Tsiamitros D., Labridis D., Dokopoulos P., Direct Numerical Evaluation of Earth Return Path Impedances of Underground Cables, *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 2005, **152**(3), 321 - 327.
- [45] Nguyen T., Earth-return Path Impedances of Underground Cables. I. Numerical Integration of Infinite Integrals, *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 1998, **145**(6), 621-626.
- [46] Papadopoulos T., Tsiamitros D., Papagiannis G., Impedances and Admittances of Underground Cables for the Homogeneous Earth Case, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, **25**(2), 961-969.
- [47] Ametani A., Yoneda T., Baba Y., Nagaoka N., An Investigation of Earth-Return Impedance Between Overhead and Underground Conductors and Its Approximation, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2009, **51**(3), 860-867.
- [48] Sunde E., *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*, 1st ed., Dover Publications Inc., New York, 1968.
- [49] Abdus Salam M., Rahman Q. M., *Power Systems Grounding*, 1st ed., Springer, Singapore, 2016.
- [50] Bridges G., Fields Generated by Bare and Insulated Cables Buried in a Lossy Half-Space, *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(1), 140-146.
- [51] Rachidi F., Tkachenko S., *Electromagnetic Field Interaction with Transmission Lines*, 1st ed., WIT Press, Boston, 2008.
- [52] Morched B. G. A. , Tartibi M., A Universal Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Underground Cables, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, **14**(3), 1032-1038.
- [53] Gustavsen B., Panel Session on Data for Modeling System Transients - Insulated Cables, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Columbus, OH, 28 January-1 February 2001.

- [54] IEC 60287-1-1, Electric cables – Calculation of the Current Rating – Part 1-1: Current Rating Equations (100 % Load Factor) and Calculation of Losses – General, Ed. 2.0, *The International Electrotechnical Commission*, Geneva, 2006
- [55] Gustavsen B., Sletbak J., Henriksen T., Simulation of Transient Sheath Overvoltages in the Presence of Proximity Effects, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995, **10**(2), 1066–1075.
- [56] Yin Y., Dommel H., Calculation of Frequency-dependent Impedances of Underground Power Cables with Finite Element Method, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1989, **25**(4), 3025-3027.
- [57] Gudmundsdottir U. S., Proximity Effect in Fast Transient Simulations of an Underground Transmission Cable, *International Conference on Power Systems Transients (IPST03)*, Vancouver, Canada, 18-20 July 2013.
- [58] Ametani A., Ohno T., Nagaoka N., *Cable System Transients*, 1st ed., John Wiley & Sons, Singapore, 2015.
- [59] Steinbrich K., Influence of Semiconducting Layers on the Attenuation Behaviour of Single-core Power Cables, *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 2005, **152**(2), 271–276.
- [60] Hashmi G. M., Papazyan R., Lehtonen M., Determining Wave Propagation Characteristics of MV XLPE Power Cable using Time Domain Reflectometry Technique, *International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa, Turkey, 5-8 November 2009.
- [61] Gustavsen B., Martinez J. A., Durbak D., Parameter Determination for Modeling System Transients - Part II: Insulated Cables, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, **20**(3), 1045-2050.
- [62] Stone G. C., Boggs S. A., Propagation of Partial Discharge Pulses in Shielded Power Cable, *Proceedings of the Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, National Academy of Sciences*, Washington, DC, 17-21 October 1982.
- [63] CIGRE WG B1.30, Technical Brochure 531 - Cable Systems Electrical Characteristics, *CIGRE*, TB531, 1-143, 2013
- [64] Liu Y., Transient Response of Grounding Systems Caused by Lightning: Modelling and Experiments, Ph. D. Thesis, Uppsala University, Uppsala, 2004.
- [65] Papalexopoulos A., Meliopoulos A., Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1987, **2**(4), 1073-1081.

- [66] Otero A., Cidras J., del Alamo J., Frequency-dependent Grounding System Calculation by Means of a Conventional Nodal Analysis Technique, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, **14**(3), 873-878.
- [67] Geri A., Behaviour of Grounding Systems Excited by High Impulse Currents: the Model and Its Validation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, **14**(3), 1008-1017.
- [68] Grcev L., Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, **11**(2), 815-823.
- [69] Nekhoul B., Labie P., Zgainski F., Meunie G., Calculating the Impedance of a Grounding System, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1996, **32**(3), 1509-1512.
- [70] Grcev L., Markovski B., Grceva S., On Inductance of Buried Horizontal Bare Conductors, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, **53**(4), 1083-1087.
- [71] Cooray V., *Lightning Protection*, 1st ed., The IET, London, 2010.
- [72] Liu Y., Theethayi N., Thottappi R., An Engineering Model for Transient Analysis of Grounding System Under Lightning Strikes: Nonuniform Transmission-Line Approach, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, **20**(2), 722-730.
- [73] IEC 62305-1, Protection Against Lightning - Part 1: General Principles, Ed. 1.0, *The International Electrotechnical Commission*, Geneva, 2006.
- [74] Jia W., Xiaoqing Z., Double-Exponential Expression of Lightning Current Waveforms, *The 2006 4th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*, Dalian, China, 1-4 August 2006.
- [75] Sargent M., Darveniza M., Tower Surge Impedance, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1969, **88**(5), 680-687.
- [76] Ametani A., Kawamura T., A Method of a Lightning Surge Analysis Recommended in Japan Using EMTP, *IEEE Transaction on Power Delivery*, 2005, **20**(2), 867-875.
- [77] Lorentzou M. I., Hatziargyriou N. D., Papadias B., Analysis of Wind Turbine Grounding Systems, *10th Mediterranean Electrotechnical Conference*, Lemesos, Cyprus, 29-31 May 2000.



EK – A



OG Kablo		
$A_{iletken}$	240	mm ²
A_{ekran}	25	mm ²
$r_{iletken}$	9,15	mm
$d_{y-iletken1}$	0,45	mm
$d_{yalıtkan1}$	9,00	mm
$d_{y-iletken2}$	0,45	mm
$d_{yalıtkan2}$	2,30	mm
İletken	Bakır	-
Yalıtkan 1	XLPE	-
Ekran	Bakır	-
Yalıtkan 2	PVC	-

Yatay Topraklama İletkeni		
$A_{iletken}$	95	mm ²
$r_{iletken}$	6,30	mm

$r1$	6,30	mm	(düzeltilmiş veri)
$\rho1$	2,26E-08	Ωm	
$\mu1$	1,00	* $\mu0$	

$r1$	9,15	mm	(düzeltilmiş veri)
$r2$	19,05	mm	
$r3$	19,26	mm	(düzeltilmiş veri)
$r4$	21,56	mm	
$\rho1$	1,89E-08	Ωm	(düzeltilmiş veri)
$\mu1$	1,00	* $\mu0$	
$\epsilon i1$	2,55	* $\epsilon0$	(düzeltilmiş veri)
$\mu i1$	1,00	* $\mu0$	
$\rho2$	1,72E-08	Ωm	(düzeltilmiş veri)
$\mu2$	1,00	* $\mu0$	
$\epsilon i2$	3,10	* $\epsilon0$	(düzeltilmiş veri)
$\mu i2$	1,00	* $\mu0$	

EK - B

```
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
% EKRANLI KABLO ICIN Y-Z MATRISI HESAPLARI
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

clear
clc

%%%%%%%%%%
% 1 - KABLO BILGILERI
%%%%%%%%%%

% Temel Bilgiler-----%
u0=4*pi*1e-7;
e0=8.854e-12;
% Geometrik Bilgiler -----%
R1=9.15e-3;
R2=19.05e-3;
R3=19.26e-3;
R4=21.56e-3;
h=1;
% Iletken Bilgileri -----%
p_c=1.89e-8;
ur_c=1;
% Yalitkan 1 Bilgileri -----%
er_ins1=2.55;
ur_ins1=1;
% Ekran -----%
p_s=1.72e-8;
ur_s=1;
% Yalitkan 2 Bilgileri -----%
er_ins2=3.1;
ur_ins2=1;
% Toprak Bilgileri -----%
p_g=1000;
er_g=0;
ur_g=1;
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 2 - HESAPLAMALAR
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Frekans Araligi -----%
f=logspace(log10(0.5e0),log10(1e6),100);

for n=1:size(f,2)

w=2*pi*f(1,n);

% Y Matrisi
C_i1=2*pi*er_ins1*e0/log(R2/R1);
C_i2=2*pi*er_ins2*e0/log(R4/R3);
Y_11=i*w*C_i1;
Y_22=i*w*C_i2;

Y(1,1,n)=Y_11;
Y(1,2,n)=-Y_11;
Y(2,1,n)=-Y_11;
Y(2,2,n)=Y_11+Y_22;

% Z Matrisi
m_c=sqrt(i*w*ur_c*u0/p_c);
m_s=sqrt(i*w*ur_s*u0/p_s);
m_g=sqrt(i*w*ur_g*u0*((1/p_g)+i*w*er_g*e0));

Z_cout=(p_c*m_c/(2*pi*R1))*(besseli(0,m_c*R1)/
besseli(1,m_c*R1));
Z_cs=(i*w*ur_ins1*u0/(2*pi))*log(R2/R1);
Z_sin=(p_s*m_s/(2*pi*R2))*coth(m_s*(R3-R2))-
(p_s/(2*pi*R2*(R2+R3)));
Z_sm=(p_s*m_s/(pi*(R2+R3)))*csch(m_s*(R3-R2));
Z_sout=(p_s*m_s/(2*pi*R3))*coth(m_s*(R3-R2))
+(p_s/(2*pi*R3*(R2+R3)));
Z_sg=(i*w*ur_ins2*u0/(2*pi))*log(R4/R3);
Z_g=GRI_THE_self(f(1,n),m_g,h,R4);

Z_11=Z_cout+Z_cs+Z_sin+Z_sout+Z_sg+Z_g-(2*Z_sm);
Z_12=Z_sout+Z_sg+Z_g-Z_sm;
Z_22=Z_sout+Z_sg+Z_g;
Z(1,1,n)=Z_11;
Z(1,2,n)=Z_12;
Z(2,1,n)=Z_12;
Z(2,2,n)=Z_22;
end

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 3 - MDE DOSYASI OLUSTURULMASI
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
fileID=fopen('MDE.txt','w');
fprintf(fileID,'! This is my file generated by an
external program.\n');
fprintf(fileID,'100\n');
fprintf(fileID,'2\n');
```

```
for n=1:size(f,2)
fprintf(fileID,'%9.1f\n',f(n));
fprintf(fileID,'%9.9e\n',real(Z(1,1,n)));
fprintf(fileID,'%9.9e\n',imag(Z(1,1,n)));
fprintf(fileID,'%9.9e\n',real(Y(1,1,n)));
fprintf(fileID,'%9.9e\n',imag(Y(1,1,n)));
fprintf(fileID,'%9.9e\n',real(Z(1,2,n)));
fprintf(fileID,'%9.9e\n',imag(Z(1,2,n)));
fprintf(fileID,'%9.9e\n',real(Y(1,2,n)));
fprintf(fileID,'%9.9e\n',imag(Y(1,2,n)));
fprintf(fileID,'%9.9e\n',real(Z(2,1,n)));
fprintf(fileID,'%9.9e\n',imag(Z(2,1,n)));
fprintf(fileID,'%9.9e\n',real(Y(2,1,n)));
fprintf(fileID,'%9.9e\n',imag(Y(2,1,n)));
fprintf(fileID,'%9.9e\n',real(Z(2,2,n)));
fprintf(fileID,'%9.9e\n',imag(Z(2,2,n)));
fprintf(fileID,'%9.9e\n',real(Y(2,2,n)));
fprintf(fileID,'%9.9e\n',imag(Y(2,2,n)));
end
```

```
fclose(fileID);
```

```

%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
% YATAY TOPRAK ILETKENI ICIN Y-Z MATRISI HESAPLARI
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

clear
clc

%%%%%%%%%%
% 1 - KABLO BILGILERI
%%%%%%%%%%

% Temel Bilgiler -----%
u0=4*pi*1e-7;
e0=8.854e-12;

% Geometrik Bilgiler -----%
a=6.3e-3;
h=1;

% Iletken Bilgileri -----%
p_c=2.26e-8;
ur_c=1;

% Toprak Bilgileri -----%
p_g=500;
er_g=4;
ur_g=1;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% 2 - HESAPLAMALAR
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Frekans Araligi -----%
f=logspace(log10(0.5e0),log10(1e6),100);

for n=1:size(f,2)

w=2*pi*f(1,n);

% Z Matrisi
m_c=sqrt(i*w*ur_c*u0/p_c);
m_g=sqrt(i*w*ur_g*u0*((1/p_g)+i*w*er_g*e0

Z_cout_HGW=(p_c*m_c/(2*pi*a))*(besseli(0,m_c*a)/
besseli(1,m_c*a));
Z_g_HGW=GRI_THE_self(f(1,n),m_g,h,a);

Z_11=Z_cout_HGW+Z_g_HGW;

Z(1,1,n)=Z_11;

% Y Matrisi

Y_g_HGW=(m_g^2)/Z_g_HGW;

Y(1,1,n)=Y_g_HGW;

end

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% 3 - MDE DOSYASI OLUSTURULMASI  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
fileID=fopen('MDE.txt','w');  
fprintf(fileID,'! This is my file generated by an  
external program.\n');  
fprintf(fileID,'100\n');  
fprintf(fileID,'1\n');  
  
for n=1:size(f,2)  
fprintf(fileID,'% -9.1f\n',f(n));  
fprintf(fileID,'%9.9e\n',real(Z(1,1,n)));  
fprintf(fileID,'%9.9e\n',imag(Z(1,1,n)));  
fprintf(fileID,'%9.9e\n',real(Y(1,1,n)));  
fprintf(fileID,'%9.9e\n',imag(Y(1,1,n)));  
end  
  
fclose(fileID);
```

```

%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
% ZATI TOPRAK DONUS EMPEDANSI HESABI (THEODOULIDIS)
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

function ZGthe = GRI_THE_self(f,m,h,R)

u0=4*pi*1e-7;
w=2*pi*f;
H=2*h;
D=sqrt((R^2)+(H^2));
d=R;
x=R;

% Ipollaczek Hesabi
A1=(( (H^2)-(x^2))/(D^4))*exp(-m*H)*(1+m*H);
A2=(m^2)*x*H/(D^2);
fun = @(t) ((2.*sqrt(1-(t.^2)))-(1./sqrt(1-(t.^2))))
.*exp(-t.*m.*D);
A3 = integral(fun,(H/D),1);
Ipollaczek=A1+A2*A3;

% Jpollaczek Hesabi
B1=((H/D)^2)*besselk(0,(m*D));
B2=(1/(m*D))*(2*((H/D)^2)-1)*besselk(1,(m*D));
B3=(1/(m^2))*Ipollaczek;
Jpollaczek=B1+B2-B3;

% ZGself Hesabi
ZGthe=(i*w*u0/(2*pi))*((besselk(0,(m*d)))-
(besselk(0,(m*D)))+(2*Jpollaczek));

end

```


KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Güneri M.**, Alboyacı B., Analysis of Ground Return Impedance Calculation Methods for Modeling of Underground Cables for Lightning Studies, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences* , 2018, **26**, 530-541.



ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Burdur’da doğdu. Lisans ve yüksek lisans eğitimini ODTÜ Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamladı. 2001 yılından bugüne kadar çeşitli firmalarda elektrik mühendisi olarak görev almıştır. Halen Kratis Mühendislik firmasında çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.

