



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi :24.07.2019
Kabul Tarihi :02.03.2020

Received Date : 24.07.2019
Accepted Date : 02.03.2020

ANAHTARLAMA FREKANSI İLE THD₁ ARASINDAKİ ANALİTİK İFADENİN SOLAR SİSTEMDE SPSS İSTATİSTİK PROGRAMI YÖNTEMİ İLE BULUNMASI

OBTAINING THE ANALYTICAL EXPRESSION BETWEEN THD₁ AND SWITCHING FREQUENCY IN SOLAR SYSTEM BY SPSS STATISTICS PROGRAM METHOD

Süleyman ADAK¹(ORCID: 0000-0003-1436-2830)

Hasan CANGİ^{2}(ORCID: 0000-0001-6954-7299)*

¹ Mardin Artuklu Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, Mardin, Türkiye

² HasCan Mühendislik, Mardin, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hasan CANGİ, cangihasan@gmail.com

ÖZET

Bu çalışma, şebekeden bağımsız fotovoltaik (PV) güç sisteminde anahtarlama frekansına bağlı olarak, inverter çıkış akımı toplam harmonik bozunumunun (THD₁) ölçülmesi, modellenmesi, analizi ve simülasyonu ile ilgilidir. Önerilen güneş enerjisi sistemi, DC-DC dönüştürücü, DC-AC solar inverter üç fazlı kontrolsüz doğrultucu ile R-L endüktif yükten oluşmaktadır. Bu makalede, anahtarlama frekansı ile THD₁ arasındaki ilişki SPSS istatistik programı yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Darbe genlik modülasyonu (PWM) anahtarlama frekansının değeri arttıkça THD₁ değerinin azaldığı gözlenmektedir. Bu topolojinin tasarımı, modellenmesi ve simülasyonu, 500 ila 50 KHz anahtarlama frekansı için Matlab/Simulink programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Anahtarlama frekansı ile THD₁ arasındaki analitik ifade SPSS istatistik yazılım programı kullanılarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: doğrusal olmayan yük, harmonik bileşen, toplam harmonik bozunumu, şebekeden bağımsız fotovoltaik sistem, anahtarlama frekansı

ABSTRACT

This paper deals with the design, modeling, analysis and simulation of inverter output current total harmonics distortion (THD₁) depending on switching frequency in off-grid photovoltaic (PV) power system. The proposed solar system is a combination of a boost DC/DC converter, DC/AC solar inverter three-phase uncontrolled rectifier and R-L inductive load. The relationship between switching frequency and THD₁ is examined with SPSS statistical program on this article. It is observed that THD₁ value decreases as value of switching frequency increases. The design, modeling and simulation of this topology are performed using Matlab/Simulink program for range of 500 to 50 KHz switching frequency. The analytical expression between the switching frequency and THD₁ was obtained using the SPSS statistical software program.

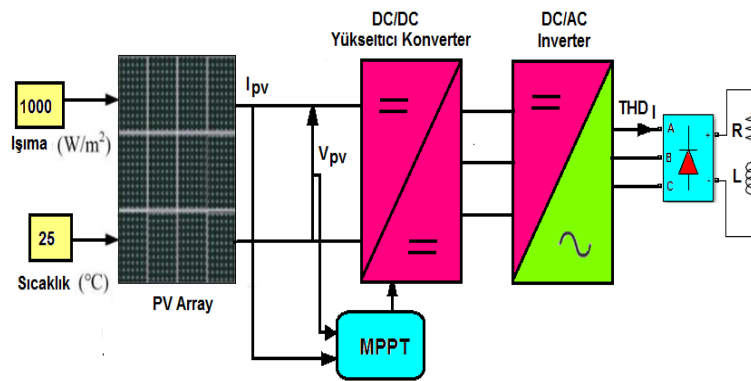
Keywords: non-linear Load, harmonic component, total harmonic distortion, off-grid photovoltaic system, switching frequency

GİRİŞ

Fosil yakıtlar hidrokarbon ile yüksek oranlarda karbon içeren kömür, petrol ve doğalgaz gibi enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklar yenilenemez enerji kaynakları olup bunların kullanılması sonucunda hava, su ve çevre kirliliği gibi birçok

problem ortaya çıkar. Yenilenebilir enerji kaynakları; fotovoltaik (PV) enerjisi, hidrolik enerjisi rüzgar enerjisi vb. enerji kaynaklarıdır. Bu kaynakların en önemlisi güneş enerjisidir. Dünyaya gelen güneş ışınlarının solar paneller yardımı ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Yenilenebilir bir enerji kaynağı olan güneş enerjisinin çevre üzerinde negatif bir etkisi yoktur [1], [2].

Panelde kirlenme, ışınların değişik açılarla gelmesi, panel üzerinde gölgelerin oluşması, ortam sıcaklığının aşırı soğuk veya sıcak olması PV panel verimini etkiler. Sanılanın aksine çok sıcak havalarda panel verimi düşüktür. Ortam sıcaklığının çok sıcak olduğu durumda panelin ürettiği akım değerinde bir artış oluşurken gerilimdeki azalış akıma nazaran daha fazladır. Sonuçta çok sıcak havalarda panelin ürettiği güç değerinde azalmalar oluşur. Şekil 1’de şebekeden bağımsız (Off-grid) PV sistem tarafından beslenen lineer olmayan yükün giriş akımı ait toplam harmonik bozunumu (THD_i) ölçümüne ilişkin prensip şeması verilmiştir [3]-[4].



Şekil 1. Şebekeden bağımsız PV güç sistemi ait prensip şeması.

PV inverterler, panellerde üretilen doğru akımı alternatif akıma çeviren güç elektroniği tabanlı dönüştürücülerdir. Bu inverterlerden çıkış harmonik bileşenlerin standartlarca ifade edilen limit değerlerin altında ile istenilen genlik ve frekansta alternatif güç sağlamaları istenir. PV inverterlerin güç sisteminde gürültüsüz çalışmaları ile birlikte yüksek verimlilikte olmalarına dikkat edilmelidir. Toplam harmonik bozunumunun (THD) standartlarca belirlenen limitleri aşmaması gerekir. Düşük ve orta güçlü uygulamalarda PV inverter çıkış dalga formlarının kare dalgaya yakın olması kabul edilirken, büyük güçlerde düşük THD'li harmoniklerden arınmış sinüzoidal dalga formunda olması istenir.

Şebekeden bağımsız (Off-grid) solar sistemlerde yeterli sayıda fotovoltaik panel enerji kaynağı olarak kullanılır. Gece süresince veya bulutlu havalarda ihtiyaç duyulan enerji güneşli havada şarj edilen akümülatörler üzerinden sağlanır. Maksimum Güç Noktası Takipçisi (MPPT) akülerin aşırı şarj ve deşarj durumlarında zarar görmesini engeller. PV güç sisteminin maksimum güçte çalışmasını sağlar.

ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ (OFF-GRID) GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİ

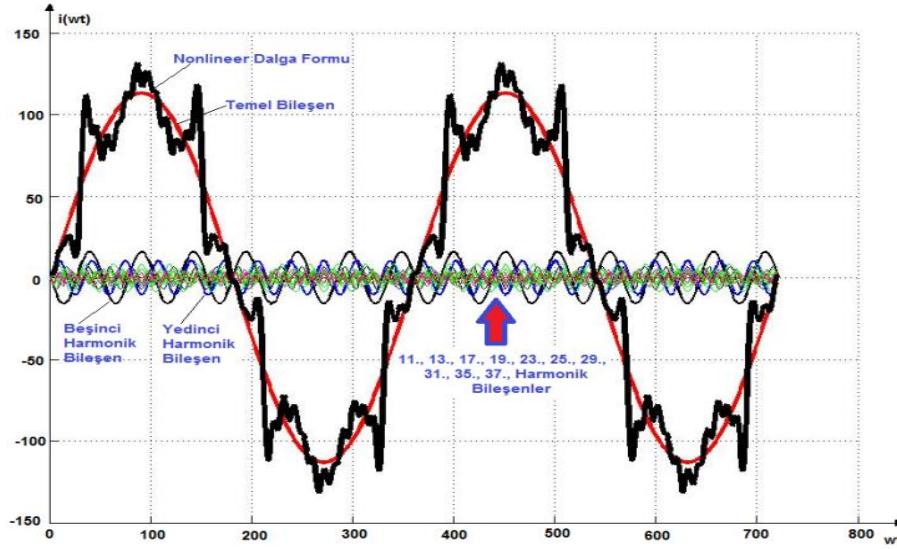
Günümüzde gittikçe artan miktardaki doğrusal olmayan yüklerin PV güç sistemine bağlanması ile non-sinüzoidal büyüklüklerin ortaya çıkmakta ve bu büyüklükler harmonik bileşenleri doğurmaktadır. Non-lineer dalga formunda temel dalga bileşeni dışındaki sinüzoidal dalgalara harmonik denir. Harmonikler, bir elektrik sisteminde temel frekansın tam katlarında ortaya çıkarlar.

PV sistemlerde kullanılan güç elektroniği tabanlı doğru akım kısıyıcılar, inverterler birer harmonik kaynağıdır. Bunların çalışma karakteristiğinden dolayı sinüzoidal dalga formunda sapmalar oluşur. Sinüs formunda oluşan sapmalar harmonik bileşenlerin ortaya çıkmasına neden olur [5]-[7]. Gittikçe artan miktardaki doğrusal olmayan karakteristikle elemanların solar enerji sistemine bağlanması ile sinüzoidal olmayan büyüklükler ortaya çıkmakta ve bu büyüklükler harmonik bileşenleri doğurmaktadır. Temel bileşen dışındaki sinüzoidal dalgalara harmonik bileşen denir. Harmonik bileşen içeren üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu akım dalga formu aşağıda verildiği gibidir.

$$i(wt) = 113 \sin(wt - 1.51) + 22.9 \sin(5wt + 171.9) + 15.89 \sin(7wt + 170.6) + 10.43 \sin(11wt - 16.19) +$$

$$8.43 \sin(19wt + 152.2) + 5.033 \sin(23wt - 34.05) + 4.16 \sin(25wt + 4.153) + 3.964 \sin(29wt + 139.8) + 3.279 \sin(31wt + 137.1) + 3.285 \sin(35wt - 49.36) \quad (1)$$

Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuda üç ve üç' ün katı harmonik bileşenler bulunmamaktadır. Denklem (1)' e ilişkin non-linear dalga formu ile harmonik bileşenleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kontrolsüz doğrultucu giriş akımı ile harmonik bileşenleri.

PV güç sistemlerde bulunan dönüştürücülerde (DC/DC, DC/AC) kullanılan MOSFET, IGBT ve BJT gibi anahtarlama elemanları non-linear karakteristiğe sahiptirler. Bundan dolayı PV güç sistemlerinde kullanılan dönüştürücüler birer harmonik kaynağıdır [8], [9]. Bu dönüştürücüler şebekeden bağımsız PV güç sistemlerinde harmonik bileşenlerin oluşmasına neden olmakta ve şebekeden bağımsız PV sistemlerde üretilen enerjinin kalitesini düşürmektedirler. PV güç sisteminde harmonikler aşağıdaki hasarlara neden olurlar:

- Solar enerjisi kablolarında, dönüştürücülerde, akülerde aşırı ısınma.
- Maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritmasının yanlış çalışması.
- DC/DC dönüştürücü ve solar inverterlerde enerji kayıpları.
- Güç elektroniği cihazlarında (MOSFET, IGBT)'lerde yanlış tetiklemeler.
- Gerilim, akım ve güç ölçmelerinde hatalı ölçmeler.
- PV güç sisteminde gerilim düşümleri.
- PV güç sisteminin güç faktöründe düşüşler oluşmaktadır.

PV güç sisteminde non-linear yüklerdeki artış dikkate alındığında, harmonik bileşenlerin gelecekte PV güç sistemlerini negatif bir şekilde etkileyeceklerdir. Kaliteli bir enerji için standartlarca akım ve gerilim için verilen THD' ye ilişkin limit değerler aşılmamalıdır. Daha iyi bir işletme için PV güç sistemlerinde harmonikler konusunda bize bir ölçüt veren THD' nin azaltılması gerekmektedir. Bu büyüklükler harmonikli dalga sinüsten uzaklaşmasının bir göstergesidir. Toplam harmonik bozunumunu efektif akım cinsinden karşılığı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\%THD_I = \sqrt{\left(\frac{I_{eff}}{I_{1eff}}\right)^2} - 1 \quad (2)$$

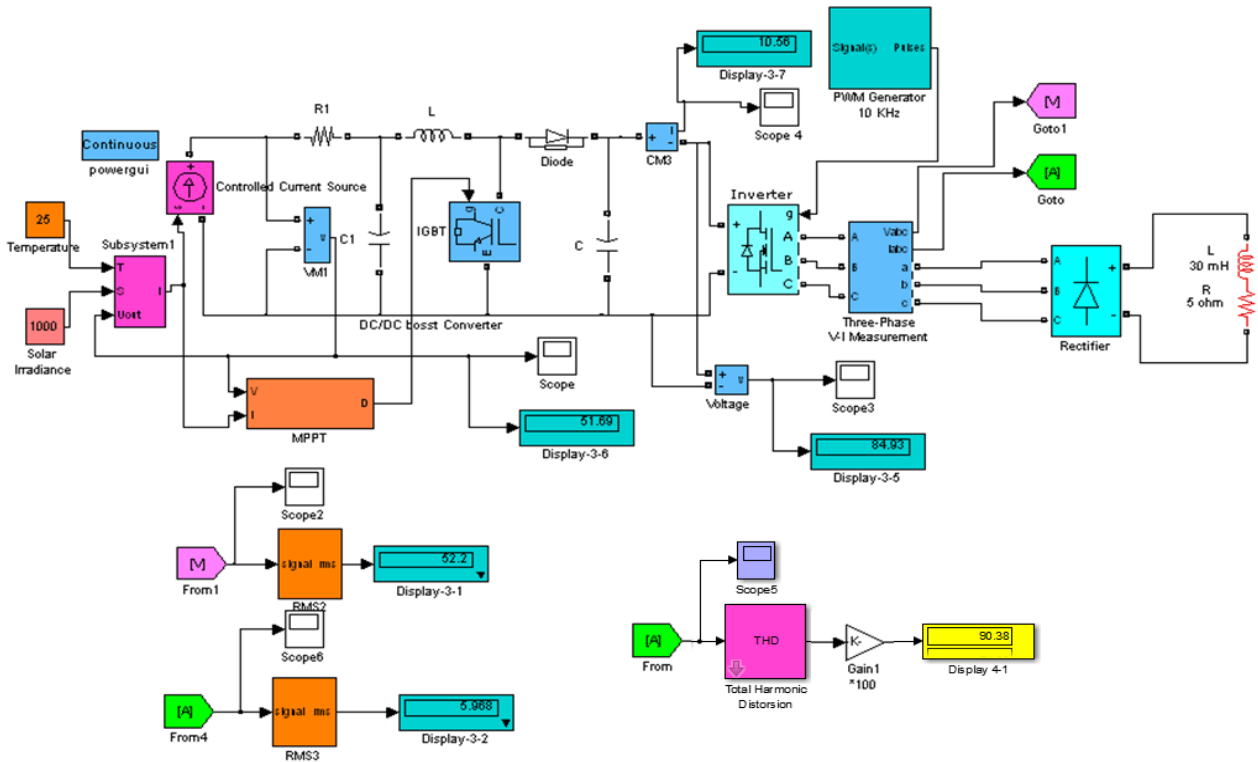
Harmoniklerin solar güç sistemlerinde teknik ve ekonomik olumsuzluklarının giderilmesi için aktif veya pasif filtrelerin kullanılması gerekir. THD_I parametresi PV güç sisteminde akım dalgalarının sinusoidal formdan ne kadar uzaklaştıkları hakkında bize bilgi verir. Diğer bir deyişle bozulmanın derecesini belirtir. Enerji kalitesi ile ilgili bir parametredir. Değeri ne kadar küçük olursa PV güç sisteminde o oranda kaliteli bir enerji üretilmiş demektir. PV güç

sisteminde akım ve gerilimin dalga formu tam sinüs formunda ise bu temel büyüklüklere ilişkin THD değeri sıfır olur [10]-[12].

Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisine olan yöneliş sürekli artmaktadır. Daha güvenilir bir işletme ve kaliteli bir enerji için, PV güç sistemlerinde yılda birkaç kez THD_i ölçümü yapılmalıdır. Enerji tesislerinin yıllık harmonik yük eğrileri çıkarılmalı ve bu tesislerde pasif veya aktif filtreler kullanılarak harmonik bileşenlerin düşük seviyede tutulmaları sağlanmalıdır. Akım veya gerilim dalgalarında harmonikli bileşenlerin bulunması sinüs şeklindeki dalga formlarının bozulmasına neden olur. Bozulan dalgalar sinüzoidal olmayan dalgalar olarak adlandırılır. Sinüzoidal gerilim dalga şeklinin bozulmasının en önemli nedeni, lineer olmayan yükler ile sinüzoidal olmayan kaynaklardır. Doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonik bileşenler devrelerindeki şebekedeki devre elemanları üzerinden tamamlayarak non-linear gerilimlerin oluşmasına neden olurlar [13]-[15].

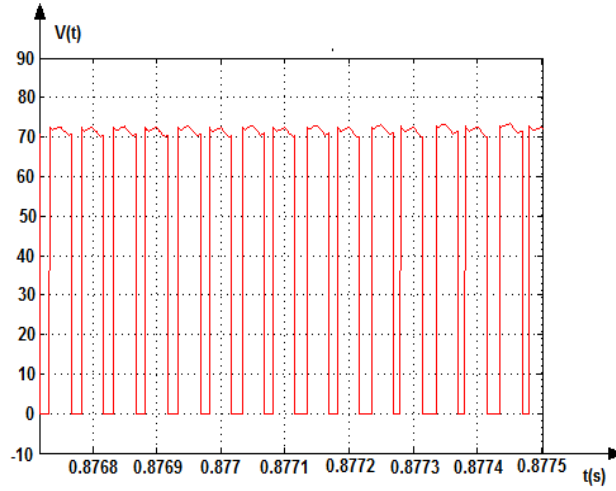
ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ (OFF-GRID) NON-LINEER YÜKLÜ PV SİSTEMLER

Bu çalışmada non-linear yüklü üç fazlı bir inverterin çıkış akımı toplam harmonik distorsiyonun anahtarlama frekansına bağlı analitik ifadesi SPSS istatistik programı yardımı ile bulunmuştur. Off-grid PV güç sistemi, DC/DC yükseltici dönüştürücü, solar inverter, üç fazlı kontrolsüz doğrultucu ve R-L endüktif yükü modelleri ve denetimlerine ait simülasyonlar MATLAB/Simulink programı içinde alan Power System Toolbox programı kullanılarak tasarlanmıştır. Simulink modelde R=5 ohm, L=30 mH olarak seçilmiştir. Şekil 3'te güç sisteminin Simulink eşdeğeri verilmiştir.



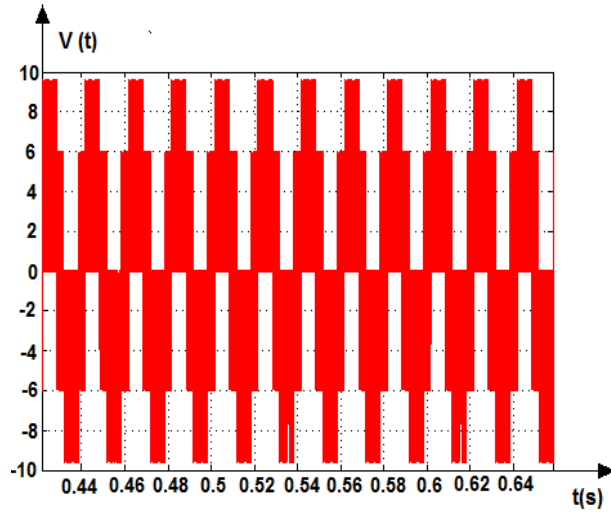
Şekil 3. Şebekeden bağımsız PV güç sisteminin prensip şeması

Solar inverterde anahtarlama elemanı olarak MOSFET kullanılmıştır. MOSFET'ler sürme devreleri IGBT' lere göre daha kolaydır. Bu transistörler yüksek anahtarlama hızıyla solar inverterin performans ve verimini arttırmaktadır. MOSFET'ler yüksek frekanslarda çalışabilirler. Sistemde darbe genlik modülasyonu (PWM) kontrol tekniğinin uygulanmasına olanak sağlar. Kontrolsüz doğrultucu çıkış gerilimi dalga formu Şekil 4'te verildiği gibidir.



Şekil 4. Kontrolsüz doğrultucu çıkış gerilimi dalga formu

PV güç sisteminde çok seviyeli inverterler klasik iki seviyeli inverterlere göre verim ve güç katsayısı göre daha iyi bir performans ve verime sahiptirler. Yüksek güçlü ve yüksek gerilimli solar uygulamalar için de elverişlidirler. Lineer olmayan yükler düşük güçlü olsalar bile solar tesislerde sinüzoidal akım ve gerilim dalga şeklini bozarlar. PV güç sisteminde bulunan DC/DC yükseltici konverter ile DC/AC solar inverterler birer harmonik kaynağıdır. Bu lineer olmayan konverterler güç sisteminde ek kayıplara ve THD₁ değerlerinin yükselmesine neden olurlar.



Şekil 5. Solar inverter çıkış akımı dalga formu

PV güç sistemi harmonik bileşenlerin zararlı etkilerinden korunmalıdır. THD düşük değerlerinin birçok faydaları bulunmaktadır. Bu faydalar; sessiz çalışma, daha az güç kaybı ve daha uzun kullanım ömrü gibi yararları vardır.

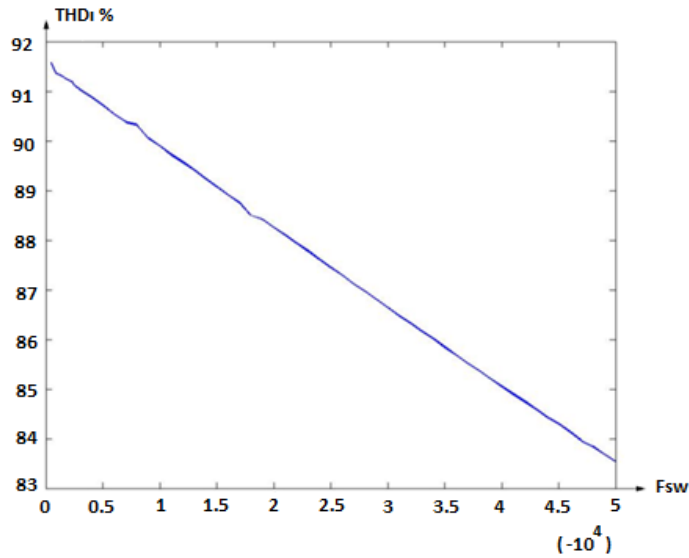
ANAHTARLAMA FREKANSI İLE THD₁ ARASINDAKİ ANALİTİK İFADENİN SPSS YÖNTEMİYLE BULUNMASI

Bu çalışmada, off-grid PV sisteminde PWM'nin anahtarlama frekansı ile kontrolsüz doğrultucu giriş akımı THD₁ arasındaki analitik ifade SPSS istatistik program ile bulunmuştur. PWM'nin anahtarlama frekansı ile THD₁ arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. PWM'nin taşıyıcı frekans değeri arttığında, THD₁ değeri azalmaktadır. PV güç sisteminin eşdeğeri Matlab/Simulink'te oluşturulmuştur. İnverter anahtarlama elemanı olarak kullanılan MOSFET'in tetiklemesini sağlayan PWM'nin anahtarlama frekansı değerleri değiştirilerek buna karşılık gelen THD₁ değerleri Tablo 1'de gösterildiği gibidir.

Tablo 1. Anahtarlama frekansı ile THD_I değerleri

Anahtarlama frekansı (F _{sw})	Yük akımı THD _I	Anahtarlama frekansı (F _{sw})	Yük akımı THD _I
500	91.57	23000	87.78
700	91.47	24000	87.61
900	91.36	25000	87.45
1100	91.35	26000	87.29
1300	91.32	28000	87.12
1700	91.25	29000	86.97
2300	91.20	30000	86.80
2500	91.12	31000	86.64
3000	91.03	32000	86.48
4000	90.88	33000	86.32
6000	90.54	34000	86.16
7000	90.38	35000	86.01
8000	90.32	36000	85.84
9000	90.05	37000	85.52
10000	89.89	38000	85.37
11000	89.72	39000	85.21
12000	89.57	40000	85.08
13000	89.41	41000	85.05
14000	89.23	42000	84.90
15000	89.07	43000	84.75
16000	88.91	44000	84.59
17000	88.75	45000	84.43
18000	88.50	46000	84.29
19000	88.42	47000	84.14
20000	88.25	48000	83.96
21000	88.10	49000	83.84
22000	87.94	50000	83.68

Anahtarlama frekansı ile THD_I arasındaki değişim Şekil 6'de verildiği gibidir.

**Şekil 6.** Anahtarlama frekansı ile THD_I arasındaki değişim

Şekil 6'daki eğrinin analitik denklemini bulmak için SPSS istatistik programı kullanılmıştır. THD_I =y ve F_{sw} =x rotasyonu kullanılacak olursa. Şekil 6'daki grafiğin aşağıdaki denkleme göre değiştiğini düşünülürse,

$$y = A * x^B \quad (3)$$

Bu verileri sağlayan polinomların katsayılarını SPSS istatistik program kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmanın ana konusu, PWM' nin anahtarlama frekansı ile THD₁ arasındaki analitik ifadeyi bulmaktır. SPSS istatistik programı yöntemi ile A ve B sabitleri Tablo 1'deki değerler kullanılarak bulunur. A=107,113 ve B=-0.021 olarak bulunmuştur. Anahtarlama frekansına bağlı THD₁ değişimi aşağıdaki formülle elde edilir.

$$THD_1 = 107,113 * F_{sw}^{-0,021} \quad (4)$$

Solar sistemlerinde harmonik bileşenlerin oluşmasının başlıca nedeni, bu tesislerde kullanılan non-lineer karakteristikli kaynak veya nonlineer yüklerdir. Bu elemanların gerilimi ile akımı arasındaki analitik bağıntının lineer olmaması elektrik tesislerinde harmonik bileşenler oluşmasına sebep olmaktadır. Harmonikler PV güç tesislerindeki kirliliktir. Harmonik bileşenlerin değeri mutlak surette standartlarca belirlenen değerlerin altına çekilmesi gerekmektedir. PV sistemlerde kullanılan inverterlerin çok seviyeli seçilmesi harmonik bileşenlerin elimine edilmesini sağlar. Çok seviyeli inverterlerin iki seviyeli inverterlere olan üstünlükleri:

- Aynı anahtarlama frekansında çok seviyeli inverterlerin THD, klasik iki seviyeli invertere göre çok daha düşüktür.
- Çok seviyeli inverterler yüksek güçlerde transformatörsüz olarak kullanılabilirler.
- Çok seviyeli inverterlerde gerilimin değişim hızı (dv/dt) iki seviyeli invertere göre çok daha düşüktür.

PV güç sistemlerinde bulunan non-lineer devre elemanları harmonik kirlilik oluşturmaktadır. Bu kirlilik enerjinin kalitesinde düşmelere sebep olur. PV güç sistemlerinin kararlı çalışmasını sağlamak için, tasarım ve tesis aşamasında doğrusal olmayan elemanların oluşturduğu harmonik bileşenlerin analizi gerçekleştirilip, harmonik bileşenleri süzecek filtre devreler tasarlanmalıdır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

PV güç sistemlerinde tesisin yapısına uygun bir harmonik giderme yöntemi mutlaka kullanılmalıdır. Harmoniklerin zararları konusunda tüketiciler bilinçlendirilerek, THD₁ oranının düşürülmesi gerekmektedir. Daha kaliteli daha güvenli ve daha ekonomik bir enerjinin elde edilmesi için THD₁ standartlarca ifade edilen değerlerin altına çekilmelidir. Solar invertere ait PWM anahtarlama frekansları 500 Hz' den 50 KHz' e kadar değiştirilerek bu değerlere ait THD₁ değerleri ölçülmüştür. Tablo 1'de ifade edilen bu değerlerden yararlanarak SPSS istatistik program ile (4) denklemi bulunmuştur. Bu denklem anahtarlama frekansı ile THD₁ arasındaki analitik ifadedir. Yüksek anahtarlama frekanslarında kontrolsüz doğrultucu THD₁ değerleri düşmektedir. Yalnız bu düşme değeri yeterli değildir. Kontrolsüz doğrultucu giriş akımı harmonik bileşenlerini süzecek aktif veya pasif filtreler mutlak surette tesis edilmeleri gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Adak, S., & Cangı, H. (2016). Bitlis Eren Univ J Sci & Technol. *Analysis and Simulation Total Harmonic Distortion of Output Voltage Three Level Diode Clamped Inverter in Photovoltaic System*, 5(2), 242-253.

Arifoğlu, U. (2016). *Matlab 9.1-Simulink ve Mühendislik Uygulamaları*, Alfa Yayıncılık, İstanbul.

Badawy, M.O., Yilmaz, A.S., Sozer, Y., & Husein, I. (2014). IEEE T Ind Appl. *Parallel power processing topology for solar PV applications*, 50, 1245-1255.

- Bandaraa, K., Sweetb, T., & Ekanayake, J. (2012). Science Direct. *Photovoltaic applications for off-grid electrification using novel multi-level inverter technology with energy storage*, 37(1), 82-88.
- Cangi, H. (2019). Natural and Applied Sciences, University of Kahramanmaraş Sutcu Imam. *Analysis and Elimination of Harmonics at Low Irradiation Level in PV Systems*, Ph.D. Thesis.
- İzgi, E., Öztopal, A., Durna, B., Kaymak, M.K., & Şahin, A.D. (2012). Solar Energy. *Short–mid-term solar power prediction by using artificial*, 86, 725-733.
- Jiang, Y.J.A., Qahouq, A., & Batarseh, I. (2010). Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst. *Improved solar PV cell MATLAB simulation model and comparison*, pp. 2770–2773.
- Kashif, I., & Zainal, S. (2011). Sol Energy. *An improved modelling method to determine the model parameters of photovoltaic (PV) modules using differential evolution (DE)*, 85, 2349-2359.
- Kılıc, B. (2011). International Journal Of Renewable Energy Research. *Evaluating of Renewable Energy Potential in Turkey*, 1(4), pp.259-264.
- Kocatepe, C., Uzunoglu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., & Arıkan, O. (2003). *Harmonics in Electrical Plants*. Birsen Publication, İstanbul.
- Krismadinataa, N., Pinga, R.H.W., & Selvaraja. J. (2013). Pro-cedia Environmental Sciences. *Photovoltaic module modelling using Simulink/MATLAB*, 17, 537- 546.
- Kulaksi, A.A. (2013). Turk J ElecEng & Comp. *ANFIS-based estimation of PV module equivalent parameters: application to a stand-alone PV system with MPPT controller*, 21, 2127-2140.
- Malla, S.G., & Bhende, C.N. (2014). EEPS: International Journal of Emerging Electric Power Systems. *Study of Stand-Alone Microgrid under Condition of Faults on Distribution Line*, 15(5), pp. 501-512.
- Ozdemir, A., & Ferikoglu, A. (2004). IEE Proceedings-Science Measurement And Technology. *Low cost mixed-signal microcontroller based power measurement technique*, - 151(4), 253-258.
- Pandiarajan, N., & Muthu, R. (2011). ICEES International Conference on Electrical Energy Systems. *Mathematical modelling of photovoltaic module with Simulink*, pp. 314-319.
- Sabir, R., Emrullah, O., Nuri, M.A., & Serhat, E.B. (2015). Bitlis Eren Univ J Sci & Technol. *Reducing the effects of harmonics on the electrical power systems with passive filters*, 5 (1), 1-10.
- Sekkeli, M., Acıkgöz, H., Gani, A., & Kececioğlu, O.F. (2015). International Refereed Journal of Engineering and Sciences. *Modeling and Analysis of Three Phase Space Vector Pulse Width Modulation Based Rectifiers Using Fuzzy PI Controller*, 2(3), 75–75.
- Uysal, U. (2004). *Mathematical and engineering applications with Matlab*, Beta Basım A.Ş., İstanbul.
- Villalva, M.G., Gazoli J.R., & Ernesto, R.F. (2009). IEEE T Power Electr. *Comprehensive approach to modelling and simulation of photovoltaic arrays*, 24, 1198-1208.