



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Fotovoltaik güneş santrallerinde şebeke bağlantı sorunları ve çözümleri

## *Problems and solutions of grid-connected in photovoltaic solar plants*

Yazarlar (Authors): Nursal ARICI<sup>1</sup>, Aslı İSKENDER<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-9181-9377

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-4433-8084

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Arıcı N., İskender A., “Fotovoltaik güneş santrallerinde şebeke bağlantı sorunları ve çözümleri”, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 215-222, (2020).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik. 644820

# Fotovoltaik Güneş Santrallerinde Şebeke Bağlantı Sorunları ve Çözümleri

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Nursal ARICI, Aslı İSKENDER\***

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Beşevler, Ankara

(Geliş/Received : 17.01.2019 ; Kabul/Accepted : 31.03.2019)

## ÖZ

Herhangi bir kaynaktan dağıtım sistemine bağlanan güç santralleri Dağıtık Enerji Santralleri olarak adlandırılır. Türkiye’de 1 MW’tan daha az güç üreten yenilenebilir kaynaklı santrallerin lisanssız üretim yapma hakkı bulunmamaktadır. Dolayısıyla bu santrallerden biri olan Fotovoltaik (FV) sistemlerin şebeke bağlantı sorunlarına karşı önceden önlem alınması adına gelişmiş ülkelerde standartlar geliştirilerek uygulamaya konulmuştur. Ülkemizde de belirli güçlerdeki lisanssız FV sistemlerin şebekeye bağlantıları için mevzuatta kolaylıklar sağlanmıştır. FV sistemlerin şebekenin enerji kalitesinde özellikle de gerilim açısından dalgalanmalar yarattığı da bir gerçektir. Bu tip şebeke bağlantı sorunlarını azaltarak güç kalitesini iyileştirmeye yönelik çalışmaların artması fotovoltaiklerin kullanımında önemli avantajlar sağlayacaktır. Bu çalışmada FV güneş santrallerinin şebekeye bağlantı sorunları irdelenmiş, önemli sorunların çözümlerine yönelik öneriler getirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş enerjisi, şebeke sorunları, FV.

## Problems and Solutions of Grid-Connected in Photovoltaic Solar Plants

### ABSTRACT

Power plants connected to the distribution system from any source are called Distributed Power Plants. The right to license the production of renewable-source generating less power than 1 MW power plants in Turkey is not available. Therefore, one of these plants, photovoltaic (PV) systems in order to take precaution against network connection problems in developed countries, standards were developed and put into practice. In our country, the legislation has been provided for the connection of unlicensed photovoltaic systems of certain powers to the grid. It is a fact that photovoltaic systems create fluctuations in the energy quality of the grid, especially in terms of voltage. Increasing efforts to improve power quality by reducing such grid connection problems will provide significant advantages in the use of photovoltaics. In this study, the connection problems of PV solar power plants to the grid have been examined and suggestions have been made to solve important problems.

**Key words:** Solar energy, grid problems, PV.

### 1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tüm Dünya’nın bildiği gibi enerji yaşamımızı doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Çevre kirliliği, küresel ısınma, ozon tabakasının incilmesi, insan sağlığına olumsuz etkisi gibi sorunların yanı sıra fosil yakıtların giderek azalması ile yenilenebilir enerji üretimi son yıllarda oldukça önem kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik üretiminin ilk yatırım maliyetleri giderek azalmakta ve temiz enerji kaynakları olarak değerlendirilmektedir.

Türkiye’nin yıllık ortalama güneş ışınımı miktarı 1303 kWh/m<sup>2</sup>yıl olup ortalama güneşlenme süresi 2623 saattir. Dolayısıyla günlük 3.6 kWh/m<sup>2</sup> lik bir güç eldesi mümkün kılınmaktadır. Türkiye’nin güneş enerjisinden 26.2 milyon TEP (ton eşdeğer petrol) yararlanma potansiyeline sahiptir. Bu potansiyelin değerlendirilmesinde FV sektörünün, Türkiye’de yakın gelecekte kayda değer bir gelişme göstermesi

beklenmektedir. 2018 sonu itibarıyla Türkiye’nin Elektrik Kurulu Gücü, 88452 MW’a ulaşmıştır. 2018 yılı kaynak bazında dağılımda güneş enerjisinin kurulu gücü 5062.83 MW’a ulaşarak, kurulu güç içerisindeki payı %5.7’ye ulaşmıştır [1].

FV sistemlerin yaygın olarak kullanımı, sistemlerin şebekeye bağlantısında oluşabilecek sorunların giderilmesiyle güç kalitesinin artırılmasına bağlıdır. Bu çalışma ile FV sistemlerin şebekeye bağlantılarında oluşabilecek sorunlar ve bunların çözümleri üzerine öneriler sunulmuştur.

### 2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE REVIEW)

FV sistemlerde en önemli parametrelerden biri verimliliğidir. Bu durumda bir FV sistemin tüm elemanlarının mühendislik açısından incelenmesi, fotovoltaik modüllerin konumlandırılması oldukça önemlidir. En yaygın olarak kullanılan kristal silisyum teknolojisinin verimliliği %15’in üzerinde olup diğer

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : aslipeyk@gmail.com

teknolojilere göre daha az maliyetlidir. FV sistemler için kalite ve güvenilirlik açısından yapılan çalışmaların yanı sıra yatırımcılar için maliyeti ve sistemde oluşabilecek riskleri en aza indirme amaçlı incelemeler yapılmaktadır. FV güç sistemleri belirli uluslararası standartla uygun olarak ve tasarımı etkileyen iklim koşullarına göre tasarlanırlar.

Bu FV sistemleri etkileyen etmenler şunlardır: Güneş ışınım miktarı, nem, rüzgar ve kar, sıcaklık değişimleri, toz vb. kirlerdir.

FV güç sistemlerinin izlenmesi ve performans analizine yönelik literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Fotovoltaik Güç Sistemleri (FVGS) uygulamalarının izlenmesi ve performansı analizi ile ilgili örnek bazı literatür çalışmaları ve sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

- Masoud Farhoodnea ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [2], şebekeye bağlı 3 kW<sub>p</sub> (kilo watt peak) kurulu gücünde olan bir FVGS'yi altı ay boyunca (Ekim 2013 ve Mart 2014 aralığında), Malezya'da Kebangsaan Üniversitesi'nin kampüsünde, 1 dakikalık aralıklarla izlenmiş ve yapılan modelleme ile karşılaştırılmasını yapmışlardır. Deneysel çalışmanın sorucuna göre FV modülün verimi % 10,11, eviricinin verimi % 95,15, sistemin aylık ortalama performans oranı % 77,28 ve kapasite faktörü %15,7 olarak gözlemlenmiştir.
- Gölge etkeni, FVGS'de ciddi kayıplara sebep olmaktadır. FV sisteminin tasarımı yaparken, gölge konusu öncelikli dikkate alınmalıdır. Sistem dizilerinin arasındaki mesafeler, en uygun uzaklıkta konumlandırılmalıdır. Ayrıca, sistemin dışında ortaya çıkan her türlü gölge etkisinden uzak durulmalıdır. Bu doğrultuda yapılan araştırmalara, S. Malathy ve R. Ramaprabha [3] tarafından yapılan çalışmayı örnek verebiliriz. FV dizinin gücü, FV dizisinin bağlantısı ve FV modüllerin konumu optimum şekilde tasarlanıp ve uygulanırsa, gölgeleme nedeni ile ortaya çıkan kayıplar en aza indirilmektedir.
- Radzimeska [4] çalışmasında, FVGS performansı üzerinde tozun etkisine odaklanmıştır. Polonya'da yapılan performans incelemesinde, Kristal silisyum yapıları FV modülleri gözlenmiştir. Bu çalışmaya göre, FV modülün eğimi, rüzgar hızı, tozun özellikleri ve çevre koşulları gibi etkenler, modüller üzerinde biriken toz miktarını etkilemektedir. FVGS performansında azalma, modül üzerinde biriken toz miktarı ile lineer olarak değişmektedir. Günlük enerji veriminde ortaya çıkan kayıp, kristal silisyum yapıları modüllerde 37° eğim açısında % 0,8 olarak gözlemlenmiştir. Bu araştırmaya göre, bütün modüllerde toz nedeniyle ortaya çıkan güç kaybı, senelik % 3 olarak raporlanmıştır [4].

### 3. FOTOVOLTAİKLER (PHOTOVOLTAICS)

FV hücrenin basitleştirilmiş eşdeğer devresi Şekil 1'de gösterildiği gibidir. Şekil 1'deki eşdeğer devrenin akım gerilim (I-V) denklemi, Kirchhoff'un akım kanununa

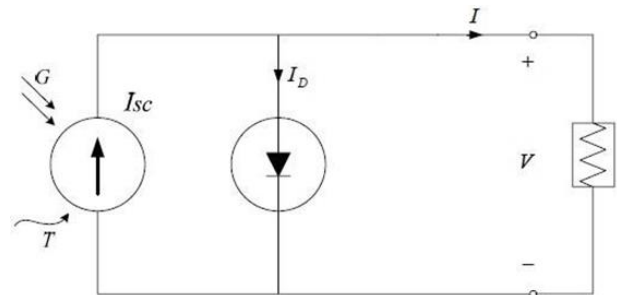
göre:

$$\begin{aligned} I_{SC} &= I - I_D \\ &= I \\ &- I_0 \left( \exp^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (1)$$

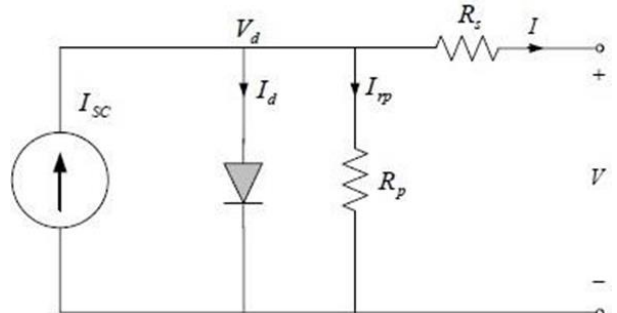
25 °C için I

$$\begin{aligned} &= I_{SC} \\ &- I_0 (e^{38.9V} - 1) \end{aligned} \quad (2)$$

verilir. Saha uygulamalarında harici kontaklar üzerinde gerilim düşümü gözlemlendiğinden buradaki gerilim kaybı, seri bir R<sub>s</sub> direnci ile ifade edildiğinde, kayıpları da dikkate alan eşdeğer devre Şekil 2'deki gibi gösterilebilir [4].



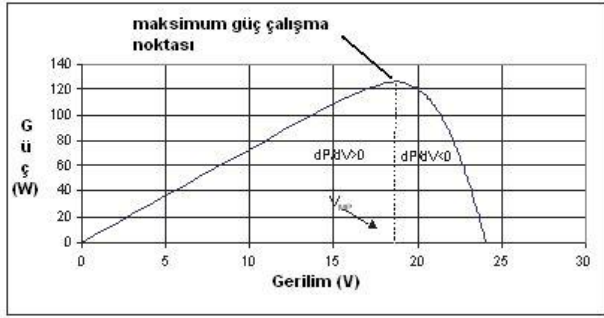
Şekil 1. FV sistemin eşdeğer devresi (Equivalent circuit of PV system) [1]



Şekil 2. FV sistemin elektriksel eşdeğer devresi (Electrically equivalent circuit of PV system) [1]

FV modüller hücrelerin seri ve paralel olarak istenilen gerilim ve güç seviyesi sağlanması prensibine göre oluşturulur. FV sistemi şebekeye bağlanması için bağlantıdan önce evirici kullanılır ve eviricinin görevi gerilim ve frekans kontrolü ile koruma ve ada konuma geçme kontrollerini yapmaktır [5].

FV sistemlerin kontrolleri maksimum çıkış gücünün izlenmesi metoduna göre yapılır. Bu prensibe göre hazırlanan kontrol algoritması FV modülün sürekli olarak güç-gerilim eğrisi üzerindeki (Şekil 3) maksimum güç noktasına yakın değerlerde sistemi tutmaya çalışır [6].



**Şekil 3.** Fotovoltaiklerin çıkış gücü-gerilim karakteristikleri (Output power-voltage characteristics of photovoltaics) [6]

FV güneş sistemlerinin verimi, elde edilen çıkış gücünün modül yüzeyine düşen toplam güneş ışınımına oranı şeklinde hesaplanır [5]: verim “ $\eta$ ” işareti ile gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \eta_{\text{maks}} &= \frac{P_{\text{maks}}}{P_{\text{ışınım}}} \\ &= \frac{I_{\text{maks}} V_{\text{maks}}}{AR_A} \end{aligned} \quad (3)$$

Sistemin verimi bir çok parametreye bağlı olmakla beraber malzemesine ve üretim yöntemine göre değişmektedir. Enerjinin büyük bir kısmı modül yüzeyinde ısı olarak elde edilmekte ancak bu ısı modüllerin verimini düşürmektedir [6].

### 3.1.Şebekeye Bağlı Sistemler (On-Grid Systems)

Güneş enerjisi santrallerinin diğer bir tipi de domestik elektrik enerjisi dağıtım şebekesine bağlı olan sistemlerdir. Uygulamalarda birçok farklı detaylar olmasına rağmen ortak özellikleri, şehir şebekesine bağlanabilen ve gerektiği durumlarda şebekeye elektrik enerjisi iletimine olanak verebilen bu sistem tipleri günümüzde oldukça yaygındır.

Bu tür sistemler temel olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Birinci sistem, kurulan Güneş panelleriyle tamamen elektrik enerjisi üreterek şebekeye destek sağlama ya da elektrik enerjisi satma amacıyla kurulan tiplerdir. Bu sistemler üretilen enerjinin büyük yükleri beslemek için değil, doğrudan şebekeye iletilmesi ve satışı nedeniyle çeşitli ölçeklerde kurulabilir. Ayrıca üretilen enerjiyi uzak noktalara taşımadan en yakında bulunan dağıtım şebeke sistemine bağlanarak iletim/dağıtım kayıplarının en az oranda tutabilmektedir[7].

İkinci sistemler ise, kullanıcının hem elektrik ihtiyacını karşılayarak kullanımın düşük olduğu durumlarda ya da paneller ile üretilen enerji üretiminin yüksek olduğu zamanlarda şebekeye satılmasına böylelikle kullanıcının gelir elde etmesine dayanmaktadır [8].

Şebekeye bağlantılı FV sistemlerin bir başka avantajı, bakım maliyetinin önemli ölçüde düşük olmasıdır ve uzun süre bakıma ihtiyacı olmadan çalışmaya devam edebilmeleridir. Bu sistemlerin elektriğin tüketildiği yere

yakın olarak üretilmesi, enerji iletim kayıplarını azaltmaktadır [4].

Şebeke bağlantılı FV sistemler şebeke yükünü hafifleterek gerekli şebeke yatırımlarını geciktirmekte ve hatta yatırımlara olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır [9].

Bu tip sistemlerde, oluşabilecek problemlerin önüne geçme amacıyla, FV sistem çıkış gerilim karakteristiği, şebekenin gerilimine oldukça yakın olmak zorundadır. Bilindiği üzere, elektrik iletim ve dağıtım şirketlerinin uyması gereken en önemli kurallardan bazıları şebeke gerilim seviyesi ve frekans değeridir. Bu nedenle elektrik şebekesine bağlanması düşünülen bir sistemin hem kendi güvenliği hem de elektrik şebeke güvenliği ve kalitesi için senkronizasyon oldukça önemlidir. Temel olarak şebekeye enterkonnekte olacak bir sistemde aranması gereken dört ana madde sıralanabilir [8]:

- FV sistem çıkış gerilim frekansı şebeke frekansı ile senkronize olmalıdır.
- FV sistem çıkış terminal gerilim büyüklüğü şebeke gerilim seviyesi ile aynı olmalıdır.
- Şebeke üç faz sırası, FV sistem çıkış fazlarının sırasıyla aynı olmalıdır.
- Faz açısı şebeke ve FV sistem arasında senkronize olmalıdır.

Aynı zamanda FV sistemde oluşabilecek bir problemde, şebeke bağlantısının çeşitli kontrol sistemleriyle kesilerek, elektrik şebekesine yansımalarının önüne geçilmelidir. Şebeke frekans dalgalanmaları ve gerilim yükselmelerinde aynı şekilde FV sistemi korumak için devre dışı hale gelmelidir [10].

FV sistemler şebekeye doğru akım vermemeli ve şebekeye bağlantısında kullanılan eviricilerin filtre devreleri içermesi gerekir. Gerilim sınırları için uluslararası standart olan EN50160 geçerli olup, alçak gerilimde nominal gerilimin  $\pm\%10$ 'una kadar bir değişime izin verilmektedir. Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmeliğe göre, can ve mal emniyetinin sağlanması için şebekeye paralel çalışan yerel üretim sistemlerinin şebeke kaybı veya kısa devre arızasının oluşması durumuna göre şebeke bağlantısının kesilmesini zorunlu kılar. Enerji depolama sistemleri olsa dahi bu bağlantı türünde yerel yükler beslenemez ve kritik yük durumunda da maddi kayıplar oluşabilmektedir. Bu sorunlar ebeke bağlantısının eviriciler yerine ayrı bir bağlantı sistemi üzerinden yapılması gerekir [11].

## 4. ŞEBEKE BAĞLANTILI FV SİSTEMLERİN ŞEBEKE BAĞLANTI SORUNLARI (MAIN CONNECTION PROBLEMS OF NETWORK CONNECTED PV SYSTEMS)

Geleneksel dağıtım sistemlerinde güç kalitesini etkileyen en önemli etken yük tarafı olurken, dağıtık enerji santrallerinin olduğu bir şebeke sisteminde ise üretim tarafı da belirleyici bir etken haline gelmiştir (Çizelge 1). Dolayısıyla dağıtım sisteminin güç kalitesi problemini

hem yükler hem de santraller açısından ayrı ayrı ele alınması gerekir.

analizi yapılırken sistemin dayanabileceği sınır değerlerinde analiz yapılması bu açıdan önemlidir [15].

**Çizelge 1.** Dağıtım sisteminin etkileri (Effects of distribution system)

Dağıtım Sistemi	Tüketim tesisi	Dağıtık Enerji Santrali	Güç Kalitesi
Geleneksel	Var	Yok	Tüketim
Modern	Var	Var	Tüketim ve Üretim

#### 4.1. Ada mod çalışma (Island mode work)

Ada mod çalışmanın anlamı, bir dağıtım sistemindeki güç sisteminin kalan kısmından elektrik olarak izole edilmesi durumunda, enerji akışının dağıtık üretim (DG) sistemi tarafından devam ettirilmesi durumudur. Ada mod çalışmada, şebeke bağlantılı FV sistem, şebeke ile bağlantısı kesildiği halde yükü beslemeye devam eder [12]. Ada mod çalışma güvenlik problemlerini de beraberinde getirir. Gerilim ve frekans değerleri izin verilen standartların dışına çıktığından PV sistem ve şebeke zarar görebilir [13]. IEEE 929-2008 standartlarına [14] göre şebeke bağlantılı bir PV sistem, ada mod çalışmaya geçtiğinde en kısa sürede şebekeden ayrılmalıdır (Çizelge 2). IEEE 1547-2015 standardına göre bu süre en fazla 2 saniye olarak belirtilmiştir [15].

**Çizelge 3.** Gerilim dalgalanması için sınır değerleri (Limit values for voltage fluctuation) [17]

PV Sistem Çalışma Durumu	Maksimum Değer
Şebeke Bağlantılı PV Sistem Devreye Girerken	$\pm \%3,3 V$
Şebeke Bağlantılı PV Sistem Devreden Çıkarken	$\pm \%3,3 V$
Devrede olduğu sürede (%95)	$\pm \%10$

#### 4.3. Uzun ve Kısa Süreli Gerilim Bozulmaları (Long and Short Term Voltage Distortions)

Bir dakikadan daha uzun süre boyunca meydana gelen nominal gerilimin etkin değerindeki değişimler uzun süreli gerilim bozulmaları olarak adlandırılır. Gerilim

**Çizelge 2.** IEEE 929-2008 tarafından belirlenen şebeke bağlantı esasları (Network connection principles set by IEEE 929-2008) [14]

No	Frekans	Gerilim	Kesici Açma Süresi
1	$f_{nom}$	$0,5V_{nom}$	6 periyot
2	$f_{nom}$	$0,5V_{nom} < V < 0,88V_{nom}$	2 sn / 120 periyot
3	$f_{nom}$	$0,88V_{nom} \leq V \leq 1,10V_{nom}$	Normal Çalışma
4	$f_{nom}$	$1,10V_{nom} < V < 1,37V_{nom}$	2 sn / 120 periyot
5	$f_{nom}$	$1,37V_{nom} \leq V$	2 periyot
6	$(f_{nom}-0,7) \leq f \leq (f_{nom}+0,5)$	$V_{nom}$	Normal Çalışma
7	$f < (f_{nom}-0,7) Hz$	$V_{nom}$	6 periyot
8	$f > (f_{nom}+0,5) Hz$	$V_{nom}$	6 periyot

#### 4.2. Gerilim dalgalanması

PV sanraller devreye girip çıkarken, gerilim düşümü veya yükselmesine neden olabilir. Bu değerler ise IEC 61000-3-3 standartlarına göre şebeke bağlantılı sistem devreye girerken ve çıkarken nominal gerilimin  $\pm \%3,3$ 'ünü aşmayacak şekilde sınırlandırılmıştır (Çizelge 3) [16]. Ayrıca güç sisteminin devrede olduğu sürenin  $\%95$ 'inde standartlar gereği nominal gerilim değerinin  $\pm \%10$ 'unu aşmamalıdır. Özellikle gerilim

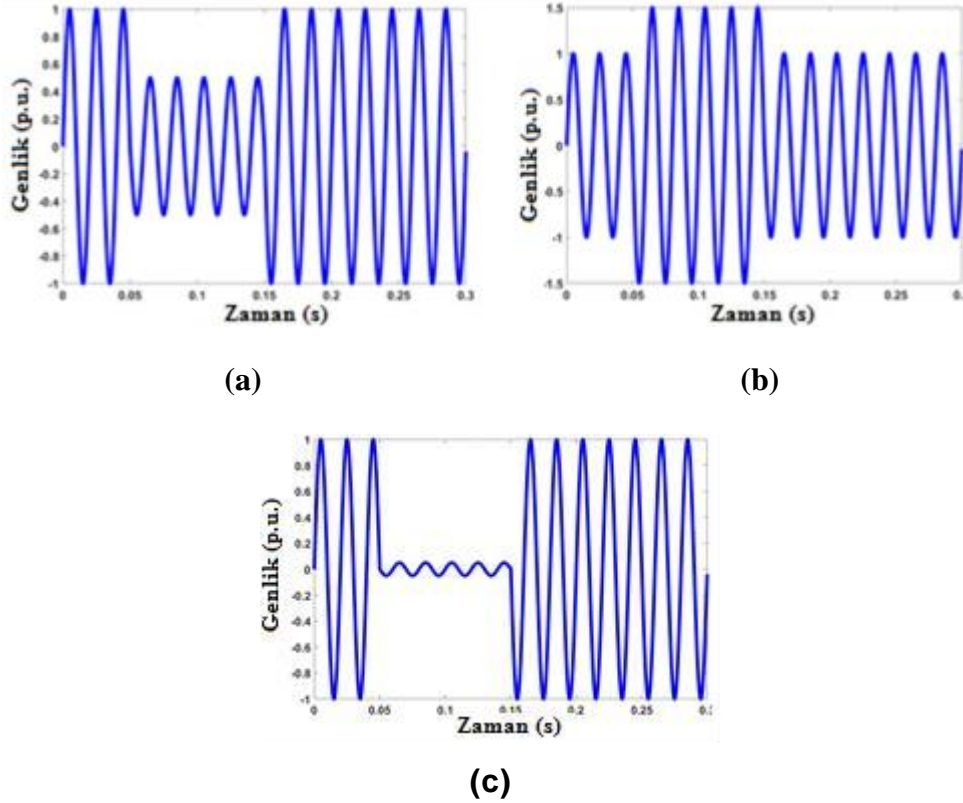
genlik değerine bağlı olarak bu değişim sistemdeki kalıcı arızalar, yük değişimi ve anahtarlama işlemleri ile ilişkili olabilir.

Gerilim değişiminin büyüklüğüne bağlı olarak, uzun süreli gerilim değişimleri düşük gerilim, aşırı gerilim ve sürekli kesinti durumları olarak sınıflandırılabilir. Şebeke nominal geriliminin etkin değerinde meydana gelen kısa süreli değişimler kısa süreli gerilim bozulmaları olarak adlandırılır.

Aşırı güç çeken motorlar, aşırı yüklenme ve hat boyunca meydana gelen arızalar gerilim çökmesine neden

#### 4.5.Harmonikler (Harmonics)

Güç sisteminde meydana gelen harmoniklerin başlıca



Şekil 6. (a) Gerilim çökmesi, (b) gerilim sıçraması ve (c) gerilim kesintisi ((a) Voltage failure, (b) voltage jump and (c) voltage failure)[15]

olmaktadır. Gerilim çökmesi olayı, şebeke frekansında çalışan bir güç sisteminde 10ms-60s zaman aralığında sınırlı olmak kaydıyla, gerilimdeki %10-90 arasında meydana gelen azalma olarak tanımlanır.

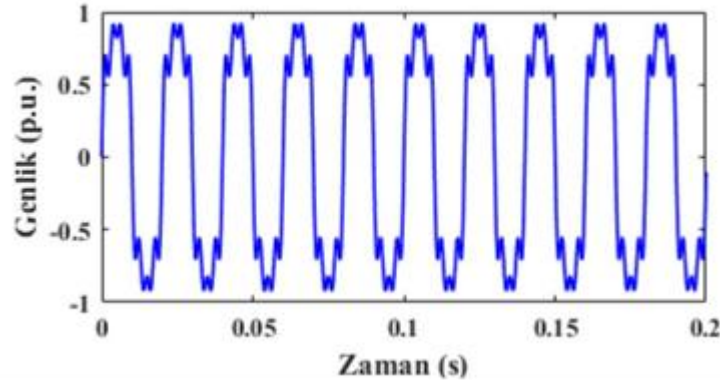
Gerilim sıçraması olayı, şebeke frekansında çalışan bir sistemde 10ms-60s zaman aralığında sınırlı olmak kaydıyla, gerilimdeki %110-%180 arasında meydana gelen artış olarak tanımlanır. Büyük endüktif yüklerin devreden alınması veya büyük kapasitör banklarının devreye alınması gibi güç sistemindeki manevralar ile simetrik olmayan arızaların, arızasız fazlarında gerilim sıçramaları oluşur. Konumuna ve güç sistemi koşullarına bağlı olarak bir arıza veya güç kalitesi problemi, gerilim çökmesine, gerilim sıçramasına veya gerilim kesintisine neden olabilir. Şekil 6'da arıza sonrasında oluşan gerilim şekilleri gösterilmiştir [15].

#### 4.4.Gerilim dengesizliği

Alçak gerilim şebekesi için sadece gerilimin negatif bileşeni dikkate alınarak oluşturulan EN 50160 standartlarına göre ölçüm süresinin %95'inde gerilim dengesizliği %2'yi geçmemelidir. Gerilim dengesizliğinin önlenmesi amacıyla her bir faza miktarda FV santral bağlanarak, güç fazlara mümkün olduğunca eşit olarak dağıtılmalıdır.

kaynakları, yarı iletken kontrollü güç kaynakları, inverterler, frekans dönüştürücüler, kaynak makineleri, ark ocakları ve doğrusal olmayan yüklerdir. Güç sisteminde kullanılan cihazların neredeyse tamamı doğrusal olmayan yüklerden oluşur ve bu da güç kalitesi sorunlarını beraberinde getirir. Harmoniklerin sebep olduğu başlıca problemler ise kontrol sistemlerinde, bilgisayarlarda, endüstriyel elektronik cihazlarda meydana gelen arızalar, transformatörlerdeki ve motorlardaki aşırı ısınma ile dağıtım sisteminde meydana gelen gerilim /akım dalga şekli bozulmaları ve rezonans olaylarıdır. Şekil 7, yüksek derecede harmonik içeren böyle bir gerilim sinyalinin göstermektedir.

Güç sistemlerinde akım harmonikleri dağıtım şebekesindeki tüketiciler tarafından incelenirken, şebeke tarafında ise daha çok gerilim harmonikleri üzerinde durulur. Elektrik üretim santrallerinde üretilen ve iletim hatlarına taşınan gerilimin harmonik bozulma miktarı çok düşük seviyededir. Ancak dağıtım şebekesindeki tüketici noktalarına yaklaşıldığında doğrusal olmayan yüklerin çektiği güce bağlı olarak gerilim ve akım dalga formu sinüs işaretinden oldukça uzaklaşabilmektedir. Bu da harmonik bozulmanın ana kaynağının tüketici olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. Yüksek derecede harmonik içeren gerilim sinyali (High-harmonic voltage signal) [15]

Gerilim ve akım dalga formundaki temel harmonik dışındaki harmoniklerin toplam etkin değerinin, temel harmoniğin etkin değerine oranı toplam harmonik bozulma (THB) olarak tanımlanır.

$$THB = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \frac{V_n^2}{V_1^2}} \quad (4)$$

Eşitlik 4'de  $V_n$ , n'inci harmonik bileşenin genliğini ifade ederken  $V_1$  değeri ise temel gerilim genliğini ifade etmektedir.

IEEE 519 standartlarına [18] bağlı olarak izin verilen toplam harmonik bozulma miktarı, güç sisteminin gerilim seviyesine bağlı olarak değişmektedir. Alçak gerilim şebekelerinde THB %8'den, her bir harmonik değer ise %5'ten küçük olacak şekilde sınırlandırılmıştır [15].

Bir güç sisteminde yüksek harmoniklerin genliği ne kadar büyükse sistemdeki nominal dalga şekli o kadar bozulmuştur. IEC 61000-3-2 standartlarına göre olması gereken akım harmonik sınır değerleri Çizelge 4'te verilmiştir [19]. Bu değerler, alçak gerilim seviyesinden şebekeye bağlanan FV sistemler için geçerlidir.

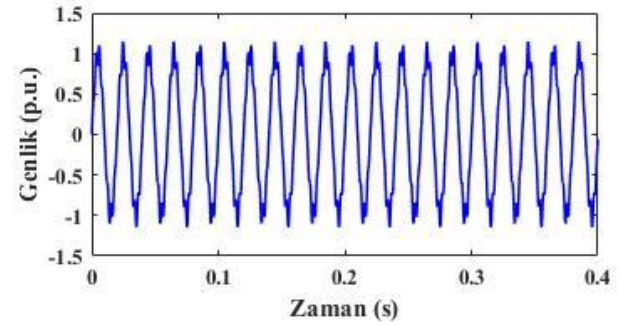
Çizelge 4. Akım için harmonik sınır değerleri (Harmonic limit values for current) [19]

Harmonik	2	3	5	7	9	11	13	$15 \leq n \leq 39$
Sınır	1.08	2.3	1.14	0.77	0.4	0.33	0.21	0.15

#### 4.6.Kırpışma (Flicker)

Gerilim dalgalanması sonucunda oluşan kırpışma dağıtım şebekesinden bağımsız, tüketici yüklerden kaynaklanan bir güç kalitesi olayıdır. Güç kalitesi olayları arasında en sık karşılaşılan problemlerden biri olan kırpışma, güç sistemi nominal frekans ve gerilimde çalışırken, gerilimin çeşitli nedenlerden dolayı daha düşük bir frekansta ve genlikte salınmasının sonucunda oluşur. Kırpışma, bir lambada parlaklığın dalgalanmasına, manyetik çekirdeğe sahip cihazlarda arızalara ve elektrik motorlarında hız değişimlerine

neden olur. Kırpışmanın büyüklüğü, gerilimdeki değişime ve bu değişimin frekansına bağlıdır. Kırpışma içeren bir gerilim sinyali Şekil 8'de verilmiştir. Kırpışma sınır değerleri IEEE Std. 1453-2004 ve IEC 61000-2-2 standartlarına uygun olmalıdır [20]. Ayrıca bu standartlarda, kırpışma olayının hesabı için çeşitli parametreler tanımlanmıştır.



Şekil 8. Kırpışma içeren bir gerilim dalga şekli (A voltage waveform that contains clipping)

Standartlarla sınırları çizilen kırpışma olayı kısa dönem ve uzun dönem olmak üzere iki başlık altında incelenir. Uzun dönem kırpışma için hesaplanan PLT değeri ise 2 saat boyunca onar dakika aralıklarla yapılan ölçümler sonucu elde edilen PST değerlerinden hesaplanır [15].

$$P_{LT} = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{n=1}^{\infty} P_{ST}^3} \quad (5)$$

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumuna ait Elektrik Şebekesi Yönetmeliği'nde [19] 1 saat içinde 10 seferden fazla gerçekleşen hızlı gerilim değişimleri kırpışma olarak değerlendirilmiştir. IEC 61000-2-2 ve IEC 6100-3-3 standartlarına göre uzun dönem ve kısa dönem kırpışma sınır değerleri Çizelge 5'te verilmiştir.

**Çizelge 5.** Kırpışma sınır değerleri (Clipping boundary values) [19]

EC 61000	PV Santral (IEC 100-3-3)	Tüketici (IEC 6100-2-2)
P <sub>ST</sub> (Kısa Dönem)	≤ 1.00	≤1.00
P <sub>LT</sub> (Uzun Dönem)	≤ 0.65	≤ 0.80

#### 4.7.Çentik (Notch)

Çentik, şebeke frekansında çalışan bir sistemde, gerilimin bir periyodunda dönüştürücünün (konvertör) darbe sayısı kadar meydana gelen ve tekrar eden yarım periyottan kısa süreli gerilim dalga şekli bozulmasıdır. Çentik etkisi ile oluşan frekans bileşenleri çok yüksek olduğundan klasik harmonik ölçüm cihazları ile tanımlanamazlar. IEEE 519-2015 [18] standardına göre çeşitli uygulama alanları ile farklı türde sistemler için çentik alan ve derinliğine bağlı sınır değerler Çizelge 6'daki gibidir.

**Çizelge 6.** Gerilimde meydana gelen çentik sınır değerleri (Notch limit values in voltage)[18]

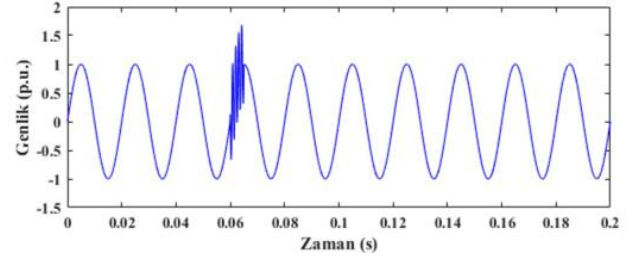
	Özel Uygulamalar (Hastane, Hava Limanı vb.)	Genel Sistem	Dönüştürücü Bulunduran Sistemler
Çentik Derinliği	10%	20%	50%
Çentik Alanı (An)	16400	22800	36500

**Çizelge 7.** Frekans ortalama değer sınırları (Frequency average value limits) [15]

TS EN 50160	Yüzde sınırı	Değer Aralığı	Çalışma Süresi
Frekans	50 Hz ± %1	49,5 Hz-50,5 Hz	99,50%
	50 Hz +%4/ -%6	47 Hz-52 Hz	100%

#### 4.8.Geçici durum olayları (Transients)

Geçici olaylar yüksek frekans bileşenleri içermekle beraber yarım periyottan daha kısa süren olaylardır. Bu olay sonucunda oluşan bozulmanın, genlik değeri nominal gerilimin 8 katına kadar çıkabilir. Güç sistemlerinde anlık olarak oluşan geçici durumlar, salınımlı ve darbeleri olmak üzere iki grupta incelenir. Darbe sonucunda oluşan geçici durum olayları, genellikle yıldırımından kaynaklı olup ani ve tek yönlüdür. Salınımlı geçici olaylar ise negatif ve pozitif olmak üzere çift yönlü özellik göstermekle beraber yarım periyot kadar sürebilirler. Salınımlı geçici olaylar kapasitör banklarının devreye alınması, büyük yüklerin devreden çıkarılması, hat veya transformator enerjilendirilmesi sonucunda oluşmaktadır. Salınımlı geçici durum olayı içeren gerilim dalga formu Şekil 9'da verilmiştir.

**Şekil 9.** Geçici durum olayı içeren gerilim dalga şekli (Voltage waveform with transient event) [15]

#### 4.9.Frekans değişimi (Frequency change)

Frekans değişimi, güç sistemindeki frekans değerinin nominal değerinden sapsmasıdır. Güç sistemdeki yük miktarı ile üretilen güç miktarının uyuşmaması frekans değişimine yol açar. Frekans değişiminin boyutu ve süresi ise yük kontrol sisteminin cevabına bağlıdır. TS EN 50160 standartlarına göre normal çalışma şartları altında şebeke bağlantılı bir FV sistemde ve şebekede yıl içindeki çalışma sürelerine göre sınır aralıkları Çizelge 7'de verilmiştir.

#### 4.10.Doğru akım enjeksiyonu (Direct current injection)

AG şebekesine bağlı FV üretim santralindeki inverterler sisteme DC akım verebilirler. DC akım enjeksiyonu dağıtım transformatorünü doyuma götürerek dalga şeklinin nominal koşulların dışına çıkmasına neden olur. IEEE Std 929-2000 standartlarına göre inverterler üzerinden sisteme verilen bu DC akım, nominal akımın %0,5'i ile sınırlandırılmıştır [15].

#### 4.11.Gürültü (Noises)

Gürültü, bir güç sisteminde nominal akım ve gerilim dalgası üzerine binen ve istenmeyen elektriksel işaretlerdir. Gürültü olayı, güç elektroniği cihazlarından, anahtarlamalı güç kaynağı içeren yüklerden veya yüksek ark cihazlarından kaynaklanabilir. Özellikle mikroşlemci ve PLC gibi hassas cihazlara zarar verir.



## 5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Şebekedeki güç kalitesinin bozulmaması uluslar arası standartlara uygun, panel, evirici, kablo ve koruma elemanlarının kullanılmasını kaçınılmaz kılmaktadır.

Lisanssız Güneş enerji santrallerinin güvenlik açısından risk oluşturmaması için mutlaka ters besleme sisteminin ortadan kaldırılması gerekir. Dolayısıyla çift yönlü güç akışı, AG seviyesinde dijital koruma rölesi kullanımının sağlanması ile bu durum sağlanabilir. Farklı güçlerdeki ve özelliklerdeki Güneş enerji santrallerinin olduğu sistemlerde, gerilim dalgalanması, kırıpışma, DC akım enjeksiyonu, toplam akım bozulması ve faz dengesizliğine izin verilmemelidir.

Güneş enerji santrallerinin güç kalitesine olumsuz etkilerini engellemek için eviricilerin kullanımı anahtar rol oynamaktadır.

Bu çalışmada FV güneş santrallerinin şebeke bağlantılarında oluşan sorunlar ile çözüm yöntemleri detaylı bir şekilde irdelenmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] GÜNDER, 2019, <https://www.solar.ist/2018-yilinda-turkiyenin-gunes-enerjisi-kurulu-gucu-5-063-mwye-ulasti/>
- [2] Farhoodnea, M., Mohamed, A., Shareef, H., Zayandehroodi, H., Power quality analysis of grid-connected photovoltaic systems in distribution networks, *Przeglad Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 208-213, 2013
- [3] Malathy, S., Ramaprabha, R., Reconfiguration strategies to extract maximum power from photovoltaic array under partially shaded conditions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(2): 2922-2934, 2018.
- [4] Jalilisaatlou, R. “Fotovoltaik güç sistemlerinin kalite karakteristiklerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, (2015)
- [5] Akdeniz, E., “Yenilenebilir Kaynaklardan Enerji Üretimine Şebekenin Enerji Kalitesi ve Kararlılığına Etkilerinin İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2006)
- [6] Tan, Y.T., “Impact on the Power System with a Large Penetration of Photovoltaic Generation”, *PhD Thesis*, University of Manchester, February, (2004)
- [7] Bellia, H., Youcef, R., Mouley, F., “A detailed modelling of photovoltaic module using MATLAB”, *National Research Institute of Astronomy and Geophysics Journal*, 53-61, (2014)
- [8] Doğan, S., “Şebeke Etkileşimli Fotovoltaik Güç Sistemlerinin İncelenmesi ve Simülasyonu”, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, (2018)
- [9] Çubukçu, M., “Türkiye’nin Farklı Konumlarında Farklı Topolojilerde Fotovoltaik-Rüzgar-Yakıt Pili Hibrid Güç Sistemlerinin Modellenmesi Karşılaştırmalı Simülasyonu ve Uygulamalı Performans Analizi”, *Doktora Tezi*, Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü, İzmir, (2011)
- [10] Peren, V., “Fotovoltaik Su Pompalama Sistemi Tasarımı ve Modellenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, (2016)
- [11] Kandemir, Ç., Bayrak, M., Fotovoltaik Sistemler Şebekeye Bağlı Olduğunda Oluşan Sorunlar, Elektrik Mühendisleri Odası
- [12] Bayrak, G., “A remote islanding detection and control strategy for photovoltaic-based distributed generation systems”, *Energy Conversion and Management* 96: 228-241, (2015)
- [13] Bayrak G., Cebeci M., “Şebeke Bağlantılı PV Güç Sistemlerinde Ada Modlu Çalışma ADMÇ ve Tespit Yöntemleri”, *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı*, Türkiye, 26-28, (2013)
- [14] IEA International Energy Agency, “Evaluation of Islanding Detection Methods for Photovoltaic Utility Interactive Power Systems, in Task V Report”, (2002)
- [15] Yılmaz, A., “Şebeke Bağlantılı Fotovoltaik (PV) Sistemlerin Mevcut Elektrik Şebekesi İle Entegrasyonu Ve Güç Sistemine Etkileri”, *Yüksek Lisans Tezi*, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, (2018)
- [16] [http://www.emo.org.tr/ekler/0f027d0cc62ecbd\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/0f027d0cc62ecbd_ek.pdf)
- [17] “Electromagnetic Compatibility (EMC), Limits – Limitation Of Voltage Changes, Voltage Fluctuations And Flicker In Public Low-Voltage Supply Systems, For Equipment With Rated Current ≤ 16 A Per Phase And Not Subject To Conditional Connection”, IEC 61000-3-3, (2002)
- [18] IEEE Std 519, “IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems”, (2014)
- [19] EPDK, “Elektrik piyasasında lisanssız elektrik üretimine ilişkin yönetmeliğin uygulanmasına dair tebliğ”, *T.C. Resmi Gazete*, 28783, (2013)
- [20] Hernández, J. C., Ortega, M. J., De la Cruz, J., and Vera, D., “Guidelines for the technical assessment of harmonic, flicker and unbalance emission limits for PV-distributed generation”, *Electric Power Systems Research*, 81(7): 1247-1257, (2011)