



Şebekeye Bağlı Güneş Enerjisi Santrallerinin Harmoniklerine Etki Eden Parametrelerin Araştırılması

Emre NEDİMOĞLU

Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Diyarbakır
wesamshagory66@hotmail.com ORCID: 0000-0002-5665-1924, Tel: (534) 585 18 63

Bilal GÜMÜŞ*

Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır
bilgumus@dicle.edu.tr ORCID: 0000-0003-4665-5339

Geliş: 11.08.2019, Revizyon: 06.09.2019, Kabul Tarihi: 20.09.2019

Öz

Küresel iklim değişikliğinin önlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar ve geliştirilen politikalar enerji üretiminde, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını hızla artırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin şebekeye bağlantısı, güvenlik, güç kalitesi ve yönetim açısından önem arz etmektedir. Azalan kurum maliyetleri güneş enerjisinden elektrik üreten sistemlerin kullanımını yaygınlaştırmıştır. Şebeke bağlantılı güneş enerji santrallerinin şebekeye bağlantılarında en önemli sorunlardan birisi de sistemden kaynaklanan harmoniklerdir. Şebeke bağlantısında kullanılan eviriciler harmonik üretimine neden olmaktadır. Oluşan harmonikler şebekenin güç kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu çalışmada şebekeye bağlı güneş enerjisi santrallerinin oluşturduğu harmonik etkiler araştırılmıştır.

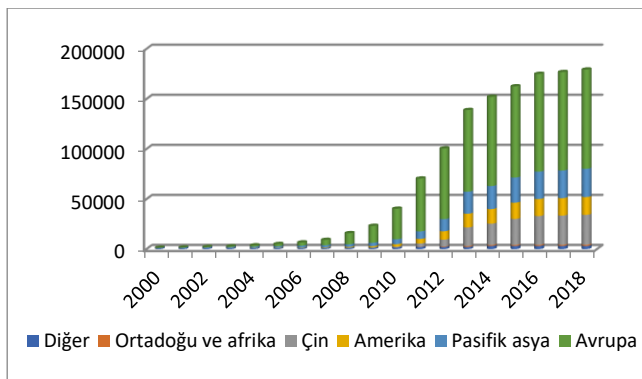
Bu amaçla öncelikle fotovoltaik güneş enerji santrali MATLAB/Simulink'de modellenmiş ve benzetimi yapılarak harmonik etkiler elde edilmiştir. Yapılan benzetim gerçek bir güneş santralinden alınan harmonik verileriyle karşılaştırılmıştır. Kabul edilebilir bir hata oranı ile doğruluğu ispatlanan model yardımıyla harmoniklere etki eden parametreler araştırılmıştır. Güneş santrallerinde oluşan harmonikler üzerinde ışımanın ve sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Birinci incelemede sıcaklık sabit iken ışımanın değişiminin harmonik üzerine etkisi araştırılmıştır. İkinci inceleme de ise ışıma sabit iken sıcaklık değişiminin harmonikler üzerindeki etkisine bakılmıştır. Sistemde kullanılan filtrenin harmonikler üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Bunun yanında, harmoniklerin azaltılması için öneriler de bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, Harmonik, Evirici, Güneş Işınmı, Güç kalitesi, Yenilenebilir Enerji, Toplam Harmonik Bozulma faktörü

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları, artan enerji talebi ile daha fazla önem kazanmaktadır. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları, enerji üretilmesinde temiz ve ucuz bir alternatif olarak tercih edilmektedir. Birçok yenilenebilir enerji türü vardır ve bunlardan en önemlisi de güneş enerjisidir. Dünyada elektrik dağıtım şebekelerine bağlı fotovoltaik (PV) güneş enerjili elektrik üretim sistemlerinin sayısı hızla artmaktadır (Haydaroğlu ve Gümü, 2017). Güneş enerjisi, yeryüzünün her yerinde geniş ölçüde mevcut olan bir enerji türüdür ve fotovoltaik yolla (PV) enerji üretimi sırasında kirletici madde yaymayan ve çok az su tüketen temiz, yenilenebilir bir enerji kaynağı sunar. Fotovoltaik enerji üretim sistem kurulum maliyetlerinin hızla düşmesiyle dünya genelinde enerji üretiminde güneş enerjisinin payı da hızla artmaktadır. Elektrik enerjisinin ihtiyacı karşılayabilmek için şebeke bağlantılı fotovoltaik güneş enerjisi santrallerinin kurulumu yönünde destek ve teşvikler çıkarılmıştır (Dinçer, 2011). Şekil 1'de 2000-2018 yılları arasında Dünya genelinde kurulmuş güneş enerjisi santrallerin kapasite gelişimi gösterilmiştir. Şekle bakıldığında görüldüğü gibi 2008 yılında sadece 15.844 MW olan güneş santrali kurulu gücü, hızlı bir şekilde artarak 2018 sonunda on iki katına kadar büyümüştür (Çelikkaya, 2018).



Şekil 0. Dünya Genelinde 2000 ve 2018 Yılları Arasında Kurulmuş Fotovoltaik Santral Kapasitesinin Gelişimi

Güneş santralleri Dünyanın enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü karşılayabilecek potansiyele

sahiptir. Güneş enerjisi santralleri, yenilenebilir enerjiden faydalanmak için kullanılan sistemlerin başında gelmektedir. Bu enerji türü elektrik sistemlerine çok önemli yararları sağlarken bazı olumsuzlukları da bulunmaktadır (Çelebi ve Çolak, 2005).

Türkiye'deki güneş enerjisi santrallerinin gelişiminde dünyadaki gelişime paralel olarak son yıllarda büyük bir artış yaşanmaya başlamıştır. Türkiye'de büyük güçte fotovoltaik santralleri bulunmamakla beraber, 2019 yılı Mayıs ayına kadar kurulmuş sistemlerin toplam kapasitesi 5.374,6 MW'tır ve bu sistemlerin büyük kısmı şebekeyle bağlantılı sistemlerdir (TEİAŞ 2019). 2019 yılı itibariyle Türkiye'nin en büyük fotovoltaik güneş enerjisi santrali Kayseri OSB'de kurulan 55 MW'lık santraldir. Bu santral ile kurulduğu organize sanayi bölgesinin ihtiyacı olan elektrik enerjisinin yaklaşık %25'inin üretilmesi öngörülmektedir (Yeşil Ekonomi, 2019). 2019 yılı Mayıs ayı itibariyle farklı üretim kaynaklarına göre Türkiye'deki kurulmuş santrallerin güçleri ve dağılımı Çizelge 1'de gösterilmiştir (TEİAŞ, 2019).

Çizelge 0. 2019 Mayıs Sonu İtibarı ile Türkiye'deki Kurulu Gücün Kaynaklara Göre Dağılımı

Üretim Kaynağı	Kurulu Gücü [MW]	Yüzdesi
İthal Kömür	8.938,9	% 10
Taş Kömürü, Linyit, Asfaltit	11.057,8	% 12,3
Fuel Oil, Nafta, Motorin	492,9	% 0,5
Hidrolik Akarsu	7.848,7	% 8,8
Hidrolik Barajlı	20.554,2	% 22,9
Biyokütle, Atık Isı	997,5	% 1,1
Rüzgâr	7.085,4	% 7,9
Jeotermal	1.302,5	% 1,5
Güneş	5.374,6	% 6
Toplam	89.680,5	% 100

Çizelgeden, güneş santrallerinin, toplam kurulu güç içerisindeki oranının %6 olduğu görülmektedir. Bu oranın gelecek yıllarda daha fazla olması beklenmektedir.

Güç Kalitesini Etkileyen Parametreler

Güneş enerjisi santrallerinde güç kalitesi sorunları aşağıdaki maddeler halinde sıralanabilir (Kocatepe ve ark., 2003):

▪ Geçici rejim gerilimi

Şebekede oluşan kısa devreler, doğa olayları ve şebekenin anahtarlanması veya yük değişimi gibi nedenlerle ortaya çıkan geçici rejimlerde yaşanan gerilim bozulmaları ve dengesizlikleri sistemin anma geriliminden farklı gerilimler ile çalışmasına neden olabilmektedir.

▪ Sürekli gerilim değişimleri

Yenilenebilir enerji kaynaklarında, çıkış gücü gerilim seviyesinde genel anlamda artış veya düşüşler gözlenebilmektedir. Uluslararası standartlara göre yüksek gerilim sistemlerinde bu değişim $\pm 10\% V_{rms}$ toleransını sağlamalıdır.

▪ Gerilim dengesizliği

Güç kalitesini etkileyen diğer bir önemli etken de gerilim dengesizliğidir. Gerilim dengesizliği, dengeli ve eşit olması gereken üç fazlı sistemlerde, fazlar arasındaki gerilim farklarından kaynaklanır. Fotovoltaik sistemde buna benzer meydana gelen faz farkları, dağıtım şebekesinin fazlarını da etkiler.

▪ Dalga formu bozulumu- harmonikler

Harmonik dalgalar, şebeke frekansının birkaç katı şeklinde ortaya çıkan frekans salınımlarıdır. Fotovoltaik sistemde buna neden olan durum, bu sistemlerde kullanılan ve non-linear karaktere sahip yarı iletken anahtarlardır. Anahtarlamada da kullanılan yöntem de harmoniklere çok etki eder.

▪ Gerilim dalgalanmaları ve gerilim titremeleri (kırışması)

Sağlıklı bir şebekede, 50 Hz frekansında ve saf bir sinüs dalgası şeklinde olması gerekir. Fakat her zaman bu durum geçerli değildir. Şebeke gerilimi bazen daha düşük frekanslarda salınımlar yapabilir. Gerilim titremeleri, sürekli yükteki gerilim dalgalanmalarından kaynaklı

aydınlatma armatürlerinde titremelere neden olan 50 Hz'den düşük gerilim salınımlarıdır. Titreme şiddeti, gerilim dalgalanmalarının genlik, şekil ve tekrarlanma sıklığı gibi faktörlerine bağlı olup birtakım yaklaşımlar ile tahminleri mümkündür.

▪ **Güç frekans değişimleri** Frekans güç kalitesi hususunda en önemli etkenlerden bir tanesidir. Güç arzında ve talebindeki dengesizlikler, frekans salınımlarına neden olurlar. Bundan ötürü şebeke bağlantılı sistemlerde, şebeke frekansı ile sistem frekansı senkronize edilmelidir (Kocatepe ve ark., 2003).

Güç kalitesi standartları, IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) ve IEC (International Electrotechnical Commission) konsorsiyumuyla hazırlanmaktadır. Güç kalitesini etkileyen sebepler;

- Yarı iletken teknolojisiyle üretilmiş ekipmanların güç elektroniği ekipmanlarına göre daha hassas olması durumu, güç kalitesinin düşümüne neden olabilmesi,
- Şebekelerde kullanılan kondansatör ve verimi yüksek motor sürücüler gibi ekipmanların harmonik bozunumları arttırması,
- Birbiriyle enterkonnekte olan şebeke elemanlarından birinde yaşanan sıkıntının diğer noktaları da etkilemesi,

olarak sıralanabilir (Rashid, 1995, Arillaga 1997).

Güneş Santrallerinde Güç Kalitesi

Fotovoltaik güneş santral kurulumları şebeke gerilimini, özellikle gerilim dalgalanmalarını, kırışmayı, harmonik bozulmayı ve yüksek frekans bozukluklarını önemli ölçüde etkileme potansiyeline sahiptir (Akdeniz, 2006; Moazzenzadeh, Şekerci, 2010; Şimşek, Bizkevelci 2013; Du, Lu, 2018). PV santralleri, eviricilerin oluşturduğu akım harmoniklerini şebekeye enjekte ederek ve tesis içindeki kapasitif elemanlar nedeniyle şebekede harmonik empedans rezonanslarına neden olarak şebekenin harmonik

performansını etkiler. Eviricilerin güç devrelerindeki yarı iletken anahtarların yüksek frekansla anahtarlanması yüksek frekanslı bozulmalara, neden olabilir (Schlabach ve Gross, 2007; Hong ve Zuercher, 2010; Sefa ve Altın, 2009).

Eviricilerden kaynaklanan harmonikler, anahtarlama kontrol yöntemi olan PWM (pulse width modulation) modülasyon şeması, kontrol tekniği ve benimsenen anahtarlama sırasına bağlıdır. AC akımlarının harmonik bozulması, bir PWM şemasındaki anahtarlama frekansının artmasıyla doğrusal olarak azalır. Bununla birlikte, yüksek güç dönüştürücülerinin anahtarlama frekansı, yarı iletken cihazların anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik uyumluluk hususları nedeniyle genellikle birkaç kilohertz ile sınırlıdır (Rao ve Srikanth, 2016).

Harmonik büyüklüklerinin tanımı

Harmonik büyüklüklerin değerleri ne kadar küçük olursa, enerji tesislerindeki akım ve gerilimin değeri sinüs eğrisine daha yakın olur. Saf sinüs eğrisi durumunda harmonik bulunmayacağından, harmoniklerin değeri matematiksel olarak sıfır olacaktır. Harmonik bileşenlerin temel bileşene göre seviyesini belirlemede dikkate alınan en önemli ölçüm harmonik bozulma denilen kavramdır. Sinüzoidal şekli dalgadan uzaklaşmayı, bozulmayı diğer bir deyişle bozulmanın derecesini belirtir. Hem akım hem de gerilim için verilebilir. Toplam harmonik bozulma faktörü kısaltılarak THD ile belirtilir (Çelebi ve Çolak, 2005).

Toplam Harmonik Bozulma

Toplam harmonik bozulma gerilim veya akım için harmoniklerin etkin değerlerin, ana harmonik etkin değerine bölünmesiyle çıkan orandır. Toplam harmonik bozulma faktörü bütün harmoniklere ait olan etkilerin toplamını nitelemektedir. Harmonik seviyelerin (üçüncü, beşinci, yedinci, vb.) temel harmonik seviyesine göre belirlemede gözden kaçırılmayan en önemli

ölçümlerden biridir. Akım ve gerilim için verilebilir. Gerilim için THD:

$$[\text{THD}]_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} v_h^2}}{v_1} \quad (1)$$

ile hesaplanır.

Burada V_h Harmonik bileşen gerilimi, V_1 : gerilimin temel bileşeninin efektif değerini göstermektedir.

THD_i, akım için Toplam Harmonik Bozulma'yı ifade eder ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$[\text{THD}]_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2}}{i_1} \quad (2)$$

Burada I_h Harmonik bileşen yük akımı, i_1 ana bileşen akımıdır (Rashid,1995; Arrilaga ve ark. 1997; Schlabach ve Gross, 2007).

Araştırma Bulguları

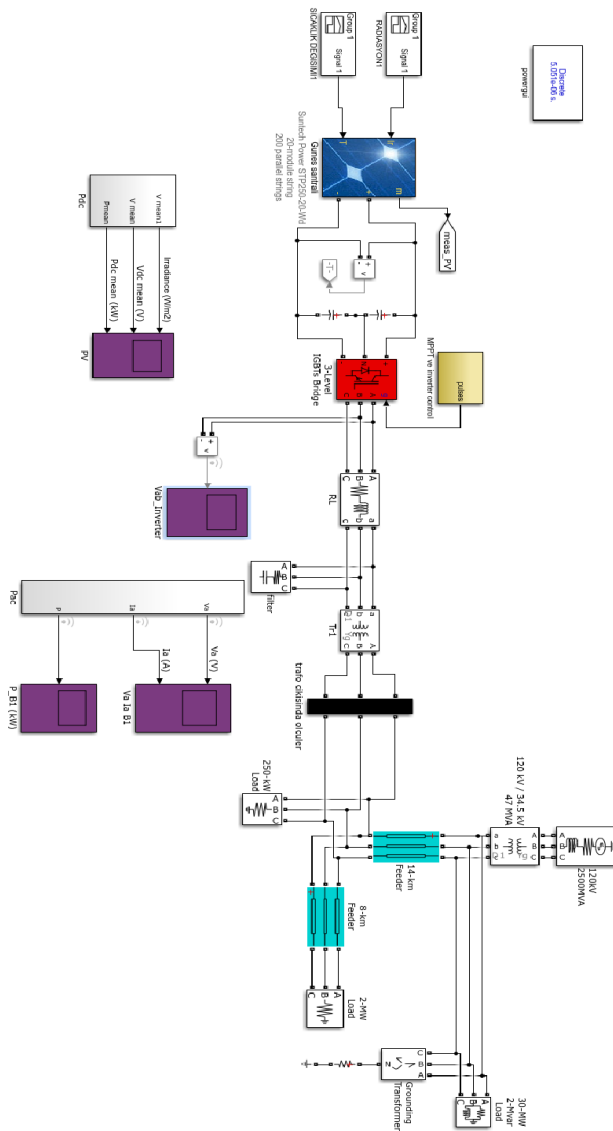
Güneş Enerjisi Santralinin Benzetimi

PV güneş enerjisi santrallerinin ve şebekenin çeşitli işletme koşulları altında şebekeye etkilerinin belirlenmesi amacıyla santral modellemeleri ve benzetimleri yapmak son derece önemli olmaktadır (Du ve ark, 2013; Efe, 2016; Yıldırım 2017). Bu amaçla, Diyarbakır bölgesinde bulunan 1 MW'lık Güneş Enerji Santrali ve şebekeye bağlandığında kullanılan tüm ögelere bağlı kalınarak, MATLAB programında modellenmiş ve benzetimi Şekil 2'deki gibi yapılmıştır. Benzetim sonucunda transformatör çıkışında akım, gerilim ve ürettiği güç değerleri ve bu santral şebekeye bağlandığında ortaya çıkan harmoniklerin seviyeleri elde edilmiştir.

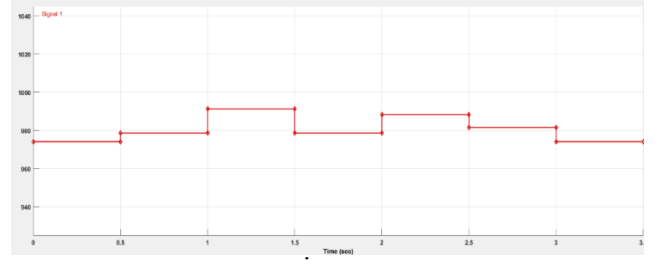
Benzetim sonuçları ile gerçek sonuçları karşılaştırmak amacıyla 2019 yılı Mayıs ayının farklı günlerinde belli saatlerde ölçülen ışıma ve sıcaklık değerleri benzetimde kullanılarak, elde edilen harmoniklerinin seviyeleri, aynı gün ve aynı saatlerde Diyarbakır bölgesinde bulunan 1MW'lık güneş santralinden alınan harmonik seviyeleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu amaçla yapılan çalışmalardan, Diyarbakır'da bulunan 1 MW 'lık Güneş santralinde 30 Mayıs 2019 gününe ait verilere göre yapılan benzetim ile

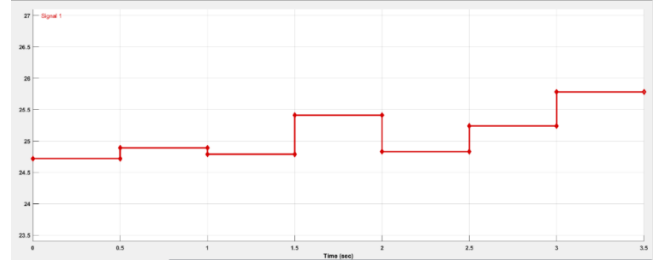
gerçek değerlere ait sonuçlar aşağıda sunulmuştur Santralden her 10 dakikada bir alınan 12:00 ile 13:00 saatleri arasındaki ışıma ve sıcaklık ortalama değerleri Şekil 3 ve Şekil 4’de gösterildiği gibidir. Ele alınan saatlerde ışıma miktarı 880-1020 W/m² arasında, sıcaklık 24.7-25.78° arasında değişmektedir. Benzetimde güneş santralinin şebekeye transformatör aracılığıyla bağlandığında, transformatör çıkışındaki akım ve gerilim dalgalarının toplam harmonik bozulma faktörü elde edilmiş ve Çizelge 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Güneş Santralinin MATLAB Benzetim Modeli.



Şekil 3. Ele Alınan Gün İçin 12:00 – 13:00 Saatleri Arasındaki Işıma Değişimi.



Şekil 4. Ele Alınan Gün İçin 12:00 – 13:00 Saatleri Arasındaki Sıcaklık Değişimi.

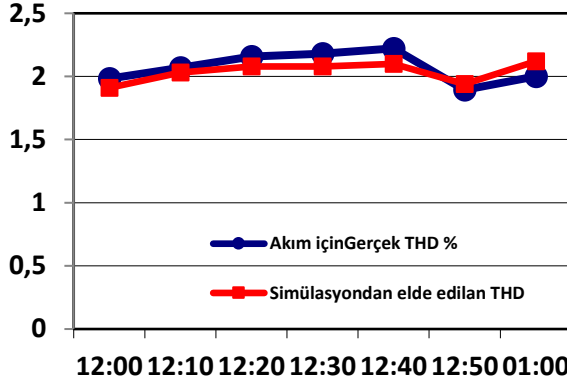
Çizelge 2. Benzetim Sonucunda 12:00 – 13:00 Saatleri Arasında Elde Edilen Akım ve Gerilim THD Faktörü

Zaman	Akım THD (%)	Gerilim THD (%)
12:00	2,13	1,29
12:10	1,86	1,29
12:20	1,77	1,29
12:30	1,83	1,29
12:40	1,79	1,29
12:50	2,00	1,29
1:00	2,12	1,40

Çizelge 2. incelendiğinde ele alınan saat diliminde akım için maksimum THD %2,13, minimum THD ise %1,77 olmuştur. Gerilim için THD'nin ise neredeyse değişmediği (%1,29) sadece saat 13:00'da %1,40'a yükseldiği saptanmıştır.

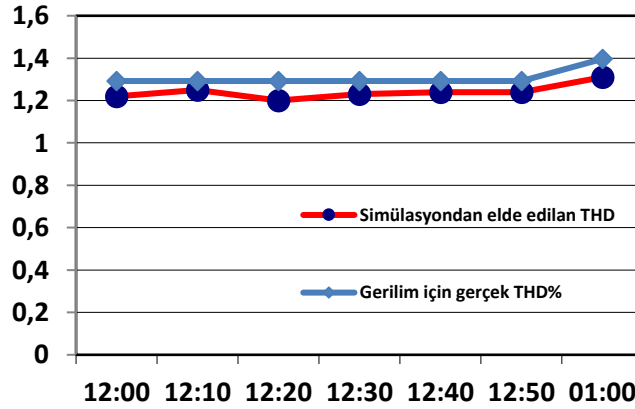
Şekil 5.'de ele alınan günde 12:00 ve 13:00 saatleri arasında benzetimle elde edilen akım için toplam harmonik bozulma faktörünün Diyarbakır'da bulunan 1MW'lık güneş santralini gerçek toplam

harmonik bozulma faktörü ile karşılaştırması gösterilmiştir.



Şekil 5. 1MW'lık Güneş Santralinin Akım için Gerçek THD'si ve Benzetimden Elde Edilen THD.

Şekil 6.'da ise ele alınan gün için 12:00 ve 13:00 saatleri arasında benzetimle elde edilen gerilim için toplam harmonik bozulma faktörünün Diyarbakır'da bulunan 1MW'lık güneş santralinin gerilim için gerçek toplam harmonik bozulma faktörü ile karşılaştırması gösterilmiştir.

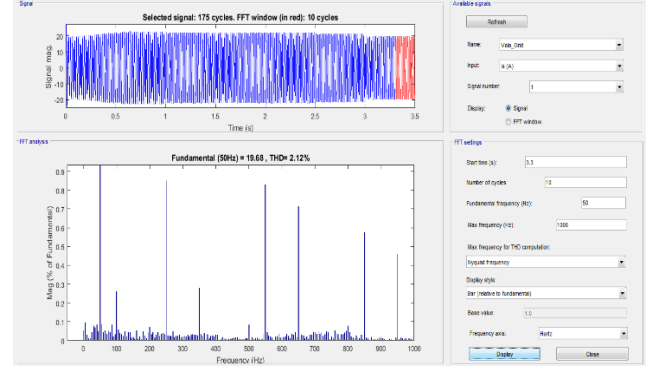


Şekil 6. 1MW'lık Güneş Santralinin Gerilim için Gerçek THD'si ve Benzetimden Elde Edilen THD

Sonuçların incelenmesinden benzetim ile elde edilen sonuçlar ile gerçek sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu, akım için maksimum hatanın %5,4; gerilim için maksimum hatanın %7,5 olduğu tespit edilmiştir. Akım için ortalama hata %4,2; gerilim için ortalama hata ise %5,3 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar benzetim modelinin oldukça doğru sonuçlar verdiğini

göstermektedir. Böylelikle benzetim modeli araştırmalar için güvenilirlikle kullanılabilir.

Saat 13:00 'te benzetim modelinden elde edilen toplam harmonik bozulma faktörü Şekil 7'de görüldüğü gibi olmuştur.



Şekil 7. FFT ile Saat 13:00'te Alınan Akım Harmonik Seviyeleri

Çizelge 3'de saat 13:00'te akım ve gerilim için harmonik seviyeleri ile hem gerçek ölçümlerden hem de benzetimden elde edilen gerilim ve akım toplam harmonik bozulma faktörü gösterilmiştir. Çizelgedeki sonuçlardan akım için THD'nin benzetim modelinde %5,4'lük hatayla, gerilim için THD'nin ise %6,1'lik hatayla tespit edildiği görülmektedir.

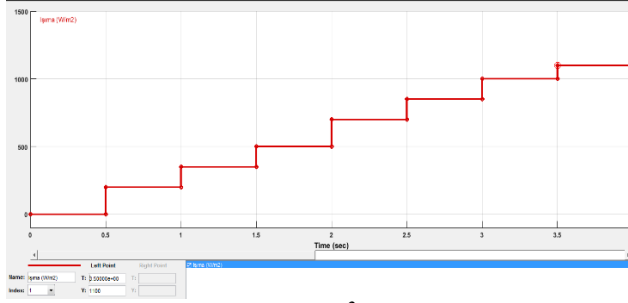
Çizelge 3. Saat 13:00'te Akım ve Gerilimin Harmonik Seviyeleri ile Ölçülen ve Benzetimle Bulunan THD Değerleri

Harmonik derecesi (n)	Benzetimde % In/ I ₁	Gerçekte % In/ I ₁	Benzetimde % Vn/ V ₁	Gerçekte % Vn/ V ₁
1	100	100	100	100
3	0,02	0,55	0,23	0,139
5	0,85	0,88	0,57	0,615
7	0,28	1,5	0,98	1,078
9	0,01	0,02	0,09	0
11	0,83	0,20	0,11	0,099
13	0,71	0,39	0,21	0,238
THD%	2,12	2,001	1,31	1,396

Harmoniklere Işıma Etkisi

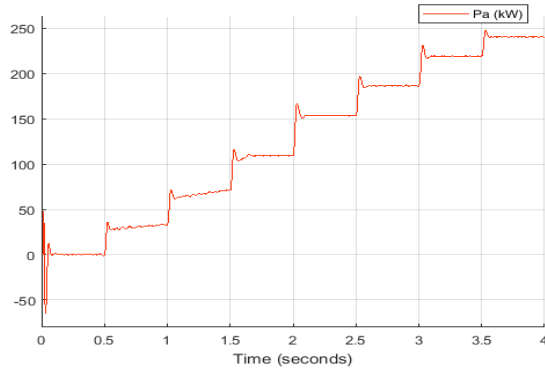
Harmoniklere ışıma etkisinin belirlenmesi için 250 kWp kurulu güce sahip Dicle Üniversitesi Güneş Enerjisi Santrali'nin benzetim modeli kullanılmıştır. Santral benzetiminde sıcaklık

değeri 25°C 'de sabit tutulup ışıma değeri Şekil 8'de gösterildiği gibi her 0,5 saniyede bir değiştirilmiştir.



Şekil 8. Işımanın 0-1100 W/m² Arasında Değişimi

Işıma arttığında santralin sisteme vereceği güç ve dolayısıyla akım değeri de artar ve buna göre sistemin performansı da artar. Şekil 9'da 25°C ortalama sıcaklıkta, etkin ışıma değeri değiştirildiğinde sistemden elde edilen güç ile şebekeye verilen güç miktarı gösterilmiştir. Şekil 9. incelendiğinde ışıma ve üretilen güç miktarı doğru orantılıdır.



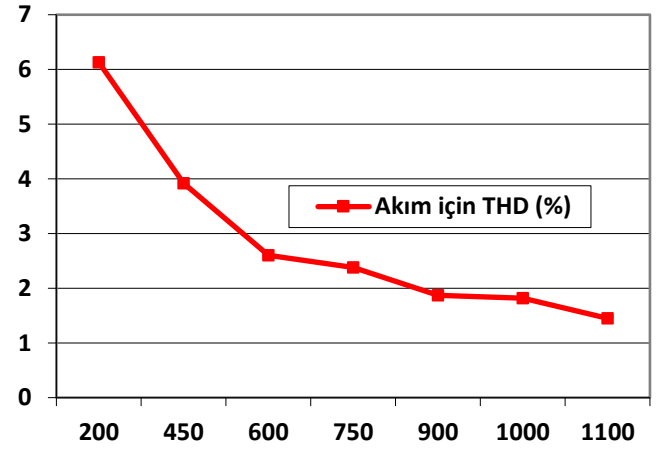
Şekil 9. Işıma Değiştirildiğinde Sistem Performansı

Şebeke tarafında gerilim ve akım dalgalarının toplam harmonik bozulma faktörüne bakıldığında, Çizelge 4. ve Şekil 12'de gösterildiği gibi etkin ışıma arttığı zaman akımın toplam harmonik faktörü de azalmış ve akımın dalga şekli sinüzoidal şekline daha fazla yaklaşmıştır. Çizelgedeki değerler incelendiğinde en büyük THD'nin akım için %6,16; gerilim için ise %1,3 olduğu görülmektedir. Işıma değeri 1000 W/m^2 'ye ulaştığında akım THD'si %1,82'ye düşmektedir. Gerilim THD'lerinin ise ışıma ile neredeyse değişmediği gözlenmektedir. Ayrıca Şekil 13.'da

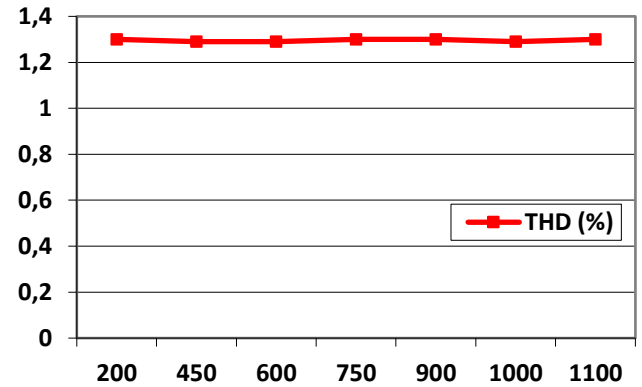
görüldüğü gibi, ışıma değiştirildiğinde gerilimin toplam harmonik bozulma faktörünün fazla etkilenmeyeceği belirlenmiştir.

Çizelge 0. Işıma-THD İlişkisi

Işıma W/m ²	Akım için THD (%)	Gerilim için THD(%)
200	6,16	1,3
450	3,92	1,29
600	2,60	1,29
750	2,38	1,30
900	1,87	1,30
1000	1,82	1,29
1100	1,45	1,30



Şekil 12. Işıma ile Akım için THD İlişkisi



Şekil 13. Işıma ile Gerilim için THD İlişkisi

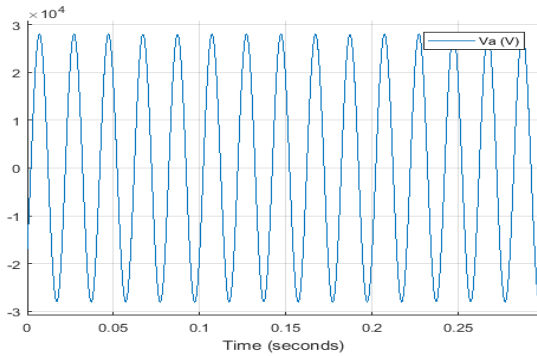
Işıma değiştirildiğinde transformatör çıkışında FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) ile alınan akım

harmoniklerin seviyelerine bakıldığında sonuçlar Çizelge 5’de görüldüğü gibi olmuştur. Genel olarak ışıma arttığında bütün harmonik seviyeleri azalmaya başlamaktadır. Çizelge 5’in incelemesinde görüleceği gibi ışıma 200 W/m^2 olduğunda akım için en büyük harmoniklerin 5. ve 7. Harmonikler olduğu görülmektedir. Ayrıca ışıma 1000 W/m^2 olduğunda en büyük harmoniklerin 5. ve 13. Harmonikler olduğu görülmüştür.

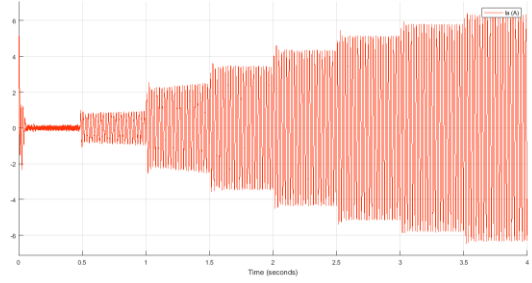
Çizelge 5. FFT ile Akım Harmoniklerinin Seviyeleri

Işıma	Harmonik							
	1.	3.	5.	7.	9.	11.	13.	15.
200	100	0,55	2,10	1,71	0,06	0,65	0,40	0,24
450	100	0,32	0,58	0,64	0,10	0,90	1,14	0,33
600	100	0,03	0,74	0,27	0,05	0,14	0,70	0,18
750	100	0,09	1	0,12	0,6	0,58	0,82	0,04
900	100	0,03	0,69	0,26	0,04	0,28	0,86	0,05
1000	100	0,07	0,65	0,44	0,03	0,44	0,88	0,05
1100	100	0,07	0,41	0,20	0,02	0,35	0,54	0,03

Şekil 14, ve Şekil 15’te sıcaklık $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de sabit olduğunda şebeke tarafında ölçülen akım ve gerilim sinyalleri gösterilmiştir. Gerilim ve akım harmoniklerinin THD’si %5 olarak kabul edilen sınırı aşmadığı için akım ve gerilim dalga şekli sinüs olarak kabul edilir.



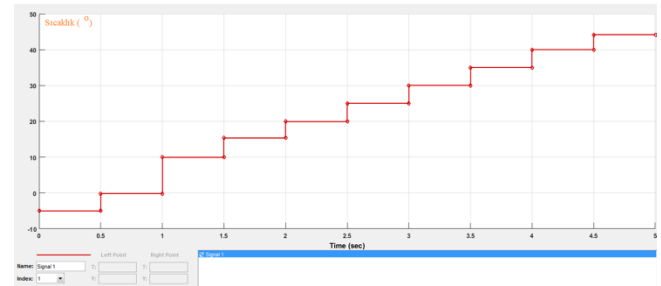
Şekil 14. Işıma Değiştirildiğinde Şebeke Tarafında Ölçülen Gerilim Sinyali



Şekil 15. Işıma Değiştirildiğinde Şebeke Tarafında Ölçülen Akım Sinyali

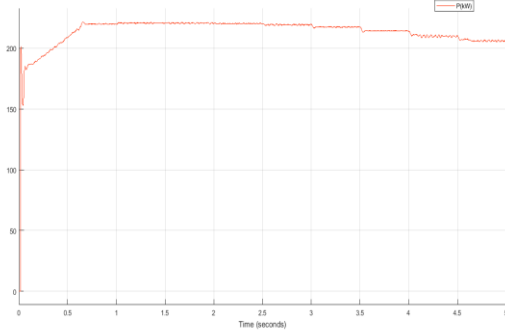
Harmoniklere Sıcaklık Etkisi

Harmoniklere sıcaklık değişiminin etkisini incelemek üzere santral benzetiminde sabit ışıma değeri 1000 W/m^2 olarak alınmış sıcaklık değeri $5 - 45 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında Şekil 16’da gösterildiği gibi her 0,5 saniyede bir değiştirilmiştir.



Şekil 16. Sıcaklığın -5 ile $45 \text{ }^\circ\text{C}$ Arasında Değişimi

Şekil 17.’de ortalama ışıma miktarı 1000 W/m^2 ’de sabit tutularak sıcaklık değeri değiştirildiğinde sistemden elde edilen güç ile şebekeye verilen güç miktarı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde yüksek sıcaklıkta üretilen güç miktarı azalmış ve sistemin performansı da azalmıştır.

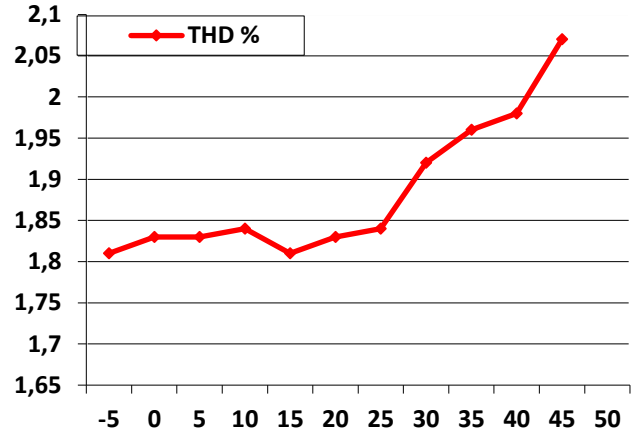


Şekil 17. Sıcaklık Değiştirildiğinde Sistemin Ürettiği Güç

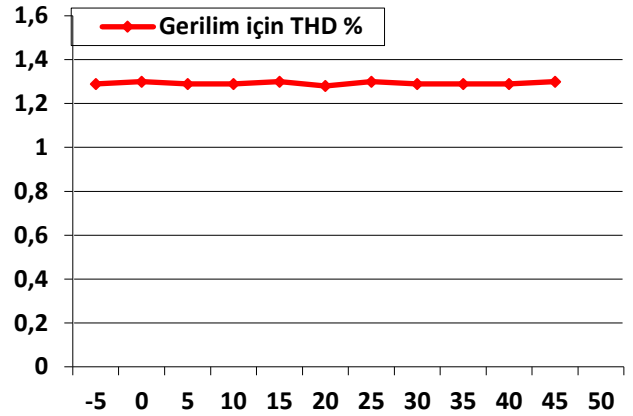
Şebeke tarafında gerilim ve akım dalgalarının toplam harmonik bozulma faktörüne bakıldığında, Çizelge 5 ve Şekil 18’de gösterildiği gibi sıcaklığın 25 °C’ye kadar olan değerlerinde, akımın toplam harmonik faktörü kabul edilen sınırlarda sabit kalmaktadır. 25 °C’den daha büyük sıcaklık değerlerinde ise akımın toplam harmonik bozulma faktörü hafif bir şekilde artmaya başlamıştır. Ayrıca Şekil 19’da gerilim için toplam harmonik bozulma faktörünün sıcaklık değişimlerinden fazla etkilenmediği gösterilmiştir. Çizelgedeki değerler incelendiğinde en büyük THD’nin akım için %2,07, gerilim için ise %1,3 olduğu görülmektedir. Sıcaklık değeri 25 °C ulaştığında Akım THD %1,84 ‘ye ulaşmıştır. Sıcaklığın 35 °C olması halinde ise akım için THD %1,96’ya çıkmaktadır. Gerilim THD’lerinin ise sıcaklık ile neredeyse değişmediği gözlenmektedir.

Çizelge 5. Sıcaklık –THD İlişkisi

Sıcaklık (°)	Akım için THD %	Gerilim için THD%
-5	1,81	1,29
0	1,83	1,30
5	1,83	1,29
10	1,84	1,29
15	1,81	1,3
20	1,83	1,28
25	1,84	1,3
30	1,92	1,29
35	1,96	1,29
40	1,98	1,29
45	2,07	1,3



Şekil 18. Sıcaklık – Akım için THD İlişkisi



Şekil 19. Sıcaklık – Gerilim için THD İlişkisi

Filtre kullanılmadığında toplam harmonik bozulma faktörü

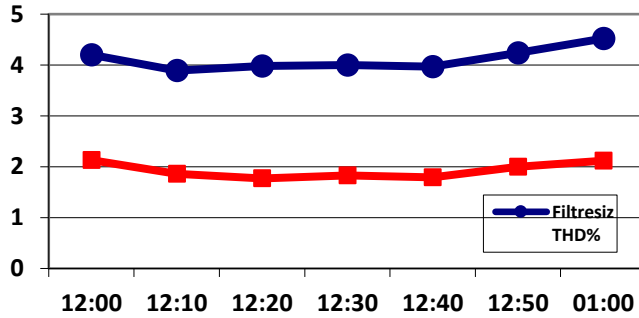
Ele alınan çalışma saatleri olan 12:00 – 13:00 saatleri arasında her 10 dakikada bir ölçülen ışıma ve sıcaklık ortalama değerlerinin (Şekil 3, Şekil 4) benzetim modelinde kullanılmasıyla, filtre kullanılması ve kullanılmaması durumlarında transformatör çıkışında akımın toplam harmonik bozulma faktörü incelenmiştir. Benzetim modelinde filtre olarak RC tipi alçak geçiren bir filtre kullanılmıştır. Filtre parametreleri olarak aktif güç 2 kW ve reaktif güç 100 kVAR olarak seçilmiştir. Şekil 20. ve Çizelge 6’de, 12:00 – 13:00 saatleri arasında filtre kullanıldığında ve filtre olmadığında toplam harmonik bozulma faktörünün nasıl değiştiği gösterilmiştir.

Çizelge 6’nın incelemesinden filtre uygulanmadığı zaman akım için THD faktörünün değerleri % 3,97

ve %4,52 arasında değiştiği görülmüştür. Filtre kullandığında akım için THD faktörünün değerleri %1,77 ve % 2,13 arasında değişmiştir.

Çizelge 6. Saat 12:00 – 13:00 Arasında Filtreli ve Filtresiz Durumda Akım İçin Toplam Harmonik Bozulma Faktörü

ZAMAN	FİLTRESİZ THD%	FİLTRELİ THD%	DEĞİŞİM %
12:00 – 12:10	4,20	2,13	2,07
12:10 – 12:20	3,89	1,86	2,03
12:20 – 12:30	3,98	1,77	2,21
12:30 – 12:40	4,00	1,83	2,17
12:40 – 12:50	3,97	1,79	2,18
12:50 – 1:00	4,24	2,00	2,24
13:00 – 13:10	4,52	2,12	2,30



Şekil 20. Filtresiz ve Filtreli Sistemde Akım İçin Toplam Harmonik Bozulma Faktörünün Değişimi

Filtre kullanılmadığı zaman toplam harmonik bozulma faktörü kabul edilen %5 sınırına yaklaşmıştır. Buna karşılık filtre kullanıldığında toplam harmonik bozulma faktörü bu sınırdan uzak kalmıştır.

Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada ilk olarak 1MW'lık fotovoltaik güneş enerji santrali MATLAB/Simulink'de modellenmiş ve benzetimi yapılarak harmonik etkiler elde edilmiştir. Yapılan benzetimden elde edilen sonuçlar, Diyarbakır'da bulunan 1MWp gücüne sahip olan gerçek bir güneş santralinden

alınan harmonik verileriyle karşılaştırıldığında hata oranının akım THD için ortalama %4,2; gerilim THD için ise ortalama %5,3 olduğu görülmüştür. Kabul edilebilir bir hata oranı ile doğruluğu ispatlanan model yardımıyla harmoniklere etki eden parametreler araştırılmıştır.

İlk incelemede Güneş santralinin güç kalitesine ışına etkisi ele alınmıştır. Işıma arttığı zaman sistemin ürettiği güç de artar ve çıkış gücü santralin nominal gücüne yaklaşır. Işıma değeri ideal ışına değerine yaklaşıncaya güç kalitesi de iyileşmekte ve harmonik etkisi daha az olmaktadır. Gerilim için toplam harmonik dağılımı ışına değişimi ile birlikte çok değişmemekle birlikte akım için toplam harmonik dağılımı değişmektedir. Işıma değeri arttıkça santralin gücü anma gücüne yaklaşmakta ve akım için toplam harmonik bozulma faktörü de azalmaktadır. Bu incelemenin sonucunda THD- Işıma değişimi elde edilmiştir. Işıma 200 W/m² olduğunda akım için en büyük harmoniklerin 5. ve 7. Harmonikler olduğu görülmektedir. Ayrıca ışına 1000 W/m² olduğunda en büyük harmoniklerin 5. ve 13. harmonikler olduğu görülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde en büyük THD'nin akım için %6,16; gerilim için ise %1,3 olduğu görülmektedir. Işıma değeri 1000 W/m²'ye ulaştığında akım için THD %1,82'ye düşmektedir. Elde edilen verilere bakıldığında akım için toplam harmonik bozulma faktörü ışına miktarı ve ile ters orantılıdır. Işıma miktarı arttığında akım için toplam harmonik bozulma faktörü azalır ve akımın dalga şekli sinüzoidal şekline yaklaşır.

İkinci incelemede Güneş santralinde görülen harmoniklere sıcaklık etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, en büyük THD'nin akım için %2,07, gerilim için ise %1,3 olduğu görülmektedir. Sıcaklık değeri 25 °C ulaştığında Akım THD %1,84 'ye ulaşmıştır. Sıcaklığın 35 °C olması halinde ise akım için THD %1,96'ya çıkmaktadır. Gerilim THD'lerinin ise sıcaklık ile neredeyse değişmediği gözlenmektedir. Toplam harmonik bozulma faktörü THD yaklaşık 25 °C'ye

kadar %1,83 değeri ile sabit kalmıştır. Ayrıca Sıcaklık 25 °C'den daha büyük değerlere yükseldikçe toplam harmonik bozulma faktörünün değerleri hafif bir şekilde artmaya başlamıştır. 45°C sıcaklıkta THD faktörü %2,07'ye kadar ulaşmıştır. Yapılan incelemede yüksek sıcaklıkta üretilen güç miktarı azalmış ve sistemin performansının da azaldığı görülmüştür. Normal sıcaklık değerlerinde harmonikler sıcaklıktan etkilenmemiştir. Ancak, belli sıcaklık değerinden sonra sıcaklık etkisi akım dalgasında görülmeye başlamıştır. Bu incelemenin Sonucu olarak; benzetimi yapılan bu sistemde Fotovoltaik güç kaynaklarının bağlanmasının harmonikler açısından, standart dışı bir bozucu etkisinin olmadığı söylenebilir.

Son olarak harmonikleri azaltmak amacıyla kullanılan filtrelerin önemini ortaya çıkarmak için dördüncü bir inceleme yapılmıştır. İncelemenin sonucunda filtre kullanmadığımız zaman akım için toplam harmonik bozulma faktörü %4,52'ye kadar artmıştır ve kabul edilen %5 sınırına çok yaklaşmıştır. Ancak filtre kullanıldığında akım için toplam harmonik bozulma faktörü değeri %2 civarındadır ve kabul edilen sınırdan uzak kalmıştır.

Tüm bu incelemeler sonucunda, güneş enerjisi santrallerinde eviricilerin kullanılması ve fotovoltaik panellerin karakteristikleri nedeniyle özellikle akım için toplam harmonik dağılımının ışıma ve sıcaklık değerlerine göre değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Düşük ışıma değerlerinde akım için toplam harmonik değerlerin arttığı ve izin verilen %5'lik sınır değerlere yaklaştığı görülmektedir. Yüksek sıcaklık değerlerinin de akım için toplam harmonik değerlerinin artmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan filtrelerin harmonikleri azaltmada etkin olduğu ve sınır değerlerden uzak kalmak için gerekli olduğu da ortaya çıkmıştır.

Kaynaklar

- Akdeniz, E. (2006). Yenilenebilir Kaynaklardan Enerji Üretiminin Şebekenin Enerji Kalitesi ve Kararlılığına Etkilerinin İncelenmesi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Arrillaga, J., Smith, B.C., Watson, N.R. ve Wood, A.R., (1997). Power System Harmonic Analysis, John Wiley & Sons, New Delhi.
- Çelebi, A. ve Çolak, M. (2005). Şebekeye Bağlı Fotovoltaik sistemlerde oluşan harmoniklerin şebekeye etkileri. 3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 19-21 Ekim 2005, Mersin, Türkiye.
- Diñer, F. (2011). Türkiye'de Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi Potansiyeli-Ekonomik Analizi ve AB Ülkeleri ile Karşılaştırmalı Değerlendirme. *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 14(1).
- Du, Y., & Lu, D. D. C. (2018). Harmonic Distortion Caused by Single-Phase Grid-Connected PV Inverter. In *Power System Harmonics-Analysis, Effects and Mitigation Solutions for Power Quality Improvement*. IntechOpen.
- Du, Y., Lu, D. D. C., James, G., & Cornforth, D. J. (2013). Modeling and analysis of current harmonic distortion from grid connected PV inverters under different operating conditions. *Solar Energy*, 94, 182-194.
- Efe, S . (2016). Power Flow Analysis of a Distribution System Under Fault Conditions. *International Journal of Energy and Smart Grid* , 1 (1) , 22-27 . DOI: 10.23884/IJESG.2016.1.1.03
- Haydaroğlu, C. ve Gümüş, B. (2017). Investigation of the effect of short-term environmental contamination on energy production in photovoltaic panels: Dicle University solar power plant example. *Applied Solar Energy*, 53(1), 31-34.
- Hong, S., & Zuercher-Martinson, M. (2010). Harmonics and Noise in Photovoltaic (PV) Inverter and The Mitigation Strategies. *Solectria Renewables*, White Paper.

https://www.solectria.com/site/assets/files/1482/solectria_harmonics_noise_pv_inverters_white_paper.pdf

- Sefa İ. ve Altın, N. (2009). Güneş Pili İle Beslenen Şebeke Etkileşimli Eviriciler Genel Bir Bakış. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(3).
- Kandemir, Ç., Bayrak, M. (2015), “Fotovoltaik Sistemler Şebekeye Bağlı Olduğunda Oluşan Sorunlar”, VI. Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi Bildirileri (EVK).
- Kocatepe, C., Uzunoglu, M., Yumurtacı, R. ve Arıkan, O., (2003), Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Moazzenzadeh, M., & Şekerci, H. Güneş Enerji Sistemlerinin Elektrik Şebekesi Güç Kalitesine Harmonik Ve Ara-Harmonik Açısından Etkisinin İncelenmesi. 5.Ulusal Elektrik Tesisat Kongresi, Ekim 2017, İzmir, Türkiye.
- Rao, P. J. B., & Srikanth, B. (2016). Harmonic Reduction in Grid Connected Solar PV System By Using SVPWM Technique. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(6), 3853-3858.
- Rashid, H. M., (1995), Power Electronics, Circuits, Devices, and Application, Prentice-Hall International, Inc.
- Schlabbach, J., & Gross, A. (2007, May). Harmonic current emission of photovoltaic inverters. 19th Int. Conf. on Electricity Distribution (CIRED 2007), Vienna, Austria.
- Simsek, B., & Bizkevelci E. (2013). Fotovoltaik Güneş Elektrik Santrallerinin Alçak Gerilim Şebekesine Bağlantı Esasları. 3. Ulusal Elektrik Tesisat Kongresi, İzmir. (pp. 1-24).
- TEİAŞ (2019), Elektrik İstatistikleri, Aylık Elektrik İstatistikleri, <https://www.teias.gov.tr/tr/elektrik-istatistikleri>
- Yeşil Ekonomi (2019). Kayseri OSB GES 50 MW güce ulaştı. Haberler. <https://yesilekonomi.com/kayseri-osb-ges-55-mw-kurulu-guce-ulasti/>
- Yıldırım, B . (2017). Investigation with Modal Analysis of Effects Of High PV Penetration on Power System Voltage Stability.

Harmonics effects of grid connected solar power plant

Extended Abstract

Our standards of living depend on energy, and the increasing demand for clean and cheap one made the renewable energy preferred. Studies and policies developed in energy production have accelerated the use of renewable energy sources, in order to reduce climate change, the issue of safety, energy quality and the connected way in which electricity power generated from renewable energy sources takes great importance. There are many kinds of renewable energy. However, the most important one is the solar energy that can be divided into two sections: the first one is the solar thermal that is used for generally heating, and the second one is the photovoltaic that is used for electrical generation. For electrical generation, we can use a system that consists of photovoltaic panels, power converters such as inverters, etc. In this system we can connect the photovoltaic panels to the grid by inverters that cause harmful harmonics and thus reducing the quality of electrical generation. "Harmonics Effects of Grid Connected Solar Power Plant" takes more and more importance.

The use of solar power plant has spread, because of its cost has been reduced, when connecting solar power plants with the grid, the most important problems that we can face are the harmonics caused by the system. Inverter is the main reason for generating harmonics, which has negatively affected on energy quality. In this paper we have studied the effects of harmonics when connecting a solar power plant with the grid.

To achieve this study, a solar power center has been simulated by MATLAB / Simulink environment. Harmonic effect was obtained. The results that obtained has been compared with real data taken from the solar power center its capacity 1 MW. Simulation results has been proved its validity through an acceptable error rate,

Accordingly the factors affecting the harmonics were studied. The effect of both radiation and temperature on harmonics have been studied. First, study has done when the temperature was constant, we have studied the effect of radiation change on harmonics. Second, study has done when the radiation was constant, we have studied the effect of temperature change on harmonics. After that effect of the filters on harmonics are determined. Finally, suggestions were made to reduce the impact of harmonics.

Keywords: *Photovoltaics, Harmonics, Solar Radiation, Inverter, Renewable Energy, Power Quality, Total Harmonic Distortion.*