

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

**ŞEBEKEYE BAĞLI FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE
GÜÇ KALİTESİNİN DENEYSEL ANALİZİ VE
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Mozhgan MOAZZEN ZADEH

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hayati OLGUN

İkinci Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Hacer ŞEKERCİ

Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi: 09.01.2018

Bornova-İZMİR

2018

Mozhgan MOAZZEN ZADEH tarafından doktora tezi olarak sunulan “Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemlerde Güç Kalitesinin Deneysel Analizi ve Değerlendirilmesi” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 09.01.2018 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Arif HEPBAŞLI

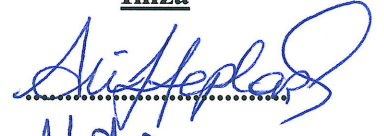
Raportör Üye: Prof. Dr. Hayati OLGUN

Üye : Prof. Dr. Mustafa GÜNEŞ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nalan ÖZKURT

Üye : Yrd. Doç. Dr. Abdül BALIKCI

İmza


.....

.....

.....

.....

.....

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Sistemlerde Güç Kalitesinin Deneysel Analizi ve Değerlendirilmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

09/01/2018



Mozhgan MOAZZEN ZADEH

ÖZET**ŞEBEKEYE BAĞLI FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE GÜÇ
KALİTESİNİN DENEYSEL ANALİZİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

MOAZZEN ZADEH, Mozhgan

Doktora Tezi, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hayati OLGUN

İkinci Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Hacer ŞEKERCİ

Ocak 2018, 97 sayfa

Son yıllarda, geleneksel enerji kaynaklarının giderek tükenmesi ve dalgalanan yakıt maliyeti, yenilenebilir enerji kaynağı olan fotovoltaik (FV) panellerin hızla yaygınlaşmasına neden olmuştur. Diğer taraftan da gelişen teknoloji ile elektronik temelli hassas cihazların hayatımızdaki yerinin artması ile güç kalitesi kavramı en güncel araştırma konularından birisi haline gelmiştir. Güç kalitesi problemleri elektrik şebekesi üzerinden dağılıp birçok tüketiciyi yakından ilgilendirdiğinden önemsenmektedir. Dolayısıyla en geniş kitleyi etkileyen problem ise harmonik ve onların yanı sıra ara-harmonikler olup güç kalitesi sorunlarının başında gelen endişelerdir. Bu nedenlerden dolayı bu kaygıları gidermeye yönelik kapsamlı bir araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında, güç kalitesi problemlerinden en yaygın olanı harmonik ve ara-harmonikleri fotovoltaik sistemlerde analiz etmek adına, iki farklı ülkede kurulmuş olan iki farklı fotovoltaik sistemde ölçümler yapılmıştır. Bu ölçüm sonuçları olarak harmonik bozulma değerlerinin Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC-61000) ve Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE-519) standartlarına göre değerlendirmesi ve FV sistemlerde harmonik yaratan bileşen olarak invertörlerin detaylı analizi yapılmıştır. Fotovoltaik invertörün güç elektroniği devresini temsil etmek için harmonik kaynak içeren bir model önerilmiş ve bu modelin simülasyonu ve diğer yandan laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneyler ile doğrulanması yapılmıştır. Son aşamada ise, şebeke kaynaklı harmoniklerin FV sistemlerle nasıl bir etkileşim içinde olacağının incelenmesi

adına deneysel çalışmalara devam edilmiştir. İnvörtörlerin bir harmonik kaynağı olduğı tesbit edilmiş, fakat sonuç olarak dağıtım şebekesine enjekte ettikleri harmonik ve ara-harmonik bozulumlarının büyük bir kaygı oluşturmadığı belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Fotovoltaik sistemler, güç kalitesi, harmonik, ara-harmonik, FV invörtör.



ABSTRACT**EXPERIMENTAL ANALYSIS AND EVALUATION OF POWER
QUALITY IN GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS**

MOAZZEN ZADEH, Mozhgan

Ph.D in Solar Energy Department

Supervisor: Prof. Dr. Hayati OLGUN

Co-Supervisor: Asst. Prof. Dr Hacer ŞEKERCİ

January 2018, 97 pages

In recent years, due to the depletion of conventional energy resources and fluctuating fuel costs, there has been a rise in photovoltaic (PV) panels as a renewable energy source being used within distribution networks. With continuous advancements in technology and increasingly sensitive electronics-based devices in our daily lives, the concept of power quality has become a prevalent research topic. Power quality problems, spread throughout a distribution system could affect a large number of consumers, hence, the most important concerns about power quality that can affect the widest group of people are harmonics and inter-harmonics. Therefore, a comprehensive investigation is needed to evaluate the seriousness of these concerns.

In this thesis, in order to analyze the most common problems of power quality, harmonics and interharmonics, measurements are made in two different photovoltaic (PV) systems installed in two different countries. Using the measured results, it is investigated whether harmonics and interharmonics are harmful or not and whether they meet The International Electrotechnical Commission (IEC-61000) and The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE-519) standards. These measurement results are used to evaluate the harmonics distortion values according to the mentioned standards. Also, a detailed analysis of inverters as a harmonic generating component in PV systems is performed. A model is

premised as a harmonic source to signify of the power circuit of the Photovoltaic inverters and then this model is verified by simulation and experiments performed in the laboratory environment. Lastly, experimental studies have been carried out in order to investigate how the harmonics from the grid will interact with the PV systems. It has been determined that the inverters are a harmonic source but, it is has been concluded that harmonics and interharmonics distortions injected into the distribution network do not create a major concern.

Key words: Photovoltaic systems, power quality, harmonics, interharmonics, PV inverters.



TEŞEKKÜR

Değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Hayati OLGUN'a tez çalışması boyunca hep yanımda olduğundan dolayı minnettarlığımı ve öğrencisi olmanın ayrıcalığına sahip olmaktan hayatım boyunca gurur duyacağımı belirtmek isterim.

İkinci danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Hacer ŞEKERCİ'ye, tüm engelleri bu çalışma esnasında önümden kaldırdığı için ve kendisi olmadan bu tezin yapılmasının çok zor olacağını ve yazılmayacağını belirterek sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bitmek bilmeyen sabrı ve pozitif enerjisiyle en büyük destekçim olan sevgili eşim Joel BACON'a,

Hayatım boyunca maddi manevi her konuda arkamda duran ve hep bana inandıkları için en değerli varlıklarım sevgili annem Raziye ve babam Mahmoud MOAZZEN ZADEH'ye,

Beni hep motive eden eşimin ailesi Mona ve James BACON'a,

Sevgi ve destekleri için ne kadar teşekkür etsem yetersizdir.

Sayın Yrd. Doç. Dr. Nalan ÖZKURT'a bilgisini ve desteğini benden hiç esirgemediği için,

Jüri üyesi sayın Prof. Dr. Mustafa GÜNEŞ'e bu zorlu yolda katkılarından dolayı,

Saha ölçümleri için tüm desteği sağlayan sayın Dr. Oğuz PERİNCEK ve İzmir'de Tekpa firmasından Sayın Mak. Müh. Erhan ŞAHYARA ve Kanada'da Northern Alberta Institute of Technology Renewable Energy bölüm başkanı sayın Dr. Jim SANDERCOCK ve Sayın Tim MATTHEWS'a,

Teşekkürü bir borç bilirim.

Mozhgan MOAZZEN ZADEH

İZMİR 2018

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Yenilenebilir Enerji Sistemlerde Güç Kalitesi.....	2
1.1.1 Güç kalitesi problemleri.....	3
1.2 Harmonikler ve Ara-harmonikler	4
1.2.1 Harmonik ve ara-harmonik nedenleri	4
1.2.2 Harmonik tanımı	5
1.2.3 Ara-harmonik tanımı	6
1.2.4 Harmonik ve ara-harmonik etkileri	7
1.3 Harmonik ve Ara-harmoniklerin Matematiksel Tanımı	8
1.4 Harmonik ve Ara-harmonik Standartları	11

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

1.4.1 IEEE-519 standardı	11
1.4.2 IEC-61000 standardı	13
1.5 Harmonik Bileşenlerin Kavramları	14
1.5.1 Toplam harmonik bozulma (THB)	14
1.5.2 Toplam talep bozulma (TTB)	15
2. LİTERATÜR TARAMASI	16
3. HARMONİK VE ARA-HARMONİK YÖNTEM VE ÖLÇÜMLER	22
3.1 İzmir-Gazimir (Türkiye) Ölçümleri ve Sonuçları	23
3.1.1 İzmir-Gazimir harmonikleri	25
3.1.2 İzmir-Gazimir ara-harmonik ölçümleri	31
3.2 Kanada-Edmonton Ölçümleri ve Sonuçları	34
3.2.1 Kanada-Edmonton harmonik ve ara-harmonik ölçüm sonuçları	36
4. FV İNVERTÖR ÇÖZÜMSEL HARMONİK MODELİ ÖNERİSİ	41
4.1 FV İnvertör Harmonik Model Çeşitleri	42
4.2 FV İnvertör Harmonik Model Önerisi	48

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.2.1 Tek faz PWM invertör anahtarlama fonksiyonu.....	50
4.3 FV İnvörtör Filtre Seçimi	55
5. FV İNVERTÖRÜN ÖNERİLEN HARMONİK MODELİNİN SİMÜLASYON DOĞRULAMA ÇALIŞMASI.....	59
5.1 Simülasyon Sonuç ve Analizleri.....	63
6. LABORATUVAR DOĞRULAMA ÇALIŞMASI.....	67
6.1 Deney Uygulaması.....	70
6.2 Ölçüm Sonuçları ve Analizleri	72
7. FV İNVERTÖRLERİN DAĞITIM SİSTEMLERİ ÜZERİNDEKİ HARMONİK ETKİSİ.....	76
7.1 FV İnvörtör ve Evdeki Elektrik Cihazlar Modeli İle Genel Harmonik Etkisi .	79
7.2 Konut İçi Elektrikli Aletlerinin Davranış Modelleri.....	80
7.3 FV İnvörtörlerin Dağıtım Sistemleri Üzerindeki Harmonik Etki Sonuçları	85
8. GENEL DEĞERLENDİRME VE YARGILAR	87
9. SONRAKİ ÇALIŞMALAR İÇİN TAVSİYELER.....	89
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	90

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Harmonikler ve akımın harmonik sıraları örneği	6
1.2 Harmonik, ara-harmonik grup ve alt grup hesaplamalarının gösterimi	8
1.3 IEC 6100-4-7'ye göre genel spektrum çözünürlüğü (50-Hz için)	9
1.4 Harmonik gruplar 50-Hz için	9
1.5 Ara-harmonik alt gruplar	10
3.1 Türkiye'nin yakıt cinslerine göre kurulu elektrik gücü (MW)	22
3.2 İzmir-Gaziemir FV sistemi	23
3.3 İzmir-Gaziemir pano ve invertörler	24
3.4 Fluke 435 analizörün bağlantı şekli	24
3.5 Akım ve gerilimlere ait toplam harmonik histogramı 50'inci harmoniğe kadar	25
3.6 Akım ve gerilimlere ait toplam harmonik histogramı	26
3.7 3-faz gerilimlere ait 3'üncü harmonik	27

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.8 3-faz gerilimlere ait 5'inci harmonik	27
3.9 3-faz gerilimlere ait 7'inci harmonik	28
3.10 Gerilimlere ait THB değerleri	28
3.11 3-faz akıma ait 3'üncü harmonik	29
3.12 3-faz akıma ait 5'inci harmonik	30
3.13 3-faz akıma ait 7'inci harmonik	30
3.14 Akıma ait THB değerleri	31
3.15 Akım ve gerilimlere ait toplam ara-harmonik histogramı	32
3.16 3-faz gerilime ait ara-harmonikler	33
3.17 3-faz akıma ait ara-harmonikler	33
3.18 Kanada-Edmonton güneş enerji sistemi	34
3.19 Kanada-Edmonton güneş enerji sistem panelleri	34
3.20 Kanada-Edmonton güneş enerji sistem özellikleri	35

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

3.21 Kanada-Edmonton güneş enerji sisteminde Fluke 434 bağlantıları.....	35
3.22 Kanada-Edmonton gerilim harmonikleri	36
3.23 Kanada-Edmonton L1 ve L2 için ayrı ayrı gerilim harmonikleri	36
3.24 Kanada-Edmonton akım harmonikleri	37
3.25 Kanada-Edmonton L1 ve L2 için ayrı ayrı akım harmonikleri	37
3.26 Kanada-Edmonton L1 fazı haftalık gerilim harmonikleri.....	38
3.27 Kanada-Edmonton L2 fazı haftalık gerilim harmonikleri.....	38
3.28 Kanada-Edmonton L1 fazı haftalık akım harmonikleri	39
3.29 Kanada-Edmonton L2 fazı haftalık akım harmonikleri	39
4.1 FV İnvörtör Norton eşdeğer modeli	43
4.2 Şebekeye bağlı FV invörtörün tam modeli.....	44
4.3 Avrupa konut dağıtım şebeke modeli.....	47
4.4 Avrupa ve Kanada dağıtım şebekeleri	48

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.5 Şebeke bağlantılı FV invertör	49
4.6 Tek-fazlı PWM invertör.....	49
4.7 Örnekleme yöntemi ve PWM anahtarlama fonksiyonu.....	51
4.8 Örnekleme yöntemi ve PWM anahtarlama fonksiyon sonuçları	52
4.9 Anahtarlama fonksiyonunun harmonik tam spektrumu.....	53
4.10 Anahtarlama fonksiyonunun harmonik spektrumu: kısmi genlik.....	53
4.11 Uniform yöntemi için farklı frekanslarda anahtarlama fonksiyonunun harmonik spektrumu	54
4.12 FV invertör harmonik modeli	57
4.13 FV invertör harmonik modeli filtre topolojisi ile	57
5.1 Simülasyonu yapılan şebeke bağlantılı FV invertörü	59
5.2 I_{pcc} 'nin harmonik spektrumu (Sinüsoidal şebeke gerilimi etkisi altında)	63
5.3 I_{pcc} 'nin harmonik spektrumu (Şebeke harmonik gerilimi etkisi altında)	64

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.1 FV invertörün ön paneli	67
6.2 FV invertör iç devresi.....	67
6.3 FV invertör üzerinde yazılan parametreler.....	68
6.4 Deney devre topolojisi	69
6.5 FV invertör devre topolojisi.....	70
6.6 Deney düzeneğinin eşdeğer devresi	71
6.7 FV entegrasyonunun deney sisteminin enstrüman kurulum	71
6.8 PCC geriliminin harmonik (V_{pcc-h}) genlik spektrumu	73
6.9 PCC geriliminin harmonik (V_{pcc-h}) faz açısı spektrumu	73
6.10 İnvörtör köprü geriliminin (V_{pwm-h}) harmonik genlik spektrumu	74
6.11 İnvörtör köprü geriliminin (V_{pwm-h}) harmonik faz açısı spektrumu	74
7.1 FV entegrasyonu ile Kuzey Amerika ikincil dağıtım sistemi	77
7.2 Konut modeli, FV invertör filtre modeli ile.....	80

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.3 Konut modeli, FV invertör Tam Modeli ile.....	80
7.4 Sabah: 6:00-7:00 harmonik gerilim spektrumu	81
7.5 Sabah: 6:00-7:00 harmonik akım spektrumu.....	82
7.6 Öğlen: 12:00-13:00 harmonik gerilim spektrumu	82
7.7 Öğlen: 12:00-13:00 harmonik akım spektrumu.....	83
7.8 Akşam: 18:00-19:00 harmonik gerilim spektrumu.....	83
7.9 Akşam: 18:00-19:00 harmonik akım spektrumu	84

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Gerilim bozulum limitler (IEEE 519-1992'ye göre).....	12
1.2 Akım bozulum limitleri 120 V'dan 69 kV'a kadar olan sistemlerde	12
1.3 IEC 61000-2-2'ye göre alçak gerilim şebekesinde bireysel gerilim harmonikleri	13
4.1 Pasif ve aktif filtre karşılaştırılması	56
5.1 Simülasyonun iki farklı modelleme detayı.....	60
5.2 Simülasyon parametreler listesi ve değerleri	61
5.3 Simülasyonun iki farklı senaryosu	62
5.4 Harmonik gerilim spektrum değerleri	62
5.5 1'nci senaryo için I_{pcc} 'nin harmonik veri set karşılaştırması	64
5.6 2'nci senaryo için I_{pcc} 'nin harmonik veri set karşılaştırması	65
6.1 GT3.0 invertör özellikleri.....	68
6.2 Laboratuvar deney senaryoları	69
6.3 Deneydeki ekipmanlar, işlevleri ve değerleri.....	72

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
6.4 Senaryolar için V_{pwm-h} ve V_{pcc-h} genlik farkları	75
7.1 Benzetim için günlük zaman dilimi ve ev aktivite tanımlaması	81
7.2 (FV Yok) ile (FV Filtre Model) akım ve gerilim farkları	84
7.3 (Filtre Model) ile (Tam Model) akım ve gerilim farkları	85

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
C	Kondansatör
C_0	DC bileşeninin büyüklüğü
C_h	Harmonik (h'nci) büyüklüğü
C_{ng}	RMS değeri
$C_{n.f_0}$	FFT'nin merkez çizgisinin değeri
f_h	Harmonik (h'nci) faz açısı
I_1	Ölçülen akımın temel bileşenli
I_L	Maksimum talep akımı
I_h	Harmonik (h'nci) akım bileşenli
I_{inv-h}	İnvertör akımı
I_{pcc-h}	FV harmonik akım çıkışı
L	Endüktans
M_a	Referans sinyalinin büyüklüğü
$m(t)$	Referans sinyali
$m_{naturally}(t)$	Doğal örnekleme referans sinyali
$m_{uniformly}(t)$	Uniform örnekleme referans sinyali
P	Yükün anma gerçek gücü
Q	Nominal reaktif güç

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
R	Direnç
$S(t)$	PWM invertörün anahtarlama fonksiyonu (zaman alanında)
V_1	Ölçülen gerilimin temel bileşenli
$V_{cr}(t)$	Taşıyıcı sinyal gerilimi
V_{dc}	DC-link gerilimi
V_h	Harmonik (h'nci) gerilim bileşenli
V_{grid-h}	Şebeke kaynaklı harmonik gerilimi
V_{pcc-h}	Şebeke harmonik gerilimi PCC noktasında
$V_{pwm}(t)$	PWM invertörün DC-link gerilimi (zaman alanda)
$V_{pwm}(h)$	PWM invertörün DC-link gerilimi (frekans alanda)
Z_{h-c}	Şebekenin eşdeğer empedansı
Z_{load}	Doğrusal yük
Z_{grid-h}	Şebeke empedansı
Z_{inv-h}	İnvertör empedansı
Z_{lf}	Filtre endüktansı
Z_{cf}	Filtre kapasitansı
Z_{lg}	Filtre endüktans ve şebeke empedans kombinasyonunu
ΔX	İndüktör

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
φ	Referans sinyalinin faz açısı
ω_0	Temel açısal frekans değeri
<u>Kısaltmalar</u>	
AC	Alternatif akım
ASP	Ayarlanabilir hız sürücü
CFL	Kompakt floresan lamba
DC	Doğru akım
FFT	Hızlı fourier dönüşümü
FT	Floresan tüp
FV	Fotovoltaik
GES	Güneş enerji sistemleri
HIDL	Yüksek yoğunluk deşarjı
IEC	Uluslararası elektronik komisyonu
IEEE	Elektrik elektronik mühendisler enstitüsü
LED	Işık yayan diot lambalar

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
MPPT	Maksimum güç noktası takipçisi
OG	Orta gerilim
PCC	Ortak kuplaj noktası
PWM	Darbe genişlik modülasyonu
RMS	Karekök ortalama
SPWM	Sinüsoidal darbe genişlik modülasyonu
THB	Toplam harmonik bozulma
TTB	Toplam talep bozulma

1. GİRİŞ

Son yıllarda, nüfus artışı, enerji talebi, ekonomik büyüme ve emisyonlar yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım popülarlığını arttırmaktadır (Abas et al., 2015). Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerji üretiminde yaygın kullanımı, onların elektrik dağıtım şebekesi üzerindeki etkilerini dikkate alınması gereken bir konu haline getirmektedir. Gün geçtikçe, çok sayıda şebekeye bağlı sistemlerin bulunması, güvenlik ve koruma sistemleri, şebeke parametreler tasarımı ve güç kalitesi ile ilgili yeni sorunlar yaratmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisinin bir uygulaması olan şebekeye bağlı fotovoltaiik (FV) sistemlerinin enerji üretim konusunda gelişen teknolojiyle birlikte daha da yaygın kullanılabileceğı belirtilmektedir (Aiello et al., 2006).

Üretilen enerjinin güvenilirliğı ile paralel olarak güç kalitesi en dikkate alınması gereken konulardandır. Güç kalitesi düşük olduğunda veya standartlara uymadığında, sadece kendi şebekesinde bozucu etkilere yol açmakla kalmadığı gibi tüm şebekeyi ve yakındaki diğerkomşu tesisleri de etkileyebilmektedir (Liang, 2017).

Bu tez çalışmasında yenilenebilir enerji kaynağı olarak fotovoltaiik (FV) sistemler esas alınarak güç kalitesi sorunlardan harmonikler ve ara-harmonikler araştırılmıştır.

Güç kalitesi açısından hedef, şebekeye bağlı FV sistemler çıkışını sinüsoidal akım ve gerilim olarak elde etmektir. Dalga şeklinin ideal sinüs biçiminden uzaklaşmasının en temel nedeni doğrusal olmayan yüklerdir ve bu yüklerin ortaya çıkardığı sık görülmekte olan sorun harmonikler olarak tanımlanmaktadır. Son yıllarda araştırma konusu olan başka bir konu ise ara-harmonikler olarak adlandırılmıştır. Harmonikler temel frekansın tam katları olan sinüs dalgaları şeklinde ortaya çıkan akım ve gerilimler iken ara-harmonikler temel frekansın tam katları olmayan sinüsoidal akım ve gerilimlerden meydana gelmektedirler (Li et al., 2003).

Fotovoltaiik sistemlerin enerji kalitesini düşüren ve harmonik sorununu ortaya

çıkaran kısım ise, FV sistemden elde edilen DC akım ve gerilimi AC akım ve gerilime dönüştüren invertörlerdir. Harmonikler ve ara-harmoniklerin sebep olduğu sinüsoidal gerilim ve akım dalgalanmalarının bozulması, elektrik enerji endüstrisinde başlıca güç kalitesi endişelerinden biridir (Bonner et al., 1996). Güç sistemlerinde harmonik bozulmalarını iyileştirmek için son yıllarda önemli çabalar sarf edilmiştir. Harmonikleri kontrol etmek için standartlar oluşturulmuştur. Harmonik ölçüm cihazları mevcut olup yaygın olarak kullanılmaktadır. Güç sistemi harmonik analiz alanı da önemli ilerlemeler kaydetmektedir. Sistematik harmonik çalışmalarını yürütmek için iyi belirlenmiş bileşen modelleri, simülasyon yöntemleri ve analiz prosedürleri geliştirilmiştir (Aiello et al., 2006).

1.1 Yenilenebilir Enerji Sistemlerde Güç Kalitesi

Yenilenebilir enerji kaynakları, şebeke hattı kayıplarını arttıran harmonik zengin invertörler vasıtasıyla ulusal dağıtım şebekesine bağlanmaktadır (Bakar et al., 2016). İnvertör yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcut elektrik şebekeleri ile senkronize edilmesi için DC'den AC'ye dönüşüm sağlayan modern yenilenebilir enerji sisteminin kalbidir. DC'nin AC'ye dönüştürülmesi, güç sisteminde düşük-seviyeli harmonik enjeksiyonuna neden olmaktadır (Moeed and Salam, 2016).

Harmonik analizi ve azaltma çalışmaları, sürdürülebilir enerji sistemi çalışmaları için yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır (Kalair et al., 2017). Günümüzde çoğu gelişmiş ülkelerde modern dağıtım şebekesi geleneksel ve harmonik zengin yenilenebilir enerji santrallerinden oluşmaktadır (Khalil and Abas, 2014).

Harmonikler, güç kalitesini kötü yönde etkileyip sistem kayıplarını % 20'ye kadar arttırabilmektedirler (Ghorbani and Mokhtari, 2015). Bu kayıpların % 27'sine sebep olan ise harmoniklerdir (Kharlov et al., 2016). Son çalışmalar, dağıtım şebekelerinde çeşitli harmonik seviyelerde (düşük-seviyeli ve yüksek-seviyeli harmonikler) ek güç kayıplarının, % 4 ve % 8,5 aralığında olabileceğini ortaya koymaktadır (Neagu et al., 2016). Dağıtım sistemi kayıpları doğrusal olmayan yüklerle değişmekte olup, % 100 harmonik yüklerde, % 110'a kadar zirve

yapabilmektedir (Gandhare and Patil, 2013). % 1 ile % 8 arasında THB_V'ye sahip akıllı bir şebeke, % 4,7 ile % 42,2 arasında kapasite kayıplarıyla karşı karşıya kalabilmektedir (Lombard and Rens, 2016). Güç kalitesi bozulmaları bazı geçici veya kalıcı hasarlara sebep olabilirler bu yüzden tüketicilere zarar verebilir ve sanayicilere ekonomik kayıplar getirebilmektedir. Güç kalitesi problemleri gerilim, akım veya frekans sapmaları ile ortaya çıkar ve ekipmanın arızalanması ile sonuçlanır (Dugan et al., 2003). Harmonikler, anahtarlı cihazlar tarafından ve doğrusal olmayan yüklerden meydana gelmektedirler bu doğrusal olmayan yükler genelde şebeke yükünün % 40'ını kapsamaktadır. Harmonikler deşarj transformatörlerini ve yüksek frekans kontrol cihazlarını da etkilemektedirler (Kalair et al., 2017). Harmoniklerin genel tanımı ilk kez 1970'lerde invertörlerin piyasaya sürülmesinden sonra ortaya çıkmıştır. 1980'lerde entegre devrelerin, bilgisayarların ve elektronik cihazların yaygınlaşması güç kalitesi sorunlarını daha da kötü bir hale getirmiştir (Ray and Hapeshis, 2011). Harmonik etkisi zamanla değişebilir fakat dağıtım şebekesinde daima şebeke arz dalga şeklini bozan belirli bir minimum kirlilik seviyesi mevcuttur. Harmonikler güç faktörünü kötüleştirir, hat kayıplarını ve kullanımdaki görünür güç arz talebini artırabilmektedir. Bu teknik kayıplar gelişmiş ülkelerde % 7'den az iken bu oran üçüncü dünya ülkelerinde % 20'den fazladır. Genel olarak bu bilgilere bakıldığında güç kalitesi problemi olan harmoniklere, enerji şebekelerindeki görünmez hayaletler denilebilir (Kalair et al., 2017).

1.1.1 Güç kalitesi problemleri

Güneş enerji sistemlerinin, rüzgâr çiftliklerinin ve DC depolarının dağıtım şebekesine ve ulusal şebekeye entegrasyonu, harmoniklerin yanı sıra başka güç kalitesi sorunlarına da sebep olabilmektedir; bu sorunlar arasında düşük güç faktörü ve gerilim istikrarsızlıklarını sayabiliriz. Diğer güç kalitesi sorunları ise aşağıdaki gibi sıralanmıştır (Rönberg and Bollen, 2016):

- Gerilim sag (yükselmesi)
- Gerilim swell (düşmesi)
- Gerilim spike (sıçraması)

- Noise (gürültü)
- Çok kısa kesintiler
- Uzun kesintiler
- Harmonik ve ara-harmonik bozulumlar
- Fliker (kırpışma)

1.2 Harmonikler ve Ara-harmonikler

Güç kalitesi problemleri; hassas cihazların arızalanmasına neden olan gerilim, akım veya frekans saptmaları ve bozulmaları ile kendini göstermektedir. İnvertöre bağılı FV'nin entegrasyonu ve doğrusal olmayan yüklerin yükselmesi, güç sistemlerinde harmoniklerin meydana gelmesine yol açmaktadır. Doğrusal olmayan yükler ve sinüsoidal kaynaklardan veya doğrusal yüklerden enerjilenen anahtarlı cihazlar ve sinüsoidal olmayan kaynaklara sahip anahtarlı cihazlar, dağıtım sisteminde harmonikler üretmektedirler (Kalair et al., 2017).

1.2.1 Harmonik ve ara-harmonik nedenleri

Güç elektroniğı ve doğrusal olmayan yükler harmoniklere neden olarak genel dağıtım kayıplarını arttırmaktadır. Harmoniğı neden olan bazı doğrusal olmayan yükler aşağıda verilmektedir (Adak, 2003):

- Transformatörler
- Statik konvertörler
- Generatörler
- Ark ocaklar
- Ark kaynak makineleri
- Gaz deşarjlı aydınlatma armatürleri
- Statik VAR kompanzatörleri
- Bilgisayarlar
- Kesintisiz güç kaynakları
- Doğru akım ile enerji iletimi
- Güç elektroniğı elemanları

- Fotovoltaik sistemler

Kompakt floresan lambalar (CFL), yüksek yoğunluklu deşarj lambalar (HID), floresan tüpler (FT), yüksek gerilim floresan lambalar, ışık yayan diyot lambalar (LED), klimalar, redresörler, invertörler, asansörler gibi tüm elektrik ve elektronik cihazlar, mobil şarj cihazları, transformatör çekirdeği, anahtarlama modlu güç kaynakları (SMPS), ayarlanabilir hız sürücüleri (ASD) ve TV, harmonik kaynağı olarak bilinmektedirler (Kalair et al., 2017).

1.2.2 Harmonik tanımı

Harmonikler, temel frekansın katları olan periyodik bir dalganın sinüsoidal bileşenleridir. FV sistemlerinde harmonikler, mükemmel sinüsoidal olmayan sinyaller üreten anahtarlama tekniklerini kullanan invertörler tarafından üretilmektedirler (IEEE , 2000).

Harmonik, periyodik bozulmuş gerilim veya akım dalga formlarının matematiksel bir ifadesidir (Cheng, 2012). Fourier teorisine göre, harmonikler için $f(t)$ periyodik bir fonksiyon olarak , ω_0 temel açısal frekans ile Denklem 1.1'deki şekilde temsil edilebilir (Arrillaga and Watson, 2003):

$$f(t) = C_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \cos(h\omega_0 t - f_h) \quad (1.1)$$

Temel açısal frekans değeri, ω_0 'dır ve T değeri $\frac{2\pi}{\omega_0}$, $f(t)$ 'nin periyodu olarak tanımlanır. C_h , f_h , C_0 , katsayıları Denklem 1.2 ve 1.3'te açıklanmıştır:

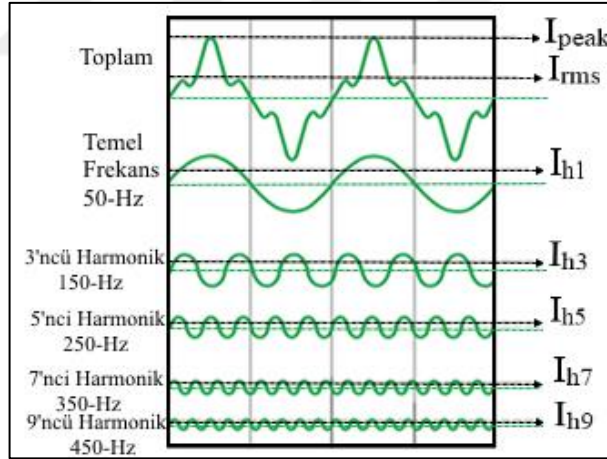
$$C_h = c_h \leq f_h = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-jh\omega_0 t} dt \quad (1.2)$$

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \quad (1.3)$$

$f(t)$ 'nin h 'nci harmoniği $h\omega_0 t$, DC bileşeninin büyüklüğü C_0 ve h 'inci harmonik büyüklüğü ve faz açısı C_h, f_h ile verilmektedir. Bu tanımlara bakılırsa $f(t)$ nin RMS'i Denklem 1.4'te gösterildiği gibidir:

$$RMS = \sqrt{c_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} \left(\frac{C_h}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (1.4)$$

Harmonikler birleştirildiğinde, gerilim veya akım dalga formlarının bozulmasına neden olabilmektedirler. Şekil 1.1 bozulmuş akım dalga formunun örneğini ve doğrusal olmayan bir yük ile üretilen harmonik bileşenlerini göstermektedir (Cheng, 2012).



Şekil 1.1 Harmonikler ve akımın harmonik sıraları örneği (Cheng, 2012).

1.2.3 Ara-harmonik tanımı

Harmonik tanımı fourier teorisine göre: periyodik bir dalga biçimi, farklı genliklerin saf sinüs dalgalarının toplamı olarak ifade edilmektedir. Burada her sinüs eğrisinin frekansı periyodik dalga formunun temel frekansının tamsayısıdır. Diğer taraftan, farklı genliklere sahip iki veya daha fazla saf sinüs dalgaların

toplamı her bir sinüs eğrisinin frekansı, temel frekansın bir tamsayısı değildir ve periyodik bir dalga formuyla sonuçlanmaz. Bu tanım ara-harmonikler olarak tanımlanır. Dolayısıyla pratik açıdan, ara-harmonik frekansları iki bitişik harmonik frekans arasındaki frekanslardır. Ara-harmoniklerin Birincil kaynağı, elektronik gücün yaygın bir şekilde kullanılmasıdır. Bu yüklerin örnekleri aşağıda verilmektedir (Li et al., 2003):

- Endüstriyel uygulamalarda ayarlanabilir hız sürücüler
- PWM invertörler
- Aktif filtreler
- Özel güç kontrol ekipmanları

1.2.4 Harmonik ve ara-harmonik etkileri

Ara-harmoniklerin etkilerinin birçoğu, harmonik etkilere benzemektedir, ancak bu etkilerden bazıları periyodik olmayan doğalarının bir sonucu olarak sadece ara-harmonikler için eşsizdir. Ara-harmonik ve harmonik etkileri temel olarak üç kategoriye ayrılabilir (Alexander and Thompson, 2007):

- Aşırı yüklenme
- Salınımlar
- Bozulmalar

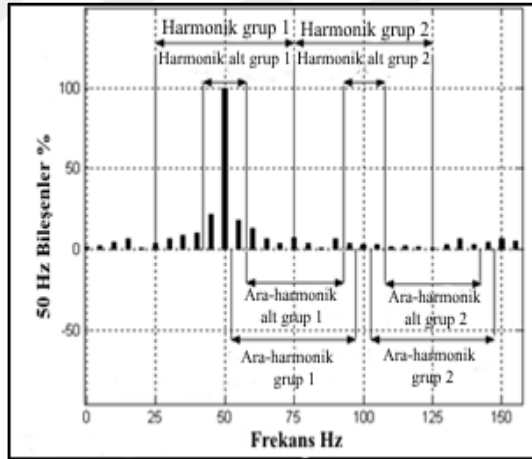
Aşırı yüklerin etkileri; ısınma, filtrelerin veya diğer sistem bileşenlerinin aşırı yüklenmesine ve akım trafo doyumuna neden olabilecek ek enerji kayıplarını içermektedir. Frekanslarına bağlı olarak, bu ek sinyaller, mekanik sistemlerde salınımlara, akustik bozukluklara sebep olabilir veya telekomünikasyon sinyallerine müdahale edebilmektedir. Temel frekans dalga biçiminin bozulması, floresan lambaları, zamanlama cihazları gibi, senkronize edilen ekipmanın düzgün çalışmasına engel olabilmektedir. Ara-harmoniklerin en yaygın zararlı etkilerinden ise fliker, başka adıyla kırpışmadır (Dugan et al., 2003).

1.3 Harmonik ve Ara-harmoniklerin Matematiksel Tanımı

Harmonik ve ara-harmonik hesaplama yöntemleri IEC-61000-4-7 standardında getirilmiştir (IEC, 2002). Bu yöntemler gruplar ve alt gruplar olarak açıklanmaktadır:

Harmonik ölçümler, dalgalı sinyallerin (zamanla değişen sinyallerin) yalnızca kendi harmonikleriyle doğru olarak tanımlanamadığı düşünülürse, sabit bir sinyal üzerinde gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte, güç sinyallerinin (akım veya gerilim) asla sabit olarak kabul edilememesi durumunda, bozulma analizlerini elde etmek genellikle faydalıdır (Aiello et al., 2004).

Bu nedenle, birbiriyle karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmek için basitleştirilmiş bir yaklaşım uygulanmıştır. FFT çıkışı c bileşenleri, harmonik ve ara-harmonik alt grubunu değerlendirmek için gruplandırılmıştır. Gruplar ve alt gruplar Şekil 1.2’de grafiksel olarak gösterilmektedir (IEC, 2002).



Şekil 1.2 Harmonik, ara-harmonik grup ve alt grup hesaplamalarının gösterimi (Salor et al., 2009).

FFT harmonik sıraları, RMS değerini değerlendirerek gruplandırılmıştır: FFT analizinden kaynaklanan tüm spektrum, sinyal harmonik ve ara-harmonik içeriği değerlendirmek için ayrı olarak gruplanır (Castilla et al., 2013).

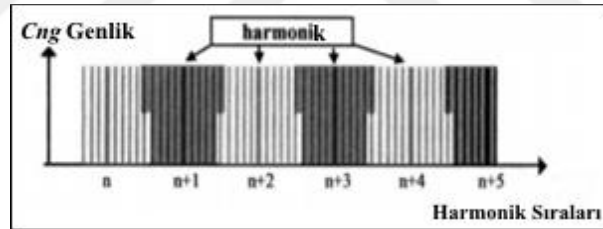
Şekil 1.3’de gösterildiği gibi 50-Hz sistemler için 10 temel bölüme eşit bir sinyal gözlem penceresi tanımlanırsa, elde edilen spektrum çözünürlük 5-Hz olacaktır. 60-Hz için ise bu 6- Hz’dir.



Şekil 1.3 IEC 6100-4-7’ye göre genel spektrum çözünürlüğü (50-Hz için) (IEC, 2002).

Harmonik grub bileşeni n’nci sırada olduğunda, taranan alanda merkez hattına karşılık gelir ve c_{ng} (RMS değeri) büyüklüğüne sahiptir.

Harmonikler için Şekil 1.4’te görüldüğü gibi:



Şekil 1.4 Harmonik gruplar 50-Hz için (IEC, 2002).

c_{ng} , 50-Hz için 4’e göre ve 60-Hz sistemleri için 5’e göre iki bitişik harmonik arasında, Denklem 1.5 ve 1.6’da verildiği gibi, alt grupları toplama şeklinde elde edilir (Aiello et al., 2004).

- 50-Hz system için:

$$C_{ng}^2 = \frac{c_{n \cdot f_0 - \frac{5}{T_w}}^2}{2} + \sum_{i=-4}^{+4} c_{n \cdot f_0 + \frac{i}{T_w}}^2 + \frac{c_{n \cdot f_0 + \frac{5}{T_w}}^2}{2} \quad (1.5)$$

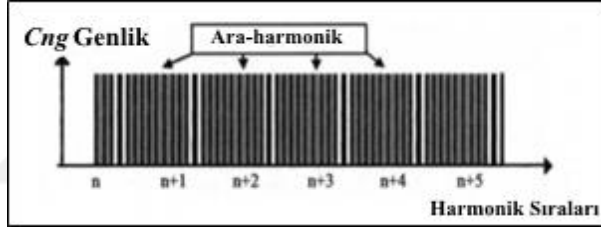
- 60-Hz system için:

$$C_{n_g}^2 = \frac{c_{n.f_0 - \frac{6}{T_w}}^2}{2} + \sum_{i=-5}^{+5} c_{n.f_0 + \frac{i}{T_w}}^2 + \frac{c_{n.f_0 + \frac{6}{T_w}}^2}{2} \quad (1.6)$$

Burada, FFT'nin merkez çizgisinin değeri $c_{n.f_0}$ ile gösterilmektedir. Onu izleyen i spektrum çizgilerine karşılık gelen değerler ise $c_{n.f_0 + \frac{i}{T_w}}$ 'dir. 50-Hz sistemler için soldan 5, sağdan 5 veya 60-Hz olanlar için 6 ve 6 şeklindedir.

Ara-harmonikler için benzer değerler Şekil 1.5'e göre getirilmiştir (Aiello et al., 2004):

50-Hz ve 60-Hz sistemler için ara-harmonik alt grupları Denklem 1.7 ve 1.8'de görüldüğü gibi ifade edilebilir.



Şekil 1.5 Ara-harmonik alt gruplar (IEC, 2002).

50-Hz sistemler için ara-harmonik alt gruplar:

$$C_{(n+0.5)_{sg}}^2 = \sum_{i=+1}^{+9} c_{n.f_0 + \frac{i}{T_w}}^2 \quad (1.7)$$

Ve 60-Hz olanlar için:

$$C_{(n+0.5)_{sg}}^2 = \sum_{i=+1}^{+11} c_{n.f_0 + \frac{i}{T_w}}^2 \quad (1.8)$$

1.4 Harmonik ve Ara-harmonik Standartları

Harmonikler sistemdeki kirlilik olarak tanımlandıkları için yarattıkları zararlı etkilerden dolayı sistemde çeşitli bozukluklara yol açabilmektedirler bu bozucu etkileri azaltmak ve enerji kalitesini en üst seviyede tutabilmek amacı ile harmonikler ve ara-harmonikler için daha yeni sayılabilecek detaylı standartlar oluşturulmuştur. Bu standartlar her bir ülkeye göre değişiklik gösterebilmekle birlikte IEC ve IEEE tarafından oluşturulan limitler neredeyse tüm standartları kapsamaktadır. Harmonikler ve ara-harmonikler için IEEE-519 (IEEE, 2000) ve IEC 61000-4-7'de detaylı bir şekilde üst limitler getirilmiştir (IEC, 2002).

1.4.1 IEEE-519 standardı

IEEE-519 ilk olarak 1981'de harmonik tanımını açıkladı ve sonra 1992'de toplam harmonik bozulumu (THB) ve toplam talep bozulumu (TTB) kavramlarına açıklık getirdi (Blooming et al., 2006). 2014 yılında yapılan revizyona göre eklenen kısımlar bu standardı daha da detaylandırmıştır.

Standart IEEE 519-1992, toplam harmonik bozulma sınırlarını ve ayrıca her bir harmonik bileşen seviyesini belirtir. Hem gerilim hem de akım harmonik bozulmaları için önerilen sınırlar bu sınırlara göre sağlanmalıdır.

IEEE 519'a göre, güç sistemlerinde harmonik gerilim bozulması toplam harmonik bozulmanın (THB) % 5'ine sınırlanmıştır ve her bireysel harmonik bozulma % 3'e kadar ayarlanmalıdır. Bu standart, PCC (ortak kuplaj noktasında) harmonik akım bozulumu sınırlarını da belirlemektedir. Sınırlar, kısa devre akımının PCC'deki maksimum yük akım oranına bağlıdır (Chattopadhyay et al., 2011).

Çizelge 1.1'de, harmonik akım sınırlarını ve 69 kV'ın altındaki gerilimlerde ortak kuplaj noktasındaki (PCC) THB'yi göstermektedir. 69 kV'dan 161 kV'a kadar gerilim için sınırlar yukarıdaki limitlerin % 50'sidir. 161 kV ve üstü için vaka-içi değerlendirme gerekmektedir. Görüldüğü gibi, Çizelge 1.2 sadece tek

harmonikleri özetlemektedir, çift harmonikler yukarıdaki tek harmonik limitlerin % 25'yle sınırlıdır (IEEE, 2014).

Çizelge 1.1 Gerilim bozulum limitler (IEEE 519-1992'ye göre).

Bara Gerilimi	Tekil Gerilim Bozulması %	Toplam Gerilim Bozulması THB %
1,0 kV ve altı*	5,0 *	8,0 *
69 kV ve altı	3,0	5,0
69 kV... 161 kV	1,5	2,5
161000 V ve üstü	1,0	1,5

*IEEE 519-2004'den IEEE 519-1992'ye eklenen kısım (Blooming, et al., 2006).

2014 yılında Çizelge 1.1 için yeni bir kısım eklenmiştir, 1 kV ve altı için tekil gerilim bozulması % 5 ve toplam gerilim bozulması % 8'in altında olmalıdır (IEEE, 2014).

Çizelge 1.2 Akım bozulum limitleri 120 V'dan 69 kV'a kadar olan sistemlerde (IEEE, 2014).

Tek Harmonikler						
ISC/IL	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h≤50 *	TTB
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Çift harmonikler, kendinden sonraki tek harmonik için tanımlanan değerin % 25'i ile sınırlandırılmıştır.

* I_{SC} = kısa devre Maksimum akımı, I_L =maksimum talep yük akımı

* ≤ 50 = IEEE 519-2004'te eklenen kısım

1.4.2 IEC-61000 standardı

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC), elektrik enerji kalitesi standartlarının sorumlusu olarak tanınan bir organizasyondur. IEC güç kalitesi sorunları ile başa çıkmak için, bir dizi standartlar tanıtmıştır. Bu seri aynı zamanda güç sistemi harmonik ve ara-harmonik bozulmalarının kontrolü için uluslararası kabul görmüş bilgileri de sağlamaktadır.

IEC-61000 serisi altı parçadan oluşmaktadır; alçak gerilim şebekesi ve güç kalitesi için en çok kullanılan referanslardan IEC 61000-4-7 ve IEC 61000-2-2 dir. IEC 61000-2-2, alçak gerilim şebekesindeki tek harmonik gerilimler için uyumluluk seviyelerini gösterir ve bu seviye Çizelge 1.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.3 IEC 61000-2-2’ye göre alçak gerilim şebekesinde bireysel gerilim harmonikleri (IEC, 2002).

Tek Harmonikler				Çift Harmonikler	
3’ün Katları Olmayanlar		3’ün Katları Olanlar		Harmonik Sırası	Sınır Değer
Harmonik Sırası	Sınır Değer	Harmonik Sırası	Sınır Değer		
h	(%)	h	(%)	h	(%)
5	% 6,0	3	% 5,0	2	% 2,0
7	% 5,0	9	% 1,5	4	% 1,0
11	% 3,5	15	% 0,5	6...24	% 0,5
13	% 3,0	21	% 0,5		
17	% 2,0				
19	% 1,5				
23	% 1,5				
25	% 1,5				

Toplam talep bozulumu (TTB) % 5’in altında olması gerektiğini de bu Çizelgede görmekteyiz. Geriliminin toplam harmonik bozulumu (THB) 40’ncı harmoniğe kadar tüm harmonikleri kapsar ve % 8’in altında olmalıdır (Anzalchi and Sarwat, 2017).

Ara-harmonikler için tanımlanan ilk standart IEC tarafından belirlenen IEC 1000-2-1 standartıdır. 2002 yılında başka bir standart oluşturulmuştur: IEC 61000-

2-2, En detaylı standart ise; IEC 61000-4-7'dir ve IEEE 519 de ara-harmonik limitlerini önceki standartlarına göre revize ederek IEC 61000-4-7 standardını kullanmaya karar vermiştir (Wilsun, 2000). IEC 61000 4-7, güç sistemleri ve ona bağlı cihazlar için harmonik ve ara-harmonik ölçümler ve enstrümanları hakkında genel ve detaylı bir kılavuzdur (Li et al., 2003). Ara-harmonik gerilim bozulumu temel frekansın 0,2 %'nin altında olmalı ve 200-Hz'den büyük bileşenler için ise 0,3 %'ün altında olması istenir (Marz, 2017).

1.5 Harmonik Bileşenlerin Kavramları

Bir dalga formunun harmonik içeriğini ölçmek ve değerlendirmek için en sık kullanılan iki kavram: toplam harmonik bozulma (THB) ve toplam talep bozulmasıdır (TTB) . Her ikisi de bir dalga formunun efektif değer ölçüsüdür ve matematiksel olarak ifade edilerek gerilime veya akıma uygulanabilmektedir (Arrillaga and Watson, 2003).

1.5.1 Toplam harmonik bozulma (THB)

Toplam harmonik bozulum (THB), iletim ve dağıtım sistemlerinde güç kalitesi sorunlarını tanımlamak için yaygın olarak kullanılan önemli bir tanımdır. Her bireysel harmonik bileşenin sinyal üzerindeki katkısını göz önüne almaktadır. THB, gerilim ve akım sinyalleri için sırasıyla Denklem 1.9 ve 1.10'da gösterildiği gibi tanımlanır:

$$THB_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (V_h)^2}}{V_1} \times 100 = \sqrt{\frac{\text{Tüm harmoniklerin genliklerinin karelerinin toplamı}}{\text{Temel genlik karesi}}} \times 100 \quad (1.9)$$

$$THB_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}}{I_1} \times 100 = \sqrt{\frac{\text{Tüm harmoniklerin genliklerinin karelerinin toplamı}}{\text{Maksimum talep yük akımının karesi}}} \times 100 \quad (1.10)$$

Burada, V_1 , I_1 ölçülen gerilimin ve akımın temel bileşenleri ve V_h , I_h , h'nci harmonik bileşenlerine tekabül etmektedir (Arrillaga and Watson, 2003).

1.5.2 Toplam talep bozulma (TTB)

Bu indeks, tek bir kullanıcıdan şebekeye bağlanan harmonik enjeksiyonlarını ölçemediğinden amaçlarımız için kullanılacak bazen en uygun değer olmayabilir. Ama harmonik akımı incelemek için de (THB) indeksinin uygulanması, bazı durumlarda, özellikle de temel akım sıfıra yaklaştığında uygun değildir. Bu durumda, elde edilen (THB) oldukça yüksek olabilir, ancak ölçülen noktanın harmonik seviyesini gerçekten temsil etmez. Bu nedenle toplam talep bozulması (TTB), özellikle harmonik akımlar için Denklem 1.11’de getirildiği şekilde tanımlanır:

$$TTB = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}}{I_L} \times 100 \quad (1.11)$$

IEEE 519-1992’a göre toplam akım bozulumu açısından, toplam talep bozulması (TTB) maksimum talep akımının (I_L) yüzdesi olarak verilir (Arrillaga and Watson, 2003).

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölüm, aşağıdaki konuları içererek önceki çalışmalarla ilgili bir literatür taraması sunmaktadır:

- Şebekeye bağlı FV sistemlerinin güç kalitesi iyileştirme çalışmaları,
- FV invertörler,
- Filtre.

Fotovoltaik sistemlerin güç kalitesi ve onların harmonik bozulum etkilerini çok sayıda ulusal ve uluslararası çalışma incelemeye almıştır. Genel olarak bakılırsa son yıllarda FV sistemlerin daha yaygın kullanımıyla birlikte güç kalitesi araştırmaları da daha önemli bir konu haline gelmiştir. Aşağıda farklı fotovoltaik invertör tasarımlarıyla, elektrik şebekesine enjekte edilen harmonikleri ve çok az sayıda mevcut olan ara-harmonikleri inceleyen çalışmalar verilmeye çalışılmıştır.

Sangwongwanich ve arkadaşlarının (2017) Danimarka’da yaptıkları çalışmada, FV invertörlerin ara-harmonik salınımı analiz edilmiştir ve şebekeye bağlı FV sistemlerin MPPT kontrol mekanizmasına sahip oldukları düşünülmüştür. Frekans spektrum analizi sonuçlarından, MPPT’den kaynaklanan algoritma dalgalanması, özellikle düşük güç çalışma koşullarında şebeke akımın ara-harmoniklerinin temel nedenlerinden biri olduğu gözlemlenmiştir. DC-link gerilimindeki bozulmalar ile şebeke gerilimi arasındaki frekans modülasyonu şebeke akım ara-harmoniğinin nedenlerinden bir diğeridir. Fakat bu ara-harmonik değerleri sistemde var olmalarına rağmen değerlerinin çok düşük olduğu da tespit edilmiştir.

Etier ve arkadaşlarının (2016) yaptığı çalışmada, FV sistemlerin akım harmonikleri araştırılmış ve elde edilen sonuçlar simülasyon çalışmasıyla birleştirilmiştir. Sonuçlara göre FV panellerin harmonik seviyesinin şebekeye bağladıktan sonra, güç elektronik cihazlarının çalışması nedeniyle % 13,3’e kadar yükseldiği gösterilmiştir.

Li ve arkadaşları (2015) tek-faz transformatörsüz invertör topolojilerini, yüksek verimlilik, düşük maliyet ve yüksek güç kalitesi nedeniyle küçük ölçekli şebekeye

bağlı FV sistemler için detaylı olarak tanıtmıştır.

Rampinelli ve arkadaşlarının (2016) Brezilya’da yaptıkları çalışmada, şebekeye bağlı FV sistemlerde kullanılan invertörlerin özellikleri teorik ve deneysel bir yaklaşımla incelenmiştir. Invertörlerin deneysel testleri ile birlikte, FV sistemlerdeki toplam harmonik bozulmanın incelenmesi yapılmıştır. Harmoniklerin bileşenlerinin genlik büyüklüğünün güç ile orantılı olduğu belirtilmiştir.

Anesio ve arkadaşlarının (2015) yaptıkları çalışmada, Brezilya’da bir şebeke bağlantılı 50 kW gücündeki FV sistemde harmonik ve ara-harmonikler konusu araştırılmış ve 24 saatlik ölçümler yapılarak değerlerin IEC 61000-4-7 standardına uyduğu tesbit edilmiştir. Sinyaller frekans invertörün çıkışında fotovoltaiik sistemin dağıtım şebekesine bağlanma noktasında (PCC) ölçülmüştür.

Varatharjan ve arkadaşlarının (2014) Almanya’da yaptıkları çalışmada, 1 MW’lık bir FV sistem kurulumu, farklı anma gücüne sahip çok sayıda invertörden oluşmaktadır. Bu çalışmada 9 invertör 100 kVA gücünde (üç-faz) iken 11 invertör (tek-faz) 1 kVA ile 10 kVA arası güçlere sahiptir. Harmonik emisyonlarını araştırma adına tüm invertörlerin toplam emisyon ölçümünün yanısıra, ölçümün bir bölümünde invertörler önceden tanımlanmış bir çizelgeyi takiben kademeli olarak kapatılmıştır. Harmonik emisyon açısından invertörler arasındaki etkileşimler detaylı olarak araştırılmıştır. Düşük seviyeli harmonikler, hem akım hem de gerilimde baskın olarak 5 ve 7’nci harmoniklerde görülmüştür.

Du ve arkadaşları (2013) Avustralya-Newcastle’de CSIRO Enerji Merkezi Mikrogrid Laboratuvarında yaptıkları bu çalışma ile, toplam harmonik bozulma ve FV çıkış gücün seviyeleri arasındaki bağlantıyı doğrulamak için bir alan ölçümü yapmışlardır. Bu sistemde farklı güç çıkış seviyelerinde çalışan toplam 13 FV üç-faz invertör, şebekeye paralel olarak bağlanmaktadır. Gerçek dalga-formları saniyede 8000 örnekle yakalanarak THB hesaplamaları yapılmıştır. FV invertörler farklı güç seviyelerinde çalışırken, yüksek THB değerlerini meydana getirmektedirler ve birkaç düşük-seviyeli harmonik genliğinin oluşma nedenleri açıklanmaktadır. Düşük güç çıkışlı invertörün akım THB büyüklüğü, yüksek güç çıkışlı invertörden yaklaşık 20 kat daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Babaei ve Maheri (2013) DC-DC konvertörün matematiksel modellenmesini yaparak, önerilen modeli Fourier yerine Laplace dönüşümlerine göre tasarlamışlardır. Simülasyon sonuçlarının yanı sıra deneysel sonuçlar, varsayımsal analizin geçerliliğini teyit etmek için kullanılmıştır.

Fekete ve arkadaşları (2012), Hırvatistan’da alçak gerilim dağıtım şebekesine bağlı 10 kW gücündeki bir küçük ölçekli fotovoltaiik (FV) sisteminin etkisini iki dönem kış ve yaz aylarında araştırmışlar. Kaydedilen verilerin yanı sıra, bir bilgisayar modeli yapılarak çalışmada iki senaryo planlanmıştır. İlk senaryoda, yerel şebekeye bağlı olan bir evin üçte birinin 10 kW FV sistemden beslendiği varsayılmaktadır. İkinci senaryoda ise, tüm ev 10 kW FV sistemden beslenmektedir. Sonuç olarak akım harmonik kaynağı sadece FV sistem değildir, şebekedeki birçok doğrusal olmayan yüklerin de harmonik bozulumlara sebep olabilecekleri belirtilmiştir. Bu etkiyi değerlendirmek adına, bir harmonik akım kaynağı modellenmiştir. FV ve şebeke harmoniklerinin karşılıklı etkileri de analiz edilmiştir.

Kamatchikannan ve Rangaranj (2012) güç kalitesi iyileştirme ve harmonik indirmeye adına bir mikro invertör akım harmonik kaynağı modeli önererek, elde edilen sonuçları simülasyon çalışması ile doğrulamıştır.

Bojoi ve arkadaşlarının (2011) yaptıkları çalışmada invertörlerin, yenilenebilir enerji kaynağından şebekeye olan aktif güç akışını kontrol ettikleri ve şebeke akımını neredeyse sinüsoidal tutarak, doğrusal olmayan yük ile akım harmonik kompanzasyonu gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar farklı çalışma koşulları için test edilen 4 kVA bir invertör üzerinden elde edilmiştir. Deney sonuçları şebeke akım harmonik bozulumu açısından kabul edilebilir bir geçici ve kararlı durum performansı göstermiştir.

Papaioannou ve arkadaşları (2011) Yunanistan’da gerçekleştirilen bir çalışmayla alçak gerilim dağıtım şebekesine bağlı FV invertör sistemlerinin etkisini tanımlamıştır. Farklı hava şartlarında 20 kW FV sistem bağlantısına sahip sistem harmonik davranış sonuçları incelemesinden, 3, 5 ve 7’nci harmonik akımının sistemde büyük değer ile varlığını göstermektedir.

Wang ve arkadaşlarının (2011) yaptığı çalışmada üç-faz akım kaynağı FV invertör kullanılarak, DC-link gerilim dalgalanmasının meydana getirdiği yüksek genlikli 5 ve 7'nci harmonik akımın görüldüğü gösterilmektedir.

Lopez ve arkadaşları (2010) 1,5 kW'lık bir FV sistemdeki akım, farklı yöntemler ile ölçülmüş ve bir simülasyon modeli oluşturmak için kullanılmıştır. Sistem 16 FV panel, trafosuz bir PWM invertör ve bir LCL filtre içermektedir. Bu model, invertör tarafından enjekte edilen harmoniklerin etkisinin incelenmesine olanak tanımıştır.

Hosseini'nin (2009) yaptığı çalışmada güç kalitesini arttırmak ve harmoniklerin zararlı etkisini azaltmak için, aktif filtre kullanan iki farklı sistem tasarlamıştır. Bu sistemlerin simülasyonları yapılarak akım harmoniklerinin baskın olduğu gösterilmektedir.

Lee ve arkadaşlarının (2008) yaptığı bir çalışmada, şebeke bağlantılı invertör için alçak geçirgen LCL filtresi kullanılmıştır. Bu filtre ile harmonik indirgemesi, nicel olarak analiz edilmiş. Daha sonra bir maliyet ve boyut incelemesi amacıyla iki farklı endüktans değerinin tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Önerilen LCL filtresinin eşdeğer devre analizi ile, işletme karakteristiklerinin doğruluğu detaylı olarak sunulmuştur. Buna ek olarak rezonans problemini azaltmak için, LCL filtresi için uygun ve basit bir oransal integral akım denetleyicisi tasarlanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre önerilen LCL filtresi ve kontrol sistemi, yüksek frekans bozulmaları ve yük değişimleri için iyi bir harmonik etkilerini azaltma özelliği göstermektedir.

Benhabib ve arkadaşlarının (2007) Hollanda'da yaptıkları çalışmada, 96 evden oluşan bir bungalov parkında PCC noktasında yapılan ölçümler ile alçak gerilim şebekesine bağlı fotovoltaik sistemler tarafından üretilen akım harmoniklerinin, diğer doğrusal olmayan yüklerle ve şebeke gerilimi ile olan etkileşimi incelemiştir. Simülasyon sonuçlarına dayalı olarak, birden çok fotovoltaik sistemin ve ortak elektronik yüklerin oluşturduğu harmonik akımlarının etkilerini ve aralarındaki etkileşme gösterilmiştir. Bir alçak gerilim şebekesinde, THB değerinin yükselmesi doğrusal olmayan yüklerin sisteme ilavesi ile arttığı fark edilmiştir.

Salam ve arkadaşlarının (2006) gerçekleştirdiği bu çalışma, FV invertörlerde kullanılan aktif filtre teknolojilerinin gelişimine genel bir bakış sunmaktadır. Harmonik bozulma problemleri ve bunların elektrik şebeke ve ekipmanları üzerindeki etkileri hakkında bir araştırma ile filtrelerin bu bozulmadaki paylarının ne kadar olduğu belirtmiştir. Önce pasif filtreleri daha sonra ise aktif filtreleri kullanarak gelişmiş harmonik azaltma yöntemleri sunulmuştur ve nihayetinde iki filtre arasında farklar gösterilmiştir.

Liserre ve arkadaşlarının (2005) yaptığı çalışmada, dağıtık elektrik şebekesi için LCL filtre rezonans değerinin uyarılması ile yeni bir şebeke empedans belirleme yöntemi sunulmuştur. Ele alınan başlıca hususlar; rezonans frekansının şebeke empedansı üzerindeki etkisi ve sistem rezonansını kontrollü bir şekilde nasıl uyarılacak olduğudur. Yöntem hem simülasyonlar, hem de deneyler yardımıyla gösterilmiştir. Şebeke empedansı ve rezonansı, voltaj ve akım harmoniklerini yükseltebilir sonucuna varılmıştır.

Infield ve arkadaşlarının (2004) İngiltere’de yapmış oldukları çalışmada, düşük güç çıkış seviyesi ve nominal gücün % 20’sinin altında üretilen güçlerde akım THB, özellikle sabah veya akşam saatlerinde, daha yüksek bir seviyeye ulaşmaktadır. Bu çalışmada aynı güç değerlerine sahip 4 adet FV invertör kullanılmıştır.

Prodanvic ve Green (2003) şebeke harmonik bozulmasını hafifleten, dalga kalitesini koruyan ve reaktif güç kontrolü sağlayan üç-faz invertör için bir filtre ve tamamlayıcı bir kontrol sistemi tasarlamışlardır. Bu çalışmada güç kalitesi, şebekeye enjekte edilen akımın bozuluma uğramadığını belirten zaman ve frekans alan sonuçlarıyla gösterilmiştir.

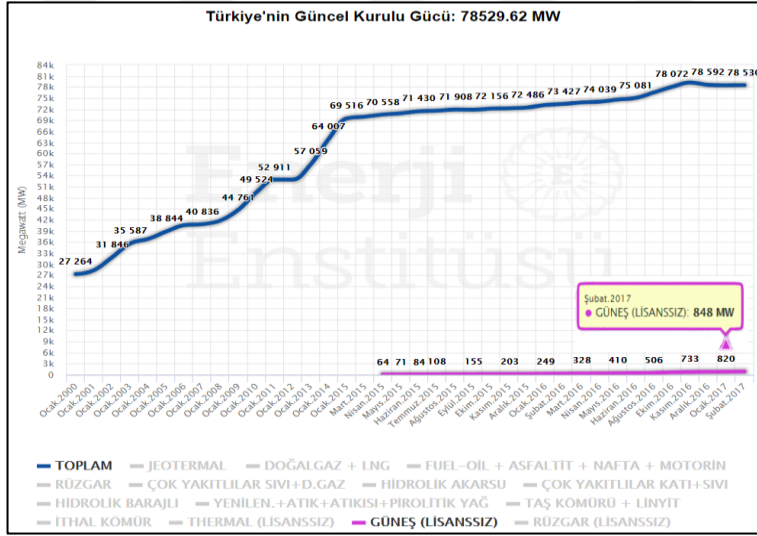
Calais ve arkadaşlarının (2002) yaptığı çalışmada, Avrupa'daki invertör teknolojisi, güç seviyeleri 5 kW'a kadar tek-faz şebekeye bağlı Fotovoltaik (FV) sistemler için özetlenmiştir. Bu bilgiler sadece piyasada bulunan topolojiler için değil, aynı zamanda araştırma adına FV invertörlerin ilgili anahtarlama frekansları ve verimliliği hakkında da detaylı ayrıntılar içermektedir. FV invertör teknolojisini belirleyen ilgili uluslararası endüstri standartlarının geliştirilmesiyle ilgili konuları da özetlemektedir.

Jiang ve Ekstrom (1997) bir çalışma ile, üç-faz akım kaynağı bir invertörden gelen harmonik aktarımını araştırarak DC-linkdeki gerilimin 2'nci harmoniği, AC tarafında bir üçüncü harmonik oluşturduğuna sebep olduğunu göstermişlerdir.



3. HARMONİK VE ARA-HARMONİK YÖNTEM VE ÖLÇÜMLER

Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi, dünyada ve ülkemizde henüz rüzgâr kadar yaygın değildir. Şubat 2017 itibariyle ülkemizin toplam enerji üretim kurulu gücü 78.529,62 MW olup bunun sadece 848 MW'lık kısmını lisanssız elektrik üretimi kapsamında, GES'ler oluşturmaktadır (Enerji Enstitüsü, 2017). Bu rakam güneş enerji lisanslı kurulu güç için Şubat 2017'de 12,9 MW olarak belirtilmiştir (EPDK, 2017). Türkiye'nin yakıt cinslerine göre kurulu elektrik gücü MW olarak Şekil 3.1'de verilmiştir. Nisan 2015'den bu yana lisanssız güneş enerji kurulu gücünde artış olmasına rağmen bu rakam hala çok düşüktür.



Şekil 3.1 Türkiye'nin yakıt cinslerine göre kurulu elektrik gücü (MW) (Enerji Enstitüsü, 2017).

Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla karşılaştırıldığında, yeni sayılan fotovoltaiklerde ve enerji sistemlerinde görülen en belirgin güç kalitesi problemi olan harmonik ve ara-harmonik konusunda çalışma düşünülmüştür. Harmonik ve ara-harmoniklerin sisteme olan etkilerini incelemek amacıyla, iki farklı yerde ve koşullarda kurulu olan sistemlerden ölçümler alınmıştır. Birisi Gaziemir-İzmir (Türkiye), diğeri ise Edmonton-Alberta (Kanada)'da olan bu sistemler farklı frekans ve farklı gerilim değerlerine sahiptir. Yapılan ölçümler ve sonuçları detaylı olarak aşağıda verilmektedir.

50 kW gücünde olan Türkiye'deki sistem 50-Hz'de, 240-V'da çalışmakta olup, panelleri polikristal yapıdadır ve Delta marka invertör kullanılmaktadır. 2,5 kW gücünde olan Kanada'daki sistem ise 60-Hz'de, 120-V'da, monokristal panel ve Sunny boy marka invertör ile çalışmaktadır. Bir diğer fark ise, ölçüm cihazının aynı marka ve model olup, ancak farklı versiyonlarda olmalarıdır. Ölçüm cihazının versiyon farkı sadece data aktarımı ve sonuçları görüntüleme yöntemindeki farkı kapsamaktadır.

3.1 İzmir-Gazimir (Türkiye) Ölçümleri ve Sonuçları

İzmir'in Gazimir semtinde havalandırma sektöründe hizmet veren bir firmanın çatısında kurulu olan 50 kW gücündeki FV sistem, 20 kW ve 30 kW gücündeki aynı marka invertörler yardımıyla üretilen enerjiyi AC'ye çevirmektedir. Bu invertörlerden 30 kW gücünde olanından Fluke 435 güç kalitesi analizörü ile 7 gün boyunca kesintisiz olarak 10 dakika aralıklarla akım ve gerilim değerleri ölçülerek, bu ölçülen dalga şekillerinin harmonik ve ara-harmonik değerleri kaydedilmiştir (Moazzen zadeh ve Şekerci, 2017).

Bu sistemde, 250 Wp gücünde panellerden 200 adet kullanılmıştır. Bu panellerden 120 adedi ölçüm alınan 30 kW'lık invertörü beslemektedir. Bu sistem ulusal şebekeye bağlı olarak çalışmaktadır. Şekil 3.2'de İzmir-Gazimir'de görülen FV sistemin panelleri zeminle 28 derece açı oluşturacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3.2 İzmir-Gazimir FV sistemi.

Ölçümler şebekenin OG tarafından alınmıştır ve analizör bağlantıları Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de görülmektedir. Güç analizörü, faz akımlarını ölçmek için üç adet akım kelepçesi ile invertörün çıkışına bağlanmış, gerilimi ölçmek için ise fazlar, nötr ve toprak dahil beş voltaj probu kullanılmıştır.



Şekil 3.3 İzmir-Gaziemir pano ve invertörler.



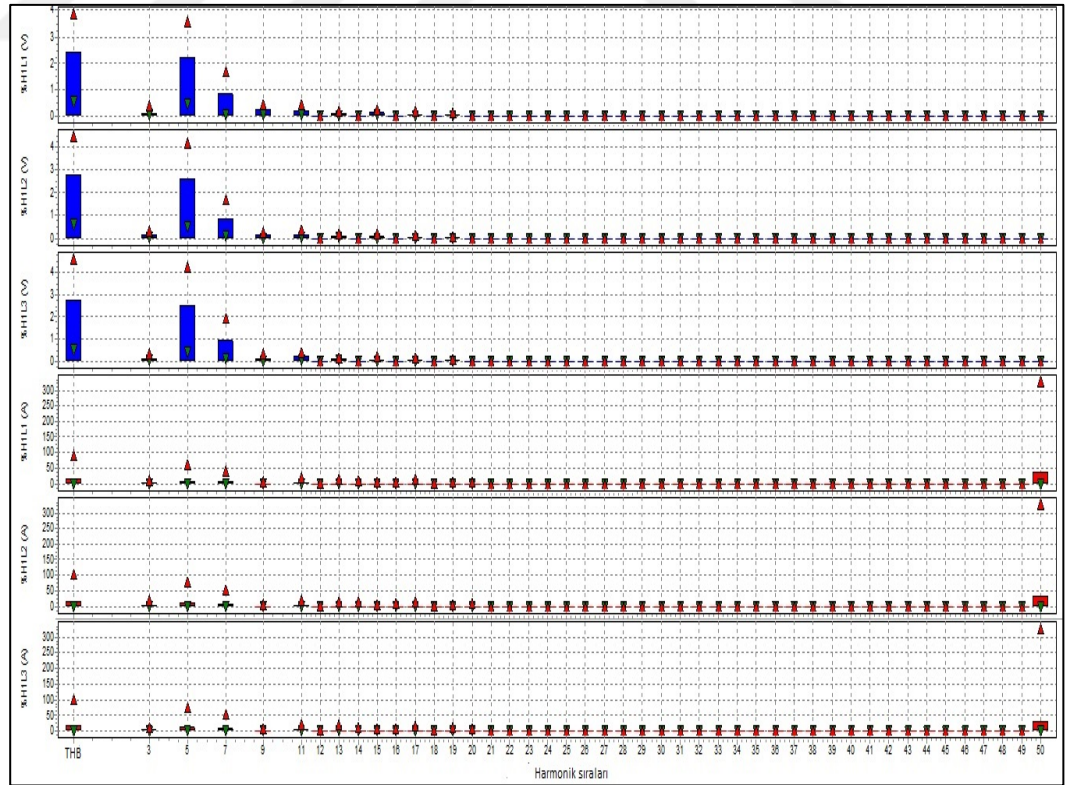
Şekil 3.4 Fluke 435 analizörün bağlantı şekli.

Yapılan ölçümler neticesinde alınan veriler Power Log isimli bilgisayar program yardımıyla incelenmiş ve grafiklere aktarılmıştır. 13.02.2015 tarihinde saat 12:42 de başlatılan ölçümler, 20.02.2015 tarihine kadar bir hafta boyunca devam etmiş ve akım ve gerilim değerlerinin 50'inci harmoniğe kadar analizi yapılmıştır.

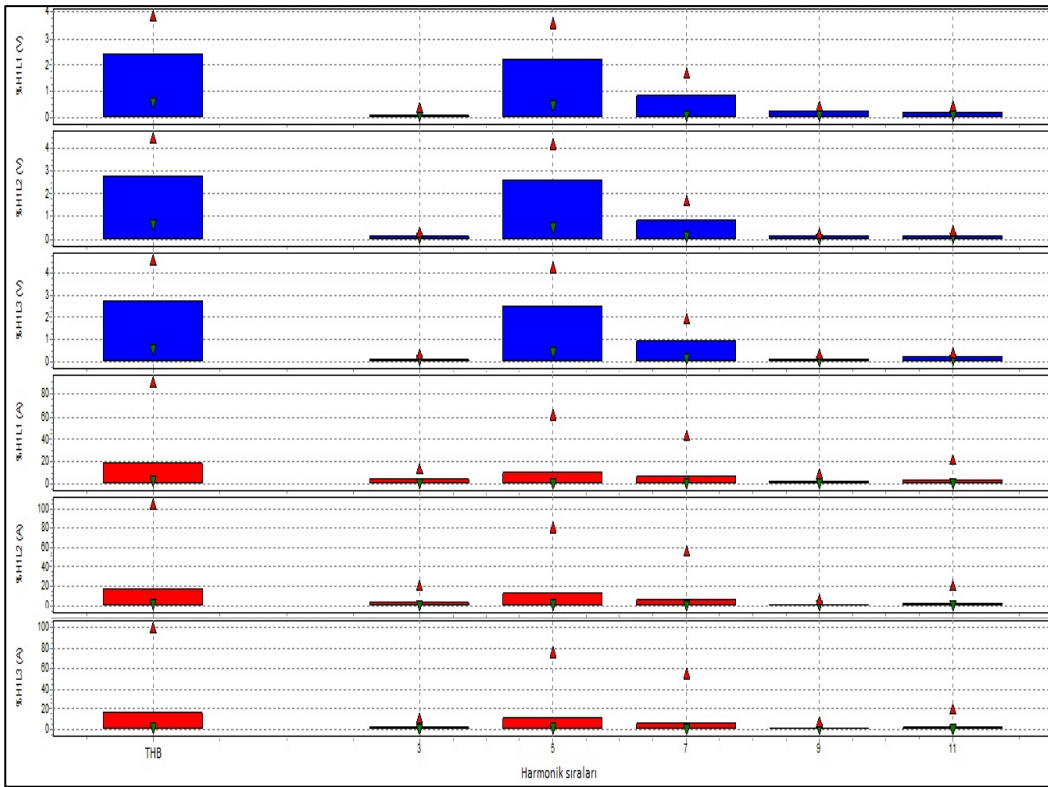
3.1.1 İzmir-Gaziemir harmonikleri

Şekil 3.5'de her 3 faza ait gerilim ve akımların toplam harmonik histogramları 50'nci harmoniğe kadar verilirken, en büyük genliğe sahip olan 3, 5, 7, 9, 11'inci harmonikler ait değerler de Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

Şekil 3.6'de A, B ve C faz gerilimlerinde oluşan THB yönetmeliklerde tanımlanan yasal sınırların altında olmakla birlikte, akımlarda ölçülen THB, A faz için % 17, B fazı için % 16 ve C fazında % 16 olarak yasal limitlerin üzerinde olduğu gözlemlenmiştir.

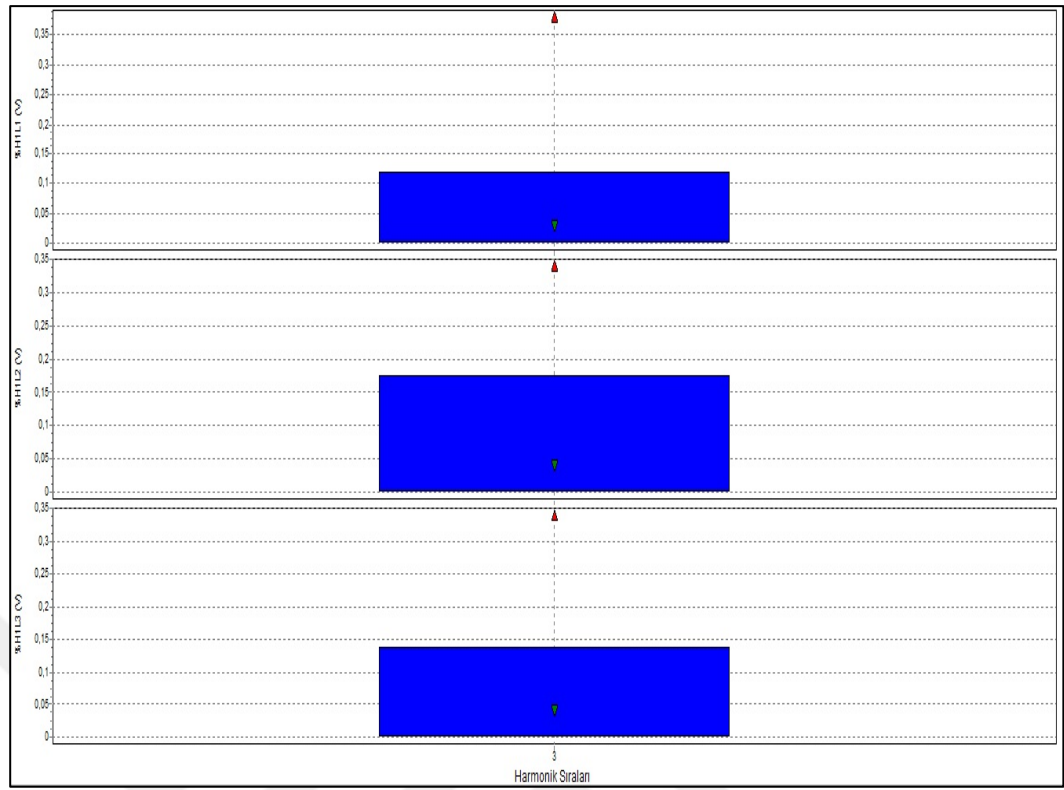


Şekil 3.5 Akım ve gerilimlere ait toplam harmonik histogramı 50'inci harmoniğe kadar.

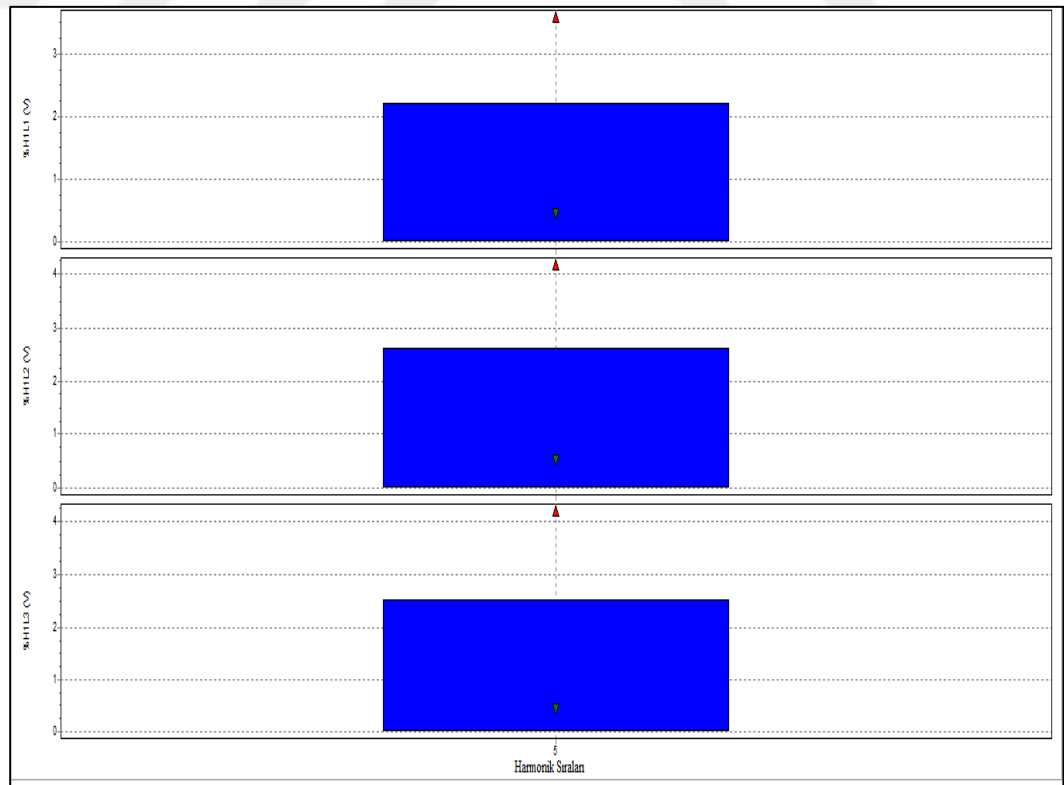


Şekil 3.6 Akım ve gerilimlere ait toplam harmonik histogramı.

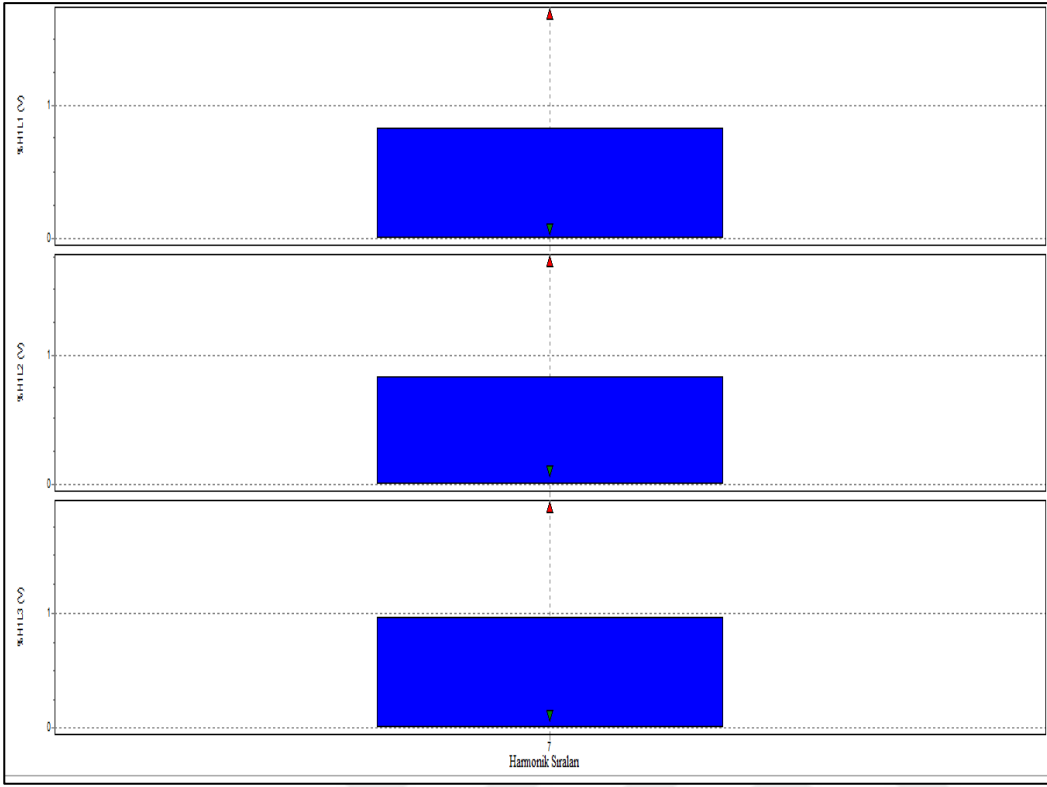
Gerilim harmoniklerinden 3, 5 ve 7'nci harmonikler dışındaki harmoniklerin değerleri çok küçük olduğu için dikkate değer bulunmamıştır. Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 incelendiğinde, 3, 5, 7'nci gerilim harmonikler sıralarının standartlarda istenen sınır değerler içinde olduğu anlaşılmaktadır. Gerilimdeki THB'nin, Şekil 3.10'dan gün boyu sınır değerinin altında olduğu da görülmektedir. Tekil gerilim harmoniklere genel olarak bakıldığında, en büyük değere sahip olan 5'inci harmonik (250-Hz) olarak görülmekte olsa da o da % 3 sınır değerinin altındadır.



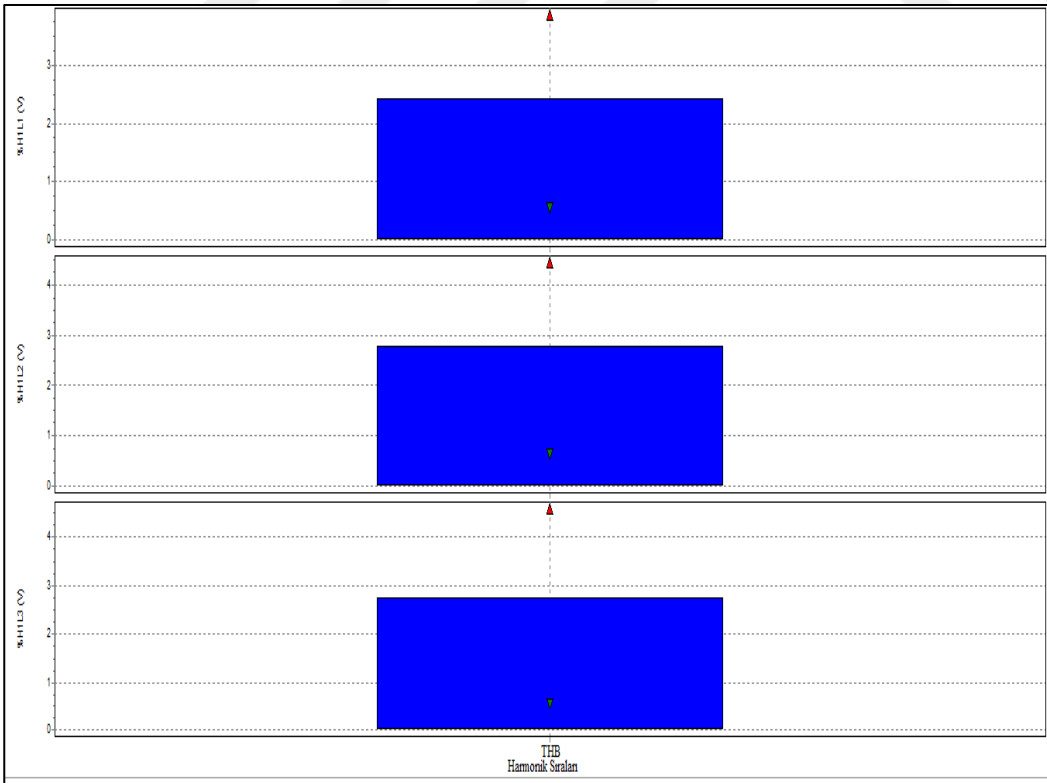
Şekil 3.7 3-faz gerilimlere ait 3'üncü harmonik.



Şekil 3.8 3-faz gerilimlere ait 5'inci harmonik.



Şekil 3.9 3-faz gerilimlere ait 7'inci harmonik.

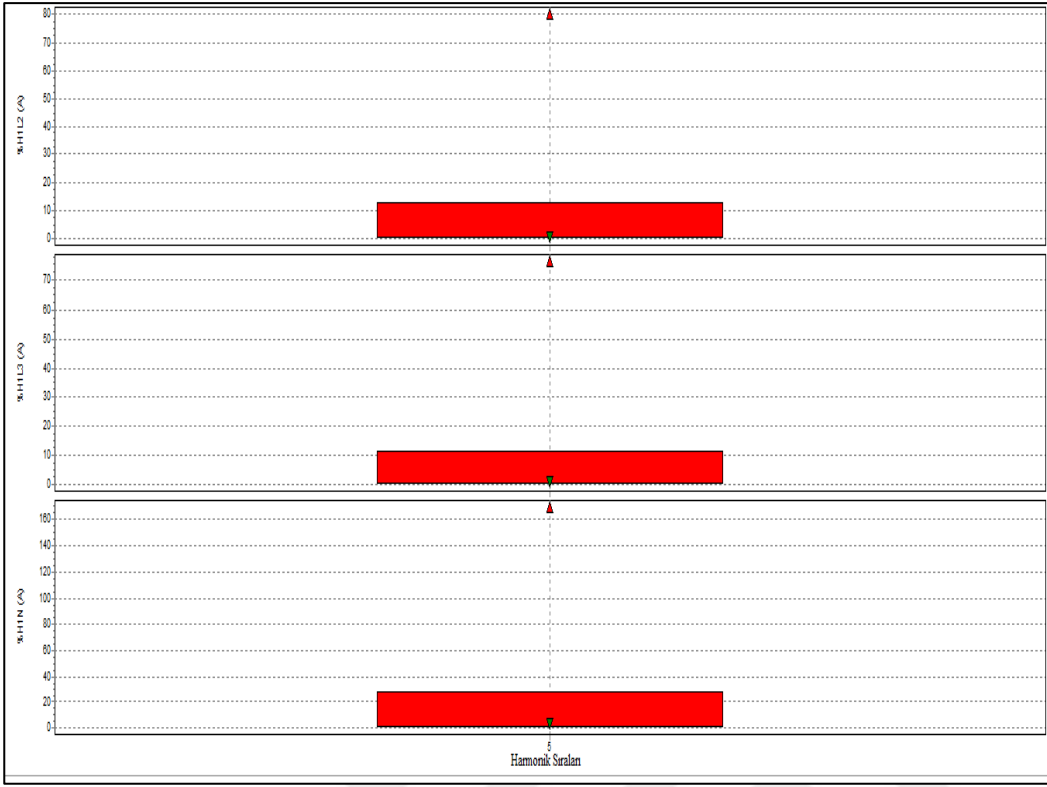


Şekil 3.10 Gerilimlere ait THB değerleri.

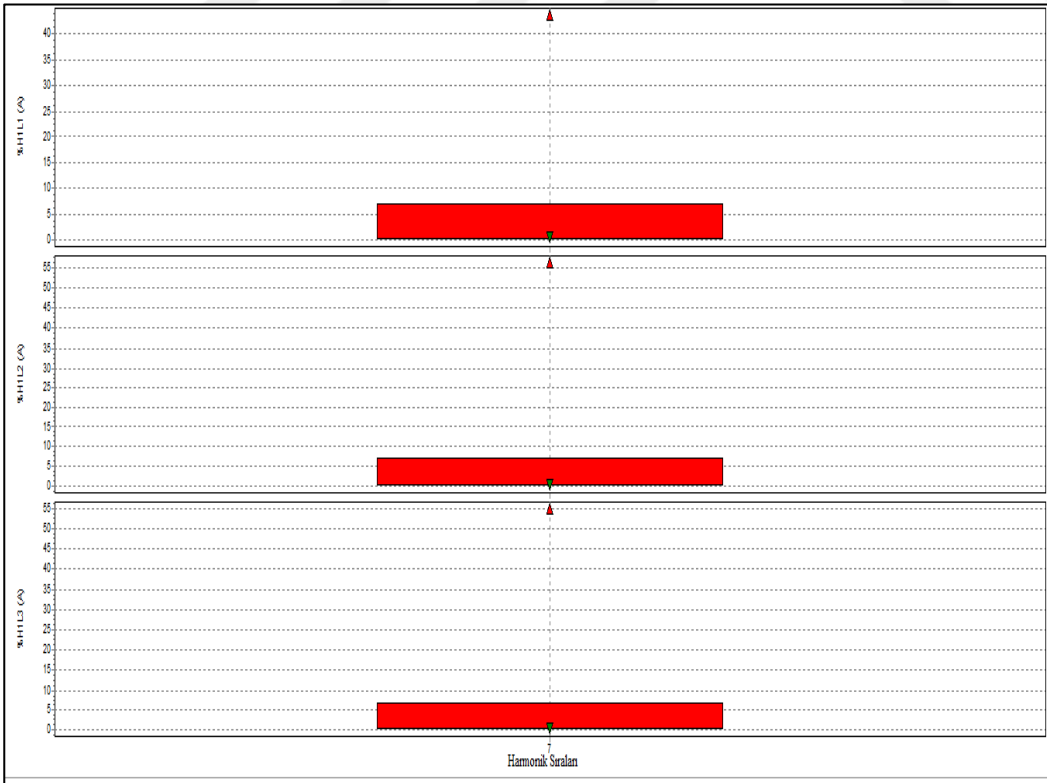
Gerilimde olduğu gibi, genlik değeri büyük olan 3, 5, 7'inci akım harmonikleri de tek tek grafiklere dökülmüştür. Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'e bakıldığında; akım harmoniklerinde de gerilim harmoniklerinde olduğu gibi 5'inci harmoniğin baskın olduğu görülmektedir. Akıma ait THB değerini gösteren Şekil 3.14 incelendiğinde ise, THB'nin sınır değeri olan % 5 limitini aştığı görülmektedir. Bunun nedeninin sabah ve akşam saatlerinde güneş enerji sistemin devreye alınması ve  ıkmasıdan dolayı olduğu sanılmaktadır.



Şekil 3.11 3-faz akıma ait 3' nc  harmonik.



Şekil 3.12 3-faz akıma ait 5'inci harmonik.



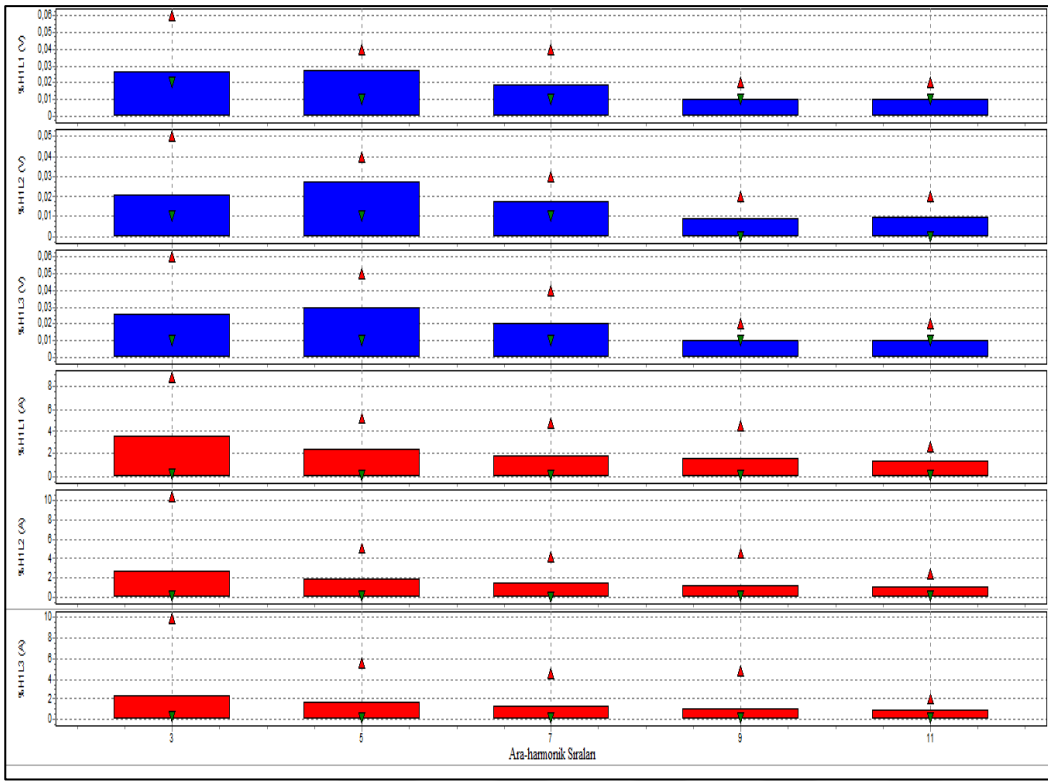
Şekil 3.13 3-faz akıma ait 7'inci harmonik.



Şekil 3.14 Akıma ait THB değerleri.

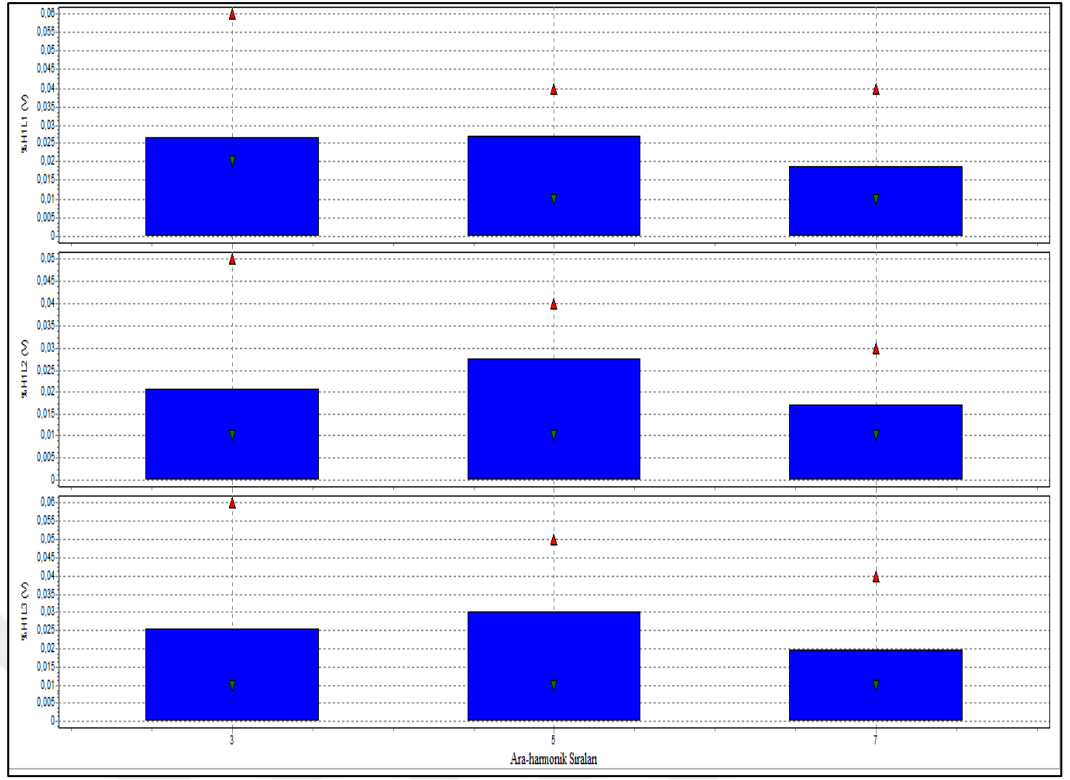
3.1.2 İzmir-Gaziemir ara-harmonik ölçümleri

Şekil 3.15’de ara-harmonik değerlerini karşılaştırmak için her faza ait gerilim ve akım değerleri aynı histogram üzerinde gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, fazların gerilim ara-harmonikleri akım ara-harmoniklerine göre daha yüksek olmasına rağmen, akım ve gerilim ara-harmoniklerinin her ikisinde istenen sınır değerlerin altındadır.

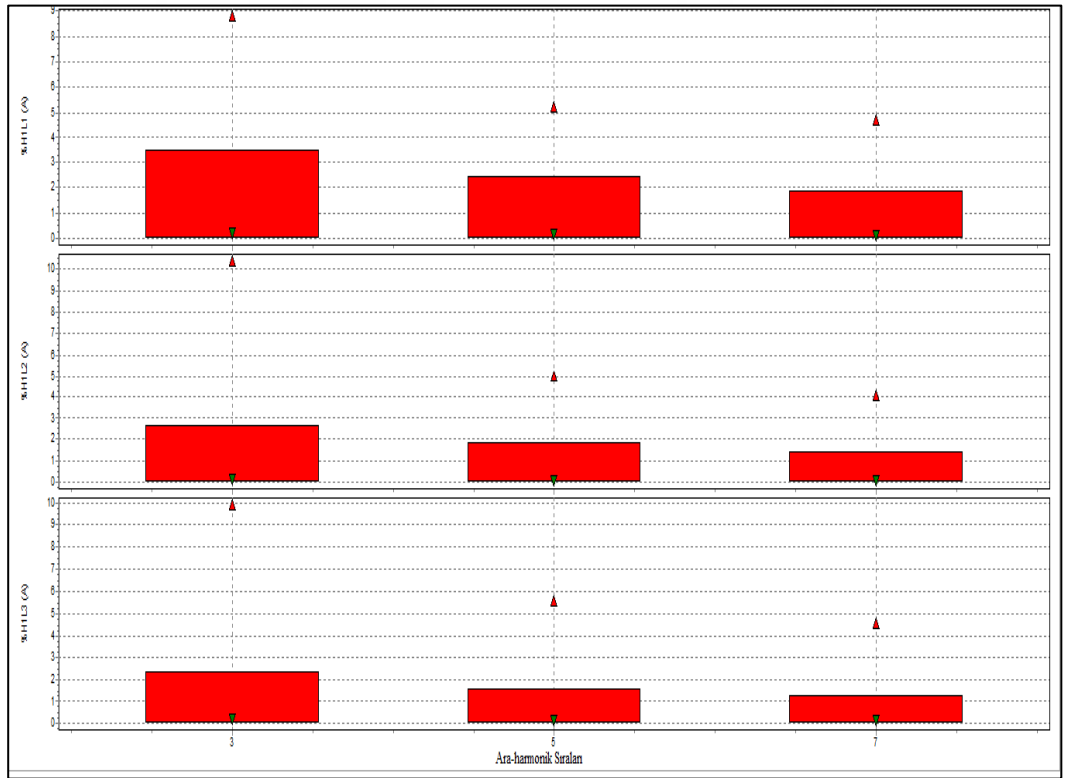


Şekil 3.15 Akım ve gerilimlere ait toplam ara-harmonik histogramı.

Şekil 3.16 ve 3.17’de ise, ara-harmonikler için akım ve gerimler histogramı ayrı ayrı verilerek, ara-harmonik açısından şebekenin genel durumunun iyi olduğu, yani sınır değerlerini hiçbir şekilde aşmadığı ve standart limitlerin altında olduğu gözlenmiştir.



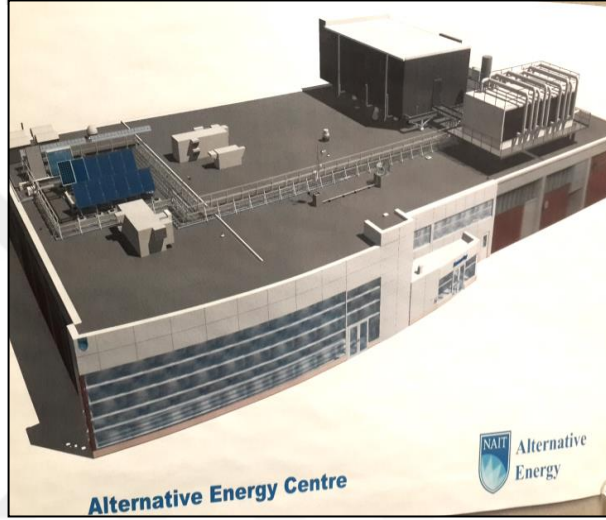
Şekil 3.16 3-faz gerilime ait ara-harmonikler.



Şekil 3.17 3-faz akıma ait ara-harmonikler.

3.2 Kanada-Edmonton Ölçümleri ve Sonuçları

Bu bölümde açıklanan ölçümler Kanada'nın Edmonton şehrinde bulunan Northern Alberta Institute of Technology adıyla anılan bir enstitünün Alternatif Enerji bölümünün çatısında kurulu olan 2,5 kW güneş enerji sisteminde yapılmıştır. FV sistemin şematik gösterilimi Şekil 3.18'de, fotoğrafları ise Şekil 3.19'da görülmektedir (Moazzen zadeh ve Şekerci, 2017).

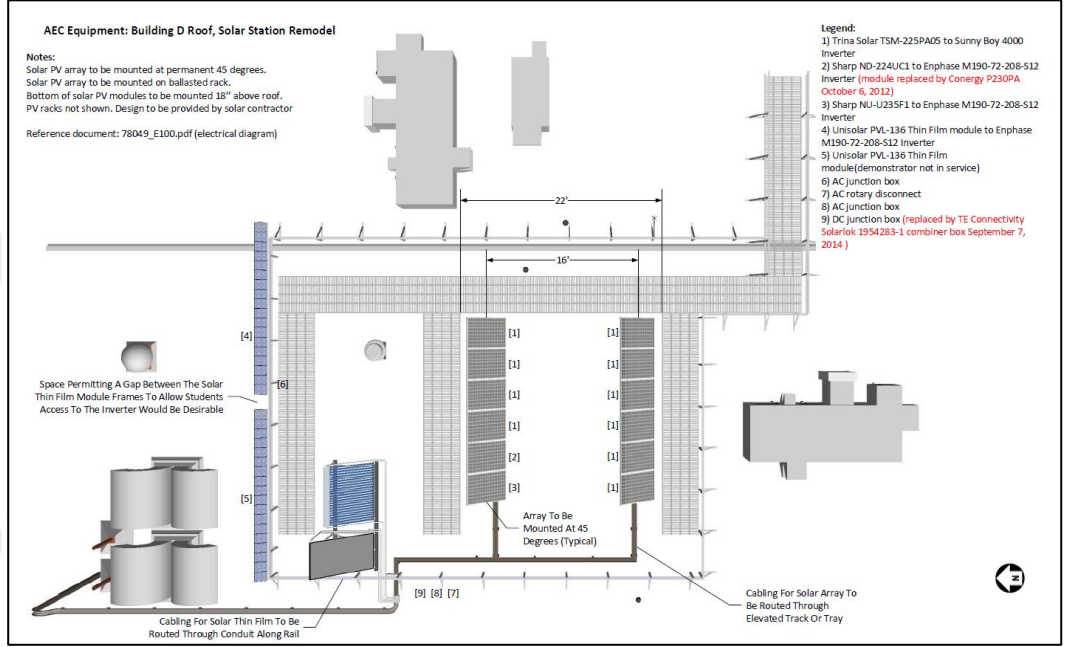


Şekil 3.18 Kanada-Edmonton güneş enerji sistemi.

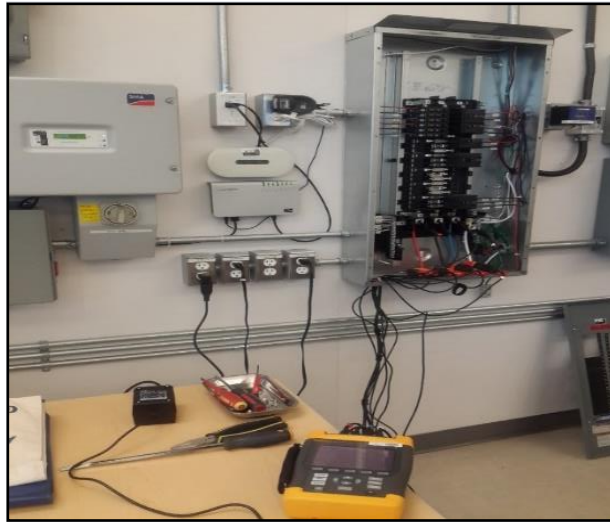


Şekil 3.19 Kanada-Edmonton güneş enerji sistem panelleri.

Deneysel amaçlı kurulan bu sistemde üç farklı çeşit panel ve invertör kullanılarak karşılaştırma olanağı sağlanması amaçlanmıştır. Burada anlatılan ölçümler sadece multi-kristal panellerden alınmıştır. Bölgenin coğrafi konumu nedeniyle panellerin açısı 45 derecedir. Sistem özellikleri ve bağlantı şeması Şekil 3.20’de verilmektedir. Fluke 434 modeli analizör ile ölçüm anında çekilen fotoğraf ise Şekil 3.21’de görülmektedir.



Şekil 3.20 Kanada-Edmonton güneş enerji sistem özellikleri.

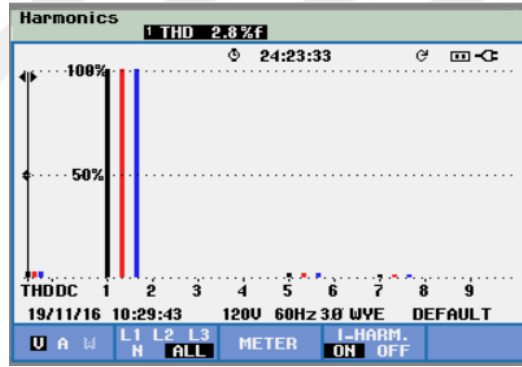


Şekil 3.21 Kanada-Edmonton güneş enerji sisteminde Fluke 434 bağlantıları.

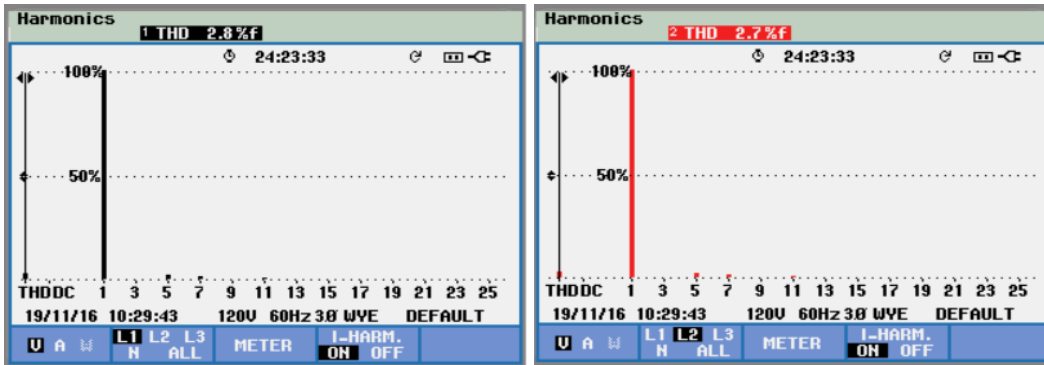
3.2.1 Kanada-Edmonton harmonik ve ara-harmonik ölçüm sonuçları

Şekil 3.22’de görüldüğü gibi ölçülen gerilim 120-V ve frekans 60-Hz’dir. Bu ölçümlerde kullanılan Fluke 434 modelinde yazılım harmonik ve ara-harmonikleri ayrı grafiklerde göstermemektedir. Ölçümler sırasında gözlenen gerilim ve akımın harmonik ve ara-harmonik dağılımlarının ekran görüntüsü ise Şekil 3.22’den Şekil 3.25’e kadar sırasıyla verilmektedir. Toplam Harmonik Bozulma (THB) gerilim değeri % 2,8 dir. Bu değerler IEEE 519-2014 standartında belirtilen sınır değerlerin altında olduğu görülmektedir. Grafiklere dayanarak ara-harmoniklerin değerleri de ilgili standartların % 0,2 sınır değerinin altında kalmıştır.

Şekil 3.22’de 3-faz (L1, L2, L3) gerilim harmonikleri aynı grafikte verilirken, Şekil 3.23’de ise L1 ve L2 fazları için ayrı ayrı verilmiştir. Bu ekran görüntüleri 24 saatlik bir ölçümün sonucunda alınmıştır ve grafikten gerilim harmoniklerinin değerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir.

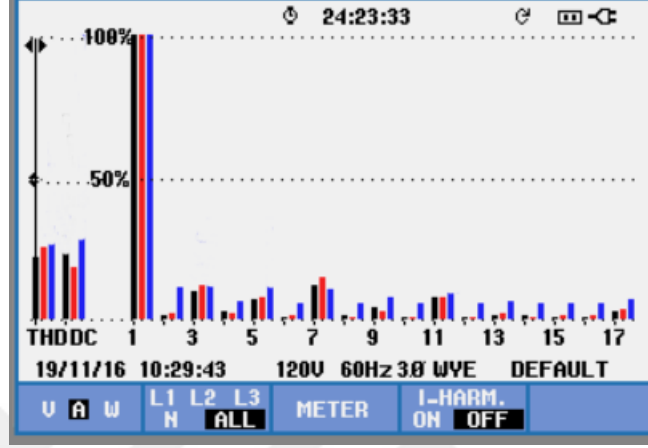


Şekil 3.22 Kanada-Edmonton gerilim harmonikleri.

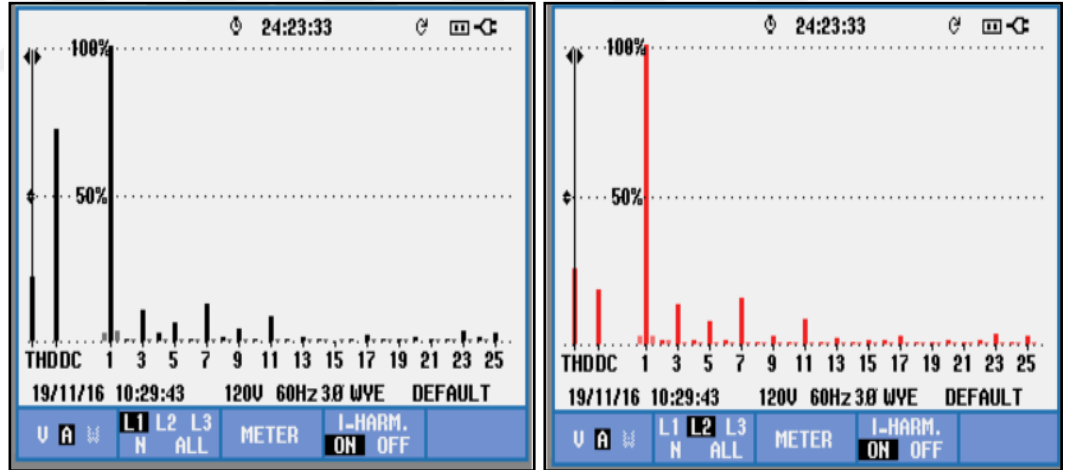


Şekil 3.23 Kanada-Edmonton L1 ve L2 için ayrı ayrı gerilim harmonikleri.

Öte yandan aynı ekran görüntüleri, 24 saatlik ölçümden sonra akım harmonikleri için de alınmış ve 3-faz bir arada olan grafik Şekil 3.24’de, fazlar tek tek olarak da Şekil 3.25’de verilmiştir. Grafiklerden görüleceği gibi, akım harmonik değerleri standart limiti % 5’in üstündedir.

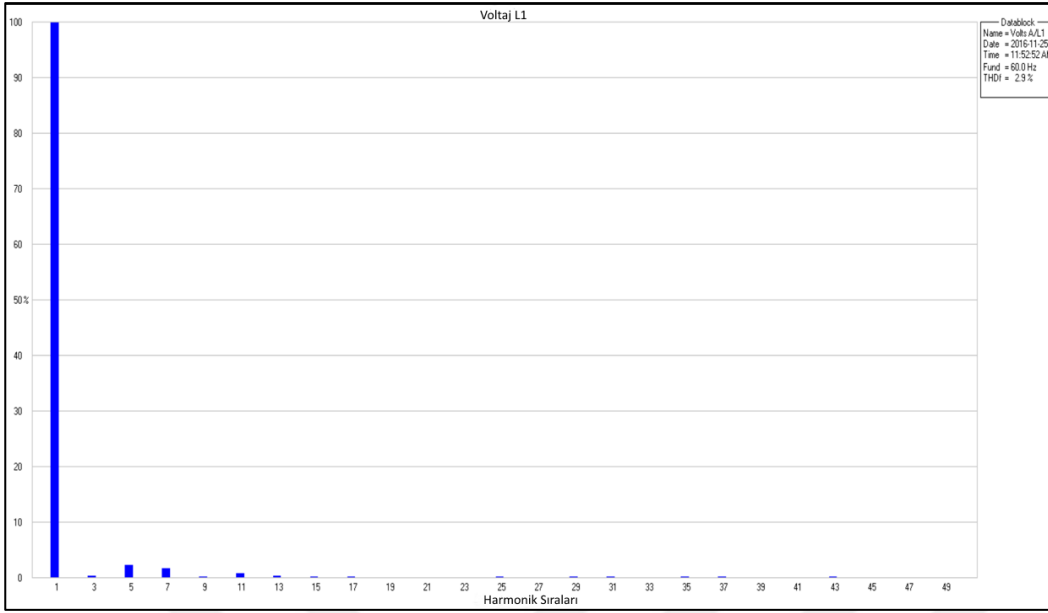


Şekil 3.24 Kanada-Edmonton akım harmonikleri.

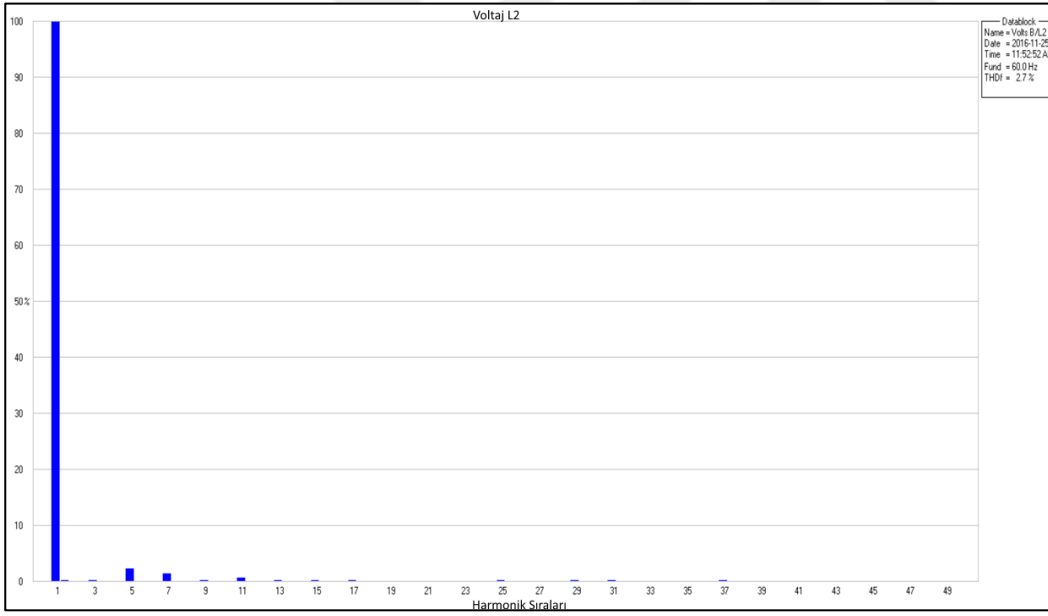


Şekil 3.25 Kanada-Edmonton L1 ve L2 için ayrı ayrı akım harmonikleri.

18.11.2016 tarihinde başlatılan ölçümler, 25.11.2016 tarihine kadar bir hafta boyunca devam etmiştir. Ölçüm dataları Flukview bilgisayar yazılımı yardımıyla gözlemlenmiştir ve iki ayrı faz (L1 ve L2) için harmonik gerilimi içeren bu veri setleri Şekil 3.26 ve 3.27’de verilmiştir.

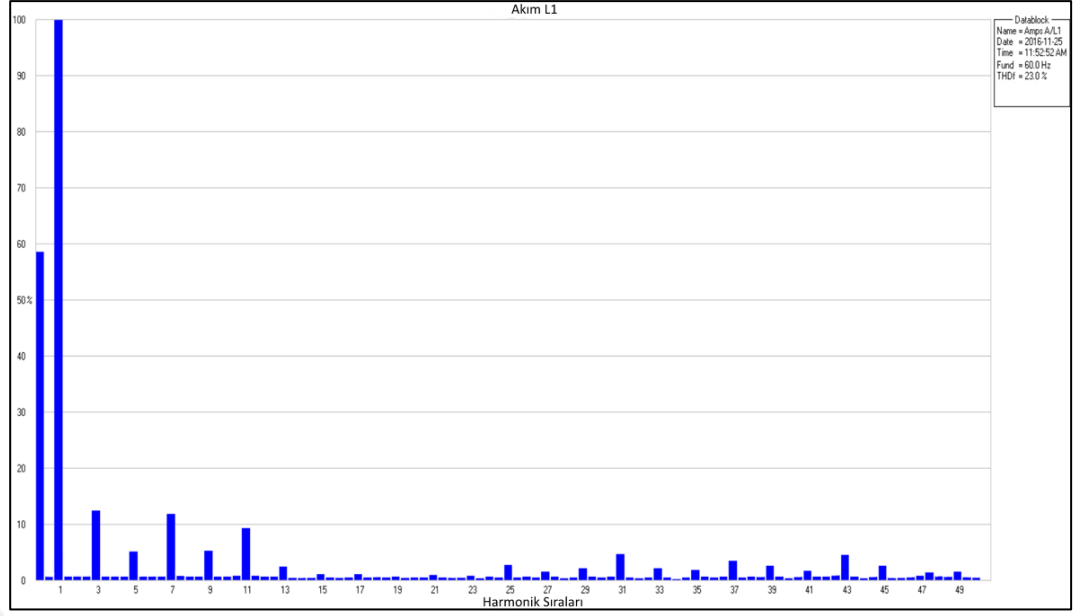


Şekil 3.26 Kanada-Edmonton L1 fazı haftalık gerilim harmonikleri.

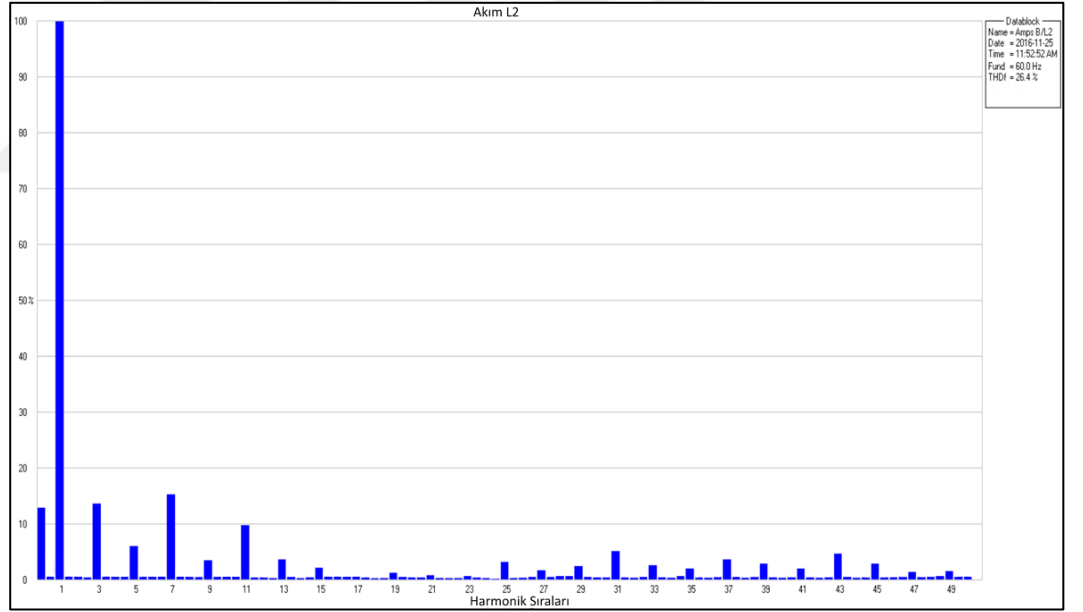


Şekil 3.27 Kanada-Edmonton L2 fazı haftalık gerilim harmonikleri.

Benzer bir şekilde bir haftalık ölçümlerin akım harmonikleri de Şekil 3.28 ve Şekil 3.29’da verilmiştir.



Şekil 3.28 Kanada-Edmonton L1 fazı haftalık akım harmonikleri.



Şekil 3.29 Kanada-Edmonton L2 fazı haftalık akım harmonikleri.

Bir hafta sonra elde ettiğimiz data setlerini incelediğimizde, bu sistemde de Türkiye’de ölçüm yapılan sisteminde olduğu gibi harmonik gerilimler sınır değerleri içinde kaldığı halde harmonik akım, belli bir kaç harmonik sırası için limitlerin üstüne çıkmıştır. Kanada’daki sistem için THB akım % 20’nin üstünde görülmektedir.

3.3 Harmonik ve Ara-harmonik Ölçüm Değerlendirmesi

Fotovoltaik sistemlerde harmonik ve ara-harmoniklerin analizi önemli olduğundan, bu tez çalışmasında iki farklı FV sisteminin akım ve gerilim harmonik ve ara-harmonikleri ölçülüp, bu veriler grafiklere aktarılmıştır. Yapılan analiz sonucunda iki sistemin de farklı frekans, güç değeri, panel tipi, invertör, panel açısı ve iklim şartlarına sahip olmalarına rağmen, gerilim harmonik ve ara-harmoniklerinin genellikle sınır değerler içinde kaldığı görülmüştür. İki sistemin de bir haftalık verilerine bakıldığında, FV sistemlerimize ait THB_v değeri sınır değerinin altında olduğu ve tekil gerilim harmonikler de % 3 olan sınır değeri aşmadığı gözlemlenmiştir. THB harmonik akım bozulma değerine bakıldığında, Türkiye'deki sistem yasal sınır olan % 5'i zaman zaman geçmiştir, aynı durum Kanada'daki sistem için de belirli harmonik sıraları için görülmektedir. Güneş enerji sisteminin belirli saatlerde devreye girmesi / çıkması ve beslediği yüklerin görece büyük olması nedeniyle akım THB'nin beklenen sınır değerini aştığı düşünülmektedir.

Ara-harmoniklerin gerilimine bakılırsa iki sistem de standart limitleri içinde oldukları için zararsız olarak tanımlanabilirler. Tüm bu değerlendirmeler sonucunda iki sistemin tüm farklılıklara rağmen voltaj harmonik ve ara-harmoniklerinde IEC'nin sınır değerleri içinde kaldığı tespit edilmiştir.

Fotovoltaik sistemler ara-harmonikler açısından incelendiğinde, hem yapılan ölçümlerin standartın belirlediği sınır değerlerin altında olması hem de literatürde bu konuda yapılan çalışmalara fazlaca rastlanmaması nedeniyle, ara-harmonik konusundan uzaklaşılarak, FV'de harmonik kaynağı olarak bilinen invertörlerin modellenmesi ve deneysel çalışmalar ile bu modellerin doğrulanması konusuna yönelinmiştir. Bu yeni bakış açısının oluşmasındaki bir diğer etki ise, 50 kW gücün altında olan bu iki sistemde beklenen yasal akım harmonik sınırı % 5 iken, ölçülen değerler % 17 ve % 27 olmasıdır. Şebekeye bağlı olarak çalışan bu kadar düşük güçteki bir sistemde bile yasal limitlerin 3 ve 5 katından fazla % 34 ve % 54 oranda hatayla bir akım harmoniğine rastlanması bu konunun daha detaylı araştırılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

4. FV İNVERTÖR ÇÖZÜMSEL HARMONİK MODELİ ÖNERİSİ

FV sistemlerde bulunan invertörler harmonik akım kaynağı olarak bilinirler, ancak harmoniklerin invörter kaynaklı mı, yoksa şebekeden mi geldiğinin anlaşılabilmesi için daha detaylı inceleme gerekmektedir. İnvörterlerin şebeke üzerindeki harmonik etkilerini değerlendirebilmek için, invertöre analitik bakış açısıyla bir harmonik modeli önerilmesi düşünülmüştür. Bu öneri kapsamında oluşturulan model ve modeli açıklayan matematiksel denklemler literatür araştırması kapsamında ortaya çıkmıştır. Önerilen bu modelin doğrulanması için MATLAB/Simulink aracıyla simülasyonlar yapılmıştır. Bu çalışmanın bir sonraki adımını ise laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneyler oluşturmaktadır.

Bu çalışma kapsamında önerilen model DC-DC konvertör bloğu, PWM invertör köprü bloğu ve alçak geçirgen filtreyi kapsamakla birlikte harmonik kontrol bloğu olmayan bir model olmasına karar verilmiştir. Bu önerilen model FV invertörün iki ana özelliği için ortaya çıkararak daha detaylı analiz olanağı vermektedir:

- Harmonik kaynak özelliği; harmonik, invertörün kendisi tarafından üretilmiş mi, yoksa şebekenin arka plan harmoniği tarafından üretilip üretilmediği, bilinmesi gerekmektedir.
- Harmonik empedans özelliği; pasif filtre bu model için ek parça olarak önerilmektedir ve harmonik empedans özelliği filtre tasarımı ve sistem kararlılığı içi önemli bir konudur. Alçak geçirgen filtre belirli bir frekans bandında kapasitif karakteristik gösterdiğinden, sistem empedansı ile etkileşim kurabilir ve sistemde ilave rezonans meydana getirebilmektedir, Bu rezonans olayı invertör tarafından üretilen harmonikler veya şebeke tarafından gelen harmoniklerin genliğini büyütebilmektedir.

İnvörtörlerin harmonik etkisini araştırmak için açıklık getirilmesi gereken başka konu ise:

- Önerilen gerilim kaynak invertör modelinin yaydığı harmonikler, ilgili kabul görmüş standart değerleri karşılayabilir mi? Eğer en kötü durumda bile bu standartları karşılayabiliyorsa, gerilim kaynak invertör ile bağlantılı dağıtım şebekelerde harmonik kontrol stratejisinin benimsenmesi acil bir ihtiyaç değildir.

FV invertörlerin harmonik modellemesini yapmak için gerçekleştirilen literatür araştırması sonucunda yapılan eski çalışmaların elde ettiği sonuçları ve eksik noktaları değerlendirdikten sonra onlardan en önemli ve detaylı incelenerek bu bölümdeki çalışmanın temeli atılarak FV invertör tasarımı için yola çıkılmıştır.

FV invertörler bir harmonik kaynağı olarak bilinmektedirler (Favuzza and Graditi, 2004) ve PWM invertörler şebeke bağlantılı FV sistemlerde DC gücünü AC gücüne çevirmek için en yaygın kullanılan invertör çeşitleridir (Ortega et al., 2013). Bu tür FV invertörler ve onların harmonik özelliklerinin dağıtım sistemi üzerindeki etkilerini incelemek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır ve bu invertörlerin anahtarlama fonksiyonlarından dolayı elektrik şebekesine harmonik enjekte ettikleri görülmüştür (Papaioannou et al., 2011). Bu nedenle söz konusu çalışmada kullanılacak FV invertör için PWM invertörün uygun olduğuna karar verilmiştir.

Tasarlanan FV invertörün başka özelliği DC-DC konvertör ile birlikte iki aşamalı ve trafosuz bir invertör olmasıdır. Çalışmanın bu kısmı Kanada’da yapıldığından dolayı, Kuzey Amerikada yaygın olarak kullanılan invertörler, 60-Hz’de 3-faz trafodur. Küçük ölçekli FV sistemlerde genel olarak trafosuz tek-faz invertörler kullanıldığından ve bu çalışma da küçük ölçekli FV sistemlere dayalı olduğu için tek-faz ve trafosuz bir invertör uygun invertör çeşidi olarak kullanılmıştır.

4.1 FV İnvörtör Harmonik Model Çeşitleri

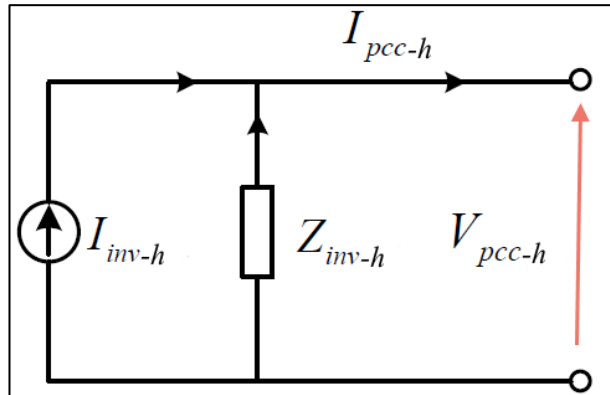
FV invertörlerin dağıtım sistemleri üzerindeki toplam harmonik etkisini araştırmak için, doğru harmonik model oluşturulmalıdır. Yapılan çalışmalarda, araştırmanın amacına uygun olarak FV invertörler modellerin oluşturulduğu

görülmektedir. Genel olarak FV invertörlerin mevcut harmonik modelleri üç kategoride açıklanmıştır:

1) Norton modeli

Aprilia ve arkadaşlarının (2012) yaptığı çalışma, FV invertör Norton modelini empedans ile birlikte sunmaktadır. Model Şekil 4.1’de gösterildiği gibi bir FV invertörünün harmonik akım çıkışının iki parçadan oluştuğunu varsayılmıştır. Görüldüğü gibi şebeke voltajı sinüsoidal olduğunda Norton akım kaynağı I_{inv-h} , FV harmonik akım çıkışını I_{pcc-h} , temsil etmektedir. Norton empedansı Z_{inv-h} , ise üzerindeki şebeke harmonik gerilimi etkisini de V_{pcc-h} , temsil etmektedir. I_{inv-h} ve Z_{inv-h} ’i açıklamak için aktif ölçüm tabanlı bir yöntem önerilmiştir. FV invertör, V_{pcc-h} harmonik gerilimi modifiye edebilen programlanabilir bir gerilim kaynağına bağlanır ve bu şekilde I_{pcc-h} ’de modifiye edilmiştir. Norton empedansı ve akım kaynağı Denklem 4.1 ile verilmiştir:

$$\begin{aligned} Z_{inv-h} &= \frac{V_{pcc-h}}{I_{inv-h} - I_{pcc-h}} \\ I_{inv-h} &= I_{pcc-h} - \frac{V_{pcc-h}}{Z_{inv-h}} \end{aligned} \quad (4.1)$$



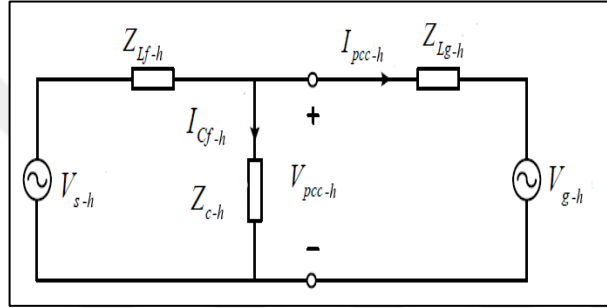
Şekil 4.1 FV İnvörtör Norton eşdeğer modeli.

Norton modele dayalı çalışmalar harmonik akım emisyonunun nedenini bir dereceye kadar açıklasalar da bu modeli uygulamak için kontrol blok parametreleri

gereklidir ve kontrol blok, harmoniklerin etkisini azalttığı için bu nedenden dolayı harmonik etkilerini analiz eden çalışmalar için pek uygun değildir (Du et al., 2013).

2) Tam Devre Modeli

FV invertörün harmonik akım üretim mekanizmasını analiz eden bir çalışmada, invertör gerilim kaynağı çıkışı, harmonik için bağımsız bir gerilim kaynağı ile temsil edilmektedir (Goh, 2011). FV invertörün bu eşdeğer devresi Şekil 4.2’de getirilmiştir.



Şekil 4.2 Şebekeye bağlı FV invertörün tam modeli.

İnverter köprü terminali çıkışı hem temel hem de harmonik frekanslarda bağımsız bir voltaj kaynağı, V_s ile temsil edilir. V_s 'in harmonik spektrumu laboratuvar ölçümü ile elde edilmiştir. Z_{Lf} ve Z_{Cf} filtre endüktansı ve kapasitansını temsil ederler ve Z_{Lg} filtre endüktansı ve şebeke empedansı kombinasyonunu göstermektedir. Bu topoloji, hem invertör harmonik geriliminin, hem de şebekede mevcut harmonik gerilimleri, FV invertörün harmonik akımı I_{pcc-h} 'ye katkıda bulunduğunu göstermektedir.

FV invertör filtre devresi ile birlikte seri bir gerilim kaynağı olarak modellenmiştir. Bununla beraber, modelin teorik temelini oluşturan gerilim kaynağı gösterimi üzerinde herhangi bir doğrulama çalışmasına rastlanmamıştır. Bu çalışmadaki topoloji hem invertör harmonik gerilimi, hem de şebekede üzerindeki harmonik gerilimin FV invertörün harmonik akıma katkıda bulunduğunu göstermektedir. Bu modelde de bazı iyileştirmeler yapılması gereklidir. İnvertör köprü çıkışının her harmonik seviyesinde bir gerilim kaynağı olarak

modellenebildiğini gösteren doğrulama çalışmasının yapılmadığı görülmüştür (Goh, 2011).

3) Akım ve Gerilim Kaynak Modeli

Geçmiş çalışmalarda FV invertörler genel olarak akım kaynağı olarak tasarlanmıştır. Bu invertör çeşitlerinde düşük-seviyeli harmonik akımlar invertör çıkışından ölçüldüğünden ve (PCC) noktasında gerilim üzerinde herhangi bir kontrol mevcut olmadığı için, bazen aşırı gerilim sorunların ortaya çıkabildiği görülmüştür (Papaioannou et al., 2011). Harmonik etkilerini inceleyen çalışmaların çoğunda da FV invertör bir harmonik akım kaynağı olarak kabul edilmiştir ve harmonik data setleri saha ölçümlerine dayalı olarak ölçülmüştür (Bhowmik et al., 2003). Bu çalışmalar detaylı çalışmalar olmalarına rağmen, gerilim kaynaklı FV invertörün harmonik karakteristiğini teorik bir anlatım ile tam olarak açıklamamaktadırlar. Diğer taraftan, harmonik akımın farklı arka plan harmonik gerilimleri altında sabit kalıp kalmadıklarını doğrulamak için bir açıklama yapmadıklarından dolayı akım kaynak modeli bu çalışmada güç sistemi harmonik incelemesi için yetersiz ve uygun değildir.

Harmonik akım kaynağı olan FV invertörlerin özellikleri aşağıda kısaca özetlenmiştir (Jana et al., 2017) :

- Yüksek empedanslı bir DC gerilim kaynağından ayarlanabilir akım ile beslenmektedir.
- Giriş akımı ayarlanabilir ama sabittir ve DC giriş tarafı bir indüktör ile seri bağlanmaktadır. DC indüktör büyük, pahalı ve daha fazla kayıplara yol açabilmektedir.
- Akım çıkışının genliği, yükten bağımsızdır, çıkışın gerilimi ve dalga büyüklüğü yük empedansın doğasına bağlıdır.
- Düşük anahtarlama kaybı, ancak yüksek iletkenlik kaybı mevcuttur, böylece, toplam güç kaybı yüksektir.

Bu özellikleri göz önünde bulundurularak tez çalışmasındaki invertör, gerilim kaynak FV invertörü olarak modellenmiştir. Gerilim kaynak FV invertör özelliklerine aşağıda sıralanmaktadır (Azmi, 2011):

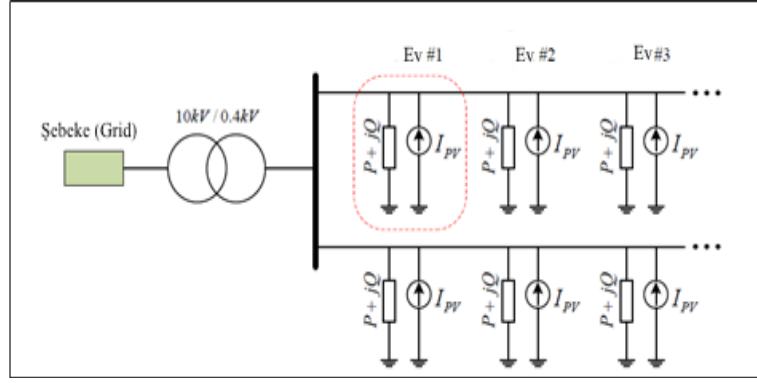
- Girişi, küçük veya ihmal edilebilir empedansa sahip bir DC gerilim kaynağıdır.
- Giriş gerilimi sabit değerde tutulmaktadır. DC girişin yan terminalleri bir kondansatörle paralel bağlanmaktadır ve DC kondansatör küçük, ucuz ve verimli enerji depolama bileşenidir.
- Çıkış geriliminin genliği yüke bağlı değildir. Buna karşın, çıkış akımının dalga formu ve büyüklüğü yük empedansının doğası ile bağlantılıdır.
- Yüksek anahtarlama kaybı, ancak düşük iletkenlik kaybı, böylece toplam güç kaybı düşüktür.

Harmonik analiz çalışmalarında, FV invertörlerin harmonik etkisini daha detaylı incelemek adına ağ topolojilerinde bakılması gereklidir:

Ağ topolojisi

Harmonik analiz çalışmalarında ağ topolojisi yalnızca Avrupa şebekeleri için geçerlidir ve bazen basitleştirilmiş olarak da kullanılmaktadır (Shahbazi and Khorsandi, 2017). Kanada’da ikincil dağıtım ağı oldukça farklıdır, bu nedenle, tipik Kuzey Amerika alçak gerilim şebekelerinde FV invertörün harmonik güç akışını nasıl etkilediğini tahmin etmek için daha fazla çalışma ve analize gerek duyulmaktadır.

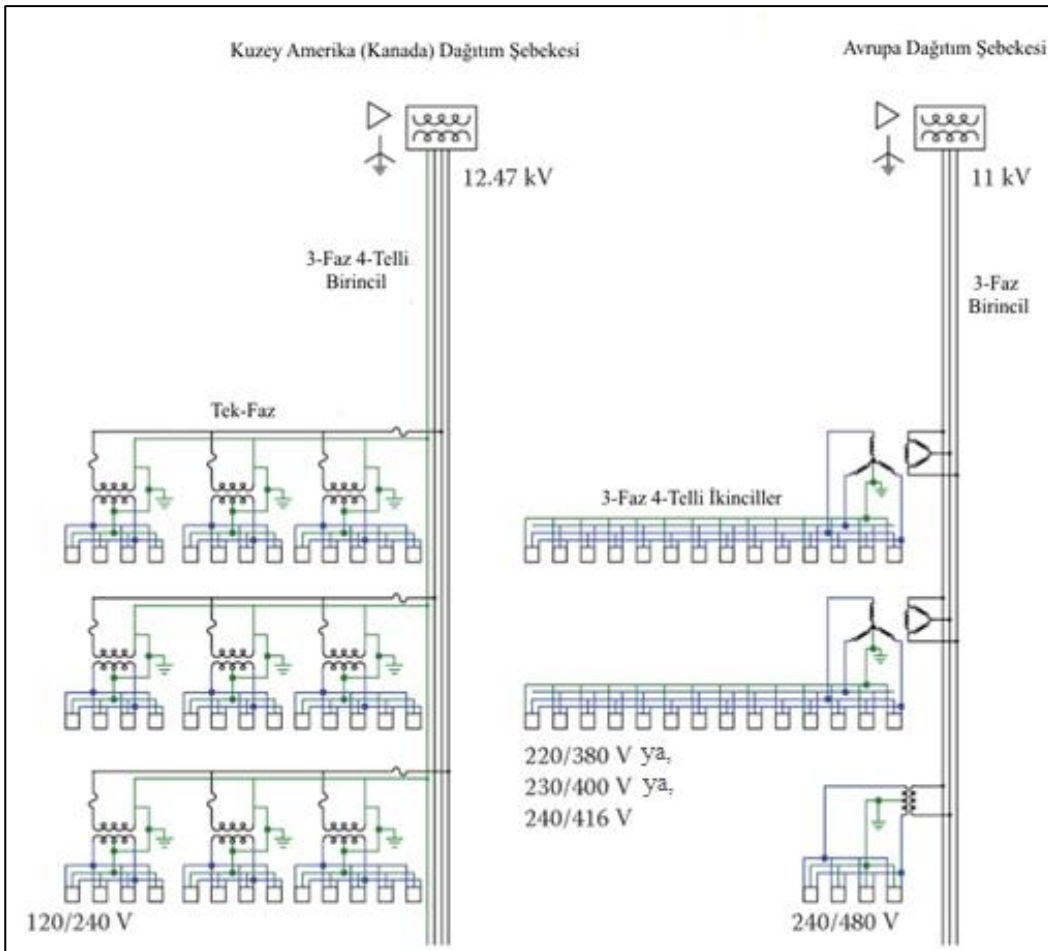
Harmonik etkiler tek bir FV invertörde çok belirgin olmayabilir ama şebeke bağlantılı FV sistemlerin sayısı çoğaldıkça ve onların harmonik etkileri birleşince alçak gerilim dağıtım şebeke ağında küçük veya büyük ölçekli sorunlar meydana gelebilmektedir. Çatı tipi FV panellerinin veya küçük ölçekli FV tesislerinin Avrupa’daki konut dağıtım ağı üzerindeki harmonik etkisini araştırmak için ölçmeye dayalı yöntemler önerilmiştir (Bhowmik et al., 2003). Şekil 4.3’de gösterildiği gibi basitleştirilmiş Avrupa ikincil sistem modelini uygulanmaktadır (Fekete et al., 2012).



Şekil 4.3 Avrupa konut dağıtım şebeke modeli.

Sunulan tez çalışması Kanada-Kuzey Amerika dağıtım şebekesi üzerinde yapıldığı için Şekil 4.4’de iki sistemin ağ şeması birlikte gösterilmiştir (Short, 2004). İki sistem karşılaştırıldığında:

Kuzey Amerika tasarımlarına kıyasla, Avrupadaki sistemlerin transformatörleri daha büyüktür ve transformatör başına daha fazla tüketici mevcuttur. Avrupa transformatörleri 3-faz ve 300 kVA ile 1000 kVA düzeyinde olup, çok daha büyüktür. Tipik Kuzey Amerika transformatörleri ise, 25 kVA veya 50 kVA değerinde tek faz ünitelerden oluşmaktadırlar. Kuzey Amerika sistemi daha esnek birincil sistem ve Avrupa sistemi daha esnek ikincil sistem tasarımına sahiptir. Avrupanın ikincil sisteminde transformatörler daha rahat yerleştirilebildiğinden kentlerde daha elverişli iken, kırsal alanlarda yük daha yayılmış olduğundan Kuzey Amerika’nın birincil sistemi daha iyi bir tasarımdır. Üç-telli Avrupa sistem transformatörü bir direnç veya reaktör üzerinden topraklanırsa, hat-toprak hatalarından kaynaklanan gerilim sarkmaları ve sızıntılarına karşı daha iyi bir sistemdir. Kuzey Amerika ikincil sistemde daha fazla empedans sorunları ve kayıplara rastlanmaktadır (Nguyen et al., 2000).



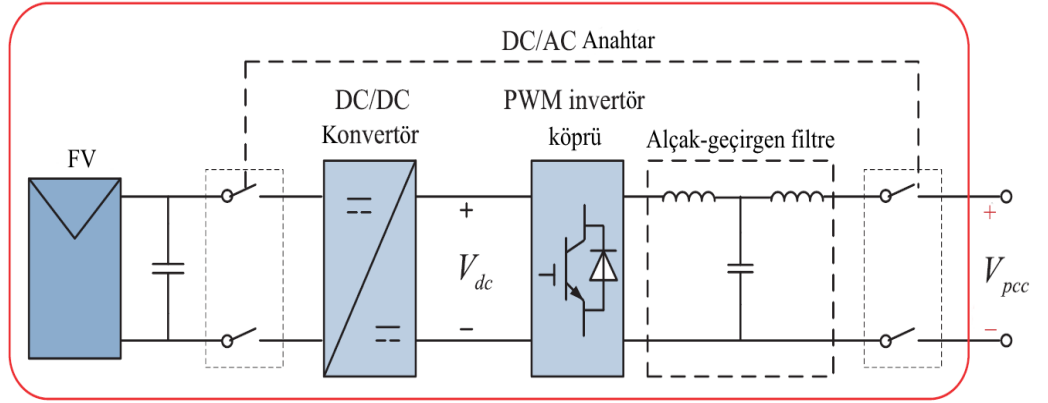
Şekil 4.4 Avrupa ve Kanada dağıtım şebekeleri.

Bu konulara ve önemli çalışmaların kuvvetli ve zayıf noktalarına bakılarak, sorun ve eksiklikleri göz önünde bulundurularak bu tez çalışması şekillendirilmiştir.

4.2 FV İnvörtör Harmonik Model Önerisi

Bu bölümde şebekeye bağlı FV invörtörlerin genel yapısı açıklanarak harmonik analiz için bir devre modeli önerilmektedir.

Şebeke bağlantılı FV invörtörünün yapısı Şekil 4.5’de gösterilmektedir. FV invörtör kutusu içindeki PWM invörtör köprü gerilimi, anahtarlama frekansı çevresinde yüksek-seviyeli ve düşük-seviyeli harmonik akımlar içermektedir (Du et al., 2013).



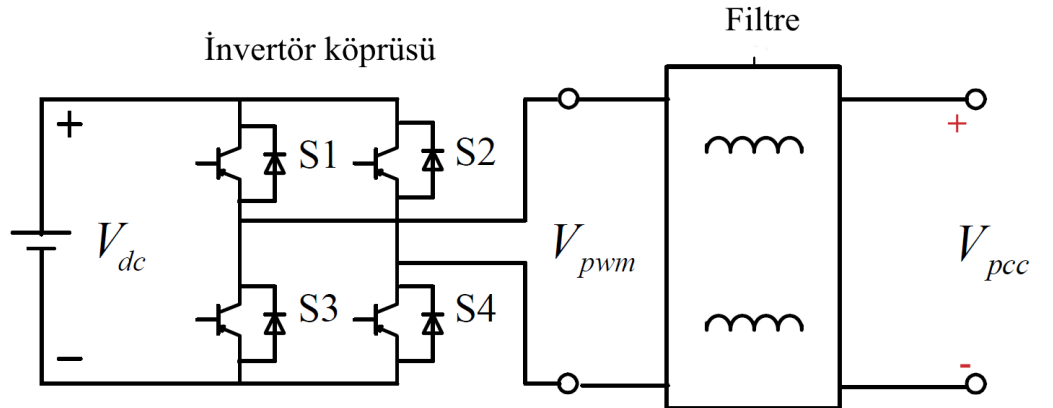
Şekil 4.5 Şebeke bağlantılı FV invertör.

FV invertörünün genel devre topolojisine göre harmonik modelleme iki aşamadan oluşmaktadır (Tran et al., 2016):

- 1) Harmonik kaynak özelliği olan invertör köprü çıkış terminali,
- 2) harmonik empedans özelliğine sahip alçak geçirgen filtre seçimi.

Filtre modeli içeren ikinci bölüm birinci bölüm modelinden sonra yapılmalıdır.

Şekil 4.6’da Tek-fazlı, trafosuz ve iki aşamalı PWM invertörü görülmektedir. PWM invertör çıkışı kararlı durumunda Denklem 4.2’de verilen $V_{pwm}(t)$ ’dir:



Şekil 4.6 Tek-fazlı PWM invertör.

$$v_{pwm}(t) = V_{dc} \times S(t) \quad (4.2)$$

Bu denklemi oluşturan kısımlar;

$S(t)$: Anahtarlama fonksiyonu zaman alanında göstermektedir ki: 0 ya da 1'dir

V_{dc} : DC-link gerilimidir.

Denklem 4.2'de invertör köprü geriliminin harmonik spektrumu $V_{pwm}(t)$, DC-link gerilimi ve PWM anahtarlama fonksiyonu ile belirlendiğini gösterir ve şebeke harmonik geriliminden etkilenmez (Hu et al., 2015). Ayrıca, DC-link gerilimi $V_{pwm}(t)$ için, küçük değerlikli ripplelar ihmal edildiğinde (IEC, 2004) harmonik bileşenler sadece anahtarlama fonksiyonuyla belirlenir. Bu nedenle anahtarlama fonksiyonu konusu detaylı incelenmelidir:

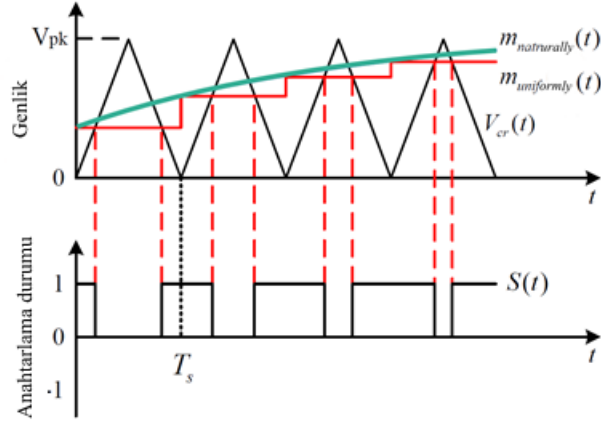
DC-link gerilim için, DC-link sabit DC gerilim kaynağı olarak modellenebilir ve DC-DC konvertörden ayrılarak invertör köprüsü zaman alanında bağımsız bir gerilim kaynağı olarak düşünülebilir (He et al., 2011).

4.2.1 Tek faz PWM invertör anahtarlama fonksiyonu

PWM modülasyonunun ilkesi Şekil 4.7'de göstermektedir. Pozitif yarım döngü sırasında, Denklem 4.3'de verilen $m(t)$ referans sinyali, $V_{cr}(t)$ ise taşıyıcı sinyali göstermektedir. Referans sinyal taşıyıcı sinyalden büyük olduğunda ($m(t) > V_{cr}(t)$), S1 ve S4 anahtarları açık; aksi takdirde anahtarlar kapanır. Negatif yarı devrede ise S2 ve S3 anahtarları benzer şekilde çalışmaktadır. Bu tekniği kullanarak, invertör çıkış voltajının büyüklüğü ve faz açısı, referans sinyalinin büyüklüğünü (M_a) ve faz açısını (φ) ile doğrudan ayarlanıp kontrol edilebilmektedir (Buso and Mattavelli, 2006).

$$m(t) \xrightarrow{\text{Örnekleme Metodu}} S(t)$$

$$m(t) = M_a \cos(\omega t - \varphi) \quad (4.3)$$



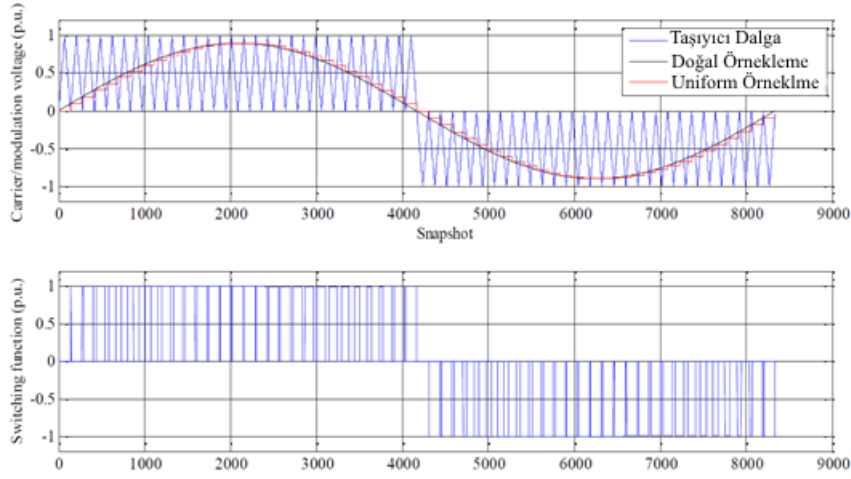
Şekil 4.7 Örnekleme yöntemi ve PWM anahtarlama fonksiyonu.

Gerilim kaynak invertörler için iki çeşit PWM anahtarlama uygulaması mevcuttur (Goh, 2011):

- **Doğal örnekleme**; naturally-sampled, referans sinyali, $m_{naturally}(t)$ ile gösterilirken,
- **Uniform örnekleme**; uniformly-sampled, referans sinyali, $m_{uniformly}(t)$ ile gösterilmektedir.

Uniform örnekleme için, referans sinyalinin güncellenmesi, sadece her bir T_s modülasyon periyodunun başlangıcında rol oynamaktadır (Buso and Mattavelli, 2006). Ne kadar anahtarlama frekansı yüksek olursa, bağlantılı olarak o kadar $m_{uniformly}$ değeri $m_{naturally}$ 'ye yaklaşmaktadır.

Şekil 4.8, iki örnekleme uygulamasına dayanan PWM anahtarlama fonksiyonu $S(t)$ örneğini göstermektedir.



Şekil 4.8 Örnekleme yöntemi ve PWM anahtarlama fonksiyon sonuçları.

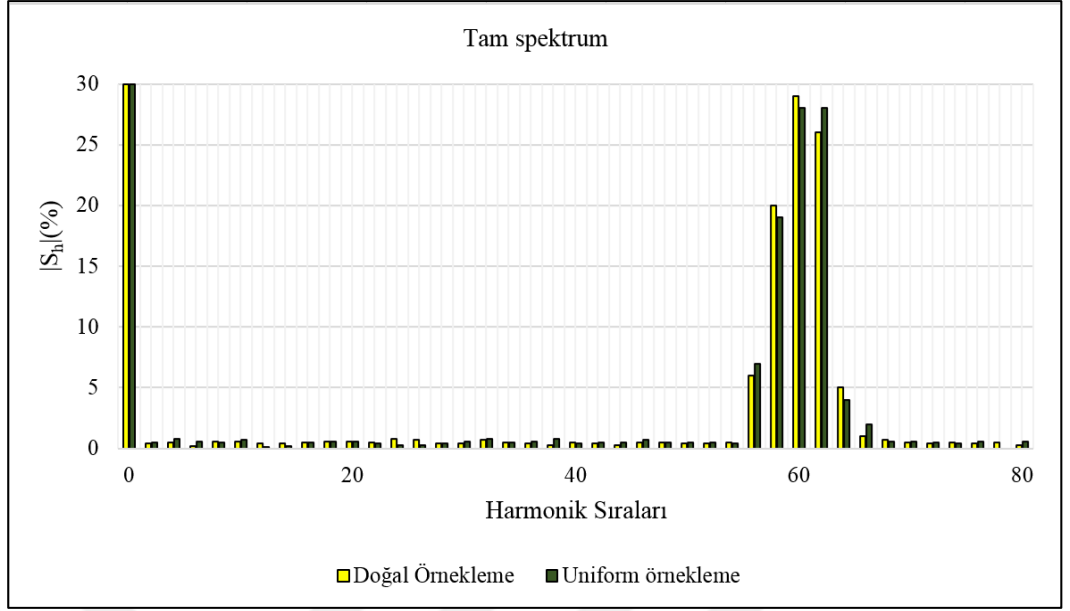
Bu örnekte, modülasyon indeksi. $M_a = 0,9$ ve anahtarlama frekansı 3600-Hz (60'ncı sıra)'dır. Anahtarlama fonksiyonunun harmonik spektrumu, Denklem 4.4'ile sayısal olarak elde edilir.

$$S(t) = \sum_{h=1}^H \sqrt{2} |S_h| \cos(h\omega t + \varphi_h) \quad (4.4)$$

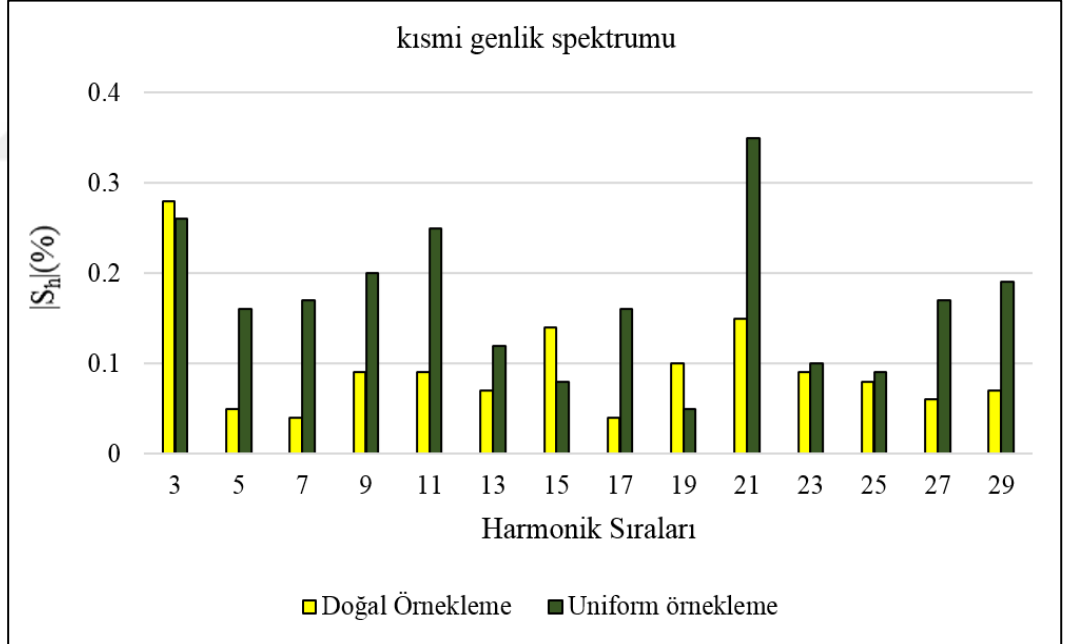
Harmonik spektrumun büyüklüğü $S(t)$ ($h = 1, 3, 5 \dots$ olarak). Şekil 4.9'da tüm bileşenleri ile Şekil 4.10'da ise kısmi olarak 29'ncü harmoniğine kadar gösterilmiştir. Çift harmoniklerin genlikleri küçük olduğundan bu grafiklerde sadece tek harmonikler gösterilmemektedir.

Bu anlatımdan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Referans sinyali tamamen sinüsoidal olsa bile, düşük-seviyeli harmonikler hala anahtarlama işlevi içerisinde bulunmaktadır.
- Doğal örnekleme ile karşılaştırıldığında uniform örnekleme, daha yüksek bir harmonik bileşene yol açmaktadır. Oysaki iki örnekleme yöntemi arasındaki harmonik anahtarlama frekansı farkı çok büyük değildir.



Şekil 4.9 Anahtarlama fonksiyonunun harmonik tam spektrumu.



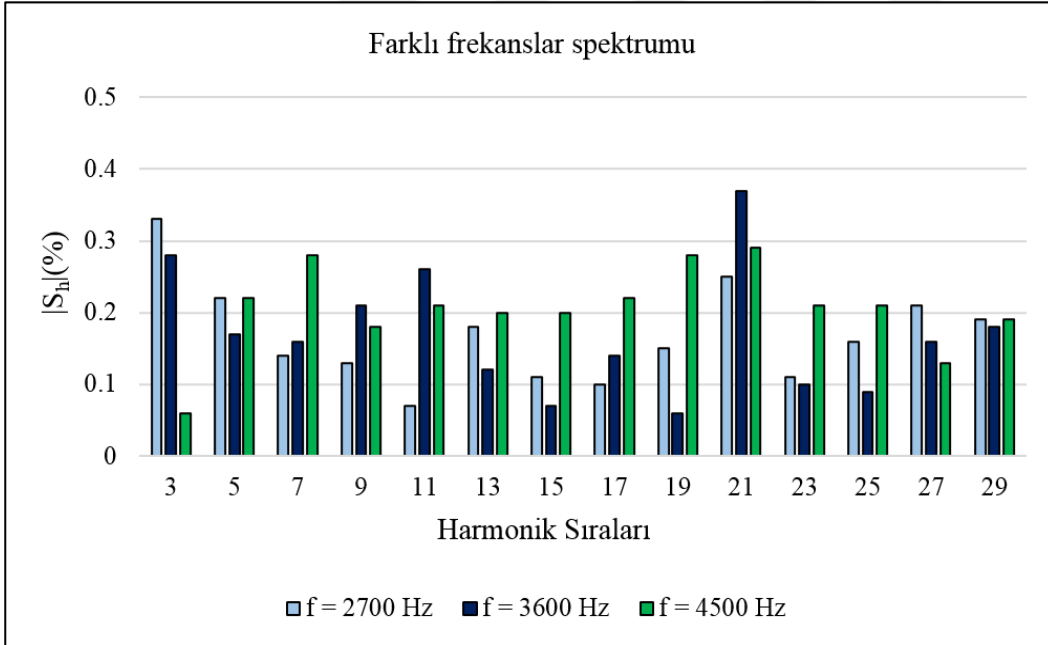
Şekil 4.10 Anahtarlama fonksiyonunun harmonik spektrumu: kısmi genlik.

Tüm yukarıdaki anlatımlara dayanarak, invertör terminal gerilimi, gerilim kaynağı ve tek harmonikler kombinasyonu olarak gösterilebilir ve hesaplamalar frekans ortamında Denklem 4.5 ile gösterilmektedir.

$$V_{pwm-h} = V_{dc} \times S_h \quad (4.5)$$

$S_h = |S_h| e^{j\theta_h}$, anahtarlama fonksiyonu $S(t)$ 'nin FFT hesaplamasıyla elde edilir. Her bir harmonik için de, invertör köprü çıkışı bağımsız bir V_{pwm-h} gerilim kaynağı olarak hareket eder.

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi, 30'nci harmoniklerin altında olan düşük seviyeli harmoniklerin değerinin hepsi % 0,5'den küçüktür, ama uniform örnekleme yöntemiyle elde edilenlerden daha yüksek harmonik değerlerine sahip olduklarından dolayı uniform örnekleme yöntemi uygulanmaktadır. Bu yöntemi doğrulamak adına anahtarlama frekansı 2700-Hz (45'nci harmonik sırası) ve 4500-Hz (75'nci harmonik sırası) düşünülerek tekrar bu spektrum değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.11 Uniform yöntemi için farklı frekanslarda anahtarlama fonksiyonunun harmonik spektrumu.

Görüldüğü gibi, düşük seviyeli harmonik spektrum oldukça hatasız ve değerler tekil harmonik bozulumu olarak % 0,5'i geçmemektedir.

4.3 FV İnvörtör Filtre Seçimi

FV invörtör filtre seçimi harmonik empedans özelliğini incelemek açısından önemlidir. Harmonik empedans özelliği, sadece filtre bazlı güç invörtörler için geçerlidir ve FV invörtörlerdeki empedans filtreden kaynaklanabilmektedir (Liserre et al., 2007).

Harmoniklerin meydana getirdiği olumsuz etkileri engelleyebilmek için FV invörtör tasarımı sırasında alınacak tedbirler yeterli olmayabilir, bu yüzden harmonik akımlarının şebekeye enjekte edilmesini engellemek için doğru invörtör devre tasarım ve seçimine ilaveten bir diğer yöntem ise, sisteme ilave edilmesi gereken ek devrelerdir. FV invörtör devrelerine ek devre olarak eklendiğinde harmonik akımlarının giderilmesini sağlayan bu devrelere “Harmonik Filtresi” denilir (Adak, 2003).

Filtre seçim yöntemleri, temel olarak aktif ve pasif filtreler olarak ikiye ayrılabilir. Pasif filtreler adından da anlaşıldığı gibi, kondansatör (C), endüktans (L) ve direnç (R), gibi pasif devre elemanlardan oluşan devrelerdir (Sucu, 2003). Temel frekans dışındaki diğer bileşenleri yok etmek için kaynak ile alıcı arasına konulmaktadırlar. Bu filtrede amaç, gidermek istenen harmonik bileşene ait frekans değerinde (L) ve (C) elemanlarının rezonansa gelmesini ve sıfır empedans göstermesini sağlamaktır (Adak, 2003).

Aktif filtreler ise, güç sisteminde doğrusal olmayan yüklerden oluşan akım harmoniklerle aynı genlikte ama ters fazda güç sistemine enjekte edilerek çalışmaktadırlar. Aktif filtreler pasif filtrelere kıyaslandığında kaynak empedans özelliğini daha az yansıtmaktadırlar (Adak, 2003).

Pasif filtreler maliyetlerinin düşük olmasından dolayı harmonik gidermesi için yaygın olarak kullanılsalar bile, oluşturdıkları rezonans devreleri nedeniyle yeni harmonik problemlerine de neden olabilmektedirler.

Bu konulardan da yola çıkarak, invörtörün filtre özelliği alçak geçirgen pasif filtre olarak düşünülmüştür.

Pasif filtrelerin başka dezavantajları da Çizelge 4.1’de gösterilmiş ve diğer bir alternatif olan aktif filtrelerle de karşılaştırılmıştır (Sucu, 2003).

Çizelge 4.1 Pasif ve aktif filtre karşılaştırılması (Sucu, 2003).

Durum	Aktif Filtre	Pasif Filtre
Harmonik Akımlarının Kontrolü	Aynı anda birçok harmonik akımının kontrolü mümkündür.	Her harmonik frekansı için bir filtre istenilir.
Harmonik frekanslarının değişiminin etkisi	Etkilenmez	Filtrenin etkinliği azalır.
Empedans modifikasyonu etkisi	Etkilenmez	Rezonans riski vardır.
Akım Yükselmesi Riski	Aşırı yüklenme riski yoktur.	Aşırı yüklenme ve bozulma riski vardır.
Sisteme yeni yük ilave edilmesi	Herhangi bir probleme yol açmaz.	Filtrenin değiştirilmesi gerekebilir.
Sistemdeki temel dalgaının frekans değişimi	Ayar ile uyum mümkündür.	Ayarlanması mümkün değildir.
Boyutlar ve ağırlık	Oldukça küçüktür.	Harmonik genliğine ve derecesine göre çok değişkendir.
Maliyet	İlk maliyet çok yüksek ama bakım gerektirmez.	İlk maliyet çok düşük ama bakım yüksektir.

Genel olarak kullanılan AC-DC invertörlerde en yaygın kullanılan pasif filtreler L, LC ve LCL filtrelerdir. Bunların içinden L tipi filtre tasarımı diğer filtrelerle nazaran daha basit olduğundan en kolay çözümdür. Fakat bu filtrede aynı toplam harmonik bozulmasını sağlamak için farklı filtre tasarımları yapıldığında, büyük endüktans değerleri gerektiğinden dolayı maliyeti en yüksek olan filtredir. Diğer taraftan bu filtrede yüksek endüktans kullanımı anahtarlama kayıplarını da arttırmaktadır (Karabacak et al., 2016).

Filtrenin bakır ve magnetik materyallerin maliyetini azaltarak boyutunu düşürmek ve bunlara ek olarak enerji kalitesini yükseltmek için LC veya LCL tipi filtreler kullanılmaktadır (Sahoo et al., 2014). LC filtre genellikle off-grid sistemlerde tercih edilir ve şebekenin iç endüktansı ile etkileşime girme olasılığı nedeniyle şebekeyle bağlantılı olarak kullanılmaz. Bu yüzden şebeke bağlantılı

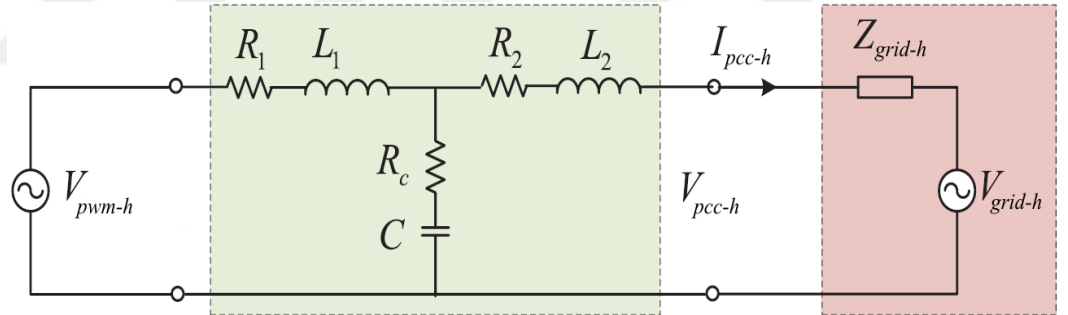
sistemlerde LCL filtre tercih edilmektedir. LCL filtre oldukça küçük boyutlu, düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir çözümdür (Husev et al., 2015).

Bu şekilde önerilen model için en uygun pasif filtre çeşidi, L ve LC filtrelerin kombinasyonu olan alçak geçirgen LCL filtreye sistem, bu tasarımdaki filtre olarak karar verilmiştir. Seçilen filtre, invertör köprü çıkış terminali ile PCC arasında takılmıştır. Bu nedenle, h 'nci harmonik için, FV invertörü Şekil 4.12'de gösterildiği gibi bir gerilim kaynağı ve bir LCL filtre bloğu olarak modellenenabilir.

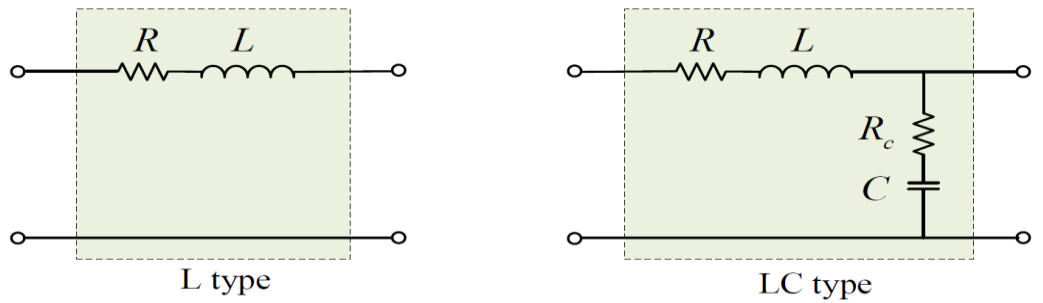
PCC'deki harmonik akımı, iki gerilim kaynağının toplam etkisinden ortaya çıkmaktadır, bu gerilim kaynakları:

- İnvörtör çıkış gerilimi, V_{pwm-h}
- Şebeke gerilimi, V_{grid-h}

LCL filtresi ile PCC üzerinden toplam harmonik akımı Denklem (4.6) ile hesaplanmaktadır.



Şekil 4.12 FV invertör harmonik modeli.



Şekil 4.13 FV invertör harmonik modeli filtre topolojisi ile.

$$I_{pcc-h} = \frac{V_{pwm-h}}{Z_{h-1} + Z_{h-c} \parallel (Z_{h-2} + Z_{grid-h})} \times \frac{Z_{h-c}}{Z_{h-c} + (Z_{h-2} + Z_{grid-h})} - \frac{Z_{grid-h}}{Z_{h-1} \parallel Z_{h-c} + (Z_{h-2} + Z_{grid-h})} \quad (4.6)$$

Bu denklemdeki empedanslar aşağıda görülmektedir:

$$\begin{aligned} Z_{h-1} &= R_1 + jh\omega L_1 \\ Z_{h-c} &= R_c + \frac{1}{jh\omega C} \\ Z_{h-2} &= R_2 + jh\omega L_2 \\ Z_{grid-h} &= R_g + jh\omega L_g \end{aligned} \quad (4.7)$$

Z_{h-1} , Z_{h-c} , Z_{h-2} , Şebekenin eşdeğer empedansları olup V_{grid-h} ise şebeke kaynaklı harmonik gerilim ifadesidir.

Sonuç olarak yukarıda açıklanan ve denklemlerle ifade edilen bilgiler ışığında bu model, FV invertörün harmonik kaynak ve harmonik empedans özelliğini yansıtmaktadır.

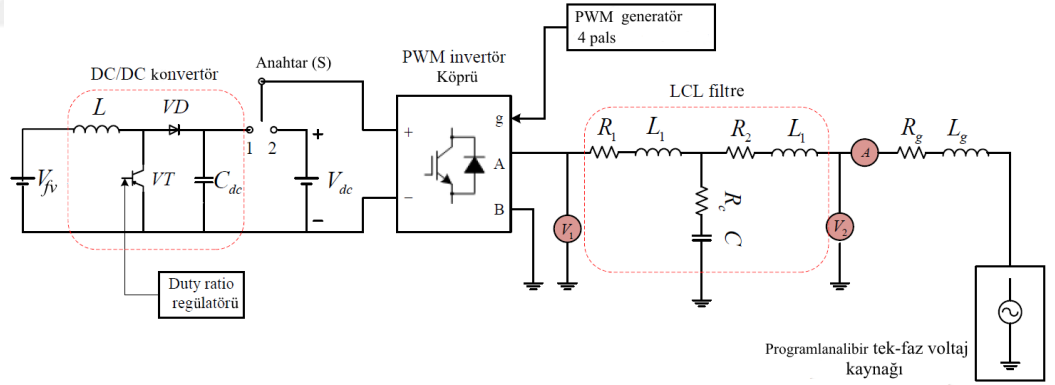
- Şebeke gerilimi sinüsoidal olup harmonik taşımasa bile FV invertör şebekeye harmonik akım enjekte etmektedir. Bununla birlikte harmonik akım şebeke harmonik geriliminden de etkilenebilmektedir.
- Ayrıca, $V_{grid-h} = 0$ olduğunda, harmonik akım I_{pcc-h} sadece FV parametrelerine değil, aynı zamanda şebeke empedansına da bağlıdır.

5. FV İNVERTÖRÜN ÖNERİLEN HARMONİK MODELİNİN SİMÜLASYON DOĞRULAMA ÇALIŞMASI

Fotovoltaik (FV) invertörlerin harmonik akım yönünden sisteme nasıl bir etki yarattığını daha detaylı incelemek için, bu bölümde önerilen FV invertör modelin simülasyonu yapılmıştır.

Simülasyon modelin özellikleri aşağıda verilen Şekil 5.1’de görülmektedir. Kontrol blok sistemi bu simülasyona eklenmemektedir ve PWM invertörün parametreleri (M_a) ve (ϕ) sabit olarak düşünülmüştür. Simülasyon modeli 4 farklı bölümden oluşmaktadır, bunlar:

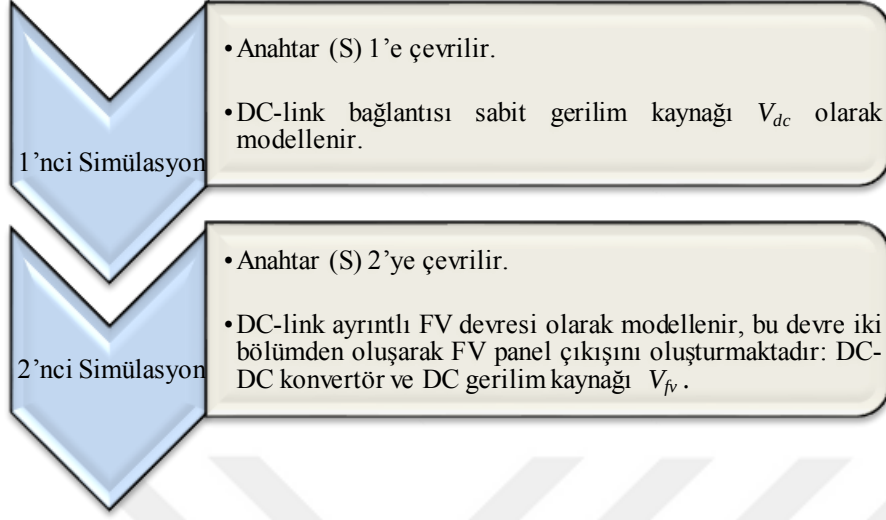
1. DC-DC konvertör
2. PWM invertör köprüsü
3. LCL filtre
4. Şebeke tarafını tanımlayan programlanabilir tek-faz voltaj kaynağı



Şekil 5.1 Simülasyonu yapılan şebeke bağlantılı FV invertörü.

Bu sistemin DC bağlantısı iki farklı şekilde modellenmiştir, bu modeller Çizelge 5.1’de detaylı olarak verilmiştir:

Çizelge 5.1 Simülasyonun iki farklı modelleme detayı.



Şebekenin AC tarafında programlanabilir tek-faz gerilim kaynağı, şebeke üzerindeki harmonik gerilimini modellemektedir. Çizelge 5.2'de simülasyon parametreleri listelenmiştir.

Buna ek olarak, V_{dc} , V_{fv} ve DC-DC konvertörün “duty ratio” oranı öyle seçilmelidir ki, PWM invertör iki simülasyonda da aynı güç seviyesinde çalışabilsin.

Çizelge 5.2 Simülasyon parametreleri listesi ve değerleri.

Bileşenler	Parçalar	Değerler
DC-Link	FV panel çıkış gerilimi, V_{fv}	150 V
	Konvertörün indüktörü, L	5 μ H
	DC-link kondansatörü, C_{dc}	2350 μ F
	DC gerilimi, V_{dc}	425 V
PWM İnvörtör	Modülasyon frekansı, ω_m	60-Hz
	Üçgen taşıyıcı açısal frekansı, ω_c	4,8 kHz
	Modülasyon indeksi, M_a	0,85
	Modülasyon indeksi, φ	8,4 deg.
LCL Filtre	İnvörtör tarafı direnc, R_l	0,05 Ω
	İnverter tarafı indüktör, L_l	2,1 mH
	Şebeke tarafı direnc, R_2	0,05 Ω
	Şebeke taraflı indüktör, L_2	1,2 mH
	Sönümleme direnci, R_c	2 Ω
	Şönt kapasitör, C	10,6 μ F
Şebeke Tarafı	Şebeke tarafı gerilim kaynağı, V_g	257 V
	Şebeke tarafı empedansı, $R_g + jX_g$	0,09+j0,055 Ω , 60-Hz'de

Simülasyon için iki farklı senaryosu Çizelge 5.3’de görüldüğü gibidir:

Çizelge 5.3 Simülasyonun iki farklı senaryosu.

1’nci Senaryo	•Şekil 5.1’de gösterildiği gibi, şebeke geriliminin sinüsoidal olmasına ve sırayla 1’nci Simülasyon ile 2’nci Simülasyon analizinin gerçekleştirilmesine izin verilir.
2’inci Senaryo	•V_g şebeke gerilimine 19’a kadar tek harmonikler eklenir (Çizelge 5.4’de verildiği gibi), ardından her iki simülasyonu tekrarlanır.

Çizelge 5.4’de harmonik gerilim spektrumunun düşük seviyeli tek harmoniklerden 19’ncuya kadar olanlar, faz açısı ve genlik parametreleri olarak verilmiştir.

Çizelge 5.4 Harmonik gerilim spektrum değerleri.

Harmonik Sırası	Büyüklik (V)	Faz Açısı (Deg.)
1	256	0
3	1,43	-56
5	4,8	-166
7	2,34	72
9	0,28	96
11	2,98	-96
13	1,53	71
15	0,24	59
17	0,29	42
19	0,15	37

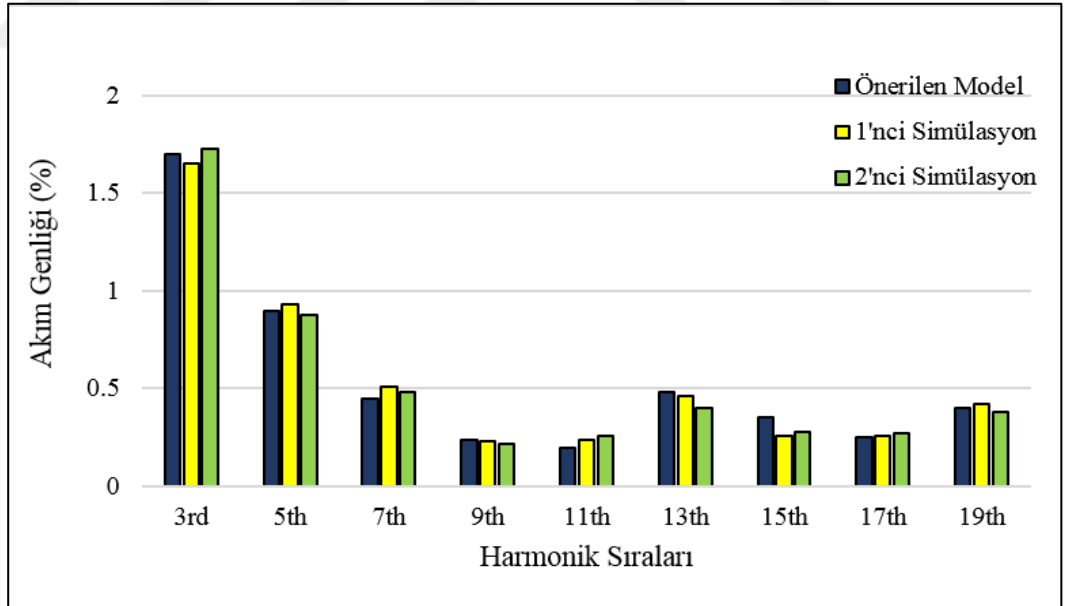
5.1 Simülasyon Sonuç ve Analizleri

Sonuçları değerlendirmek amacıyla, 3 set haromik akım ölçüm spektrumu verilmiştir:

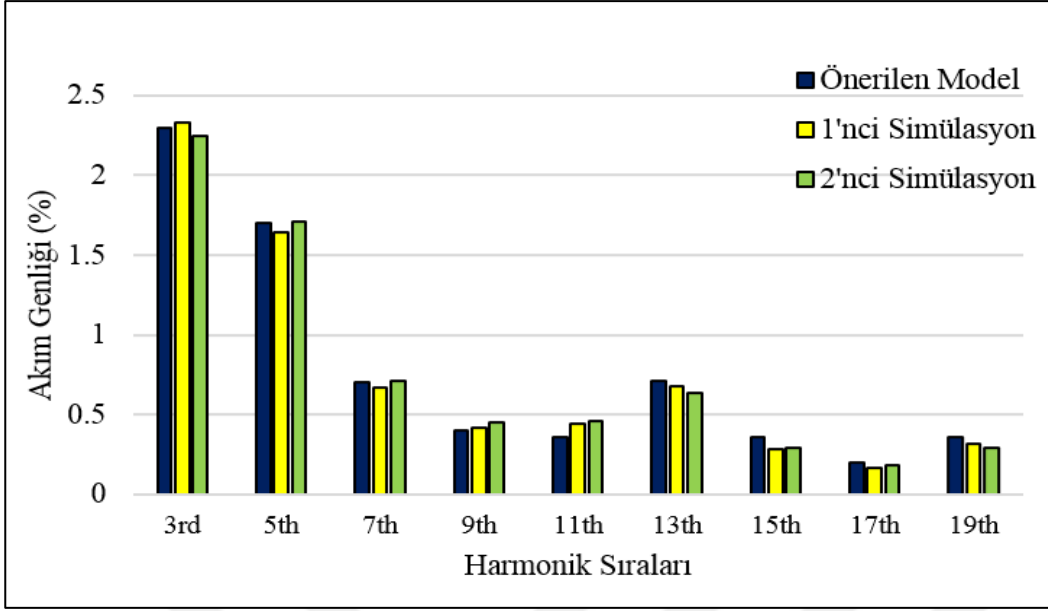
- 1'inci setimiz Şekil 4.5'de önerilen FV invertör modelden elde edilir. Burada V_{pwm-h} ve I_{pcc-h} değerleri denkem 4.6'dan hesaplanmıştır.
- 2'nci set 1'nci simülasyondan.
- 3'ncü set ise 2'nci simülasyondan elde edilmektedir.

Bu setler karşılaştırılarak önerilen harmonik modelin doğruluğunu gösterilmiştir.

Şekil 5.2'de sinüsoidal şebeke gerilimi varken, FV çıkışındaki harmonik akım spektrumunu gösterilmiştir. Şekil 5.3'de ise şebekenin arka plan bozulmuş harmonik gerilimi sisteme enjekte edilmesinden elde edilen veriler harmonik akım genliğinin yüzdesi olarak verilmiştir.



Şekil 5.2 I_{pcc} 'nin harmonik spektrumu (Sinüsoidal şebeke gerilimi etkisi altında).



Şekil 5.3 I_{pcc} 'nin harmonik spektrumu (Şebeke harmonik gerilimi etkisi altında).

1'nci ve 2'nci simülasyon arasında karşılaştırma yapıldığında analizler şu şekildedir:

DC-linki bir DC gerilim kaynağı ve diğeri, ayrıntılı devre olarak modellediğimizde, simüle edilmiş harmonik akımların çoğu harmonik sıraları için iyi bir şekilde eşleşmektedir.

Daha iyi karşılaştırmak için bu üç veri setinin fark oranları aşağıda Çizelge 5.5 ve 5.6'da gösterilmektedir:

Çizelge 5.5 1'nci senaryo için I_{pcc} 'nin harmonik veri set karşılaştırması.

Harmonik Sırası	Önerilen model ile 1'nci Simülasyon farkı	Önerilen model ile 2'nci Simülasyon farkı	1'nci Simülasyon ile 2'nci Simülasyon farkı
3rd	0,05	-0,03	-0,08
5th	-0,03	0,02	0,05
7th	-0,06	-0,03	0,03
9th	0,01	0,02	0,01
11th	-0,04	-0,06	-0,02
13th	0,02	0,08	0,06
15th	0,09	0,07	-0,02
17th	-0,01	-0,02	-0,01
19th	-0,02	0,02	0,04

Çizelge 5.6 2'nci senaryo için I_{pcc} 'nin harmonik veri set karşılaştırması.

Harmonik Sırası	Önerilen model ve 1'nci Simülasyon farkı	Önerilen model ve 2'nci Simülasyon farkı	1'nci Simülasyon ve 2'nci Simülasyon farkı
3rd	-0,03	0,05	0,08
5th	0,06	-0,01	-0,07
7th	0,03	-0,01	-0,04
9th	-0,02	-0,05	-0,03
11th	-0,08	-0,10	-0,02
13th	0,03	0,07	0,04
15th	0,08	0,07	-0,01
17th	0,03	0,02	-0,01
19th	0,04	0,07	0,03

Spektrumlar karşılaştırıldığında görülen iki simülasyonun en belirgin farklılığı; 3 ve 5'inci harmonik bileşenlerinin daha büyük olmasıdır. 2'nci simülasyonda, DC-link gerilimi, kondansatörün şarj edilmesi ve boşaltılması nedeniyle ripple içermektedir. Bu dalgalanma, invertör köprü voltajı V_{pwm-h} 'nin 3 ve 5'inci harmonik bileşenlerini ve dolayısıyla invertör çıkış akımı I_{pcc-h} 'mı değiştirmektedir. Bu olay birinci bölümde ölçümleri yapılan sistemlerde görülen baskın 3 ve 5'inci harmonik akımını da açıklamaktadır.

Önerilen model ve 1'nci simülasyon fark değerine dayanarak karşılaştırılmasında:

Önerilen modelden elde edilen harmonik akım spektrumu yaklaşık olarak 1'nci simülasyondan elde edilmiş olanlar ile aynıdır. Bununla birlikte, 1'nci simülasyondaki 11'nci ve 2'nci simülasyondaki 15'inci harmonikler karşılaştırıldığında % 20'den daha büyük fark gözükmemektedir. Durumun gerçek sebebi şu şekilde açıklanabilir:

V_{pwm-h} 'nin zaman ortamındaki simülasyonun dalga şekli formunda bazı küçük transientler (geçişler) olduğundan dolayı dalga şekli kararlı duruma ulaşamaz. Sonuç olarak, simülasyon ile elde edilen harmonik spektrum, analitik model ile elde edilen frekans-alan sonucuyla tam olarak eşleşemez.

Önerilen model ve simülasyonlarla elde edilen değerler arasında küçük farklar olmasına rağmen, 1'nci ve 2'nci simülasyonlardan elde edilen harmonik spektrum ile önerilen modelin spektrumu eşleşmektedir kararı verilebilir.

Bu nedenle, her bir harmonik sırasında DC-link (PWM invertör köprü girişini) bir DC voltaj kaynağı olarak modellenenebilir. Bu şekilde FV invertör bir alçak geçiren filtre ile harmonik gerilim kaynağı olarak simüle edilmiştir ve Şekil 5.1'deki modeli doğrulanmıştır.

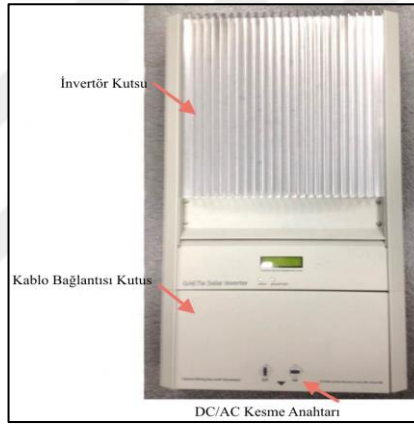


6. LABORATUVAR DOĞRULAMA ÇALIŞMASI

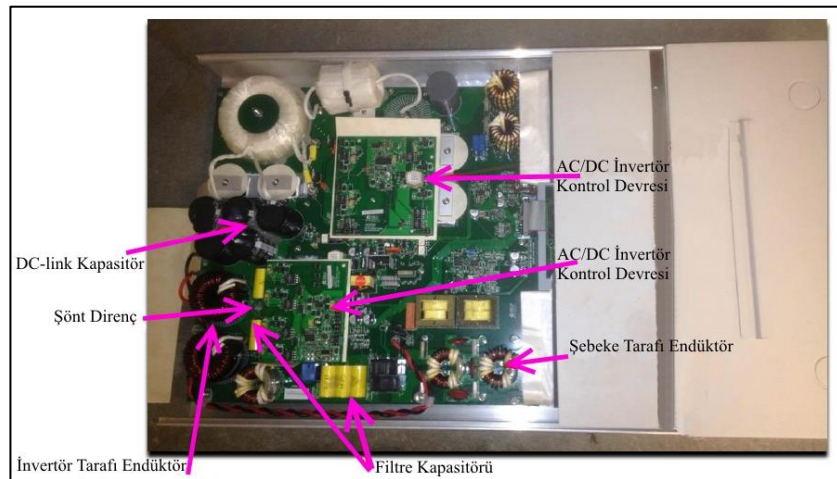
Bu bölümde laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel çalışma detaylı olarak açıklanmıştır. Söz konusu deney, V_{pwm-h} invertör PWM terminal geriliminin, şebeke harmoniği ile birbirlerini nasıl etkilediklerini araştırmaktadır.

Bu deney düzeneğinde şebeke bağlantılı GT3.0 modeli FV invertör, güneş panelinin ürettiği enerjiyi AC elektrik sinyaline çevirip şebekeye vermektedir.

Invertör temel olarak iki ayrı parçadan oluşmaktadır: birincisi FV invertör kısmı, ikincisi ise kablo / bağlantı kesme kutusudur. Invertörün ön paneli ve iç devresi sırasıyla Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 FV invertörün ön paneli.



Şekil 6.2 FV invertör iç devresi.

Name plate olarak da adlandırılan plakada verilen invertör parametreleri Şekil 6.3’de görülmektedir. Bu parametreler tablo formatına aktarılmış olarak Çizelge 6.1’de verilmiştir.

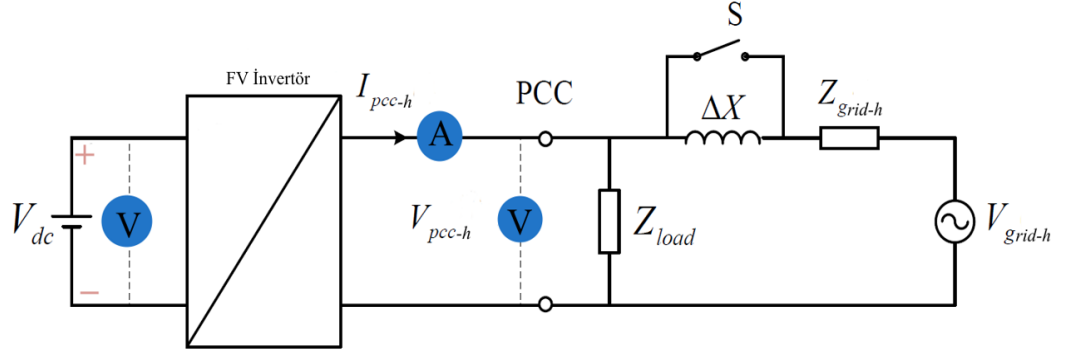


Şekil 6.3 FV invertör üzerinde yazılan parametreler.

Çizelge 6.1 GT3.0 invertör özellikleri.

Parametreler	Değerler
DC giriş voltaj aralığı	195~550 V
Masimum AC güç çıkışı	3000 W
AC çıkış gerilimi (nominal)	240 V
AC çıkış voltaj aralığı	211~264 V
Maksimum AC akım	14,2 A
Akım THB (nominal güçte)	< % 5
Güç faktörü	> 0,9 (nominal güç)
Maksimum verimlilik	% 96,6

Şekil 6.4’de kullanılan deney devresinin topolojisi gösterilmiştir. FV invertör çıkışında, şebekeye enjekte edilen ters güç akışını azaltmak için paralel olarak doğrusal bir yük (Z_{load}) bağlanmıştır. Ayrıca invertör çıkışına seri olarak bir indüktör (ΔX) yerleştirilerek, Z_{grid-h} şebeke empedansının değiştirilmesi ve bunun sonucunda PCC’deki harmonik gerilimin değiştirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 6.4 Deney devre topolojisi.

Deney iki farklı senaryoyu içermektedir, bu senaryolar Çizelge 6.2’de verilmektedir:

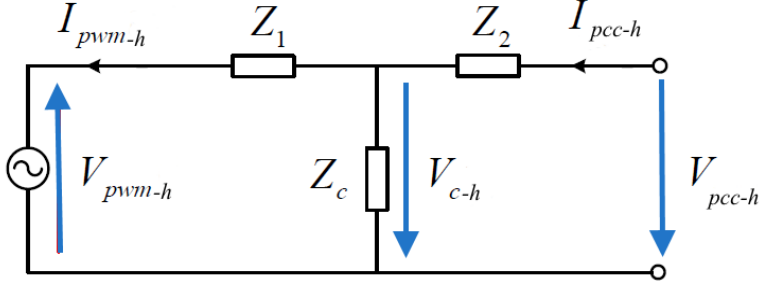
Çizelge 6.2 Laboratuvar deney senaryoları.

1’inci Senaryo	• S anahtarı, (ΔX) indüktörünü kısa devre yapacak şekilde kapatıldıktan sonra FV invertör açılır ve yaklaşık 10 dakika boyunca sistem çalıştırılarak ölçümler alınır.
2’inci Senaryo	• (ΔX) indüktörünün sisteme ilave edilmesi için S anahtarı açılarak ilk senaryodaki süreç tekrarlanır.

Deney esnasında aşağıda verilen üç parametre düzenli olarak kaydedilmiştir:

1. DC giriş gerilimi: V_V
2. AC çıkış akımı: I_{pcc}
3. AC entegrasyon gerilimi: V_{pcc}

İnverter köprü terminal gerilimi olan V_{pwm} ’i doğrudan ölçmek imkânsızdır. Şekil 6.5’de sunulan devre topolojisinden de görüleceği üzere Denklem 6.1’de verilen eşitlikler yardımıyla V_{pwm} ölçüm verileri kullanılarak hesaplanabilir:



Şekil 6.5 FV invertör devre topolojisi.

$$\begin{aligned}
 V_{c-h} &= V_{pcc-h} - I_{pcc-h} Z_{2-h} \\
 I_{pwm-h} &= I_{pcc-h} - \frac{V_{c-h}}{Z_{c-h}} \\
 V_{pwm-h} &= V_{c-h} - I_{pwm-h} Z_{1-h}
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

Denklem 6.1'deki eşitlikler tek bir denklemde birleştirilerek, direk ölçülemeyen PWM voltajı Denklem 6.2'de verilebilir:

$$V_{pwm-h} = V_{pcc-h} - I_{pcc-h} Z_{2-h} - \left(I_{pcc-h} - \frac{V_{pcc-h} - I_{pcc-h} Z_{2-h}}{Z_{c-h}} \right) Z_{1-h} \tag{6.2}$$

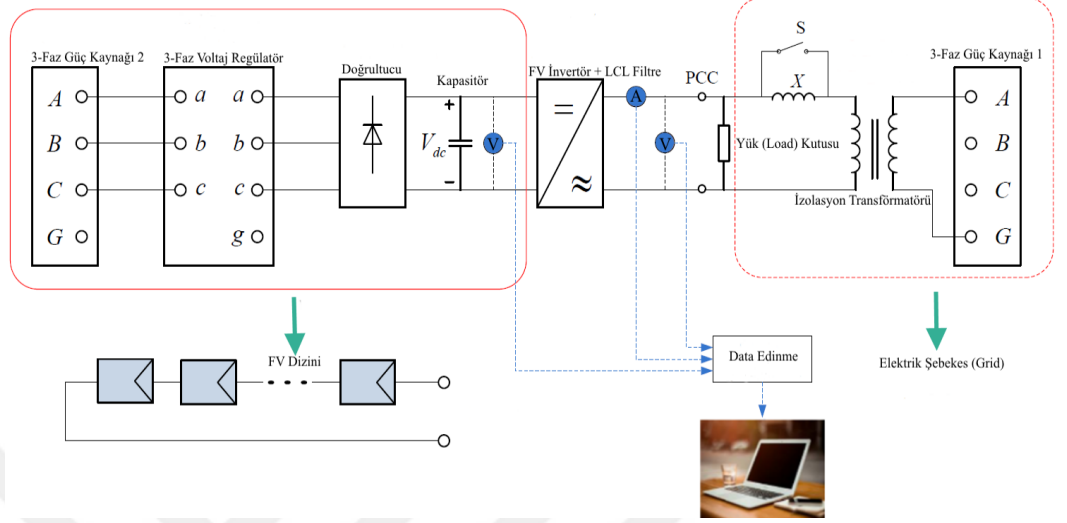
PWM voltajı hesaplandıktan sonraki adım, harmonikler için hesaplanan PWM voltajlarının ortalama değerinin hesaplanmasıdır ve harmonik spektrumu olarak da bilinen bu ortalama bir zaman periyodu süresince alınır ve Denklem 6.3'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\bar{V}_{pwm-h} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_{pwm-n-h} \tag{6.3}$$

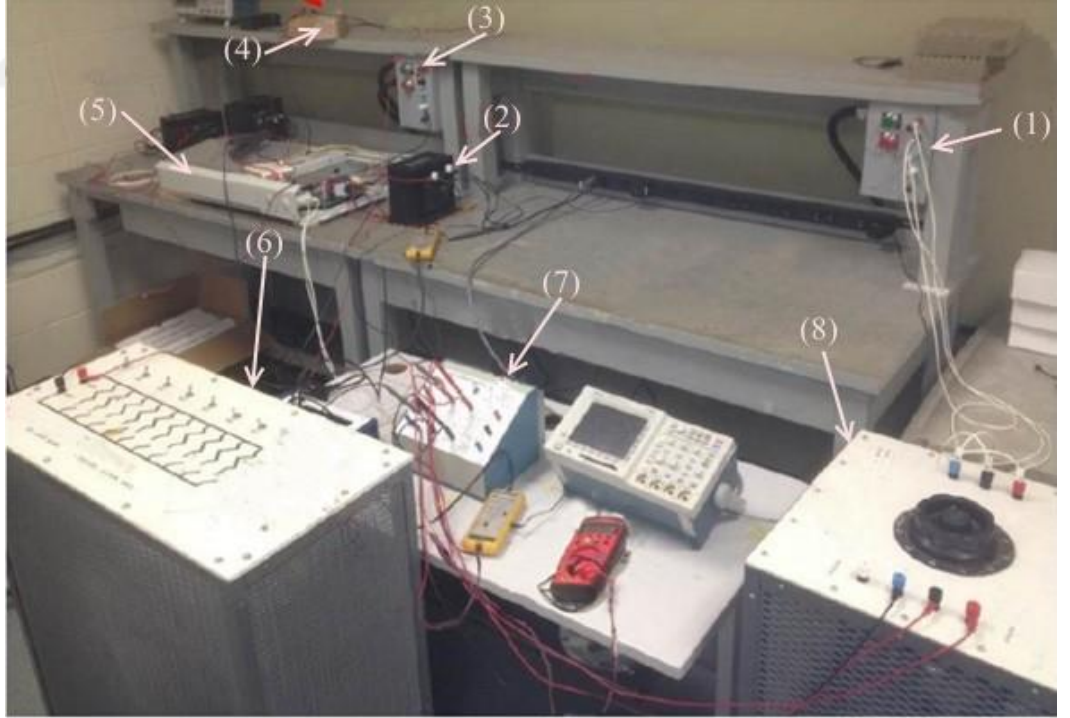
6.1 Deney Uygulaması

Deney düzeneğinin eşdeğer devresi Şekil 6.6'da sunulmuştur. Bu deneyde, FV invertör için gerekli olan (195 V'dan büyük olması istenen) DC gerilim kaynağı olarak üç fazlı doğrultucu kullanılmıştır. Deney sisteminin enstrüman kurulumu da

Şekil 6.7’de verilmiştir. Söz konusu ekipmanların listesi ile bu cihazların işlevleri ve değerleri Çizelge 6.3’de görülmektedir.



Şekil 6.6 Deney düzeneğinin eşdeğer devresi.



- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| (1) 3-Faz Güç Kaynağı 1 | (5) FV İnvertör + LCL Filtre |
| (2) İzolasyon Transformatörü | (6) Yük (Load) Kutusu |
| (3) 3-Faz Elektrik Soketi | (7) Doğrultucu + Kapasitör |
| (4) Seri Endüktör | (8) 3-Faz Voltaj Regülatör |

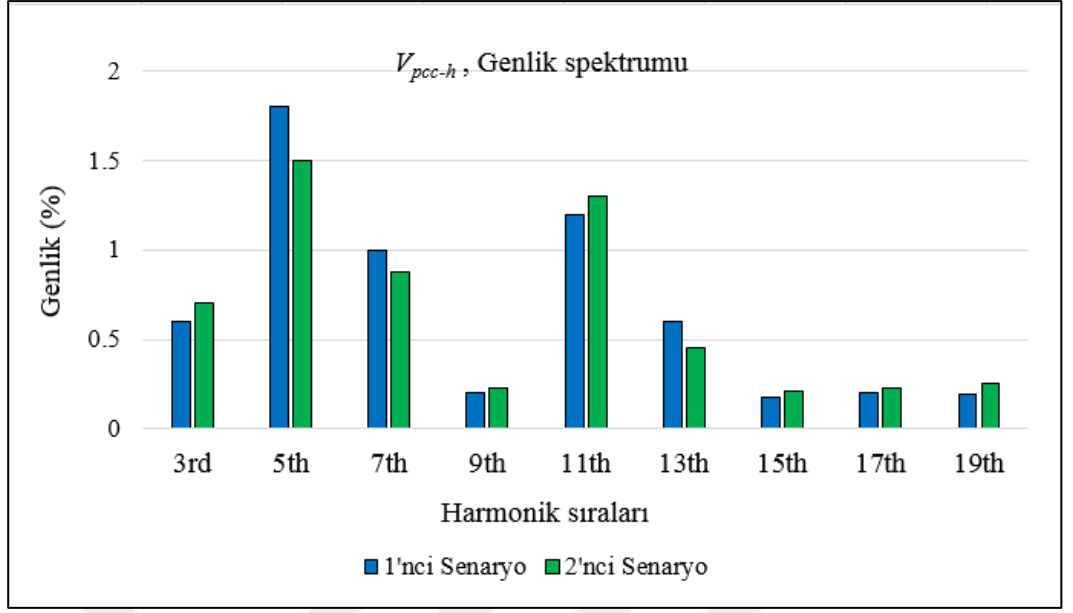
Şekil 6.7 FV entegrasyonunun deney sisteminin enstrüman kurulumu.

Çizelge 6.3 Deneydeki ekipmanlar, işlevleri ve değerleri.

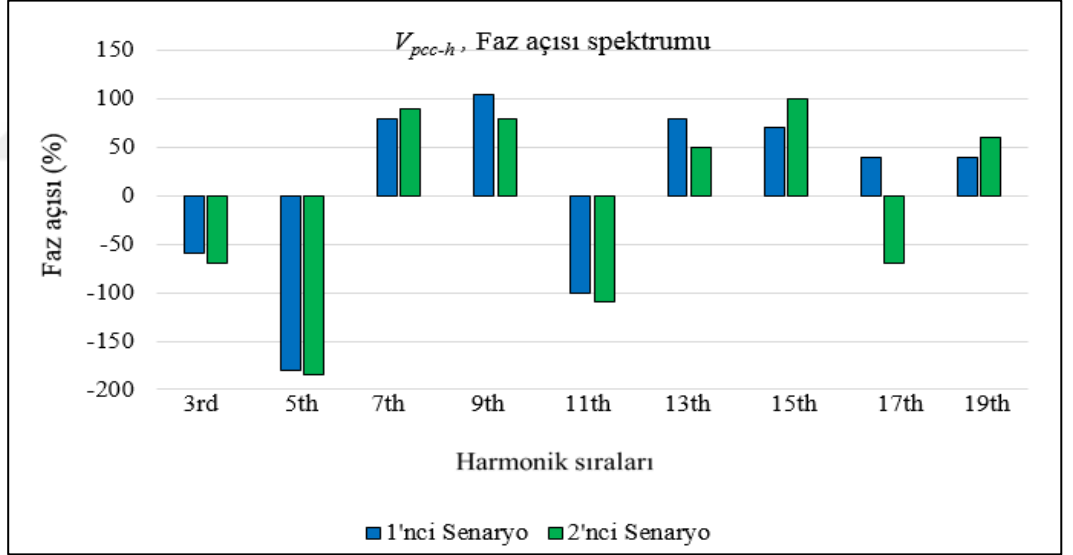
Bileşenler	Parametreler ve İşlevleri
3-Faz Güç Kaynağı 1 3-Faz Güç Kaynağı 2	Faz voltajı: 120 V, Voltaj regülatörünü besleyerek, FV invertör entegrasyonu için PCC gibi davranmaktadır.
3-Faz Voltaj Regülatör	Faz voltajı aralığı: 0 ~ 120 V, Doğrultucu için uygun bir voltaj oluşturmaktadır.
Doğrultucu Kutusu	Maksimum AC gerilimi: 800 V (V_{peak}) Maksimum akım: 25 A FV dönüştürücü için DC voltajı üretmektedir.
Elektrolitik Kapasitör	Maksimum voltaj: 450 V Kapasitans: 1440 μ F DC-Link voltajının dalgalanmasını azaltmaktadır.
FV İnvörtör	Maksimum güç: 3 kW DC giriş voltaj aralığı: 195 ~ 600V AC çıkış voltaj aralığı: 211 ~ 264V
Endüktör	Endüktans: 3 mH
Yük Kutusu	Direnç: 125 / N Ω (N = 1-10) FV invertörü tarafından üretilen AC gücünü tüketmektedir.
İzolasyon Transförmatorü	Dönüş oranı: 240 V / 120 V 1) Servis panelinin 240 V faz-faz gerilimini simüle etmek için, soket gerilimini 240 V'a yükseltmektedir, 2) FV invertörü izole ederek, kısa devreyi önlemektedir.

6.2 Ölçüm Sonuçları ve Analizleri

Harmonik gerilim spektrumu, genlik ve faz açısı ile verilmektedir. Şekil 6.8 ve 6.9'da PCC noktasındaki gerilimin genliği ve faz açısının 1'inci ve 2'nci seneryoya göre değişimi görülmektedir. Bu iki grafik direk ölçüm sonuçlarıdır ve iki grafiğin farkı seri endüktasının devre üzerindeki etkisidir. PCC voltajının temel frekans bileşeninin genlikleri 1'nci seneryo için 258,4 V ve 2'nci seneryo için 256,6 V olarak ölçülmüştür.



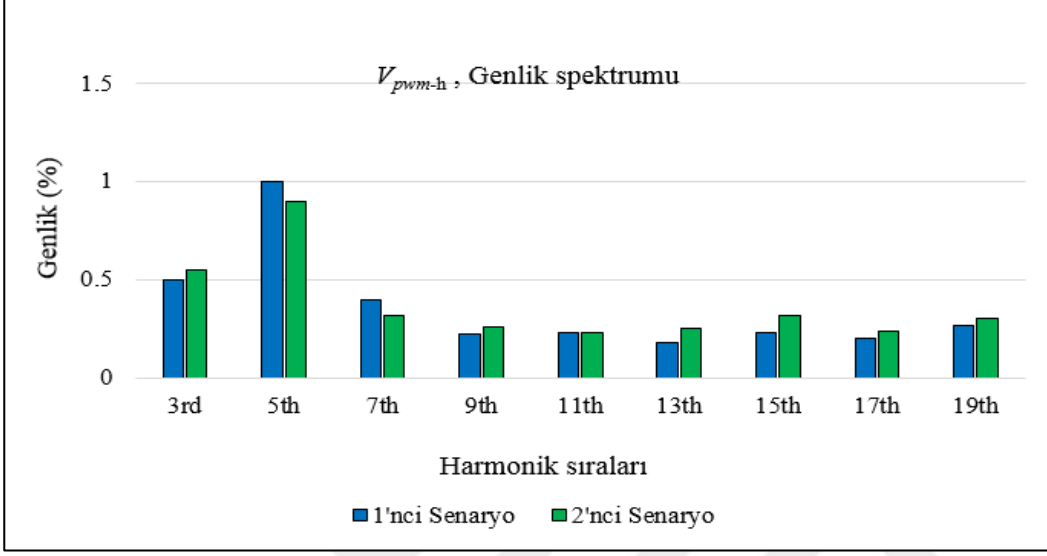
Şekil 6.8 PCC geriliminin harmonik (V_{pcc-h}) genlik spektrumu.



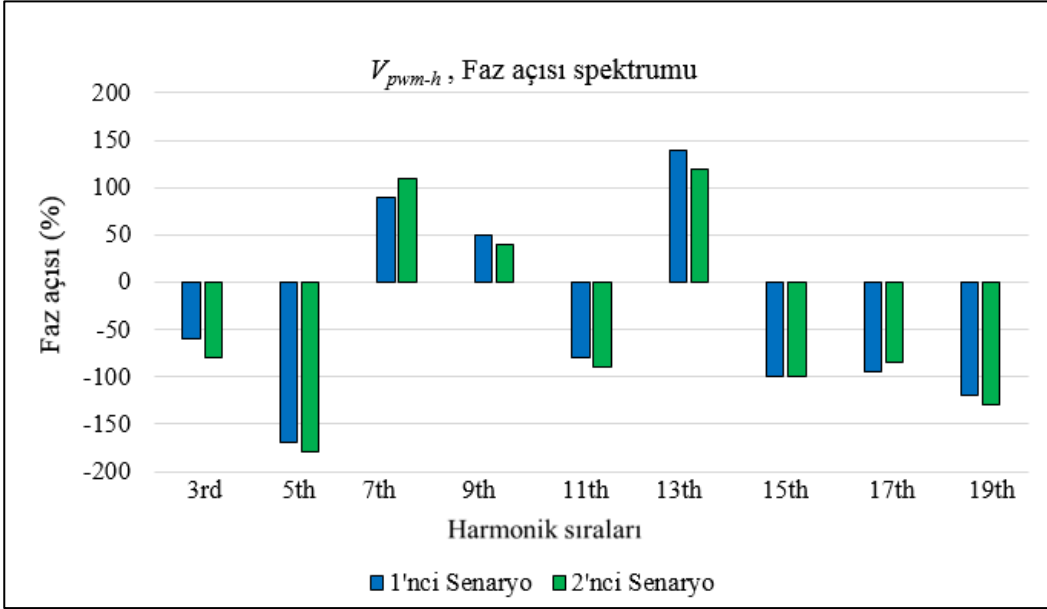
Şekil 6.9 PCC geriliminin harmonik (V_{pcc-h}) faz açısı spektrumu.

Şekil 6.10 ve 6.11’da ise direk ölçülen akım ve gerilim değerleri kullanılarak Denklem 6.2’ye göre hesaplanan (dolaylı ölçüm) PWM harmonik voltajlarının genlik ve faz açısı grafikleri iki farklı senaryo için gösterilmiştir.

V_{pwm-h} 'nin genliği ve faz açısının her iki senaryoda da farklı harmonik arka planları olduğu halde hemen hemen eşleştiği söylenebilir, aralarındaki farklar ise Çizelge 6.4'de verilmiştir.



Şekil 6.10 İnvörtör köprü geriliminin (V_{pwm-h}) harmonik genlik spektrumu.



Şekil 6.11 İnvörtör köprü geriliminin (V_{pwm-h}) harmonik faz açısı spektrumu.

Çizelge 6.4 Senaryolar için V_{pwm-h} ve V_{pcc-h} genlik farkları.

Harmonik Sıraları	V_{pcc-h} genliği için, 1'nci ve 2'nci Senaryo farkı	V_{pwm-h} genliği için, 1'nci ve 2'nci Senaryo farkı
3rd	-0,10	-0,05
5th	0,30	0,10
7th	0,12	0,08
9th	-0,03	-0,04
11th	-0,10	0,00
13th	0,15	-0,07
15th	-0,03	-0,09
17th	-0,03	-0,04
19th	-0,06	-0,03

Çizelge 6.4'deki verilere bakıldığında, V_{pwm-h} ile V_{pcc-h} arasındaki her bir harmonik sırası için genlik farklarının oldukça küçük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, harmonik frekanslar için invertör köprü çıkış geriliminin bağımsız bir gerilim kaynağı olarak modellenmesi kabul edilebilir bir yaklaşımdır. Bu ölçümlerin sonucu olarak, FV invertörün önerilen harmonik modelinin doğrulandığı tespit edilmiştir.

7. FV İNVERTÖRLERİN DAĞITIM SİSTEMLERİ ÜZERİNDEKİ HARMONİK ETKİSİ

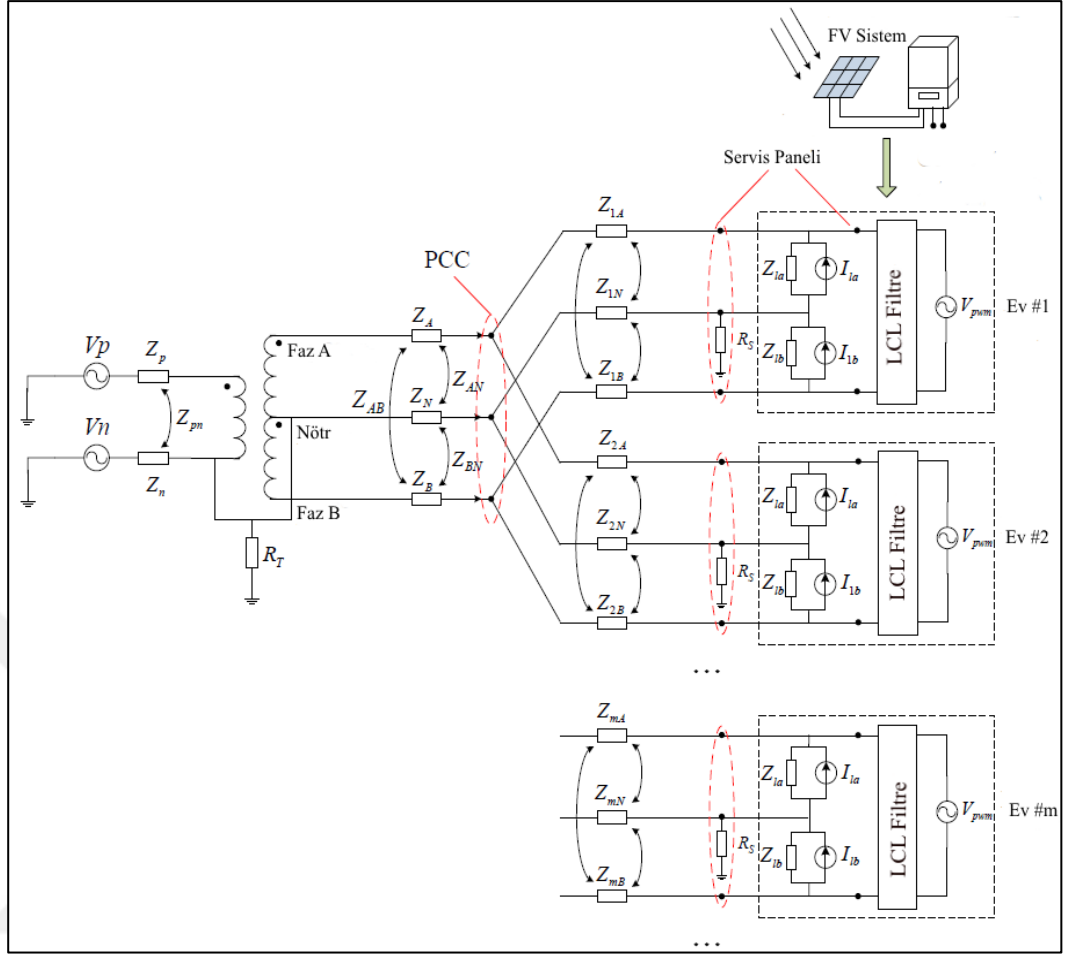
Geçmiş bölümlerde önerilen harmonik modele göre, FV invertörün potansiyel harmonik etkisi iki yönden incelenip sonuçlar elde edilmiştir:

- FV invertörler, harmonik kaynağı olarak güç sistemine harmonik akım enjekte edebilmektedirler. Fakat bu harmonik akım enjeksiyonunun oldukça küçük olduğunu gözlenmiştir.
- Diğer taraftan FV invertörler filtre empedansı içermektedirler. Filtre, belirli bir frekans bandında kapasitif olup, şebeke empedansı ile etkileşerek rezonans sorunlarına neden olabilmektedir.

Yakın gelecekte dağıtılmış FV invertörlerin kurulumu yaygınlaşıp, sayılarının hızlı bir şekilde artması beklenmektedir. Bu koşullar altında, yukarıda belirtilen harmonik kaynaklı iki sorunu ciddi bir şekilde değerlendirmek oldukça önemlidir. Bu yüzden tezin bu bölümünde küçük ölçekli konut tipi FV sistemlerde invertörlerin ikincil dağıtım şebekesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bunun neticesinde ilk bölüm ölçümlerinde karşılaşılan yüksek genlikli akım harmoniğinin nedeni daha detaylı açığa çıkmaktadır.

Şebekeye bağlı FV sistemler kurulu güçlerine göre sınıflandırılırlar. Çiftlik olarak da adlandırılan ve gücü 100 MW ve üzeri olan güneş santralleri olduğu gibi, konut (birkaç kilowatt'a kadar) veya ticari (birkaç megawatt'a kadar) amaçla yapılan sistemler de şebekeye bağlı olarak çalışmaktadırlar (Liang, 2017).

FV invertörler, ülkemizde çift yönlü sayaç ile sisteme bağlanırken, Kuzey Amerika'da konut tipi güneş enerji sistemleri ev servis-paneli aracılığıyla ikincil dağıtım sistemine entegre edilmektedirler. Çalışmanın bu kısmı Kanada'da yapıldığı için, Kuzey Amerika tipi ikincil dağıtım sisteminin detayları Şekil 7.1'de verilmiştir (Salles et al., 2012).



Şekil 7.1 FV entegrasyonu ile Kuzey Amerika ikincil dağıtım sistemi.

Elektrik dağıtım sistemi özellikleri şu şekildedir:

- 14,4 kV'luk birincil ağ eşdeğer devresi
- Tek-fazlı üç-sargılı 14,4 / 2 × 0,12 kV değerinde servis transformatörü
- İki-fazlı, üç-telli ikincil iletken ve paralel bağlı birkaç ev grubu
- FV invertör (her biri bağlandıkları evin giriş noktasında faz-faz bağlanmıştır).

Şekil 7.1'de, her bir evin aynı fazına bağlı olan yükler Z_{la} ve I_{la} , gibi tek bir empedans ve akım kaynağı olarak bir araya toplanmaktadırlar. Çalışmanın bu aşaması, aşağıdaki gibi açıklanabilir:

Konutlarda olması beklenen mevcut doğrusal ve doğrusal olmayan yükler, çektikleri güç üzerinden, temel frekansta $P + jQ$ elemanı olarak modellenmiştir.

Harmonik ortamda doğrusal yükler seri empedans olarak ve doğrusal olmayan (FV hariç) yükler harmonik akım kaynağı olarak modellenmektedir (He , et al., 2011).

Doğrusal yükler Denklem 7.1’de verildiği gibi empedans olarak hesaplanabilir.

$$Z(h) = R + jX(h) = \frac{P}{P^2 + Q^2} V_r^2 + jh \frac{Q}{P^2 + Q^2} V_r^2 \quad (7.1)$$

Burada P yükün anma gerçek gücünü ve Q nominal reaktif gücünü ifade etmektedir. Servis panelinin anma gerilimi V_r ile gösterilmektedir ve bu değer 120 V veya 240 V’a eşittir.

Ayrıca, doğrusal olmayan bir yük akım kaynağı olarak modellenmiştir. Bir yükün harmonik akımı büyüklüğü ve faz açısı, yüklerin harmonik spektrumuna göre belirlenmektedir, bu model Denklem 7.2’de verilmektedir.

$$I_h = I_1 \frac{I_{h\text{-spectrum}}}{I_{1\text{-spectrum}}}, \theta_h = \theta_{h\text{-spectrum}} + h(\theta_1 - \theta_{1\text{-spectrum}}) \quad (7.2)$$

FV invertörün ve ikincil dağıtım şebekesinin parametreleri sırasıyla, Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 7.1 FV invertör parametreleri ikincil dağıtım sistem entegrasyonu için.

Parametreler	Değerler
Anma gücü	1,5 kW
İnvertör tarafı, L_1	2,1 mH
İnvertör tarafı, R_1	0,05 Ω
Şebeke tarafı, L_2	1,2 mH
Şebeke tarafı, R_2	0,05 Ω
Kapasitör, C	10,4 μ F
Şönt Direnç, R_c	2 Ω

Çizelge 7.2 İkincil dağıtım sistem parametreleri.

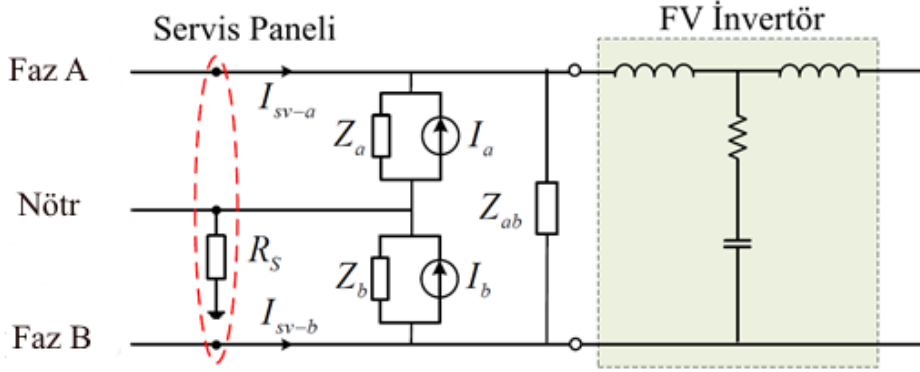
Kategori	Prametreler	Değerler
Birincil Sistem	Faz gerilimi, V_p Nötr voltaj, V_n Kaynak eşdeğer impedans	14,4 kV 10 V $Z_p = 64,04 + j46,58 \Omega$ $Z_n = 1,537 + j0,448 \Omega$ $Z_{pn} = 0,439 + j0,834 \Omega$
Servis Transformatörü	Görünür güç, S_r Ana güç, S_{base} Voltaj derecesi Kısa devre, R Kısa devre, X Topraklama direnci, R_T	37,5 KVA 37,5 KVA 14400 / 120 V 0 $X_{pa} = 0,04 p.u.$, $X_{pb} = 0,04 p.u.$ $X_{ab} = 0,05 p.u.$ 12 Ω
İkincil Sistem	İlincil iletken empedansı (kendi ve karşılıklı empedans) Transförmator boyu – PCC PCC Uzunluğu - Ev	$Z_A = Z_B = 0,249 + j0,878 \Omega / km$ $Z_N = 0,427 + j0,961 \Omega / km$ $Z_{AN} = Z_{BN} = 0,0592 + j0,429 \Omega / km$ $Z_{AB} = 0,0592 + j0,491 \Omega / km$ $l_0 = 0,10 km$ $l_1 = 0,09 km$, $l_2 = 0,07 km$, ...
Ev	Topraklama direnci, R_s Faz empedansı Nötr empedansı	1 Ω $Z_{ph} = 0,21 + j0,094 \Omega / km$ $Z_{nn} = 0,55 + j0,365 \Omega / km$

7.1 FV İnvörtör ve Evdeki Elektrik Cihazlar Modeli İle Genel Harmonik Etkisi

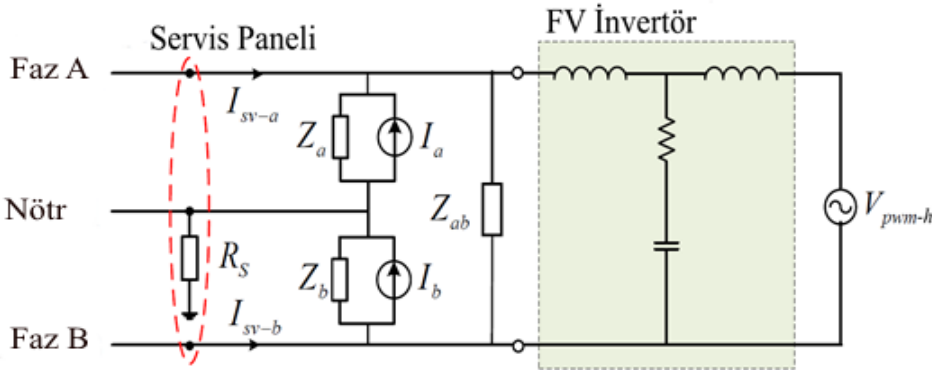
Elektrik dağıtım şebekesine bağlı FV sistemi olan bir evin, elektrik cihazlarıyla birlikte ikincil dağıtım sistemde nasıl bir harmonik etki yarattığını karşılaştırmak için gerilim kaynağı ve filtre empedansı, üç farklı durum için simüle edilmiştir:

- 1'nci Durum (FV Yok): evde güneş sistemi ve FV invertör bulunmamaktadır.
- 2'nci Durum (FV Filtre Modeli): her eve, bir FV invertör ile bağlanmakta olan bir güneş sistem mevcuttur. FV, Şekil 7.2'de gösterildiği gibi pasif bir filtre ile modellenmiştir.
- 3'ncü Durum (FV Tam Model): her evde, bir FV sistemi mevcut olup, filtresi olan bu FV Şekil 7.3'de gösterildiği gibi şebeke kaynaklı

harmonikleri modelleyen bir harmonik gerilim kaynağı ile seri bağlanarak modellenmiştir.



Şekil 7.2 Konut modeli, FV invertör filtre modeli ile.



Şekil 7.3 Konut modeli, FV invertör Tam Modeli ile.

7.2 Konut İçi Elektrikli Aletlerinin Davranış Modelleri

FV invertörlerin harmonik etkisi şebeke çalışma koşuluyla ilgilidir. Bu harmonik etkisi servis panelinden gelen şebeke empedansı ve şebeke arka plan harmoniğinden oluşmaktadır. Çalışmanın bu kısmında rastgele davranışı temsil etmek için, gün boyunca üç farklı zaman periyodu belirlenerek simülasyonlar yapılmıştır.

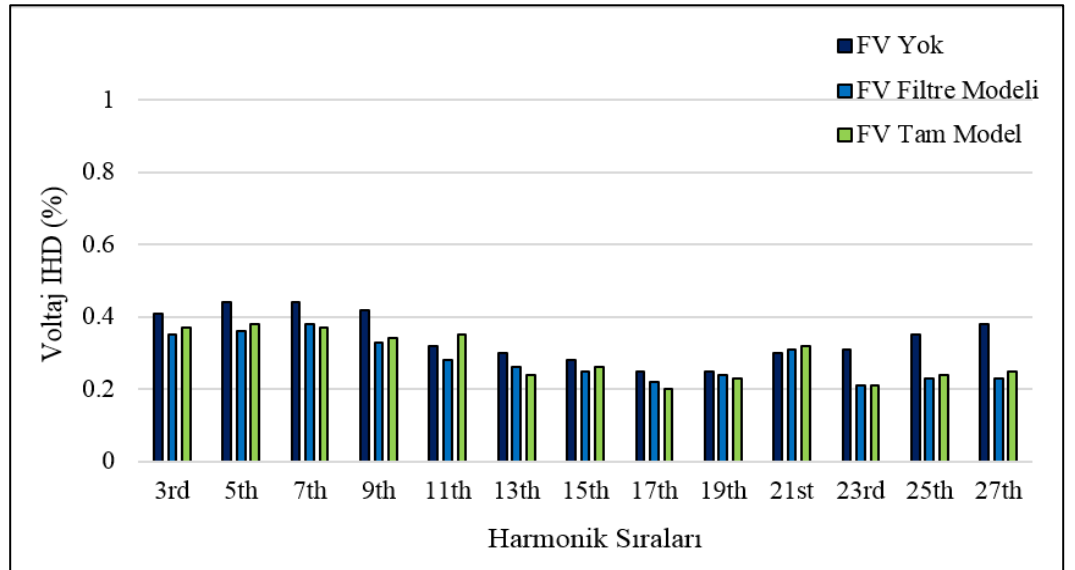
Tablo 7.3'de gösterildiği gibi, yükler sabah, öğlen ve akşam saatlerinde, her evin genel yaşam tarzına göre manüel olarak devreye sokulmaktadır.

Örneğin, ekmek kızartıcı ve ocağın sabahları açık olması muhtemeldir; TV ve bilgisayar öğle veya akşam saatlerinde açık durumdadır. Her zaman dilimi için, ev aletlerinin açılma zamanlamaları tanımlanmıştır.

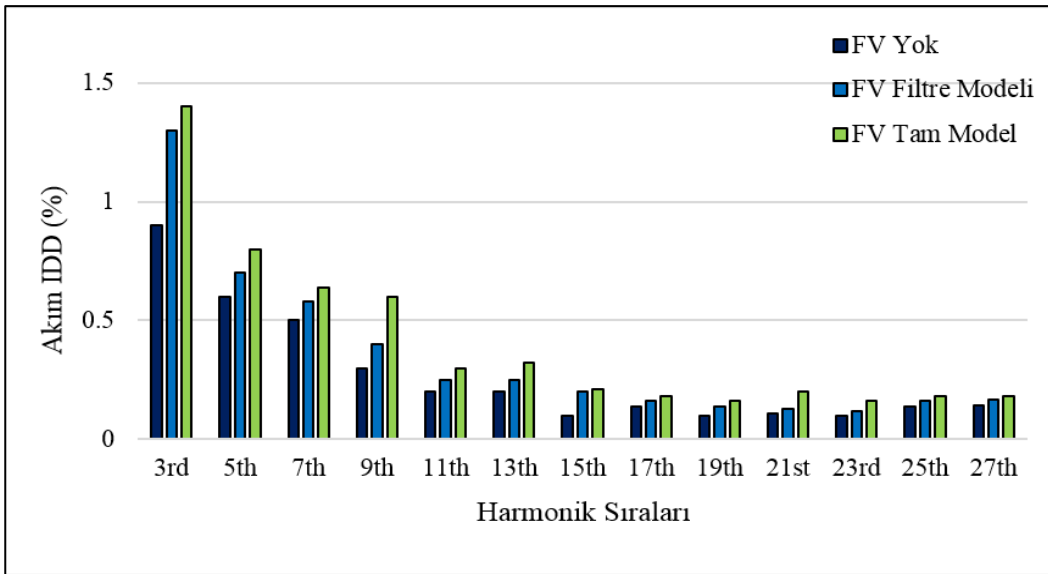
Çizelge 7.1 Benzetim için günlük zaman dilimi ve ev aktivite tanımlaması.

Zaman Dilimi	Eve Ait Temel Aktiviteler	Ev Elektrik Aletleri
Sabah 6:00-7:00	Kahvaltı	Ekmek kızartma makinası, ocak, mikrodalga, lamba, Kompakt, floresan lamba ,...
Öğlen 12:00-13:00	Öğlen yemeği	Ocak, fırın, mikrodalga fırın, TV, bilgisayar,...
Akşam 17:00-18:00	Akşam yemeği ve bulaşık	Ocak, fırın, mikrodalga fırın, TV, bilgisayar, bulaşık ve çamaşır makinesi, lamba, kompakt floresan lamba,...

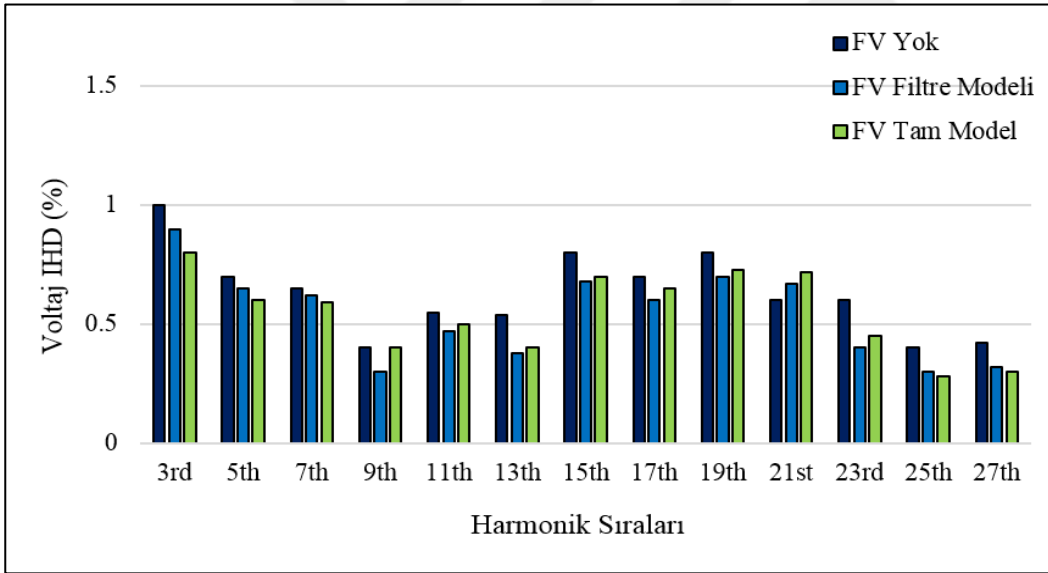
Üç zaman diliminin harmonik voltaj ve akım talep bozulumu sırayla Şekil 7.4'den 7.9'a kadar sunulmuştur.



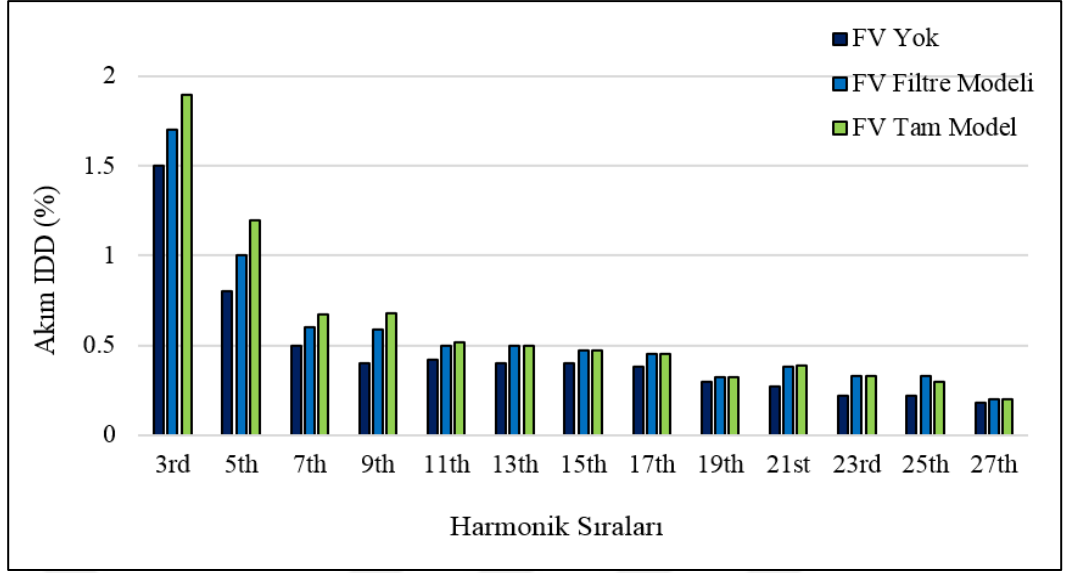
Şekil 7.4 Sabah: 6:00-7:00 harmonik gerilim spektrumu.



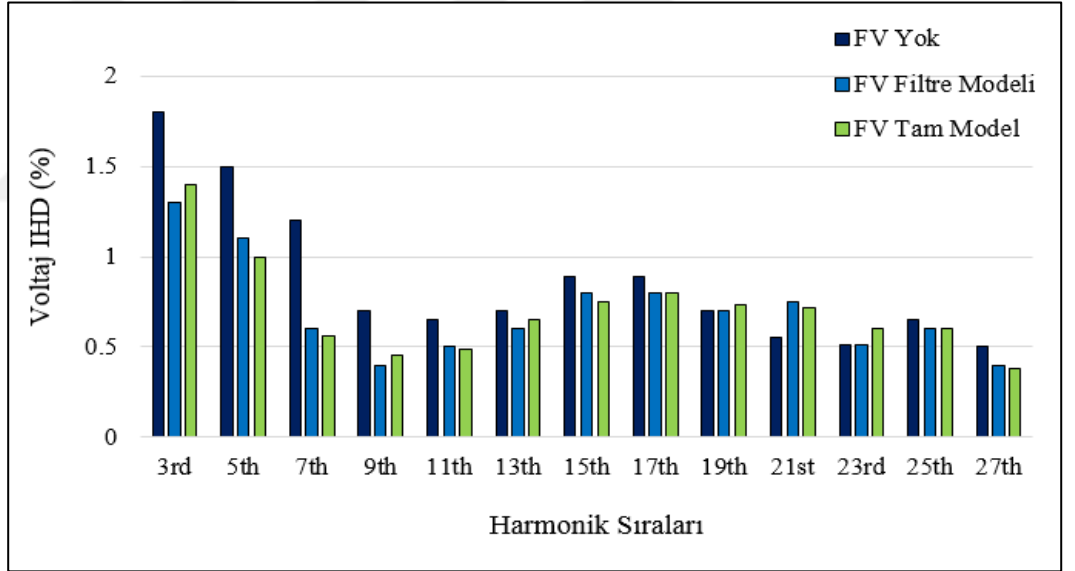
Şekil 7.5 Sabah: 6:00-7:00 harmonik akım spektrumu.



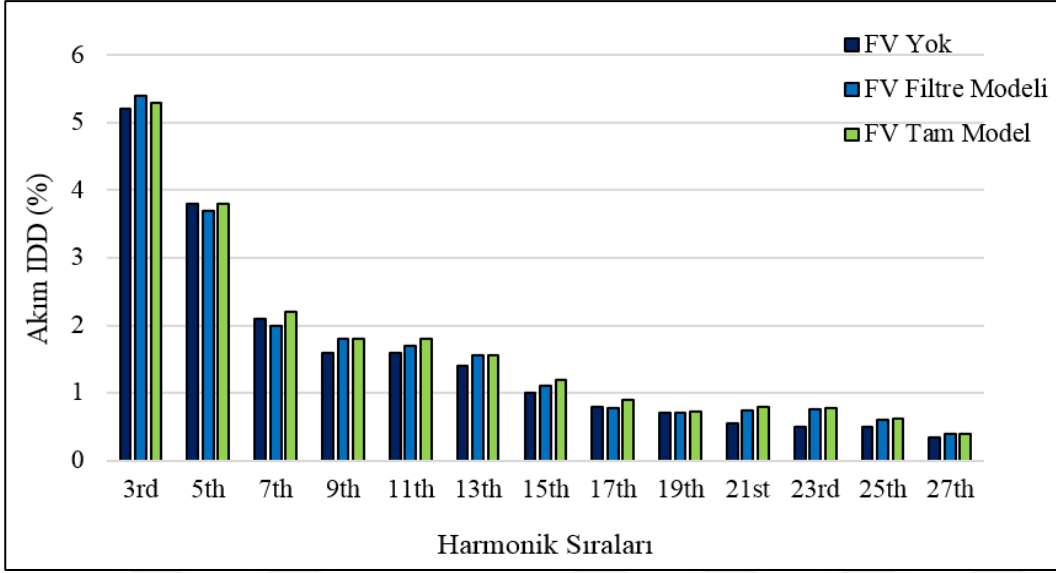
Şekil 7.6 Öğlen: 12:00-13:00 harmonik gerilim spektrumu.



Şekil 7.7 Öğlen: 12:00-13:00 harmonik akım spektrumu.



Şekil 7.8 Akşam: 18:00-19:00 harmonik gerilim spektrumu.



Şekil 7.9 Akşam: 18:00-19:00 harmonik akım spektrumu.

Akım ve gerilim spektrumlarını daha detaylı incelenmek adına üç farklı sabah, öğlen, akşam zaman diliminde FV devrede yok iken ve şebekeye filtre modeli ile eklendiğinde, aralarındaki fark ve diğeri ise FV filtre model ile tam model arasındaki farklar Çizelge 7.2 ve Çizelge 7.3’de verilmiştir.

Çizelge 7.2 (FV Yok) ile (FV Filtre Model) akım ve gerilim farkları.

Harmonik Sıraları	Akım			Gerilim		
	Sabah 6:00-7:00	Öğlen 12:00-13:00	Akşam 18:00-19:00	Sabah 6:00-7:00	Öğlen 12:00-13:00	Akşam 18:00-19:00
3rd	-0,40	-0,20	-0,20	0,06	0,10	0,50
5th	-0,10	-0,20	0,10	0,08	0,05	0,40
7th	-0,08	-0,10	0,10	0,06	0,03	0,60
9th	-0,10	-0,19	-0,20	0,09	0,10	0,30
11th	-0,05	-0,08	-0,10	0,04	0,08	0,15
13th	-0,50	-0,10	-0,15	0,04	0,16	0,10
15th	-0,10	-0,07	-0,10	0,03	0,12	0,09
17th	-0,20	-0,07	0,02	0,03	0,10	0,09
19th	-0,04	-0,02	-0,01	0,01	0,10	0,00
21st	-0,02	-0,11	-0,20	-0,01	-0,07	-0,20
23rd	-0,02	-0,11	-0,26	0,10	0,20	0,00
25th	-0,02	-0,11	-0,10	0,12	0,10	0,05
27th	-0,02	-0,02	-0,06	0,15	0,10	0,10

Çizelge 7.3 (Filtre Model) ile (Tam Model) akım ve gerilim farkları.

Harmonik Sıraları	Akım			Gerilim		
	Sabah 6:00- 7:00	Öğlen 12:00- 13:00	Akşam 18:00- 19:00	Sabah 6:00- 7:00	Öğlen 12:00- 13:00	Akşam 18:00- 19:00
3rd	-0,10	-0,20	-0,10	-0,02	0,10	-0,10
5th	-0,10	-0,20	0,10	-0,02	0,05	0,10
7th	-0,06	-0,07	0,04	0,01	0,03	0,04
9th	-0,20	-0,09	-0,05	-0,01	-0,10	-0,05
11th	-0,05	-0,02	0,01	-0,07	-0,03	0,01
13th	-0,07	0,00	-0,05	0,02	-0,02	-0,05
15th	-0,01	0,00	0,05	-0,01	-0,02	0,05
17th	-0,02	0,00	0,00	0,02	-0,05	0,00
19th	-0,02	0,00	-0,03	0,01	-0,03	-0,03
21st	-0,07	-0,01	0,03	-0,01	-0,05	0,03
23rd	-0,04	0,00	-0,09	0,00	-0,05	-0,09
25th	-0,02	0,03	0,00	-0,01	0,02	0,00
27th	-0,015	0,00	0,02	-0,02	0,02	0,02

7.3 FV İnvertörlerin Dağıtım Sistemleri Üzerindeki Harmonik Etkisi Sonuçları

Simülasyon sonuçlarına dayanarak, FV invertörlerin gözlenen harmonik etkisi şu şekilde özetlenebilir:

- FV analize katılmadığı ve analizlere eklendiği durumlar için elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, harmonik gerilimlerin ve harmonik akımların birbirine oldukça yakın olduğunu gözlemlenmektedir.
- Çizelge 7.3’de görülen değerlerden, FV devrede iken yapılan analizler olarak, Filtre Model ve Tam Model sonuçları karşılaştırıldığında, servis paneli tarafındaki harmonik gerilim ve harmonik akımın birbirine oldukça yakın olduğunu görülmektedir.
- Bununla birlikte, şebekeden gelen harmoniğin daha yüksek olduğu sabah ve akşam zaman diliminde, söz konusu fark önemsiz hale gelmektedir: şebeke kaynaklı harmonik nispeten yüksek olduğundan, gerilim kaynağının (V_{pwm-h}), servis paneli harmonik gerilim ve akımı üzerinde büyük bir etkisi yoktur. Başka bir deyişle, harmonik etki esas olarak bu zaman diliminde şebekenin empedansının filtre empedansı ile etkileşiminden kaynaklanmaktadır.

- FV yok ve Filtre modeli karşılaştırıldığında, FV devrede iken gözlenen harmonik gerilimi düşük ama harmonik akımı biraz daha yüksektir. Her üç zaman dilimine bakıldığında sadece 21'nci harmonikte FV invertörü, daha büyük bir harmonik gerilime neden olmaktadır. Çizelge 7.2'den de görüldüğü gibi FV Filtre Model devreye eklendiği zaman bu gerilim harmonik sıralarında sabah 0,01, öğlen 0,07 ve akşam 0,2 kadar yükselme meydana gelmiştir. Bunun başlıca nedeni, filtrenin 21'nci harmonik bileşen etrafında kapasitif olup şebeke empedansı ile etkileşerek paralel rezonansa neden olmasıdır. Rezonans frekansına yakın harmonikler için, filtre empedansı harmonik gerilimini biraz yükseltebilmektedir. Ancak, söz konusu harmonik gerilim yükselmesi de çok büyük değere sahip değildir.
- Diğer harmonikler için filtre indüktif davrandığı için, harmonik gerilimini düşürmeye yardımcı olur. Bu nedenle, büyük güçlü FV invertörlerin şebekeye entegrasyonu, harmonikler açısından sekonder dağıtım sisteminin güç kalitesini olumsuz etkilemez. Üstelik, FV'lerin birincil sistem üzerindeki harmonik etkisi daha da düşüktür ve detaylı olarak incelenmesine gerek yoktur.
Ev içinde mevcut cihazlar ile FV sistemin ve şebekenin etkileşimini inceleyen bu bölümün sonuçlarına bakıldığında, şebekeye bağlı bir FV invertörün sabah/akşam salgıladığı yüksek genlikli akım harmoniklerinin arka plandaki yüklerin şebekeye girip çıkmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Yani yan şebekelerin cihazlarının salgıladığı harmonik etkisi FV invertör harmoniğini de yükseltebilmektedir.
- Diğer taraftan bu son bölümde, FV invertörlerde kullanılan filtreler de bir empedans kaynağıdır ve şebeke empedansı ile birlikte rezonansa girebildiklerinden dolayı harmoniklerin genliğinde artışlara neden olabilmektedir.
- Bu sonuçlardan İzmir-Gaziemir ve Kanada-Edmonton sistemlerinin yüksek akım harmonikleri, hem invertörlerin alçak geçirgen filtresindeki harmonik empedans etkisinden, hem de şebekedeki diğer doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmoniklerden etiklenmektedir.

8. GENEL DEĞERLENDİRME VE YARGILAR

Sonuç olarak bu tez çalışmasında elde edilen veriler değerlendirildiğinde:

- Ölçümlere dayalı harmonik ve ara-harmonik analizleri iki FV sistem üzerinde yapıldıktan sonra, her ikisinde de güneş sistemlerin ve diğer yüklerin devreye girdiği ve çıktığı sabah/akşam saatlerinde akım harmoniklerin standart limitlerin biraz üstünde olduğu görülmektedir. Öte yandan ara-harmonikler için değerlerin tamamen beklenen standart limitleri altında olduğu söylenebilir. Bu yüzden FV sistemlerin ara-harmonikler açısından güç kalitesine olumsuz etkilerinin olmayacağına karar verilmiştir. Bu noktadan sonra akım harmonikler ve onlara neden olan FV invertörlerin daha detaylı incelenmesine karar verilmiştir.
- Bir sonraki aşamada FV invertör için bir harmonik modeli önerilmektedir. FV invertör harmonik frekansta bir gerilim kaynağı ve bir pasif filtre ile seri olarak modellenmiştir ve dağıtım sistemi harmonik analizi için ayrıntılı güç elektronik devresi yerine kullanılabilir. Önerilen bu model, yapılan simülasyonlar ve laboratuvar deneyleriyle doğrulanmıştır. Analizler sonucunda ilk bölümdeki FV sistemlerin yüksek akım harmonik sebebinin, şebeke arka plan yüklerinin yaydığı harmoniklerden ve FV invertörün filtre empedans etkisinden kaynaklandığı tesbit edilmiştir.
- Bu çalışmanın en önemli katkısı ise, her harmonik bileşenin invertör köprü terminal çıkışının bir gerilim kaynağı ile temsil edilebileceğini kanıtlamış olmasıdır. Bu ifade iki varsayım üzerine kurulmuştur:
 - 1) Invertörün DC-linki sabit bir gerilim kaynağı olarak modellenebilir; böylece invertör köprüsü DC-DC konvertörden ayrılmaktadır.
 - 2) Invertör köprüsünün anahtarlama fonksiyonu düşük-seviyeli harmonik bileşenlerini de içermektedir ve onun harmonik spektrumu şebeke harmoniklerinden bağımsızdır. Bu harmonik model zaman ortamında simülasyon ile doğrulanmaktadır.
- FV invertör harmonik modelini uygularken, aşağıdaki prosedürler takip edilmelidir:
 - 1) Gerilim kaynağının harmonik spektrumunu hesaplanmalıdır.
 - 2) Filtre topolojisini ve parametreleri doğru belirtilmelidir.

- Önerilen harmonik model, FV invertörün harmonik kaynak karakteristiğini ve harmonik empedans özelliğini yansıtmaktadır.
- Harmonik kaynağı olan FV invertörler, şebekeye düşük-seviyeli harmonik akımı enjekte etmektedirler. Bununla birlikte, FV invertörün harmonik enjeksiyonu önemli büyüklükte değildir. Bu nedenle FV invertörü, harmonik frekansta bir pasif devre gibi davranmaktadır.
- Son bölümde ise FV invertörlerin geniş kullanımından dolayı, ev servis paneli tarafında harmonik bozulumlarının nasıl etkilendiği araştırılmıştır ve özetlenen sonuçlar şu şekilde ifade edilmektedir:
 - a) Harmonik gerilim kaynağı olarak kabul edilen invertörün yarattığı harmonik bozulum değerlerinin düşük olması, özellikle şebeke arka plan harmoniği yüksek olduğu zaman dilimlerinde, büyük önem arz etmemektedir. Bu durum göz önünde bulundurarak harmonik güç kalitesi analizlerinde harmonik kaynağı yok sayılabilir.
 - b) FV invertörün LCL filtresi belirli bir frekans bandında kapasitif olarak rol oynamaktadır. Sonuç olarak, sistem empedansı ile etkileşim kurarak paralel rezonans problemi oluşturabilmektedir.

Tüm bu bölümlerin sonucunda önerilen gerilim kaynaklı FV invertörlerin yarattığı harmonik etkisi, kullanılan güneş sistemleri ve onların invertörleri ile tüm parametreler doğru seçildiğinde çok büyük bir etki yaratmamaktadır.

9. SONRAKİ ÇALIŞMALAR İÇİN TAVSİYELER

Bu tez çalışması, aşağıdaki verilen üç açıdan genişletilebilir:

- 1) Harmonik etki çalışmasının daha kapsamlı olmasını sağlamak için, evin sisteme bağlantı şeklinin (seri bağlantı, paralel bağlantı veya her ikisi de) ve iletim hatlarının da modele eklenmesi önerilmektedir. Bu şekilde daha karmaşık bir ikincil sistem modeli tanıtılabilir ve Avrupa ile Kuzey Amerika bağlantı sistem daha detaylı incelenebilir.
- 2) Ayrıca, gelişen teknoloji ile hayatımıza giren elektrikli araçlar nedeniyle araç şarj istasyonları ve yakıt hücresi gibi diğer yükler de bir PWM invertörü ve alçak geçirgen filtre içermektedirler. Bu nedenle, bu filtre bazlı invertörlerin ortak harmonik etkisini incelemek ilginç bir çalışma olabilir.
- 3) FV invertör hem yüksek-seviyeli hem düşük-seviyeli harmonikler içermektedir. Düşük-seviyeli harmoniklerin özellikleri ve modeli bu tez çalışmasında incelenmiştir. Bununla birlikte, FV invertörlerin yüksek-seviyeli harmonik karakteristiği ve bu harmoniklerin alçak gerilim sisteminde nasıl yayılması üzerinde daha fazla araştırma yapılabilir.
- 4) Bu çalışma için, ölçüm belirsizliği çalışmaları yapılırsa hata değerleri belirlenip ve daha yüksek doğruluk payı olan değerler elde etmek mümkündür. EK-1’de bu konuyla ilgili kısa bilgi verilmiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abas, N., Kalair, A. and Khan, N.,** 2015, Review of fossil fuels and future energy technologies Futures, 69: 31-49p, DOI: 10.1016/j.futures.2015.03.003.
- Adak, S.,** 2003, Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyonu Azaltması, Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Aiello, M., Cataliotti, A., Favuzza, S. and Graditi, G.,** 2006, Theoretical and experimental comparison of total harmonic distortion factors for the evaluation of harmonic and interharmonic pollution of grid-connected photovoltaic systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(3): 1390-1397p, DOI: 10.1109/TPWRD.2005.860231.
- Aiello, M., Cataliotti, A. and Nuccio, S.,** 2004, A PC-based instrument for harmonics and interharmonics measurement in power supply systems, *Journal Of The International Measurement Confederation*, 371-380p.
- Alexander, K. and Marc, T.T.,** 2007, Outline Power Quality in Electrical Systems, McGraw-Hill Book Company, New York, 225p.
- Anzalchi, A. and Sarwat, A.,** 2017, Overview of technical specifications for grid-connected photovoltaic systems, *Energy Conversion And Management*, 15: 312-327p, DOI: 10.1016/j.enconman.2017.09.049.
- Aprilia, E.C., Čuk, V., Cobben, J.F.G., Ribeiro, P.F. and Kling, W.L.,** 2012, Modeling the Frequency Response of Photovoltaic Inverters, *IEEE*, 1-5p.
- Arrillaga, J. and Watson, N.R.,** 2003, Power System Harmonics, Wiley Press Ltd, 412p.
- Azmi, S.,** 2011, Comparative analysis between voltage and current source inverters in grid-connected application. *Proceedings of IET Conference On Renewable Power Generation (RPG 2011)*, 6 (8): 1-6p.
- Babaei, E. and Maheri, H.,** 2013, Analytical solution for steady and transient states of buck DC-DC converter in CCM, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38 (12): 3383-3397p.
- Bakar, S., Karimi, A., Mokhlis, M., Naidu, H. and Uddin, K.,** 2016, Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network, *Renewable And Sustainable Energy*, 53: 594-605p.
- Benhabib, M., Myrzik, J. and Duarte, J.,** 2007, Harmonic effects caused by large scale PV installations in LV network, *9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU*, 1-6p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bhowmik, A., Maitra, A., Halpin, S. and Schatz, J.,** 2003, Determination of allowable penetration levels of distributed generation resources based on harmonic limit considerations, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18 (2): 619-624p.
- Blooming, T., Org, P. and Carnovale, D.,** 2006, Application Of IEEE Std 519-1992 Harmonic Limits.
- Bojoi, R., Limongi, L., Roiu, D. and Tenconi, A.,** 2011, Enhanced power quality control strategy for single-phase inverters in distributed generation systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26 (3): 793-806p.
- Bollen, M.H.J.,** 1993, Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions, Wiley Press Ltd.
- Bonner, W., Grebe, A., Gunther, T., Hopkins, E., Marz, L., Mah, M. and XU, W.,** 1996, Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. Part II: sample systems and examples, *IEEE Transactions on power delivery*, 11: 466-467p.
- Buso, S. and Mattavelli, P.,** 2006, Digital Control in Power Electronics, Morgan and Clypool Publishers.
- Calais, M., Myrzik, J., Spooner, T. and Agelidis, V.,** 2002, Inverters for Single-phase Grid Connected Photovoltaic Systems -An Overview, *IEEE*.
- Castilla, M., Miret, J., Camacho, A., Matas, J. and De Vicuna, L.,** 2013, Reduction of current harmonic distortion in three-phase grid-connected photovoltaic inverters via resonant current control, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(4).
- Chang, G. W., Lin, H.W. and Chen, S.K.,** 2001, An Analytical Approach for Determining Harmonic Characteristics of High-Speed Railway Traction Drive Converter, *IEEE*, DOI: 10.1109/PESS.2001.970123.
- Chattopadhyay, S., Mitra, M. and Sengupta, S.,** 2011, Electric Power Quality, Springer.
- Cheng, J.,** 2012, A Probabilistic Bottom-up Technique for Modeling and Simulation of Residential Distributed Harmonic Sources, Master Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Alberta.
- Du, Y., Lu, D., James, G., Cornforth, D.,** 2013, Modeling and analysis of current harmonic distortion from grid connected PV inverters under different operating conditions, *Solar Energy*, 94 (8), 182-194p.
- Dugan, R., McGranaghan, M. and Santoso, S.,** 2003, Electrical Power Systems Quality, Second Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Enerji Enstitüsü**, “Türkiyenin yakıt cinslerine göre kurulu elektrik gücü”
<http://enerjiinstitutusu.com/turkiye-kurulu-elektrik-enerji-gucu-mw/> (Erişim tarihi: 12 Ocak 2017).
- EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu)**, “Aylık sektör raporları, Eylül ayı elektrik piyasası sektör raporu ”,
<http://www.epdk.org.tr/TR/Dokumanlar/Elektrik/YayinlarRaporlar/AylikSektor>, (Erişim tarihi: 11 Ocak 2017).
- Etier, I., Abderrazzaq, M., Al Tarabsheh, A. and Saraereh, O.**, 2016, The impact of large scale photovoltaic systems on the harmonic increase in distribution networks, *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 10(4): 239-244p.
- Favuzza, S. and Graditi, G.**, 2004, Comparison of power quality impact of different photovoltaic inverters: *The viewpoint of the grid, IEEE International Conference Industrial Technology*, 542-547p.
- Fekete, K., Klaic, Z. and Majdandzic, L.**, 2012, Expansion of the residential photovoltaic systems and its harmonic impact on the distribution grid, *Renewable Energy*, (43): 140-148p, DOI: 10.1016/j.renene.2011.11.026.
- Gandhare, W. and Patil, K.**, 2013, Effects of Harmonics on Power Loss in XLPE Cables, *Energy and Power Engineering*, 1-6p, DOI: 10.4236/epe.2013.54B234.
- Ghorbani, M. and Mokhtari, H.**, 2015, Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems, *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) Journal*, 5 (1): 2088-8708p.
- Goh, H.S.**, 2011, The Effect of Grid Operating Conditions on the Current Controller Performance of Grid Connected Photovoltaic Inverters, Ph.D. Thesis, School of Electrical Electronic and Computer Engineering, Newcastle University.
- Goh, H.S., Armstrong, M. and Zahawi, B.**, 2009, The Effect of Grid Operating Conditions on the Harmonic Performance of Grid-Connected PV Inverters, *13th European Conference on Power Electronics and Applications*.
- He, F., Zhao, Z., Yuan, L. and Lu, S.**, 2011, A DC-link voltage control scheme for single-phase grid-connected PV inverters, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition: Energy Conversion Innovation for a Clean Energy Future, ECCE 2011, Proceedings*.
- Holman, P.J.**, 2012, Experimental methods for engineers, 8th Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hosseini, M.**, 2009, presented a control system that combines grid-connected PV system and power quality enhancement with two system configurations, *Electrical and Electronics Engineering ELECO, International Conference*, DOI: 10.1109/ELECO.2009.5355326.
- Hu, H., Shi, Q., He, Zh., He, J and Gao, Sh.**, 2015, Potential Harmonic Resonance Impacts of PV Inverter Filters on Distribution Systems, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6 (1).
- Husev, O., Chub, A., Romero-Cadaval, E. and Roncero-Clemente, C.**, 2015, Voltage distortion approach for output filter design for off-grid and grid-connected PWM inverters, *Journal of Power Electronics*, 15 (1): 278-28p.
- IEC 61000-2-2** (The International Electrotechnical Commission), 2002, Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems.
- IEC 61000-4-7** (The International Electrotechnical Commission), 2002, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques—General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto.
- IEEE 519** (The Institute of Electrical and Electronics Engineers), 2014, Update of harmonic standard IEEE-519: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems.
- IEEE 519** (The Institute of Electrical and Electronics Engineers), 1992, IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems.
- Infield, D., Onions, P., Simmons, A. and Smith, G.**, 2004, Power quality from multiple grid-connected single-phase inverters, *IEEE*, 19 (4): 1983-1989p.
- Jana, J., Saha, H. and Das Bhattacharya, K.**, 2017, A review of inverter topologies for single-phase grid-connected photovoltaic systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Kalair, N., Abas, A., Saleem, Z. and Khan, N.**, 2017, Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques, *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 1152-1187p.
- KamatchiKannan, V. and Rengarajan, N.**, 2012, Photovoltaic based distribution static compensator for power quality improvement, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 4 (21): 685-692p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Karabacak, M., Kılıç, F., Bilal, S. and Boz, A.F.**, 2016, Şebeke Bağlantılı Eviriciler için LLCL Filtre Tasarımı, *Journal of Polytechnic*, 19 (3): 251-260p.
- Khalil, H. and Abas, N.**, 2014, Smart grids: An approach to integrate the renewable energies and efficiently manage the energy system of Pakistan, *5th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies*.
- Kharlov, N., Borovikov, V., Ushakov, V., Tarasov, E. and Bulyga, L.**, 2016, Calculation of steady non-sinusoidal modes and electric power losses in complex electrical networks, *IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, PEMC 2016*.
- Lee, K., Park, N., Kim, R., Ha, D. and Hyun, D.**, 2008, Design of an LCL filter employing a symmetric geometry and its control in grid-connected inverter applications, *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, Greece, Rhodes*.
- Li, W., Gu, Y., Luo, H., Cui, W., He, X. and Xia, C.**, 2015, Topology review and derivation methodology of single-phase transformerless photovoltaic inverter for leakage current suppression, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62 (7): 4537-4551p.
- Liang, X.**, 2017, Emerging Power Quality Challenges Due to Integration of Renewable Energy Sources, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53 (2): 855-866p.
- Li, C., Xu, W. and Tayjasanant, T.**, 2003, Interharmonics: basic concepts and techniques for their detection and measurement, *Electric Power System Research*, 1-10p.
- Liserre, M., Blaabjerg, F. and Teodorescu, R.**, 2005, Grid impedance estimation via excitation of LCL-filter resonance, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52 (4): 1136-1144p, DOI: 10.1109/TIA.2007.904439.
- Lombard, C. and Rens, A.**, 2016, Evaluation of system losses due to harmonics in medium voltage distribution networks, *IEEE International Energy Conference, ENERGYCON 2016*.
- López, Ó., Freijedo, F., Yepes, A., Fernández-Comesaña, P., Malvar, J., Doval-Gandoy, J. and Teodorescu, R.**, 2010, Eliminating ground current in a transformerless photovoltaic application, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25 (1): 140-147p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Marz, M.**, 2017, Interharmonics: What They Are, Where They Come From and What They Do.
- Moazzen zadeh, M. ve Şekerci, H.**, 2017, Güneş enerji sistemlerinin elektrik şebekesi güç kalitesine harmonik ve ara-harmonik açısından etkisinin incelenmesi V. *Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi, Güç ve Enerji Sistemleri Sempozyumu, İzmir*, 198-210s.
- Moeed Amjad, A. and Salam, Z.**, 2014, A review of soft computing methods for harmonics elimination PWM for inverters in renewable energy conversion systems, *Renewable and Sustainable Energy*.
- Neagu, B., Georgescu, G. and Ivanov, O.**, 2016, The Impact of Harmonic Current Flow on Additional Power Losses in Low Voltage Distribution Networks, *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE 2016)*.
- Nguyen, H., Burke, J. and Benchluch, S.**, 2000, Rural Distribution System Design Comparison, *IEEE*, 4: 2357-2362p.
- Ortega, M., Hernandez, J. and Garcia, O.**, 2013, Measurement and assessment of power quality characteristics for photovoltaic systems: Harmonics, flicker, unbalance, and slow voltage variations, *Electric Power Systems Research*, 96: 23-35p.
- Papaioannou, I., Alexiadis, M., Demoulias, C., Labridis, D. and Dokopoulos, P.**, 2011, Modeling and field measurements of photovoltaic units connected to LV grid, Study of penetration scenarios, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26 (2): 979-987p, DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2095888.
- Prodanović, M. and Green, T.**, 2003, Control and filter design of three-phase inverters for high power quality grid connection, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 18 (1): 373-380p.
- Ray, L. and Hapeshis, P.**, 2011, Power System Harmonic Fundamental Considerations: Tips and Tools for Reducing Harmonic Distortion in Electronic Drive Applications, Schneider Electric, AT313.
- Rönnerberg, S. and Bollen, M.**, 2016, Power quality issues in the electric power system of the future, *The Electricity Journal*.
- Sahoo, A., Shahani, A., Basu, K. and Mohan, N.**, 2014, LCL filter design for grid-connected inverters by analytical estimation of PWM ripple voltage, *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Salam, Z., Cheng, T. and Jusoh, A.,** 2006, Harmonics Mitigation Using Active Power Filter: A Technological Review, *ELEKTRIKA, Faculty of Electrical Engineering University Teknologi Malaysia*, 8 (2): 17-26p.
- Salor, Ö., Gültekin, B., Buhan, S. and Boyrazo, B.,** 2009, Electrical Power Quality of Iron and Steel Industry in Turkey, *IEEE Transactions On Industry Applications*, 46 (1): 60-80p, DOI: 10.1109/TIA.2009.2036547.
- Salles, D., Chen, J., Xu, W., Freitas, W. and Mazin, H.,** 2012, Assesing the collective harmonic impact of modern residential loads -part 1: methodology , *IEEE*, 27 (4): 1937-1946p.
- Sangwongwanich, A., Yang, Y. and Sera, , D.,** 2017, Interharmonics from Grid-Connected PV Systems: Mechanism and Mitigation. *Proceedings of the 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEEC 2017 - ECCE Asia)*, 722-727p.
- Shahbazi, M. and Khorsandi, A.,** 2017, Power Electronic Converters in Microgrid Applications. *Microgrid*, 281-309p.
- Short, T.A.,** 2004, Electric Power distribution handbook. CRC Press LLC, Washington DC.
- Soto, D., Edrington, C., Balathanda, Y. and uthapani, S.,** 2013, Grid-connected PV-APF system with anti-islanding protection, *International Transactions on Electrical Energy Systems*.
- Sucu, M.,** 2003, Elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin filtrelenmesinin bilgisayar destekli modellenmesi ve simülasyonu, Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Tran, Q., Truong, A. and Le, P.,** 2016, Reduction of harmonics in grid-connected inverters using variable switching frequency, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 82: 242-251p.
- Varatharajan, A., Schoettke, S., Meyer, J. and Abart, A.,** 2014, Harmonic Emission of Large PV Installations Case Study of a 1 MW Solar Campus, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14), Cordoba, Spain*, 701–706p.
- Vasca, F. and Iannelli, L.,** 2012, Dynamics and Control of Switched Electronic Systems Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters, Springer.
- Wang, P., Duarte. F., Hendrix, J. and Ribeiro, M.,** 2011, Modeling and analysis of grid harmonic distortion impact of aggregated DG inverters, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26 (3): 786-797p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Wilsun, X., 2000, Comparisons and comments on harmonic standards IEC 1000-3-6 and IEEE Std. 519.

Zhao, Z., Lai, J., Yu, W., Meehan, K., Centeno, V. and Nelson, D., 2012, High Efficiency Single-stage Grid-tied PV Inverter for Renewable Energy System, Ph.D. Thesis, University Virginia Polytechnic Institute.



EK-1

Ölçüm Belirsizliği Değerlendirilmesi

Yeryüzünde, ister bir kenar ister bir açı birkaç kez ölçüldüğünde her ölçü değeri arasında az çok farkların olduğu görülür. Yapılan her ölçünün sonucunu aynı bulmak hemen hemen imkânsızdır. Ölçü hataları dediğimiz bu farklar, ölçüyü yapan kişi tarafından meydana gelebileceği gibi, ölçü aletlerinin hatalı olmasından ve atmosferik şartlardan da meydana gelebilir. Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçların doğruluğunu belirtmek için belirsizlik analizi yapılmaktadır. Denemeler esnasında doğruluğu etkileyen en önemli etken meydana gelebilecek hatalardır. Hata ve belirsizlik kavramları birbirlerinden farklı; Hata, bir niceliğin gerçek değeri ile ölçülmüş değer arasındaki farktır. Belirsizlik ise ölçümlerdeki hataların tam olarak belirlenememesi durumudur (Halman, 2012).

Belirsizlik kaynaklarının standart belirsizlik değerleri, kullanılan cihazların üzerindeki verilerden ya da dokümanlarından elde edilmektedir. Belirsizlik unsurlarının standart belirsizlik değerleri Denklem (E.1)'e yerleştirilerek, her bir deneme ve analiz için relatif standart belirsizlik değerleri bulunarak toplam belirsizlik hesaplanmaktadır.

Relatif Standart Belirsizlik:

$$\sqrt[2]{(RSD^2)n_1 + (RSD^2)n_2 + \dots} \quad (E.1)$$

Öte yandan tüm kullanılan cihazların doğruluk ve çözünürlük değerleri de dikkate alınması gerekir. Bu çalışmada Fluke 435 ve 434 serisi güç kalitesi analizör cihazları kullanılmıştır. Bu cihazlara ait harmonikler için verilen değerler Çizelge (E.1)'de verilmiştir. Görüldüğü gibi THB akım ve gerilim için doğruluk $\pm \% 2,5$ ' dir.

Çizelge E.1 Fluke 435 ve 434 için doğruluk ve çözünürlük değerleri.

Harmonikler	Ölçüm Aralığı	Çözünürlük	Doğruluk
Harmonik sırası (n)	DC, 1..50 Gruplama: IEC 61000-4-7'ye göre harmonik grupları		
İnterharmonik sırası	Kapalı, 1..50 Gruplama: IEC 61000-4-7'ye göre Harmonik ve İnterharmonik alt grupları		
Volt %f	%0,0 ... 100,0	%0,1	$\pm \%0,1 \pm n \times \%0,1$
Volt %r	%0,0 ... 100,0	%0,1	$\pm \%0,1 \pm n \times \%0,4$
Volt Mutlak	0,0 ... 1000 V	0,1 V	$\pm \%5 (*)$
Volt THD	%0,0 ... 100,0	%0,1	$\pm \%2,5$
Amper %f	%0,0 ... 100,0	%0,1	$\pm \%0,1 \pm n \times \%0,1$
Amper %r	%0,0 ... 100,0	%0,1	$\pm \%0,1 \pm n \times \%0,4$
Amper Mutlak	0,0 ... 600 A	0,1 A	$\pm \%5 \pm 5$ sayım
Amper THD	%0,0 ... 100,0	%0,1	$\pm \%2,5$
Watt %f veya %r	%0,0 ... 100,0	%0,1	$\pm n \times \%2$
Watt Mutlak	Pens ölçeklendirme ve V nominale bağlıdır		$\pm \%5 \pm n \times \%2 \pm 10$ sayım
Watt THD	%0,0 ... 100,0	%0,1	$\pm \%5$
Faz açısı	-360° ... +0°	1°	$\pm n \times 1^\circ (8)$

*) $\pm \%5$ eğer nominal gerilimin $\geq \%1$ 'i ise; $\pm \%0,05$ x nominal gerilim eğer nominal gerilimin $< \%1$ 'i ise.