



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNİN GÜÇ KALİTESİ ÜZERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Naci OBUT

**Ağustos-2024
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNİN GÜÇ KALİTESİ ÜZERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Naci OBUT

**Danışman
Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR**

**Ağustos-2024
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Naci OBUT tarafından hazırlanan “Güneş Enerji Santrallerinin Güç Kalitesi Üzerine Etkisinin İncelenmesi” adlı tez çalışması 26/08/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ömer Faruk ERTUĞRUL

.....

Danışman

Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Davut ÖZHAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Naci OBUT

26/08/2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİNİN GÜÇ KALİTESİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Naci OBUT

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Rıda Tür

2024, 44 Sayfa

Jüri

Danışmanın Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR
Prof. Dr. Ömer Faruk ERTUĞRUL
Dr. Öğr. Üyesi Davut ÖZHAN

Günlük hayatta kullanılan tüm cihazların ve ekipmanların normal çalışabilmesi ve ömürlerinden kayıp vermeden performans gösterebilmeleri için belirli elektriksel sınırlamalar gereklidir ve bu sınırlamalar Enerji Kalitesi olarak tanımlanır. Enerji kalitesi, hem enerji üreticileri hem de tüketiciler için büyük önem taşır. Bu bağlamda, belirli güç parametreleri ve standartlara uyum, enerji kalitesinin yüksek seviyede tutulmasını sağlar ve bu sayede kaliteli elektrik enerjisi son kullanıcıya iletilir. Güç kalitesi parametrelerinin ölçülmesi, elektrik santrallerinde ve santrallere bağlı cihazlarda meydana gelebilecek sorunların önlenmesinde önemli bir rol oynar. Problemlerin hızlı bir şekilde tespit edilmesi, çözüme ulaşılması ve sistem arızalarının önlenmesi hayati önem taşır. Enerji santrallerinde teknik kaliteyi belirlemek amacıyla; ölçüm esasları, teknik kalite parametreleri ve sınır değerleri, teknik kalite ölçümleri, ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi ve gerekli işlemlerin gerçekleştirilmesi teknik kalitenin korunmasını ve sürekliliğini sağlamaktadır.

Dağıtık üretim sistemlerinin şebekeye entegrasyonunda güç kalitesi kavramı belirleyici bir rol oynar ve kritik bir öneme sahiptir. Şebekeye bağlı GES (Güneş Enerji Sistemi) ve benzeri sistemler, dağıtık üretim sistemleri olarak kabul edilir. Bu tür sistemlerin entegrasyonu sırasında, gerilim dalgalanmaları, harmonik distorsiyonlar, kısa devre akım seviyesinin artması, arıza esnasında ve sonrasında ortaya çıkan davranışlar ve şebeke gerilim/frekans değişiklikleri gibi çeşitli sorunlar ortaya çıkabilir. Bu bağlamda, D-STATCOM (Dağıtılmış Statik Kompanzatör) gibi ileri teknoloji çözümleri, bu tür güç kalitesi sorunlarının etkin bir şekilde yönetilmesi için kullanılabilir. D-STATCOM, şebeke bağlantılı sistemlerde gerilim dalgalanmalarını dengeleyerek, reaktif güç kompanzasyonu sağlayarak ve harmonik distorsiyonları azaltarak şebekenin stabilitesini ve güvenilirliğini artırır. Bu nedenle, planlanan tez çalışmasında, bu entegrasyon zorlukları detaylı olarak incelenecek ve D-STATCOM gibi çözümler kullanılarak geliştirilecek öneriler ile bu sorunların üstesinden gelinmesi amaçlanacaktır.

Anahtar Kelimeler: Enerji, Güç Kalitesi, Güneş Enerji Sistemleri, D-STATCOM

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SOLAR POWER PLANTS ON POWER QUALITY

Naci OBUT

Batman University Graduate Education Institute

Department of Electrical and Electronics Engineering

Advisor: Assoc. Dr. Mehmet Rıda TÜR

2024, 44 Pages

Jury

Advisor Assoc. Dr. Mehmet Rıda TÜR

Prof. Dr. Ömer Faruk ERTUĞRUL

Dr. Davut ÖZHAN

In order for all devices and equipment used in daily life to operate normally and maintain their performance throughout their lifespan, certain electrical limitations are required, and these limitations are defined as energy quality. Energy quality is of great importance to both energy producers and consumers. In this context, compliance with specific power parameters and standards ensures that energy quality is maintained at a high level, thereby allowing quality electrical energy to be transmitted to the end user. Measuring power quality parameters plays a crucial role in preventing potential problems in power plants and the devices connected to them. The rapid detection of problems, finding solutions, and preventing system failures are vital. To determine technical quality in power plants, measurement principles, technical quality parameters and limit values, technical quality measurements, evaluation of measurement results, and the execution of necessary operations ensure the preservation and continuity of technical quality.

The concept of power quality plays a decisive role in the integration of distributed generation systems into the grid and is of critical importance. Solar Energy Systems (GES) and similar systems connected to the grid are considered distributed generation systems. During the integration of such systems, various issues such as voltage fluctuations, harmonic distortions, increases in short-circuit current levels, behaviors during and after faults, and grid voltage/frequency changes may occur. In this context, advanced technological solutions such as D-STATCOM (Distributed Static Compensator) can be used to effectively manage these power quality problems. D-STATCOM enhances the stability and reliability of the grid by balancing voltage fluctuations, providing reactive power compensation, and reducing harmonic distortions in grid-connected systems. Therefore, in the planned thesis study, these integration difficulties will be examined in detail, with the aim of overcoming these problems through suggestions developed using solutions such as D-STATCOM.

Keywords: Energy, Power Quality, Solar Energy Systems, D-STATCOM

ÖNSÖZ

Akademik kariyerimin önemli bir dönüm noktasını temsil eden bu tez çalışmasının fikir aşamasından başlayıp tüm aşamalarında akademik bilgilerin yanında, maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen değerli görüşleriyle çalışmamı zenginleştiren danışman hocam Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR'e teşekkürlerimi sunuyorum. Eğitim-öğretim hayatım ve tüm yaşamım boyunca her zaman yanımda olan manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ediyorum.

Naci OBUT
BATMAN-2024



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
TABLolar DİZİNİ	vi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. GÜNEŞ ENERJİSİ ve FOTOVOLTAİK SİSTEMLER	6
3.1. Dünyada Güneş Enerjisi	6
3.2. Türkiye’de Güneş Enerjisi	6
3.3. Fotovoltaik Hücre Çeşitleri	7
3.4. Fotovoltaik Hücresinin Matematiksel Modeli	9
3.4.1. Tek diyot modeli	9
3.4.2. Çift diyot modeli	11
3.4.3. Üç diyot modeli	12
3.5. Fotovoltaik Sistemler	13
3.6. Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Sistemler	13
3.7. Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemler	14
3.8. Hibrit Fotovoltaik Sistemler	14
4. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÜÇ KALİTESİ	16
4.1. Güç Kalitesi Ölçümleri ve Analizi	17
4.1.1. Gerilim etkin değeri	18
4.1.2. Gerilim dengesizliği	18
4.1.3. Gerilim çökmesi	18
4.1.4. Gerilim titreşimi (Flicker)	19
4.1.5. Gerilim harmoniği – Toplam harmonik bozulma	19
4.1.6. Frekans değişimleri	20
5. GERİLİM DÜZENLEMELERİ İÇİN DAĞITILMIŞ STATİK KOMPANZATÖRÜN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU	21
5.1. DSTATCOM Nedir?	21
5.2. D-STATCOM Çalışma Prensipleri	22
5.3. Matematiksel Modelleme	23
5.4. Simülasyon Sonuçları	24

6. ÖNERİLER.....	36
KAYNAKLAR	38
ÖZGEÇMİŞ	43



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

D_1	: Diyot
R_{sh}	: Şönt Direnç
R_s	: Seri Direnç
V	: Çıkış Direnci
I_0	: Diyot Doygunluk Akımı
a	: İdeallik Faktörü
I_{sh}	: Şönt Direnç Akımı
I	: Çıkış Akımı
I_{ph}	: Fotogenerasyon Akımı
k	: Bozaltman Sabiti
T	: Hücre Sıcaklığı
q	: Elektron Yüğü
V_t	: Termal Voltaj
TBH_v	: Toplam Harmonik Bozulma
U	: Harmonik Bileşenin Genliği
v_d ve v_q	: Gerilim Bileşenleri
L_s	: Şönt Reaktans
R_s	: Reaktans Direnci
w	: Açısal Hız
i_d ve i_q	: Akım Bileşenleri

Kısaltmalar

YE	: Yenilenebilir Enerji
GK	: Güç Kalitesi
FV	: Fotovoltaik
IEC	: Uluslararası Elektronik Komisyonu
D-statcom	: Dağıtım Statik Senkron Konpanzatör
FACTS	: Esnek AC İletim Sistemi
AC	: Alternatif Akım
RMS	: Kök Ortalama Kare
PSCAD	: Güç Sistemleri Bilgisayar Destekli Yazılım
DC	: Doğru Akım
EPDK	: Elektrik Piyasası Düzenleme Kurumu
UPQC	: Birleşik Güç Kalitesi Düzenleyici
VSC	: Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü
VSI	: Gerilim Kaynaklı İnverter
PI	: Propotional Integral
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Türkiye'nin güneş haritası	7
Şekil 3.2 P-Tipi ve N-Tipi birleşimi (Çakmak, 2012)	8
Şekil 3.3 Foton etkisi ile oluşan elektrik akımı (Quaschnig, 2014).....	9
Şekil 3.4 Tek diyot modeli.....	10
Şekil 3.5 Çift Diyot Modeli	11
Şekil 3.6 Üç Diyot Modeli	12
Şekil 3.7 Şebekeden bağımsız FV sistemin şeması (Çakmak, 2012)	13
Şekil 3.8 Şebekeye bağlı FV sistemin şeması (Çakmak, 2012).....	14
Şekil 3.9 Hibrit FV sistemin bağlantı şeması (Çakmak, 2012)	15
Şekil 4.1 Gerilim çömesi	19
Şekil 5.1 D-STATCOM'un bu temel çalışma prensibi (Akagi vd., 2017).	23
Şekil 5.2 DSTATCOM Sistemi ile Harmonik Filtrasyonu ve Güç Kalitesi İyileştirme Blok Diyagramı.....	24
Şekil 5.3 Faz Akımları	25
Şekil 5.4 Faz Gerilimleri.....	25
Şekil 5.5 RMS Grafiği	26
Şekil 5.6 Aşırı Akım Çeken Endüktif Yük Devreye Girdiğinde Gerilimin RMS Grafiği	27
Şekil 5.7 aşırı akım çeken endüktif yük devreye girdiğinde üç faz gerilimin grafiği.....	28
Şekil 5.8 Aşırı Akım Çeken Endüktif Yük Devreye Girdiğinde Yükün Çektiği Üç Faz Akım Grafiği.....	29
Şekil 5.9 dstatcom devrede iken RMS grafiği	30
Şekil 5.10 dstatcom devrede iken üç fazlı yük akımının grafiği	30
Şekil 5.11 Dstatcom devrede iken üç fazlı yük gerilim grafiği	31
Şekil 5.12 Yük Trafında Üç Faz Kısa Devre Arızası RMS Grafiği	32
Şekil 5.13 Yük Tarafından Üç Faz Kısa Devre Arızası Meydana Geldiğinde Çekilen Üç Faz Akım Grafiği	32
Şekil 5.14 Yük Tarafından Üç Faz Kısa Devre Arızası Meydana Geldiğinde Çekilen Üç Faz Gerilim Grafiği.....	33
Şekil 5.15 Dstatcom Devreye girdiğinde Yük Tarafında Üç Faz Kısa Devre Arızası anındaki RMS Grafiği.....	34
Şekil 5.16 Dstatcom Devreye girdiğinde Yük Tarafında Üç Faz Kısa Devre Arızası süresince RMS Grafiği.....	34
Şekil 5.17 Dstatcom Devreye girdiğinde Üç Faz Kısa Devre Arızası ile Yük Tarafında Çekilen Akım Grafiği	35
Şekil 5.18 Dstatcom Devreye girdiğinde Üç Faz Kısa Devre Arızası Esnasında Yük Gerilim Grafiği	35

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1 Türkiye’de aylık güneş enerjisi ve güneşlenme süresi (Haydaroğlu, 2017) 7



1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji (YE) kaynakları, dünya çapında artan elektrik talebiyle desteklenerek sürekli bir büyüme kaydetmiştir. Fotovoltaik (FV) paneller gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının maliyetlerindeki düşüş (Ellis vd., 2012), karbon emisyonlarının azaltılması, enerji arzının sürdürülebilirliği ve enerji verimliliğinin artırılması gibi faktörler nedeniyle kullanımını teşvik etmektedir (Hong vd., 2014). Bu sebeplerden dolayı, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı güçlü bir şekilde desteklenmektedir. Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarının artan kullanımı, elektrik dağıtım ağlarını Güç Kalitesi (GK) problemlerine karşı daha hassas hale getirmiştir (Roselund vd., 2015, Liang vd., 2015). Özellikle FV sistemlerinin fiyatlarındaki önemli düşüş, güneş enerjisinden elektrik üretiminin hızla artmasına neden olmuştur. Güneş enerjisinin elektrik şebekesine entegrasyonu, geleneksel santrallerin çevresel etkilerini minimize etme potansiyeli sunarak birçok araştırmacıyı bu entegrasyon sürecinde ortaya çıkan sorunları incelemeye yönlendirmiştir (Cheng vd. 2015, Mahela vd., 2017). Dağıtım ağlarında sıkça rastlanan güç kalitesi sorunları ve güneş enerjisi penetrasyonundaki artış, bu ağların güç kalitesinin analizini zorunlu bir gereklilik haline getirmiştir.

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC), güç kalitesini "normal çalışma koşulları altında sağlanan elektrik arzının fiziksel özelliklerinin, tüketici süreçlerini aksatmayacak şekilde olması" olarak tanımlar (Abdelhay vd., 2011). Güç kalitesi, esasen, enerji sağlayıcıları tarafından sunulan voltajın kalitesini ifade eder. Güneş enerjisi santrallerinin güç kalitesi üzerindeki etkisinin incelenmesi, enerji sistemlerinin sürdürülebilirliği ve güvenilirliği açısından büyük önem taşır. Bu santrallerin entegrasyonu sırasında karşılaşılan başlıca güç kalitesi sorunları arasında harmonikler, voltaj dalgalanmaları, reaktif güç kompanzasyonu, ters güç akışı ve güç faktörü problemleri yer alır (Shi vd., 2018). Bu sorunlar, özellikle yüksek penetrasyon seviyelerinde daha belirgin hale gelmekte ve güneş enerjisi jeneratörlerinin şebekeye entegrasyonunu zorlaştırabilmektedir (Elshiekh vd., 2018).

Bu nedenle, güneş enerjisi santrallerinin şebekeye entegrasyonunun güç kalitesi üzerindeki etkilerinin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Bu analiz, güç kalitesinin iyileştirilmesine yönelik stratejilerin geliştirilmesine ve uygulanmasına katkı sağlayabilir. Özellikle zayıf şebekelerde, akım geçişleri büyük voltaj dalgalanmalarına yol açabilir, bu da güç kalitesi sorunlarını daha karmaşık hale getirir. Bu noktada, Dağıtım

Statik Senkron Kompanzatör'ün (D-STATCOM) gerilim düzenlemesi ve modelleme yöntemleri, şebeke stabilitesini koruma ve gerilim dalgalanmalarını etkin bir şekilde yönetme konusunda kritik bir rol oynar. Dolayısıyla, D-STATCOM gibi cihazların kullanımı, güneş enerjisi santrallerinin güvenilir bir şekilde entegrasyonunu sağlamak ve güç kalitesi sorunlarını minimize etmek için büyük önem taşımaktadır.

Araştırmalar, güneş enerjisi santrallerinin entegrasyonunun çeşitli güç kalitesi sorunlarına yol açabileceğini ve bu sorunların yönetimi için gelişmiş analiz tekniklerinin kullanılmasının gerekli olduğunu ortaya koymaktadır (Yehia vd., 2018, İbrahim vd., 2019). Sonuç olarak, güneş enerjisi santrallerinin güç kalitesi üzerindeki etkisinin incelenmesi, enerji sistemlerinin daha sürdürülebilir ve güvenilir hale getirilmesi için kritik bir öneme sahiptir. Güç elektroniği teknolojilerindeki hızlı ilerlemeler, enerji sistemlerinin verimliliğini artırmak ve yenilenebilir enerji kaynaklarını daha etkili bir şekilde entegre etmek için yeni çözümler sunmaktadır. Özellikle FV sistemlerin yaygınlaşmasıyla birlikte, bu sistemlerin güç kalitesi üzerindeki etkileri önemli bir mesele haline gelmiştir. Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) teknolojisi, FV sistemlerinin şebekeye entegrasyonunu optimize ederken, gerilim düzenlemesi ve güç akışı kontrolü gibi kritik görevleri üstlenir. Bu bağlamda, D-STATCOM gibi cihazlar, FV sistemlerin neden olabileceği gerilim dalgalanmalarını ve harmonik bozulmaları etkin bir şekilde yöneterek, enerji kalitesinin korunmasında önemli bir rol oynar.

Bu çalışma, güneş enerjisi santrallerinin elektrik şebekesine entegrasyonu sırasında ortaya çıkan güç kalitesi sorunlarını derinlemesine incelemekte ve bu sorunların çözümünde D-STATCOM etkili bir yöntem olduğunu vurgulamaktadır. D-STATCOM kullanılarak gerçekleştirilen gerilim düzeltmesi, güç kalitesinin iyileştirilmesine önemli katkılar sağlayarak, şebekenin kararlılığını ve verimliliğini artırmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürdeki çeşitli güç kalitesi çalışmaları, farklı yönleri dikkate almıştır; bunlar arasında güneş FV plakalarının türü, dönüştürücü, tasarım ve ısıtım değişiklikleri bulunmaktadır. Ali Koç, Hüseyin Yağlı vd. dünyadaki enerji kaynaklarını incelemişlerdir. Çalışmalarında, bu kaynakların küresel rezerv miktarlarına, kalan ömürlerine, üretim ve tüketim oranlarına dikkat çekmişlerdir. Araştırmalarında, yenilenemeyen enerji kaynakları (kömür, doğalgaz, uranyum, toryum, petrol) ile yenilenebilir enerji kaynakları (biyokütle, rüzgâr, hidroelektrik, güneş enerjisi, jeotermal enerji) arasında kıyaslamalar yapılmıştır (Koç vd., 2018).

Metin Tüysüz ise fotovoltaiik (FV) paneller ve sabit mıknatıslı senkron jeneratörlerden oluşan hibrit bir güç sistemini modellemiştir. Yaptığı sistemin şebekeye entegrasyonunu Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirmiştir (Tüysüz vd., 2018). Aleksander Reznik, Ahmed Al-Durra ve ekibi, yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektriğin şebekeye aktarımını optimize etmek için güç dönüştürücülerinin önemini vurgulamışlardır. Araştırmalarında, inverterlerin ürettiği harmonikleri filtrelemek için genellikle bir LCL filtresinin kullanıldığını ve bu filtrenin şebekeye bağlı inverterler için tasarım metodolojisini kapsamlı bir şekilde ele almışlardır. Geliştirdikleri tekniklerin küçük ölçekli yenilenebilir enerji dönüşüm sistemlerinden orta ve büyük ölçekli şebeke bağlantılı sistemlere kadar geniş bir yelpazede uygulanabileceğini belirtmişlerdir (Reznik vd., 2013).

Alparslan Tüfekçi, yenilenebilir enerji kaynaklarının düzensiz üretimini incelemiştir. Güneş enerjisi sistemlerinde, güneş ışınlarının sürekli olmayışı gibi faktörlerin yarattığı olumsuz etkileri analiz etmiştir. Matlab/Simulink ortamında modellenen güneş enerjisi sistemi üzerinde LC filtreler kullanarak harmonik etkilerini azaltmış ve bu etkileri kabul edilebilir seviyelere çekmeyi başarmıştır (Tüfekçi vd., 2018). Kow Ken Weng, Wong Yee Wan vd. FV şebeke bağlantılı bir güç sistemindeki potansiyel güç kalitesi sorunlarını değerlendirmişlerdir. Gerçek bir güç dağıtım sistemini güç sistemleri bilgisayar destekli tasarım (PSCAD) ortamında modellemiş ve bu modeli şebeke bağlantılı bir fotovoltaiik sistemle birleştirerek analiz etmişlerdir. Farklı ısıtım ve sıcaklık senaryoları oluşturarak, şebeke bağlantılı sistemin çeşitli güç kalitesi sorunları (ani akım, güç ve frekans dalgalanmaları, harmonik bozulmalar, düşük güç faktörü) yaşadığını tespit etmişlerdir (Kow vd., 2015).

Bong Yau, Tao Yu ve diğer araştırmacılar, şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerin farklı ışıyım seviyelerinde nasıl çalıştığını incremental conductance algoritması kullanarak incelemişlerdir. Fotovoltaik inverterlerin doğrusal olmaması ve atmosferik koşulların belirsizliğinin güç kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Ayrıca, güç kalitesini artırmak için fotovoltaik inverterler ve maksimum güç noktası izleme sistemleri için çeşitli kontrol algoritmaları geliştirmişlerdir (Yang vd., 2018). Jürgen Schlabbach, Lutz Kammer vd. fotovoltaik sistemlerde farklı ışıyım koşulları altında harmonik akımların nasıl oluştuğunu incelemişlerdir. Araştırmalarında, küresel ışıyım ve sıcaklık verilerini kullanarak fotovoltaik sistemlere uygulamışlar ve bu koşullar altında harmonik akım değerlerinin nasıl değiştiğini gözlemlemişlerdir. Özellikle düşük üretim yapılan kış aylarında en yüksek harmonik akım değerlerine ulaşıldığını tespit etmişlerdir. Araştırma sonucunda, fotovoltaik dönüştürücülerin tasarımında tam yükte çalışmanın dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir (Schlabbach vd., 2006).

Rodriguez ve diğerleri (Cheng vd., 2015), İspanya dağıtım besleyicisinde farklı penetrasyon seviyeleri için voltaj dengesizliği hassasiyetini araştırmış ve bu, optimal penetrasyon seviyesini tanımlamamıza yardımcı olmuştur. Urbanetz ve diğerleri (Urbanetz vd., 2012), Brezilya'nın şebeke besleyicisinde bir güneş FV sistemi ile GK değerlendirmesini sunmuşlardır. Yük ve çevresel özelliklerdeki değişiklikler nedeniyle YE kaynaklarıyla şebekedeki GK sorunlarına dair araştırmalar (Ray vd., 2012) ve (Ray vd., 2013) numaralı çalışmalarda rapor edilmiştir.

Oktay Yılmaz, yaptığı çalışmada kısa devre hesaplamalarında kullanılan büyüklükler ile şebeke elemanlarının empedans değerlerini hesaplama yöntemlerini açıklamıştır. Çalışmasında, kısa devre hesaplamaları için Monte Carlo, Analitik, Simetrikli Bileşenler ve Kısa Devre Gücü yöntemlerini incelemiş ve Tunceli Organize Sanayi Bölgesi iletim hattı için gerçek hat parametrelerini kullanarak kısa devre gücü yöntemiyle hesaplamalar gerçekleştirmiştir (Yılmaz, 2014). A. Bracale, P. Caramia, G. Carpenilli ve diğerleri, voltaj dönüştürücüsü içeren üç fazlı bir fotovoltaik sistemin arıza katkısına dair yeni bir analitik model geliştirmişlerdir. Bu model aracılığıyla, dengeli aktif güç şebekelerinde yer alan fotovoltaik sistemlerin kısa devre hatalarını analiz etmiş ve bu hataların koruma cihazlarının kesme kapasiteleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir (Bejmert vd., 2012). T.S. Sidhu ve D. Bejmert ise, büyük ölçekli fotovoltaik enerji santrallerinin şebekeye olan akım katkısını ve bu tür dağıtık üretim sistemlerine ilişkin koruma konularını ele almışlardır. Çalışmalarında, 50 MW kapasiteli bir şebeke bağlantılı

fotovoltaik enerji santralini, farklı şebeke çalışma koşulları ve fotovoltaik ışınlam seviyelerinde incelemişlerdir (Singh vd., 2010).

D-STATCOM, gerilim düzenlemesi ve güç kalitesi iyileştirilmesi için dağıtım şebekelerinde önemli bir rol oynamaktadır. Singh ve Solanki'nin (Singh vd., 2010) çalışmasında, izole jeneratör sistemlerinde D-STATCOM'un harmonik distorsiyonları, gerilim dalgalanmalarını ve reaktif güç dengesizliklerini azaltarak sistem performansını iyileştirdiği gösterilmiştir. Benzer şekilde, Mishra ve arkadaşlarının (Mishra vd., 2003) çalışması, D-STATCOM'un gerilim kontrol modunda, ani yük değişimlerine karşı hızlı bir yanıt vererek şebekenin kararlılığını artırdığını ortaya koymuştur. Khadkikar ve Chandra (Khadkikar vd., 2006) tarafından yapılan araştırma ise, D-STATCOM'un UPQC yapısının bir parçası olarak kullanıldığında gerilim dalgalanmalarını ve harmonik distorsiyonları etkin bir şekilde yönettiğini göstermiştir.

Rashed ve Strbac (Rashed vd., 2009), D-STATCOM'un dağıtım ağlarında gerilim düşüşlerini ve harmonik bozulmaları azaltarak enerji arzının güvenilirliğini artırdığını belirtmiştir. Son olarak, El-Moursi ve Sharaf (El-Moursi vd., 2005), D-STATCOM'un yeni kontrol yöntemleriyle gerilim saptmalarını ve reaktif güç dengesizliklerini etkili bir şekilde düzenlediğini ve şebeke kararlılığına önemli katkılar sağladığını göstermiştir. Bu çalışmalar, D-STATCOM'un, güç kalitesini iyileştirmede ve şebekenin verimliliğini artırmada kritik bir cihaz olduğunu kanıtlamaktadır.

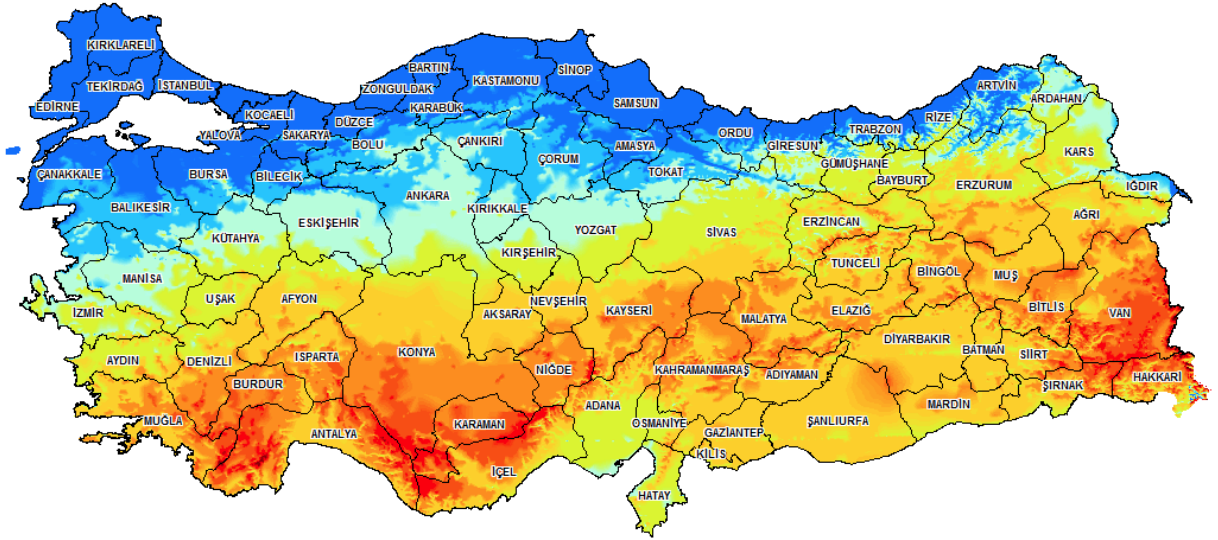
3. GÜNEŞ ENERJİSİ ve FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

3.1. Dünyada Güneş Enerjisi

Güneş enerjisinden faydalanmada coğrafi konum önemli faktördür. Coğrafi konumun yanı sıra güneşlenme süresi ve ışıyım yoğunluğu da elde edilecek enerjinin verimini belirleyen diğer önemli faktörlerdir. Bazı ülkeler, coğrafi konumları sayesinde daha fazla güneşlenme süreleri bulunmaktadır (Haydaroğlu, 2017, Kesenek, 2018, Koç vd., 2013). Afrika, Avustralya ve Amerika, coğrafi avantajlarıyla öne çıkan bölgelerdir. Diğer yandan, Türkiye, hem matematiksel hem de coğrafi konumu itibarıyla yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip ülkeler arasında yer almaktadır. Güneş ışığı alan bölgelerin çöl arazisi olması durumunda, bu alanlarda yatırım fırsatları yaratmak ve lojistik çalışmalar yürütmek gerekmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, Türkiye ve İspanya gibi ülkelerin büyük fırsatlar sunduğu, yatırım ve lojistik ihtiyaçlarının minimum düzeyde olduğu görülmektedir (Haydaroğlu, 2017, Kesenek, 2018).

3.2. Türkiye’de Güneş Enerjisi

Türkiye, coğrafi konumu, çevresel şartları, ekonomik dağılımı ve kaynak çeşitliliği açısından yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminde önemli avantajlara sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan güneş enerjisi, elektrik üretiminde kritik bir rol oynamaktadır (Kesenek, 2018, Koç vd., 2013). Türkiye'nin yıllık ortalama toplam güneşlenme süresi 2738 saat, ortalama ışıyım yoğunluğu ise 1311 kWh/m²-yıl olarak hesaplanmıştır (Koç vd., 2013). Temmuz (365 saat), Ağustos (343 saat) ve Haziran ayları (325 saat) güneşlenme süresi açısından en yüksek potansiyele sahip dönemlerdir. Tablo 3.1’de Türkiye’de aylık güneş enerjisi ve güneşlenme süresi verilmiştir. Benzer şekilde, aylık ortalama radyasyon değerleri de bu aylarda en yüksek seviyededir ve en yüksek verim de bu dönemde elde edilmektedir. Şekil 3.1’de Türkiye'nin güneş enerjisi haritası yer almaktadır.



Şekil 3.1. Türkiye'nin güneş haritası

Tablo 3.1. Türkiye’de aylık güneş enerjisi ve güneşlenme süresi (Haydaroğlu, 2017)

AYLAR	AYLIK TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ	GÜNEŞLENME SÜRESİ
(KWh/m ² -ay)	(Sağ/ay)	
OCAK	51,75	103
ŞUBAT	63,27	115
MART	96,65	165
NİSAN	122,23	197
MAYIS	153,86	273
HAZİRAN	168,75	325
TEMMUZ	175,38	365
AĞUSTOS	158,4	343
EYLÜL	123,28	280
EKİM	89,9	214
KASIM	60,82	157
ARALIK	46,87	103
TOPLAM	1.311	2.640

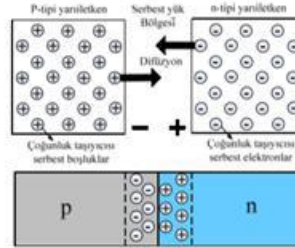
3.3. Fotovoltaik Hücre Çeşitleri

Fotovoltaik hücrelerin gelişimi, 1839 yılında Fransız fizikçi Edmund Becquerel’in bir elektrolit çözeltisinde voltaj üretmesiyle başlamıştır. Yaklaşık 40 yıl sonra, Adams ve Day, katı maddelerde fotovoltaik etkiyi araştıran ilk bilim insanları olarak ön plana çıkmıştır. 1904 yılında Albert Einstein, kuantum teorisi kapsamında fotovoltaik etkinin teorik temelini açıklayan bir makale yayınlamış ve bu çalışmasıyla 1923 yılında Nobel Ödülü’ne layık görülmüştür. Güneş pilleri, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken malzemelerden üretilir ve bu pillerin ana hammadresi, Türkiye’de bol miktarda bulunan silisyumdur. Fotovoltaik hücreler, kristal silisyum, ince

film ve geliştirmekte olan yeni hücre teknolojileri olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır (Han, 2018; Karadeniz vd., 2019).

Kristal silisyum güneş hücreleri, en yaygın kullanılan ve en çok tercih edilen hücre tipidir. Işık emme kapasiteleri düşük olsa da bu hücreler yaklaşık %15 verimliliğe sahiptir. Monokristal ve polikristal olmak üzere iki alt gruba ayrılan bu hücrelerin verimlilikleri, kullanılan hücre tipine göre değişkenlik göstermektedir (Sayın vd., 2011). İnce film güneş hücreleri ise, yarı iletken malzemenin geniş yüzeylere ince bir film olarak kaplanmasıyla üretilir. Araştırmalar, bu yöntemin daha düşük maliyetlerle cam ve metal gibi yüzeylerde uygulanabileceğini ortaya koymuştur. Ancak, bu hücrelerin uzun vadeli kararlılığının düşük olması, tercih edilme oranlarını etkilemektedir (Sayın vd., 2011).

Geliştirilmekte olan hücre teknolojileri, periyodik tablonun üçüncü ve beşinci grubu elementlerin birleşiminden oluşan bileşiklerin, yüksek ışık soğurma kapasitesi sağladığını göstermektedir (Han, 2018; Karadeniz vd., 2019). Geleneksel diyotlarda bulunan p-tipi ve n-tipi yarı iletkenlerin birleşimi, fotovoltaiik hücrelerde de kullanılır ve bu p-n birleşimi Şekil 3.2’de gösterildiği gibi elde edilmektedir (Puche vd., 2016; Sen vd., 2008).

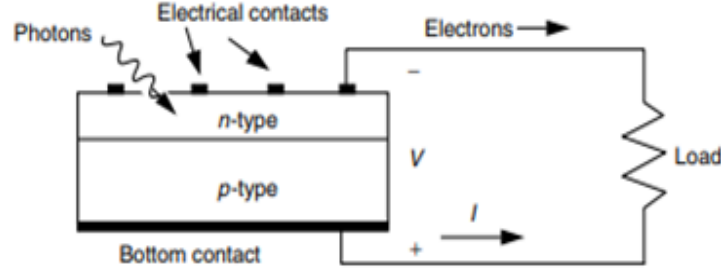


Şekil 3.2. P-Tipi ve N-Tipi birleşimi (Çakmak, 2012)

Güneş ışığından gelen fotonlar, p-n birleşim bölgesine ulaştığında, eğer fotonların enerjisi yeterince yüksekse, bu enerji elektronları harekete geçirir ve elektronlar p-n bölgesinden geçerek elektrik akımının oluşmasını sağlar. Bir FV hücrenin basit bir eşdeğer devre modeli, Şekil 3.3’te gösterildiği gibi, ideal bir akım kaynağı ile paralel bağlı bir diyottan oluşur. Bu ideal akım kaynağı, maruz kaldığı güneş ışığına bağlı olarak orantılı bir akım üretir.

Fotonların p-n birleşim bölgesine çarpmasıyla, güneş ışığı elektronları harekete geçirir ve bu durum elektrik akımının oluşmasına neden olur. Fotovoltaiik hücrenin en basit biçimde şekil 3.3’de gösterilmiştir ve bu devrede elektrik akımı en temel haliyle

ifade edilmektedir. Temelde bir akım kaynağı ve ona paralel diyottan oluşur. FV hücrelerin en çok kullanılan devre modelleri tek diyot modeli, çift diyot modeli ve üç diyot modelleridir.



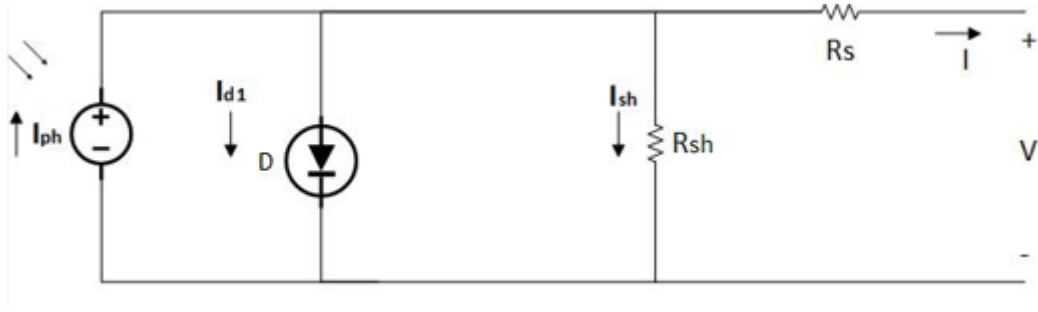
Şekil 3.3. Foton etkisi ile oluşan elektrik akımı (Quaschnig, 2014)

3.4. Fotovoltaik Hücrenin Matematiksel Modeli

FV sistemlerde güç üretim açısından ucuz teknolojiler olmasına rağmen daha düşük maliyetle verimlilik esaslı yüksek karlar elde etmek mümkündür. Bu nedenle hassas FV modeller oluşturmak önemlidir. Bu bağlamda güneş hücrelerinin matematiksel analizi kritik önem taşımaktadır (Allam vd., 2016, Izci vd., 2022). Güneş hücrelerinin karakteristik I-V eğrilerini doğru bir şekilde açıklayan birçok eşdeğer devre modeli bulunmaktadır.

3.4.1. Tek diyot modeli

Tek diyot modeli basit yapısından kaynaklı güneş hücrelerinin üretiminde yaygın kullanılmaktadır. Şekil 3.4'te görüldüğü üzere eşdeğer devresi bir akım kaynağı, paralel bağlı bir diyot D_1 , şönt direnç R_{sh} ve seri direnç R_s 'den oluşur (Kumar vd., 2020, Allam vd., 2016). Devrenin çıkış akımı I denklem 1'de matematiksel olarak ifade edilmiştir. Burada I_{ph} fotogenerik akımı ifade ederken, I_d diyot akımı, I_{sh} ise şönt direncin akımını ifade eder (Duman vd., 2022).



Şekil 3.4. Tek diyot modeli

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (3.1)$$

Ayrıca R_s , R_{sh} , V , I sırasıyla seri direnç, şönt direnç, çıkış gerilimi, güneş hücresinin akımı.

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V + (I * R_s)}{a * V_t}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

$$V_t = \frac{k * T}{q} \quad (3.3)$$

Denklem 3.2’de diyot akımı I_d matematiksel ifade edilmiştir. I_0 ve a sırasıyla diyot doygunluk akımı ve diyot ideallik faktörü olarak tanımlanmıştır. V_t termal voltajı ifade ederken; k , T , ve q sırasıyla Boltzmann sabiti ($1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K), Kelvin cinsinden hücre sıcaklığı (K), ve elektron yükü ($1.60217646 \times 10^{-19}$ C) olarak ifade edilmiştir.

Şönt direnç akımı I_{sh} denklem 3.4’ gibi matematiksel olarak tanımlanmıştır.

$$I_{sh} = \frac{V + (I * R_s)}{R_{sh}} \quad (3.4)$$

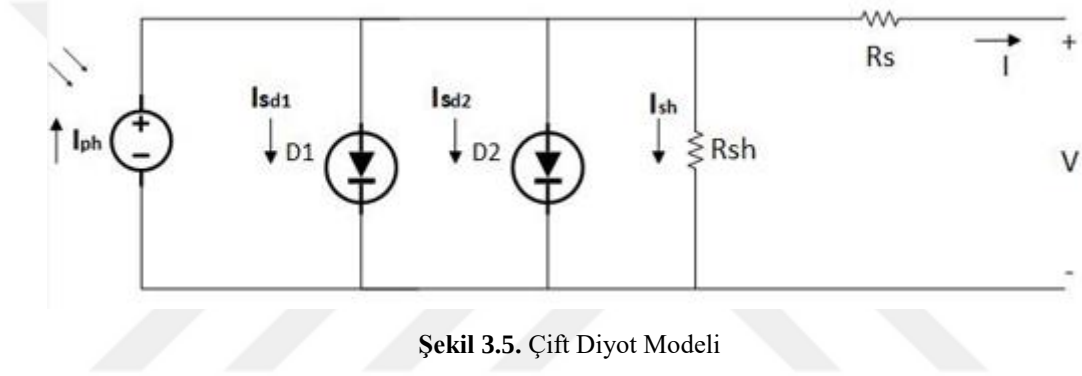
Yukarda verilen tüm ifadelere dayanarak denklem 3.1’de yeniden yazılırsa;

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V + IR_s}{aV_t} \right)} - 1 \right] - \left[\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right] \quad (3.5)$$

Denklem 3.5’te güneş hücresinin çıkış akımı ifade edilmiştir.

3.4.2. Çift diyot modeli

Tek diyot model basit yapısından kaynaklı düşük ışıyım seviyesinde ki yetersizliği FV hücrelerin karakteristik özelliklerini yüksek doğrulukta yansıtmaz. Şekil 3.5'te eşdeğer devrede görüldüğü üzere iki diyotun birbirine paralel bağlanmasıyla tek diyot modelinin daha iyi versiyonu olan çift diyot modeli elde edilir. Bu model karmaşık yapısından kaynaklı daha fazla denklemin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu bağlamda çift diyot modelinde düşük ışıyım koşullarında yüksek doğrulukta analizler yapılmasına sağlayarak ortaya çıkan bu sorunu çözmek için kullanılmaktadır (Askarzadeh vd., 2012). Çıkış akımı I denklem 3.6'de matematiksel olarak ifade edilmiştir (Duman vd., 2022).



Şekil 3.5. Çift Diyot Modeli

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (3.6)$$

Burada I_{d1} ve I_{d2} birinci ve ikinci diyot akımlarını ifade etmektedir. Denklem 3.7 ve 8'de bu diyot akımları matematiksel olarak açıklanmıştır.

$$I_{d1} = I_{01} \left(e^{\frac{V + (I \cdot R_s)}{a_1 \cdot V_t}} - 1 \right) \quad (3.7)$$

$$I_{d2} = I_{02} \left(e^{\frac{V + (I \cdot R_s)}{a_2 \cdot V_t}} - 1 \right) \quad (3.8)$$

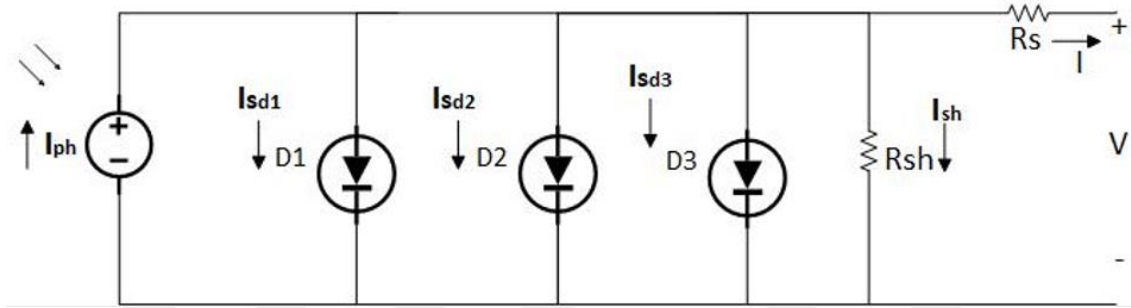
Burada, birinci ve ikinci diyotların doygunluk akımlarını sırasıyla I_{01} ve I_{02} , ideallik faktörlerini ise sırasıyla a_1 ve a_2 olarak temsil edilmiştir. Daha önce denklem 3'te V_t ifade edilmişti dolayısıyla çıkış akımı matematiksel olarak denklem 3.9 'da gösterildiği gibi yeniden yazılabilir.

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+(I*R_s)}{a_1*V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+(I*R_s)}{a_2*V_t}} - 1 \right) - \frac{V + (I - R_s)}{R_{sh}} \quad (3.9)$$

Denklem 3.9’da DDM’in çıkış akımı ifade edilmiştir.

3.4.3. Üç diyot modeli

FV hücrelerin en detaylı modeli Şekil 3.6’da görüldüğü üzere üç diyot modelidir. Düşük ışıyım seviyesinde yüksek doğrulukta analizler yapabilen ayrıca endüstriyel uygulamalar için daha yaygın kullanılan modeldir. İki diyota ek olarak üçüncü diyotun paralel bağlanmasıyla elde edilir. Üç diyot modelinde çıkış akımı I ile denklem 3.10’da matematiksel olarak ifade edilmiştir (Ali vd., 2023).



Şekil 3.6. Üç Diyot Modeli

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{d3} - I_{sh} \quad (3.10)$$

Burada I_{d1} , I_{d2} , I_{d3} birinci, ikinci ve üçüncü diyot akımlarını ifade etmektedir. Daha önce denklem 3.7 ve 3.8 sırasıyla I_{d1} ve I_{d2} akımları ifade edilmişti. Denklem 3.11’de I_{d3} diyot akımının matematiksel denklemi verilmiştir.

$$I_{d3} = I_{01} \left(e^{\frac{V+(I*R_s)}{a_3*V_t}} - 1 \right) \quad (3.11)$$

Burada, üçüncü diyotun doygunluk akımı I_{03} , a_3 ise idealite faktörünü ifade etmektedir. Çıkış akımı matematiksel olarak denklem 3.12 ‘de açıklandığı gibi yeniden yazılabilir.

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+(I \cdot R_s)}{a_1 \cdot V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+(I \cdot R_s)}{a_2 \cdot V_t}} - 1 \right) - I_{03} \left(e^{\frac{V+(I \cdot R_s)}{a_3 \cdot V_t}} - 1 \right) - \frac{V + (I \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (3.12)$$

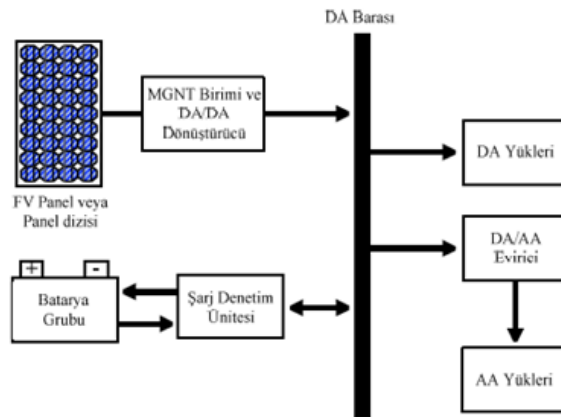
Denklem 3.12’de çıkış akımı ifade edilmiştir.

3.5. Fotovoltaik Sistemler

FV sistemler, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren teknolojilerdir. Bu sistemler genellikle güneş panelleri ve doğru akım (DC) ile alternatif akım (AC) arasında dönüşüm sağlayan dönüştürücülerden oluşur. FV sistemler, enerji ihtiyaçlarına ve uygulama alanlarına göre bağımsız, şebeke bağlantılı ve hibrit sistemler olarak üç ana gruba ayrılır (Yarar, 2019).

3.6. Şebekeden Bağımsız Fotovoltaik Sistemler

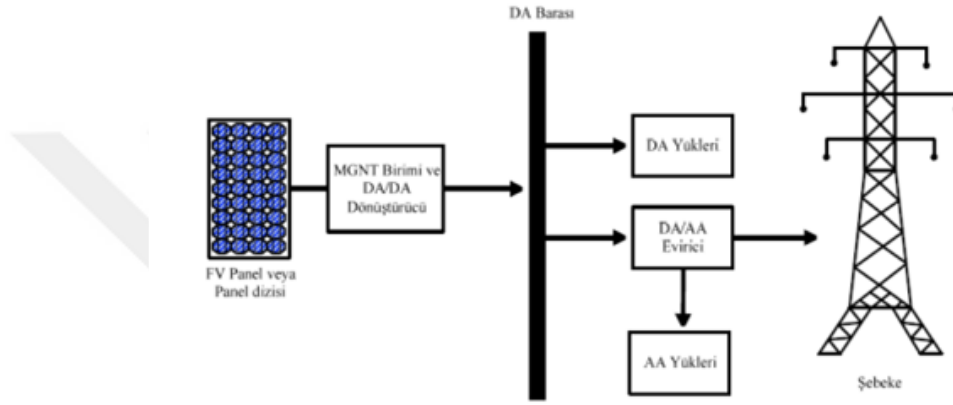
Bağımsız fotovoltaik sistemler, elektrik şebekesinin erişiminden uzak alanlarda, kırsal bölgelerde ve taşınabilir enerji gereksinimleri olan uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Bu sistemler, güneş ışığından elde edilen enerjiyi doğrudan kullanmanın yanı sıra, enerjinin sürekli olarak mevcut olmadığı durumlar için depolama sistemleri ile birlikte çalışır. Bu sayede, enerji kesintilerinin yaşandığı zamanlarda bile kesintisiz enerji sağlanabilir Şekil 3.7’de gösterilmektedir (Yarar, 2019).



Şekil 3.7. Şebekeden bağımsız FV sistemin şeması (Çakmak, 2012)

3.7. Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemler

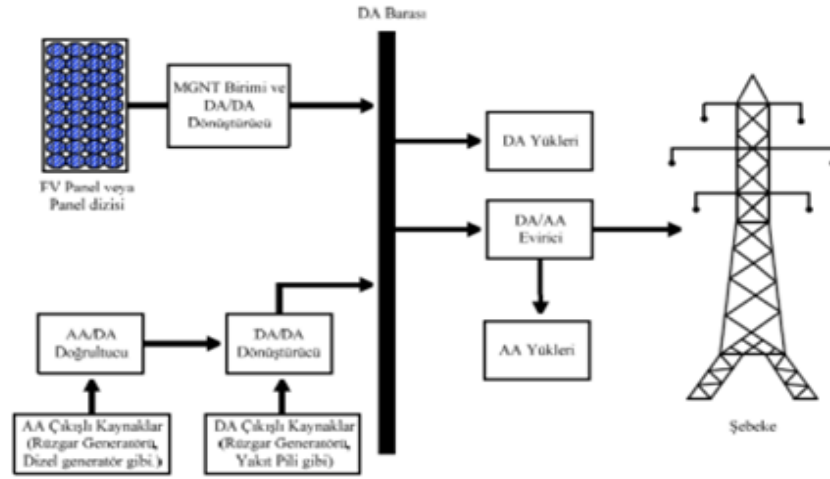
Şebeke bağlantılı FV sistemler, üretilen elektriğin doğrudan ulusal elektrik şebekesine aktarıldığı sistemlerdir. Bu sistemler, hem büyük ölçekli enerji üretim tesislerinde hem de bireysel evlerin çatı sistemlerinde kullanılabilir. Şebeke bağlantılı sistemler, üretilen enerjinin fazla olduğu durumlarda enerji fazlasını şebekeye geri satarak ekonomik fayda sağlamaktadır. Ayrıca, Şekil 3.8’de gösterilen bu sistemler, şebeke elektriğiyle senkronize çalışarak sürekli enerji arzı sağlamaktadır (Yarar, 2019).



Şekil 3.8. Şebekeye bağlı FV sistemin şeması (Çakmak, 2012)

3.8. Hibrit Fotovoltaik Sistemler

Hibrit FV sistemler, güneş enerjisinin yanı sıra rüzgar enerjisi, dizel jeneratörler veya diğer enerji kaynakları ile entegre edilerek oluşturulan karma sistemlerdir. Bu sistemler, çeşitli enerji kaynaklarını birleştirerek, enerji üretiminde süreklilik ve güvenilirlik sağlar. Şekil 3.9’da gösterilen Hibrit sistemler, enerji üretim süreçlerinde esneklik sunar ve enerji taleplerinin kesintisiz karşılanmasını sağlar (Yarar, 2019).



Şekil 3.9. Hibrit FV sistemin bağlantı şeması (Çakmak, 2012)

4. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÜÇ KALİTESİ

Teknolojinin gelişimi ile birlikte, güç sistemlerinin yük karakteristiklerinin değişmesinde etkili olmaktadır. Bu yük karakteristiklerine baktığımızda, güç elektroniği cihazları, doğrusal olmayan yükler, motor sürücüler gibi yükler, güç sistemlerinde bozucu etkilere neden olmaktadır. Güç kalitesi, bir cihazın amaçlanan kullanım için verimli bir şekilde çalışması ve herhangi bir güç kaybı olmadan çalışabilmesi için gereken elektrikselsınırlamalar olarak açıklanabilir. Dağıtım şebekesine bağlı doğrusal olmayan yüklerin varlığı, akım ve gerilimin ideal sinüs sinyalininden sapmasına neden olur. Bu durum, güç kalitesi bozulması olarak adlandırılır (Reid, 1996, Hossain vd., 2018, Dugan vd., 1996).

Güç kalitesi parametreleri, doğrudan enerji santralinin kalitesi, iletim hattı ve tüketicinin kullandığı elektrik enerjisinin kalitesi ile ilgilidir. Elektrik tesislerinde yaşanan düşük güç kalitesi, cihazların arızalanmasına ve hatta bozulmasına neden olur, bu da birçok endüstriyel tesiste ciddi sorunlara yol açar. Yüklerin elektrik tesisatlarına bağlanması sonucu oluşan harmonikler, gerilim düşmeleri ve gerilim dalgalanmaları, güç kalitesi sorunlarını ortaya koymaktadır. 2006 yılında yayımlanan Elektrik Enerjisinin Sürekli ve Teknik Kalitesine İlişkin Yönetmelikte (Directions, 2006), Dağıtım Tesisleri tüketicilerin elektrik enerji ihtiyaçlarını; gerilimin frekansı, genliği, dalga şekli ve üç fazlı simetrisini kesintisiz ve yüksek kaliteli bir şekilde belirli standartlar içinde karşılama kapasitesi olarak tanımlanmıştır. Ülkemizde güç kalitesi parametrelerinin standart değerleri EN 50160 ve IEC 61000-4-30 (Regulation, 1999; 2003) Avrupa Standartları geçerlidir (Hotchkiss vd., 2011).

Enerji piyasası düzenleme kurumu (EPDK) tarafından yayımlanan Elektrik Şebeke Yönetmeliği'nin amaçlarından biri, güç sistemlerine bağlı ve bunları etkileyen kullanıcıların sorumluluklarını ve uymaları gereken kriterleri tanımlamaktır. Bu kriterler; sistem frekansı ve değişim sınırları, sistem gerilimleri ve değişim limitleri, iletim sistemi gerilim dalga şekli kalitesi, gerilim sıçramaları, gerilim salınımları ve titreşimler, faz dengesizliği, akım harmonikleri gibi unsurlardır (Arrillaga vd., 2000, Tur vd., 2019). Güç sistemlerinde enerji kalitesi, ağdaki olumsuzlukların ve şebekeden çekilen akımın sinüzoidal dalga bozukluklarının önlenmesidir. "Güç kalitesi" terimi, üretilen elektrik enerjisinin güvenilirliğini ve elektrik iletim ve dağıtım ağlarında ölçülen gerilim ve akım büyüklüklerinin ideal özelliklerini ifade eder. Bu terim, ayrıca arızalar sonucunda ortaya çıkabilecek herhangi bir istenmeyen sapma ve müşteri ile bağlı ekipman üzerinde

olumsuz etkileri de içerir. Güç kalitesinin bir başka sorunu da uzun süreli gerilim kesintileridir. Akımda birkaç milisaniye süren tam kesinti ya da azalma, veri işleme sürecinde doğrudan hataya yol açar. Ayrıca, sistemlerde yaygın bir diğer sorun ise distorsiyon olarak tanımlanan bozulmadır. Bu sorun, güç sisteminin ana dalga şekli ile çelişen ve sistemde veri kaybına neden olan yüksek frekanslı sinyaller olarak tanımlanır (Obut vd., 2021).

Flicker olarak tanımlanan bir diğer problem ise güç kaynağından gelen nominal değer $\%90-110$ 'u arasındaki gerilim dalgalanmalarıdır ve genellikle sistemin yük tarafına zarar verir (Tür vd., 2019). Güç sistemlerindeki kesintiler, her durumda, uzun süreli ve sıfır gerilimli durumlardır. Bu, bir elektrik sisteminde devrenin enerjisiz kalması ve güç dağıtımının kesilmesi ya da şebeke elektriğinin kesilmesi durumudur. Bir kesinti durumunun, doğrudan veri kaybına, kalite düşüşüne ve sistemde kullanılan ekipmanların zarar görmesine neden olması kaçınılmazdır (Tür, 2018). Bu kesintiler genellikle iki gruba ayrılır; kısa kesintiler ve uzun kesintiler. Kısa kesintiler, enerji kaynağı birkaç milisaniyeden bir iki saniyeye kadar başarısız olduğunda meydana gelir. Bu genellikle koruma cihazlarının açılması ve şebekenin hatalı bir kısmının devre dışı bırakılması gibi durumlar nedeniyle olur. Ancak, büyük kesintiler daha ciddi hatalara yol açar; izolasyon arızası, yıldırım ve izolatör bozulması gibi (Tür, 2018). Öte yandan, enerji kaynağı 1-2 saniyeden daha uzun sürerse, güç sistemi ağ donanımındaki bozulma, fırtınalar ve/veya diğer çevresel faktörler nedeniyle oluşan kesinti, sistemdeki ekipmanın tamamen durmasına neden olabilmektedir (Tür, 2018).

4.1. Güç Kalitesi Ölçümleri ve Analizi

Güç kalitesi sorunlarını tespit etmek amacıyla, belirli aralıklarla ölçümler yapılır. Ölçümler sonrasında, problem türü belirlenir ve sistemdeki sorunlar ortadan kaldırılır. Sistemde meydana gelebilecek arızalar aşağıda listelenmiştir (Tur vd., 2018).

- Gerilim Etkin Değeri
- Gerilim Dengesizliği
- Gerilim Çökmesi
- Gerilim Dalgalanması (Fliker)
- Gerilim Harmonikleri – Toplam Harmonik Bozulma
- Frekans Değişimleri

4.1.1. Gerilim etkin değeri

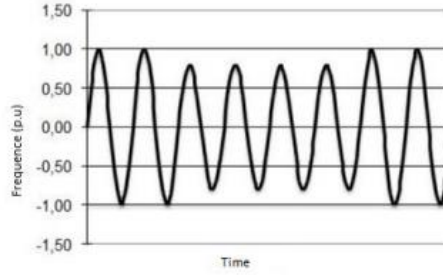
Güç santrallerinde atmosferik ve anahtarlama olayları nedeniyle aşırı gerilimler meydana gelir. Tedarik noktasına bağlanan aşırı gerilim sönümleyici veya sabit kapasitörlerle belirli seviyelerdeki aşırı gerilimler sönümlenebilir ve şebekenin aşırı gerilimlerden korunması sağlanabilir. Şebekede aşırı gerilimlerin yanı sıra gerilim düşüşleri de meydana gelebilir. Gerilim düşüşleri, şebekenin uzak bir noktasında meydana gelen kısa devre olayları nedeniyle ortaya çıkabilir. Kısa süreli gerilim düşüşleri, elektrikli cihazlara zarar verir ve cihazların yeniden başlatılması uzun zaman alabilir. Uygun aşırı gerilim sönümleyicilerin havai hatlara bağlanmasıyla kısa devre arızalarının olasılığı azaltılabilir. Bu işlemlerle güç sistemlerinin kalitesi artırılabilir (Tur vd., 2018).

4.1.2. Gerilim dengesizliği

Gerilim faz açıları arasında 120 derecelik faz farkının bulunmaması ve üç fazlı gerilim farkının 7V'den fazla olması gerilim dengesizliğine yol açar ve bu problem güç kalitesi problemlerinden biridir. Güç sistemlerine bağlı tek fazlı yükler, gerilim dengesizliğinin ana nedenidir. Aynı zamanda, uzun havai hatlar nedeniyle gerekli transpozisyon işlemlerinin yapılmaması ve gerilim regülatörlerinin düzgün çalışmaması gibi sorunlar da gerilim dengesizliğine neden olur. Tek fazlı yüklerin fazlara dağıtılması ve transpozisyon işlemlerinin yapılması durumunda gerilim dengesizliği olasılığı azalır (Tur vd., 2018).

4.1.3. Gerilim çökmesi

Gerilim çökmesi, şebeke geriliminin etkin değerinin (0,1 pu - 0,9 pu) anlık olarak düşmesi durumudur. Şebekede düşük kısa devre gücüne sahip ağlarda yüksek güçlü motorların devreye girmesi veya şebekedeki kısa devre arızalarının geç tespit edilmesi sonucu oluşur. Gerilim çökmesi nedeniyle elektrikli cihazlar arızalanabilir ve bu durum sıklaşırsa cihazın tamamen arızalanmasına neden olabilir. Gerilim çökmesi olayında sinus sinyalinin azalması Şekil 4.1'de gösterilmektedir (Mekhamer vd., 2013).



Şekil 4.1. Gerilim çömesi

4.1.4. Gerilim titreşimi (Flicker)

Flicker olayı, şebekedeki yüklerin zaman içinde anlık olarak artıp azalmasıdır. Bu etki, genellikle doğrusal olmayan değişken yüklerden (örneğin, ark fırınları) kaynaklanır. Işık şiddetindeki veya spektral dağılımdaki düzensizlikler, zamanla dalgalanan bir ışık uyarıcısı nedeniyle oluşur. Flicker, kısa süreli ve uzun süreli flicker olarak ikiye ayrılır (De Almeida vd., 2003).

4.1.5. Gerilim harmoniği – Toplam harmonik bozulma

Bir doğrusal olmayan yüke sıfır kaynak empedansı ile gerilim uygulandığında, ortaya çıkan akımın dalga şekli, gerilimin dalga şeklinden farklı olacaktır. Bu bozulmuş akım, sadece akımın geçtiği transformatörler, iletkenler ve devre kesiciler gibi bileşenleri etkiler. Ancak sıfır kaynak empedansı ideal bir durumdur. Gerçek dünyada, bu bozulmuş akım kaynak empedansı üzerinde bir gerilim düşüşü yaratır ve bu da kaynak empedansından sonraki tüm yüklere bozulmuş bir gerilimin iletilmesine neden olur. Güç sisteminde meydana gelen akım ve gerilim harmoniklerinin etkilerini dört ana kategoride toplamak mümkündür:

- Paralel ve seri rezonans durumlarının harmonik seviyelerini artırması,
- Elektrik üretimi, iletimi ve tüketim süreçlerinde verimlilik kayıpları,
- Elektrik tesisatlarının yalıtımının zayıflaması sonucu ekipman ömrünün kısılması,
- Tesislerde çeşitli arızaların meydana gelmesi.

Bu kategoriler altında karşılaşılan temel sorunlar şunlardır:

- Ekstra enerji kayıplarının oluşması ve artan gerilim düşüşleri,
- Jeneratör ve şebeke gerilim dalga şekillerinin bozulması,

- Kondansatörlerin aşırı akımla hasar görmesi,
- Asenkron ve senkron makinelerde aşırı ısınma ve gürültülü çalışma,
- Ölçüm, koruma ve kontrol sistemlerinde işlevsel hatalar,
- Rezonans olayları nedeniyle güç sistemi bileşenlerinin aşırı akım veya gerilime maruz kalması (Karim, 2018).

Harmonik akımlar ve gerilimler, doğrusal olmayan yükler veya sisteme bağlı ideal olmayan jeneratörler nedeniyle bozulmuş olan akım-gerilim sinüzoidal dalgasının bozulması sonucunda oluşur. Harmoniklerin oluşmasıyla, transformatör ve nötr iletkenler harmonik akımlar nedeniyle ısınır. Bu nedenle, aşırı ısınmayı önlemek için, nötr iletken kesiti ve transformatör gücü, bu harmonik akımlardan etkilenmeyecek şekilde seçilmelidir. Aynı zamanda, büyük güç tüketen endüstriyel tesislerdeki cihazların oluşturduğu harmonikleri sönmölemek için uygun filtrelerin kullanılması gerekmektedir. Akım ve gerilim dalgalarının neden olduğu bozulmanın yoğunluğu 'Toplam Harmonik Bozulma' olarak ifade edilir.

Toplam Harmonik Bozulma, gerilim harmonik bileşenlerinin efektif değerlerinin karelerinin toplamının karekökünün, ana bileşenin efektif değerine oranı olarak ifade edilen dalga formu bozulmasını yüzde olarak ifade eder. Aşağıda Formül Eşdeğeri denklem 4.1'de verilmiştir.

$$THB_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}}{U_1} * 100 \quad (4.1)$$

4.1.6. Frekans değişimleri

Sistemin frekansındaki değişimler, sistemin GK üzerinde olumsuz etkilere sahip olabilir. Frekans değişimleri, kararlı elektrik şebekelerinde oldukça nadir görülür, ancak güç sistemlerindeki gerilim kaynağı dönüştürücüler gibi belirli uygulamalar, harmonik emisyon seviyeleri nedeniyle frekans sapmalarına neden olabilir (De Almeida vd., 2003). Frekans değişimleri ayrıca zayıf güç altyapısına sahip sistemlerde yaygındır ve jeneratör ağır yüklendiğinde daha kötü hale gelebilir. Frekans değişim sorunu, frekans değişimine neden olan tüm güç kaynaklarını değerlendirerek ve gerekirse onararak veya değiştirerek düzeltilebilir (Karim, 2018).

5. GERİLİM DÜZENLEMELERİ İÇİN DAĞITILMIŞ STATİK KOMPANZATÖRÜN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Günümüzün hızla ilerleyen güç elektroniği teknolojisi, enerji sistemlerinin performansını artırmak ve daha verimli çalışmasını sağlamak için yeni cihazların ve yöntemlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu gelişmelerin başında, yüksek gerilimli enerji iletim sistemlerini dinamik olarak kontrol edebilmek için kullanılan FACTS teknolojisi gelmektedir. FACTS cihazları, elektrik ağlarının güç akışını optimize etmek, gerilim seviyelerini düzenlemek, geçici durumlarda kararlılığı artırmak ve güç salınımlarını etkin bir şekilde sönümlemek amacıyla kullanılır. Bu cihazlar, uygulama alanına göre şönt, seri ya da her iki yöntemin kombinasyonu şeklinde sınıflandırılabilir. Şönt cihazları, gerilim düzenlemesi için kullanılırken; seri cihazlar hat empedansını düzenlemeye yöneliktir. Seri-şönt kombinasyonları ise hem gerilim hem de hat empedansını kontrol ederek, sistemdeki gerçek ve reaktif gücü dengelemeye yardımcı olmaktadır (Hingorani vd., 2000).

5.1. DSTATCOM Nedir?

Özel güç uygulamaları, özellikle düşük gerilimli dağıtım sistemlerinde önemli bir rol oynar. Fabrikalar, ofisler ve konutlarda kullanılan elektrik enerjisinin kalitesi ve sürekliliği, bu sistemlerin güvenilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Özel güç sistemlerinin başarısı, belirli standartların karşılanmasına bağlıdır. Bu standartlar, kesintisiz enerji arzı, gerilim dalgalanmalarının minimal düzeyde tutulması, harmonik bozulmaların düşük olması ve doğrusal olmayan yüklerin terminal gerilimlerini etkilemeden kabul edilebilmesi gibi kriterleri içermektedir.

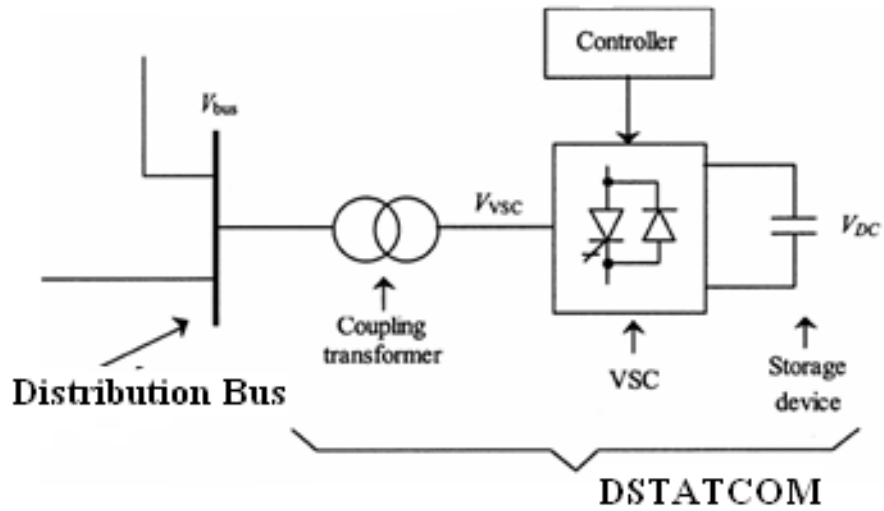
Bu yüksek gereksinimleri karşılamak amacıyla, yeni nesil güç elektroniği cihazları geliştirilmiştir. Bu cihazlar arasında Dağıtım Statik Kompansatörü (DSTATCOM) ön plana çıkar; DSTATCOM, dağıtım sisteminde meydana gelen gerilim dalgalanmaları, gerilim düşümleri ve yükselmeleri gibi problemleri etkin bir şekilde giderir ve doğrusal olmayan yüklerin olumsuz etkilerini en aza indirir. Dinamik Gerilim Restoratörü (DVR) ise, kritik yüklerin bağlı bulunduğu dağıtım sisteminde oluşabilecek dalgalanmalar, yükselmeler, geçici durumlar ve harmonik bozulmalara karşı koruma sağlamaktadır. Birleşik Güç Kalitesi Düzenleyicisi (UPQC) ise, hem arz gerilimindeki

hem de yük akımındaki bozulmaları telafi edebilen seri ve şönt kontrolörlerden oluşan karma bir sistemlerdir (Mathur vd., 2002).

D-STATCOM, AC güç sistemlerinde reaktif gücün etkin bir şekilde yönetilmesine olanak tanıyan esnek bir cihazdır. Reaktif gücün kontrolü, sistemin farklı noktalarındaki gerilim seviyelerini düzenlemek amacıyla transformatör sızıntı empedansının arkasındaki kontrol edilen bir gerilim kaynağının yönetilmesiyle sağlanır (Ghosh vd., 2012). Bu görevi yerine getirebilmek için D-STATCOM, gerilim kaynaklı dönüştürücü (VSC) olarak bilinen elektronik bir cihaz kullanır, bu da D-STATCOM'un enerji dağıtım sistemlerinde kritik bir rol oynamasını sağlar.

5.2. D-STATCOM Çalışma Prensibi

D-STATCOM sistemi, temel olarak bir Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü (VSC), bir dizi bağlama reaktörü (bu reaktörler genellikle transformatörün sızıntı reaktanslarından oluşur) ve bir kontrolör bileşeninden meydana gelir. Bu sistemin çalışması, bir DC kapasitöre bağlı olan gerilim kaynaklı bir inverterden (VSI) AC gerilimi kontrol edilebilir bir şekilde üretmesi esasına dayanır. Üretilen bu AC gerilimi, bağlama reaktörünün arkasında ortaya çıkar ve D-STATCOM ile güç sistemi arasında gerçekleşen aktif ve reaktif güç transferi, bu reaktans üzerindeki gerilim farkından kaynaklanır. D-STATCOM, özellikle gerilim kalitesinin kritik öneme sahip olduğu noktalar olan ortak bağlantı noktalarında enerji ağına entegre edilir. Sistemdeki gerilimler ve akımlar düzenli olarak ölçülür ve bu veriler kontrolöre gönderilerek referans değerlerle karşılaştırılır. Kontrolör, bir geri besleme kontrol mekanizması kullanarak bu verileri işler ve dönüştürücünün ana yarı iletken anahtarlarını yönetmek için gerekli olan anahtarlama sinyallerini üretir. D-STATCOM'un bu temel çalışma prensibi, Şekil 5.1'de gösterilmiştir (Akagi vd., 2017).



Şekil 5.1. D-STATCOM'un bu temel çalışma prensibi (Akagi vd., 2017)

5.3. Matematiksel Modelleme

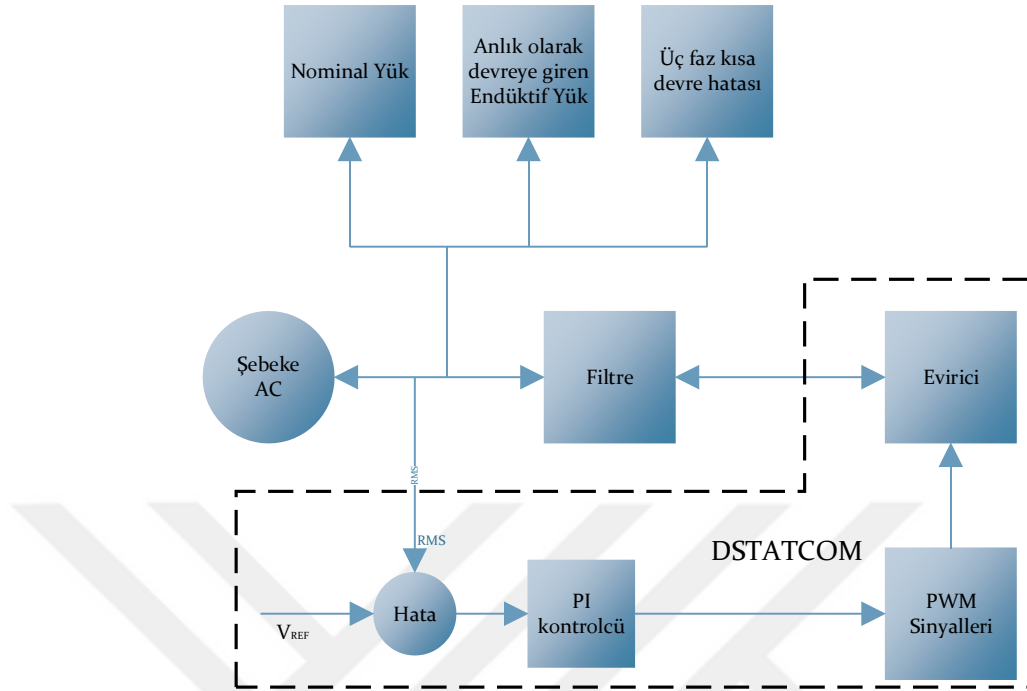
D-STATCOM'un matematiksel temeli, Park dönüşümü adı verilen bir teknik kullanılarak geliştirilmiştir. Bu yöntem, üç fazlı elektrik sistemlerini iki fazlı bir dq0 eksen takımına dönüştürerek analiz etmeyi kolaylaştırır. D-STATCOM'un AC tarafındaki diferansiyel denklemler, bu d-q eksen sisteminde denklem 5.1 ve 5.2'de ifade edilmektedir.

$$\frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_s}(v_d - R_s i_d + \omega L_s i_q - v_{cd}) \quad (5.1)$$

$$\frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_s}(v_q - R_s i_q - \omega L_s i_d - v_{cq}) \quad (5.2)$$

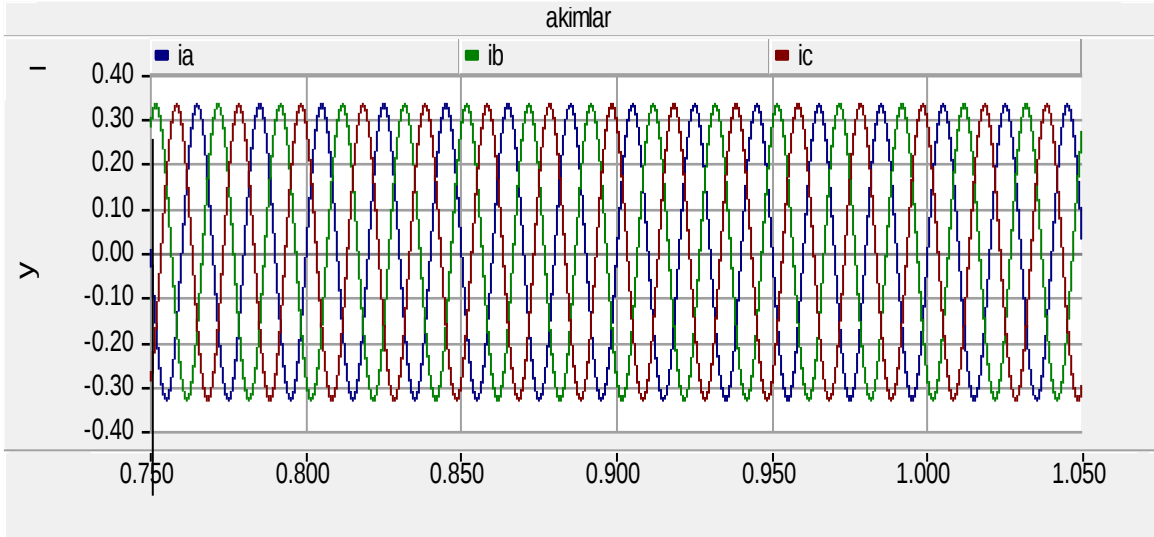
Burada v_d ve v_q , d-q eksenlerinde D-STATCOM'un gerilim bileşenlerini, i_d , ve i_q d-q eksenlerinde D-STATCOM'un akım bileşenlerini, v_{cd} , ve v_{cq} d-q eksenlerinde kontrol edilen gerilim bileşenlerini, L_s şönt reaktans, R_s reaktans direnci ve ω ise açısal frekansı temsil eder (Yazdani vd., 2010).

5.4. Simülasyon Sonuçları



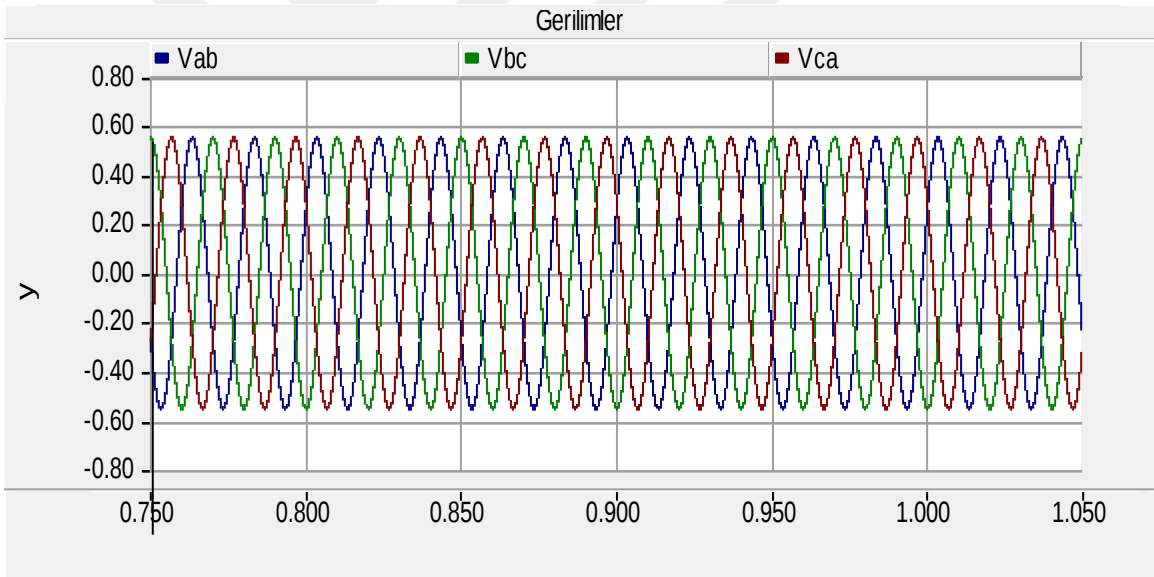
Şekil 5.2. DSTATCOM Sistemi ile Harmonik Filtrasyonu ve Güç Kalitesi İyileştirme Blok Diyagramı

Şekil 5.2’de yapılan simülasyon çalışmasının blok diyagramı görülmektedir. Devrede başlangıçta 150 kW lık omik yük devrede iken çekilen akım ve gerilimler şekilde sırasıyla verilmiştir. Şekil 5.3’te nominal yükün çektiği akımın tepe değeri 330 A ve Şekil 5.4’te yük gerilim değeri 551 V. Şekil 5.5’te ise gerilim root mean square (RMS) grafiği verilmiştir. Senaryo gereği ilk başta 1.30 sn ile 2.30 sn aralığında aşırı akım çeken yük devreye alınmıştır. 2. Senaryoda ise üç faz kısa devre hatası 1,30 sn de kısa devre süresi 0.05 sn uygulanmıştır. Evirici kontrolü Proportional-Integral (PI) kontrolör kullanılmıştır. PI kontrolöre referans gerilim ile yük geriliminin farkı giriş olarak uygulanmıştır. PI kontrolcü çıkışına faz farkı eklenerek üç fazlı referans gerilimler elde edilmiştir. Elde edilen referans gerilimler ile sinyal jeneratörü bir karşılaştırmacı bloğuna girerek evirici için gerekli pwm sinyalleri üretilmiştir.



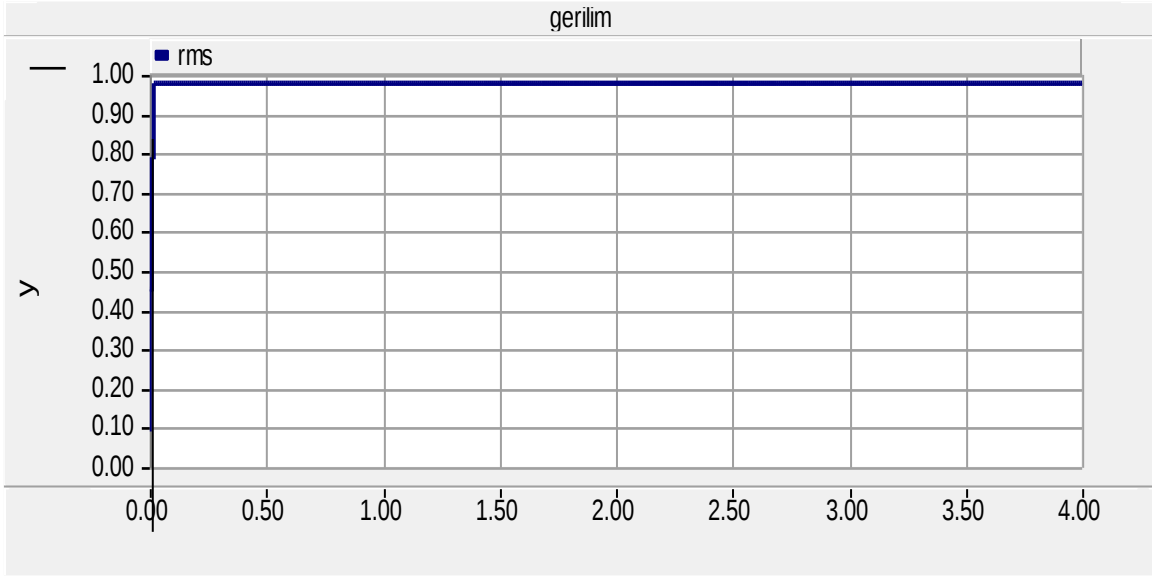
Şekil 5.3. Faz Akımları

Üç fazlı sistemdeki faz akımlarını gösterir. Akımlar sinüzoidal dalgalar halinde olup, her faz arasında 120 derece faz farkı bulunmaktadır.



Şekil 5.4. Faz Gerilimleri

Bu grafik, üç fazlı sistemdeki faz gerilimlerini gösterir. Gerilimler sinüzoidal dalgalar halinde olup, her faz arasında 120 derece faz farkı bulunmaktadır.



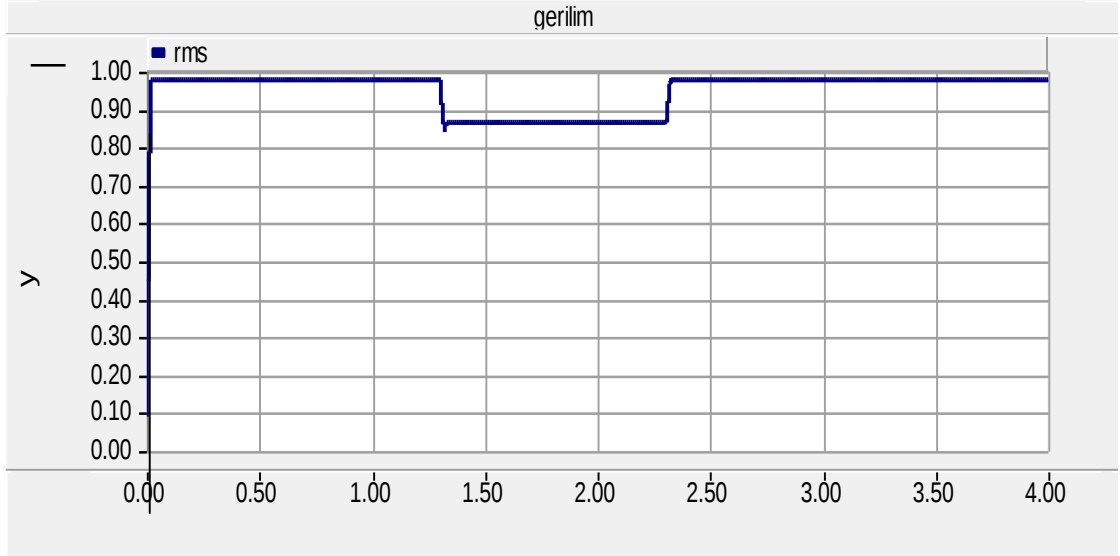
Şekil 5.5. RMS Grafiği

2. Senaryo gereği anlık olarak devreye giren 1.8 MVAR'lık endüktif yük, akım grafiğinde ani bir artışa neden olmuştur. Her üç fazın da benzer şekilde yükseldiği görülmektedir. Ancak, akımın aşırı artması, sistemdeki diğer bileşenler üzerinde gerilim düşümüne yol açmaktadır. Bu, özellikle şebekede faz dengesi üzerinde baskı oluşturabilir ve harmonik bozulmayı artırabilir.

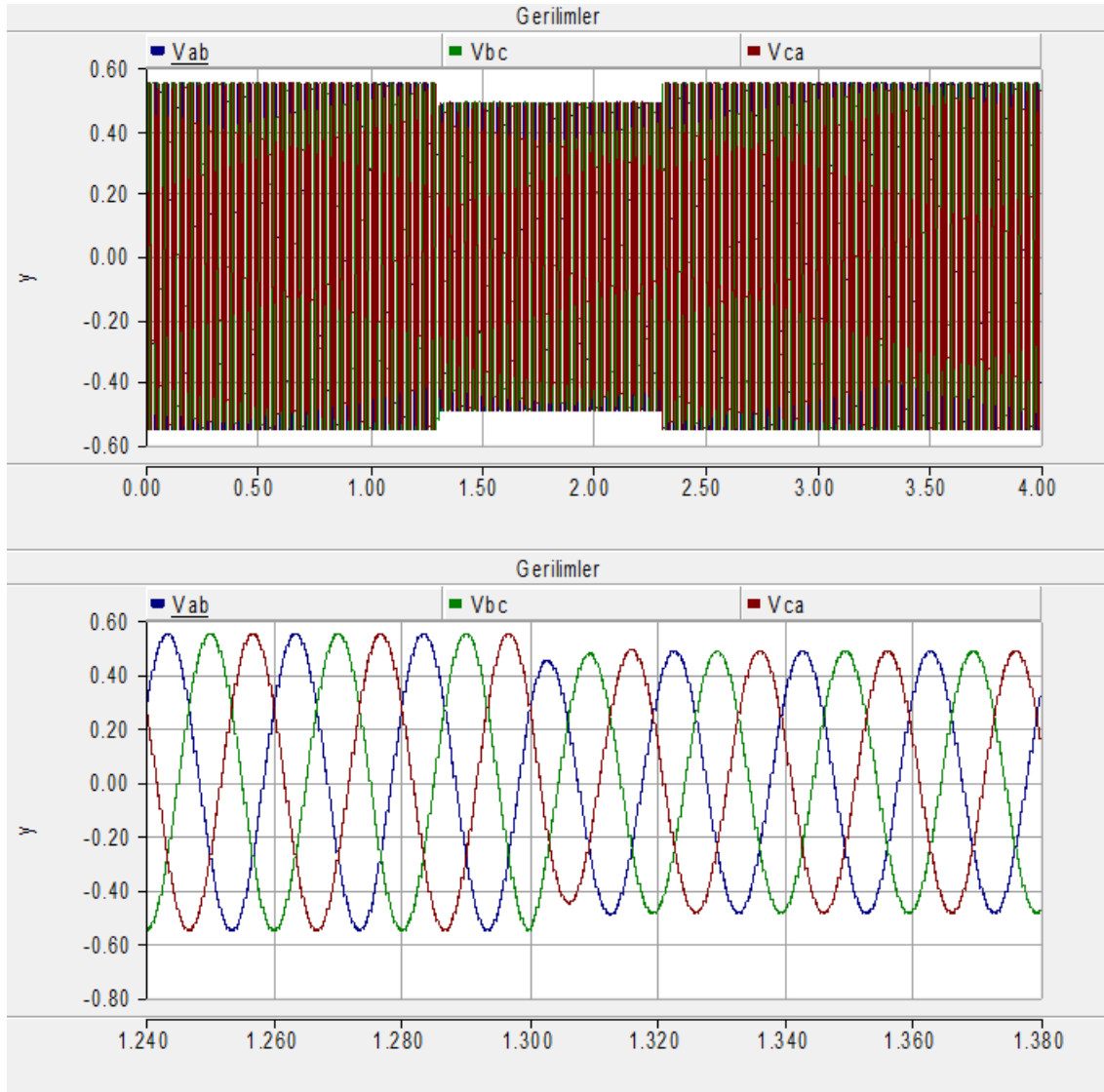
Üç fazlı sistemdeki fazlar arası gerilimleri gösterir. Dalga formları sinüzoidaldir ve aralarında 120 derece faz farkı vardır. Endüktif yükün devreye girmesi sonucu gerilimde düşüş meydana gelmiştir. Gerilim dalgalarının genliklerinde belirgin bir azalma gözlemlenmektedir.

Endüktif bir yük 1.3 sn ile 2.30 sn arasında ani olarak devreye girdiğinde yük gerilimi ve akımdaki değişimler verilmiştir. Anlık olarak ve aşırı akım çeken yük devreye girdiğinde aşırı akımdan dolayı yük geriliminde düşüm meydana gelecektir. Şekil 5.6'da RMS grafiğine bakıldığında institute of electrical and electronics engineers (IEEE) kurallarına göre gerilimde meydana gelecek kabul edilebilir düşüm değeri $\pm\%10$ 'dur. Nominal gerilim değerinin $\%10$ u kadar olabilir. Yapılan simülasyon çalışmasında ise bu değer $\%14$ olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.7'de görüldüğü gibi yük geriliminde çökmesi oluşmaktadır. Faz faz gerilim değeri max değeri 487 V olarak ölçülmüştür. Şekil 5.8'de bakıldığında Aşırı akım çeken endüktif yük devrede iken çekilen akım 3975 A dir. Endüktif yükün devreye girmesi, sistemdeki akım ve gerilimlerde ciddi değişikliklere neden olmuştur. Akım artışı ve gerilim düşüşü, sistem kararlılığı açısından dikkatle

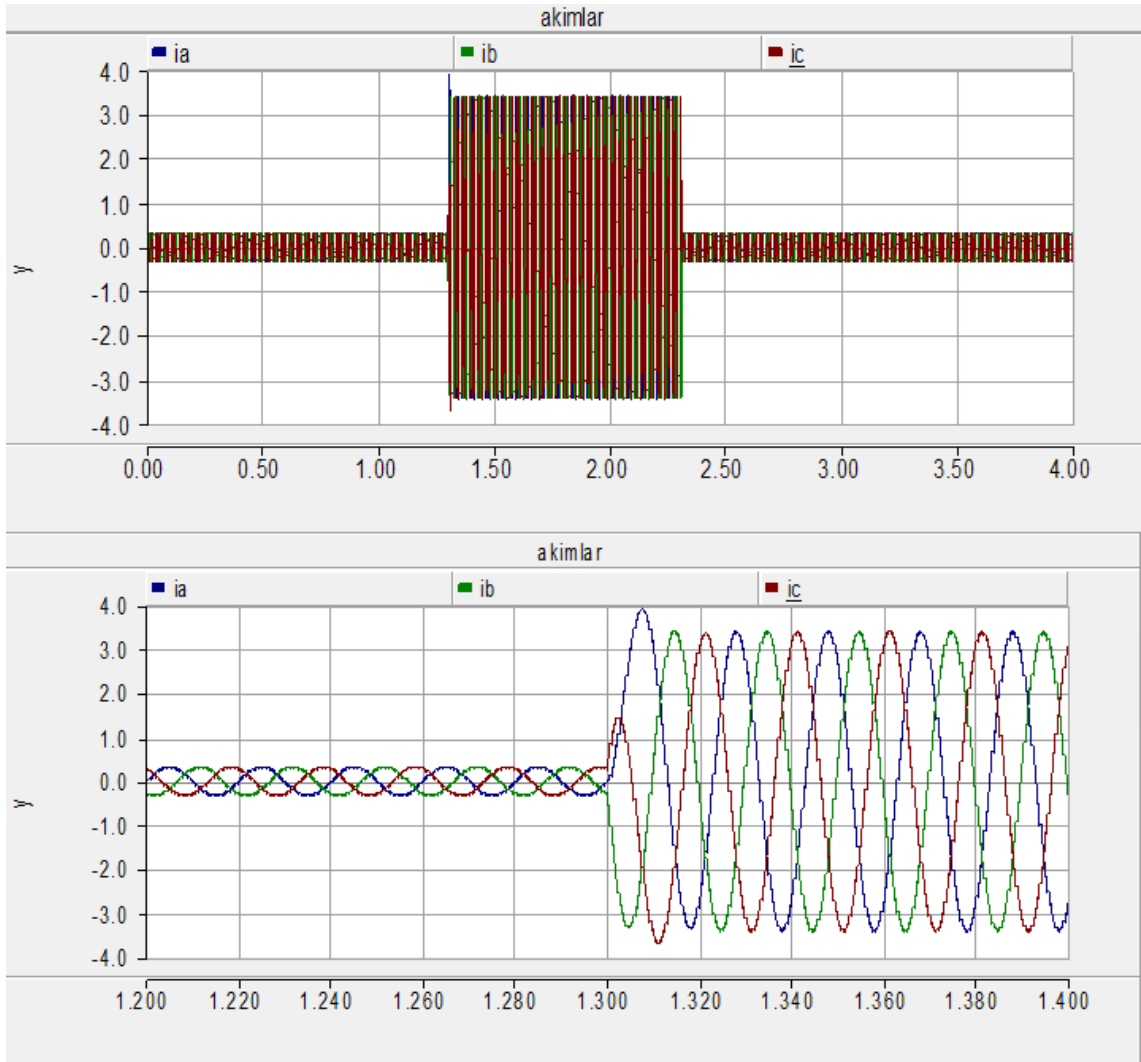
izlenmeli ve gerekli önlemler alınmalıdır. Genel olarak, bu analiz, cihazların çalışması üzerinde olumsuz etkiler yaratabilecek potansiyel riskleri ortaya koymaktadır.



Şekil 5.6. Aşırı Akım Çeken Endüktif Yük Devreye Girdiğinde Gerilimin RMS Grafiği



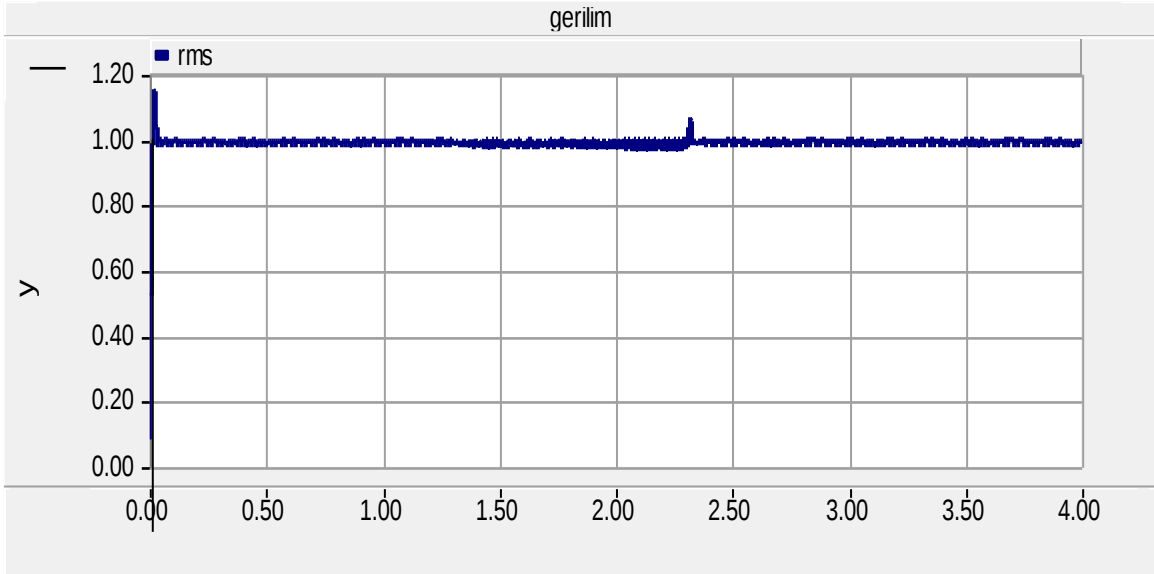
Şekil 5.7. Aşırı akım çeken endüktif yük devreye girdiğinde üç faz gerilimin grafiği



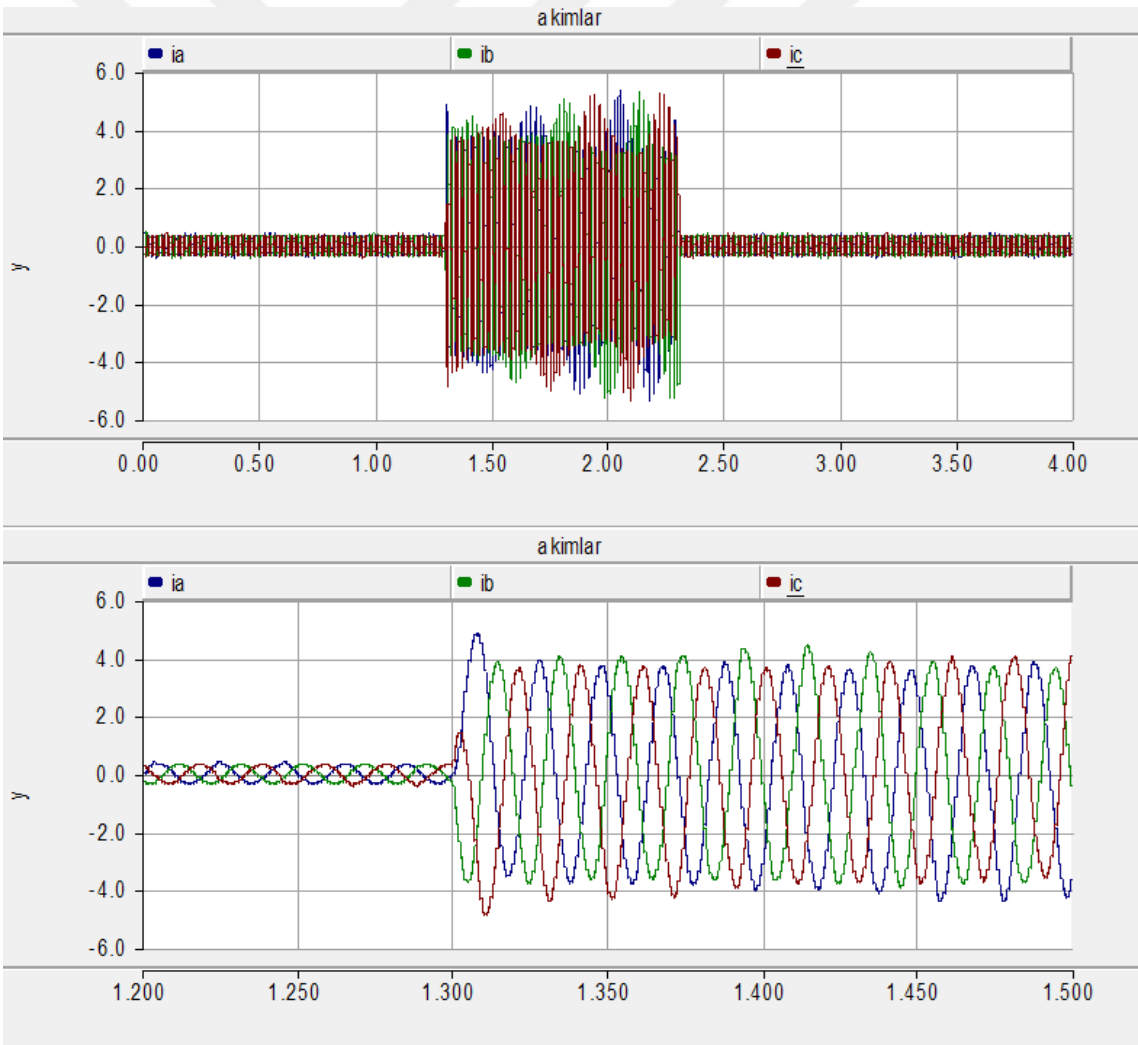
Şekil 5.8. Aşırı Akım Çeken Endüktif Yük Devreye Girdiğinde Yükün Çektiği Üç Faz Akım Grafiği

DSTATCOM'un devreye girmesiyle birlikte şebeke gerilimindeki harmoniklerin etkisi minimuma indirilmiş ve ani yük değişikliklerinin neden olduğu gerilim düşümleri başarıyla önlenmiştir. Şekil 5.9'da görüldüğü gibi dstatcom devreye girdiğinde yük geriliminin RMS grafiği düzelttiği görülmüştür. Şekil 5.10'da yükün çektiği akımlar görülmektedir. Şekil 5.11'de dstatcom devreye girdiğinde yük geriliminde oluşan gerilim çökmesini düzelttiği görülmektedir.

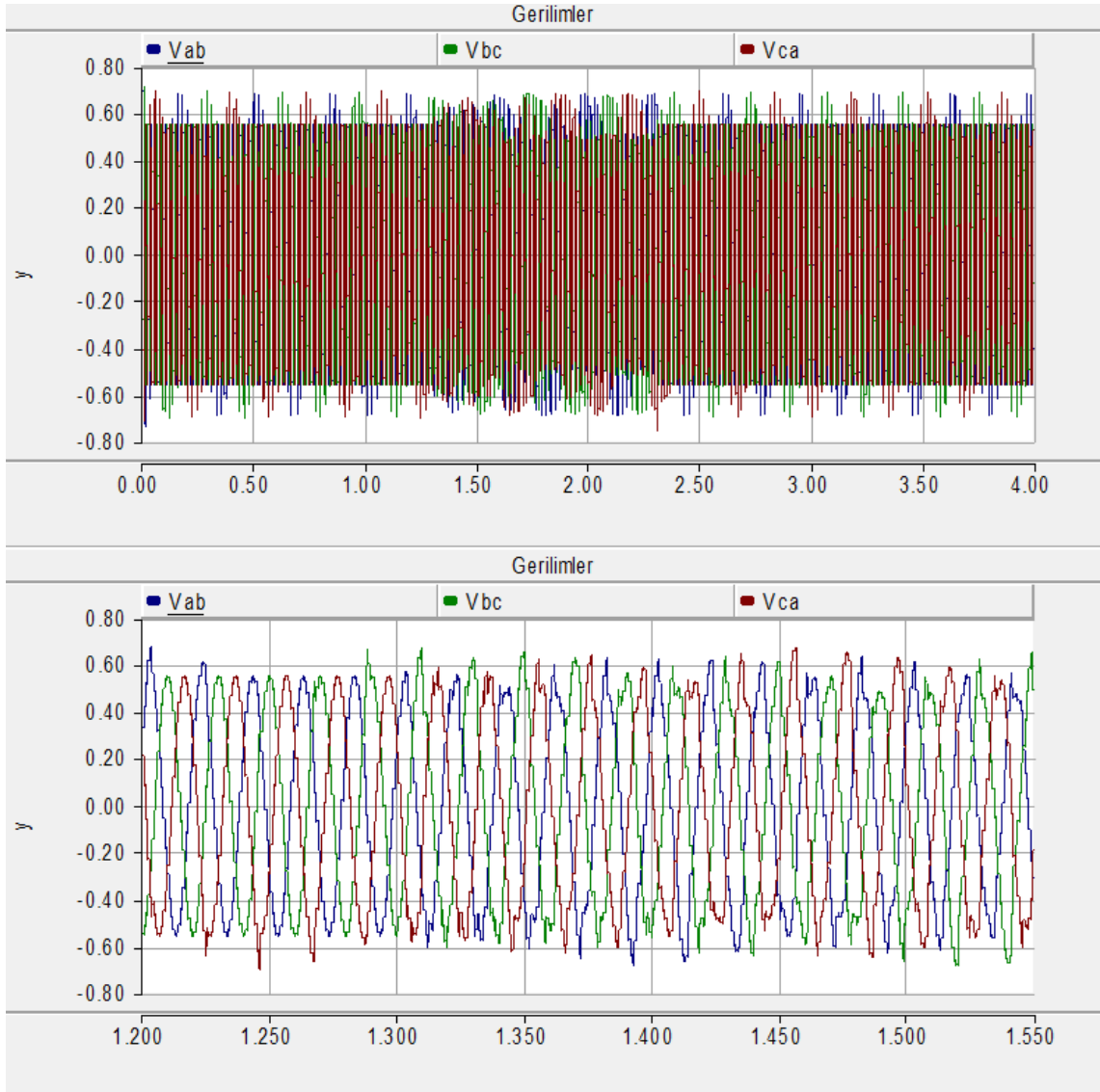
Bu durum, DSTATCOM'un hem şebeke kararlılığı hem de güç kalitesini artırmada kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Bu başarı, DSTATCOM'un modern enerji sistemlerinde neden vazgeçilmez bir bileşen haline geldiğini açıklamaktadır; çünkü sadece gerilim düzenlemesi sağlamakla kalmaz, aynı zamanda enerji kalitesini iyileştirir ve sistemin genel verimliliğini artırır. Bu durum, DSTATCOM'un dinamik tepki kabiliyetinin ve güç kalitesi üzerindeki olumlu etkisinin bir göstergesidir.



Şekil 5.9. dstatcom devrede iken RMS grafiği

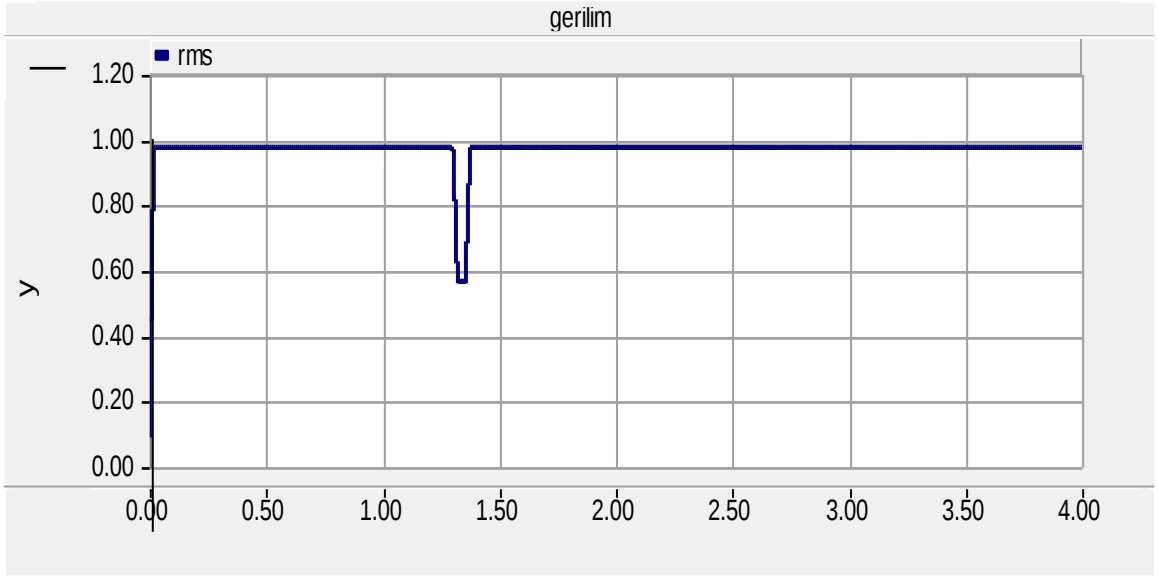


Şekil 5.10. dstatcom devrede iken üç fazlı yük akımının grafiği

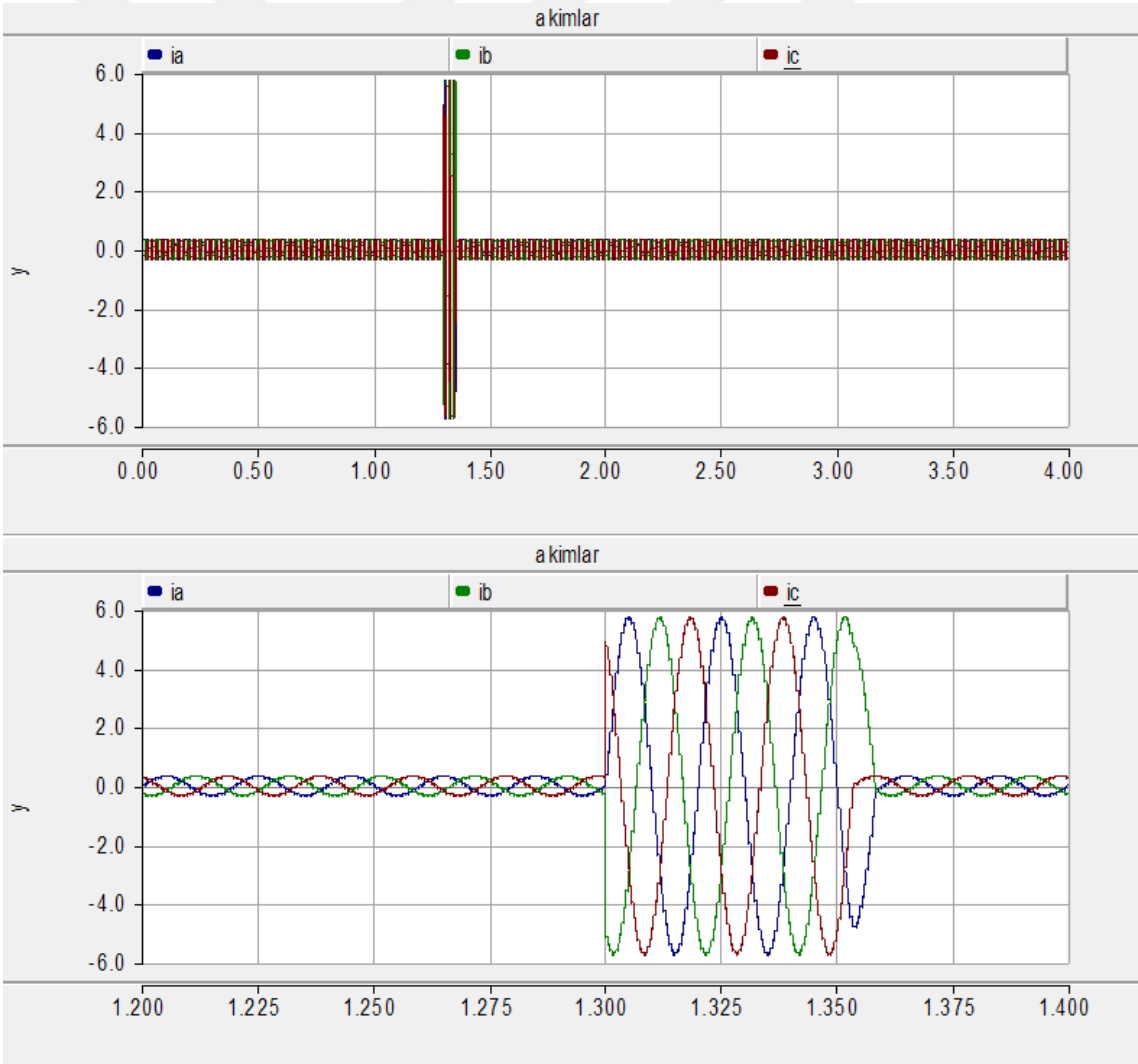


Şekil 5.11. Dstatcom devrede iken üç fazlı yük gerilim grafiği

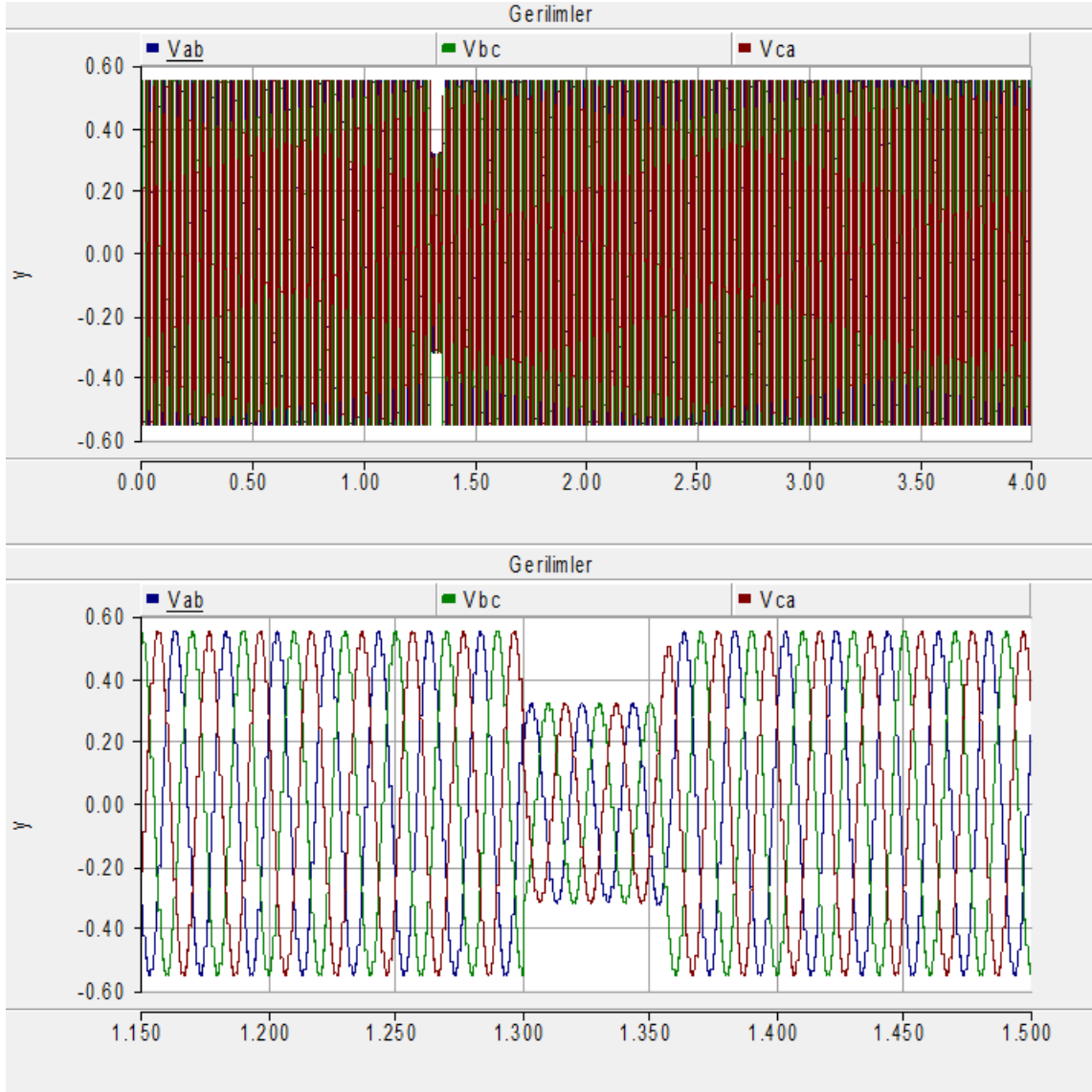
Senaryo 2 ye göre yük tarafında üç faz kısa devre arızası olduğunda Şekil 5.12’de gerilimin RMS grafiğinde görüldüğü gibi %44 oranında düşmektedir. Bu da sistemin veya yüklerin düzgün çalışmasını engelleyecektir. Şekil 5.13’te oluşan kısa devreden dolayı yük tarafında çekilen akımlar görülmektedir. Kısa devre 1.30 saniyede oluşmakta ve 0.05 saniye sürmektedir. Kısa devre anında 6000 A akım çekildiği görülmektedir. Şekil 5.14’de üç faz kısa devre arızasında yük gerilimleri görülmektedir.



Şekil 5.12. Yük Trafında Üç Faz Kısa Devre Arızası RMS Grafiği

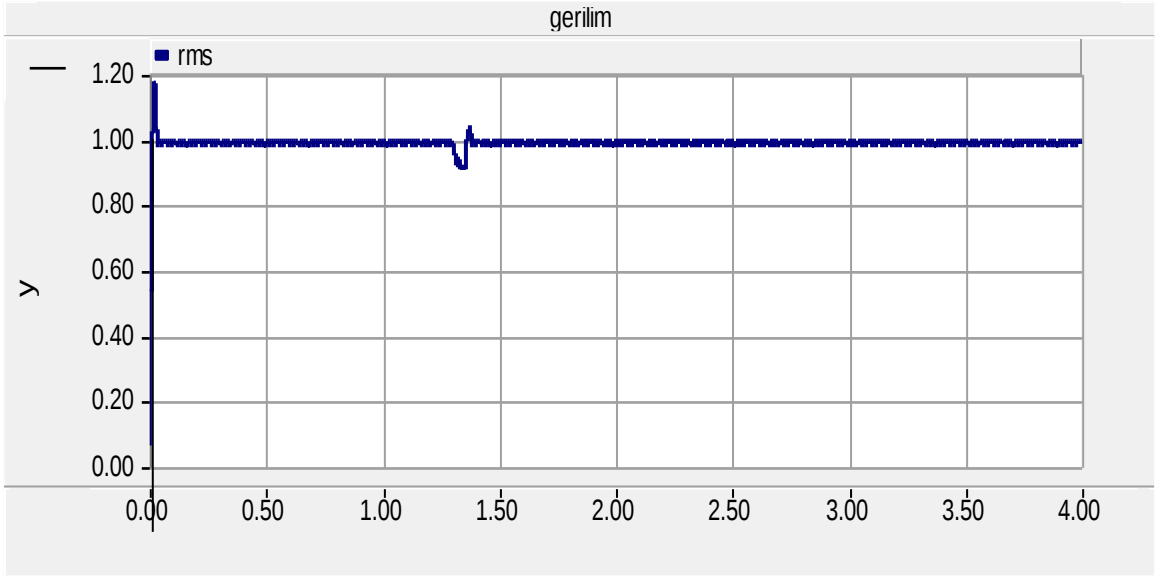


Şekil 5.13. Yük Tarafından Üç Faz Kısa Devre Arızası Meydana Geldiğinde Çekilen Üç Faz Akım Grafiği

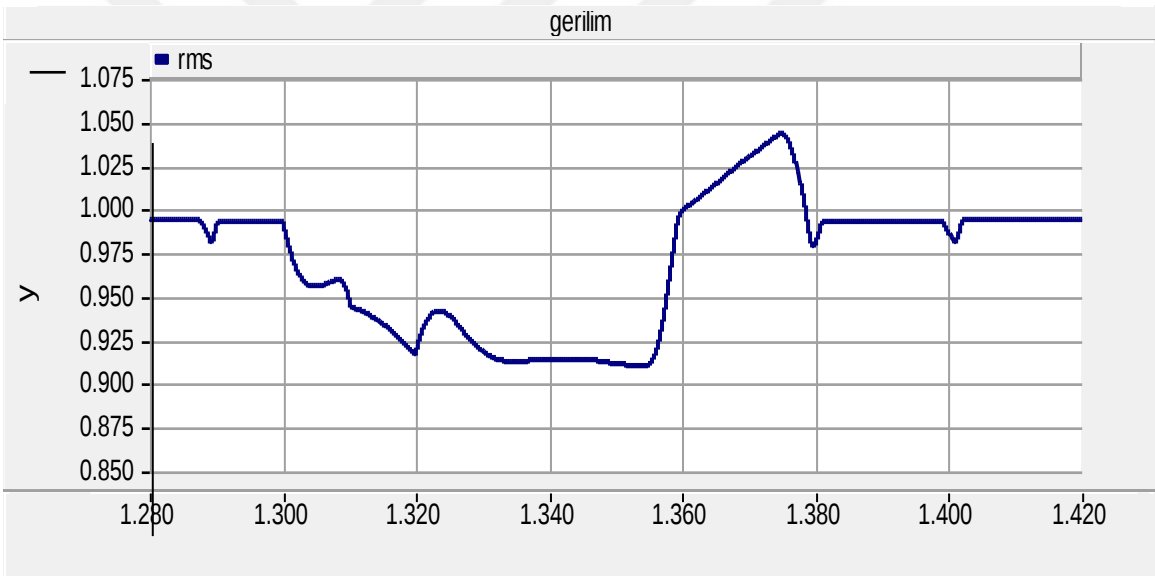


Şekil 5.14. Yük Tarafından Üç Faz Kısa Devre Arızası Meydana Geldiğinde Çekilen Üç Faz Gerilim Grafiği

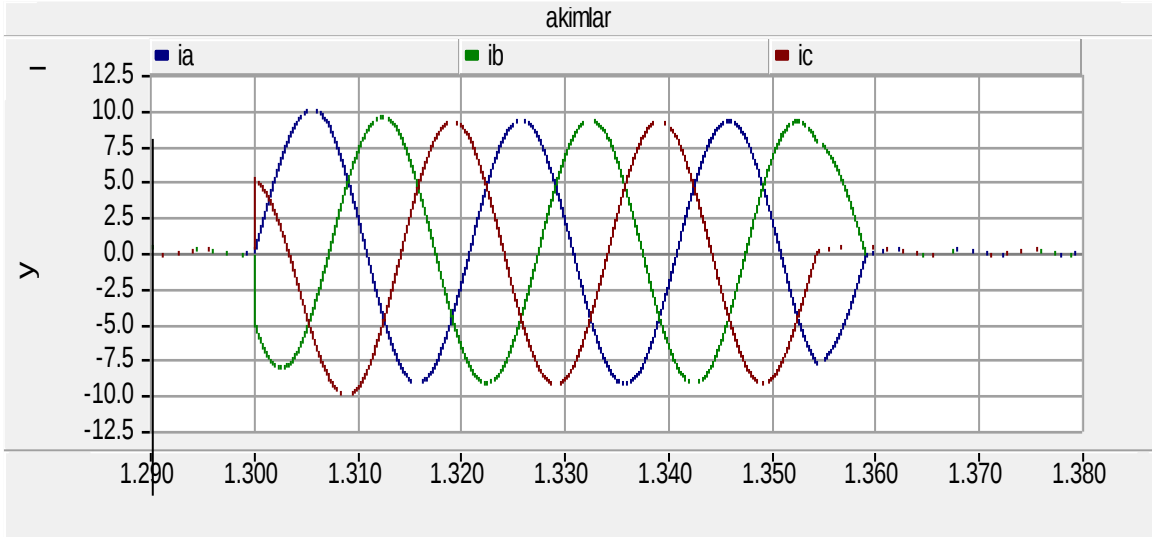
Dstatcom devreye girdiğinde ise yük geriliminin RMS grafiği 5.15'te görülmektedir. Dstatcom Gerilimi $\pm\%90$ aralığının üzerine çıkartarak IEEE şartlarında yük gerilimini düzelttiği görülmüştür. Şekil 5.16'de 0.05 saniyelik sürede oluşan üç faz kısa devre arızası süresince yük gerilimini $\%90$ üzerine çıkartarak sistemin kararlı şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Şekil 5.17'de üç faz kısa devre esnasında dstatcom devrede iken şebekeden çekilen akımlar görülmektedir. Şekil 5.18'de dstatcom devrede iken yük gerilimleri görülmektedir. Şebekeden kısa devreden dolayı aşırı akım çekilmesine rağmen yük geriliminde oluşan gerilim çökmesini dstatcom devreye girdiğinde düzelttiği görülmektedir.



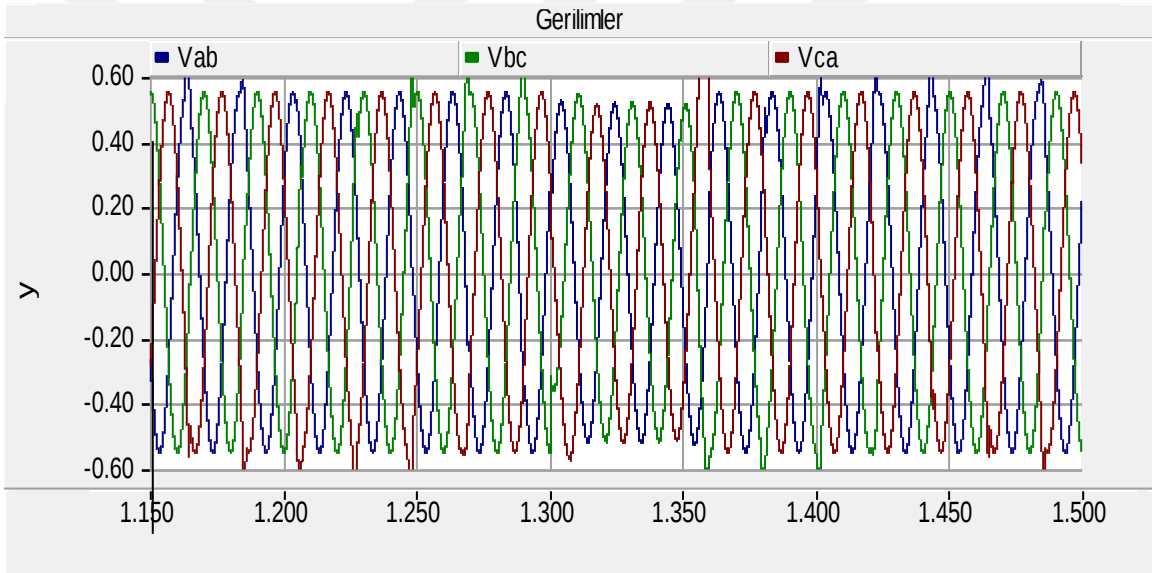
Şekil 5.15. Dstatcom Devreye girdiğinde Yük Tarafında Üç Faz Kısa Devre Arızası anındaki RMS Grafiği



Şekil 5.16. Dstatcom Devreye girdiğinde Yük Tarafında Üç Faz Kısa Devre Arızası süresince RMS Grafiği



Şekil 5.17. Dstatcom Devreye girdiğinde Üç Faz Kısa Devre Arızası ile Yük Tarafında Çekilen Akım Grafiği



Şekil 5.18. Dstatcom Devreye girdiğinde Üç Faz Kısa Devre Arızası Esnasında Yük Gerilim Grafiği

Sonuç itibariyle dstatcom devrede olmadığına aşırı akım çeken yük devreye girdiğinde yük geriliminde düşüm meydana gelecektir. Aynı şekilde yük geriliminde meydana gelecek üç faz kısa devre hatasında da yük geriliminin düştüğü görülmektedir. Gerilimi düzenlemek için tasarlanan DSTATCOM devreye girdiğinde, aşırı akım çeken yükler veya kısa devre hatalarından kaynaklanan gerilim düşümlerini düzelterek sistemin kesintisiz çalışmasını sağlamaktadır.

6. ÖNERİLER

Güneş enerji santralleri, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en hızlı büyüyen ve en yaygın kullanılanlardan biridir. Bu santraller, temiz enerji üretim kapasitesi ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma potansiyeli ile küresel enerji dönüşümünde kritik bir rol oynar. Ancak, güneş enerjisi üretimi, doğası gereği değişkendir ve çevresel koşullara, özellikle güneş ışığına bağlı olarak büyük dalgalanmalar gösterebilir. Bu dalgalanmalar, şebekeye entegre edilen güneş enerji santrallerinin güç kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Şebekeye entegre edilen güneş enerji santralleri, özellikle aniden bulutlanma veya günün farklı saatlerinde meydana gelen ışık değişiklikleri gibi faktörlere bağlı olarak hızlı üretim değişikliklerine neden olabilir. Bu durum, şebekede gerilim dalgalanmaları, frekans saptmaları, voltaj flicker, harmonik bozulmalar ve hatta kısa süreli gerilim düşüşlerine yol açabilir. Bu tür güç kalitesi problemleri, sadece şebekenin genel kararlılığını tehlikeye atmakla kalmaz, aynı zamanda şebekeye bağlı diğer tüketicilerin ve endüstriyel tesislerin performansını da olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, güneş enerji santrallerinin şebekeye entegrasyonunun dikkatlice yönetilmesi, şebekenin güvenilirliği ve enerji arzının sürdürülebilirliği için hayati önem taşır.

Bu noktada, Dağıtılmış Statik Kompanzatörler (D-STATCOM), güneş enerji santrallerinin entegrasyonunda karşılaşılan güç kalitesi sorunlarının çözümünde son derece etkili bir çözüm sunar. D-STATCOM cihazları, gerilim seviyelerini stabilize ederek, reaktif güç kompanzasyonu sağlayarak ve harmonik bozulmaları azaltarak şebekenin güç kalitesini iyileştirir. Reaktif güç dengeleme yeteneği sayesinde, D-STATCOM cihazları, güneş enerjisi üretiminde meydana gelen ani değişikliklere hızlı bir şekilde yanıt vererek gerilim saptmalarını minimuma indirir ve böylece şebeke kararlılığını korur. Ayrıca, D-STATCOM'lar, şebekede harmonik distorsiyonu filtreleyerek, sinüzoidal gerilim dalga formlarının korunmasını sağlar. Bu, hem şebeke operatörleri hem de son kullanıcılar için daha temiz, daha istikrarlı ve daha güvenilir bir enerji sağlanmasına katkıda bulunur. Güneş enerji santrallerinin artan penetrasyonu ile birlikte, bu santrallerin şebeke üzerindeki etkilerini yönetmek giderek daha karmaşık hale gelmektedir. Özellikle, güneş enerjisinin yoğun olduğu bölgelerde, bu tür güç kalitesi sorunları daha belirgin hale gelir ve şebekenin kararlılığını ciddi şekilde etkileyebilir. Bu bağlamda, D-STATCOM sistemlerinin şebekelere entegrasyonu sadece bir seçenek değil, bir gereklilik haline gelmiştir. D-STATCOM cihazlarının yaygınlaştırılması, güneş enerji santrallerinin neden olduğu olası güç kalitesi problemlerinin etkili bir şekilde

yönetilmesini sağlar ve aynı zamanda enerji sistemlerinin genel verimliliğini artırır. Sonuç olarak, D-STATCOM gibi ileri teknoloji çözümlerinin, güneş enerji santrallerinin şebekeye entegrasyonunda karşılaşılan güç kalitesi sorunlarının yönetiminde vazgeçilmez bir rol oynadığı görülmektedir. Bu cihazların etkin kullanımı, şebekenin kararlılığını sağlamanın yanı sıra, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha geniş çapta benimsenmesini teşvik eder. Bu da, hem ulusal hem de küresel düzeyde sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşma çabalarına önemli bir katkı sağlar. Dolayısıyla, güneş enerji santrallerinin şebekeye entegrasyonunda D-STATCOM gibi çözümlerin kullanımı, enerji sistemlerinin gelecekteki başarısı için kritik bir strateji olarak benimsenmelidir.



KAYNAKLAR

- Abdelhay, A. S., & Om, P. M. (2011). Electric Distribution Systems. *John Wiley & Sons, Inc.*
- Ali, F., Sarwar, A., Bakhsh, F. I., Ahmad, S., Shah, A. A., & Ahmed, H. (2023). Parameter extraction of photovoltaic models using atomic orbital search algorithm on a decent basis for novel accurate RMSE calculation. *Energy Conversion and Management*, 277, 116613.
- Akagi, H., Watanabe, E. H., & Aredes, M. (2017). Instantaneous power theory and applications to power conditioning. *John Wiley & Sons.*
- Allam, D., Yousri, D. A., & Eteiba, M. B. (2016). Parameters extraction of the three diode model for the multi-crystalline solar cell/module using Moth-Flame Optimization Algorithm. *Energy Conversion and Management*, 123, 535-548.
- Arrillaga, J., Watson, N. R., & Chen, S. (2000). Power system quality assessment. *John Wiley & Sons.*
- Askarzadeh, A., & Rezazadeh, A. (2012). Parameter identification for solar cell models using harmony search-based algorithms. *Solar Energy*, 86(11), 3241-3249.
- Bracale, A., Caramia, P., Carpinelli, G., & Di Fazio, A. R. (2017). Modeling the three-phase short-circuit contribution of photovoltaic systems in balanced power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 93, 204-215.
- Bejمرت, D., & Sidhu, T. S. (2012). Short-circuit current contribution from large scale pv power plant in the context of distribution power system protection. *Present Problems of Power System Control*, (2), 85-96.
- Cheng, D., Mather, B. A., Seguin, R., Hambrick, J., & Broadwater, R. P. (2015). Photovoltaic (PV) impact assessment for very high penetration levels. *IEEE Journal of photovoltaics*, 6(1), 295-300.
- Cheng, D., Mather, B. A., Seguin, R., Hambrick, J., & Broadwater, R. P. (2015). Photovoltaic (PV) impact assessment for very high penetration levels. *IEEE Journal of photovoltaics*, 6(1), 295-300.
- Çakmak, R. (2012). Fotovoltaik güç üretim sistemleri için bulanık mantık tabanlı maksimumgüç noktası takip sistemi. *Karadeniz Teknik Üniversitesi. Yüksek lisans tezi.*
- Duman, S., Kahraman, H. T., Sonmez, Y., Guvenc, U., Kati, M., & Aras, S. (2022). A powerful meta-heuristic search algorithm for solving global optimization and real-world solar photovoltaic parameter estimation problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 111, 104763.

- Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., & Beaty, H. W. (1996). Electrical power systems quality. New York.
- De Almeida, A., Moreira, L., & Delgado, J. (2003). Power quality problems and new solutions. *RE&PQJ*, 1(1).
- Ellis, A., Karlson, B., & Williams, J. (2012). Utility-scale photovoltaic procedures and interconnection requirements. Sandia National Laboratories SAND2012-2090.
- Elshiekh, M. E., Mansour, D. E. A., Zhang, M., Yuan, W., Wang, H., & Xie, M. (2018). New technique for using SMES to limit fault currents in wind farm power systems. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28(4), 1-5.
- El-Moursi, M. S., & Sharaf, A. M. (2005). Novel controllers for the 48-pulse VSC STATCOM and SSSC for voltage regulation and reactive power compensation. *IEEE Transactions on Power systems*, 20(4), 1985-1997.
- Ghosh, A., & Ledwich, G. (2012). Power quality enhancement using custom power devices. *Springer science & business media*.
- Hong, M., Yu, X., Yu, N. P., & Loparo, K. A. (2014). An energy scheduling algorithm supporting power quality management in commercial building microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(2), 1044-1056.
- Haydaroğlu, C. (2017). Dicle üniversitesi, güneş enerji santralleri performans analizi. *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya*, 6-11, 34-42 Yüksek Lisans Tezi.
- Hossain, E., Tür, M. R., Padmanaban, S., Ay, S., & Khan, I. (2018). Analysis and mitigation of power quality issues in distributed generation systems using custom power devices. *Ieee Access*, 6, 16816-16833.
- Han, E. (2018). Fotovoltaik hücre performansı üzerine çalışma koşullarının etkisinin incelenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri*, 7-15, 24-26 Yüksek Lisans Tezi.
- Hingorani, N. G., & Gyugyi, L. (2000). Concepts and technology of flexible ac transmission systems. *Understanding Facts*, 210.
- Hotchkiss, R. W. (2011). Performance testing of surge protective devices for low-voltage AC power circuits: approach of the IEEE. *In 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting* (pp. 1-8). IEEE.
- Izci, D., Ekinci, S., Dal, S., & Sezgin, N. (2022). Parameter estimation of solar cells via weighted mean of vectors algorithm. *In 2022 Global Energy Conference (GEC)* (pp. 312-316). IEEE.
- Ibrahem, H., Yehia, D. M., & Azmy, A. M. (2019). Effect of wind energy penetration scenario on power quality and power losses of distribution networks. *In 2019 IEEE*

- Conference on Power Electronics and Renewable Energy (CPERE)* (pp. 1-6). IEEE.
- Koç, E., & Şenel, M. C. (2013). Dünyada ve Türkiye’de enerji durumu-genel değerlendirme. *Mühendis ve Makina*, 54(639), 32-44.
- Karim, C. (2018). Control based power quality improvement in microgrids (Doctoral dissertation, Memorial University of Newfoundland).
- Kumar, C., Raj, T. D., Premkumar, M., & Raj, T. D. (2020). A new stochastic slime mould optimization algorithm for the estimation of solar photovoltaic cell parameters. *Optik*, 223, 165277.
- Karadeniz, A., & BALCI, M. (2019). Fotovoltaik dağıtık üretim birimleri (FV-DÜB): güç kalitesine etkileri, uluslararası güç kalitesi standartları ve FV-DÜB barındıran dağıtım sistemleri için güç kalitesi iyileştirme yöntemleri. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 882-903.
- Kesenek, M., (2018). Güneş enerji santralinin ulusal şebekeye entegrasyon etkilerinin incelenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş*, 42-45, 6-11 Yüksek Lisans Tezi.
- Khadkikar, V., & Chandra, A. (2006). A novel structure for three-phase four-wire distribution system utilizing unified power quality conditioner (UPQC). In *2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems* (pp. 1-6). IEEE.
- Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y., & Uğurlu, İ. (2018). Dünyada ve Türkiye’de enerji görünümünün genel değerlendirilmesi. *Mühendis ve Makina*, 59(692), 86-114.
- Kow, K. W., Wong, Y. W., Rajkumar, R. K., & Rajkumar, R. K. (2015). Power quality analysis for PV grid connected system using PSCAD/EMTDC. *International Journal of Renewable Energy Research*, 5(1), 121-132.
- Liang, X., & Bagen, B. (2015). Probabilistic planning and risk analysis for renewable power generation system. In *Proceedings of CIGRE Canada Conference* (Vol. 31).
- Mishra, M. K., Ghosh, A., & Joshi, A. (2003). Operation of a DSTATCOM in voltage control mode. *IEEE transactions on power delivery*, 18(1), 258-264.
- Mathur, R. M., & Varma, R. K. (2002). Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems. *John Wiley & Sons*.
- Mahela, O. P., & Shaik, A. G. (2017). Power quality recognition in distribution system with solar energy penetration using S-transform and Fuzzy C-means clustering. *Renewable energy*, 106, 37-51.
- Mekhamer, S. F., Abdelaziz, A. Y., & Ismael, S. M. (2013). Design practices in harmonic analysis studies applied to industrial electrical power systems. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 3(4), 467-472.

- Obut, N., & Tür, M. R. (2021). Measurement And Evaluation Of Power Quality Parameters Batman Province Application. *International Journal of Energy and Smart Grid*, 6(1-2), 37-45.
- Puche, G. A., Vidal, P. G., & Muñoz-Cerón, E. (2016). Large-scale photovoltaic power plants. *In Solar Energy* (pp. 125-169).
- Ray, P. K., Mohanty, S. R., & Kishor, N. (2012). Classification of power quality disturbances due to environmental characteristics in distributed generation system. *IEEE Transactions on sustainable energy*, 4(2), 302-313.
- Ray, P. K., Mohanty, S. R., Kishor, N., & Catalão, J. P. (2013). Optimal feature and decision tree-based classification of power quality disturbances in distributed generation systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(1), 200-208.
- Roselund, C., & Bernhardt, J. (2015). Lessons learned along europe's road to renewables. *IEEE Spectrum*, 4.
- Reid, W. E. (1996). Power quality issues-standards and guidelines. *IEEE transactions on industry applications*, 32(3), 625-632.
- Reznik, A., Simões, M. G., Al-Durra, A., & Mueeen, S. M. (2013). \$ LCL \$ filter design and performance analysis for grid-interconnected systems. *IEEE transactions on industry applications*, 50(2), 1225-1232.
- Rashed, M., & Strbac, G. (2009). Assessing the benefits of using D-STATCOMs for improving the quality of electricity supply in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(3), 1465-1474.
- Shi, J., Lee, W. J., & Liu, X. (2017). Generation scheduling optimization of wind-energy storage system based on wind power output fluctuation features. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(1), 10-17.
- Sayın, S., & Koç, İ. (2011). Güneş Enerjisinden Aktif Olarak Yararlanmada Kullanılan Fotovoltaik (Pv) Sistemler Ve Yapılarda Kullanım Biçimleri. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 26(3), 89-106.
- Sen, Z. (2008). Solar energy fundamentals and modeling techniques: atmosphere, environment, climate change and renewable energy. *Springer Science & Business Media*.
- Schlabbach, J., & Kammer, L. (2006, May). Prediction of harmonic currents of PV-inverters using measured solar radiation data. *In MELECON 2006-2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference* (pp. 857-860). IEEE.
- Singh, B., & Solanki, J. (2010). Load compensation for diesel generator-based isolated generation system employing DSTATCOM. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(1), 238-244.

- Tüysüz, M. (2018). Hibrit güç sistemlerinde maksimum güç noktası takibi için bulanık denetleyicinin optimizasyonu. *Karadeniz Teknik Üniversitesi*.
- Tur, M. R., & Bayindir, R. (2019). A review of active power and frequency control in smart grid. *1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)* (pp. 483-488). IEEE.
- Tüfekçi, A. (2018). Yenilenebilir enerji sistemlerinde harmonik analizi. *Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Tur, M. R., Ay, S., Shobole, A., & Wadi, M. (2019). Güç Sistemlerinde ünite tahsisi için döner rezerv gereksinimi optimal değerinin kayıp parametrelerin dikkate alınarak hesaplanması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(3), 1171-1186.
- Tür, M. R. (2018). Solution methods and recommendations for power quality analysis in power systems. *Journal of Engineering and Technology*, 2(2), 1-9.
- Tur, M. R., Wadi, M., Shobole, A., & Ay, S. (2018). Load frequency control of two area interconnected power system using fuzzy logic control and PID controller. *In 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)* (pp. 1253-1258). IEEE.
- Urbanetz, J., Braun, P., & Rüther, R. (2012). Power quality analysis of grid-connected solar photovoltaic generators in Brazil. *Energy Conversion and management*, 64, 8-14.
- Yılmaz, O. (2014). Elektrik dağıtım sistemlerinde kısa devre analizi ve uygulaması. *Tunceli Üniversitesi, yayınlanmış yüksek lisans tezi*.
- Yarar, N. (2019). Bir güneş santralinin elektrik şebekesine entegrasyonunda güç kalitesine etkilerinin incelenmesi. *Necmettin Erbakan Üniversitesi. Yüksek Lisans Tezi*.
- Yazdani, A., & Iravani, R. (2010). Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications. *John Wiley & Sons*.
- Yang, B., Yu, T., Shu, H., Zhu, D., An, N., Sang, Y., & Jiang, L. (2018). Perturbation observer based fractional-order sliding-mode controller for MPPT of grid-connected PV inverters: Design and real-time implementation. *Control Engineering Practice*, 79, 105-125.
- Yehia, D. M., Mansour, D. E. A., & Yuan, W. (2018). Fault ride-through enhancement of PMSG wind turbines with DC microgrids using resistive-type SFCL. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28(4), 1-5.
- Quaschnig, V. (2014). Understanding renewable energy systems. Routledge.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Naci OBUT
Uyruğu : T.C

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Üniversite	: Karadeniz Teknik Üniversitesi	1998
Yüksek Lisans	: Batman Üniversitesi	2024
Doktora	: -	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
1998-2002	TEDAŞ VAN Müessese Müdürlüğü	İşletme Mühendisi
	TEDAŞ VAN Müessese Müdürlüğü	Tesis Mühendisi
	TEDAŞ VAN Müessese Müdürlüğü	Kayıp Kaçak Mühendisi
2002-2013	TEDAŞ SİİRT Müessese Müdürlüğü	Özel Müşteriler Mühendisi
	TEDAŞ SİİRT İl Müdürlüğü	Bilgi İşlem Tahakkuk Tahsilat
	TEDAŞ SİİRT İl Müdürlüğü	Kayıp Kaçak Şube Müdürü
	TEDAŞ SİİRT İl Müdürlüğü	Proje Tesis Yatırım Şube Müdürü
	TEDAŞ SİİRT İl Müdürlüğü	İl Müdür Yardımcısı
2013-2020	DİCLE ELEKTRİK DAĞITIM A.Ş.	Siirt İl Müdürü
2020-2023	DİCLE ELEKTRİK DAĞITIM A.Ş.	Batman İl Müdürü
2023-2024	DİCLE ELEKTRİK DAĞITIM A.Ş.	Şanlıurfa İl Müdürü

UZMANLIK ALANI

Elektrik Dağıtım, Enerji, Sayaç, Ölçü

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Tür, M. R., Apaydin, E., Obut, N., Nar, R., Temiz, R., & Mirkan, N. (2022, September). Harmonic Analysis of A Grid-Connected Solar Power Plant in Batman Province and Investigation of Power Quality. *In 2022 11th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)* (pp. 508-513). IEEE.

Obut, N., & Tür, M. R. (2021). Measurement And Evaluation Of Power Quality Parameters Batman Province Application. *International Journal of Energy and Smart Grid*, 6(1-2), 37-45.

