



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**KONYA'NIN KAR YAĞIŞLI BİR
BÖLGESİNDE ALÇAK GERİLİM DAĞITIM
SİSTEMİNE BAĞLI FARKLI İNVERTER
YAPILARININ GÜÇ KALİTESİNE
ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

OKTAY YÜKSEL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

OCAK-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Oktay YÜKSEL tarafından hazırlanan “Konya'nın Kar Yağışlı Bir Bölgesinde Alçak Gerilim Dağıtım Sistemine Bağlı Farklı İnverterler Yapılarının Güç Kalitesine Etkilerinin Değerlendirilmesi” adlı tez çalışması 21/01/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof.Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ

Danışman

Dr.Öğr.Üyesi Mehmet Ali ANADOL

Üye

Doç.Dr.Mustafa YAĞCI

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü 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.

Oktay YÜKSEL

Tarih: 21.01.2022

İmza:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KONYA'NIN KAR YAĞIŞLI BİR BÖLGESİNDE ALÇAK GERİLİM DAĞITIM SİSTEMİNE BAĞLI FARKLI İNVERTER YAPILARININ GÜÇ KALİTESİNE ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Oktay YÜKSEL

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali ANADOL

2022, 72 Sayfa

Jüri
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali ANADOL
Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ
Doç. Dr. Mustafa YAĞCI

Bu tez çalışması, kar yağışının alçak gerilim dağıtım sistemine bağlı fotovoltaik (FV) tesislerin güç kalitesine etkileri ile ilgilidir. Kar yağışının etkisiyle şebekede meydana gelen güç kalitesi bozulmaları, dizi inverter ve mikroinverter yapısına sahip iki farklı fotovoltaik tesis üzerinde incelenmiştir. İki bağımsız dize girişine sahip olan dizi inverter sistemi, güney yönünde ve yatay doğrultuda yerleştirilmiş 2x18 adet mono-kristal yapıli fotovoltaik panelden oluşmaktadır. Mikroinverter sistemi, güney yönünde ve yatay konumda taşıyıcı sistem üzerine monte edilmiş 18 adet polikristal FV panelden oluşmaktadır. Bu tesislerin güç kalitesine etkileri, şebeke ile ortak bağlantı noktalarına çok fonksiyonlu şebeke analizörleri bağlanarak ölçülmüştür. Şebeke analizörlerinden elde edilen güç kalitesi değişkenlerinin mevcut ulusal mevzuat ve uluslararası standartlarda belirtilen sınır değerlere uygunluğu incelenmiştir. Bu tez çalışması sonucunda, fotovoltaik tesislerin, güç sistemlerinde gün doğumu, gün batımı anlarında gerilim saptması, reaktif güç, güç faktörü ve akım harmonik bozulması olarak bilinen kalite değişkenleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, kar yağışının etkili olduğu anlarda bu etkinin arttığı gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Fotovoltaik enerji, güç kalitesi, yenilenebilir enerji, ulusal ve uluslararası güç kalite standartları, kar yağışı, gün doğumu, gün batımı.

ABSTRACT

MS THESIS

ASSESSMENT OF THE EFFECTS TO THE POWER QUALITY OF DIFFERENT INVERTER TYPES CONNECTED LOW VOLTAGE DISTRIBUTION SYSTEM IN A SNOWY REGION OF KONYA

Oktaý YÜKSEL

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical Electronics Engineering**

Advisor: Asisst. Prof. Dr. Mehmet Ali ANADOL

2022, 72 Pages

Jury

**Asisst. Prof. Dr. Mehmet Ali ANADOL
Prof.Dr. Ahmet Afsin KULAKSIZ
Assoc. Prof. Dr. Mustafa YAGCI**

This thesis is about the effects of snowfall on the power quality of photovoltaic plants connected to the low voltage distribution system. Power quality deteriorations in the grid due to the effect of snowfall were investigated on two different photovoltaic plants with string inverter and microinverter structures. The string inverter system which has two independent array inputs consists of 2x18 mono-crystalline photovoltaic modules which are placed with a fixed south direction and horizontal position. The microinverter system consists of 18 polycrystalline fotovoltaic modules mounted on the carrier system in the south direction and horizontal position. Multifunctional network analyzers were connected to the common connection points of these facilities with the grid, and their effects on power quality were measured. The compliance of the power quality variables obtained from the network analyzers with the limit values specified in the current national regulations and international standards has been examined. As a result of this thesis study, it has been shown that photovoltaic plants have a significant effect on the quality variables known as voltage deviation, reactive power, power factor, and current harmonic distortion in power systems during sunrise, sunset and this effect increases when snowfall is effective.

Keywords: Photovoltaic energy, power quality, renewable energy, national and international power quality standarts, snowfall, sunrise, sunset.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında pandemi döneminde yaşanan birçok zorluğa rağmen bilgi ve tecrübesiyle bana her zaman destek olan tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali ANADOL ve değerli Aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Oktay YÜKSEL
KONYA-2022



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	4
3. GÜÇ KALİTESİNDE İNVERTERİN ROLÜ.....	10
4. GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİ	12
4.1. Gerilim Sapması.....	13
4.2. Gerilimin Çökmesi.....	15
4.3. Gerilim Dengesizliği	16
4.4. Fliker Şiddeti.....	18
4.5. Frekans Sapması	20
4.6. Anahtarlama Gürültüleri.....	21
4.7. Harmonik Bozulma	22
4.8. Reaktif Güç Kontrolü ve Güç Faktörü	25
5. KAR YAĞIŞI VE BUZLANMANIN FOTOVOLTAİK ÜRETİME ETKİSİ.....	28
6. MATERYAL VE YÖNTEM	30
6.1. Hibrit Dizi İnverterli Enerji Üretim Tesisi	30
6.2. Mikroinverterli Test Ve Ölçüm Sistemi.....	32
6.3. Yöntem	33
7. GÜÇ KALİTESİ ANALİZİ VE TARTIŞMA.....	35
7.1. Yük Profili	35
7.2. Gerilim Sapması.....	36
7.3. Gerilim dengesizliği	43
7.4. Harmonik Bozulma	45
7.5. Reaktif Güç ve Güç Faktörü	53
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	61
8.1. Sonuçlar	61
8.2. Öneriler.....	62
KAYNAKLAR.....	63

EKLER	68
--------------------	-----------



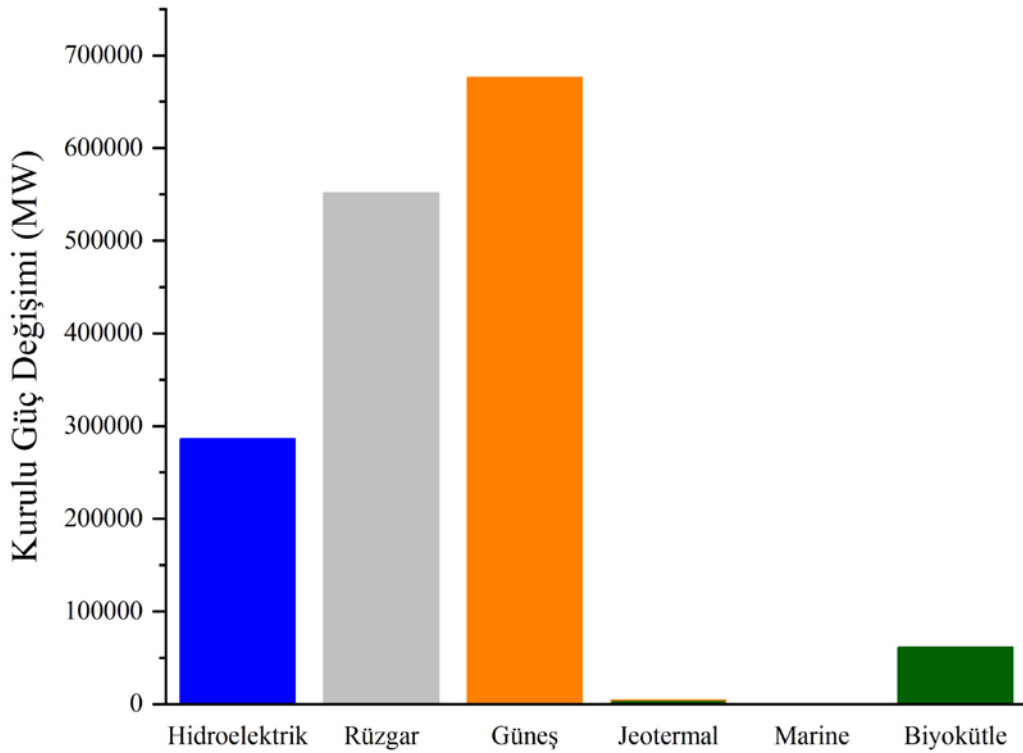
SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

AC	: Alternatif Akım
BIPV	: Binaya Bütünleşik Fotovoltaik Sistem
CO ₂	: Karbondioksit
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
DC	: Doğru Akım
DER	: Dağınık Üretim Kaynağı
EPDK	: Türkiye Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
E_a	: Jeneratör Gerilimi
f	: Anlık Frekans Değeri
f_a	: Anma Frekansı
FS	: Frekans Sapması
FV	: Fotovoltaik
GCPVS	: Şebekeye Bütünleşik Fotovoltaik Sistemler
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
I_{a1}	: Üç Fazlı Simetrik Kısa Devre Akımı
KTÜN	: Konya Teknik Üniversitesi
LVRT	: Düşük Gerilim Sırtlama
MPP	: Maksimum Güç Noktası
MPPT	: Maksimum Güç Noktası Takip Sistemi
TBMYO	: Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu
PCC	: Şebeke Bağlantı Noktası
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
RMS	: Etkin Değer
SS	: Gerilim Çökmesi
STC	: Standart Test Koşulları
TM	: Trafo Merkezi
THB	: Toplam Harmonik Bozulma
TTB	: Toplam Talep Bozulma
U	: Anlık Gerilim Değeri
U_a	: Anma Gerilimi
PLL	: Faz Kilitli Döngü
P_{st}	: Kısa Süreli (10dk) Fliker Şiddeti
P_{lt}	: Uzun Süreli (120dk) Fliker Şiddeti (Ardışık 12 P_{st} Ölçümü)
Z_1	: Pozitif Bileşen Empedansı

1. GİRİŞ

Sanayi devrimiyle birlikte ortaya çıkan endüstrileşme birçok ülkenin ekonomisini seri üretim yapan fabrikalar üzerine kurmasına neden olmuştur. Üretim devamlılığını sağlamak için kullanılan enerji kaynakları, zamanla yerini karbondioksit açığa çıkaran çeşitli fosil yakıt ürünlerine bırakmıştır. Fosil yakıt kullanımının artmasıyla birlikte ortaya çıkan bazı çevresel sorunlar, insan yaşamını ve doğayı tehdit edecek seviyelere yükselmiştir. Bu durum, üretimin devamlılığı ve ekonomik gelişimin sürdürülebilirliği için temiz ve ucuz yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacı arttırmıştır. Günümüzde dünya genelinde enerji ihtiyacının önemli bir kısmı fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Fakat fosil yakıtlardan enerji üretimi esnasında oluşan karbondioksit (CO₂) salınımı ve fosil yakıtların sonlu olması geleneksel enerji üretimi ile ilgili iki büyük endişeyi beraberinde getirmektedir. Bu endişeler, mevcut yaşam standartlarının sürdürülebilirliği için temiz ve ucuz enerji olan yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişimini ve kullanımını arttırmaktadır.



Şekil 1.1 2011-2020 yılları arasında Dünya genelinde PV enerji kurulu güç artışı¹

¹ <https://www.irena.org/>

Yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılan hidroelektrik enerji, Dünya genelinde uzun yıllar temel elektrik enerjisi üretim kaynağı olmuştur. Fakat 2010'lu yılların başında Dünya genelinde kurulu gücü sadece 40,279 MW olan fotovoltaik (FV) enerjinin kurulu gücü 2021 yılı sonunda 675874,995 MW'a kadar ulaşarak, bu süreçte hidroelektrik enerjiyi de geride bırakmış ve kurulu gücü en çok artan yenilenebilir enerji kaynağı olmuştur(www.irena.org). FV enerjinin son yıllarda en çok tercih edilen yenilenebilir enerji kaynağı olmasında FV panellerin fiyatındaki sürekli düşüş, gelişmiş ve güvenilir elektronik güç dönüştürme teknolojisi, basit kurulum süreci, düşük bakım maliyeti, yoğun güneş ışınımı zamanında daha az geleneksel üretim tesislerine ihtiyaç duyulması, iletim ve dağıtım kayıplarını azaltması (Salam ve ark., 2015; Obi ve Bass, 2016), enerji talebinin yüksek olduğu tüketim merkezlerine yakın noktalara kurulabilmesi etkili olmuştur.

Fotovoltaik enerjinin son yıllarda hızla gelişmesiyle birlikte Türkiye'nin sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli Türkiye'de FV enerjiye olan ilgiyi artırmıştır. Türkiye'de FV enerji üretimi arttırmak amacıyla 2011 yılında çıkarılan lisansız enerji üretim yönetmeliği FV tesislerin şebekeye alçak gerilim seviyesinden bağlantısının önünü açmıştır (Şimsek ve Bizkevelci, 2013). Lisansız enerji üretim tesislerinin ilk kez 2014 yılında işletmeye alınmaya başlanmasıyla 2014 yılından 2021 Kasım ayına kadar geçen sürede Türkiye'deki enerji üretim tesislerinin yaklaşık %80'ini oluşturan 8265 adet FV tesis, ülkemizdeki kurulu gücün % 7.8'ini oluşturmaktadır². Bu süreç ülkemizdeki dağıtım ağlarında dağınık üretim yapan çok sayıda FV tesisin işletmeye alındığını ve gelecekte bu sayının katlanarak artacağını göstermektedir. Ancak dağıtım ağlarında bu kadar çok dağınık üretim yapan FV tesisin bulunması bazı sorunlara neden olur. Gün doğumu, gün batımı, gölgeli çalışma sırasında fotovoltaik hücrelerine ulaşan ışınım seviyesinin azalması ve nonliner yükler normalde 95% gibi yüksek güç dönüştürme oranına sahip inverterlerin performansının düşmesine sebep olur. Bu kontrol edilemez değişkenler ve tesislerde kullanılan güç elektroniği dönüştürücüleri, şebekede gerilim kalitesi sorunları, frekans sapması ve harmonik bozulma gibi bazı güç kalitesi problemlerine sebep olur. Bu güç kalitesi problemleri, inverterler ile şebekeye aktarılan enerjinin kesilmesine sebep olabilir (Liang, 2016). Dağınık üretim ve mikro şebeke yapısı, şebeke yükünün dengelenmesi yönüyle güç sistem yönetimi açısından bir problem kaynağıdır. Çünkü FV tesislerin önlenemez atmosferik koşullardan dolayı

² <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/kurulu-guc-raporlari>

dengesiz çalışması, inverter kısıtlamaları, müşterilerin sahip oldukları nonliner yükler güç kalitesi sorunları oluşturmakla kalmaz, aynı zamanda güvenilir bir enerji tedarikini zorunlu kılar. (Patsalides ve ark., 2012). Bu yüzden birçok ülke enerji üretim tesislerini ve ekonomik değeri yüksek olan şalt malzemelerini korumak ve enerji tedarikinin sürekliliğini sağlamak için bazı yasal düzenlemeler yapmaktadırlar.

Son yıllarda yaygınlaşan güç kalitesi endişelerinden dolayı FV tesislerin şebekedeki güç kalitesini araştıran bazı çalışmalar bulunmaktadır (Oliva ve Balda, 2003; Gallo ve ark., 2012; Farhoodnea ve ark., 2013; Urbanetz ve ark., 2012; Patsalides ve ark., 2012; Gonzalez ve ark., 2012). Fakat dünyadaki FV tesislerin birçoğunun kar yağışının etkisi altındaki bölgelere kurulduğu bilinmesine rağmen kar yağışının şebekede neden olduğu etkiyi gösteren bir çalışma yoktur (Anadol, 2020; Erhan, 2019; Anadolu ve Erhan, 2019). Bu tez çalışması, FV paneller üzerinde biriken kar örtüsünün şebekede neden olduğu güç kalitesi bozulmasına dikkat çekmekte ve gelecekte fosil yakıtların kullanımının azalmasıyla birlikte mikroşebekedeki kurulu gücü artacak olan FV tesislerin kurulumuna rehber olması amaçlanmaktadır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Yenilenebilir enerji tesisinin güç kalitesi analizinin ilk incelemelerinden biri Oliva ve Balda (2003) tarafından Amerika'nın Batı Teksas eyaletindeki bir bölgede bulunan FV tesisler incelenerek yapılmıştır. Araştırmacılar şebekeye merkezi inverterlerle bağlı, kurulu güçleri 100 kW olan iki adet FV tesisin şebeke bağlantı noktasındaki (PCC) harmonik bozulmaya etkisini incelemişlerdir. Harmonikleri ölçmek için biri FV tesislerin tesis çıkışına diğeri dağıtım ağındaki en büyük müşteriye ve 1 adette harmonik değerlerin karşılaştırılması için dağıtım ağındaki trafonun alçak gerilim tarafına güç analizörleri bağlanmıştır. IEEE 519-1992 standartına göre Solar Park'ta toplam talep bozulmasının (TTB) 12%'nin altında kaldığı, bazı tekil akım harmoniklerin sınır değerleri aştığı tespit edilmiştir. Yine IEEE 519-1992 standartına göre gözlemevinde toplam harmonik bozulma (THB) 5%'lik sınır değere birçok kez yaklaşmış, 5. tekil harmonik sınır değeri aşmıştır. Bir dağıtım şirketi olan BC Hydro şirketinin sınır değerlerine göre TTB değeri, şirket sınır değerlerin altında kalmıştır. Çalışma sonucunda inverter anahtarlamasında kullanılan PWM frekansının THB üzerindeki olumsuz etkisi vurgulanmıştır.

Liu ve ark. (2015) MATLAB/Simulink'te yaptıkları benzetim çalışmalarında ABD'deki bir mikro şebekeden esinlenerek tasarlanan sanal bir dağıtım ağında liner/nonliner yüklerin 3 farklı FV tesisteki güç kalitesine etkisini incelemişlerdir. Harmonik bozulma çalışmasına ek olarak, güç bozulması, dalga şekli bozulması ve sistem dengesizliği hakkında net bir görüş vermek istenmiştir. FV tesislerin şebekeye nüfusunun etkisini incelemek amacıyla ilk olarak önce sadece doğrusal yükün bulunduğu bir sistem tasarlanmış FV tesisler birbirine yakın konumlandırılarak simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçlarında şebekedeki birçok barada THB'nin 5% sınır değerlerini aştığı görülmüştür. İkinci durumda FV tesisler birbirinden uzaklaştırılarak konumlandırıldığında tüm baralarda THB 5% sınır değerinin altında kaldığı gözlemlenmiştir. Daha sonra sisteme nonliner yükler eklenerek şebeke tekrar simüle edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında FV tesislerden birinin bağlı olduğu barada THB değeri, nonliner yüklerin toplam yükün yaklaşık 15%'ne ulaşana kadar sınır değerlerde kaldığı bu noktadan sonra THB'nin sınır değeri aştığı görülmüştür.

Jayasekara ve Wolfs (2010) Avustralya'da FV tesislerin şebekeye nüfusunun gerilim profili üzerindeki etkisini incelemek amacıyla Western Power şirketinin ölçüm verilerine dayanarak DigSilent PowerFactory yazılımında benzetim çalışması yapılmışlardır. Çalışmada yük olarak sadece FV entegreli konutlar kullanılmış, şebekeye güç sağlaması için bu konutlardan rastgele seçilenlerden toplamda 1.44 kWp'lik üretim kaynağı oluşturularak FV nüfus seviyesinin gerilim kalitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Simülasyonda 0.85, 0.91, 0.95 güç faktörü değerleri için reaktif güç akışı, maksimum yük, minimum yük ve FV tesiste üretilen gücün 10%, 30%, 40%, 50% nüfus seviyeleri için farklı durum senaryoları oluşturularak tesisin gerilim kalitesi incelenmiştir. Gerilim kalitesi incelenirken sadece şebeke gerilim değerinin anma gerilimden sapması dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda FV tesisin şebekeye nüfusunun gerilim sapması üzerindeki etkisini azaltmak için bazı önerilerde bulunulmuştur.

Benzer bir çalışmada 2012 yılında Gonzalez ve ark. (2012) tarafından yine çatı entegreli FV tesislerinin dağıtım ağındaki gerilim kalitesi sorunlarına ve bu sorunların EN50160 standartındaki uygunluğunu incelemek amacıyla yapılmıştır. Çalışma Belçika'nın Flaman bölgesindeki dağıtım şirketinden elde edilen istatistikler referans alınarak benzetim çalışması şeklinde yapılmıştır. Konutlar kırsal, kentsel, yarı kentsel ve şehirselle bölgelerde müstakil ve apartman olarak sınıflandırılmış, bu yapılardan bazıları yük olarak bazıları hem üretim tesisi hem yük olarak tasarlanmıştır. Tesislerin farklı üretim seviyeleri için senaryolar oluşturularak gerilim düşüşü, gerilim yükselmesi ve gerilim dengesizliği parametreleri incelenerek değerlendirilmiştir.

FV tesislerin güç kalitesi üzerindeki etkisini gözlemlemek amacıyla başka bir çalışmada Kopicka ve ark.(2014) tarafından Çek Cumhuriyeti'nin Güney Moravya Bölgesi'ndeki dağıtım ağında bir FV tesisin PCC'deki gerilim kalitesine etkisi incelenmiştir. Gerilim kalitesi incelenirken FV tarafından üretilen gücün PCC'deki gerilim sapması, fliker şiddeti ve gerilim harmonik bozulmasına etkisi incelenmiştir. Ayrıca gerilim sapmasının değerinin şebekenin büyüklüğüne ve FV tesisin kurulu gücüne bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Gallo ve ark.(2012) FV tesislerin güç kalitesi konusunu daha iyi anlamak ve keşfetmek amacıyla İtalya'nın güneyindeki Avellino'da bulunan, kurulu gücü 19,82 kWp'a olan ve şebekeye AG seviyesinden bağlanan bir tesiste çalışmışlardır. Güneş ışınımının DC güce dönüşme oranı, DC gücün AC güce dönüşme oranı, güneş ışınımının AC güce dönüşme oranı tespit edilmiştir. Reaktif güç çıkışı, güç faktörü, akım

dengeşizliği, gerilim dengeşizliği ve harmonik bozulmanın aktif güç çıkışı ile ilişkisi incelenerek güç kalitesi değişkenleri ile aktif güç çıkışı arasında bir ilişki kurulmuştur. Bunlara ek olarak harmonik bozulma üzerinde inverter anahtarlama frekansının etkisi gözlemlenmiştir. İnverter anahtarlama frekansının gerilim üzerinde sınırlı bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir.

Ortega ve ark. (2013) FV tesislerin güç kalitesinin ölçülmesi ve değerlendirilmesine rehberlik etmek amacıyla İspanya Jean Üniversitesi'nde kurulu gücü 800 kWp olan bir FV tesisteki gerilim harmonik bozulması, fliker şiddeti, gerilim dengeşizliği ve gerilim sapması parametrelerini ve akım harmonik bozulmasını incelenmişlerdir. FV tesislerin değerlendirilmesinde bir yöntem sunmak amacıyla uluslararası ölçüm standartları takip edilerek güç kalitesi ölçümü için bir yöntem geliştirilmiştir ve bu yöntem FV tesisteki güç kalitesi parametrelerinin ölçümünde kullanılmıştır. Çalışma sonucunda dağıtım şirketlerinin FV tesislerin enerji üretiminin düşük ($< 10\%$) olduğu zamanlarda inverter üreticilerinden harmonik bozulma ve dengeşizlik için daha katı hedefler belirlemesi gerekliliği belirtilmiştir.

Keçecioğlu ve ark. (2015) Adıyaman'ın Gölbaşı ilçesinde kurulmuş olan DAĞPEN AKMKENT isimli güneş santralinin şebekeye bağlandığı OG tarafına şebeke analizörü bağlayarak tesisten bir haftalık veri alınmış ve alınan bu veriler günlük güç kalitesi açısından incelenmiştir. Güç kalitesi bakımından gerilim harmonik bozulması, fliker şiddeti parametreleri ve akım harmonik bozulması izlenmiştir. Bu parametreler elektrik dağıtımı ve perakende satışına ilişkin hizmet kalitesi yönetmeliğine uygun olup olmadığı araştırılmıştır. Tüm bu araştırmalar neticesinde; standart değerlerin aşıldığı durumlar için şebekeye bir pasif filtre eklenmesi önerilmişlerdir.

Urbanetz ve ark. (2012) Brezilya Florianopolis'te şehir şebekesindeki güç kalitesini belirlemek amacıyla kurulu gücü 12 kWp olan bir tesiste gerçek ölçümlere dayanarak ve aynı şebekede kurulu gücü 4.2 MWp olan varsayımsal bir tesis için benzetim çalışması yaparak elde edilen verilerden güç kalitesi analizi yapmışlardır. Tesislerin PCC'deki akım ve gerilim harmonik bozulmaları ölçülmüş gerilim harmonik bozulması tesis devredeyken ve devre dışıyken karşılaştırılmıştır. Ayrıca şebeke yükünün ve FV enerji üretimin farklı seviyeleri için 4 farklı senaryo oluşturarak gerilim profili analizi yapılmıştır. Çalışma sonucunda FV tesislerin şebekeye nüfus oranının güç kalitesi üzerindeki etkisi vurgulanmıştır.

Farhoodnea ve ark. (2013) FV tesislerin etkilerini analiz etmek amacıyla Kuala Lumpur meteorolojik verilerine dayanarak kurulu gücü 1.8 MW bir tesisin bağlı olduğu ve üzerinde 16 farklı hattın bulunduğu radyal bir ağda Matlab/Simulink kullanılarak güç kalitesi analizi yapılmıştır. Güç kalitesi analizi yapılırken FV tesis tarafından üretilen gücün hatlardaki aktif güç, reaktif güç, güç faktörü, gerilim profili, fliker şiddeti ve akım harmonik bozulma değeri incelenmiştir. Çalışmada sonucunda güç ve gerilim dalgalanmalarının FV sistemlerinin neden olduğu en önemli etkiler olduğu sonucuna varılmıştır.

Patsalides ve ark. (2012) FV sistemlerinin montajı için uygun standartlara olan ihtiyacı ortaya koymak istemişlerdir. Bu amaçla Güney Kıbrıs'taki Kıbrıs Üniversitesi'nde bulunan ve kurulu gücü 15 kWp olan bir FV tesiste yapılan ölçümler sonucunda elde ettikleri verilere dayanarak bir benzetim çalışması yapmışlardır. Ayrıca benzetimde tesisin şebekeye reaktif güç enjekte etmediği, yüklerin doğrusal olduğu ve güç faktörünün 0.8-0.99 aralığında olduğu varsayımları kabul edilmiştir. Güç kalitesi değerlendirirken gerilim sapsması, akım profili, gerilim profili parametreleri akım ve gerilim harmonik bozulma parametreleri yüksek ve düşük ışıınım seviyelerinde farklı FV yapılarında karşılaştırmalı incelenmiş ve özellikle harmonik bozulma değerleri üzerinde farklı senaryolarda değerlendirilmeler yapılmıştır.

Patsalides ve ark. (2007) güneş ışıınımadaki değışikliklerin güç kalitesi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla Güney Kıbrıs'taki Kıbrıs Üniversitesi'nde kurulu gücü 12 kWp olan şebekeye bağlı bir FV tesiste güç kalitesi analizi yapılmıştır. Tesiste yapılan iki haftalık ölçümle elde edilen aktif güç, reaktif güç, güç faktörü, akım harmonik bozulması, gerilim harmonik bozulması ve gerilim profilinin bir günlük ortalama verileri bu süreçteki güneş ışıınıının bir günlük ortalama verileriyle gözlemlenmiştir. Ayrıca bu süreçte güneş ışıınıının düşük olduğu bir günde aynı değışkenler tekrar gözlemlenmiştir. Güneş ışıınıı ile güç kalitesi değışkenleri arasında bir korelasyon oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda güneş ışıınıının güç kalitesi üzerinde önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Kow ve ark. (2015) PSCAD programı kullanılarak kurulu gücü 0.27 MW olan bir FV tesis, 1MVA, 0.8 güç faktörü ile bir yük tasarlanarak bu yük üzerinde kararlı ve geçici durum analizi yapılmıştır. Kararlı durumda tesisin bağlantı noktasındaki aktif ve reaktif güç üretimi, frekans ve gerilim sapsması, şebeke tarafında aktif ve reaktif güç değışimi, gerilim dalgalanması, akım ve gerilim harmonik bozulması parametreleri incelenmiştir. Geçici durum analizinde ise düşük, yüksek güneş ışıınıı ve güneş

ışınımındaki ani değişikliklerin FV tesisin şebekeye nüfusunun farklı seviyeleri için bağlantı noktasındaki aktif, reaktif güç, gerilim değişimi, şebeke gerilimine etkisi ve akım profili gözlenmiştir. Ayrıca tesisin ada çalışma durumunda yani şebeke geriliminin kesilip tekrar geri gelmesi durumu göz önüne alınarak ortak bağlantı noktasında aktif ve reaktif güç, gerilim ve frekans saptması değişkenleri tekrar gözlenmiştir.

González ve ark. (2011) FV sistemlerinin şebeke etkilerini değerlendirmek amacıyla İspanya'nın güneybatısındaki küçük bir kasabadaki şebekeye bağlı bir tesiste güç kalitesi analizi yapmışlardır. Güç kalitesi analizi, abonelerin bağlı olduğu 4 kilometrelik bir enerji nakil hattının (ENH) trafo merkezi (TM) giriş noktasına ve FV tesisinin şebeke bağlantı noktasına bağlanan analizörlerden elde edilen verilerle yapılmıştır. TM girişindeki analizörde aktif güç üretimi, reaktif güç üretimi, güç faktörü, gerilim saptması, gerilim harmonik bozulması, akım harmonik bozulması ve akım harmoniğinin 40. bileşeninde anahtarlama gürültüsü FV tesis devredeyken ve devre dışıyken gözlenmiştir. FV tesis çıkışındaki analizörde ise tesis devredeyken şebeke bağlantı noktasında aynı parametreler incelenmiştir. Çalışma sonucunda FV tesisin şebekedeki güç kalitesi değişkenleri üzerinde etkili olduğu, FV tesislerin neden olduğu gerilim dalgalanmaları ve ters güç akışının şalt malzemelerine zarar verebileceği tespit edilmiştir.

Cuong ve Nhu (2019) FV sistemlerinin güç kalitesinin yönetilmesi ve iyileştirilmesinde yöneticilere ve dağıtım şirketlerine yardımcı olmak amacıyla Vietnam'da yaptıkları çalışmada ulusal standartlardaki güç kalitesi parametrelerinin limit değerleri bir tablo halinde özetlenerek şebekeyle bütünleşik bir fotovoltaik tesisin (GCPVS) güç kalitesini incelemişlerdir. Güçleri 250Wp olan iki adet mikroiverterli FV panel şebekeye herhangi bir kompanzasyon yapılmadan bağlanarak aktif ve reaktif güç çıkışı gözlenmiştir. Ayrıca iki mikroiverterin çıkışındaki gerilim saptması, güç faktörü gerilim harmonik bozulması, frekans saptması parametreleri ayrı ayrı gözlemlenerek tablodaki ulusal standartlarla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Aristizabal ve Gordillo (2008) Kolombiya'da kurulan şebekeye bağlı 840 Wp kurulu gücü sahip binaya bütünleşik bir fotovoltaik (BIPV) tesisten 2005 ve 2006 yılında topladıkları verilerle sistemin enerji üretimi, inverter verimi ve güç kalitesini araştırmışlardır. İnverter veriminin güç üretimi ile ilişkisinin yanı sıra güneş ışınımının yüksek ve düşük olduğu zamanlara göre gerilim profili ve güç üretimi incelenmiştir. Güç kalitesi analizinde gerilim kalitesini gösteren gerilim saptması, güç faktörü, gerilim harmonik bozulması, fliker şiddetinin ve frekans saptması parametrelerini

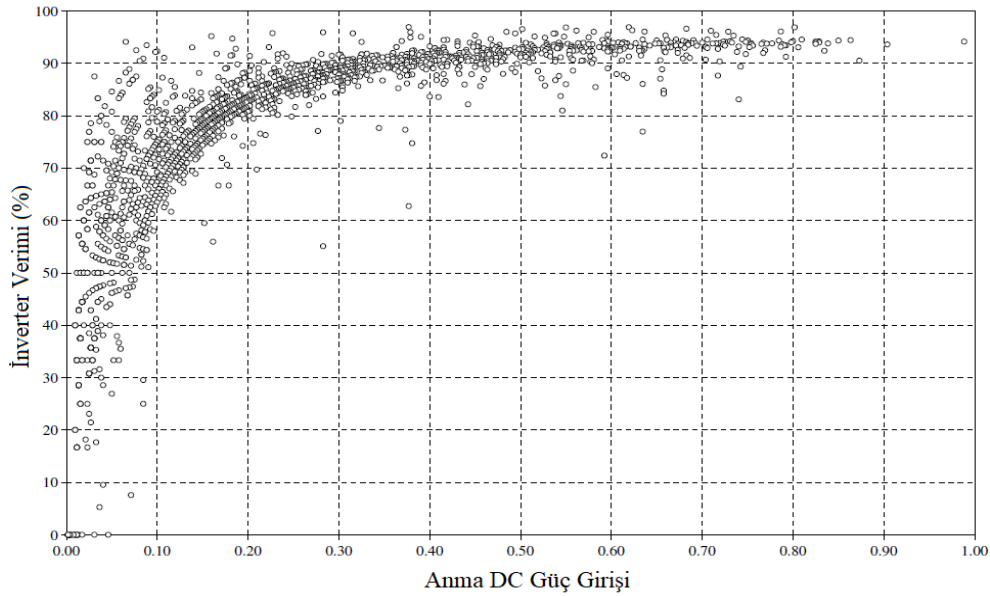
incelemişlerdir. İnceleme sonucunda tesisin ulusal ve uluslararası standartlardaki gereksinimleri yerine getirdiği görülmüştür.

Diğer bir çalışmada Aristizábal ve Páez (2018) Kolombiya Bogotá'da kurulu gücü 6 kWp olan bir BIPV tesisinde Eylül 2015'ten Ağustos 2016'ya kadar yaptıkları ölçümlerde elde ettikleri verilerle tesisin güç kalitesini incelemişler. Güç kalitesi analizinin yanı sıra özel bir yazılım kullanarak tesisin ekonomik analizi yapılmıştır. Güç kalitesi ölçümünde frekans sapması, gerilim sapması, fliker şiddeti, gerilim harmonik bozulması, güç faktörü parametrelerini incelenerek bu parametrelerin uluslararası standartlardaki limit değerleri özetlenmiş ve güç kalitesi ölçümlerinin bu standartlardaki limit değerlere uygunluğu değerlendirilmiştir.

Sikorski (2015) dağıtım ağındaki bir dağınık üretim tesisinin (DER) şebeke bağlantı noktasındaki güç kalitesi üzerindeki olası etkisini tanımlamak için güç kalitesi analizi yapmıştır. Şebekeye AG seviyesinden bağlı üç farklı FV santralden her birini şebekenin bir fazına bağlanmıştır. L_2 fazının inverter çıkışına FV panel yapısından dolayı trafo bağlanmış diğer iki faz direk şebekeye bağlanmıştır. FV sisteminin güç kalitesi parametreleri üzerindeki etkisini göstermek için, maksimum üretim seviyesinde bir günlük veriler kullanılmıştır. Güç kalitesi değerlendirmesinde reaktif güç üretimi, güç faktörü, gerilim sapması, fliker şiddeti, gerilim harmonik bozulması ve anahtarlama gürültüleri nedeniyle oluşan hızlı gerilim değişikliklerinin yanı sıra frekans sapması ve akım harmonik bozulması parametrelerini incelemiştir.

3. GÜÇ KALİTESİNDE İNVERTERİN ROLÜ

İnverterler, FV panellerde üretilen DC gücü şebeke ile aynı genlik, frekansla AC güce dönüştüren, FV tesisin şebeke ile bağlantısını sağlayan FV sistemlerin önemli bir bileşenidir (Renukadevi ve Jayanand, 2015) ve performansları güç kalitesi için kritik önem arz eder. Gün doğumu, gün batımı ve gölgeli çalışma sırasında fotovoltaiik hücrelerine ulaşan ışı nım seviyesinin azalması normalde 95% gibi yüksek güç dönüştürme oranına sahip inverterlerin performansının düşmesine sebep olur. Şekil 3.1'de DC enerji girişinin anma gücüne oranı şeklinde inverterin normalize edilmiş güç dönüştürme grafiğ i görülmektedir. Grafikten, inverterin güç dönüştürme oranının anma gücünün yüzde 10'undan daha düşük olduğu zamanlarda kötü bir performans, 30%'una ulaştığı zamansa kısmen istenilen seviyede performans gösterdiği görülmektedir. Bu durum yenilenebilir enerji santralının anma inverter kapasitesine kıyasla 30% veya daha fazla boyutlandırılması gerektiğini göstermiştir (Notton ve ark., 2010). Bu teknik literatüre inverterlerin boyutlandırılması olarak girmiştir.

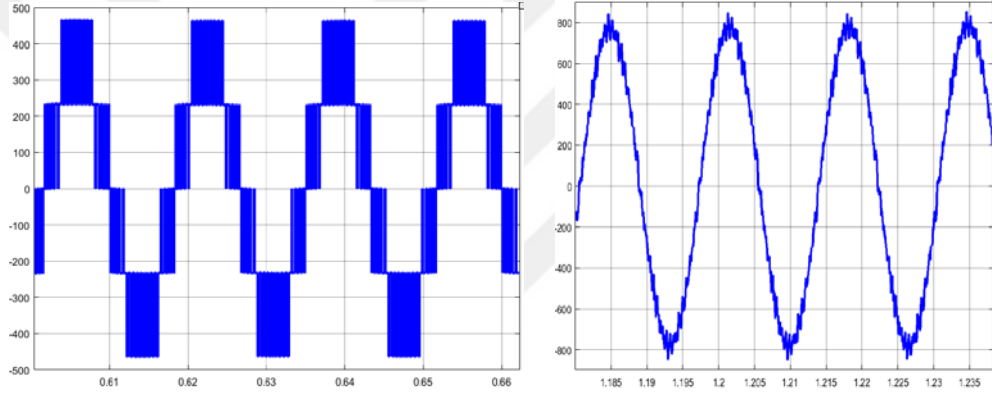


Şekil 3.1 İnverterin anma DC güç girişine göre verimliliği (Mondol ve ark., 2006)

İnverter anahtarlama sırasında kullanılan PWM sinyali, DC güçten AC güce dönüştürme sırasında şebeke geriliminin harmonik bozulması üzerinde sınırlı bir etkiye sahiptir (Gallo ve ark., 2012). Fakat müşterilerin sahip olduğu nonliner yüklerden dolayı şebekede oluşan harmonik bozulmalar inverterlere düşük empedanslarından dolayı yüksek dereceli harmonik bozulmalar olarak dönmektedir. Harmonik kirlenmeye

maruz kalan inverterler şebekeye yüksek dereceli harmonik bozulma içeren akımlar aktarırlar (Liu ve ark., 2015; Aprilia, 2012). Harmonik bozulmalar güç sistemlerinde enerji kaybında artış, gerilim düşümü, rezonans olayları, güç faktörünün değişmesi ve kondansatör performansının düşmesi gibi teknik ve ekonomik problemlere yol açmaktadır (Elbasuony ve ark., 2018 ; Kürker ve ark., 2018; Kakilli ve ark., 2008).

Harmonik bozulmalar güç sistemlerinde güç kalitesinin düşmesindeki en büyük etken olarak görülmektedir (Elbasuony ve ark., 2018; Kürker ve ark., 2018; Şahin ve ark., 2014). İnverterlerin şebeke harmonikleri üzerindeki bu yapısı düşünüldüğünde bazı araştırmacılar, güç kalitesi üzerindeki en önemli etkinin inverter olduğunu ve bu yüzden güç kalitesinin hiçbir zaman tam olarak düzeltilemeyeceğini belirtirler (Mondol ve ark. 2006; Renukadevi ve Jayanand, 2015).



Şekil 3.2 MATLAB/Simulinkte inverter çıkışında gerilim ve akım grafikleri

Yenilenebilir enerjinin gelecekteki güç sistemlerinin bağımsız ve sorumlu bir şekilde düzenlenmesine katkı sağlayabilmesi için uygun kontrol mimarisi ve teknolojilerinin geliştirilmesi hayati önem taşımaktadır (Liang, 2016). Bu bağlamda inverterlerin DC-AC güç dönüşümünü sağlamaktan daha fazlasını yapmasını sağlayacak yeni teknolojiler geliştirilmelidir. Gelecekteki GCPVS tasarımları, inverterlerin şebekeden anlık geri bildirimle dayanarak çıktılarını izlemelerini, tepki vermelerini ve ayarlamalarını gerektirecektir (Obi ve Bass, 2016). Yeni bilgi ve iletişim teknolojilerinin şebekeye entegrasyonu, şebekeyi iletişimsel hale getirecek ve ekonomik açıdan daha etkin, uygulanabilir ve güvenli bir elektrik dağıtımını sağlarken, elektrik sistemine farklı aktörlerin katılımını sağlayacaktır (Ourahou ve ark., 2020). Modern şebeke etkileşimli akıllı inverterler, modern iletişim protokollerini kullanarak makul bir maliyetle Volt/VAR kontrolü yapmalı (güç faktörü ve gerilim stabilizasyonu), frekans düzenlemesi ve depolamayı mümkün kılmalıdır (Obi ve Bass, 2016).

4. GÜÇ KALİTESİ PROBLEMLERİ

Güç kalitesi, güç kaynağının sabit alternatif akım frekansında, sabit bir genlikle sinüzoidal gerilim dalgası üretmesi anlamına gelir (Qui ve ark., 2018). Bu değerlerin herhangi birinin çeşitli nedenlerden dolayı anma değerinden sapması güç kalitesinde bozulmaya sebep olur. Fakat güç kalitesinin gerçekte neleri içermesi gerektiği konusunda birçok anlaşmazlık vardır (Bollen, 2000). Bu yüzden çizelge 4.1'den de görülebileceği üzerine birçok yazar çalışmasında kendi güç kalitesi endeksini oluşturmuştur.

Çizelge 4.1 FV tesislerin güç kalitesinin belirlenmesi çalışmalarında kullanılan bazı kalite değişkenleri

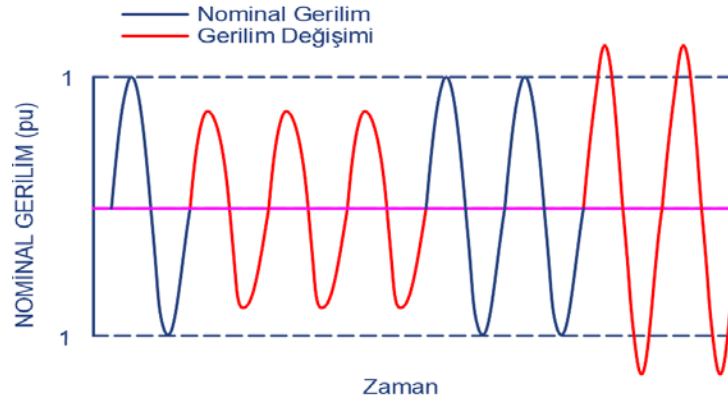
Yazar(lar)	Gerilim Dalg. /Sapması	Gerilim Dengesizliği	Fliker Şiddeti	Gerilim Harmonik Bozulması	Reaktif Güç	Güç Faktörü	Akım Harmonik Bozulması	Frekans Sapması	Anah. Gürül.	Gerçek Veri	Benzetim Verisi
Oliva ve Balda (2003)		X					X			X	
Gallo ve ark. (2012)		X		X	X	X	X			X	
Urbanetz ve ark. (2012)	X			X			X			X	X
Farhoodnea ve ark. (2013)	X		X			X	X				X
Patsalides ve ark. (2012)	X			X			X			X	
Gonzalez ve ark. (2012)	X	X									X
Ortega ve ark. (2013)		X		X			X			X	
Patsalides ve ark. (2007)	X			X	X	X	X				X
Kow ve ark. (2015)	X			X	X	X	X	X			X
Jayasekara ve Wolfs (2010)	X										X
Kopicka ve ark.(2014)	X		X	X						X	
Keçecioğlu ve ark. (2015)	X			X			X			X	
Cuong ve Nhu (2019)	X			X	X	X		X		X	
González ve ark. (2011)	X			X	X	X	X		X	X	
Sikorski (2015)	X		X	X	X	X	X	X	X	X	
Aristizabal ve Gordillo (2008)	X		X	X		X		X		X	
Aristizábal ve Páez (2018)	X		X	X		X		X		X	
Liu ve ark (2015)				X							X

Gonzalez ve ark. (2012), Jayasekara ve Wolfs (2010), Kopicka ve ark.(2014) ve Liu ve ark (2015) FV tesislerin bağlantı noktasındaki güç kalitesini incelerken sadece FV tesisler tarafından üretilen enerjinin dağıtım ağına bağlantı noktasındaki gerilim kalitesine odaklanmışlardır. Gerilim kalitesi değerlendirilirken gerilim sapması/dalgalanması, gerilim dengesizliği, fliker şiddeti, gerilim harmonik bozulması, reaktif güç değişkenlerinden bazılarını incelemişlerdir. Gerilim kalitesine ek olarak Oliva ve Balda (2003), Gallo ve ark. (2012), Urbanetz ve ark. (2012), Farhoodnea ve ark. (2013), Patsalides ve ark. (2012), Patsalides ve ark. (2007), ve Keçecioğlu ve ark. (2015) akım harmonik bozulması, Kow ve ark. (2015) ve Cuong ve Nhu (2019) frekans sapması, González ve ark. (2011) anahtarlama gürültüsünü incelemişlerdir. Bu tez çalışmasında yukarıda sözü edilen güç kalitesi problemlerinden bazıları aşağıda detaylı şekilde incelenmiştir.

4.1. Gerilim Sapması

Enerji sistemlerinin dinamik yapısı nedeniyle değişen gerilim-yük dengesi şebeke geriliminin sürekli olarak anma gerilim değerlerinden sapmasına neden olur (Vannoy ve ark., 2005). Şebeke yükündeki anlık değişimlerin yanında FV sistemlerde gölgeleme, buzlanma gibi çeşitli nedenlerle üretilen güçte meydana gelen anlık değişimler nedeniyle de FV tesislerdeki gerilim sapması değerinin daha da fazla olması beklenir. Bu bağlamda birçok araştırmacı çalışmasında sadece FV tesislerde üretilen enerjinin şebeke bağlantı noktasındaki gerilim kalitesine odaklanmıştır (Jayasekara ve Wolfs, 2010; Kopicka ve ark., 2014; Liu ve ark., 2015).

IEEE 1159-2019 standartında gerilim sapması için geçici ve kararlı durum hallerinde bazı tanımlamalar yapılmıştır. Geçici durum hallerinde anma gerilim değerinin yarın periyottan 1 dakikaya kadar geçen bir sürede gerilim etkin değerinin 0.1 ile 0.9 pu arasında düşüşü gerilim çökmesi, 1.1 pu ile 1.2 pu arasında artışı gerilim yükselmesi olarak adlandırılmıştır. Kararlı durum hallerinde ise gerilim etkin değerinin (RMS) 1 dakikadan fazla bir sürede anma gerilim değerinin 1.1 pu ile 1.2 pu arasında yükselmesi aşırı gerilim, 0.8 pu ile 0.9 pu arasında düşüşü düşük gerilim olarak adlandırılmıştır. Ayrıca gerilim etkin değerinin anma gerilim değerinin 0.95 pu ile 1.05pu arasında rastgele salınımlarda bulunması da gerilim dalgalanması olarak adlandırılmıştır.



Şekil 4.1 Gerilimin sapması

Gerilim sapmasını değerlendirmek için denklem 4.1 kullanılır;

$$\% \Delta U = \frac{U - U_a}{U_a} \times 100 \quad (4.1)$$

burada U anlık gerilim değeri, U_a anma gerilimidir (Qui ve ark., 2018).

IEEE 929-2000 standartı FV tesisler için herhangi bir çalışma gerilim ayarı belirtilmemişse, FV sistemlerin uygun çalışma aralığının anma gerilimin 88% ile 110%'u arasında ayarlanabileceğini belirtir (Liang, 2016). EN 50160-2011 standartında ise dağıtım ağındaki bir tesisin şebekeye bağlı çalışırken uygun çalışma aralığını alçak gerilim ve orta gerilim için ayrı ayrı belirtilmiştir. Şebekeye alçak gerilim ($U < 1000$ V) seviyesinden bağlı bir tesisin haftalık 10'ar dakikalık ölçüm periyotlarının 95%'inde $\pm 10\%$ aralığında, haftalık ölçüm periyotlarının tamamında ise $+10\%$, -15% aralığındaki sınır değerlerin içinde olması gerektiğini belirtir. Şebekeye orta gerilim ($1\text{kV} < U < 35\text{kV}$) seviyesinden bağlı bir tesis içinse haftalık 10'ar dakikalık ölçümlerin 99%'unda $\pm 10\%$ aralığında, haftalık ölçüm periyotlarının tamamında ise $\pm 15\%$ aralığındaki sınır değerlerin içinde olması gerektiğini belirtir (Anonymous2, 2011). Sınır değerler çizelge 4.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2 EN 50160-2011 Standartına göre gerilim sapması sınır değerleri

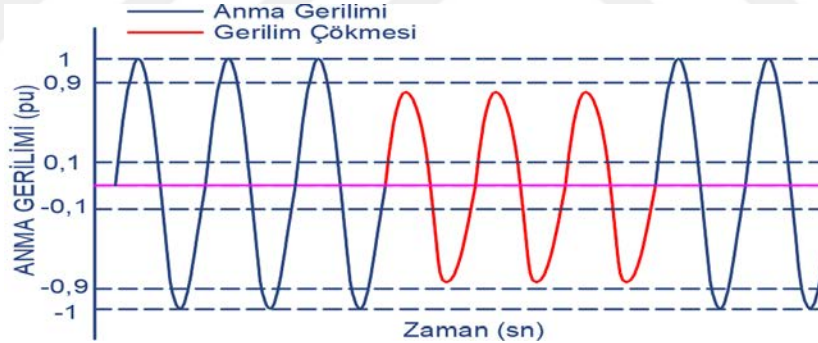
	10'ar dakikalık ortalamalar	Ölçümüm tamamı
AG	En az 95%'inde $\pm 10\%$	+ 10% - 15%
OG	En az 99%'ünde $\pm 10\%$	$\pm 15\%$

EN50160 standartında tesislerin bu değerlerin dışına nadir olarak çıktığı ve şalt malzemelerinin dayanıklılık değerlerinin bu sınırları kapsadığı, sınır değerlerin aşılma ihtimaline karşı şalt malzemelerinin korunması için dağıtım şirketleri ve tesis operatörleri tarafından ek önlemler alınabileceği belirtilir (Anonymous2, 2011).

Türkiye’de Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından çıkarılan elektrik dağıtımı ve perakende satışına ilişkin hizmet kalitesi yönetmeliğinde kararlı durum ve geçici rejim şartlarında gerilim sapması EN50160 standartında tanımlanan ve çizelge 4.2’de görülen sınır değerlere uygun olmalıdır.

4.2. Gerilimin Çökmesi

IEEE 1159-2019 standartına göre gerilim çökmesi geçici durum hallerinde gerilimin etkin değerinin yarım periyot ile 60 saniye arasında değişen bir süreyle anma gerilim değerinin 0,1 pu ila 0,9 pu arasında düşüşü olarak tanımlanır. Gerilim çökmesi genellikle sistem arızalarıyla ilişkilidir, ancak ağır yüklerin değiştirilmesi veya büyük motorların çalıştırılması da gerilim çökmesine neden olabilir (Elbasuony ve ark., 2018).



Şekil 4.2 Gerilimin çökmesi

Gerilim çökmesi denklem 4.2 ile hesaplanır ;

$$SS = 1 - \frac{(V_A + V_B + V_C)}{3} \quad (4.2)$$

Denklem 4.2’de V_a, V_b, V_c faz gerilimi değerleri per-unit olarak ifade edilir. Denklem 4.2’de elde edilen değer ortalama gerilim çökmesi değerine eşittir ve elde edilen değer in büyüklüğü ne kadar yüksekse gerilim çökmesi o kadar şiddetlidir. Hızlı

gerilim değişimi olarak nitelendirilen gerilim çökmesi EN50610 standartına göre normal çalışma koşullarında 4% pu'yu geçmez, ancak gün içinde bazı durumlarda bir iki kez kısa bir süreliğine 6% pu'yu geçebilir (Elbasuony ve ark., 2018).

Şebekeye bağlı tesislerin herhangi bir nedenden dolayı (arıza vb.) gerilim çökmesi yaşaması halinde tesisler şebekeden ayrılabilirler. Özellikle şebekede dağıtım üretim yapan birçok tesisin bulunduğu bir dağıtım ağında şebeke kararlılığı için bu tesislerin şebekeye bağlı kalması gerekir. Kısa süreli gerilim çökmelerinde üretim santrallerinin şebekeden kopmadan önce şebekenin kısa süreli gerilim çökmeleri için belirli bir tolerans göstermesi beklenir. Bu özellik, literatürde düşük gerilim sırtlama (LVRT, Low-voltage ride through) olarak ifade edilmektedir. Ülkemizdeki enerji mevzuatında gerilim çökmesi, düşük gerilim sırtlama ile ilgili herhangi bir düzenleme yoktur (Tanrıverdi, 2015). IEEE 1547 standartında gerilim çökmelerinde üretim santrallerinin şebekeden kopmadan önce ne kadar süreyle şebekeye bağlı kalması gerektiği çizelge 4.3'te görülmektedir.

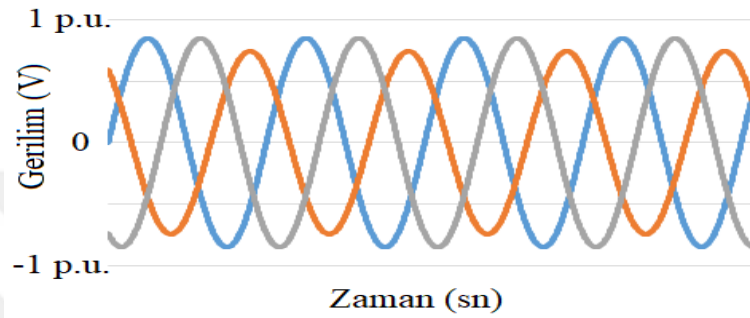
Çizelge 4.3. IEEE 1547'ye göre şebekeden ayrılma kriterleri (Tanrıverdi, 2015).

Nominal gerilimdeki değişim (%)	Santralin ayrılma süresi (s)
$V < 50$	0,16
$50 \leq V < 88$	2
$88 \leq V \leq 110$	Sürekli devrede
$110 < V < 120$	1
$V \geq 120$	0,16

4.3. Gerilim Dengesizliği

Herhangi bir nedenden dolayı şebekede meydana gelen bozulma sonucunda fazlardan birinde ya da birkaçında genlik değerinin ya da faz açısının anma değerinden sapması sonucunda fazlar arasında meydana gelen gerilim farklarına gerilim dengesizliği denir (Kalay, 2008). IEEE 1159-2019 standartında ise üç fazlı bir sistemde gerilim veya akım dengesizliğini basit olarak negatif bileşenin pozitif bileşenine oranı olarak tanımlanmıştır. Böylece gerilim dengesizliğinin hesaplanması için basitçe negatif bileşenin pozitif bileşene oranı şeklinde basit bir formül ortaya çıkmıştır. Bileşenlerin hesaplanmadığı durumlarda dengesizlik oranını tespit etmek için fazlar arası gerilim ölçümlerine göre geliştirilmiş bir formülasyon da standartta belirtilmiştir. Bu standarttaki iki denklemi karşılaştırmak için yapılan örneklerde basit yöntem ve fazlar

arası gerilim ölçümlerine göre geliştirilmiş denklemden elde edilen sonuçlarda 0,1% değerinde bir sapma olduğu görülmüştür. Ayrıca EN50160 standartında da bu basit yöntemin iyi sonuç verdiği belirtilmiştir (Anonymous2, 2011). Ancak IEEE 1159-2019 standartında harmonik bozulmaların yüksek olduğu anlarda bu hesap yönteminin doğru sonuçlar vermeyeceği gerçek dengesizlik tanımının negatif bileşenin pozitif bileşene oranı şeklinde olduğu, dengesizlik değerinin önemli olduğu hassas noktalarda bileşenlerin kullanılmasının daha doğru sonuç vereceğini belirtmiştir.



Şekil 4.3 Gerilim dengesizliği³

EN50160 standartında gerilim dengesizliği hesaplanırken IEEE 1159-2019 standartındaki denklemlerden farklı bir denklem kullanılmıştır (Anonymous2, 2011). Türkiye’de EPDK tarafından çıkarılan elektrik dağıtım ve perakende satışına ilişkin hizmet kalitesi yönetmeliğinde gerilim dengesizlikleri için uygun çalışma aralıkları EN50160 standardı göz önüne alınarak belirlendiği için bu tez çalışmasında gerilim dengesizliği hesaplanırken EN50160 standartında belirtilen denklem 4.3 kullanılmıştır (Anonim1, 2012). Bu denklem diğer çok fazlı sistemlere iki fazlı veya tek fazlı sistemlere uyarlanabilir.

$$\%Dengesizlik = \sqrt{\frac{6 \times (U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)}{(U_{12} + U_{23} + U_{31})^2}} - 2 \times 100 \quad (4.3)$$

EN50160 standardı alçak veya orta gerilimde çalışan bir tesisin normal işletme koşullarında haftalık 10’ar dakikalık ölçüm periyotlarındaki dengesizlik değerinin 2%’yi aşmaması gerektiğini belirtir. Bu oran tek fazlı ve iki fazlı sistemlerde 3%’e çıkabilir.

³<https://media.megger.com/mediacontainer/medialibraries/meggerglobal/electrical-tester-online/2016/november/unbalance.png>

Çizelge 4.4 Gerilim dengesizliği sınır değerleri

	10'ar Dakikalık ortalamalar
3 Fazlı sistemler	2%
1 ve 2 Fazlı sistemler	3%

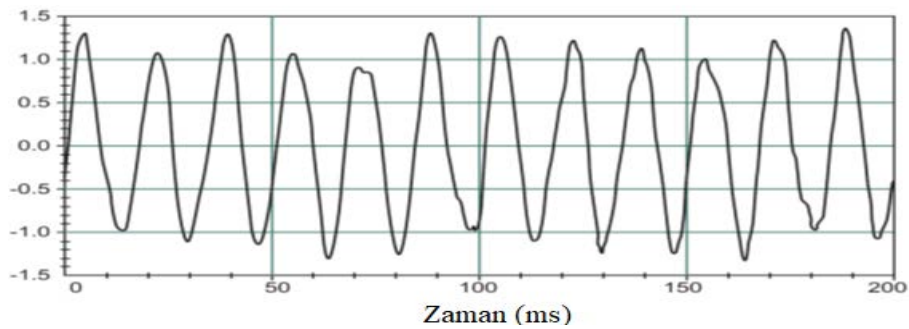
Türkiye’de EPDK tarafından çıkarılan elektrik dağıtımı ve perakende satışına ilişkin hizmet kalitesi yönetmeliğinde gerilim dengesizliğinde EN50160 standartında tanımlanan ve çizelge 4.4’de görülen sınır değerlere uygun olmalıdır.

4.4. Flicker Şiddeti

Yükteki dalgalanmalar nedeniyle aydınlatma armatürlerinde gözle görülebilecek şekilde ortaya çıkan ve kırışmaya yol açan 50 Hz altındaki gerilim salınımlarıdır (Anonim1, 2012). Flicker şiddeti sıklıkla gerilim dalgalanması ile karıştırılır. Çünkü flicker şiddeti gerilim dalgalanmasının aydınlatma armatürlerinde neden olduğu istenmeyen sonuçtur (Anonymous6, 2019).

FV sistemlerde çeşitli nedenlerle (gölgeleme, buzlanma vb.) üretilen güçte meydana gelen anlık değişimler nedeniyle değişen güç-yük dengesi gerilim dalgalanmalarının artmasına neden olur. Bu nedenle son zamanlarda FV sistemlerde oluşan güç değişimleriyle gerilim dalgalanması ve flicker şiddetini ilişkilendiren bazı çalışmalar yapılmıştır (Brinkel ve ark., 2020).

Flicker şiddeti diğer güç kalitesi değişkenlerinden gözle görülebilir olması açısından ayrılırlar. Flickerlerin gözle görülebilir olması sürekli gözle kontrole dayanan bir işte insanları olumsuz yönde etkileyerek performans düşüklüğüne, beden gücü ile çalışılan sanayi kuruluşlarındaysa işçilerin dikkatini dağıtarak iş kazalarının meydana gelmesine neden olabilir (Atasal, 2000).



Şekil 4.4 Gerilim Dalgalanması (Anonymous6, 2019)

10'ar dakikalık frekans ölçümleri sonucunda elde edilen P_{st} ve 12 ardışık P_{st} ölçümü olan P_{lt} fliker şiddeti değerlendirmesinde kullanılan iki değişkendir (Anonim1, 2012). P_{st} şiddeti değeri flikermetreler tarafından ölçülür. Elbasuony ve ark. (2018) çalışmalarında bir flikermetrenin yapısı ve çalışma şekli kısaca özetlenmişlerdir. Diğer fliker şiddet endeksi olan P_{lt} ise denklem 4.4 ile hesaplanır.

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} P_{stj}^3} \quad (4.4)$$

fliker şiddet endeksleri P_{st} ve P_{lt} IEEE 1453-2015 standartına göre çizelge 4.5'teki sınır değerlere uygun değildir (Anonymous4, 2015).

Çizelge 4.5 IEEE 1453 Standartı için fliker şiddeti sınır değerleri

Fliker şiddet endeksi	Sınır değer
P_{st}	0,8
P_{lt}	0,6

IEEE 1453 standartında çizelge 4.5'e ek olarak fliker şiddeti ölçümlerin 95%'inde sınır değerlerinin aşılması 99%'da ise dağıtım şirketi tarafından tesise göre 1-1,5 arasında belirlenen bir katsayı ile aşma yapılabileceğini belirtir. EN 50160 standartında P_{lt} değeri için haftanın 95%'inde de sınır değer 1 olarak belirlenmiş P_{st} içinse herhangi bir sınır değeri belirtilmemiştir (Anonymous2, 2011).

Çizelge 4.6 EN 50160 Standartı için fliker şiddeti sınır değeri

Fliker Şiddet Endeksi	Sınır Değerler
P_{lt}	≤ 1.0

IEEE 1453 standartı fliker şiddeti sınır değerleriyle EN 50160 standartı ile karşılaştırıldığında IEEE standartında hem P_{lt} hem de P_{st} için sınır değeri olduğu ve bazı durumlarda esneyebildiği görülür (Anonymous4, 2015).

Türkiye'de EPDK tarafından çıkarılan elektrik dağıtımı ve perakende satışına ilişkin hizmet kalitesi yönetmeliğinde fliker şiddetini uluslararası standartlardan bağımsız olarak belirlemiştir. Fliker şiddetini değerlendirmek için kullanılan P_{st} , P_{lt} değerleri çizelge 4.7'deki tabloda görülen sınır değerlere uygun olmalı ve TS EN 61000-4-15 standartına uygun flikermetrelerle ölçülmelidir.

Çizelge 4.7 Fliker şiddeti için sınır değerler

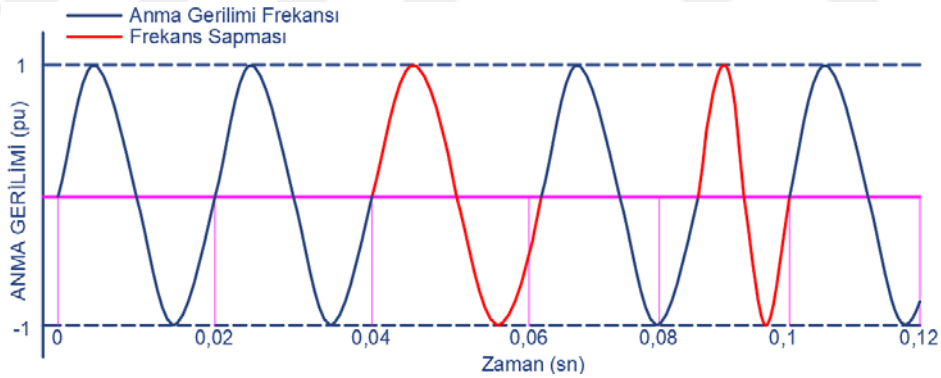
Fliker Şiddet Endeksi	Sınır Değerler
P_{st}	≤ 1.0
P_{lt}	≤ 0.8

* Elektrik dağıtımı ve perakende satışına ilişkin hizmet kalitesi yönetmeliği

4.5. Frekans Sapması

Güç sistemi temel frekansının anma frekans değerinden sapmasıdır. Güç sistemi frekansı üzerinde gerilim sapmasına benzer şekilde enerji üretimi-yük dengesi etkilidir. Enerji üretimi yük dengesinin sürekli değişmesi güç sistemi frekansının sürekli olarak az miktarda değişmesine neden olur (Bollen, 2000). Frekans sapması denklem 4.5’le hesaplanır. Burada f anlık frekans değeri f_r anma frekans değeridir (Elbasuony ve ark., 2018).

$$\%FS = \frac{|f - f_r|}{f_r} \times 100 \quad (4.5)$$



Şekil 4.5 Frekans sapması

Güç sistemlerinin sürdürülebilirliği için güç sistemi frekans değeri kritik önem arz eder. EN 50160 standartında anma frekans değeri 50 Hz olan orta ve alçak gerilim tesisleri için gerilim kaynağının haftalık 10 saniyelik ölçüm periyotlarının 95%’inde anma frekans değerinin $\pm 1\%$ sınır değeri içinde olması gerektiği belirtilir. Haftalık ölçümün tamamında ise $-6\% / +4\%$ aralığında olması gerektiği belirtilir (Anonymous2, 2011). Sınır değerler çizelge 4.8’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.8 EN50160 Standartına göre frekans sapması sınır değerleri

	95%'inde	100%'ünde
10'ar saniyelik ortalamalar	$\pm 1\%$	-6% / +4%

EN 50160 standartında frekans değişkeni değerlendirilirken diğer güç kalitesi değişkenlerinin değerlendirilmesinde kullanılan 10 dakikalık ölçüm periyotları yerine 10 saniyelik ölçüm periyotlarının kullanıldığı görülür. Bu durumdan frekans değişkenine güç sisteminde verilen önem anlaşılabilir.

Türkiye’de yine EPDK tarafından çıkarılan elektrik şebeke yönetmeliğinde bir fotovoltaiik enerji üretim tesisinin dağıtım ağına bağlı çalışırken yerine getirmesi gereken frekans sınır değerleri uluslararası standartlardan bağımsız olarak belirlenmiştir ve maksimum çalışma süreleriyle birlikte çizelge 4.9’de özetlenmiştir (Anonim2, 2014).

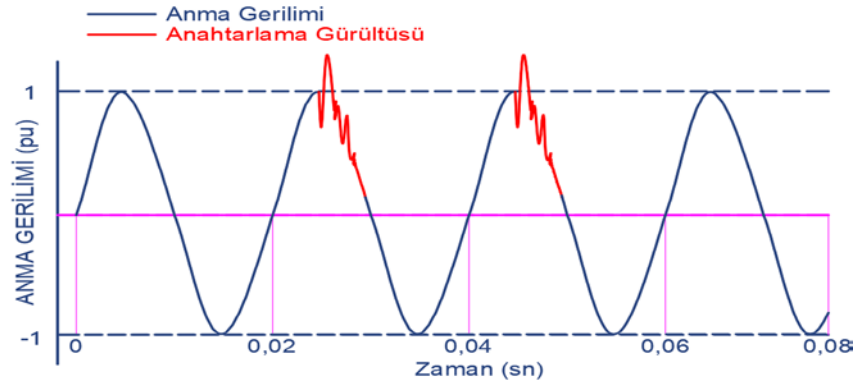
Çizelge 4.9 Fotovoltaiik üretim tesisleri için frekans aralıklarındaki çalışma süreleri

Frekans Aralığı	Minimum Çalışma Süresi
$50,5 \text{ Hz} \leq f < 51,5 \text{ Hz}$	1 saat
$49 \text{ Hz} \leq f < 50,5 \text{ Hz}$	Sürekli
$48,5 \text{ Hz} \leq f < 49 \text{ Hz}$	1 saat
$48 \text{ Hz} \leq f < 48,5 \text{ Hz}$	20 dakika
$47,5 \text{ Hz} \leq f < 48 \text{ Hz}$	10 dakika

* Elektrik şebeke yönetmeliği

4.6. Anahtarlama Gürültüleri

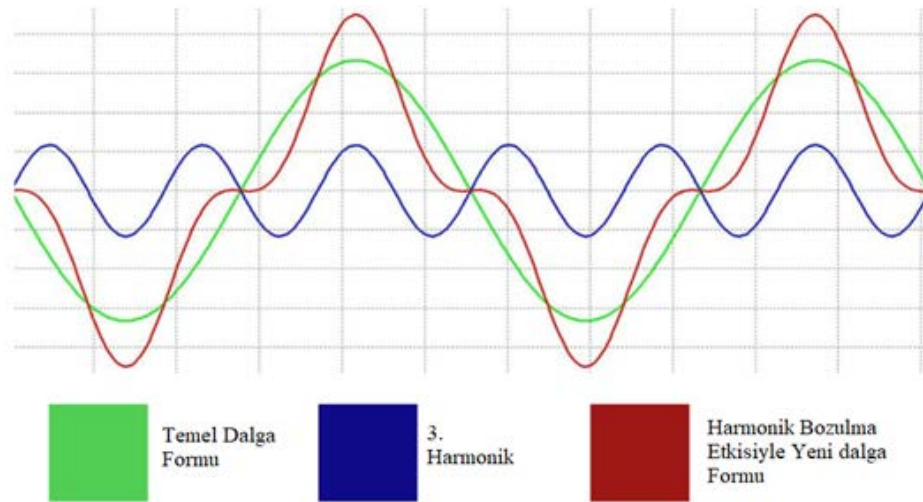
Enerji sistemlerinde kullanılan devre elemanlarının açılıp kapanmasından dolayı dağıtım sistemlerinde oluşan gürültülerdir. Fotovoltaiik tesislerde inverter anahtarlama sinyalleri (PWM) anahtarlama gürültüsüne sebep olur. Anahtarlama gürültüsü etkisi 40. akım harmoniğinde görülür (González ve ark., 2011). Ülkemizdeki enerji mevzuatında ve uluslararası standartlarda anahtarlama gürültüsünün sınırlandırılması için herhangi bir düzenleme yoktur. Ancak sınırlama değeri olarak 40. akım harmoniğine getirilen sınırlama ölçüt alınabilir.



Şekil 4.6 Anahtarlama Gürültüsü

4.7. Harmonik Bozulma

Harmonik; nonliner yükler veya gerilim dalga şekli ideal olmayan jeneratörlerden dolayı bozulmaya uğramış bir alternatif akım veya gerilimde, ana bileşen frekansının tam katları frekanslarda oluşan sinüzoidal bileşenlerin her biridir (Anonim1, 2012). Gerilimdeki bozulmaya nonliner yükler, akımdaki bozulmaya ise, nonliner yükler ve inverterler tarafından şebekeye enjekte edilen akımlar sebep olur (González ve ark. 2011).

Şekil 4.7 Harmonik bozulma⁴

⁴ <https://www.inverterdrivesystems.com/wp-content/uploads/2016/01/Harmonic-Distortion-3-phase-with-harmonics.png>

1970’li yılların sonlarına doğru güç inverterleri yaygınlaşmaya başlayınca harmoniklerle ilgili kaygılar da artmaya başlamıştır. (Tanrıverdi, 2015). Harmonikler genel olarak akım kaynaklı ve gerilim kaynaklı harmonikler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bu harmonikler AC motor sürücü sistemlerinde güç kaybına, darbeli tork oluşumuna, mikroişlemcilerin hatalı çalışmasına, enerji iletim ve dağıtımında kayıplara, elektromanyetik sistemlerde titreşimlere sebep olur (A Kiyong Eric, 2013). Günümüzde bazı uzmanlarca harmonik bozulma en önemli güç kalitesi problemi olarak görülmektedir (Tanrıverdi, 2015).

IEEE 519-2014 standardı günlük 3 saniyeden kısa süreli olan gerilim harmonik bozulma değerlerinin 99%’unda çizelge 4.10’daki sınır değerlerin 1.5 katını geçmemesi gerektiğini, haftalık değerde ise 10 dakikalık ölçümlerin 95%’inde çizelge 4.10’daki sınır değerlerin altında kalması gerektiğini belirtir (Anonymous3, 2014).

Çizelge 4.10 IEEE 519-2014’e göre gerilim harmonik bozulma sınır değerleri

Bağlantı noktası gerilimi	Tek harmonikler (%)	THB (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	5	8
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3	5

EN 50160 standartında ise gerilim harmonik bozulma değerleri için 40. harmonik değere kadar sınır değerler belirlenmiştir (Anonymous2, 2011). Bu değerler çizelge 4.11’de listelenmiştir. THB sınır değeri ise 8% olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.11 EN 50160 göre gerilim harmonik bozulma sınır değerleri

Tek harmonikler				Çift harmonikler	
3'ün katı olamayanlar		3'ün katı olanlar			
Harmonik h	Sınır değeri (U _n)	Harmonik h	Sınır değeri (U _n)	Harmonik h	Sınır değeri (U _n)
5	6 %	3	5 %	2	2 %
7	5 %	9	1,5 %	4	1 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6 . . . 24	0,5 %
13	3 %	21	0,5 %		
17	2 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

*EN 50160-2011

EN 50160-2011 standardı ile IEEE 519-2014 standartındaki gerilim harmonik bozulma sınır değerleri karşılaştırıldığında THB değerinin aynı olduğu fakat tek harmonikler için sınır değerlerinin farklı olduğu görülür.

Akım harmonik bozulması için IEEE 519 standardında 120 V ile 69 kV arasında işletme gerilimine sahip tesislerin bağlantı noktasındaki harmonik bozulma değerleri için günlük 3 saniyeden kısa süreli harmonik bozulma değerlerinin 99%'unda çizelge 4.12'deki sınır değer 2 katının altında kalması gerektiğini belirtir (Anonymous3, 2014). Haftalık değerde ise 10 dakikalık ölçümlerinin 99%'unde çizelge 4.12'deki sınır değer 1.5 katının altında, 95%'inde ise çizelge 4.12'deki sınır değerin altında kalması gerektiğini belirtir. Güç kalitesi yönetmeliğinde EN 50160-2011 standartına bakıldığı zamansa akım harmonik bozulmasıyla ilgili herhangi bir sınır değerin olmadığı görülür (Anonymous2, 2011).

Çizelge 4.12 IEEE 519-2014'e göre akım harmonik bozulma sınır değerleri

I_L yüzdesi olarak maksimum harmonik akım bozulması ^a						
I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TTB
< 20	4	2	1.5	0,6	0.3	5
20 < 50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50 < 100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100 < 1000	12	5.5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2.5	1.4	20

^aÇift Harmonikler yukarıdaki tek harmoniklerin 25%'i ile sınırlıdır

I_{SC} = PCC'de maksimum kısa devre akımı

I_L = normal yük çalışma koşullarında PCC'de maksimum talep yük akımı (temel frekans bileşeni)

FV tesisler için bazı sınır değerlere ve gerekliliklere değinen IEEE 929-2000 standartında FV tesisler için verilen harmonik sınır değerlerde IEEE 519 standardı esas alınır (Anonymous1, 2000; Anonymous3, 2014). Fakat Avrupa standardı EN 61727, EN50160'in aksine FV tesislerde gerilim ve akım harmonikleri için daha kısıtlayıcı limitler belirlemiştir. Harmonikler için önerilen limitler toplam gerilim harmonik bozulması için 2% ve toplam akım bozulması için 5%'tir. Bireysel gerilim harmonikleri için maksimum değer sınırlıdır ve 1%'i geçmemelidir (Patsalides ve ark., 2007). Gerilim ve akım için toplam harmonik bozulmalar sırasıyla denklem 4.6 ve denklem 4.7'yle hesaplanır.

$$THB = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}}{U_1} \quad (4.6)$$

$$TTB = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} (I_h)^2}}{I_1} \quad (4.7)$$

Türkiye’de EPDK tarafından çıkarılan elektrik dağıtımı ve perakende satışına ilişkin hizmet kalitesi yönetmeliğine göre gerilim harmonik bozulması sınır değerleri EN50160 standartında tanımlanan ve çizelge 4.11’de görülen sınır değerlere uygun olmalıdır. Akım harmonik bozulma değerleri içinse 3’er saniyelik ölçümler sonucu elde edilmiş 10’ar dakikalık ortalamaların tamamında IEEE 519 standartında tanımlanan ve çizelge 4.12’de görülen sınır değerlere uygun olması gerektiği belirtilir.

4.8. Reaktif Güç Kontrolü ve Güç Faktörü

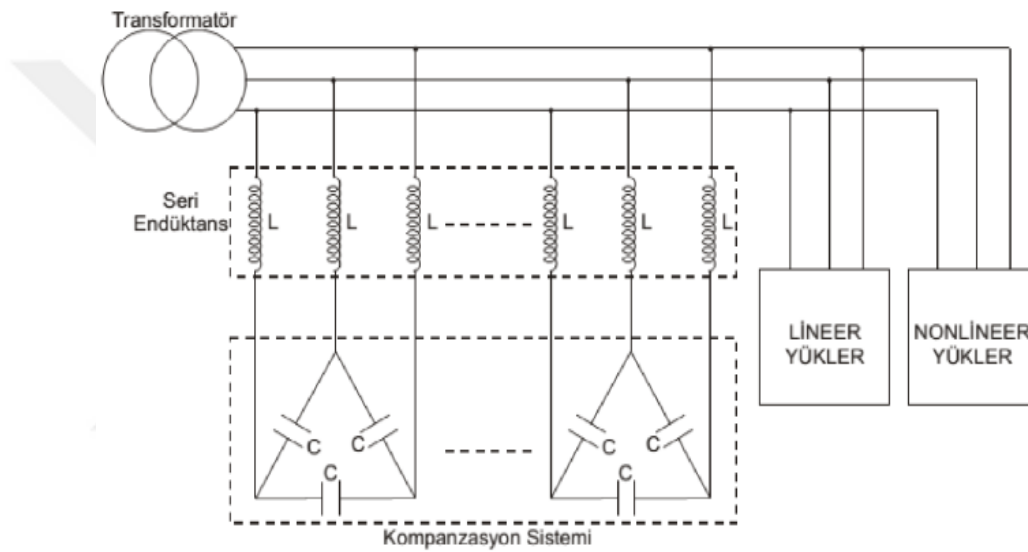
Reaktif enerji iletkenlerden geçen akımın artması nedeniyle iletim hatlarında gerilim düşümünün artmasına şalt malzemelerinin ömrünün düşmesine neden olur. Bu yüzden reaktif gücün minimize edilmesi gerekir ve güç faktörü 1’e yaklaştırılır. Enerji dağıtım sistemlerindeki endüktif yüklerden dolayı dağıtım sistemlerindeki endüktif reaktif gücü minimize etmek için Şekil 4.8 gibi dağıtım ağına kondansatörler bağlanır. Kompanzasyon sistemi olarak adlandırılan bu sistemde tesislerde kullanılan kondansatörler değerleri reaktif güce göre denklem 4.8, 4.9 ve 4.10 kullanılarak hesaplanır. Kapasitif reaktif güç:

$$Q = U.I.\sin \varphi \quad (4.8)$$

$$X_C = \frac{U^2}{Q} \quad (4.9)$$

$$C = \frac{1}{2\pi.f.X_C} \quad (4.10)$$

Sinüs dalgasının anma frekans değerinin katları şeklinde ortaya çıkan harmonik akımlar tüketim tesislerinde yükün endüktif reaktansının artmasına, kondansatörlerin kapasitif reaktans değerinin ise azalmasına neden olurlar. Harmoniklerin etkisiyle kondansatörlerin kapasitif reaktansının azalması ve sistem endüktif reaktansının artması tesislerde maksimum akımların çekildiği rezonanslara neden olabilir. Sistem rezonansı harmonik bileşen frekanslarından birine yakın değerde oluşması halinde tesisler yüksek harmonik bileşen içeren aşırı gerilim ve aşırı akımlara maruz kalırlar. Bu nedenle, etkili tüm harmonik frekanslarda sistemin rezonansa girip girmediği analiz edilmelidir (Barutçu, 2014).



Şekil 4.8 Kompanzasyon sistemi (Kakilli ve ark., 2008)

IEEE 1547 standardı bir DER'in minimum kararlı durum şartlarında veya anma aktif gücünün 5%'ine eşit ya da daha fazla üretim yaptığı zaman şebekeye reaktif güç aktarabileceği veya şebekeden reaktif güç çekilebileceğini belirtir (Anonymous5, 2018). IEEE 1547 standartında dağıtık üretim tesislerinin şebekeye nüfus oranına ve kararlı durum hallerine göre tesisleri A ve B olarak iki sınıf şeklinde sınıflandırmış ve reaktif güç kontrolü için farklı sınır değerler belirlenmiştir.

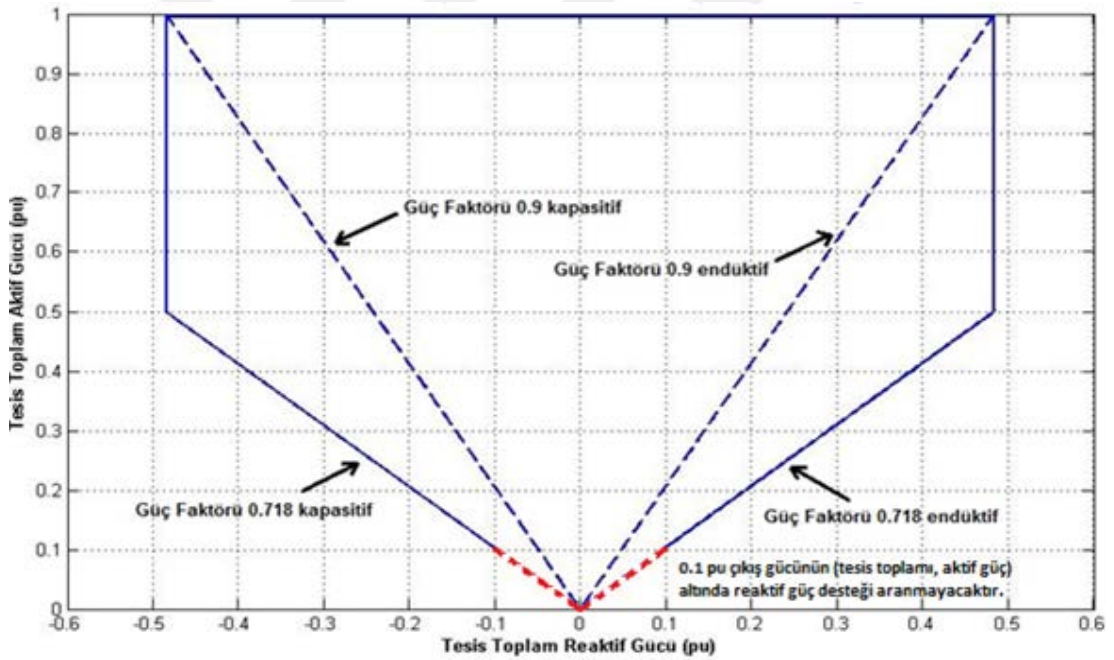
Çizelge 4.13 Minimum reaktif güç aktarma ve çekme kapasitesi

Sınıf	Anma görünür güç (kVA) değerinin yüzdesel olarak güç çekme kapasitesi	Anma görünür güç (kVA) değerinin yüzdesel olarak güç aktarma kapasitesi
A	44	25
B	44	44

*IEEE 1547-2018

IEEE 1547 standartına göre bir DER anma aktif gücünün 5%'inden fazla ve 20%'sinden daha az aktif güç çıkışı ile çalışırken çizelge 4.13'deki güç değerleriyle, anlık aktif güç çıkışının 20%'sinin anma aktif güç çıkışına bölünerek elde edilen katsayıyla çarpılmasıyla ortaya çıkan güç değeri kadar reaktif güç değişikliği yapabileceğini belirtir. Standartta tesisin anma aktif gücünün 20%'sinden fazla üretim yaptığı zamanlarda çizelge 4.13'deki gibi reaktif gücün aktarılması veya çekilmesinde herhangi bir sınırlandırılmanın yapılmaması gerektiğini belirtilir (Anonymous5, 2018).

IEEE 929-2000 standartında bir tesis anma gücünün 10%'undan fazla bir güç çıkışında çalıştığında güç faktörünün 0,85'den daha yüksek olması gerektiğini belirtir (Anonymous1, 2000). Türkiye'de ise EPDK tarafından çıkarılan elektrik şebeke yönetmeliğinde bir fotovoltaik enerji üretim tesisinin dağıtım ağına bağlı çalışırken yerine getirmesi gereken güç faktörü değeri Şekil 4.9'daki grafiğe uygun olması gerektiği belirtilir (Anonim2, 2014).



Şekil 4.9 Fotovoltaik Üretim Tesisleri Reaktif Güç Kapasite Eğrisi⁵

⁵ EPDK Elektrik şebeke yönetmeliği

5. KAR YAĞIŞI VE BUZLANMANIN FOTOVOLTAİK ÜRETİME ETKİSİ

FV panellere ulaşan küresel güneş ışınımı, direkt olarak güneşten gelen doğrudan ışınım, atmosferdeki parçacıklar ve moleküller tarafından etrafa saçılan dağınık ışınım ve panellerin etrafında bulunan cisim veya zeminin neden olduğu yansıma ışınımı olmak üzere üç bileşenden oluşur (Hosseini ve ark., 2018). Kar yağışı esnasında oluşan kısmi gölgelenme etkisi FV panellere ulaşan doğrudan ışınımı azaltmasının yanı sıra FV paneller üzerinde birikerek panel yüzeyine ulaşan bütün küresel ışınım bileşenlerini düşürür. Kar yağışının etkisinin kesilmesiyle birlikte kar yağışı esnasında oluşan kısmi gölgelenme etkisi azalsa bile paneller üzerinde biriken kar tabakası FV panellere ulaşan küresel güneş ışınımını bileşenlerini ve panel sıcaklığını azaltmakla kalmaz aynı zamanda panelleri deformasyona uğratarak FV panellerin ömürlerini azaltır (Özcan, 2019).

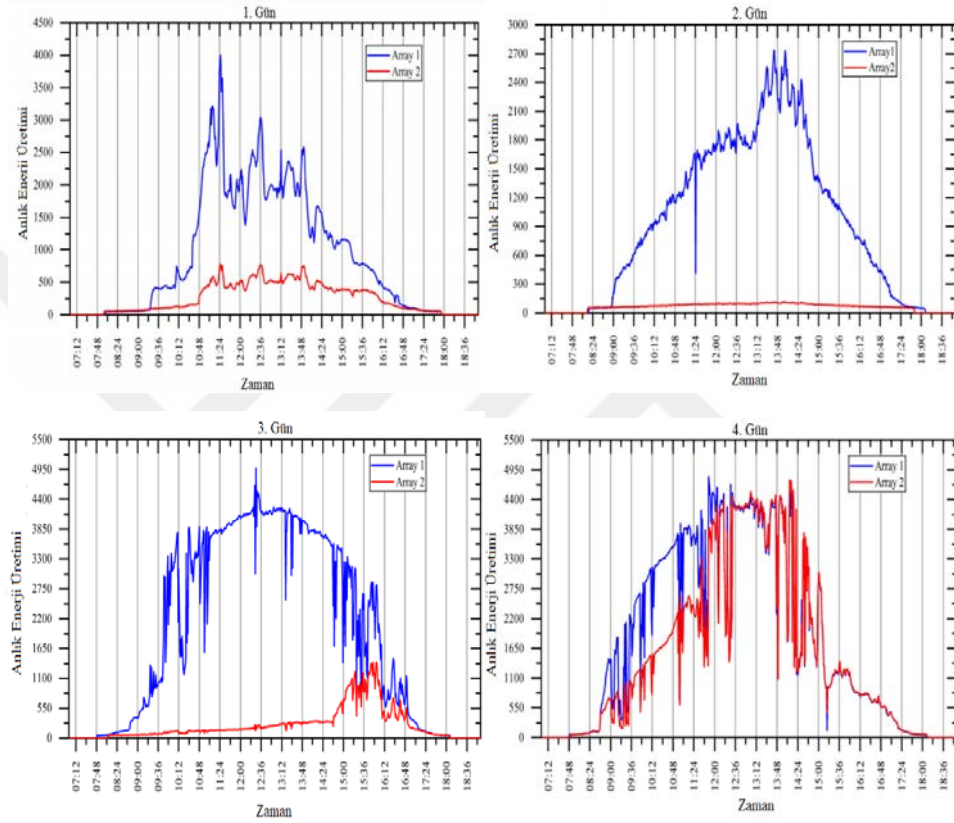


Şekil 5.1 Kar yağışı ve buzlanmanın FV panellere etkisi ⁶

Kar tabakası temizlenmeyen FV panellerde kar, kar yüksekliği, modül eğimi, dizi düzlem ışınımı, ortam sıcaklığı, rüzgâr hızı ve yönüne bağlı olarak zamanla panel yüzeyinden ayrılır (Özcan, 2019). Bu sürecin uzunluğu FV tesislerde güç kayıplarının

⁶https://www.sungrowpower.com/sites/default/files/styles/scale_732/public/Heilongjiang%20%E2%80%A2%20China%20extreme%20cold%20region%20%20300kW_adjusted.jpg?itok=En-yOYyC
<http://www.greenenergytimes.org/wp-content/uploads/2014/02/SnowProBrum1-400x299.jpg>
http://www.nef.org.uk/images/uploads/thumbnails/Solar_Panel_Vertical_Snow.jpg
<https://www.alamy.com/stock-photo-solar-panels-on-a-domestic-property-covered-in-snow-during-a-blizzard-177629981.html>

yaşanmasının yanında enerji üretim tesisinde kullanılan malzemenin zarar görmesine sebep olarak maddi kayıpların artmasına neden olabilir. Bu yüzden FV tesislerde kar yağışına bağlı enerji kaybının azaltılması için paneller üzerindeki kar tabakasının temizlenmesi gerekir. Panel temizleme yöntemleri yüzey ısıtma sistemleri, kendi kendini temizleyen yüzey kaplamaları, mekanik ve el ile kar temizleme metotları ve kimyasal çözücüler olmak üzere dörde ayrılırlar (Erhan, 2019).



Şekil 5.2 Kar yağışının etkisindeki bir FV tesiste güç çıkışı (Anadol ve Erhan, 2019)

Anadol ve Erhan (2019) Konya'nın kar yağışlı bir bölgesinde gerçekleştirdikleri bir çalışmada kar yağışının FV paneller üzerindeki etkisini iki diziden oluşan bir FV tesiste dizelerden birini sürekli temiz tutarak diğerini ise kar yağışının etkisi altında bırakarak gözlemlemişlerdir (Şekil 5.2). Anadolu ve Erhan (2019) yaptıkları çalışmada kar yağışının etkisinin anlık olmadığını kar yağışının kesilmesine rağmen panellerin üzerinde biriken kar tabakasının enerji kaybı üzerindeki olumsuz etkisini saha ölçümleri yaparak gözlemlemişlerdir.

6. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde Konya'nın kar yağışlı bir bölgesinde aynı tesis alanı içerisine kurulmuş hibrit dizi inverter ve mikro inverter yapısına sahip iki farklı FV tesisin yapısı tanıtılmıştır. Şekil 6.1'de gösterilen bu FV tesisler, Konya şehir merkezinin 17 km kuzeyinde 38.029649 N, Boylam, 32.50487 E enlemlerinde 1.168 m rakımda Konya Teknik Üniversitesi (KTÜN) yerleşke alanı Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu (TBMYO) bahçesinde yaklaşık 350 m²'lik bir alanda kurulmuştur. FV tesisler, 3x35+16 NYY yeraltı kablo hatlarıyla TBMYO'nun ana panosunu beslemektedir. Ana panonun şebeke bağlantı noktasında ve inverterlerin AC güç çıkış noktasında şebeke analizörleri ile güç kalitesi verileri ölçülmektedir.



Şekil 6.1 Konya Teknik Üniversitesi yerleşkesi alanındaki FV tesisler

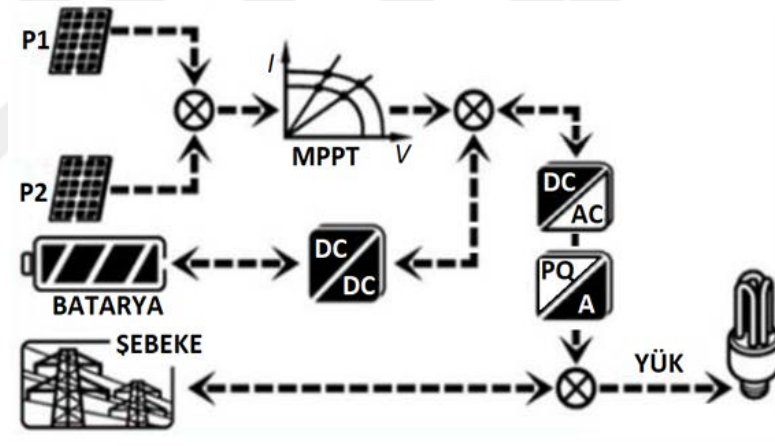
6.1. Hibrit Dizi İnverterli Enerji Üretim Tesisi

Kurulu gücü 9,85 kWp olan hibrit inverterli enerji üretim tesisi, her biri 30° sabit eğim açısıyla güney yönünde, yatay doğrultuda konuşlandırılmış monokristal yapılı 36 adet FV panelden oluşur (Şekil 6.1). Enerji üretim tesisinde ilkinde 18 adet M60-265 model FV panel ve diğerinde 8 adet M60-270A FV panel ile 10 adet M60-265 model FV panelden oluşan iki dizi bulunur. FV panellere ait elektriksel özellikler çizelge 6.1'de verilmiştir. İnverter arayüz yazılımı ile hem şebeke bağlantılı hem de şebeke bağlantısı

olmaksızın çalışabilme imkânı sunan 10 kW anma gücüne sahip ABAX marka üç fazlı bir hibrit inverter iki dizeden elde edilen DC gücü AC güce çevirerek panellerden gelen enerjiyi şebekeye iletir. Hibrit invertere ait teknik özellikler EK-1’de verilmiştir. Hibrit inverterli bu tesisin şebekenin güç kalitesine olan etkisi, inverterin şebekeyle bağlantı noktasına MULTISER-XX-TFT marka bir şebeke analizörü bağlanarak ölçülür. Şebeke analizörüne ait teknik özellikler ise EK-2’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Hibrit dize inverterli enerji üretim tesisinde kullanılan FV panellerin STC şartlarında (1000W/m²; 25°C; AM 1.5G) karakteristikleri

FV Panel		M60-265	M60-270A
Maksimum Güç	(P_{mp})	265 W	270 W
Açık Devre Gerilimi	(V_{oc})	38.55 V	39.02 V
Kısa Devre Akımı	(I_{sc})	8.664 A	9.3 A
Maksimum Güçteki Gerilim	(V_{mp})	31.24 V	31.27 V
Maksimum Güçteki Akım	(I_{mp})	8.482 A	8.63 A
Panel Sayısı	adet	28	8



Şekil 6.2 Hibrit dizi inverterin temel üniteleri ve çalışma biçimi⁷

Şekil 6.2, inverterin temel bileşenlerini ve kullanıcı arayüzü ile belirlenen muhtemel çalışma biçimlerini göstermektedir. Dizeler, buzlama, kar örtüsü ve bulutlanma gibi olumsuz çevresel etkilerden en az düzeyde etkilenmesi için inverter yapısında bulunan maksimum güç noktası takip sistemi (MPPT) ile kontrol edilir. Ayrıca FV tesiste enerji kayıplarına bağlı veri kaybını önlemek için kritik yük grubu olarak nitelendirilen verilerin toplandığı bilgisayarı ve iki adet Helios LMCP70W, Beyaz, 220VAC marka LED projektörü beslemek için 4 adet 12V-200Ah'lik, uzun ömürlü Deep Cycle jel tipi akü grubu bulunur.

⁷ <https://solaravm.com/images/uploaded/ABAX%20PDF/Abax-Trigen%20Inverter.pdf>

6.2. Mikroiverterli Test Ve Ölçüm Sistemi

Kurulu gücü 4,77 kWp olan mikroiverterli test ve ölçüm tesisinde 18 adet P60-265A polikristal özelliklere sahip paneller her bir eğim açısında üç adet panel bulunacak şekilde 0°, 10°, 20°, 30°, 40° ve 50°'lik eğim açılarıyla güney yönünde ve yatay doğrultuda taşıyıcı sistem üzerine monte edilmiştir (Şekil 6.1). FV panellere ait teknik özellikler çizelge 6.2'de verilmiştir. FV paneller ulusal şebeke bağlantı standartları ile uyumlu 2x360 W anma gücünde çift girişli 9 adet BDM 600 NEP marka mikroiverter ile AC şebekeye (220V, 50Hz) bağlanmıştır. NEP marka mikroivertere ait teknik özellikler EK-3'te verilmiştir.

Tesisteki enerji üretim verileri, BDG-256P3 gateway cihazı yardımıyla hem çevrimdışı olarak USB girişe bağlanan bir geçici depolama cihazına hem de çevrimiçi olarak inverter üreticisine ait bulut sistemine kayıt edilmektedir. Bulut sistemine kaydedilen verilere sunucu üzerinden kayıtlı kullanıcı bilgilerini kullanarak uzaktan veya lokal olarak erişmek mümkündür. İnverterlerin şebekeye bağlantı yaptığı noktaya ENTES MPR63 marka bir şebeke analizörü bağlanmıştır. ENTES MPR63 şebeke analizörüne ait teknik özellikler EK-4'te verilmiştir. Şebeke analizörü ile uyumlu ENTBUS Plus bilgisayar yazılımı, RS485-USB2 çevirici üzerinden 1 dakikalık örnekleme aralıklarıyla tesisin güç kalitesi değişkenlerini kayıt eder.

Çizelge 6.2 Mikroiverterli enerji üretim tesisinde bulunan FV panellerin özellikleri

FV Panel		M60-265A
Maksimum Güç	(P_{mp})	265 W
Açık Devre Gerilimi	(V_{oc})	37.94 V
Kısa Devre Akımı	(I_{sc})	9.15 A
Maksimum Güçteki Gerilim	(V_{mp})	30.7 V
Maksimum Güçteki Akım	(I_{mp})	8.631 A
Panel Sayısı	adet	18

FV Panellerin yüzeylerindeki kar ve buzlanma gibi atmosferik olayları gözlemlemek için tesis alanına bir adet Haikon DS-2CD2620F-IS marka IP kamera ve Haikon 7600 NVR marka kayıt cihazı kurulmuştur. Kayıt cihazları şebeke düzensizlikleri ve şebeke kesintileri nedeniyle veri kaybını önlemek için saf sinüs çıkış dalga şekline sahip Tunçmatik, 1KVA On Line Newtech Pro marka bir kesintisiz güç kaynağı ile beslenir.

6.3. Yöntem

Bu çalışmada Konya'nın kar yağışlı bir bölgesinde biri dize inverter diğeri mikroinverter yapısına sahip şebekeye bağlı iki farklı FV tesisin kar yağışının etkisiyle şebekede neden olduğu güç kalitesi değişiklikleri incelenmiştir. MULTISER-XX-TFT marka şebeke analizörlerinden biri, fakültenin ana panosunda diğeri ise hibrit dizi inverterli enerji üretim tesisinin şebeke bağlantı noktasına bağlanmıştır. Güç kalitesi değişkenleri, 5ms örnekleme aralığı ile bu şebeke analizörlerinden elde edilmiştir. Hibrit dizi inverter tesisinde bağlı analizör cihazında verilerin kaydedildiği USB kartının arızalanması nedeniyle dizi inverter sisteminin Ocak, Şubat, Mart, Nisan aylarına ait güç kalitesi kayıtları veri kaybına uğramıştır. Bu süreçte dizi inverterle ilgili sadece gerilim değişkeni verileri teknik özellikleri EK-5'te verilen Köhler marka çift yönlü elektrik sayacından elde edilebilmiştir. Ayrıca dizi inverterin akım ve harmonik bozulma değerleri ölçülememiştir. Mikroinverterli test ve ölçüm sistemindeyse güç kalitesi verileri ENTES MPR63 marka bir şebeke analizörü ile bir dakikalık aralıklarla kaydedilmiştir. Kar yağışının etkili olduğu hibrit ve mikroinverterli tesislerden elde edilen ölçüm verileri bölüm 4'te verilen denklemler yardımıyla analiz edilmiştir.

Tesislerin kurulu olduğu bölgede 2021 yılının Şubat, Mart ve Nisan ayları içerisinde toplam 10 gün kar yağışı meydana gelmiştir. Kar yağışlı günlerde tesis alanına ait görüntüler şekil 6.3'te verilmiştir.

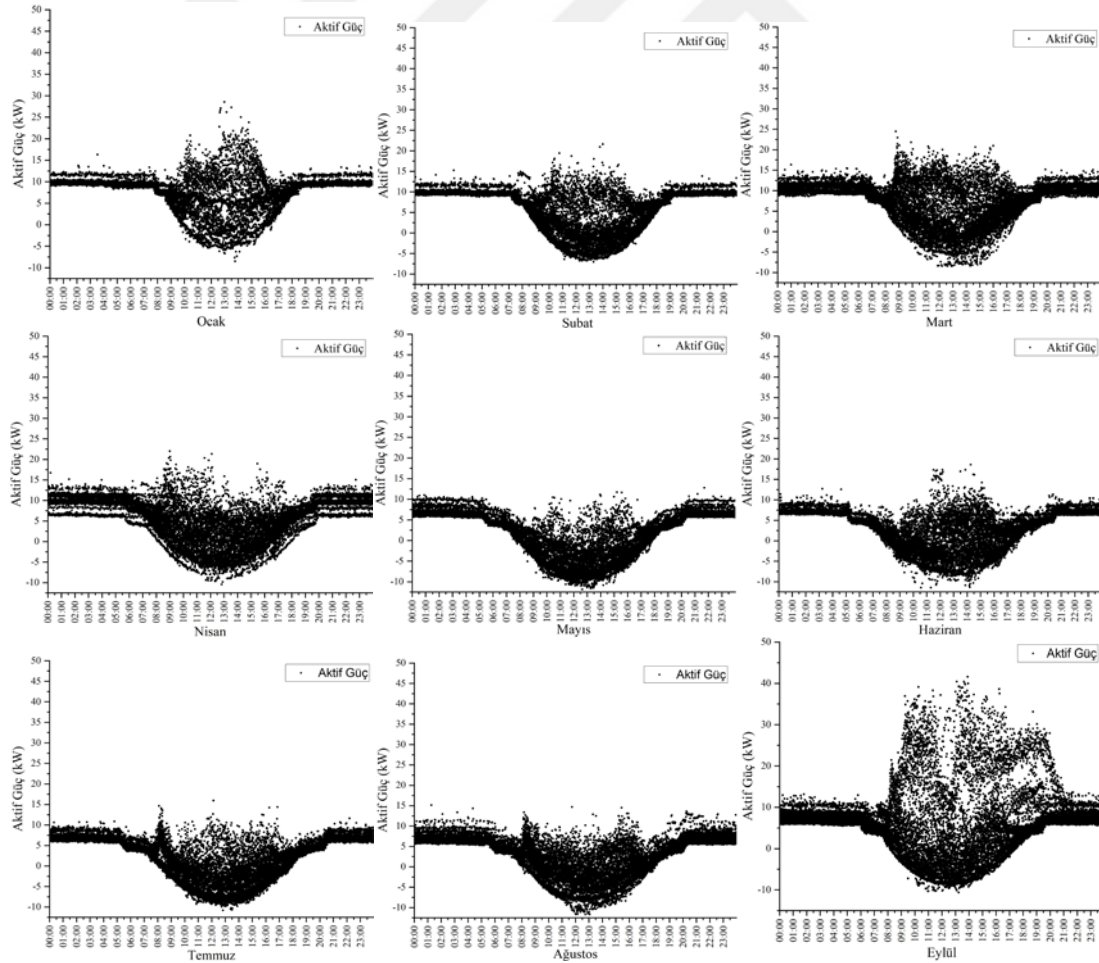


Şekil 6.3 FV tesislerin kurulu olduğu alanda kar yağışı ve buzlanmanın etkisi

7. GÜÇ KALİTESİ ANALİZİ VE TARTIŞMA

7.1. Yük Profili

Yük-talep dengesi, nonliner yükler ve endüktif yükler güç kalitesinde önemli bir etken oluşturmaktadırlar. Şekil 7.1’de verilen grafiklerde güç kalitesi analizi yapılan KTÜN TBMYO’nun yük profilleri görülmektedir. Aylık yük profillerinin ortalama bir gün olarak ifade edildiği bu şekilde enerji talebinin düşük olduğu anlarda FV tesisler tarafından üretilen enerji şebekeye aktarılmış, şebekeye aktarılan bu enerji şekil 7.1’de verilen aylık yük profili eğrilerine negatif enerji olarak yansımıştır. Şekil 7.1’deki grafiklerde 2021 yılının Ocak ayından itibaren pandemi nedeniyle ara verilen yüz-yüze eğitim öğretim faaliyetlerinin tekrar başladığı 20 Eylül 2021 tarihine kadar ki aylarda düşük yük profili, yüz yüze eğitime geçilmesiyle birlikte Eylül ayında yüksek yük profili görülmektedir.



Şekil 7.1 Ocak 2021 ile Eylül 2021 tarihleri arası KTÜN TBMYO’nun yük profili

7.2. Gerilim Sapması

Yük-Talep dengesi, gerilim sapmasını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. FV tesisler aktif enerji üretiminin yüksek olduğu anlarda şebeke bağlantı noktasında anma gerilim değerini yükseltirler. FV tesisler tarafından şebekeye aktarılan kapasitif reaktif enerji, talep fazlası enerji üretimi sırasında güç faktörünün değer aralığında olması nedeniyle önemsiz olarak kabul edilebilirken üretilen enerjinin güç talebini karşılayamadığı zamanlarda şebekeye aktarılan kapasitif reaktif enerji şebeke bağlantı noktasında gerilim düşüşlerine neden olur (Farhoodnea ve ark., 2013; Patsalides ve ark., 2007). FV tesislerin doğası gereği sürekli değişen atmosferik koşullarda çalışması sırasında dengesiz güç üretimi nedeniyle gerilim sapması güç kalitesini değerlendirilmek için önemli bir değişken olmuştur.

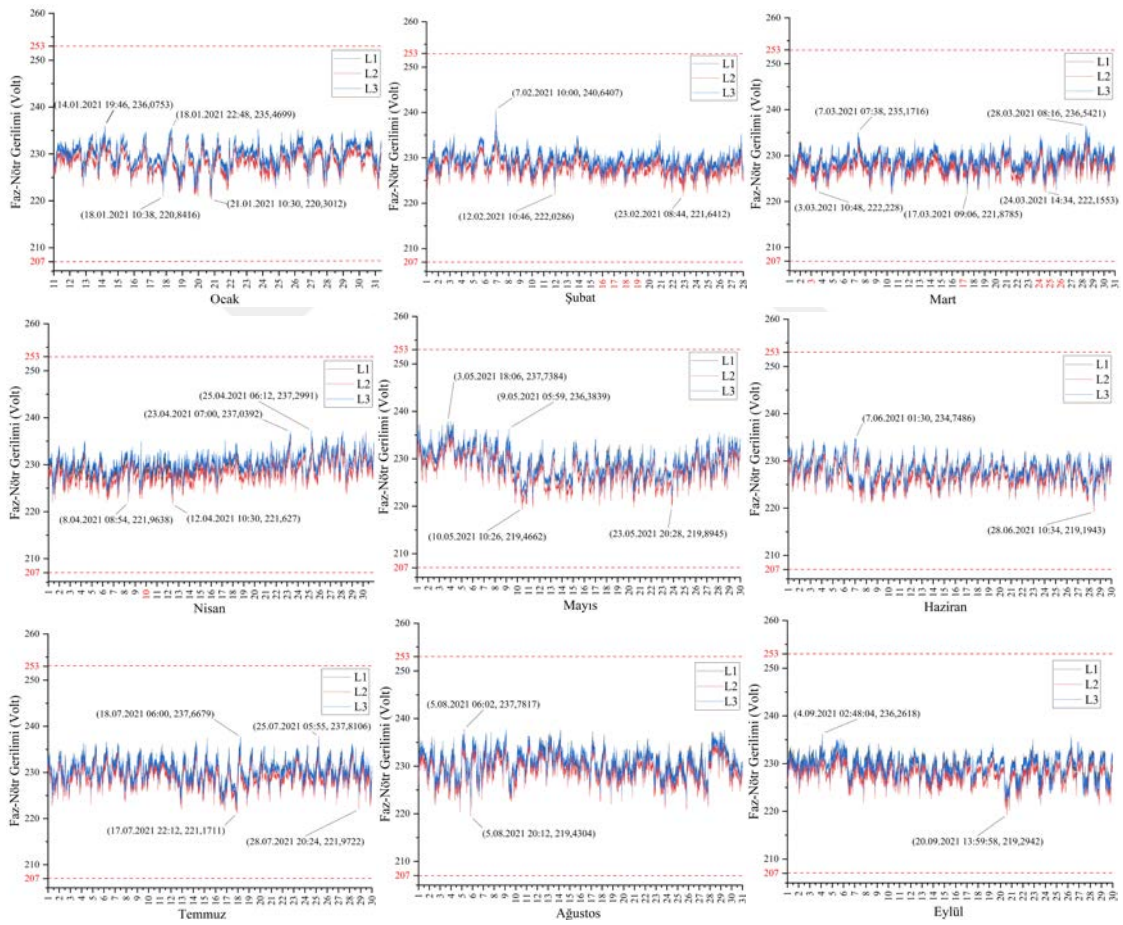
IEEE 1159-2019 standartında gerilim sapması için geçici ve kararlı durum hallerinde bazı tanımlamalar yapılmıştır. Ancak ülkemizde EPDK tarafından yayınlanan Elektrik Dağıtım ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliğinde geçici ve kararlı durum halleri için herhangi bir ayırım yapılmamış, geçici ve kararlı durum hallerinde EN 50160 standartında belirtilen ve çizelge 4.2’de özetlenen sınır değerlere uyulması gerektiği belirtilmiştir. Bu yönetmelikte şebekeye alçak gerilim seviyesinden bağlı tesislerin bir hafta boyunca 10’ar dakikalık ölçümlerinin 95%’inde anma gerilim değerinin (F-N, 230V) $\pm 10\%$ aralığında olması gerektiği, yani haftalık 1008 zaman aralığının 958’inde 207 V ile 253 V arasındaki sınır değerlere uygun olması gerektiği, ölçümlerin tamamında ise $+10\%$, -15% aralığında yani 207 V ile 254,5 V arasındaki sınır değerlere uygun olması gerektiği belirtilmiştir.

Ocak ve Eylül ayları arasındaki çalışma periyodu boyunca denklem 4.1 kullanılarak yapılan hesaplamalarda ana panonun anma gerilim değerlerinin L1 fazında ortalama -0.37% , L2 fazında ortalama -0.98% , L3 fazında ortalama -0.32% oranında değiştiği görülmüştür. Bu oran hibrit dizi inverterli enerji üretim tesisinde L1 fazında ortalama -0.07% , L2 fazında ortalama -0.4% , L3 fazında ortalama $-1,29\%$ iken mikroinverterli test ve ölçüm sisteminde L1 fazında ortalama -0.71% , L2 fazında ortalama -1.23% , L3 fazında ortalama -0.54% ’tür.

Çizelge 7.1’deki Ocak ve Eylül ayları arasında aylık gerilim değişim oranları incelendiğinde anma geriliminin değişim oranının güneşlenme süresinin artması ve statik hava koşullarını etkisiyle negatiften pozitifte geçtiği söylenebilir.

Çizelge 7.1 Ocak ve Eylül ayları arasında L1, L2, L3 fazlarında faz-nötr gerilimlerinin aylık değişim oranı

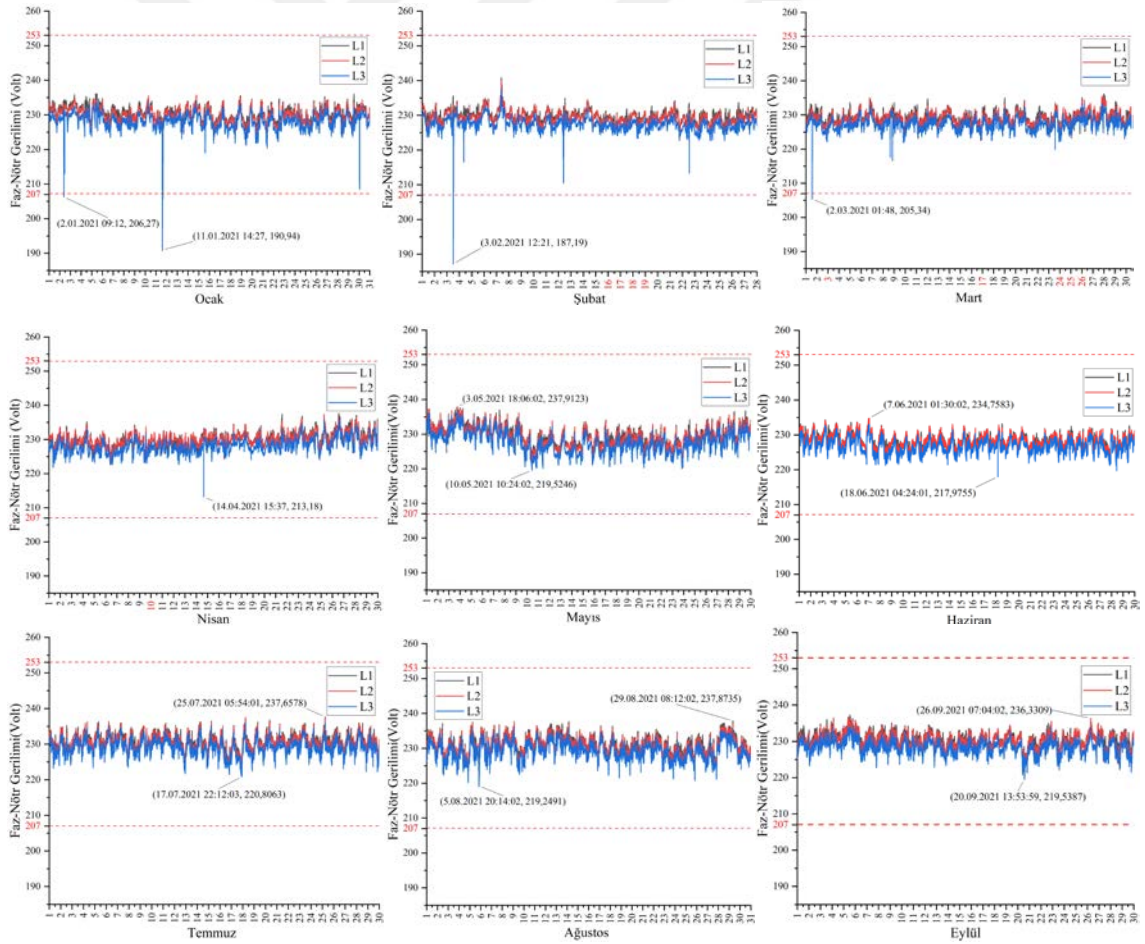
Değişim oranı (%)		Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül
Ana Pano	L1	-0.49	-0.47	-0.55	-0.16	-0.51	-0.80	0.04	0.15	-0.44
	L2	-1.1	-0.26	-0.55	-0.77	-1.34	-1.56	-0.56	-0.26	-1.07
	L3	-0.52	-0.44	-0.48	0.07	-0.51	-0.88	0.04	0.17	-0.49
Mikro İnverter	L1	-1.01	-0.1	-1.17	-0.6	-0.77	-1.33	-0.8	-0.04	0.14
	L2	-1.23	-1.15	-1.18	-0.65	-1.05	-1.4	-1.19	-0.23	-0.08
	L3	-0.86	-0.78	-0.87	-0.13	-0.6	-1.08	-0.8	0.08	0.04
Dizi İnverter	L1	-0.9	0.14	-0.44	0.04	-0.22	-0.71	0.32	0.32	-0.01
	L2	-1.46	-0.17	-0.62	0.03	-0.44	-0.82	0.01	0.18	-0.25
	L3	-3.29	-1.5	-1.26	0.83	-0.83	-1.22	-0.47	-0.23	-0.2



Şekil 7.2 Ana panonun şebeke bağlantı noktasında F-N gerilim ölçümleri

Çizelge 7.2 Kar yağışının etkili olduğu günlerde ve aylarda ana panonun şebeke bağlantı noktasında L1, L2, L3 fazlarının anma gerilim değerlerinin ortalama, maksimum ve minimum değişim oranları

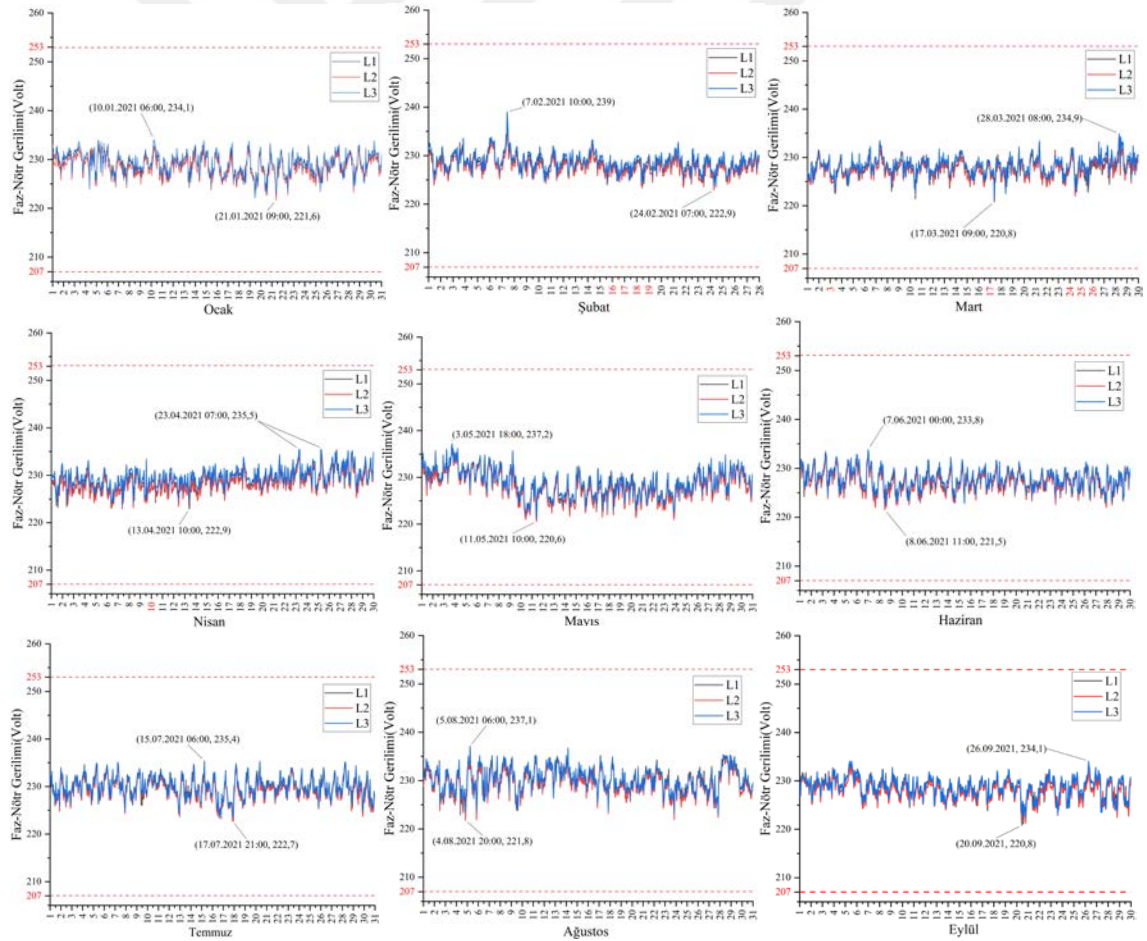
Tarih	Değişim oranı(%)								
	L1			L2			L3		
	Ortalama	Min	Maks	Ortalama	Min	Maks	Ortalama	Min	Maks
Şubat	0.47	-3.1	4.4	-0.26	-3.1	3.77	-0.44	-3.14	4.62
16 Şubat	-1.02	-2.35	0.36	-1.65	-2.35	-0.33	-1.05	-2.25	0.35
17 Şubat	-0.82	-1.83	0.52	-0.82	-1.83	-0.15	-0.82	-1.95	0.67
18 Şubat	-1.02	-2.39	0.62	-1.02	-2.39	-0.18	-1.02	-2.4	0.72
19 Şubat	-0.49	-2.32	0.95	-1.12	-2.32	0.24	-0.49	-2.03	0.92
Mart	-0.55	-3.65	2.34	-0.55	-3.65	1.63	-0.48	-3.48	2.88
3 Mart	-1.19	-3.03	0.75	-1.82	-3.03	0.07	-1.27	-3.25	0.8
17 Mart	-0.72	-3.65	2.07	-1.14	-3.65	1.52	-0.98	-3.48	2.24
24 Mart	-1.12	-3.06	1.86	-1.62	-3.06	1.21	-1.07	-3.24	2.01
25 Mart	-1.11	-3.3	0.53	-1.29	-1.29	0.34	-0.84	-3.28	0.95
26 Mart	-0.06	-1.88	1.96	-0.45	-1.88	1.63	0.12	-1.88	2.24
Nisan	-0,16	-3.44	3.04	-0.77	-3.64	2.34	0.07	-2.88	3.17
10 Nisan	-0.61	-3.44	2.34	-1.11	-3.49	1.53	-0.16	-2.88	2.84



Şekil 7.3 Dizi inverterin şebeke bağlantı noktasında F-N gerilim ölçümleri

Çizelge 7.3 Kar yağışının etkili olduğu günlerde ve aylarda dizi inverterin şebeke bağlantı noktasında L1, L2, L3 fazlarında anma gerilim değerlerinin ortalama, maksimum ve minimum değişim oranları

Tarih	Değişim oranı(%)								
	L1			L2			L3		
	Ortalama	Min	Maks	Ortalama	Min	Maks	Ortalama	Min	Maks
Şubat	0.14	-17.2	4.71	-0.17	-18.08	4.3	-1,5	-18.6	3.26
16 Şubat	-0.99	-2.06	0.33	-1.31	-2.09	-0.1	-1.83	-2.56	-0.68
17 Şubat	-0.53	-2.06	0,82	-1.04	-2.09	-0.31	-1.60	-2.56	-0.35
18 Şubat	-0.62	-1.8	0,82	-1.05	-2.46	-0,57	-1.62	-2.92	-0.32
19 Şubat	-0.16	-1.84	1.18	-1.57	-2.46	0,57	-1.17	-2.92	-0,06
Mart	-0.44	-9.84	2.34	-0.62	-10.21	2.41	-1.26	-10.7	1.5
3 Mart	-0.89	-2.58	0.75	-1.29	-3.23	0.67	-1.86	-3.45	0.01
17 Mart	-0.53	-3.2	2.07	-1.04	-3.28	0,8	-1.60	-3.2	0.1
24 Mart	-1.35	-4.09	1,86	-1.34	-3,29	1.62	-1.96	-4.41	1.03
25 Mart	-1.13	-2.95	0,53	-1.01	-3.27	1.33	-1.44	-4.41	0.55
26 Mart	-0.24	-2.95	1,96	-0,06	-1,88	1.90	0.49	-2.9	1.43
Nisan	-0.04	-3.22	3,3	0,03	-3.51	3.2	-0.83	-7.31	2.66
10 Nisan	-0.75	-3.22	2,73	-0.27	-3	2.41	-1.37	-3.55	1.50

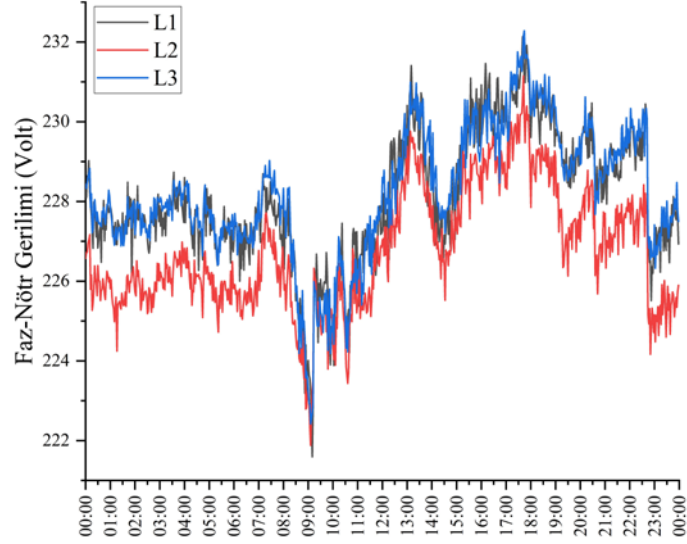


Şekil 7.4 Mikroinverterli sistemin şebeke bağlantı noktasında F-N gerilim ölçümleri

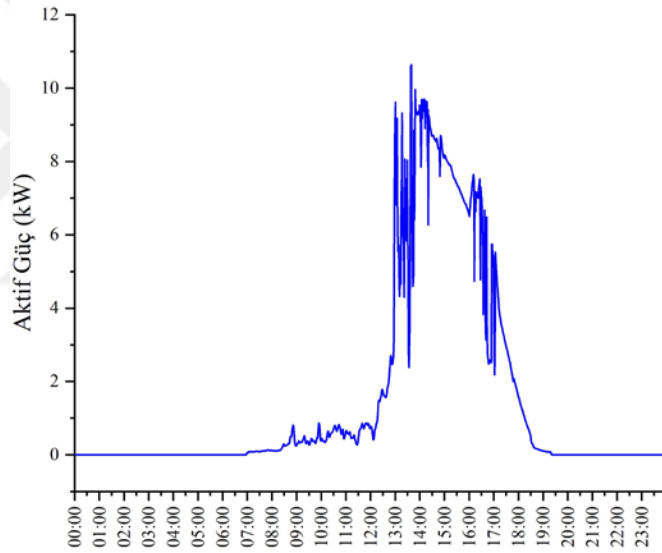
Çizelge 7.4 Kar yağışının etkili olduğu günlerde ve aylarda Mikroinverterli sistemin L1, L2, L3 fazlarında anma gerilim değerlerinin ortalama, maksimum ve minimum değişim oranları

Tarih	Değişim oranı(%)								
	L1			L2			L3		
	Ortalama	Min	Maks	Ortalama	Min	Maks	Ortalama	Min	Maks
Şubat	-0.1	-2.82	3,47	-1.15	-3.08	3,34	-0.78	-2.73	3.91
16 Şubat	-1.74	-2.26	-0,69	-1.71	-2.39	-0.60	-1.54	-2.26	-0,39
17 Şubat	-1.51	-2.17	-0,65	-1.52	-2.26	-0.60	-1.34	-2.13	-0,21
18 Şubat	-1.60	-2.69	-0.3	-1.55	-2.91	-0,47	-1.32	-2.52	0
19 Şubat	-1.1	-2.13	-0.13	-1.1	-2.39	-0.21	-0.84	-1.87	-0.21
Mart	-1.17	-4	1.34	-1.18	-3.47	1.17	-0.87	-3.47	2.13
3 Mart	-1.81	-3.26	0.78	-1.88	-3.17	0.65	-1.67	-3.17	1.21
17 Mart	-1.39	-4	0.82	-1.34	-3.39	1.13	-1.14	-3.47	1.52
24 Mart	-1.80	-3.17	1.34	-1.79	-3.47	1.17	-1.42	-3.26	1.47
25 Mart	-1.55	-3.13	-0.34	-1.47	-2.39	-0.21	-0.92	-2.34	0.21
26 Mart	-1.03	-1.56	1.04	-0.72	-1.08	1,13	-0.22	-0.82	1.39
Nisan	-0.6	-3.08	2.13	-0.65	-3.08	2,34	-0.13	-2.86	2.39
10 Nisan	-1.23	-2.52	-0.39	-1.16	-2.26	-0.26	-0.57	-1.65	0.43

Şekil 7.2, Şekil 7.3, ve Şekil 7.4'te verilen grafikler ile Çizelge 7.2, Çizelge 7.3 ve Çizelge 7.4'de verilen tablolarda çalışma periyodu içinde ana panonun L1, L2, L3 fazlarında gerilim düşüşün en büyük olduğu zamanlar Ocak Şubat ve Nisan aylarında kar yağışlı günlerden bağımsızken Mart ayı içerisinde en büyük gerilim düşüşü kar yağışlı 17 Mart tarihinde meydana gelmiştir. Dizi inverterde gerilim düşüşünün en büyük olduğu zaman tüm fazlarda kar yağışlı 10 Nisan tarihi iken diğer aylarda kar yağışlı günlerden bağımsızdır. Mikroinverterli sistemde ise gerilim düşüşün en büyük olduğu zaman sadece Mart ayında kar yağışının etkili olduğu 17 Mart tarihinde iken diğer aylarda kar yağışlı günlerden bağımsız ortaya çıkmaktadır. Bu üç aylık süreç içerisinde ana panoda ve mikroinverterli sistemde en büyük gerilim düşüşünün meydana geldiği gün kar etkisi görüldüğü 17 Mart tarihi iken dizi inverterde kar yağışından bağımsız 3 Şubat tarihidir. Şubat, Mart ve Nisan ayları içerisinde maksimum anma gerilimi değişim oranlarının bazı günlerde negatif yönde olduğu bazı günlerde ise pozitif yönde olduğu görülmektedir. Anma geriliminin değişim oranının maksimum değerinin negatif olduğu kar yağışlı bazı günlerde anma gerilim değerinin gün içerisinde 230 voltu hiç geçmediği anlaşılmaktadır. Kar yağışlı diğer günlerde maksimum gerilim değişim oranlarının sadece 24 Mart'ta mikroinverterli sistemin L1 ve L2 fazı haricinde aylık ortalamaların altında kaldığı görülmektedir.



Şekil 7.5 17 Mart 2021 tarihinde kar yağışının etkisi altındaki hibrit dizi inverterli enerji üretim sisteminin şebeke bağlantı noktasında anma gerilimi değişimi



Şekil 7.6 17 Mart 2021 tarihinde kar yağışının etkisi altındaki hibrit dizi inverterli enerji üretim tesisinin aktif güç eğrisi

Şebeke bağlantı noktasında yapılan gerilim ölçüm değerleri incelendiği zaman FV tesislerin devreye girdiği ve devreden çıktığı gün doğumu ve gün batımı anlarında anma gerilim değerinde ani düşüşler olduğu görülmektedir (Şekil 7.5). Kar yağışlı günler incelendiğinde bu anlarda kar yağışının etkisiyle FV tesislerde aktif güç üretiminin düşük olduğu görülmektedir (Şekil 7.6). Ana panonun şebeke bağlantı noktasındaki F-N gerilim ölçüm verileri incelendiği zaman Şubat ayı içerisinde anma gerilim değerinin gün doğumunda sonra 150 dakikalık ortalama sürede L1 fazında ortalama -0.24%, L2 fazında ortalama -1.01%, L3 fazında ortalama -0,44% değiştiği görülmüştür.

Kar yağışının etkili olduğu günlerde ana panonun, dizi inverterin ve mikroinverterli sistemin gün doğumu ortalama anma gerilim değeri değişimleri çizelge 7.5'te, gün batımının ana pano, dizi inverterin ve mikroinverterli sistemin gerilim değişim oranları çizelge 7.6'da özetlenmiştir. Gün doğumlarında anma gerilimi değişim oranlarının ana panoda ve dizi inverterde çizelge 7.2 ve çizelge 7.3'teki günlük ortalama değerlerinin altında, mikroinverterli sistemin Çizelge 7.5'teki gün doğumu anma geriliminin değişimin değerlerinin günlük ortalamalarının üstünde olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.5'teki verilen gün doğumu anlarındaki değişim oranları dikkate alındığında bu on gün boyunca hemen hemen bütün gün doğumlarında kar yağışının FV tesis üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Çizelge 7.6'daki gün batımı ortalama anma gerilim değeri değişimlerine bakıldığında zaman anma gerilimi düşüş şiddetlerinin gün doğumu oranına göre daha düşük olduğu görülür. Kar yağışlı günler incelendiğinde gün batımında kar etkisinin daha az olduğu görülmektedir. Kar yağışlı anlarda gerilim değerlerinin değişiminin oranlarının fazla olmasında kar yağışının neden olduğu kısmi gölgeleme etkisi ve panellerin yüzeyine bulunan kar örtüsünün panellerin yüzeyine ulaşan ışınım miktarını kısıtlamaları nedeniyle aktif güç üretiminin düşmesi etkilidir (Şekil 7.6).

Çizelge 7.5 Kar yağışının etkili olduğu günlerde gün doğumu anma gerilim değeri değişimleri

Tarih	Değişim oranı(%)								
	Ana Pano			Dizi inverter			Mikroinverter		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Şubat	-0,24	-1,01	-0,44	-0,32	-0,4	-1,79	-1,44	-1,73	-0,89
16 Şubat	-0,85	-1,52	-0,88	-1,08	-1,43	-1,85	-1,43	-1,33	-1,21
17 Şubat	-0,86	-1,51	-0,78	-0,82	-1,28	-1,81	-1,38	-1,47	-1,18
18 Şubat	-0,67	-1,29	-0,54	-0,92	-1,29	-1,85	-1,4	-1,35	-1,13
19 Şubat	-1,07	-1,70	-1,93	-0,71	-0,99	-1,61	-1,38	-1,41	-1,1
Mart	-0,32	-0,91	-0,25	-0,39	-0,15	-1,01	-1,66	-1,54	-0,87
3 Mart	-1,41	-2,08	-0,46	-1,81	-2,15	-2,77	-1,79	-2,26	-1,89
17 Mart	-1,37	-1,88	0,2	-2,26	-2,36	-2,72	-1,49	-1,56	-1,26
24 Mart	-1,59	-2,28	-0,25	-0,94	-0,87	-1,51	-0,17	-0,31	-0,02
25 Mart	-1,35	-2,07	0,09	-1,41	-1,31	-2,13	-1,68	-1,65	-1,26
26 Mart	-0,86	-1,58	0,45	-0,26	-0,91	-1,55	-0,65	-0,71	-0,93
Nisan	-0,35	-0,23	0,65	0,35	-0,54	-0,52	0,35	-0,04	-1
10 Nisan	-0,02	-0,06	0,04	-0,79	0,15	-0,94	-0,78	-0,57	-0,04

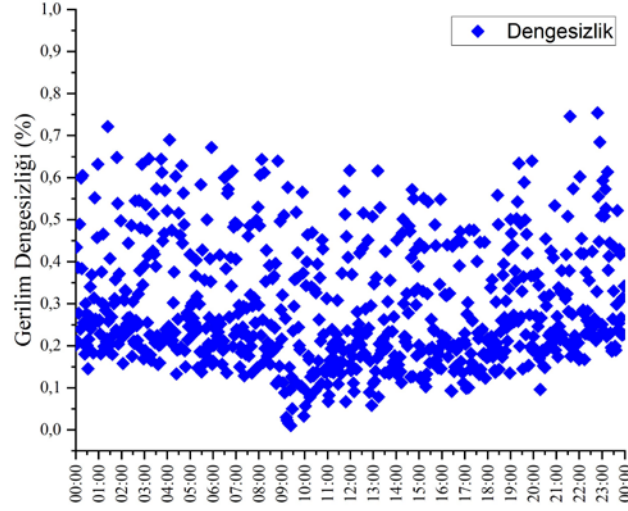
Çizelge 7.6 Kar yağışının etkili olduğu günlerde gün batımında anma gerilim değeri değişimleri

Tarih	Değişim oranı(%)								
	Ana Pano			Dizi inverter			Mikroinverter		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Şubat	-0,34	-1,02	-0,31	-0,31	-0,01	-1,71	-1,71	-2	-1,32
16 Şubat	-0,83	-0,82	-0,78	-1,20	-1,37	-2,11	-1,42	-1,33	-1,08
17 Şubat	-0,52	1,07	-0,35	-0,53	-0,6	-1,38	-1,21	-1,17	-0,91
18 Şubat	-0,72	-1,16	-0,51	-0,59	-0,7	-1,42	-1,1	-1,05	-0,72
19 Şubat	-0,28	-0,77	-0,1	-0,16	-0,29	-1	-0,78	-0,68	-0,42
Mart	-0,31	-0,82	-0,2	-0,83	-0,2	-1,57	-2,03	-2,21	-1,55
3 Mart	-0,41	-1,01	-0,46	-0,12	-0,26	-0,99	-0,69	-0,78	-0,56
17 Mart	+1,11	-0,53	0,2	-0,44	-0,46	-1,37	-0,69	-0,89	-0,42
24 Mart	-0,44	-0,94	-0,25	-0,7	-0,01	-0,83	-0,85	-0,66	-0,23
25 Mart	-0,20	-0,46	0,09	-0,86	-0,37	-1,02	-1,04	-0,66	-0,5
26 Mart	+0,11	-0,20	0,45	-1,45	-0,51	-1,23	-0,73	-0,31	-0,15
Nisan	-0,24	-0,82	-0,02	-0,02	-0,02	-1,7	-1,25	-1,4	-0,47
10 Nisan	-0,17	-0,66	0,24	-0,24	-0,03	-0,6	-0,81	-0,75	-0,36

Kar yağışlı günlere ait gerilim ölçümleri incelendiği zaman elde edilen verilerde ana panoda ve mikroinverterli sistemin de gerilim ölçümlerin tamamında EPDK tarafından belirlenen sınır değerler içerisinde olduğu görülmektedir. Ancak dizi inverterde Ocak ayı boyunca iki kez, Şubat ve Mart aylarında birer kez sınır değerlerin 15 dakikalık süreyle aşıldığı görülmüştür. Gün doğumu, gün batımında ve gün içinde kar yağışının etkili olduğu anlar ya da ani gerilim düşüşlerinin olduğu anlar görülmesine rağmen FV tesisin şebeke nüfuz oranının düşük olması gerilim düşüşlerinin belirlenen sınır değer içinde kalmasına neden olmuştur.

7.3. Gerilim dengesizliği

IEEE 1159-2019 ve EN50160-2007 standartlarında çok fazlı sistemlerde gerilim dengesizliği negatif bileşenin pozitif bileşene oranı olarak tanımlanmıştır. Ancak ölçüm cihazları genellikle ANSI C84.1-2016 standartında tanımlanan faz-faz ölçümlerine dayalı bir hesaplama yöntemini kullanırlar. Bu yöntemle basit düzeyde RMS ölçümleri yapan ölçü aletleriyle gerilim dengesizliği hesabı yapmak mümkündür (Anonymous6,2019). IEEE 1159-2019 standartında negatif bileşenin pozitif bileşene oranı olarak tanımlanan gerilim dengesizliği ve faz-faz ölçümlerine dayanan gerilim dengesizliği yöntemlerini karşılaştıran bazı örnekler incelenmiş, faz-faz ölçümlere dayalı hesaplama yönteminin makul bir hata ile iyi bir sonuç verdiği görülmüştür.



Şekil 7.7 Kar yağışının etkili olduğu 17 Mart 2021 tarihinde ana panonun şebeke bağlantı noktasında gerilim dengesizliği

EN50160-2007 standartında da IEEE 1159-2019 standartına benzer şekilde faz-faz ölçümlerine dayalı bir hesap yöntemi belirtilmiştir. Ülkemizde EPDK tarafından yayınlanan Elektrik Dağıtım ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliğinde şebekeye bağlı tesislerin gerilim dengesizliğinin değerlendirilmesinde EN50160-2007 standartında belirtilen sınır değerlere uygun olması gerektiği belirtilmiş ancak gerilim dengesizliği hesabının nasıl yapılması gerektiği belirtilmemiştir. Tez çalışmasının bu bölümünde FV tesisin şebeke bağlantı noktasındaki gerilim dengesizliğinin doğru değerlendirilebilmesi için EN50160-2007 standartında belirtilen ve faz-faz ölçümlerine dayanan denklem 4.3 kullanılmıştır.

FV tesisler şebekeye bağlı olarak çalışırken ana panonun şebeke bağlantı noktasında Ocak ayının başından Eylül ayının sonuna kadar yapılan faz-faz gerilim ölçümleri sonucunda denklem 4.3 kullanılarak yapılan gerilim dengesizliği hesaplarında ortalama gerilim dengesizliği değeri 0,36% çıkmıştır. Çizelge 7.6'da görülen ortalama gerilim dengesizliği değerlerinde dengesizlik oranlarının benzerlik gösterdiği görülmektedir. Çizelge 7.7'de kar yağışının etkili olduğu günlerde ise gerilim dengesizliği değerlerinin dokuz aylık ortalama süreç ve aylık ortalama süreçteki değerlere benzerlik gösterdiği görülmektedir. Elde edilen bu veriler sonucunda FV tesislerin ideal olmayan koşullar altında bile simetrik enerji üretim sistemi gibi davranması FV tesisin enerji üretimiyle şebeke bağlantı noktasındaki gerilim dengesizliği arasında şekil 7.7'de görüldüğü gibi herhangi bir ilişki kurulamamasına sebep olmuştur (Gallo ve ark., 2012). Bu durum FV tesislerin güç kalitesinin değerlendirilmesinde gerilim dengesizliğinin göz ardı edilmesine neden olmuştur.

Bölüm 4'te çizelge 4.4'te görülen güç kalitesi istatistiğinde 18 araştırmadan sadece 4 araştırmacının bir FV tesisin güç kalitesini değerlendirmede gerilim dengesizliğinin bir ölçüt olarak kullandığı görülmüştür.

Çizelge 7.7 Ocak ve Eylül ayları arasında aylık ortalama gerilim dengesizliği değerleri

Ay	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül
Dengesizlik oranı (%)	0,38	0,04	0,39	0,42	0,45	0,35	0,32	0,23	0,34

Çizelge 7.8 Kar yağışının etkili olduğu günlerde ortalama gerilim dengesizliği değerleri

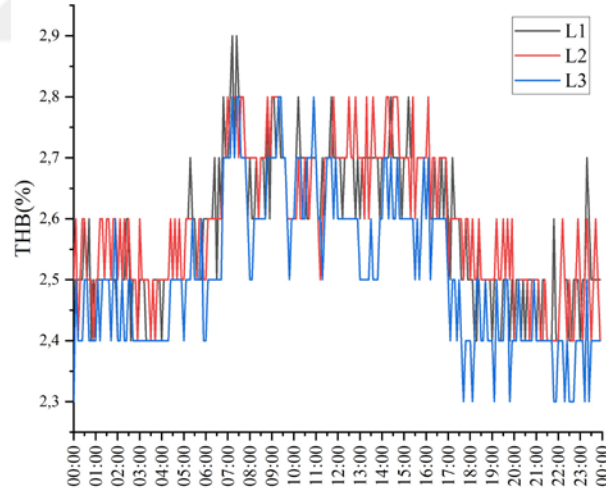
Tarih	Dengesizlik oranı(%)	
	Ortalama	Max
Şubat	0,4	1,3
16	0,45	1,17
17	0,44	1,1
18	0,41	1,05
19	0,47	1,16
Mart	0,39	1,26
3	0,5	1,12
17	0,47	1,26
24	0,4	1,21
25	0,41	1
26	0,46	1,01
Nisan	0,42	1,26
10	0,44	1,26

Kar yağışlı günlere ait faz-faz gerilim ölçümleri incelendiği zaman elde edilen verilerde gerilim dengesizliği değerlerinin tamamında EPDK tarafından belirlenen ve çizelge 4.4 görülen sınır değerlere uygun olduğu görülmektedir.

7.4. Harmonik Bozulma

Son yıllarda kullanımı hızla artan güç elektroniği uygulamaları nedeniyle dalga şekli bozulmuş sinyaller güç sistemleri için önemli bir endişe kaynağı oluşturmıştır (Anonymous6, 2019). Dağınık üretim yapan FV tesislerde DC enerjinin AC enerjiye dönüşümü sırasında kullanılan inverterlerin yapısında kullanılan güç elektroniği donanımları ve şebekede müşterilerin sahip olduğu nonliner yükler harmonik bozulma miktarını artırmakta ve inverterler düşük empedanslarından dolayı harmonik kirlenmeye maruz kalmaktadır. Diğer yandan harmonik kirlenmeye maruz kalan inverterler şebekeye yüksek dereceli harmonik bileşen içeren akımlar aktarırlar (Liu ve ark., 2015; Aprilia, 2012).

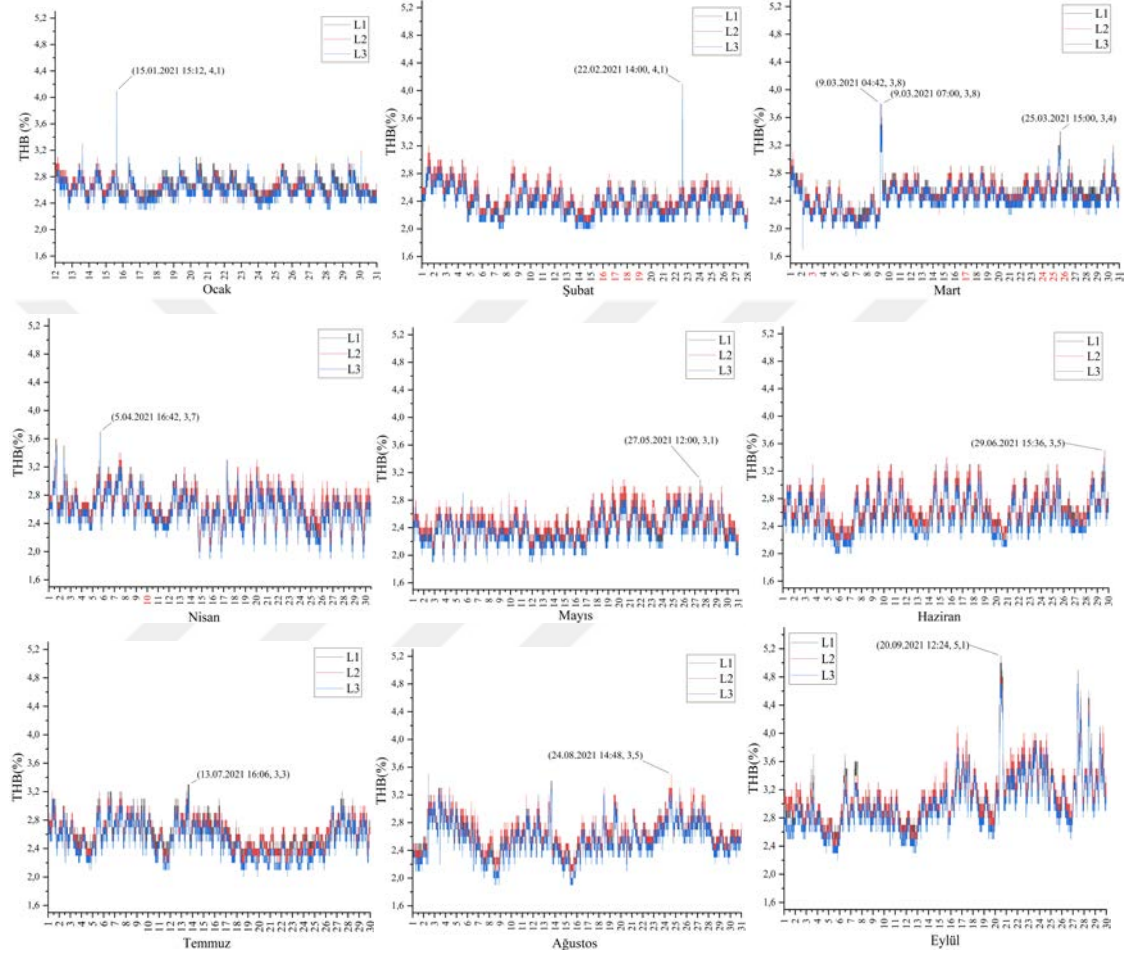
Harmonikler genel olarak akım kaynaklı ve gerilim kaynaklı harmonikler olmak üzere ikiye ayrılırlar (A Kiyong Eric, 2013). Harmonik bozulmalar her bir harmonik bileşenin büyüklüğünün ve faz açılarının karakterize edilerek gösterilebildiği gibi yaygın olarak 40. veya bazı durumlarda 50. harmoniğe kadar tek değişkenle ifade edilen THB, TTB değeriyle de gösterilmektedir (Anonymous6,2019). Çizelge 4.1’de FV tesislerin güç kalitesinin değerlendirilmesinde hem akım harmonik bozulmasının hem de gerilim harmonik bozulmasının birçok araştırmacı tarafından önemli bir ölçüt olarak kullandığı görülmüştür. Ülkemizde EPDK tarafından yayınlanan Elektrik Dağıtım ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliğinde hem tekil harmonik bileşenler için hem de THB, TTB değerleri için sınırlamalar getirilmiştir. Bu yönetmelikte şebekeye bağlı çalışan tesislerin THB bozulma değeri için EN 50160 standartında belirtilen 8%’lik sınır değere, TTB içinse şebeke bağlantı noktasındaki kısa devre akımına ve yük akımına bağlı olarak IEEE 519 standartında tanımlanan ve çizelge 4.11’de görülen sınır değerlere uygun olması gerektiği belirtilir. Bu tez çalışmasında teknik donanım yetersizliğinden dolayı şebeke bağlantı noktasında 40. harmoniğine kadar toplam bozulma değerini gösteren THB ve TTB değerleri ölçülebilmıştır.



Şekil 7.8 Kar yağışının etkili olduğu 17 Mart 2021 tarihinde şebeke bağlantı noktasında THB

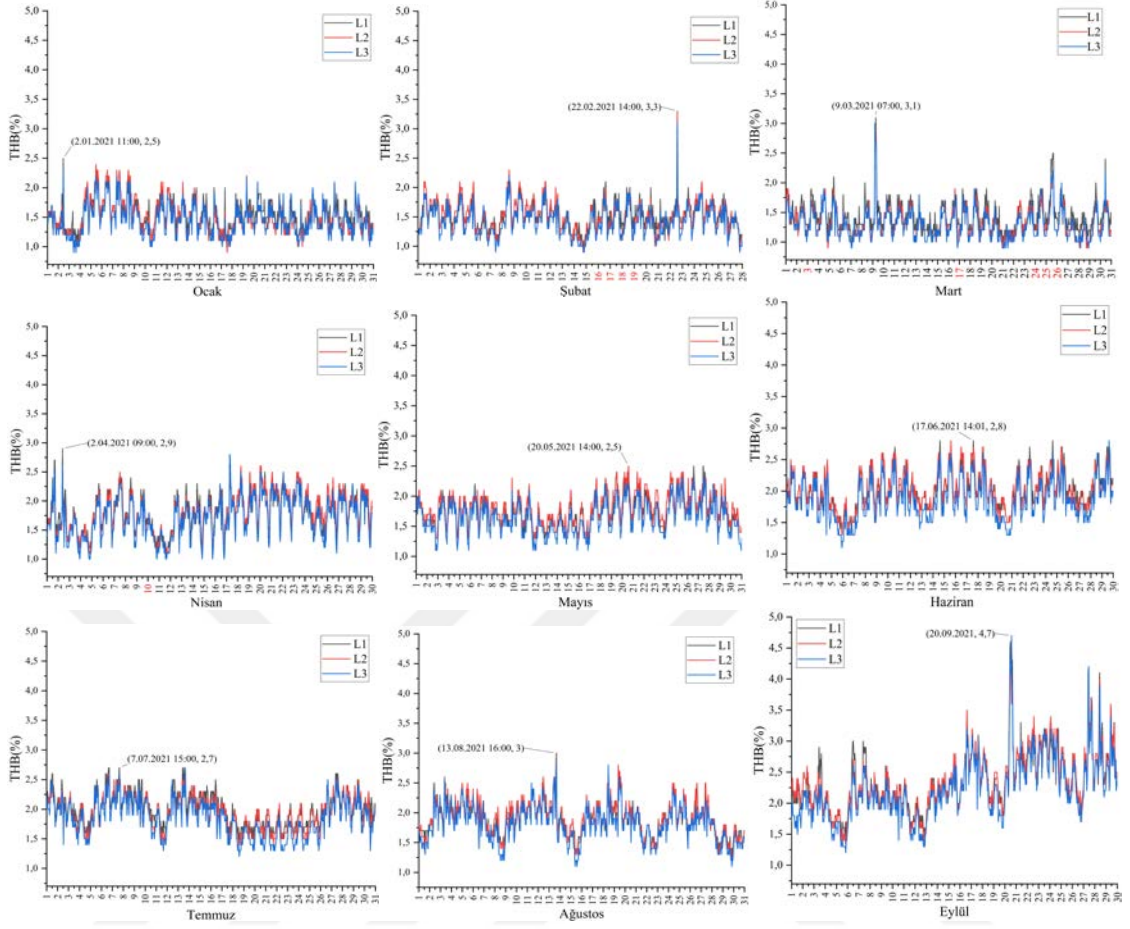
Ana pano ve mikroinverter sisteminin şebeke bağlantı noktasında yapılan güç kalitesi ölçümlerinde kar yağışının etkili olduğu Şubat, Mart, Nisan aylarındaki günler ve 9 aylık periyottaki diğer aylara ait gerilim harmonik bozulması değerleri şekil 7.9 ve şekil 7.10’daki grafiklerde görülmektedir. Şekil 7.8’de verilen günlük THB grafiklerde FV tesislerin aktif olduğu anlarda THB değerinin yükseldiği görülmekte ve bu durum

Şekil 7.9 ve 7.10'daki grafiklerde bir birine bağlı çentikler şeklinde görülmektedir. Bu çentikler 4-5 gün süreyle yükselmekte ve daha sonra aylık düzeylerdeki minimum değerlere inmektedir. 2021 yılı çalışma takvimi incelendiği zaman bu günlerin TBMYO'nun güç talebinin minimum olduğu hafta sonu günlerine ait olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 7.9 Ana panonun şebeke bağlantı noktasında gerilim harmonik bozulması

Şekil 7.9 ve şekil 7.10'deki grafiklerde mikroinverter sistemine ait THB grafiklerinde görülen ani yükselişlerin ana panoya belirgin bir şekilde yansıdığı görülmektedir. Dokuz aylık periyotta ana panonun ve mikroinverter sisteminin THB değerlerinde anlık yükselişler yaşanmasına rağmen güç kalitesi yönetmeliğinde belirtilen sınır değerleri hiç aşmadığı anlaşılmaktadır. Ancak 20 Eylül 2021 tarihinde yüz yüze eğitimin başlamasıyla birlikte artan enerji talebiyle birlikte her iki grafiğin THB değerlerinde yükselişler görülmektedir. Bu süreç içerisinde ana panoda ve mikroinverterli sisteminde en büyük THB değeri yüz yüze eğitimin başladığı 20 Eylül tarihinde gerçekleşmiştir.



Şekil 7.10 Mikroinverter sisteminin şebeke bağlantı noktasında gerilim harmonik bozulması

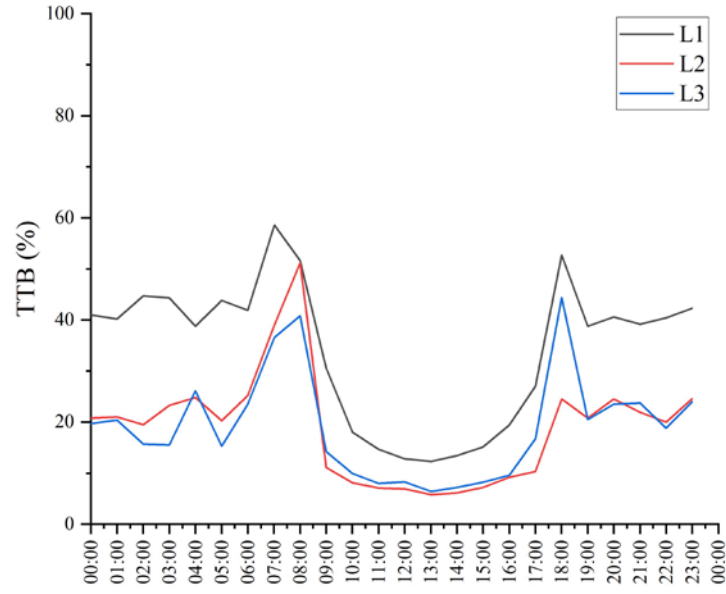
Şekil 7.8, Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'daki grafiklerde kar yağışlı günler incelendiğinde kar yağışlı günlerin THB değerini diğer günlerden ayıran herhangi bir özellik bulunmamaktadır. Aktif güç üretiminin düşük olduğu zamanlarda inverter performansının düşmesine bağlı olarak (Gallo ve ark., 2012; Ortega ve ark., 2013) THB değerlerinin artışı haricinde aktif güç çıkışı ile THB arasında bir ilişki bulunmaması kar yağışının etkisi ve THB değeri arasında ilişki kurulamamasına neden olmuştur. 2021 yılına ait Ocak ve Eylül dönemi arasındaki THB değeri incelendiği zaman mikroinverterli sistemin anlık yükselişler dışında istikrarlı olduğu ani yükseliş anlarında bile 8% olan sınır değeri hiç aşmadığı görülmektedir. Modern PWM kontrollü inverterlerin gerilim harmonik bozulması üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olması (Jayasekara ve Wolfs, 2010; Gallo ve ark., 2012) ve pandemi nedeniyle nonliner yüklerin ihtiyaç duyduğu güç talebinin düşük olması THB değerlerinin düşük olmasına neden olmuştur.

Ana pano ve mikroinverter sisteminin şebeke bağlantı noktasında yapılan güç kalitesi ölçümlerinde kar yağışının etkili olduğu Şubat, Mart, Nisan ayları ve 9 aylık periyottaki diğer aylara ait akım harmonik bozulması değerleri şekil 7.12 ve şekil 7.15'deki grafiklerde verilmektedir. Fakat akım harmonik bozulmasının değerlendirilmesinde PCC noktasındaki maksimum kısa devre akımının (I_{sc}), aynı noktada harmonik etki oluşturan yükün ilgili ölçüm periyodundaki maksimum yük akımına (I_L) oranı belirleyici faktördür (Tepecik Esen, 2020). Üç fazlı sistemlerde üç fazlı simetrik arıza maksimum kısa devre akımına neden olur ve denklem 7.1'le hesaplanır (Raj ve Bhattacharjee, 2020; Çakır, 1986).

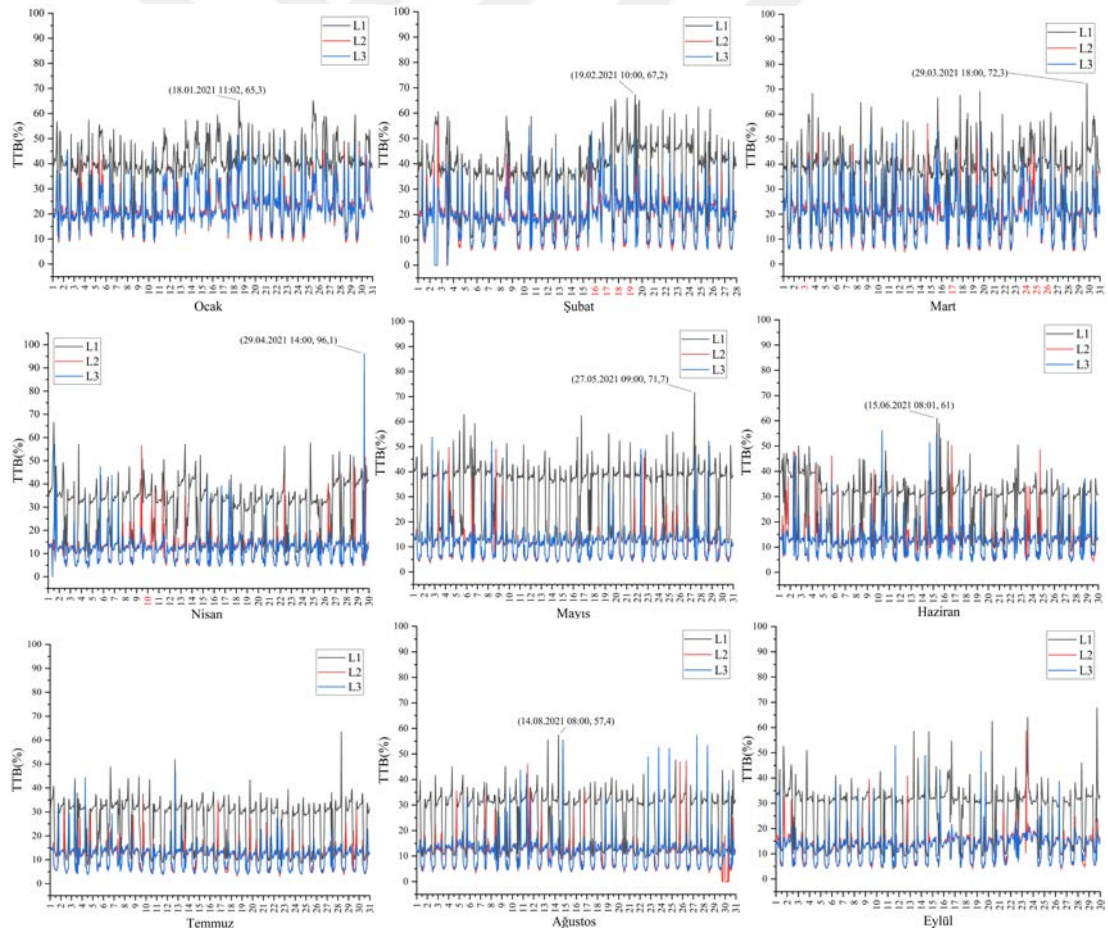
$$I_{a1} = \frac{E_a}{Z_1} \quad (7.1)$$

Denklem 7.1 kullanılarak yapılan hesaplamada mikroinverterin şebeke bağlantı noktasında kısa devre akımı 51208 A olarak hesaplanmıştır. Maksimum yük akımıysa FV tesisin kurulu gücünün tesisin fazlar arası anma gerilimine bölünmesiyle 11.92 A olarak hesaplanmıştır. Böylece I_{sc}/I_L oranı 4294 olarak bulunmuş ve güç kalitesi yönetmeliği gereği 3 saniyelik TTB ortalamaların tamamında çizelge 4.11'de görülen 20%'lik sınır değerin altında kalması gerektiği belirlenmiştir.

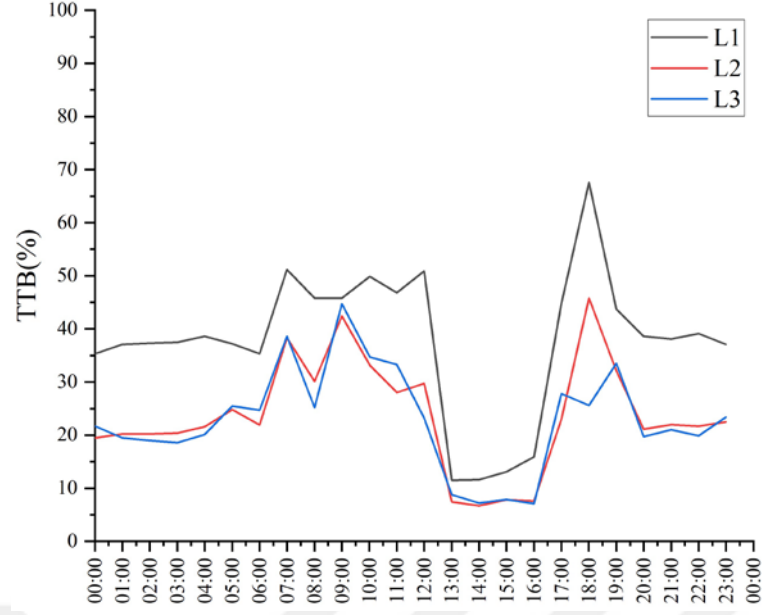
Şekil 7.11'deki açık ve güneşli bir güne ait TTB grafiğinde görüldüğü üzere mikroinverterli FV tesis devrede değilken bile PCC noktasındaki akım harmonik bozulma düzeyinin 20%'lik sınır değeri aştığı görülür. Yine Şekil 7.11'deki bir günlük grafikte mikroinverterli FV tesisin devreye girdiği ve devreden çıktığı gün doğumu ve gün batımı anlarında mikroinverterli sistemin PCC noktasında TTB düzeylerinin maksimum değerlere ulaştığı görülür. Mikroinverterli sistemin Ocak ve Eylül arasındaki 9 aylık süreçteki günlük grafiklerin birleşmesiyle oluşan ve şekil 7.12'de görülen maksimum TTB değerlerinin gün batımı veya gün doğumu anlarında maksimum değerlerde, aktif güç üretimin yüksek olduğu öğle saatlerindeyse minimum değerlerde olduğu görülür. Aktif güç üretimi ile TTB arasındaki ters orantı (Gallo ve ark., 2012) gün doğumu ve gün batımı anlarında TTB değerinin yüksek olmasına öğle saatlerindeyse minimum olmasına neden olmuştur.



Şekil 7.11 30 Ağustos 2021 tarihinde güneşli ve açık bir günde mikroinverterin şebeke bağlantı noktasında TTB



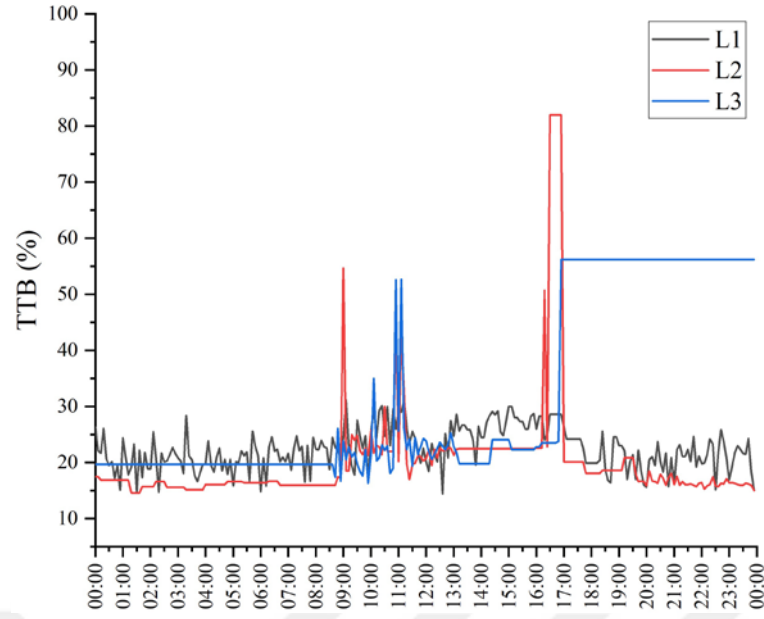
Şekil 7.12 Mikroinverterli sistemin şebeke bağlantı noktasında akım harmonik bozulması



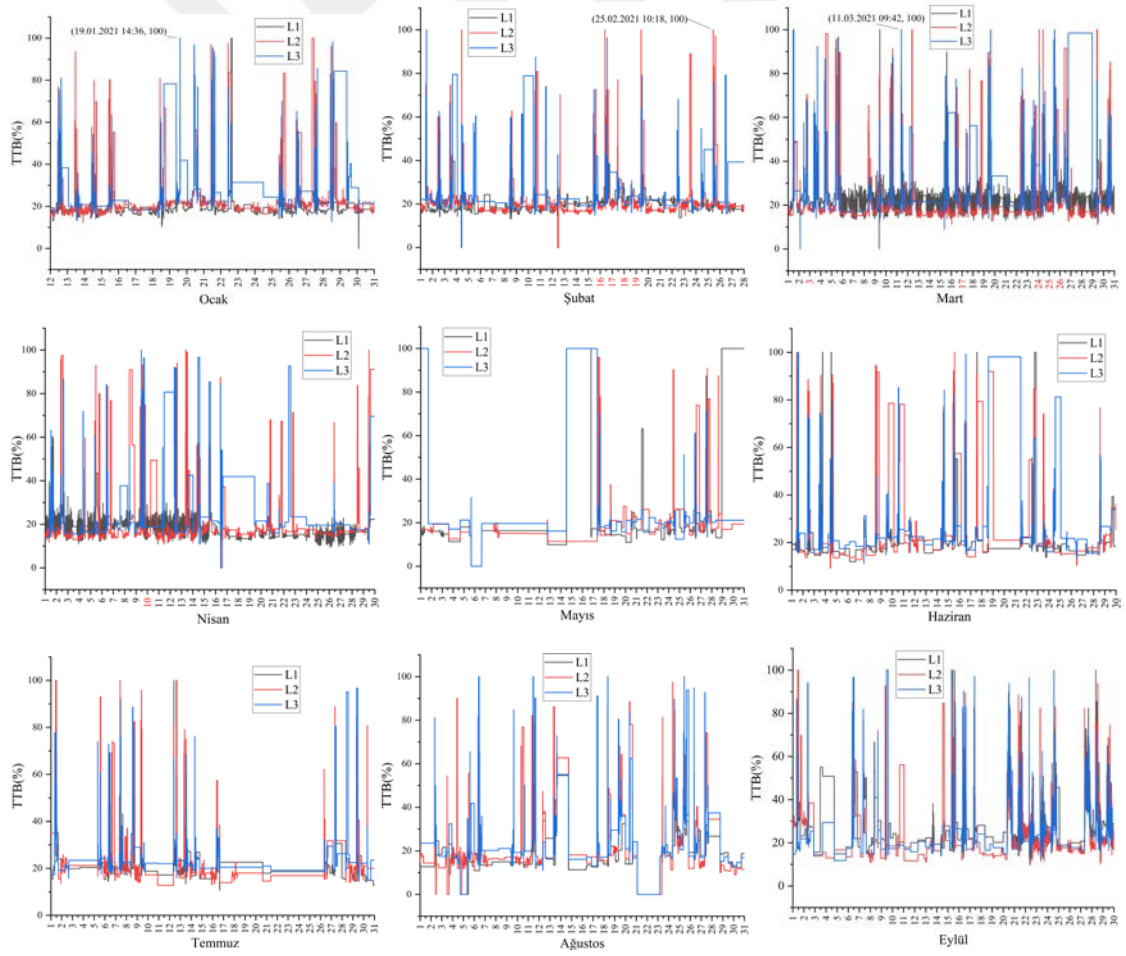
Şekil 7.13 Kar yağışının etkili olduğu 17 Mart 2021 tarihinde mikroinverterli sistemin şebeke bağlantı noktasında TTB

Kar yağışının etkili olduğu 17 Mart 2021 tarihinde mikroinverterli sisteme ait şekil 7.13'teki günlük grafikte PCC noktasındaki TTB değerleri görülmektedir. Bu grafikte kar yağışının etkili olduğu sabah saatlerinde aktif güç üretiminin düşmesiyle birlikte TTB değerlerinin yükseldiği anlaşılmaktadır. Öğle saatlerinde kar yağışının etkisinin azalması ve aktif güç üretiminin artmasıyla birlikte TTB değerleri normale dönmektedir. Şubat, Mart ve Nisan aylarındaki kar yağışlı diğer günler incelendiği zaman benzer değerler ortaya çıkmaktadır. Kar yağışlı anlarda TTB değerlerinin yükselmesine karşın mikroinverterli sistemin şekil 7.12'te görülen aylık TTB grafiklerinde maksimum TTB değerlerinin kar yağışından bağımsız günlerde ortaya çıktığı görülmektedir.

Ocak ve Eylül ayları boyunca günlük TTB verileri incelendiğinde dokuz aylık periyottaki günlerin büyük çoğunluğunda maksimum TTB değerlerinin gün batımı anlarında ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Şekil 7.14'deki ana panonun ait bir günlük grafik incelendiği zaman bu durumun mikroinverterin etkisiyle ana panoya yansıdığı görülmektedir. Ancak ana panoya yansıyan bu TTB değerinin şiddeti hemen hemen mikroinverterli sistemin iki katıdır. Ana panodaki bu TTB değerinin çok yüksek olmasında dizi inverterin etkili olmuş olma olasılığı yüksektir.



Şekil 7.14 Kar yağışının etkili olduğu 3 Mart 2021 tarihinde ana panonun şebeke bağlantı noktasında TTB



Şekil 7.15 Ana panonun şebeke bağlantı noktasında TTB

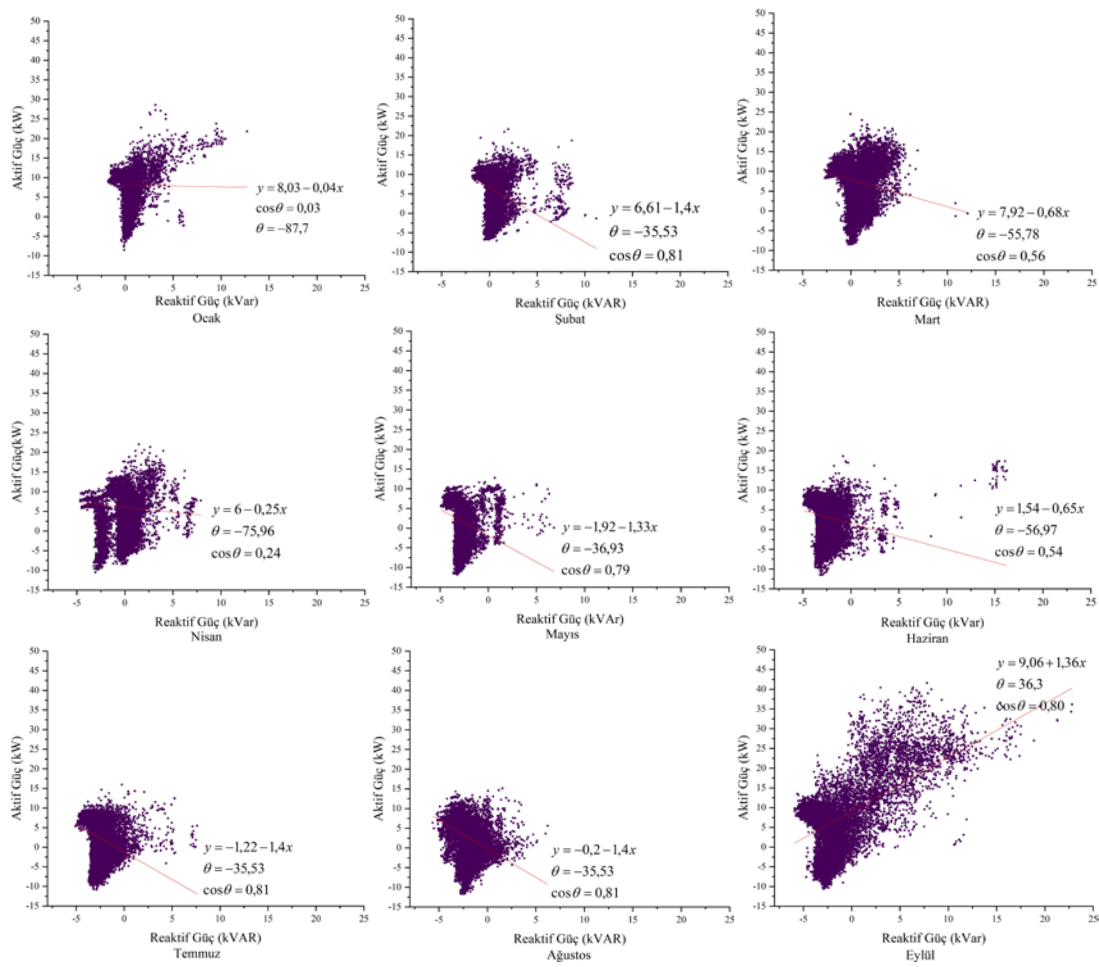
Ana panoda yapılan güç kalitesi ölçümleri sonucunda şekil 7.14’de görülen günlük TTB grafiğinde TTB değerlerinin gün batımı ve gün doğumu anlarında yüksek olması dışında mikroinverterli sistemin TTB grafikleriyle herhangi bir ilişkisi bulunmamaktadır. Bu grafikte enerji talebinin arttığı gündüz saatlerinde TTB değerinin arttığı görülmektedir. Ocak ile Eylül arasındaki dokuz aylık bu süreçte ana panonun TTB değerlerinin en yüksek olduğu zaman yükün enerji talebinin en yüksek olduğu ve eğitim öğretimin başladığı 20 Eylül tarihi sonrasındır. Ana panonun şebeke bağlantı noktasındaki TTB değerlerinin en düşük olduğu zamanlar yük talebinin düşük olduğu gece saatleri, tatil günleri ve pandemi nedeniyle tam kapanmanın olduğu 29 Nisan ve 17 Mayıs tarihi aralığındadır. Ayrıca şekil 7.15’ten grafikten enerji talebinin en düşük olduğu anlarda bile TTB değerinin 20% gibi yüksek bir değere sahip olduğu görülür. Bu duruma 24 saat sürekli olarak çalışan güvenlik kameraları ve okul dış aydınlatma sistemi gibi nonliner yükler neden olmaktadır.

2021 yılına ait Ocak ve Eylül dönemi arasındaki TTB grafikleri incelendiği zaman mikroinverterli test ve ölçüm siteminin TTB değerleri aktif enerji üretimin arttığı anlarda L1, L2 ve L3 fazlarında sınır değer olan 20% değerinin altına inmesi haricinde daima sınır değerinin üstündedir. Kar yağışının etkili olduğu günlerde TTB şiddetinin değerleri artmakta ve sınır değerlerin altında kalan süre azalmaktadır. Mikroinverterli FV tesis aktif güç üretiminin arttığı anlarda güç kalitesi ve şebeke yönetmeliklerinde belirlenen sınır değere ulaşsa da nonliner yüklerin etkisiyle yönetmeliklerde belirtilen 3’er saniyelik ölçümler sonucu elde edilmiş 10’ar dakikalık ortalamaların tamamında sınır değerinin altında kalması gerektiği şartına uymamaktadır.

7.5. Reaktif Güç ve Güç Faktörü

Reaktif enerjinin artması iletim hatlarında gerilim düşümünün artmasına şalt malzemelerinin ömrünün düşmesine neden olur. Bu yüzden reaktif gücün minimize edilmesi gerekir ve güç faktörü 1’e yaklaştırılır AS4777.2’ye göre FV inverterlerin herhangi bir reaktif güç üretmemesi gerekmektedir. Bu yüzden FV inverterler, birim güç faktöründe çalışacak şekilde tasarlanmıştır (Jayasekara ve Wolfs, 2010). Ancak bazı deneyimler inverter filtrelerinin FV tesislerin aktif enerji üretiminin olmadığı anlarda bile reaktif güç tükettiğini gösterir. Fakat bu durum yüksek seviyede reaktif güç tüketimini açıklamaz. Bu duruma son yıllarda artan endüktif yüklerin neden olma ihtimali yüksektir (González ve ark., 2011).

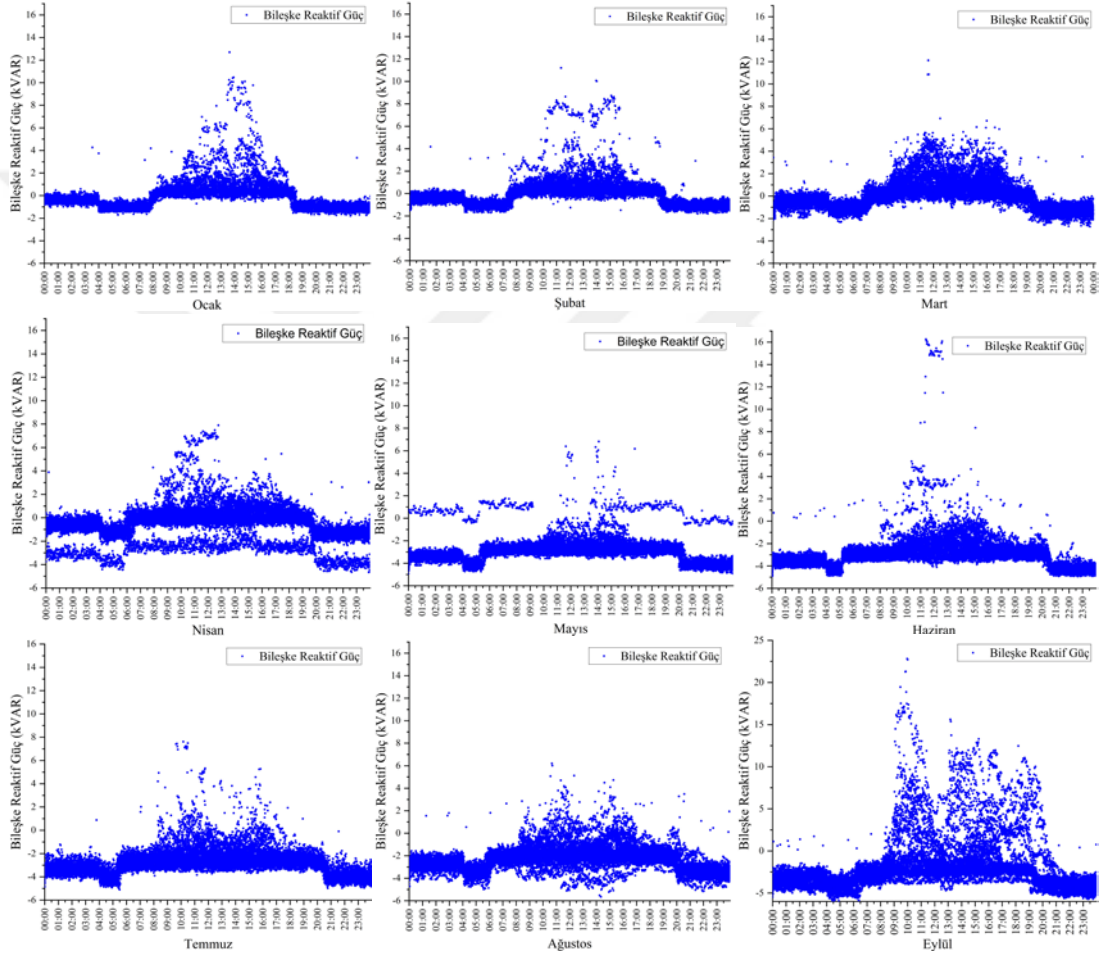
Reaktif enerji birçok çalışmada gerilim seviyesinin kontrolü ile ilişkilendirilmiştir (Patsalides ve ark., 2012; Farhoodnea ve ark. 2013; Patsalides ve ark., 2007). FV tesislerde anlık olarak değişen aktif güç üretimine bağlı olarak değişen aktif güç-reaktif güç oranı FV tesislerin şebeke bağlantı noktasında gerilim değişimlerine neden olmaktadır. FV sistemlerde güç faktörünün uygun değere ayarlamasında klasik kompanzasyon sistemleri kullanılabilmesine karşın dağıtık üretim yapan tesislerde anlık atmosferik değişimlere hızlı şekilde cevap vererek dinamik reaktif güç kontrolü yapan STATCOM (Statik senkron kompanzatör) yapısı sıkça kullanılmaktadır (Tepecik Esen, 2020).



Şekil 7.16 Ana panonun şebeke bağlantı noktasında aktif gücün fonksiyonuna bağlı olarak bileşke reaktif güç

Ana panonun şebeke bağlantı noktasındaki yapılan ölçümler sonucunda şekil 7.16 ve Şekil 7.17 verilen bileşke reaktif güç grafiklerinde reaktif gücün şekil 7.1’de verilen yük profillerine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Güç talebinin arttığı aylarda endüktif yüklere bağlı olarak şebekeden çekilen reaktif güç artmaktayken yük

talebinin düşük olduğu aylarda şebekeden çekilen reaktif güç miktarı azalmaktadır. Ana panoda enerji talebinin en düşük olduğu gece saatlerinde bile TBMYO’da sürekli olarak çalışan kamera kayıt cihazları, dış aydınlatma armatürleri gibi yüklerin ve FV tesislerin yapısında bulunan veri kayıt cihazları, akü ve UPS cihazları gibi sürekli yüklerin etkisiyle şebekeden reaktif güç çekildiği görülür. Bu süreç içerisinde şebekeden çekilen reaktif gücün en yüksek olduğu ay yüz yüze eğitimin başladığı Eylül ayı iken en düşük olduğu ay tam kapanmanın olduğu Mayıs ayıdır.

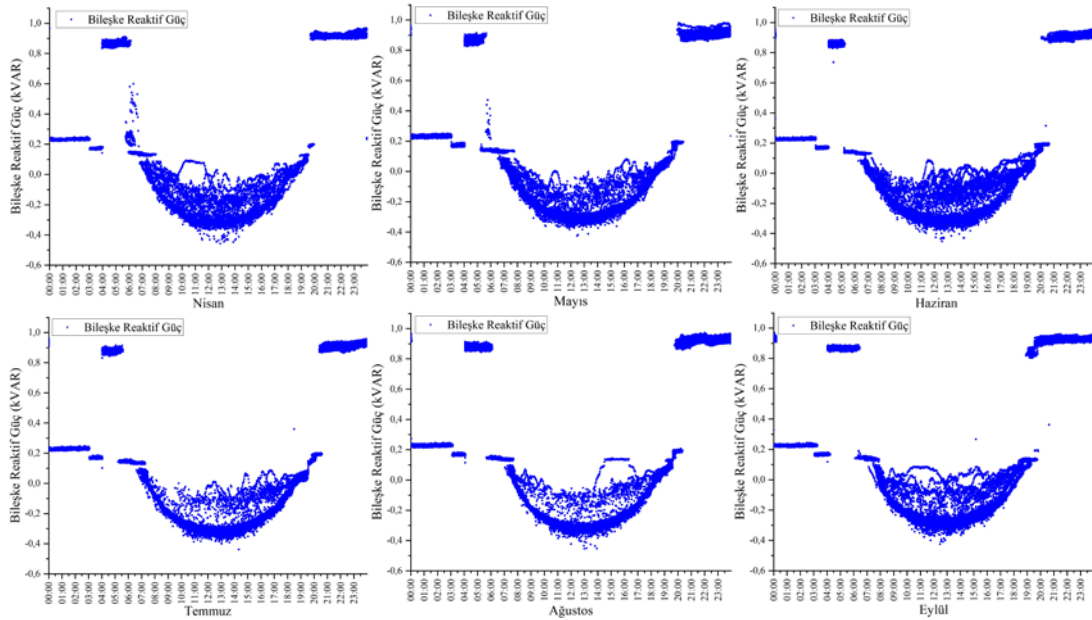


Şekil 7.17 Ana panonun şebeke bağlantı noktasında bileşke reaktif güç

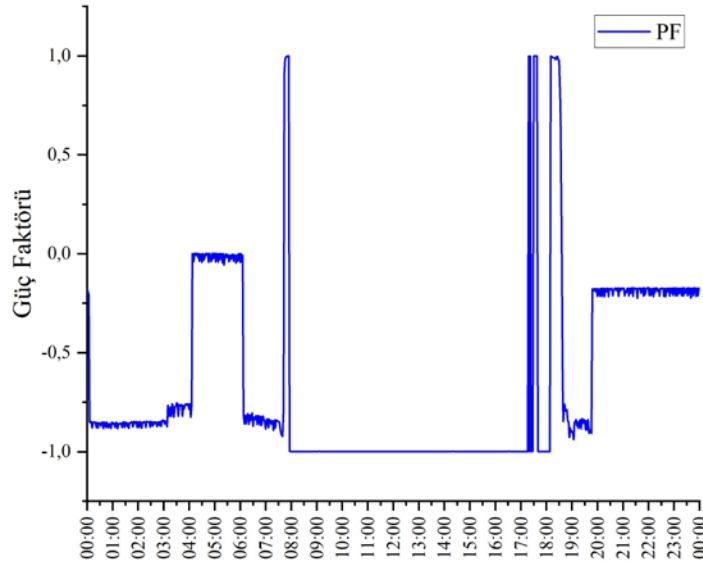
Dizi inverterin şebeke bağlantı noktasında yapılan ve şekil 7.18 ile şekil 7.20’de görülen reaktif güç ölçümlerinde şebekeye aktif güç aktardığı ve şebekeden reaktif güç çekildiği anlarda kapasitif bir kaynak gibi davranır. Dizi inverterli FV sistemi, aktif güç üretiminin olmadığı, şebekeden hem aktif hem de reaktif güç çektiği zamanlarda endüktif bir yük gibi davranır. Aktif enerji üretiminin olmadığı anlarda şebekeden çekilen reaktif güç miktarı FV tesiste reaktif güç cezasına neden olabilir. Şekil 7.18’de

ve şekil 7.20 verilen grafiklerde dizi inverterin Ocak ve Eylül ayları arasında şebekeden aynı zaman aralığında aynı miktarda reaktif güç çektiği görülmektedir. Bu saatler dizi inverterli tesisteki akülerin şarj olma zaman aralığıdır. Bu zaman aralıklarında şebekeden çekilen reaktif güce akü grubunun neden olduğu anlaşılmaktadır. Dizi inverterdeki aktif güç ile reaktif güç arasındaki ilişki, şekil 7.20'deki grafiklerde verilmiştir.

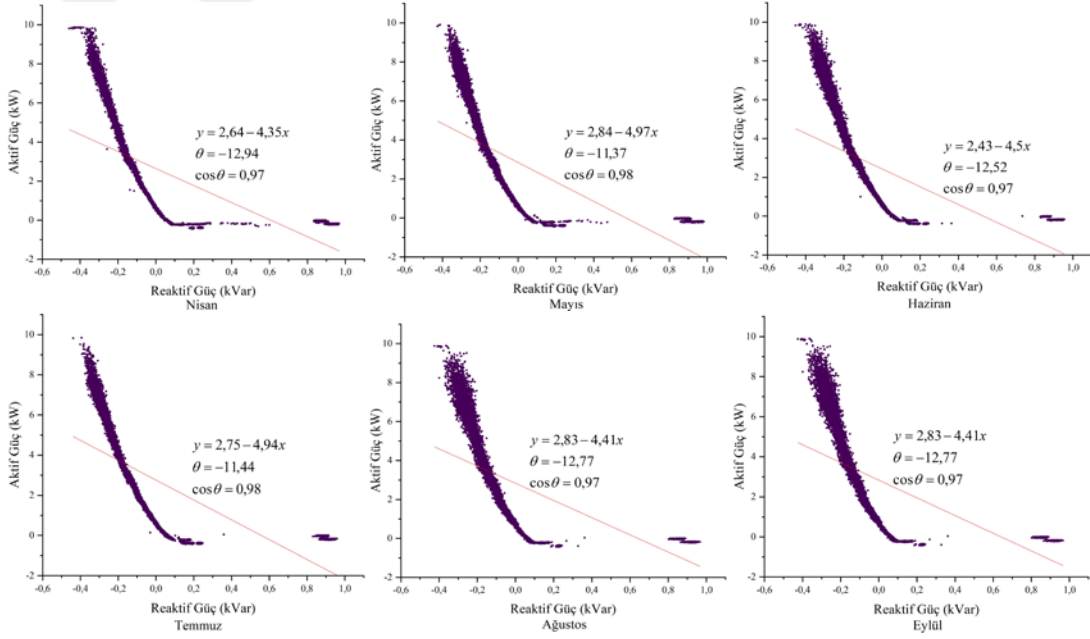
EPDK tarafından yayınlanan şebekede yönetmeliğinde FV tesislerin kurulu güçlerinin 10%'nu geçmediği sürece reaktif güç desteği aranmadığını belirtir. Dizi inverterin şebeke bağlantı noktasındaki aylık ortalama güç faktörü değerleri şekil 7.20'deki grafiklerde görülmektedir. Şekil 7.20'deki grafiklerde aylık ortalama güç faktörü değerleri şebeke yönetmeliğinde belirlenen ve Şekil 4.9'da görülen reaktif güç kapasite eğrisine uymaktadır. Şekil 7.19'de görülen grafikte havanın açık ve güneşli olduğu 30 Ağustos tarihinde bir günlük ölçüm verilerinde dizi inverterli FV tesisin gün doğumu anları haricinde güç faktörlerinin sınır değerlerin içinde kalarak 1 değerine oldukça yakın olduğu görülür. Gün doğumu anlarındaysa gün içerisindeki en düşük değerini alarak sıfıra yaklaşır. Ancak bu anlarda dizi inverterli FV tesis kurulu gücünün 10%'unun altında çalıştığı için reaktif güç desteği aranmaz. Gün doğumlarında şebekeye aktarılan bu reaktif enerji gerilim düşüşlerine neden olabilmektedir.



Şekil 7.18 Dizi inverterin şebeke bağlantı noktasında bileşke reaktif güç



Şekil 7.19 30 Ağustos 2021 tarihinde dizi inverterin şebeke bağlantı noktasında bileşke reaktif güç

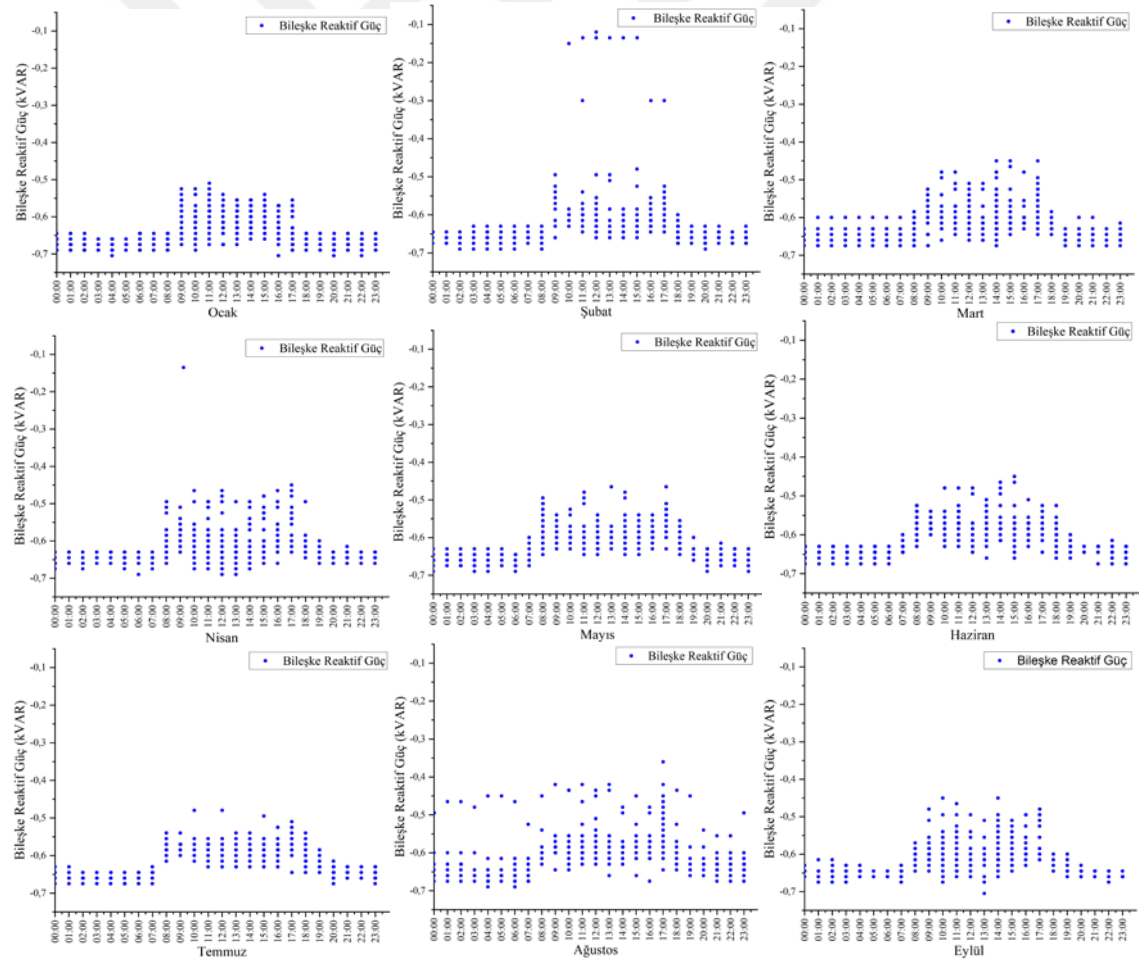


Şekil 7.20 Dizi inverterin şebeke bağlantı noktasında aktif gücün fonksiyonuna bağlı olarak bileşke reaktif güç

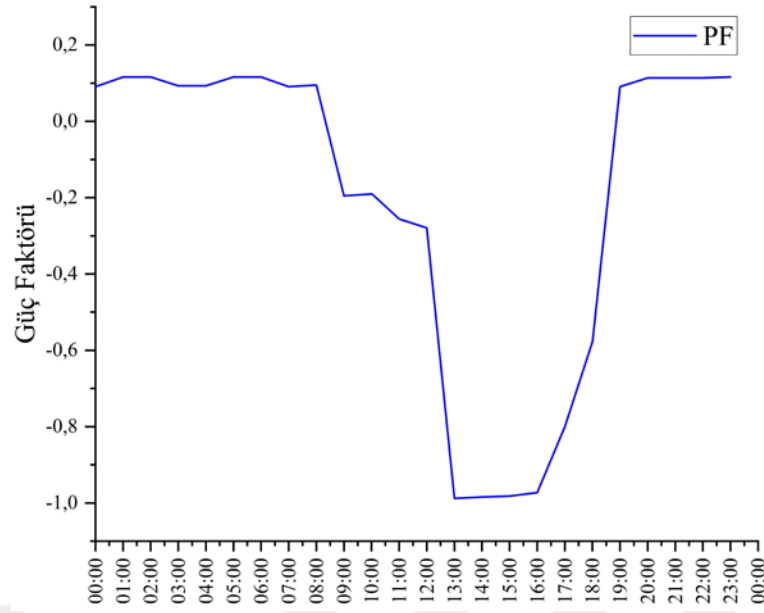
Mikroinverterli sistemin şebeke bağlantı noktasındaki bileşke reaktif güç değerleri şekil 7.21’de, aylık ortalama güç faktörü değerleri ve aktif gücün fonksiyonuna bağlı olarak bileşke reaktif gücü şekil 7.23’teki grafiklerde görülmektedir. Şekil 7.21’deki grafiklerde reaktif gücün daima negatif olduğu yani şebekeden sürekli olarak reaktif güç çektiği ve sadece aktif güç üretiminin arttığı saatler de reaktif gücün biraz düştüğü ancak şebekeden sürekli reaktif güç çekmeye devam ettiği görülür. Bu saatlerde şebekeden çekilen reaktif gücün azalmasında mikroinverterli FV tesis

tarafından üretilen reaktif gücün etkisi olduğu söylenebilir. Mikroinverterli FV tesis şebekeye aktif güç aktardığı ve şebekeden reaktif güç çektiği anlarda endüktif bir kaynak gibi davranırken şebekeden hem aktif hem de reaktif güç çektiği aktif güç üretiminin olmadığı zamanlarda kapasitif bir yük gibi davranır.

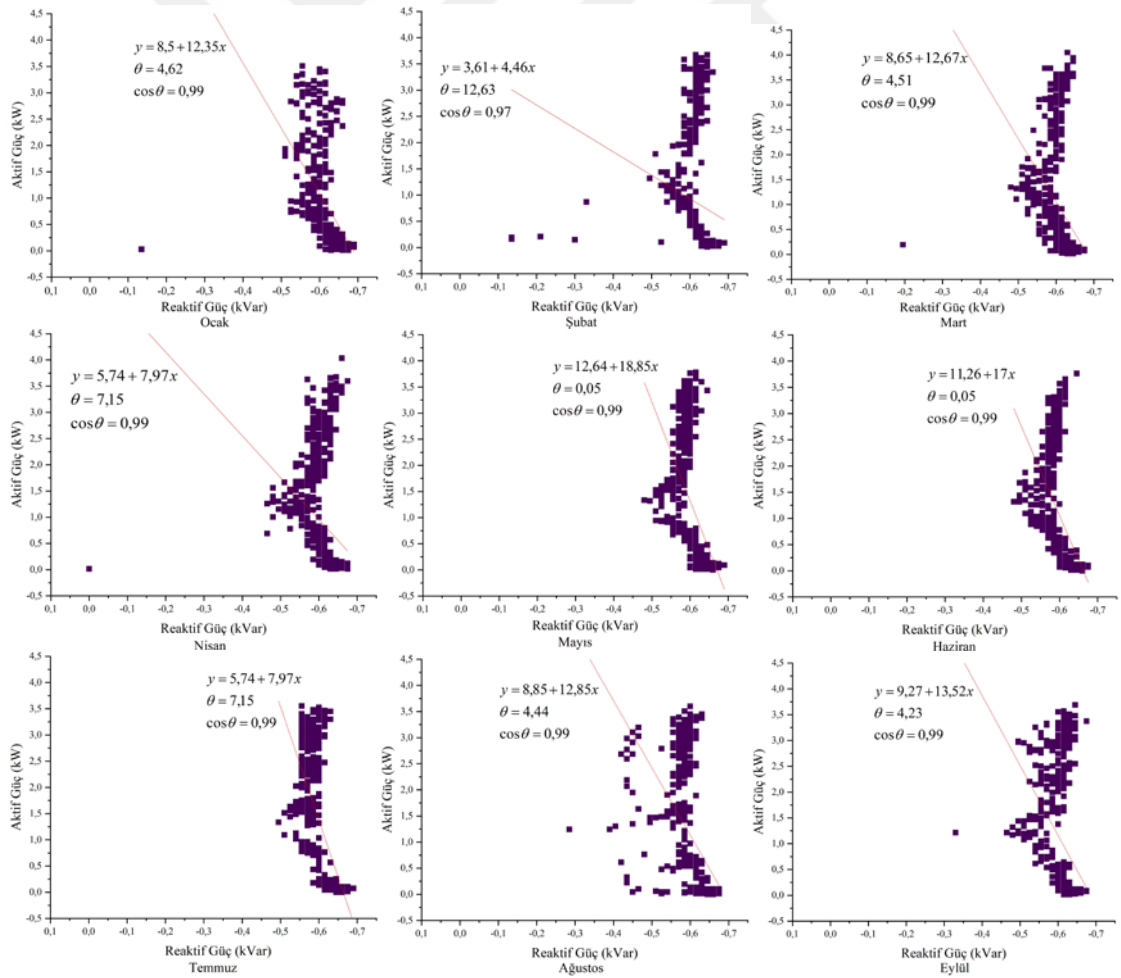
Mikroinverterli sistemin şekil 7.23'te görülen aylık ortalama güç faktörü değerleri şebeke yönetmeliğinde belirlenen ve Şekil 4.9'da görülen reaktif güç kapasite eğrisine uymaktadır. Bir günlük ölçüm verilerinde mikroinverterli FV tesisin gün doğumu ve gün batımı anları haricinde güç faktörlerinin sınır değerlerin içinde kalarak 1 değerine oldukça yakın olduğu görülür. Güç faktörü gün doğumu ve gün batımı anlarında gün içerisindeki en düşük değerini alarak sıfıra yaklaşır. Ancak bu anlarda mikroinverterli FV tesis kurulu gücünün 10%'unun altında çalıştığı için reaktif güç desteği aranmaz.



Şekil 7.21 Mikroinverterli sistemin şebeke bağlantı noktasında bileşke reaktif güç



Şekil 7.22 Kar yağışının etkili olduğu 17 Mart 2021 tarihinde mikroinverterin şebeke bağlantı noktasında güç faktörü



Şekil 7.23 Mikroinverterli sistemin şebeke bağlantı noktasında aktif gücün fonksiyonuna bağlı olarak bileşke reaktif güç

Kar yağışının etkili olduğu 17 Mart 2021 tarihindeki mikroiverterli FV tesise ait şekil 7.22’teki günlük grafikte mikroiverterli sistemin PCC noktasındaki güç faktörü değerleri görülmektedir. Bu grafikte kar yağışının etkili olduğu sabah saatlerinde aktif güç üretiminin düşmesi güç faktörü değerlerinin şekil 4.9’daki sınır değerlerin dışına çıkmasına neden olmuştur. Öğle saatlerinde kar yağışının etkisinin azalması ve aktif güç üretiminin artmasıyla birlikte güç faktörü değerleri -1’e yaklaşarak normale dönmektedir. Şubat, Mart ve Nisan aylarındaki kar yağışlı diğer günler incelendiği zaman benzer değerler ortaya çıkmaktadır. Dizi inverterli FV tesiste Ocak-Nisan döneminde yaşanan veri kaybı, dizi inverterle kar yağışı ve reaktif güç arasında herhangi bir ilişki kurulamamasına neden olmuştur.



8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kesintisiz ve sürekli enerji tedariki günümüz yaşam koşullarının vazgeçilmez gereksinimlerindendir. Enerji tedarikinin herhangi bir nedenle kesintiye uğraması hem günlük yaşamı zorlaştırmakta hem de ülke ekonomilerini olumsuz etkilemektedir. Güneş enerjisinin temiz ve ucuz olması, enerji açığının azaltılması için önemli bir kaynak oluşturmuş ve dolayısıyla FV enerjinin hızla yaygınlaşmasına neden olmuştur. Hızla büyüyen FV tesislerin 75%'inden fazlası Çin, Japonya, ABD, Almanya, Hindistan, İtalya, İngiltere ve Avustralya gibi kar yağışının etkili olduğu ülkelere kurulmuştur (Anadol, 2020). Kar yağışı etkisi altına giren FV tesisler kar yağışının etkisiyle kararsız çalışmakta ve kararsız çalışan tesisler şebekeye ağır yük getirmektedir. Dünya çapında birçok ülke enerji tedarikinin devamlılığını sağlamak, enerji üretim tesislerini ve ekonomik değeri yüksek olan şalt malzemelerini korumak için kararsız çalışan tesislere bazı yasal düzenlemeler yapmaktadır. Bu tez çalışmasında ülkemizdeki ve uluslararası standartlardaki yasal düzenlemeler incelenmiş, aynı alan içerisinde yer alan iki farklı inverter tipine sahip FV tesislerin kar yağışının etkisiyle şebekeye yaptığı etki analiz edilerek yasal uygunlukları denetlenmiştir.

8.1 Sonuçlar

FV tesislerin gün doğumu ve gün batımı anlarında düşen aktif güç üretimleri nedeniyle şebeke bağlantı noktasında artan reaktif güç oranı, gerilim düşüşlerine neden olmaktadır. Kar yağışının olduğu anlarda bu süre uzamakta ve gerilim düşüşleri daha uzun sürmektedir. Dizi inverterin gerilim sapması şiddeti oranları anlık olarak daha fazla olmasına rağmen gün doğumu ve gün batımı anlarında mikroiverterli sistem ile şebeke arasındaki reaktif güç alışverişinin dize invertere oranla fazla olması bu anlarda mikroiverterli sistemde gerilim sapması şiddetinin daha fazla olmasına neden olmuştur. Kar yağışının etkili olduğu üç aylık süreç içerisinde ana panoda ve mikroiverterli sistemde en büyük gerilim düşüşü 17 Mart tarihinde sırasıyla -3.65%, -4% olurken dizi inverterde kar yağışından bağımsız 3 Şubat tarihinde -18,8% azalma olmuştur.

FV tesisler şebekeye bağlı aktif güç üretimi yaparken her iki inverter tipinin de uygun güç faktörü aralıklarında çalıştığı görülür. Mikroiverterli tesisin kurulu gücünün dizi invertere oranla düşük olmasına rağmen şebekeden daha fazla reaktif güç

çekmektedir. Bu duruma tesisteki veri kayıt cihazları, kesintisiz güç kaynağı, tesis alanını gözlemlemek için kullanılan IP kamera ve video kayıt cihazı neden olmuş olabilir.

Mikroinverterli test ve ölçüm sisteminin gerilim harmonik bozulması değerleri dokuz aylık süreçte istikrarlıdır. Eğitim öğretim yılının başlamasıyla birlikte THB değerlerinde bir artış görülse de yıl boyunca sınır değerler hiç aşılmamıştır ve kar yağışlı günlerle THB değeri arasında herhangi bir özellik bulunamamıştır. Bu dokuz aylık süreç boyunca mikroinverterli test ve ölçüm sisteminde maksimum THB değeri yüz yüze eğitim öğretimin başladığı 20 Eylül tarihinde 4.7% çıkmıştır.

Mikroinverterli test ve ölçüm sisteminin akım harmonik bozulması aktif enerji üretimin arttığı anlarda L1, L2 ve L3 fazlarında 20% sınır değer altına inmesi haricinde daima sınır değer üstündedir. Kar yağışının etkili olduğu günlerde mikroinverterli sistemin performansının düşmesine bağlı olarak TTB şiddetinin değerleri artmakta, L1, L2 ve L3 fazlarında sınır değerlerin altında kalan süre azalmaktadır. Kar yağışının etkili olduğu anlarda TTB değerlerinde artışlar görülmesine rağmen dokuz aylık süreç boyunca günlük TTB değerlerinde maksimum bozulma değerleri gün doğumu ve gün batımı anlarında ortaya çıkmaktadır. Dizi inverterli tesiste yaşanan veri kaybı THD ve THB değerlerinin karşılaştırılamamasına neden olmuştur. Ancak ana panoya ait bir günlük TTB grafiklerinde mikroinverterin ana panoya yansıyan TTB değerinin şiddeti hemen hemen mikroinverterli sistemin iki katıdır. Ana panodaki bu TTB değerinin çok yüksek olmasında gün doğumu ve gün batımı anlarında dizi inverterin TTB değerlerinin etkili olmuş olma olasılığı yüksektir. FV tesislerin gerilim dengesizliğiyle ilgili aktif güç üretimi veya kar yağışıyla ilgili herhangi bir ilişki olmadığı tespit edilmiştir.

8.2. Öneriler

FV güç sistemlerinin şebekede neden olduğu etkiyi araştıran bu tez çalışmasında, FV tesislerin şebekedeki etkisiyle ilgili önemli veriler toplanmıştır. Ancak dokuz aylık süreç boyunca pandemi nedeniyle güç talebinin düşük olması, panel yüzeylerinde biriken kar kalınlığının 10 cm'yi geçmemesi toplanan verilerin benzer özellikte olmasına neden olmuştur. Gelecek çalışmalarda farklı güç seviyelerinde, farklı kar kalınlıkları ve yüklerin farklı güç talep oranlarıyla ilgili yapılabilecek çalışmalar ile elde edilen veriler genişletilebilir.

KAYNAKLAR

- A Kiyong Eric K., 2013, Fotovoltaik sistemlerde kullanılan 220v, 50 hz, sabit çıkış gücünde, tek fazlı bir evirici tasarımı”. (Yüksek lisans), *Ankara Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-78.
- Anadol, M. A., & Erhan, E. (2019). The effect of snowfall and icing on the sustainability of the power output of a grid-connected photovoltaic system in Konya, Turkey. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 27(6), 4608-4623.
- Anadol, M. A. (2020). Snow melting on photovoltaic module surface heated with transparent resistive wires embedded in polyvinyl butyral interlayer. *Solar Energy*, 212, 101-112.
- Anonim1, 2012, Elektrik Dağıtımı Ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği, *Resmi Gazete*, 28504.
- Anonim2, 2014, Elektrik Şebeke Yönetmeliği, *Resmi Gazete*, 29013.
- Anonymous1, 2000, IEEE Std 929-2000, IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) systems, IEEE Std.
- Anonymous2, 2011, 50160:2011, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks.
- Anonymous3, 2014, IEEE Std 519-2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Std.
- Anonymous4, 2015, IEEE Std 1453-2015, IEEE Recommended Practice for the Analysis of Fluctuating Installations on Power Systems, IEEE Std.
- Anonymous5, 2018, IEEE Std 1547-2018, IEEE Standart for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces, IEEE Std.
- Anonymous6, 2019, IEEE Std 1159-2019, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Std.
- Aprilia, E. C. (2012). Modelling of photovoltaic (PV) inverter for power quality studies. *M. Sc. Dissertation, Dept. Elec. Eng., Univ. Technology, Eindhoven, Netherland*.
- Aristizabal, A. J., & Gordillo, G. (2008). Performance monitoring results of the first grid-connected BIPV system in Colombia. *Renewable Energy*, 33(11), 2475-2484.
- Aristizábal, A. J., & Páez, C. A. (2018). Power quality analysis of 6 kW building-integrated photovoltaic system and economic evaluation using RETScreen™. *International Journal of Ambient Energy*, 39(8), 813-822.

- Atasal M., 2000, Güç kalitesi ve flikerler [online], İTÜ Akademik Açık Arşiv, <http://hdl.handle.net/11527/10591> [Ziyaret Tarihi: 03 Mart 2021].
- Barutçu, İ. Ç., 2014, Fotovoltaik tabanlı dağıtılmış enerji üretim sistemlerinin elektrik şebekeleri üzerindeki harmonik kaynaklı etkilerinin incelenmesi ve optimizasyonu”. (Yüksek lisans), *Ege Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bornova-İzmir, 1-147.
- Bollen, M. H. (2000). Understanding power quality problems. In *Voltage sags and Interruptions*. IEEE press.
- Brinkel, N. B. G., Gerritsma, M. K., AlSkaif, T. A., Lampropoulos, I., van Voorden, A. M., Fidder, H. A., & van Sark, W. G. J. H. M. (2020). Impact of rapid PV fluctuations on power quality in the low-voltage grid and mitigation strategies using electric vehicles. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 118, 105741.
- Cuong, N. X., & Do Nhu, Y. (2019). Power quality analysis of the grid-connected PV system using microinverter.
- Çakır, H. Elektrik güç sistemleri analizi, Yy, 1986.
- Elbasuony, G. S., Aleem, S. H. A., Ibrahim, A. M., & Sharaf, A. M. (2018). A unified index for power quality evaluation in distributed generation systems. *Energy*, 149, 607-622.
- Erhan E. 2019, Fotovoltaik Güneş Enerji Sistemlerinin Güç Çıkışının Sürdürülebilirliği Üzerinde Kar Yağışının Etkisinin İncelenmesi”. Yüksek Lisans), *Konya Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Konya, 1-79.
- Farhoodnea, M., Mohamed, A., Shareef, H., & Zayandehroodi, H. (2013). Power quality analysis of grid-connected photovoltaic systems in distribution networks. *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 2013, 208-213.
- Gallo, D., Landi, C., & Luiso, M. (2012, May). AC and DC power quality of photovoltaic systems. In *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings* (pp. 576-581). IEEE.
- González, P., Romero-Cadaval, E., González, E., & Guerrero, M. A. (2011, February). Impact of grid connected photovoltaic system in the power quality of a distribution network. In *Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems* (pp. 466-473). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Gonzalez, C., Geuns, J., Weckx, S., Wijnhoven, T., Vingerhoets, P., De Rybel, T., & Driesen, J. (2012, October). LV distribution network feeders in Belgium and power quality issues due to increasing PV penetration levels. In *2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)* (pp. 1-8). IEEE.

- Hosseini, S., Taheri, S., Farzaneh, M., & Taheri, H. (2018). Modeling of snow-covered photovoltaic modules. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(10), 7975-7983.
- Jayasekara, N., & Wolfs, P. (2010, December). Analysis of power quality impact of high penetration PV in residential feeders. In *2010 20th Australasian Universities Power Engineering Conference* (pp. 1-8). IEEE.
- Kakilli, A., Tunçalp, K., & Sucu, M. (2008). Harmoniklerin Reaktif Güç Kompanzasyon Sistemlerine Etkilerinin incelenmesi ve Simülasyonu. *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 20(1), 109-115.
- Kalay A., 2008, Muğla Üniversitesi Yerleşkesinde Bulunan 15 KWp Kurulu Güce Sahip Fotovoltaik (PV) Sistemin Güç Kalitesinin İncelenmesi Ve Şebeke Karakteristikleri İle Karşılaştırılması”. (Yüksek Lisans), *Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Anabilim Dalı*, Muğla, 1-107.
- Keçecioglu, Ö. F., Tekin, M., Ahmet, G. A. N. İ., AÇIKGÖZ, H., Gemci, A., & Şekkeli, M. (2015). Bir Güneş Enerji Santralinin Elektrik Şebekesindeki Güç Kalitesi Parametrelerine Etkisinin İncelenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(2), 17-24.
- Kopicka, M., Ptacek, M., & Toman, P. (2014, June). Analysis of the power quality and the impact of photovoltaic power plant operation on low-voltage distribution network. In *2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)* (pp. 99-102). IEEE.
- KÜRKER, F., TAŞALTIN, R., & KARADAĞ, K. (2018). Elektrik Tesisinde Harmonik İncelemesi ve Harmonik Filtreli Kompanzasyon. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3), 43-51.
- Liang, X. (2016). Emerging power quality challenges due to integration of renewable energy sources. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(2), 855-866.
- Liu, Z., Xu, X., Abdelsalam, H. A., & Makram, E. (2015). Power system harmonics study for unbalanced microgrid system with PV sources and nonlinear loads. *Journal of Power and Energy Engineering*, 3(05), 43.
- Mondol, J. D., Yohanis, Y., Smyth, M., & Norton, B. (2006). Long term performance analysis of a grid connected photovoltaic system in Northern Ireland. *Energy Conversion and management*, 47(18-19), 2925-2947.
- Notton, G., Lazarov, V., & Stoyanov, L. (2010). Optimal sizing of a grid-connected PV system for various PV module technologies and inclinations, inverter efficiency characteristics and locations. *Renewable Energy*, 35(2), 541-554.
- Obi, M., & Bass, R. (2016). Trends and challenges of grid-connected photovoltaic systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1082-1094.

- Oliva, A. R., & Balda, J. C. (2003). A PV dispersed generator: a power quality analysis within the IEEE 519. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(2), 525-530.
- Ortega, M. J., Hernández, J. C., & García, O. G. (2013). Measurement and assessment of power quality characteristics for photovoltaic systems: Harmonics, flicker, unbalance, and slow voltage variations. *Electric Power Systems Research*, 96, 23-35.
- Ourahou, M., Ayir, W., Hassouni, B. E., & Haddi, A. (2020). Review on smart grid control and reliability in presence of renewable energies: Challenges and prospects. *Mathematics and computers in simulation*, 167, 19-31.
- Özcan, M., (2019), Fotovoltaik güç sistemleri performansına kar etkisinin modelleme ile incelenmesi”, (Yüksel Lisans), *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Güneş Enerjisi Anabilim Dalı Enerji Teknolojisi Yüksek Lisans Programı*, İZMİR, 1-95.
- Patsalides, M., Evagorou, D., Makrides, G., Achillides, Z., Georghiou, G. E., Stavrou, A., ... & Werner, J. H. (2007, March). The effect of solar irradiance on the power quality behaviour of grid connected photovoltaic systems. In *International Conference on Renewable Energy and Power Quality* (pp. 1-7).
- Patsalides, M., Stavrou, A., Efthymiou, V., & Georghiou, G. E. (2012). Towards the establishment of maximum PV generation limits due to power quality constraints. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 42(1), 285-298.
- Raj, R. D. A., & Bhattacharjee, S. (2020, February). Short-Circuit Fault Analysis of Three-Phase Grid Integrated Photovoltaic Power System. In *2020 International Conference on Power Electronics & IoT Applications in Renewable Energy and its Control (PARC)* (pp. 231-236). IEEE.
- Renukadevi, V., & Jayanand, B. (2015). Harmonic and reactive power compensation of grid connected photovoltaic system. *Procedia Technology*, 21, 438-442.
- Qiu, Y., Yuan, C., Sun, Y., & Tang, X. (2018). Power quality analysis for ship-photovoltaic power system: a case study. *Electric Power Components and Systems*, 46(11-12), 1375-1386.
- Salam, Z., Ramli, Z., Ahmed, J., & Amjad, M. (2015). Partial shading in building integrated PV system: Causes, effects and mitigating techniques. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 6(4).
- Sikorski, T. (2015, June). Power quality in low-voltage distribution network with distributed generation. In *2015 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC)* (pp. 1-9). IEEE.
- Şahin, M., Oğuz, Y., O., Tuğcu H., Z., 2014, Güç sistemlerinde enerji kalitesini etkileyen harmoniklerin incelenmesi. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(2), 199-218.

- Şimsek, B. ve Bizkevelci, E., 2013, Fotovoltaik Güneş Elektrik Santrallerinin Alçak Gerilim Şebekesine Bağlantı Esasları, 3. *Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi*, İzmir, 1-24.
- Tanrıverdi, Ö. (2015), Fotovoltaik güç santrali bağlı bir şebekede güç kalitesi ölçümleri”, (Yüksek lisans), *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü-Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı*, ANKARA, 1-99.
- Tepecik Esen, K. (2020), Güneş Enerji Santralinin Elektrik Şebekesi Güç Kalitesine Etkisinin Belirlenmesi Ve Röle Koordinasyon Analizi”, (Yüksek lisans), *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü-Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı*, ANKARA, 1-99.
- 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.
- 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 (IJRER)*, 5(1), 121-132.
- Vannoy, D. B., McGranaghan, M. F., Halpin, S. M., Moncrief, W. A., & Sabin, D. D. (2005, September). Roadmap for power quality standards development. In *Record of Conference Papers Industry Applications Society 52nd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference* (pp. 267-276). IEEE.

EKLER

EK-1 10 kW anma gücüne sahip ABAX marka üç fazlı hibrit inverterin karakteristik özellikleri⁸

Anma Gücü	10000 W
Maksimum DC Gücü	14850 W
Anma DC Gerilimi	720 VDC
Maksimum DC Gerilimi	900 VDC
DC Çalışma Gerilimi Aralığı	300 VDC ~ 900 VDC
Başlangıç Gerilimi / Başlangıç Besleme Gerilimi	320 VDC / 350 VDC
MPP Gerilimi Aralığı / Tam Yük MPP Gerilimi Aralığı	350 VDC ~ 850 VDC / 400 VDC ~ 800 VDC
Maksimum Giriş Akımı	2*18.6 A
I _{sc} PV	25 A
İnverter geri besleme akımı	0 A
Anma Çıkış Gerilimi	230 VAC (F-N) / 400 VAC (F-F)
Çıkış Gerilimi Aralığı	184 - 265 VAC (Faz Başına)
Çıkış Frekansı Aralığı	47.5 ~ 51.5 Hz
Çıkış Anma Akımı	14.5 A (Faz Başına)
Çıkış Ani Akım/Süre	17 A (Faz Başına) / 20ms
Çıkış Maksimum Arıza Akımı /Süresi	51 A (Faz Başına)/ 1ms
Çıkış Maksimum Aşırı Akım Koruması	51 A (Faz Başına)
Güç Faktörü Aralığı	0.9 ileri – 0.9 geri
AC Çalışma Gerilimi	120-140 VAC (Faz Başına)
Otomatik Yeniden Başlama Gerilimi	180 VAC (Faz Başına)
Kabul Edilebilir Giriş Gerilimi Aralığı	170 - 280 VAC (Faz Başına)
Anma Frekansı	50 Hz / 60 Hz
AC giriş Gücü	10000VA/10000W
Maksimum AC Giriş Akımı	40 A
Giriş Ani Akım/Süre	40 A / 1ms
Batarya Çıkış Anma Gerilimi	230 VAC (F-N) / 400 VAC (F-F)
Batarya Çıkış Frekansı	50 Hz / 60 Hz (otomatik algılama)
Bataya Çıkış Dalga Şekli	Saf Sinus Dalgası
Batarya Çıkış Gücü	10000VA/10000W
Batarya Verimi (DC'den AC'ye)	91%
Batarya Gerilimi Aralığı	40 – 60 VDC
Batarya Anma Gerilimi	48 VDC
Batarya Maksimum Deşarj Akımı	275 A
Batarya Maksimum Şarj Akımı	200 A
İletişim Portu	RS-232/USB
Slot	Optional SNMP, Modbus and AS-400 cards available

⁸ <https://solaravm.com/images/uploaded/ABAX%20PDF/Abax-Trigen%20Inverter.pdf>

EK-2 MULTISER-XX-TFT şebeke analizörü teknik özellikleri⁹

İşletme Gerilimi(Un)	(Faz-Nötr) 230Vac
İşletme Aralığı	(0,8-1,1) x Un
İşletme Frekansı	50/60 Hz
Besleme Güç Tüketimi	< 6VA
Ölçme Girişlerinin Güç Tüketimi	< 1VA
V _{in}	1 – 300 Vac (L-N)
I _{in}	2 – 600 Vac (L-L)
Ölçme Sınıfı	CAT III
Gerilim Trafosu Oranı	1 4000
Akım Trafosu Oranı	1 5000 (25000/5A)
Bağlantı Tipi	3P&4W , 3P&3W , ARON
Ölçme Aralığı	1,0V - 400,0 kV 0,001A 25000 A 0 – 9,9 G (W,VAR,VA) 0 – 999,9 M (W,VAR,VA) 0 – 999,9 k (W,VAR,VA) 0-999.999.999,999 (Gwh,GVARh,GVAh)
Doğruluk	
Gerilim	1 class
Akım	1 class
Aktif Güç	1 class
Reaktif Güç	2 class
Görünür Güç	1 class
Röle Çıkışları (2 adet)	2 NO ve max.3A/240 Vac
Pals Çıkışları (2 adet)	
Çalışma Gerilimi	5 – 24Vdc max. 30Vdc
Çalışma Akımı	max 50 mA
Demand Zamanı	1 – 600 dk
Min. Anahtarlama Zamanı	100 msn

⁹ <https://www.kael.com.tr/pdfler/MULTISER-xx-PC-TFT%20EI%20Kitab%C4%B1.pdf>

EK-3 2x360 W anma gücüne sahip NEP marka üç fazlı mikroinverterin karakteristik özellikleri¹⁰

GİRİŞ (DC)	Önerilen Maksimum PV Gücü (Wp)	360 x 2		
	Maks DC Açık Devre Gerilimi (Vdc)	60		
	Maks DC Giriş Akımı (Adc)	12 x 2		
	MPPT İzleme Doğruluğu	>99.5%		
	MPPT Takip Aralığı (Vdc)	22-55		
	I _{sc} PV (mutlak maksimum) (Adc)	14 x 2		
	İnverter Maksimum Geri Besleme Akımı (Adc)	0		
ÇIKIŞ (AC)	AC Çıkış Tepe Gücü (Wp)	550		
	Anma AC Çıkış Gücü (Wp)	500		
	Anma Gücü Şebeke Gerilimi (Vac)	240	208	230
	İdeal Güç Şebeke Gerilimi (Vac)	211-264*	183-229*	yapılandırılabilir *
	İdeal Güç Frekansı (Hz)	59.3-60.5*		yapılandırılabilir *
	THB	<3% (Anma Gücünde)		
	Güç Faktörü (cos phi, sabit)	>0.99 (Anma Gücünde)		
	Anma Çıkış Akımı (Aac)	2.08	2.40	2.17
	Ani Akım (Tepe Değeri ve Süre)	24A, 15us		
	Anma Frekansı (Hz)	60		50
	Maksimum Arıza Akımı (Aac)	4.4A peak		
	Maksimum Aşırı Akım Koruması (Aac)	10		
Verimlilik	Ağırlıklı Ortalama Verimlilik	95.5%		

¹⁰ <http://www.northernep.com>

EK-4 ENTES MPR63 marka şebeke analizörü teknik özellikleri¹¹

Frekans	50/60 Hz
Besleme Girişi Güç Tüketimi	< 6 VA
Ölçme Girişleri Güç Tüketimi	< 1 VA (Akım Girişi) < 0.5 VA (Gerilim Girişi)
Vin	1 - 300 VAC (L-N) 2 - 500 VAC (L-L)
Iin	0.005 - 5.5 A~
Ölçme Aralığı	1,0 V - 400,0 kV 0.005...10000 A 0 - 4000 M (W, VAr, VA) 0-99 999 999 kWh, kVArh veya MWh, MVARh
Ölçme Sınıfı	CAT III
Doğruluk	
Gerilim, Akım	%0.5±2digit
Aktif Güç	%1±2digit
Reaktif, Görünür Güç	%2±2digit
Gerilim Trafosu Çeviri Oranı	1...4000.0
Akım Trafosu Çeviri Oranı	1...5000
Bağlantı Tipi	3P4W, 3P3W, ARON
Röle Çıkışları (2 adet)	2 NO, 5A 1250 VA
Demand Zamanı	15 dakika
Haberleşme	MODBUS RTU (RS 485)

¹¹ https://www.entes.com.tr/uploads/files/20201215-MPR6X%20_Kullan%C4%B1m-K%C4%B1lavuzu-TR_R3.pdf

EK-5 AEL.TF.21 Köhler marka çift yönlü sayacın teknik özellikleri¹²

Sayaç Tanımı	Fazlı, 4 Telli, 4 Tarifeli, Demantmetreli, Bina Dışı, Aktif- Reaktif-Kapasitif Elektronik Elektrik Sayacı
Doğruluk Sınıfı	Aktif: C, Reaktif: 2
Referans Voltajı	3x230/400 V
Çalışma Gerilim Aralığı	3x35 / 60V (Minimum) - 3x420 / 727V (Maksimum)
Referans Frekans (Fn)	50 Hz $\pm$ %5
Minimum Akım (Imin)	0,1A
Maksimum Akım (Imax)	100A
Devreye Bağlama Şekli	Direkt
Darbe Gerilimi	6 kV
Veri Depolama Kapasitesi	1 Yıl
Gerilim Devresi Güç Tüketimi	$\leq$ 1W
İlgili Standartlar	TS EN 62053-23, TS EN 50470-1, TS EN 50470-3

¹² <http://www.kohlersayac.com.tr/insertpdfs/rgbs/AEL.TF.21.pdf>