



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



PV SİSTEMLERİNDE YILDIRIMIN GEÇİCİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ İÇİN MODELLEME YÖNTEMLERİ

GONCA ÇAM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Bülent ORAL

EŞ-DANIŞMAN

Dr. Murat İSPİRLİ

İSTANBUL, 2025



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



PV SİSTEMLERİNDE YILDIRIMIN GEÇİCİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ İÇİN MODELLEME YÖNTEMLERİ

GONCA ÇAM

523121041

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Bülent ORAL

EŞ-DANIŞMAN

Dr. Murat İSPİRLİ

İSTANBUL, 2025

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimi tamamlarken bana ilham veren, destek olan ve yolumu aydınlatan değerli kişilere şükranlarımı sunmak isterim.

Öncelikle, bugün bilimle, akılla ve çağdaşlıkla yol almamı sağlayan Ulu Önder Gazi Mustafa Kemal Atatürk’e sonsuz minnet ve saygılarımı sunuyorum. “Hayatta en hakiki mürşit ilimdir, fendir.” sözü, akademik yolculuğum boyunca en büyük rehberim oldu.

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve deneyimiyle bana yol gösteren, sabrını ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Bülent Oral’a en içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinden yalnızca akademik anlamda değil, aynı zamanda araştırma etiği ve bilimsel duruş konusunda da çok şey öğrendim.

Hayatım boyunca yanımda olan, beni koşulsuz sevgiyle destekleyen aileme – özellikle varlığıyla gücümü pekiştiren anneme, desteğiyle hep arkamda duran babama ve yol arkadaşım kardeşime – en derin teşekkürlerimi sunarım. Onların sevgisi ve inancı, bu süreci başarıyla tamamlamamın temel dayanağı oldu.

Bu yolculukta katkısı olan, varlığını ve desteğini hissettiğim herkese teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	v
SEMBOLLER	vii
KISALTMALAR	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. PV SİSTEMLER VE YILDIRIMDAN KORUNMA	4
2.1. Çatı PV Sistem Bileşenleri	4
2.1.1. Montaj Sistemi.....	4
2.1.2. Modül Yönelimi	4
2.2. Saha PV Santrallerinde Sistem Ana Bileşenleri	5
2.3. Yüzer PV Sistem Bileşenleri	6
2.4. PV Sistemlerde Yıldırımdan Korunma	8
2.4.1.Harici Yıldırımdan Korunma Sistemi.....	9
2.4.1.1.Hava Sonlandırma Sistemi	10
2.4.1.2.İniş İletkeni	10
2.4.1.3.Toprak Sonlandırma Sistemi	11
2.4.2.Dahili Yıldırımdan Korunma Sistemi	11
2.5. Çatı PV Sistemlerinde Yıldırımdan Korunma Sistemi	13
2.6. PV Santrallerinde Yıldırımdan Korunma Sistem	15
2.7. Yüzer PV Santrallerinde Yıldırımdan Korunma Sistemi	18
2.7.1. Yakalama Ucu	18
2.7.2. Yıldırım Aşağı İletkenleri.....	19
2.8. PV Sistemlerde Yıldırım Kaynaklı Hasarlar	19
2.9. PV Sistemleri İçin Yıldırım Çarpma Risk Değerlendirmesi	22
3. YILDIRIMIN GEÇİCİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİNDE KULLANILAN ANALİZ YÖNTEMLERİ.....	25
3.1. PEEC Yöntemi	26
3.2. FDTD Yöntemi.....	32
3.3. MOM Yöntemi	34

4. PV SİSTEMLERİNİN YILDIRIMIN GEÇİCİ ETKİLERİ ALTINDA MODELLEME YÖNTEMLERİ	36
4.1. PV Sistemindeki Bileşenler için PEEC Modellemesi	38
4.1.1. Çalışma I.....	43
4.1.2. Çalışma II.....	47
4.1.3. Çalışma III	52
4.1.4. Çalışma IV	55
4.2. PV Sistemlerinde FDTD Modellemesi.....	62
4.2.1. Çalışma I.....	66
4.2.2. Çalışma II.....	68
4.3. PV Sistemlerde MOM	71
4.3.1. Çalışma I.....	71
4.4. PEEC, FDTD, MOM Yöntemlerinin Birlikte Kullanıldığı Hibrit Sistemler ...	77
4.4.1. Çalışma I.....	77
4.4.2. Çalışma II.....	83
4.4.3. Çalışma III	89
4.5. Sonuçlar ve Tartışma.....	98
5. SONUÇ	103
6. KAYNAKÇA.....	105
ÖZGEÇMİŞ	112

ÖZET

PV SİSTEMLERİNDE YILDIRIMIN GEÇİCİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ İÇİN MODELLEME YÖNTEMLERİ

Fotovoltaik sistemler, sıklıkla tercih edilen yenilenebilir enerji kaynaklarındandır. PV sistemler genellikle izole alanlara kurulur ve böylece gölgelenmeyi en aza indirerek PV dizilerin yüzey alanını en üst düzeye çıkarmak ve güneş ışıyım miktarını arttırmak hedeflenir. Fotovoltaik sistemlerin bu şekilde açık alanlara kuruluyor olması da sistemleri yıldırım çarpmalarına açık hale getirmektedir.

PV sistemlerin güvenli ve verimli çalışma prensibinin olması enerji sektöründe de dikkat çekmektedir. Bu durum, PV kaynağına yapılan yatırımların artmasına olanak sağlamaktadır. Açık ve korunmasız alanlara kurulan PV sistemlerini, yıldırım büyük oranda olumsuz etkilemektedir. Sistem üzerinde meydana gelen yıldırım çarpmaları, sistemin çalışma mekanizmasını bozabilmekte ya da sistemin tamamen çalışmasını durdurabilmektedir. Hasarlı cihazların değiştirilmesi ve güç kaynağının kesilmesi yatırımcılar için büyük kayıplara neden olmuştur. Bu olumsuz ihtimalleri göz önünde bulundurarak sistemi yıldırıma karşı koruyabilmek için PV sistem için en uygun çözüm olan yıldırımdan korunma sistemi kurulması gerekmektedir.

PV sistemlerinin yıldırımın olumsuz etkilerine karşı korunmasını sağlamak için sistemi koruyan yıldırımdan korunma sisteminin seçimini doğru yapmak gerekmektedir. Doğru bir LPS (Yıldırımdan korunma sistemi) seçimi için ise, öncelikle sistemdeki tüm risk koşullarını doğru değerlendirmek ve tespit etmek gerekmektedir. Bu çalışmada, yıldırımın sistem üzerindeki olumsuz etkilerine detaylı bir şekilde değinilmiştir ve risk değerlendirmesi yöntemi hakkında bilgi verilmiş olup, farklı bölgelere kurulan PV sistemleri incelenmiştir. Sistem için doğru bir LPS seçimini yapabilmek için PV sisteminin yıldırımın geçici etkileri altındaki davranışları analiz edilmelidir. Doğru analiz, sistem için gerekli ve yeterli olan LPS seçimini doğru yapmayı getirecektir. Çalışmada, PV sistemlerinin yıldırımın etkileri altındaki davranışlarını inceleyen modelleme yöntemlerine detaylıca değinilmiş ve özellikle elektromanyetik yöntemlerden PEEC(Kısmi eleman denklem devresi yöntemi), FDTD(Zaman alanı

sonlu farklar yöntemi), MOM(Momentler yöntemi) açıklanmış ve son yıllarda yapılan çalışmalar incelenmiş ve sonuçları tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: PV Sistemler, yıldırım, LPS, PEEC, FDTD, MOM.



ABSTRACT

MODELING METHODS FOR INVESTIGATING THE TRANSIENT EFFECTS OF LIGHTNING ON PV SYSTEMS

Photovoltaic systems are frequently preferred renewable energy sources. PV(photovoltaic) systems are generally installed in isolated areas, aiming to maximize the surface area of PV arrays and increase the amount of solar radiation by minimizing shading. The fact that photovoltaic systems are installed in open areas makes the systems vulnerable to lightning strikes.

The safe and efficient operating principle of PV systems also attracts attention in the energy sector. This situation allows increasing investments in PV resources. Lightning negatively affects PV systems installed in open and unprotected areas. Lightning strikes occurring on the system can disrupt the operating mechanism of the system or stop the system from working completely. Replacing damaged devices and cutting off the power supply has caused huge losses for investors. Considering these negative possibilities, to protect the system against lightning, it is necessary to install a lightning protection system, which is the most suitable solution for the PV system.

In order to protect PV systems from the adverse effects of lightning, it is essential to correctly select an appropriate lightning protection system (LPS). A proper LPS selection requires the accurate identification and evaluation of all risk factors associated with the system. This study provides a detailed examination of the negative impacts of lightning on PV systems and offers insights into risk assessment methodologies. Additionally, PV systems installed in various regions have been analyzed.

To determine the most suitable LPS for a system, it is necessary to analyze the behavior of the PV system under transient lightning effects. Accurate analysis leads to the correct selection of an LPS that is both necessary and sufficient for protecting the system. The study extensively discusses modeling approaches used to evaluate PV system behavior under lightning influences. In particular, electromagnetic methods such as PEEC (Partial Element Equivalent Circuit), FDTD (Finite-Difference Time-Domain), and MoM (Method of Moments) are explained. Furthermore, recent studies in the field are reviewed, and their results are discussed in detail.

Key Words: PV Systems, lightning, LPS, PEEC, FDTD, MOM.



SEMBOLLER

R_x	: Risk bileşeni
N_x	: Yıllık tehlikeli olay sayısı
P_x	: Hasar olasılığı
L_x	: Sonuçta ortaya çıkan kayıp
S_x	: Çarpma noktası
E_s	: Elektrik alanı
σ	: Malzemenin elektriksel iletkenliği
Φ	: Elektrik skaler potansiyeli
J	: Elektrik akımı yoğunluğu
A	: Manyetik vektör potansiyeli
M	: Mıknatıslanma akımı
V_c'	: Elektrik akımlarıyla ilişkili olan hacim
V_m'	: Manyetik akımlarıyla ilişkili olan hacim
N_l	: İletken malzemeleri ayrıştırmak için kullanılan temel hacim sayısı
N_m	: Manyetik malzemeleri ayrıştırmak için kullanılan temel hacim sayısı
N_n	: Yük içeren iletken hücrelerini ayrıştırmak için kullanılan yüzey hücrelerinin sayısıdır.
f	: Akım yoğunluklarına karşılık gelen birim vektörü
b	: Manyetizasyon akımlarına karşılık gelen birim vektörü
p	: Yük yoğunluklarına karşılık gelen birim vektörüdür.
R_k	: k iletken elemanının kısmi direncini belirtirken
$L_{p,ki}$	: k iletken elemanı ile iletken elemanı i arasındaki kısmi endüktansları
$L_{m,ki}$	: k iletken elemanı ve manyetik malzeme elemanı j ile arasındaki kısmi endüktansları temsil belirtir.
$P_{k,l}$	: İletken elemanları k ve n arasındaki kısmi potansiyel katsayısını tanımlar
E	: Elektrik alanı
H	: Manyetik alanı
ρ	: Yük yoğunluğu
ε	: Elektriksel geçirgenlik
μ	: Geçirgenlik
σ	: İletkenlik

KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
BOS	: Sistem dengesi
CDM	: Temiz kalkınma mekanizması
DC	: Doğru akım
EFIE	: Elektrik alanı integral denklemi yöntemi
FDTD	: Zaman alanı sonlu farklar yöntemi
FEM	: Sonlu elemanlar yöntemi
FPV	: Yüzer fotovoltaik sistemler
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
KCL	: Kirchhoff'un akım yasası
KVL	: Kirchhoff'un gerilim yasası
LEMP	: Yıldırım elektromanyetik darbeleri
LPMS	: Yıldırım elektromanyetik darbelerden korunma sistemi
LPS	: Yıldırımdan korunma sistemi
LPZ	: Yıldırımdan korunma bölgeleri
MM	: Ağ yöntemi
MOM	: Momentler yöntemi
PAM	: Koruma açısı yöntemi
PEEC	: Kısmi eleman denklem devresi yöntemi
PV	: Fotovoltaik
RES	: Yenilenebilir enerji sistemleri
RSM	: Yuvarlanan küre yöntemi
SPD	: Aşırı gerilim koruma cihazı
TML	: İletim hattı teorisi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Şebekeye bağlı PV sisteminde enerji dönüşümünün gösterimi	6
Şekil 2.2. Yüzer PV Sistemi Bileşenleri Tipik Gösterimi	7
Şekil 2.3. Yıldırımdan Korunma Sisteminin Sınıflandırılması	9
Şekil 2.4. AC ya da DC kablolamadan gelen dalgalanmalara karşı invertörlerin en iyi şekilde korunması için DC-AC terminasyon seti.	16
Şekil 2.5. PV sisteminin ‘harici yıldırımdan korunma’ çözümü ve bileşenleri.....	17
Şekil 2.6. PV Panel hasarının grafik ile gösterimi	20
Şekil 2.7. IEC 62305-2 standardına göre bir yapının yıldırım riski değerlendirmesi yöntemi	24
Şekil 3.1. Bir segmentin PEEC eşdeğer devresi.....	31
Şekil 3.2. Hücredeki elektrik ve manyetik alanların konfigürasyonu	33
Şekil 4.1. PV modellemede kullanılan yöntemler	37
Şekil 4.2. (a) Bir iletken segmenti (b) Eşdeğer devre.	41
Şekil 4.3. C profil çeliğinin konfigürasyonu. (a) Genel bakış. (b) Kesit görünümü	41
Şekil 4.4. C çelik profilin deney konfigürasyonu	44
Şekil 4.5. C çelik profilin ölçülen ve hesaplanan devre parametreleri. (a) Direnç, (b) Endüktans.	45
Şekil 4.6. PV hücrelerinin kablolamasının ölçülen parametreleri. (a) Direnç, (b) Endüktans.	45
Şekil 4.7. Test için basitleştirilmiş PV sistemi. (a) laboratuvar kurulumunun genel görünümü.(b)test düzenlemesinin yapılandırması.(c)PV panelinin yapılandırması.	46
Şekil 4.8. (a) PV panel dört ayağındaki akım dağılımının karşılaştırılması. (b) İki DC hattı arasında oluşan açık gerilimin karşılaştırılması.	46
Şekil 4.9. PV ünitesindeki iletkenler için temsili eşdeğer devre. (a)PV ünitesinin yapılandırılması. (b) İki iletken için eşdeğer devrenin diyagram örneği.....	47
Şekil 4.10. PV kurulumunun yapılandırmaları. (a) İzole olmayan LPS'li tek ayaklı montaj yapısı. (b) İzole olmayan LPS'li dört ayaklı montaj yapısı. (c) İzole LPS'li tek ayaklı montaj yapısı. (d) İzole LPS'li dört ayaklı montaj yapısı	48
Şekil 4.11. PV ünitesi için temsili eşdeğer devreler. (a) İzole edilmemiş LPS'li tek ayaklı montaj yapısı. (b) İzole edilmemiş LPS'li dört ayaklı montaj yapısı. (c) İzole edilmiş LPS'li tek ayaklı montaj yapısı. (d) İzole edilmiş LPS'li dört ayaklı montaj yapısı.....	48
Şekil 4.12. Farklı topraklama yöntemlerine sahip dört bacaklı montaj sisteminde $\pm$ dc kablolar arasındaki gerilim farkı	50

Şekil 4.13. İzolesiz LPS ile korunan sistemde $\pm$ dc kablolar LPS arasındaki gerilim farkı (a)Tek bacaklı montaj yapısı (b)Dört bacaklı montaj yapısı.	50
Şekil 4.14. İzole edilmemiş bir LPS ile korunan $\pm$ dc kabloları arasındaki gerilim farkı.....	51
Şekil 4.15. DC kablo düzenlerinin yapılandırılmaları	52
Şekil 4.16. Farklı kablo düzenlemelerine sahip $\pm$ dc kablolar arasındaki gerilim farkı.(a) Tek döngü düzeni. (b) Çift döngü düzeni	52
Şekil 4.17. PV Montaj Sistemi	52
Şekil 4.18. a)1 noktasında indüklenen gerilim. b) 4 noktasında indüklenen gerilim	53
Şekil 4.19. a)Metal frame yokken indüklenen gerilim b)Topraklanmış bacağın değişmesi ile indüklenen gerilim	54
Şekil 4.20. a) Toprak direncini değiştirildiğinde indüklenen gerilimler b) Karşılıklı etkiler göz ardı edildiğinde indüklenen gerilimler	54
Şekil 4.21. İki iletken için eşdeğer devrenin diyagram örneği	56
Şekil 4.22. İletim hattı altında bir PV dizisinin yapılandırması. (a) Sistemin genel görünümü. (b) Senaryo 1'in yan görünümü. (b) Senaryo 2'nin yan görünümü	57
Şekil 4.23. PV dizisinin ve bileşenlerinin sistem yapılandırması. (a) montaj yapısı. (b) PV modülü. (c) topraklama şebekesine sahip PV dizisi (üstten görünüm).....	57
Şekil 4.24. İletim direği ve topraklama şebekesi için basitleştirilmiş bir model.....	58
Şekil 4.25. (a) SPD'nin eşdeğer devre modeli ve (b) modeldeki doğrusal olmayan direncin karakteristiği	59
Şekil 4.26. +DC/- DC kabloları arasındaki indüklenen geçici gerilimler (a) hesaplanan sonuç. (b) ölçülen sonuç	60
Şekil 4.27. (a) Baypas diyotlarında indüklenen gerilimler. (b) PV metal çerçevesi ile PV kablosu arasında indüklenen gerilimler.....	60
Şekil 4.28. (a)+/-DC kabloları arasındaki indüklenen gerilimler.(b)Baypas diyotlarında indüklenen gerilimler.(c) PV metal çerçeve ile PV teli arasındaki indüklenen gerilimler.....	61
Şekil 4.29. İletken kesitinin ayrıklaştırılması	64
Şekil 4.30. Dikdörtgen kesitli ince tel modeli ve bitişik E ve H alan bileşenleri	66
Şekil 4.31. (a) PV sisteminin yapılandırması (b)Tek bir PV çerçevesinin yapılandırması	67
Şekil 4.32. (a)U-şekilli ve dikdörtgen çelik çubukların kesitleri(b) PV çerçeveleri ile 6-1, 3-1 ve 1-1 numaralı PV çerçevelerindeki negatif DC kabloları arasındaki yıldırım dalgalanma gerilimleri	67
Şekil 4.33. (a) Modellenen PV üretim sisteminin düzeni. (b) PV üretim sisteminin FDTD simülasyon modeli	68
Şekil 4.34. (a) Yıldırım test akımı dalga formu. (b) DC hattında yıldırım kaynaklı gerilim.....	69

Şekil 4.35. PV üretim sisteminde LPS'nin önerilen konumu.(b) LPS kurulumundan sonra DC hattında indüklenen gerilim.....	69
Şekil 4.36. (a) SPD'lerin DC hattı ile pozisyonları.(b) SPD montajı sonrası DC hattında yıldırım kaynaklı gerilim	70
Şekil 4.37. Tipik bir zemine monteli PV sisteminin bir bölümünün gösterimi; topraklama düzenlemeleri ve fotoğraflardaki ayrıntılar	72
Şekil 4.38. .(a) Topraklama sisteminin tipik bir dalının şematik gösterimi.(b) PV topraklama sisteminin şematik gösterimi	73
Şekil 4.39. (a)Model için kullanılan ağın 3 boyutlu görünümü.(b) X noktasındaki ilk darbe altında $\rho_g = 300 \Omega m$ dirençli bir toprak için P noktasında hesaplanan sonuçlar	75
Şekil 4.40. (a) P noktasındaki topraklama sistemine doğrudan bağlı olan dize kutusunda yangın ve güç dalgalanması hasarları.(b) X noktasındaki sonraki bir darbe altında $\rho_g = 300 \Omega m$ dirençli bir toprak için P noktasında hesaplanan sonuçlar. Ek parça aşırı gerilimin önünü göstermektedir	76
Şekil 4.41. Büyük ölçekli bir fotovoltaiik sistemin şematik diyagramı	78
Şekil 4.42. Yıldırım düştüğünde (V1, V2, V3 ve V4) köşe noktalarındaki geçici aşırı gerilimler (a) 1 noktasına düştüğünde (b)4 noktasına düştüğünde.....	80
Şekil 4.43. Yıldırım 1 noktasına düştüğünde FDTD ve PEEC yöntemlerine göre 1 noktasındaki indüklenen gerilimler.(a) 1. nokta kil toprakla ve (b) 4. nokta kil toprakla	80
Şekil 4.44. (a) 1. Nuktada yıldırım düşmesi sonucu killi kumlu topraklarda toprak öz direnci arttığında oluşan geçici aşırı gerilimler görülmektedir. (b) Killi kum zeminlerde FDTD ve PEEC yöntemleri için nokta 1 gerilimi.....	81
Şekil 4.45. a) Metal çerçevenin olmaması durumunda oluşan geçici aşırı gerilimler. (b) Çerçevesiz PV modülü ile FDTD ve PEEC yöntemleri için Nokta 1'deki gerilim	81
Şekil 4.46. (a)Topraklanmış bacağın değişimi altında geçici aşırı gerilimler.(b)Topraklama ayağının değişmesiyle FDTD ve PEEC yöntemleri için 1 noktasındaki gerilim değerleri	82
Şekil 4.47. (a) Ölçüm kurulumunun devre şeması.(b) Laboratuvarda küçük ölçekli PV sistemi.....	83
Şekil 4.48. PEEC, FDTD ve LAB sonuçlarına göre (a)Nokta 2'deki geçici aşırı gerilimler.(b) Nokta 3'teki geçici aşırı gerilimler.c) 2 ve 3 noktalarındaki aşırı gerilim tepe değerlerinin karşılaştırılması.....	83
Şekil 4.49. (a) Bir iletken segmentinin PEEC modeli. (b) MTL için 1-D FDTD modeli	84
Şekil 4.50. PV paneline yıldırım düşmesi durumunda yıldırım akımının sistemdeki rotası	85
Şekil 4.51. (a) PV panel destek yapısı ve DC hattını içeren bir PV panel sisteminin yapılandırması.(b) Yeraltı kablosunun topraklama konfigürasyonu	85
Şekil 4.52. (a) İletim direğinin topraklama elektrotlarının şematik diyagramları.(b) Transformatör modeli. (c) SPD modeli	86
Şekil 4.53. Kablo kılıfının sol ucunun, sağ ucunun ve her iki ucunun (yukarıdan aşağıya) topraklanması	87

Şekil 4.54. (a) sol uç(b) sağ uç(c) kablunun her iki ucu topraklandığında, kablo çekirdeklerinden kablo yalıtım kılıfına kadar aşırı gerilimin kablunun farklı yerlerinde dağılımı.....	87
Şekil 4.55. 18 PV dizisinden oluşan dağıtım şebekesinin şematik diyagramı	88
Şekil 4.56. (a) 18 PV dizisi (b) 9 PV dizisi bağlantısı olan trafonun solunda SPD olmadığında aşırı gerilimin kablunun solundan farklı bir mesafede toprağa dağıtımı	89
Şekil 4.57. (a) İncelenen santralde güç trafosu ve invertörler kullanılmıştır.(b) Güneş enerjisi santralinin tek hat şeması.....	90
Şekil 4.58. (a) PV invertörleri için önerilen frekans bağımlı modelleme.(b) PV invertörünün AC ve DC tarafına SPD montajı.....	90
Şekil 4.59. (a) SPD frekans bağımlı modelleme.(b)İletken bir parçanın vektör uyarlaması yöntemiyle PEEC modeli.....	91
Şekil 4.60. PV panellerinden biri. (a) Genel görünümü, (b) bir iletkendeki iki düğüm için eşdeğer devrenin yapılandırması ve (c) geçici durum devre modeli	92
Şekil 4.61. PEEC yöntemi kullanılarak bir güneş panelinin tam devre modeli	92
Şekil 4.62. (a) PV'ler için EBS((1). Bitişik paneller için eş potansiyel bağlama(2),PV dizilerini bağlamak için eş potansiyel bağlama, (3). PV'nin yapısı ve (4). Topraklama telinin geçtiği bir çelik köşe).(b) PV'deki topraklama sisteminde bağımsız topraklama kullanılması.(c) ortak toprak kullanılması.....	93
Şekil 4.63. (a) #1 invertör girişinde aşırı gerilimler oluşması durumu.(b) #1 ila #3 invertörlerinin girişindeki aşırı gerilimlerin maksimum değeri	94
Şekil 4.64. İnverter modellemede ısı emici kaçak kapasitansının E_{SPD} üzerindeki etkisi	95
Şekil 4.65. Farklı panel modelleme modlarının E_{spd} üzerine etkisi.....	95
Şekil 4.66. (a) Birinci dizinin #1 numaralı panelinde oluşan aşırı gerilimler.(b) İlk dizinin #1 ila #3 numaralı panellerindeki aşırı gerilimlerin maksimum değeri.....	97
Şekil 4.67. MATLAB ortamında doğrudan yıldırım darbelerinin santral alanına dağılımı. (a) Genel görünüm. (b) Üstten görünüm	97
Şekil 4.68. MATLAB'da paratoner kullanılarak enerji santrali koruma simülasyonu. (a) Genel görünüm. (b) Üstten görünüm	97
Şekil 4.69. (a) #1 invertöründe oluşan aşırı gerilim.(b) Santralin #1 nolu invertör girişindeki aşırı gerilimler	98

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Yıldırımdan zarar gören PV Sistemler	21
Tablo 2.2. Risk Faktörleri ve İlişkili Risk Eşiği Değerler	23
Tablo 2.3. Yapı Risk Değerlendirmelerinde Uygulanabilecek Yıldırım Çarpma Noktaları	24
Tablo 4.1. Yıldırımın Geçici Etkileri Altında PV Sistemleri Modellenmesinde Kullanılan Yöntemlerin Karşılaştırması.....	38
Tablo 4.2. PV sisteminin dört ayağındaki darbe akımı tepe noktalarının karşılaştırılması.....	46
Tablo 4.3. Dört Bacak Montaj Sisteminde Farklı Topraklama Yöntemleriyle Endüklenen Gerilim Genliği.....	49
Tablo 4.4. Gerilim Genliğinin Karşılaştırılması.....	50
Tablo 4.5. DC hattında indüklenen gerilimler.....	70
Tablo 4.6. Kullanılan Modeller	84
Tablo 4.7. SPD Kurulumunun İnvertör Girişindeki Aşırı Gerilimlerin Maksimum Değeri Üzerindeki Etkisi	94
Tablo 4.8. Maksimum Yıldırım Akımının İnvertör Girişindeki Aşırı Gerilimlerin Maksimum Değerine Etkisi ve E_{SPD}	96

1. GİRİŞ

Yıllar içinde artan nüfus ve teknolojinin beraberinde getirdiği yenilikler enerji tüketiminin artmasına neden olmuştur. Artan enerji tüketimi, elektrik üretimi için çeşitli yenilenebilir enerji santrallerinin kurulumuna ve kullanılan yöntemlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları(RES) doğal enerjiyi kullanan temiz kaynaklardır ve tükenmemektedir. Gelişen teknoloji ile RES'lerin enerji kaynağı olarak kullanımı günümüzde artış göstermektedir, fotovoltaiik (PV) sistemleri, günden güne gelişen ve çeşitli alanlarda kullanılan, yenilenebilir enerji kaynaklarındandır [1].

Fotovoltaiik (PV) sistemler, güneş ışıının miktarını arttırmak ve gölgelenmeyi azaltmak için açık ve güneş ışığı alan bölgelere kurulmaktadır. Çalışma prensibi gereği kurulduğu alanların korunmasız olması sebebi ile yıldırım düşmesine maruz kalmaktadır [2].

Güneş ışığındaki fotonlar PV hücresindeki yarı iletken bir malzemeye çarptığında elektronlar serbest kalır ve hücrenin önü ile arkası arasında bir gerilim oluşur. Bu, elektrik çıkarma olasılığını doğurur. Tek bir PV hücresi düşük gerilim üretir; Tesis yüklerine uygun gerilimi elde etmek için güneş pilleri seri olarak bağlanarak bir PV panel oluşturulur. Buna karşılık PV paneller, doğru akım üreten tüm dizileri oluşturur [3].

PV sistemi çalışma prensibi, güneş ışığından elde edilen enerjiyi dönüştüren bir sistem olarak tanımlanmaktadır ve günümüzde yaygın olarak tercih edilmektedir. Gelişen teknoloji ile PV sistemlerinin kullanım alanı yaygınlaşmakta ve sistemde kullanılan elektronik cihazların performansını daha yüksek hale getirmektedir. Fakat PV dizilerine güneş ışığının beklenenden az gelmesi, sistemde dikkate alınan verimliliği azaltır. Bu nedenle bir PV kurulumunda, kurulu güneş paneline gelen ışığa engel olacak tüm unsurlar giderilmelidir. PV uygulamaları incelendiğinde kurulumun, zemine monteli ve çatıya monteli olarak kuruldukları görülmektedir. Güneş paneli kurulumu için inşaat alanları da deniz veya büyük su depolarına maksimum fayda sağlayacak şekilde kurulmuştur. PV sistemi kurarken dikkat edilmesi gereken hususlardan biri, güneş panellerine yıldırım düşmesinin kurulu güneş enerjisi sistemine zarar vermesinin

önlenmesidir. Açık alanlarda veya dış mekan kurulumları gibi yüksek çatılarda kurulu güneş enerjisi sistemi için yıldırımdan korunma gereklidir [4].

Enerji sektöründe PV sistemlerine yatırım hızla artmaktadır ve bu artışta en büyük pay PV sistemlerinin güvenli çalışması olmuştur. Yıldırım, PV sistemlerinin korunmasız ve yüksek konumları ve büyük alanlara kurulması nedeniyle PV sistemine yönelik en büyük tehditlerden biridir. PV sistem hasarlarının ortalama %26'sının yıldırımdan kaynaklandığı bildirilmiştir. Hasarlı cihazların değiştirilmesi ve güç kaynağının kesilmesi yatırımcılar için büyük kayıplara neden olmuştur. Bu nedenle, yıldırım çarpmalarına karşı korunaklı ve güvenilir PV sistemleri gereklidir [5].

Çatı üstü kurulan fotovoltaik sistemler, temel, yapısal, arazi maliyeti, saha geliştirme, destek vb. gibi maliyetler gerektirmemektedir. Hükümet ya da hükümet dışı kuruluşlar çatı üstü güneş enerjisi kurulumları için girişimlerde bulunmuştur ve CDM (Temiz Kalkınma Mekanizması) ile ticari fayda sağlanması ve arz-talep arasındaki açığı kapatması hedeflenmektedir [6].

Fotovoltaik Sistemlerinin verimliliği ve etkinliği aşağıdaki değişkenlere bağlı olarak değişiklik gösterir [6].

- **PV'nin Konumu:** PV sistem üzerine düşen güneş ışığı miktarı, PV tarafından üretilen enerjiyi etkilemektedir.
- **PV'nin Eğim Açısı:** PV dizilerinin yüzeyine gelen güneş ışıınımı miktarı, güneş panellerinin o yöne eğilmesiyle artırılabilir, bu da dizi üzerine gelen ışıınım miktarının artmasını sağlayıp üretilen güç miktarını artıracaktır [5-9]. Güneş ışıınımı miktarı dönemsel(yaz, ekinoks ve kış aylarında) farklılık gösterecektir. Buna bağlı olarak, değişen dönemlerdeki talep edilen enerji ihtiyaçlarını karşılamak için mevsimsel değişken eğim ve çeşitli montaj modül opsiyonları bulunmaktadır. Ortalama yıllık enerji mikatrını artırmak için ise sabit eğim alternatif montaj yöntemleri vardır.
- **Yönlendirme:** Maksimum enerji çıkışı için binanın yönü ve güneş panellerinin konumu gibi unsurlar çok önemlidir. Örneğin, kuzey yarımkürede güneye bakan bir cephe, yıl boyunca en fazla güneş ışıınımını yakalayacak ve en fazla elektriği üretecektir.

Bir PV sisteminin montajı genellikle bir binanın çatısına veya duvarlarından birine doğrudan bağlantıyla yapılır. Böyle bir montaj çözümü kullanılarak, eski kullanılmayan alandan faydalanılabilir ve bir bina sıklıkla yükseltildiği için gölgeleme kayıpları daha az önemli olabilir. Ancak her yeni teknolojinin uygulanmasında olduğu gibi süreç zorluklar da içerebilmektedir. Uygulamanın başarılı olması için, PV hücrelerinin kurulacağı binanın spesifik özelliklerinin yanı sıra mekansal çevresi de yakından dikkate alınmalıdır. Mali kısıtlamalar, güvenlik gereklilikleri ve inşaat izinleriyle ilgili yasalar, belirli mülk için hangi uygulamaların mümkün olabileceğini daha da sınırlandırmaktadır [3].

Çalışmanın ikinci bölümünde, farklı alanlara kurulan PV sistemleri ele alınmış ve bu alanlarda genellikle kullanılan LPS'ler göz önünde bulundurularak yıldırımdan korunma yöntemleri hakkında teknik bilgiler verilmiştir, üçüncü bölümünde ise yıldırımın sistemler üzerindeki etkilerini analiz eden elektromanyetik yöntemler PEEC, FDTD ve MOM formülasyonları ile detaylı açıklanmıştır, dördüncü bölümde, bu yöntemleri kullanan son yıllardaki çalışmalar incelenmiş ve sonuçları tartışılmıştır.

2. PV SİSTEMLER VE YILDIRIMDAN KORUNMA

2.1. Çatı PV Sistem Bileşenleri

Üretim modüllerini bir tesisin elektrik sistemine ve şebeke şebekesine tam olarak entegre etmek için PV modüllerinin kendisi ve gerekli kablolama dışında diğer hayati bileşenlere ihtiyaç vardır [3].

Tesisin elektrik sisteminde sıklıkla alternatif akım kullanılmakla birlikte, modüller doğru akım ürettiğinden, akımın dönüştürülebilmesi için güç çevirici sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bir merkezi güç invertörü veya birkaç küçük invertör kullanılabilir; her iki durumda da bileşen, PV panellerin ardından gelir. İnverterden sonra dağıtım paneli gelir. PV sistemini tesisin elektrik sistemine ve şebeke şebekesine bağlamak, tesis içindeki yüklerin hemen beslenmesini veya şebekeye gücün geri beslenmesini mümkün kılmak için gereklidir [3].

2.1.1. Montaj Sistemi

Montaj sistemi, PV sistemlerinin önemli bileşenlerinden biridir. Bu durumda talep edildiği üzere çatıya kurulum için tasarlanmış bir sistem gereklidir. Montaj sisteminin tipi büyük ölçüde çatının tipine ve yönüne bağlıdır. Sabit sistemler ve balastlı sistemler olmak üzere iki alt grup bulunmaktadır. Kurulumun yapılacağı çatının özellikleri dikkate alınarak en uygun montaj sistemi seçilmelidir [3].

2.1.2. Modül Yönelimi

PV modüllerinin elektriksel üretimi, ışınlamaya göre değiştiği için büyük ölçüde yönelimine bağlıdır. Üretimi en üst düzeye çıkarmak için tek bir modülün azimutunu ve eğimini bulmak oldukça kolay olsa da, eksiksiz bir PV sistemi kurarken başka faktörler de devreye girer. Yatırım maliyeti, gölgeleme, üretim tutarlılığı, aşırı üretimin önlenmesi, taşıma kapasitesi ve körleme, tercih edilen yönelimi belirlerken ele alınması gereken olası faktörlerdir [3].

Yenilenebilir enerjiyi üretmek ve kullanmak amacıyla, dünya genelinde güneş enerjisi sistemleri tercih edilmekte olup daha büyük ölçekli güneş enerjisi çiftlikleri kurulmaktadır. Bunlar, güneş ışığını elektriğe dönüştüren, bazen güneş parkları veya

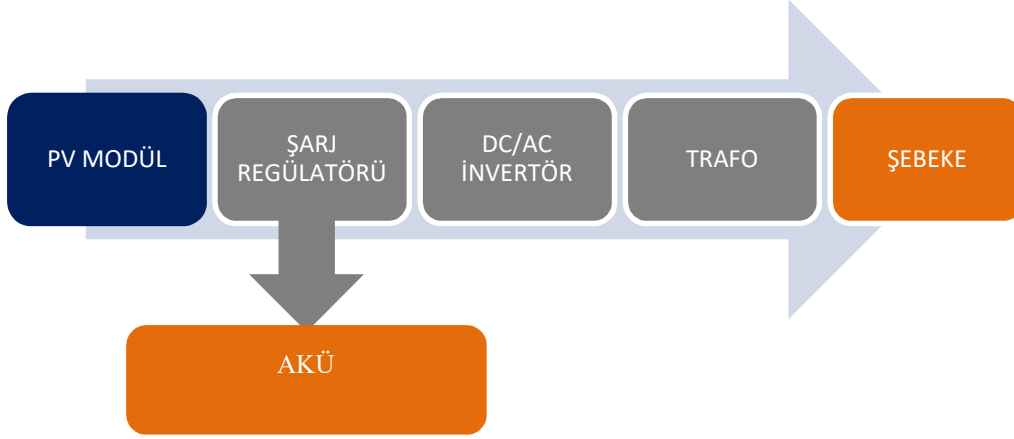
güneş alanları olarak adlandırılan, yere monte edilmiş fotovoltaik (PV) panel dizileridir [7].

2.2. Saha PV Santrallerinde Sistem Ana Bileşenleri

PV dizilerine gelen güneş ışığının dönüşümü sonucunda üretilen elektrik enerjisi, şebekeye ulaşmadan önce bir dizi dönüşüm evrelerinden geçmektedir. Bu dönüşümler özellikle akım ve gerilim ayarlarını, DC-AC dönüşümünü ve ayrıca depolama ve iletim yolları arasında güç dağıtımını içerir. Tüm bu işlemlerin toplamı, güç koşullandırma olarak tanımlanabilmektedir.

Güç koşullandırma, PV sistemi tarafından üretilen elektrik enerjisinin tüketicilere etkili ve güvenli bir şekilde ulaşmasını sağlayan, güneş enerjisi santralının önemli bir işlevidir. Doğru güç koşullandırmasını sağlamak için PV modülü ve bir dizi özel bileşen gereklidir.

Fotovoltaik tesisler, sistemi dengelemeye ve sürdürülebilir bir şekilde çalışır hale getirmeye yarayan büyük miktarda destekleyici ekipman içerir. Bu sistemin bileşenleri, invertörler, kontrolörler, transformatörler, kablolama, konektör-bağlantı kutuları, anahtarlar, izleme cihazları, şarj regülatörleri, enerji depolama cihazları olarak sıralanmaktadır. Bu cihazların tümü sistemin güneşten aldığı enerjiyi elektrik enerjisine dönüşümünden sonraki adımlarda elektrik gücünün tüketicilere ulaştırma ve kullanıma hazırlanmasına yardımcı olmaktadır. PV sistem tasarımı modülerdir, bu yapıları sayesinde, sistemlerin altyapısında önemli bir etkilenme ve aksama olmadan sisteme ekstra bölümler eklenebilir veya hasarlı bölümleri ya da bakım gerektiren kısımları onarım için çıkarılabilir. Güneş enerjisi santralindeki enerji akışı, altyapısı sistem dengesi (BOS) olarak adlandırılan, kablolu ağ ve ilgili donanımın birbirine bağlanan çeşitli cihazlardan geçmektedir. BOS'un kalitesi, uzun süreli ve verimli çalışma sağlamak için çok önemlidir. Şebekeye bağlı PV sisteminin bileşenleri ve yapısı Şekil 2.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Şebekeye bağlı PV sisteminde enerji dönüşümünün gösterimi

2.3. Yüzer PV Sistem Bileşenleri

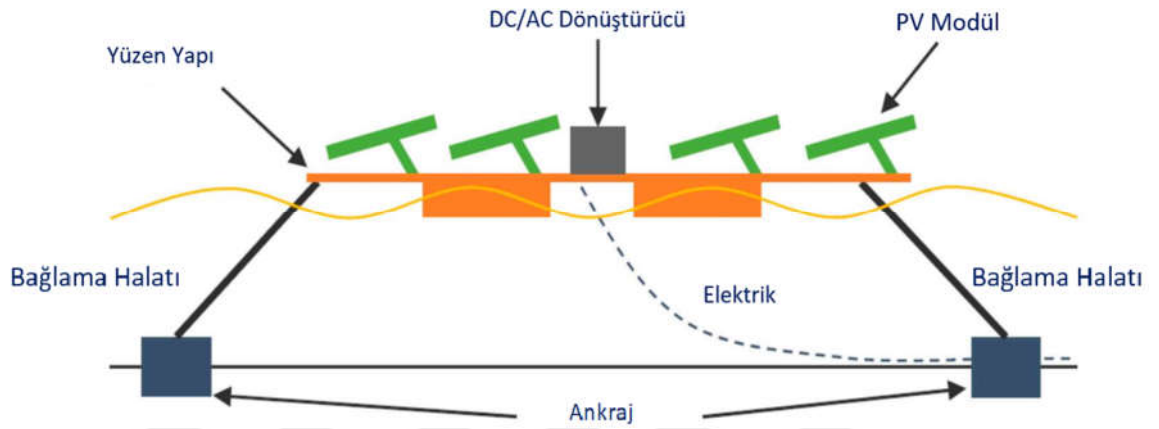
Arazilerin giderek azalması, enerji tüketimindeki artış ve fosil yakıtların çevreyi olumsuz etkilemesi ile açık deniz yenilenebilir enerji projelerinin gelişimine olanak sağlamaktadır [8]. Günümüz çalışmalarında, açık denizlere kurulan yenilenebilir enerjinin ana formları olan açık deniz rüzgarı, dalga ve gelgit enerjisi teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik birçok araştırma yapılmaktadır [9]. Ancak güneş enerjisi, deniz ortamında fazla araştırılmamıştır [10], Okyanuslar gibi açık denizlerde bu enerji kaynağını kullanmak için yüzer fotovoltaik (FPV) sistemler gerekmektedir. FPV sistem teknolojisinin deniz ortamında kurulumu ve kullanımının yaygınlaştırılması yenidir ve buna rağmen, dünya genelinde rezervuarlarda ve göllerde FPV çiftliklerinin çeşitli uygulamaları kullanılmaktadır [11].

Fotovoltaik teknolojisi, güneş ışınımını kullanır ve kirletici madde yaymadan ve çevresel etkilere neden olmadan onu elektriğe dönüştürür. Açık deniz güneş enerjisi santralleri buna ek olarak, yoğunlaştırıcı sistemlerin gereksinimlerini basitleştiren ve kolektör sıraları arasındaki gölgelemeyi önleyen dikey bir eksen etrafında güneş takibi, ve termodinamiğin verimliliğini artırabilen sınırsız soğutma suyu mevcudiyeti döngüsü olmak üzere iki teknik avantaj sunar [12].

Bu teknolojinin deniz ortamında uygulanması yeni olmasına rağmen, FPV çiftlikleri dünya çapında göller ve rezervuarlar da dahil olmak üzere tatlı sularda konuşlandırılmıştır [13], [14]. Yüzer fotovoltaik sistemlerin, kara ortamında kurulmuş olan yerleşik PV sistemlerine göre temel avantajı, güneş pilleri üzerindeki suyun

soğutulmasıdır [15]. Böylece, yüzer güneş panelleri, %10'a kadar daha fazla elektrik üreterek daha yüksek enerji dönüşüm verimliliği sağlamış olur [16]. FPV sistemlerinin mikrowatt'tan megawatt'a kadar ölçeklenebilirliği ve panellerin temizlenmesi için bol suyun bulunması ise bu sistemin sunduğu avantajlardandır [17].

Açık denizlerde kurulan yüzer PV sistemleri, PV panelleri, invertörler, yüzer yapı, demirleme ve ankrajların olduğu bir sisteminden oluşmaktadır [18]. Tipik gösterimi Şekil 2.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Yüzer PV Sistemi Bileşenleri Tipik Gösterimi. [18]

Yüzer güneş enerjisi sisteminin verimini, su yüzeyine bağlı PV panel yüzeylerinin soğutma etkisi artırırken, fotovoltaik panellerin sıcaklığındaki artışlar ise panelin ömrünü ve sistemin güç çıkışını azaltmaktadır. Bu dayanarak, PV panellerde oluşan sıcaklık artışı sistemin genel elektrik performansı ve sistemin verimliliği açısından önemlidir ve dikkate alınmalıdır [18].

Daha önce yapılan araştırmaların bulgularına göre;

- **PV Sistemlerinde Soğutma Etkisi:** Bir saha deneyinde, yüzer panel sistemleri ve karada kurulu olan PV sistemleri arasındaki ısı kaybı katsayıları karşılaştırılmıştır [19]. Bu çalışmadaki deneysel veriler dikkate alınarak, açık deniz ortamındaki ısı kaybı faktörünün, özellikle kurulum tipi bağımsız olduğunda daha yüksek aralıkta olacağı görülmüştür. Buna göre PV sistemi ilgili 'Isı Kaybı Faktörü' yüzer PV sistem tipi için ayarlanacaktır [20].

- **Açık denizlerde PV Panel Geometrisi:** Dört patentli tasarım şemasının incelenmesi incelendiğinde, PV Panellerin geometri türleri için, yüzer uygulamalarda modüler olan ve farklı sistem boyutlarına uyacak şekilde özelleştirilmiş geometri türlerinin dikkate alınması gereken potansiyel bir tasarım şeması olması gerektiği belirlenmiştir [18].
- **PV Sistemlerinde Yapısal Kararlılık:** Daha önce yapılan çalışmalar, PV sistemlerinde oldukça dayanıklı malzeme kullanmanın ve kapasiteyi artırmaya yönelik uygulanabilirliğin hem teknik hem de ekonomik fizibiliteyi belirlediğini ortaya koymaktadır [20].

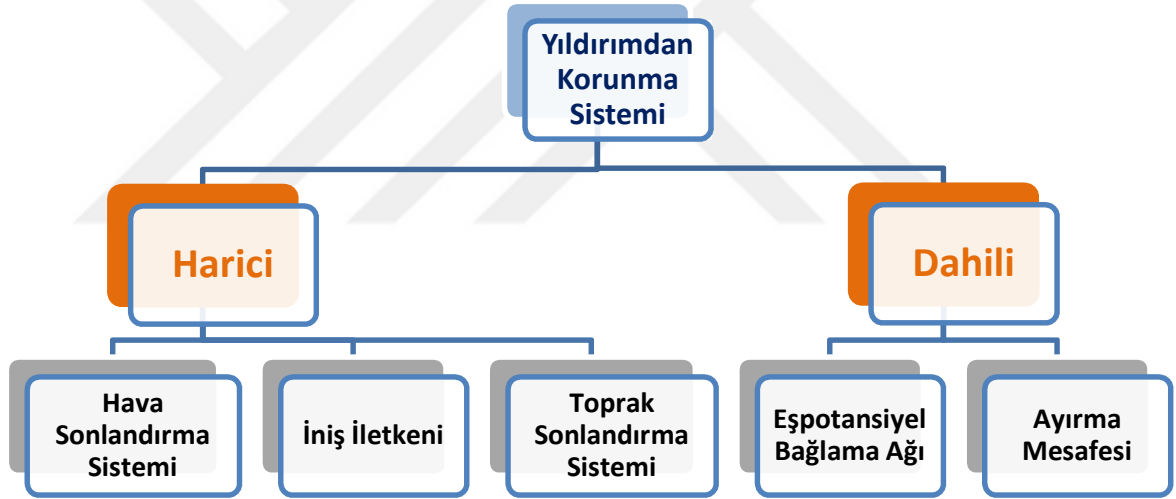
2.4. PV Sistemlerde Yıldırımdan Korunma

Fotovoltaik (PV) sistemler, genellikle çatı üstü veya güneş enerjisi çiftliği gibi geniş açık dış mekanlara kurulur. Bu, elektrikli veya elektronik ekipmanın yakındaki yıldırım çarpmalarına maruz kalmasına neden olur. Binanın dışına veya içine yerleştirilen elektrikli veya elektronik ekipman güç sisteminin yıldırıma maruz kalması sonucunda sistemin çalışması kesintiye uğrayabilir ya da ekipmanlar çalışmaz duruma gelebilir. Bunun sonucunda sistemin yenilenmesi gerekecektir ve ek maliyetler oluşacaktır. Bu nedenle, bir PV kurulumunda eksiksiz bir yıldırımdan korunma sistemi çok önemlidir ve sistemin kesintiye uğramasını önlemek için pratik bir gerekliliktir; aynı zamanda sistem gerekliliklerini göz önünde bulundurarak kurulan bir yıldırımdan korunma sistemi ile yıkımın yanı sıra can kaybına yol açan arızalardan da kaçınılacaktır [21].

Fotovoltaik tesisler çalışma prensibi gereği geniş yüzey alanına sahiptir ve alçak gerilim elektrik ağları ve sistem bileşenlerinin şok direnci, yıldırım akımının sisteme verdiği hasarın artmasına sebep olur. Bu durum, hem yıldırım akımının sistem bileşenleri üzerinden doğrudan akışından hem de sistemin yakınındaki yıldırım deşarjları sonucu tesisat içerisinde oluşan dalgalanmaların etkilerinden kaynaklanabilmektedir. Bu tip cihazların yıldırım hasarlarına karşı korunması gerekmektedir ve en iyi çözüm PN-EN 62305-1...4 standardına uygun hale getirilmesidir [17].

Çatı üstüne kurulan PV sistemler, yerleşim alanının en açık ve çatının en yüksek noktasıdır. Bu nedenle, yıldırımın doğrudan çarpma olasılığı çok yüksektir. Etkin

akımın darbe yerinin toprağa yönlendirilmesi ve bunların içerisinde güvenli bir şekilde dağıtılması, fotovoltaik modülleri ve tesisatları hasara veya yangına karşı korur. Bu koruma sayesinde sistem ekipmanında ve yaşam alanında bir elektrik riski aktarılmayacaktır. Fotovoltaik sistemlerin yıldırımdan korunması, sisteme doğrudan yıldırım çarpmalarına ve bu nedenle sistemlerde indüklenen aşırı gerilimlere karşı PV sistemlerini korumaya dayanmaktadır. Yıldırımdan korunma sistemleri, PV sistemlerinde, LPS elemanları ve PV yapının iletken parçaları arasında elektrik kırılcımlarını ve akımı önleyebilecek yeterli bir ayırma mesafesine sahip bir koruma bölgesi içine yerleştirilmesi gerekmektedir. Yıldırımdan korunmayan bir nesne olması durumunda PV modülleri ve destekleyici yapı topraklanmalıdır. Bunun yanında Fotovoltaik sistemler, sistemde kurulu bir harici yıldırımdan korunma sistemi olup olmadığına bakılmaksızın aşırı gerilimlere karşı da sistem ayrıca korunmalıdır [17].



Şekil 2.3.Yıldırımdan Korunma Sisteminin Sınıflandırılması. [22]

2.4.1. Harici Yıldırımdan Korunma Sistemi

Harici bir yıldırımdan korunma sistemi tasarımı, bir yakalama ucu sistemi aracılığıyla yıldırım akımını durdurmak ve bir iniş iletkeni aracılığıyla güvenli bir şekilde zemin seviyesine iletmek ve yıldırım akımını bir toprak sonlandırma sistemi aracılığıyla toprağa iletmeye dayanmaktadır [13], [23].

2.4.1.1. Hava Sonlandırma Sistemi:

Çatının şekline, malzemesine ve binanın kullanımına bağlı olarak çatıya farklı tipte yakalama ucu sistemleri monte edilebilir. Ayrıca korumanın türü ve korunması gereken kritik alan yakalama ucu sisteminin seçimini etkiler. Bu faktörler dikkate alınarak yakalama ucu sistemi olarak kaplamalar, örgülü iletkenler ve katener kabloları (izole edilmiş veya izole edilmemiş) monte edilebilir. Binaya kurulan bu Yakalama ucu sistemleri, yıldırıma karşı tam koruma sağlayan yöntemlerle kurulmalıdır. Yakalamalı sonlandırma sisteminin tasarımı, standartlarda üç yöntem olarak açıklanmaktadır. Bu yöntemler, yuvarlanan küre yöntemi (RSM), koruma açısı yöntemi (PAM) ve ağ yöntemi (MM) dir. Bu üç yöntemin uygulanması, sistemin yapısına bağlı olarak belirlenmektedir. Ayrıca binanın yüksekliği, koruma açısı yönteminde, koruma senaryosunun belirlenmesinde özel bir faktördür [22].

2.4.1.2. İniş İletkeni:

Yıldırımdan korunma sisteminin kurulu olduğu bir binada, iniş iletkenleri yıldırım akımının toprağa güvenli geçişini sağlamaktadır. Bu yöntem, ayrı iletken bantlar/teller veya duvarların takviye çubukları gibi beton kolonlar ve çelik yapıli çerçeveler gibi binanın kendi yapısında var olan bileşenleri ile uygulanabilmektedir. Yalıtılmamış LPS için muhtemelen binanın açıkta kalan köşelerine en az iki iniş iletkeni monte edilmediği sürece; Gök gürültülü fırtınalı dönemlerde insan temasına maruz kalacak kapı, pencere çerçeveleri, korkuluklar vb. ile minimum mesafe(ler) korunarak iniş iletkenleri yapı etrafında eşit şekilde dağıtılmalıdır. Uzun yapıların tüm iniş iletkenlerini düzenli dikey aralıklarla (örneğin 20 m) bağlaması sistemi eş potansiyelde tutabilir. Çubuk hava sonlandırma için izole LPS'de, her direk için bir iniş iletkeni gereklidir, ayrıca katener kabloları için destek başına en az bir iniş iletkeni gereklidir. İniş iletkenlerinin düz ve dikey olarak döşenmesi gerektiği, döngüler halinde veya sarkan şekilde döşenmemesi gerektiği unutulmamalıdır. Eğer sistemde döngülerden kaçınmanın mümkün olmadığı durumlarda ise boşluk boyunca ayırma mesafesi, denklem olarak hesaplanabilen minimum ayırmadan (s) daha büyük olması gerektiği dikkate alınmalıdır [22].

2.4.1.3. Toprak Sonlandırma Sistemi:

Yıldırım darbe akımı iniş iletkenlerinden geçtikten sonra, toprak sonlandırma sistemi aracılığıyla toprağa iletilecektir. Her sistemin sistem yapısına uygun bir topraklama sistemi olmalıdır. Bina topraklama sistemleri, dikey veya yatay iletkenler veya bunların bir kombinasyonu şeklinde olabilmektedir ve bu tür sistemlere A tipi topraklama sistemleri adı verilmektedir. İkinci topraklama sistemi, yapı duvarlarından yaklaşık bir metre mesafede binanın çevresine döşenen kapalı halka iletken olan B tipi toprak sonlandırma sistemi olarak adlandırılmaktadır. Belirli bir halka iletkenin uzunluğunun %80'i toprakla temas halinde olmalıdır. LPS sınıfına bağlı olarak, A tipi sistemdeki her iniş iletkenine iki elektrot konfigürasyonunda belirli uzunlukta yatay veya dikey elektrotlar bağlanmalıdır; Halka iletkenli B tipi topraklama sistemlerinde, halka elektrot yarıçapının A tipi topraklama sisteminde belirtilen uzunluktan az olması durumunda, iniş iletkenlerinin halka elektrota bağlandığı halka iletkenlere ilave yatay veya dikey elektrotlar eklenebilir. B tipi topraklama sistemlerinde de toprak elektrotlarının yapının içine bodrumdan veya yapı içindeki doğal elemanların halka iletken olarak kullanılmasına izin verilmektedir. Ancak bu tür bir kullanım için yerine getirilmesi gereken çeşitli kriterler vardır [22].

2.4.2. Dahili Yıldırımdan Korunma Sistemi

Dahili LPS'nin ana kapsamı, iletken kısımlarda ya da harici LPS'de akan yıldırım akımı nedeniyle, PV sisteminde tehlikeli kıvılcım oluşumunun önlenmesidir. Dahili LPS, eşpotansiyel bağlama ve parçalar arasındaki elektrik yalıtımını içermektedir. LPS'nin yapısal metal parçalarla, dahili sistemle, metal parçalarla, dış iletken ekipmanlarla ve yapıya bağlı hatlarla ara bağlantısı eşpotansiyel bağlama olarak adlandırılmaktadır ve parçalar arasındaki elektrik yalıtımında, hava sonlandırma veya alt kısım arasındaki ayırma mesafesine uygunluğu dikkate alınmalıdır. LPS sınıfına, iletkenlerin uzunluğuna, yalıtım malzemesine ve yıldırım akımının paylaşımına bağlı olarak iletken ve tesisatın metalik kısımları dikkate alınmalıdır [14], [24].

Açıklanan LPS, LEMP tarafından geliştirilen, bir PV kurulumunun elektrikli ve elektronik ekipmanının iletilen veya indüklenen dalgalanmalara karşı korunmasını garanti etmez. Bu nedenle korunacak sistemin LPZ'ye bölünmesi, her bölge için LEMP şiddeti ekipmanının izolasyon dayanım kapasitesi ile uyumlu olacak şekilde yapılmalıdır.

Topraklama, bağlama, manyetik koruma, hat yönlendirme ve koordineli SPD korumasını içeren sistem LEMP koruma önlemleri sistemi (LPMS) olarak adlandırılır [24], [25].

Eşpotansiyel bağlama ağı, iç LPZ'deki tüm ekipmanlar arasındaki tehlikeli potansiyel düşüşlerini azaltmanın yanı sıra manyetik alanı da kısıtlar. Düşük empedanslı bağlama sisteminin başarısı, yapının LPZ'si içindeki eş potansiyel bağlama iletkenlerinin yardımıyla tüm metal bileşenleri (tüm metal tesisatlar, betondaki takviyeler, ızgaralar, kablo kanalları, metal unları, besleme hatları vb.) doğrudan veya aşırı gerilim koruma cihazları (SPD'ler) aracılığıyla korumaktadır. Koruma sistemleri, dahili kaynaklı aşırı gerilimleri en aza indirmektedir ve Manyetik koruma ya da iç hatların korunması, manyetik alanı zayıflatmaktadır. Ayrıca dahili hatların uygun şekilde yönlendirilmesi ise endüksiyon döngülerini en aza indirmektedir ve dahili dalgalanmaları azaltmaktadır. Uzamsal ekranlama ve hat yönlendirme birleştirilip kullanılabileceği gibi ayrı da kullanılabilmektedir [24].

PV sistemlerin bir parçası olan elektrikli ve elektronik ekipmanları aşırı gerilimlere karşı korumak için faz ile toprak arasına aşırı gerilim koruma cihazları koyulur. SPD'ler çalışma prensibine bakıldığında, sistemde nominal akım için yalıtkanlar ve gelen dalgalanmalar durumunda iletkenler gibi davranarak doğrusal olmayan bir gerilim-akım karakteristiği sunar. SPD'ler, yıldırım akımını düşük empedanslı yollardan topraklama sistemine yönlendirir ve aynı zamanda oluşan aşırı gerilimleri ekipmanın izolasyon dayanımının altında tutar [24], [26].

PV sistem bileşenleri arasındaki tehlikeli kıvılcımları azaltmak ve PV sistemini eşpotansiyel hale getirmek için tüm SPD'ler ve invertör ekipmanı topraklaması Eşpotansiyel bağlama çubuğuna bağlanmalıdır, bu bağlama çubuğu toprağa yakın ana topraklama çubuğuna bağlanmalıdır sonlandırma sistemi ve ayrıca panellerin çerçevesi hem eş potansiyel bağlama çubuğuna hem de ana topraklama çubuğuna doğrudan bağlanmalıdır. Sistemin elektronik ekipmanlarını eşpotansiyel bağlama çubuğuna bağlayan topraklama iletkenlerinin boyutları, iletken üzerinden taşınabilecek indüklenen akımın hacmine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. [22].

Aşırı gerilim koruma cihazları üç ayrı tipte ifade edilmektedir [24]:

- **Tip I:** 10/350 μ s yıldırım akımına karşı birincil koruma sağlayan bu SPD'ler, LPZ 1-LPZ 0 ya da LPZ 1-LPZ 0 arasındaki sınırlarda kurulumun giriş noktasına kurulmaktadır.
- **Tip II:** 8/20 μ s dalgalanma akımlarına karşı koruma sağlayan bu SPD'ler, LPZ 2-LPZ 1 arasındaki sınırlardaki sistemin ana düğüm noktalarına monte edilmektedir.
- **Tip III:** 8/20 μ s dalgalanma akımlarına ve 1,2/50 μ s dalgalanma aşırı gerilimlerine karşı hassas koruma sağlayan bu SPD'ler, hassas elektronik cihazları, uzak mesafeden gelebilecek yıldırım çarpmalarına karşı korumaktadır. Tip III SPD'lerin kurulumunda, her zaman en azından tip II SPD'lerden sonra kurulması gerektiği dikkat edilmelidir.

2.5. Çatı PV Sistemlerinde Yıldırımdan Korunma Sistemi

Bir binanın yıldırımdan korunma sistemi standartlarda “bir yapıya yıldırım düşmesi nedeniyle oluşan fiziksel hasarı azaltan komple sistem” olarak tanımlanmaktadır. Binada oluşan bu fiziksel hasarlar ya basamaklı liderin yapıya takılmasıyla ya da yandan flaşın çıkabileceği yakındaki bir nesneyle meydana gelebilmektedir. Doğrudan çarpma veya yandan parlama durumunda, yıldırımın darbe akımının hızlı yükseliş süresi nedeniyle, binanın iç kısmındaki (ve aynı zamanda dış kısmındaki) iletken kısımlarda ark meydana gelebilir. Bu arklanma, yakınlarda patlayıcı madde depolarının olması durumunda yangına ve hatta patlamaya neden olabilir. Aksine, yakınlara yıldırım düşmesi durumunda yapıda güçlü bir elektromanyetik alan oluşacak ve bu alan bina içindeki elektrikli ve elektronik ekipmanlarda aşırı gerilime neden olabilecektir. Eksiksiz bir Yıldırımdan korunma sisteminin kurulumunda bu hasarlara sebep olan her iki durumun da dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle binalar için sağlanan yıldırımdan korunma teknikleri sınıflandırılmaktadır ve harici Yıldırımdan Korunma Sistemi (LPS) ve dahili Yıldırımdan Korunma Sistemi olmak üzere iki ayrı grupta değerlendirilmekte ve incelenmektedir [22].

PV panellerini doğrudan darbelerden ve indüklenen etkilerden koruyabilecek uygun yakalama ucu sistemini tasarlamak için tasarımcı tarafından bazı ekstra önlemlerin

alınması gerekir. LPS ile korunan PV sistemleri aynı zamanda bu LPS'den izole olarak korunması gerekmektedir. Bu izolasyonu sağlayabilmek için ise, panellerin şekli, yüksekliği ve toplam konfigürasyonu ve ayrıca her panelin LPS'ye olan mesafesi dikkate alınmalıdır. Düz yüzeyli çatılarda çubuklardan oluşan yakalama ucu sisteminin koruma açısı yöntemiyle tasarlanmasında PV panellerin açısı veya hareketli panellerin maksimum açısı dikkate alınmalıdır; Panel yüzeyi döndürüldüğünde çubuğun koruduğu alan paneli kaplamalıdır. Yuvarlanan küre yöntemiyle sıradaki iki çubuk arasındaki mesafenin yanı sıra bir sıradaki çubukların diğer sıraya olan mesafesinin de elde edilebildiği görülmektedir. Ayrıca LPS tasarlanırken panellerin panel üzerindeki gölge etkisinin sistemin verimliliğini azaltabilecek şekilde en aza indirilmesine dikkat edilmelidir [22].

Literatürdeki mevcut çalışmalarda tanımlanan Konut/Ticari, bina PV sistem kurulumu türleri için harici ve dahili LPS'nin özeti [23].

Harici LPS: Seçiminde ve kurulumunda aşağıdaki parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir:

- Panellerin şekli, yüksekliği, düzeni ve panellerin LPS'den ayrılma mesafesi.
- PV Panellerinin LPS'ye olan ayırma mesafesi aşağıdakiler arasında tutulmalıdır:
 - İzole sistemlerde, LPS ve panelin çerçevesi.
 - İzole edilmemiş sistemde, Panelin bağlantı iletkeni ve montaj yapısı.

Harici LPS olmadan:

- DC tarafında iki set 'tip II-SPD' olmalıdır.
- AC tarafında ve yük merkezinde iki set 'Tip II-SPD' (mesafe 10 m'den fazla) olmalıdır.

Harici LPS Yalıtılmış Sistemde:

- DC tarafında iki set 'Tip II-SPD' olmalıdır.
- İnvertörlerin yakınındaki AC tarafında 'Tip II-SPD' olmalıdır.
- AC yük merkezi tipindeki SPD.

Harici LPS Yalıtımsız Sistemlerde:

- DC tarafında iki set 'tip II-SPD' olmalıdır.
- İnvertörlerin AC tarafında, invertörün yakınında 'Tip I-SPD' olmalıdır.

- AC yük merkezinde tip 1'den bir SPD

Dahili LPS: SPD'lerin seçimi şunlara bağlıdır:

- Bina için seçilen LPS.
- Panelin PV çerçevelerinin LPS'den izolasyonuna
- Çerçeveler LPS'ye bağlandığında sistem yalıtılmaz.
- Topraklama iletkenlerinin boyutları
- Panellerin ve LPS'nin durumuna göre

2.6. PV Santrallerinde Yıldırımdan Korunma Sistemi

PV sistemleri yapıları ve çalışma mekanizması gereği yıldırımdan zarar görme riskinin oldukça fazla olmasına rağmen, birçok PV sistemleri yıldırıma karşı korunmamaktadır ve yıldırım sebebi ile meydana gelen aşırı gerilimlere karşı sistemi koruma ihtiyacı tasarımcılar tarafından göz ardı edilmektedir. Aşırı gerilimlerin gelişmesini önlemek ve olası bir yıldırım çarpmasının yansımalarını kısıtlamak için uygun bir LPS'nin tasarlanması ve kurulması gerekmektedir. Bununla birlikte, LPS parçalarından geçen yıldırım akımları endüktif kuplaj nedeniyle PV sistemini hala etkileyebileceğinden, yalnızca kurulumun korumasız bölümlerine yıldırım bağlantısının önlenmesi yeterli değildir. Bu nedenle, mümkün olan her yerde PV sistemlerinin stratejik yerleştirilmesi ve iletken sistemlerin ekranlanması tavsiye edilir. Her durumda, koruma önlemlerinin etkinliğini garanti etmek ve dolayısıyla kurulumun güvenli çalışmasını ve kalitesini sağlamak için ulusal ve uluslararası standartlara uygunluk önemlidir [24], [27].

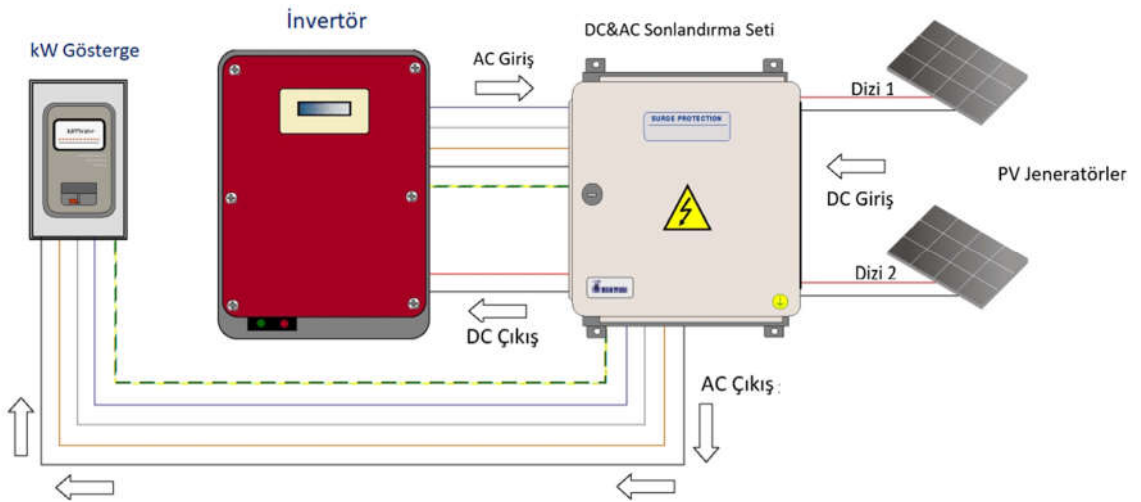
Nikolaos ve arkadaşları [28], PV parkı LPS kullanımı için bir çalışma yapmıştır. PV parkının geniş alan kapsamı nedeniyle, harici LPS'nin tasarımında, IEC 62305-3 uyarınca izole edilmiş bir uygulama ve izolasyonsuz uygulama tasarımı olmak üzere her iki olası durum dikkate alınmıştır.

Buna göre, yalıtılmamış durum için, birbirini takip eden her iki sıranın hava terminalleri, iki sıra arasına yerleştirilen birer bir elektrotlara bağlanmıştır. Bu yöntemde, her sıranın PV çerçevesi ile toprak elektrodu arasındaki mesafenin üç metreyi aşmaması tavsiye edilmektedir. Yalıtılmış durum için ise, her bir PV sırasının hava terminalinin PV çerçevesi aracılığıyla değil doğrudan ayrı bir elektroda bağlandığı izole durumu göstermektedir. Buna göre, her PV çerçevesi bağımsız bağlama iletkenleri ile aynı

toprak elektroduna bağlanmaktadır. İzole edilmiş LPS için, izole edilmiş hava terminallerini doğrudan topraklamak amacıyla her PV sırasının arkasında bir toprak elektrodu sağlanması gereklidir. Ancak izole edilmemiş durumda, hava terminallerinin topraklamasını birleştiren her 2 ardışık PV sırası için bir toprak elektrodu gereklidir.

Ayrıca, incelenmekte olan PV parkı, merkezi invertörler yerine 11kW'lık küçük invertörler kullanılarak tasarlanmıştır. Bu nedenle DC kablo döngüsü küçüktü ve yalıtımsız LPS durumunda bile invertörün DC tarafında T1+T2 SPD'lerin kullanılmasına gerek yoktur. Bu nedenle, yıldırım döngüsü oluşumunun sınırlı olması veya hiç olmaması nedeniyle DC tarafında yalnızca T2 tipi SPD'lerin kurulumunu göstermektedir.

İnvertörlerin etkili bir şekilde korunması için, tüm DC ve AC kabloların bir arada sonlandırılmasına olanak tanıyan ve aynı zamanda birleşik aşırı gerilimlere karşı koruma sağlayan birleşik bir koruma geliştirilmiştir. Bu şekilde birleşik sonlandırma seti kullanılması kablo uzunluklarını mutlak minimumda tutmaktadır. Ancak DC ve AC'nin göreceli olarak yüksek gerilimlerde bir arada bulunması, belirli izolasyon mesafeleri gerektirdiğinden böyle bir kombinasyonun belirli standartları karşılaması gerekir[3,7]. Şekil 2.4, hem DC hem de AC kablo uçları için 1 sonlandırma kutusunun kullanıldığı bu düzenlemeyi göstermektedir.



Şekil 2.4. AC ya da DC kablolamadan gelen dalgalanmalara karşı invertörlerin en iyi şekilde korunması için DC-AC terminasyon seti. [28]

Büyük PV parklarında DC kablolarının ekranlanmasının sağlanması zor olduğundan, bu çalışmada, hangi harici LPS'nin kablolarda oluşan aşırı gerilimlere karşı daha uygun ve

etkili bir koruma sağladığı araştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada, 2MWp PV parkının harici LPS tasarımına yardımcı olacak ölçümler ve bilgiler elde etmek amacıyla laboratuvarında ölçüğü küçültülmüş bir deney gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçları, yalıtılmamış LPS'nin, doğrudan yıldırım çarpması durumunda kablo üzerinde daha düşük endüklenen aşırı gerilimler sağlayacağını göstermektedir. Ek olarak, küçük invertörler kullanıldığından (dolayısıyla DC'den toprağa paralel yol olmadığından) DC için T1+T2 SPD'lere duyulan ihtiyaç zorunlu değildi. Ayrıca, topraklama sistemi düzenlemesinin izole edilmiş LPS durumuyla karşılaştırıldığında izole edilmemiş durum için uygun maliyetli bir çözüm olacaktır.

Pi Hua Tan ve Chin Kim Gan, bu makalede [29], Fotovoltaik (PV) Enerji Santrallerinde hava terminali paratoner direği ile Erken Akış Verici Yıldırım Direği arasındaki karşılaştırmayı sunmaktadır. İki farklı PV teknolojili Enerji Santrali sistemine iki farklı yıldırımdan korunma sistemi kurulmuştur. Bu iki sistemin performansları, enerji verimi ve üretilen toplam enerji açısından karşılaştırılmıştır.

Çalışma sonuçlarından da görüleceği üzere, PV enerji santraline kurulan harici bir yıldırımdan korunma sistemi, PV sisteminin performansını düşürecektir. Ayrıca, farklı tipte harici yıldırımdan korunma cihazları PV sisteminin gölgeleme sebebiyle oluşan kayıplarını etkileyecektir. Bu nedenle standartlara göre, PV modüllerine gölge düşmesini önlemek için paratoner direğinin ince olması gerektiği belirtilmektedir. Şekil 2.5. PV modülüne veya PV sistemine yıldırım çarpması hasarlarını önlemek için harici yıldırımdan korunma yöntemlerini göstermektedir.



Şekil 2.5. PV sistemlerinde ‘harici yıldırımdan korunma’ çözümü ve bileşenleri. [29]

Temel bulgular incelendiğinde, güneş enerjisi santralleri için, özellikle de İnce Film veya Kristalin, hava sonlandırmalı paratoner direğinin, uygun olduğunu göstermektedir ve Erken Akış Vericili paratoner direğine kıyasla hava sonlandırmalı paratoner direği kullanıldığında sistemde daha düşük kayıplar olmuştur [29].

2.7. Yüzer PV Santrallerinde Yıldırımdan Korunma Sistemi

Su yüzeyi, fotovoltaik bir enerji sistemi kurmak için açık bir alanın var olması ve yerleşim alanı olmaması sebebi ile düşük maliyet ile yapılabilir ve böylece yenilenebilir enerji kaynağının kullanımı ile toplumun enerji ihtiyacını sağlayabilir. Fakat yapının su yüzeyine kurulacak olması bazı teknik zorlukları da beraberinde getirecektir.

Kondrad ve Emilia Yüzer Fotovoltaik Santrallerinde kullanılan yıldırımdan korunma sistemine değinmiştir. Yüzer fotovoltaik santraller, su rezervuarının yüzeyi gibi açık alanlara kurulması, destekleyici yapılara açılı olarak monte edilen fotovoltaik modüllerin üst kenarları ve keskin kenarları nedeniyle elektrik alanının yoğunlaştığı yerlerdir. Bu nedenler yıldırıma karşı sistemleri olanaklı hale getirmektedir. Nispeten küçük yüksekliğine rağmen, santralin geniş kapsama alanı, doğrudan yıldırım deşarjlarını toplamak için geniş bir alanla ilişkilidir, bu da yıldırımdan korunma kurulumunu daha kritik hale getirir. Ayrıca, suyun yıldırımı çektiğine dair yaygın bir inanış da vardır. Ancak, LINET Lightning Detection Network tarafından 2019-2021 yıllarında Polonya'nın en büyük gölü Śniardwy ve çevresindeki kalıcı alanlarda gerçekleştirilen yer yıldırım deşarjı kayıtları bu tezi doğrulamamaktadır. Test sonuçlarına göre, suyun yüzeyinin yıldırımı çekmediği fakat üzerine kurulan fotovoltaik sistem yapılarının keskin kenarlarının elektrik alanının yoğunluğunu artırdığı düşünülmelidir. Bu durum, toprak deşarjlarının sayısında artışa neden olacaktır [30].

2.7.1. Yakalama Ucu:

Paratonerlerin montajında, Serbest duran ve Destek masalarının yapısına entegre edilmiş şeklinde ifade edilen iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Serbest duran paratonerlerin kurulumunda, iletken destek yapısına göre yalıtkan bir mesafenin korunması gerekmektedir. Ayrı paratonerlerin kullanılması ise bunların destek

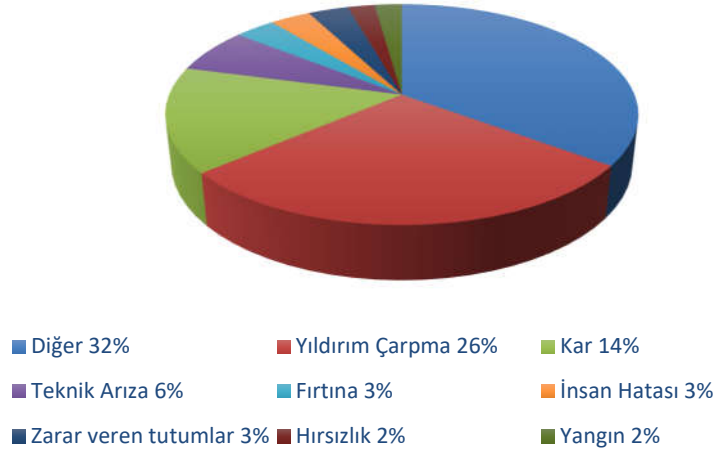
masasının yanına, standarda göre hesaplanan minimum ayırma mesafesi gereksinimini karşılamak bir mesafede yerleştirilmesini gerektirmektedir [30].

2.7.2. Yıldırım Aşağı İletkenleri

Yıldırım korumasının temel yöntemi sisteme çarpan yıldırım akımını toprağa iletmektir. Yıldırım iletkenleri ise sisteme gelen yıldırım akımının toprağa iletilmesini sağlamaktadır. Bağımsız bir fotovoltaiik santral durumunda, bu işlev ya özel kablolarla, örneğin bağımsız paratonerler için ya da iletken bir destek yapısı gibi doğal elemanlarla gerçekleştirilebilir. Bu iki durumda da en düşük empedansla galvanik süreklilikler sağlanmalıdır ve akan yıldırım akımının termal ve elektromekanik etkilerine karşı yeterince yüksek bir direnç ve su üzerine yerleştirilen yapı için önemli olan korozyon direnci özellikleri gösterilmelidir. Fakat bu yüzer yapılar, yalıtım malzemelerine monte edilmektedir ve bu nedenle, şamandıralar arasındaki uygun elektrik bağlantılarını sağlamalıdır [30].

2.8. PV Sistemlerde Yıldırım Kaynaklı Hasarlar

PV sistemleri güneş alan açık alanlarda kurulduğu için yıldırıma karşı hassastırlar. Bu nedenle yıldırımın etkisi ile PV bileşenleri zarar görmektedir ve sistemdeki elektronik hassas ekipmanlar zarar görmektedir ve hasarlar sonucu ekipman değiştirme maliyetleri ve gelir kaybına neden olabilmektedir. PV sistemlerine zarar veren veya performansını etkileyen çeşitli nedenlere ilişkin istatistiksel veriler Şekil 2.6.'da gösterilmiştir. Yıldırım çarpması ve sistemde meydana gelen dalgalanmaların %26 gibi büyük bir veriye sahip olduğu görülmektedir [31].



Şekil 2.6. PV Panel hasarının grafik ile gösterimi. [31]

Yıldırım darbeleri, şebeke bağlantılı güneş enerji santrallerine doğrudan havai enerji nakil hatlarında çıplak iletkenlerine ve saha içine düşebilir ve PV sistemini direkt etkileyebilir. Bunun yanında, yakın bir noktaya düşüp elektromanyetik girişim ile de sistemleri etkileyebilir. Bunun sonucunda yıldırımdan etki alan PV sistemlerinde, güneş paneli, transformatör, evirici veya elektriksel panolarda malzemelerin yalıtımları delinebilir ve büyük ölçekli maddi zararlar verebilir [32].

Yıldırımın direkt panele düştüğü durumlarda, panel tamamen tahrip olmuştur. PV sistemine etki eden yıldırım akımının gücü, panel çerçevesini ve yarı iletken yapıları eritmektedir. Bunun sonucunda, hasar, doğrudan yangına maruz bırakmaya benzer. PV sistemindeki hasarın belirlenildiği ve paneldeki bu hasarın kolaylıkla tespit edilebildiği durum oldukça nadirdir [33].

Yıldırımın doğrudan elektrikli ekipmana çarpmadığı, ancak yıldırımın neden olduğu aşırı gerilimin oluşabileceği ve çarpma noktasından herhangi bir ekipmanın üzerinden geçebileceği dolaylı yıldırım çarpmalarının olduğu durumlar ise daha yaygındır. Dolaylı yıldırım çarpmaları, elektrik kesintilerine neden olabilmekte ve bu da doğrudan sistemin verimliliğini azaltmaktadır, ayrıca sistemdeki ekipmanların arızalanmasına da neden olabilmektedir [34], [35], [36], [37]. Panel hasarı bir tür aşırı gerilimden kaynaklanır ve tespit edilmesi daha zordur.

Yarı iletken yapılar ciddi arızalar gösterir ancak panel görsel olarak etkilenmediği veya bozulmanın neredeyse hiç belli olmadığı durumlar olabilir [38]. PV sistemlerde meydana gelen hasar örnekleri Tablo 2.1.' de gösterilmiştir.

Tablo 2.1.Yıldırımdan zarar gören PV Sistemler. [34]

AÇIKLAMA	ETKİLER
Modül ve dizilerinde meydana gelen hasar	   

Elektronik bileşenlerde meydana gelen hasarlar



PV Panel bağlantı kutuları ve kablolarda meydana gelen hasarlar



2.9. PV Sistemleri İçin Yıldırım Çarpma Risk Değerlendirmesi

PV sistemleri için yıldırımdan korunma standartları sınırlıdır ve fazla gelişmemiştir. Yıldırımdan korunmaya yönelik IEC standartları, PV sistemleri için yıldırımdan korunma gerekliliklerini belirlemeye yönelik kesin bir yöntem sunmamaktadır. IEC 62305-1 ila 4, herhangi bir güç sistemi için yıldırımdan korunmaya yönelik genel

ilkeleri, risk yönetimini, yapısal tesislerin ve kişilerin korunmasını, yapısal tesislerdeki elektrik ve elektronik sistemleri sağlamak için kullanılmıştır [38], [39].

Bir PV sistemi için bir yıldırımdan korunma sistemi kurulmadan önce riskler değerlendirilmelidir. Buna göre, IEC 62305-2 Bölüm II-Yıldırıma karşı koruma risk yönetimi standardına göre bir risk değerlendirmesi yapılmalıdır. Bu standartta, yapılara yıldırımdan zarar gelme riskinin hesabı ve bunun için izlenen yöntemleri içermektedir. Standart dikkate alınarak, sistemlere yıldırımdan zarar gelmesinin sayısal riski hesaplanmaktadır ve sistemlerin yıldırımdan korunma sistemine olan ihtiyacı sayısal bir veri ile sunulmaktadır [39]. Standartta göre, R yapıya yönelik hesaplanan hasar riski ve RT ise eşik riskidir. R'nin eşik riskinden büyük olduğu durumlarda yapının yıldırımdan korunması gerekmektedir. Riski yönetmek için ve yapıyı korumak için bir yıldırımdan korunma sistemi önermek gereklidir [38], [39].

Her bir risk bileşeninin değerini hesaplamak için kullanılan temel denklem şu şekildedir:

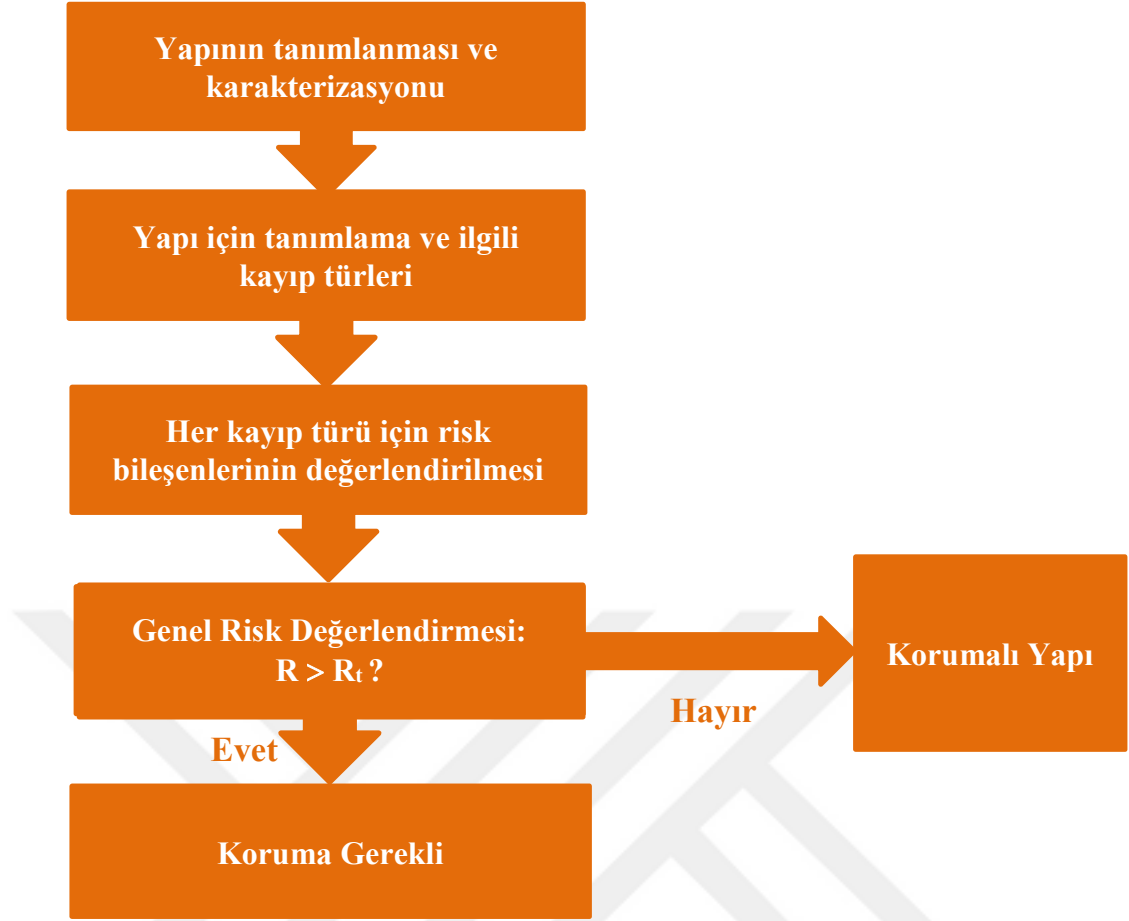
$$R_x = N_x \cdot P_x \cdot L_x \quad (2.1)$$

R_x risk bileşenini, N_x yıllık tehlikeli olay sayısını, P_x hasar olasılığını ve L_x sonuçta ortaya çıkan kaybı göstermektedir. Yapının tipine, ilgili kayıp ve hasar tipine bağlı olarak her biri belirli bir eşik değere sahip olan dört tip risk belirlenebilmektedir. Bu riskler Tablo 2.2.'de gösterilmiştir ve IEC 62305-2'de ayrıntıları verilmektedir [40].

Tablo 2.2. Risk Faktörleri ve İlişkili Risk Eşik Değerler

Risk	Eşik Risk
R_1 - İnsan hayatını kaybetme riski	10^{-5}
R_2 - Kamuya verilen hizmetin kaybedilmesi riski	10^{-3}
R_3 - Kültürel mirasın kaybolma riski	10^{-4}
R_4 - Ekonomik kayıp riski	10^{-3}

IEC 62305-2 standardına dayanarak Risk değerlendirme süreci temel metodoloji şekil 2.7.'deki gibi gösterilmektedir.



Şekil 2.7. IEC 62305-2 standardına göre bir yapının yıldırım riski değerlendirme yöntemi. [39]

PV sistemleri için, uygun maliyetli ve sistem için doğru tanımlanmış bir LPS sistemi tasarlamak için risk faktörleri bölgesel olarak hesaplanır. Bölgesel hesaplama, her sisteme uygun olan LPS sisteminin tasarımına olanak tanır. IEC 62305-2'de ayrıntılı olarak açıklanan, yıldırım riskinin değerlendirilmesi için gerekli çarpma noktaları ve uygulanabilir risk bileşenleri Tablo 2.3.'de gösterilmektedir [39].

Tablo 2.3. Yapı Risk Değerlendirmelerinde Uygulanabilecek Yıldırım Çarpma Noktaları

Çarpma Noktası	Risk Bileşenleri
S_1 - Doğrudan Yapıya	$R_A \cdot R_B \cdot R_C$
S_2 - Yapının Yakınına	R_M
S_3 - Doğrudan Hatta	$R_U \cdot R_V \cdot R_W$
S_4 - Hattın yakınına	R_Z

3. YILDIRIMIN GEÇİCİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİNDE KULLANILAN ANALİZ YÖNTEMLERİ

Güç sistemlerin yapısını oluşturan elektrik-elektronik sistemler yıldırım etkisi ile aşırı gerilim ve akımlara maruz kalabilir. Bu durum tüm sistemi etkileyebilir. Bu nedenle, bu sistemlerde yıldırımdan korunma önlemleri alınmalıdır. Bu da her sistem için gerekli olan yıldırımdan korunma sistemini seçmeyi gerekli kılmaktadır. Sistem için gerekli olan yıldırımdan korunma sistemini tasarlamak için ise yıldırımın geçici analizlerinin yapılması gereklidir. Yıldırımın geçici analizini yapan çalışmalarda genellikle, deneysel ölçümler ve simülasyon hesaplamaları olmak üzere iki kategori altında incelenmektedir.

Deneysel yöntemlerde, sistemlerin farklı yapılarında deneyi tekrarlamak mümkün değildir ve çalışmanın esnekliği düşüktür. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda, maliyet de yüksek olacaktır. Ayrıca, deneysel çalışmalarda veri elde etme de sınırlıdır ve veri kaybının analiz edilmesi kısıtlıdır. Simülasyon çalışmalarında ise, yıldırımdan korunma tasarımının etkinliği değerlendirilebilir ayrıca sistemler için farklı koruma yöntemleri test edilebilir. Bilgisayar simülasyon yöntemleri deneysel çalışmalara kıyasla daha hızlı ve verimlidir [41].

Literatürde yapılan çalışmalar, seçilen bölgeye ve kullanılacak sisteme odaklanmıştır. Birçok çalışma yıldırımın etkilerine değinmiştir. Bazı çalışmalar ise, yıldırımın etkilerinden korunmak için, kullanılan yenilenebilir enerji sistemi için en uygun LPS'yi seçmeye çalışmıştır, Uygun bir LPS ve topraklama sistemlerinin seçimi için birçok çalışma olasılık hesaplamaları ile sistemde yıldırımın düşeceği noktaları analiz etmiştir.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, elektromanyetik geçici olayları incelemek ve modellemek için sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler aşağıdaki şekilde sıralanabilir [41]:

- Zaman Alanı Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD),
- Kısmi Eleman Denklem Devresi Yöntemi (PEEC),
- Momentler Yöntemi (MOM),
- Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM),
- Elektrik Alanı İntegral Denklemi Yöntemi (EFIE),
- İletim Hattı Teorisi (TML)

3.1. PEEC Yöntemi

PEEC yöntemi, elektromanyetik alanı eşdeğer bir devreye dönüştüren bir sistemdir. Bu dönüşümü elektrik alanı karışık-konum integral denklemleri kullanarak yapmaktadır. Böylece, çözülmesi zor ve karmaşık elektromanyetik alan problemleri, basit elektriksel devre problemlerine dönüştürülür ve PEEC yöntemi kullanılarak karmaşık problemleri daha kolay analiz etmeye olanak tanır. Genellikle bu yöntem, düşük frekansla çalışan sistemlerde, kompakt yapılarda ve gecikme etkisi olan zaman-dalga sistemleri gibi elektromanyetik problemleri çözmek için kullanılmaktadır. Yöntemin, elektromanyetik yapının elektromanyetik etkilerini eşdeğer devre modeline dönüşümünün adımları aşağıdaki gibi belirtilmiştir [41].

1) Elektromanyetik Alanın - Kümelenmiş Elektrik Devre Elemanlarına Dönüştürülmesi: Karmaşık elektromanyetik alan problemlerini basit ve daha kolay analiz edilebilen elektrik devrelerine indirmek için elektromanyetik yapılar, indüktans, kapasitans ve direnç gibi elektrik devre elemanlarıyla ve her bir bileşen için olacak şekilde temsil edilir [42].

2) Elektrik Devre Modelinin Oluşturulması: Elektromanyetik yapıyı oluşturan elemanlar, devreyi çözmek için gereken tüm parametreleri içeren, elektrik eşdeğer devre modelinde kümelenmiş bir devre elemanı olarak gösterilmektedir [44] .

3) Zaman ve Frekans Domaini Analizi: Yöntem kullanılarak devre analizi hem zaman domaini hem de frekans domaininde analiz yapılabilir [43].

4) Elektromanyetik ve Devre Modelleme Birleştirilme: Bu yöntem, elektrik devreleri-elektromanyetik sistemlerin birleşik simülasyonunu sağlar ve birleşik simülasyon oluşturma konusunda avantajlıdır. Ayrıca bu özelliği ile de karmaşık sistemler gibi elektromanyetik alanların ve devrelerin birbirlerini etkilediği sistemlerde avantajlıdır. Ayrıca bu yöntem, doğrusal olmayan cihazlarla yüksek uyumluluk sağlar ve güçlü hesaplama verimliliği sebebi ile sistemlerin çözümünde güven verir [44].

Kısmi eleman eşdeğer devre (PEEC) yöntemi, elektromanyetik alan bileşenlerini elektriksel devrelere dönüştürür ve integral formlarda Maxwell denklemlerini çözer. Maxwell denklemleri, alanlar ve kaynak arasındaki ilişki ve manyetik alan ile elektrik alan arasındaki etkileşimi açıklamaktadır [41], [44].

PEEC formülasyonu en genel hali ile aşağıdaki formül ile ifade edilmektedir. Bu formül, malzemenin toplam elektrik alanına dayanmaktadır. Formüle göre, toplam elektrik alan, kaynak noktasına bağlı olarak gözlem noktasındaki elektrik alan integral denklemi (EFIE) tarafından tanımlanmaktadır [41], [44].

$$E_s(r, t) = \frac{J(r, t)}{\sigma} + \frac{\partial A(r, t)}{\partial t} + \nabla \Phi(r, t) \quad (3.1)$$

$E_s(r, t)$: t zamanında r noktasında meydana gelen harici elektrik alanı,

σ : malzemenin elektriksel iletkenliği,

$\Phi(r, t)$: Elektrik skaler potansiyeli,

$J(r, t)$: Elektrik Akımı Yoğunluğu,

$A(r, t)$: Manyetik Vektör Potansiyelidir.

$\Phi(r, t)$, malzemenin yüzey yük yoğunluğu q ve yüzey alanı s' cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir [43].

$$\Phi(r, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{S'} \frac{q(r', t)}{|r - r'|} ds' \quad (3.2)$$

İletkenlerin ve manyetik malzemelerin varlığında $A(r, t)$, iletkenlere ve manyetik malzemelere bağlı manyetik vektör potansiyelinin $J(r', t)$ ve mıknatıslanma akımları $M(r', t)$ cinsinden vektör toplamı olarak ifade edilebilir [45].

$$A(r, t) = A_c(r, t) + A_m(r, t) \quad (3.3a)$$

$$A_c(r, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_c'} \frac{J(r', t)}{|r - r'|} dV_c' \quad (3.3b)$$

$$A_m(r, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_m'} M(r', t) \times \nabla' \frac{1}{|r - r'|} dV_m' \quad (3.3c)$$

V_c' ve V_m' , elektrik ve manyetik akımlarıyla ilişkili olan hacimlerdir. PEEC yöntemi, manyetik akım ve yük yoğunluklarını temel fonksiyonlara genişletir. Ayrıca, hesaplamaların daha kolay ve basit olması ve verimlilik sağlamak için elektrik akımı, dikdörtgen temel fonksiyonları, yük yoğunluklarını, akım yoğunluklarını ve manyetizasyon akımlarını, eleman hacmi veya yüzey hücreleri içinde sabit kabul eder [45], [46].

$$J(r, t) = \sum_{i=1}^{N_l} J_i(t) f_i(r_i) \quad (3.4a)$$

$$M(r, t) = \sum_{j=1}^{3N_m} M_j(t) b_j(r_j) \quad (3.4b)$$

$$q(r, t) = \sum_{l=1}^{N_n} Q_l(t) b_l(r_l) \quad (3.4c)$$

N_l : İletken malzemeleri ayırtırmak için kullanılan temel hacim sayısı

N_m : Manyetik malzemeleri ayırtırmak için kullanılan temel hacim sayısı

N_n : Yük içeren iletken hücrelerini ayırtırmak için kullanılan yüzey hücrelerinin sayısıdır.

f : Akım yoğunluklarına karşılık gelen birim vektörü,

b : manyetizasyon akımlarına karşılık gelen birim vektörü,

p : Yük yoğunluklarına karşılık gelen birim vektörüdür.

Denklemler (3.1)–(3.4), ayırtırılmış EFIE'nin (Elektriksel Alan Entegre Denklemi) temsilini belirtir. (J_i , M_j ve Q_l) bilinmeyenlerini çözmek için bir denklem sistemi formüle edilmesini sağlar ve bunu temel fonksiyonlara hizalanmış ortogonal bir ağırlık fonksiyonu seti kullanarak yapar. Bu formülasyon sistemi, ayırtırılmış EFIE'yi, kısmi direnç, kısmi endüktans ve potansiyel katsayısı terimlerinden oluşan bir eşdeğer devre şeklinde temsil edilebilen bir denklem sistemine dönüştürür. Bu formülasyonda puls temel fonksiyonları kullanılır. Puls temel fonksiyonları, elektriksel büyüklüklerin, temel hacim veya yüzey hücreleri içinde sabit kabul edilmesini sağlar. Galerkin'in formülasyonu kullanılarak ayırtırılmış EFIE, devre alanına dönüştürülür ve iletken hacim hücresi k için şu şekilde olur [46].

$$V_{s,k}(t) = R_k I_k(t) + \sum_{i=1}^{N_l} L_{p,ki} \frac{\partial I_i(t)}{\partial t} + \sum_{j=1}^{3N_m} L_{m,kj} \frac{\partial M_j(t)}{\partial t} + \sum_{l=1}^{N_n} Q_l(t) (p_{k,l}^+ - p_{k,l}^-) \quad (3.5a)$$

$$R_k = \frac{l_{ck}}{\sigma a_{ck}} \quad (3.5b)$$

$$L_{p,ki} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{a_{ck}} \frac{1}{a_{ci}} \int_{V_{Ck}} \int_{V'_{Ci}} \frac{f_k(r_k) \cdot f_i(r'_i)}{|r_k - r'_i|} dV'_{Ci} dV_{Ck} \quad (3.5c)$$

$$L_{m,kj} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{a_{ck}} \int_{V_{Ck}} \int_{V'_{mj}} [b_j(r'_j) \frac{(r_k - r'_j)}{|r_k - r'_j|^3}] dV'_{mj} dV_{Ck} \quad (3.5d)$$

$$p_{kl} = \frac{\mu_0}{4\pi \epsilon_0 S_k S_{l'}} \int_{S_k} \int_{S'_{l'}} \frac{1}{|r_k - r'_{l'}|} ds'_{l'} ds_k \quad (3.5e)$$

R_k : k iletken elemanın kısmi direncini belirtirken,

$L_{p,ki}$: k iletken elemanı ile iletken elemanı i arasındaki kısmi endüktansları,

$L_{m,kj}$:k iletken elemanı ve manyetik malzeme elemanı j ile arasındaki kısmi endüktansları temsil belirtir.

$P_{k,l}$: İletken elemanları k ve n arasındaki kısmi potansiyel katsayısını tanımlar.

Matris şeklinde (3.5)'in yorumlanması aşağıdaki gibi belirtilebilir: [43]

$$-A\Phi(t) = V_s(t) + RI(t) + L_p \frac{dI(t)}{dt} + L_m \frac{dM(t)}{dt} \quad (3.6)$$

Kirchhoff'un gerilim yasası (KVL)'na dayanarak eşdeğer devre modeli (3.6)'da gösterilmiştir;

Denklemden, A , bağlantı matrisini ve $V_s(t)$, olay alanlarından kaynaklanan gerilim kaynaklarını belirtirler. $\Phi(t)$, düğüm potansiyeli vektörünü, $I(t)$, dal akımı vektörünü ve $M(t)$, mıknatıslanma vektörünü belirtmektedirler. Kirchhoff'un akım yasasını (KCL) PEEC eşdeğer devresinin her düğümünde uygulanarak ve her $I_s(t)$ düğümündeki toplu akım kaynakları kullanılarak (3.7)'deki gibi matris denklemi elde edilebilir: [43]

$$P^{-1} \frac{d\Phi(t)}{dt} - A^T I(t) = I_s(t) \quad (3.7)$$

Manyetik bir malzemenin doğrusal olmayan yapısal ilişkisi aşağıda olduğu gibi ifade edilebilir: [43]

$$B(r,t) = \mu_0 \mu_r (|H(r,t)|) H(r,t) \quad (3.8a)$$

$$B(r,t) = \mu_0(H(r,t) + M(r,t)) \quad (3.8b)$$

$\mu_r(|H(r,t)|)$ manyetik malzemenin doğrusal olmayan manyetik geçirgenliğini belirtir.

(3.8a) ve (3.8b) denklemlerinin birleşimi ile manyetik vektör potansiyeli ile mıknatıslanma akımları arasında aşağıdaki gibi bir ilişki tanımlanır: [43]

$$\nabla \times A(r,t) = \frac{\mu_0 \mu_r(|H(r,t)|)}{\mu_r(|H(r,t)|)-1} M(r,t) \quad (3.9)$$

Bir vektörel denklem türetmek için $A(r,t)$, (3.3)'teki denklemlerde yerine koyulur ve iletken ve manyetik malzeme elemanları üzerinde genişletilebilir. Bahsedilen vektörel denklem ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir: [43]

$$\sum_{i=1}^{N_l} D_{ki} I_i(t) + \sum_{j=1}^{3N_m} T_{kj} (|H_j(t)|) M_j(t) = \sum_{n=1}^{N_{so}} G_{kn} I_{s,n}(t) \quad (3.10a)$$

$$T_{kj}(|H_j(t)|) = W_{kj} + \Omega_{kj}(|H_j(t)|) \quad (3.10b)$$

$$W_{kj} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V'_{mj}} \nabla \times \left(\nabla \times \frac{b_j(r'_j)}{|r_k - r'_j|} \right) dV'_{mj} \quad (3.10c)$$

$$\Omega_{kj}(|H_j(t)|) = -\frac{\mu_0 \mu_r(|H_j(t)|)}{\mu_r(|H_j(t)|)-1} \check{u}_{kj} \quad (3.10d)$$

$$D_{ki} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{a'_{ci}} \int_{V'_{ci}} \nabla \times \left(\frac{f_i(r'_i)}{|r_k - r'_i|} \right) dV'_{ci} \quad (3.10e)$$

$$G_{kn} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{a'_{sn}} \int_{V'_{sn}} \nabla \times \left(\frac{f_{sn}(r'_n)}{|r_k - r'_n|} \right) dV'_{sn} \quad (3.10f)$$

N_{so} , temel kaynakların sayısını gösterir, f_s , kaynağın vektör bazlı fonksiyonlarını açıklar ve a_{sn} , n'inci kaynağın kesit alanını ifade eder. $\check{u}_{kj}$, tüm $k = j$ için 1 ve tüm $k \neq j$ için 0 olan bir birim vektörü ifade eder. Denklem (3.10) matris formunda şu şekilde yorumlanabilir: [44]

$$DI(t) + T(|H(r,t)|)M(t) = -GI_s(t) \quad (3.11)$$

(3.6), (3.7) ve (3.11)'deki denklemler, PEEC eşdeğer devre ağını çözmek için matris denklem sistemini temsil eder [44] .

Kaynak bölgede, PEEC yöntemi için eşdeğer devre modeli oluşturulur. Bu devre modeli kullanılarak, kaynak bölgedeki akım ve yük dağılımı devre uyarılma koşulları altında çözülebilmektedir [44] .

PEEC eşdeğer devre modelindeki toplu devre bileşenleriyle, elektromanyetik bir yapının elektromanyetik etkileri, dirençler, indüktörler, kapasitörler, kontrollü kaynaklar ve benzerleri tek tek modellenmiştir [44] .

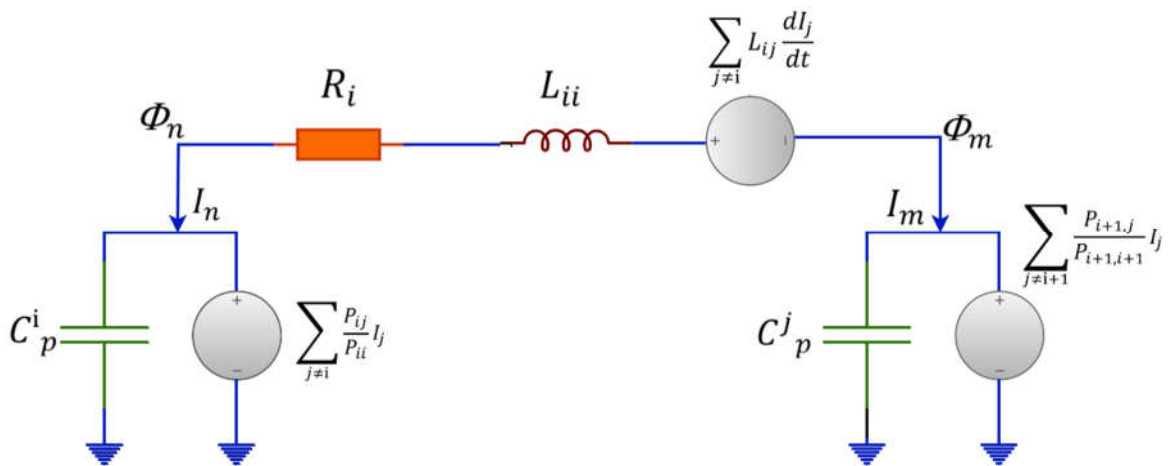
$$E^i(\mathbf{r}) = \frac{J(r)}{\sigma} + jW\mu \int_V G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') J(\mathbf{r}') dV' + \frac{\nabla}{\epsilon_0} \int_{S'} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') q(\mathbf{r}') dS' \quad (3.12)$$

Yapının elektrik alanı toplamı denkleminde yola çıkarak iki hücre için oluşturulan PEEC eşdeğer devresi Şekil 3.1. de gösterilmiştir [44] .

$$R_i = \frac{l_i}{\sigma_i a_i} \quad (3.13)$$

$$L_{ij} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{1}{a_i a_j} \int_V \int_{V'} \frac{1}{R} dV_i dV_j \quad (3.14)$$

$$p_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{S_i S_j} \int_{S_i} \int_{S_j} \frac{1}{R} dS_i dS_j \quad (3.15)$$



Şekil 3.1. Bir segmentin PEEC eşdeğer devresi. [41], [44].

3.2. FDTD Yöntemi

Bu yöntem, Maxwell denklemlerindeki sürekli değişkenlerin sonlu fark değişkenleriyle değiştirilmesi temeline dayanmaktadır. Denklemi oluşturan diferansiyel bileşenleri çözümlmek için basit yöntem kullanır. Kartezyen koordinat sisteminde, tüm alan küçük dikdörtgen hücrelere bölünür ve ayrıştırılmış Maxwell denklemleri kullanılarak bu hücrelerin elektrik ve manyetik alanları hesaplanır [66].

Maxwell denklemleri, izotropik ya da dispersif olmayan bir ortamda, kartesyen koordinatlarında, aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [66].

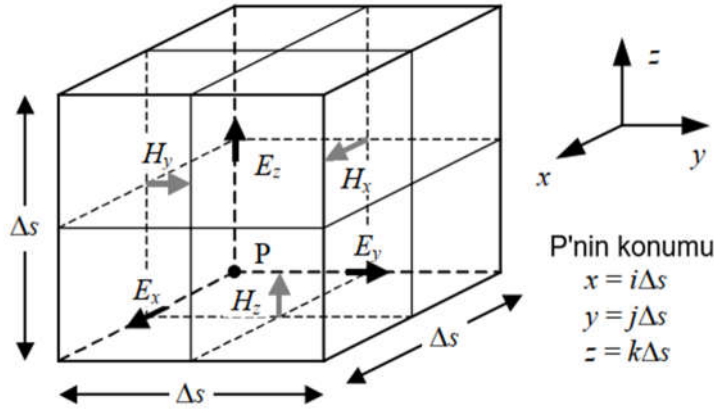
$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t}, \quad \nabla \times H = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma E \quad (3.16)$$

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon}, \quad \nabla \cdot H = 0 \quad (3.17)$$

burada E : elektrik alanı, H : manyetik alan, ρ : yük yoğunluğu, ε : elektriksel geçirgenlik, μ : geçirgenlik, σ : iletkenlik'tir [67].

Analiz edilmek istenen alan tüm yönlerde olacak şekilde s uzunluğunda bölünür ve kenar uzunlukları s olan küplerle doldurulmaktadır. Buradaki her bir küp ise hücre olarak adlandırılmaktadır. Analiz alanını x , y ve z koordinatları boyunca bölünene alanların sayısı sırasıyla N_x , N_y , N_z ile ifade edilmiştir. Buna göre analiz alanı da aşağıdaki gibi ifade edilir [66].

$$x = i\Delta s, (0 \leq i \leq N_x), \quad y = j\Delta s, (0 \leq j \leq N_y), \quad z = k\Delta s, (0 \leq k \leq N_z) \quad (3.18)$$



Şekil 3.2. Hücredeki elektrik ve manyetik alanların konfigürasyonu. [68]

(3.16) nolu denklem, x , y , z ve t (zaman) açısından türevleri içermektedir.

Şekil 3.2’de, FDTD formülasyonundaki bir hücredeki elektrik ve manyetik alanların değerlerinin temsili gösterilmiştir. Burada olduğu gibi elektrik ve manyetik alanların temsili döngülerle yapılandırılır ve böylece (3.16)'daki x , y ve z açısından türevlerin aşağıdaki merkezi farkla değiştirilmesini sağlanmaktadır [68].

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} \cong \frac{f\left(x+\frac{\Delta s}{2}\right)-f\left(x-\frac{\Delta s}{2}\right)}{\Delta s} \quad (3.19)$$

Denklem (3.19)’de x için yazılan formül y ve z için de geçerlidir. Burada f fonksiyonu E ve H ’nin bir bileşeni olarak tanımlanmaktadır. Aşağıdaki denklemdeki merkezi fark ile (3.16) numaralı denklemdeki türevler zamana göre değiştirilir. Buna göre elektrik alanları $t = n\Delta t$ ($n = 0, 1, \dots$) zaman adımlarında hesaplandığı ve manyetik alanlar da $t = (n + 1/2)\Delta t$ ($n = 0, 1, \dots$) zaman adımlarında hesaplandığı varsayılmaktadır [68].

$$\frac{\partial f(t)}{\partial t} \cong \frac{f\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)-f\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right)}{\Delta t} \quad (3.20)$$

Denklem (3.19) ve (3.20) nolu denklemler (3.16) nolu denkleme uygulandığında aşağıdaki denklemler oluşacaktır.

x bileşenine göre;

$E_x^n(i + 1/2, j, k)$ x bileşenini temsil etmektedir.

$x = (i + 1/2) \Delta s$, $y = j\Delta s$, $z = k\Delta s$ ve $t = n\Delta t$ zamanındaki elektrik alanını temsil etmektedir ve diğer bileşenler aynı şekilde ifade edilmektedir.

$$E_x^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) = K_1 E_x^{n-1} \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) + K_2 \{ H_z^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right) - H_z^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k \right) - H_y^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) + H_y^{n-\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2} \right) \} \quad (3.21)$$

$$H_x^{n+1/2} \left(i, j + \frac{1}{2}, k + 1/2 \right) = H_x^{n-1/2} \left(i, j + \frac{1}{2}, k + 1/2 \right) + K_3 \{ -E_z^n \left(i, j + 1, k + 1/2 \right) + E_z^n \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right) + E_y^n \left(i, j + \frac{1}{2}, k + 1 \right) - E_y^n \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right) \} \quad (3.22)$$

Yukarıdaki denklemlerin elde edilmesinde $\sigma E^{n-1/2} \cong \sigma \{ E^{n-1} + E^n \} / 2$ denklem yaklaşımı kullanılmaktadır ve K_1 , K_2 , ve K_3 aşağıdaki gibidir. (3.21) ve (3.22) numaralı denklemlerindeki mantık ile $E_y^n \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right)$, $E_z^n \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right)$, $H_y^{n+1/2} \left(i + 1/2, j, k + \frac{1}{2} \right)$, $H_z^{n+1/2} \left(i + \frac{1}{2}, j + 1/2, k \right)$ değerleri hesaplanır [68].

$$K_1 = \frac{1 - \sigma \Delta t / 2 \varepsilon}{1 + \sigma \Delta t / 2 \varepsilon}, \quad K_2 = \frac{\Delta t}{\varepsilon \Delta s} \frac{1}{1 + \sigma \Delta t / 2 \varepsilon}, \quad K_3 = \frac{\Delta t}{\mu \Delta s} \quad (3.23)$$

(3.21) - (3.22) numaralı denklemler Maxwell denklemlerinin FDTD formülleridir. Geçici alanlar, $t/2$ zaman aralıklarında elektrik ve manyetik alanların dönüşümlü olarak hesaplanması sonucu elde edilmektedir. (3.17) numaralı denklem ise açıkça tek tek ele alınmamış olsa da, (3.21) - (3.22) denklemleri (3.17) numaralı denklemi ispatlamıştır [68].

3.3. MOM Yöntemi

Sayısal yöntem ile problemi çözmeye dayalı bir yöntemdir. Sınır Eleman Yöntemi(BEM) olarak da bilinmektedir. Maxwell denklemlerinin integral formülasyonuna dayanan bir tekniktir. Bu yöntemde, iletkenler üzerindeki yüzey akımları ile Maxwell denklemlerinin integral denklemi tanımlanır ve bundan sonra dağılıma problemi u formülasyonlar kullanılarak çözülür. Böylece, dağılan elektrik alanı, iletkenler üzerindeki yüzey akımları cinsinden ifade edilir.

Homojen olmayan denklemler için aşağıdaki formüller kullanılır [79].

$$L(f) = g \quad (3.24)$$

(3.24)'de, L operator denklemdir ve L lineer bir operatördür, g bilinen fonksiyondur ve f bilinmeyen fonksiyondur. Operatör denkleminin çözümünün mevcut ve benzersiz olduğu varsayılır. İlk önce, lineer ve bağımsız bir fonksiyon olan f_n, f' yi yaklaşık olarak ifade etmek için kullanılmaktadır [80].

$$f \approx \sum_{n=1}^N a_n f_n \quad (3.25)$$

Burada a_n belirsiz bir katsayı, f_n operatör alanındaki temel fonksiyon, N ise pozitif bir tam sayıdır [81].

Daha sonra ise yaklaşık ifade operatör formülüne koyulur ve aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\sum_{n=1}^N a_n L(f_n) \approx g \quad (3.26)$$

$$\varepsilon = \sum_{n=1}^N a_n L(f_n) - g \quad (3.27)$$

Burada ε , gerçek değer ve yaklaşık değer arasındaki sapmadır. Kalıntı değerinin ağırlıklı ortalamasının sıfır olduğundan emin olmak için w_m ağırlık fonksiyonları seçilmektedir. Böylece, aşağıdaki gibi Moment denklemi elde edilir: [81]

$$\sum_{n=1}^N a_n \langle w_m, L(f_n) \rangle = \langle w_m, g \rangle \quad (3.28)$$

4. PV SİSTEMLERİNİN YILDIRIMIN GEÇİCİ ETKİLERİ ALTINDA MODELLEME YÖNTEMLERİ

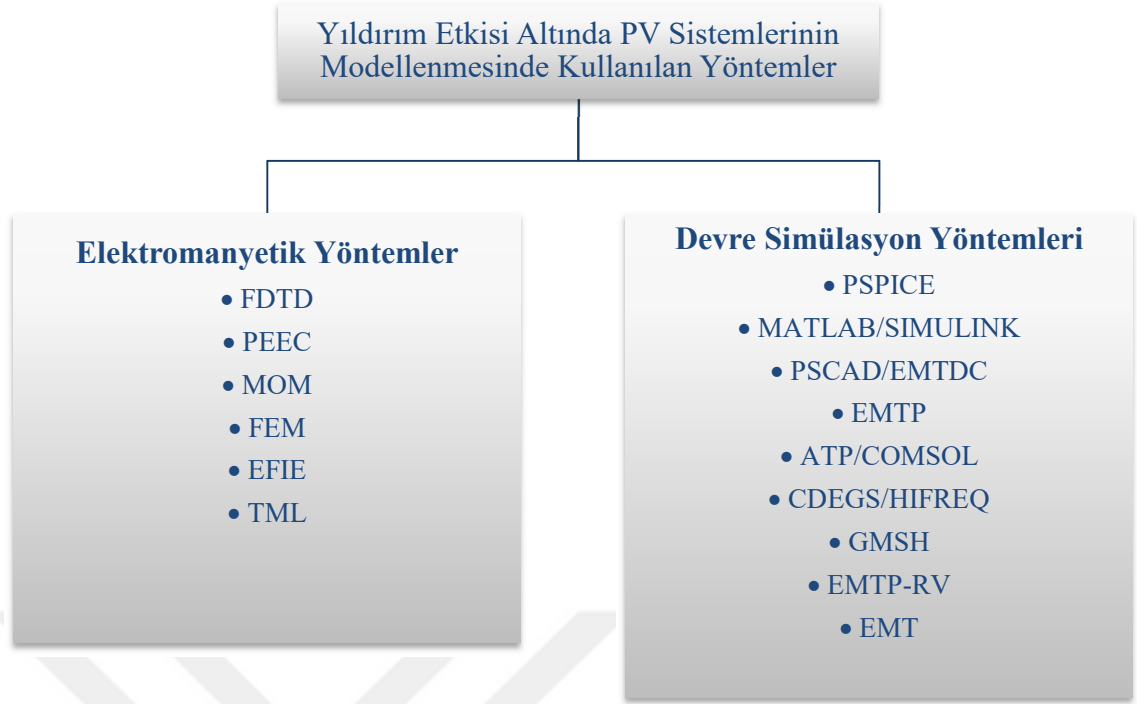
Açık alanlara kurulumu gerekli olan yenilenebilir enerji sistemlerinin tümü yıldırıma maruz kalmaktadırlar. Bu etkilerden kaçınmak ve maruz kalınan yıldırım etkilerini en aza indirmek, sistemin çalışmasını sürdürebilmesi ve uzun ömürlü olması için gereklidir. Her sistemin, kurulduğu bölge, alan ve kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı farklı olabilir. Bu nedenle, her sistem kendi özelinde değerlendirilmelidir ve buna göre yöntemler belirlenmelidir.

Yıldırımın elektromanyetik darbelerini analiz etmek için iki temel yöntem vardır. Bu yöntemler, elektromanyetik yöntemler ve devre simülasyon yöntemleridir.

Geçişleri yüksek doğruluk ile temsil edebilmesi sebebi ile elektromanyetik hesaplama yöntemleri tercih edilmektedir. Bu modelleme şekli, iletkenler arasında geçici bağlanmayı ve kapasitansları, topraklama sistemlerinin doğru modellenmesini dikkate alarak her bir sistem bileşeninin yıldırımın geçici etkileri altında temsil edilmesini sağlar. Bu yöntemlere örnek olarak, PV sistemlerinin yıldırımın etkisi altında modellenmesinde daha önceki yapılan çalışmalarda da sıklıkla tercih edilmiş olan FDTD, MOM ve PEEC metotları verilebilir [1].

Devre simülasyonu yöntemleri de yıldırımın geçici etkilerini analiz etmek için kullanılmaktadır. Devre simülasyon yöntemleri sıklıkla tercih ediliyor olup analizde yeterli doğruluk sağlamaktadır. EMTP/ATP, MATLAB, PSPICE, PSCAD/EMTDC ve EMTP-RV gibi birçok yazılım paketi yıldırım darbeleri sırasında PV sistemlerinin simülasyonunu yapmak için kullanılmaktadır [1].

Yıldırımın Etkisini incelemek için PV sistemlerinin modellenmesinde kullanılan yöntemler ve programlar Şekil 4.1' de özetlenmiştir.



Şekil 4.1. PV modellemede kullanılan yöntemler.

PV sistemlerinde yıldırımın geçici analizlerini incelemek için öncelikle gerçek sistemi aktarabilecek en yakın şekilde modelleyebilmek önemlidir. Bunun için ise sistemi oluşturan tüm parçaların modellenmesi gerekmektedir. PV güç sistemini oluşturan; PV panellerini, kabloları, montaj sistemi ve topraklama sisteminin modellenmesidir.

Tablo 4.1’de modellemede kullanılan yöntemlerin karşılaştırması yapılmıştır.

Tablo 4.1. Yıldırımın Geçici Etkileri Altında PV Sistemleri Modellenmesinde Kullanılan Yöntemlerin Karşılaştırması [41], [44].

Elektromanyetik Yöntemler	Devre Simülasyon Yöntemleri
Literatürde en çok kullanılan ve çalışılan yöntemler FDTD, PEEC ve MOM'dur.	Önceki çalışmalarda genellikle tercih edilen yöntemler PSPICE, MATLAB, PSCAD, EMTP/ATP, GMSH'dir.
PV Sistemini oluşturan PV paneller, kablolar, montaj sistemi ve topraklama sistemi gibi bileşenleri yıldırımın geçici etkisi altında temsil edilir.	Geçici davranışı etkileyen, PV Metal çerçevesi, çeşitli iletkenler, PV montaj sistemi gibi faktörleri dikkate almamıştır.
Yıldırımın geçici etkileri altında, iletkenler arasında geçici bağlanmayı, kapasitansları, topraklama sisteminin doğru modellenmesini dikkate alır.	Simülasyon ve deneysel sonuçlar arasında fark bulunmuştur.
PV Sistemi üzerindeki yıldırım darbelerinin etkisini incelemek için yıldırımın elektromanyetik dalga yayılımı analiz edilir.	Simülasyon modeli düşük doğruluktadır.
Deneysel verilerle karşılaştırıldığında analizde yüksek doğruluk sağlamaktadır.	Düşük doğrulukta olduğu için yıldırımdan korunma sisteminin yanlış tasarlanmasına yol açacaktır.

4.1. PV Sistemindeki Bileşenler İçin PEEC Modellemesi

Literatürde, PV sistemlerinde yıldırımın geçici analizleri üzerine çalışmalar yapılmıştır fakat bu çalışmalarda PV modellemede bazı bileşenler doğru modellenmemiştir ve bu nedenle analiz ve sonuçlara ulaşamamıştır. Önceki çalışmalarda, PV sistemin bileşenleri olan DC kablolar, yapısal çelikler genellikle mükemmel iletken olarak modellenmiştir. Fakat bu yapıların frekansa bağlı etkileri vardır ve özellikle yıldırım geçişleri altında yüksek oranda frekansa bağımlıdır. Fakat çalışmalarda bu etkiler göz ardı edilmiştir. Bunun yanında PV hücrelerin karakteristiği doğrusal değildir ve bu bazı çalışmalarda dikkate alınmamıştır. Ayrıca PV modellemede PV panellerinin

kablolaması da bazı çalışmalarda dikkate alınmamıştır. Bu dikkate alınmayan etkiler sebebi ile analizler yanlış sonuçlanabilir [44].

Serbest uzayda bir iletkenin toplam elektrik alanı, elektriksel skaler potansiyel Φ ve manyetik vektör A ile aşağıdaki gibi ifade edebiliriz [47].

$$E(r, W) = jWA(r, W) + \nabla\Phi(r, W) \quad (4.1)$$

G , serbest uzay Green fonksiyonu aşağıda olduğu gibi ifade edilir [47] .

$$0 = \frac{J(r)}{\sigma} + jW \int_v G(r, r') J(r') dv' + \frac{\nabla}{\epsilon} \int_s G(r, r') \rho(r') ds' \quad (4.2)$$

J , kaynak noktasındaki hacim akım yoğunluğu, σ , iletken iletkenliği ve ρ , yüzey yük yoğunluğu, v' , iletkenin hacmi, r ve r' konum vektörleridir.

İletken, bir dizi küçük parçaya bölünür ve her parçada iletken akımı I 'nin ve hat yükü q 'nin sabit olduğunu varsayalım. Modelleme için tipik bir iletken parçası Şekil 4.2'de gösterilmiştir. (4.1-4.2)'yi bu parçalarla entegre etmek, aşağıdaki gibi N_b parçaları ve N_n düğümleri için bir dizi elektrik devresi denklemi oluşturur: [47]

$$V_n - V_{n+1} = R_{ii}I_i + \sum_{j=1}^{N_b} j\omega L_{ij}I_j \quad (4.3)$$

$$V_n = \sum_{m=1}^{N_n} p_{nm}q_m \quad (4.4)$$

R_{ii} , i segmentinin direncidir, i ve j segmentleri, n ve m düğümleri arasındaki endüktans ve potansiyel katsayılar ise L_{ij} , P_{ij} 'dir [47].

Yıldırım dönüş darbesi akımı, yüksek frekanslı bileşenler içerir ve yüksek frekansta bir segmentteki akım, girdap akımı etkisi nedeniyle kesiti boyunca eşit olarak dağılmaz. Bir frekansla, direnç ve iç endüktans önemli ölçüde değişir. Bunlar, iletkenin yüzey empedansı ile belirlenebilir. Yarıçapı a olan dairesel bir iletken için, s alanındaki direnç ve iç endüktans, yüzey empedansı $Z_{s,ii}$ ile aşağıdaki gibi formülize edilir [48].

$$Z_{s,ii} = \frac{j\omega\mu}{2\pi R_a} \cdot \frac{I_0(R_a)}{I_1(R_a)}$$

$$R_{ii}(s) = \text{real}[Z_s(s)] \quad (4.5)$$

$$L_{int,ii}(s) = \frac{\text{imag}[Z_s(s)]}{\omega}$$

Burada, I_n , $R_a = (l+j)a/\delta$ argümanı ile n . dereceden değiştirilmiş Bessel fonksiyonlarıdır burada δ , deri derinliği ve μ , bağl geçirgenliktir. Dış endüktans ve potansiyel katsayısı genellikle frekans değişmezdir ve genel PEEC formülleri ile belirlenir, şöyledir: [48]

$$L_{ext,ij} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{l_i} \int_{l_j} \frac{1}{d_{ij}} dl_i dl_j \quad (4.6)$$

$$P_{nm} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{1}{l_n l_m} \int_{l_n} \int_{l_m} \frac{1}{d_{nm}} dl_n dl_m$$

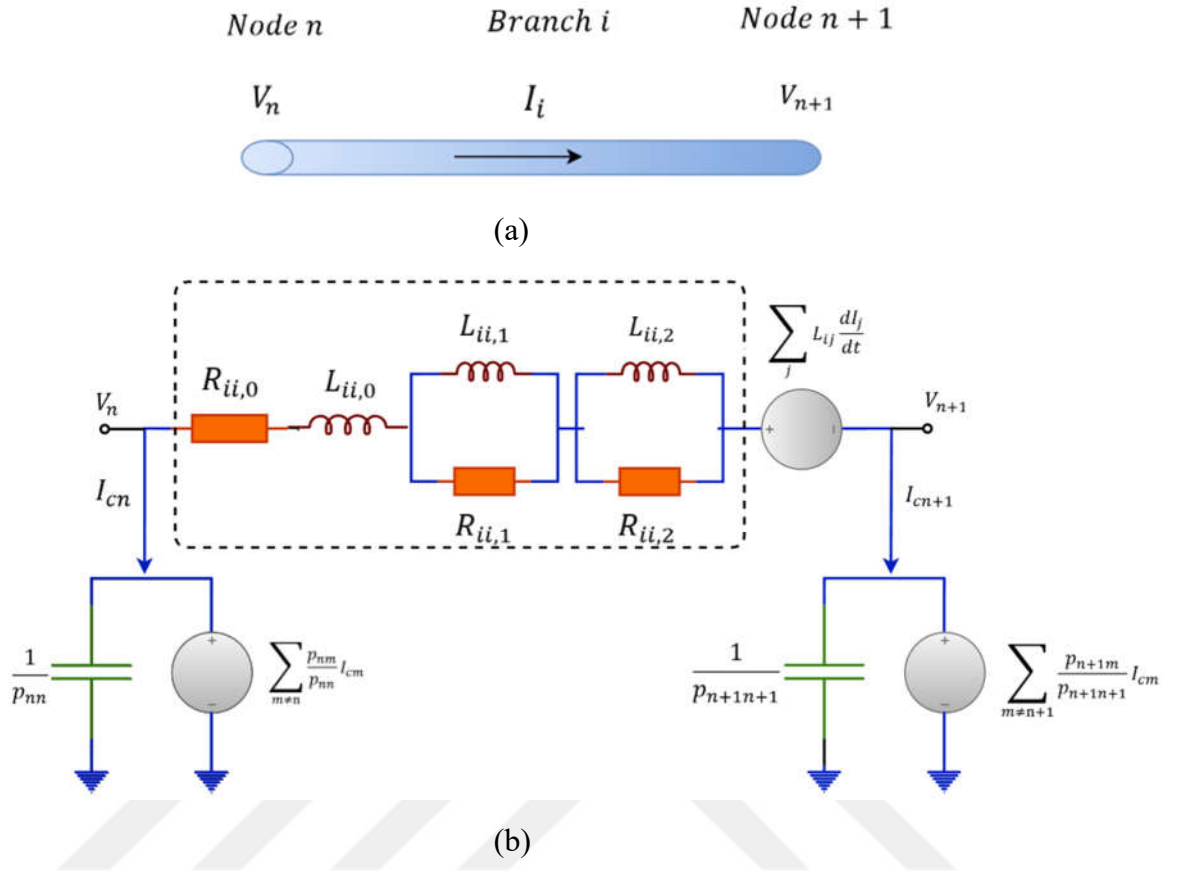
d_{ij} veya d_{nm} , i ve j dalları veya n ve m düğümleri arasındaki mesafedir.

Frekansla yüzey empedansı önemli ölçüde değişir. Frekans değişmez devre parametreleriyle, frekansa bağlı yüzey empedansını tanımlamak için vektör uydurma yöntemi kullanılmıştır. $Z(s)$, s alanındaki empedans, aşağıdaki gibi yaklaşık olarak hesaplanır [48].

$$Z_s(s) = R_0 + sL_0 \sum_{k=1}^N \frac{s}{s+R_k/L_k} \cdot R_k \quad (4.7)$$

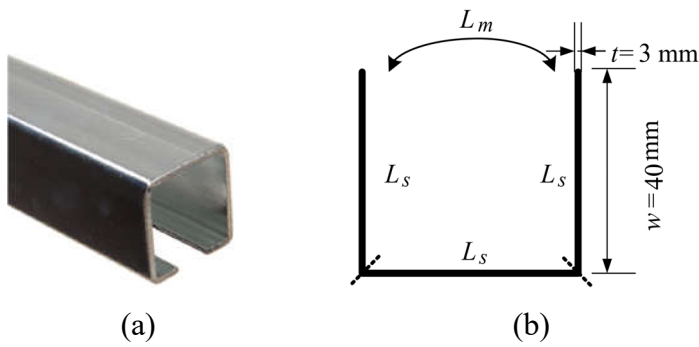
İletkenin empedansı, tüm kutuplar tanımlandıktan sonra frekans değişmez dirençler ve indüktörlerden oluşan eşdeğer bir devre ile gösterilir. Yüzey empedansı, belirtilen frekans aralığında frekansla arttığından, elemanların düzgün frekans davranışını yakalamak için iki gerçek kutup rasyonel fonksiyonu yeterli olmaktadır. Şekil 4.2(b), iletkenin bir segmenti için tam vektör uyumlu geliştirilmiş bir PEEC modelini gösterir. Bu devre modelinde, iletkenlerin tüm devre parametreleri pasiftir ve frekanstan bağımsızdır. Bir PV sisteminden oluşturulan bir tel yapısındaki yıldırım geçişlerini çözmek için zaman alanı devre analizi araçları doğrudan uygulanabilir. Bu bölümde, tel yapısının devre parametreleri Matlab kodlarıyla hesaplanır ve Matlab kodlarıyla

oluşturulan netlist dosyaları kullanılarak yapıdaki yıldırım geçiş gerilimleri ve akımları, bir SPICE çözücüsüyle çözülür [47], [48].



Şekil 4.2.(a) Bir iletken segmenti (b) Eşdeğer devre. [47], [48]

PV sistemlerinde montaj yapısında, yüksek mekanik performansı, güçlü mukavemet yapısı, hafif olmaları ve kolay kurulumu sebepleri ile çok tercih edilmektedirler. PV sistemlerinde kullanılan çelik C profil örneği Şekil 4.3(a)'da gösterilmiştir. Şekil 4.3(b) de ise ölçüleri verilmiştir [49].



Şekil 4.3. C profil çeliğinin konfigürasyonu. (a) Genel bakış. (b) Kesit görünümü. [49]

C profili çelik yapılar, ferromanyetik özellikte bir malzemedir ve akımın uyarılması durumunda doğrusal olmayan özellikler gösterirler. Bu çelik yapılar, yıldırım akımını doğrudan taşıdığında çok fazla doymuş olur ve bundan sonra doğrusal bir manyetik malzeme olarak düşünülebilir. C profili çelikler, dış empedans ve iç endüktans ile temsil edilir. Eşdeğer yarıçapa sahip silindirik model kullanılarak C profili çeliğin iç endüktansı ve direnci hesaplanır. Silindirik modelin eşdeğer yarıçapı α 'yı belirlemek için çeliğin kalınlığı küçük olduğundan yan genişliği kullanılır [49].

$$\alpha = \frac{3w}{2\pi} \quad (4.8)$$

C profil çeliğin dış endüktansı, çeliğinin geometrik boyutları kullanılarak hesaplanır. Fakat normalde dış endüktans, iletkenin dışındaki manyetik akı ile ilişkilidir. C profil çeliği üç ince şeride bölünür, bu Şekil 4.3(b)'de gösterilmiştir. Dış endüktans, üç ince şeridin paralel bağlantısı dikkate alınarak aşağıda belirtildiği şekilde hesaplanır [49].

$$L_{ext} = \frac{1}{\sum \sum \begin{bmatrix} L_s & L_{m1} & L_{m2} \\ L_{m1} & L_s & L_{m1} \\ L_{m2} & L_{m1} & L_s \end{bmatrix}^{-1}} \quad (4.9)$$

L_s , bireysel ince bantların dış öz endüktansıdır ve L_{m1} ve L_{m2} , dik ve paralel olarak yönlendirilmiş iki ince bant arasındaki karşılıklı endüktanslardır. Basitleştirilmiş Hoer formülleri kullanılarak L_s , L_{m1} , L_{m2} endüktansları hesaplanır [49].

İnce bir levhanın öz endüktansını hesaplamak için aşağıdaki bağıntı kullanılır:

$$L_s = \frac{\mu_0}{6\pi} \frac{1}{W^2} \left[3W^2 \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + W^2}}{W} - (l^2 + W^2)^{\frac{3}{2}} + 3l^2 W \ln \frac{W + \sqrt{l^2 + W^2}}{l} + l^3 + W^3 \right] \quad (4.10)$$

W , levhanın genişliği l ise uzunluğudur. Aralarındaki mesafe aralığı Δz olan iki paralel yatay düzlemin karşılıklı endüktansı aşağıdaki bağıntı ile bulunur [49].

$$L_m = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{W^2} \sum_{x_1}^{x_2} \sum_{y_2}^{y_1} \sum_{x_1'}^{x_2'} \sum_{y_1'}^{y_2'} f(x-x', y-y', \Delta z) \quad (4.11)$$

(4.11)'de olan $f(u, v, w)$ fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$f(u, v, w) = \frac{v^2 - w^2}{2} u \ln(u + R) + \frac{u^2 - w^2}{2} v \ln(v + R) - \frac{1}{6} (R^2 - 3w^2) R - uvw \tan^{-1} \left(\frac{uv}{wR} \right) \quad (4.12)$$

$$R = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$$

$f(u, v, w)$ fonksiyonu aşağıdaki gibi belirtildiği şekilde değiştirilir:

$$f(u, v, w) = \left(\frac{v^2}{2} - \frac{w^2}{6} \right) w \ln(u + R) + \left(\frac{v^2}{2} - \frac{u^2}{6} \right) u \ln(w + R) + uvw \ln(v + R) - \frac{uw}{3} R - \frac{w^3}{6} \tan^{-1} \left(\frac{uw}{vR} \right) - \frac{vu^2}{2} \tan^{-1} \left(\frac{vw}{uR} \right) - \frac{vw^2}{2} \tan^{-1} \left(\frac{vu}{wR} \right) \quad (4.13)$$

PV panelinde PV hücreleri galvanizli bakır tellerle seri olarak bağlanır. Endüstride sıklıkla tercih edilen tel tipleri ince yapıdadır ve bu sebeple modellemede telin deri etkisi ihmal edilir. Böylece telin direnci DC direncine yaklaştırılır ve öz endüktans DC endüktansına eşit sayılır. Bu direnç Hoer formülü kullanılarak hesaplanır [49].

4.1.1 Çalışma I

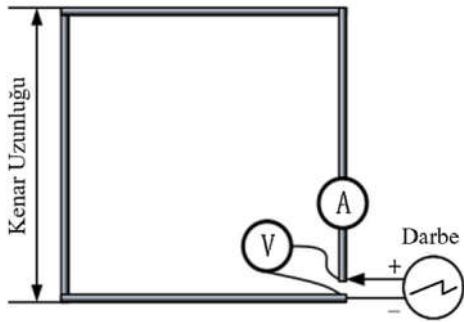
Bu makalede [50] Yang ve arkadaşları, PV sistemlerinin yıldırımın geçici etkileri altında modelleme yöntemini sunmaktadır. Yıldırım geçişlerini analiz etmek için PEEC yöntemini kullanarak PV sistemlerindeki doğrusal olmayan bileşenlerin, kabloların, iletkenlerin modellemeleri ve yöntemleri gösterilmektedir [50]. Modellemede ise vektör uydurma yöntemi kullanılarak iletkenlerin frekansa bağlı olan karakteristiği dikkate alınmıştır. Ayrıca makalede bir PV sisteminin laboratuvar deneyi sonucunda deneysel veriler ile makalede önerilen ve kullanılan yöntem doğrulanmıştır.

Çalışmanın diğer bölümlerinde, PV panel hücreleri, PV sistemlerinde kablolama ve montaj sistemlerinde kullanılan çelik yapıların modellenmesi gösterilmiştir ve detaylı açıklanmıştır. Modellemede SPD’de dikkate alınmıştır. Ayrıca, PV sistemindeki yıldırım geçişleri simüle edilmiştir.

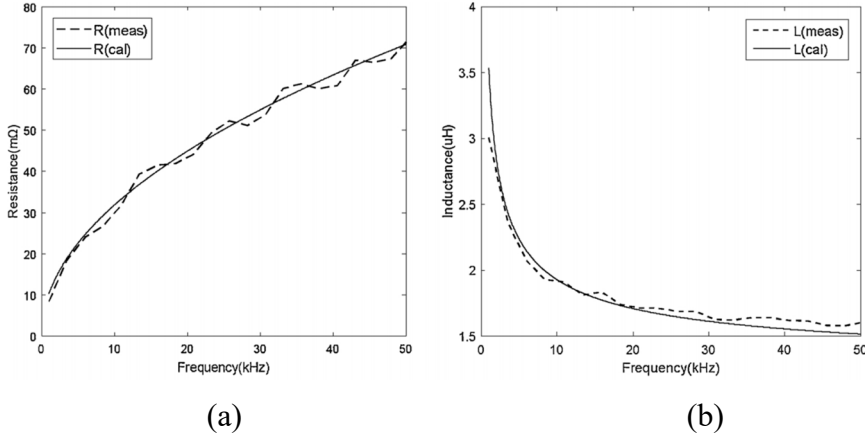
PV sisteminde iletkenlerin ve kabloların modellenmesinde 3.1.2 bölümünde açıklanan yöntemler kullanılmıştır. C profil çeliğin de modellenmesi yine bu bölümde açıklandığı şekilde dikkate alınmıştır [49]. Buna göre çalışmada PEEC eş değer devre modeli Şekil 4.2’de belirtildiği gibidir.

Ayrıca, bu makalede C profil çelik için uygulanan 3.1.2.1’de detaylı açıklanan yaklaşımı doğrulamak için deneysel testler yapılmıştır. C profil çeliğin empedansını belirlemek için yapılan testin kurlumu Şekil 4.4’te gösterilmiştir. Ölçülen sonuçlar yaklaşımın doğruluğunu göstermiştir. Deneysel verilerin ve yaklaşımın karşılaştırması Şekil 4.5’de gösterilmiştir.

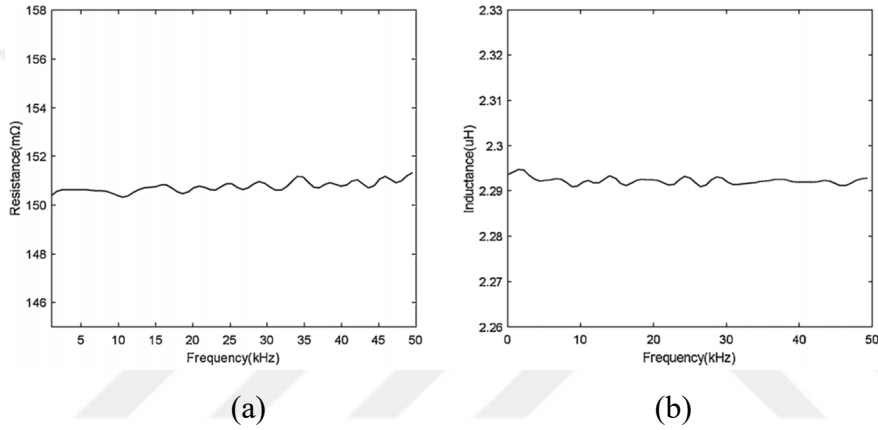
Önceki bölümde PV panel hücrelerinin teller ile seri bağlandığından bahsedilmiş olup öz endüktansın DC endüktansa eşit olduğu açıklanmıştı [49] . Bu yaklaşıma dayanarak elde edilen sonuçlar ile ölçülen sonuçların karşılaştırması ise Şekil 4.6’da olduğu gibidir. Yaklaşımın doğruluğunu kanıtlar niteliktedir [51].



Şekil 4.4. C çelik profilin deney konfigürasyonu.[50]



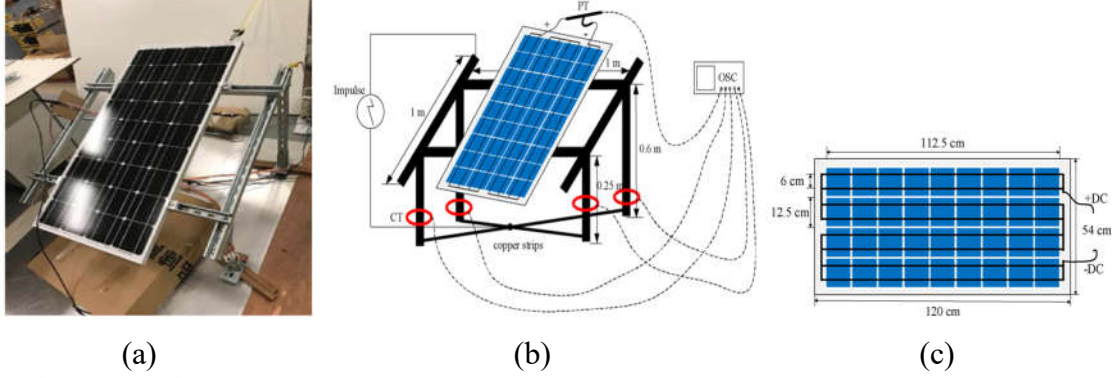
Şekil 4.5. C çelik profilin ölçülen ve hesaplanan devre parametreleri. (a) Direnç, (b) Endüktans. [50]



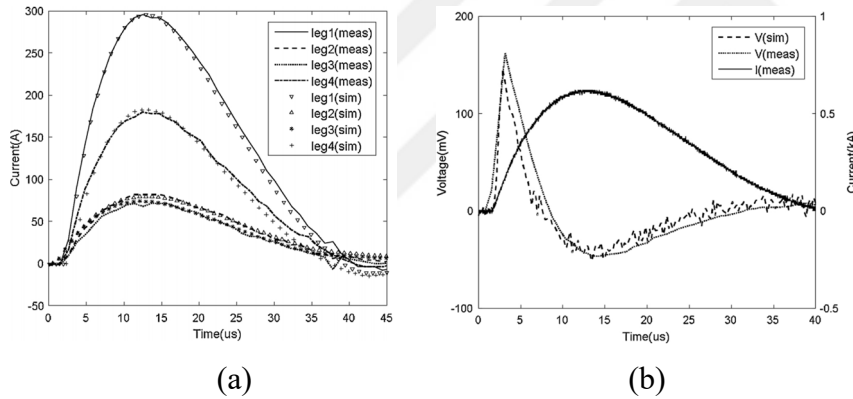
Şekil 4.6. PV hücrelerinin kablolamasının ölçülen parametreleri. (a) Direnç, (b) Endüktans. [50]

PV sistemlerinde yıldırım geçişlerinin analizi için önerilen yaklaşımı doğrulamak amacıyla laboratuvarında PV panellerinden ve C profili çelik montaj yapısından oluşan PV sistemi kurulmuştur ve test edilmiştir. Şekil 4.7(a-b)'de kurulan sistem gösterilmiştir. Deneyde, PV çerçevenin üst köşesine ekranlı bir güç kablosu kullanılarak bir darbe akımı verilmiştir. Sisteme enjekte edilen darbe akımı ise çerçevenin bacakları aracılığıyla darbe jeneratörüne geri akacaktır. Montaj sisteminin dört bacağında da dağıtılan akım ve DC kablosundaki indüklenen açık gerilim dijital bir osiloskop kullanılarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Buna göre ölçülen ve modellenen akımlar ve gerilimler büyüklük ve dalga boyu açısından uyushmaktadır. Deney sonuçları ile doğrulanan bu yaklaşım sistemdeki yıldırım geçişlerinin analizi açısından yeterlidir. 8/20 μ s'lik 632 A tepe darbe akımı değeri altında ölçülen ve simülasyonla elde edilen her dört bacadaki akım sonuçları şekil 4.8(a)'da gösterilmektedir. Tablo 4.2'de ise

montaj sisteminin dört bacaklı ölçülen ve hesaplanan tepe akımlarının değerini göstermektedir. Şekil 4.8(b)'da DC kablosunda ölçülen ve simüle edilen indüklenen açık gerilimleri göstermektedir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere hata oranı azdır ve deneysel sonuçlar ile yaklaşım sonuçları uyushmaktadır [50].



Şekil 4.7. Test için basitleştirilmiş PV sistemi. (a) laboratuvar kurulumunun genel görünümü.(b)test düzenlemesinin yapılandırması.(c)PV panelinin yapılandırması. [50]



Şekil 4.8. (a) PV panel dört ayağındaki akım dağılımının karşılaştırılması. (b) İki DC hattı arasında oluşan açık gerilimin karşılaştırılması. [50]

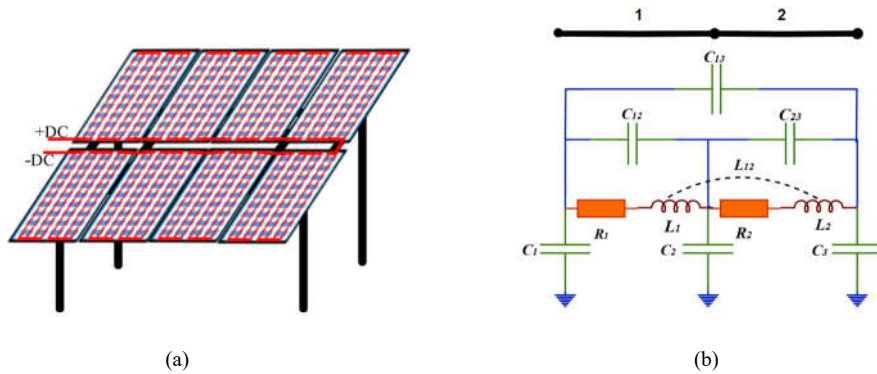
Tablo 4.2. PV sisteminin dört ayağındaki darbe akımı tepe noktalarının karşılaştırılması. [50]

Pozisyon	Değer(A)		
	Ölçülen	Hesaplanan	Hata
1.Bacak	296	296	0%
2.Bacak	82	79,61	2,9%
3.Bacak	71	74	4,2%
4.Bacak	180	182,7	1,5%

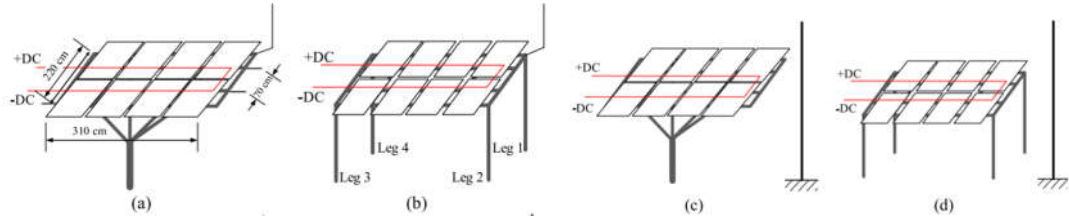
Bu makale, yıldırım geçişlerinin etkisi altında PV sistemleri için kapsamlı bir modelleme yöntemi sunmuştur. Geçiş sırasında PV sistemlerindeki akım ve gerilimler gelişmiş bir PEEC metot kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yöntemle dayanarak, DC kablolama, PV panel kablolaması, C profil çeliğin modellenmesi hesaba katılmıştır. Çıkan sonuçlar ile laboratuvar sonuçları birbiri ile karşılaştırılmış ve yöntemin doğruluğu ispatlanmıştır [50] .

4.1.2 Çalışma II

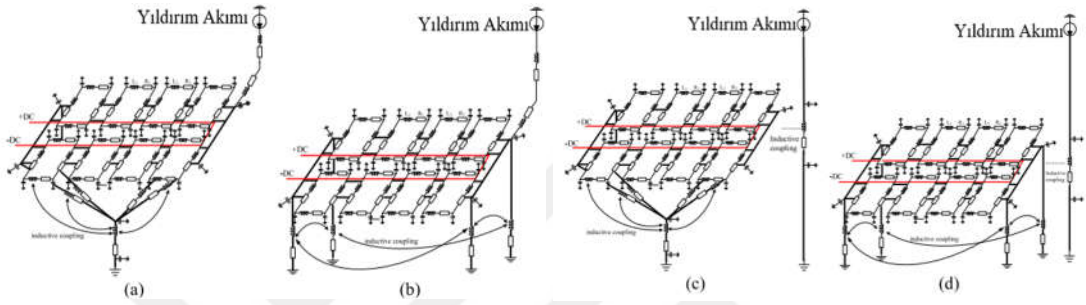
Yıldırım çarpması sırasında, PV sisteminde indüklenen aşırı gerilimler, sistemdeki DC kablolarına bağlı invertörlere zarar verebilir. PV sistemindeki ve invertörde yıldırım etkisiyle meydana gelen bu aşırı gerilimler kısmi eleman eşdeğer devresi (PEEC) metodu kullanılarak hesaplanmıştır [53]. Makalede [52] Yang ve arkadaşları, PV sisteminin montaj yapıları PEEC yöntemi kullanılarak modellenmiş olup yapının ferromanyetik etkisi ve cilt etkisi dikkate almıştır. PV sistemindeki PV kabloları, yapısal çelikler, iletkenler PEEC yöntemi ile modellenir. Buna dayanarak PEEC'nin formülasyon yöntemleri kullanılarak PV sistemi için eşdeğer devre Şekil 4.9'da gösterildiği gibi oluşturulur. Şekil 4.9(b)'de görüldüğü üzere PV sistemlerindeki herhangi iki iletkenin eşdeğer devresi, endüktans, toprak kapasitansı, direnç, ve karşılıklı endüktans ve karşılıklı kapasitansı içermektedir. Ayrıca, şekil 4.10'da gösterilmiş olan dört ayrı konfigürasyonun eşdeğer devresi de Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.9. PV ünitesindeki iletkenler için temsili eşdeğer devre. (a)PV ünitesinin yapılandırılması. (b) İki iletken için eşdeğer devrenin diyagram örneği. [52]



Şekil 4.10. PV kurulumunun yapılandırılmaları. (a) İzole olmayan LPS'li tek ayaklı montaj yapısı. (b) İzole olmayan LPS'li dört ayaklı montaj yapısı. (c) İzole LPS'li tek ayaklı montaj yapısı. (d) İzole LPS'li dört ayaklı montaj yapısı. [52]



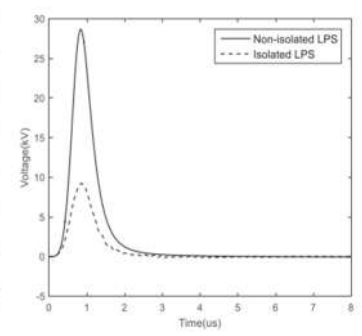
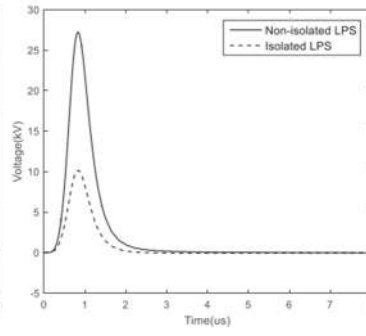
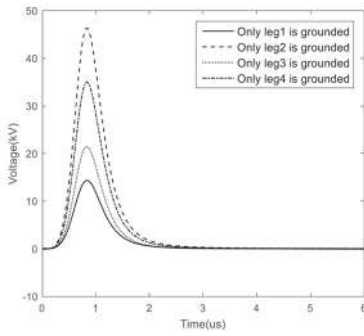
Şekil 4.11. PV ünitesi için temsili eşdeğer devreler. (a) İzole edilmemiş LPS'li tek ayaklı montaj yapısı. (b) İzole edilmemiş LPS'li dört bacaklı montaj yapısı. (c) İzole edilmiş LPS'li tek bacaklı montaj yapısı. (d) İzole edilmiş LPS'li dört bacaklı montaj yapısı. [52]

Bu çalışma, PV sistemlerinde yıldırım etkisi altında invertörde hasara sebep olan +DC ve -DC kabloları arasında indüklenen aşırı gerilimler incelemiştir. İnvertörde meydana gelen bu aşırı gerilimleri ise PV sisteme koruyucu bir ekipman eklemeyen sistemin yapısında değişiklikler yaparak oluşan aşırı gerilimleri azaltmayı araştırmıştır. PV sistemlerindeki yıldırım geçişleri PEEC tabanlı bir yazılımla modellenmektedir [53]. PV sistemi farklı yapılarda yıldırım geçişlerinin etkisi incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Makaleden elde edilen verilere göre, PV sisteminde izole edilmemiş bir LPS kullanımında, montaj sistemindeki topraklama ayağının konumu, akım dağılımı üzerinde büyük bir etkisi vardır. Montaj sistemlerinin etkisini araştırmak için Şekil 4.10(a) ve Şekil 4.10(b)'de görüleceği üzere simülasyon için tek bacaklı yapı ve dört bacaklı montaj yapısı ve izole edilmemiş LPS'ler seçilmiştir. Aslında indüklenen gerilim, montaj yapısı ve LPS ile dc kablolar arasındaki endüktif ve kapasitif bağlantılardan kaynaklanmaktadır. Dik iletkenler arasındaki karşılıklı bağlantının sıfıra eşit olduğunu PEEC teorisi açıklamaktadır [53]. Buna dayanarak, indüklenen gerilime

birincil katkı paralel iletkenlerden gelmektedir. Sistemde daha fazla topraklama noktasının olması yıldırımdan korunma sisteminin verimliliğini arttırmayacaktır. Bunu tek bacaklı montaj sisteminde tek bacadan yapılan topraklama ile dört bacaklı topraklama sisteminde bu bacakların hepsinin topraklanması durumunda Tablo 4.4'te gösterilen ve indüklenen gerilim genliklerinin birbirine yakın olmasından anlayabiliriz. Dört bacaklı bir montaj yapısı için, topraklama ayağının seçimi sistemin yıldırımdan korunma performansını da etkiler [54]. Şekil 2(b)'deki montaj sistemine sahip PV simüle edilmiş ve Şekil 4.12'de sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.12'deki sonuçlardan da anlaşılacağı üzere yıldırımdan korunma performansı için topraklama noktalarının yeri ve sayısı önemlidir. Tablo 4.3'de farklı bacakların topraklanmasında sistemde meydana gelen aşırı gerilimlerin genlikleri verilmiştir. Buradan anlaşılacağı üzere, 1.bacanın topraklanmasında indüklenen gerilim daha az 4. Bacanın topraklanması durumunda ise en fazla olmuştur. 1. Bacak topraklanmış sistem için PV çerçevesinde küçük bir akım bulunur [52]. Bunun sebebi ise yıldırım akımının doğrudan o bacak üzerinden toprağa boşalmış olmasıdır. Dört bacaklı montaj yapısında seçilen topraklama ayağı sistemin yıldırımdan korunma performansını etkilemektedir. Topraklama ayağı, paratonere mümkün olduğunca yakın olmalıdır [54].

Tablo 4.3. Dört Bacak Montaj Sisteminde Farklı Topraklama Yöntemleriyle Endüklenen Gerilim Genliği. [52]

Topraklanmış Bacak	1.Bacak	2. Bacak	3. Bacak	4. Bacak	Tüm Bacaklar
Gerilim Genliği	14,4 kV	47,3 kV	21,5 kV	35 kV	28,7 kV



(a)

(b)

Şekil 4.12.Farklı topraklama yöntemlerine sahip tek dört bacaklı montaj sisteminde $\pm$ dc kablolar arasındaki gerilim farkı. **Şekil 4.13.** İzolesiz LPS ile korunan sistemde $\pm$ dc kablolar LPS arasındaki gerilim farkı (a)Tek bacaklı montaj yapısı (b)Dört bacaklı montaj yapısı. [52]

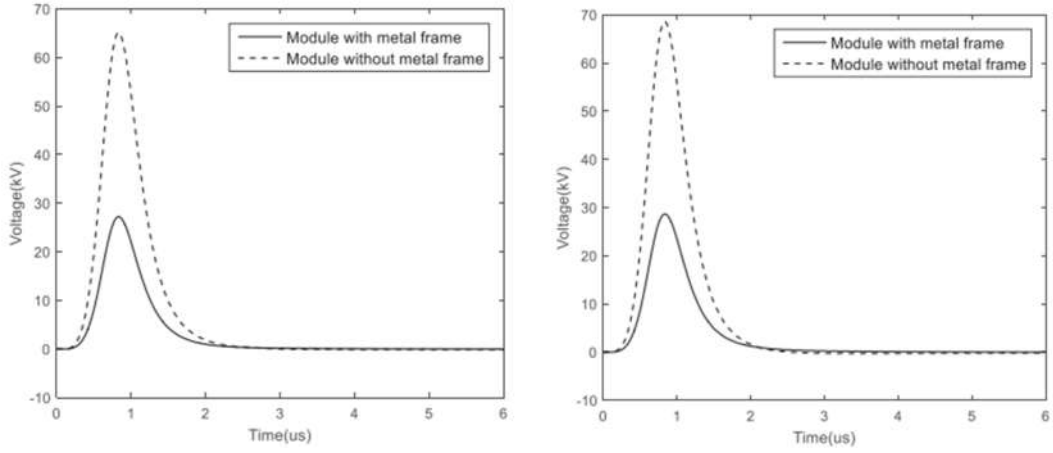
Tablo 4.4. Gerilim Genliğinin Karşılaştırılması.[52]

Montaj Sisteminin Tipi	İzole LPS	İzole olmayan LPS
Tek Bacak	10,1 kV	27,2 kV
Dört Bacak	9,21 kV	28,7 kV

PV sisteminde kullanılan LPS'lerin etkisi incelendiğinde, bu çalışmanın sonuçları Şekil 4.13'de görüleceği üzere, yıldırımın etkisi altında izole edilmiş LPS'si olan PV sistemlerinde izole edilmemiş LPS'si olana göre daha az gerilim meydana gelmektedir [55]. PV modüllerdeki DC kablolar ya da diğer teller çoğunlukla LPS'ye diktir. Ayrıca sistemin montaj yapısı izole edilmiş LPS si olan PV sisteminde indüklenen gerilim üzerinde önemli bir etkisi yoktur [52].

PV sistemlerinde modül yapılarının çerçeveli ya da çerçevesiz tercih edilmesinin indüklenen gerilim üzerindeki etkisi incelenmiş olup Şekil 2'deki her iki montaj tipinde de metal çerçeveli modül kullanıldığında çerçevesiz modüllere göre daha az gerilim indüklendiği Şekil 4.14'teki sonuçlar ile gösterilmiştir. Bunun nedeni Faraday yasasına dayanmaktadır. PV modülünün yakınında bir ani akım metal çerçeve tel döngüsünde manyetik akı üretecektir. Faraday yasasına göre telde indüklenen akıma ters yönde bir manyetik akı oluşacaktır. Faraday yasası nedeniyle öncekinin ters yönünde ek manyetik

akı üretecektir. Böylece telin döngüsündeki toplam manyetik akı azalmış olacaktır ve indüklenen gerilim de daha az olacaktır [52].

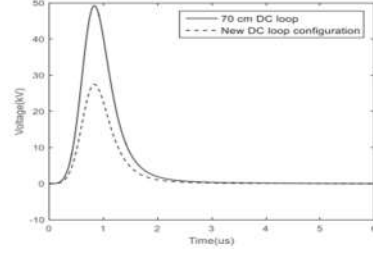
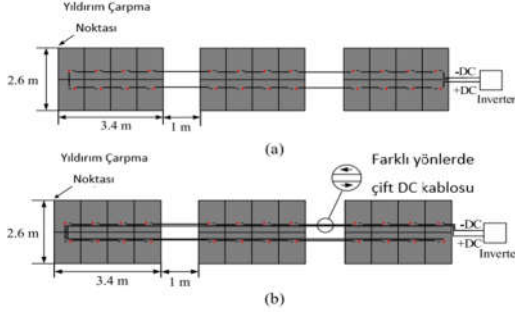


(a) Tek bacaklı montaj yapısı

(b) Dört bacaklı montaj yapısı

Şekil 4.14. İzole edilmemiş bir LPS ile korunan $\pm$ dc kabloları arasındaki gerilim farkı. [52]

PV sisteminde uygun kablo düzenlemesiyle ve dc kablo döngü boyutunun azaltılmasıyla invertördeki indüklenen gerilim önemli ölçüde azaltıldığı bu çalışmadaki sonuçlar ile gösterilmiştir. Makalede, simülasyonun daha kolay olması sebebi ile izole edilmemiş LPS koruması olan tek bacaklı montaj sistemi olan PV sistemi seçilmiştir. Şekil 4.15’de görüldüğü üzere iki tip DC kablo düzeni simüle edilmiştir. Şekil 4.15(a)’da +DC/-DC kabloları arası ayırma mesafesi 70 cm, Şekil 4.15(b)’de ise 1 cm’dir. Şekil 4.16 ise tek döngülü ve çift döngülü kablo düzeni durumdaki dc kablolarındaki indüklenen gerilimleri göstermektedir. Buradan da anlaşılabacağı üzere, kablolar arasındaki genişliğin azaltılması ve düzenlenmesi ile indüklenen gerilim azalmaktadır. Fakat yine de gerilim indüklenmektedir. Çünkü her panel sebebi ile bir döngü alanı oluşmaktadır bu da indüklenen gerilimin oluşmasına sebep olmaktadır [52].

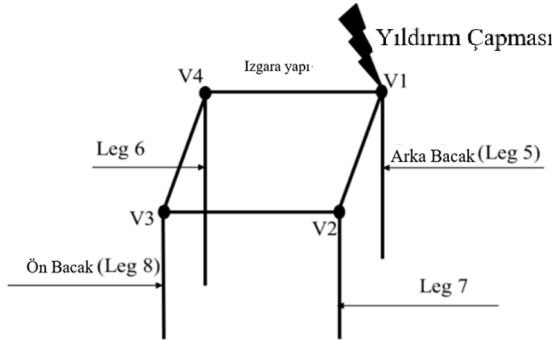


Şekil 4.15. DC kablo düzenlerinin yapılandırılmaları.[52]

Şekil 4.16. Farklı kablo düzenlemelerine sahip $\pm$ dc kablolar arasındaki gerilim farkı.(a) Tek döngü düzeni. (b) Çift döngü düzeni.[52]

4.1.3 Çalışma III

Hetita ve arkadaşları bu çalışmada [56] yıldırımın geçici etkilerinin incelenmesi için PEEC yöntemini kullanmış olup sonuçlar ile doğrulamıştır. Şekil 4.17’de modeli verilen PV metal çerçeveli montaj sistemi dikkate alınmış olup iletkenler arasındaki karşılıklı etki hesaba katılmıştır ve R,L,C parametreleri ile sistem modellenmiştir. Topraklama sistemi de R,L,C parametreleri ile modellenmiştir [56].



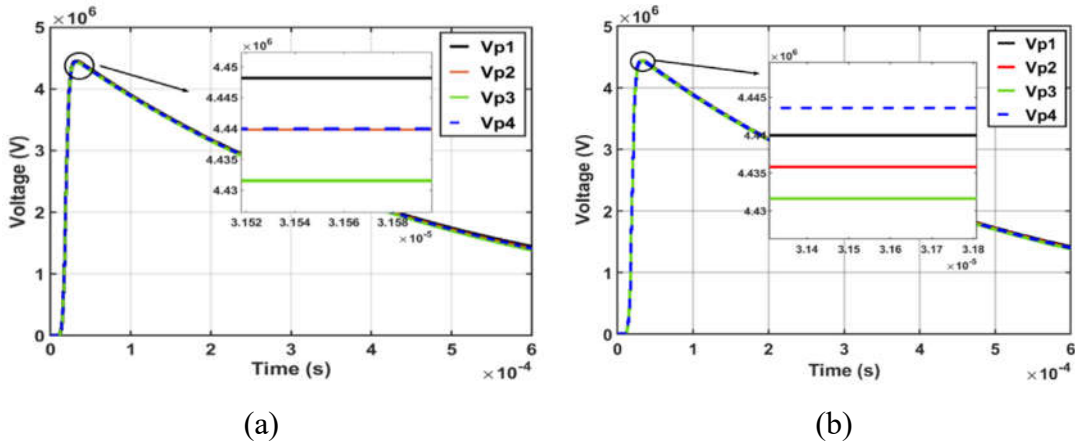
Şekil 4.17. PV Montaj Sistemi.[56]

Yıldırımın farklı noktalara çarpması durumunda ve çarpma noktasının değiştirilmesinin etkisi incelendiğinde, çalışmada görüleceği üzere Şekil 4.17’de gösterilen 1 ve 4 noktalarına yıldırımın çarpması incelenmiş ve sırasıyla Şekil 4.18(a) ve Şekil 4.18(b)’de gösterilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere, diğer noktalar ile karşılaştırıldığında indüklenen en büyük aşırı gerilim değerinin, çarpma noktasında oluşmuştur. Çarpma

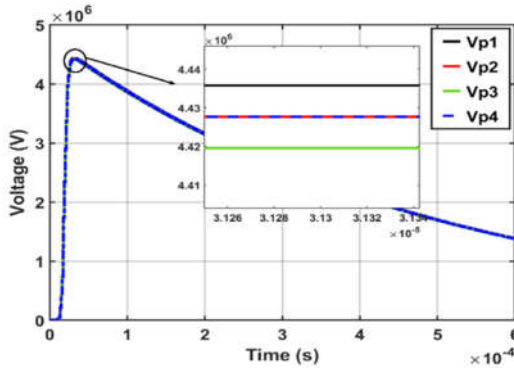
noktasından uzak olan 3 numaralı noktada ise indüklenen aşırı gerilim, en küçük değere sahiptir. PV sisteminde herhangi bir noktaya yıldırım çarptığında, sistemdeki iletkenlerinden büyük bir akım akacaktır ve bu sebeple farklı noktalarda büyük aşırı gerilimler oluşacaktır. Oluşan bu büyük akımlar, önce tüm montaj sistemi boyunca akacak ve daha sonra topraklama sistemine yayılacaktır [57]. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, yıldırımın çarptığı noktanın konumuna göre her noktadaki gerilimin farklılık gösterdiği, yıldırımın çarptığı noktada gerilimin en yüksek değere ulaştığı ve çarpma noktasından uzaklaştıkça indüklenen gerilim değerinin azaldığı sonucuna varılmıştır [58].

PV sisteminde kullanılan metal çerçevesinin kullanılmaması durumundaki indüklenen gerilim etkisi, Şekil 4.19'da incelenmiştir. Şekil 4.18(a) ve Şekil 4.18(b)'deki sonuçlar ise metal çerçevenin kullanıldığı PV sistemine aittir. Şekil 4.19(a), şekil 4.18(a) ve 4.18(b)'deki sonuçlar ile karşılaştırdığımızda aşırı gerilim değerlerinin Şekil 4.19(a)'da daha az olduğunu görebiliriz. Bu durumda, PV metal çerçevenin kullanılmamasından dolayı indüklenen gerilimin azaldığı gözlemlenmektedir. Metal çerçevenin etkisi ile sistemde ek manyetik alanlar oluşacaktır ve bu sebeple sistemde indüklenen aşırı gerilimler artış gösterecektir.

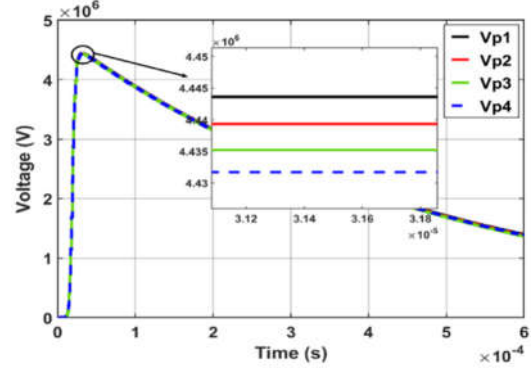
Yıldırımın çarpma noktası 1 olduğu için, indüklenen aşırı gerilimin en yüksek değeri nokta 1'de yani çarpma noktasındadır [56] .



Şekil 4.18.a)1 noktasında indüklenen gerilim. b) 4 noktasında indüklenen gerilim. [56]



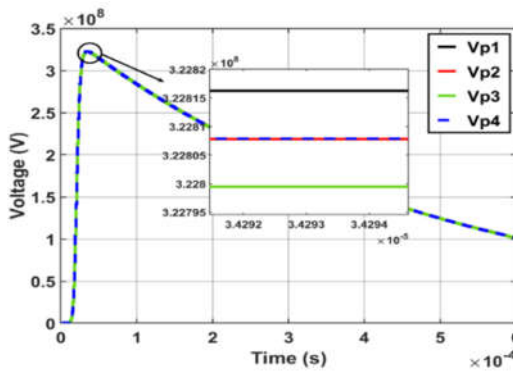
(a)



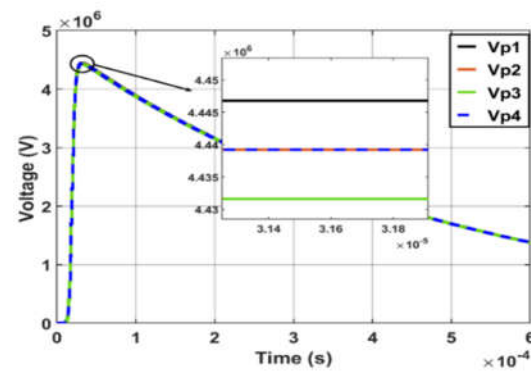
(b)

Şekil 4.19. a)Metal frame yokken indüklenen gerilim b)Topraklanmış bacağın değişmesi ile indüklenen gerilim. [56]

Montaj sisteminin topraklanan ayağının etkisi de bu çalışmada incelenmiştir. Topraklama sistemine bağlı olan montaj ayağının Şekil 4.17’de gösterildiği gibi bacak 8’den bacak 6’ya değiştirilmesinin etkisini Şekil 4.19(b)’de görebiliriz. PV sisteminde, yıldırım akımı yayıldığında montaj sisteminden geçip topraklama sistemine gidecektir. Dolayısıyla, yıldırım akımının aktığı empedansı, toprağa giden yolun değişmesiyle değişiklik gösterecektir ve buna bağlı olarak sistemin farklı noktalarda oluşan geçici aşırı gerilimler değişecektir [59]. Şekil 4.19(b)’deki verileri de dikkate alarak, indüklenen aşırı gerilimlerin tepe değerlerinin, bacak 6 yani topraklanmış ayağa bağlı olan nokta 4’te en düşük ve çarpma noktası olan nokta 1’de en büyük olduğu görülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 4.20. a) Toprak direncini değiştirildiğinde indüklenen gerilimler b) Karşılıklı etkiler göz ardı edildiğinde indüklenen gerilimler. [56]

Toprak öz direncindeki değişikliğin indüklenen gerilime etkisi incelenmiştir ve toprak öz direnci arttığında, yıldırım akımlarını boşaltmak için gerekli olan topraklama

sisteminin direncinin artacağı ve daha sonra sistemin farklı noktadaki gerilimlerin de artış göstereceği gözlemlenmiştir [58]. Çalışmada, PV sisteminde indüklenen aşırı gerilimlerin toprak öz direnci değerinin $27,2\Omega.m$ 'den $2000\Omega.m$ 'ye değiştirilmesinin etkisi Şekil 4.20(a)'da görülmektedir. Sonuçlara göre, sistemin farklı noktalarında indüklenen aşırı gerilimler toprak öz direncinin artırılmasıyla artmıştır. Buna göre toprağın öz direncinin sistemdeki farklı noktadaki geçici aşırı gerilimlerin değerleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu açıktır. Şekil 4.20(a)'daki sonuçlar incelendiğinde, toprak öz direnç değerinin, geçici aşırı gerilimler üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Bu durumda, düşük toprak öz direncinin seçilmesiyle indüklenen gerilimler azalacaktır ve dolayısıyla sistemin yıldırımdan korunumu artmış olacaktır.

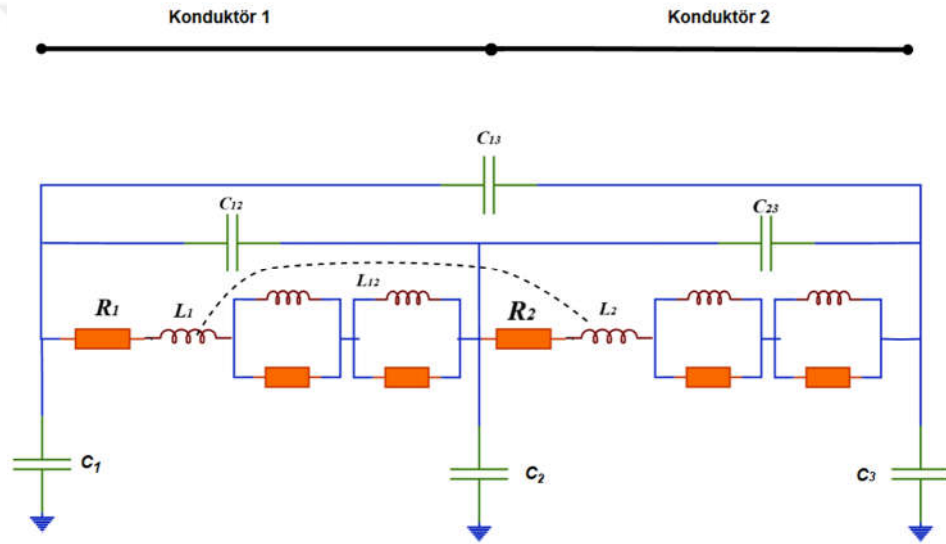
Literatürdeki araştırmaların birçoğu PV sisteminde iletkenler arasında oluşan endüktif ve kapasitif kuplajları ihmal etmiştir. Karşılıklı kuplajların etkisi ihmal edildiğinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 4.20(b)'de gösterilmiştir. Eğer karşılıklı kuplajlar etkisi ihmal edilirse, sistemin farklı noktalarında indüklenen aşırı gerilimlerin azaldığı gözlemlenmiştir. İletkenler arasında oluşan bu etkinin ihmal edilmesi sistem için seçilen LPS'nin de yanlış olmasına neden olacaktır. Bu nedenle iletkenler arasında oluşan etkilerde modellemede dikkate alınmalıdır [56].

4.1.4 Çalışma IV

Yang ve arkadaşları bu makalede [61] yıldırımın bir HV iletim hattına düşmesi durumunda PV sisteminde meydana gelen hasarların kapsamlı bir analizini sunmaktadır. Çalışmada, İletim koridoruna inşa edilmiş bir PV santrali ele alınmıştır. Yıldırımın HV hattına düşmesi sonucu PV invertörlerdeki arızalar, bypass diyotlarının bozulması ve PV'deki metalik elemanlar arasında ark oluşması olmak üzere üç tür yıldırım hasarı ayrıntılı olarak incelenmiştir. Yıldırım sonucu indüklenen aşırı gerilimler analiz edilmiş olup simülasyon ve deneylerin sonuçlarına göre yıldırım sebepli hasarları önlemek için PV sistem için en doğru koruma sistemi için tasarım çözümleri ve yaklaşımları önerilmiştir [60].

Bu makalede kullanılan modelleme yaklaşımı ise, yıldırım geçişlerinde PV tesislerindeki bileşenler ve cihazların modellenme ve incelenmesi gereksiniminden doğmuştur. Tesisteki PV bileşenler, PV modüller, iletim hatları, aşırı gerilim koruma

cihazları(SPD), direkler ve invertörlerden oluşmaktadır. Çalışmada, PV sisteminin DC tarafındaki koruma ele alınmıştır ve sistemin AC tarafındaki ekipmanlar yani transformatör ve AC kablolama sistemleri dikkate alınmamıştır. Bu bileşenler bir tel olarak temsil edilmiştir ve sistem modellemesinde PEEC yöntemi kullanılmıştır [61]. Bunlar arasında PV modülleri, topraklama şebekeleri, invertörler, aşırı gerilim koruma cihazları (SPD'ler), direkler, iletim hatları vb. bulunur. Bu makale öncelikle PV sisteminin DC tarafındaki korumayı ele aldığından, transformatörler, AC kabloları gibi AC tarafındaki ekipmanlar dikkate alınmamıştır. Çalışmada, bir vektör uydurma tekniğiyle PEEC modeli geliştirilmiştir, Şekil 4.21'de gösterildiği gibi frekansa bağlı direnç bir merdiven devresi ile değiştirilmiştir.

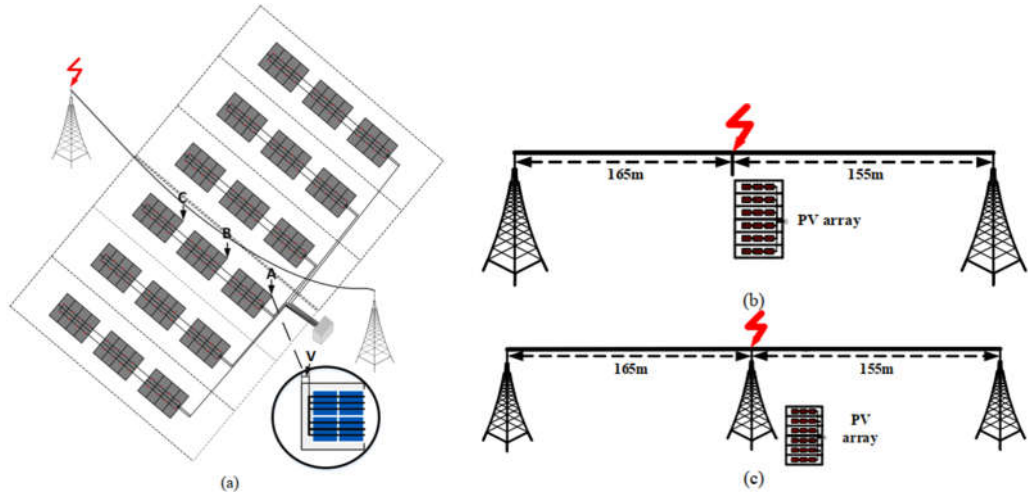


Şekil 4.21. İki iletken için eşdeğer devrenin diyagram örneği. [61]

İncelemede, Şekil 4.22(a)'da görüldüğü üzere 110 kV iletim hattı altında tipik bir PV santrali ele alınmış olup, sistemin yıldırım geçişleri çalışılmış ve araştırılmıştır. Simülasyonlarda Şekil 4.22(b) ve (c)'de gösterilen iki senaryo ele alınmıştır.

İlk senaryoda, PV dizisi iki iletim hattı direği arasındaki açıklığın ortasında yer alır ve direğin topraklama sistemi ile PV santralinin topraklama sistemi arasında büyük ayırma mesafesi vardır [62]. Bu nedenle PV santralin topraklama sistemi iletim hattı direğinin topraklama sistemine bağlı değildir.

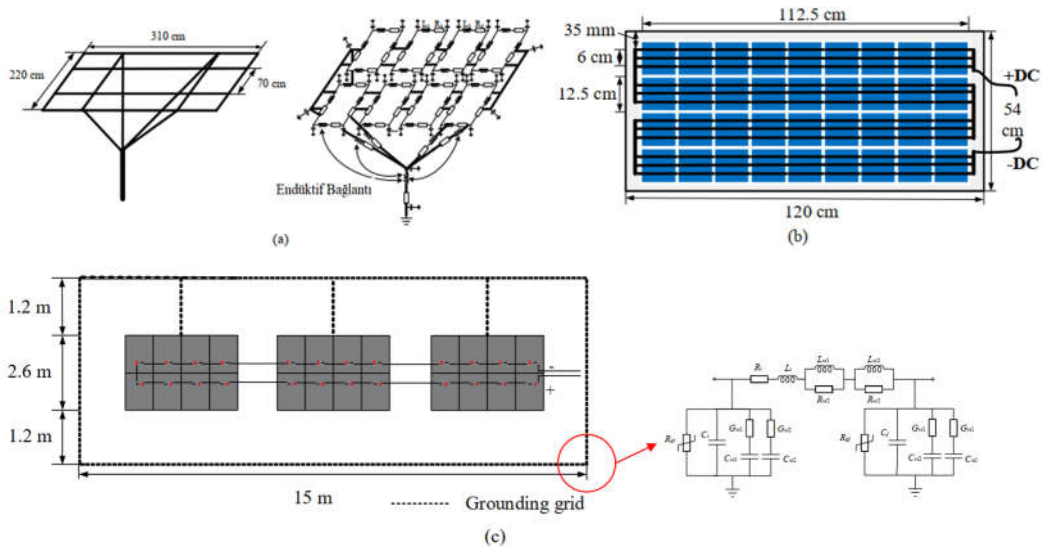
İkinci senaryoda ise, PV dizisi iletim hattı direğinin yanındadır ve iletim hattı ve PV santralinin topraklama şebekeleri bağlıdır. PV sisteminde bulunan iletkenler küçük parçalara bölünmüştür ve Şekil 4.21'de gösterilen eşdeğer devreye dönüştürülmüştür ve bu devre ile temsil edilmektedir.



Şekil 4.22. İletim hattı altında bir PV dizisinin yapılandırması. (a) Sistemin genel görünümü. (b) Senaryo 1'in yan görünümü. (c) Senaryo 2'nin yan görünümü. [61]

Yıldırım geçiş analizinde, şekil 4.22(b)'de olduğu gibi havai toprak iletkenine yıldırım düşmesi ve Şekil 4.22(c)'deki gibi direğe yıldırım düşmesi olmak üzere iki senaryo ele alınmıştır.

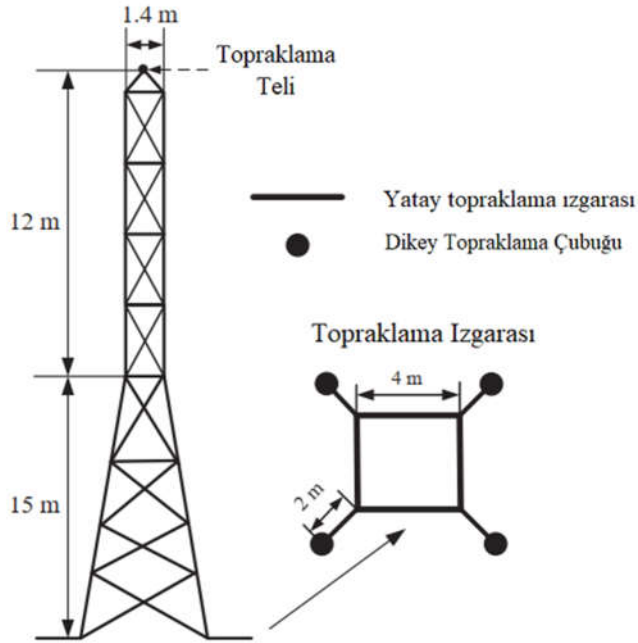
Çalışmada PV sistemi PEEC yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Şekil 4.23(a)–(b) 'de PV sisteminde montaj sistemi ve PV modüllerin yapılandırmaları gösterilmiştir. PEEC yöntemi kullanılarak elde edilen eşdeğer devre şematik diyagramı ise Şekil 4.23'de gösterilmiştir.



Şekil 4.23. PV dizisinin ve bileşenlerinin sistem yapılandırması. (a) montaj yapısı. (b) PV modülü. (c) topraklama şebekesine sahip PV dizisi (üstten görünüm). [61]

PV sisteminin topraklama sistemi 40x4 mm² düz çelikten yapılmış olup 1 m derinlikteki toprağa gömülüdür. PV sistemi için topraklama şebekesi 40 × 4 mm² düz çelikten yapılmıştır ve 1 m derinlikte toprağa gömülüdür. Topraklama ağının boyutu Şek. 6(c)'de gösterilmiştir. PV'nin montaj sistemi bacaklarının her biri düz çelik ile topraklama ağına bağlanmaktadır. Sisteme doğrudan yıldırım çarptığında, topraklama empedansı önemli ölçüde değişim gösterebilir. Bu nedenle topraklama empedansı hesaplamalarda göz ardı edilmemelidir. Toprağın etkisi, iletken empedansları, endüktif ve kapasitif bileşenler toprak girişi gibi bileşenler hesaba katılarak yansıtılır [64]. Bu eşdeğer devre modeli ile gösterilmiştir. Modelde, iyonizasyon etkileri ve cilt etkileri de dahil edilmiştir. Her PV montaj sisteminin ayağı, düz çelik aracılığıyla şebekeye bağlanır. Topraklama şebekesinin üzerine kurulmuş olan PV dizilerinin yapılandırması ve topraklama şebekesinin bir bölümü için eşdeğer devre Şekil 4.23(c)'de gösterilmiştir.

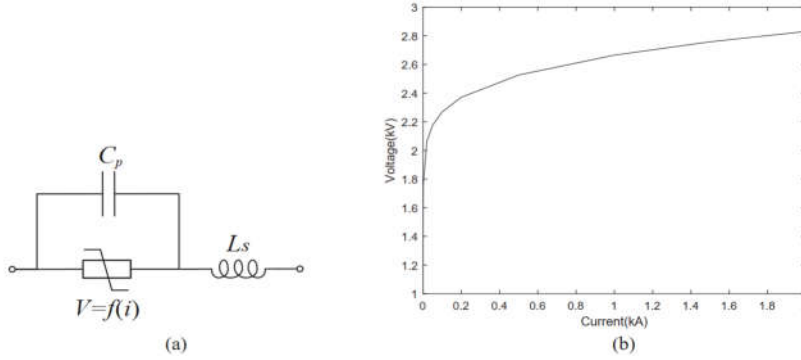
Şekil 4.24'de 110 kV'luk iletim hattı direği basit kafes modeli ile modellenmiştir. Simülasyonda, açıklığın ortasında(iki direk arasındaki telin ortası) veya açıklığın sonunda(bir direğin tepe noktasında) iletim hattının toprak iletkeni, yıldırıma maruz kalır.



Şekil 4.24. İletim direği ve topraklama şebekesi için basitleştirilmiş bir model. [61]

Çalışmada SPD'ler de modellenmiştir. SPD'ler özellikleri gereği güçlü bir doğrusal olmayan özelliğe sahiptir. SPD'lerin empedansı nominal gerilimde veya altında çalıştıklarında yüksektir ve gerilim eşiği aşıldığında ise önemli ölçüde düşer [62].

Burada SPD, Bir endüktans, bir kapasitans ve doğrusal olmayan bir direnç ile simüle edilmiştir Şekil 26'de gösterilmiştir.

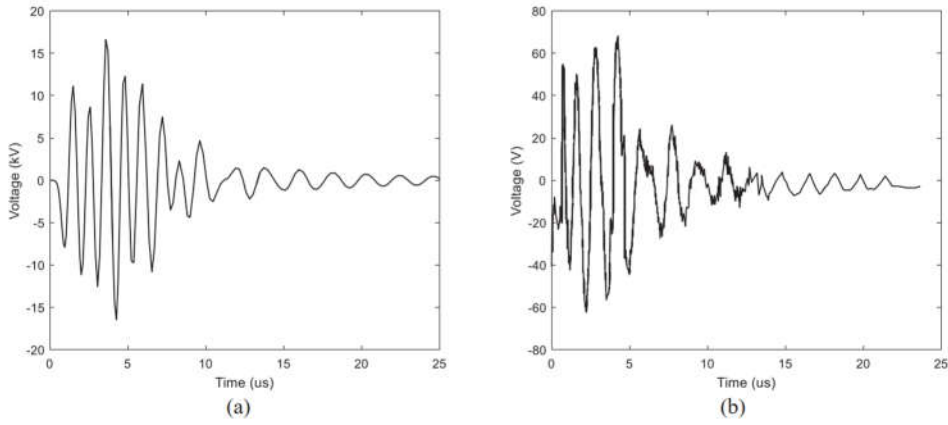


Şekil 4.25. (a) SPD'nin eşdeğer devre modeli ve (b) modeldeki doğrusal olmayan direncin karakteristiği. [61]

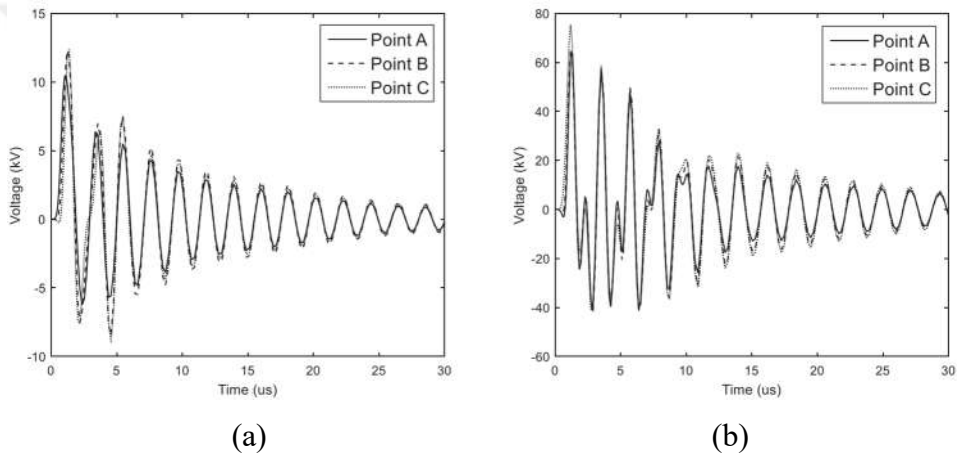
Havai topraklama iletkenine yıldırım düşmesi senaryosuna göre, havai toprak iletkenine yıldırım düştüğünde Şekil 4.26(a) invertörde +DC/– DC kabloları arasındaki indüklenen geçici gerilimi göstermektedir [63]. Sonuçları [64]'te gösterilmiştir. Bu sonuçlar Şekil 4.26(b)'de yer verilmiştir. Bu çalışmadaki ve ölçülen sistemdeki, senaryo ve PV sisteminin benzer olması aynı zamanda yıldırım dalga şekil ve frekansın benzer özelliklere sahip olması da göz önünde bulundurularak bu iki olayın da benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Sonuçların benzer olması bu çalışmada yapılan modelin ve hesaplama sonucunun belirli bir ölçüde uygun ve makul olduğunu göstermiştir.

Şekil 4.22(a)'da A, B ve C panellerindeki bypass diyotlarında indüklenen gerilimler Şekil 4.27(a)'da gösterilmektedir. İndüklenen gerilimler, arıza geriliminden çok fazladır ve bypass diyotlarında büyük hasarlara neden olmaktadır.

PV modüllerinin metal çerçevesi ve tel arasında indüklenen gerilimler Şekil 4.27(b)'de gösterilmiştir. Sonuçlardan da anlaşıldığı üzere gerilimin en yüksek olduğu nokta Panel C'dir. Panel B'de, C'den düşük A'dan daha büyük bir değere sahiptir fakat panel A'da indüklenen gerilim diğer panellerden daha azdır. Buna göre, çarpma noktasına olan mesafenin artması ile indüklenen gerilim değeri azalmaktadır.

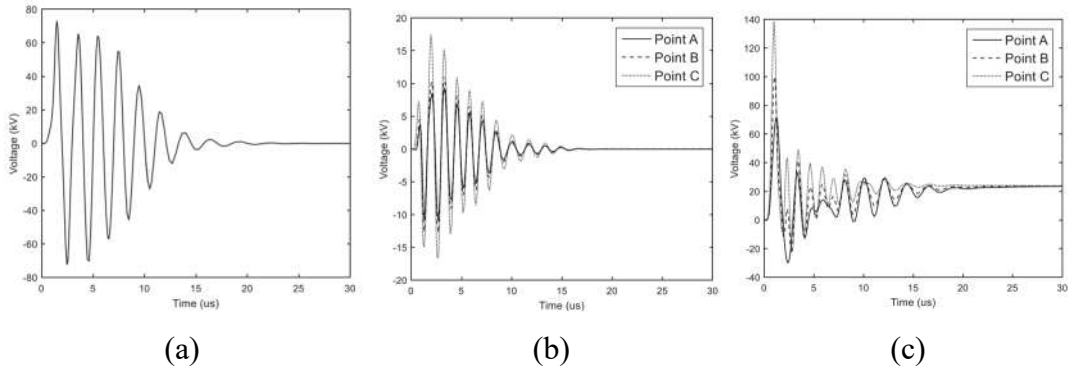


Şekil 4.26. +DC/- DC kabloları arasındaki indüklenen geçici gerilimler. (a) hesaplanan sonuç. (b) ölçülen sonuç. [61]



Şekil 4.27. (a) Baypas diyotlarında indüklenen gerilimler. (b) PV metal çerçevesi ile PV kablosu arasında indüklenen gerilimler. [61]

İletim direğine yıldırım düşmesi senaryosuna göre, direğe yakın PV panellerinde indüklenen geçici gerilimler incelenmiştir. Bu yapıya göre, PV sistemi, direğin çok yakınındadır ve iletim hattının topraklama sistemi doğrudan PV sisteminin topraklama sistemine bağlıdır. İnvertörde, +DC/-DC kabloları arasında indüklenen gerilim Şekil 4.28(a)'da gösterilmiştir. Bu indüklenen gerilim, PV invertörüne ve DC kablolarına bağlı ekipmanlara zarar verebilir [63]. PV sistemlerinde gerilim indüklenmesine sebep olan akım, birinci senaryoda havai toprak iletkenindeki yıldırım akımı ve ikinci senaryoda direktten boşaltılan yıldırım akımıdır.



Şekil 4.28.(a)+/-DC kabloları arasındaki indüklenen gerilimler.(b)Baypas diyotlarında indüklenen gerilimler.(c) PV metal çerçeve ile PV teli arasındaki indüklenen gerilimler. [61]

Her iki senaryoda da PV sistemi ve direk arasındaki mesafeler farklıdır bu nedenle bu senaryoda indüklenen gerilim, ilk senaryoda indüklenen gerilime göre daha fazladır. İlk senaryo incelendiğinde, en yakın direğin PV sistemine uzaklığının 155 m olduğu gözükmemektedir. Fakat diğer senaryoda direk PV sistemine çok yakındır. Bu nedenle ikinci senaryoda DC kabloları arasında indüklenen gerilimler ilk senaryoya göre çok daha fazladır. Ayrıca ikinci senaryoda meydana gelen toprak potansiyelindeki artış, direktan akan akımdan kaynaklanmaktadır. Bu potansiyel artışı, direğin yanındaki PV sisteminin çerçeve ve tel arasında sürekli bir aşırı gerilime sebep olur. Her iki senaryoda da toprak telinde oluşan akım yansıması, PV sistemindeki gerilim dalga formunun salınımına yol açmaktadır [62] .

Bu senaryoya göre A,B ve C panellerindeki bypass diyotlarında oluşan gerilimler Şekil 4.28(b)'de gösterilmiştir. PV paneli direğe yakınlığı diyotta indüklenen gerilimin artmasına neden olur.

Şekil 4.28(c)'de ise PV modüllerindeki metal çerçeve ve tel arasında indüklenen aşırı gerilimler gösterilmiştir. Direği olması sebebi ile Şekil 4.28(c)'de de görüldüğü üzere bu senaryodaki gerilimin grafiği farklıdır. Ayrıca meydana gelen aşırı gerilim panel C'de A'dakinin yaklaşık iki katıdır.

Bu çalışmada, PV sisteminin yakınındaki bir iletim hattına yıldırım düştüğünde sistemde meydana gelen geçici davranışlar incelenmiştir. Bunun için ise PEEC yöntemi kullanılarak PV sisteminde indüklenen gerilimler modellenmiştir [62]. Simulasyon sonuçları, önceki çalışmalarda yer alan saha sonuçları ve gözlemleri ile tutarlıdır.

Çalışmada ele alınan her iki senaryo için de yıldırım akımının yükselme süresi arttığında, aşırı gerilimlerin genliği büyük ölçüde azalacaktır ve aşırı gerilim ilk pozitif darbeye salınım yapmayacaktır. Ayrıca direğin topraklama sistemindeki yapılandırma ve toprak direncinin yapılandırması, bypass diyotundaki ve invertördeki aşırı gerilimleri etkilemeyecektir. Ayrıca 1. Senaryodaki PV modülündeki metal çerçeve ile tel arasındaki gerilimi etkilemezken 2.senaryoda bu gerilimi etkileyebilmektedir. Direkt yüksekliğinin etkisi ise her iki senaryo için de bezer şekilde etki göstermektedir. Direkt yüksekliğinin azalması aşırı gerilimlerin artmasına sebep olmaktadır. Sistemde yıldırıma karşı önerilen önlemlerin etkinliğini göstermek için simülasyonlar yapılmıştır. Buradan elde edilen verilere dayanarak, PV sistemleri için etkili yıldırım korumasının tasarımına ilişkin öneriler aşağıdaki gibi belirtilmiştir. [61]

- PV santrali yakınında bir iletim hattına yıldırım düştüğünde PV modülleri yıldırım hasarına maruz kalabilmektedir. Yıldırım sebebiyle DC devrelerde indüklenen aşırı gerilimler sebebiyle PV invertörlerinin arızalanmasına ve bypass diyotlarında bozulmaların olmasına sebep olabilmektedir. PV sisteminin direğe yakınlığı arttıkça sistemde oluşan hasarın da büyüklüğü artmaktadır.
- PV çerçevesi ve tel arasında indüklenen gerilim PV modüllerinde bir flaşa neden olup modüllerde kalıcı hasarlara neden olabilmektedirler.
- PV sistemdeki invertöre kurulan SPD'ler invertörde oluşan aşırı gerilimi kısıtlayabilmektedir.
- Sistemde seri bağlı bypass diyotlarının bağlanması önerilmiştir, bu seri bağlama ile diyotlar bozulmadan korunmuş olacaktır. Böylece devrenin toplam dayanım gerilimi artırılmış olacaktır.

4.2. PV Sistemlerinde FDTD Modellemesi

FDTD yönteminin, literatürde PV sistemlerinde kullanımı ele alınmıştır. Bu yöntem, kodlama kolaylığı, geniş bantlı analiz ile uygulama kolaylığı sağlamaktadır. Ayrıca, toprak tabakalaşması gibi homojen olmayan elektriksel parametreleri işleyebilmektedir. Yöntem kullanılarak analiz edilen modeller ise SPD'ler gibi doğrusal olmayan özelliklerdeki cihazları içerebilmektedir [65].

PV sistemlerinde, Railton modelinden türetilen yeni ince tel modelinin yardımıyla, kesit şekilleri dairesel olmayan PV çerçevelerinde kullanılan yapısal çelik yapı, FDTD analizinde yeterli bir doğrulukla simüle edilebilir [66].

FDTD yönteminin PV sistemlerinde geçici analizleri uygulaması açısından bazı zorluklar vardır. PV sistemleri yapısı gereği birçok eğik hatlar ve yapılar vardır ve FDTD yönteminin bu eğik yapıları işlemesi zordur. Bu nedenle PV sisteminin kurulumunun eğim açısı ve PV sistemlerdeki birçok iletkenin konfigürasyonu ve etkileri göz ardı edilir ve bunlar hesaplama yatay veya dikey ince teller olarak ele alınmaktadır. Ayrıca her paneldeki kablolama göz ardı edilir ve bir PV dizisindeki kablolama iki paralel uzun hatta ele alınarak basitleştirilir. Bu nedenle DC hattındaki meydana gelen akımı değerlendirirken hatalar olmaktadır ve bypass diyotlarındaki gerilimler de değerlendirmeye alınmaz [67].

Dairesel olmayan kesitli ince tel modelleri [72], fazla ayrıştırma olmadan bir FDTD ağında oluşturulabilir. Frekansa bağlı manyetik alan (H) alan dağılımı, doğrusal ferromanyetizma ve iletken kayıpları ele alınmıştır. Bu modelde, tel yapısının yakınındaki elektrik alan ve manyetik alan dağılımları ilk olarak sayısal yöntemlerle değerlendirilmektedir. Daha sonra ise ortalama çizgi/yüzey elektromanyetik alanları hesaplanarak benzersiz düzeltme faktörleri elde edilmektedir. x yönündeki elektromanyetik alanlarının düzeltme faktörleri aşağıda olduğu gibi belirlenir: [68].

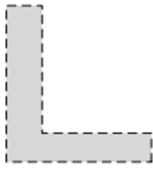
$$\epsilon_x = \langle\langle E_x \rangle\rangle_{yz} / \langle E_x \rangle_x \quad (4.14)$$

$$\mu_x = \langle\langle H_x \rangle\rangle_{yz} / \langle H_x \rangle_x$$

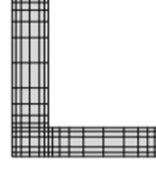
Burada $\langle a \rangle_x$ x yönelimli çizgi boyunca çizgi ortalama alanıdır ve $\langle\langle a \rangle\rangle_{yz}$ y - z yüzeyindeki yüzey ortalama alanıdır. İnce tel modeli, bu faktörlere sahip teller için hücrelerin malzeme parametrelerini değiştirerek oluşturulur. Başlangıç aşamasında ise, E ve H alanlarının düzeltme faktörleri ve iletken kaybı parametreleri, ayrı ayrı belirlenmesi gerekmektedir [68].

Düzeltilme faktörü hesaplamasında ise iki varsayım düşünülür: 1) uzunlamasına uzunluk, kesit boyutlarından çok daha uzundur; 2) iletkenin yakınındaki ve içindeki elektromanyetik alanları yarı statiktir. Elektromanyetik alan dağılımı daha sonra iki boyutlu bir düzlemde incelenebilir [69].

E alanının düzeltme faktörü, bir iletkenin etrafındaki elektrik alanın dağılımından elde edilir. Kesit sınırındaki yük ile belirlenir [69].



(a)Sınır Örgüsü



(b)Kesit Alanının Ağ Haline Getirilmesi

Şekil 4.29. İletken kesitinin ayrıklaştırılması. [72]

Yük hesabı için, iletkenin sınırını bir dizi çizgi parçasına bölünür. Bu şekil 4.29(a)'da gösterilmiştir. Her çizgi parçasındaki yükün eşit olarak dağıtıldığı ve elektrik potansiyeli Φ 'nin sınırdaki her yerde aynı olduğu varsayılarak sınır parçasındaki yük $Q=[q_i]$, yük simülasyon yöntemleri kullanılarak (4.15) numaralı denklemdeki gibi tahmin edilmektedir

$$Q = D^{-1} \cdot U / F_{sum} \cdot q_0 \quad (4.15)$$

Sınırdaki $q_0 = \sum q_i$ dir. Kaynak ve alan segmentleri arasındaki mesafe $D=[D_{i,j}]$ ve $D_{i,j} = 1/2\pi\epsilon_0 L_j \int_{L_i} \int_{L_j} \ln p_{i,j} dl_i dl_j$. $p_{i,j}$ formülü ile belirlenir. L_i ve L_j bu segmentlerin uzunluklarıdır. D^{-1} matrisindeki tüm elemanların toplamı F_{sum} 'dur. U ise $N \times 1$ boyutlarında bir birim vektördür. (x_k, y_k) noktasındaki elektrik alan dağılımı E , (4.15) numaralı denklemde elde edilen yük ile Colomb yasasına göre aşağıdaki gibi ifade edilir [70].

$$E_x = \sum_{j=1}^N \frac{q_j}{2\pi\epsilon_0 L_j} \int_{L_j} \frac{x_j - x_k}{\rho_{j,k}^2} dl \quad (4.16)$$

$$E_y = \sum_{j=1}^N \frac{q_j}{2\pi\epsilon_0 L_j} \int_{L_j} \frac{y_j - y_k}{\rho_{j,k}^2} dl$$

Dört ortogonal yöndeki elektrik alan düzeltme faktörleri, çizgi/yüzey ortalamalı E alanlarının tanımı kullanılarak elde edilir. Bu faktörler frekans-değişmezdir ve asimetrik olabilir [71].

İletkendeki akım dağılımı tarafından yüzey elektrik alanı ve H manyetik alanı düzeltme faktörleri belirlenir. Şekil 4.29(b)'deki gibi iletken dikdörtgenlere bölünür ve her bir taraftaki akım dağılımının tekdüze olduğu varsayılır.

$$I = \frac{Z^{-1}}{Y_{sum}} \cdot I_{total} = P \cdot I_{total}$$

$$Z = R + j\omega L, \quad R_{i,i} = \frac{1}{\sigma \Delta s_i} \quad (4.17)$$

$$L_{i,j} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi \Delta s_j} \int_{\Delta s_j} \ln \frac{1}{\rho_{i,j}} ds_j$$

Δs_j , j th'inci fasetin aslıdır. Z^{-1} matrisindeki tüm elemanların toplamı Y_{sum} 'dur. I_{total} , iletkenin toplam akımıdır. (4.17) numaralı denklemdeki faset akımlarıyla, ince tel yapısının yakınındaki (x_k, y_k) noktasındaki manyetik alan dağılımı H , Biot-Sawart yasasına göre aşağıdaki gibi belirlenir [70].

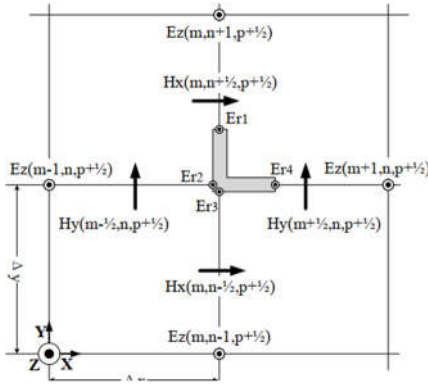
$$H_x(w) = \sum_{j=1}^M \frac{I_j(w)}{2\pi \Delta s_j} \int \int_{\Delta s_j} \frac{y_j - y_k}{\rho_{j,k}^2} dx dy \quad (4.18)$$

$$H_y(w) = \sum_{j=1}^M \frac{I_j(w)}{2\pi \Delta s_j} \int \int_{\Delta s_j} \frac{x_j - x_k}{\rho_{j,k}^2} dx dy$$

H alan düzeltme faktörlerini sayısal olarak hesaplamak için E alan düzeltme faktörlerine benzer şekilde hesaplamalar ile ilerlenmektedir.

Dört ayrı E alan bileşenlerinin olduğu FDTD güncelleme denklemlerinde iletken kaybının etkisi dikkate alınmaktadır [70]. Dikdörtgen kesitli bir iletken, Şekil 4.30'da verildiği gibi, incelendiğinde güncelleme aşamasında çevresel H alan bileşenlerini güncellemek için Er_1 , Er_2 , Er_3 ve Er_4 bileşenleri dikkate alınır. Frekans alanındaki toplam akım cinsinden Er_i ($i = 1 \dots 4$) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$Er_i = I_i \cdot R_{i,i} = P_i \cdot R_{i,i} \cdot I_{total} \quad (4.19)$$



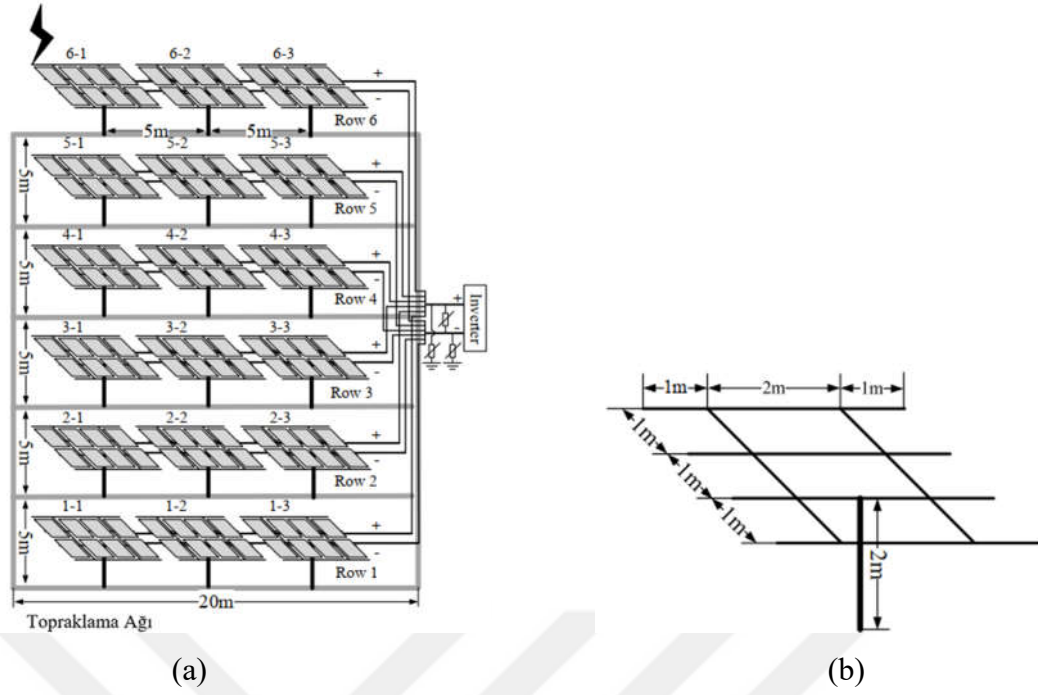
Şekil 4.30. Dikdörtgen kesitli ince tel modeli ve bitişik E ve H alan bileşenleri. [71]

Yüzey elektrik alanı E_r ve H -alan düzeltme faktörleri frekans değişkenlidir. Bu nedenle parametreleri rasyonel fonksiyonlar olarak yaklaşık olarak değerlendirmek için bir vektör uydurma tekniği uygulanır. Bu fonksiyonların zaman alanındaki analitik ifadeleri doğrudan bulunabilir ve ayrık bir evrişim tekniği kullanılarak zaman alanı hesaplamasına gömülür [70].

4.2.1. Çalışma I

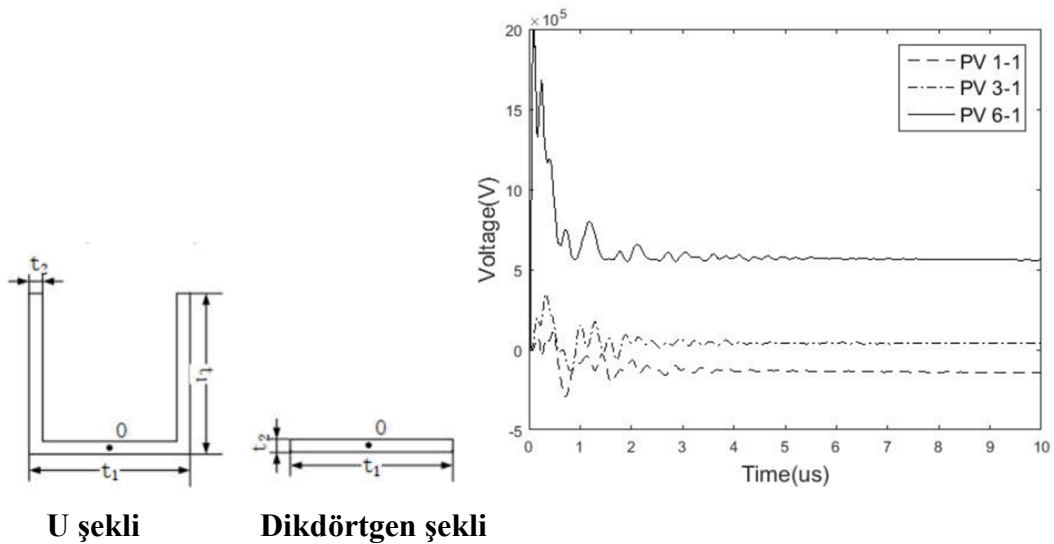
Binghao ve arkadaşları, çalışmada [72], Şekil 4.31(a)'da olduğu gibi yıldırım etkisi altında bir PV sisteminin yapısını vermiştir. PV dizilerindeki PV modüller birbirine DC kablolar ile seri bağlanmıştır. Sistemde SPD'ler, invertörde +/- DC kablolar arasına ve DC kablolar ile toprak arasına koyulmuş olup parça bazında doğrusal yöntem ile aktif akım kaynakları olarak modellenmiştir [72]. Sistemde kelepçe gerilimi 1,5 volt olarak ayarlanmıştır.

Her PV panelinde metal bir çerçeve kullanılmış olup Şekil 4.31(b)'de gösterilmiştir. Bu yapı Şekil 4.32(a)'daki gibi U şeklinde çelik çubuktan yapılmıştır. Sistemin topraklama ağı ise Şekil 4.32(a)'daki gibi dikdörtgen çelik çubuklardan yapılmıştır. Bu çubuklar, frekans bağımlı parametreler kullanılarak FDTD simülasyonunda kayıplı tel yapıları olarak modellenebilmektedir [73].



Şekil 4.31.(a) PV sisteminin yapılandırması (b)Tek bir PV çerçevesinin yapılandırması. [72]

Simülasyonda, Şekil 4.32(b)'de, 6-1, 3-1, 1-1 numaralı PV çerçevelerinde çerçeve ve – DC kablo arasında indüklenen gerilimi göstermektedir ve 6-1 numaralı PV çerçevesinde, yıldırım dönüş darbesi akımının yükselen kenarı sırasında önemli bir gerilim darbesi gözlemlenmiştir.



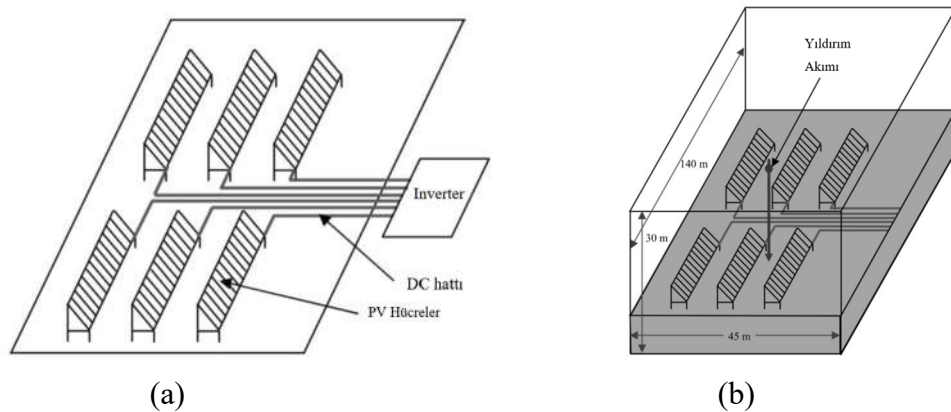
Şekil 4.32.(a)U-şekilli ve dikdörtgen çelik çubukların kesitleri(b) PV çerçeveleri ile 6-1, 3-1 ve 1-1 numaralı PV çerçevelerindeki negatif DC kabloları arasındaki yıldırım dalgalanma gerilimleri. [72]

Bu çalışmada, doğrudan yıldırım çarpması altında PV sistemde FDTD yöntemi kullanılarak yıldırım dalgalanması ve sistemde DC kabloları ve metal çerçeve arasında indüklenen gerilim analiz edilmiştir. Buna göre, PV çerçevesine doğrudan bir yıldırım çarpması sonucu sistemde oluşan aşırı gerilimler DC kablolarda yalıtım arızasına neden olabileceği gözlemlenmiştir [73].

4.2.2. Çalışma II

Makalede [78], Raju ve arkadaşları, güneş enerjisi üretim sisteminin DC hatlarında yıldırım sebebi ile indüklenen aşırı gerilimler incelemiştir. Sistemde yıldırımın olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla kullanılan ve sistem için uygun olan LPS'nin sistemde indüklenen aşırı gerilimleri azaltmaktadır. Ayrıca DC hatlarında meydana gelen aşırı gerilimi azaltmak için SPD önerilmiştir. Çalışmada önerilen ve indüklenen aşırı gerilimleri azaltmak amacıyla kullanılan yöntem performansı FDTD yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir [73].

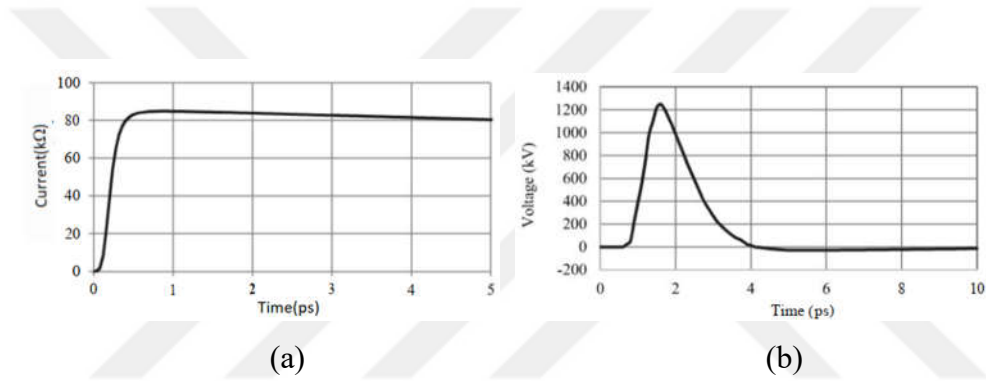
Çalışmada, Her bir PV panel gücü 250 W olan 600 adet PV paneller kullanılarak 150 kW kapasiteli büyük boyutlu güneş enerji sistemi kullanılmıştır. Şekil 4.33(a)'da kullanılan sistemin genel diyagramı gösterilmiştir [78].



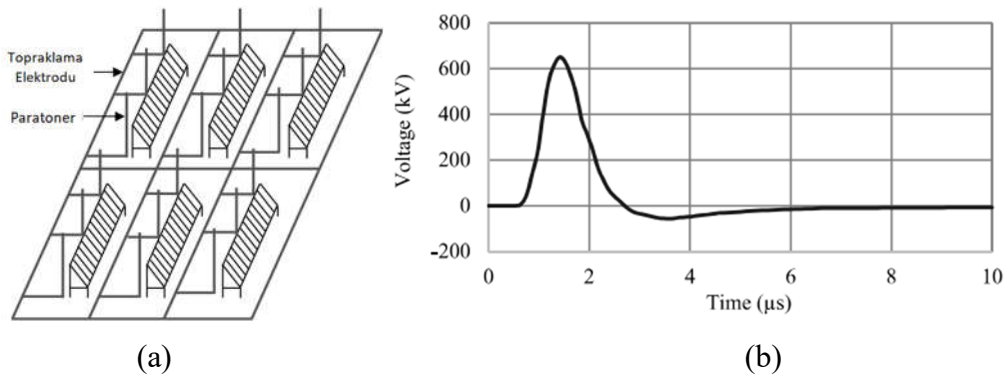
Şekil 4.33.(a) Modellenen PV üretim sisteminin düzeni. (b) PV üretim sisteminin FDTD simülasyon modeli. [78]

Bu çalışmada FDTD yöntemini kullanan simülasyon yazılımı VSTL kullanılmıştır. PV sistemi simülasyon modeli Şekil 4.33(b)'deki gibi gösterilmiştir.

Yıldırım sebebiyle meydana gelen aşırı gerilimlerin analizi Şekil 4.34(a)'da gösterilmiştir. Analiz amacı ile Şekil 4.33(b)'de gösterilen çarpma noktalarına yıldırım düşürülmüştür. Önceki çalışmalarda LPS'siz sistemde LPS olan sisteme göre daha fazla aşırı gerilimler oluştuğu gözlenmiştir [74]. Bu çalışmada ise izole LPS dikkate alınarak çalışma daha derinleştirilmiştir. Şekil 4.34(b)'de ise PV sisteminde yıldırımın çarptığı noktaya en yakın DC hattında oluşan gerilimin dalga formu gösterilmiştir. Görüleceği üzere, indüklenen gerilim çarpma noktasının en yakınındaki DC hattında daha fazladır [74]. PV sisteminde LPS'nin önerilen lokasyonu Şekil 4.35(a)'da gösterilmiş olup LPS'si olan sistemdeki indüklenen gerilim Şekil 4.35(b)'de gösterilmiştir.

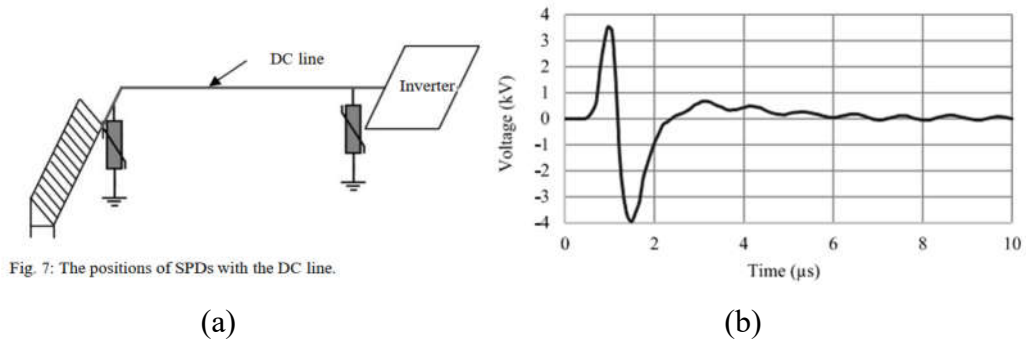


Şekil 4.34.(a) Yıldırım test akımı dalga formu. (b) DC hattında yıldırım kaynaklı gerilim. [78]



Şekil 4.35.(a) PV üretim sisteminde LPS'nin önerilen konumu.(b) LPS kurulumundan sonra DC hattında indüklenen gerilim.[78]

PV sistemine LPS kurulumundan sonra sistemde indüklenen aşırı gerilimde yaklaşık yarı yarıya kadar azalma olmuştur. Fakat bu oran dahi hala sistem için çok yüksektir ve tehlike oluşturmaktadır. Bu nedenle bu gerilimi daha da azaltabilmek için sisteme SPD eklenmiştir. Şekil 4.36(a)'da sistemde kullanılan SPD'lerin konumları verilmiştir. SPD'lerin PV panelinin yakınına ve invertörün yakınına kurulması indüklenen gerilimin daha az olması yönünde olumlu etki sağlamaktadır [74]. Şekil 4.36(b)'de, SPD kurulduktan sonra DC hattında indüklenen gerilim dalga formu gösterilmiştir. LPS ve SPD'nin olmadığı sistem ve eklendikten sonraki durumlarda indüklenen gerilim değerleri Tablo 4.5'de gösterilmiştir. Bu makalede, sistemde en kötü durumun oluştuğu ve elektromanyetik indüksiyon için oluşabilecek en kötü senaryo ele alınmış olup çok yüksek bir ön cepheye sahip ve yükselme süresi 0,25 ps olan hızlı bir yıldırım akımı dikkate alınmıştır. Toprak direnci ise 50 Qm olarak kabul edilir ve toprak direnci daha yüksek olduğunda indüklenen gerilim de daha yüksek olacaktır. Fakat SPD'nin kullanılması da toprak direncinin sistem üzerindeki etkisini aza indirecektir.



Şekil 4.36.(a) SPD'lerin DC hattı ile pozisyonları.(b) SPD montajı sonrası DC hattında yıldırım kaynaklı gerilim.[78]

Tablo 4.5. DC hattında indüklenen gerilimler.[78]

No	Durum	İndüklenen Gerilim Tepe Değeri (kV)
1	LPS ve SPD yok	1250
2	LPS var SPD yok	650
3	LPS ve SPD var	4

Bu makalede çalışma sonucu bulgular, sürdürülebilir büyük ölçekli bir PV sisteminin güvenli bir şekilde işleyebilmeye devam edebilmesi için uygun bir yıldırımdan koruma sisteminin geliştirilmesi için yardımcı olabilir. Çalışmanın sonuçları incelendiğinde,

sistemde kullanılan izole LPS'nin ve SPD'nin büyük ölçüde fayda sağladığı görülmüştür [78].

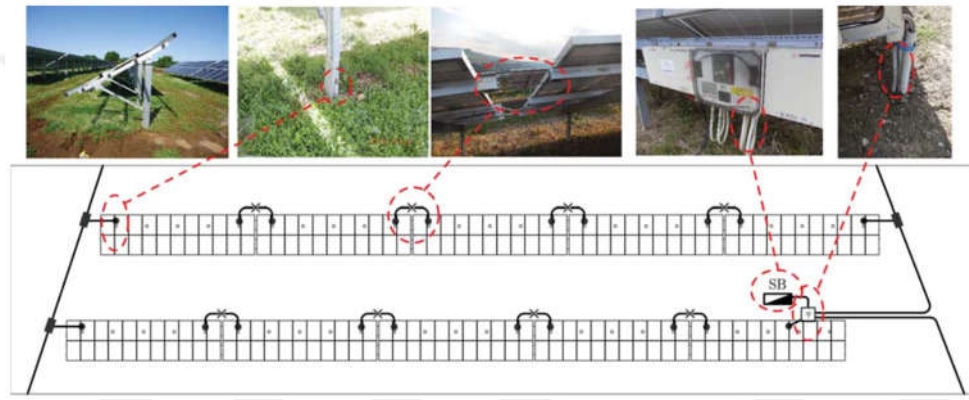
4.3. PV Sistemlerde MOM Modellemesi

MOM genellikle, PV sistemlerinin topraklama yapılarının modellenmesinde kullanılan sayısal yöntemlerden biridir. PV sisteminin topraklama şebekesindeki akımı [84] veya gerilim dağılımını [88] analiz etmek için yaygın olarak kullanılır. Özellikle ince iletken yapıların modellenmesinde; hız, doğruluk, yakınsama başarısı ve çok yönlülüğü sayesinde öne çıkmaktadır. MoM, çözümleme sırasında yalnızca iletken bileşenleri ağ yapılarına dönüştürürken, FDTD ve FEM gibi yöntemler tüm alanın ağ yapısına çevrilmesini gerektirir. Bu özelliği sayesinde, karmaşık kablolama detaylarına sahip PV sistemleri için MoM oldukça elverişli bir çözüm yöntemi sunar. Ancak MoM'un temel sınırlamalarından biri, frekans alanında çalışması nedeniyle zaman alanı çözümlerini doğrudan sağlayamamasıdır. Bu durumda zaman alanı analizine geçmek için ters Fourier dönüşümü gibi ek işlemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca doğrusal olmayan bileşenlerin çoğunlukla zaman alanında modellenmesi gerektiğinden, bu tür elemanların MoM ile birlikte kullanımı zorluk yaratabilir. Dolayısıyla MoM, PV sistemlerindeki tüm geçici rejimlerin değil, özellikle iletken yapılar üzerindeki geçişlerin analizinde tercih edilmektedir [82].

4.3.1. Çalışma I

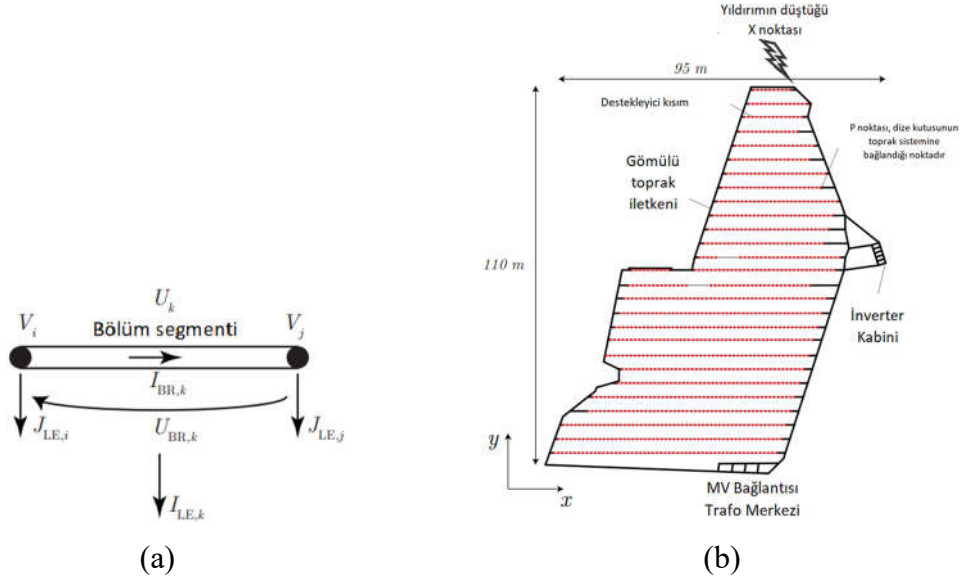
Rodolfo ve arkadaşları [88], Büyük ölçekli PV santralının topraklama sistemini temsil etmek amacıyla modelleme yöntemi kullanmıştır. Makalede incelenen çalışmanın içeriği, santralde meydana gelen doğrudan yıldırım çarpmalarının etkisi altında sistemin modellenmesine ve sistemin elektronik ve elektrik ekipmanlarında oluşan arızaların ve sistemde oluşan aşırı gerilimlerin araştırılmasına dayanmaktadır [82]. Çalışmanın amacı, sistemin yıldırım elektromanyetik darbesine karşı korunduğunu ve oluşan adım gerilimlerine karşı koruma sisteminin, canlıların ve etrafın zarar görmesini engellediğini göstermektir.

Topraklama Sisteminin Modellenmesinde, topraklama sisteminin geçici rejimdeki davranışını modelleyebilmek amacıyla, devre teorisi ile Moment Yöntemi'nin(MOM) birleşiminden oluşan hibrit bir yöntem tercih edilmiştir [83]. Bu yaklaşım, sistemdeki dirençli, endüktif ve kapasitif bağlantıları hassas bir şekilde dikkate alabilmektedir. Topraklama sistemi Şekil 4.37’de gösterilmiştir. Modelleme kapsamında, topraklama şebekesini oluşturan iletkenlerin, her biri karmaşık bir iletkenlik ile tanımlanan N_S adet düzlemsel toprak katmanı içine tamamen gömülü olduğu varsayılmıştır. Söz konusu karmaşık iletkenlik, $\sigma_i' = \sigma_i + j\omega\epsilon_0\epsilon_{r,i}$ ($i = 1, \dots, N_S$) formülüyle ifade edilmektedir. Bu çalışmada, topraktaki doğrusal olmayan etkiler ihmal edilmiş ve tüm toprak katmanlarının vakum geçirgenliği (μ_0) değerine sahip olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4.37. Tipik bir zemine monteli PV sisteminin bir bölümünün gösterimi; topraklama düzenlemeleri ve fotoğraflardaki ayrıntılar.[88]

Topraklama sistemi, her biri iki düğüm arasında yönlendirilmiş bir bağlantı olarak değerlendirilebilecek N_B adet segmente ayrılmıştır. Sistemde toplam N_N adet düğüm bulunduğu varsayılmaktadır. Her bir iletken k , bağlı olduğu iki terminal düğüm arasında sabit bir uzunlamasına akım $I_{LO,k}$ taşımaktadır. Düğümler üzerindeki skaler elektrik potansiyelleri V_i , referans olarak alınan sonsuz uzaklıktaki sıfır potansiyelli toprak düzlemine göre tanımlanmıştır. Bu potansiyellerin tanımlanması, yüksek frekanslarda elektromanyetik bağlaşım ve iletken iç empedansındaki artış nedeniyle ihmal edilemeyecek düzeyde olan gerilim düşümlerini göz önünde bulundurmaya mümkün kılmaktadır [82]. Ayrıca, her bir dal, çevresindeki toprağa doğru sabit bir sızıntı akımı $I_{LE,k}$ yaymaktadır. Topraklama sistemi, M noktasından sisteme enjekte edilen sinüzoidal biçimdeki tek frekanslı akım kaynakları F_m aracılığıyla uyarılmaktadır. Ayırıklaştırma işleminin genel şematik gösterimi Şekil 4.38(a)'da sunulmuştur.



Şekil 4.38.(a) Topraklama sisteminin tipik bir dalının şematik gösterimi. (b) PV topraklama sisteminin şematik gösterimi.[88]

Segment uzunluğu, maksimum dalga boyu λ_{max} 'a kıyasla oldukça küçük olduğunda, k-nolu segment üzerindeki elektrik potansiyeli U_k 'nin sabit kabul edilebileceği varsayılır [84]. Bu durumda, söz konusu potansiyel, segmentin bağlı olduğu iki terminal düğümdeki V_i ve V_j potansiyellerinin ortalamasına eşit olarak alınabilir. Bu varsayıma dayanarak, tüm segmentlerin ortalama skaler elektrik potansiyellerini içeren $N_B \times I$ boyutundaki sütun vektörü U ile tüm düğümlere ait potansiyelleri temsil eden $N_N \times I$ boyutundaki sütun vektörü V_n arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$U = \bar{K} \cdot V \quad (4.20)$$

K ise, elemanları $N_B \times N_N$ boyutlarında olan bir matristir.

$$k_{i,j} = \begin{cases} 1/2, & \text{eğer } i \text{ dalı } j \text{ düğümünde meydana gelirse} \\ 0, & \text{eğer } i \text{ dalı } j \text{ düğümüne bağlı değilse} \end{cases} \quad (4.21)$$

Tüm dallardaki sızıntı akımları ile ortalama skaler elektrik potansiyelleri, tam dalga elektromanyetik alan çözümüne dayanan Galerkin tabanlı Moment Yöntemi (MoM) [88] kullanılarak elde edilen bir matris denklemi ile ilişkilendirilmektedir.

$$I_{LE} = \bar{Y}_{GC} \cdot U \quad (4.22)$$

Formülde olan I_{LE} sızıntı akımlarının $N_{BX}I$ sütun vektörünü oluşturmaktadır. Y_{GC} , her bir dal segmentleri arasında bulunan kapasitif ve iletken bağlantıları hesaba katan $N_{BX}N_B$ kare kabul matrisidir. Elektriksel skaler Green fonksiyonlarının Sommerfeld integralleri kullanılarak ise tabakalı ortamlardaki spektral alan elde edilmektedir [85].

Düğümlerdeki yoğunlaşmış akımlar (J_{LE}) ve dallar arasında eşit dağılmış olarak dikkate alınan I_{LE} arasındaki ilişkiyi tanımlamak için, her bir kaçak akım $I_{LE,k}$, terminal düğümlerinde yoğunlaşan iki eşit katkıya ($I_{LE,k}/2$) bölünmüştür ve bağıntı aşağıda verilmiştir [84]. J_{LE} ise $N_N \times I$ sütun vektörüdür [86].

$$J_{LE} = \bar{K}^t \cdot I_{LE} \quad (4.23)$$

Tüm bu varsayımlar göz önünde bulundurularak eşdeğer devre geleneksel düğüm analizi sonucu aşağıdaki gibi bir denklem elde edilmiştir [82].

$$F - J_{LE} = (\bar{A} \cdot \bar{Y}_{RL} \cdot \bar{A}^t) \cdot V \quad (4.24)$$

Y_{RL} , dallar arasındaki manyetik bağlantıyı ve dalların iç empedansını hesaba katan $N_{BX}N_B$ bir kare kabul matrisidir. A ise $N_N \times N_B$ dal-düğüm olay matrisi olup MOM yöntemi sonucu elde edilmiştir.

$$a_{i,j} = \begin{cases} +1, & \text{eğer } j \text{ dalı } i \text{ düğümünden yönlendiriliyorsa} \\ -1, & \text{eğer } j \text{ dalı } i \text{ düğümüne yönlendirilirse} \\ 0, & \text{eğer } j \text{ dalı } i \text{ düğümünde değilse} \end{cases} \quad (4.25)$$

F ise düğümlerdeki etkilenmiş akımların $N_N \times I$ sütun vektörüdür ve şebekeyi enerjilendirmek için kullanılmaktadır.

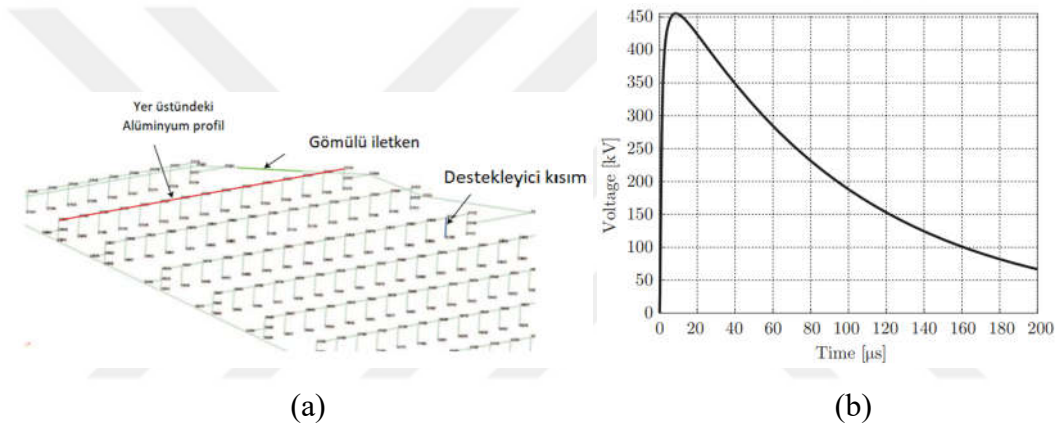
(4.20)-(4.22)-(4.23)'ü (4.24) numaralı denklemler kullanılarak (4.26) numaralı son denklem elde edilir:

$$F = (\bar{K}^t \cdot \bar{Y}_{GC} \cdot \bar{K} + \bar{A} \cdot \bar{Y}_{RL} \cdot \bar{A}^t) \cdot V \quad (4.26)$$

Diğer tüm istenen sızıntı akımları, dal akımları, zemin potansiyeli gibi ilgili değerler düğüm gerilimleri elde edildikten sonra doğrudan hesaplanabilmektedir [87].

Çalışmada 2,08 MW gücündeki PV santralinde kullanılan topraklama sistemi incelenmiştir. PV sisteminin genel saha görüntüsü Şekil 4.38(b)'de verilmiştir.

Sistemin topraklama sistemi 0,8 m derinliğe gömülmüş 95 mm²'lik çıplak bakır iletkenlerden oluşmaktadır. Şekil 4.37'de gösterildiği gibi her PV panelindeki metal direkler, bu metal çubuk aracılığı ile doğrudan sistemin topraklama sistemine bağlanmaktadır. Sistemdeki tüm metal yapılar alında topraklama sisteminin bir parçasıdır. Şekil 4.39(a)'da ise model gösterilmiştir.

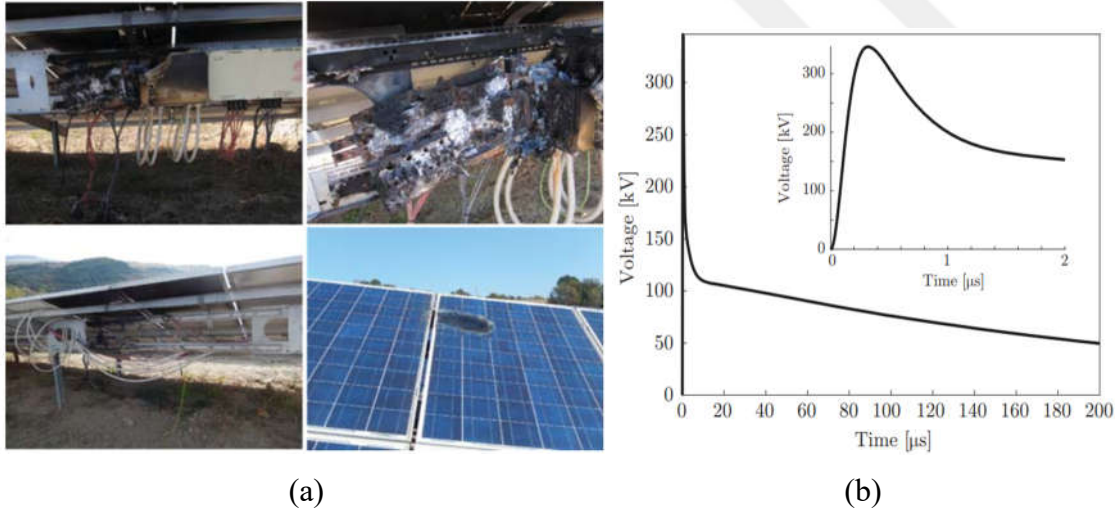


Şekil 4.39. (a)Model için kullanılan ağı 3 boyutlu görünümü.(b) X noktasındaki ilk darbe altında $\rho_g = 300 \Omega m$ dirençli bir toprak için P noktasında hesaplanan sonuçlar. [88]

Çalışmanın sonuçları hem topraklama sisteminin etkinliğini göstermiş hem de muhtemel tehlikeleri araştırmıştır. Bunun için sabit durum simülasyonları ve geçici simülasyonlar kullanılmıştır. Geçici simülasyonlar yıldırımla ilgili olup ilk ve sonraki darbeleri dikkate almaktadır. Sabit durum simülasyonları ise tek fazdan toprağa aktarılan arıza akımları ile ilgilidir.

Topraklama sistemi modelinin etkinliğini göstermek [83] ve olası tehlikeleri araştırmak için hem sabit durum hem de geçici simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sabit durum simülasyonları tek fazdan toprağa arıza akımlarıyla, geçici simülasyonlar ise ilk ve sonraki darbeleri dikkate alarak doğrudan yıldırımla ilgilidir.

PV sistemlerinin yıldırımdan etkileri önceki bölümlerde de detaylı olarak incelenmiştir. Bu makalede ise yıldırımın doğrudan çarpmasının darbelerin PV panellere gelmesine rağmen, metal çerçevelere ya da kalkan direklerine gelen darbeler sonucunda topraklama sistemine enerji verdiği ve ekipmanlara büyük ölçüde zarar veren ciddi aşırı gerilimlere neden olduğuna değinilmiştir ve incelenmiştir. Yıldırım darbesi topraklama sistemine doğrudan geldiği duruma ilişkin oluşan geçici toprak potansiyel artışı PV sistemi montaj sisteminin metal yapıları ve topraklanmış şalt panolarını da etkilemektedir. Buna benzer hasarların meydana gelme ihtimalini incelemek ve araştırmak amacıyla Şekil 4.38(b)'deki gibi yıldırımın ilk darbesi modellenmiştir. Bu darbenin X konumunda olduğu düşünülmüştür. Dizelerin toprağa bağlantısının olduğu dize kutusu P noktasındadır. Bu noktadaki geçici toprak potansiyelleri hesaplanmış olup sonuçları Şekil 4.39(b)'de gösterilmiştir. Simulasyonda SPD'ler modellenmemiş ve hesaba katılmamıştır. Sonuçlardan da görüleceği üzere geçici toprak potansiyeli 400 kV tepe değerlerinin çok üstünde olup hassas ekipmanlara zarar verebileceği açıktır. Şekil 4.40(a)'da ise çalışmada dikkate alınmış olan PV tesisinde yıldırımın PV paneline çarpması sonucu verdiği hasarları ve oluşan arıza akımı sebebi ile yanan LV şalt panosundaki hasarlar gösterilmiştir [88].



Şekil 4.40.(a) P noktasındaki topraklama sistemine doğrudan bağlı olan dize kutusunda yangın ve güç dalgalanması hasarları.(b) X noktasındaki sonraki bir darbe altında $\rho_g = 300 \Omega m$ dirençli bir toprak için P noktasında hesaplanan sonuçlar. Ek parça aşırı gerilimin önünü göstermektedir.[88]

X noktasında doğrudan bir yıldırım çarpması durumunda P noktasındaki geçici potansiyel artışı sonraki darbe modellendiğinde gösterilmektedir. Bu Şekil 4.40(b)'de

gösterilmiştir. SPD'ler dikkate alınmamıştır. Önceki durumdaki tepe değerine göre bu durumdaki tepe değeri daha düşüktür fakat geçiş çok hızlıdır.

Bu makalede, büyük bir PV santralinde yıldırımın geçici etkileri altında topraklama sisteminin davranışı simüle edilmiş olup bunun için bir hibrit model kullanılmıştır. Geçici etkiler altında sistemdeki elektrik-elektronik ekipmanlara zarar verecek düzeydeki aşırı gerilimler incelenmiş ve toprak potansiyel artışları hesaplanmıştır [88].

4.4. PEEC, FDTD, MOM yöntemlerinin birlikte kullanıldığı Hibrit Sistemler

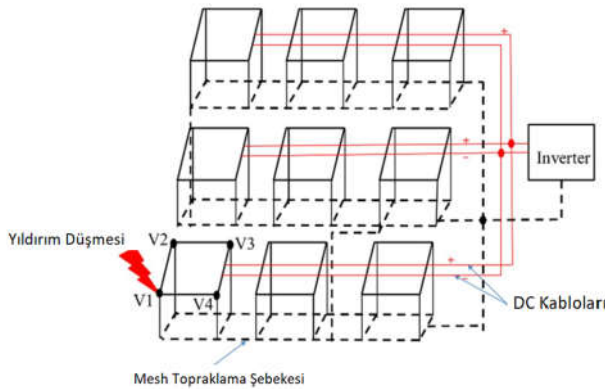
Bu çalışmada, üç model detaylı olarak anlatılmış olup önceki çalışmalarda bu yöntemlerin PV sistemlerinin yıldırımın geçici etkileri altında modellenmesi için kullanımı geniş bir anlatım ile modelleme detayları ve sonuçları ile aktarılmıştır. Literatürdeki bazı çalışmalar ise PV sistemlerin yıldırımın geçici etkilerindeki davranışlarını incelerken, modellerin birlikte kullanıldığı Hibrit model yaklaşımını kullanmıştır. Bazı çalışmalarda bu Hibrit model yaklaşımı daha iyi sonuçlar almak için kullanılırken bazı çalışmalarda modellemeler arasında karşılaştırma yapmıştır. Hibrit model yaklaşımını kullanan çalışmalardan birkaçının detaylı anlatımı bu çalışmanın devamında verilmiştir

4.4.1. Çalışma I

Çalışmada [92], Hetita ve arkadaşları, yıldırımın geçici etkilerine maruz kaldığında PV dizilerinin geçici davranışlarını incelemek ve sonuçları göz önünde bulundurarak bir yıldırımdan korunma sisteminin gerekliliğini vurgulamıştır. Modellemede FDTD modelleme yaklaşımı kullanılmış olup, yıldırım altında indüklenen geçici aşırı gerilimler montaj sistemindeki çeşitli noktalarında hesaplanmıştır. Ayrıca FDTD yönteminin yürütme süresinin iyileştirilmesi ve fazla güçlü olmayan donanım yapılarında kullanmaya uygun olması için değişken hücre boyutu yaklaşımı kullanılmıştır. Bu göz önünde bulundurularak montaj sisteminde daha küçük hücre boyutları seçilerek topraklama sisteminde ise daha büyük hücre boyutları seçilmiştir. Çalışmada, PEEC yöntemi de kullanılmış ve PV montaj sisteminin dört köşe

noktasındaki indüklenen aşırı gerilim sonuçları FDTD yöntemden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

PV sisteminin modellenmesinde, FDTD yöntemi kullanılmıştır ve PV modülünün montaj sistemindeki V1, V2, V3, V4 olmak üzere dört ayrı noktada yıldırım sebebiyle oluşan geçici aşırı gerilimler hesaplanmış ve incelenmiştir. PV sisteminin montaj yapıları, 1 m derinliğe gömülü olan 95 mm²'lik bakır tellerden oluşan sistemin topraklama yapısına bağlanmaktadır. Kullanılan FDTD modelinde, modülleri bağlayan DC kablolar, PV montaj sistemi, metal çerçeveler gibi sistemi oluşturan tüm metal parçalar dikkate alınmıştır. Bu makalede önerilen tekdüze olmayan hücre boyutlandırması yaklaşımı ile simülasyonun yürütme süresindeki azalma sayesinde birçok araştırmacı karmaşık sistemleri dahi inceleme şansı yakalayacaktır [90]. Simülasyonun yürütme süresi, tekdüze hücre boyutu durumunda 10 saat süre alırken tekdüze olmayan hücre boyutlandırması sonucu bu süre 50 dakikaya düşebilmektedir.



Şekil 4.41. Büyük ölçekli bir fotovoltaik sistemin şematik diyagramı [92].

Makalenin sonuçları incelendiğinde;

Şekil 4.41'de gösterildiği gibi PV sistemi ve topraklama sistemi FDTD yöntemi kullanılarak modellenmiştir [90]. Yöntemde, PV sistem ve topraklama sistemi uzayda d_x , d_y , d_z kenarlı kübik hücrelere bölünmüştür. X, y, z yönlerindeki hücre sayıları eşit olmayan şekilde bölünerek yazılımın yürütme süresi yaklaşık bir saatten yarım saate düşürülmüştür. FDTD yöntemi analizini yürütmek için MATLAB yazılım platformu kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan ve modellemede dikkate alınan ve incelenen yapıları da göz önünde bulundurarak FDTD yönteminin ve PEEC yöntemleri arasındaki simülasyon

sonuçları denklem (3.55) dikkate alınarak hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarındaki fark %D olarak belirtilmiştir [92].

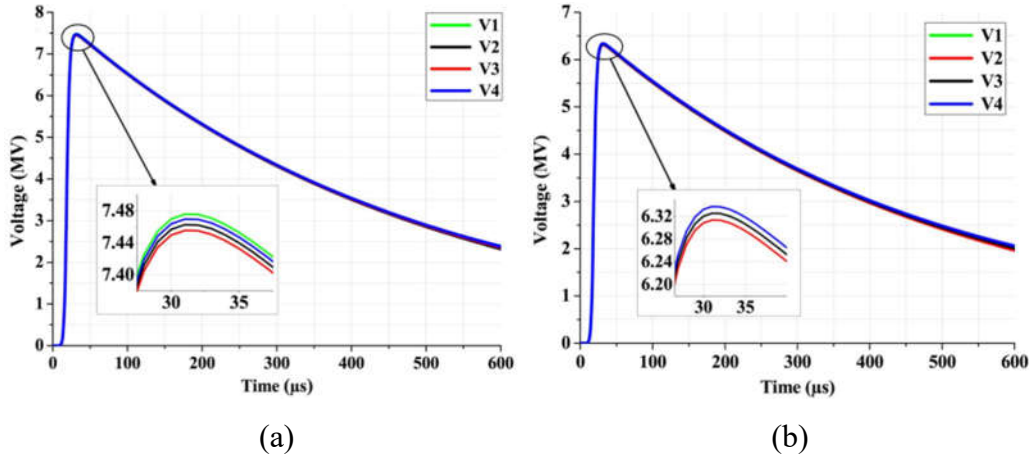
$$\%D = \frac{FDTD\ value - PEEC\ value}{PEEC\ value} \times 100 \quad (3.55)$$

Bu çalışmada analiz sonuçları değerlendirilirken Şekil 4.41'deki montaj sistemindeki dört noktaya odaklanılmış olup her zaman diliminde elektrik ve manyetik alan dağılımı hesaplanmıştır ve tüm sistem noktalarında güncellenmiştir. Dört noktadaki gerilim değeri, aşağıdaki etkiler dikkate alınarak hesaplanır ve sonuçları incelenmiştir.

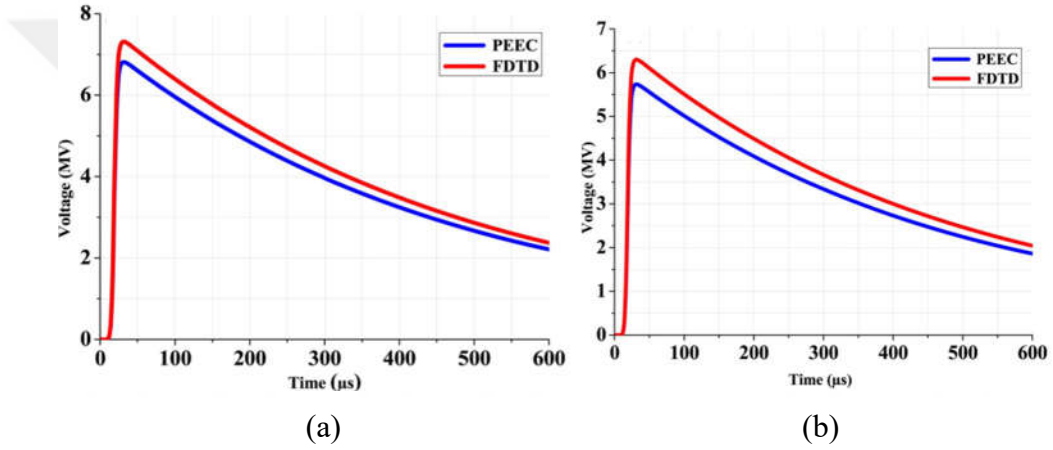
- **Çarpma noktasını değiştirmenin etkisi**

Şekil 4.41'deki dört nokta arası mesafeler 1-4 noktaları ve 2-3 noktaları arası mesafe 3 m, 1-2 ve 3-4 arası mesafeler ise 4 m'dir. Şekil 4.42(a,b)'de ise yıldırımın düşme noktasına göre bu noktalarda indüklenen aşırı gerilim değerleri verilmiştir. Şekil 4.42(a)'daki sonuçlar V_1 noktasına yıldırım düştüğünde indüklenen aşırı gerilimleri göstermekteyken Şekil 4.42(b) ise V_4 noktasına yıldırım düştüğü durumdaki sonuçları göstermektedir. Sonuçlardan da anlaşılabileceği üzere çarpma noktalarında meydana gelen yüksek elektrik ve manyetik alanların etkisi nedeniyle en yüksek bu noktalarda gerilim oluşmaktadır ve çarpma noktasından topraklama sistemine doğru uzaklaştıkça aşırı gerilim değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durumu Maxwell teorisi ile açıklanabilmektedir. Teoriye göre, elektrik ve manyetik alanların uzay-zaman alanlarında hareket eden dalgalar halinde yayılması ve bu alanların kaynak noktasından (çarpma noktasından) uzaklaştıkça zayıflaması ilkesini temel almaktadır [77].

1 ve 4 noktalarına yıldırım düşme durumlarına FDTD ve PEEC modelleme sonuçları karşılaştırıldığında Şekil 4.45(a,b)'deki sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma sonuçları, montaj sistemi dikkate alındığında FDTD yöntemi kullanmaya yönlendirmektedir.



Şekil 4.42. Yıldırım düştüğünde (V1, V2, V3 ve V4) köşe noktalarındaki geçici aşırı gerilimler (a) 1 noktaya düştüğünde (b)4 noktaya düştüğünde.[92]

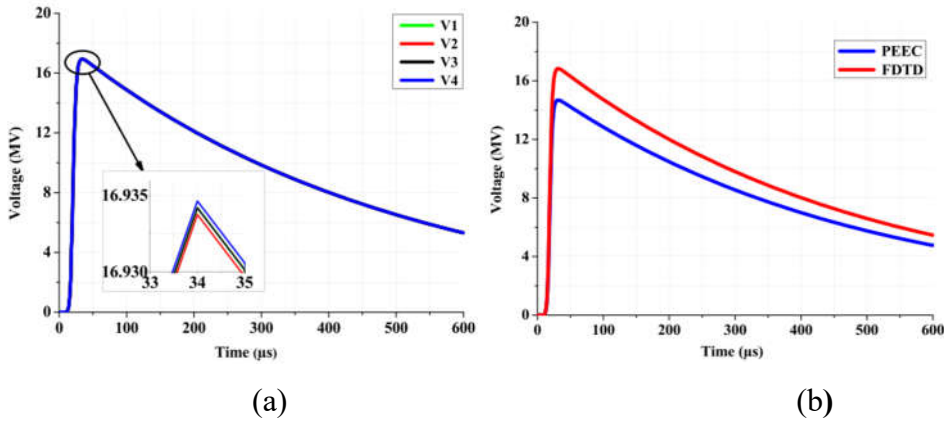


Şekil 4.43. Yıldırım 1 noktaya düştüğünde FDTD ve PEEC yöntemlerine göre 1 noktasındaki indüklenen gerilimler.(a) 1. nokta kil toprakla ve (b) 4. nokta kil toprakla.[92]

- **Toprak direncinin değişmesinin etkisi**

Çarpma noktasının 1 noktası olduğu durum incelenmiştir. Şekil 4.44(a)'da gösterildiği üzere toprak öz direnci, öz direnci küçük olan kil toprağının, öz direnci yüksek olan killi-kumlu toprağıyla değiştirilerek artırılmıştır. Bu durumda, toprak öz direncinin artması ile daha yüksek bir toprak direnci oluşmuş olacaktır ve bu durumda geçici aşırı gerilim değerlerinde artış olduğu gözlemlenmektedir. Sonuçlara göre, PV sistemlerdeki yıldırım çarpması sonucu meydana gelen aşırı gerilimlerdeki büyük etkisine dayanarak küçük öz dirençli toprak seçilmelidir sonucuna varılmıştır [75].

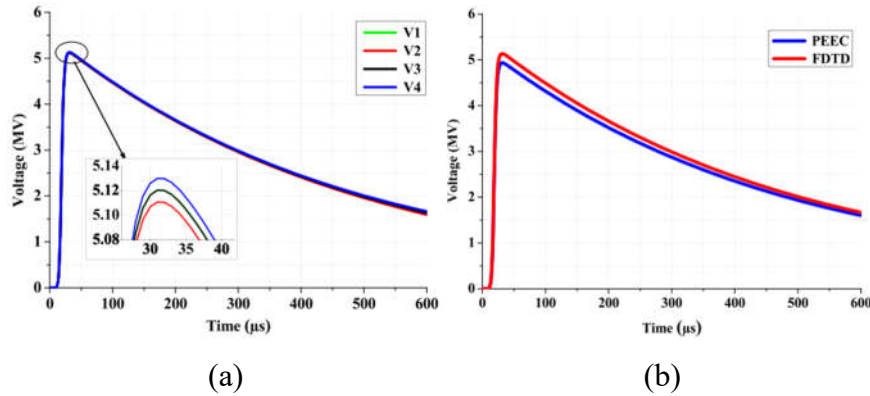
Şekil 4.44(b) ise, killi-kumlu toprak kullanıldığındaki FDTD ve PEEC modellemeleri kullanılarak elde edilen sonuçları göstermektedir.



Şekil 4.44.(a) 1. Noktada yıldırım düşmesi sonucu killi kumlu topraklarda toprak özdirenci arttığında oluşan geçici aşırı gerilimler görülmektedir. (b) Killi kum zeminlerde FDTD ve PEEC yöntemleri için nokta 1 gerilimi.[92]

• Metal çerçeve varlığının etkisi

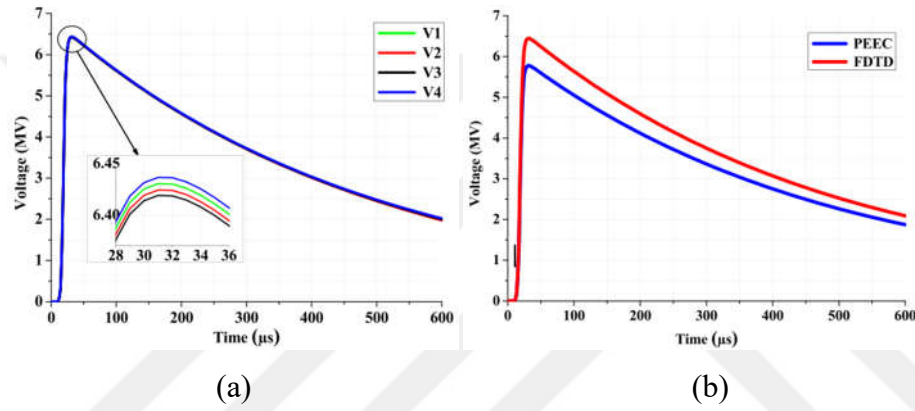
Yıldırımın çarpma noktası 1 olduğu durum dikkate alınmıştır. PV modülleri metal çerçeveli ve çerçevesiz olarak üretilebilmektedir. Bu çerçeveler özellikle taşıma esnasında modülleri korumaktadır [91]. Çalışmada metal çerçevenin kullanılmamasının aşırı gerilimler üzerindeki etkisinin sonuçları Şekil 4.45(a)'da verilmiş ve incelenmiştir. Çalışmada, metal çerçevenin olmasının sistemin toplam direncinde azalmaya sebep olduğu için sistemde aşırı gerilimlerin daha da artmasına sebep olduğuna değinilmiştir. FDTD ve PEEC arasındaki karşılaştırma da Şekil 4.45(b)'de verilmiştir.



Şekil 4.45.(a) Metal çerçevenin olmaması durumunda oluşan geçici aşırı gerilimler. (b) Çerçevesiz PV modülü ile FDTD ve PEEC yöntemleri için Nokta 1'deki gerilim.[92]

- **Topraklanan bacağın değiştirilmesinin etkisi**

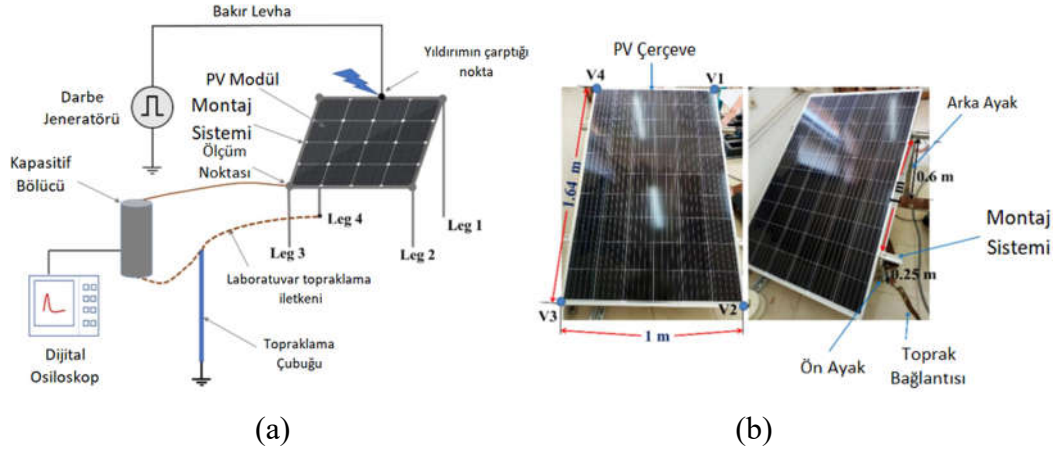
Sistemin topraklama sistemine bağlandığı bacağın değişmesi yıldırım kaynaklı geçici aşırı gerilimler üzerindeki etkili olmaktadır. Şekil 4.46(a)'da sistemin topraklanan bacağı 1. bacadan 2. Bacağa değiştirilmesinin indüklenen gerilim üzerindeki etkisini göstermiştir. Topraklama sistemine bağlı bacağın değişmesi, farklı noktalardaki geçici aşırı gerilimlerde bir değişikliğe neden olur . Sonuçlara göre, topraklanmış bacağın, topraklama sistemine doğrudan bağlanması sebebiyle daha düşük bir geçici gerilime sahip olduğunu ve bu durumunda akım yolunun empedansını diğer bacaklardan daha düşük hale getirdiğini göstermektedir. Şekil 4.46(b)'de ise FDTD ve PEEC yöntemlerinin karşılaştırması verilmiştir [92].



Şekil 4.46. (a)Topraklanmış bacağın değişimi altında geçici aşırı gerilimler.(b)Topraklama ayağının değişmesiyle FDTD ve PEEC yöntemleri için 1 noktasındaki gerilim değerleri.[92]

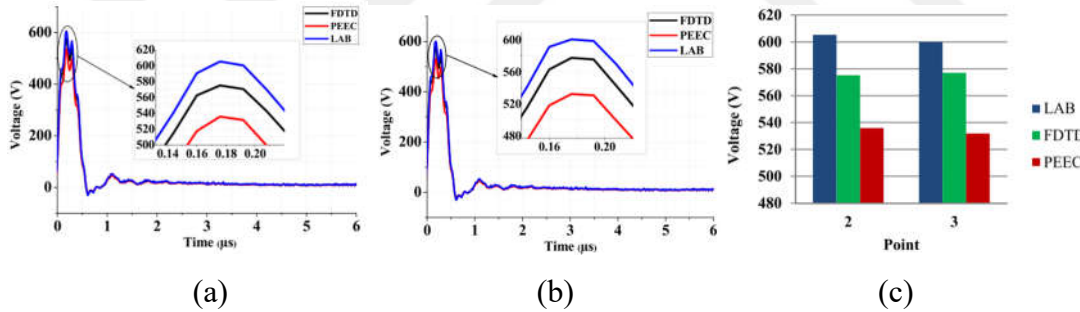
Çalışmada elde edilen tüm sonuçlar için FDTD ve PEEC modelleme yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. İki yöntem arasındaki farklılıklar, her iki yöntemin de Maxwell denklemlerinin farklı formlarını kullanmasından kaynaklanmaktadır. PEEC yöntemi Maxwell denklemlerinin diferansiyel formunu kullanmaktadır ve FDTD yöntemi ise integral formunu kullanmaktadır [76]. Bu nedenle, PV sistemi modellerken sistemi oluşturan bileşenlerden hangisini modelleyeceğimiz ve sistemin hangi elamanı veya bileşeni üzerindeki yıldırımın geçici etkilerini inceleyeceğimize göre doğru modelleme yöntemi kullanmak önemlidir.

Çalışmada, FDTD modeli deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Deneysel kurulumun düzeni Şekil 4.47(a)'da gösterilmiştir. Şekil 4.47(b)'de ise deneyde kullanılan PV sistemi gösterilmektedir.



Şekil 4.47.(a) Ölçüm kurulumunun devre şeması.(b) Laboratuvarda küçük ölçekli PV sistemi.[92]

Deneyde darbe jeneratörü montaj sistemindeki 1 noktasına bakır levha kullanılarak bağlanır ve montaj sistemi de topraklama elektrotuna bakır levha aracılığı ile bağlanmıştır. 2 ve 3 noktadaki laboratuvar sonuçları ve FDTD, PEEC yöntemleri sonuçları şekil 4.48(a,b,c)'de gösterilmiştir.

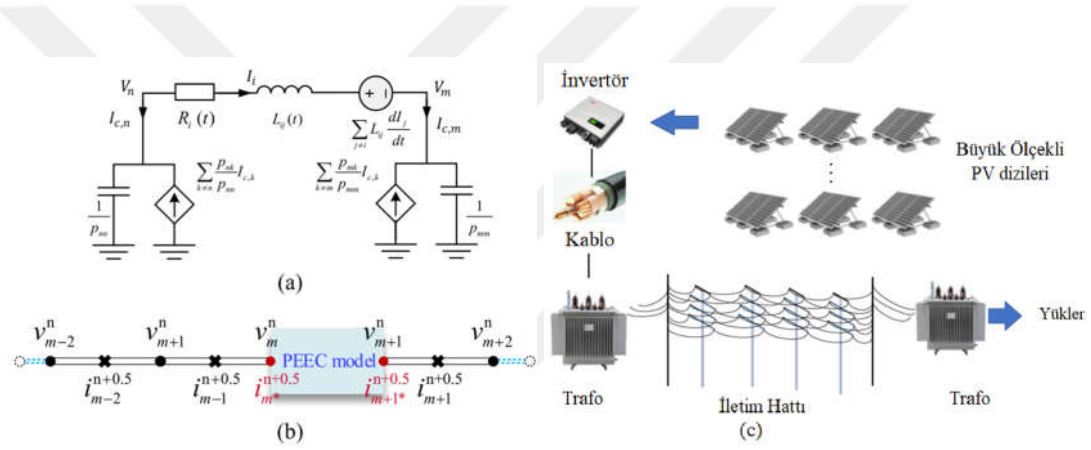


Şekil 4.48. PEEC, FDTD ve LAB sonuçlarına göre (a)Nokta 2'deki geçici aşırı gerilimler.(b) Nokta 3'teki geçici aşırı gerilimler.c) 2 ve 3 noktalarındaki aşırı gerilim tepe değerlerinin karşılaştırılması.[92]

4.4.2. Çalışma II

Makalede [93] Zhentao ve arkadaşları, büyük ölçekli şebekeye bağlı PV sistemi incelemiştir. Sistemde toprağın kayıplı etkileri göz önünde bulundurularak PEEC yöntemi kullanılmıştır ve iletim hattı modellemesi için ise çoklu iletim hattı(MTL) modelleme yöntemini kullanarak sistem için hibrit bir yapı sunmaktadır [89].

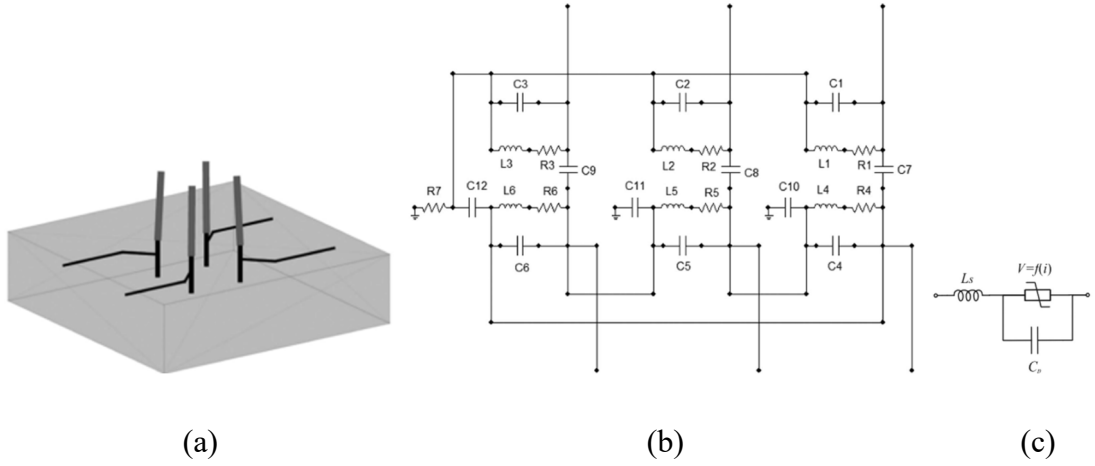
Sistemde, PV panelleri, PV-DC hattı, topraklama şebekeleri ve güç dağıtım direkleri gibi yapılar karmaşık yoğunlaştırılmış tel yapılarıdır ve PEEC ile modellenmiştir. Gömülü kablolar ve havai hatların olduğu uzun mesafeli iletim hatları tek boyutlu FDTD yöntemi ile çözülür ve MTL ile modellenmiştir. Sistemi oluşturan toplu elamanlar ise toplu devre modelleri kullanılarak modellenmiştir. Tablo 4.6’da PV sistemi bileşenlerini modellemek için kullanılan yöntemler verilmiştir. Bu şekilde hibrit bir modelleme yöntemi kullanılarak sistemin hesaplama verimliliği artırılması hedeflenmiştir. Makalede FDTD/PEEC yöntemi ile büyük ölçekli hibrit AC/DC sistemlerinde yıldırımın geçici sorunlarını incelemek ve çözümlemek için bu hibrit yöntem formüle edilmiştir [94]. Şekil 4.49(a)’da hibrit model gösterilmiştir. Şekil 4.49(b)’de ise orta gerilim şebekeye bağlı AC/DC hibrit PV sisteminin kurulumunu göstermektedir [93].



Şekil 4.49. (a) Bir iletken segmentinin PEEC modeli. (b) MTL için 1-D FDTD modeli. [93]

Tablo 4.6. Kullanılan Modeller. [93]

Sistem Bileşenleri	Modelleme Yöntemi
PV Dizileri	PEEC Model
İletim Direği	PEEC Model
Yeraltı Kablosu	MTL Model
Güç Hattı	MTL Model
İnvertör	Toplu Devre Modeli
Güç Trafosu	Toplu Devre Modeli
SPD	Toplu Devre Modeli

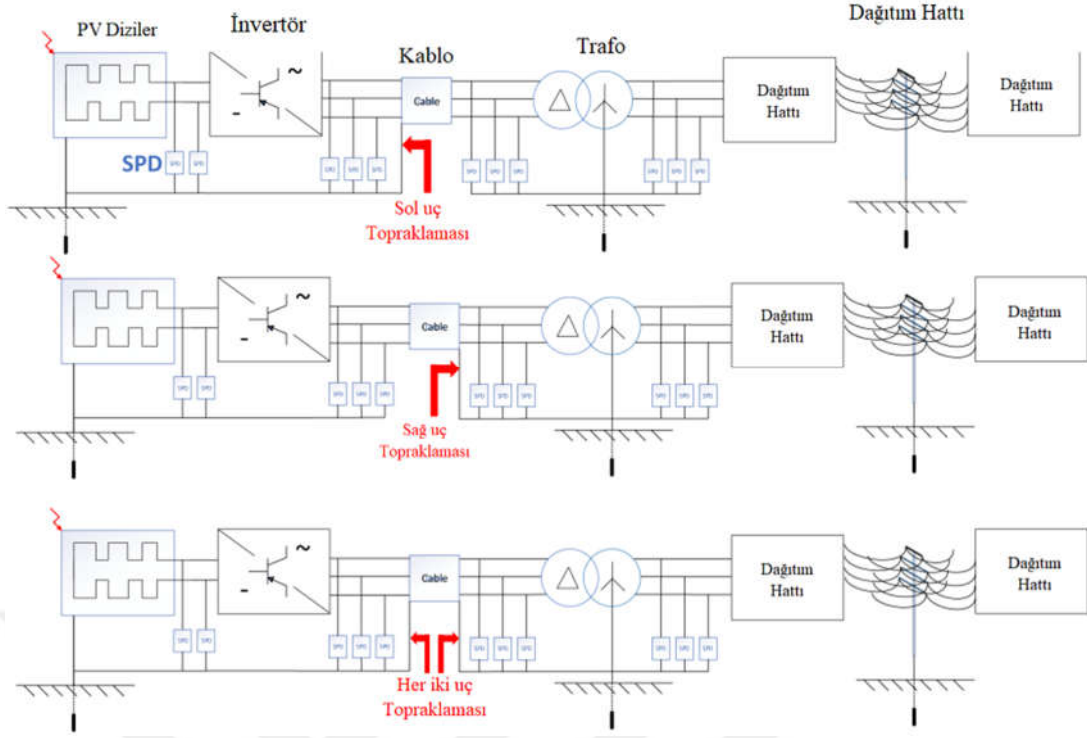


Şekil 4.52.(a) İletim direğinin topraklama elektrotlarının şematik diyagramları.(b) Transformatör modeli. (c) SPD modeli. [93]

Hibrit AC/DC PV sistemindeki çeşitli topraklama kurulumlarının etkileri hesaplanmış ve incelenmiştir. Sistemin topraklaması, invertörün uçlarına bağlı ve PV'nin topraklama çerçevesi üzerinden topraklanan SPD'leri dahil eden ve transformatörün her iki ucuna bağlı ve yıldız noktasındaki nötr üzerinden SPD'leri kullanan olmak üzere iki yönü kapsamaktadır [97].

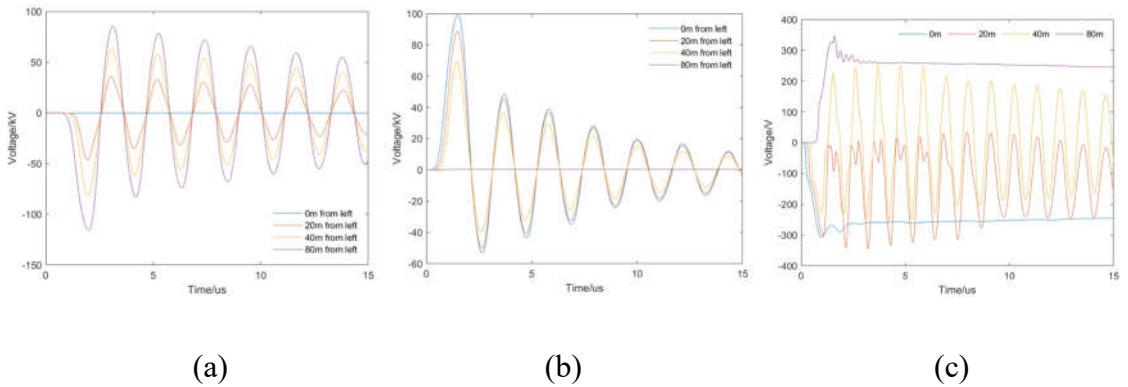
Kablo topraklamasının etkisi incelendiğinde,

Güç dağıtım sisteminde, güç trafosu ile invertör arasındaki kablo ile sistemin bağlantısı sağlanmaktadır ve mesafeye göre kablo uzunluğu belirlenmektedir. Şekil 4.51(b)'de gösterildiği gibi kablo, zırhının her iki ucundan topraklanabilmektedir. Sisteme yıldırım düşmesi ile aşırı gerilim dalgalanmalarına yol açabilmektedir ve bu nedenle de çekirdek hatlarında daha yüksek aşırı gerilimler indüklenebilir [95]. Simülasyon ile Şekil 4.53'de gösterildiği gibi PV çerçevesine doğrudan yıldırım düşmesi durumunda kablo zırhının sol ucundan, sağ ucundan ve her iki uçtan olmak üzere farklı topraklama durumları incelenmiştir. Yıldırım akımı, 100 kA genliğinde 1/50 μ s akım dalga formundadır. Buna göre Şekil 4.54'te üç topraklama düzenlemesi için kabloda çekirdek ve kılıf arasında 0,20,40 ve 80 metrelerde indüklenen aşırı gerilimleri göstermektedir.



Şekil 4.53. Kablo kılıfının sol ucunun, sağ ucunun ve her iki ucunun (yukarıdan aşağıya) topraklanması.[93]

Şekil 4.54'teki sonuçlardan da görüleceği üzere Kablo kılıfının sadece sağ ucunun ya da sadece sol uçlarının topraklanması durumunda, topraklandığı noktada indüklenen gerilim fazla olup bu noktadan uzaklaştıkça aşırı gerilim azalmaktadır. Fakat sağ ve sol olmak üzere her iki noktadan topraklanması durumunda ise kablo boyunca aşırı gerilim değeri çok fazla değişmeyecektir ve sistem normal çalışmasına devam edecektir [93].

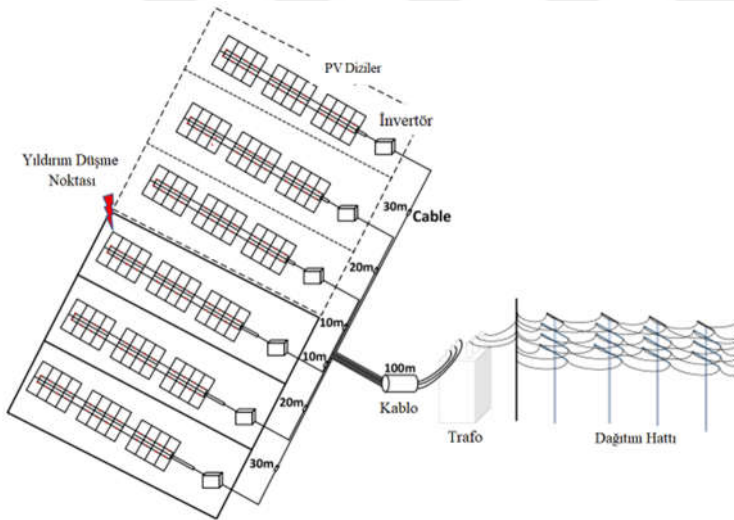


Şekil 4.54. (a) sol uç(b) sağ uç(c) kablunun her iki ucu topraklandığında, kablo çekirdeklerinden kablo yalıtım kılıfına kadar aşırı gerilimin kablunun farklı yerlerinde dağılımı.[93]

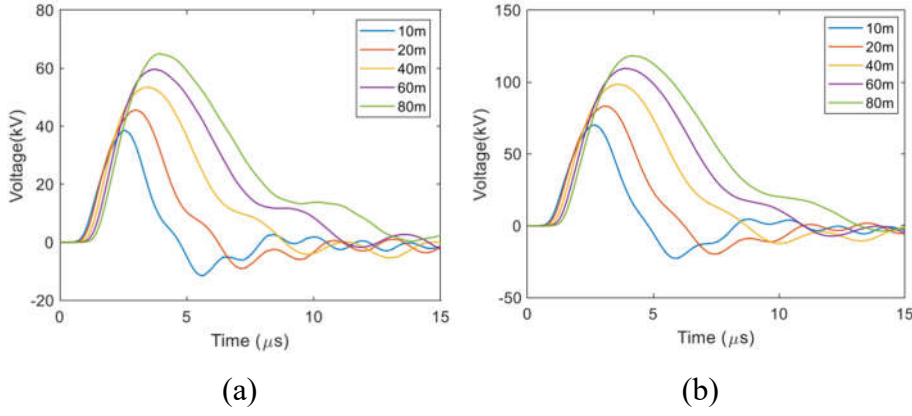
Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, PV sistemlerine yıldırım düşmesi sırasında kablo dış kılıfı ve çekirdeği arasında aşırı gerilim oluşma riskini önlemek ve kablonun zarar görmemesi ve sistemin normal çalışmasına devam edebilmesi için kablonun her iki ucundaki zırh tabakası sistemin ilgili topraklama sistemleri kullanılarak topraklanmalıdır [96].

PV Panel Sayısının Etkisi incelendiğinde,

Senaryo, Şekil 4.55’de gösterildiği gibi 18 PV paneli ve 9 PV paneli olacak şekilde oluşturulmuştur. 9 PV panel koşulunu sağlamak için ise Şekil 4.55’deki kesikli çizgili kısım bağlantısı yapılmamıştır. Senaryoda trafonun sol tarafı bir SPD’ye bağlı olmadığı durumda [77], farklı kablo uzunluklarında kılıf ve çekirdek hattı arasındaki A fazında oluşan aşırı gerilim üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 4.55’de çarpma noktası gösterilmiş olup Şekil 4.56’da ise A fazı aşırı gerilimi gösterilmiştir.



Şekil 4.55.18 PV dizisinden oluşan dağıtım şebekesinin şematik diyagramı.[93]



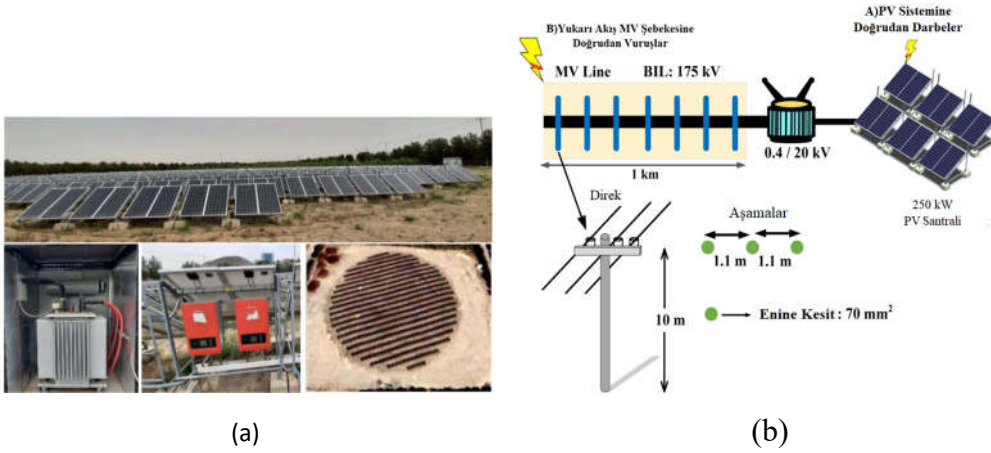
Şekil 4.56. (a) 18 PV dizisi (b) 9 PV dizisi bağlantısı olan trafonun solunda SPD olmadığında aşırı gerilimin kablounun solundan farklı bir mesafede toprağa dağıtımı.[93]

Bu senaryo sonuçları, 18 veya 9 PV paneli durumunda da PV sayısına bağlı olup olmadığına bakılmaksızın tutarlı bir eğilim olduğunu göstermektedir. Fakat sistemde invertör ve trafo arasındaki düşük gerilimli kablounun sol ucuna SPD bağlanıp sağ ucuna SPD bağlanmadığı durumda kablounun en sağ ucunda çekirdek-kabuk gerilimi kablo uzunluğu ile orantılı arttığı sonuçlardan elde edilmiştir [97]. Sonuçlardan görüleceği üzere 18 PV panelli sistemdeki aşırı gerilim 9 PV panelli sisteme göre daha azdır. Bunun sebebi, PV paneli fazla olduğunda her bir panelin topraklanmış olmasına bağlı olarak topraklama elektrotunun fazla olmasıdır ve bu durum topraklama direncini düşürecektir ve aşırı gerilim azalacaktır. Bu çalışma, PV panel sayısı arttıkça çekirdek dalgalanma aşırı geriliminin azalma eğiliminde olduğunu göstermiştir.

4.4.3. Çalışma III

Çalışmada[98], incelenen saha 250 kW'lık bir güneş enerji santralidir ve Şekil 4.57(a)'da gösterilmiştir. Bu santralde SPD'ler ve parotonerler yoktur. Şekil 4.57(b)'de ise sistemin tek hat diyagramı gösterilmiştir.

Makalede [98] Behzad ve arkadaşları, PV sistemleri frekansa bağlı yöntemler ile modellemiştir ve model, EMTP ortamında çözülerek sonuçlar analiz edilmiş ve yıldırımın sebep olduğu aşırı gerilimlere karşı sistem için uygun koruma sistemi önerilmiştir.

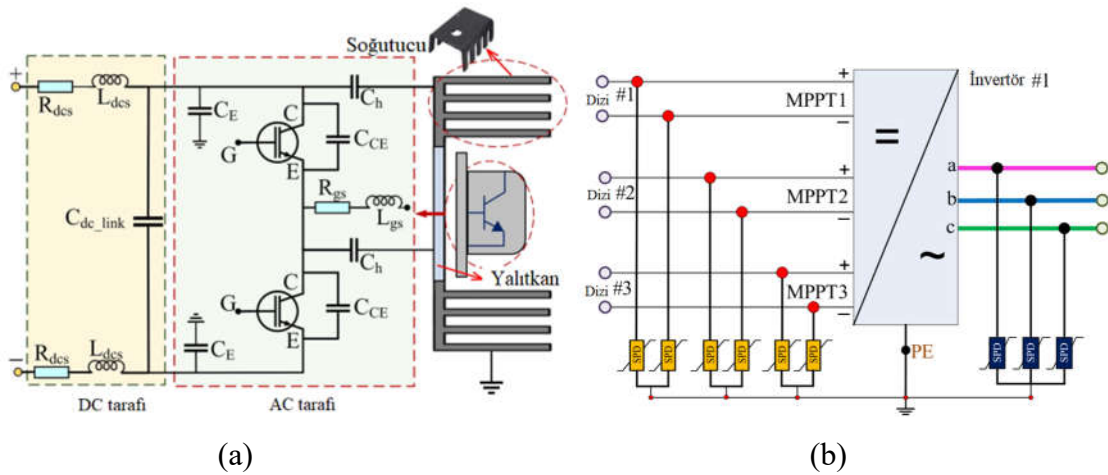


Şekil 4.57.(a) İncelenen santralde güç trafosu ve invertörler kullanılmıştır.(b) Güneş enerjisi santralinin tek hat şeması.[98]

Sistemde yıldırım etkisi ile meydana gelen ve yıldırım dalgalanmalarının sebep olduğu indüklenen aşırı gerilimlerin doğru bir şekilde hesaplanması için sistemde frekans bağımlılığı modellemesi kullanılmıştır. Modellemenin daha doğru sonuçlar vermesi için PV sistemindeki her bileşen karakteristik özellikleri göz önünde bulundurularak uygun modelleme yöntemi ile modellenmiştir [102].

Çalışmada ele alınan PV topraklama sistemini modellemek için bu daha önce detayları açıklanmış olan MOM yöntemi kullanılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir.

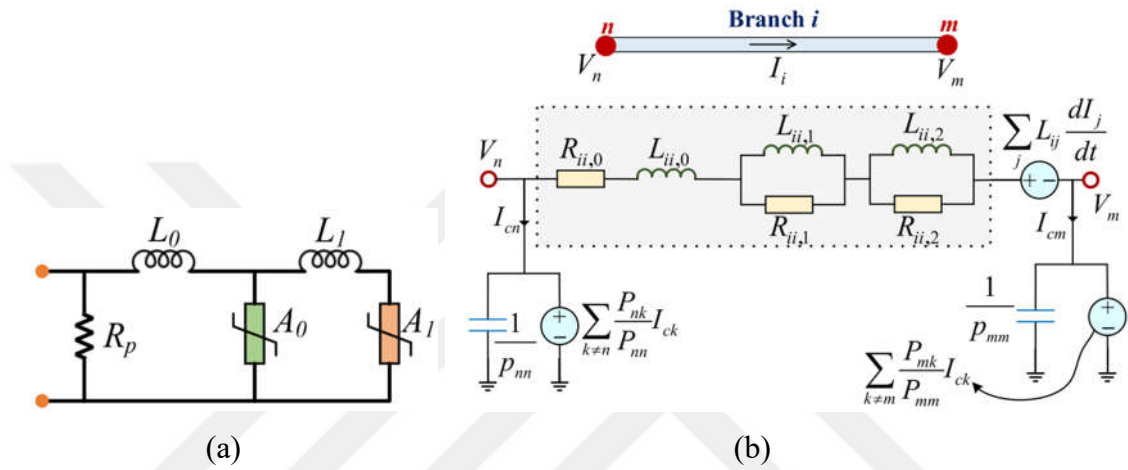
Sistemde invertörler, ısı emicisi vasıtasıyla güç santralinin topraklama sistemine bağlanmıştır ve bu şekilde yıldırım sebebiyle indüklenen aşırı gerilimlere karşı korunmaktadır. Isı emicinin indüklenen aşırı gerilimlere etkisini incelemek için Şekil 4.58(a)'daki modelleme kullanılabilmektedir [98].



Şekil 4.58.(a) PV invertörleri için önerilen frekans bağımlı modelleme.(b) PV invertörünün AC ve DC tarafına SPD montajı.[98]

Şekil 4.58(b)'de PV dizilerinin invertöre olan kablo bağlantılarını ve SPD'lerin bağlantısı gösterilmiştir. DC tarafta SPD'ler, DC girişlerinin pozitif ve negatif terminallerine bağlanmıştır ve AC tarafta ise her bir faza SPD bağlantısı yapılmıştır [104].

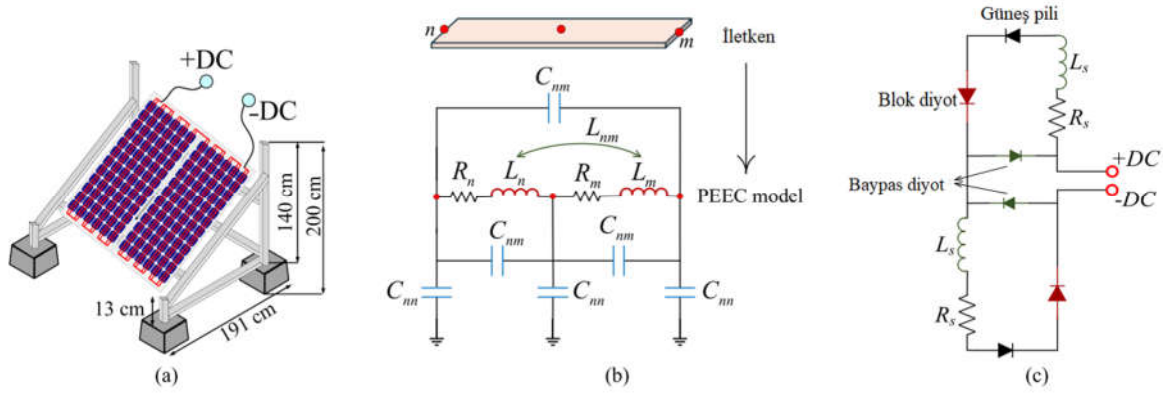
Sistemdeki SPD'ler Pinceti[99] tarafından önerilen model kullanılarak Şekil 4.59(a)'da gösterildiği gibi modellenmiştir.



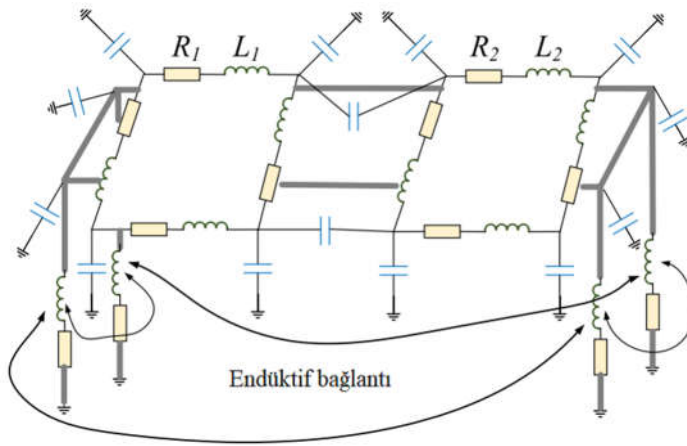
Şekil 4.59.(a) SPD frekans bağımlı modelleme.(b)İletken bir parçanın vektör uyarlaması yöntemiyle PEEC modeli.[98]

PV sistemi ise PEEC yöntemi ile modellenmiştir. Modelleme detayları [102], çalışmalarda ve bu çalışmada verilmiştir. PEEC yöntemi ile elde edilen eşdeğer devre Şekil 4.59(b)'de gösterilmiştir. Bu makalede PV'lerin devre parametreleri ise MATLAB kodları kullanılarak hesaplanmıştır ve yıldırım geçişlerinde indüklenen aşırı gerilim ve akımlar ise EMTP yazılımı kullanılarak çözülmüştür.

Bir güç santrali PV panelinin genel görünümü, iletkenindeki bypass ve blokaj diyotlarını da dikkate alarak frekans bağımlı modeliyle birlikte iki düğüm için eşdeğer devre yapılandırması Şekil 4.60'da gösterilmiştir. PV kablo endüktansı L_s ve direnci R_s ile gösterilmektedir [103]. Şekil 4.61'de ise PV paneli ve montaj sistemini PEEC yöntemini kullanarak oluşturulan devre modelini vermektedir.



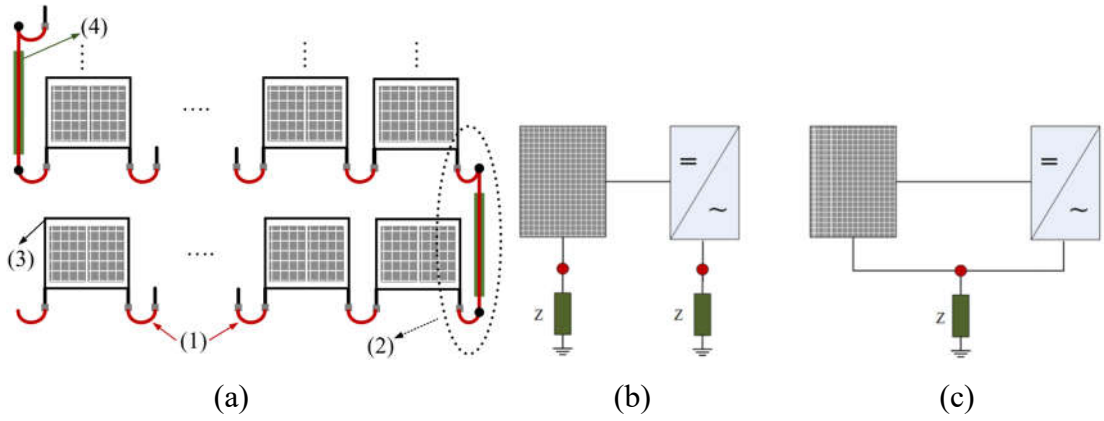
Şekil 4.60. PV panellerinden biri. (a) Genel görünümü, (b) bir iletkendeki iki düğüm için eşdeğer devrenin yapılandırması ve (c) geçici durum devre modeli.[98]



Şekil 4.61. PEEC yöntemi kullanılarak bir güneş panelinin tam devre modeli.[98]

PV sisteminin diğer bileşenleri de yüksek frekanslı modeller kullanılarak simüle edilmiştir.

Vaka çalışması EMTP’de modellenir ve yukarıdaki modellemeler uygulanarak PV sistemlerinin farklı bölgelerinde yıldırım dalgalanması uygulanması sonucunda meydana gelen aşırı gerilimler hesaplanmıştır. Simülasyonda PV sistemine veya yukarı akış MV şebekesine doğrudan bir yıldırım darbesi olduğunu varsayan durumlar dikkate alınmıştır ve her yıldırım düşmesindeki indüklenen aşırı gerilimler topraklama sisteminin dört modu [105] için hesaplanmıştır.



Şekil 4.62.(a) PV'ler için EBS((1). Bitişik paneller için eş potansiyel bağlama(2),PV dizilerini bağlamak için eş potansiyel bağlama, (3). PV'nin yapısı ve (4). Topraklama telinin geçtiği bir çelik köşe).(b) PV'deki topraklama sisteminde bağımsız topraklama kullanılması.(c) ortak toprak kullanılması.[98]

Mod 1: bağımsız toprak

Mod 2: bağımsız toprak, EBS ile

Mod 3: ortak toprak

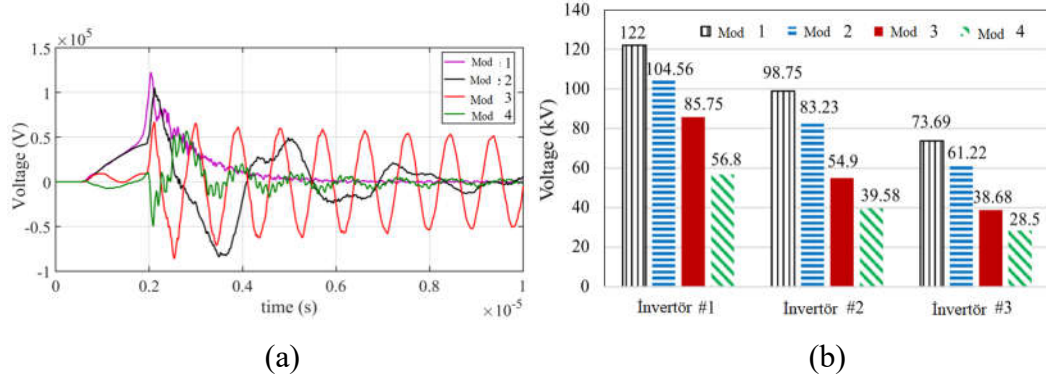
Mod 4: ortak toprak, EBS ile

A) PV Sistemine Doğrudan Darbeler

Şekil 4.57(b)'de A noktasına(1 numaralı güneş paneline) yıldırım çarpması sonucu sistemde indüklenen aşırı gerilimler farklı topraklama tipleri de dikkate alınarak incelenir [105].

- İnvertörde meydana gelen gerilim stresi sonuçları incelendiğinde, Şekil 4.63(a), topraklama tipinin invertörün girişinde indüklenen aşırı gerilimi etkilediğini göstermiştir. Şekil 4.63(b) ise mod 4 topraklama tipi uygulamasının invertörde oluşan aşırı gerilimleri azaltma açısından en uygun olduğu göstermektedir. Bu sonuçlar, üzere sistem için en uygun topraklama yönteminin ortak topraklama yöntemi olduğu ve EBS ile birlikte kullanıldığında daha etkili olduğu anlaşılmıştır. Fakat sistemde invertörlerin dayanım gerilimi 4kV'tur [45]. Yıldırımın etkisi sonucu meydana gelen aşırı gerilimler ise her topraklama tipinde bu dayanım değerinden fazladır. Bu durum da invertörde yüksek hasarlar meydana geleceğini göstermektedir. Bu nedenle invertör hasarını önlemek için ekstra koruma daha gerekli olduğu açıktır. Bu nedenle invertör girişine SPD koyulmuştur [105]. Tablo 4.7'de ise bu SPD'lerin enerji emme kapasiteleri

gösterilmektedir. Sonuçlardan anlaşılabacağı üzere en iyi koruma sistemi invertör girişlerine ve çıkışlarına SPD kurulumu ve EBS ile birlikte ortak topraklama(Mod 4) kurulumudur.



Şekil 4.63.(a) #1 invertör girişinde aşırı gerilimler oluşması durumu.(b) #1 ila #3 invertörlerinin girişindeki aşırı gerilimlerin maksimum değeri.[98]

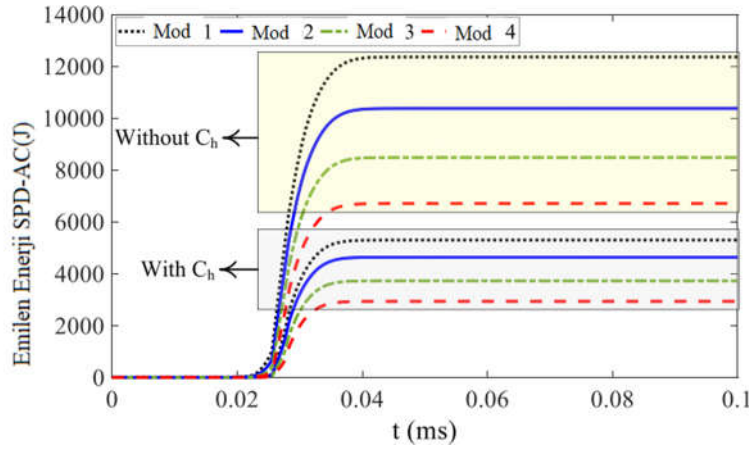
Tablo 4.7. SPD Kurulumunun İnvertör Girişindeki Aşırı Gerilimlerin Maksimum Değeri Üzerindeki Etkisi.[98]

İnvertör numarası	Mod 1		Mod 2		Mod 3		Mod 4	
	$V(kV)$	$E(kJ)$	$V(kV)$	$E(kJ)$	$V(kV)$	$E(kJ)$	$V(kV)$	$E(kJ)$
İnvertör #1	7,89	5,2	6,58	4,6	4,83	3,7	3,5	2,9
İnvertör #2	5,25	3,2	4,1	3	2,67	2,15	1,95	1,65
İnvertör #3	3,13	2,6	2,87	2,01	1,65	1,27	0,81	0,71

- Sisteme yıldırım düşmesi durumlarını araştırırken modellemeyi doğru yapmanın önemi doğru bir koruma sistemi seçmek konusunda doğrudan etkilidir. Bu makalenin bu bölümünde modellemenin etkileri incelenmiştir. SPD’ler yıldırım etkileri altında sistemi aşırı gerilimlere karşı en önemli ve kritik koruyucu cihazlardan biridir. SPD için geçici etkiler altında yalıtım arızası olasılığı vardır ve bu olasılık, her bir darbeye emilen enerji miktarına(E_{SPD}) göre hesaplanmaktadır. E_{SPD} , SPD’nin arızalanmadan önce emebileceği enerji miktarıdır [100].

İnvertörün frekans bağımlı modellemesinde, **Isı Emicinin modellemesinin etkisi** incelendiğinde, Şekil 4.64’den elde edilen sonuçlara göre, ısı emicinin kaçak kapasitansının (C_h) etkisi modellemede dikkate alınmadığında E_{SPD} ’nin, modellemede C_h ’nin dikkate alındığı durumdan yaklaşık %57 oranında daha fazla olduğu görülmüştür. Bu nedenle, PV santrallerinde invertörlerin doğru modellenebilmesi için

ısı emicinin etkisi de göz ardı edilmemelidir ve doğru koruma sistemini [101] seçmede etkisinin büyük olduğu da görülmüştür.



Şekil 4.64. İnverter modellemede ısı emici kaçak kapasitansının E_{SPD} üzerindeki etkisi.[98]

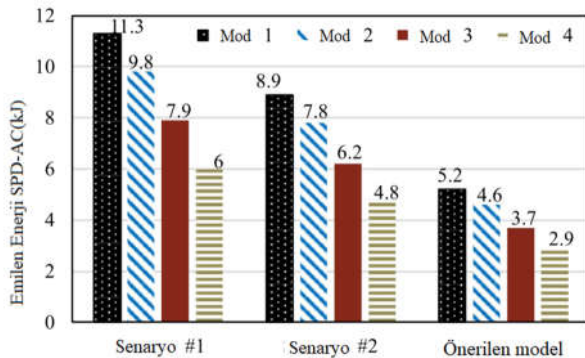
Güneş Paneli Modellemesinin Etkisi ise modellemede dikkate alınan etkileşimlere göre farklı PV modellemelerinin E_{SPD}'yi etkisi incelenmiştir.

Senaryo 1'de, Kaçak kapasitanslara ve PV modüllerinin birbirlerine karşılıklı indüksiyonu modellemede dikkate alınmamıştır.

Senaryo 2'de, PV modüller arası elektromanyetik bağlantılar sağlanmış ve kaçak kapasitanslar dikkate alınmamıştır.

Önerilen model'de ise PV modülleri arasındaki karşılıklı indüksiyon dikkate alınmış olup kaçak kapasitanslar da dikkate alınmıştır.

Şekil 4.65'den elde edilen sonuçlar PV modelleme yönteminin dört farklı topraklama tipi kullanımında da dahil olmak üzere E_{SPD} üzerindeki etkisi gösterilmiştir [98].



Şekil 4.65. Farklı panel modelleme modlarının E_{SPD} üzerine etkisi.[98]

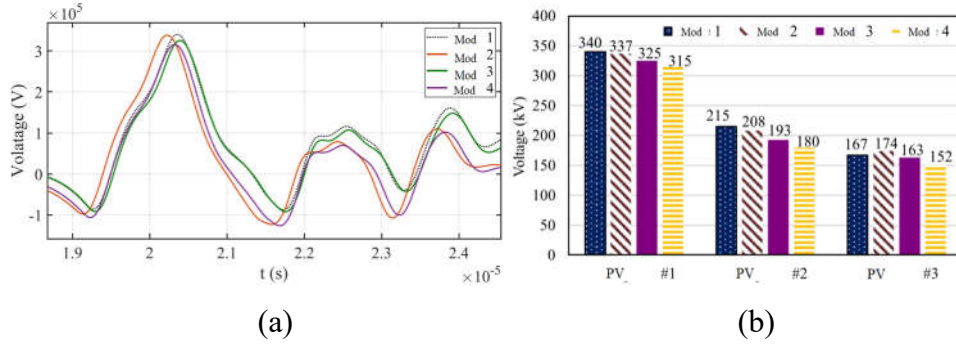
Maksimum Yıldırım Akımının Etkisi, Tablo 4.8’de sonuçları ile incelendiğinde, invertör girişinde maksimum yıldırım akımının neden olduğu invertörlerin girişindeki maksimum aşırı gerilim değerleri görülmektedir. Buna göre, en düşük yıldırım akımı olan 10 kA’da, invertörlerin girişinde indüklenen maksimum gerilim değeri 6,51 kV’tur ve SPD dayanımı 4 kV’tan yaklaşık %38 fazladır. Bu durumda çok düşük yıldırım düşmelerinde dahi invertörlerin arızalanabileceği gözükmemektedir. Bu nedenle invertörler için yıldırımın geçici etkilerine karşı bir koruma sistemi tasarlanmalıdır.

Topraklama tipleri incelendiğinde ise mod 1 durumunda SPD’ler, sadece 30kA ve 50kA arasındaki yıldırım akımları olduğunda koruma görevini yerine getirebilmektedir. E_{SPD} sadece bu aralıkta işletme kapasitesi değerini aşmamıştır. Fakat mod 4 topraklama tipi uygulandığında ise SPD’ler 100 kA değerine kadar yıldırımın sebep olduğu aşırı gerilimlere karşı korunmaktadır.

Tablo 4.8.Maksimum Yıldırım Akımının İnvertör Girişindeki Aşırı Gerilimlerin Maksimum Değerine Etkisi ve E_{SPD} . [98]

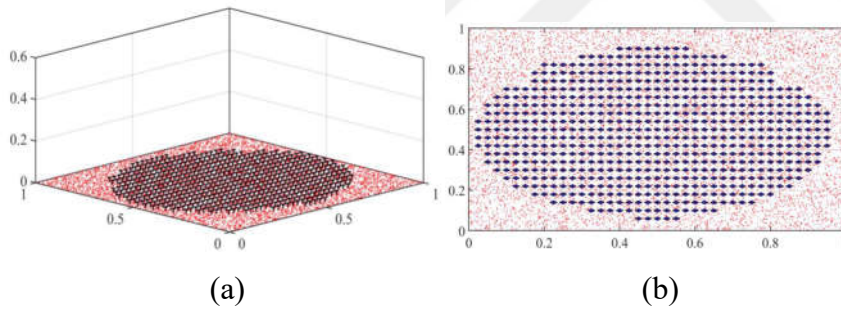
Yıldırım Akımı (kA)		10	30	50	70	90	100
Max. E_{spd} (kJ)	Mod 1	1,6	2,7	3,5	4,1	4,7	5,2
	Mod 4	0,4	0,8	1,1	1,8	2,4	2,9
SPD olmadığında indüklenen Max.aşırı gerilim(kV)		6,51	18,81	29,66	40,87	51,54	56,80

Güneş panellerinde, yıldırım etkisiyle aşırı gerilimlerin oluşumu değerlendirildiğinde, 1 nolu PV panele yıldırım düşmesi durumu için topraklama sisteminin dört modundaki sonuçları Şekil 4.66(a)’da gösterilmiştir. Şekil 4.66(b)’de ise 1’den 3’e kadar olan PV panelleri için aşırı gerilim en yüksek değerleri verilmiştir. Sonuçlardan anlaşılabileceği üzere PV panellerin zarar görme olasılığı çok yüksektir ve yıldırımın geçici etkilerinden korumak için paratonerler takılmalıdır. Bu çalışmada [98], uygun paratoner tasarımı ve yerleştirilmesi için elektrogeometrik bir model ve Monte Carlo simülasyonu kullanılmıştır. Detayları bu makalede açıklanmıştır.

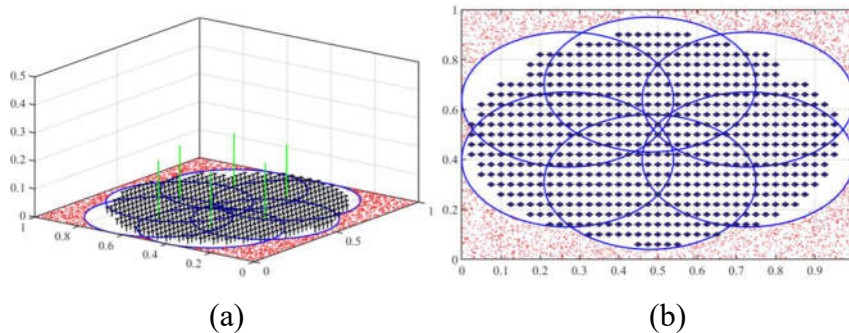


Şekil 4.66.(a) Birinci dizinin #1 numaralı panelinde oluşan aşırı gerilimler.(b) İlk dizinin #1 ila #3 numaralı panellerindeki aşırı gerilimlerin maksimum değeri.[98]

Bu makalede[98] incelenen ve 625 güneş panelinden oluşan santralin 1/1000 ölçeğinde MATLAB ortamında simülasyonu Şekil 4.67’de gösterilmiştir. Şekil 4.67’deki sonuçlar incelendiğinde, eğer santralde bir koruma sistemi yok ise şekil 4.67’de kırmızı noktalarda gösterilen yıldırım darbeleri santrale ve ekipmanlara zarar verecektir. Makalede yapılan hesaplamalar sonucunda santrali korumak için 10 m yüksekliğinde çift paratonerler kurulması gerektiği belirlenmiştir. Paratonerlerin yerleşim planıyla beraber PV santralin simülasyonu ise Şekil 4.68’de verilmiştir.



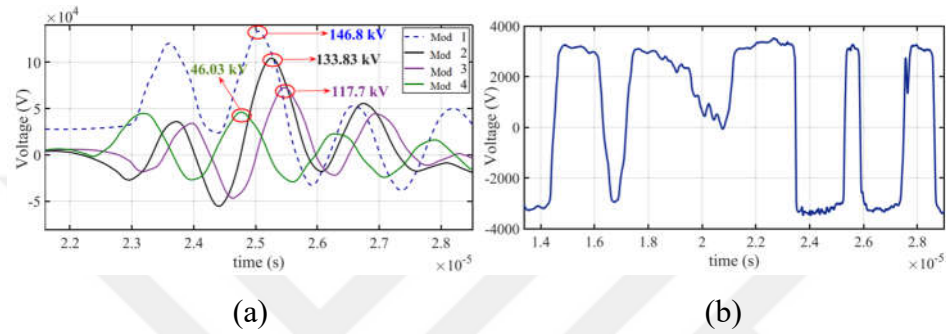
Şekil 4.67. MATLAB ortamında doğrudan yıldırım darbelerinin santral alanına dağılımı. (a) Genel görünüm. (b) Üstten görünüm.[98]



Şekil 4.68. MATLAB’da paratoner kullanılarak enerji santrali koruma simülasyonu. (a) Genel görünüm. (b) Üstten görünüm.[98]

B) Yukarı Akış MV Şebekesine Doğrudan Vuruşlar

Şekil 4.57(b)'de yıldırımın B noktasına düştüğü durum için güç santralının dört topraklama modu için de invertör 1'in girişinde indüklenen aşırı gerilim değerleri Şekil 4.69(a)'da gösterilmiştir. Sonuçlardan anlaşılabileceği üzere, en iyi topraklama sistemi modunda dahi invertör 1'de meydana gelen aşırı gerilim invertörün dayanımından fazladır bu nedenle sisteme SPD'ler eklenmelidir [101]. Şekil 4.69(b) ise SPD eklenmesi durumunda invertör 1'de meydana gelen aşırı gerilimleri göstermektedir. Bu durumda aşırı gerilim invertörün dayanım geriliminden az olmuştur.



Şekil 4.69.(a) #1 invertöründe oluşan aşırı gerilim.(b) Santralin #1 nolu invertör girişindeki aşırı gerilimler.[98]

4.5. Sonuçlar ve Tartışma

Bir PV sistemi için LPS seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar ve önceki çalışmaların sonuçları ışığında elde edilen çıkarımlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir ve tartışılmıştır.

- 1) Risk Analizi:** PV sisteminin kurulumunun yapılacağı bölgenin risk faktörleri göz önünde bulundurularak bölgesel olarak hesaplanmalıdır.
- 2) Yıldırımın Akımının Büyüklüğü:** Bölgeye düşen yıldırım akım büyüklüğü değerlendirilmelidir ve PV sisteme çarptığı noktadaki büyüklüğü LPS seçiminde etkili olacaktır. Yıldırımın çarpma noktasında en büyük aşırı gerilimler oluşmaktadır. Bunu, [56], [98] çalışma sonuçları da göstermektedir.
- 3) PV sistemlerinin Modellenmesi:** PV sistemlerini yıldırımın geçici etkileri altındaki davranışlarını analiz edebilmek için deneysel yöntemleri kullanmak, her farklı çalışma için ve her farklı tipteki sistem için tekrarlamayı gerektirecektir. Ayrıca deneysel çalışmalarda talep edilen tüm verileri toplayabilmek ve analiz etmek de sınırlıdır. Bu

nedenle modelleme yöntemleri kullanılarak sistem gerçeğe en yakın şekilde modellenmeli ve yıldırımın etkisi altındaki davranışları incelenmelidir. PV sistemleri, PV modüller, invertörler, AC/DC kabloları, PV montaj çerçevesi, sistemin bağlı olduğu topraklama sistemlerini içermektedir. Bu nedenle tüm sistem bileşenleri için bu bileşen davranışları ve yapısı göz önünde bulundurularak doğru modelleme seçilmeli ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmelidir.

Özellikle son yıllardaki çalışmalar deneysel veriler ile karşılaştırıldığında elektromanyetik yöntemlerin PV sistem modellemede etkili sonuçlar verdiğini kanıtlamış ve bu yöntemleri kullanmıştır. Bu çalışmada özellikle sık tercih edilen PEEC, FDTD ve MOM yöntemlerini kullanan önceki yıllardaki çalışmalar üzerinde durulmuştur.

Bu çalışmada ele alınan makaleler incelendiğinde, Maxwell denklemlerinin farklı formlarını kullanan bu yöntemlerin aslında PV sistemini oluşturan farklı bileşenlerini modelleme açısından daha etkin olduğu çıkarımı yapılabilir.

Buna göre;

PEEC modelleme yöntemi genellikle PV sisteminin kendisini modellemek için ve sistemin elektriksel davranışını modellemek için kullanılmaktadır. Çünkü PEEC yöntemi elektromanyetik alanları eşdeğer devre elemanlarına dönüştürür ve çözüm sunar. Böylece, PV sistemlerinin devre-elektromanyetik etkileşimleri birlikte değerlendirilebilir.

FDTD yöntemi genellikle PV sistemlerinin çerçeveler, destekleri gibi montaj yapılarının modellenmesinde kullanılmaktadır ve deneysel veriler ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Bu yöntem, zamanda doğrudan çözüm yapması ve tüm alanları kapsaması özelliği ile yıldırımın geçici etkilerini zamana bağlı çözümü doğrudan elde etmede çok iyidir. Ayrıca 3B yapıdaki geometrik detaylar için de çok uygundur ve bu nedenle montaj elemanlarını modellemede tercih edilmektedir.

MOM yöntemi genellikle topraklama sistemlerinin modellenmesinde kullanılır. Çünkü yöntem, iletken yapıların yüzey akımlarını çözmede iyidir ve topraklama sistemleri gibi iletken ağ yapılarının modellenmesinde etkilidir. İletkenlerin toprak ile etkileşimi daha şekilde modellenebilmektedir.

Makalede [92], yıldırımın geçici etkileri sonucu PV montaj sisteminin farklı noktalarında indüklenen aşırı gerilimler FDTD yöntemi ve PEEC yöntemi kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmış ve iki yöntem sonuçlarının arasında yaklaşık %15 fark olduğu görülmüştür. FDTD yöntemi ile bulunan sonuçların deneysel sonuçlara daha yakın

olduğu bulunmuştur. Bu makalede PV montaj sistemindeki geçici etkilerin araştırıldığı dikkat edilmelidir ve karşılaştırma sonucu FDTD yönteminin gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği yöntemlerin etkin olduğu alanlara dair çıkarımları destekler niteliktedir.

PV sistemleri modellenirken özellikle dikkat edilmesi gereken önemli noktalar aşağıda belirtilmiştir.

- Önceki çalışmaların birçoğunda PV sistemlerdeki iletkenler arasındaki **karşılıklı kuplajlar** ihmal edilmiştir. [56], [98] çalışmaların sonuçlarından anlaşılacağı üzere modelleme yöntemi uygulanırken PV modüllerin karşılıklı indüksiyonu, iletkenler arasında oluşan karşılıklı endüktif, kapasitif kuplajlar, kaçak kapasitanslar modellemede hesaba katılması sistemde oluşan aşırı gerilim sonuçlarını etkilemektedir. Bu nedenle sistem için doğru olan LPS'nin seçilebilmesi için sistemde oluşabilecek aşırı gerilimler doğru analiz edilmelidir. Doğru analiz için ise bu karşılıklı etkilerin hesaplamalara dahil edilmesi kritik önem taşımaktadır.
- Yıldırımın geçici etkileri altında özellikle +DC/-DC kabloları arasında indüklenen gerilimler **invertörlere** zarar vermektedir. Bu nedenle, invertör modellemeye dahil edilmelidir ve doğru modelleme yöntemi seçilmelidir. [61]'de kullanılan PEEC yöntemi ve ölçülen PV sistemi sonuçlarının uyumlu olması bu yöntemin modellemede seçilmesinin uygun olduğunu göstermektedir. İnvertörde indüklenen aşırı gerilimleri azaltmak için ayrıca aşağıdaki gibi PV sistemlerinde düzeltmeler yapılabileceği de yapılan çalışmalardan elde edilen bulgulardandır.
 - +DC/-DC kablolarda yapılan düzenlemeler [52].
 - Sisteme SPD eklenmesi.
 - Uygun topraklama yöntemi seçilmesi [93].
- PV sistemlerine eklenen **SPD**'ler sistemde indüklenen gerilimleri azaltan kritik bileşenlerdendir. Modellenmeye dahil edilmelidir. Hesaplamalara SPD'nin etkisinin dahil edilmesi, LPS'nin sistem için uygun ve yeterli seçilebilmesinde etkili olacaktır. [78], [93], [98] sonuçları SPD eklenen PV sistemde indüklenen aşırı gerilimlerin daha az olduğunu kanıtlar niteliktedir.
- **PV modüllerinin metal çerçevesi** sistemde indüklenen aşırı gerilimlerde önemli bir etkiye sahiptir. [56], [92] çalışma sonuçları metal çerçevenin varlığının sistemde indüklenen aşırı gerilimleri arttırdığını gösterirken [52] sonuçları ise metal çerçeve

kullanımının indüklenen aşırı gerilimi azalttığı göstermiştir. [52] çalışmada metal çerçevenin varlığının bu olumlu etkisi Faraday Yasasına dayandırılmıştır. Fakat sistemdeki metal çerçevede, Faraday Yasasının sağlanabilmesi ve indüklenen akıma ters yönde bir manyetik akı oluşturabilmesi için metal çerçevenin tüm kenarlarının birbirine bağlı olması gerektiği herhangi bir iletkenliği bozacak bir malzeme, kir, pas olmaması gerektiğine dikkat edilmelidir. Çerçevenin elektriksel sürekliliği sağlanmalıdır ve toprakla bağlantısı sağlanmış olmalıdır. Bu çalışmalardaki sonuçların farklı olmasında, üzerinde çalışılan PV sistemlerin, topraklama yapılarının, yıldırımın düştüğü noktalarının farklı olmasının etkileri büyüktür ve bu durum, her sistemin kendi özelinde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

4) Topraklama Sistemi: PV sistemlerdeki topraklama sisteminin yapısı indüklenen aşırı akımların toprağa iletilmesinde ve sistemde akım dağılımında etkisi büyüktür. Bu nedenle topraklama sisteminin yıldırımın geçici etkileri altındaki performansının incelenmesine dikkat edilmelidir. Analiz sonuçları LPS seçimine etki edecektir.

Önceki çalışmalardan elde edilen bulgulara göre:

- Sistemde akım toprağa gideceği yolu izlemektedir. Sistemde topraklama noktasını arttırmak, LPS'nin verimliliğini arttırmayacaktır. Bunu makale[52] sonuçları göstermektedir. Sistemin topraklama tipinin doğru modelleme ve analizi ile akımın toprağa gideceği en kısa iletim yolunu bulmak önemlidir. Fakat makalede[93] ise PV panel adedini arttırarak topraklama elektrotunun da sistemde artmış olacağı ve bu durumun aşırı gerilimleri azaltacağı vurgulanmaktadır. Bu iki analizin farklı sistemler üzerinde olduğu dikkat edilmelidir. Bu makalede seçilen sistem birden fazla panelden oluşan bir PV santralidir ve sistemde farklı topraklama elektrotunun olması sayesinde PV panellerinden oluşan santralin geniş alanı boyunca potansiyel farkı düzgün yayılmış olacak ve yıldırım akımı yayılırken de bir noktada aşırı bir potansiyel önüne geçilmiş olunacaktır.
- Toprak öz direncinin büyük olması yıldırım etkisi altında indüklenen gerilimlerin daha fazla olmasına neden olmaktadır. Bunu, [56], [92] sonuçları göstermiştir. LPS seçimi yapmak istediğimiz bir sistemde topraklama direncinin etkisi ve sistemdeki aşırı gerilimlere etkisi analiz edilmelidir.

5) LPS: PV sistemleri için seçilen izole LPS'lerin daha etkili olduğu görülmüştür. [52], [78] sonuçları bunu desteklemektedir.

İlgili tüm makalelerden ve bu çalışmadan anlaşılacağı üzere, sistem için uygun olan LPS'nin seçimi ve kurulumu, yalnızca sistemin ciddi hasarlardan korunmasına yardımcı olmakla kalmayacak, aynı zamanda bileşenlerin ömrünü uzatacak ve genel olarak PV sisteminin sorunsuz ve verimli çalışmasını sağlayacaktır. Sistem bileşenleri için kullanılan doğru modelleme ile sistem için en iyi ve yeterli LPS seçilerek oluşabilecek fazla maliyetlerin de önüne geçilmiş olunacaktır.



5. SONUÇ

PV sistemleri, dış mekana tamamen maruz kalmaktadır ve hava şartlarının olumsuz etkilerinden etkilenmektedir. Bu sistemler özellikle, yıldırımın dolaylı ve doğrudan çarpması sonucu oluşan aşırı gerilimlere karşı oldukça hassas yapıdadır. PV sistemlerinde doğrudan yıldırım çarpmaları sonucunda ciddi hasarlar meydana gelmektedir. Ayrıca, PV sistemin yakınında bir noktaya yıldırım çarpması sonucu oluşan aşırı gerilimler, sistemin parçası olan PV panellerine, invertörlere, sigortalara, kabloları zarar vermekte ve sistemin çalışmasını olumsuz etkilemektedir. PV Sistemlerinde meydana gelen bu hasarları gidermek, yüksek onarım ve değiştirme maliyetlerine neden olmaktadır. Bu nedenle, PV sistemleri doğru analiz edilmelidir, uygun risk değerlendirilmesi yapılmalıdır ve sistem gerekliliklerine uygun bir yıldırımdan korunma sistemi seçilmelidir.

Bu çalışmada, PV Sistemlerinin genel yapısı incelenmiş olup, yıldırımın olumsuz hasarlarına maruz kalan PV sistemlerine örnekler verilmiştir. Bu sistemlerin yıldırımdan korunması için sistemin risklerini analiz etmek gerekmektedir. Bundan yola çıkarak risk analizinde izlenmesi gereken adımlar belirtilmiştir ve yıldırımdan korunma sistemlerine ilişkin temel hususları detaylı incelemiştir. Önceki çalışmalar genel olarak PV sisteminin kurulumunun yapıldığı alana göre odaklanıp buna göre teorik bilgiler vermiştir. Bu çalışma ise, PV sistemlerinin çeşitli kurulum alanlarındaki LPS'nin kullanımını detaylı açıklamış olup ilgili teorik bilgileri bir araya getirip araştırmacılara tek bir kaynak kolaylığı sunmayı hedeflemiştir.

PV sistemlerini yıldırımın geçici etkilerine karşı korumak ve sistemin çalışır durumunu korumasını sağlayabilmek için sistem için uygun koruma yöntemleri seçilmesi gerektiği açıktır. Fakat her sistemin kendi özelinde olduğu unutulmamalıdır ve kendi özelinde gereklilikleri ve sistemin davranışları göz önünde bulundurulmalıdır. Buna dayanarak doğru bir LPS seçmek ve sisteme uygulamaktan ziyade sistemin tüm gereklilikleri göz önünde bulundurularak, PV sistemi doğru analiz edilerek o sistem için doğru ve ihtiyacı karşılayan bir LPS seçilmelidir.

Bu çalışmada özellikle son yıllarda PV sistemlerinin yıldırımın geçici etkileri altındaki davranışlarını inceleyen makaleler ele alınmıştır ve bu çalışmada farklı yapılarıdaki PV

sistemleri üzerinde çalışmalar yapılmış olmasına dikkat edilerek seçilen makaleler, detaylı bir anlatım ile incelenmiştir. İncelenen çalışmaların sonuçlarına göre yapılan çıkarımlar ile araştırmacılar a bir kılavuz olması hedeflenmiştir.



6. KAYNAKÇA

- [1] I. Hetita , A. S. Zalhaf, D.-E. A. Mansour, Y. Han, P. Yang and C. Wang, "Modeling and protection of photovoltaic systems during lightning strikes: A review," *Renewable Energy*, pp. 134-148, 2022.
- [2] N. A. Sabiha, M. Alsharef, M. K. Metwaly and E. E. Ela, "Sustaining electrification service from photovoltaic power plants during backflow lightning overvoltages," *Electric Power Systems Rese*, 2020.
- [3] S. Forsberg, S. Svahn, H. L. Wallengren and J. Wisk, "Roof mounted PV system," *Uppsala University*, 2016.
- [4] R. Kongnok, T. Pummaitong ve . B. Plangklang, «Five-Year Performance of an ESE Lightning Protection System for a Large Scale PV Power Plant in Thailand,» *Symmetry*, pp. 0865-4824 , 2226-1877, 2021.
- [5] A. M. Humadaa, S. Y. Darweeshc, K. G. Mohammedd, M. Kamile, T. A. Tahseen, O. I. Awad and S. Mekhilef, "Modeling of PV system and parameter extraction based on experimental data: Review and investigation," *Solar Energy*, vol. 199, pp. 742-760, 2020.
- [6] A. K. Maurya, A. K. Rai ve H. Ahuja, «Performance Analysis of Roof-top Solar PV System in Composite Environment,» *2022 IEEE 10th Power India International Conferernce (PICON)*, 2022.
- [7] P. Roddis, K. Roelich, K. Tran, S. Carver, M. Dallimer ve G. Ziv , «What shapes community acceptance of large-scale solar farms? A case study of the UK's first 'nationally significant' solar farm,» *Solar Energy*, pp. 235-244, 2020.
- [8] M. López, N. Rodríguez ve G. Iglesias, «Combined Floating Offshore Wind and Solar PV,» *Journal Of Marine Science and Engineering*, p. 576, 2020.
- [9] F. Taveira-Pinto, G. Iglesias, P. Rosa-Santos ve Z. Dan, «Preface to Special Topic: Marine Renewable Energy,» *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, pp. 1941-7012, 2015.
- [10] V. Kumar, R. Shrivastava and S. Untawale, "Solar Energy: Review of Potential Green & Clean Energy for Coastal and Offshore Applications," *Aquatic Procedia*, vol. 4, pp. 473-480, 2015.
- [11] M. R. Santafé, P. S. F. Gisbert , F. J. Sánchez, J. B. T. Soler ve J. J. Ferrá, «Implementation of a photovoltaic floating cover for irrigation reservoirs,» *Journal of Cleaner Production* , , , Carlos M. Ferrer Gisbert, cilt 66, pp. 568-570, 2014 .
- [12] C. Diendorfer, M. Haider ve M. Lauermann, «Performance Analysis of Offshore Solar Power Plants,» *Energy Procedia*, pp. 1876-6102, 2014.
- [13] C. A. Charalambous, N. D. Kokkinos ve N. Christofides, «External Lightning Protection and Grounding in Large-Scale Photovoltaic Applications,» *IEEE Transactions On elctromagnetic Compatibility*, cilt 56, no. 2, 2015.
- [14] S. Ittarat, S. Hiranvarodom ve B. Plangklang, «A computer program for evaluating the risk of lightning impact and for designing the installation of lightning rod protection for photovoltaic system,» *Energy Procedia*, cilt 34, pp. 318-325, 2013.
- [15] E. Skoplaki and J. Palyvos, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations," *Solar Energy*, vol. 83, pp. 614-624, 2009.

- [16] W. Kamuyu, L. J. Won, C.S. ve H. Ahn , «Prediction model of photovoltaic module temperature for power performance of floating,» *PVs. Energies*, cilt 11, p. 447, 2018.
- [17] P. K. Sobolewski ve M. .. E. Sobieska, «Modeling and simulations of lightning protection photovoltaic modules,» *IEEE*, 2020.
- [18] C. V. C. Srinivasan, P. K. Soori and F. A. Ghaith, "Techno-Economic Feasibility of the Use of Floating Solar PV Systems in Oil Platforms," *Sustainability*, 2024.
- [19] V. K. Haohui Liu, J. L. Leung , Thomas Reindl and L. Zhao, "Field experience and performance analysis of floating PV technologies in the tropics," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2018.
- [20] S. Oliveira-Pinto and J. Stokkermans, "Assessment of the potential of different floating solar technologies – Overview and analysis of different case studies," *Energy Conversion and Management*, 2020.
- [21] M. S. M. Nasir, M. Z. A. Ab-Kadir, M. A. M. Radzi, M. Izadi, N. Ahmad and N. Zaini, "Lightning performance analysis of a rooftop grid-connected solar photovoltaic without external lightning protection system," *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019.
- [22] N. Fallah, C. Gomes, M. Z. A. A. Kadir, G. Nourirad, M. Baojahmadi ve R. j. Ahmed, «Lightning Protection Techniques for Roof-Top PV Systems,» *PEOCO2013*, 2013.
- [23] N. Ahmad, M. Ab-Kadira, M. Izadia, N. Azisa, M. Radzib, N. Zainia ve M. Nasir, «Lightning protection on photovoltaic systems: A review on current and recommended practices,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, cilt 82, pp. 1611-1619, 2018.
- [24] C. A. Christodoulou, L. Ekonomou, I. F. Gonos ve N. P. Papa, «Lightning protection of PV systems,» *Energy Syst*, cilt 7, pp. 469-482, 2016.
- [25] J. Hernandez, P. Vidal ve J. Francisco, «Lightning and surge protection in photovoltaic installations,» *IEEE Trans PWRD*, cilt 23, no. 4, p. 1961–1971, 2008.
- [26] J. Birkel ve P. Zahlmann, «Specific requirements on SPDs installed on the DC-Side of PV-generators,» *ICLP*, 2010.
- [27] E. Spooner ve G. Harbidge, «Review of international standards for grid connected photovoltaic systems,» *Renew Energy*, cilt 22, pp. 235-239, 2001.
- [28] N. Kokkinos, N. Christofides ve C. Charalambous, «Lightning Protection Practice for Large-Extended Photovoltaic Installations,» *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 2012.
- [29] P. H. Tan ve C. K. Gan, «Methods of Lightning Protection for the PV Power Plant,» *IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)*, 2013.
- [30] P. K. Sobolewski ve M. E. Sobieska, «Analysis of lightning protection of floating photovoltaic power plant,» *36th International Conference Lightning Protection(ICLP)*, 2022.
- [31] M. T. Sameera ve M. Rihan, «Identification and Mitigation of Atmospheric Effects on Solar PV Panel,» *International Conference on Emerging Research in Electronics, Computer Science and Technology (ICERECT)*, 2022.
- [32] E. Demirel, «Güneş Enerji Santrallerinde Yıldırım Darbe Etkilerinin Araştırılması,» *Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi*, 2021.
- [33] M. Belik, «PV Panels Under Lightning Conditions,» *IEEE*, 2014.

- [34] N. I. Ahmad, A. Zaipatimah, M. Z. A. Ab. Kadir, M. Osman , N. H. Zaini ve M. H. Roslan, «Impacts of Lightning-Induced Overvoltage on a Hybrid Solar PV–Battery Energy Storage System,» *Applied Sciences*, cilt 11, p. 3633, 2021.
- [35] N. Zaini, M. Ab-Kadir ve M. Radzi, «Lightning surge analysis on a large scale grid-connected solar photovoltaic system,» *Energies*, cilt 10, pp. 2149 Izadi, M., Azis, N., Ahmad, N., Nasir, M.S.M., 2017.
- [36] N. Ahmad, M. Ab-Kadir, M. Izadi, N. Zaini, M. Radzi, N. Azis ve W. Wan Hasan, «On the performance of a polycrystalline PV panel under different impulse voltages and temperatures,» *In Proceedings of the International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, pp. 1-6, 2016.
- [37] M. Hossain ve M. Ahmed, «Analysis of indirect lightning phenomena on solar power system,» *Int. J. Electr. Eng.*, cilt 21, pp. 127-133, 2014.
- [38] T. Jiang, «Electrical Properties Degradation of Photovoltaic Modules Caused by Lightning Induced Voltage,» *Theses and Dissertations*, p. 1848, 2014.
- [39] I. Holland, W. Doorsamy ve K. Nixon, «Computational Methodology for Lightning Risk Assessment of Small-scale Rooftop Photovoltaic Systems,» *IEEE*, 2018.
- [40] I. Holland, W. Doorsamy ve K. Nixon, «Lightning Risk Assessment of Rooftop Photovoltaic Systems: A Case Study Approach,» *IEEE*, 2018.
- [41] R. QI, «The Improved PEEC Method For Grounded Structured Above Lossy Ground For Lightning Analysis,» *PhD - The Hong Kong Polytechnic University*, pp. 1-142, 2020.
- [42] Z. Yang, «Lightning Protection For Large-Scale Photovoltaic Systems,» *PhD - The Hong Kong Polytechnic University*, pp. 1-187, 2020.
- [43] A. E. Ruehli, «Equivalent circuit models for three-dimensional,» *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Cilt 22, no. 3, pp. 216-221, March 1974.
- [44] A. Ruehli, J. Garrett ve C. Paul, «Circuit models for 3D structures with incident fields,» *Procs. of 1993 IEEE International Symposium on EMC*, pp. 28-32, August 1993.
- [45] M. Ranasinghe, V. Dinavahi ve Fellow, «Partial Element Equivalent Circuit Based Parallel Electromagnetic Transient Simulation on GPU,» *IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 60, No. 10.*, cilt 60, no. 10, pp. 1-9, October 2024.
- [46] A. Mehri, R. Ghanizadeh ve M. Beiraghi, «Analysis of Electromagnetic Transient Overvoltages of PV Systems Considering Frequency Dependence of Grounding System,» *Journal of Solar Energy Research* , cilt 8, no. 3, pp. 1587-1598, 2023.
- [47] S. Mosamane ve C. Gomes, «Simulations and experimental validation of lightning-induced voltages on a PV system in both common mode and differential mode,» *Electric Power Systems Research*, cilt 229, no. 110202, 2024.
- [48] H. Chen, Z. Qin, Y. Du , Q. Wang ve Y. Ding, «TAES: A PEEC-Based Tool/or Transient Simulation,» *7th Asia Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 676-678, 2016.
- [49] I. Hetita, D.-E. A. Mansour, Y. Han, P. Yang ve A. S. Zalhaf, «Experimental and Numerical Analysis of Transient Overvoltages of PV Systems When Struck by Lightning,» *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, cilt 71, pp. 1-11, 2022.
- [50] Y. Zhang, H. Chenb ve Y. Du, «Lightning protection design of solar photovoltaic systems: Methodology and guidelines,» *Electric Power Systems Research*, cilt 174, no. 105877, 2019.

- [51] Q. Ruihan, D. Y. ve C. Mingli, «Lightning-Generated Transients in Buildings With an Efficient PEEC Method,» *IEEE Transactions On Magnetics*, cilt 55, no. 11, pp. 1-5, November 2019.
- [52] Y. Zhang, H. Chen ve Y. Du, «Considerations of Photovoltaic System Structure Design for Effective Lightning Protection,» *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, VOL. 62, NO. 4, AUGUST 2020, cilt 62, no. 4, pp. 1-9, August 2020.
- [53] Y. Zhang, H. Chen, Y. Du, Z. Li ve Y. Wu, «Lightning Transient Analysis of Main and Submain Circuits in Commercial Buildings Using PEEC Method,» *IEEE Transactions On Industry Applications*, cilt 56, no. 1, January/February 2020.
- [54] Y. Zhang, B. Li, Y. Du, Y. Ding, J. Cao ve J. Lv, «Effective Grounding of the Photovoltaic Power Plant Protected by Lightning Rods,» *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, cilt 63, no. 4, pp. 1128-1136, August 2021.
- [55] B. Kermani, R. Shariatinasab, M. Khorshidi ve J. He, «Risk Analysis of the Lightning-Related Transients on Photovoltaic Systems: Application to a Solar Power Plant Without a Lightning Protection System,» *IEEE Transactions On Power Delivery*, cilt 40, no. 1, pp. 618-629, February 2025.
- [56] I. Hetita, A. S. Zalhaf, D.-E. A. Mansour, Y. Han, P. Yang ve C. Wang, «Accurate modeling of photovoltaic systems for studying the transient effects of lightning strikes,» *20218th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE2021)*, pp. 429-438, 10–12 September 2021.
- [57] Y. Wanga, X. Yaob, S. Taa, X. Zhanga ve Y. Lina, «Study on lightning transient behavior of photovoltaic,» *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, pp. 390-396, 2019 .
- [58] P. Bokoro ve W. Doorsamy, «Investigation of lightning surge effects on a grid-connected PV plant,» *IEEE international conference on high voltage engineering and application*, pp. 1-4, 2018.
- [59] K. Yamamoto, Y. Kubo ve S. Sumi, «Transient grounding characteristic of wind turbine affecting back-flow lightning current in to distribution,» *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, pp. 1-5, 2016.
- [60] Y. Wang, X. Zhang ve S. Tao, «Modeling of Lightning Transients in Photovoltaic Bracket Systems,» *IEEE Access*, 2019.
- [61] Y. Zhang, H. Chen ve Y. Du, «Transients in solar photovoltaic systems during lightning strikes to a transmission line,» *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 1-14, 2022.
- [62] R. Shariatinasab, F. Ajri ve H. Daman-Khorshid, «Probabilistic evaluation of failure risk of transmission line surge arresters caused by lightning flash,» *IET Gener. Transm. Distrib.*, cilt 8, no. 2, pp. 193-202, 2014.
- [63] P. Vangala, M. Ropp, K. Haggerty K, K. Lynn ve W. Wilson, «Field measurements of lightning-induced voltage transients in PV arrays,» *Photovoltaic specialists conference*, pp. 1-4, 2008.
- [64] K. Sakai ve K. Yamamoto, «Lightning Protection of Photovoltaic Power Generation System,» *2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA)*, pp. 7-11, 2013.
- [65] H. Sueta, A. Mocelin, R. Zilles, P. Obase ve E. Boemeisel, «Protection of photovoltaic systems against lightning experimental verifications and techno-economic analysis of protection,» *2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA)*, pp. 354-359, 2013.

- [66] R. S. Brock, «Modeling Light Scattering From Biological Cells Using Finite-Difference Time Domain Method,» *East Carolina University*, 2007.
- [67] Y. Baba, N. Nagaoka ve A. Ametani, «Modeling of Thin Wires in a Lossy Medium for FDTD Simulations,» *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, cilt 47, no. 1, pp. 54-60, 2005.
- [68] T. Noda ve S. Yokoyama, «Development of Surge Simulation Code Based on Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Approximation of Maxwell's Equations,» *CRIEPI - Central Research Institute of Electric Power Industry*, 2001.
- [69] Y. Bo, Z. Bi-hua, C. Yong-guang ve M. Xin, «Influences of Mesh Size and Lightning Channel Length on Lightning Electromagnetic Field Calculation Using FDTD Algorithm,» *CEEM*, pp. 349-352, 2009.
- [70] T. Noda, A. Tatematsu ve S. Yokoyama, «Improvements of an FDTD-based surge simulation code and its application to the lightning over voltage calculation of a transmission tower,» *Electric Power Systems Research* , cilt 77, pp. 1495-1500, 2007.
- [71] A. Tatematsu ve A. Yamanaka, «Three-Dimensional FDTD-Based Simulation of Lightning-Induced Surges in Secondary Circuits With Shielded Control Cables Over Grounding Grids in Substations,» *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, cilt 65, no. 2, pp. 528-538, 2023.
- [72] B. Li, J. Cheng, X. Zhang, Y. Yuan , R. Zhang ve Z. Li, «A lightning surge analysis in a PV system based on the FDTD method,» *2022 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)* , pp. 1-3, 2022.
- [73] M. A. Hossain ve M. R. Ahmed, «Study and Protection of Lightning Over voltage on DC Cables of Solar Power Generation,» *8th International Conference on Electrical and Computer Engineering*, pp. 325-328, 2014.
- [74] M. R. Karim ve M. R. Ahmed, «Analysis of Electromagnetic Induction due to Lightning on a Large-Scale Solar Power Generation,» *2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*, pp. 1-5, 2019.
- [75] B. Li, Y. Du ve M. Chen, «An FDTD Thin-Wire Model for Lossy Wire Structures With Noncircular Cross Section,» *IEEE Transactions On Power Delivery*, cilt 33, no. 6, pp. 3055-3064, 2018.
- [76] A. Tatematsu ve T. Noda, «Three-Dimensional FDTD Calculation of Lightning-Induced Voltages on a Multiphase Distribution Line With the Lightning Arresters and an Overhead Shielding Wire,» *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, cilt 56, no. 1, pp. 159-167, 2014.
- [77] C. J. Railton, D. L. Paul, I. J. Craddock ve G. S. Hilton, «The Treatment of Geometrically Small Structures in FDTD by the Modification of Assigned Material Parameters,» *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, cilt 53, no. 12, pp. 4129-4135, 2015.
- [78] M. R. Ahmed, M. R. Karim ve M. A. Hossain, «Protection of Solar Power Generation System from Lightning Induced Overvoltage,» *25th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*, pp. 396-399, 2022.
- [79] M. Kalantari ve S. H. H. Sadeghi, «An Efficient Surface Integral Equation-Method of Moments for Analysis of Electromagnetic Shielding Effectiveness of a Perforated Isotropic and Lossy Enclosure,» *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, pp. 1-9, 2024.

- [80] M. R. Alemi, S. H. H. Sadeghi ve H. Askarian-Abyaneh , «A Marching-on-in-Time Method of Moments for Computation of Transient Potential Rise of Grounding Grids Exposed to Lightning Strikes,» *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, cilt 65, no. 5, pp. 1484-1491, 2023.
- [81] B. Lewke, S. Krämer, J. Kindersberger , J. Kirchhof ve Y. M. Hernández, «EMC Analysis of a Wind Turbine Blade's Lightning Protection System,» *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1-4, 2007.
- [82] Z.-X. Li, Y. Yin, C.-X. Zhang ve L.-C. Zhang, «A Mathematical Model for the Transient Lightning Response from Grounding Systems,» *Progress In Electromagnetics Research B*, cilt 57, pp. 47-61, 2014.
- [83] Z.-X. Li, G.-F. Li, . J.-B. Fan ve Y. Yin, «Quasi-Static Complex Image Method For A Current Point Source In Horizontally Stratified Multilayered Earth,» *Progress In Electromagnetics Research B*, cilt 34, pp. 187-204, 2011.
- [84] A. F. Otero, J. Cidrh ve J. L. d. Alarno, «Frequency-Dependent Grounding System Calculation by Means of a Conventional Nodal Analysis Technique,» *IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999*, cilt 14, no. 3, pp. 873-878, 1999.
- [85] F. E. Gardiol, «Mixed Potential Integral Equation Methods for Multilayered Structures,» *Mixed Potential Integral Equation Methods for Multilayered Structures*, pp. 16-26, 1996.
- [86] R. Araneo ve S. Celoui, «Extraction of Equivalent Lumped Circuits of Discontinuities Using the Finite-Difference Time-Domain Method,» *Proc. IEEE Electromagn. Compat. Symp.*, cilt 1, pp. 119-122, 2002.
- [87] R. Araneo, G. Lovat ve S. Celozzi, «Transient response of grounding systems of wind turbines under lightning strikes,» *Proc. of the 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2014)*, pp. 1-4, 2014.
- [88] R. Araneo, M. Maccioni, S. Lauria ve S. Celozzi, «Analysis of the Lightning Transient Response of the Earthing System of Large-Scale Ground Mounted PV Plants,» *IEEE Manchester PowerTech*, pp. 1-6, 2017.
- [89] I. Hetita, D.-E. A. Mansour, Y. Han, P. Yang, C. Wang ve A. S. Zalhaf, «Investigation of Induced Overvoltages on DC Cables of PV System Subjected to Lightning Strikes Using FDTD Method,» *IEEE Transactions On Elektromagnetic Compatibility*, cilt 65, no. 4, pp. 1124-1132, 2023.
- [90] J. Cao, Y. Du , Y. Ding, B. Li, R. Qi, Y. Zhang ve Z. Li, «Lightning Surge Analysis of Transmission Line Towers With a Hybrid FDTD-PEEC Method,» *IEEE Transactions On Power Delivery RANS ACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 37, NO. 2, APRIL 2022*, cilt 37, no. 2, pp. 1275-1283, 2022.
- [91] R. Qi, Y. Ding, Y. Du, H. Cai, L. Jia, X. Xiao, A. Liu ve Y. Li, «Hybrid TDPEEC/FDTD Method for Lightning Transient Analysis in Solar Panels,» *IEEJ Transactions On Electrical And Electronic Engineering*, cilt 17, p. 1133–1140, 2022.
- [92] I. Hetita, D. A. Mansour, Y. Han, P. Yang, C. Wang, M. M. F. Darwish, M. Lehtonen ve A. S. Zalhaf, «Evaluating transient behaviour of large-scale photovoltaic systems during lightning events using enhanced finite difference time domain method with variable cell size approach,» *The Institution of Engineering and Technology*, pp. 636-646, 2024.

- [93] Z. Du, Y. Ding , Y. Du, . X. Zhao ve R. Qi, «Performance Assessment of Grounding System for Large-Scale Grid-Connected-Photovoltaic System Using the PEEC-MTL Hybrid Model,» *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, pp. 1-9, 2024.
- [94] G. Ala, S. Favuzza , E. Francomano ve G. Zizzo , «On the Distribution of Lightning Current among Interconnected Grounding Systems in Medium Voltage Grids,» *Energies* 2018, 11, 771, cilt 11, no. 771, pp. 1-16, 2018.
- [95] G. Ala, M. C. D. Piazza, A. Ragusa, F. Viola ve G. Vitale, «EMI Analysis in Electrical Drives Under Lightning Surge Conditions,» *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, cilt 54, no. 4, pp. 850-859, 2012.
- [96] D. Subedi, «Lightning Induced Over-voltages in Power Transformer and Voltage Spikes in Connected Load,» *Aalto University-Thesis for the degree of Master of Science in Technology*, pp. 1-61, 2017.
- [97] J. G. Zola, «Simple Model of Metal Oxide Varistor for Pspice Simulation,» *IEEE Transactions On Computer-Aided Design Of Integrated Circuits And Systems* , cilt 23, no. 10, pp. 1491-1494, 2004.
- [98] B. Kermani ve R. Shariatinasab, «Protection of Photovoltaic Systems Against Direct Lightning Strokes,» *IEEE Transactions On Power Delivery*, cilt 40, no. 1, pp. 301-313, 2025.
- [99] P. Pinceti ve M. Giannettoni, «A simplified model for zinc oxide surge arresters,» *IEEE Trans. Power Del.*, cilt 14, pp. 393-398, 1999.
- [100] H. Chena, Y. Zhang, Y. Du ve Q. S. Cheng, «Comprehensive transient analysis for low-voltage system in a wind turbine under direct lightning,» *Electrical Power and Energy Systems* , cilt 121, pp. 1-13, 2020.
- [101] K. M. Coperich, A. Cangellaris ve A. Cangellaris, «Enhanced Skin Effect for Partial-Element Equivalent-Circuit (PEEC) Models,» *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, cilt 48, no. 9, 2000.
- [102] G. Wollenberg ve S. V. Kochetov, «PEEC method: circuit models for electromagnetic field problems,» *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, cilt 30, no. 4, pp. 1283-1295, 2011.
- [103] N. Filipe, C. Cardoso, . J. Mendes, D. Duarte, L. Perro ve M. M. Fernandes, «A methodology for estimating transmission lines lightning performance using a statistical approach,» *International Conference On Lightning Protection*, pp. 1-6, 2016.
- [104] N. H. Zaini, M. Z. A. Ab-Kadir, M. A. M. Radzi, N. Azis, N. I. Ahmad, M. S. M. Nasir, M. Izadi, N. F. Ab Aziz ve Z. Ali, «Lightning Surge on the DC and AC Side of Solar PV System,» *The 11th Asia-Pacific International Conference On Lightning*, pp. 1-5, 2019.
- [105] M. Jamali, M. Niasati ve M. Jazaeri, «Lightning analysis of adjacent grounding systems using multi-conductor transmission line method,» *IET Sci., Meas. Technol.*, cilt 14, no. 10, pp. 848-852, 2020.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Gonca Çam

Akademik Konferans Sunumları:

- **Makale:** Educational Study on Performance Comparison of PID, Fuzzy Logic-PID, and Bode Editor Techniques for Series Wound DC Motor Speed Control.
Konferans: 11 European Conference on Renewable Energy Systems(18-20 May 2023)
- **Makale:** Technological Developments of SMES Systems in Distribution Networks.
Konferans: Cukurova 11th International Scientific Researches Conference(22-24 August 2023)

Sertifikalar:

- **PRIMAVERA P6 ‘Basic&Advanced Project Management’**, Akım Mühendislik, (20 Haziran 2023)
- **Cathodic protection, grounding and lightning rod inspection specialist**, Türk Standartları Enstitüsü(TSE), (Ekim 2014)