MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE DEVREYE ALMA VE İŞLETME SIRASINDA OLUŞAN ARIZALARIN İNCELENMESİ

METİN GÖKGÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Bülent ORAL

EŞ-DANIŞMAN

Prof. Dr. Şafak SAĞLAM

İSTANBUL, 2024

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE DEVREYE ALMA VE İŞLETME SIRASINDA OLUŞAN ARIZALARIN İNCELENMESİ

METİN GÖKGÖZ

523120041

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Bülent ORAL

EŞ-DANIŞMAN

Prof. Dr. Şafak SAĞLAM

İSTANBUL, 2024

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının her aşamasında beni destekleyen, yorumlarıyla motive eden ve yönlendiren, bana çok şey öğreten değerli danışman hocalarım Prof. Dr. Bülent Oral ve Prof. Dr. Şafak Sağlam' a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Her zaman yanımda duran ve bana destek olan aileme teşekkürü borç bilirim.

Ocak 2024 Metin Gökgöz

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ÖZET iv
ABSTRACT v
SEMBOLLER vi
KISALTMALAR vii
ŞEKİL LİSTESİ viii
TABLO LİSTESİ xi
1. GİRİŞ 1
2. TEORİK BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI 3
2.1. Tarihçe 3
2.2. Fotovoltaik Güç Santralleri ve Bileşenleri 5
2.2.1. Fotovoltaik (PV) panel 6
2.2.2. İnvertör 7
2.2.3. Bağlantı kutusu, diyot 8
2.2.4. Transformatör 10
2.2.5. Kesici 10
2.2.6. Hava ölçüm istasyonu 12
2.2.7. Şebeke 12
2.3. Fotovoltaik Güç Santralleri Kurulum Aşaması 13
2.4. Fotovoltaik Güç Santrallerinde Meydana Gelebilecek Elektriksel Arızalar 16
2.4.1. Fotovoltaik güç santralleri AC kısım arızaları 17
2.4.2. Fotovoltaik güç santralleri AC&DC kısım arızaları 17
2.4.3. Fotovoltaik güç santralleri DC kısım arızaları 19

2.5. MATLAB / Simulink.....23
3. MATERYAL VE METOT.....26
3.1. Modeli Oluşturulan Fotovoltaik Güç Santrali Hakkında Bilgiler.....27
3.2. MATLAB Simulink Model.....29
3.3. MATLAB Simulink Modelinde Oluşturulan Elektriksel Arızalar.....33
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....44
4.1. Şebeke Kaynaklı Faz-Faz Kısa Devre Arızası.....44
4.2. Şebeke Kaynaklı Açık Devre Arızası.....45
4.3. İnvertör (Açık Devre) Arızası.....46
4.4. DC Taraf Açık Devre Arızası.....47
4.5. DC Taraf Hat-Toprak Kısa Devre Arızası.....49
4.6. DC Taraf Hat-Hat Kısa Devre Arızası.....50
4.7. Fotovoltaik Modül Arızası.....51
4.8. Çevresel Etkiler (Gölgelenme).....52
4.9. Tartışma.....53
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....56
KAYNAKLAR.....58
ÖZGEÇMİŞ.....65

ÖZET

FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE DEVREYE ALMA VE İŞLETME SIRASINDA OLUŞAN ARIZALARIN İNCELENMESİ

Elektrik enerjisi üretiminde kullanılan fosil yakıtlardan kaynaklı olarak artan çevre kirliliği ve küresel ısınma gibi problemler yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Bu duruma ek olarak azalan fosil yakıt rezervi ve ülkeler için enerji arz güvenliğini sağlamak amacıyla enerji üretim kaynaklarını çeşitlendirme gereksinimi yenilenebilir enerji kaynakları kullanımını bir zorunluluk haline getirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında coğrafi koşullardan bağımsız olarak en kolay faydalanılabilen enerji kaynağı güneştir. Ülkemizdeki kurulu gücün yaklaşık %7'si fotovoltaik güç santrallerinden oluşmaktadır ve bu santrallerinin sayıları her geçen gün artmaya devam etmektedir. Güneş enerjisine olan talep, Türkiye' de de tüm dünyada olduğu gibi artan enerji ihtiyacı da göz önüne alındığında artarak devam edecektir. Enerji verimliliğini artırmak için üretim yapılabilen saatlerde fotovoltaik güç santrallerinin kesintisiz üretim yapabilmesi fosil yakıtların tüketimini azaltmak için önemlidir. Bu nedenle kesintisiz çalışmanın önüne geçen durumları ve arızaları tespit etmek bir gerekliliktir. Bu alanda daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde fotovoltaik güç santrallerinde yaşanan arızaların kategorize edildiği yayınlar ve elektriksel arızaların modellendiği yayınlar ayrı ayrı bulunmaktadır. Ancak fotovoltaik güç santrallerinde devreye alma ve işletme sırasında karşılaşılan zorlukları detaylı olarak ele alan ve elektriksel arızaları hem teorik hem pratik olarak inceleyen, sanal ve gerçek ortamda model oluşturan akademik çalışmalarda kısıtlılık olduğu görülmektedir. Bu bağlamda ilgili çalışmalar için özellikle yerel bazlı olanlara gereksinim vardır. Bu çalışmada fotovoltaik güç santrallerinin devreye alınması ve işletmesi sırasında yaşanan ve / veya yaşanabilecek arızalar kategorize edilecek ve elektriksel arızalar MATLAB / Simulink üzerinde model oluşturularak incelenmektedir. Elde edilen sonuçların akademik çalışmalara kaynak oluşturması ve sektördeki firmalara saha uygulamalarına katkı sağlaması amacıyla paylaşılması hedeflenmektedir.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF FAILURES DURING COMMISSIONING AND OPERATION IN PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS

Problems such as increasing environmental pollution and global warming due to fossil fuels used in energy production have revealed the need for renewable energy sources. In addition to this situation, the decreasing fossil fuel reserves and the need to diversify energy production resources in order to ensure energy supply security for countries have made the use of renewable energy sources a necessity. Among the renewable energy sources, the most easily utilized energy source, regardless of geographical conditions, is the sun. Approximately 7% of the installed power in our country consists of photovoltaic power plants and the number of photovoltaic power plants continues to increase day by day. The demand for solar energy will continue to increase in Turkey as it is in the whole world, considering the increasing energy need. In order to increase energy efficiency, the uninterrupted production of photovoltaic power plants during production hours is important to reduce the consumption of fossil fuels. For this reason, situations and malfunctions that prevent uninterrupted operation should be detected. When the previous studies in this field are examined, there are publications in which faults in photovoltaic power plants are categorized and publications in which electrical faults are modeled separately. However, there are limitations in academic studies that deal with the difficulties encountered in commissioning and operation in photovoltaic power plants in detail, examines electrical faults both theoretically and practically, and create models in virtual and real environments. In this context, there is a need for relevant studies, especially locally based ones. In this study, the possible failures that may be occur during the commissioning and operation of photovoltaic power plants are categorized and the electrical failures are examined by creating a model on MATLAB / Simulink. It is aimed to share the results obtained in order to create a resource for academic studies and to contribute to the field applications to the companies in the sector.

SEMBOLLER

PV **:** Fotovoltaik

V **:** Volt

kV **:** Kilovolt

A **:** Amper

W **:** Watt

kW **:** Kilowatt

MW **:** Megawatt

kVA **:** Kilovolt-Amper

MVA **:** Megavolt-Amper

kVAr **:** Kilovolt-Amper Reaktif

MVAr **:** Megavolt-Amper Reaktif

m^2 **:** Metre kare

°C **:** Santigrat derece

t **:** Zaman (s)

T **:** Sıcaklık (°C)

DC **:** Doğru akım

AC **:** Alternatif akım

W/m^2 **:** Güneş ışınım şiddeti

RLC **:** Direnç bobin kapasitör

KISALTMALAR

ADC **:** Analog Dijital Çevirici (Analog Digital Converter)

ANN **:** Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network)

PID **:** Oransal İntegral Türevsel (Proportional Integral Derivative)

MPPT **:** Maksimum Güç Noktası Takibi (Maximum Power Point Tracking)

SCADA **:** Gözetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemi (Supervisory Control and Data Acquisition)

OG **:** Orta Gerilim

AG **:** Alçak Gerilim

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Fotovoltaik enerjiden faydalanma yolculuğu..... 4

Şekil 2.2 Fotovoltaik güç santrali genel sistem ekipmanları..... 5

Şekil 2.3 Fotovoltaik paneller..... 7

Şekil 2.4 İnvertör 8

Şekil 2.5 İnvertör, transformatör ve orta gerilim (OG) hücre bölmesi 8

Şekil 2.6 Birleştirici bağlantı kutusu iç görünüm 9

Şekil 2.7 Birleştirici bağlantı kutusu dış görünüm 9

Şekil 2.8 Yükseltici transformatör 10

Şekil 2.9 OG hücre.....11

Şekil 2.10 Kesici mekanizması.....11

Şekil 2.11 Hava ölçüm istasyonu örneği 12

Şekil 2.12 Fotovoltaik güç santrallerinde meydana gelebilecek elektriksel arızalar.....16

Şekil 2.13 Seri ve paralel ark arızaları 18

Şekil 2.14 Fotovoltaik sistem arıza örnekleri 19

Şekil 2.15 Blok ve bypass diyotları 21

Şekil 2.16 AC taraf faz-faz kısa devre arızası akım değişimi 24

Şekil 2.17 AC taraf faz-faz kısa devre arızası gerilim değişimi 24

Şekil 2.18 DC taraf açık devre arızası akım ve gerilim değişimi 25

Şekil 2.19 DC taraf hat-hat kısa devre arızası akım ve gerilim değişimi 25

Şekil 2.20 DC taraf hat-toprak kısa devre arızası gerilim değişimi 25

Şekil 3.1 Tez çalışmasında izlenen adımları gösteren akış diyagramı.....26

Şekil 3.2 Fotovoltaik güç santrali invertör, transformatör ve şebeke bağlantısı 28

Şekil 3.3 Haberleşme mimarisi.....29

Şekil 3.4 MATLAB Simulink modeli genel görünüm.....30

Şekil 3.5 MATLAB Simulink model blok diyagram gösterimi 31

Şekil 3.6 Fotovoltaik panel detayları 32

Şekil 3.7 Üç faz kesici bloğu.....32

Şekil 3.8 Üç faz arıza bloğu 33

Şekil 3.9 Şebeke kaynaklı faz-faz kısa devre arızası akış diyagramı 36

Şekil 3.10 Şebeke kaynaklı açık devre arızası akış diyagramı.....37

Şekil 3.11 İnvertör açık devre arızası akış diyagramı.....38

Şekil 3.12 DC taraf açık devre arızası akış diyagramı.....39

Şekil 3.13 DC taraf hat-toprak kısa devre arızası akış diyagramı 40

Şekil 3.14 DC taraf hat-hat kısa devre arızası akış diyagramı 41

Şekil 3.15 Fotovoltaik modül arızası akış diyagramı.....42

Şekil 3.16 Gölgelenme durumu akış diyagramı 43

Şekil 4.1 Şebeke kaynaklı faz-faz kısa devre arızası 44

Şekil 4.2 Şebeke kaynaklı faz-faz kısa devre arızası DC ölçümler 44

Şekil 4.3 Şebeke kaynaklı faz-faz kısa devre arızası AC ölçümler 45

Şekil 4.4 Şebeke kaynaklı açık devre arızası.....45

Şekil 4.5 Şebeke kaynaklı açık devre arızası DC ölçümler.....45

Şekil 4.6 Şebeke kaynaklı açık devre arızası AC çıkış akım ve gerilimi.....46

Şekil 4.7 AC taraf invertör açık devre arızası 46

Şekil 4.8 AC taraf invertör açık devre arızası dc ölçümler 47

Şekil 4.9 AC taraf invertör açık devre arızası ac ölçümler 47

Şekil 4.10 DC taraf açık devre arızası-1 48

Şekil 4.11 DC taraf açık devre arızası-2 48

Şekil 4.12 DC taraf açık devre arızası DC ölçümler.....48

Şekil 4.13 DC taraf açık devre arızası AC ölçümler.....49

Şekil 4.14 DC taraf hat-toprak kısa devre arızası 49

Şekil 4.15 DC taraf hat-toprak kısa devre arızası DC ölçümler 50

Şekil 4.16 DC taraf hat-toprak kısa devre arızası AC ölçümler 50

Şekil 4.17 DC taraf hat-hat kısa devre arızası 50

Şekil 4.18 DC taraf hat-hat kısa devre arızası DC ölçümler 51

Şekil 4.19 DC taraf hat-hat kısa devre arızası AC ölçümler 51

Şekil 4.20 Modül arızası.....51

Şekil 4.21 Modül arızası DC ölçümler.....52

Şekil 4.22 Modül arızası AC ölçümler.....52

Şekil 4.23 Işıma miktarı 1000 W/m^2 iken üretilen akım ve gerilim 52

Şekil 4.24 Işıma miktarı 750 W/m^2 iken üretilen akım ve gerilim.....52

Şekil 4.25 Işıma miktarı 500 W/m^2 iken üretilen akım ve gerilim.....53

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Fotovoltaik güç santrallerinde görülen elektriksel arızalar 22

Tablo 3.1 MATLAB Simulink üzerinde modellenen fotovoltaik güç santrallerinde meydana gelebilecek elektriksel arızaların oluşturulma yöntemleri ve açıklamaları 35

1. GİRİŞ

Enerji üretmek için kullanılan yöntemler ve kaynaklar her geçen gün değişmekte ve çeşitlenmektedir. Alternatif enerji kaynakları arasında fotovoltaik güç santralleri, son yıllarda en çok yatırım yapılan yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir [1]. Fotovoltaik güç santralleri fosil yakıt kullanılarak, enerji üreten santrallere karşı en verimli ve sürdürülebilir seçenek haline gelmiştir [2]. Fotovoltaik güç santralleri fotovoltaik paneller vasıtası ile üretilen DC gücü eviriciler vasıtası ile AC güce dönüştürerek şebekeye bağlanmaktadır. Uygulama alanına göre şebekeye bağlanmadan çalışan fotovoltaik güç santralleri de bulunmaktadır. Fotovoltaik güç santrallerinin en büyük avantajlarından biri de her çeşit uygulamaya göre boyutlandırılabilmesidir. Bu boyutlandırma koşullar elverdiği ölçüde büyük olabilirken yalnızca bir evin enerji ihtiyacını karşılayacak kadar küçük de olabilmektedir [3]. Fotovoltaik güç santralleri uygulama yöntemine göre şebekeye alçak gerilim seviyesinden veya orta gerilim seviyesinden transformatörler yardımı ile gerilim seviyesi ayarlanarak bağlanabilir [4]. Fotovoltaik güç santralleri şebeke düzenleyici yardımcı tesisler olarak gerilim ve frekans düzenleme amacı ile kullanılabilmektedir [4-6].

Fotovoltaik güç santrallerinde karşılaşılan sorunları analiz edebilmek için önce sorunları kategorize ederek sorunların nedenlerini tespit etmek gerekmektedir. Karşılaşılan zorlukları kategorilere ayırmak için farklı yöntemler kullanılabilmektedir [7]. Alsharif vd. fotovoltaik güç santrallerinde karşılaşılan zorlukları maliyet, enerji üretiminin sürekli olmaması, teknik sorunlar, ekolojik - sosyal etkiler ve performans kısıtları olarak sınıflandırmıştır [8]. Arızaları daha detaylı kategorilere ayırabilmek için için öncelikle arızayı tanımlamak gerekir. Bir fotovoltaik güç santralinin çıkış gerilimini düşüren her etkiye arıza denilebilir. Arızalar etki sürelerine göre geçici veya kalıcı arızalar olarak adlandırılabilirler. Madeti vd. fotovoltaik güç santrallerindeki elektriksel arızaların sınıflandırılmasında en yaygın kullanılan başlıkları incelemiştir [9]. Bu çalışmada arızalar AC ve DC arızalar olmak üzere iki ana başlık altında incelenmiştir. Diminish vd. fotovoltaik güç santrallerindeki arızaları sınıflandırırken AC ve DC arızalara ek olarak kontrol sistemi için veri toplama aşamasında yaşanan arızaları da ekleyerek arızaları üç başlık altında ele almıştır [10]. Alam vd. fotovoltaik güç santrallerinde kullanılan fotovoltaik panelleri içerisindeki elektriksel arızaları; toprak arızaları, faz-faz arızaları, fotovoltaik ark arızaları üst başlıklarında incelemiş ve her başlıktaki arızaları oluşma sebeplerine göre alt gruplara ayırmıştır [11]. Chen vd. fotovoltaik panellerdeki

elektriksel arızaları MATLAB Simulink program üzerinde modellemiştir [12]. Kurukuru vd. fotovoltaik santrallerdeki arızaları diğer çalışmalardan daha farklı ve kapsamlı şekilde ele almıştır [13]. Bu çalışmada arızalar; çevresel arızalar, elektriksel arızalar ve fiziksel arızalar olarak üç ana başlıkta incelenmiştir. Bu başlıklardan elektriksel arızaları da kendi arasında inverter arızaları ve fotovoltaik dizi arızaları olarak ayırmış ve bu şekilde arızaları detaylandırarak kapsamlı bir gruplama yapmıştır. Ardından MATLAB Simulink programı üzerinde fotovoltaik santrali modelleyerek arızaların sınıflandırılması için oluşturulan algoritmayı bu model üzerinde incelemiştir. Berghout vd. fotovoltaik santrallerdeki arızaların tespiti için makine öğrenmesi algoritmaları kullanmıştır [14]. Demirel v.d. örnek bir fotovoltaik güç santrali için PSCAD programı kullanılarak model oluşturulmuş ve yıldırım darbe etkilerini oluşturulan model üzerinde incelenmiştir [15]. Bosman fotovoltaik santraller her ne kadar arıza riski düşük santraller olsa da fotovoltaik güç santralleri için yaygın olarak bilinen "Kur ve Unut" bakış açısının yanlış olduğunu ifade etmiştir [16]. Fotovoltaik güç santrallerinde oluşabilecek birçok farklı arıza çeşidi vardır. Arızaların türlerine göre sınıflandırılması ve olası etkilerinin modellenmesi uygulamalarda sağlayacağı kolaylık ve gelecekteki akademik yayınlara kaynak oluşturması açısından önemlidir.

Bu tez çalışmasında fotovoltaik güç santrallerinde devreye alma ve işletme sırasında karşılaşılan zorluklar incelenecektir, bu kapsamda elektriksel arızalar MATLAB Simulink program üzerinde modellenecektir. Simulink üzerinde fotovoltaik güç santralinin tamamı modellenebildiği gibi özel bir bölümü modellenip yalnızca o bölümün incelemesi de yapılabilir [17]. Popa vd. oluşturulan MATLAB Simulink modeli üç fazlı bir evirici üzerinden 0.4 kV alçak gerilim seviyesinde şebekeye bağlanmıştır [18]. Argyrou vd. bir fotovoltaik güç santrali MATLAB Simulink programında modellenerek çıkış gerilimine etki eden faktörler incelenmiştir [19]. Azhari Zakri vd. bir fotovoltaik güç santrali MATLAB Simulink üzerinde modellenmiş ve çıkış gerilimi gözlemlenmiştir [20]. Bu çalışmaların önemli bir kısmında model çıktıları paylaşılmış, model verilmemiştir. Bu tez çalışmasında önceki çalışmalardan farklı olarak, sahada oluşan bir arızanın MATLAB Simulink üzerinde benzetimi gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Fotovoltaik güç santrallerindeki elektriksel arızalar açıklanarak bu arızaların MATLAB / Simulink modeli üzerinde etkileri gözlemlenmiş ve elde edilen sonuçlar başka çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

2. TEORİK BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

Elektrik enerjisi günümüz dünyasının temelini oluşturan, tüm insan yaşayış sistemi ve düzeninin üzerine kurulu olduğu enerjidir. Neredeyse tüm sanayi, sağlık ve iletişim sistemleri elektrik enerjisi ile yürütülmektedir. Hızla artan insan nüfusu ve bu nüfusun beslenmesi için üretilen paketli gıdalar ve içme suyu arıtma sistemlerinin olduğu da düşünülürse elektrik enerjisinin yoksunluğu durumunda tüm insanları etkileyecek bir problemler silsilesi doğacağı aşikardır. Elektrik enerjisi, kömür, petrol, doğalgaz, güneş, rüzgar gibi birincil enerji kaynakları kullanılarak elde edilen ikincil bir enerjidir. Elektrik enerjisinin üretileceği birincil enerji kaynaklarının sürekliliğini sağlamak, sürdürülebilir enerji için gereklidir. Enerji üretiminde süreklilik olmaması bir çok sektörü olumsuz etkileyerek zarara yol açacaktır. Sürdürülebilir enerji üretimi için, tükenmekte olan ve kendini yenilemeyen birincil enerji kaynaklarına alternatif olarak, bir maliyet veya efor gerektirmeden kendini yenileyebilen, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim bir zorunluluk haline gelmiştir. Güneş enerjisi, coğrafi konuma bağlı olarak verimi değişmekle birlikte bu kaynaklar içerisinde farklı boyutlar ve ihtiyaçlar için en kolay kullanılabilen enerji kaynağıdır.

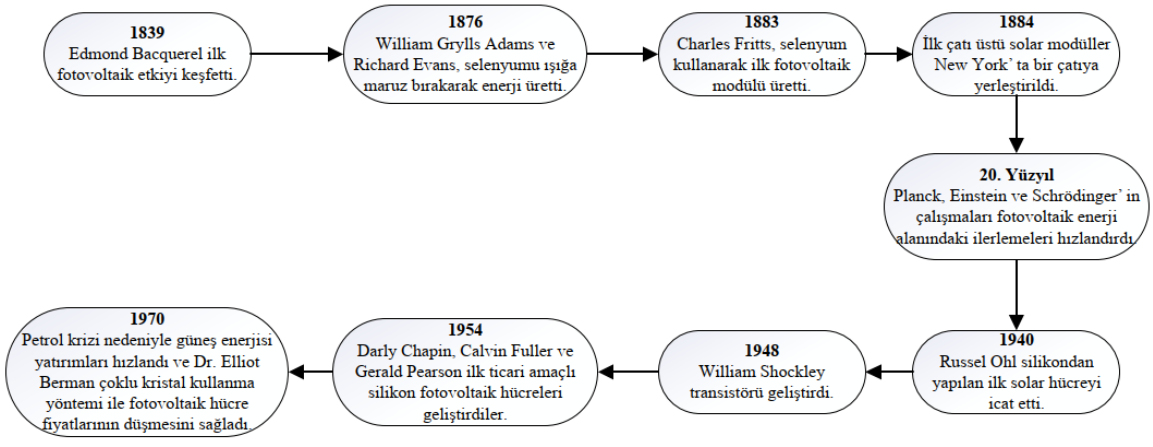
Bu çalışmada literatür incelemesi için Google Akademik ve ProQuest gibi akademik çalışma arama motorları kullanılmıştır. Kaynak çeşitliliği sağlamak amacıyla fotovoltaik güç santralleri ile ilgili dergi, makale, kitap, tez, akademik bildiri gibi çok geniş yelpazede bir literatür taraması yapılmıştır. Bu çalışmada fotovoltaik güç santrallerinin ortaya çıkışı, gerekliliği, fotovoltaik güç santralleri ve fotovoltaik güç santrallerinde oluşabilecek elektriksel arızalar ile ilgili bilgi verilmiş ve kaynak oluşturmak hedeflenmiştir. Ardından bir fotovoltaik güç santrali MATLAB Simulink programı üzerinde modellenerek simüle edilmiş ve elde edilen bulgular benzer çalışmaların çıktıları ile karşılaştırılmıştır.

2.1. Tarihçe

Güneş enerjisinden faydalanma fikrinin ortaya çıkış süreci, için Fransız fizikçi Edmond Becquerel' in 1939' da yaptığı deneye dayanmaktadır. Deneyde Bacquerel bir elektroliti asit çözeltisine daldırdıktan sonra ışığa maruz bırakarak gerilim ve akım gözlemlemiştir. 1876' da Willian Grylls Adams ve Richard Evans selenyum elementini ışığa maruz bırakarak

enerji üretmiştir [21].

1883 yılında mucit Charles Fritts selenyumdan ilk solar hücreyi üretmiştir. Selenyumun altın ile kaplanması ile elde edilen bu ilk modelin verimi %1' di. Yüksek maliyet ve düşük verimliliğinden kaynaklı olarak bu hücrelerin üretimine devam edilmemiştir. 19. Yüzyılda Max Planck, bugün Planck Yasası olarak bilinen ışımanın yaydığı elektromanyetik radyasyonu açıklamıştır. Bu çalışma Albert Einstein' a ilham vererek ışığın foton adı verilen küçük parçacıklardan oluştuğunu ve bu parçacıkların belirli bir miktar enerji içerdiğini öne sürmesini sağlamıştır. Einstein' ın bu önerisi kuantum mekaniğinin geliştirilmesininin ve Edwin Schrödinger' in dalga denklemini üreterek iletkenler ve yalıtkanlar arasındaki farkları ve yarı iletkenleri açıklamasının önünü açmıştır. 1940 yılına gelindiğinde Russel Ohl yanlışlıkla silikondan yapılan ilk solar hücreyi keşfetmiştir. William Shockley, Ohl' un keşfinden yola çıkarak ilk pratik transistörleri üretmiştir. Daryl Chapin, Calvin Fuller ve Gerald Pearson, "pozitif" ve "negatif" bağlantılardan yola çıkarak ilk ticari amaçlı silikon fotovoltaik hücreyi geliştirmiştir ve bu ilk hücrey %6 verime ulaşmıştır. Kısa süre sonra uyduları beslemek için güneş panelleri kullanmaya başlanmıştır ve 1958'de 1 W gücündeki 6 güneş pilinden oluşan Vanguard uydusu fırlatılmıştır. 1970' li yıllarda petrol krizi sebebiyle güneş enerjisi alanındaki yatırımlar hızlanmıştır. Dr. Elliot Bermann silikondan birden fazla kristal kullanmanın bir kristal kullanmaktan daha ekonomik olduğunu keşfederek solar panel fiyatlarının düşmesini sağlamıştır [21].



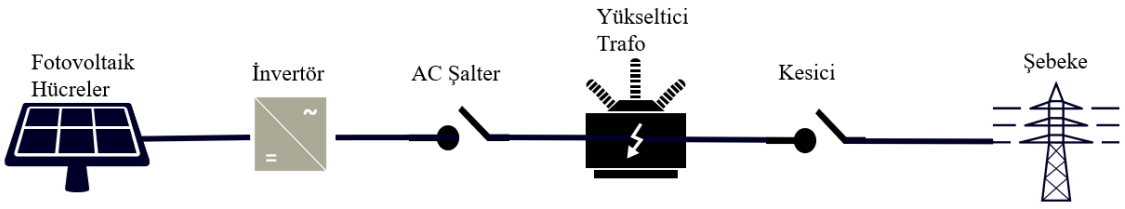
Şekil 2.1 Fotovoltaik enerjiden faydalanma yolculuğu

2.2. Fotovoltaik Güç Santralleri ve Bileşenleri

Fotovoltaik güç santralleri şebeke bağlantı şekillerine ve yerlerine göre kategorilere ayrılmaktadır. Şebeke bağlantı şekillerine göre, şebekeye bağlı fotovoltaik santraller ve şebekeden bağımsız fotovoltaik santraller olarak adlandırılmaktadır. Şebekeye bağlı fotovoltaik santraller kuruldukları yerlere göre, binalara entegre fotovoltaik santraller (örneğin çatı üstü fotovoltaik santraller) ve yere kurulan fotovoltaik santraller olarak ikiye ayrılmaktadır. Şebekeden bağımsız çalışan fotovoltaik santraller kurulu güçlerine göre, konutların enerji ihtiyacını karşılamak için kurulan küçük ve orta güçlü ev tipi fotovoltaik santraller ve sulama sistemi, elektrikli araç gibi sistemleri çalıştırmak için kullanılan daha yüksek güçlü fotovoltaik santraller olarak kategorize edilmektedir [22].

Fotovoltaik santraller her ne kadar farklı amaçlar ve farklı boyutlara göre kurulsa da temel bileşenleri benzerdir. Bu bileşenler; fotovoltaik panel, invertör, saha bağlantı kutusu, transformatör, anahtarlama elemanı ve bu ekipmanlar arasındaki kablolardır.

Tüm bu donanıma ek olarak işletme ve raporlamayı kolaylaştırmak adına fotovoltaik güç santrallerine uzaktan kontrol ve izleme sistemleri (SCADA) kurulmaktadır. Bu sistemler, invertörlerden ve santral sahasındaki diğer ekipmanlardan alınan verilerin anlık olarak uzaktan izlenebilmesini ve herhangi bir arıza durumundan alarm ve uyarı sistemleri ile erken bilgi vererek hızlı müdahale edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca koruma röleleri ve invertörlerden alınan arıza kayıt ve geriye dönük ölçüm değerleri ile arızaların kök sebepleri tespit edilebilmekte ve gelecekte aynı arızaların tekrar etmemesi için önlemler alınabilmektedir. SCADA sistemleri sayesinde fotovoltaik güç santrali, ihtiyaca göre aktif ve reaktif güç çıkış değerleri değiştirilerek aktif güç kontrol, reaktif güç kontrol, gerilim kontrol, MPPT, frekans kontrol modu gibi farklı çalışma modlarında çalıştırılabilmektedir [23].



Şekil 2.2 Fotovoltaik güç santrali genel sistem ekipmanları

2.2.1. Fotovoltaik (PV) panel

Fotovoltaik paneller, güneş ışığı sayesinde gerilim üreten ekipmanlardır. Fotovoltaik panellerdeki fotovoltaik hücrelerde n tipi ve p tipi yarı iletkenler bulunmaktadır. Hücreler birbirlerine seri bağlanarak hücrelerin ve sistemde kullanılacak invertörün çalışma gerilimine göre bir gerilim seviyesi elde edilmektedir. Birbirlerine seri bağlanmış bu fotovoltaik hücreler fotovoltaik modülleri oluşturmaktadır. Daha yüksek güç elde etmek amacıyla bir araya getirilen fotovoltaik modüller fotovoltaik panelleri meydana getirmektedir. Bir araya getirilen fotovoltaik panel gruplarına bir fotovoltaik dizi adı verilir. Fotovoltaik diziler birbirlerine paralel bağlanarak fotovoltaik güç santralinin çıkış akımı artırılır [24].

Fotovoltaik paneller hücre yapısına göre; ince film fotovoltaik paneller, tek kristalli fotovoltaik paneller ve çok kristalli fotovoltaik paneller olmak üzere üç grubu ayrılmaktadır [25].

- Bu panel çeşitlerinden tek kristalli fotovoltaik panellerin ömürleri ve verimleri diğer panel çeşitlerine göre daha yüksektir. Tek kristalli fotovoltaik panellerin verimleri yaklaşık olarak %20’ dir [26].
- Çok kristalli fotovoltaik panellerin başlıca avantajı ise üretim maliyetlerinin düşük olmasıdır [25].
- İnce film fotovoltaik panellerde ise kristal bulunmamaktadır. Bu paneller esnek yapıda olup genellikle geniş yüzeylere yapılan uygulamalarda tercih edilmektedir. İnce film fotovoltaik panellerin verimleri kristalli fotovoltaik panellerden daha düşüktür. İnce film fotovoltaik paneller, farklı yüzeylerde uygulanabilir olduğu ve güç üretebildiği ışınım spektrumu kristalli fotovoltaik panellere göre daha geniş olduğu için tercih edilmektedir [25, 26].



Şekil 2.3 Fotovoltaik paneller

2.2.2. İnvertör

İnvertörler doğru akımı alternatif akıma dönüştüren ekipmanlardır. İnvertörler sayesinde fotovoltaik panellerde üretilen DC güç şebekeye bağlanabileceği AC güce dönüştürülmektedir. İnvertörlerin iç yapıları uygulama alanına ve güç seviyesine göre farklılık göstermekle birlikte tek aşamalı yani yalnızca DC-AC dönüşüm yapan ve çok aşamalı yani hem DC-DC dönüştürücü içeren hem de DC-AC dönüşüm yapan invertörler üretilmektedir [6]. Fotovoltaik güç santrallerinde merkezi invertör, dizi invertör ve mikro invertör olmak üzere üç çeşit invertör kullanılmaktadır. Mikro invertörler dizi invertör ve merkezi invertöre göre daha az kullanılmaktadır, genellikle ev tipi uygulamalarda kullanılan küçük güçlü invertörlerdir. Dizi invertörler, merkezi invertörlerden daha küçük güçlü invertörlerdir ve fotovoltaik diziler invertöre doğrudan bağlanmaktadır. Merkezi invertörlerde ise fotovoltaik diziler ile invertörlerin arasında bir bağlantı birleştirme kutusu (combiner box) bulunur ve sahadan gelen diziler bu kutuda birleştirildikten sonra daha büyük kesitli bir kablo ile merkezi invertörün DC giriş bölümüne aktarılır [27, 28].

İnvertörler donanım ve yazılımlarının desteklediği çalışma modlarında çalıştırılarak esnek güç üretimi yapabilmekte ve güç çıkışları hızlı bir şekilde değiştirilebilmektedir. Bu hızlı tepki süresi invertörlerin hem şebekeye bağlı hem de şebekeden bağımsız çalışmalarda tercih edilmesini sağlamaktadır. Ancak fotovoltaik güç santrali uygulamalarında genellikle invertörler şebeke gerilimi olduğu durumda güç üretimi yapabilecek şekilde kurulmaktadır.



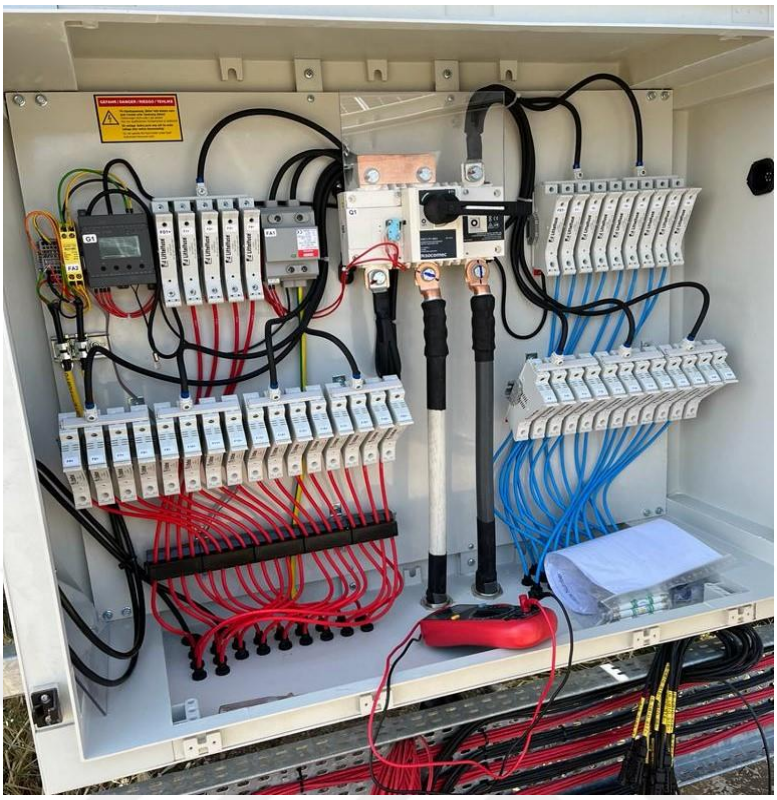
Şekil 2.4 İnvertör



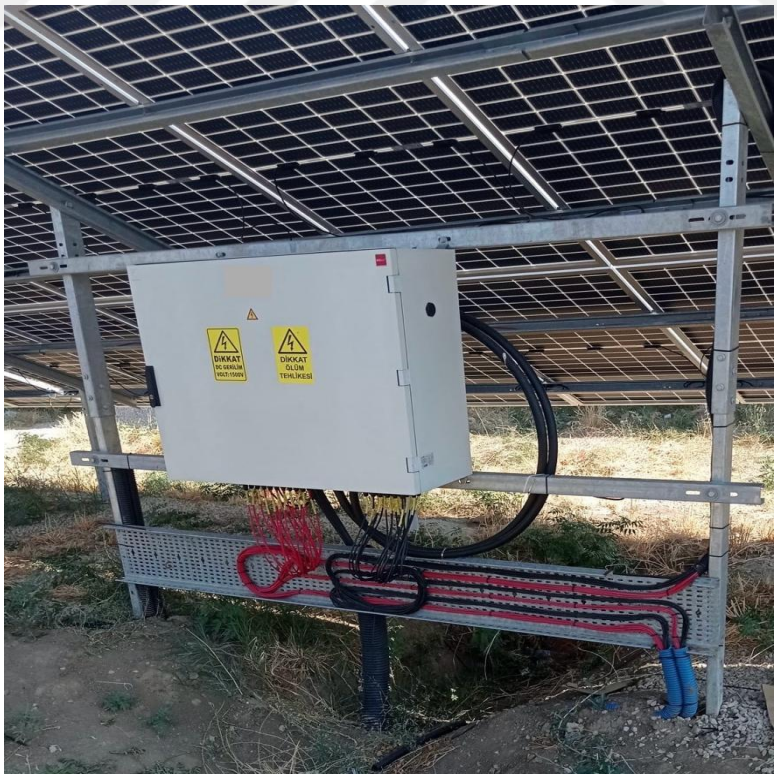
Şekil 2.5 İnvertör, transformatör ve orta gerilim (OG) hücre bölmesi

2.2.3. Bağlantı kutusu, diyot

Fotovoltaik panellerden oluşan fotovoltaik dizilerin birbirleri ile irtibatları için diyotlar ve merkezi invertör kullanılan fotovoltaik güç santrallerinde bu dizilerin invertör ile irtibatı için bağlantı kutuları kullanılır. Bağlantı kutularında enerji analizörü, dizi sigortaları ve DC şalter gibi ekipmanlar yer alır [29].



Şekil 2.6 Birleştirici bağlantı kutusu iç görünüm



Şekil 2.7 Birleştirici bağlantı kutusu dış görünüm

2.2.4. Transformatör

Fotovoltaik güç santrallerinde transformatörler invertör çıkışındaki AC geriliminin şebekeye bağlı santrallerde şebeke, şebekeden bağımsız santrallerde yük gerilimine yükseltilmesi için kullanılır [30].



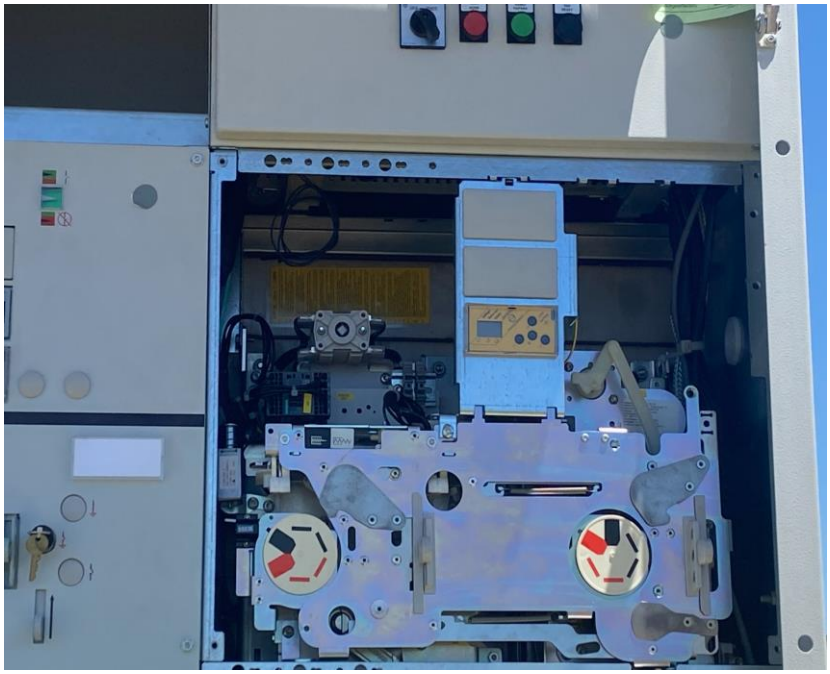
Şekil 2.8 Yükseltici transformatör

2.2.5. Kesici

Trafo çıkışında bulunur ve fotovoltaik üretim ile şebeke arasında açma-kapama yapmak için kullanılır [30]. Genellikle OG hücre bölmesi içerisinde bulunur.



Şekil 2.9 OG hücre



Şekil 2.10 Kesici mekanizması

2.2.6. Hava ölçüm istasyonu

Hava ölçüm istasyonları ışıma, sıcaklık, nem, rüzgar hızı gibi hava verilerini ölçerek kayıt altına alan sistemlerdir. Hava ölçüm verileri hem fotovoltaik güç santralleri kurulmadan önce kurulum planlanan alanın fotovoltaik güç üretimine uygunluğunu belirlemek hem de santral kurulumundan sonra fotovoltaik güç santralinin verimini ölçmek, geleceğe yönelik güç üretim tahmini oluşturmak için düzenli olarak verilerin kaydedilmesinde kullanılır [31].



Şekil 2.11 Hava ölçüm istasyonu örneği [32]

2.2.7. Şebeke

Şebekeye bağlı fotovoltaik güç santrallerinin bağlı olduğu sonsuz yük ve sonsuz güç varsayılan sistemdir. Fotovoltaik güç santrallerinin şebekeye bağlanma gerilimleri şebeke bağlantı noktasındaki gerilim seviyesine göre değişmektedir. Üretim kayıtları ve santralin kontrol sistemi için gerekli olan verilerin bir kısmı şebeke bağlantı noktasından alınan ölçümler ile elde edilir. Fotovoltaik santral çıkışlarında akım, santralden şebekeye doğru akar.

2.3. Fotovoltaik Güç Santralleri Kurulum Aşaması

Fotovoltaik güç santralleri kurulumundan önce santralin kurulacağı zeminin uygunluğu, santralin kurulması durumunda çevreye etkisi, güneşlenme miktarı gibi ölçüm ve araştırmalar yapılır, gerekli rapor ve onay süreçlerinin ardından proje uygulamasına geçilir. Projelendirme aşamasında fotovoltaik güç santralinin mekanik ve elektrik projeleri çizilmekte ve fotovoltaik panel, transformatör, invertör gibi kullanılacak malzemeler seçilmektedir. Seçilen malzemelerin sahaya sevk edilmesi aşamasından önce genellikle üretici tesislerinde fabrika kabul testleri yapılmaktadır. Bu testler her ürün tipi için örnek olarak yapılabileceği gibi sahaya gönderilecek tüm ürünler için de ayrı ayrı yapılabilmektedir. Fabrika kabul testleri üretici firmaların test prosedürlerine uygun olarak proje sahibi kuruluşun katılımıyla yapılmaktadır. Bu testlerde hem ürünlerin ihtiyaca uygunluğu hem de doğru çalışıp çalışmadığı test edilmektedir. Testlerden geçen ürünler kurulumlarının yapılması için sahaya sevk edilir.

Fotovoltaik güç santrallerinin kurulumunda öncelikle zemin düzenleme çalışmaları yapılmaktadır. Zemin düzenleme çalışmalarından sonra, projelendirme aşamasında belirlenen koordinatlara yerleştirilecek olan fotovoltaik modülleri taşıyacak sehpaların temel çalışmaları yapılmaktadır. Bu temellere sehpaların çakılma işlemi sonrasında fotovoltaik panellerin montaj çalışmalarına başlanmaktadır. Fotovoltaik panel montaj çalışmalarından sonra üretilecek gücü iletmek amacıyla kullanılan kabloların modüller ile invertörler arasında çekilmesi işlemleri için kablo kanalı açılması ve kablo çekim işlemleri yapılmaktadır. Tüm bu kurulum aşamalarında karşılaşılacak ilk zorluk hava şartlarıdır. Fotovoltaik güç santralleri üzeri açık bir alanda kurulduğu için mevsime göre değişmekle birlikte kurulum işlemleri doğrudan hava koşullarından etkilenmektedir. İnşaat ve montaj çalışmalarında işlem yapılacak ekipman ve zemindeki montaj çalışmalarının standartlara uygunluğu ilerleyen aşamalarda yaşanacak sorunların önüne geçmek için her aşamada değerlendirilerek çalışmalar yapılmaktadır. Panel montajlarının ve kablo çekimlerinin tamamlanmasının ardından panellerden toplayıcı bağlantı kutularına gelen ve toplayıcı bağlantı kutusundan invertörlere giden kablo bağlantıları yapılmaktadır. Elektriksel olarak kurulum aşamasında karşılaşılan problemlerin başında topraklama hataları gelmektedir. Kabloların kablo çekim işlemleri sırasında hasar görmesi veya bağlantı noktalarındaki problemlerden dolayı toprak teması oluşmasıyla toprak hataları meydana gelir. Eğer hatanın

yeri tahmin edilemiyorsa invertör bağlantı noktasından başlayacak şekilde adım adım diziler ayrılarak hatanın yeri tespit edilir ve hata giderilir. Kablolarda kurulum esnasında oluşabilecek hatalar devreye alma ve işletme sırasında maddi kayıplara ve zaman kaybına yol açacaktır, bu kayıpları önlemek adına kurulum aşamasında tüm kabloların süreklilik testleri yapılır. Kablo çekim işlemleri sırasında eksik veya yanlış etiketlemeden dolayı karışan kabloların yanlış noktalara çekilmesi bir diğer hatadır. Hatalı kabloların ucu kısa devre edilerek ölçü aleti ile veya kablo bulucu cihazlar ile hatalı kablo tespit edilip olması gereken yere taşınır. Yine yanlış etiketleme kaynaklı AC taraftaki çıkış kablolarının invertöre hatalı bağlanması sık karşılaşılan bir diğer sorundur. Faz sırası hatası olması durumunda invertörler devreye alınamayacaktır, bu hatanın varlığı tespit edildikten sonra bağlantı noktası izole edilerek kablolar sökülür ve doğru faz sırasına göre yeniden bağlantı yapılır. Özellikle yüksek güçlü merkezi invertörlerin çıkışlarında trafo veya kesici bağlantı noktasındaki kablo başlıkları yapılırken yapılan uygulama hataları nedeniyle kurulum sırasında arızalar görülebilir. Hatalı kablo başlığı yapılması sonucu ilgili kabloda hiç iletim olmayacağı gibi iletim olmasına rağmen aşırı ısınma meydana gelmesi de söz konusu olabilir. Isınma tespit edilen kablo bağlantı noktası, sistem enerjisiz bırakılarak sökülüp yeniden başlık yapılır aksi halde ısınma kaynaklı güç kayıplarına ve sonrasında yine ısınma kaynaklı diğer malzemelerin zarar görmesine neden olur [23, 33, 34].

Kablo bağlantı ve ekipman montaj işleri tamamlandıktan sonra fotovoltaik güç santralinin soğuk testleri ile devreye alma çalışmalarına başlanmaktadır. Soğuk testlerin yapılması devreye alma ve işletme sırasında karşılaşılabilecek sorunların tespiti ve hızlı çözülebilmesi için önem taşımaktadır. Soğuk testlerde devre süreklilik testleri, direnç ölçümleri ve ekipman fonksiyon testleri gibi testler yapılmaktadır. Soğuk testler tamamlandığında fotovoltaik güç santralinin enerjilenmesi için sıcak testler adı verilen devreye alma testlerine geçilmektedir. Sıcak testlerde fotovoltaik santraldeki ekipmanlar, toplayıcı bağlantı kutularındaki DC şalterler kapatılarak sırasıyla enerjilendirilmektedir. Toplayıcı bağlantı kutularında DC şalterleri kapatılan fotovoltaik dizilerin ardından bağlantı kutularından invertöre gücü iletecek olan kabloyu enerjilendirmek için invertör ile toplayıcı bağlantı kutusu arasındaki DC şalter de kapatılmaktadır. Bu işlem ile invertörün DC girişi enerjilendirildikten sonra invertöre başlama komutu verilerek invertör devreye alınmaktadır. Fotovoltaik güç sistemleri ada modda çalışarak bir mikro şebeke oluşturabilmelerine rağmen uygulamalarda birçok santral şebekeye bağlı olarak

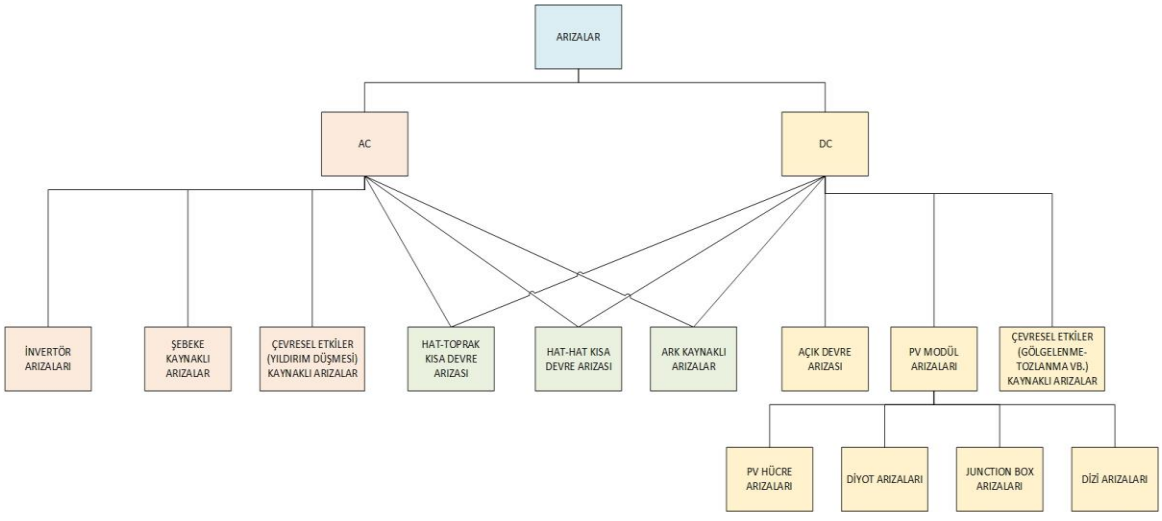
çalışmaktadır. Şebekeye bağlı çalışan invertörlerin senkronizasyon şartlarını sağlayıp devreye alınabilmesi için invertörün, üreteceği AC gerilimin dışında şebeke tarafında da gerilim bilgisini okuyabilmesi gerekmektedir. Bu sayede invertörlerin kontrol sistemleri, invertörde üretilen gerilim ile şebeke gerilimini karşılaştırarak senkronizasyon şartları uygun olduğu zaman invertörün devreye girmesi ve güç üretmesini sağlayabilmektedir. İnvertörlerin AC kısımlarına referans gerilimini iletmek için invertör çıkışlarında bulunan transformatörlerin ve transformatörler ile şebeke arasında anahtarlama işlemi yapan OG hücrelerin devreye alınması gerekmektedir. Transformatör ve OG hücre testlerinin soğuk testler sırasında yapılması ve transformatörlerin enerjilendirmeye hazır olması gerekmektedir. Transformatörler enerjilendirilirken, OG hücrelerdeki topraklama bıçakları açılarak toprak bağlantıları kesilmekte ardından kesici ve ayırıcılar kapatılarak şebeke gerilimi transformatörlere iletilmektedir. Enerjilenen transformatörlerin giriş ve çıkış gerilimleri ölçülerek invertör devreye alma aşamasına geçilmektedir. İnvertörlerin devreye alınması için son kontroller yapılarak invertörlere başlatma komutları verilmektedir. İnvertör kontrol sistemleri, başlatma komutu ile sistemdeki kontrolleri yapar ve içerisinde yüklü programda oluşturulmuş olan devreye alma şartları uygunsa invertör devreye alma işlemlerini başlatır. İnvertör devreye girerken, DC giriş şalterinin kapanması ve evirici devresinin enerjilenmesinin ardından üretilen AC gerilim referans noktasından alınan referans gerilimi ile senkron şartlarını sağlıyor ise invertör bünyesindeki AC şalter kapatılarak invertör ile şebeke arasındaki güç iletimi başlar. İlk devreye alma işlemlerinde invertör üretici firmaların katalog bilgilerinde belirtilen sürelerde invertörler çalıştırılarak sistemin çalışması gözlenmektedir ve elde edilen verilere göre yapılması gereken iyileştirme ve ayarlar yapılmaktadır.

Fotovoltaik güç santrali devreye alındıktan sonra üretilecek güç invertörde maksimum aktif güç olarak ayarlanabileceği gibi ihtiyaca göre invertörün güç sınırları içerisindeki aktif veya reaktif güç değerlerine de ayarlanabilmektedir. İleriye dönük üretim tahminleri veya geçmişe dönük verim hesaplamaları yapılabilmesi için hava ölçüm istasyonlarından alınan veriler haberleşme protokolleri ile kontrol sistemlerine entegre edilebilmektedir.

2.4. Fotovoltaik Güç Santrallerinde Meydana Gelebilecek Elektriksel Arızalar

Arızaların nedenlerini ve etkilerini inceleyebilmek adına fotovoltaik güç santrallerinde oluşan elektriksel arızalar AC arızalar ve DC arızalar olma üzere iki başlıkta incelenebilir. AC tarafta görülen arızalar invertör veya şebeke kaynaklı oluşabilir [35]. DC tarafta görülen arızalar sayıca AC taraf arızalarından fazladır. DC arızalar; fotovoltaik hücre arızaları, bypass diyot arızaları, bağlantı kutusu arızaları, açık devre arızası, kısa devre arızası, ark hatası ve toprak hatasıdır. Şekil 2.12' de, fotovoltaik güç santrallerinde meydana gelen elektriksel arızaların sınıflandırılması içeriğin daha iyi takip edilebilmesi adına grafik üzerinde gösterilmiştir.

Arızaların sınıflandırılmasında kullanılan farklı yöntemler vardır. Bu çalışmanın konusu fotovoltaik güç santrallerindeki elektriksel arızalardır. Fotovoltaik güç santrallerindeki elektriksel arızalar, arızalar üzerinde daha detaylı çalışılabilmesi ve çalışmanın daha anlaşılır olması amacıyla incelenme aşamasından önce sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma yapılırken daha önce yapılmış sınıflandırma çalışmaları göz önüne alındığı gibi hata tespit çalışmaları ve başka simülasyon çalışmaları da incelenmiştir [10, 36-40]. Elektriksel arızalardan takip eden bölümlerde açıklanmıştır [14, 41, 42].



Şekil 2.12 Fotovoltaik güç santrallerinde meydana gelebilecek elektriksel arızalar

2.4.1. Fotovoltaik güç santralleri AC kısım arızaları

AC tarafta meydana gelen arızalarda tüm sistemin gücü kesilebilir veya oluşan arıza sonucu sadece fotovoltaik sistem AC taraftan ayrılarak şebeke kesintisi meydana gelebilir [33, 43, 44].

İnvertör Arızaları: İnvertörlerde arıza meydana gelmesi durumunda DC güç sabit kalırken AC çıkış gücü azalır veya tamamen sıfıra iner. Buna göre fotovoltaik güç santrallerinde DC güç sabitken AC gücün azalması durumunda fotovoltaik modül, dizi veya DC kablo arızalarının değil doğrudan invertör arızasının meydana geldiği çıkarımı yapılabilir [45].

Şebeke Kaynaklı Arızalar: Şebeke kaynaklı arızalar arasında trafo merkezlerindeki, enerji nakil hatlarındaki ve hatta şebekeye bağlı başka güç santrallerindeki bileşenlerin hasar görmesi ve kısa devre, açık devre, aşırı yüklenme gibi arızalar yer almaktadır. Şebeke arızaları fotovoltaik güç santrallerinin şebeke bağlantısını doğrudan etkilemektedir. Şebeke arızaları senkronizasyon durumunu bozabilmekte veya düşük gerilimden dolayı fotovoltaik güç santralinin şebeke bağlantısının kesilmesine yol açabilmektedir [45, 46].

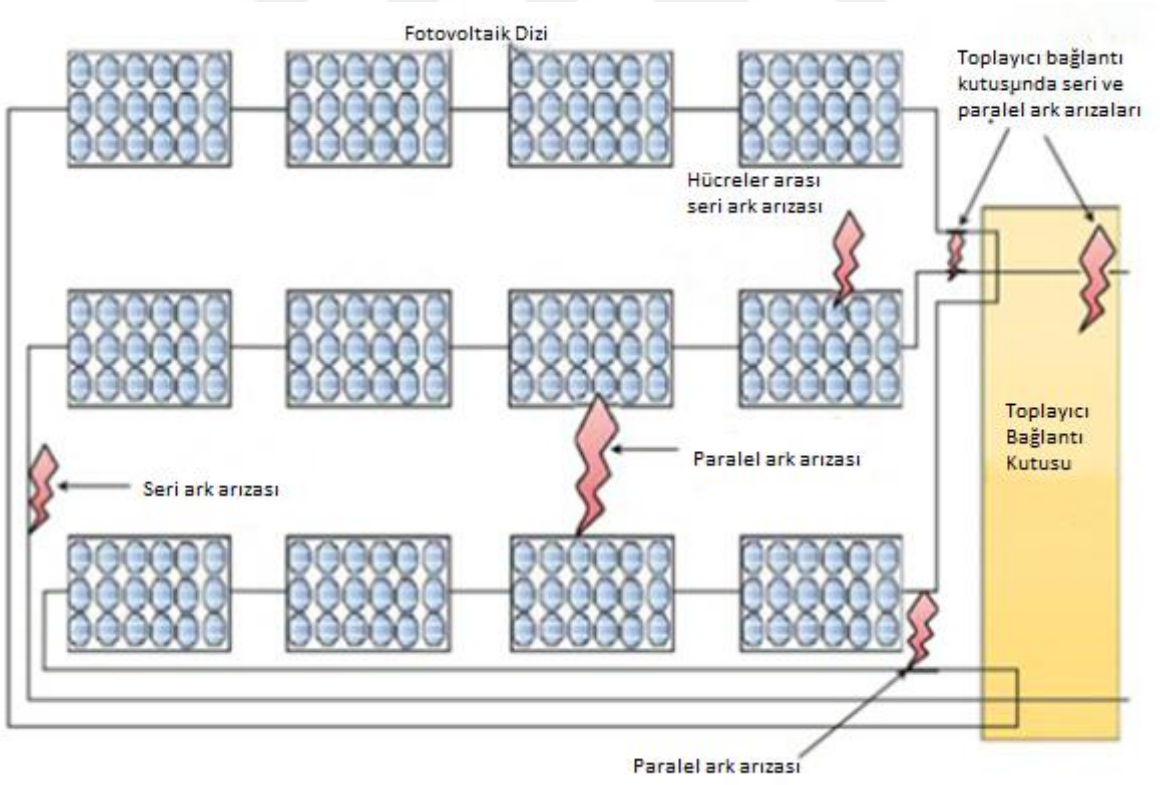
Çevresel Etkiler (Yıldırım Düşmesi) Kaynaklı Arızalar: Yıldırım düşmesi yüklenen bulutlardan toprağa bir akım akması durumudur. Yıldırım oluştuğunda, etki alanı içerisindeki elektronik cihazlarda kalıcı veya geçici hasar meydana gelebilir [41].

2.4.2. Fotovoltaik güç santralleri AC&DC kısım arızaları

Hat-Toprak Kısa Devre Arızası: Hat iletkenleri ile toprak potansiyeli arasında bir temas olduğunda hat-toprak kısa devre arızası oluşur. Hat-toprak kısa devre arızası, DC tarafta pozitif veya negatif iletken ile toprak arasında oluşurken AC tarafta faz iletkenleri ile toprak arasında oluşur. Bu nedenle AC taraftaki hat-toprak kısa devre arızası faz-toprak kısa devre arızası olarak adlandırılır. Fotovoltaik güç santrallerinde hat-toprak kısa devre arızası; yanlış manevra, hücrelerdeki çatlaklarda oluşan toz ve su kaçakları, iletkenlerin izolasyonlarının hasar görmesi gibi durumlarda oluşabilir. Hat-toprak kısa devresinden kaynaklı oluşabilecek hasarları önlemek amacıyla devredeki akıllı koruma röleleri uygun koruma parametreleri ile konfigüre edilir. Ayrıca invertörlerde toprak kaçaklarını tespit eden izolasyon test sistemleri bulunur. Bu sayede oluşan hatalar daha hızlı tespit edilip giderilebilir [13, 47].

Hat-Hat Kısa Devre Arızası: Farklı gerilim seviyelerindeki veya farklı faz gerilimlerindeki iki nokta arasında meydana gelen kısa devre durumuna hat-hat kısa devre arızası denir. Hat-hat kısa devre arızası, DC tarafta pozitif ve negatif iletken arasında oluşurken AC tarafta faz iletkenleri arasında oluşur. Bu nedenle AC taraftaki hat-hat kısa devre arızası faz-faz kısa devre arızası olarak adlandırılır. Fotovoltaik güç santrallerinde hat-hat kısa devre arızası AC kısımda kablo izolasyonunun korozyon, fiziksel darbe veya hayvanların etkisiyle zarar görmesi sonucu oluşabileceği gibi DC tarafta da fotovoltaik dizilerdeki kısa devreler dizilerin içerisinde veya iki dizi arasında meydana gelebilir [48, 49].

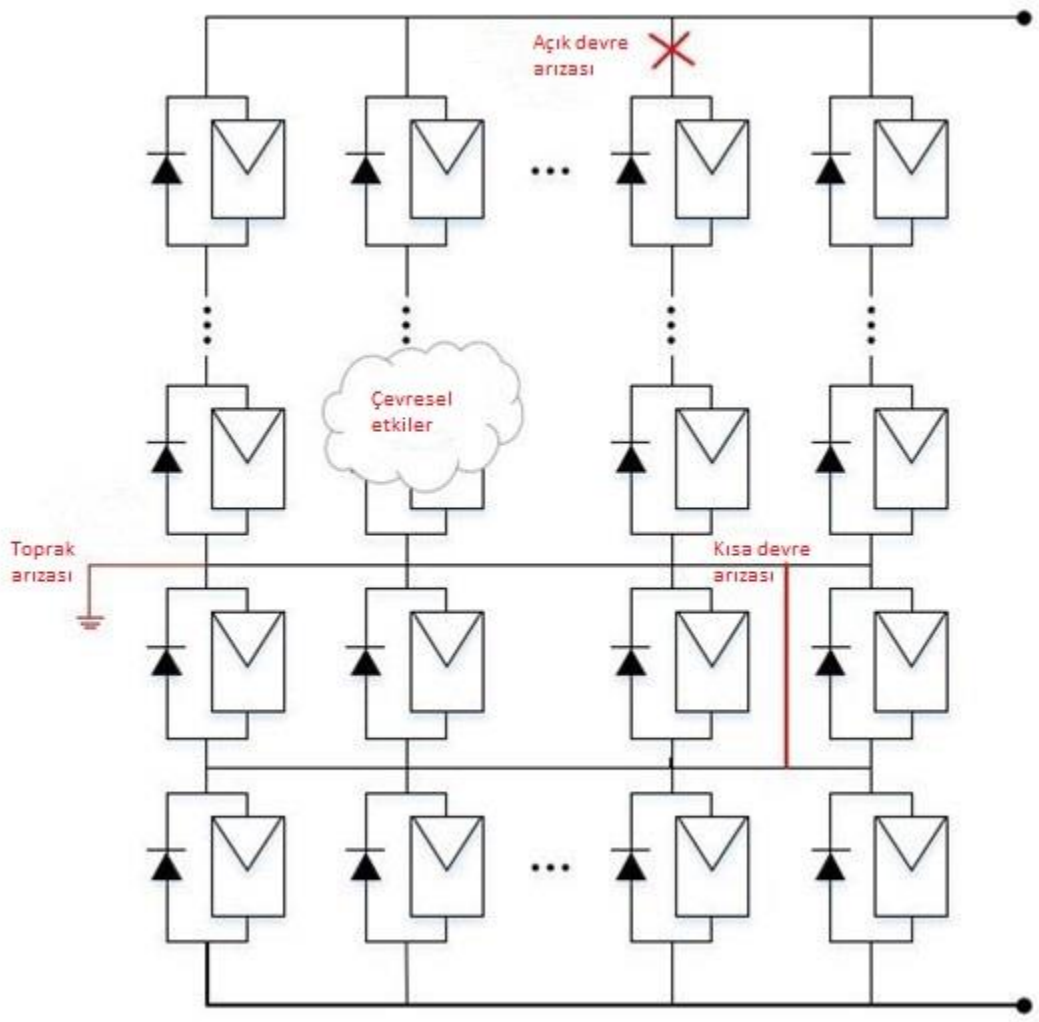
Ark Kaynaklı Arızalar: Kablo izolasyonunun zarar görmesi ve bağlantı noktalarındaki uygunsuz bağlantılar ark arızalarının nedenlerinin başında gelmektedir. Ark arızaları paralel ve seri ark arızaları olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Seri ark arızaları genellikle modüller arasında veya bağlantı kutularındaki gevşek kablo bağlantılarında görülür. Paralel ark arızaları ise farklı gerilim seviyelerindeki iki iletken birbirine olması gerekenden fazla yaklaştığında meydana gelir [49, 50]. Ark arızaları Şekil 2.13' te gösterilmiştir.



Şekil 2.13 Seri ve paralel ark arızaları [48]

2.4.3. Fotovoltaik güç santralleri DC kısım arızaları

DC gerilim taşıyan ekipmanlar üzerinde meydana gelebilecek arızalardan bir kısmı Şekil 2.14' te gösterilmiştir.



Şekil 2.14 Fotovoltaik sistem arıza örnekleri [51, 52]

Açık Devre Arızası: Açık devre arızası iletkenin belirli bir noktada sürekliliğinin kesilmesi durumudur. Bu durum dış etkenlere bağlı olarak meydana gelebileceği gibi bağlantı noktalarındaki uygunsuz ve gevşek bağlantılardan dolayı zaman içerisinde de oluşabilir [9, 14, 53].

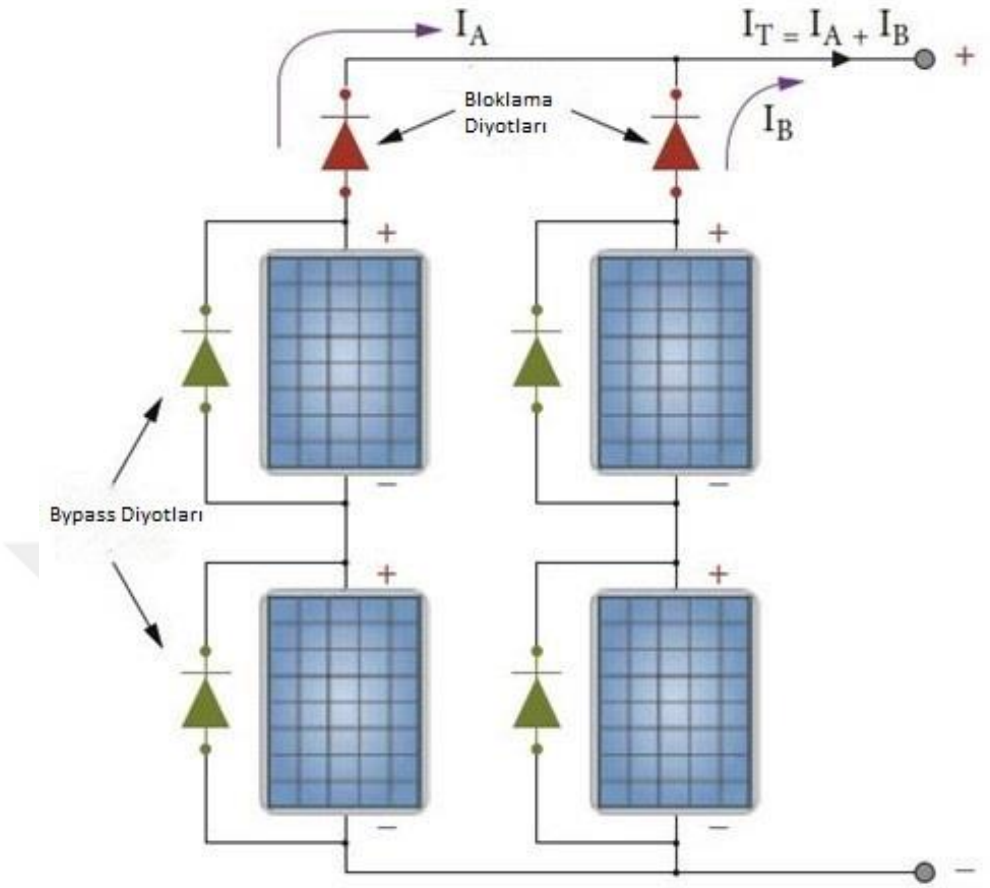
Çevresel Etkiler Kaynaklı Arızalar: Fotovoltaik modüllerdeki uyumsuzluklar bir hücre veya bir grup hücrenin diğer hücrelerden farklılaştığı durumlarda oluşur. Fotovoltaik modüller

bu uyumsuzluk durumlarından dolayı kalıcı veya geçici olarak zarar görebilirler. Örneğin bir fotovoltaik dizi ağaç veya bina gölgesine, toz, kar veya buluta yani güneş ışınları ile doğrudan temasını kesecek bir etkene maruz kaldığında diğer diziler ile arasında çevresel etkiler kaynaklı geçici uyumsuzluk durumu oluşur. Bu durumun üretime etkisi; fotovoltaik panellerde gerilim oluşabilmesi için güneş ışığına maruz kalmaları gerekmektedir. Ancak bulut, kar, ağaç gölgesi, çamur gibi çevresel faktörler güneş ışığını engellediği zaman fotovoltaik paneller verimli çalışamaz ve diğer paneller kadar güç üretemezler. Güneş ışığı azalmasına maruz kalan hücrelerin azalmış kısa devre akımı, bu bozucu etkilere maruz kalmamış olan hücrelerin işletme akımının altında kalırsa sağlıklı çalışan modüller güneş ışınları ile teması azalan veya kesilen modüllerde ısınmaya ve kalıcı hasara yol açacaktır. Bu nedenle bu sıcak noktaların oluşmadan engellenmesi önemlidir [41, 53, 54].

Fotovoltaik Panel/Modül Arızaları: Fotovoltaik panel/modül arızaları arızanın meydana geldiği ekipmana göre isimlendirilirler. Bu arızalar fotovoltaik hücre arızaları, diyot arızaları bağlantı kutusu arızaları ve dizi arızaları başlıklarında incelenebilir.

Fotovoltaik Hücre Arızaları: Fotovoltaik hücre arızaları, hücrelerde meydana gelen çatlak, toz, kar, hücreler arası akım dengesizliği, kısmı gölgelenme nedeniyle meydana gelen eş yaşlanmama durumu ve hücrelerdeki korozyon ve aşırı ısınmaya bağlı verim düşmesi gibi arızalardır [55].

Diyot Arızaları: Fotovoltaik panellerdeki diyotlar çek valf gibi çalışırlar, amaçları tek yönlü akım geçişini sağlamaktır. Fotovoltaik santrallerde en çok kullanılan diyot tipleri bloklama diyotları ve bypass diyotlarıdır. Bloklama diyotları, üretilen akımın yalnızca tek yönde hareket etmesini sağlamak için fotovoltaik hücrelere seri bağlanır. Bypass diyotlar ise akımın, fazla güneş ışığına maruz kalmış hücrelerden daha az güneş ışığına maruz kalmış hücrelere doğru akmasını önlemek için kullanılmaktadır. Bypass diyotları devreye paralel olarak bağlanırlar. Diyotlar fotovoltaik hücreleri olası hasarlardan korumak için kullanıldığından dolayı diyot arızalarının tespiti önem taşımaktadır. Diyot arızaları çoğunlukla yanlış bağlantı ve aşırı ısınmadan kaynaklanmaktadır [17, 47, 48]. Fotovoltaik santrallerde diyot yerleşimleri Şekil 2.15’ te gösterilmiştir.



Şekil 2.15 Blok ve bypass diyotları [48]

Tablo 2.1 Fotovoltaik güç santrallerinde görülen elektriksel arızalar [56]

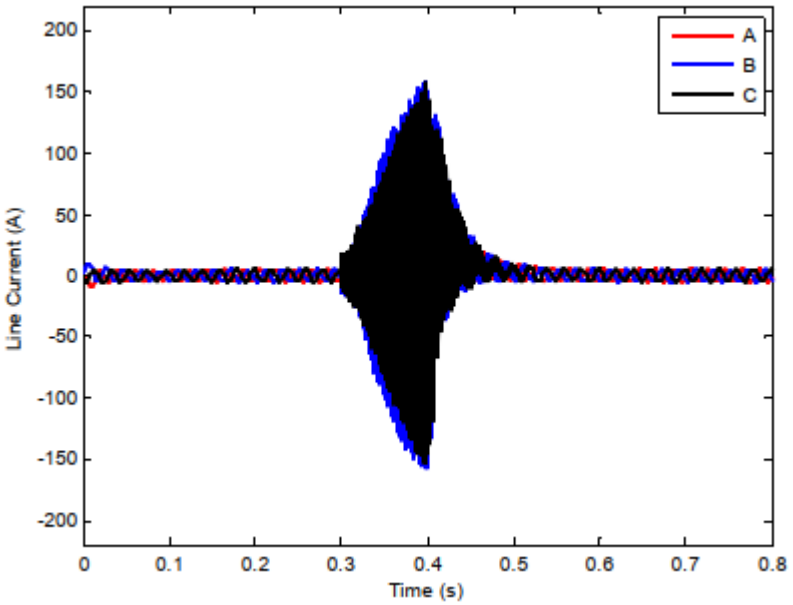
Arıza Türü	Arıza Yeri	Tanım	Arızanın Etki Alanı / Riskler
İnvertör Arızası	AC	İnvertör ekipmanlarındaki arızalardan kaynaklanır.	İnvertörde hasar
Şebeke Arızası	AC	Ekipman arızası, hat kesintisi, bakım, kazalar veya insan kaynaklı hatalardan kaynaklanır.	Tüm fotovoltaik güç santrali
Çevresel Etkiler Kaynaklı Arıza	AC	Yıldırım, fırtına veya diğer doğal afetlerden kaynaklanır.	Tüm fotovoltaik güç santrali
Toprak Arızası	AC/DC	Akım taşıyan iletkenler ve toprak arasında irtibat kurulmasından kaynaklanır.	Fotovoltaik dizilerde hasar, yangın riski
Hat-Hat Arızası	AC/DC	Üzerinde gerilim olan iki nokta arasında irtibat kurulmasından kaynaklanır.	İletkenlerde ve fotovoltaik dizilerde hasar, yangın riski
Ark Kaynaklı Arızalar	AC/DC	Korozyon, gevşek vida, hücre hasarı, eski ekipman, vahşi hayvanlar gibi nedenlerle akım taşıyan iletkenler arasında oluşur.	Fotovoltaik dizilerde hasar, yangın riski
Açık Devre Arızası	DC	Fotovoltaik hücreler arasında zayıf bağlantı, kırık hücreler,eski kablolar gibi nedenlerden kaynaklanır.	Fotovoltaik modüllerde, diyotlarda ve bağlantı kutularında hasar
Panel / Modül Arızaları		Bazı modüllerin çıkış gücünün diğer modüllerden düşük olması, açık devre veya kısa devre durumlarından kaynaklanır.	
Fotovoltaik Hücre Arızaları			Fotovoltaik hücrelerde hasar
Diyot Arızaları	DC	Diyotlardaki açık devre veya kısa devre durumu, parçalı gölgelenme, aşırı ısınma gibi nedenlerden kaynaklanır.	Diyotlarda hasar
Bağlantı Kutusu Arızaları		Korozyon, gevşeyen bağlantılar, paslanma gibi nedenlerden kaynaklanır.	Bağlantı kutusunda hasar, düşük verim, yangın riski
Dizi Arızaları		Dizilerdeki arızalardan kaynaklanır.	Fotovoltaik dizilerde hasar, düşük verim, yangın riski

2.5. MATLAB / Simulink

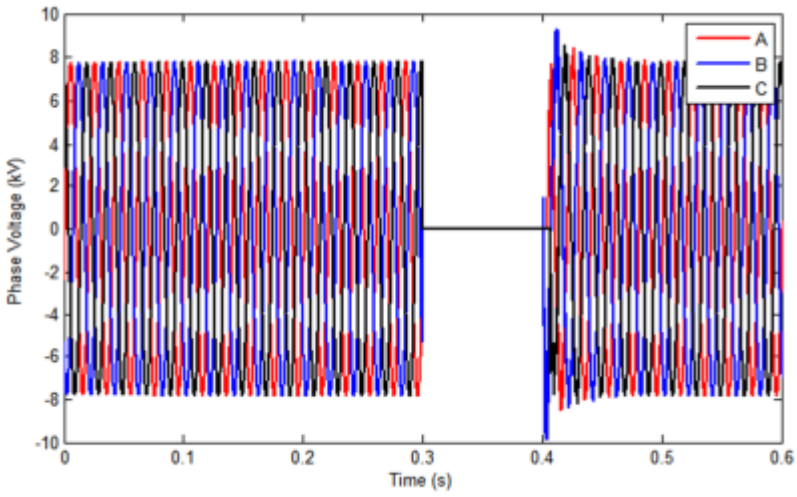
MATLAB/Simulink, dinamik sistemlerin modellenmesi için kullanılan bir grafik programlama arayüzüdür. Bu program sayesinde gerçek sistemlerin blok diyagramlar ile modelleri oluşturularak sistemlerin fiziksel kurulum ve işletme maliyetleri olmaksızın benzetim çalışmaları yapılabilir. MATLAB/ Simulink programında fotovoltaik güç santrallerinde bulunan ekipmanlar modellenebileceği gibi arayüzde bulunan hazır kütüphaneler kullanılarak önceden oluşturulmuş ve test edilmiş bloklarla da çalışma yapılabilir.

MATLAB/Simulink programı esnek programlama imkanı sunduğundan dolayı fotovoltaik güç santrallerinin modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Oluşturulan model kullanıcının tercih ve ihtiyacına göre değişebilmektedir, bu sayede gözlenmek istenen kısımlar detaylandırılırken çalışma sırasında üzerinde gözlem yapılmayacak kısımlar daha az detaylı olacak şekilde modellenebilir. Örneğin [57]' de iki diyotlu ve tek diyotlu fotovoltaik hücrelerin farklarının karşılaştırılabilmesi için bir MATLAB/Simulink modeli oluşturulmuştur. Bu modelde tek ve iki diyot kullanımının farkının görülebilmesi için fotovoltaik hücre modellenirken [58]' de MPPT algoritması üzerinde daha çok durulmuştur. Buna karşılık [59]' daki çalışmada büyük ölçekli bir fotovoltaik güç santrali modellendiği için fotovoltaik panellerin ayrıca modellenmesi üzerinde durulmamış hazır bir fotovoltaik panel kütüphanesi kullanılmıştır.

MATLAB Simulink programında oluşturulan fotovoltaik güç santral modellerinde elektriksel arızaların modellendiği çalışmalarda grafik çıktısı elde edilebilmektedir. Şekil 2.16 ve Şekil 2.17' de AC tarafta oluşan bir faz-faz kısa devre arızası durumunda akım ve gerilimdeki değişimler gösterilmektedir.

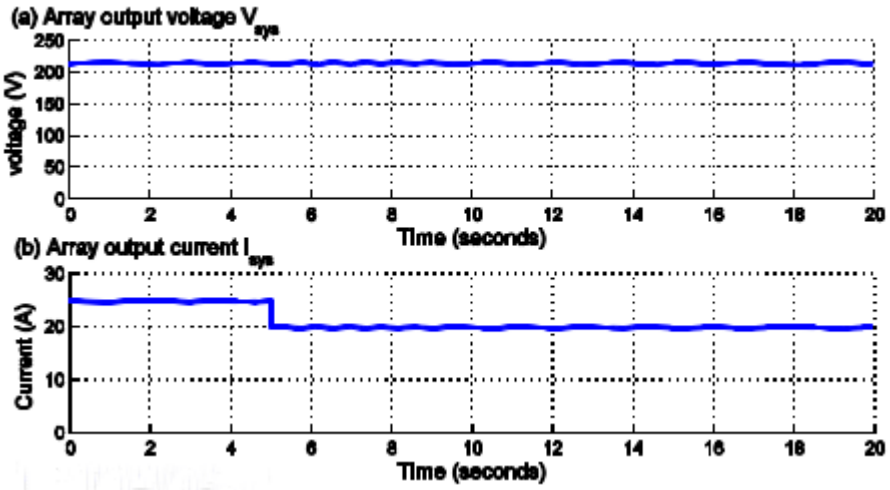


Şekil 2.16 AC taraf faz-faz kısa devre arızası akım değişimi [60]



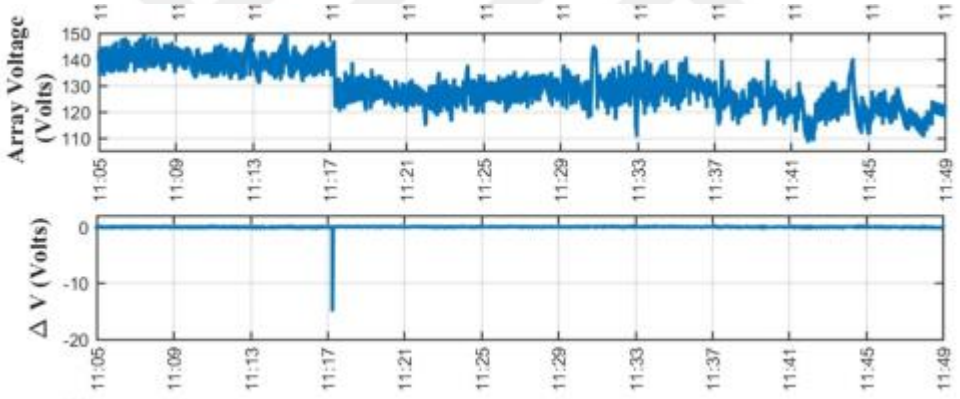
Şekil 2.17 AC taraf faz-faz kısa devre arızası gerilim değişimi [60]

Şekil 2.18' de, simulink üzerinde modellenen bir fotovoltaik güç santralinin DC tarafında gerçekleşen açık devre arızası durumuna ait akım ve gerilim grafik çıktısı gösterilmektedir.



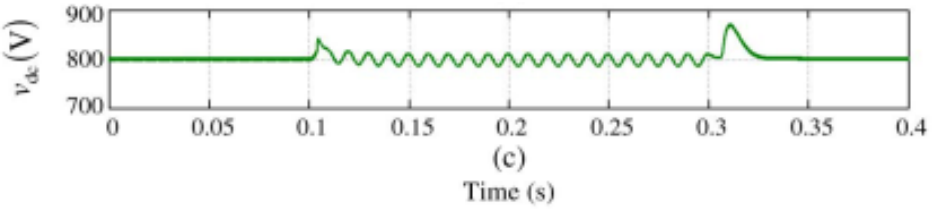
Şekil 2.18 DC taraf açık devre arızası akım ve gerilim değişimi [61]

Şekil 2.19' da anlık olarak gerçekleşen bir DC hat-hat kısa devre arızası durumu gösterilmektedir.



Şekil 2.19 DC taraf hat-hat kısa devre arızası akım ve gerilim değişimi [62]

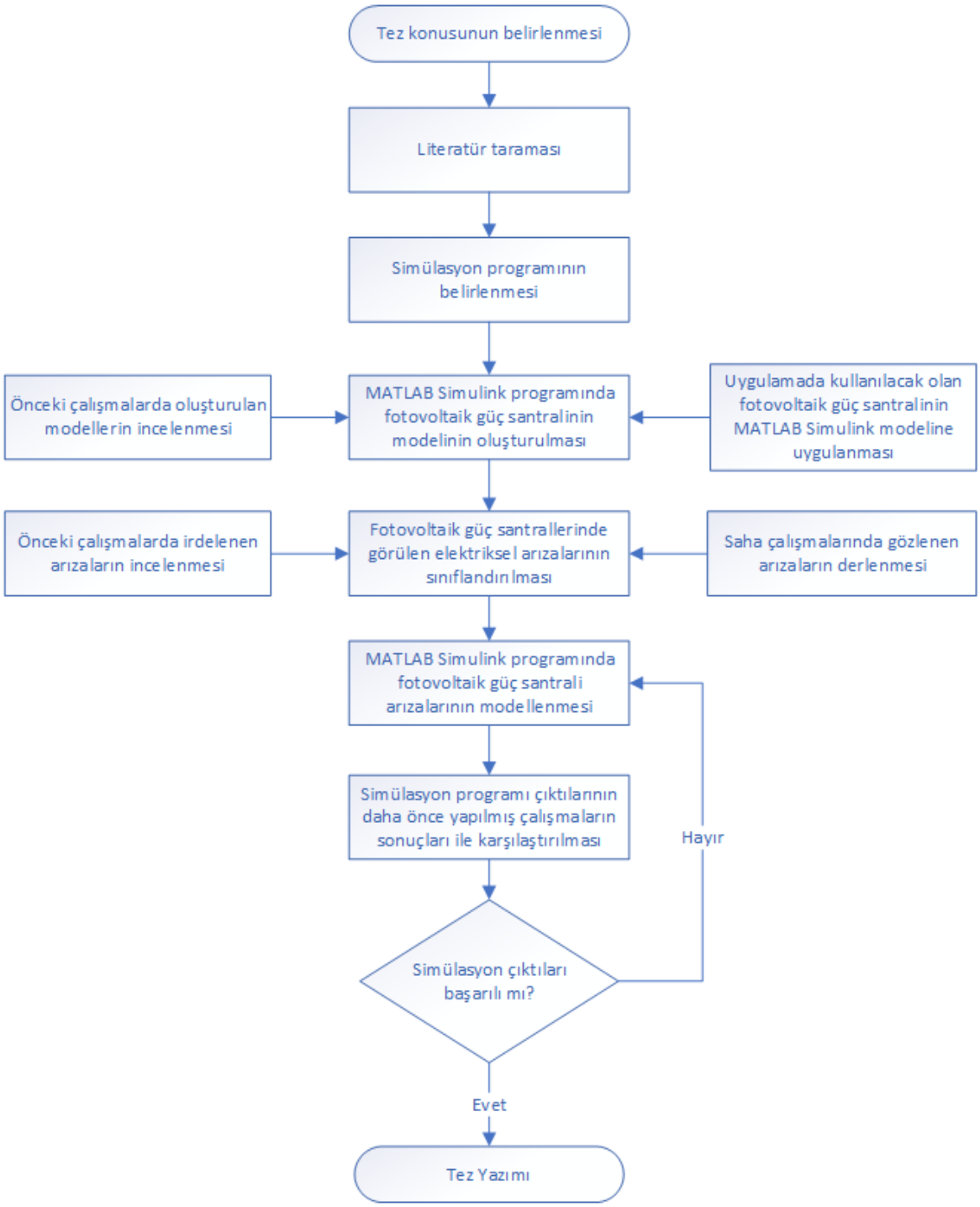
Şekil 2.20' de DC kısımda meydana gelen bir hat-toprak kısa devre arızasının gerilime etkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.20 DC taraf hat-toprak kısa devre arızası gerilim değişimi [63]

3. MATERYAL VE METOT

Tez çalışmasının başlangıcından sonuna kadar yapılan çalışmaları ve izlenen adımları içeren akış diyagramı Şekil 3.1' de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Tez çalışmasında izlenen adımları gösteren akış diyagramı

Bu tez çalışmasında şebekeye bağlı bir güneş enerji santrali MATLAB Simulink programında modellenenmiş ve elektriksel arızaları incelenmiştir.

Tez konusunun belirlenmesi amacıyla fotovoltaik güç santralleri ile ilgili literatür araştırması yapılarak, fotovoltaik güç santrali devreye alma saha çalışması tecrübeleri kapsamında, devreye alma ve işletme sırasında karşılaşılan elektriksel arızaların sınıflandırıldığı ve bir simülasyon programı üzerinde modellendiği kapsamlı bir kaynağa ihtiyaç olduğu görülmüş ve tez konusu belirlenmiştir.

Tez konusunun belirlenmesi sonrasında tez konusu ile ilgili detaylı bir literatür taraması çalışması yapılarak fotovoltaik güç santrallerinde meydana gelebilecek elektriksel arızalar sınıflandırılmıştır.

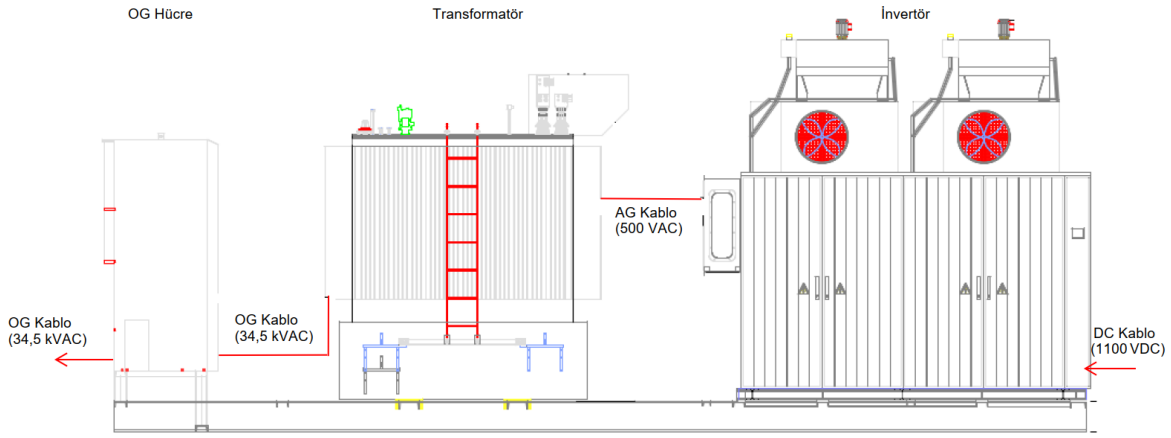
Fotovoltaik güç santralinin modellenmesi ve elektriksel arızaların model üzerinde simüle edilmesi için MATLAB Simulink programı kullanılmıştır. MATLAB Simulink programında, daha önce fiziksel kurulumu yapılmış ve devreye alınmış bir fotovoltaik güç santrali modellenmiştir. Modellenecek santralin seçiminde tez yazım sürecinde ihtiyaç duyulacak bilgilere en hızlı ulaşılabilecek santralin seçilmesine özen gösterilmiştir. Bu fotovoltaik güç santralinin simulink modelinin oluşturulması için MATLAB web sayfasında bulunan örnek dokümanlar ile daha önce yapılmış çalışmalar incelenmiştir [64]. Modelin yapısı oluşturulduktan sonra uygulamaya geçilmiş ve simulink modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde elde edilen çıktılar olması gereken değerler ile ve daha önce yapılmış benzer çalışmaların çıktıları ile karşılaştırılmıştır. Modelin uygunluğu değerlendirilerek iyileştirmeler yapılmıştır, bu karşılaştırma işlemleri tekrarlanarak simulink modeli nihai haline getirilmiştir.

3.1. Modeli Oluşturulan Fotovoltaik Güç Santrali Hakkında Bilgiler

Modellenen fotovoltaik güç santrali, gerçek zamanlı bir tesisin içerisinde 34,5 kV OG seviyesinden tesisin barasına bağlı ve sonrasındaki şebeke bağlantı noktası üzerinden şebeke ile irtibatlıdır. Şebekeye bağlı 1.8 MW kurulu güce sahip bir merkezi invertör içermektedir. İnvertör, transformatör ve OG hücre yapısı şekil 3.2’ de gösterilmektedir.

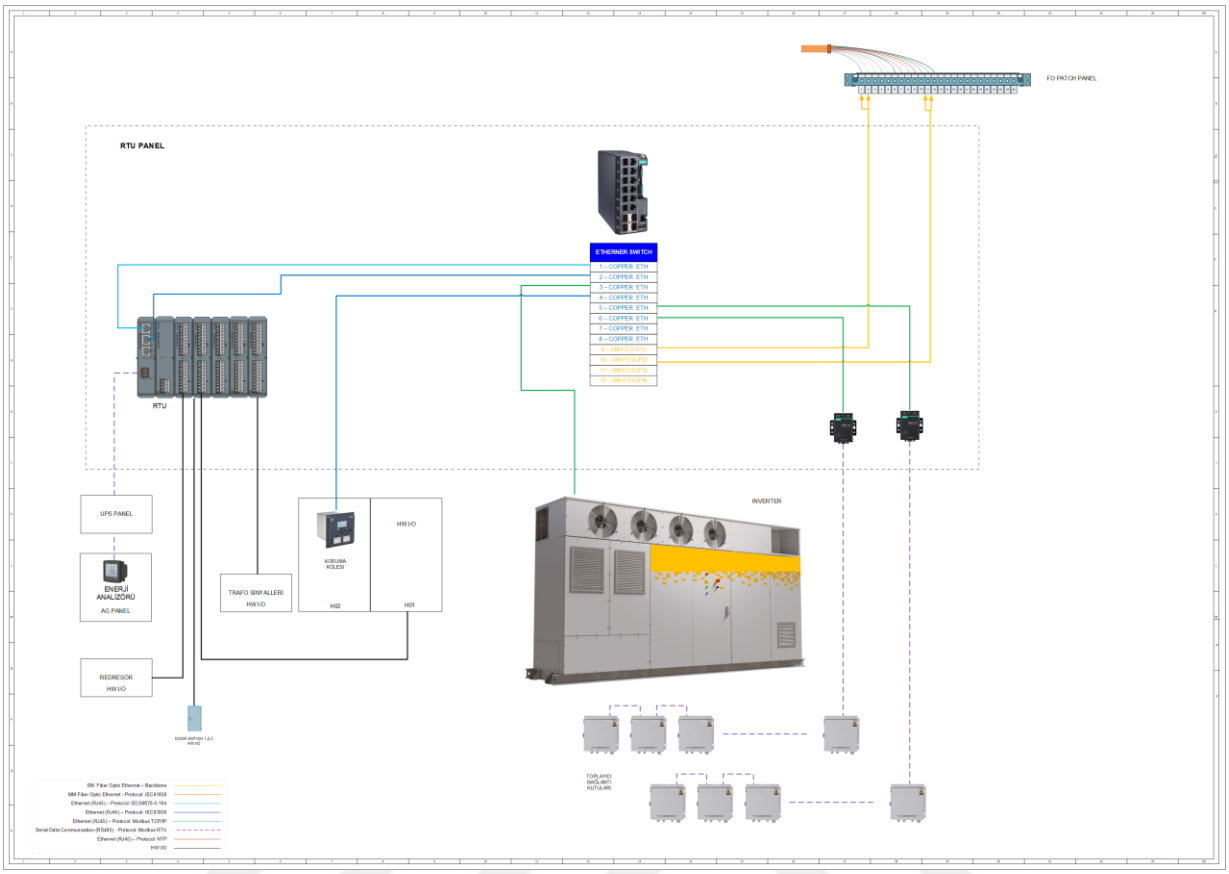
Fotovoltaik hücreler, sahada var olan tesise uygun şekilde monokristal hücre tipinde kullanılmaktadır. Fotovoltaik güç santralinde kullanılan fotovoltaik panellerin her biri için;

maksimum güç 450W, maksimum güç noktası gerilimi 41,4V, maksimum güç noktası akımı 10,87A, açık devre gerilimi 49,79V, kısa devre akımı 11,44A' dir. Her bir dizide 26 adet birbirine seri bağlı fotovoltaik modül, her toplayıcı bağlantı kutusunda ise 15 adet paralel bağlı dizi bulunmaktadır (Şekil 3.4). Toplamda 10 adet toplayıcı bağlantı kutusu kullanılmaktadır. Bu şekilde yapılan konfigürasyonda invertörün maksimum giriş gerilimi 1500V DC, anma gerilimi ise 1100V DC' dir. İnvertörün çıkış gerilimi 500V AC' dir. İnvertörün şebeke bağlantı noktasında invertör çıkış gerilimini şebekeye iletebilmek için 0,5/34,5 kV oranında bir yükseltici trafo kullanılmaktadır.



Şekil 3.2 Fotovoltaik güç santrali invertör, transformatör ve şebeke bağlantısı

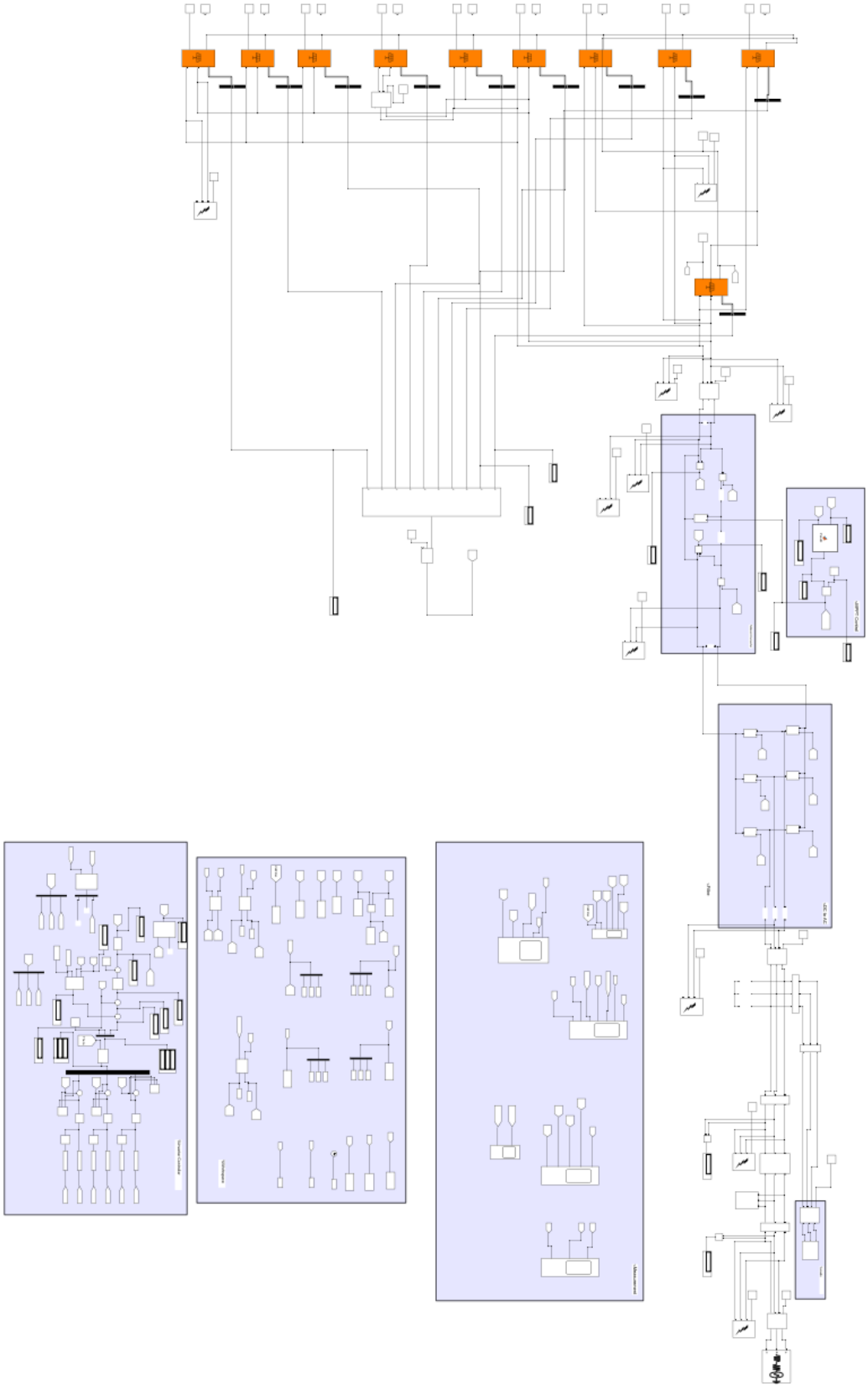
Fotovoltaik güç santralinde santralin uzaktan izleme ve kontrolü için gerekli bilgilerin kontrol ünitelerine aktarılması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan fotovoltaik güç santraline ait invertör için çizilmiş haberleşme mimarisi Şekil 3.3' te gösterilmiştir. Bu haberleşme mimarisinde görüldüğü üzere koruma rölesinden, enerji analizöründen, inverter, UPS, redresör gibi diğer cihazlardan alınan veriler fiber optik kablolar yardımıyla ana kontrol merkezine iletilmektedir. Farklı haberleşme protokolleri ile alınan veriler RTU (Remote Terminal Unit) cihazında toplanarak ethernet switch yardımıyla üst istasyona aktarılmaktadır.



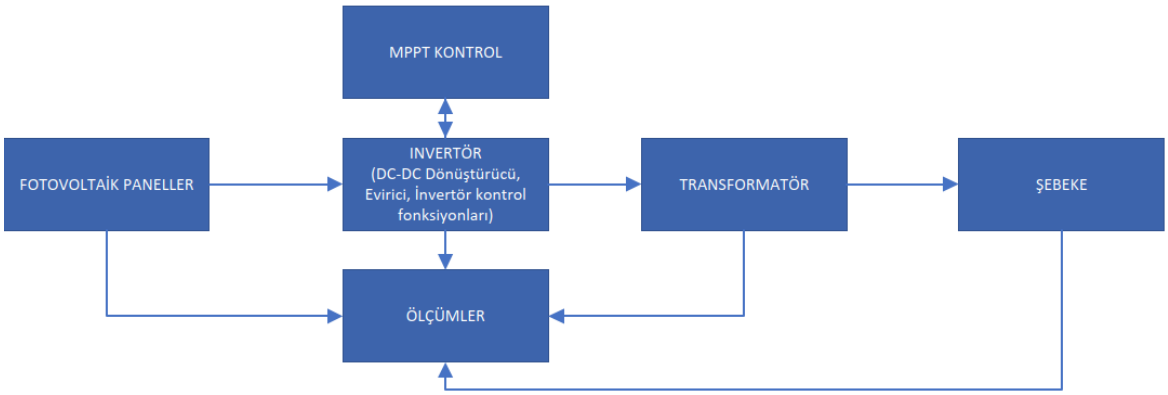
Şekil 3.3 Haberleşme mimarisi

3.2. MATLAB Simulink Model

Fotovoltaik santrallerde meydana gelebilecek elektriksel arızaları gözlemleyebilmek amacıyla saha uygulaması yapılmış, çalışan bir santralin MATLAB Simulink programında modeli oluşturulmuştur. Modelin MATLAB Simulink programı üzerindeki genel görünümü Şekil 3.4' teki gibidir. Modelin ana hatları Şekil 3.5' teki blok diyagramda gösterilmiştir.



Şekil 3.4 MATLAB Simulink modeli genel görünüm



Şekil 3.5 MATLAB Simulink model blok diyagram gösterimi

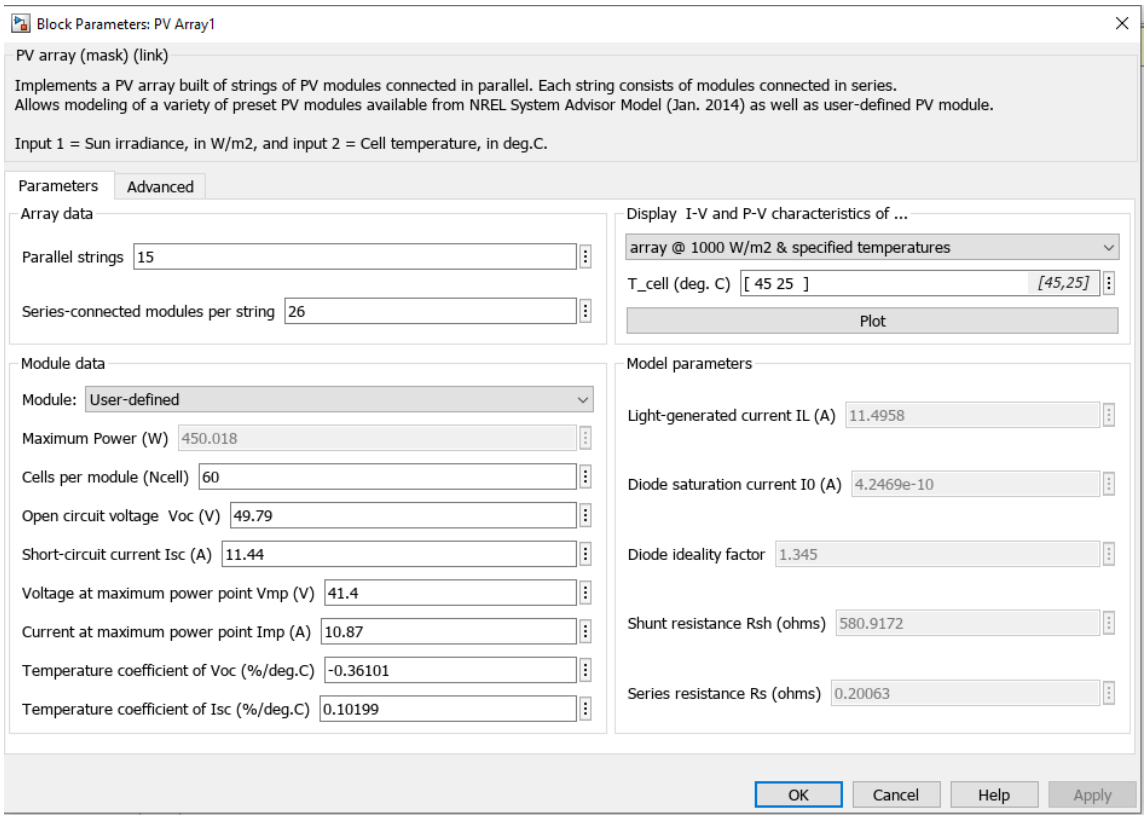
Oluşturulan bu modelde DC tarafta merkezi invertör, bu merkezi invertörler ile fotovoltaik paneller arasında ise toplayıcı kutular gösterilmektedir. Fotovoltaik panellerde üretilen güç, toplayıcı kutular üzerinden merkezi invertöre iletilmektedir. İnvertör girişinde önce DC-DC dönüştürücüden geçen DC akım ardından evirici devresinden geçmektedir. İnvertör bloğundaki invertör kontrol fonksiyonlarının yerine getirilebilmesi ve maksimum güç noktasında çalışabilmesi için MPPT fonksiyonu da bu blokta gösterilmektedir. İnvertör ünitesinden çıkan AC akım transformatör üzerinden geçerek şebekeye bağlanmaktadır. Oluşturulan MATLAB/Simulink modelinde kontrol ve izleme yapılabilmesi için Şekil 3.5'te gösterildiği gibi her noktadan ölçümler alınarak gözlem yapılmaktadır.

İnvertör modellenirken gözlem ve değişiklik kolaylığı olması açısından komponentleri kapalı bloklar ile değil açık şekilde modellenmektedir. DC-AC dönüşüm için DC-DC konvertör, evirme işlemi için IGBT blokları, uygulama sırasında gerçeğe yakın bir model elde etmek için eklenen transformatörün sinüsoidal sinyali bozmasından kaynaklı olarak modelde bir harmonik filtre ve maksimum güç takibi için ise MPPT programı kullanılmaktadır [65-68].

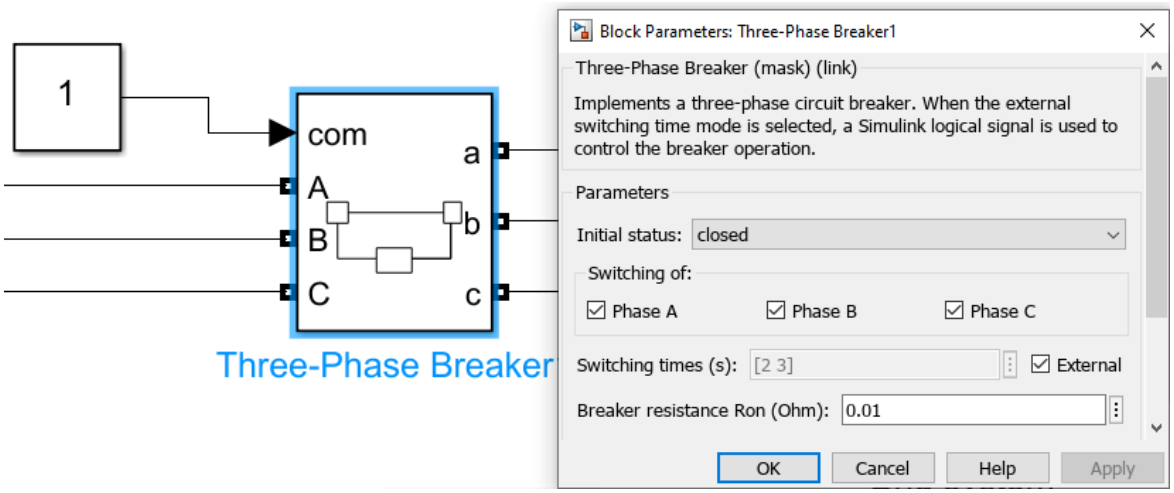
Arıza durumları modellenirken çevresel etkilerin her arıza durumunda sabit tutulması ve maksimum verimde üretim yapıldığı durumu görmek için için hava sıcaklığı 25 °C, ışıma miktarı 1000W/m^2 olarak ayarlanmaktadır.

Bu modelde arıza durumu oluşturulduktan sonra arızanın durumunu görebilmek için devre kesici elemanlar otomatik zamanlı değil dış müdahaleye bağlı olarak konfigüre edilmektedir. Açık devre arızası durumu oluşturmak için simulink programında Şekil 3.7'

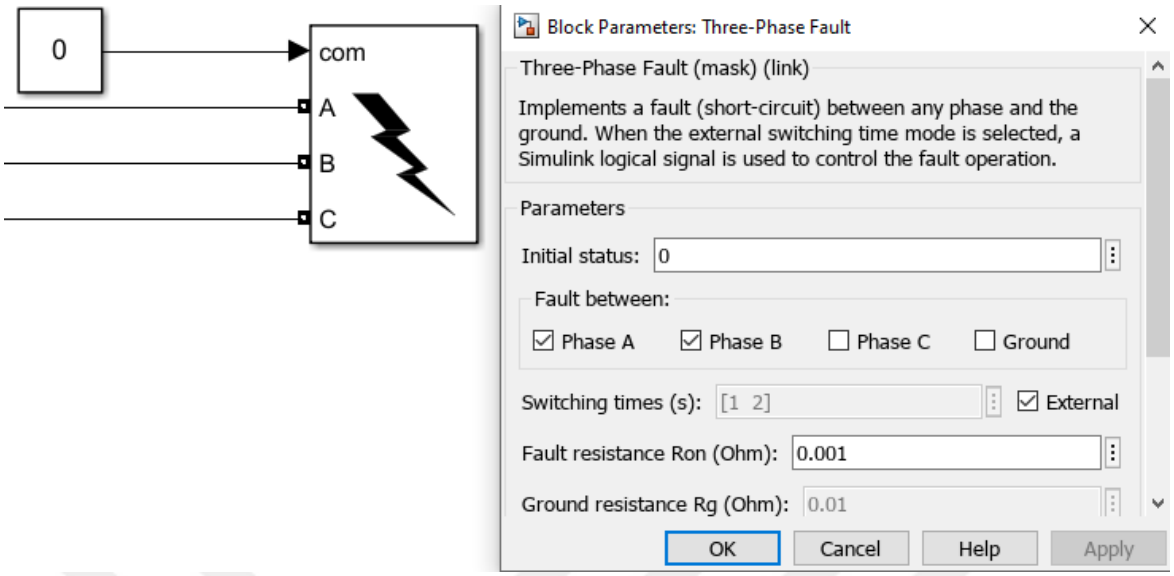
deki kesici objesi, kısa devre arızaları için ise Şekil 3.8' te gösterilen üç faz arıza objesi kullanılmaktadır. Üç faz arıza objesi hat-toprak arızası, hat-hat kısa devre arızası gibi arızaları oluşturmak için kullanılmaktadır. Simulink modelinde arıza durumu oluşmadan önceki ve arıza durumu oluştuktan sonraki durumları gözlemlemek amacıyla grafik kayıtları tutulmaktadır.



Şekil 3.6 Fotovoltaik panel detayları



Şekil 3.7 Üç faz kesici bloğu



Şekil 3.8 Üç faz arıza bloğu

MATLAB Simulink modelinde arızalar oluşturulurken her arıza türü için bir işlem adımı sırası takip edilmektedir. Bu sayede arızanın doğru yerde ve doğru şekilde oluşturulduğundan emin olunmaktadır. Simülasyonun işlem adımlarını göstermek için her arıza için bir akış diyagramı oluşturulmaktadır.

Arızaları doğru oluşturmak ve doğru sonuçları gözlemlemek için modelde kullanılan ölçüm noktaları arızanın oluştuğu ve etkilediği yerlere göre seçilmektedir.

3.3. MATLAB Simulink Modelinde Oluşturulan Elektriksel Arızalar

Bu bölümde MATLAB Simulink programında oluşturulan arızalar ve arızaları üretme yöntemleri açıklanmaktadır. Fotovoltaik güç santrallerindeki elektriksel arızalar bu çalışmada arızanın oluştuğu bölgeye göre sınıflandırılmaktadır. Arızalar, bu sınıflandırma sisteminde, meydana geldiği bölgelere göre detaylandırılmaktadır. Bu elektriksel arızalar temelde açık devre ve kısa devre durumlarından kaynaklanmaktadır. MATLAB Simulink programında elektriksel arızaları oluşturmak için arızanın meydana geldiği bölgede, doğru ekipmanları etkileyecek şekilde açık devre ve kısa devre durumları oluşturulmaktadır. Fotovoltaik güç santrallerindeki elektriksel arızaların açık devre veya kısa devre durumlarına göre oluşturulma yöntemleri Tablo 3.1' de gösterilmektedir.

Tablo 3.1' deki arızalar incelendiğinde temelde arızaların açık devre ve kısa devre durumlarından kaynaklandığı ve bu yöntemler ile MATLAB Simulink modelinin

oluşturulabileceği görülmektedir.

İnvertör arızalarında fotovoltaik paneller ile şebeke bağlantısı kesileceği için invertör çıkışında bir açık devre durumu oluşturularak DC ve AC taraftaki tepkiler incelenmektedir.

Fotovoltaik santralde transformatör çıkışındaki kesicinin bulunduğu bölge şebeke bağlantısı olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle MATLAB Simulink modeli oluşturulan fotovoltaik güç santralinde şebeke kaynaklı arızalar modellenirken transformatör çıkışında kısa devre ve açık devre blokları kullanılmaktadır.

Çevresel etkiler kaynaklı arızaların modellenmesinde kısa devre ve açık devre durumlarından farklı olarak dış etkiler kaynaklı gölgelenme durumunun akım ve gerilim üzerindeki etkisinin gösterilebilmesi amacıyla ışıma miktarı değiştirilmektedir.

Toprak arızası ve hat-hat kısa devre arızası durumları MATLAB Simulink programındaki "üç faz arıza" objesi kullanılarak ve ihtiyaca göre bağlantı yöntemleri değiştirilerek üretilmektedir.

DC Taraftaki açık devre arızasını üretmek için için MATLAB Simulink programında kesici objesi kullanılmaktadır.

DC Taraftaki ekipman arızaları "Fotovoltaik Modül Arızası" başlığı altında DC tarafta kısa devre durumu oluşturularak simüle edilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, arızaların görünür halde kalması için devre koruma ekipmanlarının aktif olmadığı kabul edilmiştir. Bu nedenle devre koruma ekipmanları model içerisinde bulunmamaktadır.

Tablo 3.1 MATLAB Simulink üzerinde modellenen fotovoltaik güç santrallerinde meydana gelebilecek elektriksel arızaların oluşturulma yöntemleri ve açıklamaları

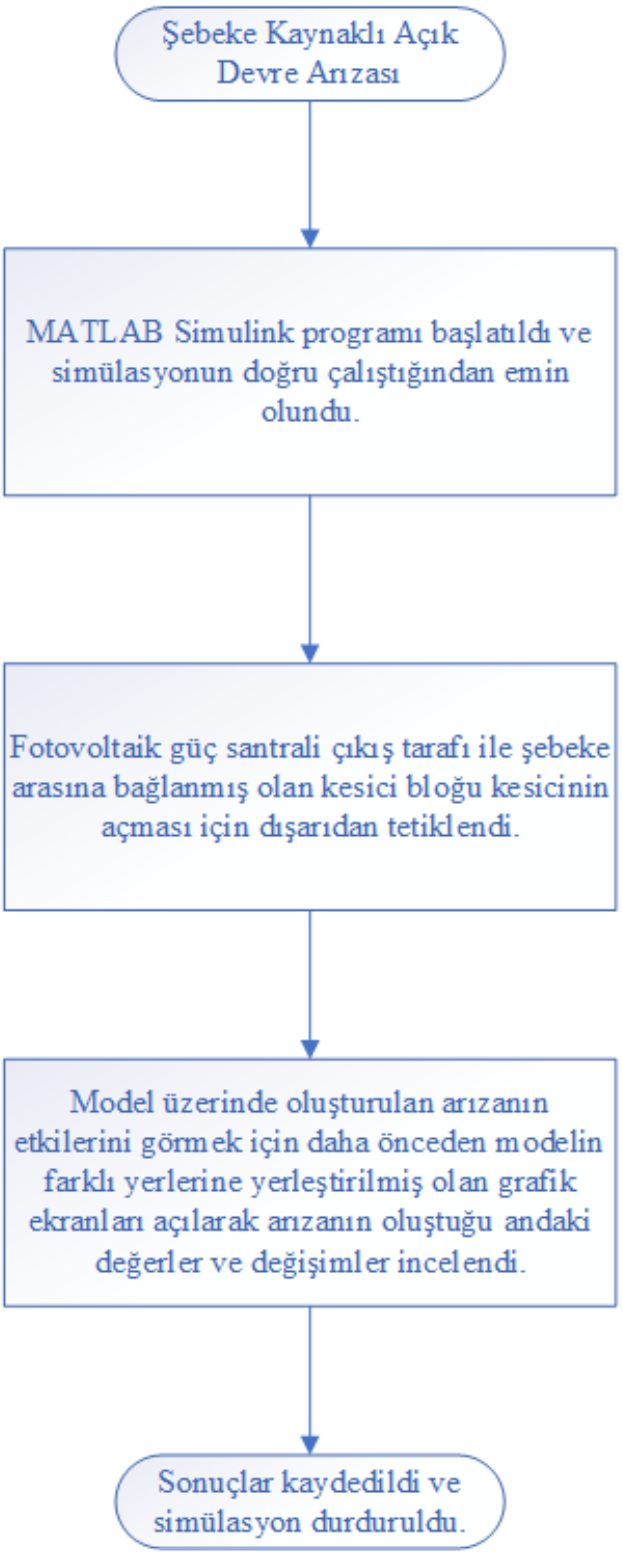
Arıza Türü	Arıza Yeri	Arıza Detayı	Arıza Oluşturma Yöntemi
İnvertör Arızası	AC	İnvertör ekipmanlarındaki sorunlardan kaynaklı oluşan arızalardır. İnvertörün hasar görmesi durumunda fotovoltaik modüller ile şebeke bağlantısı kesilir, bu invertörün güç çıkışının kesilmesi durumunu gösteren, invertör çıkışında açık devre arızası ile modellenmiştir.	Açık Devre
Şebeke Arızası	AC	Şebeke bağlantı tarafında oluşabilecek arızalardır. Bu nedenle "Şebeke Kaynaklı Faz-Faz Kısa Devre Arızası" ve "Şebeke Kaynaklı Açık Devre Arızası" yöntemleri ile modellenmiştir.	Açık Devre, Kısa Devre
Çevresel Etkiler Kaynaklı Arızalar	AC/DC	Yıldırım, fırtına veya gölgelenme gibi doğal olaylardan kaynaklanır.	Işıma Miktarındaki Değişim
Toprak Arızası	AC/DC	Akım taşıyan iletkenler ve toprak arasında irtibat kurulmasından kaynaklanır. Hat-toprak kısa devre arızası ile modellenmiştir.	Kısa Devre
Hat-Hat Arızası	AC/DC	Üzerinde gerilim olan iki nokta arasında irtibat kurulmasından kaynaklanır. Hat-hat kısa devre arızası ile modellenmiştir.	Kısa Devre
Açık Devre Arızası	DC	Fotovoltaik hücreler arasındaki zayıf bağlantı, kırık hücreler, sıcak noktalar, eski kablolar gibi nedenlerden kaynaklanır. Açık devre arızası ile modellenmiştir.	Açık Devre
Fotovoltaik Hücre / Panel / Modül / Dizi Arızaları Diyot Arızaları Bağlantı Kutusu Arızaları	DC	Fotovoltaik panel, fotovoltaik modül, fotovoltaik hücre, diyot, bağlantı kutusu ve fotovoltaik dizi arızalarının hepsi DC tarafta ve ekipmanların zarar görmesi sonucu oluştuğu için "Fotovoltaik Modül Arızası" ve "DC Taraf Kısa Devre Arızası" yöntemleri ile modellenmiştir.	Kısa Devre

AC tarafta şebeke çıkışında bir faz-faz kısa devre arızası meydana gelmesi için simulink modelinde Şekil 3.9' daki yol izlenir;



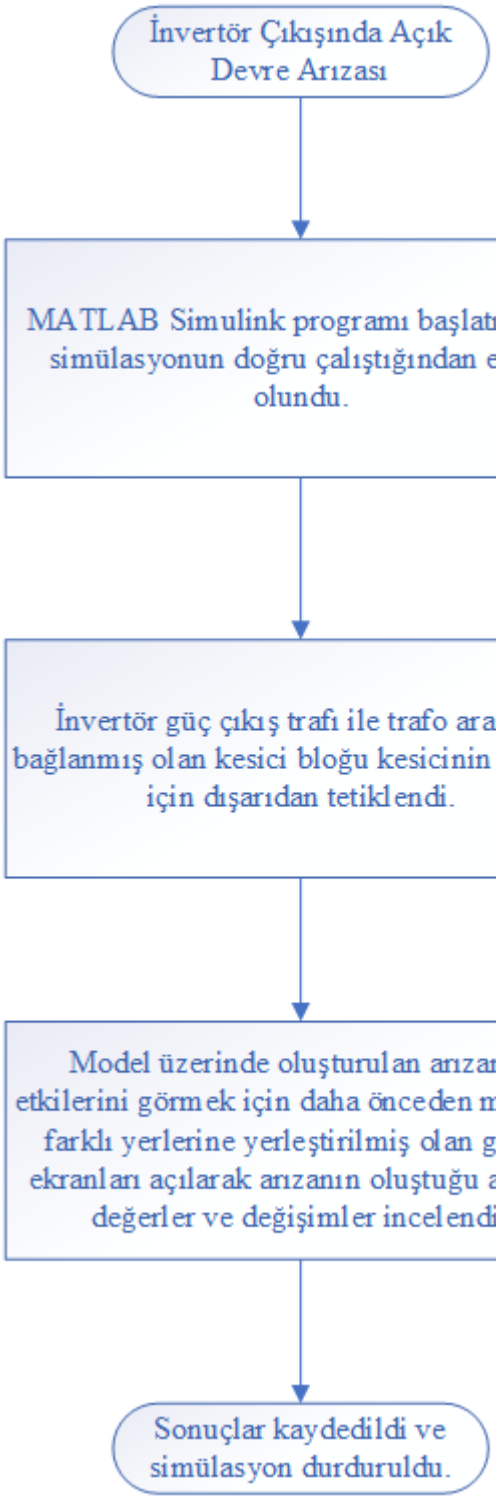
Şekil 3.9 Şebeke kaynaklı faz-faz kısa devre arızası akış diyagramı

AC tarafta şebeke çıkışında bir açık devre arızası meydana gelmesi için simulink modelinde Şekil 3.10’ daki yol izlenir;



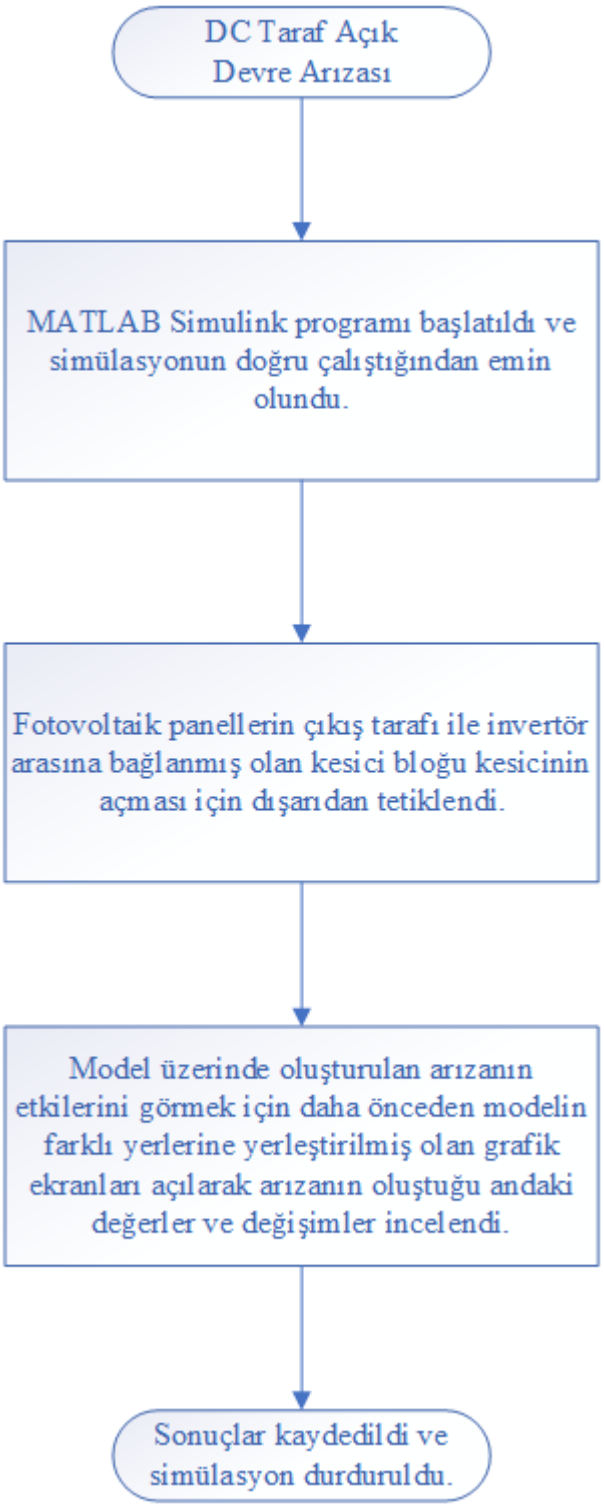
Şekil 3.10 Şebeke kaynaklı açık devre arızası akış diyagramı

İnvertörde açık devre arızası meydana gelmesi için simulink modelinde Şekil 3.11' deki yol izlenir;



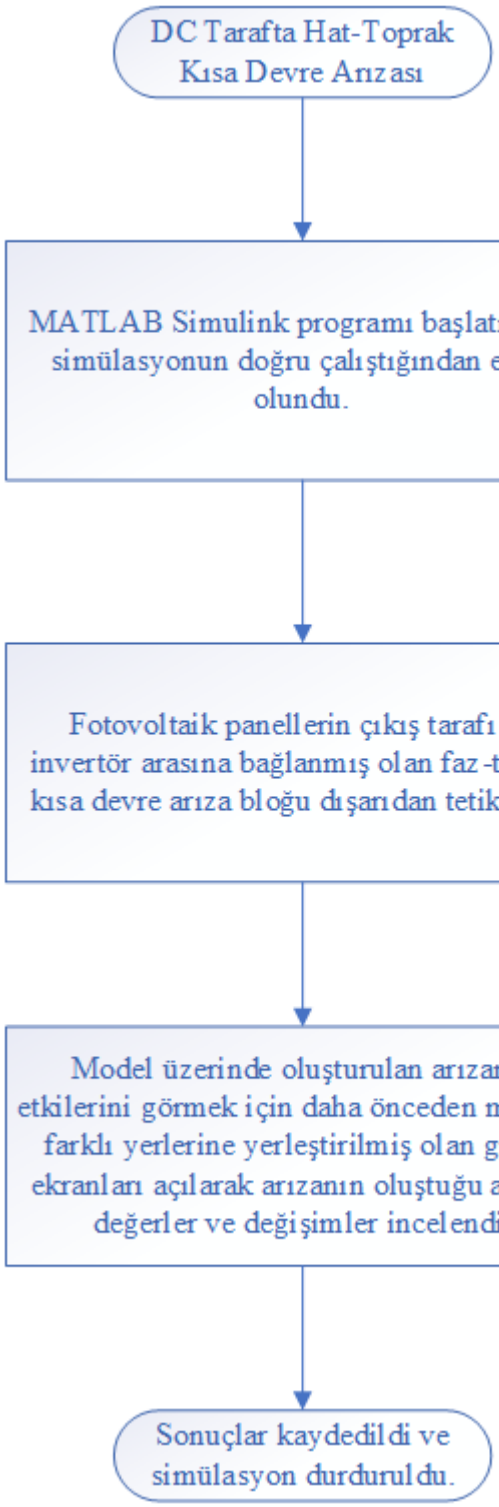
Şekil 3.11 İnvertör açık devre arızası akış diyagramı

DC tarafta açık devre arızası meydana gelmesi için simulink modelinde Şekil 3.12' deki yol izlenir;



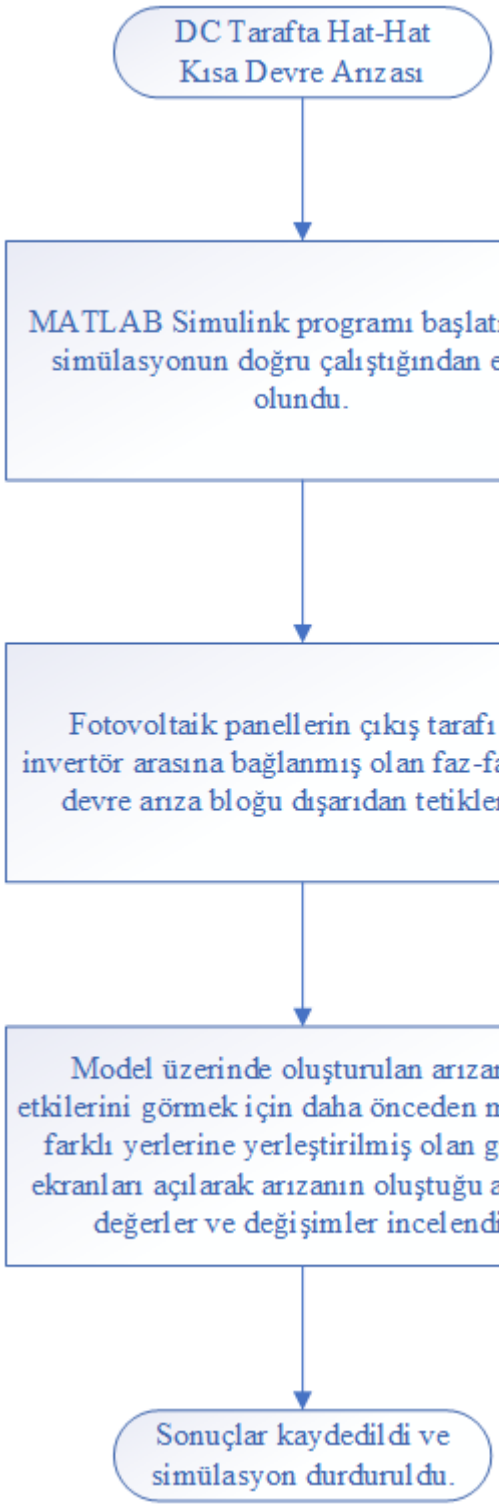
Şekil 3.12 DC taraf açık devre arızası akış diyagramı

DC tarafta hat-toprak kısa devre arızası meydana gelmesi için simulink modelinde Şekil 3.13' teki yol izlenir;



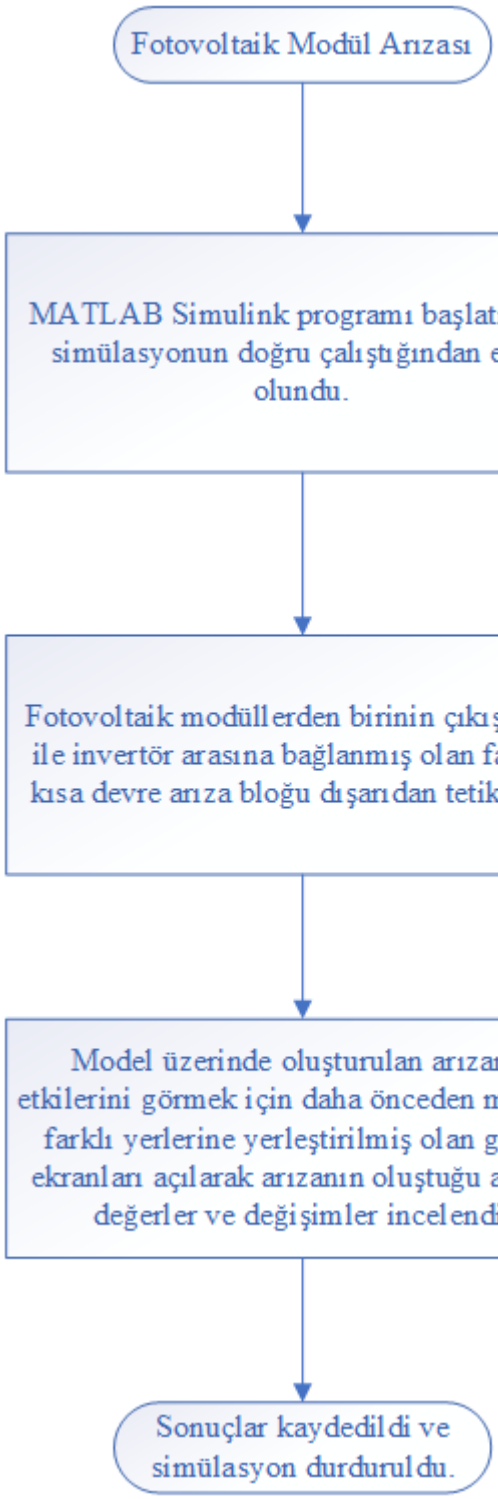
Şekil 3.13 DC taraf hat-toprak kısa devre arızası akış diyagramı

DC tarafta hat-hat kısa devre arızası meydana gelmesi için simulink modelinde Şekil 3.14' teki yol izlenir;



Şekil 3.14 DC taraf hat-hat kısa devre arızası akış diyagramı

Fotovoltaik modül arızası meydana gelmesi için simulink modelinde Şekil 3.15' teki yol izlenir;



Şekil 3.15 Fotovoltaik modül arızası akış diyagramı

Işıma miktarındaki değişim için simulink modelinde Şekil 3.16’ daki yol izlenir;



Şekil 3.16 Gölgelenme durumu akış diyagramı

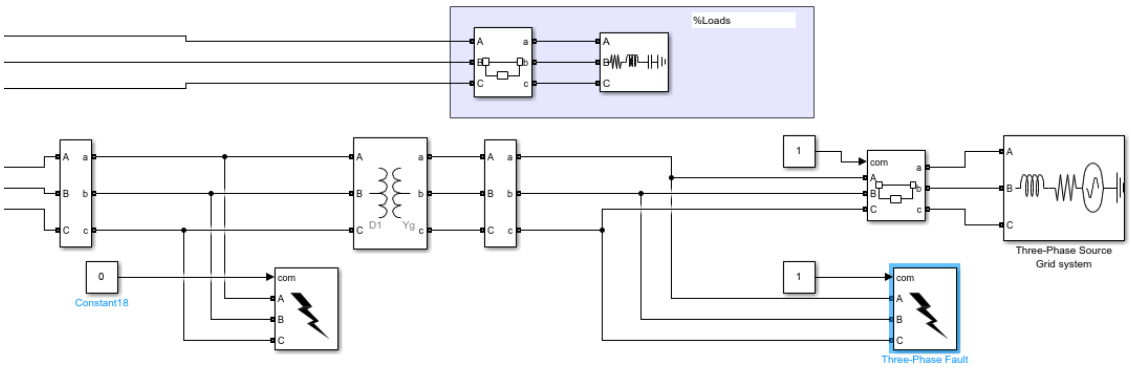
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, MATLAB Simulink programında oluşturulan arızaların çıktıları verilmiş ve elde edilen sonuçlar diğer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

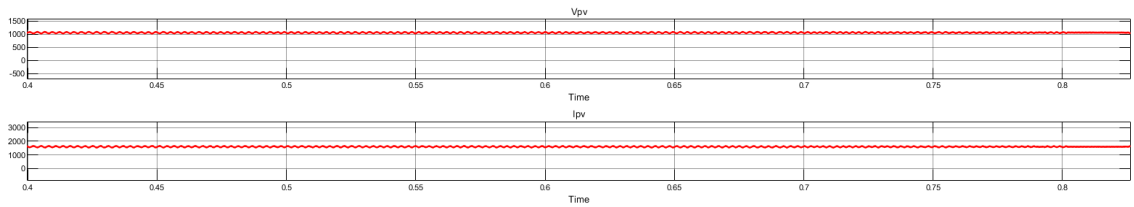
AC tarafta nominal gerilim 34,5 kV, nominal akım ise yaklaşık 30A' dir. DC tarafta nominal gerilim yaklaşık 1100V, nominal akım 1540A' dir.

4.1. Şebeke Kaynaklı Faz-Faz Kısa Devre Arızası

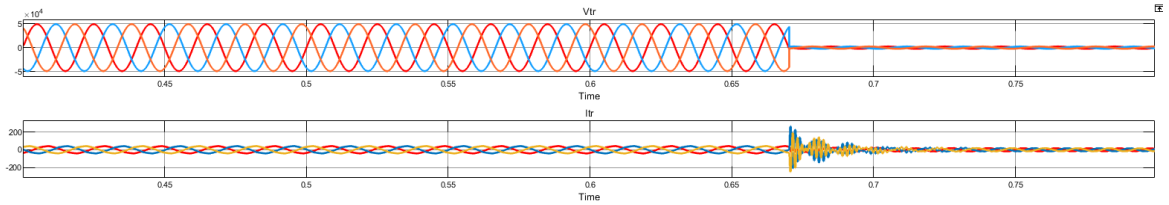
AC tarafta şebeke çıkışında bir faz-faz kısa devre arızası meydana gelmesi için Şekil 4.1' de seçili olan arıza bloğu tetiklenerek bir arıza durumu oluşturulmuştur. Arıza sonucunda AC taraftaki gerilimin efektif değeri 34,5 kV seviyesinden 0 kV seviyesine inmiştir, akımın efektif değeri ise anlık olarak 29A' den 188A seviyesine yükselmiştir. Şekil 4.2 ve 4.3' teki grafikler elde edilmiştir. Bu grafiklerde, şebeke bağlantı noktasında oluşan bir faz-faz kısa devresinin trafo çıkış gerilimini doğrudan etkilediği ancak fotovoltaik panellerin çıkışından okunan DC akım ve gerilimi etkilemediği görülmektedir.



Şekil 4.1 Şebeke kaynaklı faz-faz kısa devre arızası



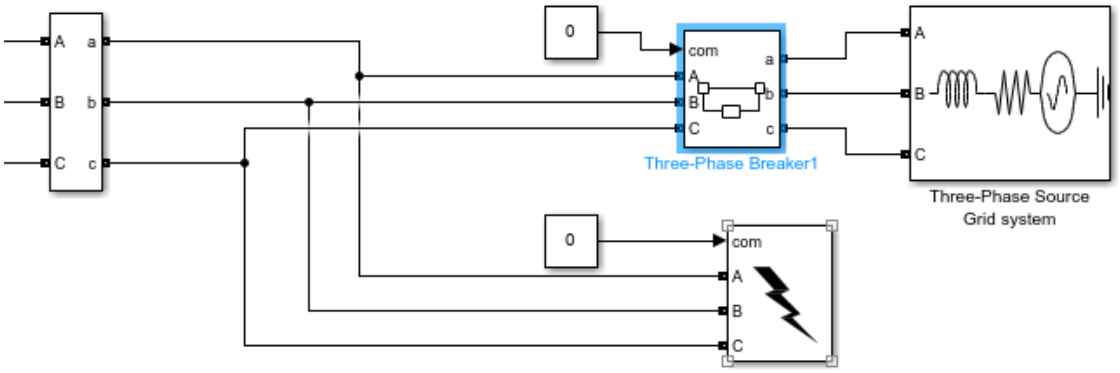
Şekil 4.2 Şebeke kaynaklı faz-faz kısa devre arızası DC ölçümler



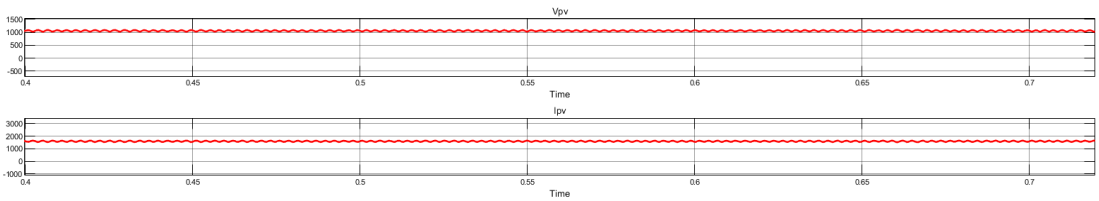
Şekil 4.3 Şebeke kaynaklı faz-faz kısa devre arızası AC ölçümler

4.2. Şebeke Kaynaklı Açık Devre Arızası

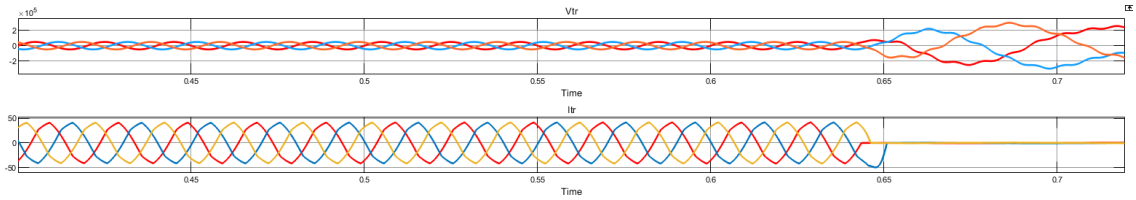
AC tarafta şebeke çıkışında açık devre arızası meydana gelmesi için Şekil 4.4' teki kesici dışarıdan açık olarak işaretlenmiştir. Arıza oluştuktan sonra Şekil 4.5 ve 4.6' daki grafiklerden de takip edilebileceği gibi trafonun şebeke tarafından alınan ölçümde trafo çıkış akımının açık devre durumu oluştuğu anda sıfırlandığı, çıkış geriliminin efektif değerinin ise ise 34,5 kV seviyesinden 212 kV seviyesine yükseldiği ve sinüs dalga şeklinin bozulduğu ancak fotovoltaik panellerin çıkışından okunan DC akım ve gerilimin etkilenmediği görülmektedir.



Şekil 4.4 Şebeke kaynaklı açık devre arızası



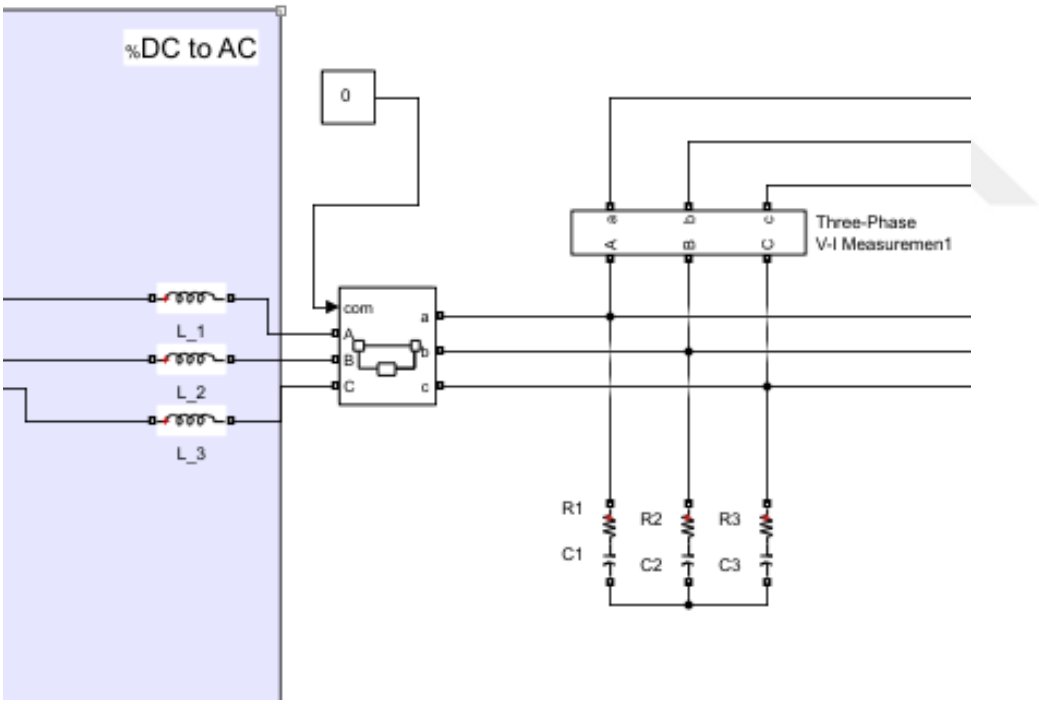
Şekil 4.5 Şebeke kaynaklı açık devre arızası DC ölçümler



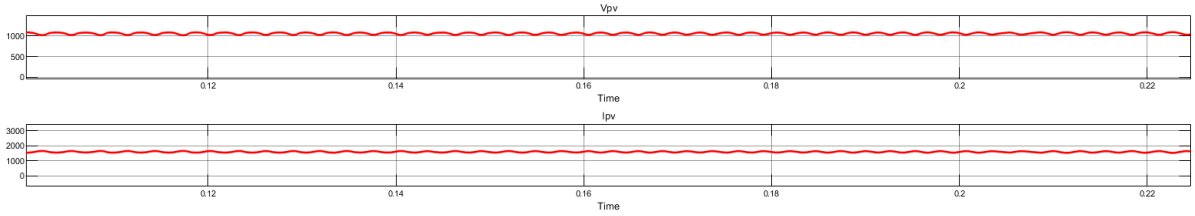
Şekil 4.6 Şebeke kaynaklı açık devre arızası AC çıkış akım ve gerilimi

4.3. İnvertör (Açık Devre) Arızası

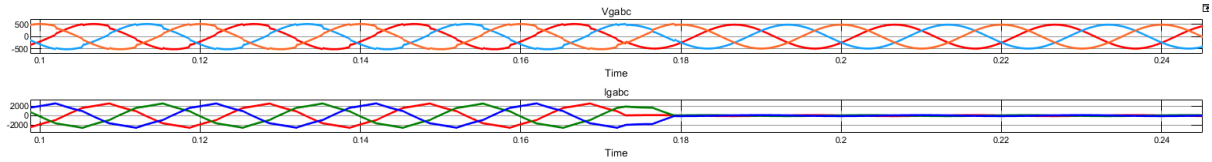
AC tarafta invertör çıkışında açık devre arızası meydana gelmesi için Şekil 4.7' deki kesici dışarıdan açık olarak işaretlenmiştir. Arıza oluştuktan sonra Şekil 4.8 ve 4.9' daki grafiklerden AC taraftaki akım ve güç değerlerinin sıfıra indiği, gerilim değerlerinin ise sinüsoidal formda kısa süreli düşük genlikli bir bozulmaya karşın sabit kaldığı görülmektedir. DC tarafta ise bu arızanın bir etkisi gözlemlenememektedir.



Şekil 4.7 AC taraf invertör açık devre arızası



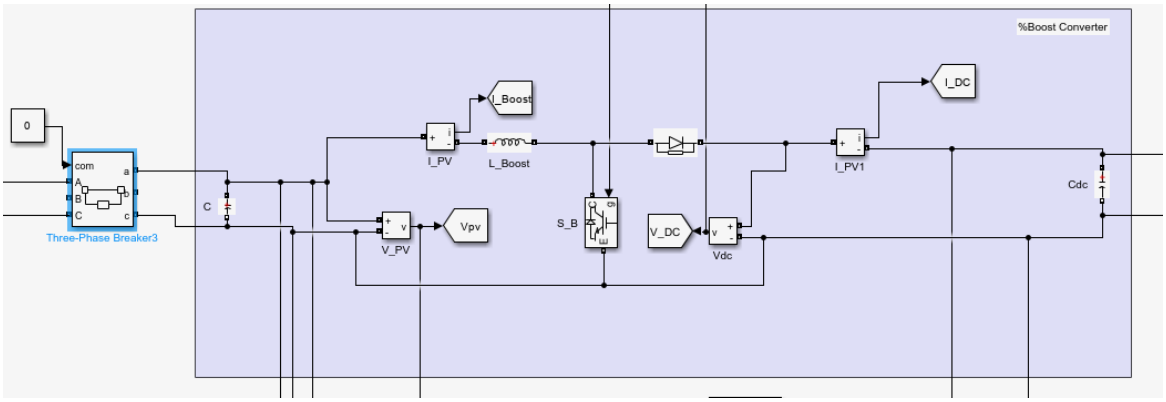
Şekil 4.8 AC taraf invertör açık devre arızası dc ölçümler



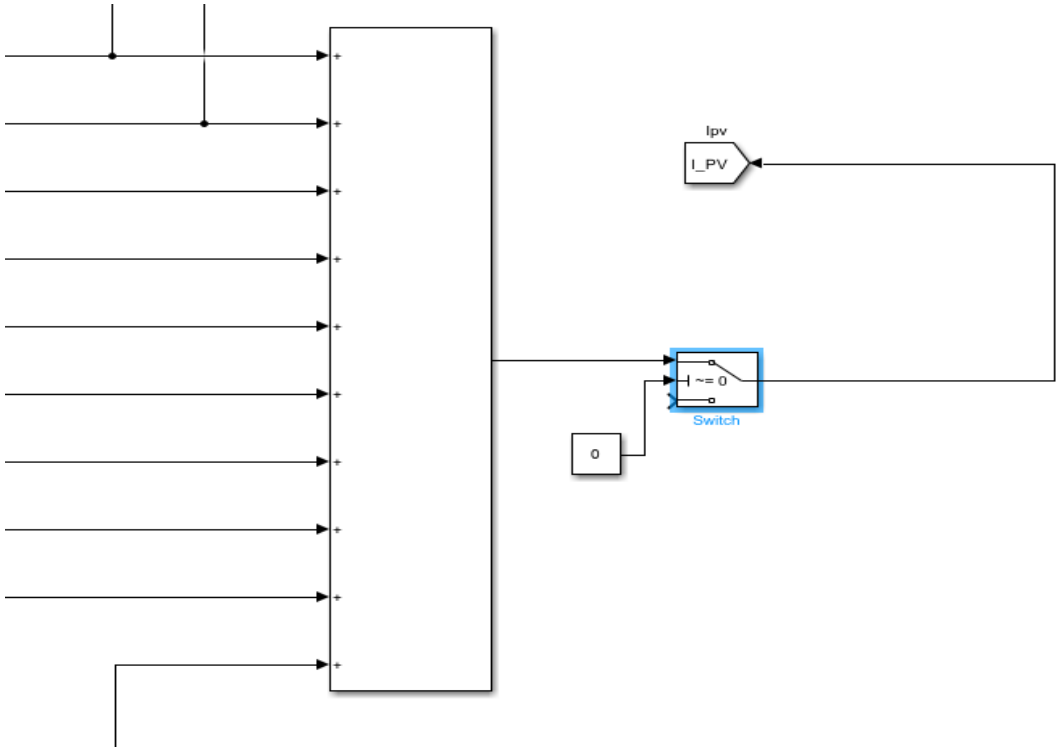
Şekil 4.9 AC taraf invertör açık devre arızası ac ölçümler

4.4. DC Taraf Açık Devre Arızası

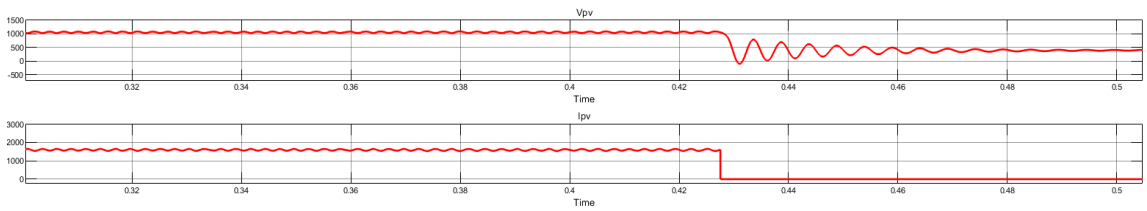
DC tarafta açık devre arızası meydana gelmesi için Şekil 4.10' daki kesici dışarıdan açık olarak işaretlenmiştir. DC akım, invertör kontrol bloklarında kullanılmak üzere toplama işlemine dahil edildiği için açık devre durumunda bir akım akmayacağından dolayı Şekil 4.10' daki seçim bloğundan panellerden gelen toplam akım sıfırlanmıştır. Şekil 4.11' deki anahtarlama bloğu ile, ölçümler için doğrudan panel bloğundan alınan akım bilgisi de açık devre arızası ile birlikte sıfırlanmıştır. Bu sayede gerçeğe daha yakın bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Arıza oluştuktan sonra Şekil 4.12 ve 4.13' teki grafiklerden de takip edilebileceği gibi DC tarafta açık devre arızası meydana gelmesi durumunda DC akımın arıza oluştuğu anda sıfırlandığı görülmektedir. DC gerilim ise arıza anında bir miktar düşüş ve dalgalanma göstermesine rağmen zamanla 400V değerinde sabitlenmektedir. Şekil 4.13' teki şebeke tarafından alınan ölçümlere bakıldığında AC çıkış akımının DC açık devre durumundan etkilendiği ancak, şebeke gerilimine DC açık devre durumunun herhangi bir etkisi olmadığı görülmektedir.



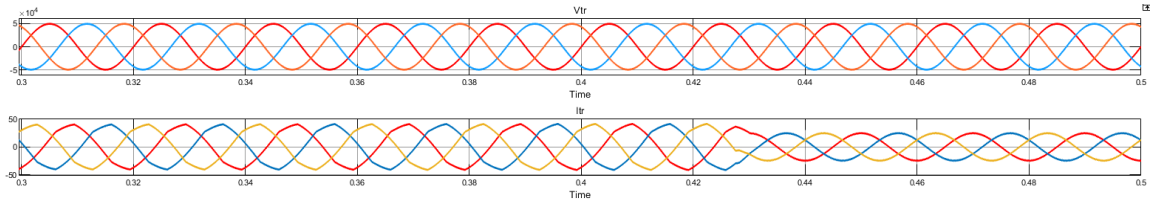
Şekil 4.10 DC taraf açık devre arızası-1



Şekil 4.11 DC taraf açık devre arızası-2



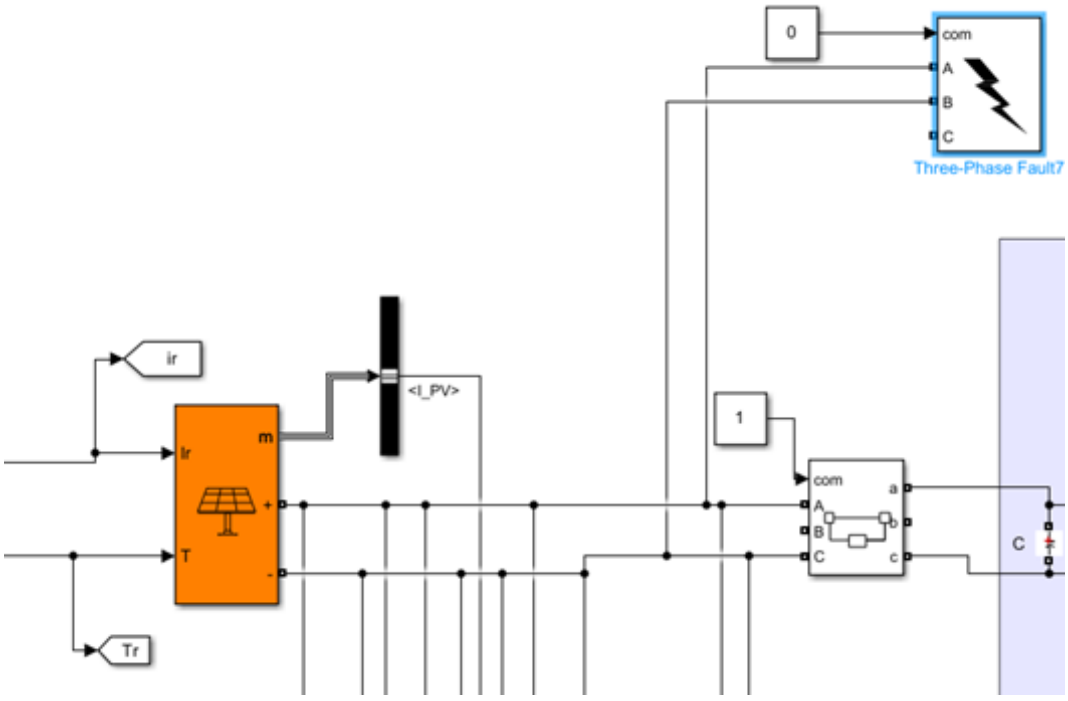
Şekil 4.12 DC taraf açık devre arızası DC ölçümler



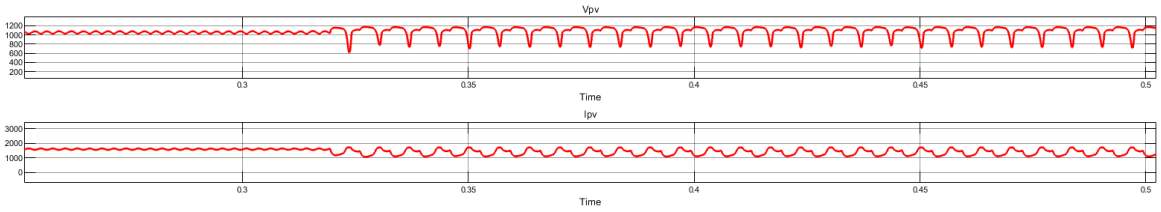
Şekil 4.13 DC taraf açık devre arızası AC ölçümler

4.5. DC Taraf Hat-Toprak Kısa Devre Arızası

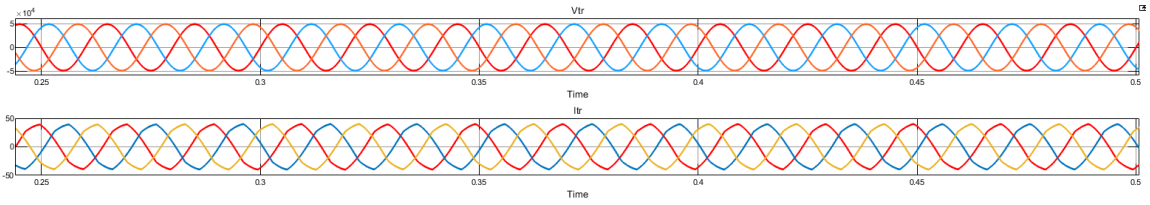
DC tarafta hat-toprak kısa devre arızası meydana gelmesi için Şekil 4.14' te seçili olan arıza bloğu tetiklenerek bir arıza durumu oluşturulmuştur. Şekil 4.15 ve 4.16' daki grafikler elde edilmiştir. DC taraftan alınan ölçümler ile elde edilen grafiklere bakıldığında, bir hat toprak kısa devre arızasının akım ve gerilimde büyük dalgalanmalara yol açtığı görülmüştür. Arıza oluştuktan sonra DC gerilim 600V ile 1200V arasında artıp azalmaktadır. Arıza durumu gözlenemeden simülasyonun durmaması için devre kesilmemiş ve bir süre arıza durumuna devam edilmiştir. AC taraftan alınan ölçümler ile oluşturulan grafiklerde, DC tarafta oluşan bir hat-toprak kısa devresinin trafo çıkış gerilimini doğrudan etkilemediği ancak trafo çıkış akımını etkilediği görülmektedir.



Şekil 4.14 DC taraf hat-toprak kısa devre arızası



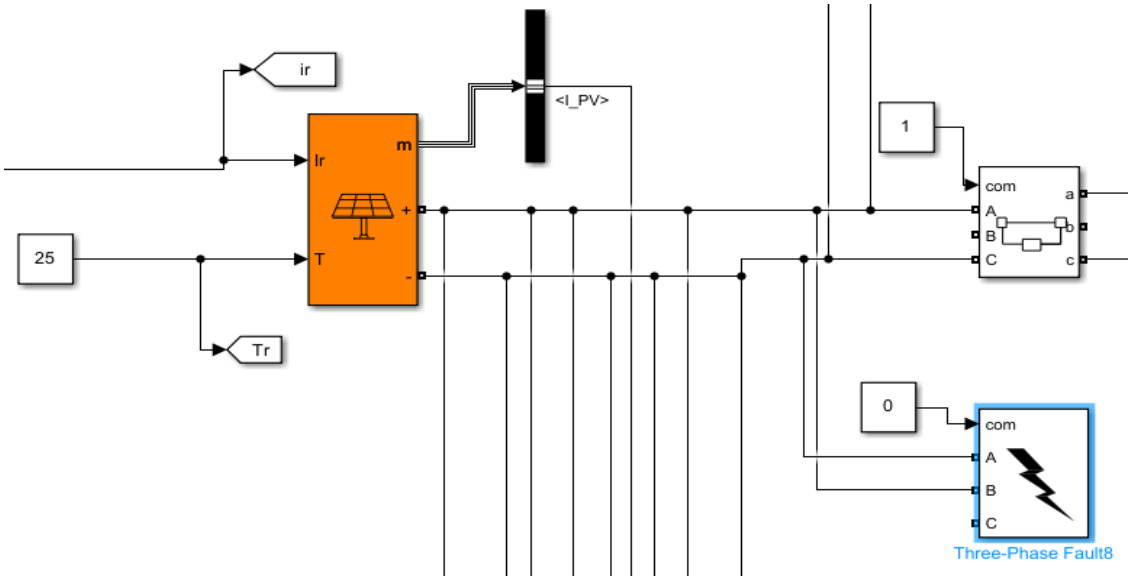
Şekil 4.15 DC taraf hat-toprak kısa devre arızası DC ölçümler



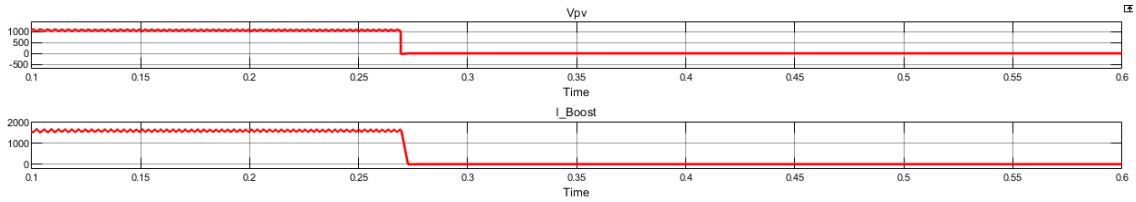
Şekil 4.16 DC taraf hat-toprak kısa devre arızası AC ölçümler

4.6. DC Taraf Hat-Hat Kısa Devre Arızası

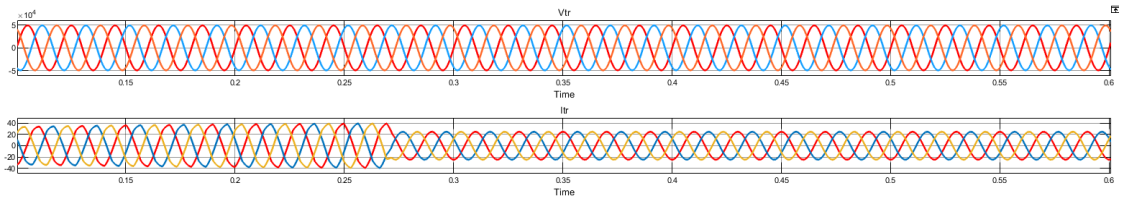
DC tarafta hat-hat kısa devre arızası meydana gelmesi için Şekil 4.17' de seçili olan arıza bloğu tetiklenerek bir arıza durumu oluşturulmuştur. Şekil 4.18 ve 4.19' daki grafikler elde edilmiştir. DC taraftan alınan ölçümlerden elde edilen grafiklere bakıldığında, bir hat hat kısa devre arızasının akım ve gerilimi sıfıra götürdüğü görülmüştür. AC taraftan alınan ölçümler ile oluşturulan grafiklerde, DC tarafta oluşan bir hat-hat kısa devresinin trafo çıkış gerilimini doğrudan etkilemediği ancak trafo çıkış akımını etkilediği görülmektedir.



Şekil 4.17 DC taraf hat-hat kısa devre arızası



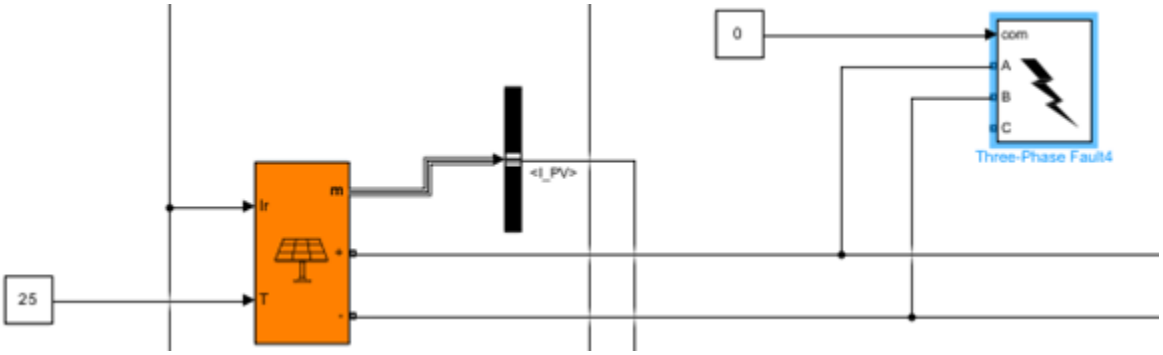
Şekil 4.18 DC taraf hat-hat kısa devre arızası DC ölçümler



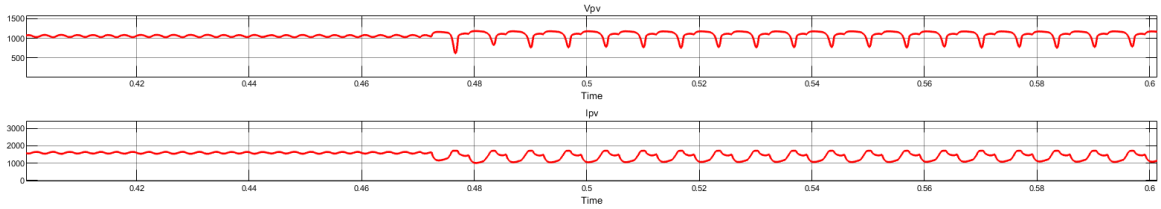
Şekil 4.19 DC taraf hat-hat kısa devre arızası AC ölçümler

4.7. Fotovoltaik Modül Arızası

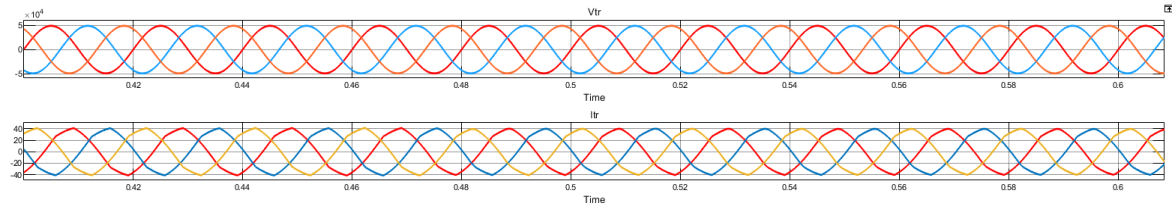
Fotovoltaik modül arızası için DC tarafta bağlantı kutusu olarak sembolize edilen kısımda hat-hat kısa devre arızası oluşturulmuştur. Bu arızanın meydana gelmesi için Şekil 4.20' de seçili olan arıza bloğu tetiklenerek bir arıza durumu oluşturulmuştur. Şekil 4.21 ve 4.22' deki grafikler elde edilmiştir. DC taraftan alınan ölçümlerle elde edilen grafiklere bakıldığında, bir modül arızasının akım ve gerilimde büyük dalgalanmalara yol açtığı görülmüştür. DC tarafta gerilim, 600V ile 1200V arasında, akım ise 1050A ile 1700 A arasında değişmektedir. Arıza durumu gözlenemeden simülasyonun durmaması için devre kesilmemiş ve bir süre arıza durumuna devam edilmiştir. AC taraftan alınan ölçümler ile oluşturulan grafiklerde, DC tarafta oluşan bir hat-toprak kısa devresinin trafo çıkış gerilimini doğrudan etkilemediği ancak trafo çıkış akımını ise modül arızasının ne kadar modülü kapsadığına göre değişerek etkilediği görülmektedir.



Şekil 4.20 Modül arızası



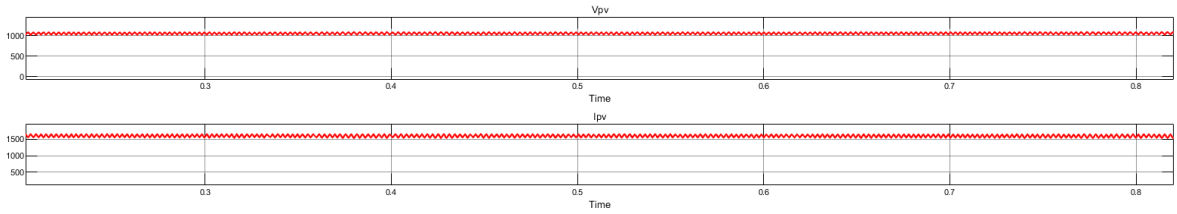
Şekil 4.21 Modül arızası DC ölçümler



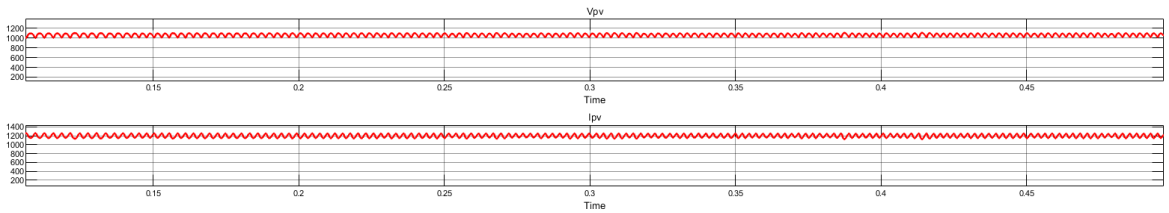
Şekil 4.22 Modül arızası AC ölçümler

4.8. Çevresel Etkiler (Gölgelenme)

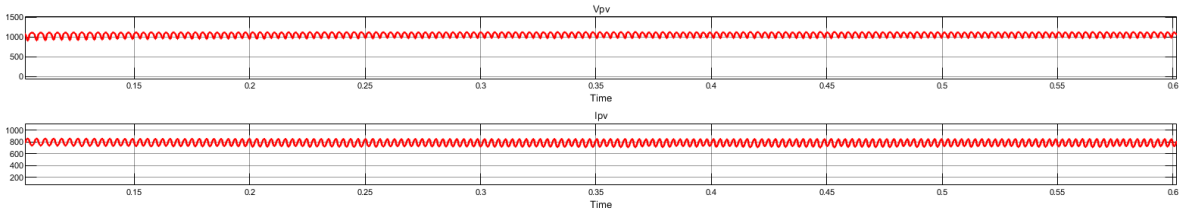
Işıma miktarındaki değişim doğrudan bir arıza sebebi olmasa da güç üretimine etkisi ve fazla gölgelenme durumunda fotovoltaik santrale etkisinin görülmesi amacıyla simüle edilmiştir. Işıma miktarındaki değişimler bir fotovoltaik güç santralinin üretim miktarını ve verimini doğrudan etkilemektedir. Bunun için aşağıdaki Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te ışıma miktarı sırasıyla 1000 W/m^2, 750 W/m^2 ve 500 W/m^2 olarak değiştirilerek üretime etkisi gözlenmiştir.



Şekil 4.23 Işıma miktarı 1000 W/m^2 iken üretilen akım ve gerilim



Şekil 4.24 Işıma miktarı 750 W/m^2 iken üretilen akım ve gerilim



Şekil 4.25 Işıma miktarı 500 W/m^2 iken üretilen akım ve gerilim

Yukarıdaki şekillerde, ışıma miktarı arttığında üretilen akımın da arttığı görülmektedir. Işıma miktarı düştüğünde ise düzensiz ve yetersiz üretim olacağı için akım hem azalmaktadır hem de sisteme zarar verecek kadar düzensiz bir hal almaktadır. Bu belirsiz hal durumunu ortadan kaldırmak için invertörlerin kontrol sistemlerinde devreye girmeleri için gerekli minimum ışıma miktarları tanımlanmaktadır.

4.9. Tartışma

Tez çalışmasında fotovoltaik santrallerdeki elektriksel arızalar sınıflandırılmış ve bu arızalar MATLAB Simulink programında modellenerek ölçüm verileri grafikler üzerinde incelenmiştir. Bu çalışmanın literatür araştırması kısmından çalışmanın tamamlanmasına kadar geçen sürede incelenen çalışmaların içerikleri geniş bir yelpazede olmakla birlikte bir kısım çalışmalar da doğrudan fotovoltaik güç santrallerindeki elektriksel arızaların bilgisayar ortamında simüle edilmesi ile ilgilidir. İncelenen tüm çalışmalar bu tez çalışması gibi elektriksel arızaları genel anlamıyla incelememiştir, bazı çalışmalarda yalnızca bir arıza simüle edilirken [60, 69, 70], bazı çalışmalarda birden fazla arıza simüle edilmiştir [51, 62, 71], bazı çalışmalarda ise hiç arıza simülasyon çıktısı verilmemiş ancak arızanın etkilerinden bahsedilmiştir [10, 37].

Oluşturulan Simulink modelinde AC tarafta faz-faz kısa devre arızası modellenmiş ve sonuçları gözlemlenmiştir. Bu durumda üç faz kısa devre arızası oluşturulduğunda AC gerilimin sıfıra doğru gittiği ancak akımın değerinin çok yükseldiği ve dalga şeklinin bozulduğu görülmüştür. Bu çalışmada oluşturulan simulink modeli literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, modellerde kullanılan santrallerle farklı güç değerlerine sahip olduğu için akım ve gerilim değerleri farklı olmasına rağmen grafiklerde benzer sonuçlar elde edilmiştir [60, 72, 73].

Oluşturulan MATLAB Simulink modelinde AC tarafta invertör ve şebeke çıkışında oluşan

açık devre arızalarında akımın sıfır olduğu gerilimin ise genliğinin ve dalga şeklinin bir miktar bozulduğu gözlemlenmiştir. Daha önce yapılan çalışmalara bakıldığında ise elde edilen sonuçların benzerlik gösterdiği görülmektedir [13, 61].

DC tarafta oluşturulan bir açık devre arızası durumunda ise DC akımın sıfır olduğu, DC gerilimin azaldığı ancak zaman içerisinde nominal seviyesine yaklaştığı, AC tarafta ise AC akımın sıfıra yaklaştığı, AC gerilimin ise değişimden etkilenmediği görülmüştür. Literatür araştırmasında erişilen çalışmalarda ise bu tez çalışmasındaki grafiklere yakın grafik çıktıları elde edilmiştir [51, 61, 74, 75].

Fotovoltaik güç santrali modelinde DC tarafta oluşacak bir hat-toprak kısa devre arızası durumunun DC akım ve gerilimde büyük dalgalanmalar yol açtığı görülmüştür. AC tarafta ise şebeke geriliminin etkilenmediği ancak akımın arıza durumundan etkilendiği görülmüştür. Bu grafik çıktılarından farklı olarak literatürdeki bazı çalışmalarda, kısa devre arızası sonrası sistem koruma elemanları devreye girmiş ve devre açılmış gibi simülasyon gerçekleştirildiği için kısa devre başladığında ölçüm alınması durdurulmuştur [9, 74]. Bazı çalışmalarda ise bu tez çalışmasında olduğu gibi devre kesilmemiş ve arıza durumu devam ettirilerek benzer grafikler üretilmiştir [61, 63].

DC tarafta hat-hat kısa devre arızası oluşturularak elde edilen grafikler incelendiğinde, DC taraftaki hat hat kısa devre arızasının akım ve gerilimi sıfıra götürdüğü görülmüştür. AC taraftan alınan ölçümler ile oluşturulan grafiklerde, DC tarafta oluşan bir hat-hat kısa devresinin trafo çıkış gerilimini doğrudan etkilemediği ancak trafo çıkış akımını etkilediği görülmektedir [61].

Fotovoltaik modül arızası modellenirken yine hat-hat kısa devresi oluşturulmuştur. Ancak modül arızası için oluşturulan hat-hat kısa devre arızasının modeldeki yeri farklı olduğu için DC taraf hat-hat kısa devre arızasından farklı sonuçlar elde edilmiştir. MATLAB Simulink modelinde elde edilen bu sonuçlar daha önce yapılmış çalışmalara yakın ama farklıdır. Aynı grafiğin elde edilememesinin sebeplerinden bir tanesi çıktıları göstermek için farklı grafikler kullanılmasıdır. Bu tez çalışmasında akım-zaman ve gerilim-zaman grafikleri kullanılmıştır ancak literatür araştırmasında ulaşılan bazı çalışmalar model ile ilgili açıklamaları akım-gerilim eğrisi üzerinden yapmıştır [71, 76]. Ancak elde edilen sonuçlar yine benzer olmuştur [62, 77].

Fotovoltaik güç santrallerindeki elektriksel arızaların sebeplerinden bir tanesi de çevresel etkenlerdir. Fotovoltaik güç santrallerinde sahaya daha çok dağılmış olan ve çevresel etilerden daha çok etkilenebilecek kısım DC kısım olduğu için çevresel etkiler DC tarafta oluşabilecek arızalar olarak gruplandırılmıştır. MATLAB Simulink modelinde çevresel etkileri kısa devre ve açık devre ile göstermek daha önce simüle edilmiş olan arızaları tekrar etmek olacağı için ışıma miktarındaki değişimin üretime etkisi gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar daha önce yapılmış çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile paralel özelliktedir [62, 69, 78].

Bu çalışmadaki uygulama diğer çalışmalardan temelde daha kapsayıcı olması ve arıza noktalarının çok çeşitli olması ile ayrılmaktadır. Tüm arızaların olması gereken yerlerde gösterilebilmesi için bu çalışmada oluşturulan MATLAB Simulink modeli mümkün olduğunca detaylı oluşturulmuştur. Literatür taraması sırasında incelenen çalışmalarda daha az sayıda arızanın modellendiği görülmüştür. Çalışmalar belirli bir arıza grubu veya fotovoltaik santralin belirli bir bölgesi için yapılmıştır. Bu tez çalışmasının ise bir fotovoltaik güç santralinin tüm ekipmanları ve tüm arıza bölgelerini içeren kapsayıcı bir çalışma olması hedeflenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Fotovoltaik güç santrallerinde arızalar üretimi engelleyen veya azaltan durumlardır. Bu arızalar kimi zaman kolay giderilirken kimi zaman da tespiti ve giderilmesi uzun zaman alabilmekte ve bu durum maddi kayıplara yol açabilmektedir.

Bu tez çalışmasında fotovoltaik güç santrallerinde görülen elektriksel arızalar sınıflandırılarak standartlaştırılmıştır. Sınıflandırma işlemi arızaların görülme yerlerine ve oluşma nedenlerine göre yapılmıştır. Bu kategorilendirme işlemi ile arızaların olası nedenleri ve lokasyonları tariflenerek arızaların tespiti ve giderilmesi kolaylaştırılmıştır. Saha uygulaması yapılmış olan gerçek bir santral MATLAB Simulink programında modellenerek elektriksel arızalar simüle edilmiştir ve modellenen arızaların sonuçları somutlaştırılmıştır. Bu sayede hem arıza tespiti ve çözüm yollarının aranması işletmeler için bir zorluk olmaktan çıkmıştır hem de arıza durumlarının modellenmesi sayesinde arızadan etkilenebilecek ekipmanlar ve etkilenme şekilleri somutlaştırılmıştır.

Yapılan çalışmada arızaların etkilerini yorumlamak için kullanılabilecek veriler, modelin grafik çıktıları ve arızaların oluşturulduğu yani temas edebileceği bölgenin büyüklüğüdür.

Modellenen arızalardan elde edilen grafik çıktılarına göre şebekeye etkisi en fazla olan arıza türü AC tarafta oluşan faz-faz kısa devre arızasıdır. AC tarafta gerçekleşen faz-faz kısa devre arızasının akım ve gerilim değerlerinde en büyük farklara yol açan arıza olduğu görülmektedir. DC tarafta ise en yüksek oranda değer değişimi DC tarafta oluşan hat-toprak kısa devresi arızasında görülmüştür.

Modellenen arızalardan elde edilen grafik çıktıları incelendiğinde sisteme etkisi en fazla olan arıza türlerinin DC tarafta gerçekleşen hat-hat ve hat-toprak kısa devre arızaları olduğu görülmektedir. Fotovoltaik güç sistemlerinde DC tarafta fotovoltaik paneller, birleştirici bağlantı kutuları, invertörlerin DC giriş kısımları gibi çeşitli ekipmanlar bulunmaktadır. Bu nedenle DC hat-hat ve hat-toprak kısa devre arızaları, fotovoltaik güç santralinde en çok ekipmana etki eden arızalardır.

Üretimi durdurmasına rağmen en az ekipmana etki eden ve en az kalıcı hasar bırakma riski olan arızanın AC açık devre arızası olduğu tespit edilmiştir.

Bu alanda yapılan başka çalışmalar olmasına rağmen bu tez çalışmasını diğer çalışmalardan

ayıran en önemli özellik kapsayıcı ve detaylı olmasıdır. Burada modellenen gerçek bir fotovoltaik güç santrali olduğu için benzer çalışma başka fotovoltaik güç santralleri için de uygulanabilir.

Bu tez çalışmasında gerçek bir fotovoltaik güç santrali modellenmiş olmasına rağmen fotovoltaik güç santrallerinin bir çoğunda düzenli kayıt alınmamasından ve tüm arızaların bir santralde görülmesi çok kolay olmadığından dolayı arızaların gerçek durum etkileri görülememiştir. Bu çalışmaya ek olarak gelecekte bir fotovoltaik güç santralinde görülen arızaların kayıtları tutulduktan sonra MATLAB Simulink üzerinde modellenerek model çıktıları ile gerçek arıza sırasında tutulan arıza kayıtları karşılaştırılırsa modelin gerçeğe yakınlığı test edilebilir.

KAYNAKLAR

[1] Lazzaretti, A.E., et al., *A Monitoring System for Online Fault Detection and Classification in Photovoltaic Plants.* Sensors, 2020. **20**(17): p. 4688.

[2] Abubakar, A., C.F.M. Almeida, and M. Gemignani, *Review of Artificial Intelligence-Based Failure Detection and Diagnosis Methods for Solar Photovoltaic Systems.* Machines, 2021. **9**(12): p. 328.

[3] Öncin, F., *Çatı Tipi Güneş Enerji Santralleri ve Dağıtım Tesislerine Bağlantı Kriterleri*, in *Fen Bilimleri Enstitüsü*. 2018, Gazi Üniversitesi: Ankara, Türkiye.

[4] Mansouri, N., et al., *Large Photovoltaic Power Plants Integration: A Review of Challenges and Solutions.* Energies, 2019. **12**(19): p. 3798.

[5] Ahmadipour, M., et al., *A Fast Fault Identification in a Grid-Connected Photovoltaic System Using Wavelet Multi-Resolution Singular Spectrum Entropy and Support Vector Machine.* Energies, 2019. **12**(13): p. 2508.

[6] Rakhshani, E., et al., *Integration of Large Scale PV-Based Generation into Power Systems: A Survey.* Energies, 2019. **12**(8): p. 1425.

[7] Mellit, A., G.M. Tina, and S.A. Kalogirou, *Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems: A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **91**: p. 1-17.

[8] Alsharif, M.H., J. Kim, and J.H. Kim, *Opportunities and challenges of solar and wind energy in South Korea: A review.* Sustainability, 2018. **10**(6): p. 1822.

[9] Madeti, S.R. and S. Singh, *A comprehensive study on different types of faults and detection techniques for solar photovoltaic system.* Solar Energy, 2017. **158**: p. 161-185.

[10] Dhimish, M., V. Holmes, and M. Dales, *Parallel fault detection algorithm for grid-connected photovoltaic plants.* Renewable energy, 2017. **113**: p. 94-111.

[11] Alam, M.K., et al., *A comprehensive review of catastrophic faults in PV arrays: types, detection, and mitigation techniques.* IEEE Journal of Photovoltaics, 2015. **5**(3): p. 982-997.

[12] Chen, Z., et al., *Intelligent fault diagnosis of photovoltaic arrays based on optimized kernel extreme learning machine and IV characteristics.* Applied energy, 2017. **204**: p. 912-931.

[13] Kurukuru, V.S.B., et al., *A novel fault classification approach for photovoltaic systems.* Energies, 2020. **13**(2): p. 308.

[14] Berghout, T., et al., *Machine learning-based condition monitoring for PV systems: State of the art and future prospects.* Energies, 2021. **14**(19): p. 6316.

[15] Demirel, E., *Güneş Enerji Santrallerinde Yıldırım Darbe Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi*, in *Fen Bilimleri Enstitüsü*. 2021, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Muğla, Türkiye.

[16] Bosman, L.B., et al., *PV system predictive maintenance: Challenges, current approaches, and opportunities.* Energies, 2020. **13**(6): p. 1398.

[17] Sabbaghpur Arani, M. and M.A. Hejazi, *The comprehensive study of electrical faults in PV arrays.* Journal of Electrical and Computer Engineering, 2016. **2016**.

[18] Popa, D.-L., et al. *Design and simulation of a 10 MW photovoltaic power plant using MATLAB and Simulink*. in *2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*. 2016. IEEE.

[19] Argyrou, M.C., et al. *A grid-connected photovoltaic system: Mathematical modeling using MATLAB/Simulink*. in *2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. 2017. IEEE.

[20] Zakri, A.A., et al., *Photovoltaic modeling methods based on matlab simulink implementation.* Sinergi, 2018. **22**(1): p. 1-6.

[21] Pagani, V.H., *Soiling Index Modeling for Photovoltaic Systems*. 2021, Instituto Politecnico de Braganca (Portugal).

[22] Lynn, P.A., *Electricity from sunlight: an introduction to photovoltaics*. 2011: John Wiley & Sons.

[23] Woyte, A. and S. Goy, *Large grid-connected photovoltaic power plants: Best practices for the design and operation of large photovoltaic power plants*, in *The Performance of Photovoltaic (PV) Systems*. 2017, Elsevier. p. 321-337.

[24] Elsaidi, A., *Photovoltaic (PV) type solar generators and their effect on distribution systems*. 2013: University of Missouri-Kansas City.

[25] Abamor, S., *Şebeke bağlantılı fotovoltaik enerji santrallerinin elektrik güç kalite parametrelerinin izlenmesi ve analizi/Monitoring and analysis of electrical power quality parameters of on-grid photovoltaic power plants*. 2016.

[26] Altun, D., *Güneş enerji santrallerinde depolanabilirlik ve enerji satış maliyeti*.

2019, Necmettin Erbakan University (Turkey).

[27] Atasoy, B. and S.S. Tezcan. *Comparison of String and Central Inverter for 10MW PV Plant*. in *2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*. 2021. IEEE.

[28] Desai, A., I. Mukhopadhyay, and A. Ray. *Performance analysis of string and central inverter based ideally designed utility scale solar pv plant*. in *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. 2020. IEEE.

[29] Kaya, A.A., *Türkiye'deki Güneş Enerjisi Santrallerinin Üretim Potansiyelinin Enerji ve Ekserji Verimliliği Açısından Belirlenmesi*. 2016, İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

[30] Aghaei, M., et al., *Solar PV power plants*, in *Photovoltaic Solar Energy Conversion*. 2020, Elsevier. p. 313-348.

[31] Zhao, J., et al., *A photovoltaic array fault diagnosis method considering the photovoltaic output deviation characteristics.* International Journal of Photoenergy, 2020. **2020**: p. 1-11.

[32] Boyd, M., *NIST Weather Station for Photovoltaic and Building System Research.* National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, Technical Note, 2016(1913).

[33] Eltawil, M.A. and Z. Zhao, *Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review.* Renewable and sustainable energy reviews, 2010. **14**(1): p. 112-129.

[34] Eray, S., *Fotovoltaik Sistemlerin Kurulum Aşamaları Ve İşletimdeki Santrallerin Gerçekleşen Üretim Değerlerinin Simulasyon Sonuçları İle Karşılaştırılması*. Enerji Enstitüsü.

[35] Lazzaretti, A.E., et al., *A monitoring system for online fault detection and classification in photovoltaic plants.* Sensors, 2020. **20**(17): p. 4688.

[36] Chouder, A. and S. Silvestre, *Automatic supervision and fault detection of PV systems based on power losses analysis.* Energy conversion and Management, 2010. **51**(10): p. 1929-1937.

[37] Shah, A.A., et al., *A novel prediction error-based power forecasting scheme for real pv system using pvusa model: A grey box-based neural network approach.* IEEE Access, 2021. **9**: p. 87196-87206.

[38] Chao, K.-H., C.-J. Li, and S.-H. Ho. *Modeling and fault simulation of photovoltaic generation systems using circuit-based model*. in *2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*. 2008. IEEE.

[39] Ropp, M.E. and S. Gonzalez, *Development of a MATLAB/Simulink model of a single-phase grid-connected photovoltaic system.* IEEE transactions on Energy conversion, 2009. **24**(1): p. 195-202.

[40] Tong, Q., et al., *Classification Method of Photovoltaic Array Operating State Based on Nonparametric Estimation and 3σ Method.* Sustainability, 2023. **15**(10): p. 7769.

[41] Dhanraj, J.A., et al., *An effective evaluation on fault detection in solar panels.* Energies, 2021. **14**(22): p. 7770.

[42] Li, B., et al., *Application of Artificial Neural Networks to photovoltaic fault detection and diagnosis: A review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021. **138**: p. 110512.

[43] Gandoman, F.H., et al., *Review of FACTS technologies and applications for power quality in smart grids with renewable energy systems.* Renewable and sustainable energy reviews, 2018. **82**: p. 502-514.

[44] Zúñiga, A.A., et al., *Classical failure modes and effects analysis in the context of smart grid cyber-physical systems.* Energies, 2020. **13**(5): p. 1215.

[45] Mahalakshmi, R., et al., *Classification and detection of faults in grid connected photovoltaic system.* Int. J. Sci. Eng. Res, 2016. **7**(4): p. 149-154.

[46] Oyekale, J., et al., *Impacts of renewable energy resources on effectiveness of grid-integrated systems: Succinct review of current challenges and potential solution strategies.* Energies, 2020. **13**(18): p. 4856.

[47] Hong, Y.-Y. and R.A. Pula, *Methods of photovoltaic fault detection and classification: A review.* Energy Reports, 2022. **8**: p. 5898-5929.

[48] Appiah, A.Y., et al., *Review and performance evaluation of photovoltaic array fault detection and diagnosis techniques.* International Journal of Photoenergy, 2019. **2019**.

[49] Aziz, F., et al., *A novel convolutional neural network-based approach for fault classification in photovoltaic arrays.* IEEE Access, 2020. **8**: p. 41889-41904.

[50] Kim, J.C.K., *DC Arc Fault Detection and Protection in Solar Photovoltaic Power*

Systems. 2022, Northeastern University.

[51] Ji, D., et al., *Photovoltaic array fault detection by automatic reconfiguration.* Energies, 2017. **10**(5): p. 699.

[52] Memon, S.A., et al., *A machine-learning-based robust classification method for PV panel faults.* Sensors, 2022. **22**(21): p. 8515.

[53] Basnet, B., H. Chun, and J. Bang, *An intelligent fault detection model for fault detection in photovoltaic systems.* Journal of Sensors, 2020. **2020**: p. 1-11.

[54] Bhuvanesh, A., et al., *Classification and Detection of Faults in Grid Connected Photovoltaic System.* International Journal of Printing, Packaging & Allied Sciences, 2016. **4**: p. 2430-38.

[55] Köntges, M., et al., *Review of failures of photovoltaic modules.* 2014.

[56] Gökgöz, M., Ş. Sağlam, and B. Oral, *Challenges during commissioning and operation in photovoltaic power plants by electrical faults.* Turkish Journal of Electromechanics and Energy, 2023. **8**(1).

[57] Hossain, M.S., N.K. Roy, and M.O. Ali. *Modeling of solar photovoltaic system using MATLAB/Simulink*. in *2016 19th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*. 2016. IEEE.

[58] Srivastav, A.K., et al. *Modelling and Simulation of Photo voltaic System Using Matlab/Simulink*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. IOP Publishing.

[59] Oum, C. and Y. Zhang. *Modelling of Large-scale Grid-connected PV System with Reactive Power Control Methods*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. IOP Publishing.

[60] Hota, P.K., B. Panda, and B. Panda, *Fault analysis of grid connected photovoltaic system.* American Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2016. **5**(4): p. 35-44.

[61] Zhao, Y., *Fault analysis in solar photovoltaic arrays*. 2011, Northeastern University.

[62] Kumar, B.P., et al., *Online fault detection and diagnosis in photovoltaic systems using wavelet packets.* IEEE Journal of Photovoltaics, 2017. **8**(1): p. 257-265.

[63] Mirhosseini, M., J. Pou, and V.G. Agelidis, *Single-and two-stage inverter-based grid-connected photovoltaic power plants with ride-through capability under grid faults.* IEEE Transactions on sustainable energy, 2014. **6**(3): p. 1150-1159.

[64] MathWorks. https://uk.mathworks.com/help/sps/examples.html?category=renewable-energy-relib&s_tid=CRUX_topnav. (Erişim tarihi: 15.12.2023)

[65] Abdellah, A., M. Larbi, and D. Toumi, *Open circuit fault diagnosis for a five-level neutral point clamped inverter in a grid-connected photovoltaic system with hybrid energy storage system.* Electrical Engineering & Electromechanics, 2023(6): p. 33-40.

[66] Argyrou, M.C., P. Christodoulides, and S.A. Kalogirou. *Modeling of a photovoltaic system with different MPPT techniques using MATLAB/Simulink*. in *2018 IEEE international energy conference (ENERGYCON)*. 2018. IEEE.

[67] Bousbait, F.I., *PV Grid Connected System Modeling and Performance in Dhahran Environment*. 2015, King Fahd University of Petroleum and Minerals (Saudi Arabia).

[68] Keles, C., et al. *A photovoltaic system model for Matlab/Simulink simulations*. in *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. 2013. IEEE.

[69] Ishaque, K., Z. Salam, and H. Taheri, *Accurate MATLAB simulink PV system simulator based on a two-diode model.* Journal of power electronics, 2011. **11**(2): p. 179-187.

[70] Manohar, K. and P.S. Rani, *Mppt and simulation for a grid-connected photovoltaic system and fault analysis.* The International Journal of Engineering and Science (IJES), 2012. **1**(2): p. 158-166.

[71] Fezzani, A., et al. *Modeling and analysis of the photovoltaic array faults*. in *2015 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT)*. 2015. IEEE.

[72] Ekici, S., F. Unal, and U. Ozleyen, *Comparison of different regression models to estimate fault location on hybrid power systems.* IET Generation, Transmission & Distribution, 2019. **13**(20): p. 4756-4765.

[73] Mohammedsaeed, E.K., M.A. Abdelwahid, and K. Jia, *Distance protection and fault location of the PV power plants distribution lines.* The Journal of Engineering, 2019. **2019**(16): p. 2710-2716.

[74] Ahmad, S., et al. *Fault classification for single phase photovoltaic systems using*

machine learning techniques. in *2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE)*. 2018. IEEE.

[75] Khan, M.A., et al., *A model-based approach for detecting and identifying faults on the DC side of a PV system using electrical signatures from IV characteristics.* Plos one, 2022. **17**(3): p. e0260771.

[76] Haque, A., et al., *Fault diagnosis of photovoltaic modules.* Energy Science & Engineering, 2019. **7**(3): p. 622-644.

[77] Alsaif, A., *Modeling, Control, and Operation of a Grid-Tied Solar Photovoltaic Inverter in Unbalanced Conditions*, in *Department of Electrical Engineering*. 2022, University of South Florida. p. 129.

[78] Alotaibi, S., *A current-source modular converter for large-scale photovoltaic systems*. 2023, Lancaster University.