

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**DENGELİ OLMAYAN ÜÇ FAZLI DAĞITIM
ŞEBEKELERİNDE HARMONİK KISITLARIN
FOTOVOLTAİK DAĞITIK GÜÇ SİSTEMLERİNİN
OPTİMAL KATILIM ORANINA ETKİLERİ**

İbrahim Çağrı BARUTÇU

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mutlu BOZTEPE

İkinci Tez Danışmanı : Doç. Dr. Engin KARATEPE

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Doktora Programı

İzmir
2020

İbrahim Çağrı BARUTÇU tarafından Doktora tezi olarak sunulan “Dengeli Olmayan Üç Fazlı Dağıtım Şebekelerinde Harmonik Kısıtların Fotovoltaik Dağıtık Güç Sistemlerinin Optimal Katılım Oranına Etkileri” 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 07/02/2020 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı

: Doç. Dr. Murat BOZTEPE

.....

Raportör Üye

: Doç. Dr. Engin GÜİN

.....

Üye

: Prof. Dr. Metin DEMİRTAŞ

.....

Üye

: Prof. Dr. Erkan MELE

.....

Üye

: Doç. Dr. Ulas KIZIL

.....

Üye

: Doç. Dr. Zeynep KARATEPE

.....

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Doktora Tezi olarak sunduğum “Dengeli Olmayan Üç Fazlı Dağıtım Şebekelerinde Harmonik Kısıtların Fotovoltaik Dağıtık Güç Sistemlerinin Optimal Katılım Oranına Etkileri” 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.

07/02/2020



İbrahim Çağrı BARUTÇU

ÖZET**DENGELİ OLMAYAN ÜÇ FAZLI DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE
HARMONİK KISITLARIN FOTOVOLTAİK DAĞITIK GÜÇ
SİSTEMLERİNİN OPTİMAL KATILIM ORANINA ETKİLERİ**

BARUTÇU, İbrahim Çağrı

Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mutlu BOZTEPE

İkinci Tez Danışmanı: Doç. Dr. Engin KARATEPE

Şubat 2020, 115 sayfa

Dağıtım şebekelerinde fotovoltaik (FV) sistemlerin katılım oranlarının artmasıyla birlikte FV eviricilerin etkilerinden dolayı harmonik bozulmalar da artmaktadır. Bu nedenle, güç kalitesi açısından optimal FV katılım oranının belirlenmesi önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, yük profilinin belirsizliği ve güneş ışınımındaki değişimlerden dolayı FV sistem çıkış gücünün değişkenliği göz önünde bulundurulmuştur. Bu kapsamda, dengesiz üç fazlı dağıtım sistemlerinde optimal FV katılım oranlarını belirlemeye dayalı optimizasyon problemi, Interior Point (IP) yönteminin sırasıyla Monte Carlo Simulasyonu (MCS) ve $k -$ ortalamalar kümeleme yöntemi ile birlikte gerçekleştirilmesi sonucu çözülmüştür. FV sistem şebeke akımının harmonik bileşenlerinin güneş ışınımına bağlılığı önerilen yöntemlerde göz önünde bulundurulmuştur. Döngü referans yapısına dayalı güç akışı analizi yöntemi FV sistemlerin ve doğrusal olmayan yüklerin bağlı bulunduğu dağıtım şebekelerinde harmonik parametrelerini belirlemek için kullanılmıştır. Bu güç akışı analizi tekniğinden elde edilen gerilimdeki toplam harmonik bozulma, gerilimdeki tekil harmonik bozulma ve RMS gerilimi gibi güç kalitesi parametreleri göz önünde bulundurularak, önerilen optimizasyon yöntemlerinde optimal FV katılım oranları belirlenmiştir. Dağıtım şebekelerinde harmonik kısıtlar dikkate alınırken FV sistemlerin optimal katılım oranlarının maksimize edilmesi açısından önerilen yöntemlerin etkinliği elde edilen sonuçlardan görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Harmonik bozulma, harmonik bileşenler, FV sistem, üç fazlı sistem, optimizasyon, güç kalitesi, güneş ışınımı.

ABSTRACT

**IMPACTS OF HARMONIC LIMITS
ON OPTIMAL PV PENETRATION LEVELS
IN UNBALANCED DISTRIBUTION NETWORKS**

BARUTÇU, İbrahim Çağrı

PhD in Electrical-Electronics Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mutlu BOZTEPE

Second Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Engin KARATEPE

February 2020, 115 pages

Harmonic distortions increase because of the influences of PV inverters by the increasing penetration levels of PV systems in the distribution networks. Thus, it is important problem to obtain the optimal PV penetration level for maintaining the power quality. In this thesis, the uncertainty of load profile and the intermittent characteristic of PV system output power due to changes in solar irradiance are considered. In this context, the proposed optimization problem based on determining the optimal PV penetration levels in unbalanced three phase distribution systems is solved by performing the IP method together with MCS and k – means clustering, respectively. The dependence of the harmonic components of PV system grid current on the solar irradiance is taken into account in the proposed methodologies. The loop frame of reference based power flow analysis method is utilized to determine the harmonic power quality parameters in distribution networks where the PV systems and nonlinear loads are connected. The optimal PV penetration levels are determined by considering the harmonic power quality parameters such as total harmonic voltage distortion, individual harmonic voltage distortion and RMS voltage in the proposed optimization procedure. The effectiveness of proposed methods is observed from the obtained results in terms of maximizing the optimal PV system penetration levels while taking into account harmonic limits in distribution networks.

Keywords: Harmonic distortion, harmonic components, PV system, three phase system, optimization, power quality, solar irradiance.

ÖNSÖZ

FV sistemler güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünde önemli bir rol oynamaktadır. Bu sistemlerin yapılarında bulunan güç elektroniği cihazları güneş enerjisinin verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. FV sistemlerin bileşenlerinin yüksek performansının ve büyük ölçekli üretim gücünün düşük maliyetler getirmeleri, bu kaynakların işletmeciliğinin hızlı bir şekilde gelişmesini sağlamaktadır. Birçok ülkede şebekeye bağlı FV sistemlerden üretilen elektrik enerjisinin satın alınması konusundaki düzenlemeler ve bu sistemlerin kurulum maliyetlerine yönelik verilen destekler, çevre dostu güneş enerjisinin yaygın kullanımının farkındalığını teşvik etmektedir. TEİAŞ Genel Müdürlüğü'nün 2019 yılı istatistiklerine göre, 2008 yılında 41.817,2 MW olan Türkiye kurulu gücünün 2019 yılında 90.420,9 MW değerine yükseldiği gözlenmiştir. Bu 11 yıl içerisinde güneş enerjisinin payı % 0'dan % 6 seviyesine gelmiştir. Bu artış, dağıtım şebekesi planlamacıları açısından FV sistemlerin katılım oranlarının artırılması konusundaki çalışmaların önemini açıkça göstermiştir.

Son yıllarda, FV sistem endüstrisinin hızlı gelişimi, dünya genelinde birçok araştırmacının ve bilim adamının yer aldığı eğitim ve çalışmalara olan ilgi ve ihtiyacı genişletmiştir. FV sistemlerin tasarımı ve analizi, hızlı ve doğru simulasyonlar gerçekleştirmek için bilgisayarların kullanımını gerektiren önemli konulardır. Günümüzde, farklı disiplinlerde çalışan mühendisler ve araştırmacılar, bu alanda bilgisayar yazılımlarının geliştirilmesi konusunda gerekli donanımlara sahip olmak için çalışmalarına devam etmektedir. Bu kapsamda, Matlab simulasyon programı, bilim adamlarına araştırmaları ile ilgili problemleri çözmeleri açısından ilham veren bu önemli yazılım programlarından biridir. Bu tez çalışması kapsamında, öncelikle farklı güneş ışıınımı durumlarında maksimum gücün çekilmesini sağlayan algoritmalara sahip, şebekeye bağlı bir FV sistemin Matlab/Simulink ortamındaki modeli göz önünde bulundurulmuştur. Bu noktada; farklı güneş ışıınımı koşullarında, FV sistemin şebekeye enjekte ettiği akımın harmonik bileşenleri ve güneş ışıınımı arasındaki ilişkiye dair literatür araştırmaları ve gerekli çalışmalar yapılmıştır.

Tez çalışmasının sonraki aşamalarında ise, doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu elektrik şebekelerine FV sistemlerin bağlanması durumunda, dengesiz üç fazlı şebekelerin harmonik güç akışı analizleri gerçekleştirilerek, bu kaynakların şebekeler üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Bu kapsamda, şebeke elemanlarının dengesiz üç fazlı harmonik güç akışı analizine uygun modelleri oluşturulmuş ve analizler için gerekli Matlab simulasyon kodları yazılmıştır. Aynı

zamanda, dengesiz üç fazlı harmonik güç akışı analizine yönelik literatürdeki çalışmalar ayrıntılı olarak incelenmiştir. IEEE 519 standartlarında belirtilen harmonik kısıtları göz önüne alınarak şebekeye entegre edilecek FV sistemlerin optimal katılım oranları, matematiksel analiz yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Bu kısıtlar altında gerçekleştirilen optimizasyonlar sonucunda, FV sistemlerin bağlandığı dağıtım şebekelerine enjekte edebileceği optimal aktif güçleri elde edilmiştir. Bu analiz ve optimizasyonlarda, güneş ışınlımlarına bağlı olarak, FV sistemlerin çıkış güçlerinin ve akım harmoniklerinin değişkenliği ve dağıtım şebekelerinin uzun dönemdeki yük profilleri dikkate alınmıştır. Gerçekleştirilen analiz ve optimizasyon yöntemleri, IEEE dengesiz üç fazlı dağıtım sistemleri üzerinde uygulanarak, farklı senaryolar altında FV sistemlerin etkileri incelenmiştir.

İZMİR
07/02/2020



İbrahim Çağrı BARUTÇU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xvii
TABLolar DİZİNİ	xxii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Motivasyonu	2
1.2 Literatür Özeti	4
1.2.1 Dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinin modellenmesi	6
1.2.2 Dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde harmonikler	10
1.2.3 FV sistemlerde güneş ışınlımı ve harmonikler	13
1.3 Tez Çalışmasının Aşamaları	14
2. GÜNEŞ IŞINIMINDAKİ DEĞİŞİMLERİN FV SİSTEMLERİN HARMONİK PARAMETRELERİNE ETKİLERİ	18
2.1 Giriş	18
2.2 Harmonikler	19

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.3 Zamanda Desimasyonlu FFT Yöntemi	20
2.4 FV Sistemlerde Güneş Işınımının Şebekedeki Harmonik Parametrelere Etkileri.....	27
2.5 Sonuçlar	31
3. OPTİMAL FV KATILIM ORANININ HARMONİK LİMİTLERİ DAHİLİNDE OLASILIKSAL YÖNTEM İLE BELİRLENMESİ	32
3.1 Giriş.....	32
3.2 Dengesiz Üç Fazlı Harmonik Güç Akışı.....	33
3.2.1 Temel frekans güç akışı analizi.....	34
3.2.2 Harmonik frekans güç akışı analizi.....	36
3.3 Güneş Işınımının ve Yük Profiline Modellenmesi	39
3.4 Optimizasyon Yapısı.....	40
3.5 Simulasyon Sonuçları	45
3.6 Sonuçlar	51
4. OPTİMAL FV KATILIM ORANLARININ OLASILIKSAL VE DETERMİNİSTİK YÖNTEMLER İLE BELİRLENMESİ.....	53
4.1 Giriş.....	53
4.2 Optimizasyon Yapısı.....	54

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.3 Simulasyon Sonuçları	56
4.3.1 Uzun dönemde güneş ışıının ve yük profilinin modellenmesi	56
4.3.2 Dengesiz üç fazlı 7 baralı dağıtım şebekesi.....	58
4.3.3 Dengesiz üç fazlı 13 baralı dağıtım şebekesi.....	69
4.3.4 Dengesiz üç fazlı 25 baralı dağıtım şebekesi.....	78
4.3.5 Pratikteki dengesiz üç fazlı 19 baralı dağıtım şebekesi	88
4.4 Sonuçlar	90
5. AKTİF FİLTRELERİN DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE OPTİMAL FV KATILIM ORANLARINA ETKİLERİ.....	92
5.1 Giriş	92
5.2 Aktif Filtreler ve Çalışmadaki Probleme Uygulanmaları.....	92
5.3 Simulasyon Sonuçları	94
5.4 Sonuçlar	98
6. TARTIŞMA.....	100
7. SONUÇLAR.....	103
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	105
TEŞEKKÜR	114

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

ÖZGEÇMİŞ	115
----------------	-----



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Tez çalışmasının aşamalarını gösteren blok şema	17
2.1 Sinüzoidal olmayan gerilimin temel ve harmonik frekanslardaki bileşenleri .	20
2.2 N noktalı DFT hesaplamasını N/2 noktalı DFT hesaplamalarına ayırmak için kullanılan zamanda desimasyon yönteminin akış diyagramı (Oppenheim, 1999)	23
2.3 N/2 noktalı DFT hesaplamasını N/4 noktalı DFT hesaplamalarına ayırmak için kullanılan zamanda desimasyon yönteminin akış diyagramı (Oppenheim, 1999)	24
2.4 Şekil 2.3'teki DFT hesaplamasının Şekil 2.2'deki akış diyagramına eklenmesiyle oluşturulan yapı (Oppenheim, 1999).....	25
2.5 2 noktalı DFT akış diyagramı (Oppenheim, 1999).....	25
2.6 8 noktalı DFT hesaplaması (Oppenheim, 1999).....	26
2.7 (a) Akım sinyali, (b) harmonik spektrumu	27
2.8 FV sistemlerin kısmi gölgelenme durumunda (a) akım – gerilim karakteristikleri, (b) güç – gerilim karakteristikleri.....	28
2.9 Zamanda desimasyonlu FFT yönteminin adapte edildiği Matlab/Simulink ortamındaki şebekeye bağlı FV sistemin blok diyagramı.....	28
2.10 Farklı güneş ışıınımı koşullarında FV sisteminin akımının harmonik bileşenleri.....	29
2.11 FV sisteminin akımının THD değerinin güneş ışıınımına bağlı değişimi	29
2.12 FV sisteminin harmonik akımlarının yüzdeliklerinin güneş ışıınımına bağlı değişimleri	30

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Üç fazlı harmonik güç akışı algoritmasının akış diyagramı	38
3.2 MCS ile bağlantılı IP optimizasyon yönteminin akış diyagramı	43
3.3 Harmonik parametrelerindeki toplam ihlal sayılarını belirlemek için önerilen akış diyagramı	44
3.4 Dengesiz üç fazlı 7 baralı dağıtım şebekesi	45
3.5 (a) Olasılıksal yöntemde (b) optimizasyon sonuçlarının test edilmesinde kullanılan yük profilleri	47
3.6 (a) Olasılıksal yöntemde (b) optimizasyon sonuçlarının test edilmesinde ele alınan güneş ışıınımı dağılımları	47
3.7 FV sistemlerin (a) 2., (b) 3., (c) 4., (d) 5., (e) 6., (f) 7. baralardaki optimal çıkış güçlerinin dağılımları	48
3.8 Optimal FV çıkış güçlerinin iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri	49
3.9 Optimal FV katılım oranlarının iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri	49
3.10 Optimal FV katılım oranının dağılımı	50
4.1 K – ortalamalar kümeleme ile bağlantılı IP optimizasyon yönteminin akış diyagramı	55
4.2 Gerçek güneş ışıınımı verisinin dağılımı	56
4.3 MCS yönteminde kullanılan (a) düşük (b) orta (c) yüksek güneş ışıınımı senaryoları	58

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.4 Düşük güneş ışıınımı senaryosu için (a) 2., (b) 3., (c) 4., (d) 5., (e) 6., (f) 7. baralardaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları.....	60
4.5 Orta güneş ışıınımı senaryosu için (a) 2., (b) 3., (c) 4., (d) 5., (e) 6., (f) 7. baralardaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları.....	61
4.6 Yüksek güneş ışıınımı senaryosu için (a) 2., (b) 3., (c) 4., (d) 5., (e) 6., (f) 7. baralardaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları.....	62
4.7 Optimal FV çıkış güçlerinin iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri (a) düşük güneş ışıınımı senaryosu için (b) orta güneş ışıınımı senaryosu için (c) yüksek güneş ışıınımı senaryosu için	63
4.8 Optimal FV katılım oranlarının iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri (a) düşük güneş ışıınımı senaryosu için (b) orta güneş ışıınımı senaryosu için (c) yüksek güneş ışıınımı senaryosu için	64
4.9 Optimal FV katılım oranlarının dağılımları (a) düşük güneş ışıınımı senaryosu için (b) orta güneş ışıınımı senaryosu için (c) yüksek güneş ışıınımı senaryosu için	64
4.10 Düşük güneş ışıınımı senaryosunda farklı sayılarda kümeler için optimal FV çıkış güçleri.....	65
4.11 Düşük güneş ışıınımı senaryosunda şebekenin 6. ve 7. baralarının b fazında IHDV ⁵ ihlal sayılarının küme sayısına bağlı değişimi	67
4.12 Dengesiz üç fazlı 13 baralı dağıtım şebekesi.....	70
4.13 13 baralı sistemin (a) MCS (b) k – ortalamalar kümeleme yöntemlerinde kullanılan yük profilleri	70

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

4.14 Düşük güneş ışıınımı senaryosu için 13 baralı sistemin (a) 632., (b) 634., (c) 646., (d) 671., (e) 692., (f) 684. baralarındaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları	71
4.15 Orta güneş ışıınımı senaryosu için 13 baralı sistemin (a) 632., (b) 634., (c) 646., (d) 671., (e) 692., (f) 684. baralarındaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları	72
4.16 Yüksek güneş ışıınımı senaryosu için 13 baralı sistemin (a) 632., (b) 634., (c) 646., (d) 671., (e) 692., (f) 684. baralarındaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları	73
4.17 13 baralı sistemde optimal FV çıkış güçlerinin iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri (a) düşük güneş ışıınımı senaryosu için (b) orta güneş ışıınımı senaryosu için (c) yüksek güneş ışıınımı senaryosu için	74
4.18 13 baralı sistemde optimal FV katılım oranlarının iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri (a) düşük güneş ışıınımı senaryosu için (b) orta güneş ışıınımı senaryosu için (c) yüksek güneş ışıınımı senaryosu için	75
4.19 13 baralı sistemde optimal FV katılım oranlarının dağılımları (a) düşük güneş ışıınımı senaryosu (b) orta güneş ışıınımı senaryosu (c) yüksek güneş ışıınımı senaryosu.....	75
4.20 Dengesiz üç fazlı 25 baralı dağıtım şebekesi	79
4.21 25 baralı sistemin (a) MCS (b) k – ortalamalar kümeleme yöntemlerinde kullanılan yük profilleri	79
4.22 Düşük güneş ışıınımı senaryosu için 25 baralı sistemin (a) 7., (b) 8., (c) 9., (d) 10., (e) 11., (f) 17. baralarındaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları	80

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

4.23 Orta güneş ışıınımı senaryosu için 25 baralı sistemin (a) 7., (b) 8., (c) 9., (d) 10., (e) 11., (f) 17. baralarındaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları	81
4.24 Yüksek güneş ışıınımı senaryosu için 25 baralı sistemin (a) 7., (b) 8., (c) 9., (d) 10., (e) 11., (f) 17. baralarındaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları	82
4.25 25 baralı sistemde optimal FV çıkış güçlerinin iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri (a) düşük güneş ışıınımı senaryosu için (b) orta güneş ışıınımı senaryosu için (c) yüksek güneş ışıınımı senaryosu için	83
4.26 25 baralı sistemde optimal FV katılım oranlarının iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri (a) düşük güneş ışıınımı senaryosu için (b) orta güneş ışıınımı senaryosu için (c) yüksek güneş ışıınımı senaryosu için	84
4.27 25 baralı sistemde optimal FV katılım oranlarının dağılımları (a) düşük güneş ışıınımı senaryosu (b) orta güneş ışıınımı senaryosu (c) yüksek güneş ışıınımı senaryosu	84
4.28 Pratikteki dengesiz üç fazlı 19 baralı dağıtım şebekesi	89
5.1 Aktif filtrelerin temel çalışma prensibi.....	93

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Bu tez çalışmasında göz önünde bulundurulan problemler ile ilgili literatürdeki çalışmaların karşılaştırılması	16
3.1 Dengesiz üç fazlı 7 baralı dağıtım şebekesinin hat bilgileri	45
3.2 Dengesiz üç fazlı 7 baralı dağıtım şebekesinin yük bilgileri	45
3.3 Doğrusal olmayan yüklerin harmonik akım bileşenleri	46
3.4 7 baralı dağıtım şebekesinde doğrusal olmayan yüklerin baraları ve güçleri ..	46
3.5 Optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri	49
3.6 Harmonik parametrelerinde görülen ihlal sayıları	50
4.1 Düşük, orta ve yüksek güneş ışıınımı senaryoları için optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri	62
4.2 Düşük, orta ve yüksek güneş ışıınımı senaryoları için optimal FV çıkış güçleri	66
4.3 Düşük güneş ışıınımı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları	66
4.4 Orta güneş ışıınımı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları ..	68
4.5 Yüksek güneş ışıınımı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları	68
4.6 13 baralı sistemde düşük, orta ve yüksek güneş ışıınımı senaryoları için optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri	73

TABLOLAR DİZİNİ (devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
4.7 13 baralı sistemde düşük, orta ve yüksek güneş ışıınımı senaryoları için optimal FV çıkış güçleri	76
4.8 13 baralı sistemde düşük güneş ışıınımı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları	77
4.9 13 baralı sistemde orta güneş ışıınımı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları	77
4.10 13 baralı sistemde yüksek güneş ışıınımı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları	78
4.11 25 baralı sistemde düşük, orta ve yüksek güneş ışıınımı senaryoları için optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri.....	83
4.12 25 baralı sistemde düşük, orta ve yüksek güneş ışıınımı senaryoları için optimal FV çıkış güçleri	85
4.13 25 baralı sistemde düşük güneş ışıınımı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları	86
4.14 25 baralı sistemde orta güneş ışıınımı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları	87
4.15 25 baralı sistemde yüksek güneş ışıınımı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları	88
4.16 19 baralı sistemde düşük, orta ve yüksek güneş ışıınımı senaryoları için optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri.....	89
4.17 19 baralı sistemde düşük, orta ve yüksek güneş ışıınımı senaryolarında harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları.....	90

TABLOLAR DİZİNİ (devam)

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
5.1 4. bölümde olasılıksal yöntemden elde edilen sonuçlar için şebekelerdeki güç kalitesi ihlalleri açısından sorunlu noktalar	94
5.2 7 baralı dağıtım şebekesinde olasılıksal optimizasyon sonuçları için harmonik ihlal sayıları.....	95
5.3 13 baralı dağıtım şebekesinde olasılıksal optimizasyon sonuçları için harmonik ihlal sayıları	96
5.4 25 baralı dağıtım şebekesinde olasılıksal optimizasyon sonuçları için harmonik ihlal sayıları	97
5.5 Dağıtım şebekelerine aktif filtrelerin bağlanmadığı ve bağlandığı durumlarda optimal FV katılım oranlarının beklenen değerleri.....	98

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$A(k)$	Dizinin çift indisli noktalarının $N/2$ noktalı DFT değeri
$a[2l], a[2l+1]$	Ayrık zamanlı bir a dizisinin çift ve tek indisli elemanları
$B(k)$	Dizinin tek indisli noktalarının $N/2$ noktalı DFT değeri
$b[2l], b[2l+1]$	Ayrık zamanlı bir b dizisinin çift ve tek indisli elemanları
$C_{NLL}(h)$	Doğrusal olmayan yükün harmonik akım spektrumu
$C_{FV}(g, h)$	FV sistemin g değerindeki güneş ışınlamına karşılık gelen harmonik akım spektrumu
D_N	N uzunluğunda DFT için sabit bir kompleks katsayı
$IHDV_i^{p,h}(\%)$	Şebekenin i . barasının her bir fazındaki gerilimdeki tekil harmonik bozulma
$IHDV_{maks,i}^{p,h}(\%)$	Gerilimdeki maksimum tekil harmonik bozulma limiti
I_{Bara}^{abc}	Bara enjeksiyon akımları vektörü
I_i^{abc}	i . baranın her bir fazındaki enjeksiyon akımı
$I_{NLL,i}^{abc,1}$	Şebekenin i . barasındaki doğrusal olmayan yükün temel frekans akım enjeksiyonu
$I_{FV,i}^{abc,g,1}$	Şebekenin i . barasındaki FV sistemin g değerindeki güneş ışınlamına karşılık gelen temel frekans akım enjeksiyonu
$I_{FV,i}^{abc,g,h}$	Şebekenin i . barasındaki FV sistemin g değerindeki güneş ışınlamına karşılık gelen h . harmonik frekansındaki akım enjeksiyonu
$I_{Bara}^{abc,h}$	h . harmonik frekansında bara enjeksiyon akımları vektörü

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$I_{LD}^{abc,h}$	h . harmonik frekansında doğrusal yüklerin akım vektörü
$I_{NLD}^{abc,h}$	h . harmonik frekansında doğrusal olmayan yüklerin ve FV sistemlerin akım vektörü
$I_{NLD,i}^{abc,h}$	Şebekenin i . barasındaki harmonik akım enjeksiyonu
$I_{NLL,i}^{abc,h}$	Şebekenin i . barasındaki doğrusal olmayan yükün h . harmonik frekansındaki akım enjeksiyonu
$I_{Bara}^{abc,k}$	k . iterasyonda dağıtım şebekesinin bara enjeksiyon akımları vektörü
$I_i^{abc,k}$	k . iterasyonda i . yük barasının her bir fazındaki enjeksiyon akımı
K_{ij}	Branş-yol etki matrisinin i . satırındaki j . sütunundaki elemanı
N	DFT yönteminin uygulandığı örnek sayısı
N_{bara}	Dağıtım şebekesindeki bara sayısı
n	FV sistemlerin şebekede bağlandığı toplam bara sayısı
$P_{D,Toplam}$	Dağıtım sisteminin toplam yükünün aktif gücü
$P_{D,i}^{abc}$	i . baranın her bir fazındaki yükün aktif gücü
$P_{FV,i}^p$	Şebekenin i . barasının her bir fazındaki FV sistemin aktif güç üretimi
$P_{FV,maks}^p$	FV sistemlerin çıkış güçlerinin maksimum limiti

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler	Açıklama
$P_{FV,min}^p$	FV sistemlerin çıkış güçlerinin minimum limiti
$P_{FV,N}^p$	FV sistemin 1000 W/m ² güneş ışınlımı durumunda anma gücü
$\overline{P}_{D,i}$	Dağıtım şebekesinin <i>i.</i> barasındaki aktif yükün ortalama değeri
$Q_{D,i}^{abc}$	<i>i.</i> baranın her bir fazındaki yükün reaktif gücü
$R_{hat}^{abc}, X_{hat}^{abc}$	Hat empedans matrisinin rezistans ve reaktans değerleri
S_i	Dengesiz üç fazlı dağıtım sisteminin <i>i.</i> aday barasındaki FV sisteme düşen güneş ışınlımı
$THDV_i^p$ (%)	Şebekenin <i>i.</i> barasının her bir fazındaki gerilimdeki toplam harmonik bozulma
$THDV_{maks,i}^p$ (%)	Gerilimdeki maksimum toplam harmonik bozulma limiti
U_{Bara}	Birim matris
V_{Bara}^{abc}	Bara gerilimleri vektörü
V_i^{abc}	<i>i.</i> baranın her bir fazındaki gerilim
$V_{ref,Bara}^{abc}$	Referans barası gerilimleri vektörü
$V_{Bara}^{abc,h}$	<i>h.</i> harmonik frekansında bara gerilimleri vektörü
$V_{Bara}^{abc,k}$	<i>k.</i> iterasyonda dağıtım şebekesinin bara gerilimleri vektörü
$V_i^{abc,k}$	<i>k.</i> iterasyonda <i>i.</i> baranın her bir fazındaki gerilim

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler	Açıklama
$V_i^{p,1}$	Şebekenin i . barasının her bir fazındaki temel frekans gerilimi
$V_i^{p,h}$ gerilimi	Şebekenin i . barasının her bir fazındaki harmonik frekans gerilimi
V_{rms}^p	Şebekenin i . barasının her bir fazındaki RMS gerilim
$V_{rms}_{max,i}^p$	Maksimum RMS gerilim limiti
$V_{rms}_{min,i}^p$	Minimum RMS gerilim limiti
$Y(k)$	N noktalı $y[n]$ dizisinin DFT değeri
$Y_{LD}^{abc,h}$ matrisi	Doğrusal yüklerin h . harmonik frekansındaki admitans matrisi
$y[n]$	Ayrık zamanlı bir y dizisinin elemanları
$y[2r], y[2r+1]$	Ayrık zamanlı bir y dizisinin çift ve tek elemanları
Z_{aa}	Üç fazlı hattın a fazındaki öz empedansı
Z_{ab}	Üç fazlı hattın a ve b fazları arasındaki karşılıklı empedansı
Z_{Bara}^{abc}	Dağıtım şebekesinin bara empedans matrisi
Z_{hat}^{abc}	Üç fazlı hat empedans matrisi
Z_p^{abc}	Hatların temel (primitive) empedans matrisi
$Z_{Bara}^{abc,h}$ matrisi	h . harmonik frekansında dağıtım şebekesinin bara empedans matrisi
$Z_{hat}^{abc,h}$	h . harmonik frekansında hat empedans matrisi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$Z_p^{abc,h}$	h . harmonik frekansında hatların temel empedans matrisi
α, β	Beta dağılımının parametreleri
$\Delta V_i^{abc,k}$	k . iterasyonda i . baranın geriliminin değişimi
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	Hata toleransları
μ, σ	Ortalama ve standart sapma değerleri
<u>Kısaltmalar</u>	
ASD	Adjustable Speed Drive
DEÜ	Dağıtık Enerji Üretimi
DFT	Discrete Fourier Transform
EN	European Norm
FFT	Fast Fourier Transform
FV	Fotovoltaik
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IHDV ^h	Gerilimdeki Tekil Harmonik Bozulma
IP	Interior Point
MCS	Monte Carlo Simulasyonu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PV	Photovoltaic
RMS	Karelerin Ortalamasının Karekökü
THD	Toplam Harmonik Bozulma
THDV	Gerilimdeki Toplam Harmonik Bozulma
VFD	Variable Frequency Drive

1. GİRİŞ

Güç şebekelerinde yük talebinin artmasıyla birlikte, geleneksel merkezi güç üretim birimleri (conventional central power generation units), güç iletim hatlarında oluşan kayıplardan, çevresel ve ekonomik faktörlerden dolayı belirli oranda kullanılabilmekte ve bu güç üretim birimlerinin kaynakları sürekli azalmaktadır. Güç kalitesi, dağıtım şebekelerinde güç taleplerinin artması sonucu büyük önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, elektrik şirketleri, güvenilirlik ve maliyet gibi konuları göz önünde bulundurarak yük taleplerini karşılamaktadır. Merkezi güç üretim birimlerinin uzak bölgelerdeki yük talepleri için yetersiz olması ve bu bölgelerde merkezi güç üretim sistemi veya iletim hattı kurulamaması durumlarında, dağıtık enerji üretim (DEÜ) sistemleri güç şebekelerinde alternatif bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. DEÜ, güç dağıtım şebekelerinde yük talebinin artmasıyla birlikte büyük önem kazanmaktadır. Düşük kapasiteli DEÜ birimleri, dağıtım sistemlerinde yük talebinin yakınına bağlanmaktadır. DEÜ sistemlerinin dağıtım şebekelerine optimal entegrasyonu ve bu şebekeler üzerine etkileri, literatürde güncelliğini korumaya devam eden önemli problemlerdir (Prakash and Khatod, 2016; Khoa et al., 2006; Colmenar-Santos et al., 2016).

Fotovoltaik (FV) sistemler, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en önemli DEÜ teknolojilerinden biridir (Hengsritawat et al., 2012). Dağıtım şebekelerinde yük taleplerinin yükselmesi sonucu FV sistemlerinin önemi giderek artmaktadır (Rawat et al., 2016). Yenilenebilir enerji kaynaklarının dağıtım şebekesine güç elektroniği cihazları yoluyla bağlanmaları, evirici tabanlı DEÜ birimlerinin yaygın kullanımına olanak sağlamaktadır (Hernandez et al., 2011; Patsalides et al., 2016). FV sistemlerin enerji talebini karşılama konusundaki avantajlarına karşın dezavantajları da bulunmaktadır. Dağıtık FV sistemlerinin düşük gerilim dağıtım sistemlerine entegrasyonunun büyük oranda artması, şebekeye düşük güç kalitesi açısından yeni zorluklar getirmektedir. DEÜ sistemlerinin evirici ara yüzleri şebekede akım ve gerilim harmoniklerinin oluşmasına yol açmaktadır (Chidurala et al., 2016; Enslin and Heskes, 2004; Oliva and Balda, 2003). Dağıtım sistemlerinde, FV tabanlı DEÜ sistemlerinin katılım oranlarının artmasıyla birlikte evirici ara yüzlerinden dolayı harmonik bozulmalar daha da yükselmektedir. Ayrıca, DEÜ sistemlerinin günlük hayatta kullanılan doğrusal olmayan karakteristikli elektronik cihazlar ile birlikte güç sistemlerine bağlanmaları, şebekedeki harmonikleri önemli ölçüde artırmaktadır (Mohammadi et al., 2016). Güç sisteminin verimliliği ve güvenilirliği, yükler ve

koruma cihazları, bu harmoniklerden olumsuz yönde etkilenmektedir (Menti et al., 2011; Jain and Singh, 2011).

Bu bölümde, tez çalışmalarına yönelik giriş açıklamaları yapılmıştır. Bölüm 1.1’de, tez çalışmalarına motive eden etkenlerden bahsedilmiştir. Bölüm 1.2’de, bu tez kapsamında gerçekleştirilmiş çalışmalar ile ilgili literatür özeti sunulmuştur. Bölüm 1.3’te ise, tez çalışmasının amaçları anlatılmıştır.

1.1 Tezin Motivasyonu

Dağıtım sistemleri, genellikle bir ya da daha fazla iletim hattından beslenen dağıtım trafo merkezlerinden itibaren başlamaktadır. Bazı durumlarda, dağıtım trafo merkezi yüksek gerilim iletim hattından doğrudan beslenmektedir. Her bir dağıtım trafo merkezi bir ya da daha fazla şebeke hattına güç sağlamaktadır. Güç akışının yönü dağıtım trafo merkezinden son kullanıcılara doğru olduğundan, dağıtım şebekeleri radyal şebekeler olarak isimlendirilmektedir. Dağıtım şebekesinin ana bileşenleri, üç fazlı birincil hat, birincil hatta bağlı üç fazlı, iki fazlı ve tek fazlı yan hatlar, şönt kapasitör bankaları, dağıtım transformatörleri, üç fazlı, iki fazlı ve tek fazlı yüklerdir.

Dağıtım şebekelerinde yüklenme, eşit olmayan çok sayıda tek fazlı yüklerden dolayı dengeli olmamaktadır. Bu şebekelerin dengeli olmamasının bir diğer sebebi ise, üç fazlı havai ve yer altı hat kesitlerinin iletkenleri arasındaki uzaklıkların eşit olmamasıdır. Dağıtım şebekesi, dengeli olmayan üç fazlı, iki fazlı ve tek fazlı yükleri, iletkenleri arasındaki uzaklıkları eşit olmayan (untransposed) üç fazlı, iki fazlı ve tek fazlı hatlar üzerinden beslemektedir. Bu durum, üç fazlı hat akımlarının ve hat gerilimlerinin dengeli olmamasına yol açmaktadır. Dağıtım sistemlerinin dengeli olmayan yapılarından dolayı, bu sistemlerin dengeli üç fazlı olduğu varsayılarak tek faz eşdeğer sistemde gerçekleştirilen güç akışı algoritmaları yeterli olmamaktadır (Kersting, 2012). Dağıtım şebekesinde güç akışı çalışmasının doğru yapılabilmesi için, bu şebekenin mümkün olan en doğru şekilde modellenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, güç akışı algoritmasında dağıtım sisteminin ana bileşenlerinin üç fazlı modelleri kullanılmalıdır.

Günümüzde, güç sistemlerinde doğrusal olmayan yüklerin kullanımı gittikçe artmaktadır. Bununla birlikte, doğrusal olmayan yükler, alternatif akım (AA) dalga şekillerini bozan harmonikleri üretmektedir. Harmonikler, sistemde güç kayıplarına, haberleşme parazitlerine, cihazların yaşam ömrünün azalmasına

ve rezonans risklerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, harmonik güç akışı analizi, şebekedeki harmonik bozulma seviyelerinin belirlenmesine olanak sağladığından güç sisteminin analizi ve tasarımı açısından önemlidir. Dağıtım sistemlerinde harmonik analizi, zaman ve frekans uzaylarında yapılabilmektedir (Yang and Le, 2016). Frekans bölgesindeki kararlı duruma dayalı yöntemler, büyük ölçekli dağıtım sistemlerinin analizinde zaman bölgesindeki geçici duruma dayalı yöntemlere göre daha verimli olmaktadır. Frekans bölgesine dayalı yöntemler, güç akışı hesaplamalarına ve bileşenlerin frekans bölgesindeki modellerine dayalı olarak geliştirilmektedir. Harmonik güç akışı yöntemleri, güç sisteminin dengeli olmasına ya da olmamasına bağlı olarak tek fazda ya da üç fazda gerçekleştirilebilmektedir.

Son yıllarda, FV sistemlerin elektrik güç şebekelerindeki katılım oranları hızla artmaktadır. Bunun sonucunda, FV sistemlerin güç elektroniği ara yüzlerinden dolayı dağıtım sistemlerindeki harmonik bozulmalar yükselmektedir. Ayrıca, güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan doğrusal olmayan yükler güç kalitesi üzerinde önemli etkiye sahiptir. Güç kalitesi, dağıtım şebekelerinde güç taleplerinin artması sonucu büyük önem kazanmaktadır. Dağıtım sistemlerinde faz gerilimlerinin dengesiz olması, yenilenebilir enerji kaynaklarının çıkış güçlerinin süresiz olması, akım ve gerilim harmoniklerinin değişken olması güç kalitesini etkileyen faktörlerdendir.

Güç elektroniği tabanlı DEÜ'lerin şebekeye doğrusal olmayan yükler ile birlikte bağlanmaları, dağıtım şebekesinde büyük oranda harmonik bozulmalara yol açmaktadır (Chidurala et al., 2016). Şebekedeki yüksek harmonik akımları, dağıtım şebekesi açısından bakıldığında güç kalitesi problemlerine yol açmaktadır. Bu nedenle, harmonik kaynaklı problemler göz önünde bulundurularak DEÜ'lerin şebekeye optimal katılım oranlarının belirlenmesi çok önemlidir (Barutcu and Karatepe, 2017).

FV sistemler, genellikle güneş ışınımının yüksek olduğu yerlerde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, mevsimsel etkiler, bulut geçişleri, şehir merkezlerindeki binalar ve ağaçlar, FV sistemlerine gelen güneş ışınımında ani değişimlere neden olmaktadır (Silvestre et al., 2015). FV sistemlerin güç gerilim karakteristikleri panellerin üzerine düşen ışıma çok bağımlıdır. Bu ışımadaki değişimler FV sistemin çıkış gücünün düşmesine neden olmaktadır. Maksimum güç noktası izleme (maximum power point tracking) yöntemi, şebekeye bağlı FV sisteminden farklı ışıma koşullarında maksimum gücün çekilmesinde önemli rol

oynamaktadır. FV sistemlerin güç üretimi, güneş ışınımındaki değişimlerden dolayı kesikli (intermittent) yapıda olmaktadır. Güneş ışınımı koşullarının ve FV sistemlerin çıkış güçlerinin değişimlerinden dolayı, FV sistemlerinin ürettiği harmonikler de değişmektedir (Chidurala et al., 2016).

Verilen bu motivasyonlar doğrultusunda, bu tez çalışmasında doğrusal olmayan yüklerin ve FV sistemlerin bulunduğu dağıtım şebekelerinin ana bileşenlerinin üç fazlı modelleri göz önünde bulundurularak dengesiz üç fazlı harmonik güç akışı analizleri gerçekleştirilmiştir. Harmonik bozulmaların görüldüğü aktif dağıtım sistemlerinde FV sistemlerin harmonik akım bileşenlerinin güneş ışınımına bağlılığı ele alınarak bu kaynakların optimal katılım oranlarının belirlenmesi için deterministik ve olasılıksal optimizasyon modelleri önerilmiştir.

1.2 Literatür Özeti

Dağıtım şebekeleri, son kullanıcılara ulaşan gücün verimliliği ve güvenilirliği açısından güç sistemlerinin önemli bölümlerinden biri olduğundan, harmonik çalışmaları bu şebekelerde yapılan araştırmalar arasında güncelliğini korumaya devam etmektedir. Literatürde farklı uygulamaları bulunan bu çalışmalar, gerek evirici arayüzlü DEÜ sistemleri gerekse FV sistemler ile birlikte gerçekleştirildiğinde büyük önem kazanmaktadır (Fekete et al., 2012; Urbanetz et al., 2012; Pandi et al., 2013a; Pandi et al., 2013b; Bhowmik et al., 2003; Ghaffarzadeh and Sadeghi, 2016; Hengsritawat et al., 2012; Abdelsalam and El-Saadany, 2013; HassanzadehFard and Jalilian, 2018; Jashfar and Esmaeili, 2014). FV sistemler harmonik üreten cihazlar olan güç elektroniği dönüştürücülerini bulundurduğundan, bu sistemler doğrusal olmayan yüklerin de bulunduğu şebekenin güç kalitesi üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bu kapsamda, Fekete et al. (2012), FV sistemlerin bağlı bulunduğu dağıtım şebekesinde farklı senaryolar altında harmonik analizi gerçekleştirmişlerdir. Doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu dağıtım şebekesinde FV sistemlerinin bütün yük taleplerini beslediği durumda toplam harmonik bozulmaların en yüksek seviyelerde olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Urbanetz et al. (2012) ise, FV sistemlerin entegre edildiği dağıtım şebekesinde güç kalitesi değerlendirme çalışması yapmışlardır. FV sistemlerinin güç sistemine stratejik bağlantısının şebekedeki gerilim profilini ve toplam harmonik gerilim bozulmalarını iyileştirebileceğini ve güç kayıplarını azaltabileceğini belirlemişlerdir. Son yıllarda, evirici tabanlı DEÜ sistemlerinin ve özellikle de FV sistemlerin şebekelerdeki kurulumları hızla artmaktadır. Bu artan

katılım oranları IEEE 519 standartlarında belirtilen limitleri aşabilen harmonik bozulma seviyelerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu anlamda, Pandi et al. (2013a), evirici tabanlı DEÜ sistemlerinin maksimum katılım oranlarını güç kalitesi kısıtlarını göz önünde bulundurarak Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization) yöntemi ile belirlemişlerdir. Dağıtım şebekesinde DEÜ kapasitesinin farklı bölgelere dağıtılmasıyla DEÜ katılım oranının artırılabilceği sonucuna ulaşmışlardır. Pandi et al. (2013b) başka bir çalışmalarında, farklı senaryolar altında en kötü koşulları göz önünde bulundurarak evirici tabanlı DEÜ birimlerini güç kalitesi parametrelerine dayalı optimizasyon problemine dahil etmişlerdir. Optimal DEÜ katılım oranı belirlenirken harmonik parametrelerinin göz önünde bulundurulması gerektiği anlaşılmıştır. Bhowmik et al. (2003) ise, DEÜ sistemlerinin radyal dağıtım şebekelerindeki katılım oranlarını tekil harmonik bozulma limitlerini göz önünde bulundurarak analitik bir yöntem ile belirlemişlerdir. Evirici tabanlı DEÜ sistemlerinin ve şönt kapasitörlerin harmonik limitler göz ardı edilerek şebekeye entegre edilmeleri, şebeke açısından harmonik bozulmaların yüksek seviyelere gelmesine neden olmaktadır. Ghaffarzadeh and Sadeghi (2016), planlama sürecinde harmonik limitleri göz önünde bulundurarak DEÜ birimlerinin ve kapasitörlerin şebekedeki optimal yerleşimi ve boyutlandırılması problemini çözmüşlerdir. Literatüre bakıldığında, yenilenebilir enerji kaynaklarının dağıtım şebekelerinde optimal bağlantılarının göz önünde bulundurulduğu harmonik çalışmalarında olasılıksal yaklaşımların uygulandığı görülmektedir. Bu bağlamda, Hengsritawat et al. (2012), dağıtım şebekesinde harmonik limitlerini göz önünde bulundurarak optimal FV çıkış gücünü ve yerleşimini olasılıksal bir yöntem kullanarak belirlemişlerdir. Güç dağıtım şebekesinde doğrusal olmayan yükler bulunduğunda FV sistemlerinin harmonik limitlerinin ihlaline neden olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Abdelsalam and El-Saadany (2013), dağıtım sisteminde harmonik bozulmaları göz önünde bulundurarak çeşitli DEÜ birimlerinin optimal yerleşimi problemini çözmek için olasılıksal tabanlı Genetik Algoritma yöntemini kullanmışlardır. HassanzadehFard and Jalilian (2018), harmonik bozulmaların bulunduğu dağıtım şebekesinde yüklerin belirsizliklerini ve DEÜ sistemlerinin çıkış güçlerinin kesikli yapıdaki karakteristiklerini göz önünde bulundurarak DEÜ sistemlerinin optimal yerleşimi ve çıkış gücünü belirlemek için optimizasyon yöntemi önermişlerdir. Jashfar and Esmaeili (2014) ise, dağıtım sisteminde harmonik bozulmaları göz önünde bulundurarak FV sistemlerinin reaktif güç planlamasını optimizasyon problemine dahil etmişlerdir.

Bu tez çalışmasında, FV sistemlerin bağlı bulunduğu dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde harmonik parametreleri göz önüne alınarak bu yenilenebilir enerji kaynaklarının optimal katılım oranları irdelenmiştir. Bu bölümün alt başlıklarında tez çalışması kapsamı ile ilgili literatür özeti sunulmuştur.

1.2.1 Dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinin modellenmesi

Güç akışı analizi, bir güç sisteminin planlama, tasarım ve çalışma aşamalarında önemli ve temel bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır. Aynı zamanda, bu analiz, güç şebekesinin kararlı durum davranışının belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bir güç akışı yöntemi, dağıtım sisteminin özelliklerini yeterince detaylı olarak modelleyebilmelidir. Elektrik dağıtım şebekesinin genel olarak bilinen özellikleri, radyal yapı, birden fazla faz, dengeli olmayan yüklenme, çok sayıda hat bölümleri ve baralardır. Ayrıca, bu şebekelerdeki hatların direnç – reaktans oranları yüksektir.

Güç sistemi uygulamalarında, dengeli olmayan üç fazlı güç akışı probleminin çözümü için yaygın olarak kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Güç sistemlerinin doğrusal olmayan denklemlerinin iteratif çözümleri için kullanılan en yaygın yöntemler, Gauss, Newton-Raphson ve ileri – geri süpürme (forward and backward sweep) tekniğine dayalı algoritmalarlardır.

Dengesiz üç fazlı güç akışı probleminin çözümü için uygulanan algoritmalarından biri, ileri ve geri süpürme tekniğine dayalı olan iteratif yöntemdir (Thukaram et al., 1999; Teng, 2003; Kersting, 2012; Ciric et al., 2003). Thukaram et al. (1999), çok sayıda şebeke hattının bulunduğu 3 fazlı dağıtım sistemlerinde güç akışını gerçekleştirmek için formülasyon ve çözüm algoritması geliştirmişlerdir. Önerdikleri yöntem, hatların (branches) üç fazlı modellemesini ve yük modellemesini göz önünde bulundurmaktadır. Çözüm yöntemi, dağıtım sisteminin her bir düğüm noktasındaki (node) gerilimleri ve her bir hattındaki akımları elde etmek için ileri ve geri yayılım (forward and backward propagation) prensibine dayalıdır. Geri yayılım (backward propagation), dağıtım sisteminin hat akımları ile bara akım enjeksiyonları arasındaki ilişkiyi elde etmek için kullanılmıştır. İleri yayılım (forward propagation), bara gerilimlerini hesaplamak için bahsedilen ilişkiden yararlanılarak geliştirilmiştir. İleri – geri yayılım yöntemi, dağıtım şebekelerinin analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Teng (2003), dağıtım sistemlerinin topolojik karakteristiklerini göz önünde bulunduran bir formülasyon geliştirerek dengeli olmayan üç fazlı dağıtım sistemlerinin güç

akışı problemini çözmüştür. Güç akışı sonuçlarını elde etmek için bara enjeksiyon – hat akımı matrisi ve hat akımı – bara gerilimi matrisi olmak üzere iki matris geliştirmiştir. Çoğu güç akışı programlarında, dağıtım şebekesinin nötr hattı genellikle Kron'un indirgeme (Kron's reduction) yöntemi ile faz hatlarına dahil edilmektedir (Kersting, 2012). Nötr hattı ve toprak, modellemede açıkça gösterilmediklerinden, nötr hattı ve toprak akımları ve gerilimleri bilinmemektedir. Güç kalitesi ve kayıp analizi gibi bazı uygulamalarda, nötr hattı ve toprak akımları ve gerilimlerinin bilinmesi önemli hale gelmektedir. Ciric et al. (2003), ileri ve geri süpürme yöntemini kullanarak ve nötr topraklamasını göz önünde bulundurarak üç fazlı dört hatlı dağıtım şebekeleri için genel bir güç akışı algoritması önermişlerdir. Nötr hattı ve toprak bağlantılarını, kullandıkları yöntemde göz önünde bulundurmışlardır. Dengeli olmayan yüklerin bulunduğu orta gerilim ve düşük gerilim test şebekelerini kullanarak farklı senaryolar altında güç akışını gerçekleştirmişlerdir. Radyal dağıtım sistemleri için tasarlanan ileri geri süpürme tekniğine dayalı yöntemler dağıtım şebekelerinde yaygın olarak kullanılan güç akışı algoritmalarından biridir. Bununla birlikte, basamaklı çözüm yöntemi, dağıtım sisteminin hat kollarında hesaplama yükünün artmasına neden olmaktadır. Pratikte, büyük ölçekli radyal dağıtım şebekelerinde, sistem ile ilgili hesaplamaların yapılması oldukça zor ve hatalara açık olabilmektedir (Yang, 2016).

Dağıtım sistemlerinde gerçekleştirilen güç akışı analizi yöntemlerinden diğeri, Newton – Raphson algoritmalarına dayalıdır (Zimmerman and Chiang, 1995; Lo and Zhang, 1993). Zimmerman and Chiang (1995), dengeli olmayan dağıtım sistemlerinin güç akışı problemini çözmek için dağıtım sisteminin topolojik yapısını kullanarak hızlı ayırık Newton yöntemini geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımda, hatlar, transformatörler, şönt kapasitörler, jeneratörler ve çeşitli yük modelleri göz önünde bulundurulmuştur. Lo and Zhang (1993), sıralı bileşenler (sequence components) yapısını kullanarak 3 fazlı AA güç akışı algoritması geliştirmişlerdir. 3 fazlı dengeli olmayan güç akışı problemini üç farklı alt probleme ayırmışlardır. Pozitif sıralı bileşenlerin bulunduğu alt problem (pozitif sıralı güç akışı) Newton – Raphson iteratif yöntemi ile çözülmüş olup, diğer iki alt problem iki eş zamanlı lineer denklemler takımı ile belirtilmiştir.

Newton – Raphson algoritması, yakınsama yeteneğinden dolayı güç akışı problemlerinin çözümünde tercih edilmektedir. Bununla birlikte, algoritmanın her iterasyonunda Jakobiyen matrisinin oluşturulması ve tersinin alınması gerekmektedir. Ayrıca, bu yöntem, dağıtım sistemindeki hatların direnç – reaktans

(R/X) oranlarının yüksek olması ve yüklerin dengeli olmaması sonucunda yakınsamamaktadır.

Güç akışı analizi yöntemlerinden bir diğeri ise, Gauss algoritmalarına dayalıdır (Chen et al., 1991a; Chen et al., 1991b; Vieira et al., 2004; Chen and Yang, 2009; Chen and Yang, 2010; Yang, 2016). Chen et al. (1991a), büyük ölçekli dağıtım sistemleri için üç fazlı güç akışı analizi önermişlerdir. Çözüm yöntemi, optimal olarak sıralanmış admitans matrisinin üçgen şeklinde ayrıştırılmasına dayalı olan Gauss kapalı empedans matrisi yöntemidir (Gauss implicit Zbus method). Analizi gerçekleştirilen sistem, dengeli ya da dengeli olmayan, radyal şebeke veya enterkonnekte şebeke olabilmektedir. Sistem ve bileşen modelleri için her bir fazın gösterimi kullanılabildiğinden dolayı, tek fazlı, iki fazlı ve üç fazlı bileşenler aynı anda şebekede bulunabilmektedir. Gauss kapalı empedans matrisi yönteminde, şebekedeki bara gerilimlerinin hesaplanması için süperpozisyon (superposition) ilkesi kullanılmaktadır. Süperpozisyon ilkesi, bara gerilimleri hesaplanırken aynı anda tek çeşit kaynağın göz önünde bulundurulmasını gerektirmektedir. Dağıtım şebekesinin referans (slack) barasındaki gerilim kaynağı aktifleştirildiğinde, sistemdeki diğer bütün akım kaynaklarının bağlantıları kesilmektedir. Akım kaynakları şebekeye bağlandığında ise, referans barasındaki gerilim kaynağı kısa devre edilmektedir. Chen et al. (1991b), bir diğer çalışmalarında, geniş ölçekli dağıtım sistemlerini analiz etmek için üç fazlı detaylı jeneratör ve transformatör modellerini sunmuşlardır. Jeneratör modeli, dağıtım sisteminin dengeli olmamasından dolayı jeneratör fazlarının dengeli olmaması durumunu temsil ettiğinden önemlidir. Üç fazlı transformatör modellerinde ise, bakır ve nüve kayıplarını, sarım bağlantılarını, birincil ve ikincil sarımlar arasındaki faz kaymasını, nominal olmayan kademe ayarlarını göz önünde bulundurmuşlardır. Vieira et al. (2004), her bir fazın ayrı bir şekilde modellendiği ve her fazın güç akışının bağımsız olarak gerçekleştirildiği, dengeli olmayan dağıtım şebekeleri için üç fazlı güç akışı çözüm yöntemini sunmuşlardır. Bütün bileşen modelleri, sadece her bir fazın gerilimleri, admitansları ve bağımsız akım kaynakları kullanılarak tanımlanmıştır. Bileşen modelleri, gerekli durumlarda akım enjeksiyonları yardımı ile her bir fazda ayrı ayrı elde edilmiştir. Çözüm yöntemi, her bir fazda admitans matrisinin ayrıştırıldığı Gauss empedans matrisi yöntemine dayalıdır. Chen and Yang (2010), bara referans yapısı (bus frame of reference) yerine döngü referans yapısını (loop frame of reference) kullanarak dengeli olmayan radyal dağıtım sistemlerinde üç fazlı güç akışı yöntemi önermişlerdir. Temel grafik teorisini ve enjeksiyon akımı yöntemini önerdikleri yöntemde uygulamışlardır (Chen and

Yang, 2009). Yang (2016), büyük ölçekli dengeli olmayan dağıtım şebekeleri için grafik teorisini, enjeksiyon akımını ve seyrek matris (sparse matrix) yöntemlerini kullanarak üç fazlı güç akışı çözüm yöntemi önermiştir. İteratif yöntemi, bara referans yapısını (bus frame of reference) kullanarak çözmüştür. Transformatörlerin elektriksel karakteristiklerini yöntemine dahil etmek için bileşen modellerini eşdeğer enjeksiyon akımlarına dönüştürmüştür. Güç akışı algoritmasını dengeli olmayan üç fazlı dağıtım sistemleri üzerinde uygulamıştır.

Son yıllarda, dağıtık enerji üretim kaynaklarının ve enerji depolama cihazlarının dağıtım şebekelerindeki uygulamaları, sera gazları emisyonlarının azaltılması, sistem güvenilirliğinin artırılması gibi yönlerden avantaj sağlamaktadır (Yang, 2016). Yakın gelecekte, yenilenebilir enerjideki global yönelimin dağıtık enerji üretim kaynaklarının ve enerji depolama cihazlarının akıllı şebekelerde göz önünde bulundurulması yönünde olacağı beklenmektedir (Yang and Tseng, 2015). Akıllı şebekelerin analizini gerçekleştirmek için, trafo merkezleri, hatlar, şönt kapasitörler, reaktörler, transformatörler, dağıtık enerji üretim kaynakları ve enerji depolama cihazları gibi temel bileşenlerin detaylı olarak modellenmesi gerekmektedir.

Akıllı şebekelerin çalışmaları, dengesiz üç fazlı hat düzenlerinden, üç fazlı yer altı ve havai hatların eşit olmayan iletken uzaklıklarından, dengeli olmayan yüklerden ve çeşitli dağıtık enerji üretim kaynaklarından dolayı dengeli olmamaktadır. Ayrıca, çeşitli DEÜ sistemlerinin şebekeye bağlı durumda olması dağıtım sisteminin dengeli olmamasına yol açmaktadır (Yang and Tseng, 2015). Düşük gerilim dağıtım şebekelerinde, fotovoltaik sistemler gibi tek fazlı dağıtık enerji üretim kaynaklarının artması ve bu kaynakların dengeli olmayan yapıları ile bu şebekelerin dengeli olmama durumu daha da belirginleşmektedir (Rodriguez-Calvo et al., 2017). Yang and Tseng (2015), enerji depolama cihazlarının bulunduğu akıllı şebekelerde Gauss tabanlı üç fazlı güç akışı analizi yöntemi önermişlerdir. Önerdikleri yöntemi, döngü referans yapısına dayalı olarak geliştirmişlerdir. Akıllı şebekelerin sistem topolojilerini göz önünde bulundurarak radyal ve radyal olmayan şebekeler için çözüm yöntemleri geliştirmişlerdir. Rodriguez-Calvo et al. (2017), fotovoltaik sistemlerin ve enerji depolama cihazlarının dengeli olmayan düşük gerilim dağıtım şebekelerine entegrasyonunun teknik sonuçlarını incelemişlerdir. Konuta bağlı elektrik hizmet alımı yapan müşterileri ve dağıtık enerji depolama cihazlarını ve fotovoltaik sistemleri göz önünde bulundurarak, şebekedeki yükün dengeli olmama durumu arttıkça günlük enerji kayıplarını ve gerilim problemlerini saatlik bazda güç akışı analizi ile

değerlendirmişlerdir. Analizleri, kırsal ve yarı kırsal düşük gerilim elektrik şebekelerinde, talep seviyesini, enerji depolama cihazlarının ve fotovoltaik sistemlerin katılım oranlarını farklı senaryolar altında göz önünde bulundurarak gerçekleştirmişlerdir. Üç fazlı güç akışı analizini ileri – geri süpürme algoritmasını kullanarak yapmışlardır.

Dağıtık enerji üretim sistemleri, genellikle dağıtım sistemlerinin güç akışı analizi çalışmalarında şebekelerin jeneratör veya yük baralarına bağlanabilmektedir. Her bir DEÜ birimi için uygun bir model belirlenmesi, DEÜ çalışmasının ve bu sistemin şebekeye bağlanma şeklinin (direkt ya da dolaylı olarak) bilinmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda, Moghaddas-Tafreshi and Mashhour (2009), güç akışı çalışmaları için uygun DEÜ modellerinin listesini çalışmalarında sunmuşlardır. Ayrıca, radyal dağıtım şebekelerinde DEÜ sistemlerini göz önünde bulundurarak, ileri – geri süpürme tekniğine dayalı dengeli olmayan üç fazlı güç akışı algoritması sunmuşlardır. Kamh and Iravani (2010), küçük şebeke (microgrid) ve aktif dağıtım sistemi uygulamaları için üç fazlı Newton-Raphson güç akışı algoritması sunmuşlardır. Geliştirilen algoritma, tek fazlı hatları, dengeli olmayan yükleri ve hatları desteklemektedir. Ayrıca, dengeli veya dengeli olmayan durumlarda geliştirdikleri güç akışı yaklaşımı için DEÜ birimlerinin kararlı durum sıralı bileşen modellerini sunmuşlardır. DEÜ modelleri, senkron jeneratör tabanlı ve elektronik kuplajlı DEÜ birimlerini temsil etmektedir. DEÜ birimlerinin sabit güç ve regüle edilmiş gerilim çalışma modları göz önünde bulundurulmuştur. Güç sistemlerinde dağıtık enerji üretim sistemlerinin katılım oranı arttıkça, dağıtım sistemlerinin güç akışı analizi birden fazla kaynağı göz önünde bulundurabilecek modelleri ve algoritmaları gerektirmektedir. Khushalani et al. (2007), birden fazla dağıtık enerji üretim sistemlerinin bulunduğu dengeli olmayan dağıtım şebekelerinde ileri – geri süpürme tekniğine dayalı güç akışı analizi gerçekleştirerek bu sistemlerin şebeke kayıplarına ve gerilim saptmalarına etkilerini incelemişlerdir.

1.2.2 Dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde harmonikler

Dengesiz üç fazlı dağıtım sistemlerinde harmonik problemi, önemli bir çalışma konusu olarak karşımıza çıkmaktadır. Literatürde dağıtım şebekelerinin dengeli çalıştığı göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen harmonik çalışmaları görülmektedir (Mohammadi et al., 2016; Pandi et al., 2013a; Pandi et al., 2013b; Ghaffarzadeh and Sadeghi, 2016; Hengritawat et al., 2012; Abdelsalam and El-Saadany, 2013; HassanzadehFard and Jalilian, 2018). Bununla birlikte, dengeli

durum göz önünde bulundurularak tek faz eşdeğer sistemde gerçekleştirilen güç akışı çalışmaları dağıtım şebekelerinin dengesiz yapılarından dolayı yeterli olmamaktadır (Kersting, 2012). Bu nedenle, dağıtım şebekelerinin bileşenlerinin üç fazlı modelleri güç akışı algoritmalarında kullanılabilir. Dağıtım sistemlerinin dengeli olmayan özelliklerinden dolayı, bütün bileşenlerin detaylı üç fazlı modellerinin göz önünde bulundurulduğu harmonik güç akışı analizi gereklidir.

Dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde gerçekleştirilen harmonik çalışmaları, şebekedeki doğrusal olmayan yüklerin ve evirici tabanlı DEÜ sistemlerinin ele alındığı çalışmalar olarak ikiye ayrılmaktadır. İlgili çalışmalardan birincisi, dağıtım sistemlerinde doğrusal olmayan yüklerin göz önünde bulundurulduğu çalışmalardır (Yan et al., 1994; Teng and Chang, 2007; Teng et al., 2014; Yang and Le, 2016). Yan et al. (1994), çeşitli harmonik yüklerin bulunduğu bir güç sistemindeki harmonik bozulmaları analiz etmek için bir harmonik güç akışı programı geliştirmişlerdir. Önerilen program, sistemin her bir barasındaki harmonik akımların akışını, gerilim harmonik bozulma faktörünü ve rezonans frekansını elde etmek için uygulanmıştır. Teng and Chang (2007), üç fazlı radyal dağıtım sistemleri için tasarlanan hızlı bir harmonik güç akışı analizi yöntemi önermişlerdir. Bu yöntem üç fazlı bileşen modellerine, frekans tarama formülasyonuna ve yaygın olarak kullanılan ileri – geri süpürme tekniğine (forward / backward sweep technique) dayalı olarak geliştirilmiştir. Geri süpürme (backward sweep), dağıtım sisteminin hat akımları ile bara akım enjeksiyonları arasındaki ilişkiyi elde etmek için kullanılmıştır. İleri süpürme (forward sweep), bara gerilimlerini hesaplamak için bahsedilen ilişkiden yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. İleri – geri süpürme tekniği, dağıtım sistemleri analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, harmonik analiz için doğrudan kullanılamamaktadır. Bu nedenle, belirli veri formatları geliştirildikten sonra, bu formatlar kullanılan ileri – geri süpürme tekniğine entegre edilerek sistemdeki harmonik kaynaklı etkiler incelenebilmektedir. Teng et al. (2014), dengeli olmayan dağıtım sistemleri için 3 fazlı harmonik analizi yöntemi önermişlerdir. Baralardaki harmonik gerilimleri, baralara enjekte edilen harmonik akımları ve hatlardaki harmonik akımları, dağıtım sistemlerinin topolojik karakteristiklerinden geliştirdikleri matrisler ile analiz etmişlerdir. Yang and Le (2016), dengeli olmayan radyal dağıtım sistemleri için Gauss temelli üç fazlı harmonik güç akışı yöntemi önermişlerdir. Önerdikleri yöntem, döngü referans yapısına dayanmaktadır.

Şebekelerde, üç fazlı modellerin kullanıldığı harmonik çalışmalarından diğeri ise, evirici arayüzlü DEÜ birimlerinin dağıtım sistemlerine entegrasyonunun göz önünde bulundurulduğu çalışmalardır. Literatürde, güç elektroniği tabanlı DEÜ sistemlerinin dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde harmonik bozulmalara etkileri ile ilgili önemli çalışmaların olduğu görülmektedir (Chidurala et al., 2016; Dash et al., 2012; Taher and Bagherpour, 2013; Wang et al., 2018; Degroote et al., 2010). Dağıtım şebekelerinde kurulumları hızla artan FV sistemler, dağıtım sisteminin güç kalitesi üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bu kapsamda, Chidurala et al. (2016), doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesinde FV sistemlerinin harmonik kaynaklı etkilerini farklı senaryolar altında incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri simülasyonlarda, FV sistemlerinin gittikçe artan katılım oranlarının ve doğrusal olmayan yüklerin harmonikleri yükselttiğini belirlemişlerdir. Gerçek bir dağıtım şebekesinde, FV sistemlerinin harmoniklere ve harmoniklerin transformatörlere etkilerini incelemişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçlara göre, FV sistemlerinin dağıtım şebekesindeki sayıları arttıkça, gerilimdeki ve akımdaki toplam harmonik bozulmalar (THD) limitlerini aşmıştır ve bunun sonucunda da trafolar aşırı yüklenerek ısınmıştır. Dash et al. (2012) ise, dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesinde DEÜ birimlerini göz önünde bulundurarak güç kalitesi parametrelerini belirlemişlerdir. Dağıtım sistemlerinin dengesiz yüklenmelerinden dolayı DEÜ sistemlerini şebekeye entegre ederken dengesiz üç fazlı gerilimlerin ve toplam harmonik bozulmaların göz önünde bulundurulması gerektiğini belirtmişlerdir. Aktif dağıtım şebekelerinde harmonikler göz önünde bulundurulmadan şönt kapasitörlerin yerleşimi, bu şebekelerde kapasitörler ile endüktif elemanlar arasındaki olası rezonans risklerinden dolayı harmonik bozulmaları artırabilmektedir. Bu bağlamda, Taher and Bagherpour (2013), evirici tabanlı DEÜ sistemlerinin bağlı bulunduğu dengesiz üç fazlı dağıtım sisteminde harmonik parametrelerini göz önünde bulundurarak optimal kapasitör yerleşimi ve boyutlandırılması problemi için bir optimizasyon yöntemi önermişlerdir. Evirici tabanlı DEÜ sistemlerinin dağıtım şebekelerinde entegrasyonunun artmasıyla birlikte oluşan harmonik bozulmalar, bu şebekelerin çalışmasını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu harmonikler, DEÜ sistemlerinin çeşitliliğine ve bu sistemlerin çıkış güçlerinin değişkenliğine bağlılık göstermektedir. Bu anlamda, Wang et al. (2018), dengesiz üç fazlı dağıtım sisteminde DEÜ çıkış gücünün değişkenliğini göz önünde bulundurarak farklı DEÜ birimlerinin harmonik gerilimlere etkilerini belirlemek için bir yöntem önermişlerdir. DEÜ sistemlerinin dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerine entegre edilmeleri, bu şebekeler açısından güç kayıpları ile ilgili problemleri gündeme getirmektedir. Bu güç kayıpları, temel ve harmonik

frekanslardaki kayıpları içermektedir. Evirici tabanlı DEÜ sistemleri, bu kayıplar üzerinde farklı etkilere sahiptir. Degroote et al. (2010), DEÜ sistemlerinin toplam kayıplara etkilerini incelemek ve toplam kayıplara oranla harmonik frekanslardaki güç kayıplarının önemini vurgulamak için harmonik güç akışı analizi yöntemi sunmuşlardır.

1.2.3 FV sistemlerde güneş ışıını ve harmonikler

Son yıllarda, güneş ışıınındaki değişimlerin FV sistem harmoniklerine etkileri literatürde önemli bir araştırma konusudur. Genellikle, evirici tabanlı DEÜ sistemlerinin harmonik akım spektrumunun sabit olduğu kabul edilmektedir (Pandi et al., 2013a; Pandi et al., 2013b; Bhowmik et al., 2003; Ghaffarzadeh and Sadeghi, 2016; Abdelsalam and El-Saadany, 2013; HassanzadehFard and Jalilian, 2018; Taher and Bagherpour, 2013; Wang et al., 2018). Bununla birlikte, FV sistem akım harmonik spektrumunun güneş ışıınına bağlı olarak değişimi harmonik analizinde göz önünde bulundurulmalıdır (Hengsritawat et al., 2012). Literatürde, güneş ışıını koşullarının FV sistemlerinin ürettiği harmoniklere etkilerinin göz önünde bulundurulduğu önemli çalışmalar olduğu görülmektedir (Patel and Agarwal, 2010; Muthuramalingam and Manoharan, 2014; Sidrach-de-Cardona and Carretero, 2005; Patsalides et al., 2012; Papaioannou et al., 2009; Papaioannou et al., 2011; Luo et al., 2015; Chicco et al., 2009; Mahela and Shaik, 2017). Patel and Agarwal (2010), çeşitli FV bağlı aktif filtre konfigürasyonlarını ve kontrol şemalarını, reaktif güç kompanzasyonuna göre, harmoniklerin kompanzasyonuna göre ve dengesiz üç fazlı sistemde doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerden dolayı fazların kompanzasyonuna göre karşılaştırmışlardır. Çıkış gücünü, toplam harmonik bozulmaları, fazların dengeli olmama durumunu ve nötr iletken akımını, tam güneş ışıınında ve kısmi gölgelenme durumunda değerlendirmişlerdir. Kısmi gölgelenme koşulları, FV sistemlerin evirici arayüzleri ile bağlandıkları yükün geriliminin harmonik spektrumunda önemli bir rol oynamaktadır. Bu kapsamda, Muthuramalingam and Manoharan (2014), şebekeye bağlı olmayan (stand alone) FV sistemlerde kısmi gölgelenme ile ilgili yapmış oldukları çalışmalarında, maksimum güç noktası izlemede zeki yöntemleri (maximum power point tracking (MPPT) intelligence techniques) karşılaştırmışlardır. Ayrıca, kısmi gölgelenme durumunda yaptıkları deneysel ölçümler sonucunda gerilimdeki toplam harmonik bozulmaları sunmuşlardır. Sidrach-de-Cardona and Carretero (2005) ise, farklı güneş ışıını koşullarındaki günlerde, şebekeye bağlı FV sistemlerinin toplam harmonik akım bozulmalarını belirlemek için bir analiz yöntemi önermişlerdir. Akımdaki toplam harmonik

bozulma değerlerinin yüksek güneş ışınlımlı günler için düşük iken, düşük güneş ışınlımlı günler için yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Aynı çalışmaya göre, akımdaki THD değeri FV çıkış gücüne bağlıdır. FV çıkış gücü nominal değerinde olduğunda THD değeri azalırken, nominal değerinin altında düştüğünde yükselmektedir. Ayrıca, FV sistemlerin entegre edildiği dağıtım şebekesinde gerilimdeki THD değerleri açısından en kötü koşullar yüksek güneş ışınlımlı durumunda gözlenmektedir. Bu bağlamda, Patsalides et al. (2012), harmonik bozulmaların güneş ışınlımlıma bağlılığını FV sistemlerin bulunduğu dağıtım şebekesinde harmonik parametrelerini inceleyerek araştırmışlardır. FV sisteminin akım harmonikleri, çıkış gücüne ve güneş ışınlımlıma bağlı olan temel frekans akımına göre değişmektedir (Papaioannou et al., 2009; Papaioannou et al., 2011). Bu anlamda, Luo et al. (2015), FV sistemin harmonik akım spektrumunun ve akımının THD değerlerinin güneş ışınlımlıma göre değiştiğini gözlemlemişlerdir. Güneş ışınlımlı azalırken THD'nin arttığını tespit etmişlerdir. Chicco et al. (2009) ise, FV sistemlerden kaynaklanan harmonik bozulmaları farklı çalışma şartları altında deneysel olarak ölçmüşlerdir. Harmonik akım spektrumunun ve akımdaki THD değerlerinin düşük güneş ışınlımlı durumunda yüksek güneş ışınlımlı durumuna göre daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bir diğer çalışmada Mahela and Shaik (2017), şebekeye bağlı üç fazlı fotovoltaiik sistemde güneş ışınlımlının ve FV katılım oranının değişimlerini göz önünde bulundurarak akım ve gerilimdeki toplam harmonik bozulmaları analiz etmişlerdir.

1.3 Tez Çalışmasının Aşamaları

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilmiş olan çalışmalar, aşağıda belirtilen aşamalarda anlatılmaktadır:

Birinci bölümde, öncelikle tez çalışmaları ile ilgili giriş açıklamaları sunulmuştur. Daha sonra, tez çalışmalarına yönelik motivasyonlar verilmiştir. Bu doğrultuda, tez çalışması kapsamı ile ilgili literatür özeti anlatıldıktan sonra, bu tez çalışmalarının literatüre katkılarından ve amaçlarından bahsedilmiştir.

İkinci bölümde, farklı güneş ışınlımlı koşullarında maksimum gücün çekilmesini sağlayan MPPT algoritmasının bulunduğu şebekeye bağlı FV sistemin güç elektroniği ara yüzleri ile birlikte modeli göz önünde bulundurulmuştur. FV sistemin şebekeye enjekte ettiği akımın harmonik bileşenleri, farklı güneş ışınlımlı durumlarında ilgili modelden elde edilmiştir. Buradaki amaç, farklı güneş ışınlımlı koşullarında MPPT yönteminde karşılaşılan zorluklar göz önünde

bulundurulurken, FV sistemin güç elektroniği ara yüzü ile şebekeye enjekte ettiği akımın harmonik bileşenleri ile güneş ışıınımı koşulları arasındaki ilişkilerin belirlenmesidir.

Üçüncü bölümde, dağıtım şebekesinin ana bileşenlerinin dengesiz üç fazlı güç akışına uygun matematiksel modelleri oluşturulmuştur. Doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesine FV sistemlerinin bağlanması durumunda dağıtım sisteminin ayrıntılı olarak dengesiz üç fazlı harmonik güç akışı analizinin gerçekleştirilebilmesi için gerekli temeller oluşturulmuştur. Bu kapsamda, literatürde mevcut analiz yöntemleri incelenmiş ve gerekli analizler için bilgisayar tabanlı simülasyonlar geliştirilmiştir. Harmonik bozulmaların bulunduğu dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesinde, FV sistemlerin optimal katılım oranlarını belirlemek için olasılıksal yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem, FV sistemin şebekeye enjekte ettiği akımın harmonik spektrumunun güneş ışıınımına bağlı değişimine dayalıdır. Bu bağlamda, dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesinin uzun dönemdeki yük profili ve güneş ışıınımındaki değişimlerden dolayı fotovoltaik sistemlerin çıkış güçlerinin belirsizliği düşünülerek ve harmonik kısıtları göz önüne alınarak bu kaynakların dengesiz üç fazlı dağıtım sistemindeki güç talebini karşılamadaki optimal katılım oranlarını planlamak için gerekli çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Dördüncü bölümde, IEEE 519 standardında belirtilen harmonik kısıtları göz önüne alınarak dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerine entegre edilecek FV sistemlerin optimal katılım oranlarını belirlemek için deterministik ve olasılıksal optimizasyon yöntemleri önerilmiştir. Ayrıca, FV sisteminden şebekeye iletilen akımın harmonik spektrumunun, farklı güneş ışıınımı koşullarına bağlılığı göz önünde bulundurulmuştur. Dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde gerçekleştirilen planlamalarda harmonik kısıtları göz önüne alınarak FV sistemlerin bu şebekelerdeki optimal katılım oranları farklı güneş ışıınımı senaryoları altında matematiksel analiz yöntemleri ile belirlenmiştir. Geliştirilen analiz yöntemleri, IEEE dengesiz üç fazlı dağıtım sistemleri üzerinde uygulanmış olup FV sistemlerin dağıtım şebekelerindeki harmoniklere etkileri incelenmiştir.

Beşinci bölümde, dağıtım şebekelerinde harmonik ihlalleri açısından sorunlu baralar tespit edilerek bu noktalara aktif filtreler bağlanmıştır. Aktif filtrelerin bağlı bulunduğu dağıtım şebekelerinde yük belirsizliği ve güneş ışıınımındaki değişimler dikkate alınarak optimal FV katılım oranlarını belirlemek için olasılıksal yöntem uygulanmıştır. FV sistemlerin optimal katılım oranları,

aktif filtrelerin ve doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu dağıtım sistemlerinde üç fazlı harmonik güç akışı analizinden belirlenen güç kalitesi parametrelerinin kısıtları göz önünde bulundurularak elde edilmiştir.

Altıncı ve yedinci bölümlerde, tez çalışmaları ile ilgili edinilen genel sonuçlar tartışılmış ve değerlendirilmiştir.

Bu tez kapsamında göz önünde bulundurulmuş olan çalışmalar literatürde ilgili problemlerin ele alındığı çalışmalar ile karşılaştırılmış olup, tez çalışmalarının literatüre katkıları Tablo 1.1’de sunulmuştur.

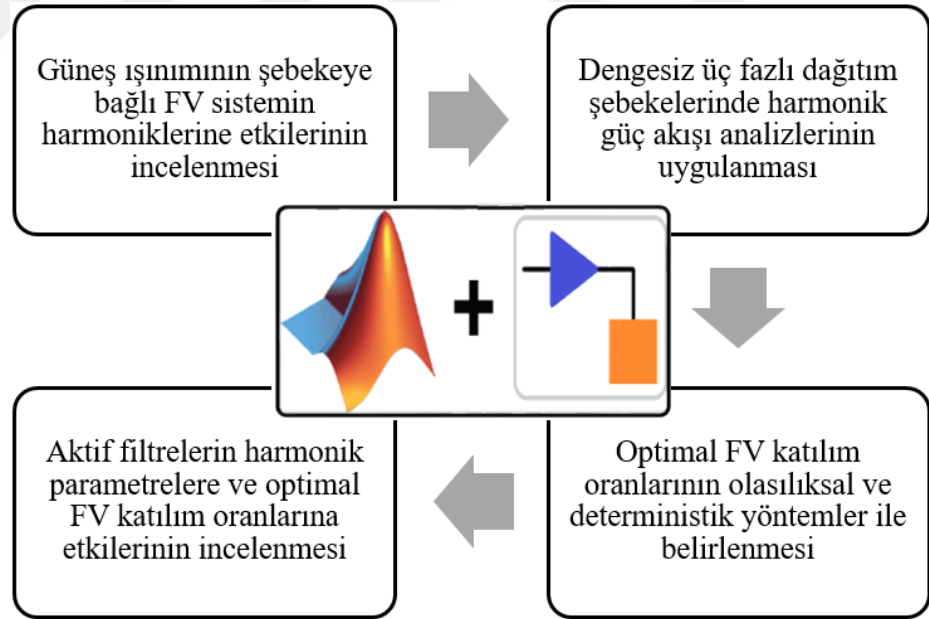
Tablo 1.1 Bu tez çalışmasında göz önünde bulundurulan problemler ile ilgili literatürdeki çalışmaların karşılaştırılması

Referanslar	Amaç: katılım oranı	Optimizasyon	Yenilenebilir enerji kaynaklarının belirsizliği	Yük belirsizliği	Dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesi	Harmonik parametrelerinin güneş ısınımına bağlılığı
Fekete et al. (2012)	✓		✓	✓	✓	✓
Hengsritawat et al. (2012)		✓	✓	✓		✓
Pandi et al. (2013b)	✓	✓	✓	✓		
Ghaffarzadeh and Sadeghi (2016)		✓		✓		
HassanzadehFard and Jalilian (2018)		✓	✓	✓		
Abdelsalam and El-Saadany (2013)		✓	✓	✓		
Chidurala et al. (2016)	✓		✓		✓	✓
Taher and Bagherpour (2013)		✓		✓	✓	
Vinayagam et al. (2019)	✓		✓	✓	✓	✓
Mahela and Shaik (2017)	✓		✓		✓	✓
Papaioannou et al. (2011)	✓		✓		✓	✓
Patsalides et al. (2012)	✓		✓		✓	✓
Bu tez çalışması	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Bu anlamda, harmonik kısıtlı optimal FV sistem katılım oranı probleminde, güneş ısınımlarındaki değişimlere bağlı olarak bu kaynakların harmonik akım bileşenlerinin güncellenmesinin ve ilgili optimizasyon probleminin dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde yük ve FV çıkış gücü belirsizlikleri altında olasılıksal ve deterministik optimizasyon yöntemleri ile çözülmesinin önemi literatürde güncelliğini korumaktadır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Harmonik kısıtlı optimal FV katılım oranı probleminde FV sistem şebeke akımının harmonik spektrumunun güneş ışıınım koşullarına bağlılığının ele alınması.
- Yük belirsizliğinin ve güneş ışıınımındaki değişimlerden dolayı FV sistem çıkış gücünün kesikli yapısının göz önünde bulundurularak optimizasyon probleminin dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerine uygulanması.
- Harmonik kısıtlı optimizasyon probleminin her bir senaryosunda dağıtım şebekelerinin FV bağlı baralarında farklı güneş ışıınımı koşullarının oluştuğunun göz önünde bulundurulması.
- Yük ve güneş ışıınımı belirsizlikleri altında optimizasyon probleminin olasılıksal ve deterministik yöntemler ile çözülmesi.
- Yük ve güneş ışıınımı belirsizliklerinin ve FV sistem harmonik akım spektrumunun güncellenmesinin optimizasyon işleminde aynı anda göz önünde bulundurulması.

Bu tez çalışmasının aşamalarını sırasıyla gösteren blok şema, Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1 Tez çalışmasının aşamalarını gösteren blok şema

2. GÜNEŞ IŞINIMINDAKİ DEĞİŞİMLERİN FV SİSTEMLERİN HARMONİK PARAMETRELERİNE ETKİLERİ

Tez çalışmasının bu bölümünde, FV sistemlerin şebekeye enjekte ettiği akımın harmonik bileşenlerinin güneş ışıını koşullarına bağıllığı incelenmiştir.

Bu bölümün alt başlıkları şu şekilde sunulmaktadır: Bölüm 2.1’de, güneş ışıınıındaki değışimlere bağılı olarak FV sistemlerin dağıtım şebekelerinde harmonik parametrelere etkileri ile ilgili giriş açıklamaları yapılmıştır. Bölüm 2.2’de, harmonikler hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 2.3’te, şebekeye bağılı FV sistem modeline farklı güneş ışıını koşullarında adapte edilen Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) algoritması hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 2.4’te, güneş ışıınıındaki değışimlere bağılı olarak FV sistemlerin şebekedeki harmonik parametrelere etkileri ile ilgili elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Bölüm 2.5’te, bu çalışmanın genel sonuçları anlatılmıştır.

2.1 Giriş

Güneş ışıınıındaki ani değışimler, FV sistemlerin güç elektroniğı ara yüzlerinin çalışma noktasında değışime yol açmaktadır. Aynı zamanda, güneş ışıınıının değışimi FV sistemlerin çıkış gücünün kesikli yapıda olmasına ve bu kaynaklar tarafından üretilen harmoniklerin etkilenmesine neden olmaktadır (Chidurala et al., 2016). Literatürde, FV sistemlerinin akım harmoniklerinin güneş ışıınıındaki değışimlere bağılı olması gittikçe önem kazanan bir problemdir. Bu nedenle, FV sistemin harmonik akım spektrumunun değışimi, harmonik analizi çalışmalarında göz önünde bulundurulabilmektedir (Hengsritawat et al., 2012). Literatüre bakıldığında, güneş ışıınıının şebekeye bağılı FV sistemlerde harmoniklere etkileri güncel bir araştırma konusudur (Mahela and Shaik, 2017; Sidrach-de-Cardona and Carretero, 2005; Patsalides et al., 2012; Papaioannou et al., 2009; Papaioannou et al., 2011; Luo et al., 2015; Chicco et al., 2009). Güneş ışıınıının ve FV sistemlerin katılım oranlarının değışimleri, gerilim ve akımdaki THD değıerleri gibi harmonik parametrelerini etkilemektedir (Mahela and Shaik, 2017). Yüksek güneş ışıınıı koşulları FV sisteminin akımındaki THD değıerinin azaltırken, düşük güneş ışıınıı koşulları bu değıeri yükseltmektedir (Sidrach-de-Cardona and Carretero, 2005). Diğer taraftan, yüksek güneş ışıınıı koşulları FV sistemlerin bağılı bulunduğu dağıtım şebekesinde gerilimdeki THD değıerlerinin artmasına neden olmaktadır (Patsalides et al., 2012). Ayrıca, FV sisteminin akımının harmonik spektrumu ve THD değıerleri, düşük güneş ışıınıı durumunda güç kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir (Papaioannou et al., 2009;

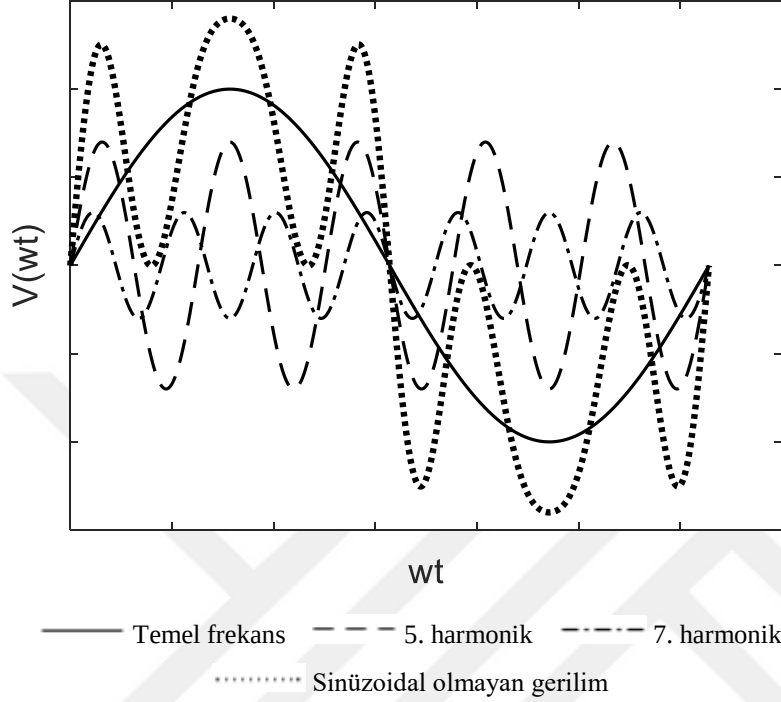
Papaioannou et al., 2011; Luo et al., 2015; Chicco et al., 2009). Literatürde, evirici tabanlı DEÜ sistemlerinin harmonik akım spektrumu, harmonik çalışmalarında iki farklı şekilde ele alınmaktadır. Bunlardan birincisi, FV sistemlerinin harmonik akım spektrumunun güneş ışınlamına dayalı olarak değişiminin göz önünde bulundurulduğu çalışmalardır (Fekete et al., 2012; Hengsritawat et al., 2012; Muthuramalingam and Manoharan, 2014; Sidrach-de-Cardona and Carretero, 2005; Patsalides et al., 2012; Papaioannou et al., 2009; Papaioannou et al., 2011; Luo et al., 2015; Chicco et al., 2009). İkincisi ise, evirici tabanlı DEÜ sistemlerinin harmonik akım spektrumunun güncellenmediği çalışmalardır (Pandi et al., 2013a; Pandi et al., 2013b; Bhowmik et al., 2003; Ghaffarzadeh and Sadeghi, 2016; Abdelsalam and El-Saadany, 2013; HassanzadehFard and Jalilian, 2018; Taher and Bagherpour, 2013; Wang et al., 2018).

Tez çalışmasının bu aşamasında, şebekeye bağlı FV sistemin güç elektroniği ara yüzleri ile birlikte Matlab / Simulink ortamındaki modeli kullanılmıştır (Mahela and Shaik, 2017). Bu modelde, farklı güneş ışınlamı koşullarında maksimum gücün çekilmesini sağlayan MPPT algoritması bulunmaktadır. FV sistemin şebekeye enjekte ettiği akımın harmonik bileşenleri, farklı güneş ışınlamı koşullarında ilgili modelden elde edilmiştir. Buradaki amaç, farklı güneş ışınlamı koşullarında MPPT yönteminde karşılaşılan zorluklar göz önünde bulundurularak, FV sistemin güç elektroniği ara yüzü ile şebekeye enjekte ettiği akımın harmonik bileşenleri ile güneş ışınlamı arasındaki ilişkileri belirlemektir. Güneş ışınlamındaki değişimlere bağlı olarak FV sistemlerin şebekedeki harmonik parametrelere etkileri, FFT yönteminin şebekeye bağlı FV sistem modeline IEC 61000-4-7 ve EN 50160 standartlarına uygun olarak adapte edilmesi ile incelenmiştir (International Electrotechnical Commission, 2009; European Norm 50160, 2010).

2.2 Harmonikler

Dağıtım şebekelerinde ideal şartlarda akım ve gerilimin dalga şekillerinin sinüzoidal olmaları beklenmektedir. Bununla birlikte, şebeke gerilimi sinüzoidal olsa dahi, ark fırınları, güç elektroniği eviricileri gibi doğrusal olmayan yüklerin akımları sinüzoidal olmamaktadır. Gerilimin dalga şeklindeki bozulmalar da, akımın dalga şeklinin sinüzoidal olmamasından etkilenmektedir. Harmonikler, sinüzoidal olmayan gerilim ve akımın temel frekansının tam katı frekanslardaki bileşenleridir. Harmonik bozulmaların görüldüğü akım ve gerilim dalga şekillerinin temel ve harmonik frekanslardaki bileşenleri Fourier serileri

kullanılarak elde edilebilmektedir (Arrillaga et al., 1985). Sinüzoidal olmayan bir gerilim dalga şeklinin temel frekanstaki ve bazı harmonik frekanslardaki bileşenleri Şekil 2.1’de görülmektedir.



Şekil 2.1 Sinüzoidal olmayan gerilimin temel ve harmonik frekanslardaki bileşenleri

2.3 Zamanda Desimasyonlu FFT Yöntemi

Ayrık Fourier dönüşümü (DFT), ayrık zamanlı sinyal işleme algoritmalarının analizi, tasarımı ve uygulamasında önemli bir rol oynamaktadır (Oppenheim, 1999).

$Y(k)$, N - noktalı $y(n)$ dizisinin Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT) ise;

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n)e^{-j2\pi kn/N}, \quad k = 0,1,2,\dots, N-1 \quad (2.1)$$

Buradan, $D_N^{kn} = e^{-j2\pi kn/N}$ dönüşümü yapılarak aşağıdaki ifade yazılabilir;

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n)D_N^{kn}, \quad k = 0,1,2,\dots, N-1 \quad (2.2)$$

Burada;

$$D_N = e^{-j2\pi/N} = \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) \quad (2.3)$$

DFT, eşit aralıklı frekanslarda Fourier dönüşümünün örneklenmesine karşılık gelmektedir. Dolayısıyla, N noktalı DFT'nin hesaplanması, birim çember üzerinde N noktada, N tane eşit aralıklı frekansta ($d_k = 2\pi k / N$) Fourier dönüşümünün N örneğinin hesaplanmasına karşılık gelmektedir.

D_N , N uzunluğunda DFT için sabit bir kompleks katsayıdır. Aynı zamanda, birim çemberin N . dereceden köküdür.

$$D_N^N = 1 \quad (2.4)$$

D_N , periyodiktir. Her bir m tamsayısı için;

$$D_N^n = D_N^{n+mN} \quad (2.5)$$

Örneğin; 8 noktalı DFT için aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$D_8^2 = D_8^{10} = D_8^{18} \quad (2.6)$$

(2.2) no'lu eşitlikte verildiği gibi, her bir $Y(k)$, N kompleks çarpım ve $N-1$ kompleks toplam gerektirir. Bu durumda, N noktalı DFT, N^2 çarpım, $N(N-1)$ toplam gerektirmektedir.

Herhangi bir algoritmanın karmaşıklığını veya verimliliğini değerlendirmek için birçok yöntem kullanılabilmektedir. Bunlardan biri, hesaplama yükünün bir ölçüsü olarak algoritmadaki aritmetik çarpım ve toplam sayısını belirlemektir. Çarpım ve toplam sayısı, hesaplama hızı ile doğru orantılıdır. FFT algoritması, çarpım ve toplam sayısı açısından bakıldığında DFT yöntemine göre daha verimlidir.

Büyük boyutlu DFT hesaplamaları, art arda daha küçük boyutlu DFT hesaplamalarına bölünerek verimlilik sağlanabilmektedir. Bu işlemde, $D_N^{kn} = e^{-j2\pi kn/N}$ ifadesinin simetri ve periyodiklik özellikleri kullanılmaktadır. Bir

$y(n)$ dizisinin sıra ile daha küçük alt dizilere ayrılmasına dayalı algoritmalar, zamanda desimasyonlu algoritmalar olarak isimlendirilmektedir.

$$D_N^{k(N-n)} = D_N^{-kn} = (D_N^{kn})^* \quad (2.7)$$

$$D_N^{kn} = D_N^{k(n+N)} = D_N^{(k+N)n} \quad (2.8)$$

Zamanda desimasyonlu FFT algoritması, dizi uzunluğu N , 2'nin tamsayı kuvveti olarak düşünülerek gerçekleştirilebilmektedir. Bu durumda, N çift bir sayı olduğundan, $y(n)$ dizisi uzunlukları $N/2$ olan iki alt diziye ayrılarak $Y(k)$ hesaplanabilmektedir.

(2.2) no'lu eşitliğe bakıldığında, $y(n)$ dizisi çift ve tek indisli noktalara ayrılarak aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir.

$$Y(k) = \sum_{n(\text{çift})} y(n) D_N^{kn} + \sum_{n(\text{tek})} y(n) D_N^{kn} \quad (2.9)$$

(2.9) no'lu eşitliğe bakıldığında, n değişkeninin çift olduğu durumlar için $n=2r$ ve bu değişkenin tek olduğu durumlar için $n=2r+1$ dönüşümü yapıldığında aşağıdaki eşitlikler elde edilmektedir.

$$Y(k) = \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} y(2r) D_N^{2rk} + \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} y(2r+1) D_N^{(2r+1)k} \quad (2.10)$$

$$Y(k) = \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} y(2r) (D_N^2)^{rk} + D_N^k \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} y(2r+1) (D_N^2)^{rk} \quad (2.11)$$

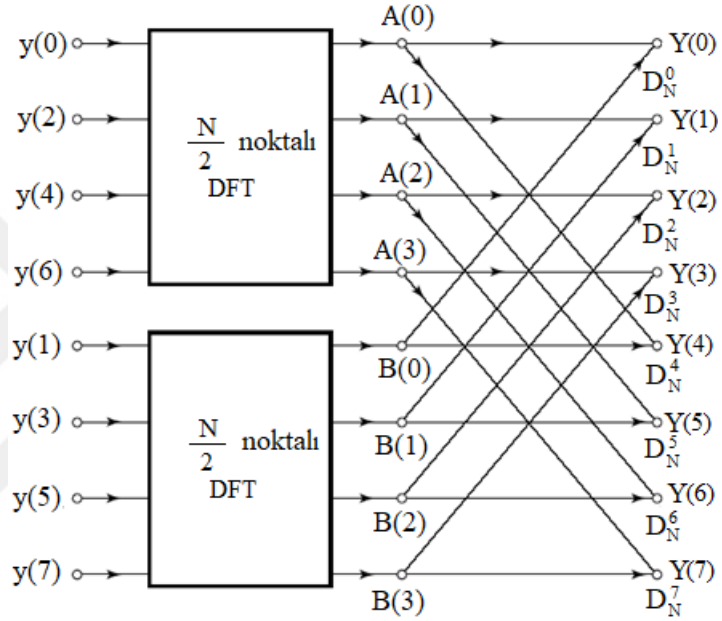
Aşağıda verilen (2.12) no'lu eşitlik kullanılarak (2.11) no'lu eşitlik, (2.13) ve (2.14) no'lu eşitliklerde verildiği gibi yazılabilmektedir.

$$D_N^2 = e^{-j4\pi/N} = e^{-j2\pi/(N/2)} = D_{N/2} \quad (2.12)$$

$$Y(k) = \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} y(2r) D_{N/2}^{rk} + D_N^k \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} y(2r+1) D_{N/2}^{rk} \quad (2.13)$$

$$Y(k) = A(k) + D_N^k B(k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.14)$$

(2.13) no'lu eşitlikteki her bir toplam $N/2$ noktalı DFT değerine karşılık gelmektedir. Birinci toplam, dizinin çift indisli noktalarının $N/2$ noktalı DFT değerine karşılık gelirken, ikinci toplam, dizinin tek indisli noktalarının $N/2$ noktalı DFT değerini vermektedir. (2.14) no'lu eşitlikteki $A(k)$ ve $B(k)$, $N/2$ periyodu ile periyodik olduklarından, k değişkeni N tane değer almasına rağmen, her bir toplam k değişkeninin $[0, (N/2)-1]$ aralığı için hesaplanmaktadır. (2.13) no'lu eşitlikteki iki DFT hesaplandıktan sonra, N noktalı DFT elde etmek için (2.14) no'lu eşitlikteki gibi birleştirilmektedir. Bu hesaplama $N=8$ için Şekil 2.2'de gösterilmektedir (Oppenheim, 1999).



Şekil 2.2 N noktalı DFT hesaplamasını $N/2$ noktalı DFT hesaplamalarına ayırmak için kullanılan zamanda desimasyon yönteminin akış diyagramı (Oppenheim, 1999)

(2.14) no'lu eşitlik, N noktalı hesaplamanın $N/2$ noktalı DFT hesaplamalarına ayrılmasına karşılık gelmektedir. N , 2'nin tamsayı kuvvetine eşit olduğunda, $N/2$ çift olursa, $N/2$ noktalı DFT hesaplamaları $N/4$ noktalı DFT hesaplamalarına ayrıştırılabilir. Bu durumda, (2.14) no'lu eşitlikteki $A(k)$ aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

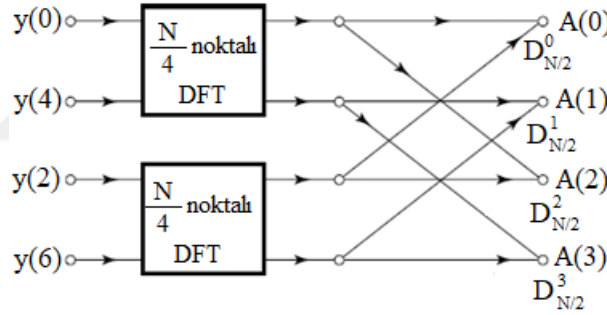
$$A(k) = \sum_{r=0}^{N/2-1} a(r) D_{N/2}^{rk} = \sum_{l=0}^{N/4-1} a(2l) D_{N/2}^{2lk} + \sum_{l=0}^{N/4-1} a(2l+1) D_{N/2}^{(2l+1)k} \quad (2.15)$$

$$A(k) = \sum_{l=0}^{N/4-1} a(2l) D_{N/4}^{lk} + D_{N/2}^k \sum_{l=0}^{N/4-1} a(2l+1) D_{N/4}^{lk} \quad (2.16)$$

Benzer şekilde, $B(k)$ aşağıdaki gibi yazılabilmektedir.

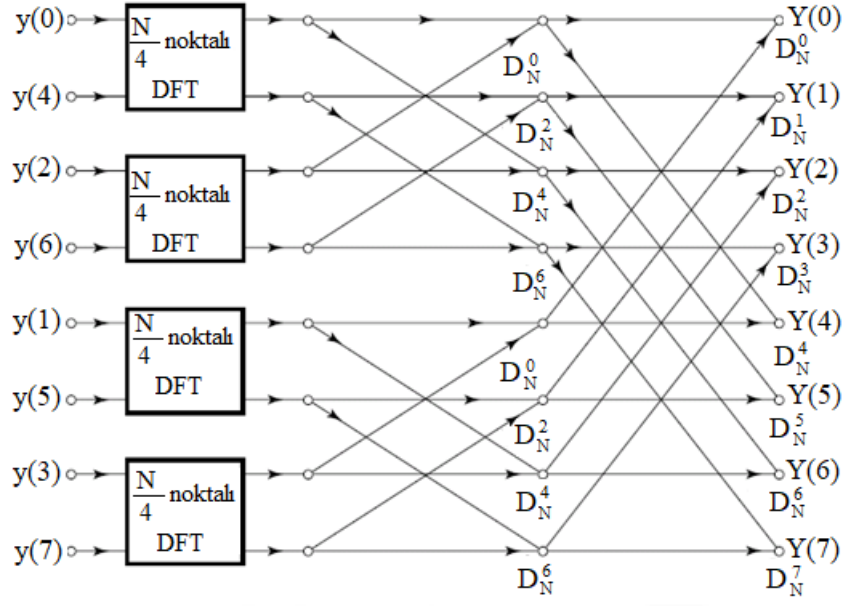
$$B(k) = \sum_{l=0}^{\frac{N}{4}-1} b(2l) D_{N/4}^{lk} + D_{N/2}^k \sum_{l=0}^{\frac{N}{4}-1} b(2l+1) D_{N/4}^{lk} \quad (2.17)$$

Dolayısıyla, $N/2$ noktalı DFT $A(k)$, $a(2l)$ ve $a(2l+1)$ dizilerinin $N/4$ noktalı DFT'leri birleştirilerek elde edilmektedir. Benzer şekilde, $N/2$ noktalı DFT $B(k)$, $b(2l)$ ve $b(2l+1)$ dizilerinin $N/4$ noktalı DFT'leri birleştirilerek elde edilebilmektedir. Bu nedenle, Şekil 2.2'deki 4 noktalı DFT'ler (2.16) ve (2.17) no'lu eşitliklere göre hesaplanırsa, bu hesaplama Şekil 2.3'te gösterildiği gibi olmaktadır. Şekil 2.3'teki hesaplama, Şekil 2.2'deki akış diyagramına eklendiğinde, Şekil 2.4'teki akış diyagramı elde edilmektedir. Şekil 2.4'te, $D_{N/2}^2 = D_N^2$ eşitliği kullanılarak, katsayılar, $D_{N/2}$ ifadesinin kuvvetleri yerine, D_N ifadesinin kuvvetleri cinsinden yazılmaktadır.

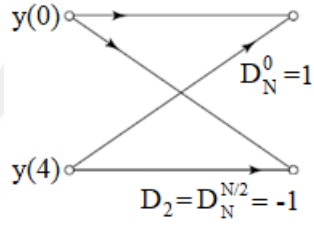


Şekil 2.3 $N/2$ noktalı DFT hesaplamasını $N/4$ noktalı DFT hesaplamalarına ayırmak için kullanılan zamanda desimasyon yönteminin akış diyagramı (Oppenheim, 1999)

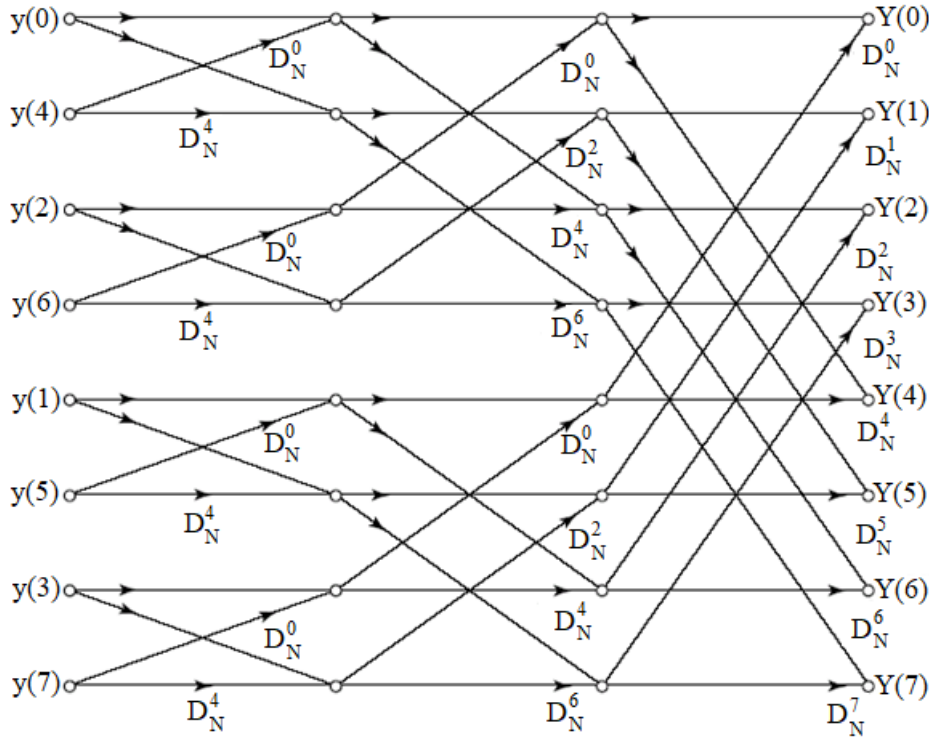
Şekil 2.4'te görüldüğü üzere, 8 noktalı DFT hesaplaması, 2 noktalı DFT'lerin hesaplanmasına indirgenmektedir. $y(0)$ ve $y(4)$ dizisinin 2 noktalı DFT hesaplaması, Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Şekil 2.5'teki hesaplamanın Şekil 2.4'teki akış diyagramına eklenmesiyle, 8 noktalı DFT'nin hesaplanması için tam akış diyagramı Şekil 2.6'daki gibi verilmektedir. Şekil 2.6'da verilen akış diyagramına göre, zamanda desimasyonlu FFT yöntemini gerçekleştirmek için gerekli kompleks çarpım ve toplama işlemlerinin sayısı $N \log_2 N$ olmaktadır.



Şekil 2.4 Şekil 2.3'teki DFT hesaplamasının Şekil 2.2'deki akış diyagramına eklenmesiyle oluşturulan yapı (Oppenheim, 1999)



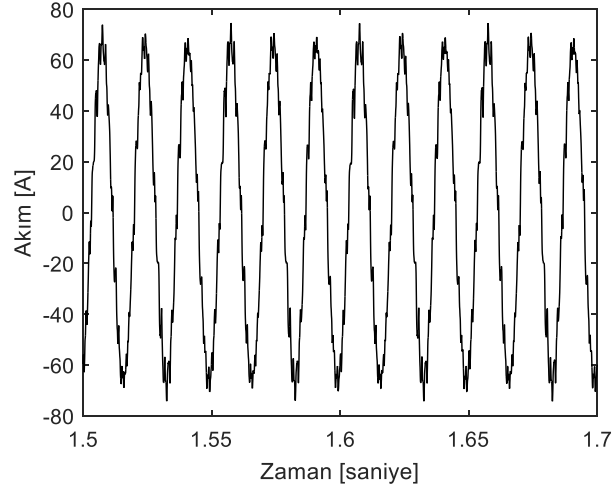
Şekil 2.5 2 noktalı DFT akış diyagramı (Oppenheim, 1999)



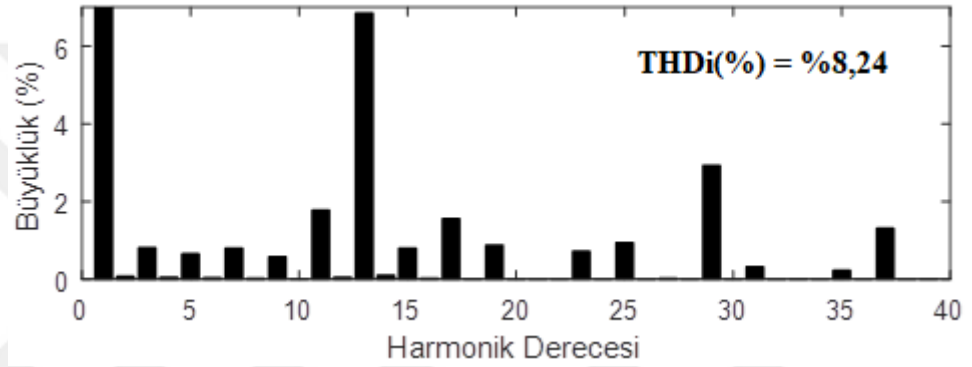
Şekil 2.6 8 noktalı DFT hesaplaması (Oppenheim, 1999)

Bu çalışmada, Zamanda Desimasyonlu Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) yöntemi, şebekeye bağlı FV sistem modeline IEC 61000-4-7 ve EN 50160 standartlarına uygun olarak adapte edilerek, güneş ışınımındaki değişimlere bağlı olarak FV sistemin şebekedeki harmonik parametrelere etkilerini incelemek için kullanılmaktadır.

EN 50160 standardına göre; maksimum harmonik derecesi 40 olmaktadır (European Norm 50160, 2010). IEC 61000-4-7 standardına göre; harmonik spektrumu elde edilecek sinyalin temel frekansı 50 Hz ise, 10 periyot (200 ms) ölçüm alınarak harmonik spektrum hesaplanmalıdır. Harmonik spektrumu elde edilecek sinyalin temel frekansı 60 Hz ise, 12 periyot (200 ms) ölçüm alınarak harmonik spektrum hesaplanmalıdır (International Electrotechnical Commission, 2009). Bu çalışmada, şebekeye bağlı FV sistem modelinden herhangi bir güneş ışınımında elde edilen temel frekansı 60 Hz olan bir akım sinyali ve harmonik spektrumu Şekil 2.7’de verilmektedir.



(a)



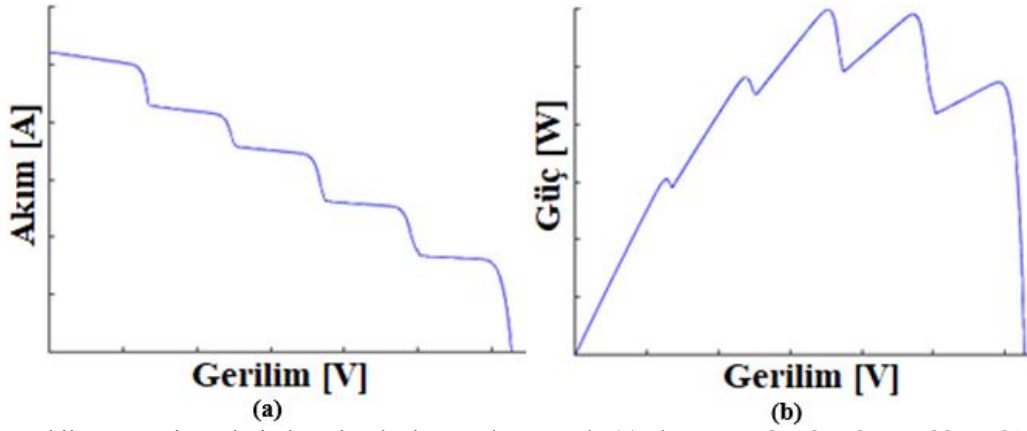
(b)

Şekil 2.7 (a) Akım sinyali, (b) harmonik spektrumu

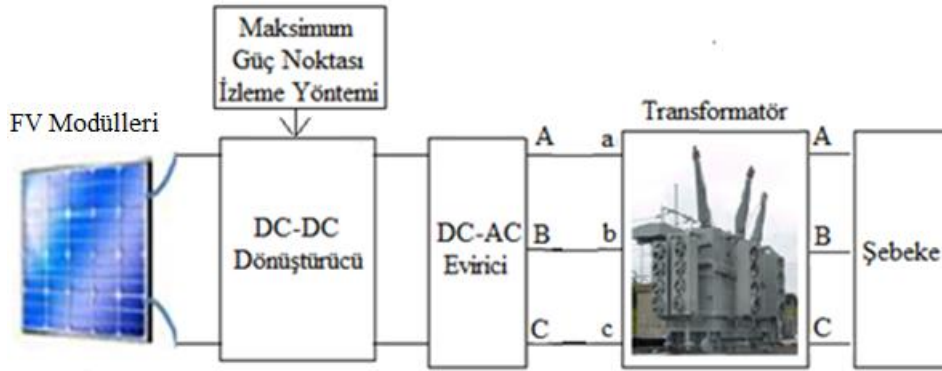
2.4 FV Sistemlerde Güneş Işınımının Şebekedeki Harmonik Parametrelere Etkileri

FV sistemlerin akım – gerilim ve güç – gerilim karakteristikleri, kısmi gölgelenme durumlarında, Şekil 2.8’de görüldüğü gibi ciddi değişikliklere uğramaktadır. Kısmi gölgelenme durumu, FV sistemin çıkış gücünün düşmesine neden olmaktadır. Maksimum güç noktası izleme (maximum power point tracking) yöntemi, bu gibi ışınım koşullarının değiştiği durumlarda şebekeye bağlı FV sistemden maksimum gücün çekilmesinde önemli rol oynamaktadır. Ancak fotovoltaik sistemlerin güç üretimi, güneş ışınımındaki değişimlerden dolayı kesikli (intermittent) yapıda olmaktadır. FV sisteminin çalışma noktası, güneş ışınımındaki ani değişimler, kısmi gölgelenme vb. durumlarda değişmektedir. FV sistemlerin çıkış gücündeki değişimlerden dolayı, FV sistemlerinin ürettiği harmonikler de değişmektedir (Chicco et al., 2009; Luo et al., 2015). Bu çalışmada, zamanda desimasyonlu FFT yönteminin adapte edildiği

Matlab/Simulink ortamındaki şebekeye bağlı üç fazlı 400 kW FV sisteminin blok diyagramı Şekil 2.9’da verilmektedir.

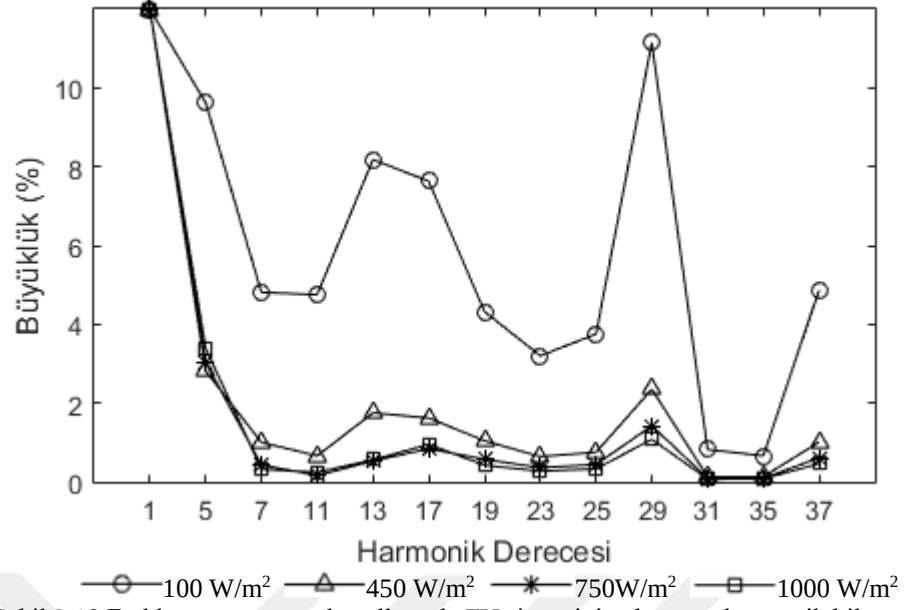


Şekil 2.8 FV sistemlerin kısmi gölgelenme durumunda (a) akım – gerilim karakteristikleri, (b) güç – gerilim karakteristikleri

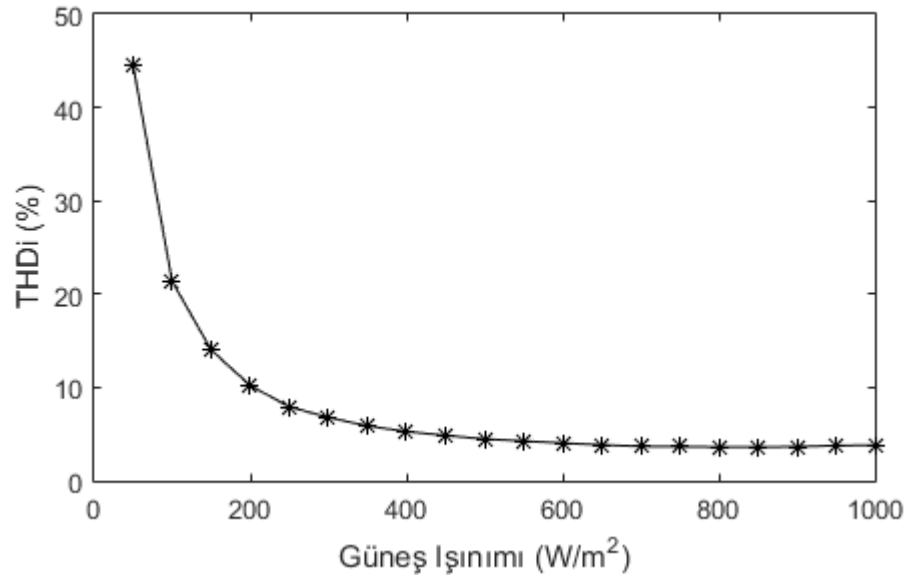


Şekil 2.9 Zamanda desimasyonlu FFT yönteminin adapte edildiği Matlab/Simulink ortamındaki şebekeye bağlı FV sistemin blok diyagramı

Şekil 2.9’da verilen şebekeye bağlı FV sistem modelinde, fotovoltaik sistemin güç elektroniği ara yüzleri, transformatör ve farklı güneş ışınımı koşullarında maksimum gücün çekilmesini sağlayan maksimum güç noktası izleme (maximum power point tracking (MPPT)) algoritması bulunmaktadır (Mahela and Shaik, 2017). Bu çalışmada, farklı güneş ışınımlarında şebekeye bağlı FV sistemin akımının harmonik spektrumları Şekil 2.10’da verilmektedir. FV sisteminin akımının toplam harmonik bozulma (THD) değerinin güneş ışınımına bağlı değişimi Şekil 2.11’de verilmektedir.



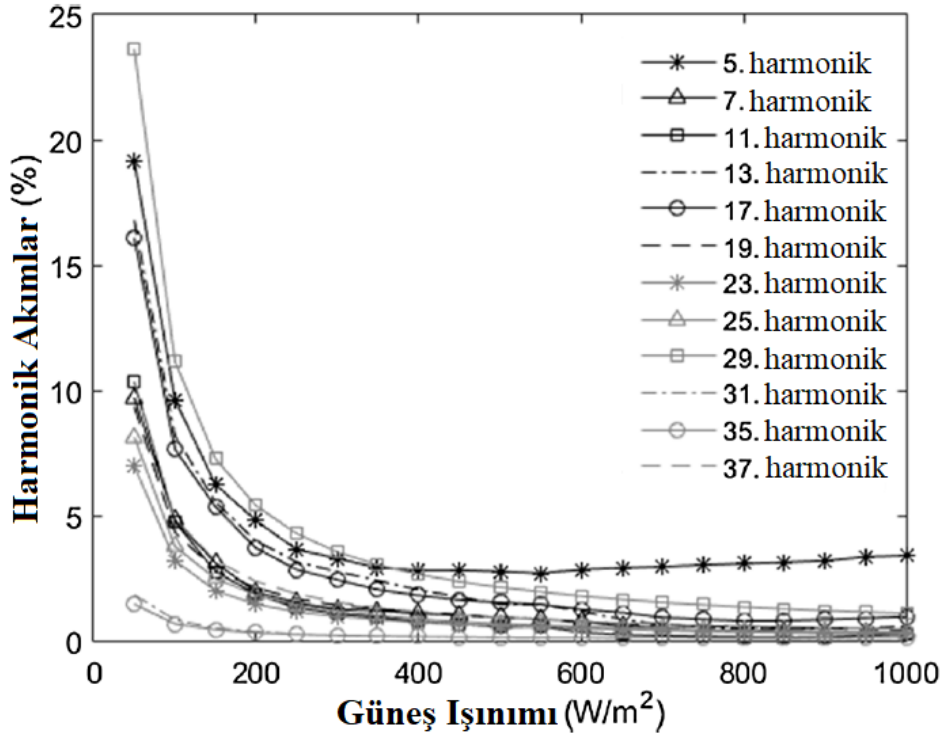
Şekil 2.10 Farklı güneş ışınlımlı koşullarında FV sisteminin akımının harmonik bileşenleri



Şekil 2.11 FV sisteminin akımının THD değerinin güneş ışınlımlına bağlı değişimi

Şekil 2.10'da verilen harmonik parametrelere bakıldığında, şebekeye bağlı FV sistemin harmonik akımlarının farklı ışınlımlı koşullarında değiştiği anlaşılmaktadır. Güneş ışınlımlıdaki ani değişimler, FV sisteminin çalışma noktasını değiştirmektedir. Bu durum, FV sistemin şebeke akımının harmonik spektrumunun yüzdelik değerlerine yansımaktadır. Bu yüzdelik değerleri, düşük güneş ışınlımlı durumunda yükselmektedir. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi, harmonik

akım yüzdelik değerlerinin düşük güneş ışınımında yükselmeleri, akımdaki THD değerlerinin de artmasına yol açmaktadır. Bu koşullarda, IEEE 519 standartlarında belirtilmiş olan % 5 değerindeki maksimum THD limiti ihlal edilmektedir (IEEE Standards Association, 2014). Bununla birlikte, FV sisteminin şebeke akımının THD değeri, bu tez çalışmasında güneş ışınımı 1000 W/m² iken standartlarda belirtilmiş olan limit ile uyumlu olup, harmonikler açısından sorun teşkil etmemektedir. FV sisteminin farklı harmonik frekanslarındaki akım yüzdeliklerinin güneş ışınımına bağlı değişimi Şekil 2.12’de verilmektedir.



Şekil 2.12 FV sisteminin harmonik akımlarının yüzdeliklerinin güneş ışınımına bağlı değişimleri

Şekil 2.12’de görüldüğü üzere, harmonik akımlarının yüzdelik değerleri, güneş ışınımının azalması durumunda yükselmektedir. Harmonik akımlar, FV sisteminin çıkış gücüne büyük ölçüde bağlılık göstermektedir. FV sistemin çıkış gücü arttıkça, temel frekans akım değeri arttığından dolayı harmonik akımların yüzdelik değerleri azalmaktadır. FV sistemin çıkış gücü nominal değerinin altında olduğunda harmonik bozulmalar yükselmektedir. Bu tez çalışmasında, harmonik akım yüzdelik değerleri, FV anma gücü için IEC 61727 standartlarında belirtilen % 5 limit değerlerinin altındadır (International Electrotechnical Commission, 1995).

2.5 Sonuçlar

Tez çalışmasının bu aşamasında, şebekeye bağlı fotovoltaik sistemin güç elektroniki ara yüzleri ile birlikte Matlab/Simulink ortamındaki modeli kullanılmıştır. Bu modelde, farklı güneş ışınımı koşullarında maksimum gücün çekilmesini sağlayan MPPT algoritması bulunmaktadır. FV sistemin şebekeye enjekte ettiği akımın harmonik bileşenleri, farklı güneş ışınımı koşullarında ilgili modelden elde edilmiştir. Güneş ışınımındaki değişimlere bağlı olarak FV sistemlerin şebekedeki harmonik parametrelere etkileri, Zamanda Desimasyonlu FFT yönteminin şebekeye bağlı FV sistem modeline IEC 61000-4-7, IEC 61727 ve EN 50160 standartlarına uygun olarak adapte edilmesi ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, güneş ışınımındaki ani değişimler, FV sisteminin çalışma noktalarını değiştirmektedir. Bu durum, FV sisteminin akım harmoniklerine, akımdaki toplam harmonik bozulma değerlerine yansımaktadır. Güneş ışınımının düşük olduğu durumlarda, toplam harmonik bozulma değerleri daha yüksek olmaktadır. Harmonik akımlar, FV sisteminin çıkış gücüne büyük ölçüde bağlılık göstermektedir. FV sistemin gücü arttığa, temel frekans akım değeri arttığından dolayı, harmonik akımları azalmaktadır. FV sistemin çıkış gücü nominal gücün altında olduğunda harmonik bozulmalar yükselmektedir.

3. OPTİMAL FV KATILIM ORANININ HARMONİK LİMİTLERİ DAHİLİNDE OLASILIKSAL YÖNTEM İLE BELİRLENMESİ

Bu bölümde, dengesiz üç fazlı aktif dağıtım şebekesinde FV sistemlerin optimal katılım oranı harmonik parametreleri göz önünde bulundurularak olasılıksal optimizasyon yöntemi ile belirlenmiştir.

Bu bölümün alt başlıkları şu şekildedir: Bölüm 3.1’de, yapılan çalışmalar ile ilgili giriş açıklamaları yapılmıştır. Bölüm 3.2’de, döngü referans yapısına bağlı üç fazlı harmonik güç akışı yöntemi anlatılmıştır. Bölüm 3.3’te, dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesinin uzun dönemdeki yük profilinin ve güneş ışınlamındaki değişimlerden dolayı FV sistemlerin çıkış güçlerinin belirsizliğinin modellenmesi hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 3.4’te, Interior Point (IP) yönteminin Monte Carlo Simulasyonu ile bağlantılı olarak optimizasyon problemini çözmek için uygulanması anlatılmıştır. Bölüm 3.5’te ise, çalışmada gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bölüm 3.6’da, yapılan çalışmalardan edinilen genel sonuçlar anlatılmıştır.

3.1 Giriş

Tez çalışmasının bu bölümünde, harmonik bozulmaların bulunduğu dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesinde, fotovoltaik sistemlerin optimal katılım oranlarını belirlemek için olasılıksal (probabilistic) bir yöntem önerilmektedir. Interior Point (IP) yöntemi, Monte Carlo Simulasyonu ile bağlantılı olarak optimizasyon problemini çözmek için uygulanmaktadır. Önerilen yöntem, FV sistemin şebekeye enjekte ettiği akımın harmonik spektrumunun güneş ışınlamına bağlı değişimine dayalıdır. Harmonik parametreleri, doğrusal olmayan yüklerin ve FV sistemlerin bulunduğu dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesinde, döngü referans yapısına dayalı üç fazlı harmonik güç akışı yöntemi (loop frame of reference based three phase harmonic power flow method) kullanılarak belirlenmektedir. Güç kalitesinin sürekliliği ve güvenilirliği açısından, efektif gerilim (RMS voltage) değerlerinin, tekil harmonik gerilim bozulma (individual harmonic voltage distortion) değerlerinin ve toplam harmonik gerilim bozulma (total harmonic voltage distortion) değerlerinin belirli sınırlarda olması beklenildiğinden, harmonik güç akışı analizinden elde edilen sonuçları istenilen aralıkta tutmak için şebekeye bağlanan fotovoltaik sistemlerin çıkış güçlerinin planlanması ve fotovoltaik sistemlerin şebekedeki optimal katılım oranlarının belirlenmesi güncel bir araştırma konusudur. Bu kapsamda, dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesinin uzun dönemdeki yük profili ve güneş ışınlamındaki

değişimlerden dolayı fotovoltaik sistemlerin çıkış güçlerinin belirsizliği düşünülerek ve harmonik kısıtları göz önüne alınarak bu kaynakların dengesiz üç fazlı dağıtım sistemindeki güç talebini karşılamadaki optimal katılım oranlarını belirlemek için gerekli çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

3.2 Dengesiz Üç Fazlı Harmonik Güç Akışı

Güç akışı analizi, bir güç sisteminin planlama, tasarım ve çalışma aşamalarında önemli ve temel bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır. Güç şebekesinin kararlı durum davranışının belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bir güç akışı yöntemi, dağıtım sisteminin özelliklerini yeterince detaylı olarak modelleyebilmelidir.

Dağıtım sistemlerinin dengesiz yapılarından dolayı, bu sistemlerin dengeli üç fazlı olduğu varsayılarak tek faz eşdeğer sistemde gerçekleştirilen güç akışı algoritmaları yeterli olmamaktadır. Dağıtım şebekesinde güç akışı çalışmasının doğru yapılabilmesi için, bu şebekenin mümkün olan en doğru şekilde modellenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, güç akışı algoritmasında dağıtım sisteminin ana bileşenlerinin üç fazlı modelleri kullanılmalıdır.

Günümüzde, güç sistemlerinde doğrusal olmayan yüklerin kullanımı gittikçe artmaktadır. Bununla birlikte, doğrusal olmayan yükler, AA gerilim ve akım dalga şekillerini bozan harmonikleri üretmektedir. Harmonikler, sistemde güç kayıplarına, haberleşme parazitlerine, cihazların yaşam ömrünün azalmasına ve rezonans risklerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, harmonik güç akışı analizi, şebekedeki harmonik bozulma seviyelerinin belirlenmesine olanak sağladığından güç sisteminin analizi ve tasarımı açısından önemlidir. Dağıtım sistemlerinin dengeli olmayan özelliklerinden dolayı, bütün bileşenlerin detaylı üç fazlı modellerinin göz önünde bulundurulduğu harmonik güç akışı analizi gereklidir.

Bu bölümde, döngü referans yapısına dayalı üç faz harmonik güç akışı analizi yöntemi anlatılmaktadır (Yang and Le, 2016). Bu yöntem, temel frekansta ve harmonik frekanslarda ayrı ayrı uygulanmaktadır. Yöntem, aşağıdaki alt bölümlerde detaylı olarak anlatılmaktadır.

3.2.1 Temel frekans güç akışı analizi

Grafik teorisine göre, K ile gösterilen branş-yol etki matrisi (branch-path incidence matrix), düzlemsel bir grafikte branşların yollara etkilerini temsil etmektedir. Bir yol, bir düğümden referans düğümüne yönlendirilmektedir. Branş-yol etki matrisinin elemanları aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$K_{ij} = 1 \Rightarrow$ eğer i . branş j . düğümden referans düğümüne doğru olan yol üzerinde ve bu yol ile aynı yönde ise,

$K_{ij} = -1 \Rightarrow$ eğer i . branş j . düğümden referans düğümüne doğru olan yola ait ve bu yol ile zıt yönde ise,

$K_{ij} = 0 \Rightarrow$ eğer i . branş j . düğümden referans düğümüne doğru olan yol üzerinde değil ise,

Güç akışı çalışmalarında, gerilim büyüklüğü ve faz açısının önceden belirlenmiş olduğu salınım barası referans alınmaktadır. Diğer baraların gerilimleri ise, iteratif olarak hesaplanmaktadır. Eşdeğer π modeli, empedans değerleri Carson denklemleri ile belirlenen üç fazlı hatları temsil etmektedir (Kersting, 2012). Üç fazlı hat empedansları, aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$[Z_{hat}^{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Hatların temel (primitive) empedans matrisi Z_p^{abc} , üç fazlı hat empedansları kullanılarak hesaplanabilmektedir. Dağıtım şebekesinin bara empedans matrisi, (3.2) no'lu eşitlikte verildiği gibi elde edilmektedir.

$$[Z_{Bara}^{abc}] = [K]^t [Z_p^{abc}] [K] \quad (3.2)$$

Bara enjeksiyon akımı ve bara gerilimi vektörleri, sırasıyla (3.3) ve (3.4) no'lu eşitliklerde verilmektedir.

$$[I_{Bara}^{abc}] = [[I_2^{abc}]^t \ [I_3^{abc}]^t \ \dots \ [I_i^{abc}]^t \ \dots \ [I_{Nbara}^{abc}]^t]^t \quad (3.3)$$

$$[V_{Bara}^{abc}] = [[V_2^{abc}]^t \quad [V_3^{abc}]^t \quad \dots \quad [V_i^{abc}]^t \quad \dots \quad [V_{Nbara}^{abc}]^t]^t \quad (3.4)$$

Burada;

$$[I_i^{abc}] = [I_i^a \quad I_i^b \quad I_i^c]^t \quad (3.5)$$

$$[V_i^{abc}] = [V_i^a \quad V_i^b \quad V_i^c]^t \quad (3.6)$$

Burada, I_{Bara}^{abc} bara enjeksiyon akımı vektörünü, V_{Bara}^{abc} bara gerilimi vektörünü, I_i^{abc} i. baranın her bir fazındaki bara enjeksiyon akımını, V_i^{abc} i. baranın her bir fazındaki bara gerilimini, $Nbara$, dağıtım şebekesindeki bara sayısını temsil etmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan güç akışı analizi yöntemine göre, yükler ve FV sistemler bara enjeksiyon akımları olarak modellenabilmektedir. Net enjeksiyon akımları, her bir baranın her bir fazı için hesaplanabilmektedir. Akım enjeksiyonları, bara gerilimleri kullanılarak belirlenebilmektedir. Bu nedenle, akım enjeksiyon vektörü güç akışı algoritmasının her bir iterasyonunda güncellenmektedir. Örneğin, k . iterasyonda i . yük barasının her bir fazındaki bara enjeksiyon akımı (3.7) no'lu eşitlikte verildiği gibi olmaktadır.

$$I_i^{abc,k} = \left(\frac{P_{D,i}^{abc} + jQ_{D,i}^{abc}}{V_i^{abc,k}} \right)^* \quad (3.7)$$

Referans barası gerilim vektörü, (3.8) no'lu eşitlikte verilmektedir.

$$[V_{ref,Bara}^{abc}] = [[V_{ref,2}^{abc}]^t \quad [V_{ref,3}^{abc}]^t \quad \dots \quad [V_{ref,i}^{abc}]^t \quad \dots \quad [V_{ref,Nbara}^{abc}]^t]^t \quad (3.8)$$

Burada;

$$[V_{ref,i}^{abc}] = [V_{ref,i}^a \quad V_{ref,i}^b \quad V_{ref,i}^c]^t \quad (3.9)$$

Temel frekansta üç fazlı güç akışı analizi problemini çözmek için gerekli denklemler (3.10) no'lu eşitlikte verilmektedir.

$$[V_{Bara}^{abc,k}] = [V_{ref,Bara}^{abc}] + [Z_{Bara}^{abc}][I_{Bara}^{abc,k}] \quad (3.10)$$

Güç akışı analizi yönteminin k . iterasyonunda şebekenin i . barasının geriliminin değişimi (3.11) no'lu eşitlik kullanılarak belirlenebilmektedir.

$$[\Delta V_i^{abc,k}] = [V_i^{abc,k+1}] - [V_i^{abc,k}] \quad (3.11)$$

Temel frekans güç akışı analizinin iterasyon işlemleri, k . iterasyonda bara gerilimlerinin değişimleri önceden belirlenmiş toleransın altına düşene kadar devam etmektedir. İterasyon durdurma kriterleri, (3.12) ve (3.13) no'lu eşitliklerde verilmektedir.

$$|\operatorname{Re}([\Delta V_i^{abc,k}])| \leq \varepsilon_1 \quad (3.12)$$

$$|\operatorname{Im}([\Delta V_i^{abc,k}])| \leq \varepsilon_2 \quad (3.13)$$

3.2.2 Harmonik frekans güç akışı analizi

Bu tez çalışmasında kullanılan harmonik güç akışı analizi yöntemine göre, hat empedanslarının modeli (3.14) no'lu eşitlikte verilmektedir.

$$[Z_{hat}^{abc,h}] = [R_{hat}^{abc}] + j h [X_{hat}^{abc}] \quad (3.14)$$

Bara empedans matrisinin h . harmonik frekansındaki modeli, (3.15) no'lu eşitlikte verildiği gibi oluşturulmaktadır.

$$[Z_{Bara}^{abc,h}] = [K]^t [Z_p^{abc,h}] [K] \quad (3.15)$$

Üç fazlı harmonik güç akışı problemini çözmek için gerekli denklemler (3.16) no'lu eşitlikte verilmektedir.

$$[V_{Bara}^{abc,h}] = [Z_{Bara}^{abc,h}] [I_{Bara}^{abc,h}] \quad (3.16)$$

Harmonik frekanslardaki bara enjeksiyon akımları vektörü, doğrusal olmayan yüklerin ve FV sistemlerin harmonik akımlarından ($I_{NLD}^{abc,h}$) ve doğrusal yüklerin akımlarından ($I_{LD}^{abc,h}$) oluşmaktadır.

$$[I_{Bara}^{abc,h}] = [I_{NLD}^{abc,h}] + [I_{LD}^{abc,h}] \quad (3.17)$$

Şebekenin i . barasındaki harmonik akım enjeksiyonu ($I_{NLD,i}^{abc,h}$), (3.18) no'lu eşitlikte verildiği gibi belirlenmektedir.

$$I_{NLD,i}^{abc,h} = I_{PV,i}^{abc,g,h} + I_{NLL,i}^{abc,h} \quad (3.18)$$

Burada;

$$I_{PV,i}^{abc,g,h} = C_{PV}(g,h) I_{PV,i}^{abc,g,1} \quad (3.19)$$

$$I_{NLL,i}^{abc,h} = C_{NLL}(h) I_{NLL,i}^{abc,1} \quad (3.20)$$

Burada, $I_{PV,i}^{abc,g,h}$ şebekenin i . barasındaki FV sistemin g değerindeki güneş ışınımına karşılık gelen h . harmonik frekansındaki akım enjeksiyonunu, $I_{NLL,i}^{abc,h}$ i . baradaki doğrusal olmayan yükün h . harmonik frekansındaki akım enjeksiyonunu, $C_{PV}(g,h)$ FV sistemin g değerindeki güneş ışınımına karşılık gelen harmonik akım spektrumunu, $C_{NLL}(h)$ doğrusal olmayan yükün harmonik akım spektrumunu, $I_{PV,i}^{abc,g,1}$ şebekenin i . barasındaki FV sistemin g değerindeki güneş ışınımına karşılık gelen temel frekans akım enjeksiyonunu, $I_{NLL,i}^{abc,1}$ i . baradaki doğrusal olmayan yükün temel frekans akım enjeksiyonunu temsil etmektedir.

(3.16) ve (3.17) no'lu eşitlikler kullanılarak (3.21) no'lu eşitlik aşağıda verildiği gibi elde edilebilmektedir.

$$[V_{Bara}^{abc,h}] = [Z_{Bara}^{abc,h}]([I_{NLD}^{abc,h}] + [I_{LD}^{abc,h}]) \quad (3.21)$$

Doğrusal yüklerin harmonik bulundurmayan akım vektörü (3.22) no'lu eşitlikte verildiği gibi belirlenebilmektedir.

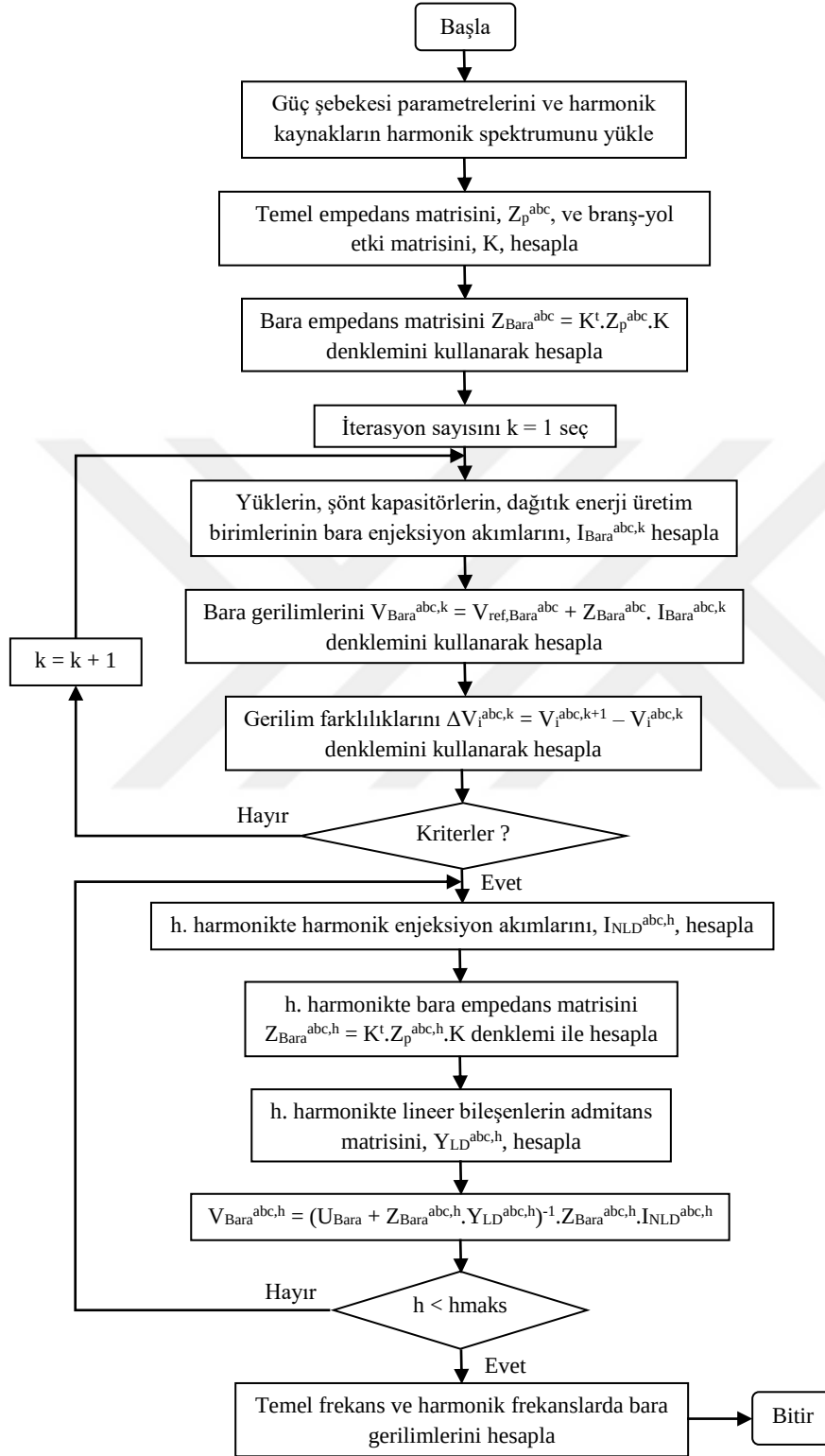
$$[I_{LD}^{abc,h}] = -[Y_{LD}^{abc,h}][V_{Bara}^{abc,h}] \quad (3.22)$$

Burada, $Y_{LD}^{abc,h}$ doğrusal yüklerin h . harmonik frekansındaki admitans matrisini temsil etmektedir. (3.21) ve (3.22) no'lu eşitlikler göz önünde bulundurularak (3.23) no'lu eşitlik aşağıda gösterildiği gibi belirlenebilmektedir.

$$[V_{Bara}^{abc,h}] = ([U_{Bara}] + [Z_{Bara}^{abc,h}][Y_{LD}^{abc,h}])^{-1}[Z_{Bara}^{abc,h}][I_{NLD}^{abc,h}] \quad (3.23)$$

Burada, U_{Bara} birim matrisi temsil etmektedir.

Bu tez çalışmasında kullanılan üç fazlı harmonik güç akışı algoritmasının akış diyagramı Şekil 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3.1 Üç fazlı harmonik güç akışı algoritmasının akış diyagramı

3.3 Güneş Işınımının ve Yük Profiline Modellenmesi

Bu çalışmada, Monte Carlo Simulasyonu, dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesinin uzun dönemdeki yük profili ve fotovoltaik sistemlerdeki güneş ışınımı göz önünde bulundurularak optimal FV katılım oranının belirlenmesi için kullanılmaktadır.

Çalışmada, güneş ışınımının düzgün dağılımlı olduğu düşünülmektedir (Pukhrem et al., 2018). Bu durumda, dağıtım şebekesinin her bir barasındaki FV sistemlere gelen güneş ışınımı değerleri, rassal değer üretim yöntemi ile (3.24) no'lu eşitlikte verildiği gibi Matlab ortamında üretilmektedir.

$$G_i = G_{i,\min} + (G_{i,\max} - G_{i,\min}) \cdot \text{random}(g) \quad (3.24)$$

Burada, $G_{i,\min}$ planlama süre zarfında şebekenin i . barasındaki FV sisteme düşen minimum güneş ışınımını, $G_{i,\max}$ planlama süre zarfında şebekenin i . barasındaki FV sisteme düşen maksimum güneş ışınımını, G_i planlama süre zarfında şebekenin i . barasındaki FV sisteme düşen güneş ışınımını, g güneş ışınımı durumlarını içeren rassal vektörün uzunluğunu temsil etmektedir. Bu çalışmada, $G_{i,\min}$ değeri 100 W/m^2 ve $G_{i,\max}$ değeri 1000 W/m^2 olarak alınmıştır.

FV sistemlerin çıkış gücü güneş ışınımına bağlıdır ve aşağıdaki eşitlikte verildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$P_{FV} = P_{FV,anma} \cdot G_i / 1000 \quad (3.25)$$

Burada, P_{FV} , FV sistemlerin çıkış gücünü, $P_{FV,anma}$, $G_i = 1000 \text{ W/m}^2$ durumundaki FV sistemlerin anma gücünü temsil etmektedir.

Bu çalışmada, uzun dönemdeki yük profilleri optimizasyon yapısında kullanılmaktadır. Yük profilinin normal dağılımlı olduğu göz önünde bulundurulmaktadır (Hengsritawat et al., 2012). Yükler, dağıtım sisteminin orijinal yükünün rassal olarak üretilen yük profilinin ortalaması olarak seçilmesiyle modellenmektedir. Yük profili, rassal değer üretim yöntemi ile üretilmektedir. Dağıtım sisteminin her bir barasındaki yük ve toplam yükü, sırasıyla (3.26) ve (3.27) no'lu eşitliklerde verilmektedir.

$$P_{D,i} = \bar{P}_{D,i} \pm \bar{P}_{D,i} \cdot \alpha \cdot \text{random}(z) \quad (3.26)$$

$$P_{D,Toplam} = \sum_{i=1}^{N_{bara}} P_{D,i} \quad (3.27)$$

Burada, α sapma faktörünü, z yük durumlarını içeren rassal vektörün uzunluğunu, N_{bara} güç şebekesindeki baraların sayısını, $P_{D,i}$ şebekenin i . barasında rassal olarak üretilen aktif yükün gücünü, $\bar{P}_{D,i}$ şebekenin i . barasındaki yükün ortalama değerini temsil etmektedir. Bu çalışmada, sapma faktörü % 10 olarak seçilmiştir. Yüklerin standart sapmaları, ortalama değerlerinin bu sapma faktörü ile çarpılması sonucu elde edilmektedir.

3.4 Optimizasyon Yapısı

Bu çalışmada, güç kalitesinin sürekliliği ve güvenilirliği açısından, RMS gerilim değerlerinin, gerilimdeki tekil harmonik bozulma değerlerinin ve gerilimdeki toplam harmonik bozulma değerlerinin belirli sınırlarda olması beklenildiğinden dolayı, harmonik güç akışı analizinden elde edilen sonuçları istenilen aralıkta tutmak için dağıtım şebekesine bağlanan FV sistemlerin çıkış güçlerini planlayarak şebekedeki optimal katılım oranlarını belirlemek için IP yöntemi (Alam et al., 2016; Martins et al., 2014) kullanılmıştır. Çalışmada, harmonik parametreleri göz önünde bulundurularak dağıtım şebekelerinin önceden belirlenmiş olan baralarında FV sistemlerinin optimal çıkış güçleri belirlenmiştir.

Dağıtım şebekelerinde harmonik parametreleri göz önünde bulundurularak optimal FV sistem katılım oranlarını belirlemek için Monte Carlo Simulasyonu IP yöntemi ile birlikte kullanılmıştır.

Amaç, dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinin yük profillerinin belirsizliği ve güneş ışınımındaki değişimlerden dolayı FV sistemlerinin çıkış güçlerinin değişkenliği göz önünde bulundurularak, şebekedeki harmonik parametreleri limitler dahilinde tutulup, FV sistemlerinin çıkış güçlerinin planlanması ve optimal katılım oranlarının maksimize edilmesidir. Amaç fonksiyonu, aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$KO(\%) = \frac{\sum_{p=1}^3 \sum_{i=1}^n P_{FV,i}^p}{P_{D,Toplam}} \times 100 \quad p \in a, b, c \quad (3.28)$$

Burada, $KO(\%)$ FV sistemlerinin toplam katılım oranını, $P_{FV,i}^p$ şebekenin i . barasının her bir fazındaki FV sistemin aktif güç üretimini, $P_{D,Toplam}$ dağıtım sisteminin toplam yükünün aktif gücünü, n FV sistemlerin şebekede bağlandığı toplam aday bara sayısını temsil etmektedir. Gerilimdeki tekil ve toplam harmonik bozulma limitleri, IEEE 519-2014 standartlarında belirtilmektedir (IEEE Standards Association, 2014). Üç fazlı harmonik güç akışı analizinden elde edilen harmonik parametreleri, optimizasyon yapısına eşitsizlik kısıtları olarak dahil edilmiştir. Harmonik kısıtları aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$THDV_i^p (\%) \leq THDV_{maks,i}^p (\%) \quad p \in a, b, c \quad (3.29)$$

$$IHDV_i^{p,h} (\%) \leq IHDV_{maks,i}^{p,h} (\%) \quad p \in a, b, c \quad (3.30)$$

$$Vrms_{min,i}^p \leq Vrms_i^p \leq Vrms_{maks,i}^p \quad p \in a, b, c \quad (3.31)$$

Burada;

$$THDV_i^p (\%) = \frac{\sqrt{\sum_h^{h_{maks}} |V_i^{p,h}|^2}}{|V_i^{p,1}|} \times 100 \quad p \in a, b, c \quad (3.32)$$

$$IHDV_i^{p,h} (\%) = \frac{|V_i^{p,h}|}{|V_i^{p,1}|} \times 100 \quad p \in a, b, c \quad (3.33)$$

$$Vrms_i^p = \sqrt{|V_i^{p,1}|^2 + \sum_h^{h_{maks}} |V_i^{p,h}|^2} \quad p \in a, b, c \quad (3.34)$$

Burada; $THDV_i^p (\%)$, $IHDV_i^{p,h} (\%)$ ve $Vrms_i^p$ sırasıyla şebekenin i . barasının her bir fazındaki gerilimdeki toplam harmonik bozulma, gerilimdeki tekil harmonik bozulma ve RMS gerilim değerlerini temsil etmektedir. $V_i^{p,1}$ ve $V_i^{p,h}$ sırasıyla şebekenin i . barasının her bir fazındaki temel frekans ve harmonik frekans gerilimlerini göstermektedir. IEEE 519-2014 Standartlarına göre, $THDV_{maks,i}^p (\%)$ % 5 değerindeki gerilimdeki maksimum toplam harmonik bozulma limitini, $IHDV_{maks,i}^{p,h} (\%)$ % 3 değerindeki gerilimdeki maksimum tekil harmonik bozulma limitini temsil etmektedir. $Vrms_{min,i}^p$ ve $Vrms_{maks,i}^p$ sırasıyla 0.9 p.u. (per unit) minimum RMS gerilimini ve 1.1 p.u. maksimum RMS gerilimini temsil etmektedir. Bu çalışmada, (3.28) – (3.34) no'lu eşitlikler ile tanımlanan

optimizasyon problemi, IP algoritması ile çözülmüştür. FV sistemlerin aktif çıkış güçleri, optimize edilen parametreler olarak göz önünde bulundurulmuştur. FV sistemlerinin optimal çıkış güçleri için aday çözüm vektörü aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$X = [P_{FV,1}^p, P_{FV,2}^p, \dots, P_{FV,i}^p, \dots, P_{FV,n}^p] \quad p \in a, b, c \quad (3.35)$$

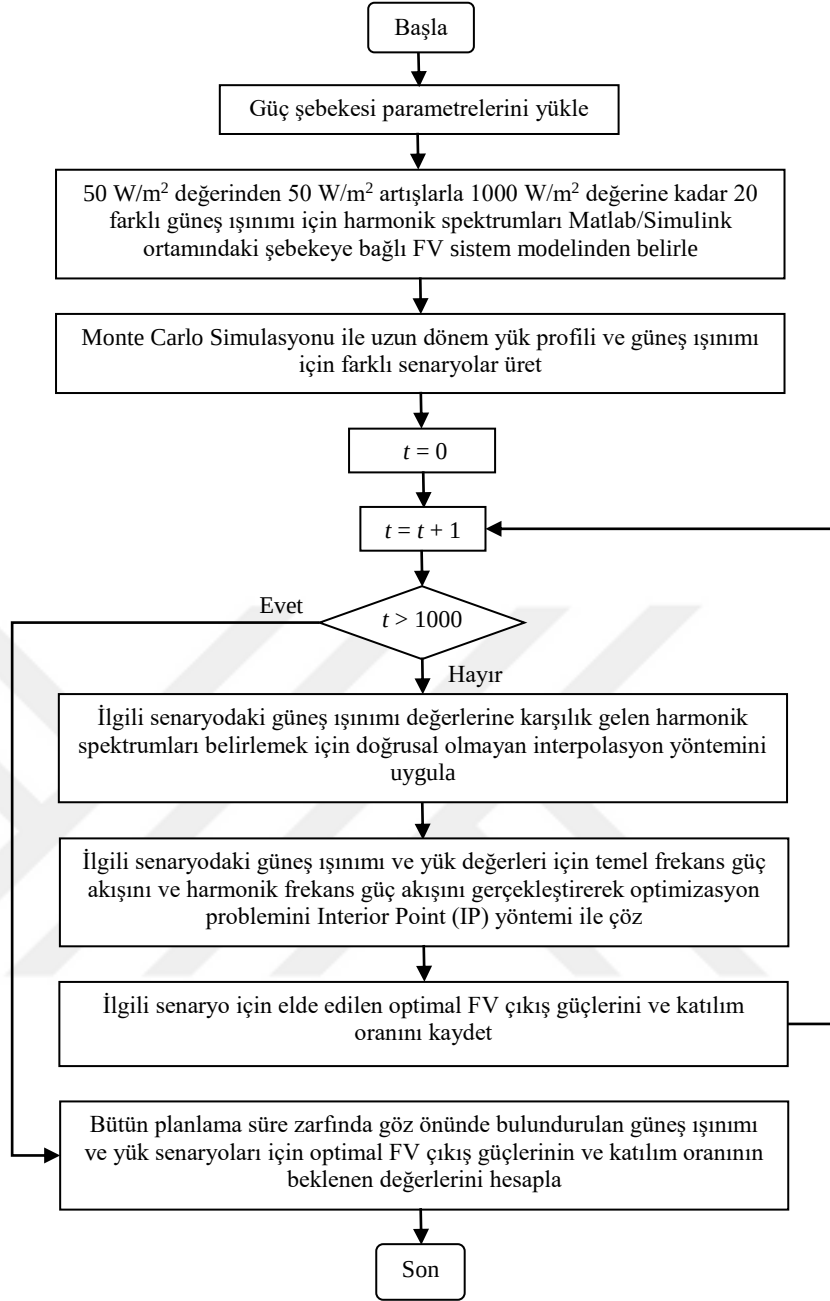
FV sistemlerinin çıkış gücü limitleri aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$P_{FV,\min}^p \leq P_{FV,i}^p \leq P_{FV,\max}^p \quad p \in a, b, c \quad (3.36)$$

Burada, $P_{FV,\min}^p$ ve $P_{FV,\max}^p$ sırasıyla FV sistemlerin çıkış güçlerinin minimum ve maksimum limitlerini temsil etmektedir.

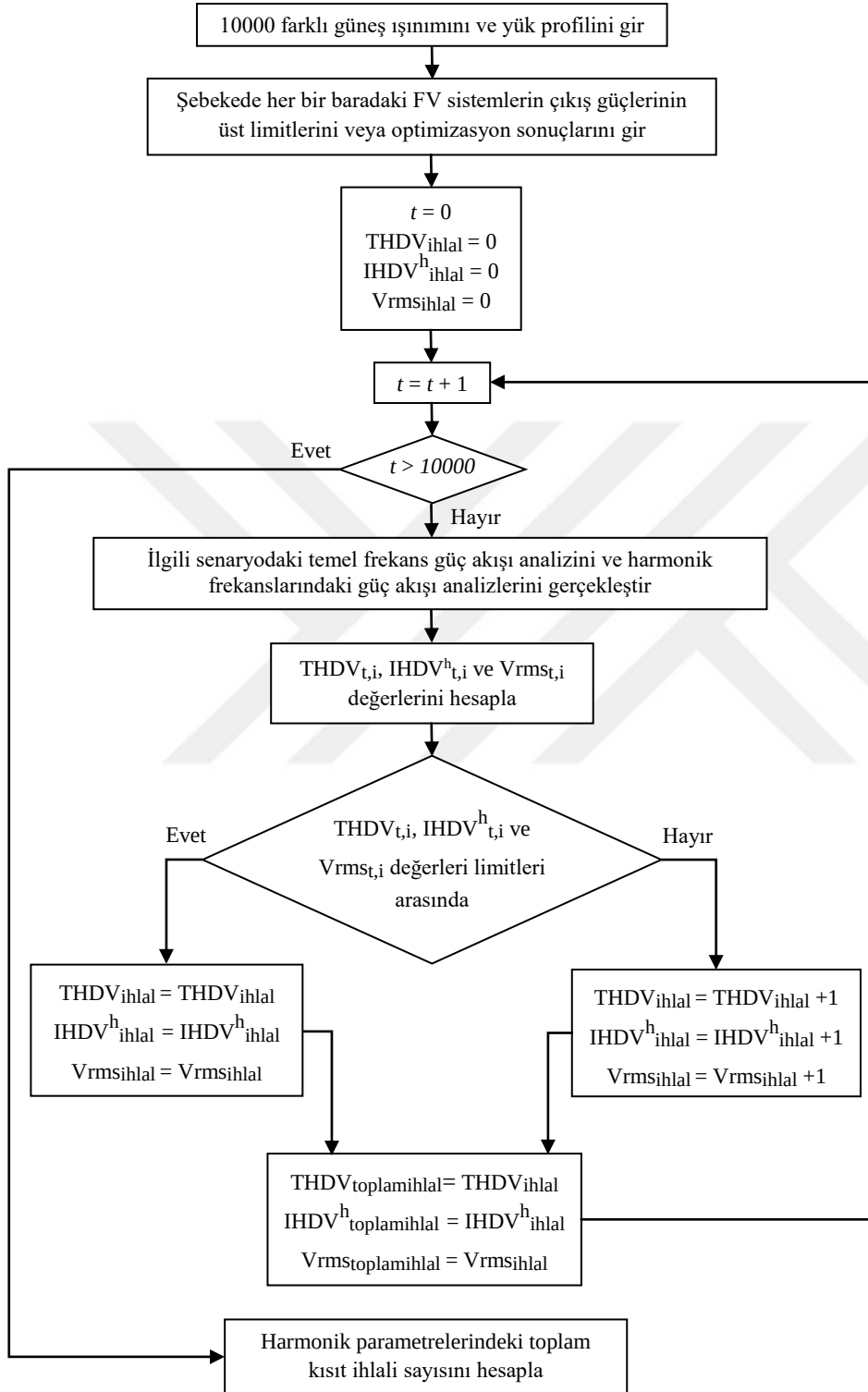
Harmonik parametreleri göz önünde bulundurularak, FV sistemlerin şebekedeki optimal katılım oranlarının belirlenmesi için önerilen MCS ile bağlantılı IP optimizasyon işleminin akış diyagramı Şekil 3.2’de verilmiştir. Bu çalışmada önerilen yöntem aşağıdaki adımlarda anlatılmıştır:

- 1) Güç şebekesi parametrelerini yükle.
- 2) 50 W/m² değerinden 50 W/m² artışlarla 1000 W/m² değerine kadar 20 farklı güneş ışıınımı için harmonik spektrumları IEC 61000-4-7 ve EN 50160 standartlarına uygun olarak belirle.
- 3) Uzun dönem yük profili ve güneş ışıınımı için farklı senaryolar üret.
- 4) İlgili senaryo için temel frekans güç akışını ve harmonik frekans güç akışını gerçekleştirerek optimizasyon problemini IP yöntemi ile çöz.
- 5) İlgili senaryo için elde edilen optimal FV çıkış güçlerini ve optimal FV katılım oranlarını kaydet.
- 6) Bütün planlama süre zarfında göz önünde bulundurulan senaryolar için optimal FV çıkış güçlerinin ve katılım oranının beklenen değerini hesapla.
- 7) Önerilen yöntemi harmonik ihlalleri açısından 10,000 farklı uzun dönem yük profili ve güneş ışıınımı senaryoları için test et.



Şekil 3.2 MCS ile bağlantılı IP optimizasyon yönteminin akış diyagramı

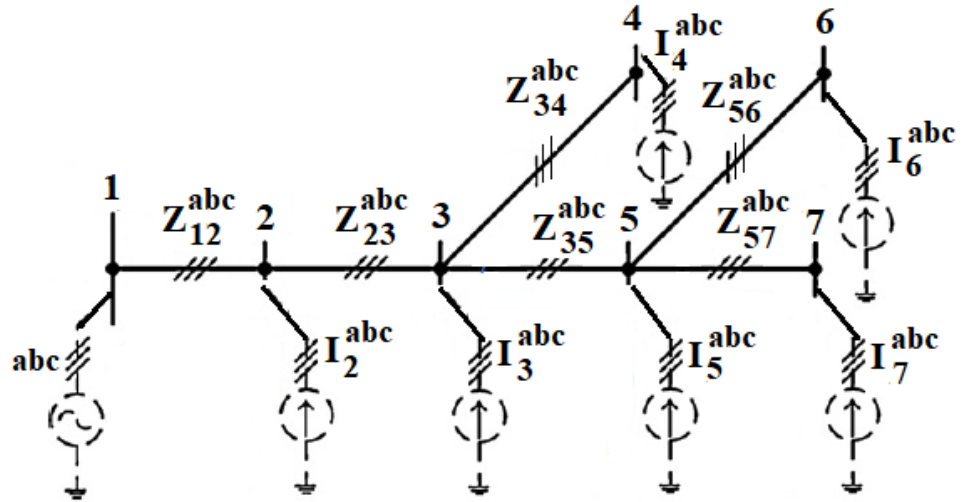
Harmonik parametrelerindeki ihlal sayılarının belirlenmesi için önerilen akış diyagramı Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Harmonik parametrelerindeki toplam ihlal sayılarını belirlemek için önerilen akış diyagramı

3.5 Simulasyon Sonuçları

Tez çalışmasının bu bölümünde, simulasyonlar dengesiz üç fazlı 7 baralı dağıtım şebekesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. 7 baralı dağıtım sistemi Şekil 3.4'te verilmiştir. Bu şebekede, üç fazlı hatlar ve yükler bulunmaktadır. Şebekenin referans barası, 1. bara olarak kabul edilmiştir. Diğer baralar, yük baraları olarak modellenmiştir. Dağıtım sisteminin hat ve yük bilgileri, sırasıyla Tablo 3.1 ve 3.2'de sunulmuştur.



Şekil 3.4 Dengesiz üç fazlı 7 baralı dağıtım şebekesi

Tablo 3.1 Dengesiz üç fazlı 7 baralı dağıtım şebekesinin hat bilgileri

Hat Numarası	Baradan	Baraya	Fazlar	Hat Uzunluğu (feet)	Konfigürasyon
1	1	2	abc	1000	1
2	2	3	abc	500	1
3	3	4	abc	500	1
4	3	5	abc	500	2
5	5	6	abc	500	2
6	5	7	abc	500	2

Tablo 3.2 Dengesiz üç fazlı 7 baralı dağıtım şebekesinin yük bilgileri

Bara	a fazı		b fazı		c fazı	
	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
1	-	-	-	-	-	-
2	157.95	109.10	143.40	99.50	160.80	79.10
3	177.45	90.90	155.10	94.10	148.95	95.50
4	116.10	106.40	203.55	96.90	160.65	87.60
5	162.90	86.20	191.40	90.20	146.85	82.10
6	154.65	98.20	129.75	97.70	148.05	102.50
7	130.35	112.70	195.45	89.90	172.20	79.70

Doğrusal olmayan yüklerin harmonik akım bileşenlerinin yüzdelik değerleri Tablo 3.3'te verilmiştir (HassanzadehFard and Jalilian, 2018). Hız ayarlı sürücü (ASD) ve değişken frekanslı sürücü (VFD) isimli güç elektroniği cihazlarının dağıtım sisteminde bulunduğu kabul edilmiştir. Bu çalışmada, bu doğrusal olmayan yüklerin bağlı bulunduğu dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde harmonik parametreleri incelenmiştir. Doğrusal olmayan yüklerin 7 baralı dağıtım şebekesinde bağlı bulunduğu baralar ve bu yüklerin güçleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.3 Doğrusal olmayan yüklerin harmonik akım bileşenleri

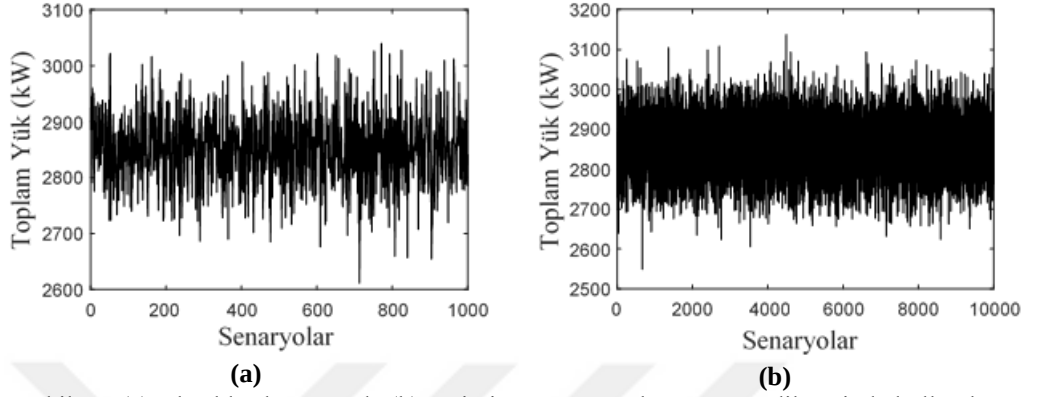
Harmonik Derecesi	VFD	ASD
	Büyüklik (%)	Büyüklik (%)
1	100	100
5	23.52	82.8
7	6.08	77.5
11	4.57	46.3
13	4.2	41.2
17	1.8	14.2
19	1.37	9.7
23	0.75	1.5
25	0.56	2.5
29	0.49	-
31	0.54	-

Tablo 3.4 7 baralı dağıtım şebekesinde doğrusal olmayan yüklerin baraları ve güçleri

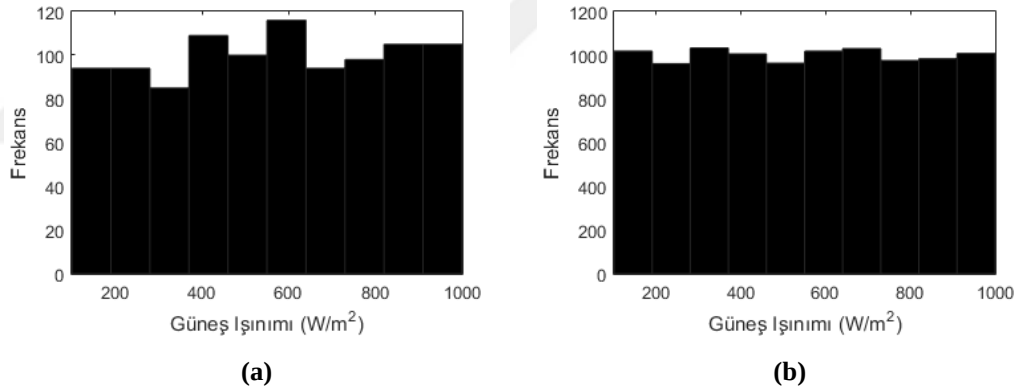
Doğrusal Olmayan Yük		Güç					
İsmi	Barası	a fazı		b fazı		c fazı	
		kW	kVar	kW	kVar	kW	kVar
ASD	2	5.265	5.455	4.780	4.975	5.360	3.955
	3	5.915	4.545	5.170	4.705	4.965	4.775
	4	3.870	5.320	6.785	4.845	5.355	4.380
	5	5.430	4.310	6.380	4.510	4.895	4.105
	6	5.155	4.910	4.325	4.885	4.935	5.125
	7	4.345	5.635	6.515	4.495	5.740	3.985
VFD	2	28.431	29.457	25.812	26.865	28.944	21.357
	3	31.941	24.543	27.918	25.407	26.811	25.785
	4	20.898	28.728	36.639	26.163	28.917	23.652
	5	29.322	23.274	34.452	24.354	26.433	22.167
	6	27.837	26.514	23.355	26.379	26.649	27.675
	7	23.463	30.429	35.181	24.273	30.996	21.519

Bu çalışmadaki simülasyonlarda, harmonik kısıtları göz önünde bulundurularak FV tabanlı DEÜ sistemlerinin optimal katılım oranlarının farklı yük profili ve güneş ışınlımı senaryoları için belirlenmesi üzerinde odaklanılmaktadır. 7 baralı dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesinin toplam yükünün aktif güç değeri, 2855.55 kW değerindedir. Dağıtım sisteminde olasılıksal optimizasyon yönteminin gerçekleştirilmesinde ve bu yöntemden elde edilen sonuçların test edilmesinde göz önünde bulundurulanan toplam yük profilleri Şekil 3.5'te verilmiştir. Çalışmada, üç fazlı FV sistemlerin dağıtım şebekesinin referans

barası dışındaki tüm baralara bağlandığı göz önünde bulundurulmuştur. Belirli bir anda, şebekenin her bir barasındaki FV sistemine farklı güneş ışıınının geldiği düşünülmüştür. MCS yönteminde ve optimizasyon sonuçlarının test edilmesinde göz önünde bulundurulan güneş ışıını dağılımları Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.5 (a) Olasılıksal yöntemde (b) optimizasyon sonuçlarının test edilmesinde kullanılan yük profilleri

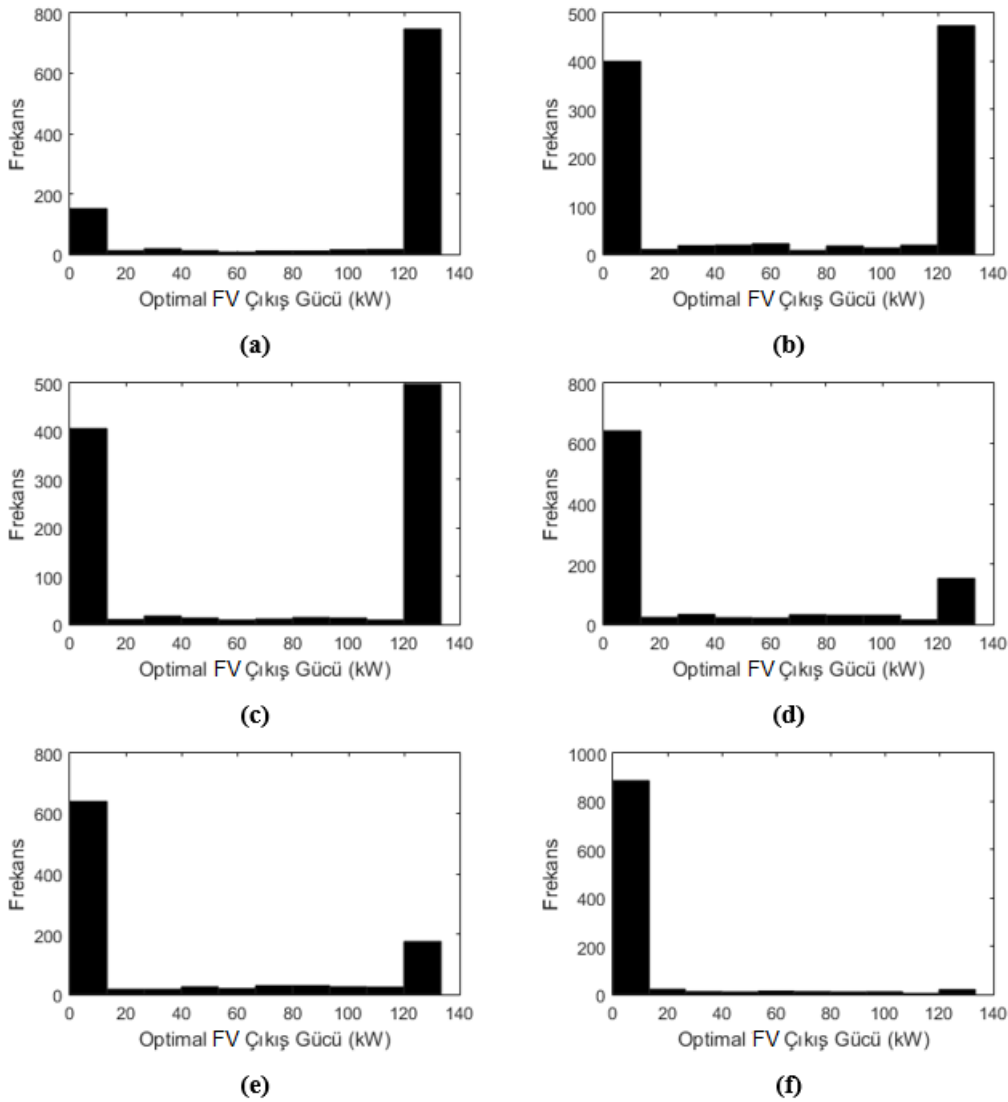


Şekil 3.6 (a) Olasılıksal yöntemde (b) optimizasyon sonuçlarının test edilmesinde ele alınan güneş ışıını dağılımları

Bu çalışmada, şebekeye bağlı üç fazlı FV sistemler, birim güç faktöründe çalıştırılmaktadır. Kurulu gücü 400 kW olan üç fazlı FV sistemler şebekeye bağlanmaktadır. Bu durumda, optimizasyon işleminde şebekenin her bir aday barasının her bir fazında FV sistemlerin çıkış güçlerinin üst limitleri 133.33 kW olmaktadır.

Olasılıksal optimizasyon yönteminin uygulanması sonucu, şebekedeki FV sistemlerin bağlandığı her bir barada optimal çıkış güçlerinin dağılımları Şekil 3.7’de verilmiştir. Şekil 3.7’de belirlenen dağılımlara göre, 2., 3. ve 4. baralardaki

optimal FV çıkış güçleri yüksek değerlerde, 5., 6. ve 7. baralardaki FV sistemlerin çıkış güçleri ise düşük değerlerde daha fazla gözlenmiştir. Test şebekesinin harmonik akımlara hassas olan 5., 6. ve 7. baralarında harmonik parametreleri FV sistemlerin optimal çıkış güçlerini diğer baralara kıyasla daha fazla limitlemiştir. Dağıtım şebekesinin 2., 3. ve 4. baralarında optimal FV sistem çıkış güçleri sırasıyla % 74.7, % 47.4 ve % 49.8 olasılıklar ile 120 kW değerinin üzerinde elde edilmiştir. Bununla birlikte, 5., 6. ve 7. baralardaki optimizasyon sonuçları sırasıyla, % 65.1, % 64.6 ve % 89.9 olasılıklar ile 20 kW değerinin altında gözlenmiştir. Şebekedeki FV sistemlerin bağlanmış olduğu baralardaki optimal çıkış güçlerinin beklenen değerleri Tablo 3.5'te sunulmuştur.

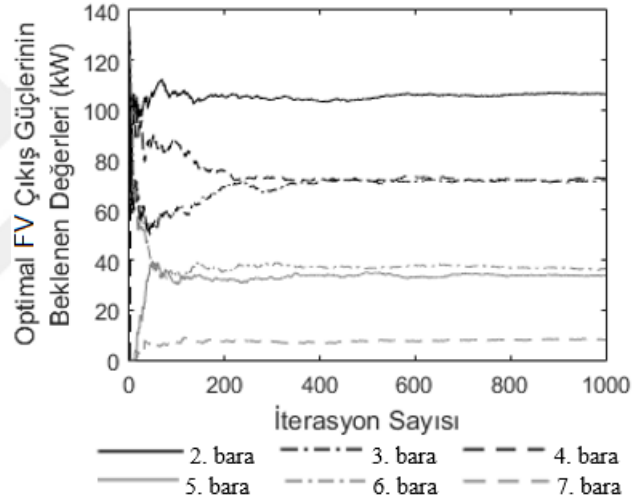


Şekil 3.7 FV sistemlerin (a) 2., (b) 3., (c) 4., (d) 5., (e) 6., (f) 7. baralardaki optimal çıkış güçlerinin dağılımları

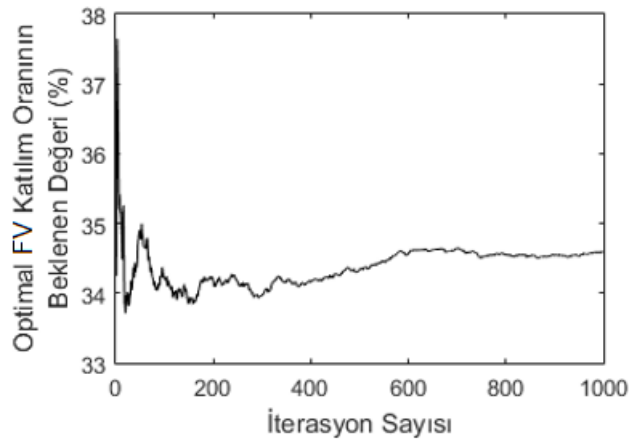
Tablo 3.5 Optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri

Baralar	Optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri (kW)
2	106.44
3	71.75
4	72.64
5	33.87
6	36.38
7	8.16

MCS yönteminin IP ile birlikte uygulanması sonucu, optimal FV çıkış güçlerinin iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri Şekil 3.8’de sunulmuş olup, optimal FV katılım oranlarının iteratif olarak belirlenen beklenen değerleri Şekil 3.9’da verilmiştir.

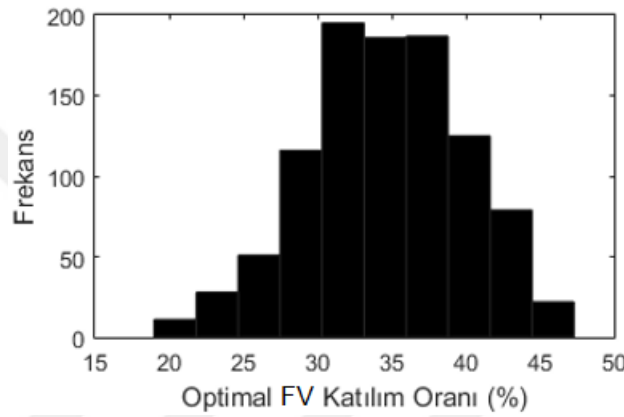


Şekil 3.8 Optimal FV çıkış güçlerinin iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri



Şekil 3.9 Optimal FV katılım oranlarının iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri

Şekil 3.8 ve 3.9’da görüldüğü gibi, FV sistemlerin optimal çıkış güçleri ve optimal katılım oranları beklenen değerlerine yakınsamıştır. MCS ile gerçekleştirilen optimizasyon işlemlerinde elde edilen sonuçlar 1000 iterasyonda beklenen değerlerine yakınsadığından, tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde gerçekleştirilen simülasyonlarda ilgili iterasyon sayısı yeterli görülmüştür. Olasılıksal optimizasyon yönteminde belirlenen optimal FV katılım oranının dağılımı Şekil 3.10’da gösterilmiştir. Optimal FV katılım oranlarının, % 63.9 olasılık ile % 30 ve % 40 katılım oranları arasında olduğu gözlenmiştir. FV sistemlerin optimal katılım oranının beklenen değeri % 34.59 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.10 Optimal FV katılım oranının dağılımı

FV sistemlerin çıkış güçlerinin üst limitleri, optimizasyon yöntemi gerçekleştirilmeden önce harmonik ihlallerinin elde edilmesi için dağıtım şebekesine entegre edilmiştir. IP optimizasyon yönteminin MCS ile uygulanması sonucu, FV sistemlerin optimal çıkış güçlerinin beklenen değerleri önerilen yöntemin test edilmesi açısından, harmonik parametrelerindeki ihlal sayılarının belirlenmesi için, dağıtım sistemine bağlanmıştır. Sonuçlar, Tablo 3.6’da özetlenmiştir.

Tablo 3.6 Harmonik parametrelerinde görülen ihlal sayıları

Baralar	İhlal Sayıları			
	FV Çıkış Güçlerinin Üst Limitleri İçin		FV Çıkış Güçlerinin Beklenen Değerleri İçin	
	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵
5(a)	-	1	-	-
5(b)	5864	8583	-	-
5(c)	-	39	-	-
6(a)	108	3227	-	-
6(b)	10000	10000	-	7349
6(c)	662	5212	-	-
7(a)	172	3518	-	-
7(b)	10000	10000	-	9525
7(c)	735	5301	-	-

Tablo 3.6’da görüldüğü üzere, optimizasyon algoritması uygulanmadan önce, dağıtım şebekesinin 5., 6. ve 7. baralarında THDV ve IHDV^h değerlerinde ihlallerin olduğu gözlenmiştir. MCS tabanlı optimizasyon yöntemi uygulandıktan sonra THDV ihlalleri tamamen minimize edilmiştir. Ayrıca, optimizasyon işlemi gerçekleştirildikten sonra IHDV⁵ ihlalleri azaltılmıştır. Bununla birlikte, dağıtım sisteminde harmonik akımlara hassas olan 6. ve 7. baraların b fazında ihlallerin olduğu gözlenmiştir. Olasılıksal optimizasyon yöntemi ile belirlenen optimizasyon sonuçları kullanıldığında, ihlaller risk alınarak minimize edilmiştir. Bunun yanı sıra, 5. harmonik dışındaki IHDV^h değerlerinde ve RMS gerilimlerinde optimizasyon yöntemi uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra ihlal görülmemiştir. Bu sonuçlar, FV sistemlerin optimal katılım oranları maksimize edilirken, şebekedeki harmonik bozulmalarda görülen ihlallerin minimize edilmesi konusunda önerilen yöntemin etkinliğini göstermiştir.

3.6 Sonuçlar

Tez çalışmasının bu bölümünde, harmonik bozulmaların bulunduğu dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesinde, fotovoltaik sistemlerin optimal katılım oranlarını belirlemek için olasılıksal (probabilistic) bir yöntem önerilmiştir. Interior Point (IP) yöntemi, Monte Carlo Simulasyonu ile bağlantılı olarak optimizasyon problemini çözmek için uygulanmıştır. Önerilen yöntem, FV sistemin şebekeye enjekte ettiği akımın harmonik spektrumunun güneş ışınımına bağlı değişimine dayalıdır. Harmonik parametreleri, doğrusal olmayan yüklerin ve FV sistemlerin bulunduğu dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesinde, döngü referans yapısına dayalı üç fazlı harmonik güç akışı yöntemi (loop frame of reference based three phase harmonic power flow method) kullanılarak belirlenmiştir. Güç kalitesinin sürekliliği ve güvenilirliği açısından, efektif gerilim (RMS voltage) değerlerinin, özel harmonik gerilim bozulma (individual harmonic voltage distortion) değerlerinin ve toplam harmonik gerilim bozulma (total harmonic voltage distortion) değerlerinin belirli sınırlarda olması beklenildiğinden dolayı, harmonik güç akışı analizinden elde edilen sonuçları istenilen aralıkta tutmak için şebekeye bağlanan fotovoltaik sistemlerin çıkış güçlerinin planlanması ve fotovoltaik sistemlerin şebekedeki optimal katılım oranlarının belirlenmesi güncel bir araştırma konusudur. Bu anlamda, dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesinin uzun dönemdeki yük profili ve güneş ışınımındaki değişimlerden dolayı fotovoltaik sistemlerin çıkış güçlerinin belirsizliği düşünülerek ve harmonik kısıtları göz önüne alınarak bu kaynakların dengesiz üç fazlı dağıtım sistemindeki güç talebini karşılamadaki optimal katılım oranlarını belirlemek için gerekli çalışmalar

gerçekleştirilmiştir. MCS tabanlı optimizasyon yönteminden belirlenen sonuçlar, yük ve güneş ışıınımı değişkenlerinin ilgili aralıklarındaki olasılık dağılımları göz önünde bulundurularak elde edilmiştir. Bu kapsamda, yük ve güneş ışıınımı senaryolarının dağılımlarının uygun aralıklarda seçilmesi ile, optimal FV sistem çıkış güçlerinin ve katılım oranlarının dağılımları açısından anlamlı sonuçlara ulaşılmıştır. Optimal FV katılım oranı problemi, MCS yönteminin her bir iterasyonundaki senaryolara karşılık gelen kısıtlar ayrı ayrı ele alınarak çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar, olasılıksal optimizasyon yöntemi kullanıldığında, farklı güneş ışıınımı ve yük durumlarında, FV sistemlerin optimal katılım oranları maksimize edilirken, şebekedeki harmonik bozulmaların risk alınarak minimize edildiğini göstermiştir.



4. OPTİMAL FV KATILIM ORANLARININ OLASILIKSAL VE DETERMİNİSTİK YÖNTEMLER İLE BELİRLENMESİ

Bu bölümde, harmonik bozulmaların bulunduğu dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde FV sistemlerin optimal katılım oranları olasılıksal ve deterministik optimizasyon yöntemleri ile farklı güneş ışınlamı senaryoları altında belirlenmiştir.

Bu bölümün alt başlıkları şu şekilde verilmektedir: Bölüm 4.1’de, göz önünde bulundurulan problem ile ilgili giriş açıklamaları yapılmıştır. Bölüm 4.2’de, çalışmada önerilen optimizasyon yapısı verilmiştir. Bölüm 4.3’te, çalışmada göz önünde bulundurulan güneş ışınlamı senaryoları ve elde edilmiş olan simulasyon sonuçları sunulmuştur. Bölüm 4.4’te ise, tez çalışmasının bu bölümünde elde edilen genel sonuçlar açıklanmıştır.

4.1 Giriş

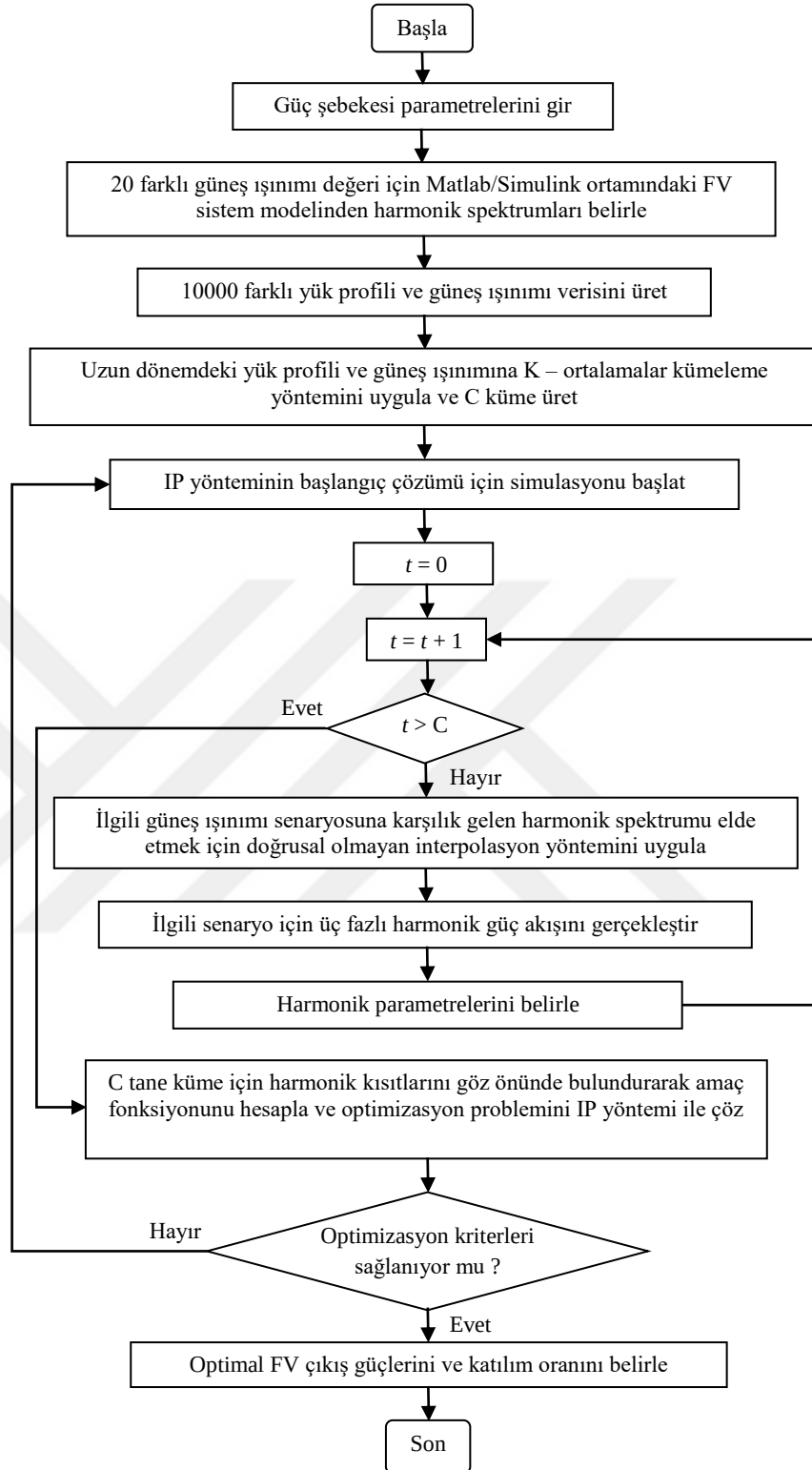
FV sistem, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en önemli teknolojilerden biridir. FV sistemlerin dağıtım şebekelerinde giderek artan katılım oranları ile birlikte, şebekeye bağlantı noktalarında bulunan güç elektroniği cihazlarından dolayı harmonik bozulmalar da yükselmektedir. Bu nedenle, şebekedeki optimal FV katılım oranının belirlenmesi, güç kalitesi problemlerinin önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Tez çalışmasının bu bölümünde, dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerindeki yük belirsizliği ve güneş ışınlamındaki değişimlerden dolayı FV sistemlerinin çıkış güçlerinin kesikli yapısı göz önünde bulundurularak FV sistemlerin optimal katılım oranlarının belirlenmesi için olasılıksal ve deterministik optimizasyon yöntemleri önerilmiştir. Interior Point (IP) yöntemi, sırasıyla Monte Carlo Simulasyonu (MCS) ve $k -$ ortalamalar kümeleme yöntemleri ile bağlantılı olarak optimizasyon problemini çözmek için uygulanmıştır. FV sistem şebeke akımının harmonik spektrumunun güneş ışınlamına bağlılığı önerilen yöntemlerde göz önünde bulundurulmuştur. Harmonik parametreleri, doğrusal olmayan yüklerin ve FV sistemlerin bağlı bulunduğu dağıtım şebekesinde döngü referans yapısına dayalı üç fazlı harmonik güç akışı analizi yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Optimal FV katılım oranları, optimizasyon işleminde gerilimdeki toplam harmonik bozulma, gerilimdeki tekil harmonik bozulma ve RMS gerilim limitlerine dayalı olarak belirlenmiştir.

4.2 Optimizasyon Yapısı

Tez çalışmasının bu bölümünde, harmonik kısıtları göz önünde bulundurularak FV sistemlerin optimal katılım oranlarının elde edilmesi için göz önünde bulundurulmuş optimizasyon problemi (3.28) – (3.34) no'lu eşitlikler ile temsil edilmiştir. Bu optimizasyon probleminin çözülmesi için önerilen MCS tabanlı IP optimizasyon yöntemi Şekil 3.2'de sunulmuş olup, k – ortalamalar kümeleme yöntemi ile bağlantılı IP yönteminin akış diyagramı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında önerilen deterministik yöntem aşağıdaki adımlarda verilmiştir:

- 1) Güç şebekesi parametrelerini yükle.
- 2) 50 W/m² değerinden 50 W/m² artışlarla 1000 W/m² değerine kadar 20 farklı güneş ışıınımı için harmonik spektrumları Matlab/Simulink ortamındaki şebekeye bağlı FV sistem modelinden IEC 61000-4-7 ve EN 50160 standartlarına uygun olarak belirle.
- 3) Uzun dönem yük profili ve güneş ışıınımı için 10,000 farklı senaryo üret.
- 4) K – ortalamalar kümeleme yöntemini uzun dönemdeki yük profili ve güneş ışıınımına aralarındaki korelasyonu sağlayarak uygula ve C tane küme elde et.
- 5) IP yönteminin başlangıç çözümü için simülasyonları başlat.
- 6) İlgili senaryo için simülasyonları başlat. Aksi takdirde, C tane küme göz önünde bulunduruluyor ise (10) no'lu adıma git.
- 7) İlgili senaryodaki güneş ışıınımı değerlerine karşılık gelen harmonik spektrumları belirlemek için doğrusal olmayan interpolasyon yöntemini uygula.
- 8) İlgili senaryodaki güneş ışıınımı ve yük değerleri için temel frekans güç akışını ve harmonik frekans güç akışını gerçekleştir.
- 9) İlgili senaryo için harmonik parametrelerini belirle ve (6) no'lu adıma git.
- 10) C tane küme için harmonik kısıtlarını göz önünde bulundurarak amaç fonksiyonunu hesapla ve optimizasyon problemini IP yöntemi ile çöz.
- 11) Optimizasyon kriterleri sağlanıyor ise (12) no'lu adıma git. Aksi takdirde, (5) no'lu adıma git.
- 12) Bütün planlama süre zarfında göz önünde bulundurulmuş güneş ışıınımı ve yük senaryoları için optimal FV çıkış güçlerini ve katılım oranını hesapla.
- 13) Önerilen yöntemi harmonik ihlalleri açısından 10,000 farklı uzun dönem yük profili ve güneş ışıınımı senaryoları için test et.



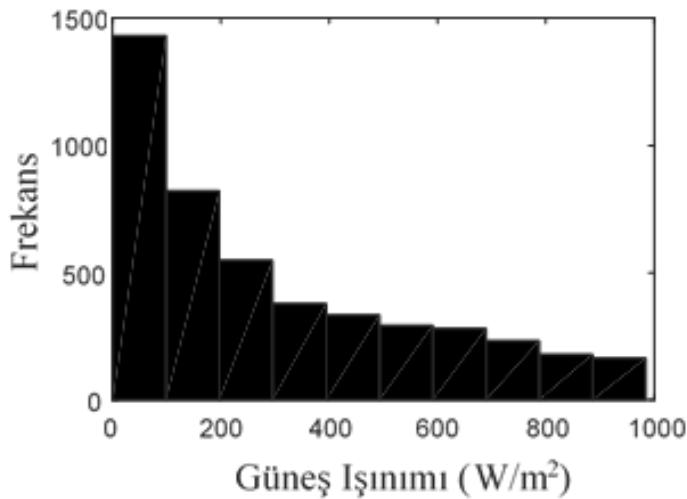
Şekil 4.1 K – ortalamalar kümeleme ile bağlantılı IP optimizasyon yönteminin akış diyagramı

4.3 Simulasyon Sonuçları

Bu tez çalışmasında, şebekeye bağlı üç fazlı FV sistemlerin birim güç faktöründe çalıştırıldığı göz önünde bulundurulmuştur. Dağıtım şebekesinin her bir aday barasındaki toplam FV sistem kapasitesi 400 kW değerindedir. FV sistemlerin her bir fazındaki çıkış güçlerinin üst limitleri, toplam kapasiteleri üç faza bölünerek hesaplandığından dolayı, bu limitler 133.33 kW olmaktadır. Ayrıca, bütün senaryolarda doğrusal olmayan yüklerin dağıtım şebekelerinde bulunduğu kabul edilmiştir. FV sistemlerin şebeke akımının harmonik spektrumunun güneş ışınlamına bağlılığı optimizasyon yapısında göz önünde bulundurulmuştur. Güneş ışınlamının dağıtım şebekelerinde harmonik parametrelere ve optimal FV katılım oranlarına etkilerini gözlemlemek için üç farklı güneş ışınlamı senaryosu ele alınmıştır. Bütün senaryolarda, FV sistemlerin aktif çıkış güçleri optimize edilen kontrol değişkenleri olarak düşünülmüştür. Simulasyonlar, 7 baralı, 13 baralı, 25 baralı ve pratikteki 19 baralı dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde gerçekleştirilmiştir.

4.3.1 Uzun dönemde güneş ışınlamının ve yük profilinin modellenmesi

Bu çalışmada, güneş ışınlamı verileri Amerika Birleşik Devletlerinde yer alan Webster şehrinden alınmıştır (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2018). Gerçek güneş ışınlamı verisinin dağılımı Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 Gerçek güneş ışınlamı verisinin dağılımı

Gerçek güneş ışınlamı verisine dayalı olarak uzun dönem güneş ışınlamı verileri üretilmiştir. Bu çalışmada, güneş ışınlamının beta dağılımlı olduğu göz önünde bulundurulmuştur (Abdelsalam and El-Saadany, 2013). Beta dağılımını temsil eden olasılık yoğunluk fonksiyonu (4.1) no'lu eşitlikte verilmiştir.

$$f(S_i) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} S_i^{(\alpha-1)} (1 - S_i)^{(\beta-1)}, \\ 0 \leq S_i \leq 1, \quad \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \quad \text{ için} \\ 0, \quad \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (4.1)$$

Burada, S_i dengesiz üç fazlı dağıtım sisteminin i . aday barasındaki FV sisteme düşen güneş ışınlamını, α ve β ise beta dağılımının parametrelerini temsil etmektedir. Bu parametreler, (4.2) ve (4.3) no'lu eşitliklerde verildiği gibi elde edilmektedir.

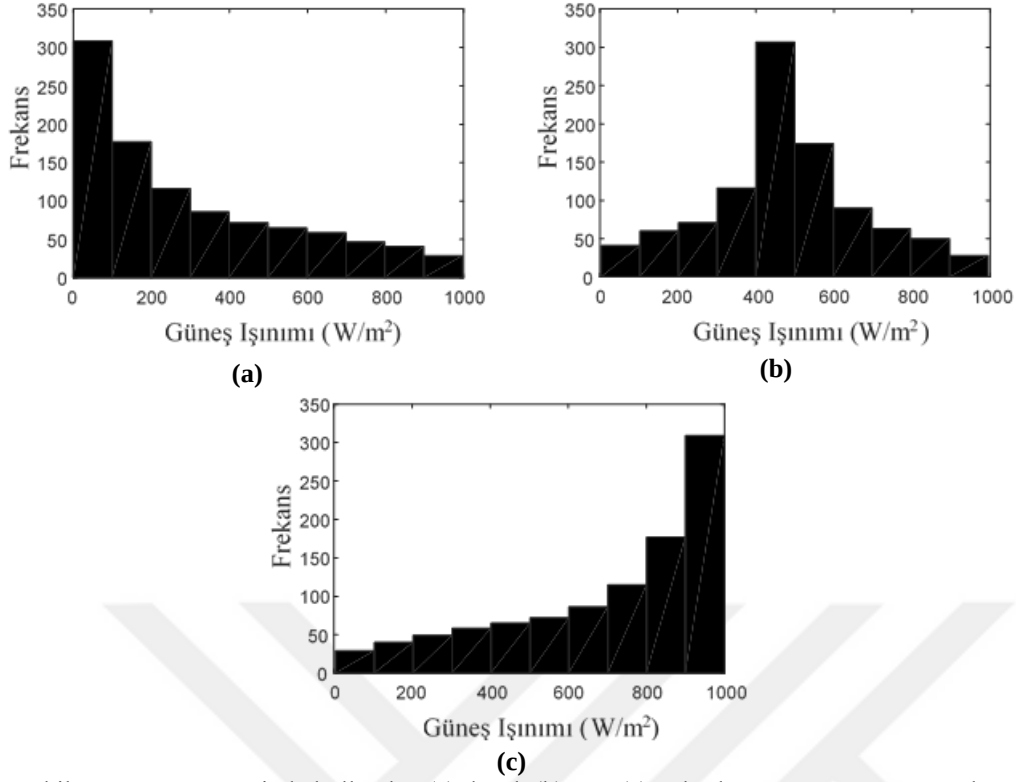
$$\beta = (1 - \mu) \left(\frac{\mu(1 - \mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (4.2)$$

$$\alpha = \frac{\mu\beta}{(1 - \mu)} \quad (4.3)$$

Burada, μ ve σ sırasıyla ortalama ve standart sapma değerlerini göstermektedir. Şebekedeki FV sistemlerin aktif çıkış güçleri güneş ışınlamına bağlı olarak (4.4) no'lu eşitlikte verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{FV}^p = P_{FV,N}^p \frac{S_i}{1000} \quad p \in a, b, c \quad (4.4)$$

Burada, P_{FV}^p FV sistemin şebekeye bağlandığı baranın her bir fazındaki çıkış gücünü, $P_{FV,N}^p$ FV sistemin 1000 W/m² güneş ışınlamı durumunda anma çıkış gücünü göstermektedir. Bu çalışmada, MCS yönteminde kullanılmak üzere uzun dönemde FV sistemlerdeki güneş ışınlamı için 3 farklı senaryo göz önünde bulundurulmuştur. Bu senaryolar için MCS yönteminde göz önünde bulundurulan güneş ışınlamı dağılımları Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3 MCS yönteminde kullanılan (a) düşük (b) orta (c) yüksek güneş ışınımı senaryoları

Bu çalışmada, uzun dönemdeki yük profilleri optimizasyon yapısında kullanılmıştır. Yük profillerinin normal dağılımlı olduğu göz önünde bulundurulmuştur (Hengsritawat et al., 2012). Ayrıca, planlama süre zarfında olası bütün durumları göz önünde bulundurabilmek için, uzun dönemdeki yük profili ve güneş ışınımının her biri için 10,000 farklı senaryo üretilmiştir. Bu çalışmada, k – ortalamalar kümeleme yöntemi, uzun dönemdeki 10,000 farklı yük profili ve güneş ışınımına uygulanarak kümeler elde edilmiştir. K – ortalamalar kümeleme yöntemi, yük profili ve güneş ışınımı arasındaki korelasyonu sağlayarak daha az sayıda veri ile temsil edilmelerini sağlamaktadır (Na et al., 2010).

4.3.2 Dengesiz üç fazlı 7 baralı dağıtım şebekesi

Dengesiz üç fazlı 7 baralı dağıtım şebekesi Şekil 3.4'te verilmiştir. Bu bölümde, 7 baralı dağıtım şebekesinin toplam yükünün aktif gücü 2855.55 kW değerindedir. Dağıtım sisteminin MCS ve k – ortalamalar kümeleme yöntemleri ile gerçekleştirilen optimizasyon yöntemlerinde göz önünde bulundurulan toplam yük profilleri Şekil 3.5'te verilmiştir.

Bu tez çalışmasında, dengesiz üç fazlı 7 baralı dağıtım sisteminde üç fazlı FV sistemlerinin aday baraları, referans barası dışındaki baralar olarak göz önünde bulundurulmuştur. IP yönteminin MCS ile uygulanması sonucu, FV sistemlerin optimal çıkış güçlerinin dağılımları, düşük, orta ve yüksek güneş ışıını senaryoları için sırasıyla Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6'da gösterilmiştir.

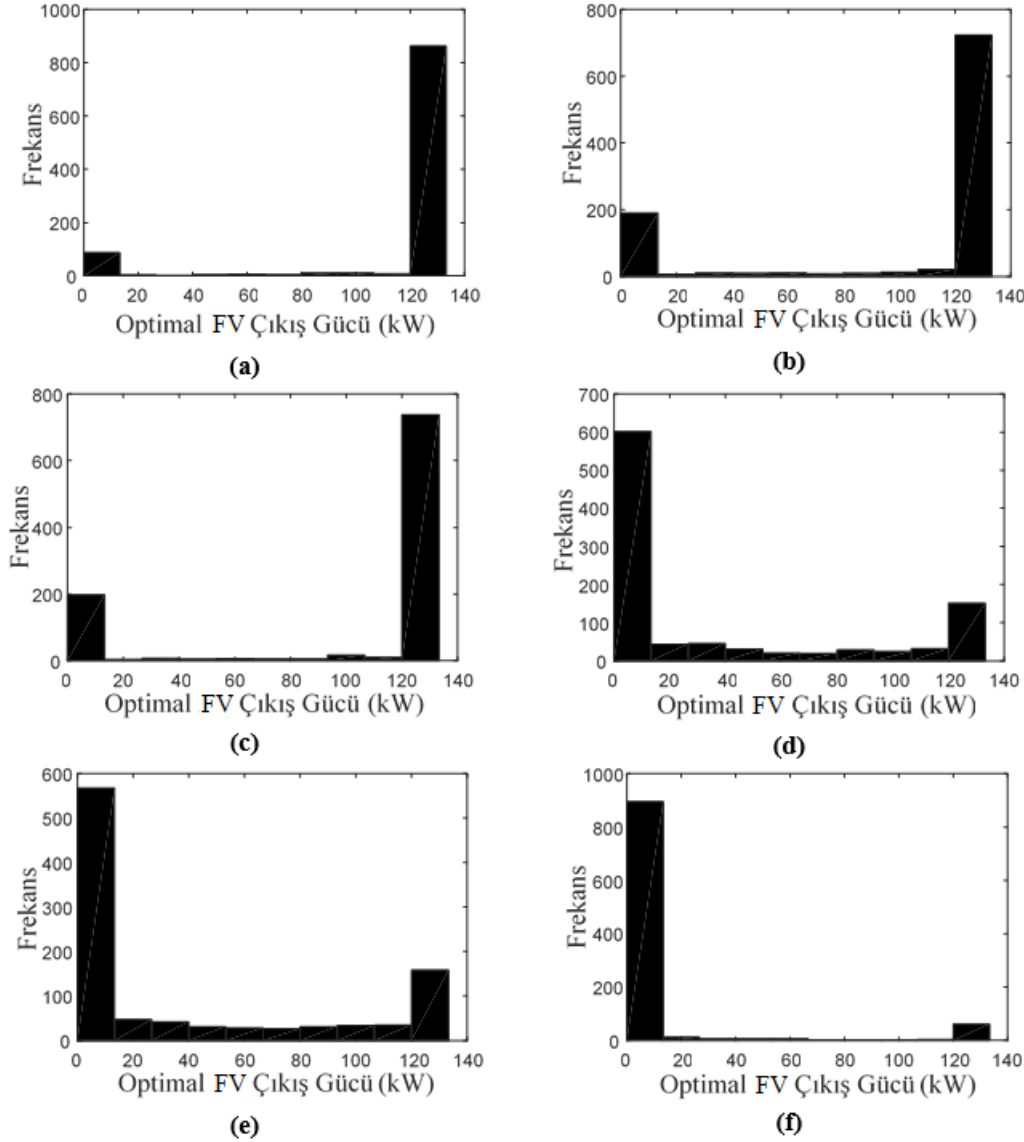
Şekil 4.4'te elde edilen dağılımlara bakıldığında, 2., 3. ve 4. baralardaki optimal FV çıkış güçleri sırasıyla % 86.2, % 72.3 ve % 73.8 olasılıklar ile 120 kW değerinin üzerinde gözlenmiştir. Bununla birlikte, 5., 6. ve 7. baralardaki FV sistemlerin çıkış güçleri sırasıyla % 62.8, % 59.1 ve % 90.1 olasılıklar ile 20 kW değerinin altında elde edilmiştir. Bu sonuçlar, özellikle 5., 6. ve 7. baraların harmonik akımlara daha hassas olmaları nedeniyle FV sistemlerin çıkış güçlerini limitlediklerini göstermiştir.

Dağıtım şebekelerine FV sistem entegrasyonunun artmasıyla birlikte, harmonik bozulmalar şebeke açısından olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bu yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekelere doğrusal olmayan yükler ile birlikte bağlanmaları, dağıtım sistemi planlamacılarını harmonik kısıtlarının sağlanması konusunda yeni araştırmalara yönlendirmektedir. Bu bağlamda, yüksek harmonik akımlarının ve gerilimlerinin gözlemlendiği aktif dağıtım şebekelerinde, optimal FV katılım oranlarının belirlenmesi bu araştırmalar arasında güncelliğini koruyan problemlerden biridir.

IEEE 519 standartlarında belirtilen harmonik limitlerine dayalı olarak elde edilen optimal FV katılım oranları, dağıtım sistemindeki güç kalitesinin devamlılığı açısından önemli hale gelmektedir. Güç kalitesinin sürekliliği, şebekedeki son kullanıcılara aktarılan gücün verimliliği ve güvenilirliği için kaçınılmazdır. Bu kapsamda, şebekelerde harmonik problemlerinin oluşması, FV sistemlerin optimal katılım oranları ile ilgili yapılan planlamaların her bir fazının doğru bir şekilde yapılmasını gerektirmektedir.

Pratikte dengesiz üç fazlı yapıda bulunan dağıtım şebekelerinin yük belirsizliği ve FV sistemlere düşen güneş ışıınının değişkenliği, şebeke operatörlerini bu planlamalara teşvik etmektedir. Bunun nedeni, şebekedeki yük profilinin ve güneş ışıınının değişimlerinden dolayı çözülmesi gereken optimizasyon problemlerinin karmaşık bir yapı almasıdır. Şebekedeki FV sistemlerin çalışma noktalarının ve harmonik akım bileşenlerinin güneş ışıını koşullarına bağlılığı bu optimizasyon problemine yeni bir boyut

kazandırmaktadır. Belirtilen bu noktalara dayalı olarak dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde optimal FV katılım oranlarının planlanması, harmonik bozulmaların minimize edilerek güç kalitesinin istenilen düzeye getirilmesi açısından literatürde yapılmış olan çalışmaları yeni bir düzeye getirmektedir. Dolayısıyla, bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen optimal FV katılım oranları konusundaki planlamalar, literatürdeki gelecek çalışmalara ışık tutmaları özelliği ile önemli bir yere sahiptir.

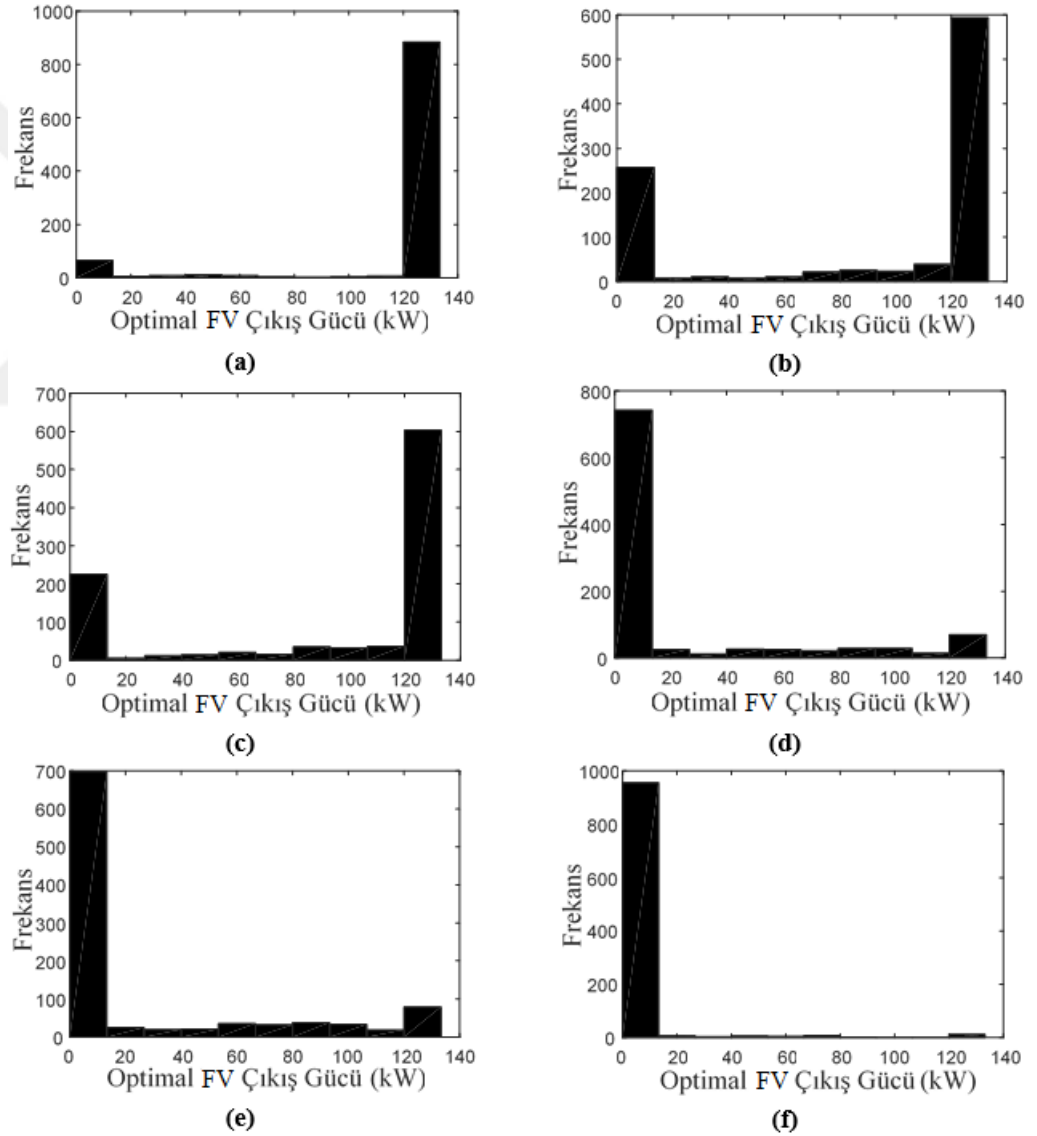


Şekil 4.4 Düşük güneş ışınlamı senaryosu için (a) 2., (b) 3., (c) 4., (d) 5., (e) 6., (f) 7. baralardaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları

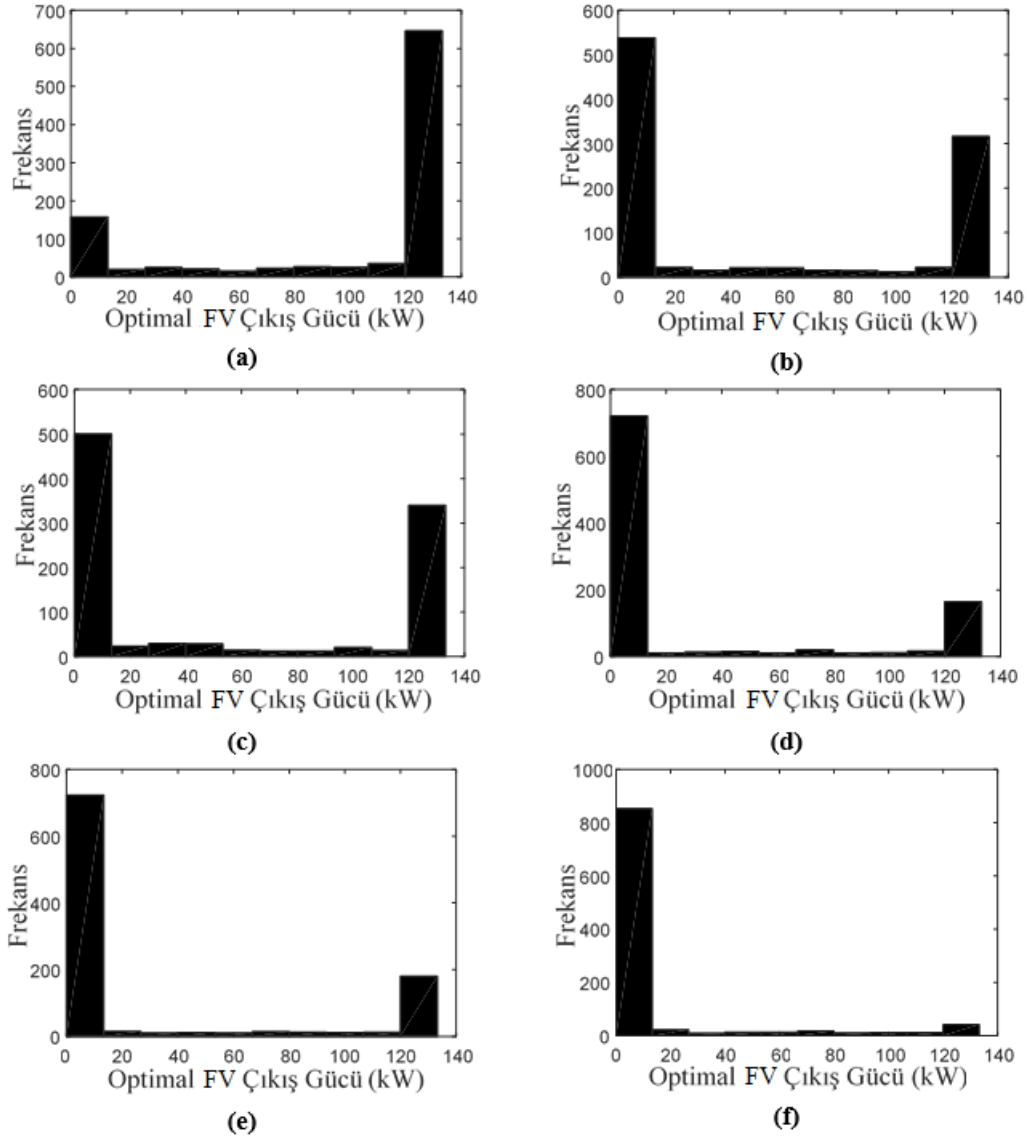
Şekil 4.5'te verilen sonuçlara göre, optimal FV çıkış gücünün beklenen değerinin 120.88 kW olduğu 2. baradaki optimizasyon sonuçları % 88.4 olasılık ile 120 kW üzerinde elde edilmiş olup, ilgili beklenen değerin 3.26 kW olduğu 7. Baradaki sonuçlar % 96.1 olasılık ile 20 kW değerinin altında bulunmuştur. Şekil 4.6'da sunulan sonuçlara göre, 3. ve 4. baralar harmonik bozulmalara karşı hassas

duruma geçmiş olup, bu baralardaki optimal FV sistem çıkış güçleri % 54.8 ve % 51.4 olasılıklar ile 20 kW değerinin altında elde edilmiştir. Yüksek güneş ışıını senaryosunda harmonik gerilim bozulmalarının artması limitleyici etkide bulunarak FV çıkış güçlerini azaltmıştır.

FV sistemlerin aday baralarındaki optimal çıkış güçlerinin beklenen değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Tablo 4.1’de görüldüğü gibi, optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri, 2., 3. ve 4. baralarda 5., 6. ve 7. baralara göre daha yüksek elde edilmiştir. Harmonik bozulmalar, 5., 6. ve 7. baralardaki FV sistemlerin çıkış güçleri üzerinde diğer baralara göre daha yüksek olasılıkla limitleyici etkiye sahiptir.



Şekil 4.5 Orta güneş ışıını senaryosu için (a) 2., (b) 3., (c) 4., (d) 5., (e) 6., (f) 7. baralardaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları



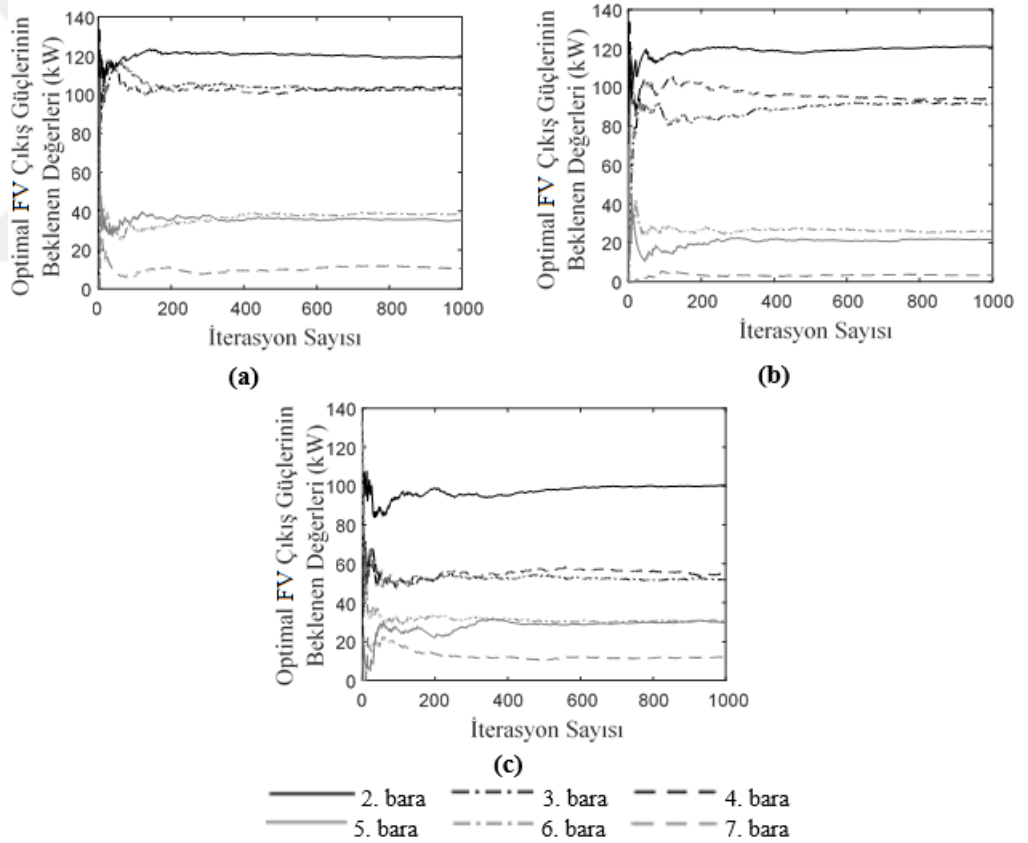
Şekil 4.6 Yüksek güneş ışınlımı senaryosu için (a) 2., (b) 3., (c) 4., (d) 5., (e) 6., (f) 7. baralardaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları

Tablo 4.1 Düşük, orta ve yüksek güneş ışınlımı senaryoları için optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri

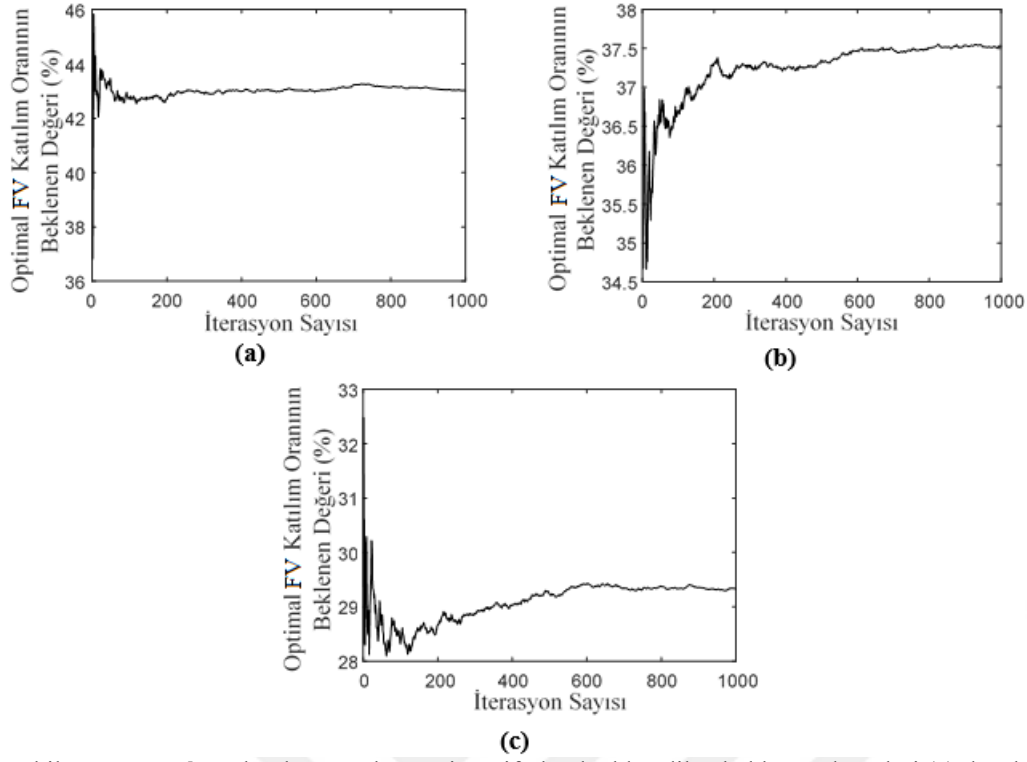
Baralar	Optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri (kW)		
	Düşük güneş ışınlımı senaryosu	Orta güneş ışınlımı senaryosu	Yüksek güneş ışınlımı senaryosu
2	119.05	120.88	100.26
3	102.81	91.16	51.67
4	103.14	94.22	54.94
5	35.53	21.78	29.78
6	38.52	25.94	30.41
7	10.38	3.26	12.10

Bu çalışmada göz önünde bulundurulan bütün senaryolarda, optimal FV çıkış güçlerinin iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri Şekil 4.7’de verilmiş olup, optimal FV katılım oranlarının iteratif olarak belirlenen beklenen değerleri Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

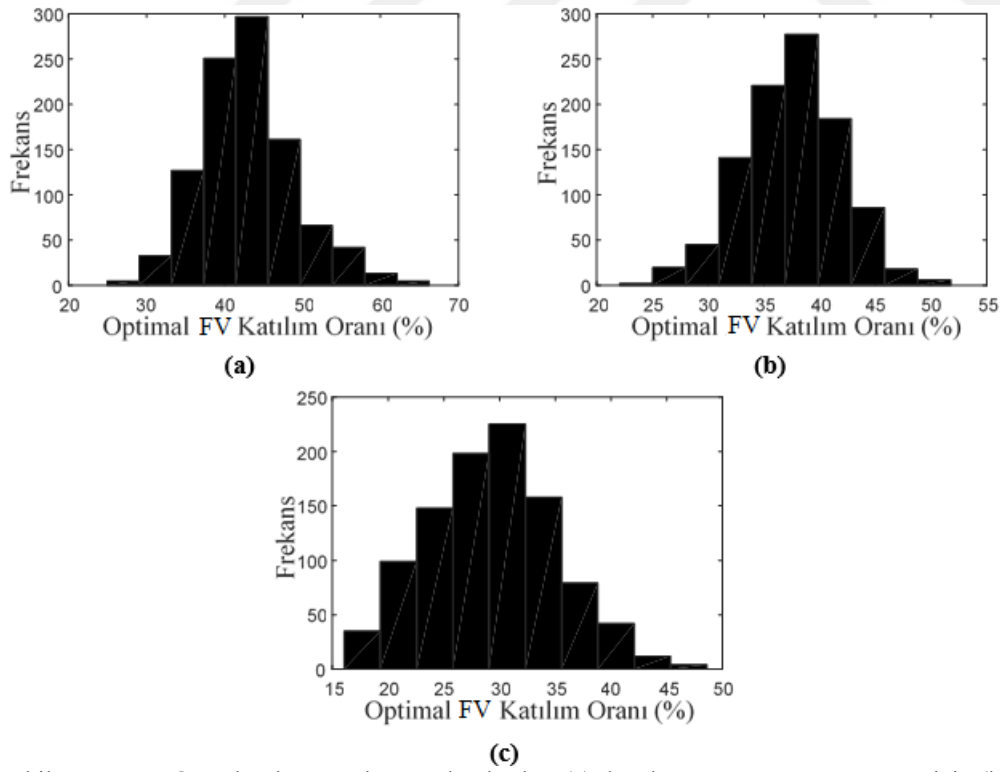
Şekil 4.7 ve 4.8’de görüldüğü üzere, optimal FV sistem çıkış güçleri ve katılım oranları beklenen değerlerine yakınsamıştır. Optimal FV katılım oranlarının MCS ile gerçekleştirilen planlamada elde edilen dağılımları, bütün senaryolar için Şekil 4.9’da sunulmuştur. Optimal FV katılım oranlarının beklenen değerleri, sırasıyla düşük güneş ışınımı senaryosu için % 43.01, orta güneş ışınımı senaryosu için % 37.53 ve yüksek güneş ışınımı senaryosu için % 29.33 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.7 Optimal FV çıkış güçlerinin iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri (a) düşük güneş ışınımı senaryosu için (b) orta güneş ışınımı senaryosu için (c) yüksek güneş ışınımı senaryosu için

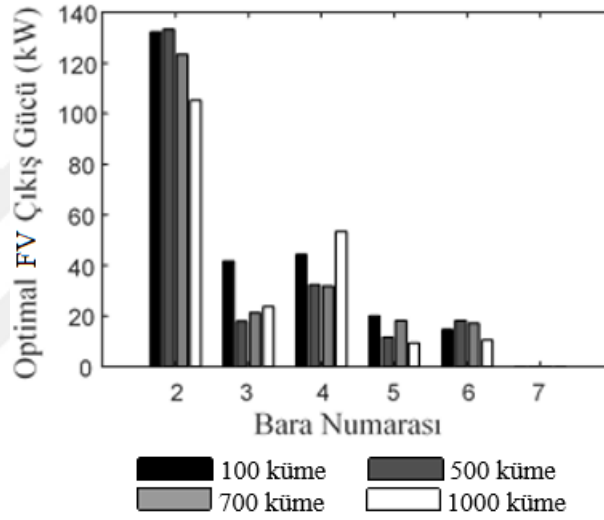


Şekil 4.8 Optimal FV katılım oranlarının iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri (a) düşük güneş ışınımı senaryosu için (b) orta güneş ışınımı senaryosu için (c) yüksek güneş ışınımı senaryosu için



Şekil 4.9 Optimal FV katılım oranlarının dağılımları (a) düşük güneş ışınımı senaryosu için (b) orta güneş ışınımı senaryosu için (c) yüksek güneş ışınımı senaryosu için

Bu tez çalışmasının düşük güneş ışınımı senaryosunda, 10000 farklı güneş ışınımı ve yük profili verilerine k – ortalamalar kümeleme yöntemi uygulanarak 100 kümeden 1000 kümeye kadar 10 farklı durum oluşturulmuştur. K – ortalamalar kümeleme yönteminin IP optimizasyon tekniği ile uygulanması sonucu, dağıtım şebekesindeki FV sistemlerin optimal çıkış güçleri, 100, 500, 700 ve 1000 küme için Şekil 4.10’da verilmiştir. Optimal FV katılım oranları, 100 küme için % 26.56, 500 küme için % 22.39, 700 küme için % 22.23 ve 1000 küme için % 21.25 olarak elde edilmiştir. Optimal FV katılım oranı, küme sayısı sayısı arttıkça azalmaktadır. Küme sayısının artırılması ile birlikte, harmonik parametreleri açısından en kötü koşulların ortaya çıkması optimal FV katılım oranı üzerinde limitleyici etkiye sahip olmaktadır.



Şekil 4.10 Düşük güneş ışınımı senaryosunda farklı sayılarda kümeler için optimal FV çıkış güçleri

Bu çalışmada göz önünde bulundurululan bütün güneş ışınımı senaryolarında, IP yönteminin k – ortalamalar kümeleme yöntemi ile elde edilen 1000 küme için uygulanması sonucu FV sistemlerin optimal çıkış güçleri Tablo 4.2’de verildiği gibi belirlenmiştir. Tablo 4.2’de verilen sonuçlara bakıldığında, FV sistemlerin optimal katılım oranları düşük güneş ışınımı senaryosunda % 21.25, orta güneş ışınımı senaryosunda % 19.74 ve yüksek güneş ışınımı senaryosunda % 17.48 olarak belirlenmiştir. K – ortalamalar kümeleme tabanlı optimizasyon yönteminde bütün güneş ışınımı ve yük durumlarına karşılık gelen kısıt fonksiyonları aynı anda göz önünde bulundurulurken, MCS tabanlı optimizasyon yönteminde her bir durum ayrı ayrı ele alınmaktadır. Bu nedenle, IP yönteminin k – ortalamalar kümeleme ile gerçekleştirilmesi sonucu elde edilen optimal FV katılım oranı değerleri, bu yöntemin MCS ile gerçekleştirildiği duruma göre daha düşük olmaktadır. Patsalides et al. (2012), yaptıkları çalışmada FV sistemlerin bulunduğu dağıtım şebekesinde gerilimdeki harmonik bozulmalar açısından en

kötü koşulların yüksek güneş ışıınımı koşullarında gözleendiği sonucuna ulaşmışlardır. Yüksek güneş ışıınımı durumunda, harmonik kısıtları optimal FV katılım oranı üzerinde diğere durumlara göre daha fazla limitleyici etkiye sahiptir. Bu nedenle, k – ortalamalar kümeleme ve MCS tabanlı optimizasyon yöntemlerinde en yüksek FV katılım oranları, düşük güneş ışıınımı durumlarında elde edilmektedir.

Tablo 4.2 Düşük, orta ve yüksek güneş ışıınımı senaryoları için optimal FV çıkış güçleri

Baralar	Optimal FV çıkış güçleri (kW)		
	Düşük güneş ışıınımı senaryosu	Orta güneş ışıınımı senaryosu	Yüksek güneş ışıınımı senaryosu
2	105.29	133.33	133.33
3	23.70	34.10	25.73
4	53.43	15.60	7.37
5	9.42	0	0
6	10.41	4.85	0
7	0	0	0

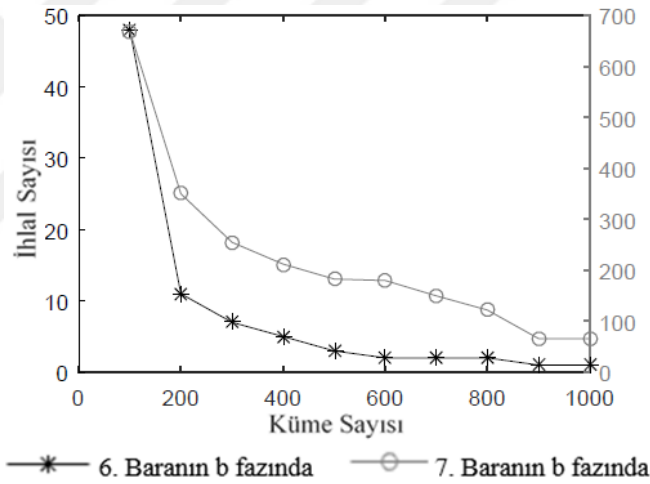
Önerilen yöntemleri test etmek için, FV sistemlerin çıkış güçlerinin üst limitleri optimizasyon algoritmasını uygulamadan önce harmonik parametrelerindeki ihlal sayılarını belirlemek için dağıtım şebekesine bağlanmıştır. Optimizasyon işlemi uygulandıktan sonra ise, IP yönteminin sırasıyla MCS ve k – ortalamalar kümeleme ile uygulanması sonucu elde edilen FV sistemlerin çıkış güçlerinin beklenen değerleri ve optimal değerleri, bütün senaryolarda ihlal sayılarını hesaplamak için dağıtım sistemine entegre edilmiştir. Düşük güneş ışıınımı senaryosunda elde edilen optimizasyon sonuçları için harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları Tablo 4.3’te verilmiştir.

Tablo 4.3 Düşük güneş ışıınımı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları

Baralar	İhlal sayıları					
	FV çıkış güçlerinin üst limitleri için		Optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri için		Optimal FV çıkış güçleri için	
	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵
5(b)	5885	2960	-	-	-	-
6(a)	865	189	-	-	-	-
6(b)	9989	9999	-	5107	-	1
6(c)	1166	555	-	-	-	-
7(a)	1116	226	-	-	-	-
7(b)	9999	10000	7	9005	-	66
7(c)	1245	575	-	-	-	-

Tablo 4.3’te görüldüğü gibi, optimizasyon algoritmaları uygulanmadan önce gerilimdeki toplam harmonik bozulma (THDV) ve 5. harmonik için gerilimdeki tekil harmonik bozulma (IHDV⁵) değerlerinde ihlallerin olduğu belirlenmiştir. Optimizasyon işlemi gerçekleştirildikten sonra THDV ihlalleri büyük ölçüde

azaltılmıştır. Aynı zamanda, optimizasyon algoritmalarının uygulanması sonucu IHDV⁵ ihlalleri minimize edilmiştir. Bununla birlikte, dengesiz üç fazlı 7 baralı dağıtım şebekesinde harmonik akımlara hassas olan 6. ve 7. baraların b fazlarında ihlallerin olduğu görülmüştür. IP yönteminin MCS ile bağlantılı olarak uygulanması ile elde edilen optimizasyon sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, ihlallerin risk alınarak minimize edildiği anlaşılmıştır. Ayrıca, optimizasyon işleminin öncesinde ve sonrasında, 5. harmonik dışındaki IHDV^h değerlerinde ve RMS gerilimlerinde ihlal saptanmamıştır. THDV ihlalleri, IP optimizasyon işleminin k – ortalamalar kümeleme yöntemi ile uygulanması sonucu tamamen minimize edilmiştir. Ayrıca, IHDV⁵ ihlalleri optimizasyon algoritmasının uygulanması ile büyük oranda minimize edilmiştir. Dağıtım şebekesinin 6. ve 7. baralarının b fazındaki ihlal sayılarının optimizasyon işlemlerinde göz önünde bulundurulan küme sayılarına bağlı değişimi Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11 Düşük güneş ışınımı senaryosunda şebekenin 6. ve 7. baralarının b fazında IHDV⁵ ihlal sayılarının küme sayısına bağlı değişimi

Bu tez çalışmasında, k – ortalamalar kümeleme yöntemi güneş ışınımı ve yük profili durumları arasındaki korelasyonu sağlayarak daha az sayıda veri ile temsil edilmelerini sağlamaktadır. Küme sayısı arttıkça hesaplama yükü artmasına rağmen, orijinal veri daha verimli bir şekilde temsil edilebilmektedir. Küme sayısının artmasıyla birlikte, daha iyi optimal sonuçlar elde edilebilmektedir. Bunun sonucunda, harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları azaltılabilmektedir. Şekil 4.11’de görüldüğü üzere, 1000 kümeden daha yüksek küme sayılarında ihlal sayılarındaki değişimler çok düşük olduğundan, k – ortalamalar kümeleme tabanlı optimizasyonda 1000 küme yeterli görülmüştür. Bu çalışmada, MCS ve k – ortalamalar kümeleme tabanlı optimizasyonlardan elde edilen sonuçlar kullanılarak belirlenen harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları, orta güneş

ışınımı senaryosu için Tablo 4.4'te ve yüksek güneş ışınımı senaryosu için Tablo 4.5'te gösterilmiştir.

Tablo 4.4 Orta güneş ışınımı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları

Baralar	İhlal sayıları					
	FV çıkış güçlerinin üst limitleri için		Optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri için		Optimal FV çıkış güçleri için	
	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵
5(b)	5563	5593	-	-	-	-
6(a)	87	474	-	-	-	-
6(b)	10000	10000	-	4101	-	-
6(c)	390	1374	-	-	-	-
7(a)	133	532	-	-	-	-
7(b)	10000	10000	-	8693	-	42
7(c)	451	1438	-	-	-	-

Tablo 4.5 Yüksek güneş ışınımı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları

Baralar	İhlal sayıları					
	FV çıkış güçlerinin üst limitleri için		Optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri için		Optimal FV çıkış güçleri için	
	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵
5(a)	-	337	-	-	-	-
5(b)	7356	9899	-	-	-	-
5(c)	-	1354	-	-	-	-
6(a)	539	8248	-	-	-	-
6(b)	9999	10000	-	8861	-	-
6(c)	2193	9209	-	-	-	-
7(a)	762	8397	-	-	-	-
7(b)	9999	10000	-	9841	-	301
7(c)	2287	9226	-	-	-	-

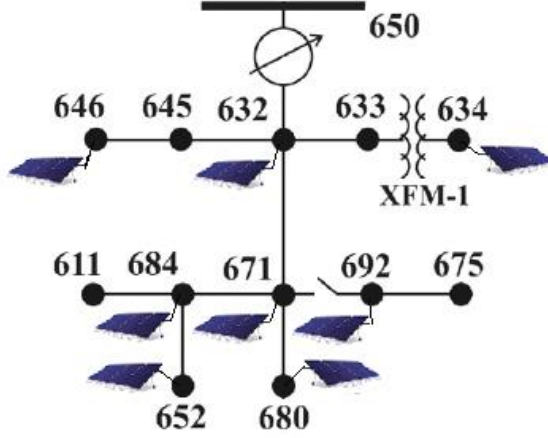
Tablo 4.4 ve 4.5'te görüldüğü gibi, THDV ihlalleri optimizasyon algoritmalarının uygulanması sonucu tamamen minimize edilmiştir. Ayrıca, IHDV⁵ ihlalleri FV sistemlerin çıkış güçlerinin optimal değerlerinin şebekeye bağlanması durumunda, bu sistemlerin çıkış güçlerinin beklenen değerlerinin şebekeye entegre edildiği duruma göre büyük oranda minimize edilmiştir. Orta güneş ışınımı senaryosunda, FV sistem çıkış güçlerinin üst limitleri için elde edilen IHDV⁵ ihlal sayıları, düşük güneş ışınımı senaryosunda belirlenenlere göre daha yüksek olmuştur. Bu nedenle, orta güneş ışınımı senaryosunda elde edilen IHDV⁵ değerleri optimal FV katılım oranı üzerinde düşük güneş ışınımı senaryosundaki değerlere göre daha fazla limitleyici etkiye sahip olmuştur. Yüksek güneş ışınımı senaryosunda, FV çıkış güçlerinin üst limitleri için IHDV⁵ ihlal sayıları ise, düşük ve orta güneş ışınımı senaryolarında elde edilenlere göre daha büyük olmuştur. Optimizasyon gerçekleştirilmeden önce, düşük ve orta güneş ışınımı senaryolarında ihlallerin görüldüğü noktalara ek olarak, yüksek güneş ışınımı senaryosunda şebekenin 5. barasının a ve c fazlarında da IHDV⁵ ihlalleri gözlenmiştir. Ayrıca, yüksek güneş ışınımı senaryosunda görülen THDV

ihlal sayıları, orta güneş ışınlamı senaryosunda belirlenenlere göre daha yüksek olmuştur. Bu nedenle, yüksek güneş ışınlamı senaryosundaki THDV ve IHDV⁵ ihlalleri optimal FV katılım oranı üzerinde diğer senaryolara göre daha fazla limitleyici etkiye sahip olmuştur. Olasılıksal optimizasyon yönteminin sonuçları kullanılarak ihlaller belirli bir oranda azaltılabilmektedir. Bütün senaryolarda doğrusal olmayan yükler göz önünde bulundurulduğundan, FV sistemlerin optimal çıkış güçlerinin beklenen değerleri şebekeye bağlandığında harmonik akımlara hassas baralarda ihlaller gözlenmiştir. Bununla birlikte, deterministik optimizasyon yönteminde bütün güneş ışınlamı ve yük profili durumlarına karşılık gelen kısıtlar amaç fonksiyonu ile birlikte aynı anda göz önünde bulundurulduğundan bu ihlaller deterministik optimizasyon sonuçları kullanılarak minimize edilmiştir.

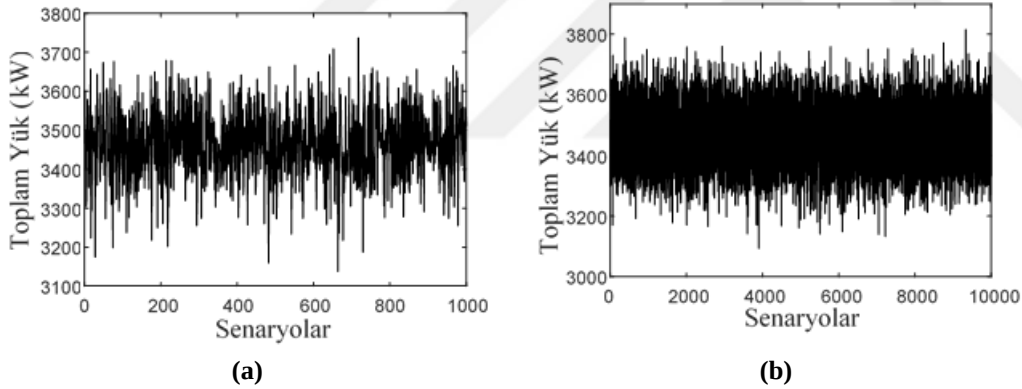
4.3.3 Dengesiz üç fazlı 13 baralı dağıtım şebekesi

Bu çalışmada kullanılan dengesiz üç fazlı 13 baralı dağıtım şebekesi Şekil 4.12’de verilmiş olup, FV sistemlerin aday baraları ilgili şebeke üzerinde gösterilmiştir (Mahela and Shaik, 2017). Şönt kapasitörlerin dağıtım sisteminde bulunmadığı kabul edilmiştir. Dağıtım şebekesinin toplam yükünün aktif gücü 3466 kW değerindedir. Dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesinde, MCS ve k – ortalamalar kümeleme ile uygulanan yöntemlerde kullanılan toplam yük profilleri Şekil 4.13’te gösterilmiştir. ASD ve VFD isimli doğrusal olmayan yüklerin güçleri, sırasıyla şebekedeki toplam yükün % 2’si ve % 5’i olarak kabul edilmiştir. Literatürde, evirici tabanlı DEÜ sistemlerinin aday baraları, dağıtım şebekesinin bütün baraları arasından rastgele seçilmektedir (Pandi et al., 2013b). MCS ile gerçekleştirilen optimizasyon yönteminde, FV sistemlerin optimal çıkış güçlerinin dağılımları, düşük, orta ve yüksek güneş ışınlamı senaryoları için sırasıyla Şekil 4.14, 4.15 ve 4.16’da verilmiştir. FV sistemlerin şebekedeki optimal çıkış güçlerinin beklenen değerleri Tablo 4.6’da sunulmuştur. Optimal FV çıkış güçlerinin ve katılım oranlarının iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri, sırasıyla Şekil 4.17 ve 4.18’de verilmiştir. Şekil 4.17 ve 4.18’de görüldüğü gibi, optimal FV çıkış güçlerinin ve katılım oranlarının beklenen değerlerine yakınsadıkları sonucuna ulaşılmıştır. Olasılıksal optimizasyon yönteminden elde edilen sonuçlara göre, optimal FV katılım oranlarının dağılımları Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Optimal FV katılım oranlarının beklenen değerleri, sırasıyla düşük güneş ışınlamı senaryosunda % 63.06, orta güneş ışınlamı senaryosunda % 54.81 ve yüksek güneş ışınlamı senaryosunda % 43.57 olarak belirlenmiştir. K – ortalamalar kümeleme tabanlı optimizasyon yönteminin

sonuçları Tablo 4.7’de verilmiştir. Bu yöntemde, optimal FV katılım oranları, sırasıyla düşük güneş ışınlımı senaryosu için % 38.08, orta güneş ışınlımı senaryosu için % 34.23 ve yüksek güneş ışınlımı senaryosu için % 28.26 olarak elde edilmiştir.



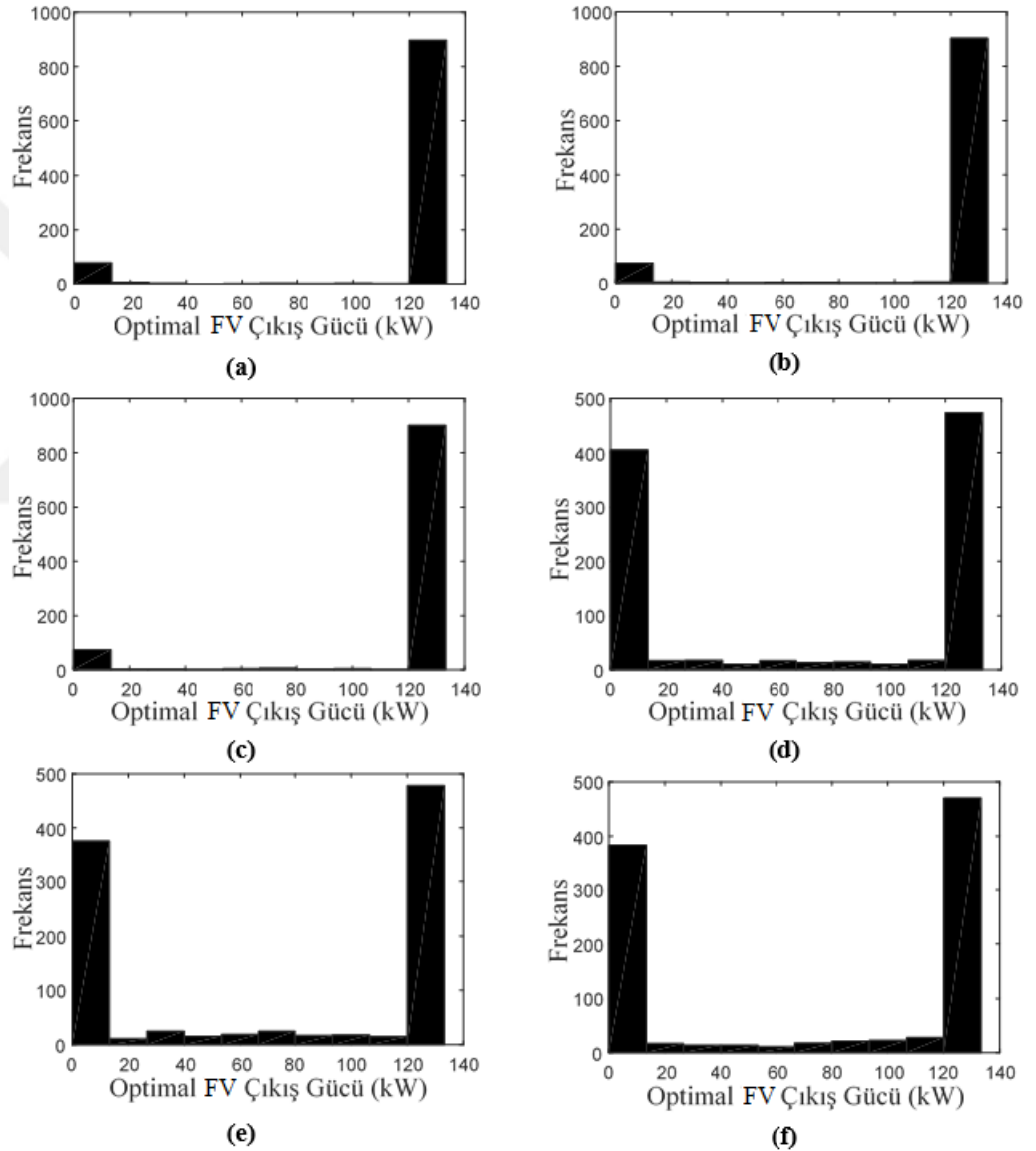
Şekil 4.12 Dengesiz üç fazlı 13 baralı dağıtım şebekesi



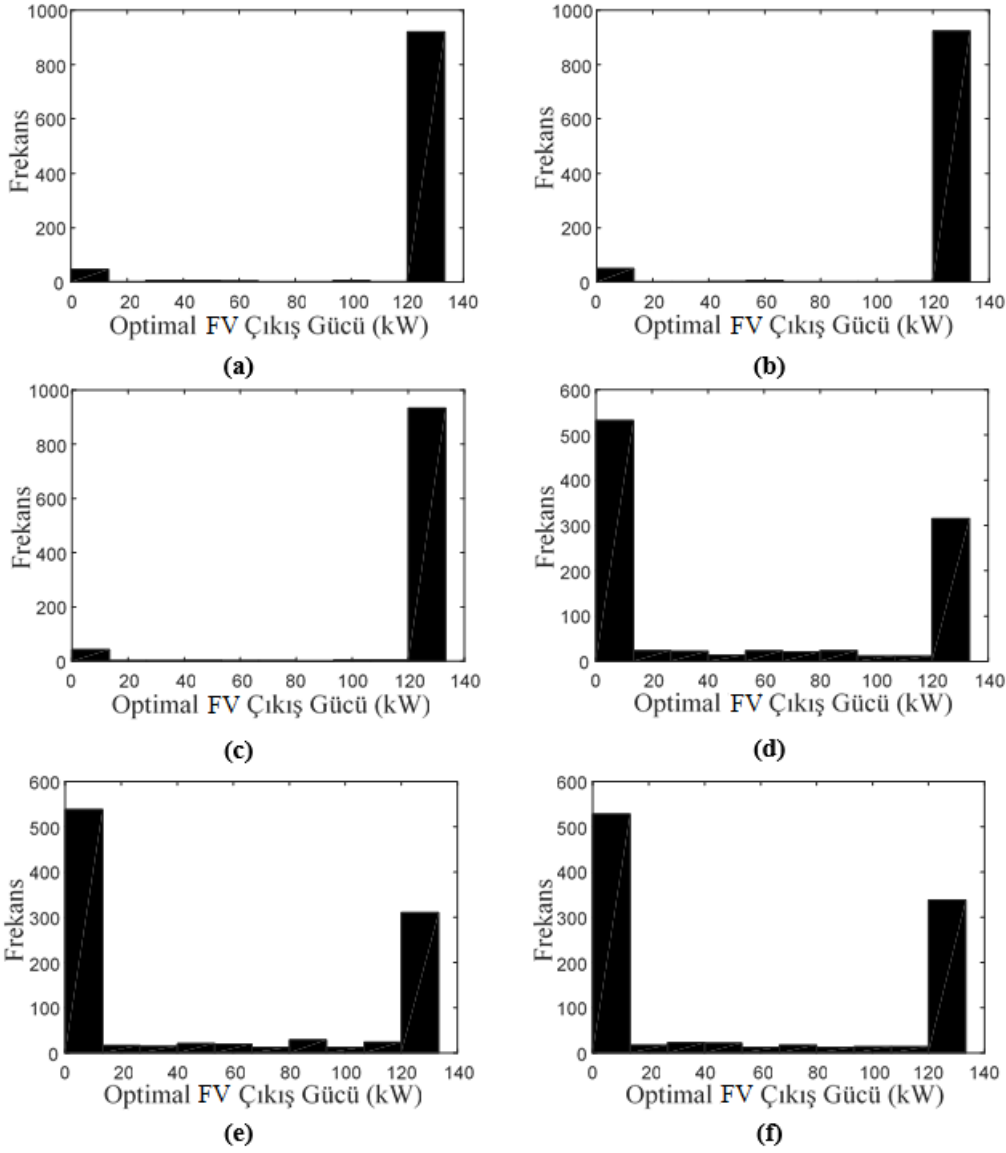
Şekil 4.13 13 baralı sistemin (a) MCS (b) k – ortalamalar kümeleme yöntemlerinde kullanılan yük profilleri

Yük taleplerine aktarılan gücün verimliliği açısından önemli noktalardan biri olan dağıtım şebekelerinde gerçekleştirilen harmonik çalışmaları bu şebekelerde çözülmeye çalışılan problemler arasında önemli bir yere sahiptir. FV sistemleri ile farklı alanlarda uygulamalar bulan bu çalışmalar, güç kalitesi ile ilgili yapılan araştırmalar içerisinde önemini giderek artırmaktadır. Doğrusal olmayan yükler ve güç elektroniği eviricisi donanımına sahip FV sistemler güç kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu kapsamda, FV sistemlerin doğrusal olmayan yüklerin de bağlı bulunduğu dağıtım şebekelerinde güç taleplerinin tamamını karşılamaları durumunda toplam harmonik bozulmalar da yüksek seviyelere gelmektedir. FV sistemlerin dağıtım şebekelerine optimal bağlantıları, şebekedeki harmonik bozulmaların limitler dahilinde tutulabilmesi açısından

önemlidir. Bununla birlikte, bu kaynakların şebekelerdeki kurulumlarının yükselmesi IEEE 519 standartlarında belirtilmiş olan harmonik limitlerinin ihlal edilmesine yol açmaktadır. Bu anlamda, optimal FV sistem katılım oranlarının harmonik parametreleri göz önünde bulundurularak belirlenmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, harmonik bozulmaların görüldüğü aktif dağıtım sistemlerinde yük belirsizliği ve güneş ışınımının değişkenliği ele alınarak optimal FV katılım oranlarının elde edilmesi için optimizasyon yaklaşımları önerilmiştir. Bu yaklaşımlar, şebekelerin doğru bir şekilde planlanması açısından önemlidir.

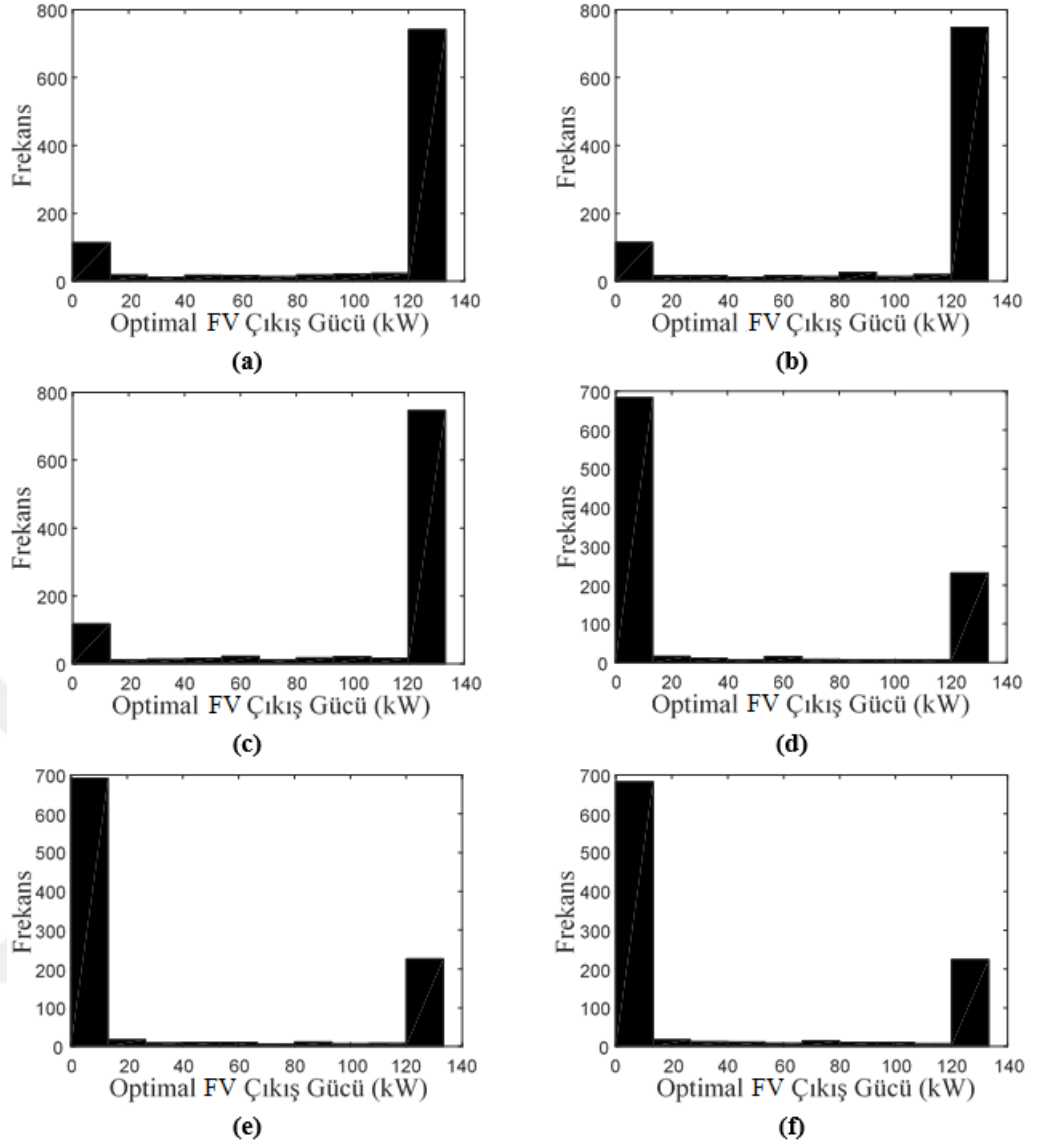


Şekil 4.14 Düşük güneş ışınımı senaryosu için 13 barlı sistemin (a) 632., (b) 634., (c) 646., (d) 671., (e) 692., (f) 684. barlarındaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları



Şekil 4.15 Orta güneş ışınımı senaryosu için 13 baralı sistemin (a) 632., (b) 634., (c) 646., (d) 671., (e) 692., (f) 684. baralarındaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları

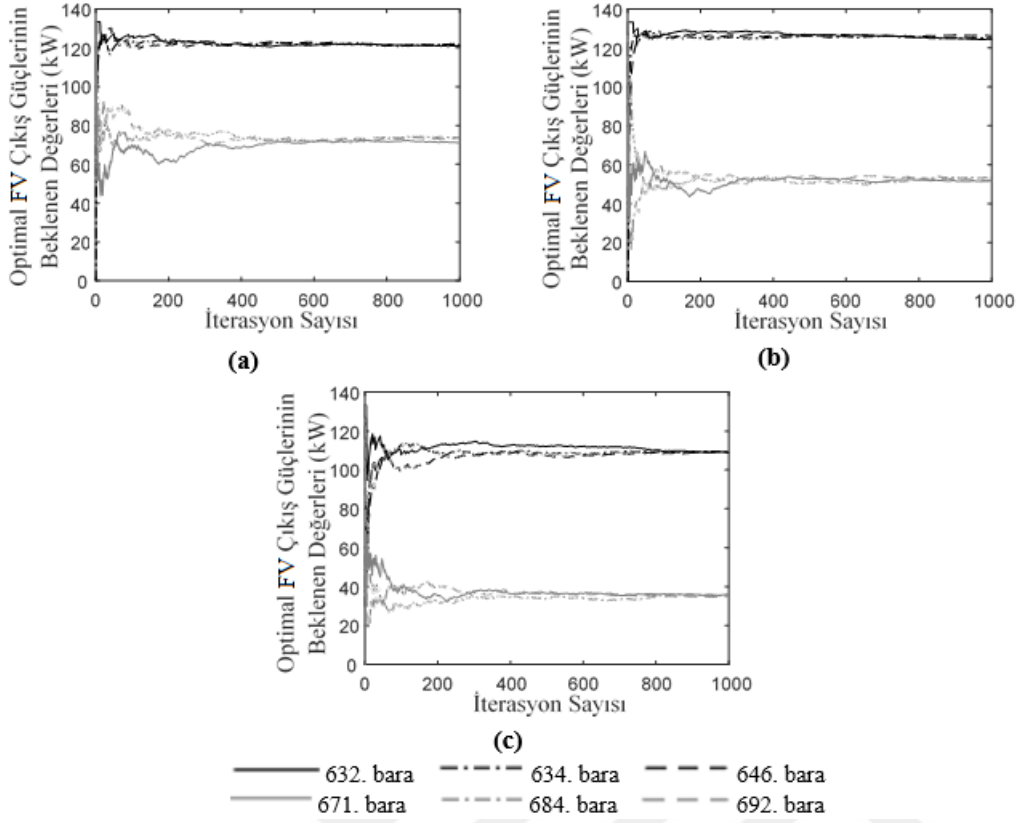
Yenilenebilir enerji kaynakları arasında gelecek vaat eden teknolojilerden biri olan FV sistemler, dağıtım sistemlerinde güç taleplerinin artmasıyla birlikte sürekli önem kazanmaktadır. Dağıtım sistemlerine güç elektroniği dönüştürücüleri ile entegre edilen DEÜ sistemleri geniş kullanım alanına sahip olmaktadır. FV sistemlerin bağlı bulundukları dağıtım şebekelerindeki güç talebini karşılamalarına rağmen, bu şebekelerde olumsuz etkileri de görülebilmektedir. Dağıtım şebekelerindeki FV sistemlerin katılım oranlarının büyük ölçüde yükselmesi, bu şebekelerde güç kalitesi açısından problemlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Dağıtım şebekelerinde FV sistemlerin büyük oranda entegre edilmesi ve bu sistemlerin dağıtım şebekelerine doğrusal olmayan yükler ile entegrasyonu sonucu harmonikler yüksek seviyelere ulaşarak dağıtım sisteminin verimliliği ve güvenilirliği açısından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır.



Şekil 4.16 Yüksek güneş ışıınımı senaryosu için 13 baralı sistemin (a) 632., (b) 634., (c) 646., (d) 671., (e) 692., (f) 684. baralarındaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları

Tablo 4.6 13 baralı sistemde düşük, orta ve yüksek güneş ışıınımı senaryoları için optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri

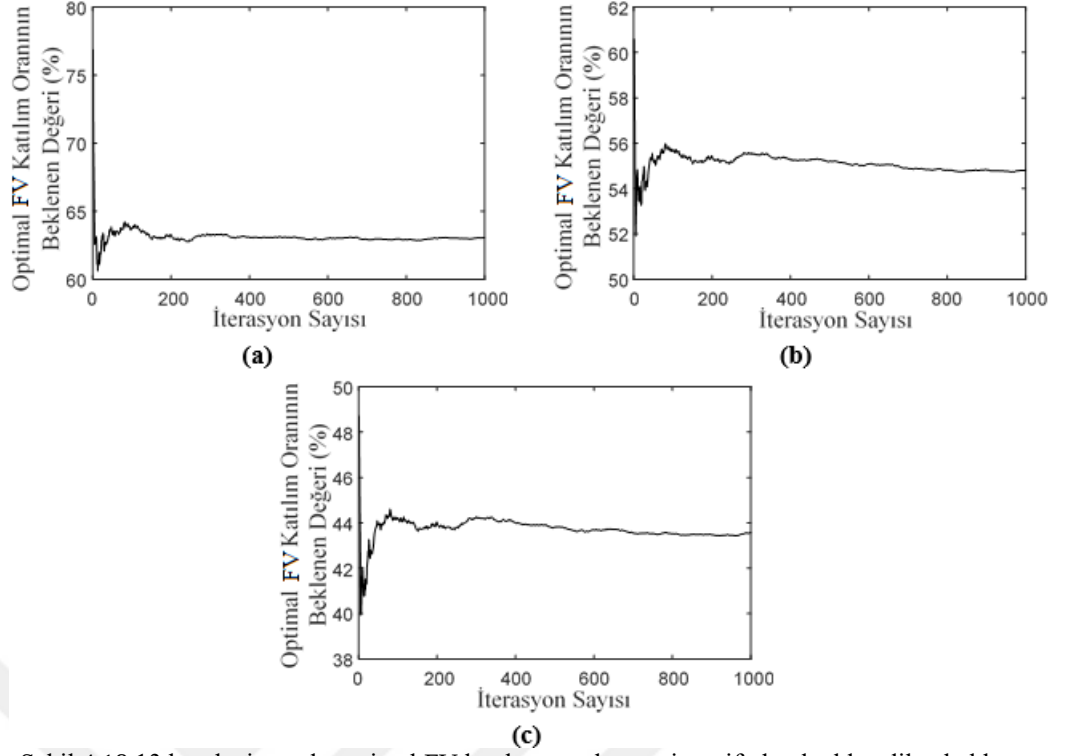
Baralar	Optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri (kW)		
	Düşük güneş ışıınımı senaryosu	Orta güneş ışıınımı senaryosu	Yüksek güneş ışıınımı senaryosu
632	121.08	124.66	108.95
634	121.79	124.92	109.20
646	121.68	126.13	108.99
671	71.05	51.51	35.96
692	73.39	51.96	35.09
684	73.59	53.39	35.49
680	71.60	48.79	34.82
652	74.36	51.85	34.87



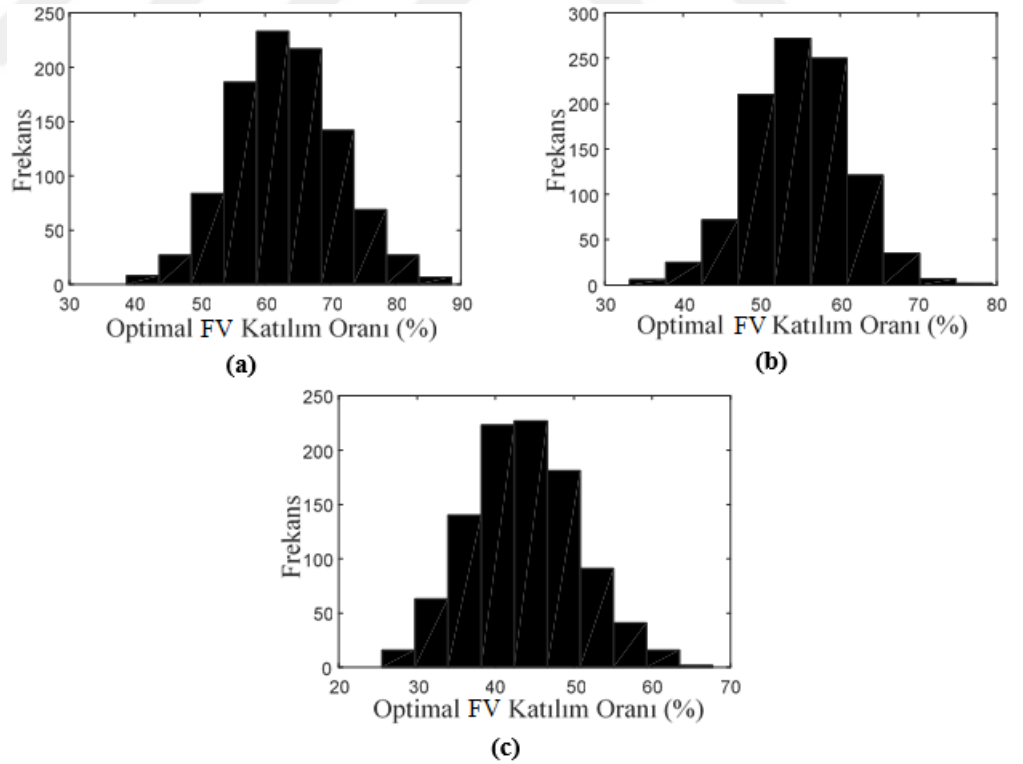
Şekil 4.17 13 baralı sistemde optimal FV çıkış güçlerinin iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri (a) düşük güneş ışınlımı senaryosu için (b) orta güneş ışınlımı senaryosu için (c) yüksek güneş ışınlımı senaryosu için

Dağıtım şebekeleri, ana bileşenlerinden olan yüklerin ve hatların yapıları gereği dengesiz üç fazlı yapıya sahip olmaktadır. Bu şebekelerde, dengesiz üç fazlı yüklere iletkenleri arasındaki uzaklıkların eşit olmadığı üç fazlı hatlar üzerinden güç sağlanmaktadır. Bu nedenle, dağıtım sistemlerinde hat akımları ve bara gerilimleri dengesiz üç fazlı yapıda olmaktadır. Dağıtım şebekelerinin dengeli üç fazlı olduğu göz önünde bulundurularak tek faz sistemde uygulanan güç akışı analizleri, bu şebekelerin dengesiz yapıya sahip olmalarından dolayı yeterli sonuçlar vermeyebilmektedir. İlgili şebekelerde güç akışı analizlerinden doğru sonuçların elde edilebilmesi için bu şebekelerin üç fazlı modellerinin ele alınması gerekmektedir.

Son yıllarda, dağıtım şebekelerinde güç elektroniği cihazlarının yaygın olarak kullanılmalarından dolayı, akım ve gerilimler sinüzoidal yapılarından gittikçe uzaklaşmaktadır. Bu durum, şebekelerdeki son kullanıcılara iletilen gücün kalitesi açısından olumsuz etkilere yol açmaktadır. Bu kapsamda, harmonik güç akışı çalışmaları, dağıtım sistemlerinin harmonik bozulmalar göz önünde bulundurularak analiz edilmesi ve tasarlanması açısından bakıldığında önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 4.18 13 baralı sistemde optimal FV katılım oranlarının iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri (a) düşük güneş ışınlamı senaryosu için (b) orta güneş ışınlamı senaryosu için (c) yüksek güneş ışınlamı senaryosu için



Şekil 4.19 13 baralı sistemde optimal FV katılım oranlarının dağılımları (a) düşük güneş ışınlamı senaryosu (b) orta güneş ışınlamı senaryosu (c) yüksek güneş ışınlamı senaryosu

Tablo 4.7 13 baralı sistemde düşük, orta ve yüksek güneş ışınlımı senaryoları için optimal FV çıkış güçleri

Baralar	Optimal FV çıkış güçleri (kW)		
	Düşük güneş ışınlımı senaryosu	Orta güneş ışınlımı senaryosu	Yüksek güneş ışınlımı senaryosu
632	133.33	95.43	115.84
634	115.31	133.33	63.42
646	106.76	133.33	133.33
671	0	0	13.90
692	40.24	19.74	0
684	16.36	13.62	0
680	0	0	0
652	27.96	0	0

Kümeleme işlemine dayalı optimizasyon yönteminde güç kalitesi açısından en kötü koşullar dahil bütün durumlar aynı anda göz önünde bulundurulduğundan, optimal FV katılım oranları MCS tabanlı optimizasyon yönteminde daha yüksek olmuştur. Önerilen yöntemlerde, yüksek güneş ışınlımı koşulları gerilimdeki harmonik bozulmaların yükselmesine neden olduğundan optimal FV katılım oranlarını diğer güneş ışınlımı koşullarına göre daha fazla kısıtlamıştır. Optimizasyon sonuçları, harmonik parametrelerindeki ihlal sayılarını belirlemek için test edilmiştir. İhlal sayıları, düşük, orta ve yüksek güneş ışınlımı senaryoları için sırasıyla Tablo 4.8, 4.9 ve 4.10'da gösterilmiştir. Güneş ışınlımı ve yük senaryolarına karşılık gelen harmonik kısıt fonksiyonları olasılıksal yöntemin her bir iterasyonunda ayrı ayrı ele alınırken, bu kısıt fonksiyonları deterministik yöntemde aynı anda göz önünde bulundurulmaktadır. Tablo 4.8, 4.9 ve 4.10'da görüldüğü gibi, kümeleme tabanlı optimizasyon yöntemi bütün senaryolarda IHDV⁵ ihlallerini MCS tabanlı optimizasyon işlemine göre daha iyi minimize etmiştir. Ayrıca, THDV ihlalleri her iki önerilen yöntemde de büyük oranda azaltılmıştır. Dağıtım şebekesine FV sistemlerin çıkış güçlerinin üst limitleri ve optimal değerleri bağlandığında, 5. harmonik dışındaki IHDV^h değerleri ve RMS gerilimleri limitleri dahilinde olduğundan bu harmonik parametrelerinde ihlal gözlenmemiştir. FV sistem çıkış güçlerinin üst limitleri için IHDV⁵ ve THDV ihlal sayıları, yüksek güneş ışınlımı senaryosunda en fazla iken, düşük güneş ışınlımı senaryosunda en az olmuştur. Bu nedenle, optimal FV katılım oranları yüksek güneş ışınlımı senaryosunda diğer senaryolara göre daha fazla limitlenmiştir.

Elektrik dağıtım şebekelerindeki harmonik bozulmalar, FV sistemlerin bu şebekelere entegrasyonunun giderek artması sonucu bu kaynakların yapılarında bulunan evirici arayüzlerinden dolayı artmaktadır. Bunun yanı sıra, dağıtım sistemlerinde büyük ölçüde kullanılan doğrusal olmayan yüklerin bu harmonik bozulmalarda önemli bir rolü bulunmaktadır. Bu şebekelerde enerji taleplerinin

sürekli artmasının bir sonucu olarak güç kalitesi önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Güç kalitesi, dağıtım şebekelerinin dengesiz yapılarından, FV sistemlerin çıkış güçlerinin süreksizliğinden, bu kaynakların akım ve gerilim harmoniklerinin güneş ışınımına bağlılığından etkilenmektedir.

Tablo 4.8 13 baralı sistemde düşük güneş ışınımı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları

Baralar	İhlal sayıları					
	FV çıkış güçlerinin üst limitleri için		Optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri için		Optimal FV çıkış güçleri için	
	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵
671(a)	3438	9930	-	5389	-	4
671(b)	3082	9843	-	4523	-	5
671(c)	490	8643	-	1017	-	-
692(a)	3438	9930	-	5389	-	4
692(b)	3082	9843	-	4523	-	5
692(c)	490	8643	-	1017	-	-
675(a)	6150	9992	3	8630	-	192
675(b)	5435	9981	1	7773	-	101
675(c)	1592	9697	-	3158	-	2
684(a)	5271	9974	-	6605	-	19
684(b)	4752	9927	-	5706	-	10
684(c)	1232	9197	-	1643	-	-
611(a)	5636	9981	-	7025	-	27
611(b)	5084	9947	-	6118	-	13
611(c)	1414	9323	-	1860	-	-
680(a)	5470	9961	-	6142	-	4
680(b)	4968	9910	-	5265	-	5
680(c)	1381	9102	-	1423	-	-
652(a)	7534	9988	3	7980	-	62
652(b)	6978	9975	1	7080	-	32
652(c)	3166	9635	-	2698	-	-

Tablo 4.9 13 baralı sistemde orta güneş ışınımı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları

Baralar	İhlal sayıları					
	FV çıkış güçlerinin üst limitleri için		Optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri için		Optimal FV çıkış güçleri için	
	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵
671(a)	5566	10000	-	4554	-	4
671(b)	5340	10000	-	3817	-	5
671(c)	1003	9957	-	366	-	-
692(a)	5566	10000	-	4554	-	4
692(b)	5340	10000	-	3817	-	5
692(c)	1003	9957	-	366	-	-
675(a)	8204	10000	-	8556	-	76
675(b)	7863	10000	-	7711	-	47
675(c)	2852	10000	-	2106	-	1
684(a)	7472	10000	-	6084	-	9
684(b)	7249	10000	-	5128	-	5
684(c)	2255	9990	-	743	-	-
611(a)	7822	10000	-	6577	-	13
611(b)	7560	10000	-	5617	-	9
611(c)	2570	9994	-	927	-	-
680(a)	7655	10000	-	5361	-	4
680(b)	7454	10000	-	4522	-	5
680(c)	2499	9986	-	570	-	-
652(a)	9222	10000	-	7622	-	19
652(b)	9013	10000	-	6787	-	12
652(c)	4955	9999	-	1533	-	-

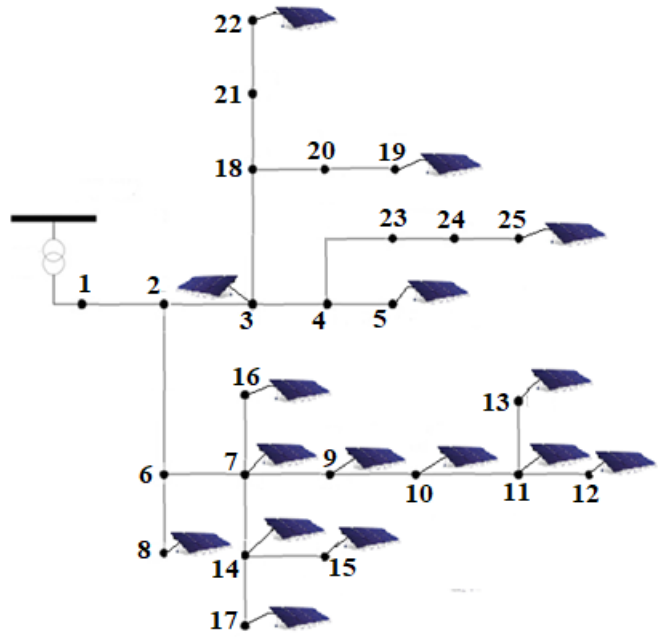
Tablo 4.10 13 baralı sistemde yüksek güneş ışınlımı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları

Baralar	İhlal sayıları					
	FV çıkış güçlerinin üst limitleri için		Optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri için		Optimal FV çıkış güçleri için	
	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵
671(a)	9543	10000	-	7891	-	10
671(b)	9530	10000	-	7279	-	5
671(c)	6805	10000	-	2041	-	-
692(a)	9543	10000	-	7891	-	10
692(b)	9530	10000	-	7279	-	5
692(c)	6805	10000	-	2041	-	-
675(a)	9909	10000	-	9618	-	505
675(b)	9856	10000	-	9326	-	281
675(c)	8597	10000	-	5683	-	-
684(a)	9838	10000	-	8712	-	25
684(b)	9802	10000	-	8177	-	15
684(c)	8247	10000	-	3152	-	-
611(a)	9871	10000	-	8914	-	47
611(b)	9832	10000	-	8450	-	26
611(c)	8445	10000	-	3586	-	-
680(a)	9857	10000	-	8365	-	10
680(b)	9817	10000	-	7821	-	5
680(c)	8425	10000	-	2704	-	-
652(a)	9969	10000	-	9323	-	76
652(b)	9953	10000	-	8974	-	50
652(c)	9375	10000	-	4734	-	-

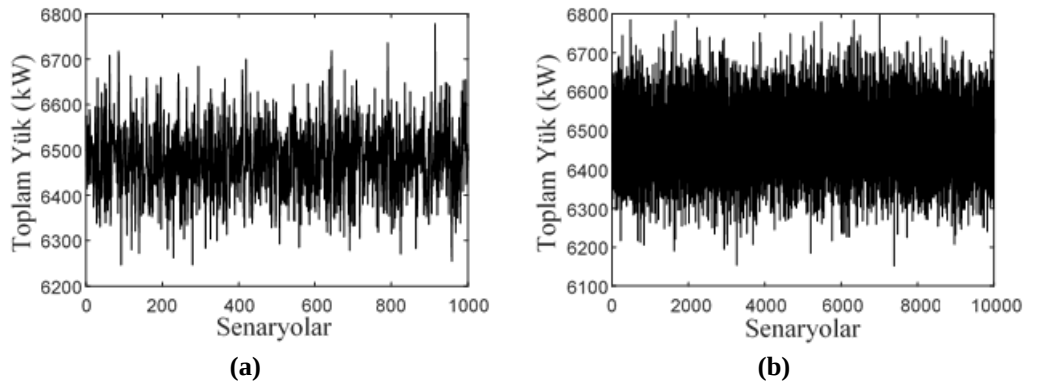
4.3.4 Dengesiz üç fazlı 25 baralı dağıtım şebekesi

Bu çalışmada göz önünde bulundurulmuş dengesiz üç fazlı 25 baralı dağıtım şebekesi Şekil 4.20’de verilmiş olup, üç fazlı FV sistemlerinin aday baraları, şebeke üzerinde gösterilmiştir (Ran and Miao, 2015). Dağıtım sisteminin toplam yükünün aktif gücü 6479.8 kW olarak kabul edilmiştir. Dağıtım şebekesinde, MCS ve k – ortalamalar kümeleme yöntemlerinde göz önünde bulundurulmuş toplam yük profilleri Şekil 4.21’de verilmiştir. Şebekede bağlı bulunduğu kabul edilen ASD ve VFD isimli doğrusal olmayan yüklerin güçleri, sırasıyla dağıtım sisteminin toplam yükünün % 3’ü ve % 7’si olarak seçilmiştir. Olasılıksal optimizasyon yöntemine göre, FV sistemlerin optimal çıkış güçlerinin dağılımları düşük, orta ve yüksek güneş ışınlımı senaryoları için sırasıyla Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24’te gösterilmiştir. FV sistemlerin optimal çıkış güçlerinin beklenen değerleri, Tablo 4.11’de verilmiştir. IP optimizasyon yönteminin MCS ile uygulanması sonucu, optimal FV çıkış güçlerinin ve katılım oranlarının iteratif olarak belirlenen beklenen değerleri sırasıyla Şekil 4.25 ve 4.26’da gösterilmiştir. Şekil 4.25 ve 4.26’da sunulan FV sistemlerin optimal çıkış güçlerine ve katılım oranlarına bakıldığında beklenen değerlerine yakınsadıkları anlaşılmıştır. MCS ile gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda, optimal FV katılım oranlarının dağılımları Şekil 4.27’de verilmiştir. Optimal FV katılım oranlarının beklenen değerleri, sırasıyla düşük güneş ışınlımı senaryosunda % 65.83, orta güneş ışınlımı

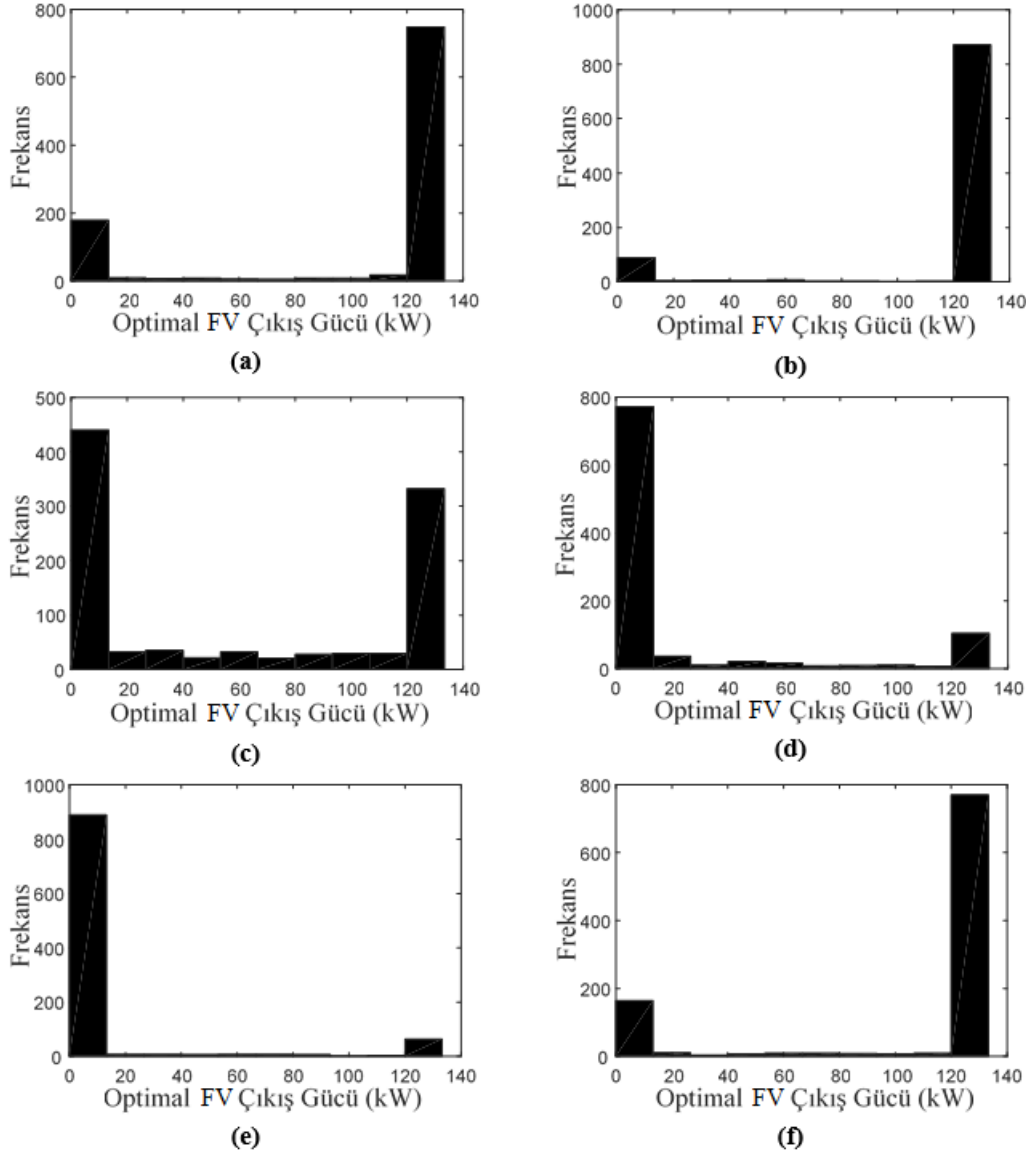
senaryosunda % 60.66 ve yüksek güneş ışıınımlı senaryosunda % 48.64 olarak belirlenmiştir. Kümeleme işlemine dayalı optimizasyon sonuçları Tablo 4.12’de sunulmuştur. Deterministik optimizasyon yönteminden elde edilen sonuçlara göre, optimal FV katılım oranları düşük güneş ışıınımlı senaryosunda % 50.48, orta güneş ışıınımlı senaryosunda % 48.37 ve yüksek güneş ışıınımlı senaryosunda % 39.07 olarak belirlenmiştir. MCS tabanlı optimizasyon yöntemi risk alınarak gerçekleştirildiğinden, olasılıksal optimizasyon yöntemi ile daha yüksek katılım oranları elde edilmiştir. Yüksek güneş ışıınımlı senaryosunda gerilimdeki harmonik bozulmalar daha yüksek olduğundan, bu senaryoda optimal FV katılım oranları diğer senaryolara göre daha fazla kısıtlanmıştır.



Şekil 4.20 Dengesiz üç fazlı 25 baralı dağıtım şebekesi



Şekil 4.21 25 baralı sistemin (a) MCS (b) k – ortalamalar kümeleme yöntemlerinde kullanılan yük profilleri

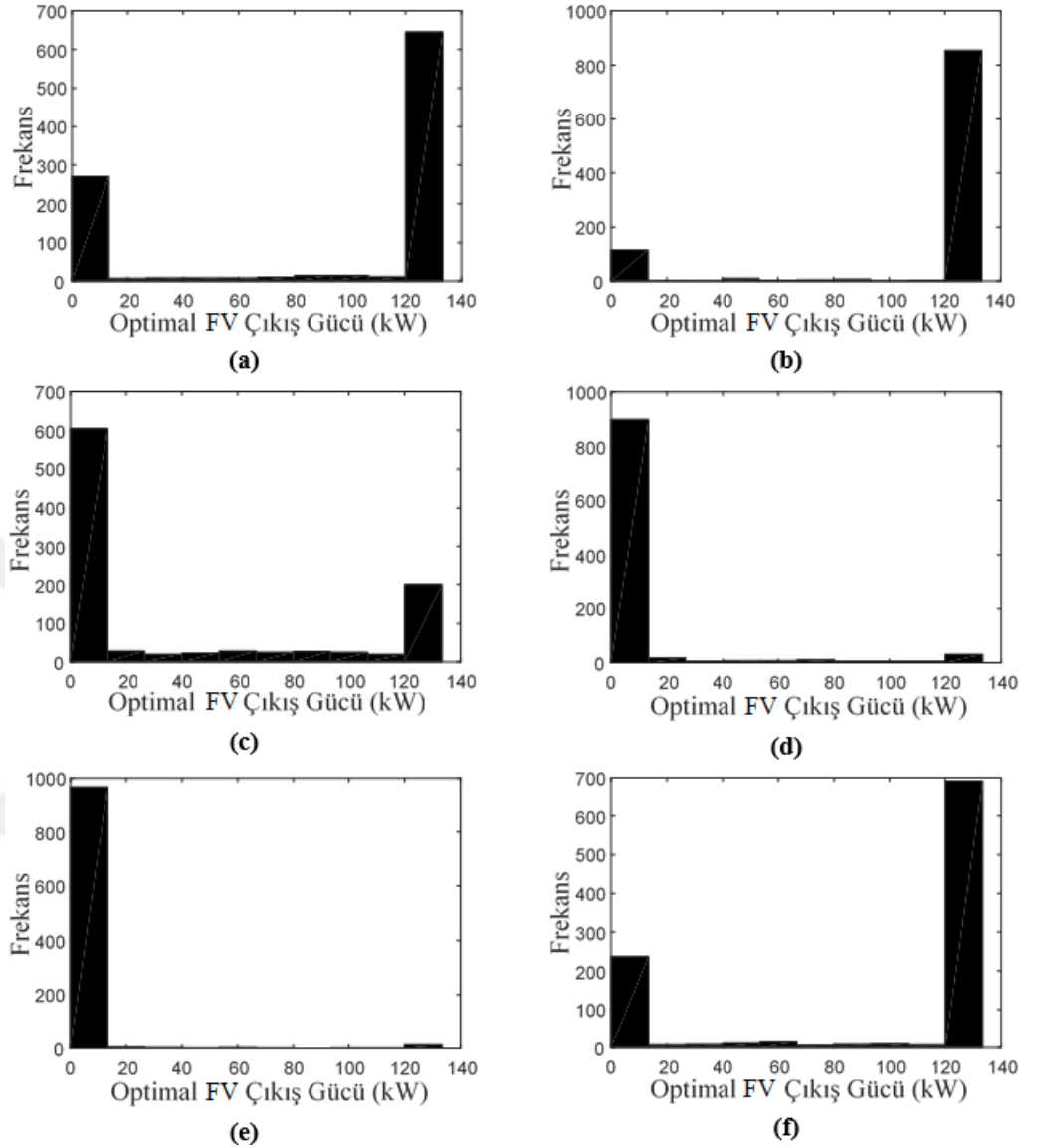


Şekil 4.22 Düşük güneş ışınlımı senaryosu için 25 baralı sistemin (a) 7., (b) 8., (c) 9., (d) 10., (e) 11., (f) 17. baralarındaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları

Dağıtım şebekelerinde FV sistemlerin doğrusal olmayan yükler ile birlikte entegrasyonu geniş ölçüde harmonik bozulmalara neden olarak güç kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu bağlamda, FV sistemlerin şebekedeki katılım oranlarının harmonik parametreleri göz önünde bulundurularak optimize edilmesi önemli bir problemidir.

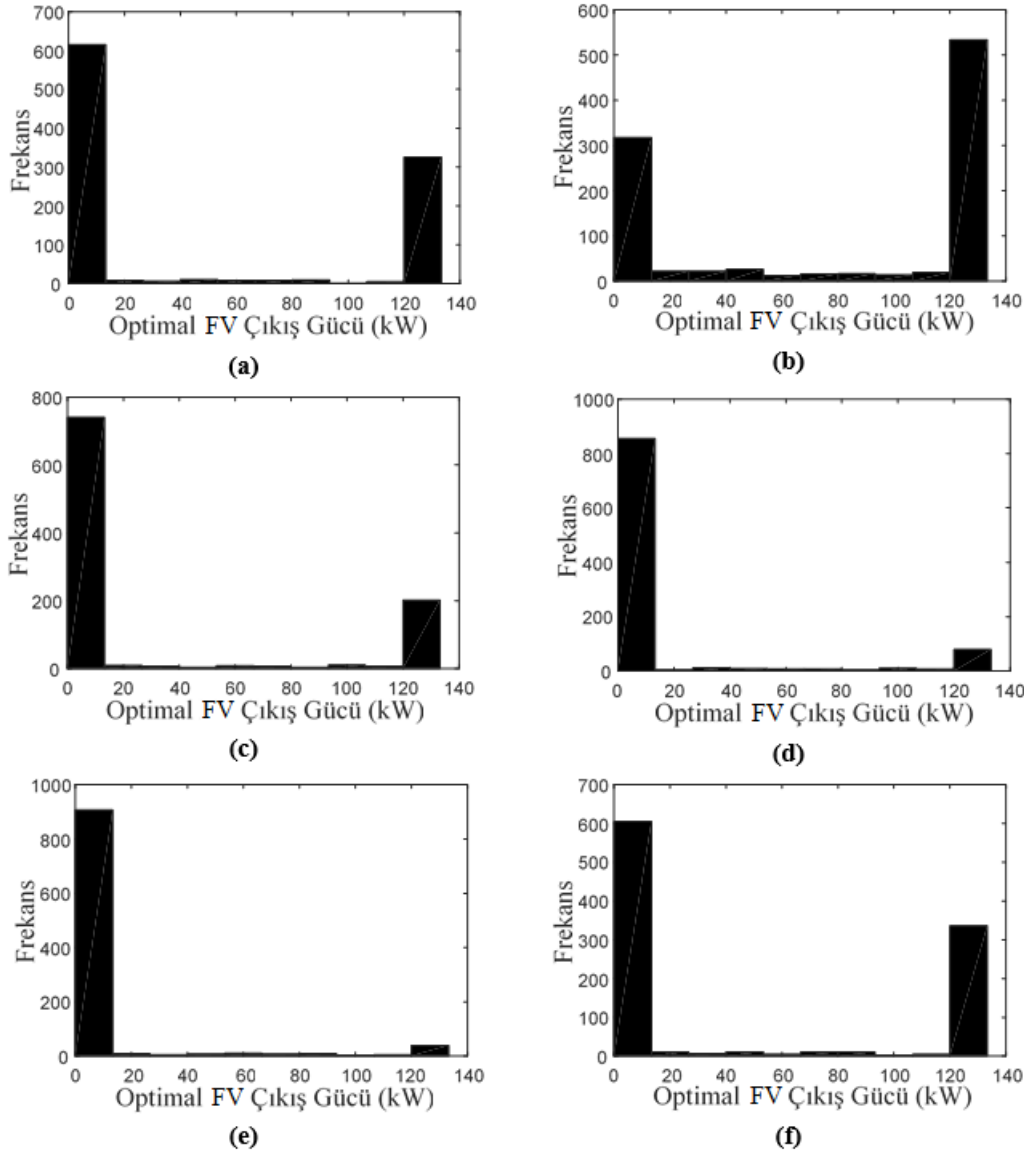
FV sistemler güneş ışınlımının yeterince yüksek olduğu alanlarda yaygın olarak kullanım bulmalarına rağmen, çevresel etkilerden dolayı güneş ışınlımında ani değişimler olması durumunda bu kaynakların akım – gerilim ve güç – gerilim karakteristikleri doğrusal olmamaktadır. Bu nedenle, FV sistemlerin çıkış güçleri sürekli olarak değişmektedir. Farklı güneş ışınlımı durumlarında MPPT yöntemleri FV sistemlerden maksimum gücün çekilmesini sağlamaktadır. Diğer taraftan,

şebekeye bağlı bu yenilenebilir enerji kaynaklarının akım ve gerilim harmonikleri güneş ışınımına bağlılık göstermektedir.



Şekil 4.23 Orta güneş ışınımı senaryosu için 25 baralı sistemin (a) 7., (b) 8., (c) 9., (d) 10., (e) 11., (f) 17. baralarındaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları

Harmonik parametrelerinin güneş ışınımına bağlılığı FV sistemlerin dengesiz üç fazlı dağıtım şebekeleri üzerindeki etkilerini incelemek açısından önemlidir. FV sistem bağlı dağıtım şebekelerinde, güneş ışınımı koşullarındaki değişimler harmonik parametrelerinde ihlallere neden olabilmektedir. Bu anlamda, dağıtım şebekelerinde harmonik bozulmalar göz önünde bulundurularak optimal FV katılım oranları belirlenirken, güneş ışınımının harmonik parametrelere etkileri, bu kısıtlı optimizasyon problemine dahil edilmelidir.



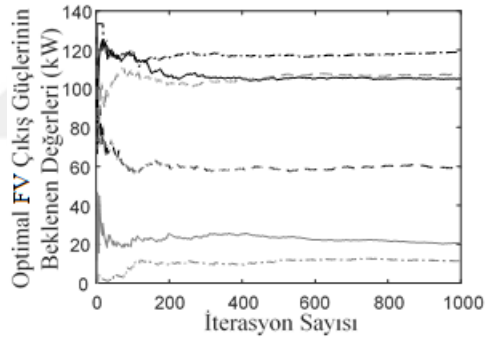
Şekil 4.24 Yüksek güneş ışınımı senaryosu için 25 baralı sistemin (a) 7., (b) 8., (c) 9., (d) 10., (e) 11., (f) 17. baralarındaki optimal FV çıkış güçlerinin dağılımları

Dağıtım şebekelerinin dengeli çalıştığı göz önünde bulundurularak tek faz eşdeğer sistemde gerçekleştirilen harmonik çalışmaları, pratikteki dağıtım sistemlerinin dengesiz yapılarından dolayı yeterli olmayabilmektedir. Bu durumda, dağıtım sistemlerinde harmonik güç akışı analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için bu sistemlerin ana bileşenlerinin üç fazlı modelleri kullanılmaktadır. Doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde FV sistemlerin katılım oranları arttıkça harmonikler de yükselmektedir. Pratikte, FV sistem harmonikleri dağıtım şebekelerindeki cihazları olumsuz yönde etkilemektedir. FV sistemlerin dağıtım sistemindeki sayıları arttıkça, harmonik parametrelerinden olan gerilimdeki ve akımdaki toplam harmonik bozulmalar standartlarda belirtilmiş olan limitlerini aşarak şebekedeki cihazların yaşam ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Bu

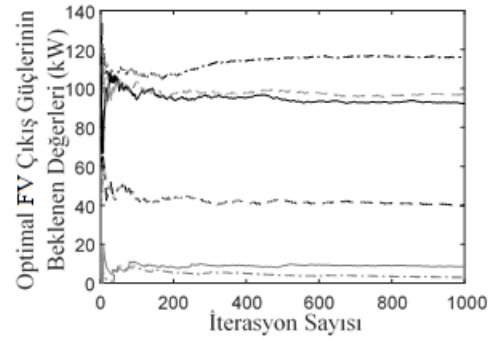
kapsamda, FV sistemler şebekeye entegre edilirken toplam harmonik bozulmaların ve dağıtım şebekelerinin dengesiz yüklenmelerinden dolayı üç fazlı gerilimlerin göz önünde bulundurulmaları gerekmektedir.

Tablo 4.11 25 baralı sistemde düşük, orta ve yüksek güneş ışıınımı senaryoları için optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri

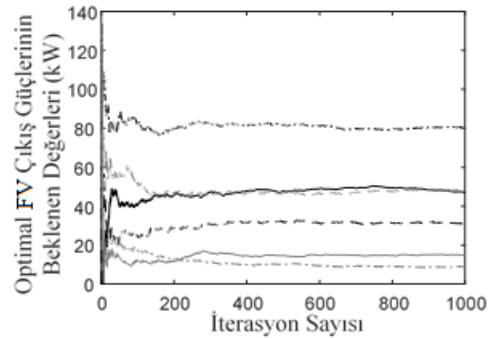
Baralar	Optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri (kW)		
	Düşük güneş ışıınımı senaryosu	Orta güneş ışıınımı senaryosu	Yüksek güneş ışıınımı senaryosu
3	131.04	131.98	130.44
5	131.61	132.45	132.03
7	105.11	92.10	47.06
8	118.66	115.85	80.59
9	59.22	39.61	30.74
10	20.62	8.39	15.03
11	11.28	2.85	8.71
12	9.09	1.41	4.86
13	10.80	3.31	9.62
14	108.28	97.23	47.93
15	106.52	96.87	50.11
16	106.27	94.48	48.52
17	107.14	96.92	48.44
19	132.05	132.29	131.62
22	132.12	132.34	132.55
25	132.09	132.17	132.45



(a)



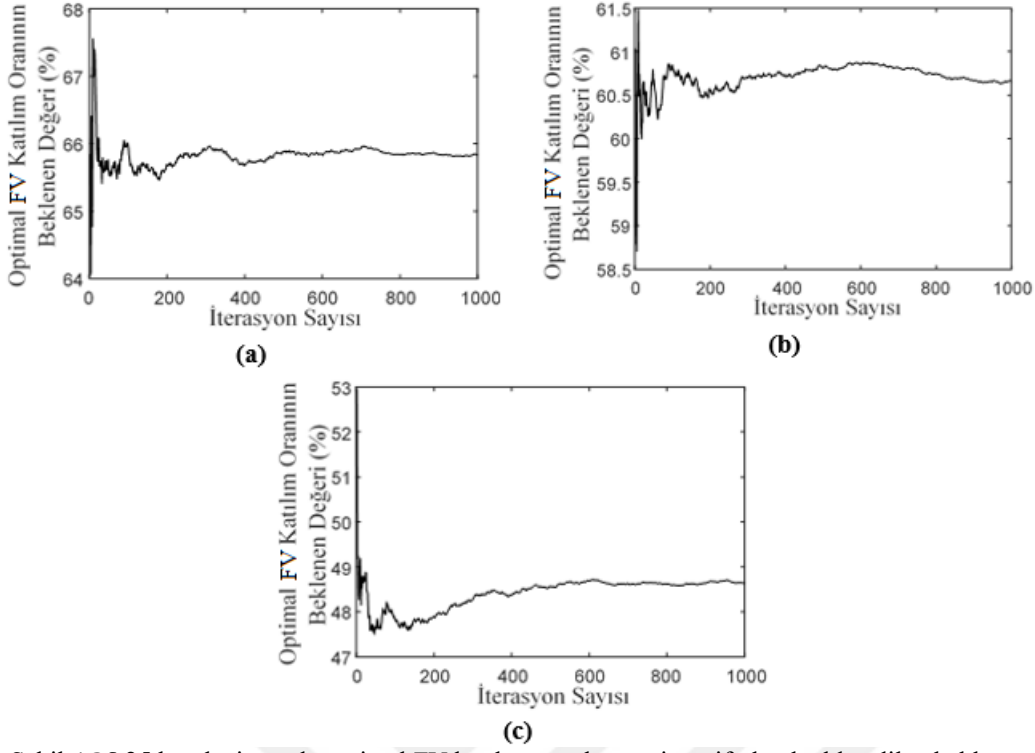
(b)



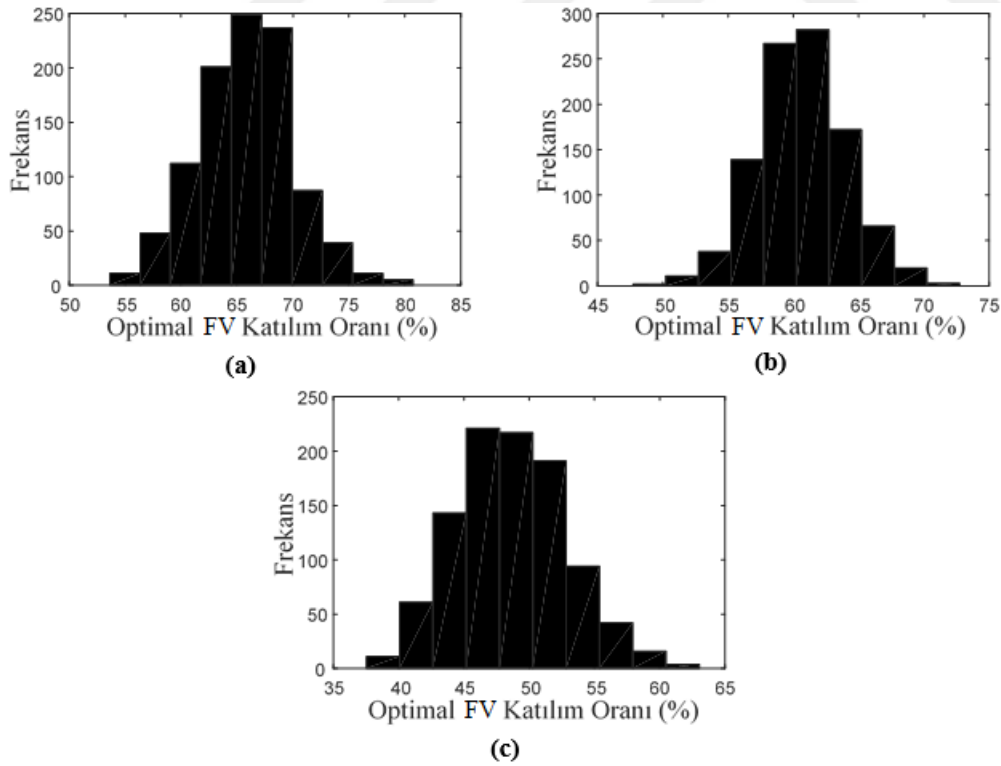
(c)

— 7. bara - - - 8. bara - - - 9. bara
 — 10. bara - - - 11. bara - - - 17. bara

Şekil 4.25 25 baralı sistemde optimal FV çıkış güçlerinin iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri (a) düşük güneş ışıınımı senaryosu için (b) orta güneş ışıınımı senaryosu için (c) yüksek güneş ışıınımı senaryosu için



Şekil 4.26 25 baralı sistemde optimal FV katılım oranlarının iteratif olarak elde edilen beklenen değerleri (a) düşük güneş ışınlımı senaryosu için (b) orta güneş ışınlımı senaryosu için (c) yüksek güneş ışınlımı senaryosu için



Şekil 4.27 25 baralı sistemde optimal FV katılım oranlarının dağılımları (a) düşük güneş ışınlımı senaryosu (b) orta güneş ışınlımı senaryosu (c) yüksek güneş ışınlımı senaryosu

Tablo 4.12 25 baralı sistemde düşük, orta ve yüksek güneş ışıını senaryoları için optimal FV çıkış güçleri

Baralar	Optimal FV çıkış güçleri (kW)		
	Düşük güneş ışıını senaryosu	Orta güneş ışıını senaryosu	Yüksek güneş ışıını senaryosu
3	133.33	133.33	133.33
5	133.33	133.33	133.33
7	68.14	0	8.39
8	133.33	133.33	133.33
9	0	19.91	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	2.29
14	15.42	85.99	0
15	42.00	69.42	10.17
16	115.73	28.77	22.97
17	49.11	40.68	0
19	133.33	133.33	133.33
22	133.33	133.33	133.33
25	133.33	133.33	133.33

Tablo 4.11 ve 4.12’de verilen optimizasyon sonuçları, sırasıyla dağıtım şebekesine bağlanmış olup, harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları belirlenerek test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, düşük, orta ve yüksek güneş ışıını senaryoları için sırasıyla Tablo 4.13, 4.14 ve 4.15’te özetlenmiştir. Tablo 4.13’te görüldüğü üzere, düşük güneş ışıını senaryosunda deterministik optimizasyon yöntemi THDV ve IHDV⁵ ihlallerini olasılıksal yöntemle göre daha fazla minimize etmiştir. Tablo 4.14 ve 4.15’te görüldüğü gibi, optimizasyon yöntemleri THDV ihlallerini büyük ölçüde minimize etmiştir. Bununla birlikte, MCS tabanlı optimizasyon sonucunda elde edilen IHDV⁵ ihlalleri, kümeleme işlemine dayalı optimizasyon sonucunda azaltılmıştır. Orta güneş ışıını senaryosunda FV sistem çıkış güçlerinin üst limitleri için IHDV⁵ ihlal sayıları, düşük güneş ışıını senaryosuna göre daha yüksek elde edilmiştir. Orta güneş ışıını senaryosu için optimizasyon öncesinde IHDV⁵ ihlalleri, düşük güneş ışıını senaryosunda ihlallerin gözlemlendiği noktalara ek olarak 7. baranın c fazında görülmüştür. Yüksek güneş ışıını senaryosunda FV sistem çıkış güçlerinin üst limitleri için THDV ve IHDV⁵ ihlal sayıları, düşük ve orta güneş ışıını senaryolarında elde edilenlerden daha yüksek olmuştur. Ayrıca, yüksek güneş ışıını senaryosu için IHDV⁵ ihlalleri, düşük ve orta güneş ışıını senaryolarında ihlallerin görüldüğü noktalara ek olarak 7. baranın a fazında ve 25. baranın b fazında gözlenmiştir. Bu nedenle, yüksek güneş ışıını senaryosunda gözlenen THDV ve IHDV⁵ ihlalleri optimal FV katılım oranını diğer senaryolara göre daha fazla kısıtlamıştır.

Tablo 4.13 25 baralı sistemde düşük güneş ışınlımı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları

Baralar	İhlal sayıları					
	FV çıkış güçlerinin üst limitleri için		Optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri için		Optimal FV çıkış güçleri için	
	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵
7(b)	53	65	-	-	-	-
9(a)	5594	338	-	-	-	-
9(b)	9953	8449	-	1	-	-
9(c)	8541	2173	-	-	-	-
10(a)	9977	7306	-	-	-	-
10(b)	10000	10000	-	1362	-	-
10(c)	9998	9726	-	4	-	-
11(a)	10000	9781	-	1	-	-
11(b)	10000	10000	805	7159	-	42
11(c)	10000	9995	-	104	-	-
12(a)	10000	9941	-	6	-	-
12(b)	10000	10000	3047	9187	-	264
12(c)	10000	10000	-	296	-	-
13(a)	10000	9903	-	3	-	-
13(b)	10000	10000	2341	8832	-	159
13(c)	10000	9998	-	236	-	-
14(a)	1758	140	-	-	-	-
14(b)	9782	7106	-	12	-	-
14(c)	6362	1493	-	-	-	-
15(a)	6989	928	-	-	-	-
15(b)	9988	9715	-	263	-	-
15(c)	9349	4573	-	3	-	-
16(a)	-	-	-	-	-	-
16(b)	1269	325	-	-	-	-
16(c)	-	6	-	-	-	-
17(a)	5034	458	-	-	-	-
17(b)	9952	8756	-	77	-	-
17(c)	8660	3119	-	1	-	-

FV sistem harmoniklerinin güneş ışınlımındaki değişimlere bağlılığı önemli bir araştırma konusu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, FV sistemlerin çalışma noktaları güneş ışınlımı koşullarına göre değişim gösterdiğinden dolayı harmonik akım spektrumları da sabit olmayıp bu ışınlım koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, çalışmada gerçekleştirilen harmonik analizlerinde farklı güneş ışınlımı senaryolarında FV sistemlerin şebekelerdeki harmonik parametrelere etkileri göz önünde bulundurulmaktadır.

FV sistem akımının harmonik bileşenleri ve toplam harmonik bozulma değerleri, yüksek güneş ışınlımı durumlarında düşük olup, düşük güneş ışınlımı koşullarında yükselmektedir. Bununla birlikte, dağıtım şebekeleri açısından gerilimdeki toplam harmonik bozulma değerlerinde görülen en kötü koşullar, şebekeye bağlı FV sistemlere düşen güneş ışınlımının yüksek olduğu durumlarda oluşmaktadır. Güneş ışınlımı yükseldikçe FV sistemlerin çıkış güçleri ve temel frekans akımları artmaktadır. Bu durumda, harmonik akım spektrumları ve THDi değerleri azalmaktadır. Ancak, yüksek güneş ışınlımı koşullarında FV sistemlerin dağıtım şebekesinde çıkış güçleri daha baskın olduğundan dolayı THDV değerleri yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Dolayısıyla, yüksek güneş ışınlımı koşullarında

gerilimdeki harmonik bozulma değerleri optimal FV sistem katılım oranı üzerinde diğer ışınlam senaryolarına göre daha fazla limitleyici etkiye sahip olmaktadır.

Tablo 4.14 25 baralı sistemde orta güneş ışınlamı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları

Baralar	İhlal sayıları					
	FV çıkış güçlerinin üst limitleri için		Optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri için		Optimal FV çıkış güçleri için	
	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵
7(b)	2	376	-	-	-	-
7(c)	-	11	-	-	-	-
9(a)	4941	1400	-	-	-	-
9(b)	10000	9971	-	-	-	-
9(c)	9698	6201	-	-	-	-
10(a)	10000	9752	-	-	-	-
10(b)	10000	10000	-	762	-	-
10(c)	10000	10000	-	-	-	-
11(a)	10000	10000	-	-	-	-
11(b)	10000	10000	-	6457	-	41
11(c)	10000	10000	-	28	-	-
12(a)	10000	10000	-	1	-	-
12(b)	10000	10000	5	9043	-	295
12(c)	10000	10000	-	92	-	-
13(a)	10000	10000	-	-	-	-
13(b)	10000	10000	4	8512	-	186
13(c)	10000	10000	-	68	-	-
14(a)	592	651	-	-	-	-
14(b)	9991	9752	-	1	-	-
14(c)	7748	4973	-	-	-	-
15(a)	7309	3122	-	-	-	-
15(b)	10000	10000	-	117	-	-
15(c)	9936	8844	-	-	-	-
16(a)	-	-	-	-	-	-
16(b)	446	1448	-	-	-	-
16(c)	-	64	-	-	-	-
17(a)	4218	1768	-	-	-	-
17(b)	9998	9983	-	20	-	-
17(c)	9712	7423	-	-	-	-

FV sistem akımının harmonik bileşenlerinin farklı güneş ışınlamı koşullarına bağlılığı gerçek zamanlı uygulamalarda göz önünde bulundurululan önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, harmonik güç akışı analizlerinden elde edilen RMS gerilim değerlerini, IHDV^h değerlerini ve THDV değerlerini güç kalitesinin sürekliliği ve güvenilirliği açısından istenilen sınırlarda tutmak için şebekelere entegre edilen FV sistemlerin optimal çıkış güçlerinin ve katılım oranlarının belirlenmesi güncelliğini koruyan bir problemdir. Bu anlamda, dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesinin uzun dönemdeki yük profili ve güneş ışınlamındaki değişimlerden dolayı FV sistemlerin çıkış güçlerinin belirsizliği, harmonik parametrelerinin güneş ışınlamına bağlılığı ve standartlarda belirtilen harmonik kısıtları, FV sistemlerin dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerindeki optimal katılım oranlarının matematiksel analiz yöntemleri ile belirlenmesi problemini literatürde yeni bir zemine taşımaktadır. Bu nedenle, FV sistemlerin dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde harmoniklere etkilerinin geliştirilen analiz

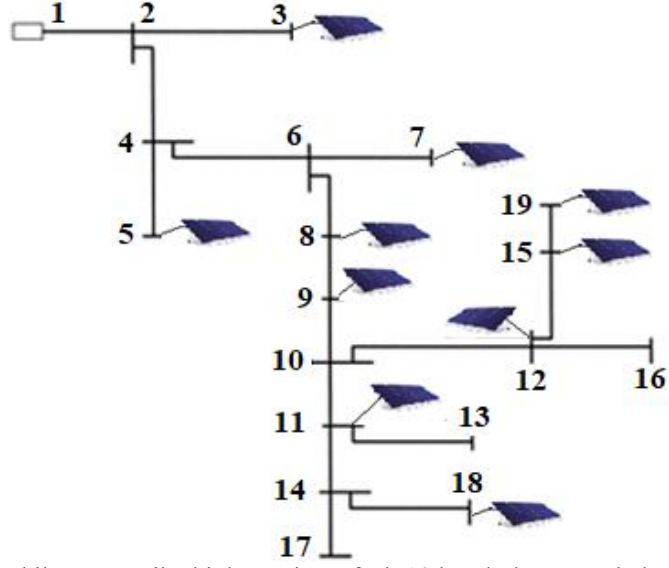
yöntemleri kullanılarak ve farklı güneş ışınlı senaryoları göz önünde bulundurularak belirlenmesi önemli bir araştırma konusudur.

Tablo 4.15 25 baralı sistemde yüksek güneş ışınlı senaryosunda harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları

Baralar	İhlal sayıları					
	FV çıkış güçlerinin üst limitleri için		Optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri için		Optimal FV çıkış güçleri için	
	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵
7(a)	-	4656	-	-	-	-
7(b)	700	9901	-	-	-	-
7(c)	-	8746	-	-	-	-
9(a)	8709	9969	-	-	-	-
9(b)	10000	10000	-	-	-	-
9(c)	9978	9999	-	-	-	-
10(a)	10000	10000	-	-	-	-
10(b)	10000	10000	-	4374	-	-
10(c)	10000	10000	-	-	-	-
11(a)	10000	10000	-	-	-	-
11(b)	10000	10000	-	9527	-	90
11(c)	10000	10000	-	328	-	-
12(a)	10000	10000	-	-	-	-
12(b)	10000	10000	-	9929	-	773
12(c)	10000	10000	-	1129	-	-
13(a)	10000	10000	-	-	-	-
13(b)	10000	10000	-	9881	-	509
13(c)	10000	10000	-	946	-	-
14(a)	4171	9922	-	-	-	-
14(b)	9999	10000	-	-	-	-
14(c)	9787	9998	-	-	-	-
15(a)	9510	9993	-	-	-	-
15(b)	10000	10000	-	291	-	-
15(c)	9996	10000	-	-	-	-
16(a)	-	6901	-	-	-	-
16(b)	5030	9974	-	-	-	-
16(c)	77	9514	-	-	-	-
17(a)	8274	9976	-	-	-	-
17(b)	10000	10000	-	12	-	-
17(c)	9976	10000	-	-	-	-
25(b)	-	7	-	-	-	-

4.3.5 Pratikteki dengesiz üç fazlı 19 baralı dağıtım şebekesi

Bu çalışmada önerilen olasılıksal optimizasyon yaklaşımı, pratikteki bir dağıtım şebekesinde de uygulanmıştır. Pratikteki dengesiz üç fazlı 19 baralı dağıtım şebekesi, üç fazlı FV sistemlerin bağlandığı aday baralar ile birlikte Şekil 4.28’de gösterilmiştir (Kalesar and Seifi, 2010; Thukaram et al., 1999). Bu dağıtım sisteminin toplam yükünün aktif gücü 4066.2 kW olarak kabul edilmiştir. ASD ve VFD isimli doğrusal olmayan yüklerin güçleri, sırasıyla dağıtım sisteminin toplam yükünün % 3’ü ve % 8’i olarak seçilmiştir. Optimal FV sistem çıkış güçlerinin beklenen değerleri Tablo 4.16’da gösterilmiştir. Sonuçlara göre, optimal FV katılım oranlarının beklenen değerleri, düşük güneş ışınlı senaryosunda % 38.55, orta güneş ışınlı senaryosunda % 33.27 ve yüksek güneş ışınlı senaryosunda % 26.16 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.28 Pratikteki dengesiz üç fazlı 19 baralı dağıtım şebekesi

Tablo 4.16 19 baralı sistemde düşük, orta ve yüksek güneş ışınlımı senaryoları için optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri

Baralar	Optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri (kW)		
	Düşük güneş ışınlımı senaryosu	Orta güneş ışınlımı senaryosu	Yüksek güneş ışınlımı senaryosu
3	129.93	131.63	129.75
5	120.64	120.40	94.79
7	112.99	109.85	70.43
8	84.95	61.48	35.42
9	37.34	20.38	16.81
11	9.18	1.80	2.39
12	7.36	1.73	1.28
15	4.50	0.72	0.51
18	12.05	2.24	2.88
19	3.54	0.77	0.27

Dağıtım şebekelerinde gerilimdeki toplam harmonik bozulmalar, yüksek güneş ışınlımı senaryosu için diğer senaryolara göre daha yüksek olmaktadır. Bunun nedeni, bu şebekelerin yüksek ışınlımlarda harmonik akımlarına daha hassas olmalarıdır. Dolayısıyla, dağıtım şebekesindeki optimal FV sistem katılım oranları, yüksek güneş ışınlımı senaryosunda diğer ışınlım senaryolarına kıyasla harmonik bozulmalar tarafından daha fazla limitlenmektedir.

Tablo 4.16'da sunulmuş olan optimizasyon sonuçları, bütün senaryolarda harmonik ihlallerinin test edilmesi açısından dağıtım şebekesine entegre edilmiştir. İhlal sayıları Tablo 4.17'de özetlenmiştir.

Tablo 4.17 19 baralı sistemde düşük, orta ve yüksek güneş ışınlımı senaryolarında harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları

Baralar	İhlal Sayıları											
	Düşük güneş ışınlımı senaryosunda				Orta güneş ışınlımı senaryosunda				Yüksek güneş ışınlımı senaryosunda			
	FV üst limitleri için		FV beklenen değerleri için		FV üst limitleri için		FV beklenen değerleri için		FV üst limitleri için		FV beklenen değerleri için	
	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵
9(a)	-	2	-	-	-	14	-	-	-	6603	-	-
9(b)	-	2	-	-	-	15	-	-	-	6580	-	-
9(c)	-	2	-	-	-	18	-	-	-	6625	-	-
10(a)	9800	9985	-	-	9997	10000	-	-	10000	10000	-	-
10(b)	9851	9992	-	-	9999	10000	-	-	10000	10000	-	-
10(c)	9859	9991	-	-	9999	10000	-	-	10000	10000	-	-
11(a)	9969	9998	-	1	10000	10000	-	-	10000	10000	-	-
11(b)	9983	9999	-	1	10000	10000	-	-	10000	10000	-	-
11(c)	9983	9998	-	3	10000	10000	-	-	10000	10000	-	-
12(a)	9986	9998	-	1	10000	10000	-	-	10000	10000	-	-
12(b)	9991	9999	-	1	10000	10000	-	-	10000	10000	-	-
12(c)	9987	9998	-	5	10000	10000	-	-	10000	10000	-	-
13(a)	9988	10000	-	18	10000	10000	-	1	10000	10000	-	1
13(b)	9993	10000	-	38	10000	10000	-	2	10000	10000	-	5
13(c)	9993	10000	-	75	10000	10000	-	5	10000	10000	-	19
14(a)	9987	9999	-	4	10000	10000	-	-	10000	10000	-	-
14(b)	9991	9999	-	4	10000	10000	-	-	10000	10000	-	-
14(c)	9993	9998	-	13	10000	10000	-	-	10000	10000	-	1
15(a)	10000	10000	-	1218	10000	10000	-	320	10000	10000	-	907
15(b)	10000	10000	-	2025	10000	10000	-	626	10000	10000	-	1672
15(c)	10000	10000	-	1867	10000	10000	-	617	10000	10000	-	1583
16(a)	9996	10000	-	362	10000	10000	-	61	10000	10000	-	183
16(b)	9998	10000	-	838	10000	10000	-	209	10000	10000	-	638
16(c)	9997	10000	-	547	10000	10000	-	118	10000	10000	-	375
17(a)	9992	10000	-	42	10000	10000	-	1	10000	10000	-	4
17(b)	9994	10000	-	50	10000	10000	-	3	10000	10000	-	7
17(c)	9993	10000	-	95	10000	10000	-	8	10000	10000	-	29
18(a)	9994	10000	-	81	10000	10000	-	3	10000	10000	-	9
18(b)	9995	10000	-	107	10000	10000	-	4	10000	10000	-	19
18(c)	9994	10000	-	179	10000	10000	-	14	10000	10000	-	52
19(a)	10000	10000	-	6266	10000	10000	-	4033	10000	10000	-	6106
19(b)	10000	10000	-	7841	10000	10000	-	5875	10000	10000	-	7688
19(c)	10000	10000	-	6985	10000	10000	-	4859	10000	10000	-	6828

Tablo 4.17’de görüldüğü üzere, önerilen optimizasyon yaklaşımı, bütün senaryolarda THDV ihlallerini tamamen minimize etmiştir. İlgili senaryolarda, IHDV⁵ ihlalleri de optimizasyon sonuçları kullanılarak azaltılmıştır. 5. harmonik dışındaki IHDV^h değerlerinde ve RMS gerilimlerinde ihlal gözlenmemiştir. FV sistem çıkış güçlerinin üst limitleri için IHDV⁵ ve THDV ihlal sayıları, yüksek güneş ışınlımı senaryosunda diğer senaryolara göre daha fazla olmuştur. Ayrıca, bu yenilenebilir enerji kaynaklarının çıkış güçlerinin üst limitleri orta güneş ışınlımı senaryosunda düşük güneş ışınlımı senaryosuna göre THDV ve IHDV⁵ açısından daha yüksek ihlal sayılarına neden olmuştur. Bu nedenle, optimal FV katılım oranları yüksek güneş ışınlımı senaryosunda diğer senaryolara göre daha fazla limitlenmiştir.

4.4 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, olasılıksal ve deterministik optimizasyon yöntemleri, farklı güneş ışınlımı senaryoları altında dağıtım şebekelerinde optimal FV katılım

oranlarını belirlemek için önerilmiştir. IP yöntemi, sırasıyla MCS ve k – ortalamalar kümeleme yöntemleri ile bağlantılı olarak optimizasyon problemlerini çözmek için uygulanmıştır. Önerilen yöntemler, FV sistemin şebeke akımının harmonik bileşenlerinin güneş ışıınımına bağlılığı göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Harmonik parametreleri, doğrusal olmayan yüklerin ve FV sistemlerin bağlı bulunduğu dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde döngü referans yapısına dayalı üç fazlı harmonik güç akışı analizi yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Optimal FV katılım oranları, optimizasyon işleminde dağıtım sistemlerinin yük belirsizliği ve güneş ışıınımındaki değişimlerden dolayı FV sistemlerin çıkış güçlerinin değişkenliği göz önünde bulundurularak, gerilimdeki toplam harmonik bozulma, gerilimdeki tekil harmonik bozulma ve RMS gerilimi limitlerine dayalı olarak elde edilmiştir. Olasılıksal optimizasyon yönteminde sonuçlar risk alınarak elde edilmiş olup, deterministik optimizasyon yönteminde sonuçlar bütün güneş ışıınımı ve yük senaryolarına karşılık gelen kısıt fonksiyonları aynı anda göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Bu nedenle, IP yönteminin MCS ile bağlantılı olarak uygulandığı durumda elde edilen optimal FV katılım oranları, k – ortalamalar kümeleme ile uygulandığı duruma göre daha yüksek olmuştur. Yüksek güneş ışıınımı koşulları, gerilimdeki harmonik bozulmalar açısından en kötü durumlara neden olduğundan, bu ışıınımı koşulları optimal FV katılım oranı üzerinde diğer ışıınım koşullarına göre daha fazla limitleyici etkiye sahip olmuştur. FV sistemin şebeke akımındaki toplam harmonik bozulma düşük güneş ışıınımı koşullarında daha yüksek olmasına rağmen, gerilimdeki toplam harmonik bozulmalar yüksek güneş ışıınımı koşullarında daha yüksek olmuştur. Yüksek güneş ışıınımı koşullarında gerilimdeki toplam harmonik bozulmaların daha yüksek olmasının nedeni, bu koşullarda FV sistemin şebeke akımının harmonik bileşenlerinin yüzdelik değerleri düşmesine rağmen bu kaynağın çıkış gücünün şebekede daha baskın hale gelmesidir.

5. AKTİF FİLTRELERİN DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE OPTİMAL FV KATILIM ORANLARINA ETKİLERİ

Tez çalışmasının bu bölümünde, dengesiz üç fazlı dağıtım sistemlerinde görülen harmonik bozulmaların minimize edilmesi açısından aktif filtreler entegre edilerek bu şebekelerde FV sistemlerin optimal katılım oranları incelenmiştir.

Bu bölümün alt başlıkları şu şekildedir: Bölüm 5.1’de, yapılan çalışmalar ile ilgili giriş açıklamaları yapılmıştır. Bölüm 5.2’de, aktif filtreler ve çalışmada önerilen optimizasyon yapısına uygulanması hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 5.3’te, çalışmada belirlenen simulasyon sonuçları sunulmuştur. Bölüm 5.4’te ise, bu bölümdeki çalışmalar ile ilgili genel sonuçlar anlatılmıştır.

5.1 Giriş

Doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu dağıtım sistemlerine bağlanan FV sistemlerin katılım oranlarının artırılması sonucu şebekelerdeki harmonik akımlar ve gerilimler beklenmeyen seviyelere gelebilmektedir. Bu kapsamda, harmonik bozulmaların görüldüğü şebekede harmonik parametreleri ihlal edilmeden optimal FV katılım oranlarının yükseltilebilmesi için doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu noktalara filtreleme işlemi uygulanabilmektedir. Bu tez çalışmasının 4. bölümünde, dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde MCS tabanlı optimizasyon yönteminden elde edilen optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerlerinin harmonikler açısından problemlere neden olduğu görülmüştür. Bu bölümde ise, şebekelerde harmonik ihlalleri açısından sorunlu baralar tespit edilerek bu noktalara aktif filtreler entegre edilmektedir. Aktif filtrelerin bağlı bulunduğu dağıtım şebekelerinde yük belirsizliği ve güneş ışınımındaki değişimler dikkate alınarak optimal FV katılım oranlarını hesaplamak için MCS tabanlı IP optimizasyon yöntemi uygulanmaktadır. FV sistemlerin optimal katılım oranları, aktif filtrelerin ve doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu dağıtım sistemlerinde döngü referans yapısına dayalı üç fazlı harmonik güç akışı analizinden belirlenen THDV, IHDV^h ve RMS gerilimi kısıtları göz önünde bulundurularak elde edilmektedir.

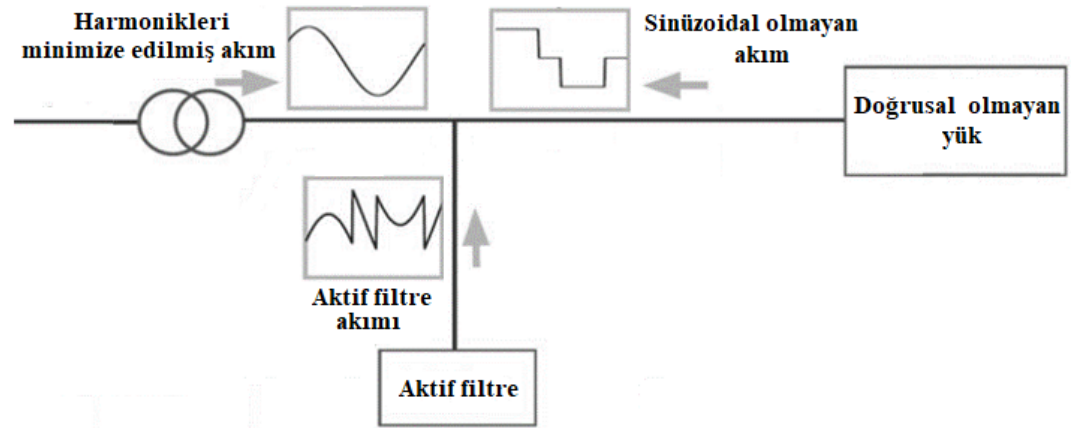
5.2 Aktif Filtreler ve Çalışmadaki Probleme Uygulanmaları

Harmonik akımların şebekede dolaşmasının önlenmesi için sisteme bağlanan ve harmonik bozulmaların minimize edilmesini sağlayan cihazlara filtre denilmektedir. Filtreler, farklı frekanslardaki akım veya gerilim harmoniklerinin

şebekedeki büyüklüklerinin minimize edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Şebekede görülen bütün harmonik bileşenler için filtreleme işlemi uygulanabilmektedir. Bir şebekede harmoniklerden dolayı oluşan ekonomik ve teknik problemler, filtrelerin kullanılması ile minimize edilebilmektedir. Filtreler, harmonik akım kaynaklarından şebekeye enjekte edilen harmonik bileşenlerin azaltılmasını sağlamaktadır.

Aktif filtreler, şebekeden doğrusal olmayan yüklere aktarılan harmonik frekanslardaki akımları karşılayarak ilgili şebekedeki güç kalitesi problemlerinin minimize edilmesini sağlamaktadır. Bu filtreler, harmonik bozulmaların minimize edilmesi için şebekede doğrusal olmayan yüke iletilen harmonik akım bileşenlerini inceleyerek bu yüke belirli bir faz farkı ile harmonik akımlar enjekte etmektedir.

Aktif filtreler, ölçtüğü harmonik akım ile 180° faz farkına sahip harmonik akım spektrumu üretmektedir. Bu sayede, harmonikler minimize edilerek şebekede saf sinüzoidal duruma yakın akımların akması sağlanmaktadır. Aktif filtreleme ilkesini gösteren örnek Şekil 5.1’de verilmektedir. Verilen şekilde, sinüzoidal olmayan akım dalgası ve aktif filtre ile üretilmiş zıt yönde harmonik akımlar ile elde edilmiş akım dalgası gösterilmiştir. Sonuç olarak, aktif filtre kullanıldığında harmonik bileşenleri minimize edilmiş şebeke akımı elde edilmiştir.



Şekil 5.1 Aktif filtrelerin temel çalışma prensibi

Tez çalışmasının 4. bölümünde, dağıtım şebekelerinde uygulanan MCS tabanlı optimizasyon yönteminden belirlenen optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri harmonik ihlalleri açısından 10,000 farklı uzun dönem yük

profili ve güneş ışınlamı senaryoları için test edilmiştir. Olasılıksal yöntemden elde edilen optimizasyon sonuçlarının harmonik parametrelerinde problemlere neden olduğu anlaşılmıştır.

Tez çalışmasının bu bölümünde, dengesiz üç fazlı dağıtım sistemlerinde harmonik parametrelerinde ihlallerin görüldüğü sorunlu baralar belirlenerek ilgili baralara aktif güç filtreleri bağlanmaktadır. Öncelikle, aktif filtrelerin entegre edildiği dağıtım şebekelerine 4. bölümde olasılıksal optimizasyon yönteminden elde edilmiş optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri bağlanarak güç kalitesi parametrelerindeki ihlal sayıları Şekil 3.3'te verilmiş olan yöntem kullanılarak gözlenmektedir. Daha sonra, aktif filtrelerin bağlı bulunduğu dağıtım şebekelerinde gerilimdeki toplam harmonik bozulma, gerilimdeki tekil harmonik bozulma ve RMS gerilimi limitleri dikkate alınarak optimal FV katılım oranlarının elde edilmesi için IP yöntemi MCS ile birlikte uygulanmaktadır. Doğrusal olmayan yüklerin ve aktif filtrelerin bulunduğu dağıtım şebekelerinde yük belirsizliği ve güneş ışınlamındaki değişimler ele alınarak, şebekelerdeki harmonik kısıtları altında FV sistemlerin optimal çıkış güçleri ve katılım oranları planlanmaktadır. 3. bölümde (3.28) – (3.34) no'lu eşitlikler ile tanımlanmış olan optimizasyon problemi, bu bölümde dağıtım sistemlerinde sorunlu baralara aktif filtrelerin entegre edildiği göz önünde bulundurularak Şekil 3.2'de sunulmuş olan MCS tabanlı IP yöntemi ile ele alınmaktadır.

5.3 Simulasyon Sonuçları

Çalışmanın 4. bölümünde göz önünde bulundurulmuş dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde MCS tabanlı IP yönteminden belirlenen sonuçların test edilmesi ile güç kalitesi ihlalleri açısından problemlerin gözlemlendiği noktalar Tablo 5.1'de verilmektedir.

Tablo 5.1 4. bölümde olasılıksal yöntemden elde edilen sonuçlar için şebekelerdeki güç kalitesi ihlalleri açısından sorunlu noktalar

Şebekelerde harmonik açısından sorunlu noktalar		
7 baralı dağıtım şebekesi	13 baralı dağıtım şebekesi	25 baralı dağıtım şebekesi
6(b), 7(b)	671(a, b, c), 692(a, b, c), 675(a, b, c), 684(a, b, c), 611(a, b, c), 680(a, b, c), 652(a, b, c)	10(b), 11(b, c), 12(b, c), 13(b, c), 15(b), 17(b)

Tablo 5.1'de verilen dağıtım sistemlerindeki sorunlu noktalara aktif filtreler bağlanmıştır. İlgili noktalardaki bu aktif filtreler, çalışmada kullanılan dengesiz üç

fazlı dağıtım şebekelerinde bulunan ve harmonik spektrumları Tablo 3.3'te verilmiş olan doğrusal olmayan yüklerin harmonik akım büyüklüklerinin % 15'i oranında ve 180° faz farkı ile şebekelere entegre edilmiştir. Aktif filtrelerin bulunduğu dağıtım şebekelerine tez çalışmasının 4. bölümünde MCS tabanlı IP optimizasyon yönteminden belirlenen FV sistemlerin optimal çıkış güçlerinin beklenen değerleri bağlanarak harmonik parametrelerindeki ihlaller 10,000 farklı yük profili ve güneş ışınlamı verileri için test edilmiştir. Bu ihlaller, aktif filtrelerin bağlanmadığı ve bağlandığı durumlar göz önünde bulundurularak, 7 baralı dağıtım şebekesi için Tablo 4.1'de, 13 baralı dağıtım şebekesi için Tablo 4.6'da ve 25 baralı dağıtım şebekesi için Tablo 4.11'de verilmiş olan optimizasyon sonuçlarının ilgili şebekelere bağlanması sonucu sırasıyla Tablo 5.2, 5.3 ve 5.4'te düşük, orta ve yüksek güneş ışınlamı senaryoları için sunulmuştur.

Tablo 5.2'de verildiği gibi, 7 baralı dağıtım şebekesinde aktif filtreler bağlanmadan önce optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri için sorunlu noktalarda gerilimdeki tekil harmonik bozulma değerlerinde ihlallerin olduğu gözlenmiştir. Gerilimdeki toplam harmonik bozulma değerlerindeki ihlaller sadece düşük güneş ışınlamı senaryosunda görülmüştür. Bununla birlikte, aktif güç filtreleri şebekeye bağlandıktan sonra harmonik parametrelerindeki ihlaller büyük oranda minimize edilmiştir. Ayrıca, aktif filtrelerin şebekeye bağlanmadığı ve bağlandığı durumlarda, RMS gerilimlerinde ve 5. harmonik dışındaki IHDV^h değerlerinde ihlal gözlenmemiştir. Benzer şekilde, Tablo 5.3 ve 5.4'te görüldüğü üzere, aktif filtreler 13 baralı ve 25 baralı dağıtım şebekelerinde de harmonik problemlerinin büyük oranda minimize edilmesinde önemli rol oynamıştır.

Tablo 5.2 7 baralı dağıtım şebekesinde olasılıksal optimizasyon sonuçları için harmonik ihlal sayıları

	Baralar	İhlal sayıları					
		Düşük güneş ışınlamı senaryosu		Orta güneş ışınlamı senaryosu		Yüksek güneş ışınlamı senaryosu	
		THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵
Aktif filtreler bağlanmadığında	6(b)	-	5107	-	4101	-	8861
	7(b)	7	9005	-	8693	-	9841
Aktif filtreler bağlandığında	6(b)	-	1	-	-	-	-
	7(b)	-	1	-	-	-	-

Güç şebekelerinde yükler genellikle güç elektroniği dönüştürücüleri şeklinde doğrusal olmayan yüklerden oluşmaktadır. Bu yükler, şebekelerde harmonik bozulmaların ana kaynakları olup, düşük verimliliğe, düşük güç faktörüne ve şebekedeki cihazların zarar görmelerine neden olmaktadır. Aktif güç filtresi, uygun kontrol algoritmalarını kullanarak şebekedeki harmoniklerin

olumsuz etkilerini kompanze etmek için önemli bir çözümdür (Kashif et al., 2018). Farklı konfigürasyonları piyasada ticari kullanımları için bulunmakta olup, şönt bağlı aktif güç filtreleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu filtreler, şebekede ortak bağlantı noktasında bulunan yük akımındaki harmoniklere ters işaretli harmonik akımlar enjekte etmektedir.

Tablo 5.3 13 baralı dağıtım şebekesinde olasılıksal optimizasyon sonuçları için harmonik ihlal sayıları

	Baralar	İhlal sayıları					
		Düşük güneş ışıınımı senaryosu		Orta güneş ışıınımı senaryosu		Yüksek güneş ışıınımı senaryosu	
		THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵
Aktif filtreler bağlanmadığında	671(a)	-	5389	-	4554	-	7891
	671(b)	-	4523	-	3817	-	7279
	671(c)	-	1017	-	366	-	2041
	692(a)	-	5389	-	4554	-	7891
	692(b)	-	4523	-	3817	-	7279
	692(c)	-	1017	-	366	-	2041
	675(a)	3	8630	-	8556	-	9618
	675(b)	1	7773	-	7711	-	9326
	675(c)	-	3158	-	2106	-	5683
	684(a)	-	6605	-	6084	-	8712
	684(b)	-	5706	-	5128	-	8177
	684(c)	-	1643	-	743	-	3152
	611(a)	-	7025	-	6577	-	8914
	611(b)	-	6118	-	5617	-	8450
	611(c)	-	1860	-	927	-	3586
	680(a)	-	6142	-	5361	-	8365
	680(b)	-	5265	-	4522	-	7821
	680(c)	-	1423	-	570	-	2704
	652(a)	3	7980	-	7622	-	9323
	652(b)	1	7080	-	6787	-	8974
	652(c)	-	2698	-	1533	-	4734
Aktif filtreler bağlandığında	671(a)	-	18	-	1	-	12
	671(b)	-	15	-	1	-	9
	671(c)	-	-	-	-	-	-
	692(a)	-	18	-	1	-	12
	692(b)	-	15	-	1	-	9
	692(c)	-	-	-	-	-	-
	675(a)	-	121	-	15	-	185
	675(b)	-	107	-	15	-	135
	675(c)	-	4	-	-	-	-
	684(a)	-	53	-	3	-	34
	684(b)	-	48	-	5	-	29
	684(c)	-	2	-	-	-	-
	611(a)	-	67	-	4	-	47
	611(b)	-	57	-	5	-	41
	611(c)	-	3	-	-	-	-
	680(a)	-	52	-	2	-	24
	680(b)	-	47	-	4	-	26
	680(c)	-	-	-	-	-	-
	652(a)	-	142	-	12	-	140
	652(b)	-	129	-	10	-	107
	652(c)	-	6	-	-	-	-

Aktif güç filtreleri, şebekelerde harmonik kompanzasyonu için kullanılan en önemli cihazlardan biridir. Bu filtrelerin yüksek yatırım maliyetlerine karşın yakın gelecekte elektrik şebekelerinde yaygın olarak kullanılmaları beklenmektedir (Marini et al., 2019; Lakum and Mahajan, 2019). Aktif güç filtresi, çıkışında

istenilen harmonik kompanzasyon akımlarını üretmek için kontrol edilen bir eviricidir. Evirici, şebekedeki harmonikleri minimize etmek için 180° faz farkı ile harmonik akımları enjekte eder. Bu filtrelerde, şebekeden ölçülen gerilim ve akım sinyalleri aktif güç filtresi kontrolcüsünü iletilmektedir. Kontrolcü, aktif güç filtresinden enjekte edilecek gerekli referans harmonik akımlarını belirlemektedir. Elde edilen referans akımları, uygun bir anahtarlama yöntemi ile şebekeye iletilmektedir.

Tablo 5.4 25 baralı dağıtım şebekesinde olasılıksal optimizasyon sonuçları için harmonik ihlal sayıları

Baralar	İhlal sayıları					
	Düşük güneş ışıınımı senaryosu		Orta güneş ışıınımı senaryosu		Yüksek güneş ışıınımı senaryosu	
	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵	THDV	IHDV ⁵
Aktif filtreler bağlanmadığında	9(b)	-	1	-	-	-
	10(b)	-	1362	-	762	4374
	10(c)	-	4	-	-	-
	11(a)	-	1	-	-	-
	11(b)	805	7159	-	6457	9527
	11(c)	-	104	-	28	328
	12(a)	-	6	-	1	-
	12(b)	3047	9187	5	9043	9929
	12(c)	-	296	-	92	1129
	13(a)	-	3	-	-	-
	13(b)	2341	8832	4	8512	9881
	13(c)	-	236	-	68	946
	14(b)	-	12	-	1	-
	15(b)	-	263	-	117	291
	15(c)	-	3	-	-	-
	17(b)	-	77	-	20	12
	17(c)	-	1	-	-	-
Aktif filtreler bağlandığında	9(b)	-	-	-	-	-
	10(b)	-	1	-	-	-
	10(c)	-	-	-	-	-
	11(a)	-	-	-	-	-
	11(b)	-	43	-	7	79
	11(c)	-	-	-	-	-
	12(a)	-	-	-	-	-
	12(b)	-	139	-	32	401
	12(c)	-	1	-	-	-
	13(a)	-	-	-	-	-
	13(b)	-	108	-	21	295
	13(c)	-	1	-	-	-
	14(b)	-	-	-	-	-
	15(b)	-	2	-	-	-
	15(c)	-	-	-	-	-
	17(b)	-	-	-	-	-
	17(c)	-	-	-	-	-

Aktif filtrelerin entegre edildiği dağıtım şebekelerinde THDV, IHDV^h ve RMS gerilimi limitleri göz önünde bulundurularak farklı güneş ışıınımı senaryoları altında FV sistemlerin optimal katılım oranlarının belirlenmesi için olasılıksal optimizasyon yöntemi uygulanmıştır. Optimal FV sistem katılım oranları, doğrusal olmayan yüklerin ve aktif filtrelerin bağlı bulunduğu dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde yük belirsizliği ve güneş ışıınımındaki değişimler dikkate

alınarak harmonik parametrelerinin limitleri dahilinde planlanmıştır. MCS tabanlı IP optimizasyon yönteminden belirlenen optimal FV sistem katılım oranlarının beklenen değerleri 7 baralı, 13 baralı ve 25 baralı dağıtım şebekelerinde farklı güneş ışıını senaryoları için aktif filtrelerin ilgili şebekelere entegre edilmediği ve edildiği durumlar göz önünde bulundurularak Tablo 5.5'te verilmiştir. Tablo 5.5'te görüldüğü üzere, aktif filtre işleminin dağıtım şebekelerinde uygulanması harmonik parametrelerinin minimize edilmesini sağladığından optimal FV katılım oranlarının beklenen değerlerinde yükselmeler gözlenmiştir. 7 baralı, 13 baralı ve 25 baralı dağıtım şebekelerinde harmoniklerin filtreleme işlemlerinin uygulanması sonucu optimal FV katılım oranlarının beklenen değerleri, düşük güneş ışıını senaryosunda maksimum % 73.04, % 87.62 ve % 80.54 seviyelerine getirilmiştir. Bu sonuçlar, dağıtım şebekelerinde aktif güç filtrelerinin harmonik kompanzasyonu açısından avantajlarını göstermektedir.

Tablo 5.5 Dağıtım şebekelerine aktif filtrelerin bağlanmadığı ve bağlandığı durumlarda optimal FV katılım oranlarının beklenen değerleri

Senaryolar		Optimal FV sistem katılım oranlarının beklenen değerleri (%)		
		7 baralı dağıtım şebekesi için	13 baralı dağıtım şebekesi için	25 baralı dağıtım şebekesi için
Aktif filtreler bağlanmadığında	Düşük güneş ışıını senaryosu	43.01	63.06	65.83
	Orta güneş ışıını senaryosu	37.53	54.81	60.66
	Yüksek güneş ışıını senaryosu	29.33	43.57	48.64
Aktif filtreler bağlandığında	Düşük güneş ışıını senaryosu	73.04	87.62	80.54
	Orta güneş ışıını senaryosu	70.29	81.37	77.24
	Yüksek güneş ışıını senaryosu	55.05	64.21	62.82

Doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu bir dağıtım şebekesinde FV sistemlerin katılım oranının maksimize edilmesi planlanırken, şebekedeki doğrusal olmayan yüklerin düşük harmonik bozulmalar için tasarlanması veya şebekeye harmonik kompanzasyon cihazının bağlanması alınabilecek önlemler olabilir. Doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan harmonik bozulmalar yüksek olduğunda, şebekedeki harmonik kompanzasyonu filtreler kullanılarak sağlanabilmektedir.

5.4 Sonuçlar

Tez çalışmasının 4. bölümünde MCS tabanlı IP optimizasyon yönteminden belirlenen optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri, dağıtım şebekelerinde harmonik problemleri oluşturmuştur. Bu bölümde, ilgili şebekelerde harmonik

ihlallerinin görüldüğü sorunlu baralar belirlenerek bu baralara aktif filtreler bağlanmıştır. Optimal FV katılım oranları, aktif filtrelerin entegre edildiği dağıtım şebekelerinde yük belirsizliği ve güneş ışınımındaki değişimler göz önünde bulundurularak olasılıksal optimizasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Doğrusal olmayan yüklerin ve aktif filtrelerin bağlı bulunduğu dağıtım şebekelerinde FV sistemlerin optimal katılım oranları, döngü referans yapısına dayalı üç fazlı harmonik güç akışı analizinden elde edilen THDV, IHDV^h ve RMS gerilimi kısıtlarına dayalı olarak belirlenmiştir. Simulasyon sonuçları, dağıtım şebekelerinde aktif güç filtrelerinin harmonik kompanzasyonu açısından avantajlarını göstermiştir. Filtre tasarımının ideal kriteri, şebekedeki harmonik bozulmalardan kaynaklı bütün zararlı etkilerin minimize edilmesidir. Pratik uygulamalardaki yaklaşım, şebekede bütün son kullanıcıların bulunduğu ortak bağlantı noktasında harmonik akımlar ve harmonik gerilimler açısından oluşan problemleri limitler dahilinde tutabilmektir. Doğrusal olmayan yüklerin ve FV sistemlerin bulunduğu şebekelerde aktif filtrelerin kullanımı daha da önemli bir hale gelmektedir.

6. TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, dağıtım şebekelerinde harmonik parametrelerinin limitlerini ne kadar ihlal ettikleri göz önünde bulundurularak optimal FV katılım oranlarının beklenen değerlerini belirlemek için MCS tabanlı optimizasyon yapısı önerilmiştir. Yük belirsizliği ve güneş ışınımındaki değişimlerden dolayı FV sistem çıkış güçlerinin değişkenliği optimizasyon probleminin olasılıksal bir yapı almasını sağlamaktadır. Çalışmada, optimal FV sistem çıkış güçlerinin planlaması, harmonik kısıtlarında riskler alınarak olasılıksal çerçevede gerçekleştirilmiştir. Optimal FV katılım oranları, planlamanın her bir fazında yük ve güneş ışınımının olasılıksal karakteristikleri göz önünde bulundurularak maksimize edilmiştir. Amaç, MCS yönteminin her bir iterasyonunda güç kalitesi parametrelerini limitlerinde tutarak FV katılım oranlarını maksimize etmektir.

Bu tez çalışmasında, olasılıksal yöntem ek olarak deterministik optimizasyon yöntemi önerilmiştir. K – ortalamalar kümeleme yöntemi ile gerçekleştirilen optimizasyon yönteminde problemin rastlantısallığı sınırlı sayıda senaryo ile temsil edilebilmektedir. Deterministik yöntem kullanılarak elde edilen optimizasyon sonuçları daha korumacı planlama kararları verebilmektedir. Bununla birlikte, olasılıksal optimizasyon yaklaşımı karar vericilere esneklik sağlayabilmektedir. Olasılıksal tabanlı optimizasyon sonuçları, değişkenlerin olası aralıklarındaki olasılıksal dağılımları kullanılarak belirlenebilmektedir. Bu nedenle, MCS tabanlı optimizasyon yöntemi, yük ve güneş ışınımı dağılımlarının uygun bir şekilde seçilmeleri koşuluyla optimal FV katılım oranı sonuçlarının aralığı açısından anlamlı sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte, olasılıksal optimizasyon yönteminden elde edilen optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri, harmonik parametrelerindeki ihlal sayıları açısından deterministik yöntemden elde edilen sonuçlara göre daha problemlili durumlara neden olmaktadır. Optimal FV katılım oranı problemi deterministik yöntemde bütün yük ve güneş ışınımı değerlerine karşılık gelen harmonik kısıt denklemleri göz önünde bulundurularak çözülürken, bu problem olasılıksal yöntemin her bir iterasyonundaki kısıtlar ayrı ayrı göz önünde bulundurularak ele alınmaktadır.

FV sistemlerin şebekedeki katılım oranlarındaki artış ve güneş ışınımındaki ani değişimler, harmonik parametrelerinde ihlallere neden olabilmektedir. FV sistemler, güneş ışınımı senaryosuna bağlı olarak bu parametreler üzerinde farklı etkilere sahiptir. Güneş ışınımı seviyeleri, FV sistemin harmonik parametreleri üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, bu tez çalışmasında dağıtım şebekelerinde FV sistemlerinin etkilerini incelemek için farklı güneş ışınımı

senaryoları göz önünde bulundurulmuştur. Dağıtım şebekesinin her bir noktasındaki FV sistemler, pratikteki çalışma koşullarında farklı güneş ışıını seviyelerine maruz kalabilmektedir. Bu çalışmada, pratik uygulamalardaki bu durum göz önünde bulundurulmuştur. Bu nedenle, optimal FV katılım oranları, düşük, orta ve yüksek güneş ışıını koşulları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Şebekeye bağlı üç fazlı FV sistem modeli, farklı güneş ışıını koşulları altında FV şebeke akımının harmonik bileşenlerini belirlemek için kullanılmıştır. FV sistemin akımının harmonik bileşenleri güneş ışıınındaki değişimlere dayalı olarak farklı davranışlar sergilediğinden dolayı optimizasyon yapısı bu değişimler göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. FV sistemlerin dağıtım şebekelerinin harmonik parametrelerine etkileri, harmonik bozulmaların güneş ışıını koşullarına bağılılığı göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. FV sistemlerin akım harmonikleri yüksek güneş ışıını koşullarında daha düşük iken, şebeke gerilimindeki harmonik bozulmalar bu ışıını koşullarında daha yüksek olmaktadır. Bunun nedeni, FV sistem çıkış gücünün bu koşullarda daha baskın olmasıdır. FV katılım oranı artırıldığında, şebekedeki harmonik parametreleri limitlerini ihlal edebilmektedir. Buna bağılı olarak, bu tez çalışmasında FV katılım oranlarının optimal planlaması harmonik problemleri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. Dağıtım şebekelerindeki FV sistemlerde yüksek güneş ışıını koşulları gözleendiğinde gerilimdeki toplam harmonik bozulmalar beklenmeyen seviyelere gelmektedir. Bu durum, optimal FV katılım oranı üzerinde limitleyici etkiye sahip olmaktadır.

Güç elektroniği tabanlı cihazların şebekelerde yaygın kullanımından dolayı harmonik bozulmalar önemli hale gelmektedir. Harmonikler için uygun minimize etme yöntemleri kullanılmadığı durumlarda güç kalitesi düşmektedir. Diğer taraftan, şebekedeki son kullanıcıların yüksek güç kalitesi talepleri dağıtım şirketlerinin gerekli önlemleri almasını sağlamaktadır. Bu nedenle, elektrik şebekelerindeki güç kalitesi standartlarının sağlanması için çeşitli araştırmalar göz önünde bulundurulmaktadır. Günümüzde, elektrik dağıtım şebekelerindeki yüklerin büyük bir kısmı güç elektroniği ara yüzlerine dayalıdır. Bu yükler, genellikle doğrusal olmayan davranış göstermekte olup, şebekede belirli seviyelerde harmonik akımlarının oluşmasına neden olmaktadır. Güç kalitesi, bu harmonik bozulmalardan dolayı beklenmeyen seviyelerde olmaktadır. Bu nedenle, elektrik şebekelerinde güç kalitesini yükseltmek için uygun harmonik minimize etme yöntemlerine başvurulmaktadır. Diğer taraftan, şebekelerdeki son kullanıcılar tarafından kullanılan cihazlar harmonik bozulmalara karşı çok hassas durumda olmaktadır. Bu durum, yüksek güç kalitesi ihtiyacını doğurmakta ve güç

kalitesi kaynaklı problemlerin minimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, dağıtım şebekesindeki son kullanıcılar harmonik bozulmalardan dolayı ödedikleri gücün kalitesi hakkında endişe duymaktadır. Bir başka deyişle, son kullanıcılar açısından güç kalitesinin yüksek olduğu oranda refah düzeyi de iyileşmektedir. Bu nedenle, dağıtım şirketlerinin şebekedeki harmonik bozulmaların minimize edilmesi konusundaki çalışmaları giderek artmaktadır. Bu kapsamda, şebekedeki harmonik bozulmaların azaltılması açısından aktif güç filtreleri önemli bir rol oynamaktadır. Bunun bir sonucu olarak, bütün müşteriler elektriksel güçten yüksek kalitede yararlanmaktadır.



7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, şebekeye bağlı FV sistemin literatür tarafından kabul görmüş Matlab/Simulink modeli kullanılmıştır. Harmonik bileşenler, FFT yönteminin şebekeye bağlı FV sistem modeline IEC 61000-4-7, IEC 61727 ve EN 50160 standartları göz önünde bulundurularak uygulanması ile elde edilmiştir. Gerçekleştirilen simulasyonlardan elde edilen bulgular, güneş ışınımındaki ani değişimlerin FV sistemin çalışma noktalarını değiştirdiğini göstermiştir. FV sistemin şebeke akımının harmonik bileşenleri ve toplam harmonik bozulma değerleri, güneş ışınımındaki bu değişimlerden etkilenmiştir. Şebeke akımının harmonik spektrumunun yüzdelik değerleri ve toplam harmonik bozulma değerleri, düşük güneş ışınımı koşullarında yükselmiştir. Bununla birlikte, nominal güneş ışınımı durumunda bu değerlerin standartlarda belirtilen limitleri ile uyumlu oldukları görülmüştür.

Çalışmada, FV sistemlerin optimal katılım oranları, dengesiz üç fazlı dağıtım şebekelerinde harmonik bozulmalar göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Şebekelerdeki doğrusal olmayan yükler ve FV sistemler, harmonik akım kaynakları olarak modellenmiştir. Dağıtım sistemlerindeki optimal FV katılım oranları, önerilen deterministik ve olasılıksal optimizasyon algoritmalarının farklı güneş ışınımı senaryoları göz önünde bulundurularak uygulanması sonucu elde edilmiştir. IP yöntemi, sırasıyla MCS ve k – ortalamalar kümeleme yöntemleri ile birlikte ayrı ayrı uygulanmıştır. Güneş ışınımındaki değişimlerin FV sistemin şebekeye enjekte ettiği akımın harmonik spektrumuna etkileri, önerilen yöntemlerde göz önünde bulundurulmuştur. Döngü referans yapısına dayalı üç fazlı harmonik güç akışı yöntemi, FV sistemlerin ve doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu dağıtım şebekelerinde gerilimdeki toplam harmonik bozulma, gerilimdeki tekil harmonik bozulma ve RMS gerilimi gibi harmonik parametrelerinin elde edilmesi için kullanılmıştır. FV sistemlerin şebekedeki optimal katılım oranları, güneş ışınımındaki değişimlerden dolayı FV sistemlerin çıkış güçlerinin belirsizliği ve dengesiz üç fazlı dağıtım şebekesinin uzun dönemdeki yük profili göz önünde bulundurularak harmonik kısıtları altında belirlenmiştir.

Deterministik optimizasyon yöntemi, bütün güneş ışınımı ve yük senaryolarına karşılık gelen harmonik parametrelerinin kısıt fonksiyonları aynı anda göz önünde bulundurularak gerçekleştirilirken, olasılıksal optimizasyon yöntemi risk alınarak uygulanmıştır. Bu durumda, k – ortalamalar kümeleme ile IP optimizasyon yönteminin gerçekleştirildiği durumda optimal FV sistem katılım

oranları, MCS ile bu optimizasyon algoritmasının uygulandığı duruma göre daha düşük elde edilmiştir. Optimal FV katılım oranları, yüksek güneş ışıınımı senaryosunda diğer senaryolara göre daha fazla kısıtlanmıştır. Bunun nedeni, gerilimdeki harmonik bozulmalar açısından en kötü koşulların yüksek güneş ışıınımı durumunda gerçekleşmesidir. Yüksek güneş ışıınımı senaryosunda gerilimdeki toplam harmonik bozulmalar daha yüksek olmasına karşın, düşük güneş ışıınımı senaryosunda FV sistemin akımının toplam harmonik bozulma değerleri daha yüksek elde edilmiştir. Yüksek güneş ışıınımı koşullarında, FV sistemin şebeke akımının harmonik spektrumunun yüzdelik değerleri azalmasına rağmen bu sistemin çıkış gücü şebekede daha etkin olduğundan bu koşullarda gerilimdeki toplam harmonik bozulmalar yükselmektedir.

MCS tabanlı IP optimizasyon yönteminden belirlenen optimal FV çıkış güçlerinin beklenen değerleri, dağıtım şebekelerinde harmonik problemleri oluşturmuştur. İlgili şebekelerde harmonik ihlallerinin görüldüğü sorunlu baralar belirlenerek bu baralara aktif filtreler bağlanmıştır. Optimal FV katılım oranları, aktif filtrelerin entegre edildiği dağıtım şebekelerinde yük belirsizliği ve güneş ışıınımındaki değişimler göz önünde bulundurularak olasılıksal optimizasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Doğrusal olmayan yüklerin ve aktif filtrelerin bağlı bulunduğu dağıtım şebekelerinde FV sistemlerin optimal katılım oranları, harmonik kısıtlarına dayalı olarak belirlenmiştir. Simulasyon sonuçları, dağıtım şebekelerinde aktif güç filtrelerinin harmonik kompanzasyonu açısından avantajlarını göstermiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abdelsalam, A.A., and El-Saadany, E.F.,** 2013, Probabilistic approach for optimal planning of distributed generators with controlling harmonic distortions, IET Generation, Transmission and Distribution, 7(10): 1105-1115 pp.
- Alam, M.N., Das, B., and Pant, V.,** 2016, An interior point method based protection coordination scheme for directional overcurrent relays in meshed networks, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 81: 153-164 pp.
- Arrillaga, J., Bradley, D.A. and Bodeger, P.S.,** 1985, Power system harmonics, John Wiley and Sons, England.
- Barutcu, I.C., and Karatepe, E.,** 2017, Influence of phasor adjustment of harmonic sources on the allowable penetration level of distributed generation, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 87: 1-15 pp.
- Bhowmik, A., Maitra, A., Halpin, S.M., and Schatz, J.E.,** 2003, Determination of allowable penetration levels of distributed generation resources based on harmonic limit considerations, IEEE Transactions on Power Delivery, 18(2): 619-624 pp.
- Chen, T.H., and Yang, N.C.,** 2009, Three-phase power-flow by direct Z BR method for unbalanced radial distribution systems, IET Generation, Transmission and Distribution, 3(10): 903-910 pp.
- Chen, T.H., and Yang, N.C.,** 2010, Loop frame of reference based three-phase power flow for unbalanced radial distribution systems, Electric Power Systems Research, 80(7): 799-806 pp.
- Chen, T.H., Chen, M.S., Hwang, K.J., Kotas, P., and Chebli, E.A.,** 1991a, Distribution system power flow analysis-a rigid approach, IEEE Transactions on Power Delivery, 6(3): 1146-1152 pp.
- Chen, T.H., Chen, M.S., Inoue, T., Kotas, P., and Chebli, E.A.,** 1991b, Three-phase cogenerator and transformer models for distribution system analysis, IEEE Transactions on Power Delivery, 6(4): 1671-1681 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chicco, G., Schlabbach, J., and Spertino, F.,** 2009, Experimental assessment of the waveform distortion in grid-connected photovoltaic installations, *Solar Energy*, 83(7): 1026-1039 pp.
- Chidurala, A., Saha, T.K., and Mithulananthan, N.,** 2016, Harmonic impact of high penetration photovoltaic system on unbalanced distribution networks-learning from an urban photovoltaic network, *IET Renewable Power Generation*, 10(4): 485-494 pp.
- Ciric, R.M., Feltrin, A.P., and Ochoa, L.F.,** 2003, Power flow in four-wire distribution networks-general approach, *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(4): 1283-1290 pp.
- Colmenar-Santos, A., Reino-Rio, C., Borge-Diez, D., and Collado-Fernandez, E.,** 2016, Distributed generation: a review of factors that can contribute most to achieve a scenario of DG units embedded in the new distribution networks, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59: 1130-1148 pp.
- Dash, P.K., Padhee, M., and Barik, S.K.,** 2012, Estimation of power quality indices in distributed generation systems during power islanding conditions, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 36(1): 18-30 pp.
- Degroote, L., Vandeveld, L., and Renders, B.,** 2010, Fast harmonic simulation method for the analysis of network losses with converter-connected distributed generation, *Electric Power Systems Research*, 80(11): 1332-1340 pp.
- EN 50160,** 2010, Voltage characteristic of electricity supplied by public distribution systems.
- Enslin, J.H.R., and Heskes, P.J.M.,** 2004, Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(6): 1586-1593 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- 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: 140-148 pp.
- Ghaffarzadeh, N., and Sadeghi, H.,** 2016, A new efficient BBO based method for simultaneous placement of inverter-based DG units and capacitors considering harmonic limits, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 80: 37-45 pp.
- HassanzadehFard, H., and Jalilian, A.,** 2018, Optimal sizing and location of renewable energy based DG units in distribution systems considering load growth, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 101: 356-370 pp.
- Hengsritawat, V., Tayjasant, T., and Nimpitiwan, N.,** 2012, Optimal sizing of photovoltaic distributed generators in a distribution system with consideration of solar radiation and harmonic distortion, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 39: 36-47 pp.
- Hernandez, J.C., Ortega, M.J., De la Cruz, J., and Vera, D.,** 2011, Guidelines for the technical assessment of harmonic, flicker and unbalance emission limits for PV-distributed generation, *Electric Power Systems Research*, 81: 1247-1257 pp.
- IEEE Standards Association,** 2014, IEEE Std 519-2014-Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Power and Energy Society, 29.
- International Electrotechnical Commission,** 1995, Photovoltaic (PV) systems – characteristics of the utility interface, IEC 61727.
- International Electrotechnical Commission,** 2009, 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, IEC 61000-4-7, Ed. 2.1.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jain, S.K., and Singh, S.N.**, 2011, Harmonic estimation in emerging power system: key issues and challenges, *Electric Power System Research*, 81(9): 1754-1766 pp.
- Jashfar, S., and Esmaili, S.**, 2014, Volt/var/THD control in distribution networks considering reactive power capability of solar energy conversion, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 60: 221-233 pp.
- Kalesar, B.M., and Seifi, A.R.**, 2010, Fuzzy load flow in balanced and unbalanced radial distribution systems incorporating composite load model, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 32: 17-23 pp.
- Kamh, M.Z., and Iravani, R.**, 2010, Unbalanced model and power-flow analysis of microgrids and active distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(4): 2851-2858 pp.
- Kashif, M., Hossain M.J., Zhou, F., and Gautam, S.**, 2018, Design and implementation of a three-level active power filter for harmonic and reactive power compensation, *Electric Power System Research*, 165: 144-156 pp.
- Kersting W.H.**, 2012, *Distribution system modeling and analysis*. CRC press.
- Khoa, T.Q.D., Binh, P.T.T., and Tran, H.B.**, 2006, Optimizing location and sizing of distributed generation in distribution systems, *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, Atlanta, GA, 725-732 pp.
- Khushalani, S., Solanki, J.M., and Schulz, N.N.**, 2007, Development of three-phase unbalanced power flow using PV and PQ models for distributed generation and study of the impact of DG models, *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(3): 1019-1025 pp.
- Lakum, A., and Mahajan, V.**, 2019, Optimal placement and sizing of multiple active power filters in radial distribution system using grey wolf optimizer in presence of nonlinear distributed generation, *Electric Power System Research*, 173: 281-290 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lo, K.L., and Zhang, C.,** 1993, Decomposed three-phase power flow solution using the sequence component frame, IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution, 140(3): 181-188 pp.
- Luo, A., Xie, N., Shuai, Z., Chen, Y., Jin, G., Ma, F., and Lv, Z.,** 2015, Large-scale photovoltaic plant harmonic transmission model and analysis on resonance characteristics, IET Power Electronics, 8(4): 565-573 pp.
- Mahela, O.P., and Shaik, A.G.,** 2017, Power quality recognition in distribution system with solar energy penetration using S-transform and Fuzzy C-means clustering, Renewable Energy, 106: 37-51 pp.
- Marini, A., Ghazizadeh, M.S., Mortazavi, S.S., and Piegari, L.,** 2019, A harmonic power market framework for compensation management of DER based active power filters in microgrids, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 113: 916-931 pp.
- Martins, L.S.A., Azevedo, A.T., and Soares, S.,** 2014, Nonlinear medium-term hydro-thermal scheduling with transmission constraints, IEEE Transactions on Power Systems, 29(4): 1623-1633 pp.
- Menti, A., Zacharias, T., and Milias-Argitis, J.,** 2011, Harmonic distortion assessment for a single-phase grid-connected photovoltaic system, Renewable Energy, 36: 360-368 pp.
- Moghaddas-Tafreshi, S.M., and Mashhour, E.,** 2009, Distributed generation modeling for power flow studies and a three-phase unbalanced power flow solution for radial distribution systems considering distributed generation, Electric Power Systems Research, 79(4): 680-686 pp.
- Mohammadi, M., Rozbahani, A.M., and Montazeri, M.,** 2016, Multi criteria simultaneous planning of passive filters and distributed generation simultaneously in distribution system considering nonlinear loads with adaptive bacterial foraging optimization approach, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 79: 253-262 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Muthuramalingam, M., and Manoharan, P. S.,** 2014, Comparative analysis of distributed MPPT controllers for partially shaded stand alone photovoltaic systems, *Energy Conversion and Management*, 86: 286-299 pp.
- Na, S., Xumin, L., and Yong, G.,** 2010, Research on k-means clustering algorithm: an improved k-means clustering algorithm, *Third international symposium on intelligent information technology and security informatics IITSI*, 63-67 pp.
- National Oceanic and Atmospheric Administration,** 2018, <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/land-based-station-data/land-based-datasets/solar-irradiance> (Erişim tarihi: 28 Kasım 2018).
- Oliva, A.R., and Balda, J.C.,** 2003, A PV dispersed generator: a power quality analysis within the IEEE 519, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(2): 525-530 pp.
- Oppenheim, A. V.,** 1999, *Discrete-time signal processing*. Pearson Education India.
- Pandi, V.R., Zeineldin, H.H., Xiao, W., and Zobaa, A.F.,** 2013a, Optimal penetration levels for inverter-based distributed generation considering harmonic limits, *Electric Power Systems Research*, 97: 68-75 pp.
- Pandi, V.R., Zeineldin, H.H., and Xiao, W.,** 2013b, Determining optimal location and size of distributed generation resources considering harmonic and protection coordination limits, *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(2): 1245-1254 pp.
- Papaioannou, I.T., Alexiadis, M.C., Demoulias, C.S., and Labridis, D.P.,** 2009, Modeling and measurement of small photovoltaic systems and penetration scenarios, *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, Bucharest, Romania, 1-7 pp.
- Papaioannou, I.T., Alexiadis, M.C., Demoulias, C.S., Labridis, D.P., and Dokopoulos, C.S.,** 2011, Modeling and field measurements of photovoltaic units connected to LV grid, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(2): 979-987 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Patel, H., and Agarwal, V.,** 2010, Investigations into the performance of photovoltaics-based active filter configurations and their control schemes under uniform and non-uniform radiation conditions, IET renewable power generation, 4(1): 12-22 pp.
- Patsalides, M., Stavrou, A., Efthymiou, V., and Georghiou, G.E.,** 2012, Towards the establishment of maximum PV generation limits due to power quality constraints, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 42(1): 285-298 pp.
- Patsalides, M., Efthymiou, V., Stavrou, A., and Georghiou, G.E.,** 2016, A generic transient PV system model for power quality studies, Renewable Energy, 89: 526-542 pp.
- Prakash, P., and Khatod, D.K.,** 2016, Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57: 111-130 pp.
- Pukhrem, S., Basu, M., and Conlon, M.,** 2018, Probabilistic risk assessment of power quality variations and events under temporal and spatial characteristic of increased PV integration in low voltage distribution networks, IEEE Transactions on Power Systems, 33(3): 3246-3254 pp.
- Ran, X., and Miao, S.,** 2015, Probabilistic evaluation for static voltage stability for unbalanced three-phase distribution system, IET Generation, Transmission and Distribution, 9(14): 2050-2059 pp.
- Rawat, R., Kaushik, S.C., and Lamba, R.,** 2016, A review on modeling, design methodology and size optimization of photovoltaic based water pumping, standalone and grid connected system, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57: 1506-1519 pp.
- Rodriguez-Calvo, A., Cossent, R., and Frías, P.,** 2017, Integration of PV and EVs in unbalanced residential LV networks and implications for the smart grid and advanced metering infrastructure deployment, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 91: 121-134 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Sidrach-de-Cardona, M., and Carretero, J.,** 2005, Analysis of the current total harmonic distortion for different single-phase inverters for grid-connected pv-systems, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 87(1-4): 529-540 pp.
- Silvestre, S., Kichou, S., Chouder, A., Nofuentes, G., and Karatepe, E.,** 2015, Analysis of current and voltage indicators in grid connected PV (photovoltaic) systems working in faulty and partial shading conditions, *Energy*, 86: 42-50 pp.
- Taher, S.A., and Bagherpour, R.,** 2013, A new approach for optimal capacitor placement and sizing in unbalanced distorted distribution systems using hybrid honey bee colony algorithm, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 49: 430-448 pp.
- Teng, J.H.,** 2003, A direct approach for distribution system load flow solutions, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(3): 882-887 pp.
- Teng, J.H., and Chang, C.Y.,** 2007, Backward/forward sweep-based harmonic analysis method for distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(3): 1665-1672 pp.
- Teng, J.H., Liao, S.H., and Leou, R.C.,** 2014, Three-phase harmonic analysis method for unbalanced distribution systems, *Energies*, 7(1): 365-384 pp.
- Thukaram, D., Banda, H.M.W., and Jerome, J.,** 1999, A robust three phase power flow algorithm for radial distribution systems, *Electric Power Systems Research*, 50(3): 227-236 pp.
- Urbanetz, J., Braun, P., and Rüther, R.,** 2012, Power quality analysis of grid-connected solar photovoltaic generators in Brazil, *Energy Conversion and Management*, 64: 8-14 pp.
- Vieira, J.C.M., Freitas, W., and Morelato, A.,** 2004, Phase-decoupled method for three-phase power-flow analysis of unbalanced distribution systems, *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 151(5): 568-574 pp.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Wang, S., Liu, X., Wang, K., Wu, L., and Zhang, Y.,** 2018, Tracing harmonic contributions of multiple distributed generations in distribution systems with uncertainty, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 95: 585-591 pp.
- Yan, Y.H., Chen, C.S., Moo, C.S., and Hsu, C.T.,** 1994, Harmonic analysis for industrial customers, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30(2): 462-468 pp.
- Yang, N.C.,** 2016, Three-phase power flow calculations using direct Z BUS method for large-scale unbalanced distribution networks, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 10(4): 1048-1055 pp.
- Yang, N.C., and Le, M.D.,** 2016, Loop frame of reference based harmonic power flow for unbalanced radial distribution systems, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 77: 128-135 pp.
- Yang, N.C., and Tseng, W.C.,** 2015, Adaptive three-phase power-flow solutions for smart grids with plug-in hybrid electric vehicles, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 64: 1166-1175 pp.
- Zimmerman, R.D., and Chiang, H.D.,** 1995, Fast decoupled power flow for unbalanced radial distribution systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(4): 2045-2052 pp.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca verdiği desteklerden dolayı danışmanım Doç. Dr. Mutlu BOZTEPE'ye, bu uzun ve zorlu süreçte doğru yönlendirmeleriyle akademik olarak alanımda gelişmeye büyük katkıları bulunan danışmanım Doç. Dr. Engin KARATEPE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde büyük emekleri olan anneme, babama ve abime, yollarımızın kesiştiği andan itibaren her alanda beni destekleyen, umutsuzluğa kapıldığımda motive eden sevgili eşim Emel'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm eğitim hayatım süresince benden desteklerini esirgemeyen herkese çok teşekkür ederim.

07/02/2020

İbrahim Çağrı BARUTÇU

ÖZGEÇMİŞ

Ad: İbrahim Çağrı
Soyad: BARUTÇU
Uyruğu: Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri: Tercan
Doğum Tarihi: 01.05.1988
E-mail Adresi: ibrahim.cagri.barutcu@ege.edu.tr
 ibrahim.cagri.barutcu@gmail.com
Adres: Ege Üniversitesi
 Mühendislik Fakültesi
 Elektrik-Elektronik Mühendisliği
 35100, Bornova, İzmir
Lisans Eğitimi: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
 Mühendislik Mimarlık Fakültesi
 Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Yüksek Lisans Eğitimi: Ege Üniversitesi
 Mühendislik Fakültesi
 Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Araştırma Alanları: Dağıtım sistemlerinde planlama ve optimizasyon
 Dağıtım sistemlerinde FV sistem entegrasyonu
 Dağıtım şebekelerinde harmonikler
 Fotovoltaik sistemler

Yayınlar:

- 1) Barutcu, I.C., Karatepe, E.: “Power factor improvement and harmonic distortion aspects in power networks considering inverter based renewable energy resources”, 7th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE), 18-20 June 2014, Usak, Turkey.
- 2) Barutcu, I.C., Karatepe, E.: “Influence of phasor adjustment of harmonic sources on the allowable penetration level of distributed generation”, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2017, 87: pp. 1-15.
- 3) Barutcu, I.C., Karatepe, E., Boztepe, M.: “Fotovoltaik sistemlerin dengesiz üç fazlı elektrik dağıtım şebekesi üzerindeki etkilerinin olasılıksal analizi”, 10. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi (YEKSEM), 12-14 Aralık 2019, Antalya, Türkiye.
- 4) Barutcu, I.C., Karatepe, E., Boztepe, M.: “Impact of harmonic limits on PV penetration levels in unbalanced distribution networks considering load and irradiance uncertainty”, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 118: 105780.